

中国工程建设标准化协会标准 CECS

CECS X:201X

---

# 铝合金空间网格结构技术规程

Technical Specification for Aluminium alloy Space frame structures

征求意见稿

《铝合金空间网格结构技术规程》编制组

2018年5月



# 前言

根据中国工程建设标准化协会建协字 [2015]014 号《关于印发 2015 年第二批工程建设协会标准制订、修订计划的通知》的要求，规程编制组经过充分调查研究，认真总结实践经验，参考国外先进标准和国内相关规程标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程的主要技术内容是：总则、术语和符号、基本规定、结构计算、杆件与节点的设计与构造、制作安装与防护、验收。本规程适用于铝合金空间网格结构的设计与施工。

本规程由中国工程建设标准化协会负责管理，由天津大学建筑工程学院负责具体技术内容的解释。执行中如有意见或建议，请寄至天津大学建筑工程学院《铝合金空间网格结构技术规程》编制组（地址：天津市南开区卫津路 92 号；邮编：300072）。

本规程主编单位：天津大学

浙江东南网架股份有限公司

本规程参编单位：上海通正铝业工程技术有限公司

华东建筑设计研究院有限公司

丛林集团有限公司

中国建筑科学研究院

同济大学

清华大学

东南大学

中国西南建筑设计研究院

哈尔滨工业大学

中建钢构有限公司

北京市建筑工程研究院有限责任公司

北京工业大学

太原理工大学

华电重工股份有限公司

巨力索具股份有限公司

上海市建设工程监理有限公司

浙江建工集团有限公司

河北建设集团有限公司

天津大学建筑设计研究院

山东博润工业技术股份有限公司

天津飞宇幕墙装饰工程有限公司

开封安利达金属工程有限公司

天津市钢结构学会

本规程主要起草人:

# 目 次

|     |             |    |
|-----|-------------|----|
| 1   | 总 则         | 5  |
| 2   | 术语和符号       | 6  |
| 2.1 | 术语          | 6  |
| 2.2 | 符号          | 7  |
| 3   | 基本规定        | 10 |
| 3.1 | 结构选型        | 10 |
| 3.2 | 基本设计规定      | 11 |
| 3.3 | 材料性能指标      | 12 |
| 3.4 | 挠度容许值       | 14 |
| 4   | 结构计算        | 15 |
| 4.1 | 一般计算原则      | 15 |
| 4.2 | 静力计算        | 15 |
| 4.3 | 稳定性计算       | 16 |
| 4.4 | 抗震计算        | 16 |
| 4.5 | 抗风计算        | 18 |
| 5   | 杆件与节点的设计与构造 | 19 |
| 5.1 | 杆件          | 19 |
| 5.2 | 板式节点        | 21 |
| 5.3 | 螺栓球节点       | 27 |
| 5.4 | 毂式节点        | 32 |
| 5.5 | 铸铝节点        | 35 |
| 5.6 | 支座节点        | 36 |
| 5.7 | 螺栓环节点       | 39 |
| 6   | 制作安装与防护     | 42 |
| 6.1 | 一般规定        | 42 |
| 6.2 | 制作与预拼装      | 42 |
| 6.3 | 包装与运输       | 49 |
| 6.4 | 安装          | 49 |
| 6.5 | 防腐          | 51 |
| 6.6 | 防火、隔热       | 51 |
| 7   | 验收          | 52 |

|                     |    |
|---------------------|----|
| 7.1 一般规定 .....      | 52 |
| 7.2 支承面允许偏差 .....   | 52 |
| 7.3 总拼和安装允许偏差 ..... | 53 |
| 7.4 交验 .....        | 55 |
| 附录 A 常用材料性能指标 ..... | 57 |
| 本规程用词说明 .....       | 61 |
| 附：条文说明 .....        | 63 |

# 1 总 则

**1.0.1** 为了在铝合金空间网格结构的设计与施工中贯彻执行国家的技术经济政策，做到技术先进、安全适用、经济合理、确保质量，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于主要以铝合金杆件组成的空间网格结构的设计、加工、安装及验收。

**1.0.3** 本规程不适用于直接承载反复动力荷载作用并需要疲劳计算的结构。

**1.0.4** 在进行铝合金空间网格结构的设计、加工、安装及验收时，除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 空间网格结构 space frame, space latticed structure

按一定规律布置的杆件、构件通过节点连接而形成的空间结构，包括网架、曲面型网壳以及立体桁架等。

#### 2.1.2 网架 space truss, space gird

按一定规律布置的杆件通过节点连接而形成的平板型或微曲面型空间杆系结构。

#### 2.1.3 网壳 latticed shell, reticulated shell

按一定规律布置的杆件通过节点连接而形成的曲面状空间杆系或梁系结构，主要承受整体薄膜内力。

#### 2.1.4 正交正放网格

由纵向与环向杆件互成直角连接而成的网格单元

#### 2.1.5 联方网格 lamella gird

由二向斜交杆件构成的菱形网格单元

#### 2.1.6 三向网格 three-way gird

由三向杆件构成的类等边三角形网格单元

#### 2.1.7 板式节点 gusset-type joint

由铝合金节点板、杆件和紧固螺栓三部分组成的机械装配式节点

#### 2.1.8 螺栓球节点 bolted spherical joint

由铝合金球、不锈钢螺栓或镀锌高强度螺栓、套筒、紧固螺钉、锥头或封板等零件组成的机械装配式节点

#### 2.1.9 嵌入式毂节点 embeded hub joint

由柱状毂体、杆端嵌入件、上下盖板、中心螺栓、平垫圈、弹簧垫圈等零部件组成的机械装配式节点

#### 2.1.10 铸铝节点 cast aluminum joint

以铸造工艺制造的用于复杂形状或受力条件的空间节点

#### 2.1.11 螺栓环节点 bolted hub joint

由中心环柱体、不锈钢角码、不锈钢螺栓、虎克螺栓（抽芯铆钉）、C形或H形铝合金

连接件等部件组成的机械装配式节点。

## 2.2 符号

### 2.2.1 作用、作用效应与响应

$F$  ——铝合金空间网格结构节点荷载向量；

$F_{Exji}$ 、 $F_{Eyji}$ 、 $F_{Ezji}$  —— $j$ 振型， $i$ 节点分别沿 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 的地震作用标准值；

$G_i$  ——铝合金空间网格结构第 $i$ 点节点的重力荷载代表值；

$\Delta t$  ——温差；

$\sigma_{eq}$  ——折算应力；

$\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  ——计算点处的第一、第二、第三主应力；

$u$  ——平板铝合金网格结构可不考虑温度作用影响的支承柱柱顶在单位力作用下的水平位移；

$U$ 、 $\dot{U}$ 、 $\ddot{U}$  ——结构节点相对加速度向量、相对速度向量和相对位移向量；

$\ddot{U}_g$  ——地面运动加速度向量；

$X_{ji}$ 、 $Y_{ji}$ 、 $Z_{ji}$  ——分别为 $j$ 振型， $i$ 节点的 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的相对位移；

$S_{Ek}$  ——杆件地震作用标准值的效应；

$S_j$ 、 $S_k$  ——分别为 $j$ 、 $k$ 振型地震作用标准值的效应；

$f$  ——钢材的抗拉强度设计值；

$f_y$  ——铸造铝合金的材料屈服强度标准值。

### 2.2.2 计算指标

$f_t^b$  ——螺栓经热处理后的抗拉强度设计值；

$E$  ——材料的弹性模量；

$\alpha$  ——材料的线膨胀系数；

$R_m$  ——抗拉强度；

$R_{p0.2}$  ——规定非比例延伸强度；

$A$  ——断后伸长率；

$A_{50\text{mm}}$  ——标距为 50mm 时断后伸长率；

$K$  ——空间铝合金网格结构总弹性刚度矩阵；

$U$  ——空间铝合金网格结构节点位移向量；

$M$  ——空间铝合金网格结构质量矩阵；

$Q$  ——空间铝合金网格结构阻尼矩阵。

### 2.2.3 几何参数

$L$  ——空间铝合金网格结构在验算方向的跨度

$L$  ——杆件几何长度；

$A$  ——支承(上承或下承) 平面弦杆截面积的算术平均值；

$A_{\text{eff}}$  ——螺栓的有效截面积；

$D$  ——铝合金球直径；

$\theta$  ——两相邻螺栓之间的最小夹角；

$d_1^b$  ——两相邻螺栓的较大直径；

$d_s^b$  ——两相邻螺栓的较小直径；

$B$  ——滑槽长度；

$\xi d$  ——螺栓伸入钢球长度；

$m$  ——滑槽端部紧固螺钉中心到套筒端部的距离；

$n$  ——滑槽顶部紧固螺钉中心至套筒顶部的距离；

$K$  ——螺栓露出套筒距离；

$h$  ——锥头底板厚度或封板厚度；

$t$  ——螺纹根部到滑槽附加余量；

$x$  ——螺纹收尾长度；

$e$  ——紧固螺钉的半径；

$\Delta$  ——滑槽预留量；

$r$  ——球面或圆柱面网壳的曲率半径；

$\beta$  ——圆柱面网壳相邻母线所对应的中心角

$l_b$  ——斜杆所对应的三角形网格底边几何长度

$\theta_0$  ——相汇交二杆件的夹角；

$\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  ——相汇交二杆件嵌入榫的中线与相应嵌入件（杆件）轴线的垂线之间的夹角（即杆端嵌入榫倾角）；

$H$  ——环柱体高度；

$t_h$  ——环柱体的厚度；

$D_h$  ——环柱体外接圆直径；

$S$  ——螺栓间距

#### 2.2.4 计算系数

$\alpha_j$  ——相应于  $j$  振型自振周期的水平地震影响系数；

$\gamma_j$  —— $j$  振型参与系数；

$\rho_{jk}$  —— $j$  振型与  $k$  振型的耦联系数；

$Z_j$ 、 $\zeta_k$  ——分别为  $j$ 、 $k$  振型的阻尼比；

$\lambda_T$  —— $k$  振型与  $j$  振型的自振周期比；

$m$  ——计算中考虑的振型数；

$\xi$  ——螺栓拧入球体长度与螺栓直径的比值；

$\lambda$  ——套筒外接圆直径与螺栓直径的比值；

$\beta_f$  ——材料强度修正系数；

$\gamma_{RE}$  ——有地震作用组合时的节点承载力抗震调整系数

## 3 基本规定

### 3.1 结构选型

**3.1.1** 网架结构可采用双层或多层形式；网壳结构可采用单层或双层形式，也可采用局部双层形式。

**3.1.2** 网架结构可选用下列网格形式：

1 由交叉桁架体系组成的两向正交正放网架、两向正交斜放网架、两向斜交斜放网架、三向网架；

2 由四角锥体系组成的正放四角锥网架、正放抽空四角锥网架、棋盘形四角锥网架、斜放四角锥网架、星形四角锥网架；

3 由三角锥体系组成的三角锥网架、抽空三角锥网架、蜂窝形三角锥网架；

**3.1.3** 网壳结构可采用球面、圆柱面、双曲抛物面、椭圆抛物面等曲面形式，也可采用各种组合曲面形式。

**3.1.4** 单层网壳可选用下列网格形式：

1 单层圆柱面网壳可采用单向斜杆正交正放网格、交叉斜杆正交正放网格、联方网格及三向网格等形式。

2 单层球球面网壳可采用肋环型、肋环斜杆型、三向网格、扇形三向网格、葵花形三向网格、短程线型等形式。

3 单层双曲抛物面网壳宜采用三向网格，其中两个方向杆件沿直纹布置，也可采用两向正交网格，杆件沿主曲率方向布置，局部区域可加设斜杆。

4 单层椭圆抛物面网壳可采用三向网格、单向斜杆正交正放网格、椭圆底面网格等形式。

**3.1.5** 双层网壳可由两向、三向交叉的桁架体系或由四角锥体系、三角锥体系等组成，其上、下弦网格可采用本规程第 3.1.4 条的方式布置。

**3.1.6** 立体桁架可采用直线或曲线形式。

**3.1.7** 空间网格结构的选型应结合工程的平面形状、跨度大小、支承情况、荷载条件、屋面构造、建筑设计等要求综合分析确定。杆件布置及支承设置应保证结构体系几何不变。

**3.1.8** 单层网壳应采用刚接节点。

**3.1.9** 榫式节点网格结构可用来建造平板网架、柱面网壳、球面网壳以及其他不规则网壳等空间结构，主要有单层网格结构和双层网格结构等，其中双层结构可以由四角锥体系、三角

锥体系、空腹桁架体系等结构单元组成。

**3.1.10** 榫式节点用于柱面网壳时，单层柱面网壳的跨度不大于 30m，双层柱面网壳的跨度不大于 60m；榫式节点用于球面网壳时，单层球面网壳的跨度不大于 60m，双层球面网壳的跨度不大于 120m。

## 3.2 基本设计规定

**3.2.1** 本规程采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，用分项系数设计表达式进行计算。

**3.2.2** 在铝合金结构设计文件中，应注明建筑结构的安全等级、设计使用年限、铝合金材料牌号及供货状态、连接材料的型号和对铝合金材料所要求的力学性能、化学成分及其他附加保证项目。

**3.2.3** 设计铝合金空间网格结构时，应从工程实际情况出发，合理选用结构方案、网格布置与构造措施，并应综合考虑材料供应、加工制作与现场施工安装方法，以取得良好的技术经济效果。

**3.2.4** 铝合金结构应按下列承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计：

1 承载能力极限状态：包括构件和连接的强度破坏和因过度变形而不适于继续承载，结构和构件丧失稳定，结构转变为机动体系和结构倾覆；

2 正常使用极限状态：包括影响结构、构件和非结构构件正常使用或外观的变形，影响正常使用的振动，影响正常使用或耐久性能的局部损坏。

**3.2.5** 按承载能力极限状态设计铝合金结构时，应考虑荷载效应的基本组合，必要时尚应考虑荷载效应的偶然组合。按正常使用极限状态设计铝合金结构时，应按规定的荷载效应组合。

**3.2.6** 铝合金结构的计算模型和基本假定应与构件连接的实际性能相符合。

**3.2.7** 铝合金结构的正常使用环境温度应低于 90℃。

**3.2.8** 设计铝合金结构时应考虑永久荷载、可变荷载、支承结构的变形或沉降、施工荷载、安装荷载、检修荷载等及地震作用、温度变化作用。

**3.2.9** 设计铝合金结构时，荷载的标准值、荷载分项系数、荷载组合值系数等，应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009 的规定采用。结构的重要性系数 $\gamma_0$ 应按现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB50068 的规定采用，其中对设计年限为 25 年的结构构件， $\gamma_0$ 不应小于 0.95。

**3.2.10** 大跨度空间结构内力分析时宜考虑几何非线性效应的影响，应计算结构的整体稳定承

载力。

### 3.3 材料性能指标

3.3.1 铝合金型材材料性能指标应符合以下要求：

1 铝合金型材的合金牌号、供货状态及表面处理类别应符合表 3.3.1-1 的规定，表 3.3.1-1 中未列出的，应符合 GB/T 6892 的规定。

表 3.3.1-1 牌号、供货状态及表面处理类别

| 牌号                        | 供货状态     | 表面处理类别                                |
|---------------------------|----------|---------------------------------------|
| 6005A、6060、6061、6063、6082 | T4、T5、T6 | 阳极氧化；<br>阳极氧化+电泳涂漆；<br>粉末喷涂；<br>液体喷涂。 |

注：1 型材的供货状态应符合GB/T 16475的规定。

2 各类表面处理的膜层代号应符合 GB/T 6892 的规定。

2 型材的尺寸偏差应符合 GB/T 14846—2014 的高精级规定，不同于高精级或需要超高精级时，应在图纸、订货单（或合同）中注明。对于表面处理的型材，因表面处理引起的尺寸变化应不影响其装配和使用。

3 型材的室温纵向拉伸力学性能应符合表 3.3.1-2 的规定。表 3.3.1-2 中未规定的型材，其室温拉伸力学性能应符合 GB/T 6892 的规定。

表 3.3.1-2 室温拉伸力学性能

| 牌号          | 状态 | 壁厚<br>mm    | 室温拉伸试验结果          |                                 |            |                   |
|-------------|----|-------------|-------------------|---------------------------------|------------|-------------------|
|             |    |             | 抗拉强度 $R_m$<br>MPa | 规定非比例延伸<br>强度 $R_{p0.2}$<br>MPa | 断后伸长率<br>% |                   |
|             |    |             |                   |                                 | A          | A <sub>50mm</sub> |
|             |    |             | 不小于               |                                 |            |                   |
| 6060        | T4 | ≤25.00      | 120               | 60                              | 16         | 14                |
|             | T5 | ≤5.00       | 160               | 120                             | —          | 6                 |
|             |    | >5.00~25.00 | 140               | 100                             | 8          | 6                 |
|             | T6 | ≤3.00       | 190               | 150                             | —          | 6                 |
| >3.00~25.00 |    | 170         | 140               | 8                               | 6          |                   |
| 6005A       | T4 | ≤25.00      | 180               | 90                              | 15         | 13                |
|             | T5 | ≤6.30       | 250               | 200                             | —          | 7                 |

| 牌号   | 状态       | 壁厚<br>mm     |              | 室温拉伸试验结果          |                                 |            |            |
|------|----------|--------------|--------------|-------------------|---------------------------------|------------|------------|
|      |          |              |              | 抗拉强度 $R_m$<br>MPa | 规定非比例延伸<br>强度 $R_{p0.2}$<br>MPa | 断后伸长率<br>% |            |
|      |          |              |              |                   |                                 | $A$        | $A_{50mm}$ |
|      |          |              |              | 不小于               |                                 |            |            |
|      |          | >6.30~25.00  | 250          | 200               | 8                               | 7          |            |
|      | T6       | 实心<br>型材     | ≤5.00        | 270               | 225                             | —          | 6          |
|      |          |              | >5.00~10.00  | 260               | 215                             | —          | 6          |
|      |          |              | >10.00~50.00 | 250               | 200                             | 8          | 6          |
|      | 空心<br>型材 | ≤5.00        | 255          | 215               | —                               | 6          |            |
|      |          | >5.00~15.00  | 250          | 200               | 8                               | 6          |            |
|      |          | >15.00~25.00 | 250          | 200               | 8                               | —          |            |
| 6061 | T4       | ≤25.00       | 180          | 110               | 15                              | 13         |            |
|      | T5       | ≤16.00       | 240          | 205               | 9                               | 7          |            |
|      | T6       | ≤5.00        | 260          | 240               | —                               | 7          |            |
|      |          | >5.00~25.00  | 260          | 240               | 10                              | 8          |            |
| 6063 | T4       | ≤25.00       | 130          | 65                | 14                              | 12         |            |
|      | T5       | ≤3.00        | 175          | 130               | —                               | 6          |            |
|      |          | >3.00~25.00  | 160          | 110               | 7                               | 5          |            |
|      | T6       | ≤10.00       | 215          | 170               | —                               | 6          |            |
|      |          | >10.00~25.00 | 195          | 160               | 8                               | 6          |            |
| 6082 | T4       | ≤25.00       | 205          | 110               | 14                              | 12         |            |
|      | T5       | ≤5.00        | 270          | 230               | —                               | 6          |            |
|      | T6       | ≤5.00        | 290          | 250               | —                               | 6          |            |
|      |          | >5.00~50.00  | 310          | 260               | 10                              | 8          |            |

注：1 如无特殊要求或说明， $A$  适用于壁厚大于 12.50mm 的型材， $A_{50mm}$  适用于壁厚不大于 12.50mm 的型材；

2 壁厚不大于 1.60mm 的型材不要求伸长率，如有要求时，可供需双方协商，并在订货单（或合同）中注明；

3 状态定义应符合 GB/T 16475 的规定；

4 型材的化学成分、低倍组织、显微组织、膜层性能、外观质量应符合 GB/T 6892 的规定，若需方有其他特殊要求，应由供需双方协商确定，并在订货单（或合同）中注明。

**3.3.2** 铝合金板带材应符合 GB/T 3880 的规定，铝合金管材应符合 GB/T 4437 的规定，铝合金棒材应符合 GB/T 3191 的规定。

**3.3.3** 铝合金材料的物理性能指标应按表 3.3.3 的规定取值。

**表 3.3.3 铝合金的物理性能指标**

|                                |              |                                |                            |                                     |
|--------------------------------|--------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 弹性模量 E<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 泊松比 $\gamma$ | 剪变模量 G<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 线膨胀系数 $\alpha$ (以<br>每°C计) | 质量密度 $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
| 70000                          | 0.3          | 27000                          | $23 \times 10^{-6}$        | 2700                                |

### 3.4 挠度容许值

**3.4.1** 铝合金空间网格结构在恒荷载与活荷载标准值作用下的最大挠度值不宜超过表 3.4.1 中的容许挠度值。

**表 3.4.1 铝合金空间网格结构的容许挠度值**

| 结构体系         | 屋盖结构 (短向跨度) | 楼盖结构 (短向跨度) | 悬挑结构 (悬挑跨度) |
|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 网架           | 1/250       | 1/300       | 1/125       |
| 单层网壳         | 1/400       | —           | 1/200       |
| 双层网壳<br>立体桁架 | 1/250       | —           | 1/125       |

注:对于设有悬挂起重设备的屋盖结构,其最大挠度值不宜大于结构跨度的 1/400

**3.4.2** 网架与立体桁架可预先起拱,其起拱值可取不大于短向跨度的 1/300。当仅为改善外观要求时,最大挠度可取恒荷载与活荷载标准值作用下挠度减去起拱值。

## 4 结构计算

### 4.1 一般计算原则

4.1.1 铝合金结构的计算模型应根据结构形式、支座节点数量和构造等情况以及支承结构的刚度，确定合理的边界约束条件。

4.1.2 铝合金空间网格结构应进行重力荷载及风荷载作用下的位移、内力计算，并应根据具体情况，对地震、温度变化、支座沉降及施工安装荷载等作用下的位移、内力进行计算，铝合金网格结构的整体稳定性计算应考虑结构的非线性影响。

4.1.3 对非抗震设计，作用及作用组合的效应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009进行计算，在杆件截面及节点设计中，应按作用基本组合的效应确定内力设计值；对抗震设计，地震组合的效应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011计算。在位移验算中，应按作用标准组合的效应确定其挠度。

4.1.4 铝合金网格结构的外荷载可按静力等效原则将节点所辖区域内的荷载集中作用在该节点上。当杆件上作用有局部荷载时，应另行考虑局部弯曲内力的影响。

4.1.5 铝合金网格结构分析时，应考虑上部网格结构与下部支承结构的相互影响。

4.1.6 铝合金网格结构施工安装阶段与使用阶段支承情况不一致时，应区别不同支承条件分析计算施工安装阶段和使用阶段在相应荷载作用下的结构位移和内力。

### 4.2 静力计算

4.2.1 按有限元法进行铝合金空间网格结构静力计算时可采用下列基本方程：

$$UK=F \quad (4.2.1)$$

式中： $K$ ——铝合金空间网格结构总弹性刚度矩阵；

$U$ ——铝合金空间网格结构节点位移向量；

$F$ ——铝合金空间网格结构节点荷载向量。

4.2.2 铝合金空间网格结构应经过位移、内力计算后进行杆件截面设计，如杆件截面需要调整应重新进行计算，使其满足设计要求。铝合金空间网格结构设计后，杆件不宜替换，如必须替换时，应根据截面及刚度等效的原则进行，并应考虑内力重分配重新进行结构计算及受影响构件的验算。

4.2.3 当平板铝合金网格结构符合下列条件之一时，可不考虑由于温度变化而引起的内力：

- 1 支座节点的构造允许平板铝合金网格结构沿水平方向移动,且允许移动值大于或等于该结构沿移动方向的温度变形值;
- 2 平板铝合金网格结构周边独立柱支承、验算方向跨度小于40m;
- 3 在单位力作用下,支承柱柱顶水平位移大于或等于公式(4.2.3)的计算值:

$$u = \frac{L}{2\xi EA_m} \left( \frac{E\alpha\Delta t}{0.038f} - 1 \right) \quad (4.2.3)$$

式中:  $L$  ——网架在验算方向的跨度(m);

$F$  ——铝合金的抗拉强度设计值(N/mm<sup>2</sup>);

$E$  ——材料的弹性模量(N/mm<sup>2</sup>);

$A$  ——材料的线膨胀系数(1 / °C);

$\Delta t$  ——温差(°C);

$A_m$  ——支承(上承或下承)平面弦杆截面积的算术平均值(mm<sup>2</sup>);

$\xi$  ——系数,支承平面弦杆为正交正放时取1.0;正交斜放时取 $\sqrt{2}$ ,三向时取2.0。

### 4.3 稳定性计算

**4.3.1** 对于网架结构,可不进行整体稳定性分析;对单层或双层网壳结构,必须进行整体稳定性分析。

**4.3.2** 在进行网壳结构稳定性分析时,可采用弹性几何非线性有限元法分析;进行非线性稳定分析时,单层网壳结构的每根杆件宜剖分为2至4个非线性空间梁单元。

**4.3.3** 进行网壳结构的整体稳定性分析时,应考虑初始几何缺陷。几何缺陷可根据一致模态法取值,缺陷最大值可取 $L/300$ , $L$ 为网壳的最小跨度。

**4.3.4** 仅考虑几何非线性时,铝合金网壳结构的整体稳定系数应大于3.0;同时考虑几何非线性和材料非线性时,铝合金单层网壳结构的整体稳定系数应大于2.4。

**4.3.5** 进行铝合金单层网壳结构的整体稳定分析时,宜考虑连接节点刚度的影响;节点刚度可通过精细化数值分析模型得到,亦可通过试验得到。

### 4.4 抗震计算

**4.4.1** 对用作屋盖的铝合金网架结构,其抗震验算应符合下列规定:

- 1 在抗震设防烈度为8度的地区,对于周边支承的中小跨度网架结构应进行竖向抗震验

算，对于其他网架结构均应进行竖向和水平抗震验算；

2 在抗震设防烈度为9度的地区，对各种网架结构应进行竖向和水平抗震验算。

**4.4.2** 对于铝合金网壳结构，其抗震验算应符合下列规定：

1 在抗震设防烈度为7度的地区，当网壳结构的矢跨比大于或等于1/5时，应进行水平抗震验算；当矢跨比小于1/5时，应进行竖向和水平抗震验算；

2 在抗震设防烈度为8度或9度的地区，对各种网壳结构应进行竖向和水平抗震验算。

**4.4.3** 在单维地震作用下，对铝合金空间网格结构进行多遇地震作用下的效应计算时，可采用振型分解反应谱法；对于体型复杂或重要的大跨度结构，应采用时程分析法进行补充计算。

**4.4.4** 采用时程分析法时，应按建筑场地类别和设计地震分组选用不少于两组的实际强震记录 and 一组人工模拟的加速度时程曲线，其平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符。加速度曲线峰值应根据与抗震设防烈度相应的多遇地震的加速度时程曲线最大值进行调整，并应选择足够长的地震动持续时间。

**4.4.5** 当采用振型分解反应谱法进行铝合金空间网格结构地震效应分析时，对于铝合金网架结构宜至少取前 10—15 个振型，对于铝合金网壳结构宜至少取前 25—30 个振型，以进行效应组合；对于体型复杂或重要的大跨度铝合金空间网格结构需要取更多振型进行效应组合。

**4.4.6** 在抗震分析时，应考虑支承体系对空间网格结构受力的影响。此时宜将空间网格结构与支承体系共同考虑，按整体分析模型进行计算；亦可把支承体系简化为空间网格结构的弹性支座，按弹性支承模型进行计算。

**4.4.7** 在进行结构地震效应分析时，对于周边落地的铝合金空间网格结构，阻尼比值可取 0.03。

**4.4.8** 对于体型复杂或较大跨度的铝合金空间网格结构，宜进行多维地震作用下的效应分析。进行多维地震效应计算时，可采用多维随机振动分析方法、多维反应谱法或时程分析法。

**4.4.9** 铝合金空间网格结构宜按下列要求进行防连续倒塌的概念设计：

- 1 采取减小偶然作用效应的措施；
- 2 采取使重要构件及关键节点避免直接遭受偶然作用的措施；
- 3 在结构容易遭受偶然作用影响的区域增加冗余约束，布置备用传力路径；
- 4 增强重要构件及关键节点的承载力和变形性能；
- 5 通过合理分区并加强边缘构件，控制可能发生连续倒塌的范围。

**4.4.10** 重要结构的防连续倒塌设计可采用下列方法：

- 1 局部加强法：对可能遭受偶然作用而发生局部破坏的重要构件和关键节点，可提高结

构的安全储备；也可直接考虑偶然作用进行结构设计。

**2 去除构件法：**按一定规则去除结构的主要受力构件，采用考虑相应的作用和材料抗力，验算剩余结构体系的极限承载力；也可采用受力-倒塌全过程分析，进行防倒塌设计。

## 4.5 抗风计算

**4.5.1** 铝合金空间网格结构设计时应考虑风荷载的静力和动力效应。

**4.5.2** 对铝合金空间网格结构进行风静力效应分析时，风载体型系数应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009 的规定取值。对于体型复杂且无相关资料参考的铝合金空间网格结构，其风载体型系数宜通过风洞试验或专门研究确定。

**4.5.3** 对于基本自振周期大于 0.25s 的铝合金空间网格结构，宜通过风振响应分析确定风动力效应。

## 5 杆件与节点的设计与构造

### 5.1 杆件

**5.1.1** 铝合金空间网格结构的杆件可采用铝合金建筑型材和管材。杆件采用的铝材牌号和等级应符合现行国家标准《铝合金结构设计规范》GB 50429 的规定。杆件截面应按现行国家标准《铝合金结构设计规范》GB 50429 根据强度和稳定性的要求计算确定。

**5.1.2** 确定桁架弦杆和单系腹杆(用节点板与弦杆连接)的长细比时,其计算长度应按表 5.1.2 的规定取值。

表 5.1.2 桁架弦杆和单系腹杆的计算长度  $l_0$

| 序号 | 弯曲方向   | 弦杆    | 腹杆        |        |
|----|--------|-------|-----------|--------|
|    |        |       | 支座斜杆和支座竖杆 | 其他腹杆   |
| 1  | 在桁架平面内 | $l$   | $l$       | $0.8l$ |
| 2  | 在桁架平面外 | $l_1$ | $l$       | $l$    |
| 3  | 斜平面    | —     | $l$       | $0.9l$ |

注:  $l$  为构件的几何长度(节点中心间距离);  $l_1$  为桁架弦杆侧向支承点之间的距离。

**2** 斜平面系指与桁架平面斜交的平面,适用于构件截面两主轴均不在桁架平面内的单角铝腹杆和双角铝十字形截面腹杆。

**3** 无节点板的腹杆计算长度在任意平面内均取其等于几何长度(铝管结构除外)。

当桁架弦杆侧向支承点之间的距离为节间长度的 2 倍(图 5.1.2)且两节间的弦杆轴心压力不相同,则该弦杆在桁架平面外的计算长度,应按下式确定(但不应小于  $0.5l_1$ ):

$$l_0 = l_1 \left( 0.75 + 0.25 \frac{N_2}{N_1} \right) \quad (5.1.2)$$

式中:  $N_1$ ——较大的压力,计算时取正值;

$N_2$ ——较小的或拉力,计算时压力取正值,拉力取负值。

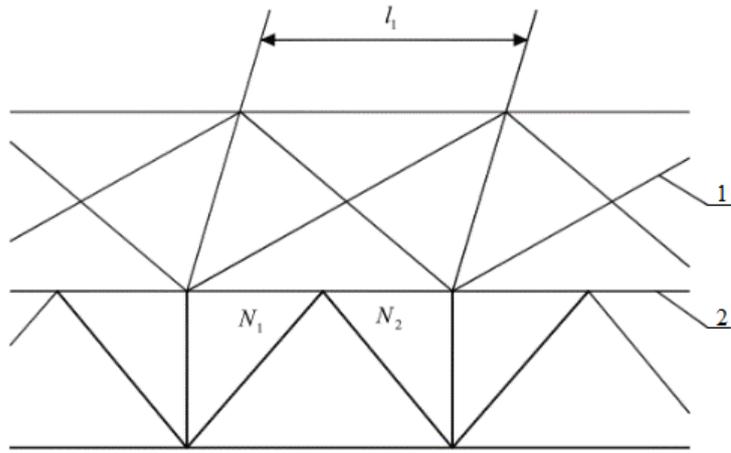


图 5.1.2 弦杆轴心压力在侧向支承点间有变化的桁架简图

1——支撑；2——桁架

桁架再分式腹杆体系的受压主斜杆及 K 形腹杆体系的竖杆等，在桁架平面外的计算长度也应按第 5.1.2 条确定（受拉主斜杆仍取  $l_1$ ）；在桁架平面内的计算长度则取节点中心间距离。

5.1.3 平板网架、曲面网架、单层网壳杆件的计算长度应按表 5.1.3 的规定取值。

表 5.1.3 平板网架、曲面网架、单层网壳杆件计算长度

| 杆 件     | 计算长度   |
|---------|--------|
| 弦杆及支座腹杆 | $l$    |
| 腹 杆     | $l$    |
| 壳体曲面内杆  | $0.9l$ |
| 壳体曲面外杆  | $1.6l$ |

注：  $l$  为杆件几何长度（节点中心间距离）。

5.1.4 杆件的长细比不宜超过表 5.1.4 中规定的数值。

表 5.1.4 杆件的容许长细比  $[\lambda]$

| 结构体系               | 杆件形式   | 杆件受拉 | 杆件受压 | 杆件受压与压弯 | 杆件受拉与拉弯 |
|--------------------|--------|------|------|---------|---------|
| 网架<br>立体桁架<br>双层网壳 | 一般杆件   | 350  | 150  | —       | —       |
|                    | 支座附近杆件 | 300  |      |         |         |
| 单层网壳               | 一般杆件   | —    | —    | 150     | 300     |

注：1 桁架（包括空间桁架）的受压腹杆，当其内力等于或小于承载能力的 50% 时，容许长细比值可取 200。

2 跨度等于或大于 60m 的桁架，其受压弦杆和端压杆的容许长细比宜取 100，其他受压腹杆可取 150（承受静力荷载），其受拉弦杆和腹杆的长细比不宜超过 300（承受静力荷载）。

3 受拉构件在永久荷载与风荷载组合下受压时，其长细比不宜超过 250。

**5.1.5** 杆件截面的最小尺寸应根据结构的跨度与网格大小按计算确定，普通角铝不宜小于  $L50 \times 3$ ，铝管不宜小于  $\Phi 48 \times 3$ 。

**5.1.6** 铝合金空间网格结构杆件分布应保证刚度的连续性，受力方向相邻的弦杆其杆件截面面积之比不宜超过 1.8 倍，多点支承的网架结构其反弯点处的上、下弦杆宜按照构造要求加大截面。

**5.1.7** 对于低应力、小规格的受拉杆件其长细比宜按受压杆件控制。

**5.1.8** 在杆件与节点构造设计时，应考虑便于检查、清刷与油漆，避免易于积留湿气与灰尘的死角与凹槽，铝管端部应进行封闭。

## 5.2 板式节点

**5.2.1** 板式节点体系通常用于铝合金杆件以轴向拉压力为主的空间网格结构，也可运用于铝合金杆件以弯矩及剪力为主的结构中，设计时宜采用有限元分析验证连接节点的安全性及有效性。条件允许时，宜进行试验验证。

**5.2.2** 为减少对下部支承体系的反力，可以采用橡胶支座、球铰支座或弹簧支座释放相应水平方向的反力。

**5.2.3** 该体系应宜采用铝合金主结构与围护系统一体化构造，可考虑屋面板的刚度贡献。

**5.2.4** 板式节点体系（图5.2.4）由工字型或箱型杆件和上下两块节点板通过螺栓紧密连接而成。

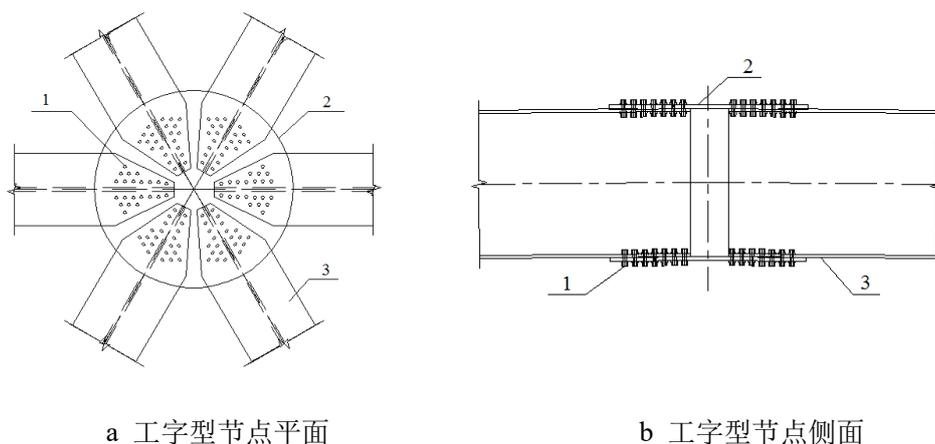
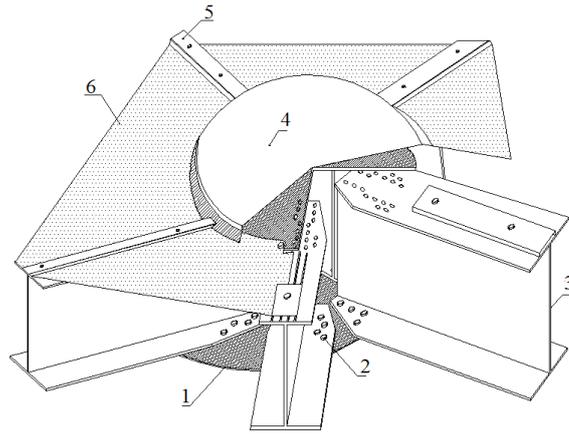


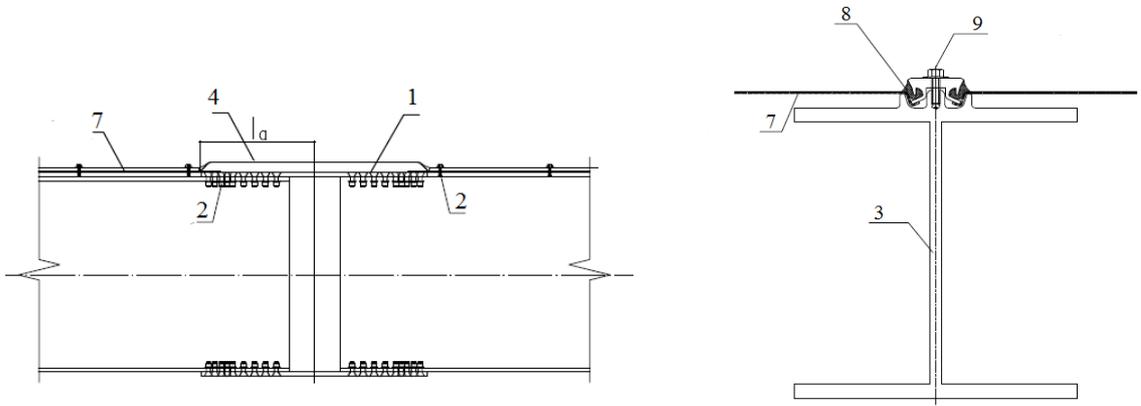
图5.2.4 板式节点

1——紧固件；2——节点板；3——铝合金型材

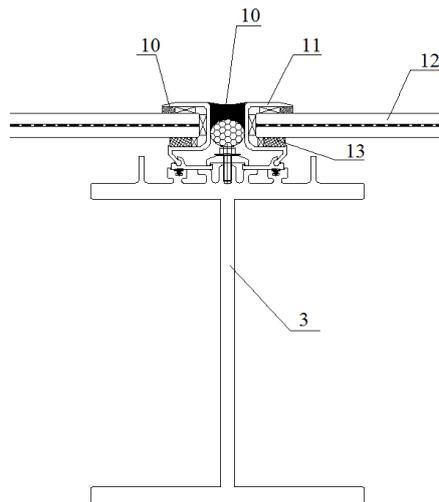
**5.2.5** 板式节点体系一体化围护材料可采用铝板、玻璃等（图5.2.5）。



a 一体化围护系统三维图



b 铝板节点系统



c 玻璃节点系统

图5.2.5 板式节点体系一体化围护系统节点

- 1——节点板；2——紧固件；3——铝合金型材；4——节点盖板；5——铝合金压板；  
 6——屋面铝板/玻璃；7——屋面板；8——橡胶条；9——螺栓；10——硅酮密封胶；  
 11——铝合金副框；12——玻璃；13——硅酮结构胶；

5.2.6 节点板最小的厚度应不小于8mm,且不应小于杆件翼缘厚度。

5.2.7 节点盖板最小的端部搭接长度应符合表 5.2.7的规定。

表5.2.7 节点盖板最小的端部搭接长度 $l_a$ (mm)

| 厚度 $t$        | 屋面板坡度 $i$                       |                      |
|---------------|---------------------------------|----------------------|
|               | $\frac{1}{6} < i < \frac{1}{4}$ | $i \geq \frac{1}{4}$ |
| $t \leq 25$   | -                               | 140                  |
| $25 < t < 50$ | 230                             | 140                  |
| $t \geq 50$   | 230                             | 140                  |

5.2.8 节点板与紧固件的承载力应通过计算或试验确定，试验时应防止节点板撕裂、翘曲。

5.2.9 节点板在受拉时的块状拉剪破坏有可能出现三种形式（图5.2.9）：单连接区块状拉剪破坏，双连接区块状拉剪破坏，三连接区块状拉剪破坏。

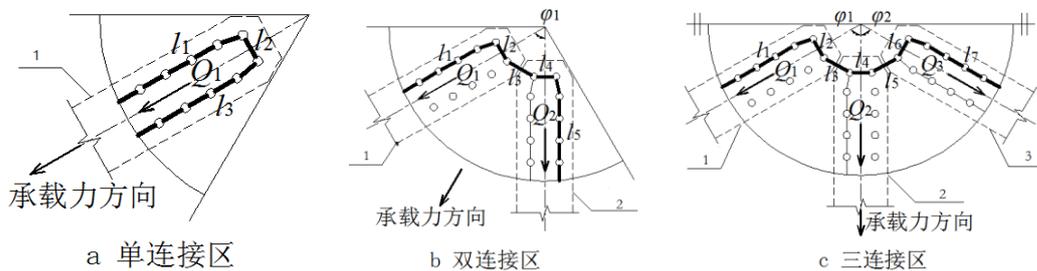


图5.2.9 节点板块状拉剪破坏形式

- 1——杆件  $L_1$ ；2——杆件  $L_2$ ；3——杆件  $L_3$

5.2.10 节点板块状拉剪破坏承载力设计值应满足下列公式要求：

单连接区块状拉剪破坏：

$$V_1 = 0.5tf \sum_{i=1}^3 \gamma_i l_i \geq Q_1, \quad \gamma_1 = \gamma_3 = 0.58, \quad \gamma_2 = 1 \quad (5.2.10-1)$$

双连接区块状拉剪破坏：

$$V_2 = 0.5tf \sum_{i=1}^5 \gamma_i l_i \geq (Q_1 + Q_2) \cos \frac{\phi_1}{2} \quad (5.2.10-2)$$

三连接区块状拉剪破坏：

$$V_3 = 0.5tf \sum_{i=1}^7 \gamma_i l_i \geq Q_1 \cos \phi_1 + Q_2 + Q_3 \cos \phi_2 \quad (5.2.10-3)$$

式中  $V_1$  ——单连接区块状拉剪破坏承载力设计值；  
 $V_2$  ——双连接区块状拉剪破坏承载力设计值；  
 $V_3$  ——三连接区块状拉剪破坏承载力设计值；  
 $t$  ——节点板厚度；  
 $f$  ——铝合金抗拉强度设计值；  
 $\gamma_i$  ——第*i*条破坏边的材料等效破坏强度系数，取值应符合表5.2.10规定；  
 $l_i$  ——第*i*条破坏边的净长度；  
 $Q_i$  ——第*i*根杆件与节点板连接区所受螺栓群剪力；  
 $\varphi_i$  ——杆件间夹角；

表5.2.10 等效破坏强度系数  $\gamma_i$

| 连接区  | $\gamma_i$ | 40°   | 45°   | 50°   | 55°   | 60°   | 65°   | 70°   | 75°   | 80°   | 85°   | 90°   |
|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 双连接区 | $\gamma_1$ | 0.641 | 0.656 | 0.673 | 0.690 | 0.707 | 0.725 | 0.743 | 0.762 | 0.780 | 0.799 | 0.816 |
|      | $\gamma_2$ | 0.960 | 0.950 | 0.939 | 0.926 | 0.913 | 0.899 | 0.884 | 0.868 | 0.851 | 0.834 | 0.816 |
|      | $\gamma_3$ | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
|      | $\gamma_4$ | 0.960 | 0.950 | 0.939 | 0.926 | 0.913 | 0.899 | 0.884 | 0.868 | 0.851 | 0.834 | 0.816 |
|      | $\gamma_5$ | 0.641 | 0.656 | 0.673 | 0.690 | 0.707 | 0.725 | 0.743 | 0.762 | 0.780 | 0.799 | 0.816 |
| 三连接区 | $\gamma_1$ | 0.780 | 0.816 | 0.851 | 0.884 | 0.913 | 0.938 | 0.960 | 0.977 | 0.990 | 0.997 | 1.000 |
|      | $\gamma_2$ | 0.851 | 0.816 | 0.780 | 0.743 | 0.707 | 0.673 | 0.641 | 0.615 | 0.595 | 0.582 | 0.577 |
|      | $\gamma_3$ | 0.960 | 0.950 | 0.939 | 0.926 | 0.913 | 0.899 | 0.884 | 0.868 | 0.851 | 0.834 | 0.816 |
|      | $\gamma_4$ | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
|      | $\gamma_5$ | 0.960 | 0.950 | 0.939 | 0.926 | 0.913 | 0.899 | 0.884 | 0.868 | 0.851 | 0.834 | 0.816 |
|      | $\gamma_6$ | 0.851 | 0.816 | 0.780 | 0.743 | 0.707 | 0.673 | 0.641 | 0.615 | 0.595 | 0.582 | 0.577 |
|      | $\gamma_7$ | 0.780 | 0.816 | 0.851 | 0.884 | 0.913 | 0.938 | 0.960 | 0.977 | 0.990 | 0.997 | 1.000 |

5.2.11 受压节点的中心局部屈曲承载力设计值应按公式(5.2.11)计算取值：

$$V_{cr} = \frac{1.2Et^3}{R_0(1-\nu^2)} \quad (5.2.11)$$

式中  $V_{cr}$  ——中心局部屈曲承载力设计值；  
 $E$  ——弹性模量；  
 $t$  ——节点盖板厚度；  
 $R_0$  ——节点盖板中心域半径，即节点板中点到最内排连接螺栓孔中心距离；  
 $\nu$  ——泊松比；

5.2.12 节点板螺栓间距应按公式(5.2.12)计算取值:

$$x \geq \frac{4.10n - 0.71}{0.71n + 1.41} d_0 \quad (5.2.12)$$

式中  $x$  ——螺栓孔中心间距;

$d_0$  ——螺栓或铆钉的孔径;

$n$  ——杆件与节点板单连接区域上的螺栓孔个数。

5.2.13 节点板中心域半径与厚度的比值应按公式(5.2.13)计算取值:

$$\frac{R_0}{t} \leq 17 \sqrt{\frac{240}{f_{0.2}}} \quad (5.2.13)$$

式中  $f_{0.2}$  ——铝合金名义屈服强度。

5.2.14 铝合金板式节点弯曲刚度可按照图5.2.14采用四折线模型。

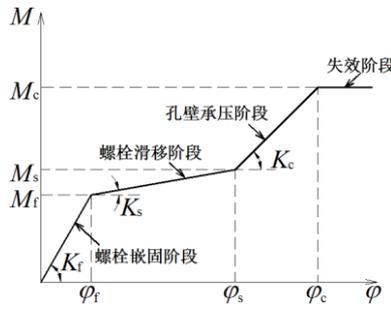


图5.2.14 铝合金板式节点弯曲刚度四折线模型

弯矩作用下铝合金板式节点的变形分为四个阶段：螺栓嵌固阶段，螺栓滑移阶段，孔壁承压阶段和失效阶段。各阶段节点弯曲刚度和抗弯承载力设计值应按公式(5.2.14-1)~公式(5.2.14-7)计算取值:

$$K_f = \frac{1}{\frac{1}{0.76E_p t_p h^2} + \frac{t_f}{0.00035E_c \mu n h^2 A_c} + \frac{(R - R_c)}{1.14E_b I}} \quad (5.2.14-1)$$

$$M_f = \frac{\mu n P h}{1 + 0.5\beta} \quad (5.2.14-2)$$

$$K_s = \frac{1}{\frac{1}{0.76E_p t_p h^2} + \frac{(4 - \beta^2)d_h}{\mu n \beta P h^2} + \frac{(R - R_c)}{1.14E_b I}} \quad (5.2.14-3)$$

$$M_s = \frac{\mu n P h}{1 - 0.5\beta} \quad (5.2.14-4)$$

$$K_c = \frac{1}{\frac{1}{0.76E_p t_p h^2} + \frac{2(t_f E_b + t_p E_p)}{(0.00958d + 0.129)nh^2 t_f t_p E_b E_p} + \frac{(R - R_c)}{1.14E_b I}} \quad (5.2.14-5)$$

$$M_c = \frac{nfdth}{1 + 0.5\beta} \quad (5.2.14-6)$$

$$\varphi = \begin{cases} \frac{M}{K_f} & (0 < M \leq M_f) \\ \frac{M_f}{K_f} + \frac{M - M_f}{K_s} \text{ or } \frac{M_f}{K_f} + \frac{4d_h}{h} & (M_f < M \leq M_s) \\ \frac{M_f}{K_f} + \frac{M_s - M_f}{K_s} + \frac{M - M_s}{K_c} & (M_s < M \leq M_c) \\ \text{失效} & (M_c < M) \end{cases} \quad (5.2.14-7)$$

式中  $K_f$  ——嵌固刚度；

$M_f$  ——滑移弯矩；

$K_s$  ——滑移刚度；

$M_s$  ——承压弯矩；

$K_c$  ——承压刚度；

$M_c$  ——抗弯承载力设计值；

$E_p$  ——节点板弹性模量；

$t_p$  ——节点板厚度；

$h$  ——杆件截面高度；

$t_f$  ——杆件翼缘厚度；

$E_e$  ——等效弹性模量，取节点板弹性模量与杆件翼缘弹性模量平均值；

$\mu$  ——摩擦系数；

$n$  ——连接区螺栓数量；

$A_c$  ——杆件与截面接触面积；

$R$  ——节点板半径；

$R_c$  ——节点板中心距杆件端部距离；

$E_b$  ——杆件弹性模量；

$I$  ——杆件截面惯性矩；

$P$  ——螺栓预紧力；

$\beta$  ——轴力和杆件截面高度的乘积与弯矩之比；

$d_h$  ——螺栓与螺栓孔的间隙；

$f$  ——铝合金抗拉强度设计值；

$d$  ——螺栓有效直径；

$t$  ——连接板厚度；

### 5.3 螺栓球节点

5.3.1 螺栓球节点（图 5.3.1）应由铝合金球、不锈钢螺栓或镀锌高强度螺栓、套筒、紧固螺钉、锥头或封板等零件组成，可用于连接网架和双层网壳等空间网格结构的圆铝合金管杆件。

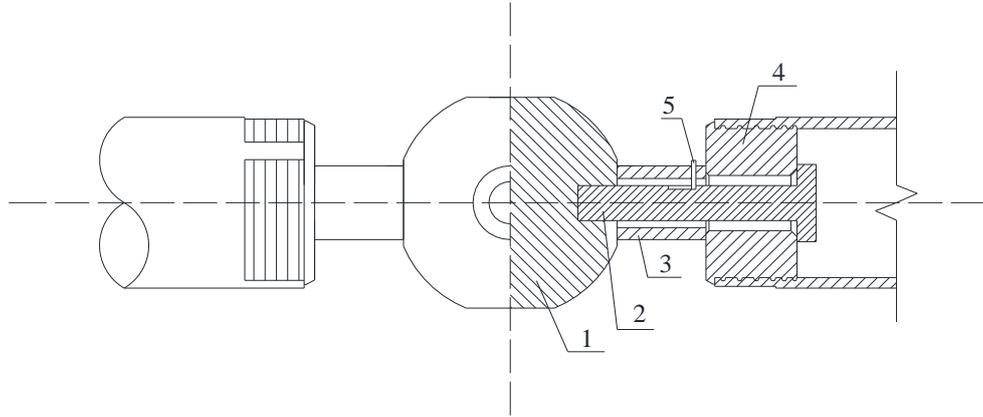


图 5.3.1 螺栓球节点

1——铝合金球；2——不锈钢螺栓或镀锌高强螺栓；3——套筒；4——封板；  
5——紧固螺钉

5.3.2 改进型螺栓球节点的构成与螺栓球节点相同（图 5.3.2），滑槽位置由不锈钢螺栓或镀锌高强螺栓上改在套筒上。

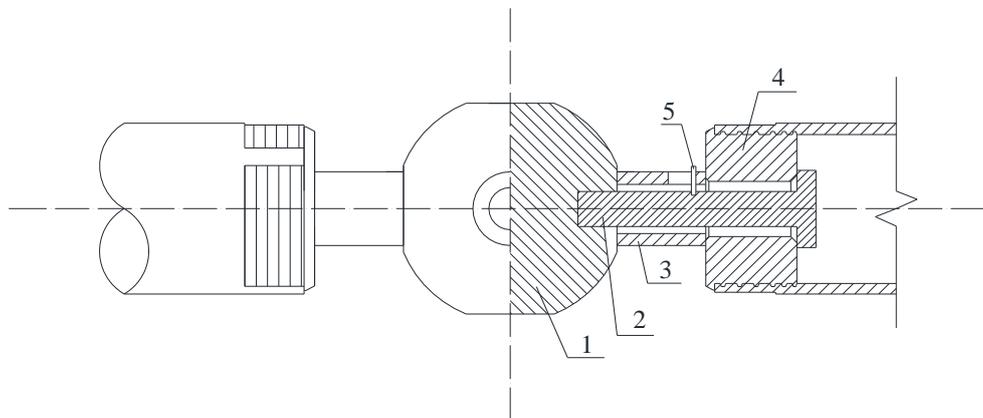


图 5.3.2 改进型螺栓球节点

1——铝合金球；2——不锈钢螺栓或镀锌高强螺栓；3——套筒；4——封板；  
5——紧固螺钉

5.3.3 用于制造螺栓球节点的铝合金球、不锈钢螺栓、套筒、紧固螺钉、封板、锥头的材料可按表 5.3.3 的规定选用，并应符合相应标准的技术条件。

表 5.3.3 螺栓球节点零件材料

| 零件名称  | 推荐材料                     | 材料标准编号                       | 备注                    |
|-------|--------------------------|------------------------------|-----------------------|
| 铝合金球  | 2A12-T5、T4               | 《铝及铝合金挤压棒材》GB/T 3191         | 选用挤压棒材，机加工            |
| 不锈钢螺栓 | 304(0Cr18Ni9)            | 《紧固件机械性能不锈钢紧定螺钉》GB/T 3098.16 | 螺纹规格 M12~M36          |
| 高强度螺栓 | 20MnTiB,<br>40Cr, 35CrMo | 《合金结构钢》GB/T 3077             | 螺纹规格 M12~M24, 外表面镀锌处理 |
|       | 35VB, 40Cr,<br>35CrMo。   |                              | 螺纹规格 M27~M36, 外表面镀锌处理 |
| 套筒    | 2A12-T5                  | 《铝及铝合金挤压棒材》GB/T 3191         | 选用挤压棒材，机加工            |
| 紧固螺钉  | A1-50                    | 《紧固件机械性能不锈钢紧定螺钉》GB/T 3098.16 |                       |
| 锥头或封板 | 2A12-T5                  | 《铝及铝合金挤压棒材》GB/T 3191         | 选用挤压棒材，机加工            |

5.3.4 铝合金球直径应保证相邻螺栓在球体内不相碰并应满足套筒接触面的要求(图 5.3.4)，可分别按下列公式核算，并按计算结果中的较大者选用。

$$D \geq \sqrt{\left(\frac{d_s^b}{\sin \theta} + d_1^b \cot \theta + 2\xi d_1^b\right)^2 + \lambda^2 d_1^{b^2}}$$

(5.3.4-1)

$$D \geq \sqrt{\left(\frac{\lambda d_s^b}{\sin \theta} + \lambda d_1^b \cot \theta\right)^2 + \lambda^2 d_1^{b^2}} \quad (5.3.4-2)$$

式中：D——铝合金球直径(mm)；

$\theta$ ——两相邻螺栓之间的最小夹角(rad)；

$d_1^b$ ——两相邻螺栓的较大直径(mm)；

$d_s^b$ ——两相邻螺栓的较小直径(mm)；

$\xi$ ——螺栓拧入球体长度与螺栓直径的比值，应取为 1.5；

$\lambda$ ——套筒外接圆直径与螺栓直径的比值，可取为 1.8。

当相邻杆件夹角 $\theta$ 较小时，尚应根据相邻杆件及相关封板、锥头、套筒等零部件不相碰的要求核算螺栓球直径。此时可通过检查可能相碰点至球心的连线与相邻杆件轴线间的夹角不大于 $\theta$ 的条件进行核算。

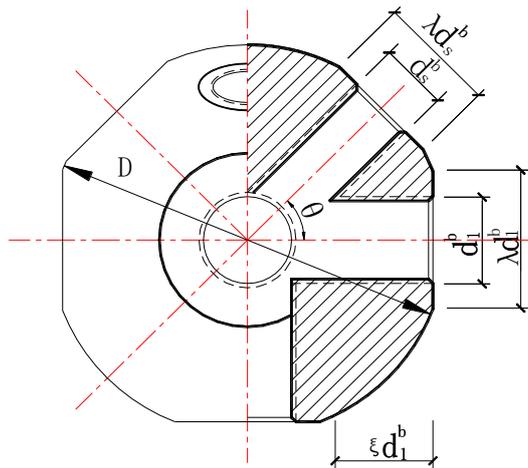


图 5.3.4 螺栓球与直径有关的尺寸

**5.3.5** 不锈钢螺栓的形式与尺寸应符合现行国家标准《紧固件机械性能不锈钢紧定螺钉》GB/T 3098 16 的要求。螺栓的直径应由杆件内力确定，螺栓的受拉承载力设计值  $N_t^b$  应按下式计算：

$$N_t^b = A_{eff} f_t^b \quad (5.3.5)$$

式中： $f_t^b$  ——抗拉强度设计值，对于 304(0Cr18Ni9)不锈钢材料，取 185N/mm<sup>2</sup>；

$A_{eff}$  ——螺栓的有效截面积。当螺栓上钻有键槽或钻孔时， $A_{eff}$  值取螺纹处或键槽、钻孔处二者中的较小值。

**5.3.6** 高强度螺栓的性能等级应按 10.9 级选用，形式与尺寸应符合现行国家标准《钢网架螺栓球节点用高强度螺栓》GB/T 16939 的要求。选用高强度螺栓的直径应由杆件内力确定，高强度螺栓的受拉承载力设计值  $N_t^b$  应按下式计算：

$$N_t^b = A_{eff} f_t^b \quad (5.3.6)$$

式中： $f_t^b$  ——高强度螺栓经热处理后的抗拉强度设计值，对 10.9 级，取 430N/mm<sup>2</sup>；

$A_{eff}$  ——高强度螺栓的有效截面积，可按表 5.3.6 选取。当螺栓上钻有键槽或钻孔时， $A_{eff}$  值取螺纹处或键槽、钻孔处二者中的较小值。

表 5.3.6 常用高强螺栓在螺纹处的有效截面面积  $A_{eff}$  和承载力设计值  $N_t^b$

| 性能等级   | 螺纹规格 $d$ | 螺距 $p$ (mm) | $A_{eff}$ (mm <sup>2</sup> ) | $N_t^b$ (kN) |
|--------|----------|-------------|------------------------------|--------------|
| 10.9 级 | M12      | 1.75        | 84                           | 36.1         |
|        | M14      | 2           | 115                          | 49.5         |
|        | M16      | 2           | 157                          | 67.5         |
|        | M20      | 2.5         | 245                          | 105.3        |
|        | M22      | 2.5         | 303                          | 130.5        |
|        | M24      | 3           | 353                          | 151.5        |
|        | M27      | 3           | 459                          | 197.5        |
|        | M30      | 3.5         | 561                          | 241.2        |
|        | M33      | 3.5         | 694                          | 298.4        |
|        | M36      | 4           | 817                          | 351.3        |

注：螺栓在螺纹处的有效截面积  $A_{eff} = \pi(d - 0.9382p)^2 / 4$ 。

5.3.7 受压杆件的连接螺栓直径,可按其内力设计值绝对值求得螺栓直径计算值后,按表 5.3.6 的螺栓直径系列减少 1~3 个级差。

5.3.8 套筒(即六角形无纹螺母)外形尺寸应符合扳手开口系列,端部要求平整,内孔径可比螺栓直径大 1mm。对于受压杆件的套筒应根据其传递的最大压力值验算其抗压承载力和端部有效截面的局部承压力。对于开设滑槽的套筒应验算套筒端部到滑槽端部的距离,应使该处有效截面的抗剪力不低于紧固螺钉的抗剪力,且不小于 1.5 倍滑槽宽度。

套筒长度  $l_s$ (mm)和螺栓长度  $l$ (mm)可按下列公式计算(图 5.3.8)：

$$l_s = m + B + n \quad (5.3.8-1)$$

$$l = \xi d + l_s + h \quad (5.3.8-2)$$

式中： $B$ ——滑槽长度(mm),  $B = \xi d - K$ ；

$\xi d$ ——螺栓伸入铝球长度(mm),  $d$  为螺栓直径,  $\xi$  一般取 1.5；

$m$ ——滑槽端部紧固螺钉中心到套筒端部的距离(mm)；

$n$ ——滑槽顶部紧固螺钉中心至套筒顶部的距离(mm)；

$K$ ——螺栓露出套筒距离(mm),预留(4~5)mm, 但不应少于 2 个丝扣；

$h$ ——锥头底板厚度或封板厚度(mm)。

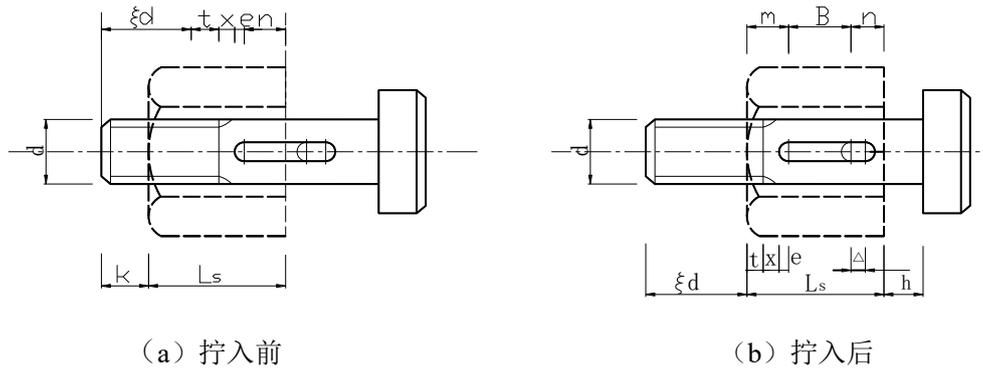


图 5.3.8 套筒长度及螺栓长度

图中： $t$ ——螺纹根部到滑槽附加余量，取 2 个丝扣；

$x$ ——螺纹收尾长度；

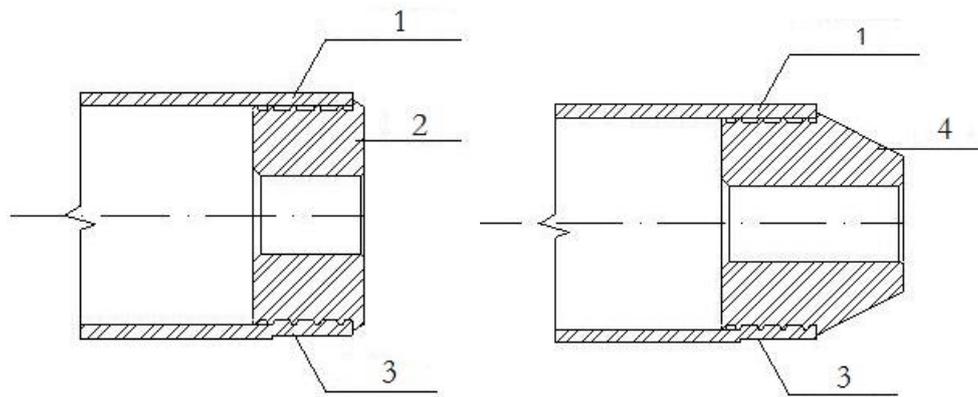
$e$ ——紧固螺钉的半径；

$\Delta$ ——滑槽预留量，一般取 4mm。

**5.3.9** 杆件端部应采用锥头或封板连接，采用焊接连接时其连接焊缝的承载力应不低于连接管件的 60%，采用挤压方式连接(图 5.3.9)时其连接部位的承载力应不低于连接管件的 95%。锥头任何截面的承载力应不低于连接管件，封板厚度应按实际受力大小计算确定，封板及锥头底板厚度不应小于表 5.3.9 中数值。锥头底板外径宜较套筒外接圆直径大(1~2)mm，锥头底板内平台直径宜比螺栓头直径大 2mm。锥头倾角应小于 40°。

表 5.3.9 封板及锥头底板厚度

| 螺纹规格    | 封板/锥头底厚 (mm) | 螺纹规格    | 锥头底厚 (mm) |
|---------|--------------|---------|-----------|
| M12、M14 | 12           | M20~M24 | 16        |
| M16     | 14           | M27~M36 | 30        |



(a) 封板连接

(b) 锥头连接

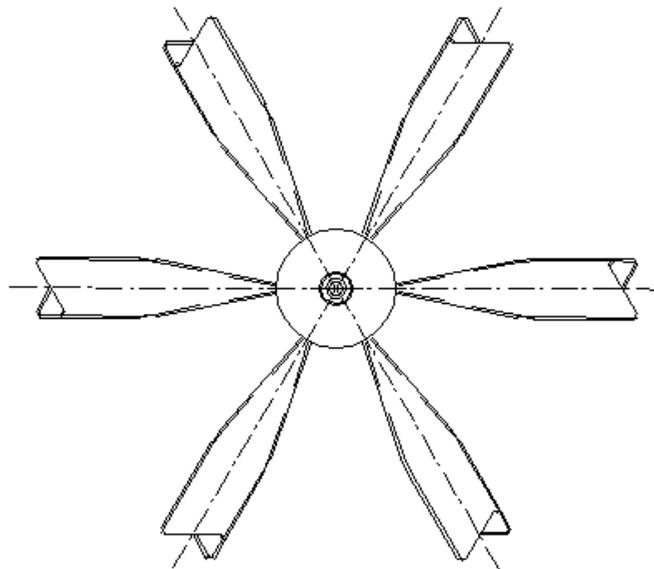
图 5.3.9 杆件端部挤压连接

1——未环压部位；2——封板；3——环压部位；4——锥头

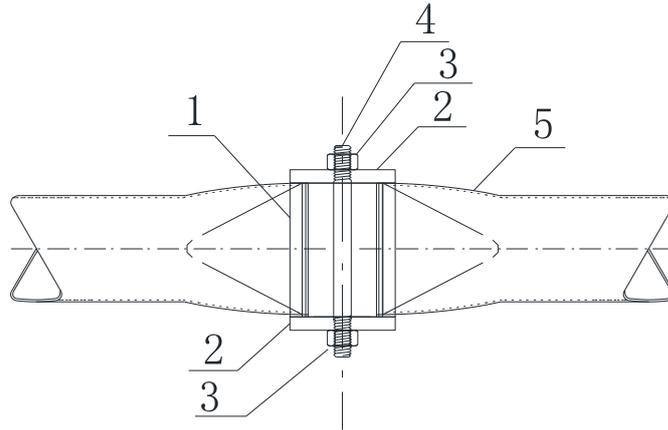
**5.3.10** 紧固螺钉应采用不锈钢材料，其直径可取螺栓直径的 0.16~0.18 倍，且不宜小于 3mm。紧固螺钉规格可采用 M5~M10。

## 5.4 榫式节点

**5.4.1** 榫式节点（图 5.4.1）应由柱体、杆件嵌入件、盖板、螺杆等零件组成，节点零件及杆件材料可按表 5.4.1 选用，并应符合相应材料标准的技术条件。



(a) 节点平面示意图



(b) 节点剖面示意图

图5.4.1 榫式节点示意图

1——铝合金柱体节点；2——盖板；3——螺母；4——螺杆；5——杆件嵌入件

表 5.4.1 榫式节点零件及杆件材料

| 名称 | 推荐材料                            | 材料标准   | 备注      |
|----|---------------------------------|--|---------|
| 柱体 | 铝合金 6061-T6                     | GBT 6892-2006 《一般工业用铝及铝合金挤压型材》<br>GBT 14846-2014 《铝及铝合金挤压型材尺寸偏差》   |         |
| 盖板 | 钢材 Q235、Q345                    | GB/T700-2006 《碳素结构钢》<br>GB/T 1591-2008 《低合金高强度结构钢》   | 镀锌处理    |
| 螺杆 | 普通螺栓或高强螺栓                       | GBT 15389-1994 《螺杆》<br>GB/T901-1988 《等长双头螺柱》<br>GBT 859-1987 《轻型弹簧垫圈》<br>GB/T6170-2015 《1型六角螺母》          | 镀锌处理    |
| 杆件 | Q235、Q345 钢管<br>或 6061-T6 铝合金管材 | GBT 13793-2016 《直缝电焊钢管》<br>GBT 8162-2008 《结构用无缝钢管》<br>《铝及铝合金拉（轧）制无缝管》 GB/T 6893<br>《铝及铝合金热挤压管》 GB/T 4437 | 钢管做镀锌处理 |

**5.4.2** 铝合金节点根据插槽的类型和位置区分为多种规格，主要有 6 个插槽的节点和 12 个插槽的节点等类型。

**5.4.3** 与榫式节点相连的嵌入件凸肋和杆件的角度不应小于 35°。

**5.4.4** 杆件采用钢管时，钢管端部通过冷加工成型，压扁后杆件端部区域材料的屈服强度提高，宜乘以强度系数 $h_{srain}$ ：当作为主要受力构件时： $h_{srain}=1.1$ ；当作为围护支撑等次要受力构件时： $h_{srain}=1.2$ 。

**5.4.5** 杆件管材端部压扁后，杆件截面面积减小，应乘以折减系数 $R=0.72$ 。

**5.4.6** 节点凹槽处齿的抗剪设计值应按公式（5.4.6）计算：

$$T_{V,HubTeeth} = A_{shear} F_{suAl} = r_{as} A_g f_{v,Al} / \cos(\alpha) \quad (5.4.6)$$

式中： $A_{shear}$ ——铝合金齿抗剪切面积， $A_{shear} = r_{as} A_g / \cos(\alpha)$ ；

$r_{as}$ ——铝合金齿抗剪承载力系数；

$\alpha$ ——杆件端部压扁倾角绝对值，不大于 $60^\circ$ ；

$f_{v,Al}$ ——铝合金抗剪设计强度， $f_{v,Al}=115\text{Mpa}$ 。

$TT$ ——杆件厚度；

$TR$ ——铝合金槽公称厚度；

$A_g$ ——圆管面积。

**5.4.7** 杆件压扁处局部受压承载力设计值应按公式（5.4.7）计算：

$$C_{crip} = A_g F_{crip} \quad (5.4.7)$$

式中： $F_{crip} = K_{crip} f$ ；

$K_{crip}$ ——屈曲强度折减系数（通过试验获得）；

$f$ ——钢材抗拉设计强度， $f=215\text{Mpa}$ ；

$W$ ——压扁后的杆端长度。

**5.4.8** 应进行杆件与节点连接处的抗拉、抗剪和抗弯承载力验算。

**5.4.9** 对于设有竖腹杆的网格结构，应对竖腹杆与节点连接处进行承载力验算。

**5.4.10** 应进行节点抗扭转承载力验算。

**5.4.11** 盖板和螺杆应根据承载力分析得到的内力进行设计。

**5.4.12** 螺母和盖板之间可配套采用弹簧垫圈。

## 5.5 铸铝节点

**5.5.1** 多杆件连接的节点以及建筑上有特殊外形要求时可采用铸铝节点，并进行几何造型设计、工艺设计和分析以及力学性能分析和节点校核计算。

**5.5.2** 铸铝节点适用于直接承受静载的铝合金空间网格结构设计，对直接承受反复动力荷载作用并需要疲劳计算的铸铝节点的设计应作专门研究。

**5.5.3** 铸铝节点的铸造铝合金材料力学性能应符合现行国家标准《铸造铝合金》GB/T 1173 的规定。

**5.5.4** 铸铝节点与杆件的连接，宜采用螺栓连接；当采用焊接时，应进行焊接工艺评定认可。

**5.5.5** 铸铝节点在荷载设计值作用下，应保持弹性工作状态；最不利节点应力可采用线弹性理论计算并准确考虑应力集中的影响，或直接采用弹性有限元法进行计算；强度验算采用下式进行：

$$\sigma_{\text{eq}} \leq \beta_f f_y / \gamma_{\text{RE}} \quad (5.5.5-1)$$

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (5.5.5-2)$$

式中： $\sigma_{\text{eq}}$ ——折算应力；

$\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ ——计算点处的第一、第二、第三主应力；

$\beta_f$ ——材料强度修正系数。当计算点各主应力全部为压应力时， $\beta_f=1.0$ ；当计算点处各主应力全部为拉应力时， $\beta_f=0.8$ ，且最大主应力应满足  $\sigma_1 \leq 1.0f_y$ ；其他情况时， $\beta_f=0.9$ ；

$f_y$ ——铸造铝合金的材料屈服强度标准值；

$\gamma_{\text{RE}}$ ——有地震作用组合时的节点承载力抗震调整系数，取 0.9。

**5.5.6** 铸铝节点的强度计算还可通过节点试验或弹塑性有限元分析进行；节点承载力设计值不应大于节点试验破坏承载力的 1/2，不应大于弹塑性有限元分析所得极限承载力 1/3。

**5.5.7** 铸铝节点的有限元分析宜采用实体单元，并在易产生应力集中的部位保证网格划分的精细程度；有限元分析工况应涵盖设计控制工况；有限元分析宜进行不同单元类型、不同单元尺寸分析模型的对比计算，以保证计算精度。

**5.5.8** 铸铝节点属于下列情况之一时，宜进行节点试验：

- 1 设计或建设方认为对铝合金网格结构安全至关重要的节点；

2 8度、9度抗震设防时，对铝合金网格结构安全有重要影响的节点；

3 铸铝节点与其他构件采用复杂连接方式的节点。

**5.5.9** 铸铝节点试验应采用足尺试件。当试验设备无法满足时，可采用缩尺试件，缩尺比例不宜小于 1/2。

**5.5.10** 铸铝节点的加工、检测要求根据现行国家标准《铸造铝合金》GB/T 1173 执行。

**5.5.11** 铸铝节点的设计、加工制作、安装验收等还应满足现行国家标准《铝合金结构设计规范》GB 50429 的规定。

## 5.6 支座节点

**5.6.1** 铝合金空间网格结构的支座节点必须具有足够的强度和刚度，在荷载作用下不应先于杆件和其他节点而破坏，也不得产生不可忽略的变形。支座节点构造形式应传力可靠、连接简单，并应符合计算假定。

**5.6.2** 铝合金空间网格结构的支座节点应根据其主要受力特点，可选用压力支座节点、拉力支座节点、可滑移与转动的弹性支座节点以及兼受轴力、弯矩和剪力的刚性支座节点。支座形式和要求可参照《空间网格结构技术规程》JGJ7 的规定。

**5.6.3** 铝合金网壳支座节点及与支座相连的杆件可采用钢结构。

**5.6.4** 对于支座为单向受力的铰接节点的铝合金空间网格结构，可选用板式支座节点，如图 5.6.4-1 和图 5.6.4-2。双层杆件间使用不锈钢螺栓连接，加强板与 H 杆件使用不锈钢螺栓连接，钢柱与连接盘连接使用不锈钢螺栓，加强板、加劲肋与支座钢结构焊接。

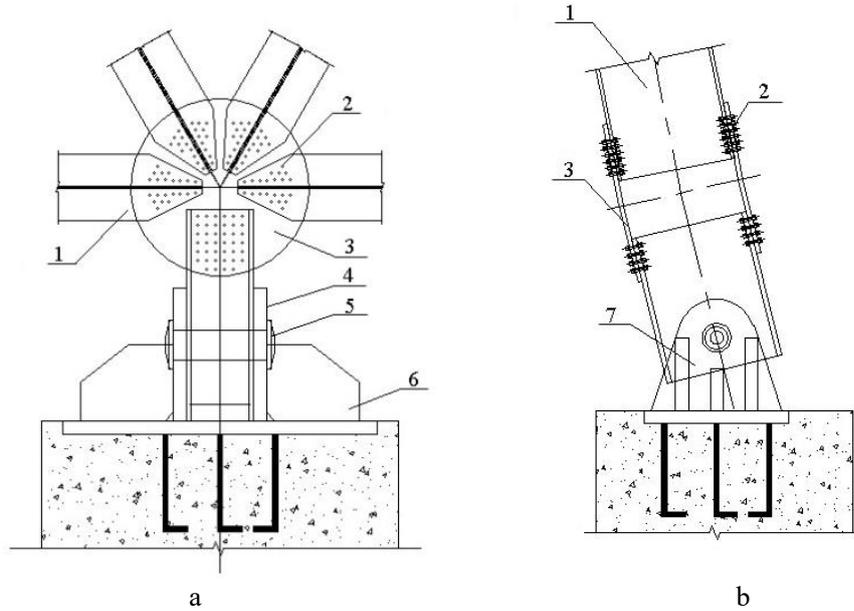


图5.6.4-1 单层板式节点支座

1——铝合金型材；2——紧固件；3——节点盘；4——支座板；5——支座销轴；6——支座加肋板；7——支座

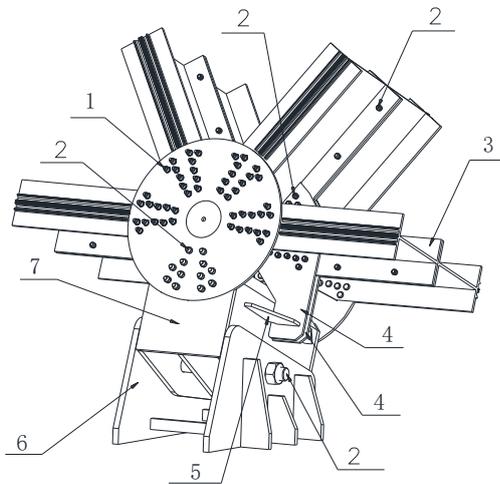


图 5.6.4-2 双层板式支座节点

1——虎克螺栓；2——螺栓；3——杆件；4——加强板；5——加强筋；6——支座；7——钢柱

### 5.6.5 支座节点的设计与构造应符合下列规定：

1 支座竖向支承板中心线应与竖向反力作用线一致，并与支座节点连接的杆件汇交于节点中心；

2 支座球节点底部至支座底板间的距离应满足支座斜腹杆与柱或边梁不相碰的要求（图 5.6.5）；

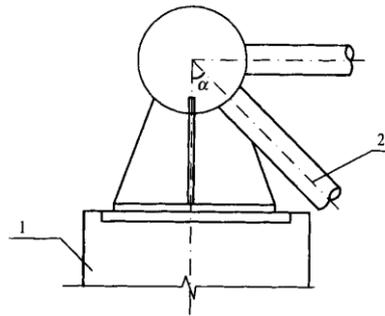


图 5.6.5 支座球节点底部与支座底板间的构造高度

1——柱；2——支座斜腹杆

3 支座竖向支承板应保证其自由边不发生侧向屈曲，其厚度不宜小于 10mm；对于拉力支座节点，支座竖向支承板的最小截面面积及连接焊缝应满足强度要求；

4 支座节点底板的净面积应满足支承结构材料的局部受压要求，其厚度应满足底板在支座竖向反力作用下的抗弯要求，且不宜小于 12mm；

5 支座节点底板的锚孔孔径应比锚栓直径大 10mm 以上，并应考虑适应支座节点水平位移的要求；

6 支座节点锚栓按构造要求设置时，其直径可取 20mm~25mm，数量可取 2~4 个；受拉支座的锚栓应经计算确定，锚固长度不应小于 25 倍锚栓直径，并应设置双螺母；

7 当支座底板与基础面摩擦力小于支座底部的水平反力时应设置抗剪键，不得利用锚栓传递剪力；

8 支座节点竖向支承板与螺栓球节点焊接时，应将螺栓球球体预热至 150℃~200℃，以小直径焊条分层、对称施焊，并应保温缓慢冷却。

**5.6.6** 球形支座板的材料宜用铸铝，单面弧形支座板也可用厚钢板加工而成。板式橡胶支座应采用由多层橡胶片与薄钢板相间粘合而成的橡胶垫板，其材料性能及计算构造要求可按本规程附录 A 确定。

**5.6.7** 压力支座节点中可增设与埋头螺栓相连的过渡铝板，并应与支座预埋铝板焊接（图 5.6.6）。

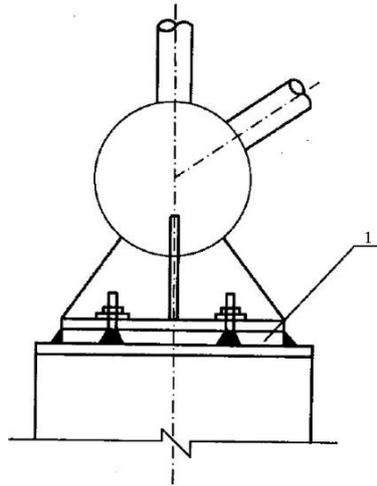


图 5.6.7 采用过渡铝板的压力支座节点

1——过渡铝板

## 5.7 螺栓环节点

**5.7.1** 螺栓环节点（图 5.7.1）由中心环柱体、不锈钢角码、不锈钢螺栓、虎克螺栓（抽芯铆钉）、C 形或 H 形铝合金连接件等组成，可用于连接铝合金空间网格结构的矩形或 H 形截面铝合金杆件。

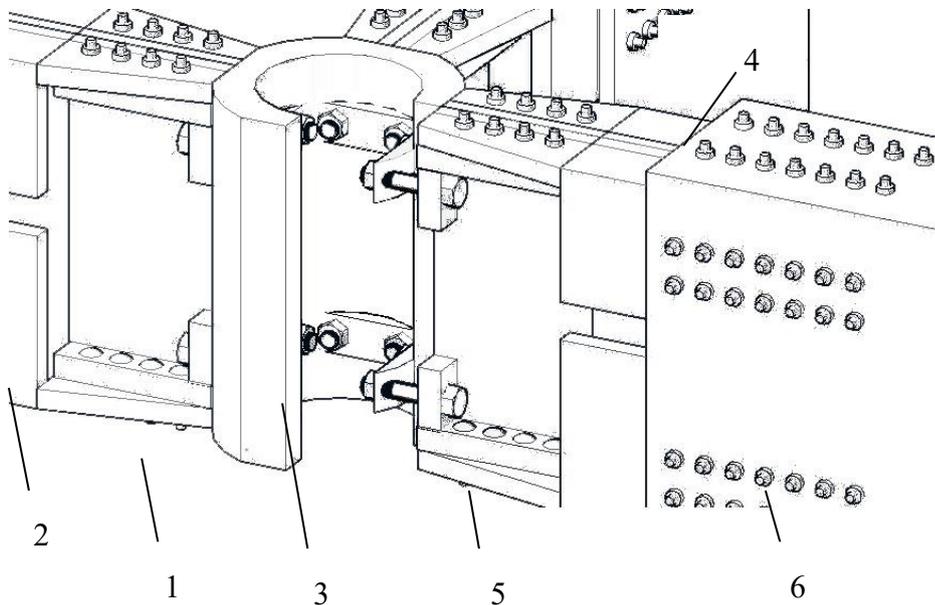


图 5.7.1 螺栓环节点示意图

1——中心环柱体； 2——不锈钢角码； 3——不锈钢螺栓；

4——虎克螺栓； 5——C 形铝合金板； 6——矩形截面杆件

**5.7.2** 螺栓环节点在空间网格结构中可传递杆件轴力、弯矩以及剪力。设计时宜采用有限元

分析验证连接节点的安全性及有效性，宜进行试验验证。

**5.7.3** 中心环柱体与杆件应使用铝合金材料，节点与杆件之间宜使用不锈钢螺栓进行连接。

**5.7.4** 用于制造螺栓环节点的中心环柱体、不锈钢角码、不锈钢螺栓、虎克螺栓、C形或H形铝合金连接件可按表 5.7.4 的规定选用，并应符合相应标准技术条件的要求。

**表 5.7.4 螺栓环节点零件及杆件材料**

| 零件名称   | 推荐材料          | 材料标准编号  | 备注                       |
|--------|---------------|---|--------------------------|
| 中心环柱体  | 6061-T6       | 《工业用铝及铝合金热挤压型材》GB/T 6892<br>《铝及铝合金挤压型材尺寸偏差》GB/T 14846 | 选用厚壁铝管，机加工               |
| 不锈钢角码  | 304(0Cr18Ni9) | 《不锈钢冷轧钢板和钢带》GB/T 3280                                 | 机加工打孔                    |
| 不锈钢螺栓  | 304(0Cr18Ni9) | 《紧固件机械性能不锈钢螺栓》GB/T 3098                               | 螺纹规格 M10~M36             |
| 虎克螺栓   | 304(0Cr18Ni9) | 《紧固件机械性能抽芯铆钉》GB/T 3098.19                             | 虎克螺栓应采用不锈钢材料，其直径不宜小于 3mm |
| 铝合金连接件 | 6061-T6       | 《铝及铝合金轧制板材》GB/T 3880                                  | C形铝合金连接件可由板材冷弯加工制作       |

**5.7.5** 铝合金环柱体外径应保证相邻连接件在环柱体外侧不相碰并应满足连接件接触面的要求。铝合金环柱体的轴向承载力可按下式进行计算：

$$N_{\text{hub}} = 2Ht_h^2 f / D_h \quad (5.7.5)$$

式中： $H$ ——环柱体高度；

$t_h$ ——环柱体的厚度；

$D_h$ ——环柱体外接圆直径；

$F$ ——铝合金材料抗拉强度设计值。

**5.7.6** 铝合金环柱体的平面外抗弯承载力可按下式进行计算：

$$M_{\text{hub}} = t_h^2 f S \left[ \frac{(3H - 2S)}{3D_h} + \frac{(H - S)^2}{4SD_h} + \frac{\sqrt{3}\pi}{12} \right] \quad (5.7.6)$$

式中： $S$ ——螺栓间距。

**5.7.7** 当按照（5.7.5）、（5.7.6）设计得到的环柱体厚度过大时，可考虑在环柱体内部设置环

向加劲肋。节点受压时，环向加劲肋最大宽厚比应满足《铝合金结构设计规范》受压板件宽厚比限值的相关规定。

**5.7.8** 铝合金环柱体的弹性轴向刚度和转动刚度可分别按下式进行计算：

$$K_{\text{hub}}^N = \frac{16\pi E H t_h^3}{3D_h^3(\pi^2 - 8)} \quad (5.7.8-1)$$

$$K_{\text{hub}}^M = \frac{4\pi E H^3 t_h^3}{9D_h^3(\pi^2 - 8)} \quad (5.7.8-2)$$

式中： $E$ ——铝合金材料弹性模量。

**5.7.9** 应对不锈钢角码进行抗拉强度及抗弯强度验算。

**5.7.10** 应按照《铝合金结构设计规范》、《GB3098.19-2004-T 紧固件机械性能 抽芯铆钉》的相关规定，对不锈钢螺栓、虎克螺栓的连接强度进行验算。

**5.7.11** C形或H形铝合金连接按照与杆件等强度原则进行设计。节点受压时，C形或H形铝合金连接件应满足《铝合金结构设计规范》受压板件宽厚比限值的相关规定。

**5.7.12** 螺栓环节点的设计、加工制作、安装验收等均应满足现行国家标准《铝合金结构设计规范》GB 50429 的规定。

## 6 制作安装与防护

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 铝合金空间网格结构使用材料的品种、规格、性能等应符合设计和国家现行标准的规定。材料的抽样复验应符合现行国家标准《铝合金结构工程施工质量验收规范》GB50576 的规定。

**6.1.2** 铝合金空间网格结构工程施工前，施工单位应编制施工组织设计，并应根据施工方案对安装过程中结构的强度和稳定性进行验算。

**6.1.3** 铝合金空间网格结构零部件出厂应具备下列资料：

- 1 设计图纸、设计更改文件、施工详图、材料质量证明书和试验报告。
- 2 零部件检验记录，不锈钢螺栓或镀锌高强度螺栓质量检验资料。
- 3 零部件产品合格证、试验报告和分项工程质量检验评定资料。
- 4 试拼装几何尺寸检查记录。

**6.1.4** 铝合金空间网格结构的安装方法，应根据结构特点，在保证质量、安全的前提下，结合进度、经济性及现场施工条件综合确定。

**6.1.5** 铝合金空间网格结构安装方法确定后，应对各施工工况进行验算，对有影响的杆件和节点应进行调整。安装用支架拆除前应对相应各拆除工况进行验算。

**6.1.6** 铝合金空间网格结构螺栓球节点中的不锈钢螺栓或镀锌高强度螺栓拧紧后，应对螺栓的拧紧情况逐一检查，确保螺栓拧紧到位。

**6.1.7** 铝合金空间网格结构应在安装完毕、形成整体结构后再进行屋面板、马道及其他吊挂构件的安装，如确需提前安装附件需进行安装工况的分析计算。

**6.1.8** 铝合金空间网格结构在制作、运输与安装过程中应确保构件不变形、表面不受损伤。

**6.1.9** 铝合金空间网格结构制作、安装、验收及土建放线使用的计量器具应统一，并按国家有关计量法规的规定进行标定，且在有效期内。

### 6.2 制作与预拼装

**6.2.1** 铝合金空间网格结构制作单位应根据设计图编制施工详图，当需要修改设计图时，须向原设计单位申报，经设计人签字确认后才能修改。

**6.2.2** 铝合金空间网格结构杆件和节点应在专用设备或胎架上进行制作与组装，其质量应符合

合设计和现行国家标准《铝合金结构工程施工质量验收规范》GB50576 的规定。

**6.2.3** 铝合金空间网格结构的杆件不宜拼接，当杆件长度不足时，应重新下料。

**6.2.4** 铝合金空间网格结构杆件宜采用铝型材切割机或专用车床下料。杆件下料允许偏差应符合表 6.2.4 的规定。

**表 6.2.4 杆件下料允许偏差 (mm)**

| 项目        | 允许偏差                | 检验方法              |
|-----------|---------------------|-------------------|
| 长度        | $\pm 1.0$           | 用测长机或标准量块和游标卡尺检查  |
| 端面对管轴的垂直度 | $0.005r$            | 用百分表和 V 形块检查      |
| 弯曲矢高      | $L/1500$ ，且不应大于 5.0 | 用拉线、吊线和游标卡尺或测长机检查 |
| 管口曲线      | 0.5                 | 用套模和游标卡尺检查        |

注：r 为杆件半径；L 为杆件长度。

**6.2.5** 螺栓球节点铝合金空间网格结构制作应符合下列规定：

**1** 螺栓球宜采用铝棒机加工而成，加工后的球表面应平顺圆滑，不得有明显的车削痕迹或裂纹等缺陷。

**2** 螺栓孔应采用数控车床或数控加工中心加工；螺纹应采用专用丝锥攻丝，螺纹尺寸应符合现行国家标准《普通螺纹基本尺寸》GB/T196 的规定，螺纹允许偏差应符合现行国家标准《普通螺纹公差》GB/T197 中 6H 级精度的规定。螺栓球加工允许偏差应符合表 6.2.5-1 的规定。

表 6.2.5-1 螺栓球加工允许偏差

| 项目                        |              | 允许偏差         | 检验方法             | 图例  |
|---------------------------|--------------|--------------|------------------|---|
| 直径<br>(mm)                | $D \leq 120$ | +1.0<br>-0.5 | 用卡尺和游标卡尺<br>检查   | <p>其余 12.5</p> <p>D - 螺栓球外径<br/>r - 铣平面半径</p> |
|                           | $D > 120$    | +2.0<br>-1.0 |                  |   |
| 圆度<br>(mm)                | $D \leq 120$ | 1.0          | 用卡尺和游标卡尺<br>检查   |   |
|                           | $D > 120$    | 1.5          |                  |   |
| 同一轴线上<br>两铣平面平<br>行度 (mm) | $D \leq 120$ | 0.1          | 用百分表和 V 形块<br>检查 |   |
|                           | $D > 120$    | 0.2          |                  |   |
| 铣平面距球中心距离 a<br>(mm)       |              | $\pm 0.1$    | 用游标卡尺检查          |   |
| 相邻两螺纹孔夹角 $\theta$         |              | $\pm 30'$    | 用分度头检查           |   |
| 铣平面与螺栓孔轴线垂直<br>度 (mm)     |              | $0.5\%r$     | 用百分表检查           |   |

3 螺栓球加工后应进行抗拉强度试验，试验方法应符合设计文件或可参照国家现行标准《钢网架螺栓球节点》JG/T10 的规定。

4 杆件连接用螺栓可采用不锈钢螺栓或镀锌高强度螺栓。不锈钢螺栓应符合《紧固件机械性能不锈钢紧定螺钉》GB/T3098.16 的要求；镀锌高强度螺栓形式与尺寸应符合《钢网架螺栓球节点高强度螺栓》GB/T16939 的要求，其性能等级按 10.9S 选用。

5 不锈钢螺栓和镀锌高强度螺栓的螺纹应符合《普通螺纹基本尺寸》GB/T196 的规定，螺纹允许偏差应符合《普通螺纹公差》GB/T197 中 6g 级的规定。

6 封板与铝合金管宜采用挤压或焊缝连接，连接强度应符合设计要求。杆件加工允许偏差应符合表 6.2.5-2 的规定。

表 6.2.5-2 杆件加工允许偏差 (mm)

| 项目            | 允许偏差                | 检验方法              |
|---------------|---------------------|-------------------|
| 长度            | $\pm 1.0$           | 用测长机或标准量块和游标卡尺检查  |
| 端面对管轴的垂直度     | $0.005r$            | 用百分表和 V 形块检查      |
| 弯曲矢高          | $L/1500$ ，且不应大于 5.0 | 用拉线、吊线和游标卡尺或测长机检查 |
| 两端孔中心与杆件轴线同轴度 | 1.0                 | 用百分表和芯棒检查         |

注：r 为杆件半径；L 为杆件（含封板）长度。

7 杆件加工后，应进行抗拉强度试验，试验方法应符合设计文件或可参照国家现行标准《钢网架螺栓球节点》JG/T10 的规定。

8 封板宜采用铝棒机加工而成。与杆件挤压连接的平行螺纹加工应满足设计图纸要求，加工后的封板表面不得有明显的车削痕迹或裂纹等缺陷。封板加工尺寸允许偏差应符合表 6.2.5-3 的规定。

表 6.2.5-3 封板加工允许偏差 (mm)

| 项目   | 允许偏差         | 检验方法       |
|------|--------------|------------|
| 大径 D | +1.0<br>-0.5 | 用卡尺和游标卡尺检查 |
| 厚度 h | -0.2<br>+0.5 | 用卡尺和游标卡尺检查 |
| 同轴度  | 0.2          | 用百分表检查     |
| 图例   |              |            |
|      |              |            |

9 套筒宜采用六角铝棒加工。套筒的六角尺寸应符合扳手开口尺寸或国家相关标准的规定。加工后的套筒表面不得有明显的车削痕迹或裂纹等缺陷。套筒加工尺寸允许偏差应符合表 6.2.5-4 的规定。

表 6.2.5-4 套筒加工允许偏差 (mm)

| 项目         | 允许偏差      | 检验方法       | 图例 |
|------------|-----------|------------|----|
| 长度         | $\pm 0.2$ | 用卡尺和游标卡尺检查 |    |
| 两端平面与轴线垂直度 | $0.5\%r$  | 用百分表检查     |    |
| 两端面平行度     | $\pm 0.2$ | 用百分表检查     |    |

10 紧固螺钉直径可取不锈钢螺栓或镀锌高强度螺栓直径的 0.16~0.18 倍，但不宜小于 M3，一般可取 M5~M10。紧固螺钉宜采用数控仪表车床加工。

**6.2.6 板式节点铝合金空间网格结构制作应符合下列规定：**

1 节点应在专用设备或胎架上进行制作与组装，加工质量应符合设计和现行国家标准《铝合金结构工程施工质量验收规范》GB50576 的规定。

2 节点零部件切割宜采用机械方法加工，切割面或剪切面应无裂纹、夹渣和大于 0.5mm 的缺棱。零部件切割尺寸允许偏差应符合表 6.2.6-1 的规定。

**表 6.2.6-1 切割尺寸允许偏差 (mm)**

| 检查项目      | 允许偏差 |
|-----------|------|
| 零部件的宽度、长度 | ±0.5 |
| 切割面平面度    | 0.3  |
| 割纹深度      | 0.3  |
| 局部缺口深度    | 0.5  |

3 节点加工和组装允许偏差应符合表 6.2.6-2 的规定。

**表 6.2.6-2 板式节点加工和组装允许偏差**

| 项目             |       | 允许偏差             | 检查方法        |
|----------------|-------|------------------|-------------|
| 零件宽度、长度(mm)    |       | ±0.5             | 用钢卷尺或游标卡尺检查 |
| 节点板平面度(mm)     |       | B/1000 且不应大于 1.0 | 用百分表检查      |
| 节点板不同面的夹角      |       | ±30′             | 用分度头或角度尺检查  |
| 节点板上的螺栓孔距离(mm) | 一组内   | ±0.2             | 用游标卡尺检查     |
|                | 组与组之间 | ±0.5             | 用游标卡尺检查     |

注：B 为节点板边长。

4 杆件加工尺寸允许偏差应符合表 6.2.6-3 的规定。

**表 6.2.6-3 杆件加工尺寸允许偏差**

| 项目        |       | 允许偏差             | 检查方法              |
|-----------|-------|------------------|-------------------|
| 长度(mm)    |       | ±1.0             | 用测长机或标准量块和游标卡尺检查  |
| 孔距(mm)    | 一组内   | ±0.2             | 用游标卡尺检查           |
|           | 组与组之间 | ±0.5             | 用钢卷尺或游标卡尺检查       |
| 杆端平面度(mm) |       | 0.3              | 用百分表检查            |
| 杆端角度      |       | ±30′             | 用分度头或角度尺检查        |
| 弯曲矢高(mm)  |       | L/1500 且不应大于 5.0 | 用拉线、吊线和游标卡尺或测长机检查 |

注：L 为杆件长度。

**6.2.7 嵌入式毂节点铝合金空间网格结构制作应符合下列规定：**

1 杆端嵌入件和毂体宜采用铝棒并用数控机床进行加工。杆端嵌入件加工尺寸允许偏差应符合表 6.2.7-1 的规定；毂体加工尺寸允许偏差应符合表 6.2.7-2 的规定。

**表 6.2.7-1 杆端嵌入件加工允许偏差**

| 公差等级 | 尺寸 (mm) |        |        |        |        |         |          |
|------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|----------|
|      | ≤10     | >10~16 | ≥16~25 | >25~40 | ≥40~63 | >63~100 | ≥100~160 |
| CT4  | 0.26    | 0.28   | 0.30   | 0.32   | 0.36   | 0.40    | 0.44     |
| CT6  | 0.52    | 0.54   | 0.58   | 0.64   | 0.70   | 0.78    | 0.88     |

**表 6.2.7-2 毂体加工允许偏差**

| 项 目                         | 允许偏差 |
|-----------------------------|------|
| 毂体直径 $d_h$ ，毂体高度 $h_h$ (mm) | -0.5 |
| 毂体嵌入槽圆孔直径 $d'_{ht}$ (mm)    | +0.2 |
| 嵌入槽圆孔平行度 (mm)               | ∅0.2 |
| 相邻两嵌入槽轴线间夹角 $\theta$        | ±20' |
| 两端面平行度 (mm)                 | 0.5  |
| 毂体端面跳动 (mm)                 | 0.3  |

2 杆件与杆端嵌入件组装后允许偏差应符合表 6.2.7-3 的规定。

**表 6.2.7-3 杆件与杆端嵌入件组装后允许偏差**

| 项 目          | 允许偏差             |
|--------------|------------------|
| 杆件组焊后长度 (mm) | ±0.8             |
| 杆端嵌入件倾角      | ±20'             |
| 杆件两端杆端嵌入件扭角  | ±20'             |
| 杆件弯曲矢高 (mm)  | L/1500，且不应大于 5.0 |

注：L 为杆件长度。

**6.2.8 铸铝节点加工质量应符合设计与现行国家标准《铝合金结构工程施工质量验收规范》GB50576 的规定。**

**6.2.9 铝合金空间网格结构支座与支托制作应符合下列规定：**

1 支座底板、筋板等零部件切割宜采用机械方法加工，铝合金管宜采用铝型材切割机下料、剖口；支座应在专用胎架上进行组装，加工质量应符合现行国家标准《铝合金结构工程

施工质量验收规范》GB50576 的规定。

2 支托板、筋板等零部件切割宜采用机械方法加工下料，铝合金管宜采用铝型材切割机下料、剖口；支托宜在专用胎架上进行组装，加工质量应符合现行国家标准《铝合金结构工程施工质量验收规范》GB50576 的规定。

3 支座销轴应采用数控机床加工，与之相配的支座板应采用机械方法加工，加工尺寸允许偏差应符合表 6.2.9 的规定。

**表 6.2.9 销轴、支座板尺寸允许偏差(mm)**

| 项 目             | 允许偏差         |
|-----------------|--------------|
| 销轴直径(d)         | ±0.2         |
| 销轴长度            | ±0.5         |
| 支座板孔径           | +1.0<br>+0.2 |
| 支座竖板孔同轴度(与销轴相配) | 0.5          |
| 支座竖板平行度         | 0.5          |

**6.2.10 铝合金空间网格结构试拼装应符合下列规定：**

1 铝合金空间网格结构产品出厂前，对重大、复杂工程宜进行试拼装，试拼装可采取单元试拼装、部分结构试拼装或整体结构试拼装。

2 试拼装用的场地应平整，并应满足拼装承载力要求。

3 试拼装所用的胎架、支承凳或平台应测量找平，检测时应拆除全部临时固定和拉紧装置。

4 所有进行试拼装的构件应符合质量要求，相同构件应可互换，并应在自由状态下进行试拼装。

5 试拼装时应采取措施保护好所有构件表面不损伤。

6 试拼装允许偏差应符合表 6.2.10 的规定。

**表 6.2.10 铝合金空间网格结构试拼装允许偏差 (mm)**

| 构件类型 | 项 目         | 允许偏差           | 检验方法         |          |
|------|-------------|----------------|--------------|----------|
| 桁架   | 跨度最外侧支承面间距离 | ±5.0           | 用钢尺检查        |          |
|      | 接口处截面错位     | t/10 且不应大于 2.0 | 用卡尺检查        |          |
|      | 拱度          | 设计要求起拱         | ±L/5000      | 用拉线和钢尺检查 |
|      |             | 设计未要求起拱        | +L/2000<br>0 |          |

|      |           |                   |          |
|------|-----------|-------------------|----------|
|      | 节点处杆件轴线错位 | 2.0               | 用钢尺检查    |
| 管构件  | 构件长度      | ±5.0              | 用钢尺检查    |
|      | 弯曲矢高      | L/1500, 且不应大于 5.0 | 用拉线和钢尺检查 |
|      | 对口错边      | t/10, 且不应大于 2.0   | 用卡尺检查    |
| 空间单元 | 单元长、宽     | ±5.0              | 用钢尺检查    |
|      | 单元对角线     | ±7.0              | 用钢尺检查    |
|      | 单元弯曲矢高    | L/1500, 且不应大于 5.0 | 用拉线和钢尺检查 |
|      | 接口错边      | t/10 且不应大于 2.0    | 用卡尺检查    |
|      | 节点处杆件轴线错位 | 2.0               | 用钢尺检查    |

注：L 为长度、跨度，h 为截面高度，t 为板、壁厚度。

### 6.3 包装与运输

**6.3.1** 铝合金空间网格结构杆件、节点及其零配件宜采用装箱包装。铝合金杆件、节点及其零配件装箱时，每个构件或零配件之间应铺设软性材料，并做好防水保护。

**6.3.2** 包装箱上应有标志，标志应准确、清晰，内容应完整；随箱应带有装箱清单。

**6.3.3** 铝合金空间网格结构出口产品包装应符合中国海关和进口国的有关规定；发货标志如无特殊要求时，宜采用中、英文对照。

**6.3.4** 铝合金空间网格结构成品装车时，应摆放平整，绑扎牢固。

**6.3.5** 铝合金空间网格结构成品运输过程中应做好防变形、防丢失、防雨雪和防污染措施。

### 6.4 安装

**6.4.1** 铝合金空间网格结构安装前，应对所有进场构件的规格、数量、质量证明书、产品合格证和试验报告等资料进行检查。

**6.4.2** 铝合金空间网格结构构件应按品种和规格堆放在专用架子或垫木上，在室外堆放时，应采取隔离保护措施，防止表面污染，如有污染，应在安装前清除。

**6.4.3** 安装前应复核和验收支座预埋板或预埋锚栓的平面位置、水平度和标高，并应符合表 6.4.3 的规定。

表 6.4.3 支承面顶板、支座锚栓位置的允许偏差 (mm)

| 项 目   |       | 允许偏差              | 检验方法       |
|-------|-------|-------------------|------------|
| 支承面顶板 | 轴线位置  | 10.0              | 经纬仪和钢尺     |
|       | 顶面标高  | ±2.0              | 全站仪或水准仪和钢尺 |
|       | 顶面水平度 | L/1000, 且不应大于 2.0 | 水准仪和钢尺     |
| 支座锚栓  | 中心偏移  | 5.0               | 经纬仪和钢尺     |

注：L 为顶面测量水平度时两个测点间的距离。

**6.4.4** 铝合金空间网格结构安装时，应确保构件表面不受损伤。

**6.4.5** 铝合金空间网格结构可采用高空散装法、分条分块安装法、滑移法、整体吊装法等方法进行安装，具体安装方法和要求可参照《空间网格结构技术规程》JGJ7 的相关规定。

**6.4.6** 铝合金空间网格结构安装校正时应考虑日照、环境温度等因素对结构变形的影响；施工单位和监理单位宜在相同的天气条件和时间段进行测量验收。

**6.4.7** 施工用临时支承架，应验算其强度、整体稳定性及刚度，验算结果应符合相关标准的规定。

**6.4.8** 在临时支承架拆除过程中，应保证结构内力和变形满足设计要求。

**6.4.9** 铝合金空间网格结构安装应符合下列规定：

1 螺栓球节点铝合金空间网格结构单元安装顺序宜为：先安装下弦杆及下弦球，然后安装腹杆及上弦球，最后安装上弦杆。应确保单元安装过程中的内力和变形满足设计要求。

2 采用小拼单元或杆件直接在高空拼装时，宜采用吊装带吊装小拼单元或构件，确保吊装过程中结构或构件不受损伤。

3 安装用临时支承架应平整、坚固，并应有可调节措施保证节点坐标符合设计要求。

4 当在施工阶段因自重及其他荷载作用，发生超过设计文件或国家现行标准规定的变形限值；或设计文件有预变形要求时，应在施工过程中采取预变形措施。

5 应采取措施确保拼装精度满足设计和国家现行标准的规定。

**6.4.10** 铝合金空间网格结构安装过程应及时形成空间稳定体系，并应随时进行校正与固定（或临时固定）。

**6.4.11** 铝合金空间网格结构不得在六级及以上大风、冰雪等天气情况下进行安装。

## 6.5 防腐

**6.5.1** 铝合金空间网格结构与其他金属材料（不锈钢和镀锌构件除外）或含酸性、碱性的非金属材料接触、紧固时，宜采用隔离材料。

**6.5.2** 当铝合金空间网格结构构件表面进行防腐处理时，铝合金构件宜采用阳极氧化、电泳涂漆、粉末喷涂或氟碳漆喷涂等防腐措施，并应符合现行国家标准《铝合金建筑型材》GB5237的规定。钢构件表面处理应符合设计和现行国家标准《钢结构工程施工规范》GB50755及《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205的规定。

**6.5.3** 铝合金空间网格结构构件表面进行维护清洗时应符合下列规定：

- 1 不得使用对铝合金保护膜有腐蚀作用的清洗剂，清洗剂应在有效期限内。
- 2 不宜用不同的清洗剂同时清洗同一铝合金构件。
- 3 不宜用滴、流等方式清洗铝合金构件。
- 4 不得在构件、节点等部位有残留的清洗剂。

## 6.6 防火、隔热

**6.6.1** 铝合金空间网格结构的耐火极限要求应符合设计和现行国家标准《建筑设计防火规范》GB50016的规定。

**6.6.2** 铝合金空间网格结构防火可采用设置水喷淋系统等措施进行防护。

**6.6.3** 铝合金空间网格结构的表面长期受辐射热温度达 100℃或以上时，应加隔热层或采用其他有效的隔热措施。

## 7 验收

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 本章适用于建筑工程中的铝合金空间网格结构安装工程的质量验收。铝材的抽样、复验应符合现行国家标准《铝合金结构工程施工质量验收规范》GB50576 的相关规定。

**7.1.2** 铝合金空间网格结构安装工程应按变形缝、施工段或空间刚度单元划分成一个或若干个检验批。

**7.1.3** 铝合金空间网格结构安装检验批应在进场验收和铆接连接、紧固件连接、制作等分项工程验收合格的基础上进行验收。

**7.1.4** 铝合金空间网格结构安装偏差的检测，应在结构形成空间刚度单元并连接固定后进行。

**7.1.5** 铝合金空间网格结构安装工程的竣工验收，宜分两个阶段进行：

1 在每个流水段范围内全部构件安装、校正、铆接、栓接完毕并自检合格后，作隐蔽工程验收；

2 全部铝合金结构安装、校正、铆接、栓接完成并经隐蔽工程验收合格后，作结构安装工程的竣工验收。

### 7.2 支承面允许偏差

**7.2.1** 铝合金空间网格结构支座定位轴线、支座锚栓的规格应符合设计要求。

检查数量：按支座数抽查 10%，且不应少于 4 处。

检验方法：用经纬仪和钢尺实测。

**7.2.2** 支承面顶板的位置、标高、水平度以及支座锚栓位置的允许偏差应符合表 7.2.2 的规定。

检查数量：按支座数抽查 10%，且不应少于 4 处。

检验方法：用全站仪或经纬仪、水准仪、钢尺实测。

**表 7.2.2 支承面顶板、支座锚栓位置的允许偏差 (mm)**

| 检查项目  |       | 允许偏差            |
|-------|-------|-----------------|
| 支承面顶板 | 位置    | 10.0            |
|       | 顶面标高  | 0<br>-3.0       |
|       | 顶面水平度 | L/1000 且不大于 2.0 |
| 支座锚栓  | 中心偏移  | 5.0             |

注：L 为顶面测量水平度时两个测点间的距离。

**7.2.3** 支承垫块的种类、规格、摆放位置和朝向，必须符合设计要求和国家现行有关标准的规定。橡胶垫块与刚性垫块之间或不同类型刚性垫块之间不得互换使用。

检查数量：按支座数抽查 10%，且不应少于 4 处。

检验方法：观察和用钢尺实测。

**7.2.4** 铝合金空间网格结构支座锚栓的紧固应符合设计要求。

检查数量：按支座数抽查 10%，且不应少于 4 处；

检验方法：观察检查。

**7.2.5** 支座锚栓尺寸的允许偏差应符合表 7.2.5 的规定。支座锚栓的螺纹应有保护措施。

检查数量：按支座数抽查 10%，且不应少于 4 处。

检验方法：观察和用钢尺实测。

**表 7.2.5 支座锚栓尺寸的允许偏差 (mm)**

| 项目     | 允许偏差  |
|--------|-------|
| 锚栓露出长度 | +30.0 |
|        | 0     |
| 螺纹长度   | +30.0 |
|        | 0     |

### 7.3 总拼和安装允许偏差

**7.3.1** 小拼单元的允许偏差应符合表 7.3.1 的规定。检查数量按单元数抽查 5%，且不应少于 5 个。检验方法用钢尺和拉线等实测。

表 7.3.1 小拼单元的允许偏差 (mm)

| 检查项目           | 允许偏差                   |
|----------------|------------------------|
| 节点中心偏移         | 2.0                    |
| 杆件交汇节点与杆件中心的偏移 | 1.0                    |
| 杆件轴线的弯曲矢高      | $L_1/1000$ , 且不应大于 5.0 |
| 节间距离           | $\pm 2.0$              |
| 高度             | $\pm 2.0$              |
| 上弦杆对角线长度       | $\pm 3.0$              |

注:  $L_1$  为杆件长度。

**7.3.2** 建筑结构安全等级为一级, 且设计有要求时, 应按下列项目进行节点承载力试验:

1 应按设计指定的节点及其匹配的铝合金杆件连接成试件, 进行轴线拉、压承载力试验, 其试验破坏荷载值大于或等于 1.6 倍设计承载力为合格;

2 应按设计指定的节点最大螺栓孔螺纹进行抗拉强度保证荷载试验, 当达到螺栓的设计承载力时, 螺孔、螺纹及螺帽仍完好无损为合格。

检查数量: 每项试验做 3 个试件。

检验方法: 检查试验报告。

**7.3.3** 铝合金空间网格结构总拼完成后及屋面工程完成后应分别测量其挠度值, 且所测的挠度值不应超过相应设计值的 1.15 倍。

检查数量: 跨度 24m 及以下铝合金空间网格结构测量下弦中央一点; 跨度 24m 以上铝合金空间网格结构测量下弦中央一点及各向下弦跨度的四等分点。

检查方法: 用钢尺和水准仪实测。

**7.3.4** 铝合金空间网格结构安装完成后, 其节点及杆件表面应干净, 不应有明显的疤、泥沙和污垢等缺陷。

检查数量: 按节点及杆件数抽查 5%, 且不应少于 10 个节点。

检查方法: 观察检查。

**7.3.5** 铝合金空间网格结构安装完成后, 其允许偏差应符合表 7.3.5 的规定。

检查数量: 全数检查。

检验方法: 用钢尺、经纬仪水准仪实测。

表 7.3.5 铝合金空间网格结构安装的允许偏差 (mm)

| 检查项目         | 允许偏差                                      | 检验方法      |
|--------------|---|-----------|
| 纵向、横向长度      | L/2000, 且不应大于 30.0<br>-L/2000, 且不应大于-30.0 | 用钢尺实测     |
| 支座中心偏移       | L/3000, 且不应大于 30.0                        | 用钢尺和经纬仪实测 |
| 周边支承结构相邻支座高差 | $L_1/400$ , 且不应大于 15.0                    | 用钢尺和水准仪实测 |
| 支座最大高差       | 30.0                                      |           |
| 多点支承结构相邻支座高差 | $L_1/800$ , 且不应大于 30.0                    |           |

注: L 为纵向、横向长度,  $L_1$  为相邻支座间距。

## 7.4 交验

**7.4.1** 铝合金空间网格结构的制作、拼装和安装的每道工序完成后均应进行检查, 每道工序的检查均应作出记录, 并汇总存档。安装完成后必须进行交工验收。空间网格结构的各种节点、杆件、高强度螺栓及其他零配件均应有出厂合格证及检验记录。

**7.4.2** 交工验收时, 应检查铝合金空间网格结构的各边长度、支座的中心偏移和高度偏差, 其允许偏差应符合表 7.3.5 的规定。

**7.4.3** 铝合金空间网格结构安装完成后, 应对挠度进行测量。测量点的位置可由设计单位确定。当设计无要求时, 对跨度为 24m 及以下的, 应测量跨中的挠度; 对跨度为 24m 以上的, 应测量跨中及跨度方向四等分点的挠度。所测得的挠度值不应超过现荷载条件下挠度计算值的 1.15 倍。

**7.4.4** 铝合金空间网格结构工程验收, 应具备下列文件和记录:

- 1 铝合金空间网格结构施工图、设计变更文件、竣工图;
- 2 铝合金空间网格结构制作安装过程中, 业主、设计单位、制作厂、安装单位达成的各种技术文件;
- 3 制作合格证;
- 4 施工组织设计;
- 5 所用铝材及其他连接材料的质量证明文件、试验报告和技术资料;
- 6 零部件产品合格证和试验报告;
- 7 焊接质量检验资料;
- 8 总拼就位后几何尺寸偏差、支座高度偏差和挠度测量记录;
- 9 隐蔽工程验收记录;

## 10 使用说明书。

## 附录 A 常用材料性能指标

### 表 A.0.1 常用材料室温拉伸力学性能

| 牌号    | 状态 | 壁厚<br>mm            |                      | 室温拉伸试验结果          |                                 |           |            |
|-------|----|---------------------|----------------------|-------------------|---------------------------------|-----------|------------|
|       |    |                     |                      | 抗拉强度 $R_m$<br>MPa | 规定非比例<br>延伸强度 $R_{p0.2}$<br>MPa | 断后伸长率 / % |            |
|       |    |                     |                      |                   |                                 | $A$       | $A_{50mm}$ |
|       |    |                     |                      | 不 小 于             |                                 |           |            |
| 6A02  | T4 | —                   |                      | 180               | —                               | 12        | 10         |
|       | T6 | —                   |                      | 295               | 230                             | 10        | 8          |
| 6101A | T6 | $\leq 50.00$        |                      | 200               | 170                             | 10        | 8          |
| 6101B | T6 | $\leq 15.00$        |                      | 215               | 160                             | 8         | 6          |
| 6005  | T1 | $\leq 12.50$        |                      | 170               | 100                             | —         | 11         |
|       | T5 | $\leq 6.30$         |                      | 250               | 200                             | —         | 7          |
|       |    | $> 6.30 \sim 25.00$ |                      | 250               | 200                             | 8         | 7          |
|       | T4 | $\leq 25.00$        |                      | 180               | 90                              | 15        | 13         |
|       | T6 | 实心<br>型材            | $\leq 5.00$          | 270               | 225                             | —         | 6          |
|       |    |                     | $> 5.00 \sim 10.00$  | 260               | 215                             | —         | 6          |
|       |    |                     | $> 10.00 \sim 25.00$ | 250               | 200                             | 8         | 6          |
|       |    | 空心<br>型材            | $\leq 5.00$          | 255               | 215                             | —         | 6          |
|       |    |                     | $> 5.00 \sim 15.00$  | 250               | 200                             | 8         | 6          |
|       |    |                     |                      |                   |                                 |           |            |
| 6005A | T5 | $\leq 6.30$         |                      | 250               | 200                             | —         | 7          |
|       |    | $> 6.30 \sim 25.00$ |                      | 250               | 200                             | 8         | 7          |
|       | T4 | $\leq 25.00$        |                      | 180               | 90                              | 15        | 13         |
|       | T6 | 实心<br>型材            | $\leq 5.00$          | 270               | 225                             | —         | 6          |
|       |    |                     | $> 5.00 \sim 10.00$  | 260               | 215                             | —         | 6          |
|       |    |                     | $> 10.00 \sim 25.00$ | 250               | 200                             | 8         | 6          |
|       |    | 空心<br>型材            | $\leq 5.00$          | 255               | 215                             | —         | 6          |
|       |    |                     | $> 5.00 \sim 15.00$  | 250               | 200                             | 8         | 6          |
|       |    |                     |                      |                   |                                 |           |            |
| 6106  | T6 | $\leq 10.00$        |                      | 250               | 200                             | —         | 6          |
| 6008  | T4 | $\leq 10.00$        |                      | 180               | 90                              | 15        | 13         |

| 牌号          | 状态  | 壁厚<br>mm    |             | 室温拉伸试验结果          |                                 |           |            |
|-------------|-----|-------------|-------------|-------------------|---------------------------------|-----------|------------|
|             |     |             |             | 抗拉强度 $R_m$<br>MPa | 规定非比例<br>延伸强度 $R_{p0.2}$<br>MPa | 断后伸长率 / % |            |
|             |     |             |             |                   |                                 | $A$       | $A_{50mm}$ |
|             |     |             |             | 不 小 于             |                                 |           |            |
|             | T6  | 实心          | ≤5.00       | 270               | 225                             | —         | 6          |
|             |     | 型材          | >5.00~10.00 | 260               | 215                             | —         | 6          |
|             |     | 空心          | ≤5.00       | 255               | 215                             | —         | 6          |
|             |     | 型材          | >5.00~10.00 | 250               | 200                             | —         | 6          |
| 6351        | O   | —           |             | ≤160              | ≤110                            | 14        | 12         |
|             | T4  | ≤25.00      |             | 205               | 110                             | 14        | 12         |
|             | T5  | ≤5.00       |             | 270               | 230                             | —         | 6          |
|             | T6  | ≤5.00       |             | 290               | 250                             | —         | 6          |
|             |     | >5.00~25.00 |             | 300               | 255                             | 10        | 8          |
| 6060        | T4  | ≤25.00      |             | 120               | 60                              | 16        | 14         |
|             | T5  | ≤5.00       |             | 160               | 120                             | —         | 6          |
|             |     | >5.00~25.00 |             | 140               | 100                             | 8         | 6          |
|             | T6  | ≤3.00       |             | 190               | 150                             | —         | 6          |
|             |     | >3.00~25.00 |             | 170               | 140                             | 8         | 6          |
|             | T66 | ≤3.00       |             | 215               | 160                             | —         | 6          |
| >3.00~25.00 |     | 195         | 150         | 8                 | 6                               |           |            |
| 6360        | T4  | ≤25.00      |             | 110               | 50                              | 16        | 14         |
|             | T5  | ≤25.00      |             | 150               | 110                             | 8         | 6          |
|             | T6  | ≤25.00      |             | 185               | 140                             | 8         | 6          |
|             | T66 | ≤25.00      |             | 195               | 150                             | 8         | 6          |
| 6061        | T4  | ≤25.00      |             | 180               | 110                             | 15        | 13         |
|             | T5  | ≤16.00      |             | 240               | 205                             | 9         | 7          |
|             | T6  | ≤5.00       |             | 260               | 240                             | —         | 7          |
|             |     | >5.00~25.00 |             | 260               | 240                             | 10        | 8          |
| 6261        | O   | —           |             | ≤170              | ≤120                            | 14        | 12         |
|             | T4  | ≤25.00      |             | 180               | 100                             | 14        | 12         |
|             | T5  | ≤5.00       |             | 270               | 230                             | —         | 7          |
|             |     | >5.00~25.00 |             | 260               | 220                             | 9         | 8          |

| 牌号           | 状态               | 壁厚<br>mm     |             | 室温拉伸试验结果          |                                 |           |            |
|--------------|------------------|--------------|-------------|-------------------|---------------------------------|-----------|------------|
|              |                  |              |             | 抗拉强度 $R_m$<br>MPa | 规定非比例<br>延伸强度 $R_{p0.2}$<br>MPa | 断后伸长率 / % |            |
|              |                  |              |             |                   |                                 | $A$       | $A_{50mm}$ |
|              |                  |              |             | 不 小 于             |                                 |           |            |
|              |                  | >25.00~50.00 | 250         | 210               | 9                               | —         |            |
|              | T6               | 实心           | ≤5.00       | 290               | 245                             | —         | 7          |
|              |                  | 型材           | >5.00~10.00 | 280               | 235                             | —         | 7          |
|              |                  | 空心           | ≤5.00       | 290               | 245                             | —         | 7          |
|              |                  | 型材           | >5.00~10.00 | 270               | 230                             | —         | 8          |
| 6063         | T4               | ≤25.00       | 130         | 65                | 14                              | 12        |            |
|              | T5               | ≤3.00        | 175         | 130               | —                               | 6         |            |
|              |                  | >3.00~25.00  | 160         | 110               | 7                               | 5         |            |
|              | T6               | ≤10.00       | 215         | 170               | —                               | 6         |            |
|              |                  | >10.00~25.00 | 195         | 160               | 8                               | 6         |            |
|              | T66 <sup>c</sup> | ≤10.00       | 245         | 200               | —                               | 6         |            |
| >10.00~25.00 |                  | 225          | 180         | 8                 | 6                               |           |            |
| 6063A        | T4               | ≤25.00       | 150         | 90                | 12                              | 10        |            |
|              | T5               | ≤10.00       | 200         | 160               | —                               | 5         |            |
|              |                  | >10.00~25.00 | 190         | 150               | 6                               | 4         |            |
|              | T6               | ≤10.00       | 230         | 190               | —                               | 5         |            |
| >10.00~25.00 |                  | 220          | 180         | 5                 | 4                               |           |            |
| 6463         | T4               | ≤50.00       | 125         | 75                | 14                              | 12        |            |
|              | T5               | ≤50.00       | 150         | 110               | 8                               | 6         |            |
|              | T6               | ≤50.00       | 195         | 160               | 10                              | 8         |            |
| 6463A        | T1               | ≤12.00       | 115         | 60                | —                               | 10        |            |
|              | T5               | ≤12.00       | 150         | 110               | —                               | 6         |            |
|              | T6               | ≤3.00        | 205         | 170               | —                               | 6         |            |
|              |                  | >3.00~12.00  | 205         | 170               | —                               | 8         |            |
| 6081         | T6               | ≤25.00       | 275         | 240               | 8                               | 6         |            |
| 6082         | O、H111           | —            | ≤160        | ≤110              | 14                              | 12        |            |
|              | T4               | ≤25.00       | 205         | 110               | 14                              | 12        |            |
|              | T5               | ≤5.00        | 270         | 230               | —                               | 6         |            |

| 牌号 | 状态                  | 壁厚<br>mm | 室温拉伸试验结果          |                                 |           |            |
|----|---------------------|----------|-------------------|---------------------------------|-----------|------------|
|    |                     |          | 抗拉强度 $R_m$<br>MPa | 规定非比例<br>延伸强度 $R_{p0.2}$<br>MPa | 断后伸长率 / % |            |
|    |                     |          |                   |                                 | $A$       | $A_{50mm}$ |
|    |                     |          | 不 小 于             |                                 |           |            |
| T6 | $\leq 5.00$         | 290      | 250               | —                               | 6         |            |
|    | $> 5.00 \sim 25.00$ | 310      | 260               | 10                              | 8         |            |

## 本规程用词说明

1 为了便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。



中国工程建设标准化协会标准 CECS

CECS X:201X

---

# 铝合金空间网格结构技术规程

Technical Specification for Aluminium alloy Space frame structures

条文说明

《铝合金空间网格结构技术规程》编制组

2018年5月



## 制定说明

本规程制定过程中，编制组进行了资料文献的搜集整理和铝合金空间网格结构应用现状的研究，总结了铝合金空间网格结构在设计、施工与验收方面的工程经验，同时参考了《空间网格结构技术规程》JGJ 7-2010、《建筑结构荷载规范》GB 50009、《建筑抗震设计规范》GB 50011、《铝合金结构设计规范》GB 50429、《铝合金结构工程施工质量验收规范》GB 50576、《普通螺纹 公差》GB/T 197、《优质碳素结构钢》GB/T 699、《碳素结构钢》GB/T 700、《低合金高强度结构钢》GB/T 1591、《钢网架螺栓球节点用高强度螺栓》GB/T 16939、《钢网架螺栓球节点》JG/T 10、《单层网壳嵌入式毂节点》JG/T 136 制定了本规程。

为便于广大设计、施工、验收、科研等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，《铝合金空间网格结构技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本规程条文说明，对条文规定的目的、依据及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与规程正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。



# 目 次

|     |                  |    |
|-----|------------------|----|
| 1   | 总 则.....         | 69 |
| 3   | 基本规定.....        | 70 |
| 3.1 | 结构选型.....        | 70 |
| 3.2 | 基本设计规定.....      | 70 |
| 3.3 | 材料性能指标.....      | 71 |
| 3.4 | 挠度容许值.....       | 72 |
| 4   | 结构计算.....        | 73 |
| 4.1 | 一般计算原则.....      | 73 |
| 4.2 | 静力计算.....        | 73 |
| 4.3 | 稳定性计算.....       | 74 |
| 4.4 | 抗震计算.....        | 75 |
| 4.5 | 抗风计算.....        | 77 |
| 5   | 杆件与节点的设计与构造..... | 78 |
| 5.1 | 杆件.....          | 78 |
| 5.2 | 板式节点.....        | 78 |
| 5.3 | 螺栓球节点.....       | 80 |
| 5.4 | 毂式节点.....        | 81 |
| 5.6 | 支座节点.....        | 84 |
| 5.7 | 螺栓环节点.....       | 86 |
| 6   | 制作、安装.....       | 88 |
| 6.1 | 一般规定.....        | 88 |
| 6.2 | 制作与试拼装.....      | 88 |
| 6.3 | 包装与运输.....       | 89 |
| 6.4 | 安装.....          | 90 |
| 6.5 | 防腐.....          | 90 |
| 6.6 | 防火、隔热.....       | 92 |
| 7   | 验收.....          | 93 |
| 7.2 | 支承面允许偏差.....     | 93 |
| 7.3 | 总拼和安装允许偏差.....   | 93 |
| 7.4 | 交验.....          | 93 |



# 1 总 则

**1.0.1** 本条是铝合金空间网格结构的设计与施工中必须遵循的原则。

**1.0.3** 对于采用何种类型的空间结构体系,应由设计人员综合考虑建筑要求、下部结构布置、结构性能与施工制作安装而确定,以取得良好的技术经济效果。

**1.0.4** 对直接承受反复动力荷载作用并需要疲劳计算的结构,因动荷载会使杆件和节点产生疲劳,而目前这方面的试验资料还不多,在无确切试验及可靠经验时不宜考虑其承受疲劳荷载。因此本规程未考虑直接承受反复动力荷载或需要疲劳计算的结构,不能形成相应条款。对于铝合金空间网格结构直接承受反复动力荷载或需要疲劳计算的情况,可通过试验进行专门研究。

## 3 基本规定

### 3.1 结构选型

**3.1.1** 目前我国已建和在建的铝合金结构常用的主要有三种类型：H型单层球面网壳结构、铝合金螺栓球网架结构和佛伦迪尔小双层网壳。目前研发的铝合金结构形式包括铝合金网架结构、单层网壳结构（又称铝合金穹顶结构或铝合金薄壳结构）、H型铝-佛伦迪尔组合网格结构、铝合金空间桁架结构、双层铝合金网壳结构等。

铝合金网架结构包括螺栓球节点铝合金网架结构、榫式节点铝合金网架结构和体结点铝合金网架结构。

铝合金单层网壳结构主要有榫式节点单层网壳结构、佛伦迪尔单层网壳结构、H型铝单层网壳结构和装配式预应力铝合金单层网壳结构。

双层铝合金网壳结构主要有螺栓装配双层铝合金网壳结构和桁架式铝合金双层空间网格结构。

铝合金桁架结构主要有榫栓节点铝合金平面桁架结构和植板式体结点铝合金空间桁架结构。

**3.1.8** 按节点刚度分类，铝合金网架和双层网壳属铰接体系，铝合金单层网壳属刚接体系；若按单元组成分类，铝合金空间网格结构均属刚性单元结构，包括以梁单元作为基本构件的单层网壳和以杆单元作为基本构件的网架和双层网壳。

已研发的铝合金网格节点主要有螺栓球节点、圆盘盖板节点、铸铝节点、榫式节点、榫式一盖板组合节点、结构板肋节点、结构双向板肋节点、阶梯型铝合金节点、装配式铝合金曲面蝴蝶形盘节点等 9 种。目前国内所采用的铝合金节点主要有圆盘盖板节点、螺栓球节点以及双层网壳中的螺栓连接节点。

### 3.2 基本设计规定

**3.2.1** 按照《建筑结构可靠度设计统一标准》GB50068，本规程采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，用分项系数设计表达式进行计算。

**3.2.2** 条提出的在设计文件中应注明的内容，是与保证工程质量密切相关的。其中铝合金材料的牌号应与有关铝合金材料的现行国家标准或其他技术标准相符；对铝合金材料性能的要求，凡我国铝合金材料标准中各牌号能基本保证的项目可不再列出，只提附加保证和协议要求的项目，而采用其他尚未形成技术标准的铝合金材料或国外铝合金材料时，必须详细列出

有关铝合金材料性能的各项要求。

**3.2.4** 承载能力极限状态可理解为结构或构件发挥允许的最大承载功能的状态。正常使用极限状态可理解为结构或构件达到使用功能上允许的某个限值的状态。

**3.2.5** 荷载效应的组合原则是根据《建筑结构可靠度设计统一标准》GB50068 的规定，结合铝合金结构的特点提出的。对荷载效应的偶然组合，统一标准只作出原则性的规定，具体的设计表达式及各种系数应符合专门规范的有关规定。对于正常使用极限状态，铝合金结构一般只考虑荷载效应的标准组合，当有可靠依据和实践经验时，亦可考虑荷载效应的频遇组合，当考虑长期效应时，可采用准永久组合。

**3.2.6** 由于铝合金材料的可焊性较差，所以实际工程应用中，采用螺栓连接的情况较多。计算模型应根据实际情况采用刚接、半刚性连接、铰接等计算模拟方法。

**3.2.7** 铝合金材料具有优良的负温工作性能，在低温条件下其强度及延性具有所提高，所以不必规定铝合金结构的负温临界工作温度。但铝合金耐高温性能差，150℃以上时迅速丧失强度，这也是可以通过挤压工艺产生型材的主要原因。根据相关试验数据，当温度达到 100℃时，铝合金的屈服强度、极限强度、弹性模量大约折减 95%、91%、96%；当环境温度在 90℃以内时，铝合金的力学参数基本保持与室温相同。因此，本条对铝合金结构的正常使用环境温度进行了控制。

**3.2.10** 由于铝合金材料弹性模量小等自身特征，大跨度铝合金曲面结构的整体非线性稳定承载力相对钢结构偏低，实际工程往往是稳定性对结构最终设计结果起到控制作用。

### 3.3 材料性能指标

**3.3.1** 铝合金型材材料性能指标应符合以下要求：

1 所列型材的主要牌号选自国家标准 GB/T 6892-2015《一般工业用铝及铝合金挤压型材》、GB/T 34488-2017《全铝桥梁结构用铝合金挤压型材》、GB/T 34489-2017《屋面结构用铝合金挤压型材和板材》中所列牌号，并结合目前市场实际使用需求制订。

在进行状态选择时，考虑到铝合金空间结构对力学性能的要求，建议选择 T5、T6 状态。另考虑到部分型材在使用中可能涉及折弯等加工，故将 T4 状态也纳入其中。

目前，部分表面处理铝型材在工业及建筑工程领域得到应用，故铝合金型材的表面处理类别参照 GB/T 6892-2015《一般工业用铝及铝合金挤压型材》相关规定执行。

2 型材横截面的壁厚、非壁厚尺寸及角度允许偏差应符合供需双方签订的图样规定，为保证工程装配精度，未标注偏差但能直接测量的尺寸或角度，其尺寸偏差应符合 GB/T 14846-2014《铝及铝合金挤压型材尺寸偏差》中高精级的规定，其精度指标严于 GB/T 6892 《一般

工业用铝及铝合金挤压型材》中普通级的要求，能够满足空间网格结构工程使用要求。

**3** 本标准所规定的铝型材牌号性能与 GB/T 6892-2015《一般工业用铝及铝合金挤压型材》、GB/T 34488-2017《全铝桥梁结构用铝合金挤压型材》、GB/T 34489-2017《屋面结构用铝合金挤压型材和板材》中所列牌号性能一致；

另因铝合金空间网格结构工程用材部分 T6 状态型材壁厚较大，故对其中 6005A、6082 合金增加了壁厚范围。其中 6005A-T6 状态空心型材增加了  $>15.00\sim 25.00$  的壁厚范围，6082-T6 状态型材壁厚范围由  $>5.00\sim 25.00$  增加至  $>5.00\sim 50.00$ ，上述修改所涉及的性能指标要求在国家标准 GB/T 26494-2016《轨道交通车辆结构用铝合金挤压型材》修订时得到验证，本标准可直接参考引用。

**4** 型材的其他性能应符合 GB/T 6892《一般工业用铝及铝合金挤压型材》的规定，当要求不同于 GB/T 6892 时，应由供需双方协商确定，并在订货单（或合同）中注明。

**3.3.2** 考虑到铝合金空间网格结构工程中除主要应用铝合金型材外，同时有部分铝合金板带材、管材和棒材的使用，故保留铝合金板带、管、棒材的材料要求，其铝合金板带材应符合 GB/T 3880《一般工业用铝及铝合金板、带材》的规定，铝合金管材应符合 GB/T 4437《铝及铝合金热挤压管》的规定，铝合金棒材应符合 GB/T 3191《铝及铝合金挤压棒材》的规定。

### 3.4 挠度容许值

**3.4.1** 空间网格结构的计算容许挠度，是综合近年国内外的工程设计与使用经验而定的。对网架、立体桁架用于屋盖时规定为不宜超过网架短向跨度或桁架跨度的  $1/250$ 。一般情况下，按强度控制而选用的杆件不会因为这样的刚度要求而加大截面。至于一些跨度特别大的网架，即使采用了较小的高度（如跨高比为  $1/16$ ），只要选择恰当的网架形式，其挠度仍可满足小于  $1/250$  跨度的要求。当网架用作楼层时则参考混凝土结构设计规范，容许挠度取跨度的  $1/300$ 。网壳结构的最大计算位移规定为单层不得超过短向跨度的  $1/400$ ，双层不得超过短向跨度的  $1/250$ ，由于网壳的竖向刚度较大，一般情况下均能满足此要求。对于在屋盖结构中设有悬挂起重设备的，为保证悬挂起重设备的正常运行，与钢结构设计规范一致，其最大挠度值提高到不宜大于结构跨度的  $1/400$ 。

**3.4.2** 国内已建成的网架，有的起拱，有的不起拱。起拱给网架制作增加麻烦，故一般网架可以不起拱。当网架或立体桁架跨度较大时，可考虑起拱，起拱值可取小于或等于网架短向跨度（立体桁架跨度）的  $1/3000$  此时杆件内力变化“较小”，设计时可按不起拱计算。

## 4 结构计算

### 4.1 一般计算原则

**4.1.1** 分析双层铝合金网格结构时，可假定节点为铰接，杆件只承受轴向力；分析铝合金桁架时，当杆件的节间长度与截面高度（或直径）之比不小于 12（主管）和 24（支管）时，也可假定节点为铰接；分析单层铝合金结构时，应假定节点为刚接，杆件除承受轴向力外，还承受弯矩、扭矩、剪力等。

**4.1.2** 铝合金空间网格结构主要应对使用阶段的外荷载（对网架结构主要为竖向荷载，网壳结构则包括竖向和水平向荷载）进行内力、位移计算，对单层网壳通常要进行稳定性计算，并据此进行杆件截面设计。此外，对地震、温度变化、支座沉降及施工安装荷载应根据具体情况对内力、位移计算。由于在大跨度结构中风荷载往往非常关键，本条特别强调风荷载作用下的计算。

**4.1.4** 作用在铝合金空间网格结构杆件上的局部荷载在分析时先按静力等效原则换算成节点荷载进行整体计算，然后考虑局部弯曲内力的影响。

**4.1.5** 铝合金空间网格结构与其支承结构之间相互作用的影响往往十分复杂，因此分析时应考虑两者的相互作用而进行协同分析。

**4.1.6** 铝合金网格结构在施工安装阶段的支承条件往往与使用阶段不一致，如采用悬挑拼装施工的网壳结构，其支承边界条件与使用状态下网壳的边界条件完全不同。此时应特别注意施工安装阶段全过程位移和内力分析计算，并可作为网壳的初内力和初应变而残留在网壳内。

### 4.2 静力计算

**4.2.1** 有限单元法是将网格结构的每根杆件作为一个单元，采用矩阵位移法进行计算。网架结构和双层网壳以杆件节点的两个线位移为未知数，单层网壳以节点的两个线位移和三个角位移为未知数。无论是理论分析及模型试验乃至工程实践均表明，这种杆系的有限单元法是迄今为止分析网格结构最为有效、适用范围最为广泛且相对而言精度也是最高的方法。目前这种方法在国内外已被普遍应用于网格结构的设计计算中，因此本规程将其列为分析网格结构的主要方法。

有限单元法可以用来分析不同类型、具有任意平面和几何外形、具有不同的支承方式及不同的边界条件、承受不同类型外荷载的网格结构。有限单元法不仅可用于网壳结构的静力分析，还可用于动力分析、抗震分析以及稳定分析。这种方法适合于在计算机上进行运算，

目前我国相关单位已编制了一些网格结构分析与设计的计算机软件可供使用。由于杆系和梁系有限元法在不少书本中已有详尽的论述，本规程仅列出其基本方程。

值得指出，对于空间梁单元，尚有考虑弯曲、剪切、扭转、翘曲和轴向变形耦合影响的、更为精确的单元。每个节点除了通常的三个线位移和三个角位移，还考虑截面翘曲的影响，即增加了表征截面翘曲变形的翘曲角自由度，因此每个节点有七个自由度。目前的大多数分析程序只包含了一般的空间梁单元，可满足大多数实际工程的计算精度要求；对于杆件约束扭转影响十分显著的情况，可考虑采用七个自由度的空间梁单元。

**4.2.2** 铝合金空间网格结构设计中，由于杆件截面调整而进行的重分析次数一般为 3~4 次。铝合金空间网格结构设计后，如由于备料困难等原因必须进行杆件替换时，应根据截面及刚度等效的原则进行，被替换的杆件应不是结构的主要受力杆件且数量不宜过多（通常不超过全部杆件的 5%），否则应重新复核。

**4.2.3** 对于平板铝合金网格结构，温度应力主要由支承体系阻碍结构变形而产生，其中支承平面的弦杆受影响最大，应作为平板铝合金网格结构是否考虑温度应力的依据。支承平面弦杆的布置情况，可归纳为正交正放、正交斜放、三向等三类。

其次，在平板铝合金网架的不同区域中，支承平面弦杆的温度应力也不同。计算表明，边缘区域比中间区域大，考虑到边缘区域杆件大部分由构造决定，有较富裕的强度储备，本条将支承平面弦杆的跨中区域最大温度应力小于  $0.038f$  ( $f$  为钢材强度设计值) 作为不必进行温度应力验算的依据，条文中的规定经计算均满足这一要求。

### 4.3 稳定性计算

**4.3.1** 单层和双层网壳结构均存在整体失稳的可能性；设计某些单层网壳时，稳定性还可能起控制作用，因而对这些网壳应进行稳定性计算。

**4.3.2** 以非线性有限元分析为基础的结构荷载—位移全过程分析可以把结构强度、稳定乃至刚度等性能的整个变化历程表示得十分清楚，因而可以从全局的意义上研究网壳结构的稳定性问题。目前，考虑几何及材料非线性的荷载—位移全过程分析方法已相当成熟，包括对初始几何缺陷、荷载分布方式等因素影响的分析方法也比较完善。因而现在完全有可能要求对实际大型网壳结构进行仅考虑几何非线性的或考虑双重非线性的荷载—位移全过程分析，在此基础上确定其稳定性承载力。

**4.3.3** 初始几何缺陷对各类网壳的稳定性承载力均有较大影响，应在计算中考虑。网壳的初始几何缺陷包括节点位置的安装偏差、杆件的初弯曲、杆件对节点的偏心等，后面两项是与杆件计算有关的缺陷。我们在分析网壳稳定性时有一个前提，即在强度设计阶段网壳所有杆

件都已经过强度和杆件稳定验算。这样，与杆件有关的缺陷对网壳总体稳定性（包括局部壳面失稳问题）的影响就自然地限制在一定范围内，而且在相当程度上可以由关于网壳初始几何缺陷（节点位置偏差）的讨论来覆盖。

节点安装位置偏差沿壳面的分布是随机的。通过实例进行的研究表明：当初始几何缺陷按最低阶屈曲模态分布时，求得的稳定性承载力是可能的最不利值。这也就是本规程推荐采用的方法。至于缺陷的最大值，按理应采用施工中的容许最大安装偏差；但大量算例表明，当缺陷达到跨度的  $L/300$  左右时，其影响往往才充分展现；从偏于安全角度考虑，本条规定了“按网壳跨度的  $L/300$ ”作为理论计算的取值。

**4.3.4** 确定安全系数  $K$  时考虑到下列因素：(1)荷载等外部作用和结构抗力的不确定性可能带来的不利影响；(2)复杂结构稳定性分析中可能的不精确性和结构工作条件中的其他不利因素。对形状复杂网壳和一些大型或特大型网壳，宜进行弹塑性全过程分析。

**4.3.5** 网壳结构节点的刚度是影响网壳整体稳定性的重要因素之一，因而需通过精细化数值分析模型或试验研究得到节点刚度。

## 4.4 抗震计算

**4.4.3** 采用时程分析法计算空间铝合金网格结构地震效应时，其动力平衡方程应为：

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -M\ddot{U}_g \quad (1)$$

式中：  $M$  ——结构质量矩阵；

$Q$  ——结构阻尼矩阵；

$K$  ——结构刚度矩阵；

$\ddot{U}, \dot{U}, U$  ——结构节点相对加速度向量、相对速度向量和相对位移向量；

$\ddot{U}_g$  ——地面运动加速度向量。

采用振型分解反应谱法进行单维地震效应分析时，空间网格结构  $j$  振型、 $i$  节点的水平或竖向地震作用标准值应按下列式确定：

$$\left. \begin{aligned} F_{Exji} &= \alpha_j \gamma_j X_{ji} \tilde{G}_i \\ F_{Eyji} &= \alpha_j \gamma_j Y_{ji} \tilde{G}_i \\ F_{Ezji} &= \alpha_j \gamma_j Z_{ji} \tilde{G}_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中：  $F_{Exji}$ 、 $F_{Eyji}$ 、 $F_{Ezji}$  ——  $j$  振型， $i$  节点分别沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  的地震作用标准值；

$\alpha_j$  ——相应于  $j$  振型自振周期的水平地震影响系数，按现行国家

标准《建筑抗震设计规范》GB50011 确定；当仅  $z$  方向竖

向地震作用时，竖向地震影响系数取  $0.65\alpha_j$ ；

$X_{ji}$ 、 $Y_{ji}$ 、 $Z_{ji}$  ——分别为  $j$  振型， $i$  节点的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的相对位移；

$G_i$  ——铝合金空间网格结构第  $i$  点节点的重力荷载代表值，其中恒载取结构自重标准值；可变荷载取屋面雪荷载或积灰荷载标准值，组合值系数取 0.5；

$\gamma_j$  —— $j$  振型参与系数，应按公式 (3) — (5) 确定。

当仅  $x$  方向水平地震作用时， $j$  振型参与系数应按下列式计算：

$$\gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ji} G_i}{\sum_{i=1}^n (X_{ji}^2 + Y_{ji}^2 + Z_{ji}^2) G_i} \quad (3)$$

当仅  $y$  方向水平地震作用时， $j$  振型参与系数应按下列式计算：

$$\gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{ji} G_i}{\sum_{i=1}^n (X_{ji}^2 + Y_{ji}^2 + Z_{ji}^2) G_i} \quad (4)$$

当仅  $z$  方向竖向地震作用时， $j$  振型参与系数应按下列式计算：

$$\gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^n Z_{ji} G_i}{\sum_{i=1}^n (X_{ji}^2 + Y_{ji}^2 + Z_{ji}^2) G_i} \quad (5)$$

式中： $n$ ——空间网格结构节点数。

**4.4.5** 按振型分解反应谱法进行在多遇地震作用下单维地震作用效应分析时，铝合金网架结构杆件地震作用效应可按下列式确定：

$$S_{Ek} = \sqrt{\sum_{j=1}^m S_j^2} \quad (6)$$

铝合金网壳结构杆件地震作用效应宜按下列公式确定：

$$S_{Ek} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \rho_{jk} S_j S_k} \quad (7)$$

$$\rho_{jk} = \frac{8\zeta_j \zeta_k (1 + \lambda_T) \lambda_T^{1.5}}{(1 - \lambda_T^2)^2 + 4\zeta_j \zeta_k (1 + \lambda_T)^2 \lambda_T} \quad (8)$$

式中： $S_{Ek}$  ——杆件地震作用标准值的效应；

$S_j$ 、 $S_k$  ——分别为  $j$ 、 $k$  振型地震作用标准值的效应；

$\rho_{jk}$  —— $j$  振型与  $k$  振型的耦系数；

$Z_j$ 、 $\zeta_k$  ——分别为  $j$ 、 $k$  振型的阻尼比；

$\lambda_T$  —— $k$  振型与  $j$  振型的自振周期比；

$m$  ——计算中考虑的振型数。

## 4.5 抗风计算

**4.5.1** 铝合金结构重量轻刚度小，属于风敏感结构体系。风荷载对结构的作用表现为平均风压的不均匀分布作用和脉动风压的动力作用。

**4.5.2** 影响屋盖结构风压分布的因素很多，也很复杂，如曲面的几何形状、曲率、风向等等。因此条文规定体型复杂的铝合金空间网格结构的风荷载体型系数宜进行风洞试验确定，也可通过数值风洞等方法分析确定体型系数。

**4.5.3** 对于本条列出的情况，应对风动力效应进行较为细致地分析。当采用风振时程分析方法或随机振动理论分析时，输入的风荷载时程或功率谱宜根据风洞试验确定。

## 5 杆件与节点的设计与构造

### 5.1 杆件

**5.1.1** 铝合金空间网格结构的杆件可采用铝合金建筑型材和管材。管材宜采用拉（轧）制无缝管和热挤压管，当有条件时应采用薄壁管形截面。管材在使用前应进行相应试验研究，经专家评审论证通过后方可投入使用。

**5.1.2** 构件的计算长度与构件的支承条件有关，在材料弹性状态下，铝合金结构的构件计算长度参照国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 中有关内容编写。

**5.1.3** 铝合金平板网架和曲面网架是指采用铰接节点的网格结构，铝合金单层网壳是指采用刚接节点的网格结构。

**5.1.4** 条文参照国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 中有关内容编写。

**5.1.5** 根据多年来空间网格结构的工程实践规定了杆件截面的最小尺寸。但这并不是说，所有空间网格工程都可以采用本条规定的最小截面尺寸，这里明确指出，杆件最小截面尺寸必须在实际工程中根据计算分析经杆件截面验算后确定。

**5.1.6** 铝合金空间网格结构杆件当其内力分布变化较大时，如杆件按满应力设计，将会造成沿受力方向相邻杆件规格过于悬殊，而造成杆件截面刚度的突变，故从构造要求考虑，其受力方向相连续的杆件截面面积之比不宜超过 1.8 倍，对于多点支承网架，虽然其反弯点处杆件内力很小，也应考虑杆件刚度连续原则，对反弯点处的上下弦杆宜按构造要求加大截面。

**5.1.7** 由于大量的空间网格结构实际工程中，小规格的低应力拉杆经常会出现弯曲变形，其主要原因是此类杆件受制作、安装及活荷载分布影响时，小拉力杆转化为压杆而导致杆件弯曲，故对于低应力的小规格拉杆宜按压杆来控制长细比。

**5.1.8** 本条规定提醒设计人员注意细部构造设计，避免给施工和维护造成困难。

### 5.2 板式节点

**5.2.4** 板式节点体系常用于单层网壳结构中。

**5.2.5** 铝合金空间网格结构围护连接构造节点应由铝合金杆件、铝合金压条、不锈钢螺栓、面板、防水橡胶条等零件组成，其连接构造具有一体化连接特点。

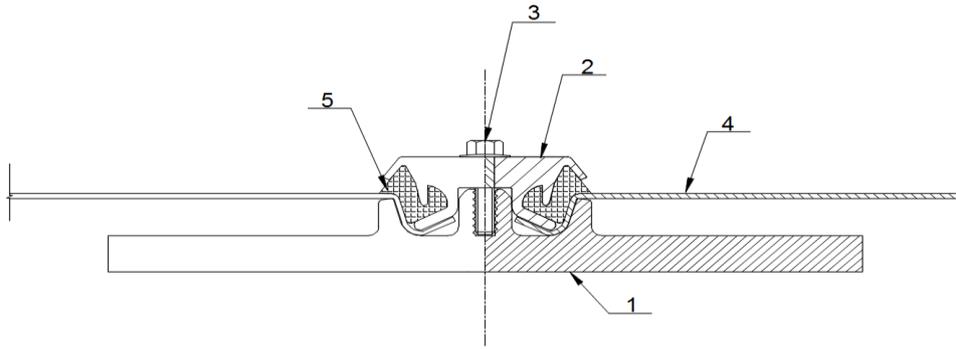


图1 一体化铝板围护连接构造节点

- 1——杆件上翼缘；2——铝合金压条；3——不锈钢螺栓；4——面板；  
5——防水橡胶

用于该种围护系统的杆件、压条、不锈钢螺栓、面板以及防水橡胶条的材料可按照表1的规定选用，并符合相应标准的技术条件。

表1 围护连接构造节点零件材料

| 零件名称  | 推荐材料           | 材料标准编号                               | 备注        |
|-------|----------------|--------------------------------------|-----------|
| 杆件    | /              | /                                    | 按结构设计所需选用 |
| 铝合金压条 | 6063-T5        | 《一般工业用铝及铝合金板、带材》<br>GB/T 3880.2-2006 | 挤压成型      |
| 不锈钢螺栓 | 304 (0Cr18Ni9) | 《紧固件机械性能<br>不锈钢紧定螺栓<br>钉》GB/T3098.16 | 粗牙螺纹，c级螺栓 |
| 铝合金面板 | 3003-H16       | 《一般工业用铝及铝合金板、带材》<br>GB/T 3880.2-2006 | 辊压成型      |
| 防水橡胶条 | 有机硅橡胶          |                                      |           |

注：1 杆件上翼缘卡槽以及螺纹槽的尺寸依据抗风性能要求及建筑要求确定。

2 压条的尺寸根据卡槽及螺纹槽确定，并且采用挤压成型。

3 不锈钢螺栓的形式与尺寸应符合现行国家标准《紧固件机械性能不锈钢紧定螺钉》GB/T3098.16的要求。通常此类屋面板系统应选用 M5 或 M6 的不锈钢螺栓，M5 螺栓的破坏力矩为 7.8，M6 螺栓的破坏力矩为 13。螺栓间距通常应取 200-300mm 之间，间距的具体取值应根据节点所应提供的抗拔承载力而取值。

$$P_d \geq S_d$$

$$P_d = \alpha * f_v^b * \left(\frac{1}{3}\right) * P * n_p * d$$

其中  $P_d$  为屋面系统的提供的抗拔承载力， $S_d$  为荷载组合效应设计值。

上式中 $f_v^b$ 表示所选用铝合金材料的抗剪承载力；P 是螺槽上的螺距； $n_p$ 是螺槽上的螺纹数；d 为螺栓直径； $\alpha$  为折减系数。

4 该种屋面系统的屋面板的厚度通常应取 0.8~1.6mm。

5 防水橡胶起密封防止雨水进入建筑内部的作用，不起力学作用。

### 5.3 螺栓球节点

**5.3.1** 螺栓将圆管与螺栓球连接而成的螺栓球节点，在构造上比较接近于铰接计算模型，因此适用于双层以及两层以上的空间网格结构中圆管杆件的节点连接。

**5.3.2** 螺栓球节点的材料在选用时考虑以下因素：

螺栓球节点上沿各汇交杆件的轴向端部设有相应螺孔，当分别拧入杆件中的螺栓后即形成网架整体。球的硬度可略低于螺栓的硬度，材料强度也较螺栓低，球体材料选用 2A12-T4、T5 挤压棒材，可以满足设计要求，并便于加工制作。锥头或封板是圆钢管杆件通过螺栓与球连接的过渡零件。套筒主要传递压力。

螺栓可以根据受力情况分别选用不锈钢螺栓或高强螺栓。高强度螺栓的钢材应保证其抗拉强度、屈服强度与淬透性能满足设计技术条件的要求。结合目前国内钢材的供应情况和实际使用效果，推荐采用 40Cr 钢、35CrMo 钢，同时考虑到多年使用和厂家习惯用材，对于 M12~M24 的高强度螺栓还可采用 20MnTiB 钢，M27~M36 的高强度螺栓还可采用 35VB 钢。为防止钢铝材料接触产生电化学腐蚀情况发生，要求高强螺栓表面必须进行镀锌处理。紧固螺钉也宜选用不锈钢材料。

**5.3.5** 采用高强度螺栓经热处理后的抗拉强度设计值为  $430\text{N/mm}^2$ 。由于本规程中已考虑了螺栓直径对性能等级的影响，在计算高强度螺栓抗拉设计承载力时，不必再乘以螺栓直径对承载力的影响系数。

高强度螺栓表明应作镀锌处理，高强度螺栓的最高性能等级采用 10.9 级，即经过热处理后的钢材极限抗拉强度  $f_u$  达  $(1040\sim 1240)\text{N/mm}^2$ ，规定不低于  $1000\text{N/mm}^2$ ，屈服强度与抗拉强度之比为 0.9，以防止高强度螺栓发生延迟断裂。

**5.3.6** 螺栓球节点连接受力特点可知，杆件的轴向压力主要是通过套筒端面承压来传递的，螺栓主要起连接作用。因此对于受压杆件的连接螺栓可不作验算。但从构造上考虑，连接螺栓直径也不宜太小，设计时可按该杆件内力绝对值求得螺栓直径后适当减小。减少螺栓直径后的套筒应根据传递的压力值验算其承压面积，以满足实际受力要求，此时套筒可能有别于一般套筒，施工安装时应予以注意。

**5.3.8** 端部的锥头或封板以及它们与圆管间的连接为杆件的重要组成部分。对于端部焊接的

铝合金受拉杆，实际上是杆件的焊接强度控制着该杆件的设计强度。杆件焊接后产生的主要问题是靠近焊接区域的铝管材料的热软化及封板(锥头)材料的热软化。封板(锥头)材料的热软化会造成封板(锥头)的焊接热变形及受力变形大的问题，虽然可以采取焊接时端部冷却的方式来部分解决这个问题。铝合金杆件经焊接处理后其杆件的极限抗拉强度损失较大，而且在焊接区域表面氧化膜被损坏，若想重新获得较高的强度、优良的耐腐蚀性能及理想的外观，须对焊接成形后的铝网架杆件重新进行热处理及表面阳极化处理。

一般封板用于连接直径小于60mm的管件，锥头用于连接直径大于或等于60mm的管件。封板与锥头的计算可考虑塑性的影响，其底板厚度都不应太薄，否则在较小的荷载作用下即可能使塑性区在底板处贯通，从而降低承载力。

锥头底板厚度和锥壁厚度变化应与内力变化协调，锥壁与锥头底板及钢管交接处应和缓变化，以减少应力集中。

**5.3.9** 封板机械连接所对应的破坏形式（保证螺栓不拉断的前提下）如下所示：

- (1) 当封板厚度较小时，发生铝管环压部位拉剪组合破坏。
- (2) 当封板厚度较大时，发生铝管环压部位与未环压部位抗拉破坏。

在使用封板前应进行试验研究确定其受拉承载力。

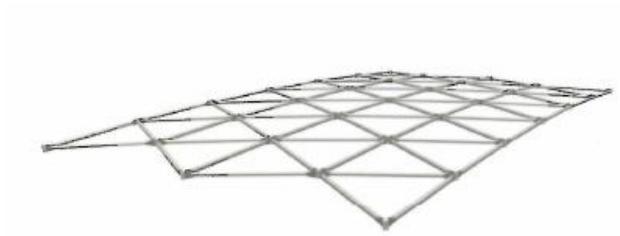
## 5.4 榫式节点

**5.4.1** 榫式节点网格结构可用来建造平板网架、柱面网壳、球面网壳以及其他不规则网壳等空间结构，主要有单层网格结构和双层网格结构等，其中双层结构可以由四角锥体系、三角锥体系、空腹桁架体系等结构单元组成。

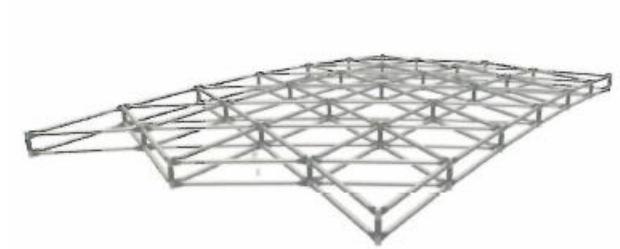
榫式节点用于柱面网壳时，单层柱面网壳的跨度不大于30m，双层柱面网壳的跨度不大于60m；榫式节点用于球面网壳时，单层球面网壳的跨度不大于60m，双层球面网壳的跨度不大于120m。

榫式节点利用柱状体上通过挤压成型的嵌入槽，将其与杆件端部冲压成型的凸肋状嵌入件机械连接在一起。与榫式节点相连的杆件可以采用圆管和矩形管，杆件端部的凸肋状嵌入件是利用特定的加工设备，通过直接冲压杆件的端部而成型。

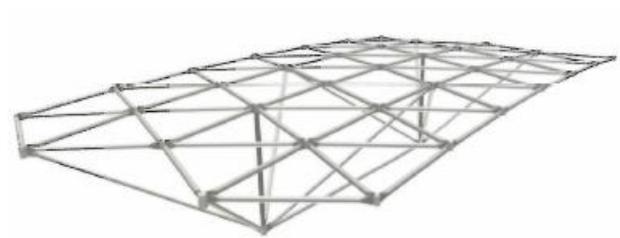
榫式节点网格的结构型式主要分为以下几种：



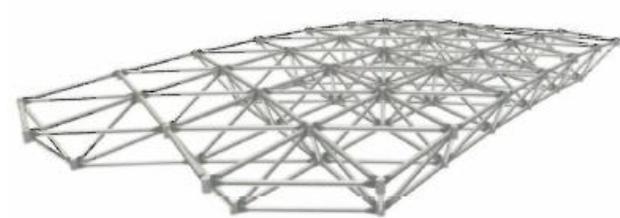
(a) 单层毂式节点网格



(b) 空腹式网格



(c) 局部加肋式网格



(d) 三角锥式网格

图2 毂式节点网架结构类型示意图

**5.4.2** 铝合金柱体上开槽的数量可以为6个、8个、12个等。铝合金柱体上的槽，可分为a、b、d、f、i等不同的规格，每一种铝合金槽匹配特定厚度范围的压制杆件。

**5.4.3** 嵌入件凸肋和杆件的角度如果过小，会造成压制杆件的凸肋过长，端部过尖，超出常规设备的加工能力。因此，凸肋和杆件的角度不应过小。

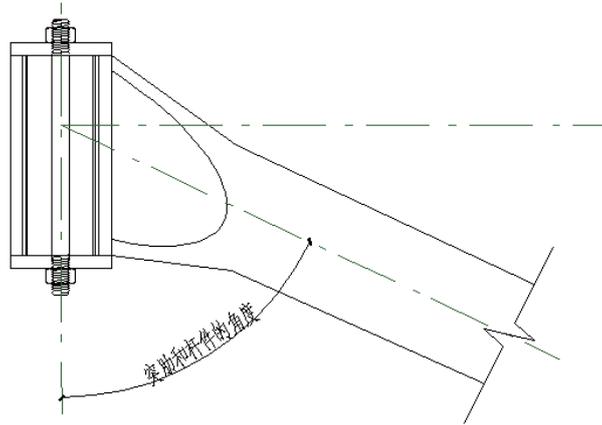


图3 凸肋和杆件的角度示意图

**5.4.4** 杆件压制的冷作硬化过程增加了杆件喉口的机械性能。相关文献对冷作硬化后的极限强度给出了如下计算公式： $F_u=K(e)^n$ ，计算得到的极限抗拉强度与原极限抗拉强度的比值均大于 1.2。因此本规程对冷作硬化的有利影响也适当考虑。

**5.4.5** 对于此类榫式节点，压制后喉口的平均厚度减少到原有厚度的 72%（最低为 54%，最高为 81%，取决于槽的规格和管材厚度）。

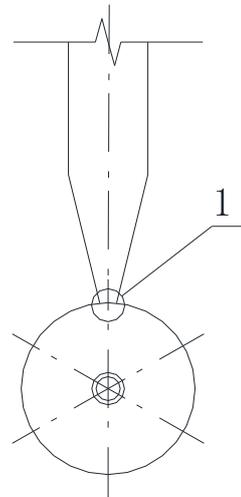


图4 喉口位置示意图

1——喉口位置

**5.4.6** 杆件和铝合金柱体通过连接处的咬合来传递拉力，杆件拉力作用下铝合金齿承受剪力，因此需要对铝合金齿的抗剪承载力进行验算。铝合金齿抗剪承载力系数根据杆件端部肋和铝合金齿的抗剪面获得，不同规格的槽，抗剪承载力系数不同，常用规格的凹槽的抗剪承载力系数为

$$TT > 1.15TR \quad r_{as} = 2.7$$

$$TT \leq 1.15TR \quad r_{as} = 2.7 \times \frac{1.15 \times TR}{TT}$$

**5.4.7** 杆件端部压扁后，在轴力作用下存在局部屈曲失稳的破坏模式，本条给出了局部屈曲验算的公式，其中屈曲强度折减系数，随着杆件的径厚比的增加而减小，是根据受压试验而确定。

**5.4.9** 设有竖腹杆的网格结构，用于空腹式网格等结构型式，铝合金插头紧密插入竖腹杆中，使腹杆可承受弯矩，设计过程需要对杆件进行承载力验算。

**5.4.10** 节点所连接的杆件端部均进行过压扁处理，杆件端部面外刚度较小，因此，对于节点，存在扭转破坏的可能性，需要进行抗扭验算。

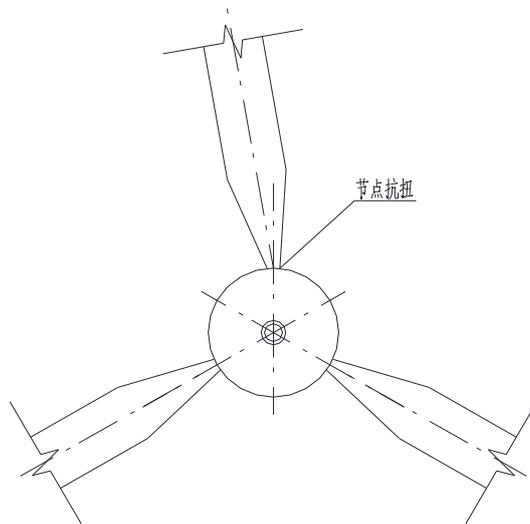


图5 节点扭转示意图

**5.4.11** 螺栓和盖板将杆件端部限制在铝合金柱体槽内，螺栓、盖板会受到杆件的作用力，需要进行验算。

**5.4.12** 设置弹簧垫圈，可以有助于控制的紧固程度和安装质量。但是弹簧垫圈的防松能力较低，在高可靠性结构中须谨慎使用。

## 5.6 支座节点

**5.6.1** 空间网格结构支座节点的构造应与结构分析所取的边界条件相符，否则将使结构的实际内力、变形与计算内力、变形出现较大差异，并可能由此而危及空间网格结构的整体安全。一个合理的支座节点必须是受力明确、传力简捷、安全可靠。同时还应做到构造简单合理、制作拼装方便，并具有较好的经济性。

**5.6.2** 根据空间网格结构支座节点的主要受力特点可分为压力支座节点、拉力支座节点、可滑移、转动的弹性支座节点以及兼受轴力、弯矩与剪力的刚性支座节点。

**5.6.3** 相较于钢材，目前国内的铝合金材料强度偏低，节点及其相连构件受力较大，采用铝合金有一定的局限性；并且由于铝合金可焊性较差，制作加工及节点形式受限。为方便支座节点的设计，支座可采用采用钢结构。由于钢材和铝合金会发生电化学反应，节点构造时应保证钢材和铝板分离，通常在铝板和钢材之间增设不锈钢垫板。研究表明采用不锈钢垫板即能在全设计使用周期保证不发生电化学反应。

**5.6.4** 对于单向受力的铰接支座，板式支座节点是工程中较为成熟的支座节点形式。

若支座节点及与支座相连的杆件均采用钢结构，如图 6 所示，则可选的支座形式则更加灵活。全钢结构支座及与相连的钢构件可以焊接、铸钢节点、或其他成熟的节点形式，在支座节点外沿一个节点钢构件再于铝合金网格构件相连。

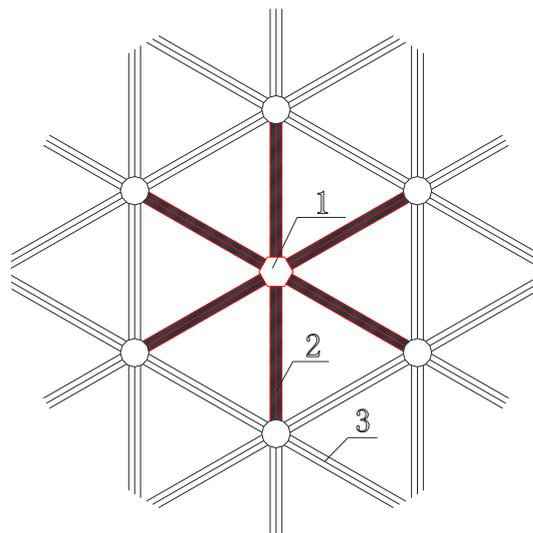


图 6 支座节点连接示意图

1——支座；2——钢构件；3——铝合金构件

**5.6.5** 考虑到支座节点可能存在一定的水平反力，为减少由此而产生的附加弯矩，应尽量减少支座球节点中心至支座底板的距离。

对于上弦支承空间网格结构，设计时应控制边缘斜腹杆与支座节点竖向中心线间具有适当夹角，防止斜腹杆与支座柱边相碰，在支座设计时应进行放样验算。

支座底板与支座竖板厚度应根据支座反力进行验算，确保其强度与稳定性要求。

当支座节点中的水平剪力大于竖向压力的 40%时，不应利用锚栓抗剪。此时应通过抗剪

键传递水平剪力。

**5.6.6** 弧形支座板由于形状变异，宜用铸铝浇铸成型。为简便起见，单面弧形支座板也可用厚钢板加工成型。橡胶支座垫板系指由符合橡胶材料技术要求的多层橡胶片与薄钢板相间粘合压制而成的橡胶垫板，一般由工程橡胶制品厂专业生产。不得采用纯橡胶垫板。

**5.6.7** 在实际工程中要求将支座节点底板上的锚孔精确对准已埋入支承柱内的锚栓，对土建施工精度要求较高，因此对传递压力为主的网架压力支座节点中也可以在支座底板与支承面顶板间增设过渡铝板。

过渡铝板上设埋头螺栓与支座底板相连，过渡铝板可通过侧焊缝与支承面顶板相连，这种构造支座底板传力虽较间接，但可简化施工。当支座底板面积较大时可在过渡铝板上开设椭圆形孔，以槽焊与支承面顶板相连，以确保钢板间的紧密接触。

## 5.7 螺栓环节点

**5.7.1** 当采用 C 形铝合金连接件时，矩形杆件四周均可布置虎克螺栓；当采用 H 形连接件时，仅可在矩形杆件的上下翼缘布置虎克螺栓。

**5.7.3** 考虑到铝合金材料焊接残余应力较大，另外结合《铝合金结构设计规范》GB 50429-2007 中的建议，铝合金结构不宜采用高强螺栓连接，因此推荐使用不锈钢螺栓进行连接。

**5.7.4** 中心环柱体由厚壁铝管机械加工制作，外边缘需根据 C 形或 H 形铝合金连接件的宽度以及杆件在竖直平面内的倾角进行切削，以实现和连接件紧密、可靠的连接。C 形铝合金连接件可由板材冷弯加工制作，端部切削为槽形，便于不锈钢螺栓的连接。当中心环柱体外径较小而连接杆件数量较多时，可将 C 形或 H 形铝合金连接件端部切削为锥形，端面最小宽度应大于腹板厚度与角码宽度之和的 2 倍。虎克螺栓栓杆长度应根据连接板件的厚度确定。

**5.7.5、5.7.6** 根据“强节点、弱构件”原则，应满足环柱体承载力设计值大于杆件承载力设计值。式 5.7.5 和 5.7.6 给出的环柱体承载力计算公式基于弹塑性理论得到，环柱体弹塑性承载力约为弹性承载力的 1.36~2.43 倍，而极限承载力约为弹塑性承载力的 1.36~1.71 倍。采用弹塑性承载力设计方法，可以充分利用环柱体的弹塑性变形能力。铝合金空间结构杆件设计应力比通常小于 0.4，节点的实际受力远小于弹性承载力。另外，当达到弹塑性承载力时，环柱体仍处于小变形阶段，仍具有较高的安全储备。

**5.7.7** 设置环向加劲肋可以有效提高环柱体的刚度和承载力。在等强度条件下，可相应较小环柱体厚度，以减轻节点自重、降低造价。试验研究结果表明，设置环向加劲肋后，环柱体轴向刚度和平面外抗弯刚度提高 1 倍，弹塑性轴向承载力提高 2 倍，弹塑性抗弯承载力提高

0.6 倍。

**5.7.8** 铝合金环柱体的弹性轴向刚度和转动刚度公式基于刚性地基梁假设得到，并通过足尺节点轴向拉压试验、三点弯曲试验等进行了验证。

**5.7.10** 不锈钢螺栓的形式与尺寸应符合现行国家标准《紧固件机械性能不锈钢紧定螺钉》GB/T 3098.19 的要求，同时还应满足《铝合金结构设计规范》中规定的最大、最小容许距离的构造要求。

## 6 制作、安装

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 对属于下列情况之一的铝合金材料应进行抽样复验，其复验结果应符合国家现行产品标准和设计要求：

- 1 建筑结构安全等级为一级，铝合金主体结构中主要受力构件所采用的铝合金材料。
- 2 设计有复验要求的铝合金材料。

3 对质量有疑义的铝合金材料（对质量有疑义主要指下列三种情况：对质量证明文件有疑义；质量证明文件不全；质量证明文件中的项目少于设计要求的铝合金材料）。

抽样数量可参考《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205 相应的规定。

**6.1.4** 铝合金空间网格结构安装方法选择时，应充分考虑结构特点，应保证施工过程中结构单元的刚度，减少结构的变形。

**6.1.5** 铝合金空间网格结构安装方法确定后，应对各施工工况进行施工模拟分析，如分析结果表明有局部杆件或节点超过设计承载力时，应对这些杆件或节点进行调整，调整后再重新计算，直到满足设计要求。

**6.1.6** 工程中可能存在个别不锈钢螺栓或镀锌高强度螺栓拧紧不够，即所谓的“假拧”现象，本条文强调要设专人对所有不锈钢螺栓或镀锌高强度螺栓拧紧情况进行逐个检查。

**6.1.8** 由于铝合金强度比较低，构件表面容易刻痕、划伤等，因此在加工、运输、安装等各个环节都应采取措施保护好构件表面，确保表面质量。

### 6.2 制作与试拼装

**6.2.3** 铝合金空间网格结构的杆件如不够长需要接长时，一般可采用焊缝、螺纹等方式进行连接，但无论采用哪种连接方式，一般均难达到等强连接的要求。因此，当铝合金杆件长度不够时，要求重新下料。

**6.2.5** 铝合金螺栓球的抗拉极限承载力应由设计给出（或取该节点中最大不锈钢螺栓或镀锌高强度螺栓抗拉极限承载力值），试验方法可参照《钢网架螺栓球节点》JG/T10 的规定。

封板与铝合金管采用挤压连接时应采用缩管机，并结合专用成形模具进行连接。连接尺寸应符合设计图纸要求，连接处铝合金管外表面不得有明显的压痕或裂纹等缺陷。

杆件加工完后，应进行抗拉强度试验，杆件抗拉极限承载力由设计给出，试验方法可参照《钢网架螺栓球节点》JG/T10 的规定。

封板的平行螺纹的深度、螺距等应根据杆件壁厚和承载力要求进行专门设计。封板与铝合金管挤压成型时，应通过试验确定是否满足承载力要求。在生产过程中应保证工艺的稳定性，同时应根据确定好的批次进行承载力试验。

**6.2.7** 嵌入式榫节点几何尺寸计算方法及构造要求可参考《空间网格结构技术规程》JGJ7 - 2010 第 5.4.4 条的规定。

杆端嵌入件的构造比较复杂，嵌入榫的倾角也各不相同，采用普通机械加工工艺难以实现，铸铝又不能满足强度和精度要求，故要求采用数控机床加工嵌入件。

榫体是嵌入式榫节点的主体部件，毛坯可采用铝棒经机械加工而成。为保证交汇于榫体的杆件可靠地连接在一起，榫体应有足够的刚度和强度，嵌入榫的尺寸精度应保证各嵌入件能顺利嵌入并良好吻合。

**6.2.10** 对结构或形状简单的空间网格结构可以不进行试拼装，但对国外工程宜进行试拼装。对单元相同的网格结构，可进行单元试拼装；对单元不同但结构对称的网格结构，可进行部分结构试拼装；对单元不同、结构不对称的网格结构，宜进行整体结构试拼装。

## 6.3 包装与运输

**6.3.1** 对小型及标准构件和节点（如螺栓球节点、嵌入式榫节点、铸铝节点等）可按图 1 所示采用装箱包装；对大型及复杂构件和节点（如板式节点）可采用捆包装，但不论采用何种包装形式，均应采用铺设软性材料保护好构件和节点。

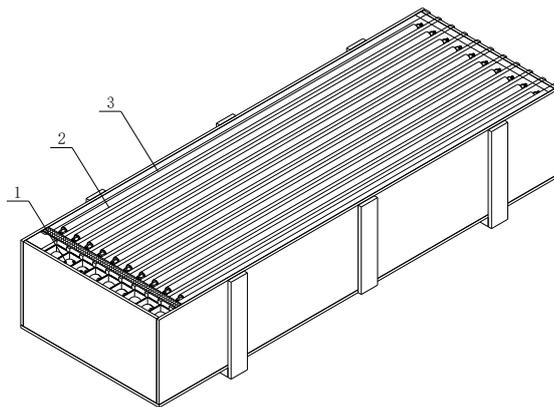


图 6 装箱包装示意图

1—螺栓球节点；2—软性材料；3—铝合金杆件

**6.3.2** 包装箱的标志可采用印刷、粘贴、拴挂、钉附及喷涂等方法。标志内容一般应包括：工程名称、发货件号、总重、外形尺寸、发货单位、收货地址、收货人及联系电话等。

## 6.4 安装

**6.4.4** 铝合金空间网格结构在安装过程中用扳手拧紧螺栓时，宜采用垫橡胶片等措施来保护构件表面不受损伤。

**6.4.5** 铝合金空间网格结构各种安装方法的主要内容和要求如下：

**1** 高空散装法是指网格结构的杆件和节点或事先拼成的小拼单元直接在设计位置进行总拼，拼装时应搭设支承架。

**2** 分条分块安装法是将整个空间网格结构的平面分割成若干条状或块状单元，吊装就位后再在高空拼成整体。分条一般是在网格结构的跨度方向上分割。条状或块状单元的大小应根据起重机起重能力和结构单元刚度确定。

**3** 滑移法是将网格结构的条状单元向一个方向滑移的施工方法。网格结构的滑移方向可以水平、向上、向下或曲线方向。它比分条安装法具有网格结构安装与室内土建施工平行作业的优点，可缩短工期，节约拼装支架，起重设备也容易解决。

**4** 整体吊装法吊装中小型空间网格结构时，一般采用多台吊车抬吊或拔杆起吊，大型空间网格结构由于重量较大及起吊高度较高，则宜采用多根拔杆吊装，在高空作移动或转动就位安装。

**5** 整体提升或整体顶升方法只能作垂直起升，不能作水平移动。提升与顶升的区别是：当空间网格结构在起重设备的下面称为提升；当空间网格结构在起重设备的上面称为顶升。由于空间网格结构的重心和提（顶）升力作用点的相对位置不同，其施工特点也有所不同。当采用顶升法时，应特别注意由于顶升的不同步，顶升设备作用力的垂直度等原因而引起的偏移问题，应采取措施尽量减少其偏移，而对提升法来说，则不是主要问题。因此，起升、下降的同步控制，顶升法要求更严格。

## 6.5 防腐

**6.5.1** 铝合金材料同其他金属材料（不锈钢和镀锌构件除外）或含酸性、含碱性的非金属材料接触时，容易发生电偶腐蚀，应在铝合金材料与其他材料之间采用油漆、橡胶或聚四氟乙烯等材料进行隔离。

**6.5.2** 铝合金空间网格结构构件表面防腐处理应分别符合下列规定：

**1** 铝合金空间网格结构阳极氧化应符合下列规定：

（1）氧化膜的厚度应符合设计和现行国家标准《铝合金建筑型材 第2部分：阳极氧化型材》GB5237.2及《铝合金结构设计规范》GB50429的规定，并应符合表1的要求。

表 2 氧化膜厚度级别 (μm)

| 级别   | 最小平均厚度 | 最小局部厚度 |
|------|--------|--------|
| AA10 | 10     | 8      |
| AA15 | 15     | 12     |
| AA20 | 20     | 16     |
| AA25 | 25     | 20     |

(2) 阳极氧化后不应有电灼伤、氧化膜脱落等影响使用的缺陷。

(3) 阳极氧化膜颜色及色差应符合设计和现行国家标准《铝合金建筑型材 第 2 部分：阳极氧化型材》GB5237.2 的规定。

**2 铝合金空间网格结构电泳涂漆应符合下列规定：**

(1) 电泳涂漆前，型材外观质量应符合现行国家标准《铝合金建筑型材 第 3 部分：电泳涂漆型材》GB5237.3 的规定。

(2) 电泳涂漆后的漆膜应均匀、整洁、不应有皱纹、裂纹、气泡、流痕、夹杂物、发粘和漆膜脱落等缺陷，电泳漆复合膜厚度应符合表 2 的规定。

表 3 电泳涂漆复合膜厚度 (μm)

| 膜厚级别 | 阳极氧化膜局部膜厚 | 漆膜局部膜厚 | 复合膜局部膜厚 |
|------|-----------|--------|---------|
| A    | ≥9        | ≥12    | ≥21     |
| B    | ≥9        | ≥7     | ≥16     |
| S    | ≥6        | ≥15    | ≥21     |

(3) 电泳涂漆型材的漆膜附着力、漆膜硬度和漆膜的颜色、色差等应符合设计和现行国家标准《铝合金建筑型材 第 3 部分：电泳涂漆型材》GB5237.3 的规定。

**3 铝合金空间网格结构粉末喷涂应符合下列规定：**

(1) 涂层的最小局部厚度宜大于等于 40μm。

(2) 粉末喷涂的涂层应平滑、均匀，不应有皱纹、流痕、鼓泡、裂纹、发粘等缺陷，可允许有轻微的桔皮现象，其程度应符合设计要求。

(3) 铝合金空间网格结构粉末喷涂的耐冲击性、附着力、压痕硬度、光泽、杯突试验结果及漆膜的颜色、色差等应符合设计和现行国家标准《铝合金建筑型材 第 4 部分：粉末喷涂型材》GB5237.4 的规定。

**4 铝合金空间网格结构氟碳漆喷涂应符合下列规定：**

(1) 喷涂漆膜厚度应符合表 3 的规定。

表 4 氟碳喷涂的漆膜厚度 (μm)

| 涂层种类 | 平均膜度 | 最小局部膜厚 |
|------|------|--------|
| 二涂   | ≥30  | ≥25    |
| 三涂   | ≥40  | ≥34    |
| 四涂   | ≥65  | ≥55    |

(2) 涂层应平滑、均匀, 不应有皱纹、流痕、鼓泡、裂纹、发粘等缺陷。

(3) 铝合金空间网格结构氟碳喷涂漆膜硬度、耐冲击性、附着力、压痕硬度、光泽和漆膜的颜色及色差等应符合设计和现行国家标准《铝合金建筑型材 第 5 部分: 氟碳漆喷涂型材》GB5237.5 的规定。

## 6.6 防火、隔热

**6.6.2** 铝合金空间网格结构防火措施通常采用水喷淋系统等进行防护, 防火涂料对铝合金材料影响较大, 容易与其他材料发生电化腐蚀, 一般较少采用。

**6.6.3** 铝合金材料在受辐射热温度达到 100°C 时, 强度开始下降, 温度超过 100°C 时, 强度明显下降, 因此, 应控制辐射热温度。

## 7 验收

### 7.2 支承面允许偏差

**7.2.3** 在对铝合金空间网格结构进行分析时，其杆件内力和节点变形都是根据支座节点在一定约束条件下进行计算的。而支承垫块的种类、规格、摆放位置和朝向的改变，都会对铝合金空间网格结构支座节点的约束条件产生直接的影响。

### 7.3 总拼和安装允许偏差

**7.3.4** 铝合金空间网格结构理论计算挠度与安装后的实际挠度有一定的出入，这除了铝合金空间网格结构的计算模型与实际情况存在差异之外，还与铝合金空间网格结构的连接节点实际零件的加工精度、安装精度等有着极为密切的联系。

## 7.4 交验

**7.4.2** 铝合金空间网格结构安装中如支座标高产生偏差，可用钢板垫平垫实。如支座轴线位置超过允许值，应由设计、监理、施工单位共同研究解决办法。严禁用倒链等强行就位。

**7.4.3** 铝合金空间网格结构若干控制点的挠度是对设计和施工的质量综合反映，故必须测量这些数据值并记录存档。挠度测量点的位置一般由设计单位确定。当设计无要求时，对小跨度、设在下弦中央一点；对大、中跨度，可设五点：下弦中央一点，两向下弦跨度四分点处各设二点；对三向网架应测量每向跨度三个四等分点处的挠度，测量点应能代表整个结构的变形情况。本条文中允许实测挠度值大于现荷载条件下挠度计算值（最多不超过 15%）是考虑到材料性能、施工误差与计算上可能产生的。