



T/CECS XXX-202X

中国工程建设标准化协会标准

充气膜结构技术规程

Technical specification for air-inflated membrane structures

(征求意见稿)

中国计划出版社

中国工程建设标准化协会标准

充气膜结构技术规程

Technical specification for air-inflated membrane structures

T/CECS XXX-202X

主编单位：北京工业大学

中国钢结构协会空间结构分会

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202X年XX月XX日

中国计划出版社

202X年 北 京

前 言

根据工程建设标准化协会《关于印发<2018 年第一批工程建设协会标准制定、修订计划>的通知》（建标协字[2018] 012 号）的要求，由北京工业大学与中国钢结构协会空间结构分会会同有关单位，在广泛调研、认真总结实践经验、参考国外先进技术资料和广泛征求意见的基础上制订本规程。

规程的主要技术内容有：1 总则；2 术语与符号；3 一般规定；4 建筑设计；5 材料；6 荷载及荷载组合；7 结构分析与设计；8 连接构造；9 设备系统；10 制作、安装与充气调试；11 验收、维护与保养。

本规程由中国工程建设标准化协会轻型钢结构专业委员会归口管理，由北京工业大学负责具体技术内容的解释。本规程在执行过程中，如有需要修改或补充之处，请将有关资料和建议寄送解释单位（地址：北京市朝阳区平乐园 100 号，北京工业大学西区基础楼 808 空间结构分会；邮政编码：100124），以供修订时参考。

主编单位：北京工业大学
中国钢结构协会空间结构分会

参编单位：

主要起草人：

主要审查人：

目 录

1 总 则	1
2 术语与符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	3
3 一般规定	5
3.1 建筑	5
3.2 类型	5
3.3 选型	7
3.4 结构设计	9
3.5 变形容许值	10
4 建筑设计	11
4.1 一般规定	11
4.2 建筑功能设计	11
4.3 建筑物理环境设计	12
4.4 建筑防火、疏散设计	14
4.5 门窗设计	15
5 材料	17
5.1 膜材	17
5.2 拉索和锚具	18
5.3 保温材料	19
5.4 其它材料	19
6 荷载及荷载组合	20
6.1 一般规定	20
6.2 风荷载	20
6.3 雪荷载	21
6.4 荷载组合	22
7 结构分析与设计	24
7.1 一般规定	24
7.2 内压设计	24
7.3 初始形态分析	25

7.4 荷载效应分析.....	28
7.5 裁剪分析.....	30
7.6 塌落时间.....	31
7.7 基础设计.....	32
8 连接构造.....	33
8.1 一般规定.....	33
8.2 膜片之间的连接.....	33
8.3 膜单元之间的连接.....	34
8.4 膜单元与支承面的连接.....	36
8.5 膜单元与气密门的连接.....	37
8.6 拉索的节点连接.....	38
8.7 膜单元与供气管的连接.....	40
9 设备系统.....	42
9.1 一般规定.....	42
9.2 充气设备.....	42
9.3 电气系统.....	44
9.4 监测与控制系统.....	44
10 制作、安装与充气调试.....	46
10.1 制作.....	46
10.2 安装.....	47
10.3 充气调试.....	48
11 验收、维护与保养.....	49
11.1 一般规定.....	49
11.2 验收.....	49
11.3 维护和保养.....	50
附录 A 常见气承式膜结构风荷载体型系数的规定.....	52
附录 B 确定 P 类、G 类膜材剪切模量的面内纯剪试验法.....	55
附录 C 确定 P 类、G 类膜材剪切模量的双轴试验法.....	58
附录 D 气枕简化计算方法.....	61
附录 E 双轴拉伸应变补偿测试方法.....	63
附录 F.....	64

Contents

1 General provisions.....	1
2 Terms and symbols.....	2
2.1 Terms.....	2
2.2 Symbols.....	3
3 General requirement.....	5
3.1 Architecture.....	5
3.2 Type.....	5
3.3 Selection.....	7
3.4 Structural design.....	9
3.5 Allowable deformation value.....	10
4 Architectural design.....	11
4.1 General requirement.....	11
4.2 Architectural function design.....	11
4.3 Architectural physical environment design.....	12
4.4 Architectural fire protection and evacuation design.....	14
4.5 Door and window design.....	15
5 Material.....	17
5.1 Membrane materials.....	17
5.2 Cable and anchor.....	18
5.3 Thermal insulation material.....	19
5.4 Other materials.....	19
6 Loads and load combinations.....	20
6.1 General requirement.....	20
6.2 Wind load.....	20
6.3 Snow load.....	21
6.4 Load combination.....	22
7 Structural analysis and design.....	24
7.1 General requirement.....	24
7.2 Internal pressure design.....	24
7.3 Analysis of initial shape.....	25
7.4 Load effect analysis.....	28

7.5 Analysis of pattern cutting.....	30
7.6 Collapse time.....	31
7.7 Foundation design.....	32
8 Connections structure.....	33
8.1 General requirement.....	33
8.2 Connection between membrane panel.....	33
8.3 Connection between membrane element.....	34
8.4 Connection between membrane element and supporting surface.....	36
8.5 Connection between membrane element and airtight door.....	37
8.6 Joint connection of tension cable.....	38
8.7 Connection between membrane element and air supply pipe.....	40
9 Equipment system.....	42
9.1 General requirement.....	42
9.2 Inflatable equipment.....	42
9.3 Electrical system.....	44
9.4 Monitoring and control system.....	44
10 Manufacture, installation and inflating adjustment.....	46
10.1 Manufacture.....	46
10.2 Installation.....	47
10.3 Inflation adjustment.....	48
11 Acceptance and maintenance.....	49
11.1 General requirement.....	49
11.2 Acceptance.....	49
11.3 Maintenance.....	50
Appendix A Regulations for shape factor of wind load for common air-inflated membrane structure.....	52
Appendix B In-plane pure shear test method for determining the shear modulus of P and G type membrane materials.....	55
Appendix C Biaxial test method for determining the shear modulus of P and G type membrane.....	58
Appendix D Simplified calculation method of air-cushion.....	61
Appendix E Biaxial tensile strain compensation test method.....	63
Appendix F.....	64

1 总 则

1.0.1 为贯彻执行国家的技术经济政策，适应充气膜结构的发展需要，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 本规程适用于工业与民用建筑领域的气承式、气枕式、气肋式和气囊式等充气膜结构的设计、制作、安装、验收及维护。

1.0.2 条文说明：除气承式、气枕式、气肋式和气囊式四种基本的充气膜结构类型外，本规程也适用于上述四种类型的组合形式以及充气膜结构和其它结构的组合形式。非工业与民用建筑领域，如飞艇、充气天线、充气游乐设施等充气膜结构分析设计理论与方法也可以参考本规程，但由于材料性能要求、荷载取值等与工业与民用建筑领域不同，因此本规程未包括非工业与民用建筑领域的充气膜结构。

1.0.3 本规程与《膜结构技术规程》（CECS 158）和《膜结构工程施工质量验收规程》（T/CECS 664）配套使用。

1.0.4 充气膜结构的设计、制作、安装、验收及维护，除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 充气膜结构 air-inflated membrane structure

由膜材和其他构件组成，以充气方式向膜面施加预张力的膜结构建筑物或构筑物，包括气承式、气枕式、气肋式和气囊式或其组合形式。

2.1.2 气承式膜结构 air-supported membrane structure

由膜面、室内地面（楼面）与周围封闭边界形成可供人类活动或生产的封闭空间，充气提供稳定的内压以保持膜面形态并承受荷载作用的充气膜结构。

2.1.3 气枕式膜结构 air-cushion membrane structure

由多个气枕单元列阵而成的围护结构体系。每个气枕单元由双层或多层膜材形成枕状封闭空腔，充气提供稳定内压以保持膜面的形态，并承受荷载作用。

2.1.4 气肋式膜结构 air-rib membrane structure

由一个或多个气肋单元跨越建筑空间，并承受荷载作用的充气膜结构。每个气肋单元由膜材形成管状封闭空腔，充气维持较高的内压以形成自平衡体系。

2.1.5 气囊式膜结构 air-chamber membrane structure

由双层或多层膜材形成封闭囊体，充气提供稳定的内压以保持膜面的形态，与周边刚性骨架形成平衡体系直接跨越较大建筑空间，并承受荷载作用。

2.1.6 工作内压 operation pressure

充气膜结构在正常使用时的内外气压差，其值介于最小工作内压和最大工作内压之间。

2.1.6 条文说明：应根据不同的使用阶段以及风荷载和雪荷载的大小，设定不同的内外气压差。

2.1.7 基准工作内压 basic operation pressure

充气膜结构初始形态设计时（找形或找力）的内外气压差，是膜裁剪设计和索网下料长度的基准。

2.1.7 条文说明：基准工作内外压差值对应膜面初始预张力和索网的初始预拉力。

2.1.8 初始态 initial form

在永久荷载和基准工作内压共同作用下的结构形态。

2.1.9 最大工作内压 maximum operation pressure

在强风或者暴雪等极端天气条件下，充气膜结构可正常使用的最大内外气压差。

2.1.9 条文说明: $P_{\max}$ 为最大工作内压, 取最大雪荷载对应的最大内外气压差 $P_{\max,s}$ 与最大风荷载对应的最大内外气压差 $P_{\max,w}$ 中的较大值。

2.1.10 最小工作内压 minimum operation pressure

充气膜结构保持结构体系稳定性设定的最小内外气压差。

2.2 符号

H ——膜结构(单元)矢高;

L ——膜结构(单元)短向跨度;

G ——为恒荷载;

W ——风荷载;

Q ——活荷载与雪荷载中的较大者;

P_0 ——基准工作内压;

$P_{\max}$ ——为最大工作内压;

$P_{\max,s}$ ——设计雪荷载对应的最大工作内压;

$P_{\max,w}$ ——设计风荷载对应的最大工作内压;

R_1 、 R_2 ——充气膜结构两个主曲率半径;

σ_1 、 σ_2 ——两个主应力;

$\sigma_{f,w}$ ——各种荷载组合作用下的经向最大应力值;

$\sigma_{f,f}$ ——各种荷载组合作用下的纬向最大应力值;

$f_{r,w}$ ——膜材经向抗拉强度设计值;

$f_{r,f}$ ——膜材纬向抗拉强度设计值;

$f_{k,w}$ ——膜材经向抗拉强度标准值;

$f_{k,f}$ ——膜材纬向抗拉强度标准值;

ζ ——强度折减系数;

γ_R ——膜材抗力分项系数;

$\sigma_{\max}$ ——在各种荷载组合作用下的最大主应力值;

f ——对应于最大主应力方向的膜材抗拉强度设计值;

f_k ——膜材抗拉强度标准值;

σ_1 ——在第一类荷载组合下的第一主应力；

σ_p ——维持膜结构曲面形状所需的最小应力值；

F ——拉索的抗拉力设计值；

F_{tk} ——拉索的极限抗拉力标准值；

V_0 ——基准工作内压作用下气承式膜结构室内空气体积；

A_p ——气承式膜结构的水平投影面积；

C_0 ——泄气洞口形式对应的流量折减系数；

A_e ——关门情况下气承式膜结构的等效泄气面积；

A_E ——开启门洞（如应急门）人员逃生时增加的泄气面积；

L_M ——泄气时鼓风机的充气速率；

P_r ——泄气至内压基本平稳时的残余气压；

W ——膜面荷载总重；

K_w ——残余气压放大系数；

P_2 ——设备和管道的压力损失值；

α ——附加系数；

A_e ——关门情况下气承式膜结构建筑的等效泄气面积；

C_0 ——泄气洞口形式对应的流量折减系数。

3 一般规定

3.1 建筑

3.1.1 充气膜结构应根据建筑物的性质、重要程度、使用功能和地区自然条件等因素，并应遵循可持续发展的原则进行建筑设计。

3.1.2 充气膜结构的建筑设计应包括建筑功能与形态设计、建筑物理环境设计、防火疏散设计、气密通道设计、充气设备设计、电气与控制系统设计、空调系统设计、防雷设计。

3.1.2 条文说明：与常规刚性结构不同，充气膜结构建筑设计须考虑膜材透光性能影响的光环境、膜材保温性能影响的热环境、充气形体易产生的内部回声及张紧的薄膜外部的噪声影响等，还需考虑充气设备、控制系统、气密通道等特有的设计要求等。

3.1.3 布置充气膜结构建筑物内部、外部固定物体时，应保证膜面在最不利荷载组合作用下发生局部大变形时，固定物体靠近膜面的凸出点不与膜面摩擦或碰撞，且应对 2 倍最大变形范围内的局部固定物体尖角进行防护处理。

3.1.3 条文说明：充气膜结构在荷载作用下变形较大，布置内外部固定物体时需注意与膜面保持足够的距离，防止由于摩擦与碰撞造成膜面破坏。

3.2 类型

3.2.1 充气膜结构可采用气承式、气枕式、气肋式、气囊式四种基本类型，也可以采用各种基本类型的组合。

3.2.2 气承式膜结构的形状可采用球面、柱面、椭球面或它们的组合形式，可支承于地面（图 3.2.2（a））或下部刚性结构（图 3.2.2（b））。当跨度较大时，宜加设膜面拉索。

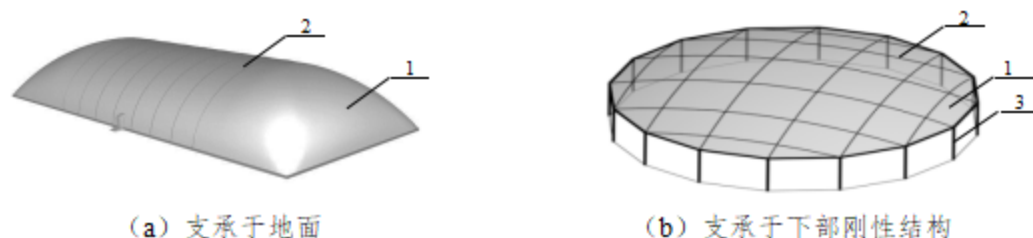


图 3.2.2 气承式膜结构

1-膜面；2-拉索；3-下部刚性结构

3.2.2 条文说明：气承式膜结构一般采用 P 类膜材，可应用于体育、文娱、商业建筑和工业厂房，也可用于

有环保要求的储料大棚、污水覆盖和储气罐，需要移动或快速搭建的避难所、雷达防护罩等临时建筑。还可以作为采用喷射技术的混凝土壳体或冰壳的胎模，国内已建成的充气模板混凝土煤仓最大跨度为 70 余米，充气模板冰塔最高为 30 余米，它们往往需要更高精度的找形与裁剪分析。

3.2.3 气枕式膜结构中气枕单元的平面形状可采用三边形、矩形、菱形和六边形等凸多边形(图 3.2.3 (a)、(b))，可由多个气枕单元列阵支承于刚性骨架或索网骨架，形成建筑围护体系。

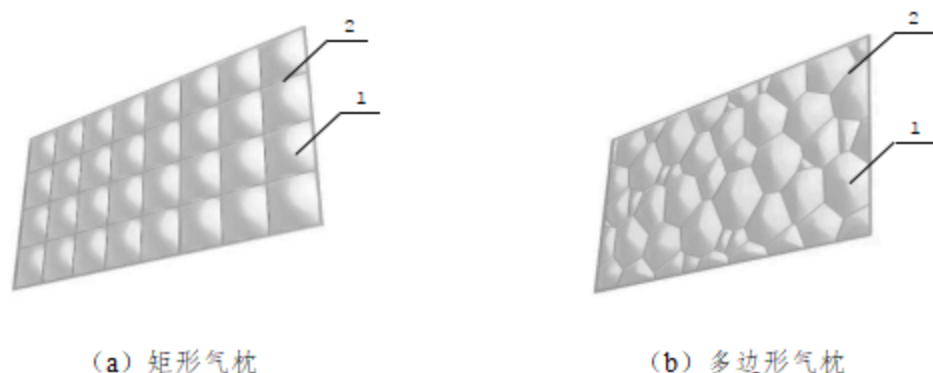


图 3.2.3 气枕式膜结构

1-气枕；2-支承骨架

3.2.3 条文说明：气枕式膜结构一般采用 ETFE 膜材料，具有透光性强、自洁性好的特点，表面不易沾污，因此更加适用于需要良好采光的场合，也可结合光、声、电的巧妙运用，使建筑物绚丽多彩。

3.2.4 气肋式膜结构由多根拱、柱或梁形气肋单元组合形成柱面、球面等形状直接支承于地面或下部刚性结构上，以跨越较大建筑空间。可由气肋单元紧密排列并用索、带等柔性连接以形成整体(图 3.2.4 (a))，也可构成气肋拱架(图 3.2.4 (b))。

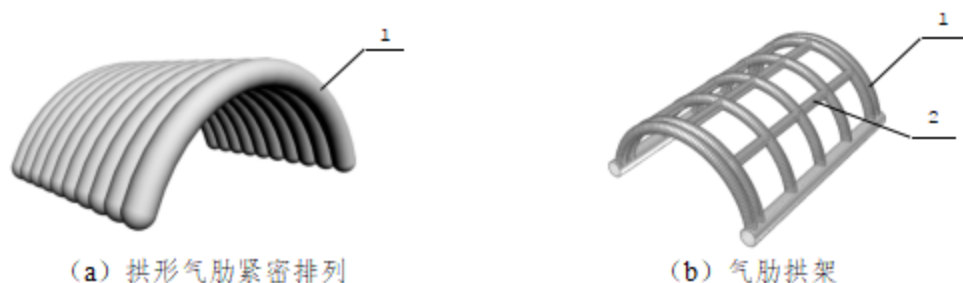


图 3.2.4 气肋式膜结构

1-拱形气肋单元；2-梁形气肋单元

3.2.4 条文说明：气肋式膜结构一般采用 P 类膜材。荷载作用下拱形气肋承压为主，受力合理，但梁形气肋需要抵抗弯矩，往往需要辅以紧密连接的受压侧板和受拉侧索，国外已有该类工程案例。

3.2.5 气囊式膜结构可用单个囊体跨越较大的建筑空间，也可加设膜面拉索。周边刚性骨架可以是下部支承结构的一部分(图 3.2.5)，也可以是囊体自平衡体系的一部分。

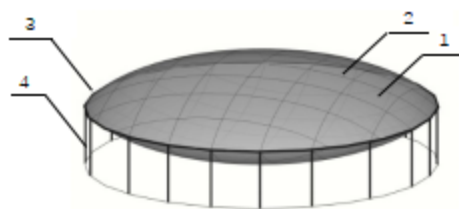
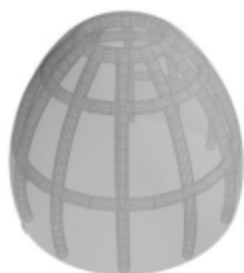


图 3.2.5 气囊式膜结构

1-囊体；2-拉索；3-周边刚性骨架；4-下部支承结构

3.2.5 条文说明：气囊式膜结构常采用 P 类膜或 G 类膜材。与气枕式膜结构的区别在于它是由一个气囊形成的直接跨越建筑空间并承受荷载的屋盖结构，所以一般跨度较大。自平衡气囊式膜结构如果充入的是轻于大气的氦气等惰性气体，则可做成浮空系留屋盖，根据屋盖开合的需要将气囊升起或降下，国内外已有工程方案采用此种设计。

3.2.6 两种或两种以上不同基本类型的充气膜结构进行合理组合可形成组合充气膜结构，如气承式与气肋式组合（图 3.2.6（a））、用张拉膜覆盖气肋拱架（图 3.2.6（b））。



（a）气承式与气肋式组合



（b）用张拉膜覆盖气肋拱架

图 3.2.6 组合充气膜结构

3.3 选型

3.3.1 充气膜结构的选型应根据建筑造型、使用要求、支承条件等因素通过综合分析确定。

3.3.2 气承式膜结构选型应符合下列规定：

1 平面形状宜选用简单对称的矩形、凸多边形、圆形、椭圆形以及它们的组合形状，应避免锐角；

2 矢跨比不宜小于 $1/3$ ，也不宜大于 $2/3$ 。对于无雪荷载或屋面具有除雪或融雪设施时，矢跨比可适当降低但不应小于 $1/6$ ；

3 根据需要可设单向拉索（图 3.2.2（a））、纵横向拉索（图 3.3.2（a））、斜向交叉索网（图 3.3.2（b））或其它形式索网，以减小膜面应力和变形，拉索的直径和间距应由计算确定；

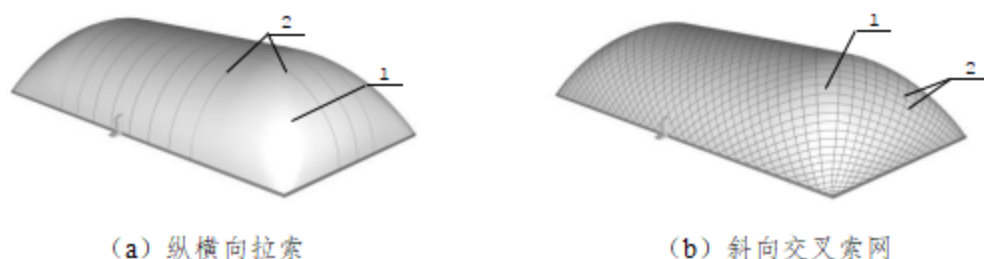


图 3.3.2 常用索网布置

1-膜面；2-拉索；

4 气承式膜结构与其它结构间可采用刚性或柔性连接，连接构造应满足强度、变形和气密性要求；

5 可增设内膜形成一定的空气层或在内外膜中间填充保温材料，提高保温隔热性能。

3.3.2 条文说明：对于使用功能特殊的雷达罩、储气罐、充气模板混凝土壳等气承式膜结构，其矢跨比可能更大，可不受本条第 2 款矢跨比建议值的限制。本条第 3 款仅列举了常用索网的形式，工程中并不限于所列形式。加设索网使膜面被束缚，从而在内压作用下膜面呈局部穴状鼓起，形成了与索网的协同工作，能有效地转移并降低膜面的应力。但是整体结构承受的荷载和传递给基础的反力并没有因为这种膜面形状的改变而降低，只是附加的索网转移了一部分本应由膜面承受的荷载。因此可根据工程特点进行合理的索网设计，但需确保索网形状美观、间距合理，避免引起过度的应力集中。

3.3.3 气枕式膜结构选型应符合下列规定：

1 气枕单元的平面形状应避免 45° 以下的锐角。当必须采用小于 45° 锐角时，宜进行局部切角或在阴角处分割为更小的单元。采用圆形边界时可用多边形拟合；

2 应根据建筑效果、结构分析及便于维修更换等因素综合确定气枕单元的面积，不宜过大且长宽比宜小于 10，气枕单元的边界宜共面；

3 气枕单元的跨度宜为 2m~5m。跨度大于 6m 时，宜增设拉索；

4 气枕单元的矢跨比宜取 $1/8 \sim 1/12$ 。因建筑造型有特别需要时，不应低于 $1/20$ 和高于 $1/6$ ；

5 当存在特殊保温、声学性能要求，或者荷载较大时，可采用三到五层膜材构成气枕。

3.3.3 条文说明：本条第 1 款规定气枕式膜结构的平面形状尽量避免 45° 以下的锐角，是为了防止安装时带来破损的风险，允许采用多边形拟合圆形边界是为了减小加工的难度。本条第 4 款规定了气枕式膜结构矢跨比的上下限，工程经验表明采用过小的矢高将降低气枕单元的承载力，而过大的矢高将容易造成非圆形边界气枕角部的褶皱。

3.3.4 气肋式膜结构选型应符合下列规定：

1 当采用气肋单元构成圆柱形、球形、椭球形网格的支承骨架（肋），并与覆盖膜结合使用形成组合充气膜结构时，矢跨比宜采用 $1/3 \sim 2/3$ ；

2 当荷载较大或气密性要求较高时，可采用内层膜密封外层膜承载的气肋单元；

3 当跨度较大或内压较高时，可在气肋单元外表面布置拉索。

3.3.5 气囊式膜结构选型应符合下列规定：

- 1 平面一般为圆形、椭圆形，也可为矩形、凸多边形；
- 2 矢跨比宜取 1/12~1/10；
- 3 当跨度较大时，宜在气囊上下表面设置索网加强。

3.4 结构设计

3.4.1 充气膜结构的结构设计应符合下列规定：

- 1 应采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，以分项系数设计表达式进行荷载组合，再进行荷载效应分析；
- 2 一般工业与民用建筑充气膜结构的安全等级可取二级。当结构设计工作年限为 50 年时，结构重要性系数不应小于 1.0；当结构设计工作年限为 25 年时，结构重要性系数不应小于 0.95；当结构设计工作年限为 5 年时，结构重要性系数不应小于 0.9；
- 3 应进行内压设计、结构分析、应急逃生分析、节点连接设计以及必要的施工过程验算。

3.4.1 条文说明：充气膜结构应进行非线性分析，因此本条第 1 款明确了结构设计中需先按分项系数设计表达式进行荷载组合后再进行荷载效应分析。本条第 3 款指出的内压设计、应急逃生分析是充气膜结构不同于常规刚性结构设计的特有要求。

3.4.2 充气膜结构应按表 3.4.2 分为四个等级进行设计。

表 3.4.2 充气膜结构分级及设计要求

结构等级	结构类型与适用范围		分析计算方法	拉索设置
I	气承式膜结构	$l > 120\text{m}$	应考虑膜材各向异性进行几何非线性分析，宜进行专项论证。	宜设斜向交叉索网，并增设加劲索
	气囊式膜结构	$l > 90\text{m}$		
	气肋式膜结构	$l > 60\text{m}$		
II	气承式膜结构	$80\text{m} < l \leq 120\text{m}$	应考虑膜材各向异性进行几何非线性分析	宜设斜向交叉索网
	气囊式膜结构	$60\text{m} < l \leq 90\text{m}$		
	气肋式膜结构	$40\text{m} < l \leq 60\text{m}$		
III	气承式膜结构	$40\text{m} < l \leq 80\text{m}$	宜考虑膜材各向异性进行几何非线性分析	可设纵横向拉索或斜向交叉索网
	气囊式膜结构	$30\text{m} < l \leq 60\text{m}$		
	气肋式膜结构	$20\text{m} < l \leq 40\text{m}$		
IV	气枕式膜结构		可考虑膜材各向同性进行几何非线性分析	可不设置拉索或按构造设置拉索
	气承式膜结构	$l \leq 40\text{m}$		
	气囊式膜结构	$l \leq 30\text{m}$		
	气肋式膜结构	$l \leq 20\text{m}$		

注：表中 l 为膜结构（或气枕单元）短向跨度。拉索设置指气承式膜结构。

3.4.2 条文说明：织物类膜材具有明显的各向异性。而结构跨度越大，受力状态越复杂，就越有必要采用各向异性的计算模型，使计算模拟分析更加符合实际。因此，相较现行协会标准《膜结构技术规程》CECS 158，本规程对不同跨度的充气膜结构划分等级，明确了需考虑膜材各向异性和适合采用不同拉索加强方式的结构类型与范围。这里对超大跨度的充气膜结构提出了更为严格的要求，有利于保证计算分析结果的可靠性，减小隐患。

3.4.3 对成型精度要求高的充气膜结构，计算分析时应考虑裁剪误差和热合缝影响。

3.4.3 条文说明：研究表明对充气膜结构成型精度要求高时，裁剪误差和热合缝的影响应予以考虑。对其进行几何非线性分析时不仅要考虑膜材各向异性，还宜考虑膜材的非线性本构。

3.5 变形容许值

3.5.1 按正常使用极限状态设计时充气膜结构在最不利荷载组合作用下的最大变形不宜超过表 3.5.1 中的容许变形值。

表 3.5.1 充气膜结构的容许变形值

结构类型	水平变形	竖向变形
气承式膜结构	$h/10$	$l/30$
气枕式膜单元	-	$l/15$
拱形气肋式膜结构	$h/10$	$l/30$
气囊式膜结构	-	$l/50$

注：1、表中 h 为膜结构（单元）矢高， l 为膜结构（单元）短向跨度；

2、表中的容许变形均指膜面相对于初始态的变形。

3.5.1 条文说明：充气膜结构的变形与工作内压相关，国外尚无关于其变形限值的规定。原因在于与常规刚性结构通过构件自身应变引起内力的变化来承受或传递荷载不同，充气膜结构尤其是气承式膜结构主要通过膜面的形状改变来承受或传递外荷载，而且一旦荷载卸除，膜面形状即可恢复。因此容许变形值主要考虑不会因较大的变形导致膜面破坏，也不会因较大的变形和振动导致内部人员有不舒适感，并根据工程经验总结给出。

3.5.2 在各种荷载组合作用下，变形后的膜面与膜结构内外部固定物体之间的最小距离应不小于 1m。

3.5.2 条文说明：由于局部最大变形可能使膜面与内部、外部固定物体凸出点之间的距离过小，易发生碰撞、摩擦而造成膜面损伤、撕裂，因此设计中应校核内部、外部固定物体凸出点附近的膜面局部变形。

3.5.3 在活荷载作用下膜面不应出现局部凹陷变形。

3.5.3 条文说明：膜面积水（雪）具有马太效应特点，积水（雪）将导致局部凹陷变形，凹陷变形反过来加剧积水（雪）现象，因此膜面不允许出现局部低沉凹陷。设计中应检查在雪等屋面荷载作用下膜面局部变形的等值线图，如果等值线有闭合区域即会有“凹兜”产生。

4 建筑设计

4.1 一般规定

4.1.1 充气膜结构民用建筑设计应符合《民用建筑设计统一标准》GB 50352，工业建筑设计可参照现行国家相关标准执行。

4.1.1条文说明：近年来，充气膜结构广泛应用于料场封闭、污染土处理、环保覆盖等工业建筑中，其建筑设计需要参照国家相关行业的标准。

4.1.2 充气膜结构的总体布局设计应符合以下规定：

- 1 宜选择地势平缓、场地干燥、排水通畅、空气流通、工程地质及水文地质条件较好的地段。
- 2 民用建筑不应选在有害气体和烟尘影响的区域内，且与噪声源及储存易燃、易爆物场所的距离应符合国家现行有关安全、卫生和环境保护等标准的规定。
- 3 主要出入口及疏散口位置应符合城市交通规划要求，宜有 2 个不同方向通向城市道路的出口。
- 4 建筑场地应具有相应的市政配套条件。
- 5 应考虑日照遮挡和设备噪音等对周围环境的影响。

4.1.2 条文说明：气承式膜结构建筑一般体量较大，设备较多。膜面反光、日照遮挡和设备运行等对周围环境的影响。对位于居住建筑群中建造的白色的气承式膜结构建筑，应评估膜面反射白光对周边建筑的影响。

4.1.3 确定充气膜结构建筑单体方案时，应考虑结构体系的合理性，其平面、立面和形态设计除必须满足使用功能要求外，尚应考虑与建筑物整体风格，与周围环境相协调，并体现充气膜结构的形态和技术特点。

4.2 建筑功能设计

4.2.1 充气膜结构建筑平面和外形设计应符合膜结构的受力特点。

4.2.2 充气膜结构建筑的四周应留有安装和检修空间。

4.2.2 条文说明：充气膜结构建筑的安装和检修一般需要吊车或登高车，宜留有足够的空间作业。为了安装和检修的方便，气承式膜结构建筑的四周宜留有 4m~6m 宽的作业场地。

4.2.3 充气膜结构建筑四周宜做散水，并将雨水汇集排入场地雨水系统。

4.2.4 用于羽毛球、网球等场馆的设置内膜的充气膜结构，内膜膜材的颜色应满足视觉要求。

4.2.4 条文说明：充气膜结构用于羽毛球、网球等场馆时，内膜材宜采用深蓝色、深绿色等较深颜色的膜材，便于肉眼能快速分辨球体。

4.2.5 充气膜结构用于游泳、水上项目等场馆时，应采取防塌落措施。

4.2.5 条文说明：气承式、气囊式、气肋式膜结构塌落于水面时，馆内人员逃生困难。对于气承式膜结构，可通过增高膜结构四周墙体高度或采取其他措施，增加躲避空间，以满足人员疏散的要求。

4.3 建筑物理环境设计

4.3.1 充气膜结构民用建筑的室内温、湿度环境应符合《民用建筑设计统一标准》GB 50352、《民用建筑热工设计规范》GB 50176 的规定。对室内湿度较大的建筑物，尚应防结露，并采取措施排除冷凝水，满足除湿要求。

4.3.2 充气膜结构建筑室内应通风良好，宜采用机械通风换气。

4.3.3 充气膜结构民用建筑室内空气环境污染物的控制应满足《民用建筑工程室内环境污染控制规范》GB 50325 规定。

4.3.4 当建筑有保温隔热需求时，充气膜结构可采用双层或多层膜的构造方式，也可在两层膜之间增加保温材料，节点构造应避免冷桥。充气膜结构的平均传热系数宜由试验测定。

4.3.4 条文说明：对应用于寒冷地区和夏热冬冷地区的充气膜结构，围护结构的传热系数和围护结构总热阻可以用以下公式计算：

1. 围护结构传热系数：

$$K=1/r_0 \quad (4.3.4-1)$$

式中： r_0 ——围护结构总热阻 $[(m^2 \cdot K)/W]$ 。

2. 围护结构总热阻：

$$r_0=r_i+r+r_e \quad (4.3.4-2)$$

式中： r_i ——内表面换热阻 $[(m^2 \cdot K)/W]$ ，冬季和夏季取值 0.11；

r_e ——外表面换热阻 $[(m^2 \cdot K)/W]$ ，冬季取值 0.04，夏季取值 0.05；

r ——围护结构传热热阻 $[(m^2 \cdot K)/W]$ ，对于单一材料层的热阻可以用材料层的厚度除以材料的导热系数得到，对于多层匀质材料层结构的热阻可以用以下公式得出：

$$r=r_1+r_2+\cdots+r_n \quad (4.3.4-3)$$

式中： $r_1, r_2, \cdots, r_n$ ——各层材料的热阻 $[(m^2 \cdot K)/W]$ 。

【例 1】在寒冷地区的气承式膜结构羽毛球馆，双层膜+75mm 厚玻璃纤维棉双面覆铝箔玻纤布保温材料的秋、冬季节围护结构传热系数计算如下：

(1) 双层膜热阻，[双层膜间距大于 150mm 时传热系数可取为 $1.8 W/(m^2 \cdot K)$]：

$$r_1=1/1.8=0.56 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$$

(2) 75mm 厚玻璃纤维棉双面覆铝箔玻纤布热阻:

$$r_2=0.075/0.042=1.79 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$$

(3) 总热阻:

$$r_0=r_i+r_1+r_2+r_e=0.11+0.56+1.79+0.04=2.5 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$$

(4) 围护结构传热系数:

$$K=1/r_0=1/2.5=0.4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$$

在气承式膜结构保温材料设计中,单层膜的传热系数大,双层膜+空气间层的传热系数小,双层膜加适当的保温隔热材料,其保温隔热性能甚至优于传统建筑的屋面。因此,从气承式膜结构建筑热环境设计考虑,应根据建筑功能、环境、预算,采用双层膜、双层膜含保温材料或单层膜方案。

【例 2】双层气枕,内外层均采用 250umETFE,冬季。

(1) ETFE 膜材热阻:

$$r_1=r_2=d/\lambda=0.00025/0.1=0.0025 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$$

(2) 空气层热阻,大于 25mm 的空气层,其热阻 $r_g=0.18 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$

(3) 气枕单元总热阻:

$$r_0=r_i+r_1+r_g+r_2+r_e=0.11+0.0025+0.18+0.0025+0.04=0.335 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W};$$

(4) 气枕单元传热系数:

$$K=1/r_0=1/0.335=2.99 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$$

当 ETFE 导热系数采用 0.238 时,气枕单元总热阻 0.332 $(\text{m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$,传热系数 3.01 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

类似地,可以计算出三层气枕的传热系数约 2.0 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,四层气枕的传热系数约 1.5 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,与 ETFE 膜材的厚度、种类、空气层厚度的关系均不大,只与气腔数量有直接关系。

在不具备试验条件也不便于采用上述经验方法计算时,常用膜结构的传热系数参考值如下:

- 1) P 类双层膜 (90mm 空气层) 1.4~1.8 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
- 2) P 类三层膜 (90mm 空气层) 0.9~1.3 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
- 3) P 类双层膜 (90mm 空气层)+50 厚双面覆铝箔玻璃丝绵保温材料 0.6~0.8 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
- 4) E 类双层气枕 (100mm 空气层) 的传热系数 2.9~3.0 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
- 5) E 类三层气枕 (100mm+100mm 空气层) 的传热系数 1.8~2.0 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
- 6) E 类四层气枕 (100mm+100mm+100mm 空气层) 的传热系数 1.4~1.5 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

ETFE 单层膜导热系数 0.238 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; P 类单层膜导热系数 0.2108 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

由于 ETFE 膜材厚度极薄,故其数值、颜色及是否印刷,对气枕单元的整体传热系数影响很小,可忽略不计。

4.3.5 气枕式膜结构应采取空气干燥或内部空气循环等措施,避免气枕内部结露。

4.3.6 气承式膜结构建筑可在膜体的适当部位布置具有透光性的膜材。当有保温隔热要求时,透光膜的布置比例不宜超过建筑投影面积的 20%。

4.3.7 根据使用要求进行采光和照明设计时,宜合理利用自然光。吊式照明灯具宜采取止晃措施。大空间充气膜结构建筑宜采用柱式照明。热源照明灯具与膜面的距离不应小于 1.0m。

4.3.8 气枕式膜结构的膜材透光率选择,应综合考虑室内采光和遮阳的需要。

4.3.9 当充气膜结构民用建筑有特殊声学要求时,应根据膜材的声学特性、膜结构构造特点、预张力施加水平等因素对建筑声学质量进行评价。

4.3.9 条文说明:气承式膜结构建筑,内衬采用吸音膜材或内部悬挂吸音板,可以明显降低回音影响。对雨噪敏感的气枕式膜结构工程,可通过在气枕下方的室内环境设置吸音措施。对混响时间有控制要求的气枕式膜结构工程,应在室内设置吸音材料。必要时,尚应对室内或膜体覆盖空间进行混响时间测试和控制。

4.4 建筑防火、疏散设计

4.4.1 占地面积大于 10,000 m² 的充气膜结构建筑,应设置环形消防车道。当条件受限制时,应沿建筑长边设置尽端式消防车道,并应设回车道或回车场。回车场的面积应不小于 12m×12m,如供大型消防车使用时,应不小于 18m×18m。

4.4.2 充气膜结构民用建筑应设置合理的防火分区,气承式膜结构单个防火分区建筑面积不宜超过 10,000 m²。

4.4.2 条文说明:气承式膜结构民用建筑,国内外的工程实践大多为 10,000 m² 以内的单一防火分区。防火分区面积较大、人员较多的气承式膜结构民用建筑设计须从人员疏散、火灾救援等方面做消防特殊研究。

4.4.3 充气膜结构工业、仓储建筑最大允许占地面积及其防火分区面积应满足表 4.4.3 的要求。

表 4.4.3 工业、仓储气承式膜结构占地面积与防火分区面积限值

生产的火灾危险性类别	每个防火分区最大建	最大允许占地面积(m ²)
	筑面积(m ²)	
丙类	12,000	50,000
丁类	不限	不限
戊类	不限	不限

注:1、生产的火灾危险性类别依据《建筑设计防火规范》GB 50016 确定。

2、储煤棚防火分区之间应采用宽度不小于 10m 的通道或高度大于堆煤表面高度 3m 的防火墙进行分隔。有斗轮机分割的两个煤场,视为两个防火分区。

4.4.4 充气膜结构每个防火分区应急疏散门数量不应少于 2 个,且相邻两个应急疏散门净距不小于 10m。旋转门、互锁门、汽车通道门不得作为应急疏散门使用,应急疏散门净宽不应小于 0.9m。

4.4.5 充气膜结构民用建筑的疏散距离不宜超过 30m。

4.4.5 条文说明:疏散距离较大的气承式膜结构民用建筑设计须从人员疏散、火灾救援等方面做消防特殊研究。

4.4.6 充气膜结构工业或仓储建筑内任一点至最近应急疏散门的直线距离不应大于表 4.4.6 的

限值。

表 4.4.6 工业、仓储气承式膜结构应急疏散门距离限值

生产的火灾危险性类别	任一点到应急疏散门的最大距离 (m)
丙类	80
丁类	不限
戊类	不限

注：1、生产的火灾危险性类别依据现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016 确定。

4.4.7 充气膜结构与相邻建（构）筑物之间的防火间距，民用建筑不宜小于 6m，工业或仓储建筑不宜小于 10m。

4.4.8 充气膜结构民用建筑应设置灭火器、火灾自动报警、应急广播等设施，辅助用房与膜结构之间应采用防火墙隔开。

4.5 门窗设计

4.5.1 气承式膜结构正常出入口可采用平开互锁门、旋转门、车辆通道互锁门。安全出口应设应急疏散门。

4.5.1 条文说明：

气承式膜结构的门按使用对象划分，主要分为人员进出门及车辆通道互锁门。人员进出门又分为正常使用进出门及应急疏散门。

正常使用进出门主要有平开互锁门及旋转门两种形式。对于进出人员少于 100 人/小时的宜采用平开互锁门，其由多套门体及压力缓冲区构成，通过多套门间交替开启实现互锁机制。平开互锁门能提供较好的气密性，门扇需向高压区开启。对于进出人员多于 100 人/小时的宜采用旋转门，旋转门能提供较高的通过效率，但气密性略差，采用旋转门作为人员进出门时，要有相应的安全保障措施避免人员夹伤。

应急逃生门仅作为紧急情况供人员逃生时使用，正常情况下不得随意开启，但必须保证紧急情况下能方便开启，门体禁止用钥匙锁闭，宜采用安全推杠式门锁。为了确保紧急情况时应急逃生门的完整、可靠，不被失压后的膜体拉扯变形，应急逃生门的门框应具有足够的刚度；应急逃生门的门扇应设有可视观察窗；应急逃生门的门扇应开向逃生方向，如方向与正压方向相同，宜采用平衡式门扇开启方式，避免开启时对外部人员造成伤害；应急逃生门内部应配置有应急照明灯，外部设有警示标识。

应急逃生门的布置应参考《建筑设计防火规范》中的相应规定设置。

车辆通道互锁门主要是解决气承式膜结构内部有车辆、大型设备、设施等进出而设置的，因此需按最大部件设计门体尺寸及压力缓冲区长度。车辆通道互锁门的门体宜采用滑升门结构，该类型门体具有较好的气密性。对于有重型车辆进出的车辆通道互锁门，其缓冲区地面，尤其是门体闭合处地面，应控制其沉降、变形，避免造成门体闭合不严的漏气现象。

4.5.2 平开互锁门开启方向应开向室内，开启扇宽度不应小于 0.9m。

4.5.3 旋转门宜采用三翼或四翼，手动方式开启。

4.5.4 车辆通道互锁门之间的空间应具有气密性，并满足车辆通行要求。

4.5.5 应急疏散门宜采用平衡门。

4.5.6 所有的门应配有观察窗。在互锁通道入口处不能同时观察到两个门的状态时，应设标识或警示灯装置显示两个门状态。

4.5.7 当采用附属用房和气承式膜结构联建时，中间的分隔墙的构造应保证密封和抗压，在分隔墙上只能开固定窗。

4.5.8 门、窗、门窗框架及通道应满足最大工作内压下正常使用的要求。

5 材料

5.1 膜材

5.1.1 膜材应根据充气膜结构的使用功能、结构类型、所处环境、工作年限、承受荷载以及建筑防火要求选用 P 类、G 类或 E 类膜材。

5.1.1 条文说明：随着织物纤维及涂层材料的研发、编织及涂层工艺的改良、透光隔热性能的提升，近年来出现了较多新型膜材。对这些新型膜材的强度以及耐久性能等指标进行充分认证以后，可以积极使用新型膜材，提升建筑物安全以及使用性能。

5.1.2 P 类和 G 类膜材的产品名称和理化性能应符合《膜结构用涂层织物》GB/T 30161 的规定。P 类、G 类或 E 类膜材的力学性能应符合《膜结构技术规程》CECS 158 的规定。

5.1.2 条文说明：P 类、G 类膜材抗撕裂强度和抗剥离强度，E 类膜材的抗拉强度标准值、第一屈服强度标准值、第二屈服强度标准值、密度、弹性模量以及泊松比，在《膜结构技术规程》CECS 158 均已进行了详细的规定，本规程不再重复列出。

《膜结构技术规程》CECS 158 条文说明指出，高温时 E 类膜材强度将显著下降，并给出了温度从 20℃升高到 40℃时 ETFE 薄膜屈服强度和抗拉强度下降约 20%的折减率。进一步的研究表明：当温度从 20℃升高到 60℃时，屈服强度和抗拉强度将下降约 40%，供设计需要时参考。

5.1.3 充气膜结构设计时，P 类和 G 类膜材经/纬向极限抗拉强度标准值可按表 5.1.3-1 和表 5.1.3-2 选用，或按《膜结构用涂层织物》GB/T 30161 规定的试验方法进行试验确定。

表 5.1.3-1 常用 P 类膜材等级

代号	经/纬向极限抗拉强度标准值 (N/5cm)	厚度 (mm)	重量 (g/m ²)
P2	2,200/2,000	0.45~0.65	≥500
P3	3,200/3,000	0.55~0.85	≥750
P4	4,200/4,000	0.65~0.95	≥900
P5	5,300/5,000	0.75~1.05	≥1,000
P6	6,400/6,000	1.0~1.15	≥1,100
P7	7,500/7,000	1.05~1.25	≥1,300
P8	8,500/8,000	1.05~1.25	≥1,500

表 5.1.3-2 常用 G 类膜材等级

代号	经/纬向极限抗拉强度标准值 (N/5cm)	丝径 (μm)	厚度 (mm)	重量 (g/m ²)
G3	3,200/2,500	3、4 或 6	0.25~0.45	≥400
G4	4,200/4,000	3、4 或 6	0.40~0.60	≥800

G5	6,000/5,000	3、4或6	0.50~0.95	≥1,000
G6	6,800/6,000	3、4	0.65~1.0	≥1,100
G7	8,000/7,000	3、4	0.75~1.15	≥1,200
G8	9,000/8,000	3、4	0.85~1.25	≥1,300

5.1.4 P类、G类膜材的弹性模量和泊松比可采用生产企业提供的数值或按《膜结构技术规程》CECS 158规定的双轴拉伸试验方法确定。P类、G类膜材的剪切模量可采用生产企业提供的数值或按本规程附录B或附录C规定的试验方法确定。在方案设计阶段，可按表5.1.4选用。

表 5.1.4 P 类、G 类膜材弹性模量和泊松比

膜材类型		弹性模量(MPa)		泊松比		剪切模量(MPa)
		经向	纬向	经向	纬向	
P 类	①	800	800	0.1	0.1	10
	②	900	600	0.3	0.2	10
G 类		1,800	1,000	0.9	0.5	80

注：①为经纬向力学性能接近的 P 类膜材；②为除①类以外的其他 P 类膜材。

5.1.4 条文说明：膜材的弹性模量和泊松比与织物基材、涂层以及编织方式等密切相关，宜按本规程规定的试验方法确定。对于剪切模量，本规程附录 B 和附录 C 给出了两种试验方法。附录 B 和附录 C 的试验方法分别参考了日本和欧洲的试验方法，可根据试验条件选用。

为了方便，通过分析多种常用膜材双轴拉伸试验结果给出了 P 类和 G 类膜材弹性模量和泊松比的参考值，供方案设计阶段参考使用。考虑到 P 类膜材编织方式及涂层工艺的多样性，又将其分为两类并分别给出了材性参数。某些采用双向张拉涂层工艺的膜材以及某些经编膜材，经纬向力学性能比较接近，可选用 P 类①的材性数据。

5.1.5 膜材的防火性能应按现行国家标准《建筑材料及制品燃烧性能分级》GB 8624 的规定进行测试并确定等级。膜材的燃烧性能应不低于 B1 级要求。

5.2 拉索和锚具

5.2.1 充气膜结构拉索的索体宜采用钢绞线或钢丝绳。

5.2.1 条文说明：充气膜结构的拉索索体也可采用非金属索体。非金属索体，柔韧性强，弯曲性能好，但不能承受高温辐射。

5.2.2 钢绞线的质量应符合《建筑结构用高强度钢绞线》GB/T 33026、《锌-5%铝-混合稀土合金镀层钢丝、钢绞线》GB/T 20492 和《建筑用不锈钢绞线》JG/T 200 等的规定。钢丝绳的质量应符合《一般用途钢丝绳》GB/T 20118 和《不锈钢绞线》GB/T 9944 的规定。

5.2.3 钢绞线索体可采用镀锌钢绞线、高强度低松弛预应力热镀锌钢绞线 and 不锈钢绞线。

5.2.4 钢丝绳索体宜采用密封钢丝绳、单股钢丝绳、多股钢丝绳。充气膜结构用钢丝绳应采用

无油镀锌钢芯钢丝绳。

5.2.5 多股镀锌钢芯钢丝绳和多股不锈钢钢丝绳的弹性模量不应小于 $1.20 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ，不锈钢绞线的弹性模量不应小于 $1.40 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ，镀锌钢绞线和锌-5%铝-混合稀土合金镀层钢绞线的弹性模量不应小于 $1.60 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 。

5.2.6 充气膜结构中拉索锚具宜采用压接式锚具，其抗拉强度不得小于拉索极限抗拉力标准值的 90%。锚具表面应做防腐处理。

5.2.7 压接式锚具的质量应符合《钢丝绳绳端套管压制索具》GB/T 30589 和《不锈钢拉索》YB/T 4294 的规定。

5.2.8 对组成钢绞线、钢丝绳的钢丝应进行镀锌或其他防腐镀层处理。对外露的钢绞线和钢丝绳，可采用高密度聚乙烯护套或其他方式防护。锚具与有防护层的拉索连接处应进行防水密封。

5.3 保温材料

5.3.1 保温材料的选取应考虑膜体加工特点及安装便利性，并应符合《民用建筑热工设计规范》GB 50176、《建筑设计防火规范》GB 50016 和《公共建筑节能设计标准》GB 50189 的要求。

5.3.2 保温材料的燃烧性能宜采用 A 级。内部环境湿度较大时，可选用燃烧性能 B1 级的吸湿性低的保温材料。

5.3.3 充气膜结构的保温材料可采用双面覆铝箔玻纤布玻璃纤维棉、玻璃纤维气凝胶毡、双面复合铝箔化学交联聚乙烯泡棉（XPE）、双面复合铝箔橡塑保温棉等。

5.3.3 条文说明：本条给出了四种常用的保温材料，其中双面覆铝箔玻纤布玻璃纤维棉和玻璃纤维气凝胶毡燃烧性能可达到 A 级，双面复合铝箔化学交联聚乙烯泡棉（XPE）和双面复合铝箔橡塑保温棉燃烧性能可达到 B1 级。

5.3.4 采用悬挂式安装的保温材料应具有足够的抗拉能力，防止断裂。

5.4 其它材料

5.4.1 铝合金型材宜采用 6xxx 系列，其材质应符合《铝合金结构设计规范》GB 50429 的规定。

5.4.2 三元乙丙胶条、硅橡胶条等应符合《建筑门窗、幕墙用密封胶条》GB/T 24498 的规定。

5.4.3 气枕式膜结构送风管道、连接软管和气阀应具备良好的抗紫外线、抗老化、抗变形能力。送风管道可选用镀锌钢管、不锈钢钢管、聚酯管等；连接软管可采用 FEP、ETFE 等材质；气阀可采用铝合金、不锈钢、ETFE 等材质。

6 荷载及荷载组合

6.1 一般规定

6.1.1 充气膜结构设计时应考虑永久荷载、活荷载、内压、风荷载、雪荷载等荷载作用。荷载标准值应按《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定采用，膜面的活荷载标准值可取 0.3kN/m^2 。

6.1.2 对充气膜结构中的索、膜构件，可不考虑温度作用、地震作用及地基不均匀沉降的影响；支承结构的抗震设计，应按《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定执行。

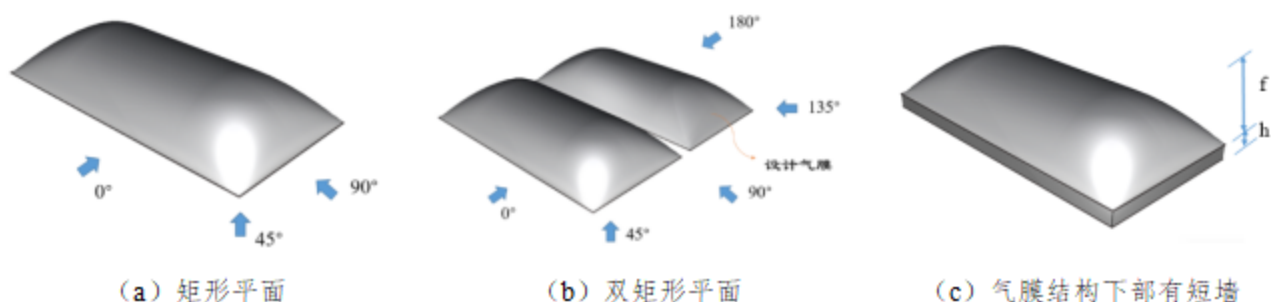
6.1.2 条文说明:充气膜结构自重一般较小，地震对结构的影响较小，设计时可不考虑地震作用，但地震对支承结构的影响应予考虑。

6.2 风荷载

6.2.1 充气式膜结构风荷载体型系数取值，可参考现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定。对于形状复杂或重要的充气式膜结构，应通过风洞试验或专门研究来确定风荷载体型系数。

6.2.2 矩形平面气承式膜结构的风荷载体型系数，可参见附录 A 确定。

6.2.2 条文说明:风荷载是充气膜结构的主要荷载。由于充气膜结构的体型较复杂，而《建筑结构荷载规范》GB 50009 所提供的建筑体型有限，所以充气膜结构的风荷载体型系数一般都需要通过风洞试验来确定。当所设计的充气膜结构为临时性建筑时，可参考以往的工程确定风荷载体型系数。



6.2.3 在计算风荷载引起的索、膜部分的内力和位移时应考虑其动力效应。

1 对 I 级充气膜结构，应通过专项研究确定风荷载的动力效应。

2 对于 II、III、IV 级气承式、气肋式和气囊式膜结构，宜采用风振系数考虑结构的风致动力效应，风振系数可取 1.2-1.6。

3 对于气枕式膜结构，气枕单元的风荷载动力效应计算应采用阵风系数，支承骨架的风荷载动力效应计算应采用风振系数。

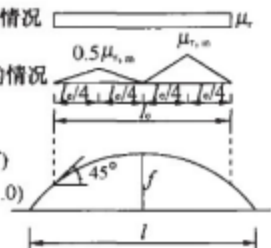
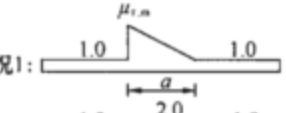
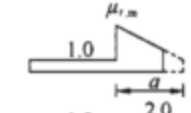
6.2.3 条文说明: 充气膜结构自重较小, 属风敏感结构, 在风荷载作用下易产生较大的变形和振动。对于该问题国内外已开展了一定的研究工作, 但是由于充气膜结构形态各异, 很难用统一的风振系数来描述。对于形状复杂、跨度较大或重要的建筑物, 必须进行风洞试验和风振分析, 以确定风荷载动力影响。当有风荷载时, 通常需增加内部压力, 以增大屋盖结构的刚度。对于一定的风速, 其增加值是一定的。对于大多数气承式膜结构, 其表面大部分承受负风压, 故在荷载组合时, 风压加上最大工作压力不应超过结构的有效抗力。充气膜结构的基础设计可不考虑风振系数。

6.3 雪荷载

6.3.1 充气式膜结构雪荷载分布系数可按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 取值。

6.3.2 气承式膜结构的雪荷载分布系数可按表 6.3.2 确定。

表 6.3.2 气承式膜结构的雪荷载分布系数

项次	类别	雪荷载分布系数 μ_r
1	拱形屋面	均匀分布的情况 μ_r 不均匀分布的情况  $\mu_r = l/(8f)$ ($0.4 \leq \mu_r \leq 1.0$) $\mu_{r,m} = 0.2 + 10f/l$ ($\mu_{r,m} \leq 2.0$)
2	高低屋面	情况1:  情况2:  $a = 2h$ ($4m < a < 8m$) $\mu_{r,m} = (b_1 + b_2)/2h$ ($2.0 \leq \mu_{r,m} \leq 4.0$)

6.3.2 条文说明: 由于作为屋面结构的充气膜结构, 其曲面多为正高斯曲率曲面, 结构上的雪荷载一般为非均匀分布, 因此应根据不同的曲面形状、曲率变化调整雪荷载的分布。根据哈尔滨工业大学对膜结构屋面开展的积雪滑落试验结果, 屋面积雪的滑落临界角大多在 $30^\circ \sim 45^\circ$, 故本规程确定为 45° 。当积雪粘度较大时, 也可参考现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009, 取积雪滑落临界角为 60° 。当充气膜结构与附属用房连在一起时, 在连接区常会出现高低屋面的积雪情况。此区域的积雪非常严重, 是导致工程雪灾的重要原因之一, 故应在设计时特别注意, 并尽量避免出现这种情况。

6.3.3 当充气膜结构采用除雪、融雪措施时,经专项论证后雪荷载可适当降低,但降低幅度不应超过 50%。

6.3.3 条文说明:雪荷载可以通过提高内压、融雪或相结合来清除,在一些极端环境下,可通过机械或人工方式除雪。通常情况下,上人除雪不能作为一般除雪方法,但在特殊情况下或局部可以采用。

增压法:通过提高充气膜膜内压力来抵抗积雪。气压增加值应大于等于规范中规定的雪屋顶荷载要求。

融雪法:在结构设计分析时应考虑最大可能积雪速率和飘积率,以此作为设计雪荷载。同时融雪系统设计需要考虑合理准确的热功损耗,例如建筑容积、膜导热性、空气对流、屋面表面积等。并且保证在正常电力供应出现问题时,备用电源可满足融雪装置的正常运转。

结合法:可通过融雪法和提高内压相结合的方法保障气承式膜结构在雪荷载作用下正常使用。

6.4 荷载组合

6.4.1 充气膜结构设计应根据使用过程中可能同时出现的荷载,按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行荷载组合。

6.4.1 条文说明:充气膜结构的恒荷载包括:膜、索、连接件自重,吊挂设备(如照明、音响、管槽线、内衬膜、隔热层、自动喷淋、监测控制管线和设备等)自重。由膜及加强件构成的永久荷载只占总荷载的很小部分,但其大小对结构坍塌时间有影响。

充气膜结构的施工检修荷载不仅要考虑均布荷载,还需考虑集中荷载的影响,集中荷载的大小和作用位置,应根据安装方式和结构形状确定。

内气压是充气膜结构所特有的参数,它既是一个结构内部抗力特性参数,又是一种长期载荷。保持合适内气压值可保证结构合理刚度、形态稳定和材料强度,在各种设计载荷下,膜面不出现过大大变形、振动、褶皱、局部低沉凹陷等。

6.4.2 充气膜结构设计荷载组合应按式(6.4.2-1—6.4.2-11)进行:

1 强度验算荷载组合:

第一类荷载组合:

$$1.3G + 1.0P_0 \quad (6.4.2-1)$$

$$0.9G + 1.3P_{max} \quad (6.4.2-2)$$

$$1.3G + 1.5Q + 1.0P_{max,s} \quad (6.4.2-3)$$

第二类荷载组合:

$$1.3G + 1.5Q + 0.7 \times 1.5W + 1.0P_{max,s} \quad (6.4.2-4)$$

$$0.9G + 1.0P_{max,w} + 1.5W \quad (6.4.2-5)$$

$$0.9G + 1.5W + 0.7 \times 1.5Q + 1.0P_{\max,w} \quad (6.4.2-6)$$

2 变形验算荷载组合：

第一类荷载组合

$$1.0G + 1.0P_{\max} \quad (6.4.2-7)$$

$$1.0G + 1.0Q + 1.0P_{\max,s} \quad (6.4.2-8)$$

第二类荷载组合：

$$1.0G + 1.0Q + 0.7 \times 1.0W + 1.0P_{\max,s} \quad (6.4.2-9)$$

$$1.0G + 1.0P_{\max,w} + 1.0W \quad (6.4.2-10)$$

$$1.0G + 1.0W + 0.7 \times 1.0Q + 1.0P_{\max,w} \quad (6.4.2-11)$$

式中：G——恒荷载；

W——风荷载；

Q——活荷载与雪荷载中的较大者；

P_0 ——基准工作内压；

$P_{\max,s}$ ——与设计雪荷载对应的最大工作内压；

$P_{\max,w}$ ——与设计风荷载对应的最大工作内压；

$P_{\max}$ ——最大工作内压，取 $P_{\max,s}$ 和 $P_{\max,w}$ 中的较大值。

6.4.2 条文说明：充气膜结构的设计主要由强度和变形控制，且与结构内压密切相关。当结构处于不同工作状态时，应选择适当的内压及荷载组合形式。第一类荷载组合主要考虑由永久荷载和准永久荷载（如大雪）组合所引起的结构内力和变形。第二类荷载组合则考虑由强风或强风与大雪联合作用引起的结构内力和变形。本条列出的是充气膜结构设计中必须要考虑的一些基本组合形式，实际设计中可结合具体情况增加其他必要的荷载组合工况。

7 结构分析与设计

7.1 一般规定

7.1.1 充气膜结构应进行内压设计、初始形态、荷载效应、裁剪和应急逃生分析。

7.1.2 采用索网加强的充气膜结构，受力分析应考虑索和膜的协同作用，应对索、膜进行整体结构分析。

7.1.2 条文说明：采用索网加强的充气膜结构，在荷载作用下，索和膜的协同作用很复杂，索网与膜面之间和未设连接节点的搭接交叉索之间可能存在相对滑移或索膜发生脱离。鉴于考虑接触滑移或脱离等影响的有限元分析比较复杂，在结构分析中较难准确模拟，现多采用膜和索节点耦连的方式进行分析，在强度校核时，可采用通过调整膜面应力的方法考虑其影响，建议膜面应力放大 10%~15%。

7.1.3 充气膜结构分析时应考虑膜面褶皱对结构刚度的影响。

7.1.3 条文说明：充气膜结构分析时，应按主应力准则判断膜单元的三种受力状态：无褶皱、单向褶皱、双向褶皱。对于单向褶皱膜单元，可根据张力场理论修正其刚度；对于双向褶皱膜单元，应忽略其对结构整体刚度的贡献，为了防止计算过程中出现病态矩阵，本构关系矩阵可用一个很小正值的对角矩阵代替。

7.1.4 充气膜结构分析时应根据实际支承情况考虑结构边界条件。

7.1.4 条文说明：在充气膜结构荷载分析过程中，计算模型的边界条件应考虑支承点构造和支承结构刚度的影响；对于一些未与支承界面（地面、支承结构）固定连接的充气膜结构，还需考虑受荷过程中结构与支承界面的接触、脱离问题。

7.2 内压设计

7.2.1 内压设计应包括基准工作内压、最小工作内压、最大工作内压设计。

7.2.2 基准工作内压应保证结构正常使用状态下的稳定性，一般可在下列范围内选取：

气承式膜结构： 200~300Pa

气肋式膜结构： 5,000~10,000Pa

气枕式膜结构： 200~250Pa

气囊式膜结构： 250~300Pa

7.2.2 条文说明：对于一些特殊用途的充气膜结构，基准工作内压可按下列范围选取：

雷达罩：（1,000~2,000）Pa；

储气罐：（2,000~5,000）Pa；

气膜模板：（400~600）Pa。

高压气肋梁拱：（50,000~300,000）Pa。

7.2.3 最小工作内压应根据单位面积永久荷载最大值确定,不宜小于 100Pa。

7.2.4 最大工作内压应保证在各种荷载组合作用下,满足承载力极限状态和正常使用极限状态设计要求。

7.2.4 条文说明:最大工作内压的最小取值建议同时满足以下两项条件:

(1) 对于雪荷载而言,最大工作内压的最小取值应保证膜最底部不出现大量褶皱,即

$$P_{\max,s} \geq 1.1(W_s + W_D)/A_p \quad (7.2.4-1)$$

其中, W_s 为膜面雪荷载总量, W_D 为膜面自重和恒载总量, A_p 为基底投影面积,并考虑 1.1 倍放大系数。

(2) 对于风荷载而言,最大工作内压的最小取值原则上应保证膜面均不形成负压区域,但对整个膜面如此要求过于苛刻,实际操作时可适当降低要求,仅取

$$P_{\max,w} \geq \mu_s \mu_h \omega_0 \quad (7.2.4-2)$$

其中, μ_s 为体形系数, μ_h 为受压中心区的高度系数, ω_0 为基本风压。

另外,考虑到门洞设计及鼓风机供气能力,最大工作内压建议不宜超过下列限值:

气承式膜结构: 700Pa

气枕式膜结构: 400Pa

气肋式膜结构: 50,000Pa

气囊式膜结构: 800Pa

对于一些特殊用途的充气膜结构,最大工作内压可取为: 雷达罩 6,000Pa; 储气罐 6,000Pa; 气膜模板 800Pa; 高压气肋梁拱 300,000Pa。

7.2.5 气枕式膜结构内压应根据气枕封闭结构在设计荷载下的最不利效应进行确定,初步设计时可采用附录 D 给出的简化方法进行计算。

7.3 初始形态分析

7.3.1 充气膜结构初始形态分析应基于设计几何形状按等应力或非等应力平衡曲面进行,可采用非线性有限元法、动力松弛法、力密度法等。

7.3.2 索网初始形状应根据充气膜结构基准工作内压确定,宜采用索膜共同受力找形的方法确定索网和膜面形态。

7.3.3 充气膜结构初步设计阶段可采用式 (7.3.3-1) 进行初始形态估算。

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = P_0 \quad (7.3.3-1)$$

式中: R_1 、 R_2 ——充气膜结构两个主曲率半径;

σ_1 、 σ_2 ——两个主应力;

P_0 ——基准工作内压。

7.3.3 条文说明：在确定基准工作内压及给定膜面外形后，按式 7.3.3-1 进行计算可估算对应的初始膜面预应力，根据初始膜面外形、初始膜面预应力和基准工作内压，即可进行充气膜结构的初始形态分析。

对于特定形状的充气膜结构，膜面应力可根据式（7.3.3-2）计算

$$\sigma = PRC \quad (7.3.3-2)$$

式中： σ ——在充气压力和荷载作用下膜面的应力值（单位：N/m）；

P ——内部充气压力与风压迭加后作用值（单位：Pa）；

R ——曲率半径（单位：m）；

C ——充气膜结构的形状系数。

1 对于广泛采用的圆柱形和球形充气膜结构，其曲率半径 R 可根据矢高 H 、跨度 B 计算如下

$$R = \frac{H^2 + (\frac{B}{2})^2}{2H} \quad (7.3.3-3)$$

2 对于常用规则几何形态充气膜结构，其形状系数 C 如下：

(1) 圆球形

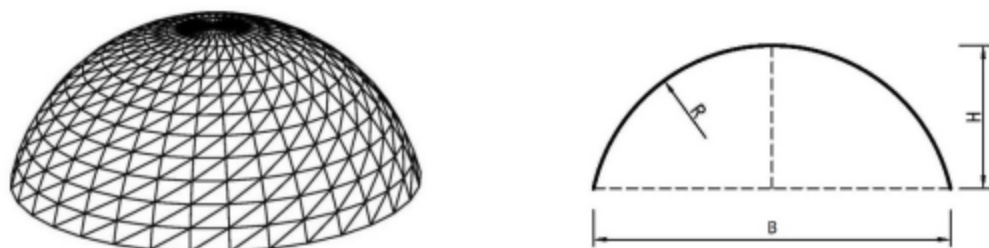


图 7.3.3-1 圆球形充气膜结构

对于圆球形充气膜结构，如图 7.3.3-1，其形状系数： $C=0.5$ ，即圆球形充气膜结构的经纬向膜面应力可分别表达为：

$$\sigma = \frac{PR}{2} \quad (7.3.3-4)$$

(2) 圆柱面形

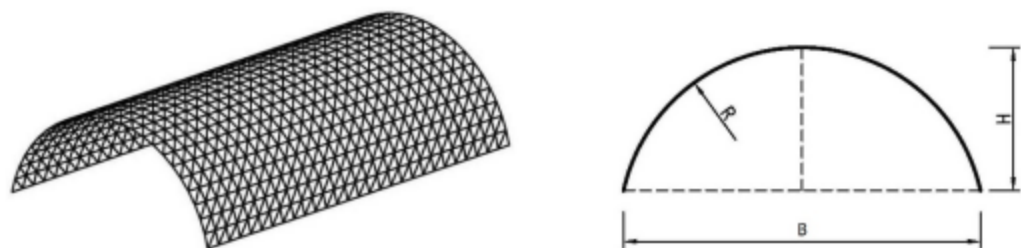


图 7.3.3-2 圆柱面形充气膜结构

对于圆柱面形充气膜结构，如图 7.3.3-2，其形状系数： $C=1$ ，即圆柱面形充气膜结构的主跨向膜面应力可表达为：

$$\sigma = PR \quad (7.3.3-5)$$

(3) 椭球面形（或抛物面形）

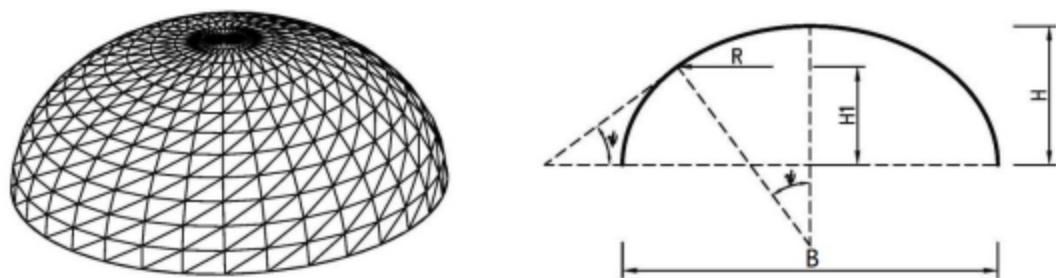


图 7.3.3-3 椭球面（或抛物面）形充气膜结构

对于椭球面（或抛物面）形充气膜结构，如图 7.3.3-3，膜面为非等应力曲面，其经向和纬向应力分别为

$$\sigma_{\theta} = \frac{PR}{2} \quad (7.3.3-6)$$

$$\sigma_{\varphi} = PR \left(1.0 - \frac{(R/H)^2}{2} \right) \quad (7.3.3-7)$$

7.3.4 当充气膜结构用于精确成形的模板时，在初始形态分析中应考虑热合缝对预应力分布的影响。

7.3.4 条文说明：如图 7.3.4 所示，在热合缝长度方向，可将焊接区域重叠的一层膜面模拟为索单元，其截面面积取为膜材厚度和热合缝宽度的乘积，并根据膜材弹性模量及厚度确定等效的索单元弹性模量；在焊缝宽度方向，相邻热合缝之间的膜单元纬向弹性模量的修正可按式（7.3.4）进行计算：

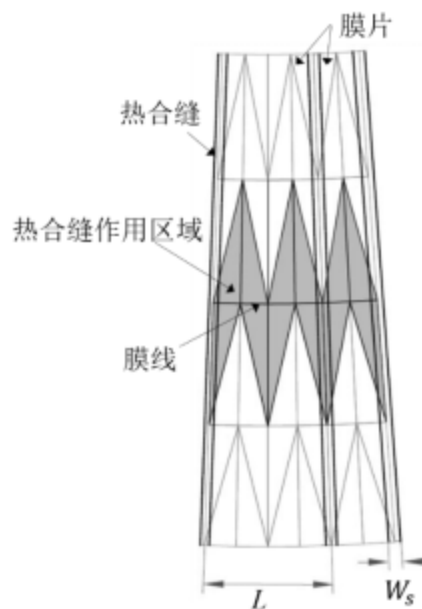


图 7.3.4 热合缝间膜片示意图

$$E_f' = mE_f \quad (7.3.4-1)$$

$$m = \frac{2L}{2L - W_s} \quad (7.3.4-2)$$

式中: E_f' ——修正膜材纬向模量;

E_f ——膜材纬向模量;

m ——膜材纬向模量修正系数, 其值不大于 2;

L ——相邻热合缝之间的膜线长度;

W_s ——热合缝宽度。

7.4 荷载效应分析

7.4.1 充气膜结构的荷载效应分析可采用非线性有限元法和动力松弛法。

7.4.2 在第一类荷载组合下, 充气膜结构应按内压不变进行非线性分析; 在第二类荷载组合下, 充气膜结构宜按内压变化进行非线性分析。

7.4.2 条文说明: 第一类荷载组合作用下, 充气膜结构相对变形缓慢, 由于充气系统的自动调节功能, 气压可维持基本不变, 故按内压不变进行非线性分析。

在第二类荷载组合作用下, 如风荷载等动态荷载会导致结构迅速变形, 充气系统无法立即做出反应调节内压保持不变, 故分析时需按内压变化进行非线性分析。在风吸力作用下, 充气膜内部体积变大, 按理想气体状态方程计算得到的内压有可能小于零, 然而考虑到当内压小于零时, 由于门窗洞口等因素会导致充气膜向内吸气, 使内压变大, 因此考虑内压变化计算时内压取值建议不小于零。

7.4.3 在各种荷载组合作用下, 涂层织物膜面各点的经向、纬向最大应力应满足式 (7.4.3) 的要求:

$$\sigma_{f,w} \leq f_{r,w} \quad (7.4.3-1)$$

$$\sigma_{f,f} \leq f_{r,f} \quad (7.4.3-2)$$

$$f_{r,w} = \zeta \frac{f_{k,w}}{\gamma_R} \quad (7.4.3-3)$$

$$f_{r,f} = \zeta \frac{f_{k,f}}{\gamma_R} \quad (7.4.3-4)$$

式中: $\sigma_{f,w}$ 、 $\sigma_{f,f}$ ——在各种荷载组合作用下的经向、纬向最大应力值;

$f_{r,w}$ 、 $f_{r,f}$ ——膜材经向、纬向抗拉强度设计值;

$f_{k,w}$ 、 $f_{k,f}$ ——膜材经向、纬向抗拉强度标准值。对于 P 类、G 类膜材，取经纬向极限抗拉强度标准值；

ζ ——强度折减系数；对于 P 类、G 类膜材，一般部位取 $\zeta=1.0$ ；节点和边缘部位取 $\zeta=0.75$ ；

γ_R ——膜材抗力分项系数；对于 P 类、G 类膜材，第一类荷载组合时， $\gamma_R=5.0$ ；第二类荷载组合时， $\gamma_R=2.5$ 。

7.4.3 条文说明：建筑涂层织物膜材为正交异性，在材料章节和结构计算模型均假设为正交异性，在强度设计条文改为正交异性复合材料强度准则，同时，考虑最新建筑织物膜材强度研究，在双轴拉伸作用下，其强度呈现增强，如图 7.4.3。因此，延续单轴拉伸强度设计准则，不考虑双轴拉伸强度折减，但是分别考虑经纬向抗拉设计强度，通过经纬向拉伸强度值，考虑抗力分项系数。

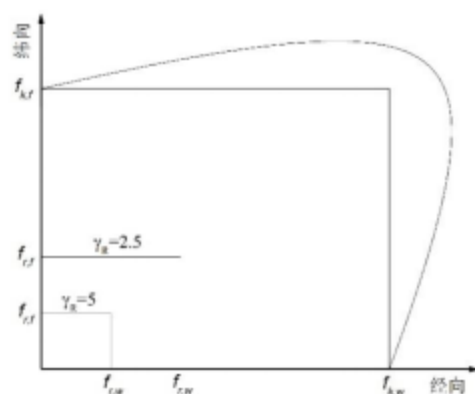


图 7.4.3 建筑织物膜材强度模型

7.4.4 在各种荷载组合作用下，E 类膜材膜面各点的最大主应力应满足下列要求：

$$\sigma_{max} \leq f \quad (7.4.4-1)$$

$$f = \zeta \frac{f_k}{\gamma_R} \quad (7.4.4-2)$$

式中： σ_{max} ——在各种荷载组合作用下的最大主应力值；

f ——对应于最大主应力方向的膜材抗拉强度设计值；

f_k ——膜材抗拉强度标准值。对于 E 类膜材，取第二屈服强度标准值；

ζ ——强度折减系数；对于 E 类膜材，取 $\zeta=1.0$ ；

γ_R ——膜材抗力分项系数；对于 E 类膜材，第一类荷载效应组合时，气枕式 $\gamma_R=1.4$ ；第二类荷载效应组合时， $\gamma_R=1.2$ 。

7.4.4 条文说明：E 类膜 TD 和 MD 方向力学性能差异小，在工程领域可认为一致，结构设计分析假设为各

向同性，因此，可计算 **Mises** 主应力，并采用膜面最大主应力作为强度设计。

7.4.5 在各种荷载组合下，充气膜结构膜面允许出现一定褶皱，但需满足以下要求：

1 在第一类荷载组合下，充气膜结构膜面不得出现双向褶皱（松弛现象），局部区域可出现单向褶皱，褶皱区域的膜单元第一主应力应满足式（7.4.5）的要求，并且单向褶皱的总面积不得大于膜面总面积的 10%；

$$\sigma_1 > \sigma_p \quad (7.4.5)$$

式中： σ_1 ——在第一类荷载组合下的第一主应力；

σ_p ——维持膜结构曲面形状所需的最小应力值，可取基准工作内压作用下膜面应力值的 25%。

2 在第二类荷载组合下，充气膜结构膜面可局部出现双向褶皱，但双向褶皱面积不得大于膜面总面积的 10%。

7.4.6 拉索的抗拉力设计值应按式 7.4.6 进行计算

$$F = \frac{F_{tk}}{\gamma_R} \quad (7.4.6)$$

式中： F ——拉索的抗拉力设计值（kN）；

F_{tk} ——拉索的极限抗拉力标准值（kN）；

γ_R ——拉索的抗力分项系数，可取 1.6~2.0。

7.4.6 条文说明：当采用纵横向加强索网时，建议拉索的抗力分项系数取 2.0；对于采用斜向交叉索网加强且索网间距小于 3m 的气承式膜结构，由于结构体量庞大、索网非常密集，单根索长度较长，受荷区域大，一般情况下对索力起控制作用的风荷载不会在索受荷区域内同时达到设计荷载，并且其中某根索破坏时，通过内力重分布其承担的荷载可由其它索代替，因此建议拉索的抗力分项系数可取 1.6~2.0。

7.5 裁剪分析

7.5.1 充气膜结构的裁剪分析应在初始形态基础上进行，并考虑初始预张力、膜材材料特性以及基础连接处膜片特殊边界的影响，裁剪线宜采用测地线法确定。

7.5.1 条文说明：为获得与空间曲面最接近的平面展开膜片，裁剪分析应确定膜片的收缩量，调整膜片的裁剪尺寸，应考虑膜片之间的搭接量。

7.5.2 当气承式膜结构面积较大时，可分成多个膜单元，单个膜单元面积不宜超过 4,000m²。

7.5.2 条文说明：为便于膜的工厂加工、包装运输与现场安装，膜单元面积不宜超过 4,000m²；若是双层或多层气承式膜结构，则内外层膜面积总和不宜超过 4,000m²。

7.5.3 充气膜结构裁剪补偿率宜按照附录 E 双轴拉伸试验确定，也可采用经验值确定：P 类膜材膜面处可取 0.5%~3%，固定边界处可取 0.2%~2%；E 类膜材不宜超过 0.2%~0.5%。

7.5.4 当充气膜结构用于精确成型的模板时，裁剪设计应在裁剪形状上进行，应考虑膜片之间的搭接量，不考虑膜片的收缩量。裁剪形状可用残余气压法确定。

7.5.4 条文说明：裁剪形状对应内压为 0Pa 时的充气膜形状，理论上讲，裁剪形状应将充气膜的内压从基准工作内压降至 0Pa 时分析得到。但采用非线性有限元法分析求解 0pa 状态时往往不收敛，因此可在初始形态对应形状的基础上，将基准工作内压增加 50Pa，并按内压增加的比例增大所有索膜计算单元的预应力，将内压降到 50Pa 时分析得到的形状作为裁剪形状，该方法称为残余内压法。

7.6 塌落时间

7.6.1 进行应急逃生分析时，气承式膜结构屋顶膜面塌落至 2.1 m 时所用时间 T 可按式 (7.6.1) 计算：

$$T = \frac{V_0 - 2.1A_p}{1.265C_0(A_c + A_E)P_r^{0.5} - L_M} \quad (7.6.1-1)$$

式中： V_0 ——基准工作内压作用下气承式膜结构室内空气体积， m^3 ；

A_p ——气承式膜结构的水平投影面积， m^2 ；

C_0 ——泄气洞口形式对应的流量折减系数，可取 0.65；

A_c ——关门情况下气承式膜结构的等效泄气面积， m^2 ；

A_E ——开启门洞（如应急门）人员逃生时增加的泄气面积， m^2 ；

L_M ——泄气时鼓风机的充气速率， m^3/s ；

P_r ——泄气至内压基本平稳时的残余气压，Pa，可按式 (7.6.1-2) 计算：

$$P_r = K_w \frac{W}{A_p} \quad (7.6.1-2)$$

式中： W ——膜面荷载总重，包括膜面自重及膜面上的竖向外荷载；

K_w ——残余气压放大系数，仅自重时取 1.0，有雪荷载时取 1.1。

7.6.1 条文说明：气承式膜结构在泄气倒塌过程中膜面应保持一定高度以满足人员逃生需求，参考美国规程 ASCE17-96，本技术规程中取该高度为 2.1m。

残余内压不仅跟竖向荷载总量有关，也跟充气膜结构的泄气倒塌模式（褶皱分布及发展形式）紧密相关，考虑在雪载及自重作用下的泄气倒塌模式跟仅自重作用下的泄气倒塌模式可能完全不同，故此时考虑 1.1 倍的放大系数。

等效泄气面积 A_e 造成的空气泄漏源自以下几个方面：

- 1 膜结构主体与基础连接处。基础锚具的种类、安装连接的牢固程度都会对空气泄漏量产生影响。
- 2 膜单元连接缝。膜单元连接缝的节点形式不同，空气泄漏量的大小也不相同。
- 3 出入口的装配。空气泄漏量会随着进出门的类型、尺寸和数量发生变化。
- 4 机械设备。各种机械设备的送风管道处也会有一定的空气泄漏。
- 5 通风口。不同类别通风口之间的空气泄漏情况差异很大，它取决于结构的尺寸、位置、容纳的人数以及通风装置的尺寸和数量。充气系统也要通过正常的空气排放来保持足够的空气流通，增加更多和更大装置的通风装置可以提供更大的空气流通，但是这种额外的空气流失也必须包含在所选风机合理的容量范围内。
- 6 其它开口：其它一些开口处（比如特定的剖位、窗户等）的空气泄漏会随着这些开口的尺寸发生变化。

7.6.2 为满足人员应急逃生要求，气承式膜结构屋顶膜面塌落至 2.1 m 时所需时间 T 应大于等于 1200s（仅自重作用）或 600s（膜面自重和膜面竖向外荷载共同作用）。

7.6.2 条文说明：如按式 7.6.2-1 计算的逃生时间不满足要求，则应从两方面加以调整：（1）增大泄气倒塌过程中的充气速率；（2）对 7.6.1 中所有对等效泄气面积 A_e 有贡献的项目进行整改，尽可能减小各项所产生的漏气面积。

7.7 基础设计

7.7.1 充气膜结构地基承载力计算，应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007 的规定。

7.7.2 充气膜结构基础进行抗滑移稳定性验算时，稳定性系数不小于 1.3。

7.7.3 充气膜结构基础进行抗倾覆稳定性验算时，稳定性系数不小于 1.6。

7.7.4 充气膜结构基础进行抗滑移、抗倾覆稳定性验算时可不考虑风振系数。

7.7.5 充气膜结构地基基础设计等级为丙级。

7.7.6 基础下部存在液化土时，可按照建筑抗震设防丁类采取相应措施。

7.7.7 湿陷性黄土地区，充气膜结构建筑分类采用丁类。

8 连接构造

8.1 一般规定

8.1.1 连接构造应符合结构计算假定，具有可靠的气密性，保证连接的安全、合理、美观。

8.1.2 连接件应传力可靠，具有足够的强度、刚度和耐久性，不应先于所连接的膜材、拉索或钢构件破坏，并不得产生影响结构受力性能的变形。

8.1.3 拉索的连接节点应符合《索结构技术规程》JGJ 257 的规定。

8.1.4 连接构造应采取可靠措施防止膜材的磨损和撕裂。

8.1.5 对金属连接件应采取可靠的防腐蚀措施。

8.2 膜片之间的连接

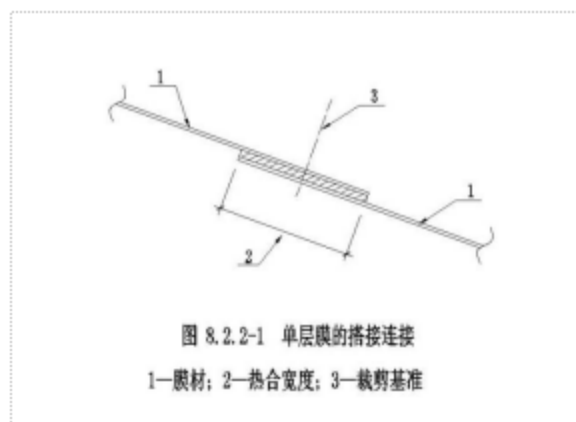
8.2.1 膜材之间的主要受力缝应采用热合连接，其它连接缝可采用粘结或缝合连接。

8.2.2 膜材之间的连接可采用搭接（图 8.2.2-1）或对接方式。搭接连接时，应使高处的膜材覆盖在低处的膜材上。采用对接方式时，背贴条宜在主膜材下方（图 8.2.2-2）。当 E 类膜材有印刷点时，背贴条宜在主膜材上方（图 8.2.2-3）

8.2.2 条文说明：气承式膜结构通常采用 P 类膜材，膜材正面有 PVDF 或 PVF 面层，不能直接热合。所以 P 类膜材在对接连接时，背贴条应在主膜材下方。气枕式膜结构通常采用 E 类膜材，当膜材背面有印刷点时，不能直接热合。所以 E 类膜材在对接连接时，背贴条应在主膜材上方。

8.2.3 热合连接的热合宽度，应根据膜材类别、

厚度和连接强度的要求确定。G 类膜材不应小于 50mm；E 类膜材不应小于 10mm；P 类膜材内膜不应小于 25mm，外膜不应小于 40mm，I 级充气膜结构的外膜不应小于 50mm。



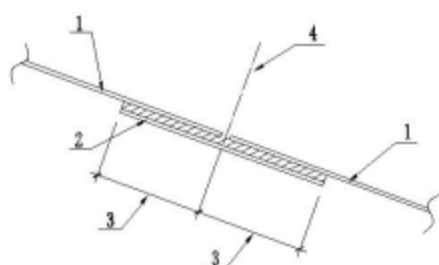


图 8.2.2-2 单层膜的对接连接

1—P类膜材；2—背贴条；3—热合宽度；4—裁剪基准

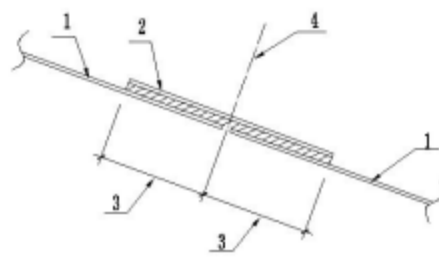


图 8.2.2-3 单层膜的对接连接

1—E类膜材；2—背贴条；3—热合宽度；4—裁剪基准

8.2.4 气承式膜结构采用双层膜材时，可将外膜和内膜在膜片连接处一并热合（图 8.2.4-1），也可在外膜和内膜之间增设连接片相互热合连接（图 8.2.4-2）。

8.2.4 条文说明：当有保温需求时，气承式膜结构可采用双层或多层构造，形成空气层以增大热阻、减小传热系数，或者在双层膜之间填充保温材料，进一步提高保温隔热效果。

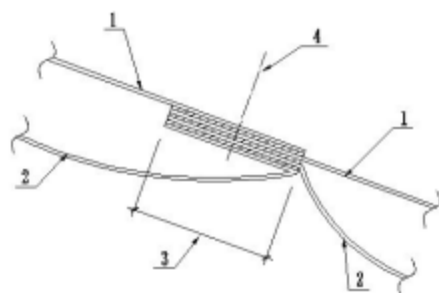


图 8.2.4-1 双层膜的连接 (a)

1—外膜；2—内膜；3—热合宽度；4—裁剪基准

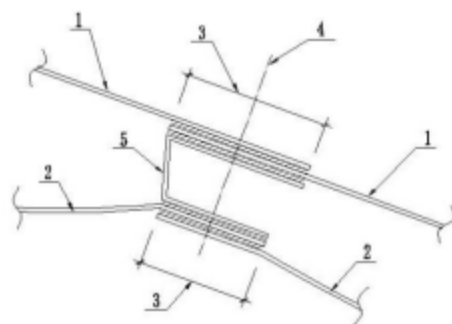


图 8.2.4-2 双层膜的连接 (b)

1—外膜；2—内膜；3—热合宽度；4—裁剪基准；5—内外膜连接片

8.2.5 气枕式膜结构的气枕单元，上层膜和下层膜与周边的连接可采用图 8.2.5 的方式。

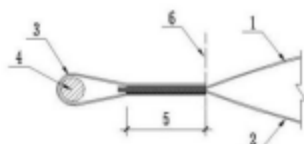


图 8.2.5 双层膜的收边连接

1—外膜；2—内膜；3—边膜；4—边绳；
5—热合宽度；6—裁剪基准

8.3 膜单元之间的连接

8.3.1 膜单元之间连接，单层膜可采用图 8.3.1-1 的方式，双层膜可采用图 8.3.1-2 的方式。

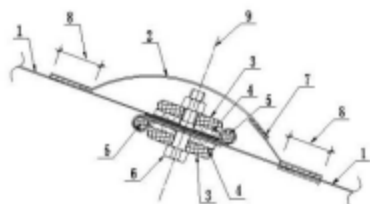


图 8.3.1-1 单层膜的单元连接

1—主体膜；2—防水膜；3—铝压板；4—垫片；5—边绳；
6—螺栓；7—粘扣；8—热合宽度；9—测量基准

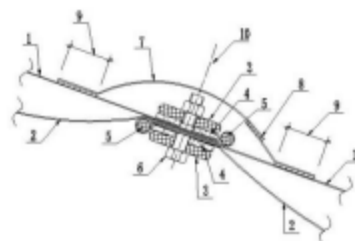


图 8.3.1-2 双层膜的单元连接

1—外膜；2—内膜；3—铝压板；4—垫片；5—边绳；6—螺栓；
7—防水膜；8—粘扣；9—热合宽度；10—测量基准

8.3.2 内外膜之间填充保温材料时，在屋脊处的连接可采用图 8.3.2-1、图 8.3.2-2 的方式；在支承面的连接可采用图 8.3.2-3、图 8.3.2-4 的方式。

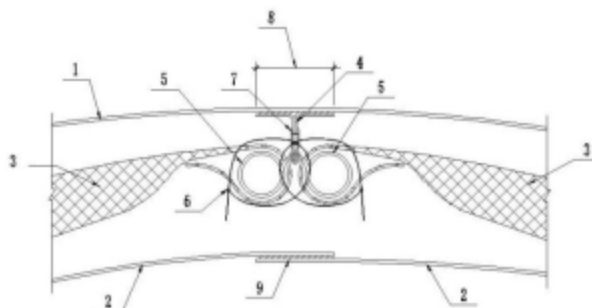


图 8.3.2-1 双层膜和保温材料在屋脊的连接

1—外膜；2—内膜；3—保温材料；4—吊带；5—PVC管；
6—绑绳；7—篷圈；8—热合宽度；9—粘扣

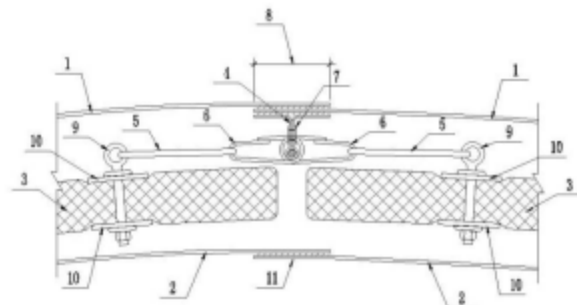


图 8.3.2-2 双层膜和保温材料在屋脊的连接

1—外膜；2—内膜；3—保温材料；4—吊带；5—拉绳；6—卡扣；
7—篷圈；8—热合宽度；9—吊环螺栓；10—夹板；11—粘扣

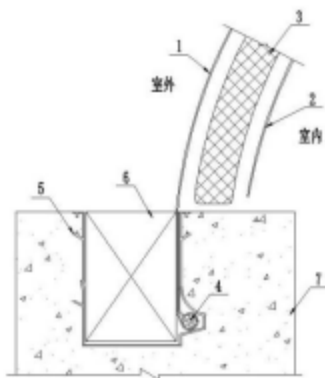


图 8.3.2-3 双层膜和保温材料在支承面的连接

1—外膜；2—内膜；3—保温材料；4—边绳；
5—铝合金槽；6—防腐木；7—混凝土基础

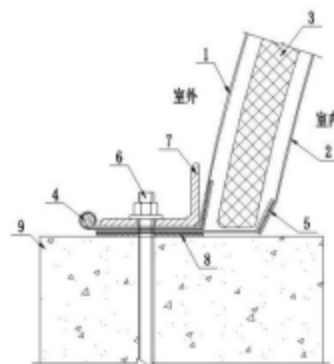


图 8.3.2-4 双层膜和保温材料在支承面的连接

1—外膜；2—内膜；3—保温材料；4—边绳；
5—粘扣；6—强筋；7—角钢；8—垫片；9—混凝土基础

8.3.3 膜单元连接铝合金压板的板厚不宜小于 5mm，紧固螺栓直径不宜小于 8mm、间距不宜大于 100mm。I 级充气膜结构的膜单元连接铝合金压板的板厚不宜小于 6mm，紧固螺栓直径不宜小于 10mm。

8.4 膜单元与支承面的连接

8.4.1 气承式膜结构的膜单元与支承面的连接,可采用预埋铝合金槽压入防腐木(图 8.4.1-1)、预埋锚筋连接角钢(图 8.4.1-2)、预埋型钢连接槽型钢(图 8.4.1-3)等方式。

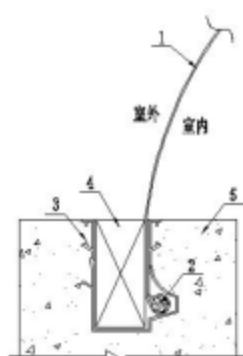


图 8.4.1-1 膜单元与支承面的连接（铝槽）

1—膜；2—边绳；3—铝合金槽；
4—防腐木；5—混凝土基础

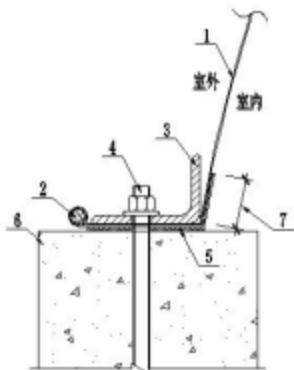


图 8.4.1-2 膜单元与支承面的连接（锚筋）

1—膜；2—边绳；3—角钢；4—锚筋；
5—垫片；6—混凝土基础；7—热合宽度

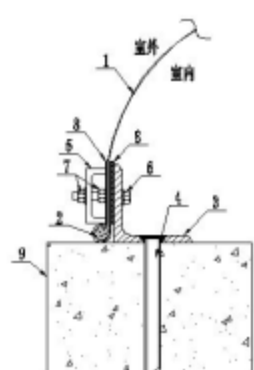


图 8.4.1-3 膜单元与支承面的连接（角钢）

1—膜；2—边绳；3—预埋角钢；4—锚筋；5—槽型折弯件；
6—螺栓；7—螺母；8—垫片；9—混凝土基础

8.4.2 预埋铝合金槽的深度不宜小于 90mm、宽度不宜小于 50mm。I 级充气膜结构不宜采用预埋铝合金槽连接。

8.4.3 预埋锚筋的直径 d 不宜小于 16mm、间距不宜大于 300mm、锚固长度不宜小于 $30d$ 。I 级充气膜结构的预埋锚筋的直径 d 不宜小于 20mm。

8.4.4 气枕式膜结构膜单元与支承面的连接,可采用在主结构上设置连接钢构件,再通过铝合金型材与连接钢构件连接(图 8.4.4)。

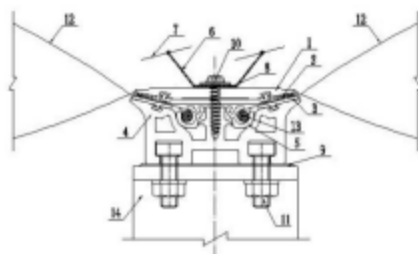


图 8.4.4 气枕单元与支承面的连接

1—铝型材1；2—垫片1；3—垫片2；4—铝型材2；5—铝型材3；
6—防鸟架；7—螺栓；8—垫片3；9—垫片4；10—自攻螺钉；
11—螺栓；12—气枕；13—边绳；14—预埋连接钢构件

8.4.5 气枕单元之间支承面处的连接可采用图 8.4.5-1 的方式,设置天沟时可采用图 8.4.5-2 的方式。

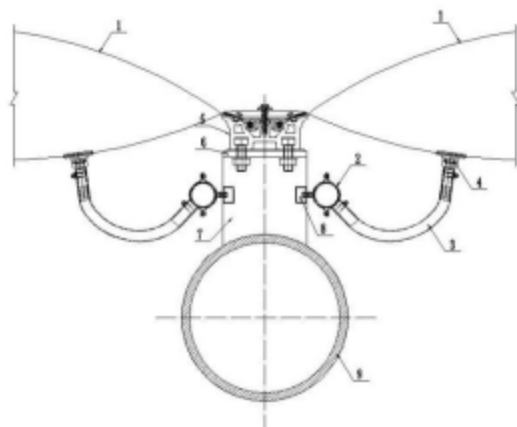


图 8.4.5-1 气枕单元之间的连接（无天沟）

1—气枕；2—供风管；3—充气软管；4—充气阀；5—铝型材；
6—顶板；7—底板；8—型钢；9—支承结构

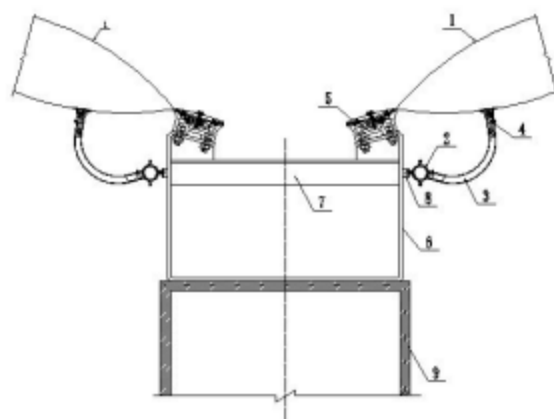


图 8.4.5-2 气枕单元之间的连接（有天沟）

1—气枕；2—供风管；3—充气软管；4—充气阀；5—铝型材；
6—天沟；7—底板；8—型钢；9—支承结构

8.5 膜单元与气密门的连接

8.5.1 气承式膜结构在出入口处与气密门的连接可采用柔性连接或刚性连接。

8.5.2 柔性连接应满足膜面的变形要求。膜单元在出入口的边索，可采用图 8.5.2-1 或图 8.5.2-2 所示的方式，边索直径不宜小于 12mm，I 级充气膜结构出入口处的边索直径不宜小于 16mm。

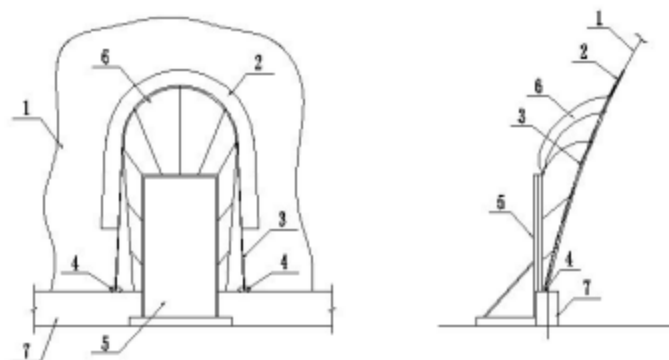


图 8.5.2-1 膜单元与气密门的连接（边索在软连接外）

1—主体膜；2—出入口索套；3—边索；4—预埋件
5—气密门；6—出入口软连接；7—基础

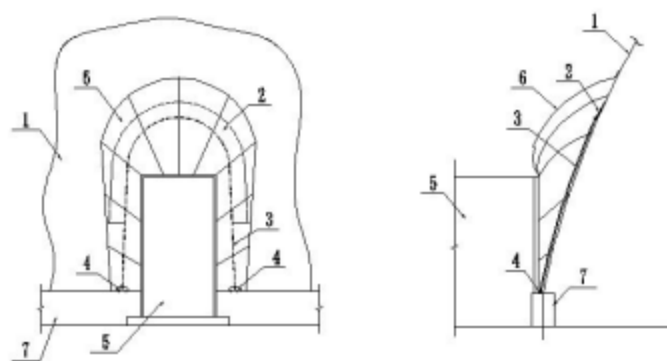


图 8.5.2-2 膜单元与气密门的连接（边索在软连接内）

1—主体膜；2—出入口索套；3—边索；4—预埋件
5—气密门；6—出入口软连接；7—基础

8.5.3 刚性连接应满足膜材的强度要求。可采用 8.4 节中膜单元与支承面的连接方式。

8.6 拉索的节点连接

8.6.1 气承式膜结构采用索网加强时，拉索的交叉节点可采用图 8.6.1-1 或图 8.6.1-2 的方式。索网拉索直径不宜小于 12mm，I 级充气膜结构的拉索直径不宜小于 16mm。

8.6.1 条文说明：纵横向索网加强的充气膜，当拉索需要在膜面固定时，可在膜面设置束带，防止拉索滑动。

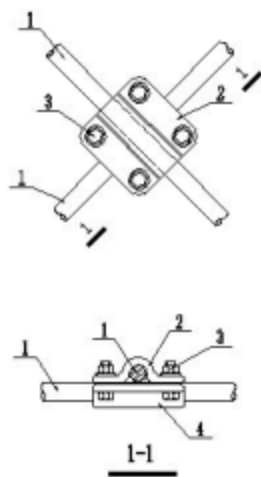


图 8.6.1-1 拉索的交叉连接（拉索连续）

1—拉索；2—上夹板；3—螺栓；4—下夹板

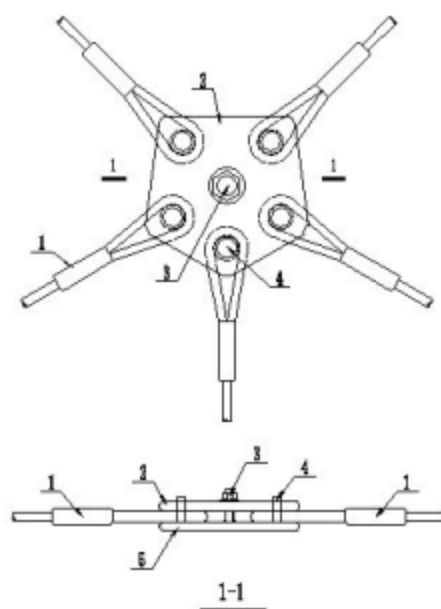


图 8.6.1-2 拉索的交叉连接（拉索分段）

1—拉索；2—上夹板；3—螺栓；4—下夹板

8.6.2 拉索与支承面的连接可采用图 8.6.2-1 或图 8.6.2-2 的方式。

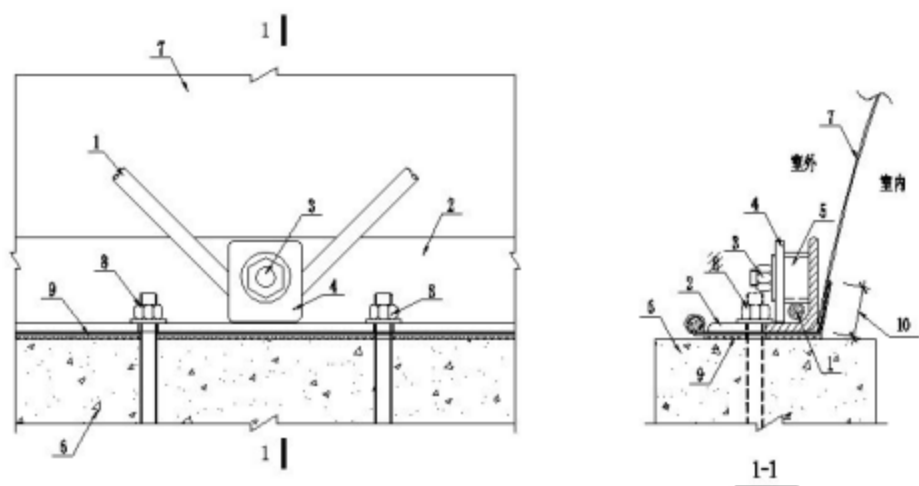


图 8.6.2-1 拉索与支承面的连接（拉索连接）

1—拉索；2—角钢；3—螺栓；4—垫板；5—套管；6—预埋土基础；
7—无气膜；8—螺母；9—垫片；10—锚台宽度

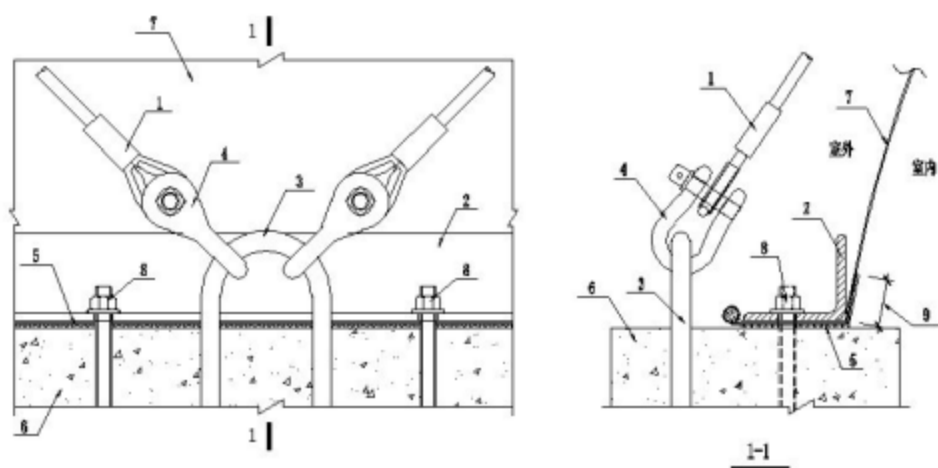


图 8.6.2-2 拉索与支承面的连接（拉索分段）

1—拉索；2—角钢；3—螺栓；4—垫板；5—套管；
6—预埋土基础；7—外膜；8—螺母；9—锚台宽度

8.6.3 拉索端头与支承面连接的预埋件可采用图 8.6.3-1 或图 8.6.3-2 的方式。

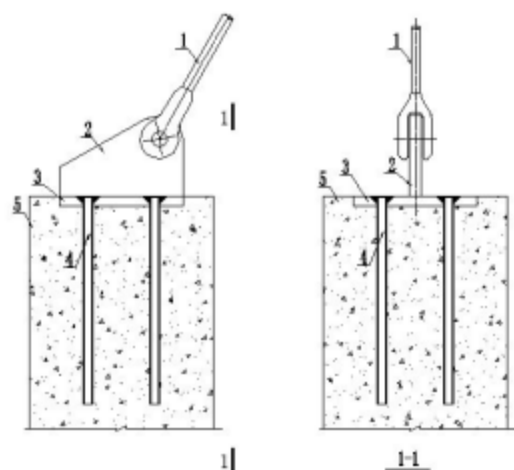


图 8.6.3-1 缆索与支承面连接（预埋锚固钢板）
1—缆索；2—耳板；3—钢板；4—锚固；5—混凝土基础

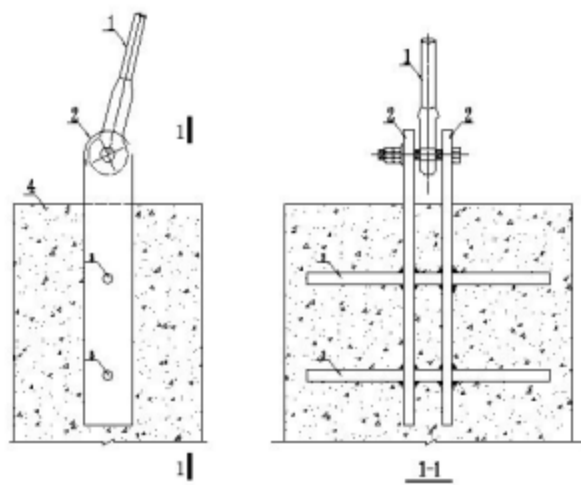


图 8.6.3-2 缆索与支承面连接（预埋钢耳板）
1—缆索；2—耳板；3—圆钢；4—混凝土基础

8.7 膜单元与供气管的连接

8.7.1 气枕式膜结构的膜单元与供气管之间的连接可采用图 8.7.1 的方式。

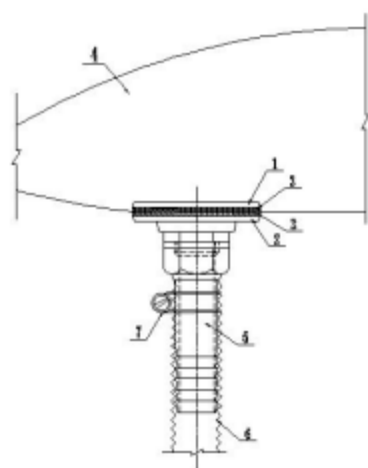


图 8.7.1 气枕单元与充气管的连接
1—进气口上压盘；2—进气口下压盘；3—垫片；4—气枕；
5—进气口连接管；6—充气管；7—基础

8.7.2 气枕式膜结构的供气宜采用图 8.7.2-1 的“并联”方式。当采用图 8.7.2-2 “串联”方式，不宜超过 3 个。

8.7.2 条文说明：当采用“串联”连接形式时，气枕串联的数量，应根据计算确定。

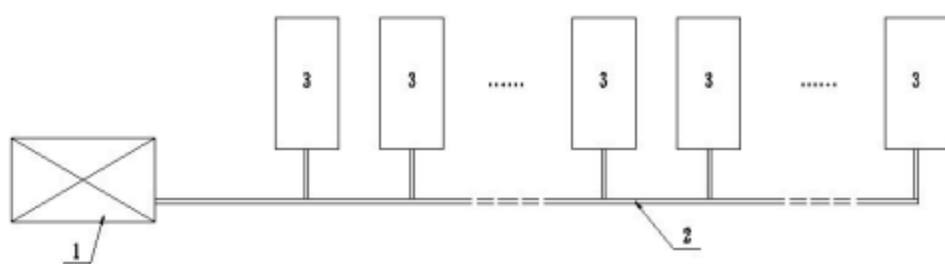


图 8.7.2-1 气枕单元的并联连接

1—风机；2—供气管；3—气枕单元

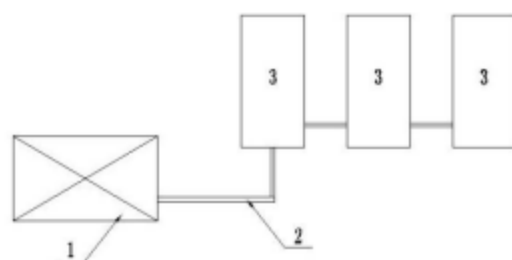


图 8.7.2-2 气枕单元的串联连接

1—风机；2—供气管；3—气枕单元

9 设备系统

9.1 一般规定

9.1.1 充气膜结构的设备系统应包括充气设备、电气系统、监测与控制系统。

9.1.2 充气设备应满足充气内压设计和风量的要求。

9.1.3 民用建筑的电气系统设计应按现行行业标准《民用建筑电气设计规范》JGJ 16 的规定执行；工业建筑的电气系统设计按相关现行国家标准和行业标准的规定执行。

9.1.3 条文说明：工业建筑的电气设计与民用建筑不同，工业建筑动力负荷多，会接触到高压气体放电灯照明、明敷设线路、动力设备配电、电动机控制原理等方面的设计。工业建筑涉及的电气规范条文非常多、非常广，应按相关现行国家标准和现行行业标准的规定执行。比如以下所列规范：《建筑设计防火规范》GB 50016；《爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范》GB 50058；《人民防空工程设计防火规范》GB 50098；《自动喷水灭火系统设计规范》GB 50084。

9.1.4 监测与控制系统设计应满足充气膜结构正常运行的要求。

9.1.4 条文说明：监测与控制系统是通过对外界风速、雨雪及充气膜结构内外压差的监测，控制和调节充气设备的运行，确保充气膜结构在正常工作压力范围内安全运行

9.2 充气设备

9.2.1 充气设备可包括风机、管道、送风口、止回阀、安全阀、进气口、排气阀等。

9.2.2 充气设备应配置主风机和备用风机，备用风机应具有自动启动功能。

9.2.3 充气设备应设置保护措施，保证在各种自然条件下正常运行。气枕式膜结构的充气设备进风口应配置可清洗或可更换的滤网，且应满足设计参数要求。

9.2.3 条文说明：所有的充气设备都要有应对外界自然条件的保护措施，比如设置入口过滤网，防止树叶、飞鸟等进入设备内部而影响到充气设备的运行；如果充气设备中的风机采用皮带传动，还要设置相应的皮带保护。充气设备还要设置应对天气变化的保护措施，比如设置预热和融雪装置等，保证在各种天气情况下都能连续的运行。

9.2.4 充气设备应充分密封，以减少充气膜结构的空气泄漏。

9.2.5 当有通风、供暖等特殊要求时，充气设备宜符合现行国家标准《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736、《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50019 和《组合式空调机组》GB/T 14294 的规定。

9.2.6 风机应根据全压和风量要求，按照风机性能曲线进行选择。

9.2.7 风机全压应按下列公式计算：

$$P=a \cdot P_{\max}+P_2 \quad (9.2.7)$$

式中： $P_{\max}$ ——最大工作内压；

P_2 ——设备和管道的压力损失值；

a ——附加系数，一般取值 1.10-1.15

9.2.7 条文说明：通过管道出风口压力在满足最大工作压力并考虑计算系统压力损失上宜附加 10%~15%。风机风压应考虑设备和管道的压力损失；风机风压在满足最大工作压力并考虑设备和管道压力损失的基础也不宜附加过高。

9.2.8 风机风量应符合下列规定：

- 1 应满足式（7.6.1-1）中泄气时风机的充气速率 L_M 的要求；
- 2 当风机承担换气和空气内循环功能时，其风量应满足充气膜结构换气量和空气内循环的要求；
- 3 宜满足充气膜结构最初充气时能在规定的时间内达到最小工作压力。

9.2.8 条文说明：在最初充气时，可以考虑主风机和备用风机全部投入工作，也可以考虑增加临时风机缩短最初充气时间。

9.2.9 管道可采用管材或现场砌筑，应具有气密性、安全性和耐久性，宜进行防水、保温处理。外露管道应有稳固的支撑和保护。气枕式膜结构管道与气枕应采用软管连接。

9.2.9 条文说明：外露的管道容易受到外界天气状况的影响，会因地震或其它冲击而受到损坏，所以要进行稳固的支撑，并采取适用的保护措施。气枕式膜结构管道应考虑管道材质的热胀冷缩影响。

9.2.10 气承式膜结构民用建筑的管道内空气流速宜小于 10m/s，出风口处的空气流速宜小于 5m/s。

9.2.11 止回阀应与风机配套使用，设置在供风机管路上，多台风机并联运行的系统应在每台风机各自的管路上设置止回阀。

9.2.12 应采用安全阀或其他有效措施确保充气膜结构内压不超过最大工作压力。

9.2.12 条文说明：充气系统还应保证能控制设计压力限值，使其提供的充气压力不超过最大工作压力，以防止过度的充压。

9.2.13 充气设备的进气口处应确保不受到杂物、积雪、积水等阻塞，并避免设置在有毒、有害气体处。

9.2.14 封闭空间的气枕式膜结构的充气系统内应配置干燥装置；开敞空间的气枕式膜结构充气系统可以不配置干燥装置，但应采取相应的处理措施，避免气枕内部产生冷凝水。

9.2.14 条文说明：为避免气枕内部产生冷凝水，封闭空间的气枕式膜结构充气系统内应配置干燥装置，经干燥的空气量应不低于气枕式膜结构的正常空气泄露和空气循环量；开敞空间的气枕式膜结构充气系统可以不配置干燥装置，但应采取相应的处理措施，可设置出气口或者增加气枕内的空气循环。

9.2.15 充气膜结构宜根据环境控制的需要配置换气窗或排气阀。

9.2.15 条文说明：民用建筑的充气膜结构内，根据内部空气质量控制的需要可以配置手动开关的换气窗，也要以配置自动控制开关的排气阀；工业建筑的充气膜结构内，根据内部温度控制、粉尘和有害气体浓度控制的需要，应配置相应数量和尺寸的排气阀，排气阀应具备手动开关控制和自动开关控制等多种控制方式。

9.3 电气系统

9.3.1 充气膜结构的电气系统应包括设备供电、控制系统供电、照明系统、防雷接地系统等，应符合现行相关国家标准和行业标准的规定。

9.3.2 充气膜结构的电源应冗余配置，可采用双路电源或备用发电机供电。当常规的供电系统出现故障时，备用电源应在 60 秒内自动启动。

9.3.2 条文说明：为了确保备用电源能够正常的自动启动，应采取措施使备用电源处于良好的状态，防止受到气候条件的影响。在严寒地区，备用电源应设置在具有采暖条件的控制室内、或者应采取水套加热等防冻措施。要经常检查确保备用电源的机油、蓄电池等处于良好的状态。

9.3.3 备用发电机的燃料储存应满足不少于 8 个小时的连续运行。

9.3.4 充气膜建筑防雷设计应按照现行国家标准《建筑物防雷设计规范》GB 50057 的规定，采取有效的防雷保护措施。

9.4 监测与控制系统

9.4.1 监测与控制系统应具备充气膜结构压差监测、控制与自动调节功能，并应满足充气膜结构的特定监测与控制的功能需求。

9.4.1 条文说明：监测与控制系统一般采用可编程控制器（PLC）对各种传感器参数进行采集和分析，按设定的程序对充气设备进行控制；监控器和上位机可以显示和汇总监测与控制系统的各项数据变化，并给可编程控制器发出控制指令；报警器可以通过声光等形式来提醒或警示监测与控制系统中出现的故障情况和安全提示；通讯模块可以通过通讯和网络的模式将数据显示、设备操控和报警提示等以远程访问的方式展现出来。

9.4.2 监测与控制系统应实现对充气膜结构在各种工况下的工作内压调节功能，满足充气膜结构的工作压力要求。

9.4.3 监测与控制系统宜连续工作，关键部件宜冗余配置。

9.4.4 监测与控制系统应具有自动控制和手动控制工作方式，并具备故障报警功能。

9.4.4 条文说明：正常情况下，充气膜结构的控制系统应通过压差传感器和风机、风阀的状态，自动控制风机、风阀的运行和设备轮换，实现无人值守控制。当调试和设备检修时，控制系统宜切换到手动工作方式，通过控制按钮和操作元件实现控制系统的手动补压控制。

9.4.5 监测与控制系统宜具备本地和远程监测和控制功能。

9.4.5 条文说明：本地报警通过声光报警器实现，远程报警采用网络监控、手机端报警等方式及时提醒设备

故障，使维护人员及时了解控制系统的工作状态和充气膜结构的运行状况。

9.4.6 充气膜结构应配置压差传感器。气承式膜结构应配置两套及以上的压差传感器；对于气枕式膜结构，每台充气设备宜配置两套及以上压差传感器，布置在远近不同的位置，面积小于500平方米或者气枕数小于20个时，每台充气设备可配置一套压差传感器，宜布置在最远端。

9.4.7 气承式膜结构应配置风速传感器；在沿海台风地区的气枕式、气肋式、气囊式膜结构宜配置风速传感器。

9.4.8 在雪荷载较大的地区充气膜结构宜配置雪厚传感器。

9.4.8 条文说明：充气膜结构应根据项目的地理位置、雪荷载的大小及项目的具体情况，来确定是否配置雪传感器（通常是雪厚传感器）。

9.4.9 充气膜结构工业建筑应根据需要配置相关的环境监测传感器。

9.4.9 条文说明：工业建筑的充气膜结构内，会因为内部作业、物料仓储堆放等因素造成内部的粉尘、有害气体（比如可燃气、CO等）浓度较高，控制和监测系统应根据这些环境参数的控制需要配置相关的温度传感器、粉尘传感器、可燃气传感器、CO传感器等。

10 制作、安装与充气调试

10.1 制作

10.1.1 膜材在加工下料前应进行材料抗拉强度和外观检测。抗拉强度应满足设计文件要求；膜材表面不应有针孔、明显褶皱和污渍，不应出现断丝、裂缝和破损现象，无明显色泽差异。

10.1.2 膜结构制作车间应宽敞洁净，工作温度宜保持在 10~30℃范围内。E 类膜材制作车间工作温度宜保持在 15~30℃范围内。

10.1.3 膜材裁剪宜使用自动裁剪机。

10.1.4 经裁剪后的膜片应全部进行尺寸检验，当设计边长大于 10m 时，各向尺寸误差应控制在±6mm 之内；当设计边长小于等于 10m 时，各向尺寸误差应控制在±3mm 之内。

10.1.5 具有不可热合面层的 P 类膜材，热合前应采用专用打磨设备对裁剪后的膜片进行热合面的打磨，打磨宽度误差应控制在±0.2mm 之内。对有印刷的 E 类膜材采用搭接焊缝时，热合前应采用酒精或丙酮擦去热合部位的印刷层，擦除宽度误差应控制在 0~1mm 之内。

10.1.5 条文说明：有些 P 类膜材的面层不能直接进行热合，热合前必须对热合面进行打磨，膜材面层通常只有几个至几十个微米，因此要用精度较高的专用打磨设备进行打磨，如果面层打磨不彻底会影响热合缝的强度，打磨过度会损伤膜涂层厚度甚至膜布基，降低膜材的强度及使用寿命。ETFE 印刷层(点)不能直接热合，在热合缝范围内需要进行擦除干净。

10.1.6 膜片热合前应进行热合工艺试验，确定工艺参数。P 类、G 类膜材热合处的抗拉强度不低于母材抗拉强度的 80%，E 类膜材热合处的抗拉强度不低于 30MPa。

10.1.6 条文说明：热合前要根据图纸中出现的膜材热合叠合层数（如二层、三次或多层）分别做热合工艺试验，通过热合缝质量选定适当的热合参数，包括热合压力、电流、时间、温度等参数。当试件热合缝的剥离面积达到或大于 90%，同时热合缝强度不小于膜材强度的 80%时可认为质量合格，作为确定的热合工艺参数使用。

10.1.7 P 类、G 类膜材膜单元面积较大时宜采用轨道行走式设备热合。

10.1.7 条文说明：膜单元面积较大时，为防止热合过程中膜材的频繁移动造成膜面及膜材强度的损伤，建议采用大型轨道机器行走的热合方式。

10.1.8 热合缝宽度误差对 P 类、G 类膜材应控制在±3%之内，对 E 类膜材应控制在±1mm 之内。

10.1.9 膜单元周边尺寸误差应控制在±1%之内，表面不应有破损现象。

10.1.10 对检验合格的膜单元包装前应进行表面清洁，清洁后膜面不得留有粘胶痕迹、画线痕迹、污渍、尘土等。

10.1.10 条文说明：应使用中性洗涤剂进行清擦，不得使用酸、碱性强的化学品及含研磨成分的去污粉类物品。

10.1.11 膜单元包装应按安装展开顺序合理折叠，用干净、无污染、不掉色的包装膜（布）包裹严实并捆扎牢固。包装后应在醒目位置上进行标识，包括工程名称、膜单元编号和膜单元的展开方向等信息。

10.1.12 膜包裹应采用专用车辆运输，不得与其他物品混装，且应采取可靠措施保证膜包裹与运输工具之间不发生相对移动和撞击，膜包裹之间不宜相互叠压。

10.1.13 拉索、门窗、设备系统、保温材料等其他部分制作应满足设计文件或相应国家、地方技术标准要求。

10.2 安装

10.2.1 充气膜结构的安装可包括膜体、拉索、门窗、设备系统、保温材料等。

10.2.2 充气膜结构应具备下列条件后进行安装：

1 在安装之前，所有钢结构支撑面、基础、预埋件等应施工完毕并验收合格。

2 充气膜的安装应具备良好的天气条件。当风力达到四级或气温低于 4℃时，不宜进行高空膜单元安装；当风力达到五级及以上时，严禁膜单元安装。

3 对安装场地有要求时，场地内部应进行平整，宜进行硬化处理。为了防止膜材划伤或污损，现场宜铺设光滑、平整、不褪色的保护膜，对所有尖锐物体应进行有效的保护。

4 气承式膜结构预埋铝槽内部、送风风道内应清理干净，无积水、无施工垃圾等异物；气枕式膜结构支承骨架与膜面的连接部位处应打磨光滑，确保连接处无毛刺、棱角，支承骨架连接及拐角处应做水密处理。

10.2.3 气承式膜结构门的安装水平度和垂直度应满足设计要求，能正常开启，门体四周应进行密封处理。

10.2.4 充气膜结构设备系统安装应满足设计文件或相应国家、地方技术标准要求。

10.2.5 膜单元应按设计位置与方向展开，并应采取保护措施防止膜材受损。

10.2.6 膜单元之间、膜单元与周边基础或支撑构件之间、膜单元与出入口门框之间应牢固连接，并应做气密处理。

10.2.7 气承式膜结构索网可接单根索或分片索网单元进行现场安装，索网的安装应在膜单元安装完成后进行，并应对膜单元进行有效的保护。索网夹具及连接节点应牢固可靠，且进行防腐处理。

10.2.8 气承式膜结构保温材料应在充气后安装，保温材料与膜单元连接应牢固可靠。

10.2.8 条文说明：气承式膜结构保温材料安装宜采用升降车、蜘蛛车或搭设脚手架的方式进行辅助安装，应采取相应的技术和管理措施确保施工安全。

10.3 充气调试

10.3.1 当风力达到四级时，不宜进行充气调试；当风力达到五级及以上时，严禁进行充气调试。

10.3.2 充气调试之前，应进行下列检查：

- 1 对充气设备、电气系统、监测与控制系统等进行检查，确保正常运行。
- 2 对索网、膜单元之间、膜单元与周边基础或支撑构件之间、膜单元与出入口门框之间的连接进行检查，确保所有的边界及连接节点满足设计要求。
- 3 对周边环境进行检查，对可能危及到膜体安全的建筑物、构筑物或其他物品进行有效的防护。

10.3.3 气枕式膜结构每个气枕安装完成后，应及时进行充气。

10.3.4 气承式膜结构充气调试过程宜按以下阶段进行：

- 1 前期充气：宜在 2~4 个小时内充气至 $60\text{Pa}\sim 100\text{Pa}$ ，必要时可增加辅助风机进行充气，并保持室内气压；
- 2 充气检查：保持室内气压 $60\text{Pa}\sim 100\text{Pa}$ ，对膜体、索网、各种进出口门及设备等的连接及运行情况进行全面检查，确保处于正常状态；
- 3 后期充气：继续充气至基准工作内压，对膜体、索网、各进出口门及设备等的连接及运行情况进行全面检查，确保处于正常状态；
- 4 最终检测：充气至最大工作内压全面检查合格，维持 1 个小时正常运行后切换至自动控制的状态。

10.3.4 条文说明：充气时间宜选择在早晨或上午开始，以有足够时间来进行处理意外情况的发生。充气式膜结构在充气阶段受风荷载作用位移较大，因此，必须选择好的天气条件下在较短的时间内（一般不超过 4 个小时，设计风机满足不了时可使用临时风机）使膜内气压快速上升至 $60\text{Pa}\sim 100\text{Pa}$ ，该气压下膜体形状保持基本稳定，可对膜体、索网、各种进出口门及设备等的连接及运行情况进行全面检查；各系统处于正常运行时，可继续升压至基准工作内压；各系统正常运行时，再升至最大工作压力进行全面检查，各系统正常运行后，切换至自动控制的状态。

11 验收、维护与保养

11.1 一般规定

11.1.1 根据现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300 的规定，充气膜结构应按（子）分部工程进行验收。

11.1.2 各分项工程验收应符合《膜结构工程施工质量验收规程》T/CECS 664 的相关规定。

11.1.3 充气膜结构应严格按照使用维护手册进行操作和维护。

11.1.3 条文说明：使用维护手册应包括但不限于：充气设备的操作和维护、电气系统的操作和维护、监测与控制系统的操作和维护。与充气膜运行安全相关的其它设备，如：空气净化、冷暖设备、除湿设备等，其操作和维护也须包含在使用维护手册中。使用维护手册中宜包含紧急情况的处理预案。

11.2 验收

11.2.1 充气膜（子）分部工程可包含下列分项工程：

- 1 膜附件及膜连接件；
- 2 拉索；
- 3 膜单元；
- 4 保温材料；
- 5 门窗；
- 6 充气设备；
- 7 电气设备；
- 8 监测与控制系统；
- 9 试运行。

11.2.2 充气膜结构（子）分部工程验收时，应提供下列文件和记录：

- 1 竣工图及相关设计文件；
- 2 技术交底记录、施工组织设计；
- 3 膜材、钢材、索材及其它材料的产品质量保证书和设计要求的检测报告；
- 4 有关安全及功能的检验和见证检测项目检查记录；
- 5 有关观感质量检验项目检验记录；

- 6 (子)分部工程所包含各分项工程质量检验记录;
- 7 分项工程所含各检验批质量检验记录;
- 8 重大质量、技术问题的处理方案和验收记录;
- 9 不合格项的处理记录及验收记录;
- 10 其他必要的文件和记录;
- 11 充气设备的说明书及合格证明文件;
- 12 结构在常规和紧急情况下的操作和维护手册。

11.2.3 充气膜结构工程质量验收记录应符合下列规定:分项工程检验批验收记录、分项工程验收记录、(子)分部工程验收记录应分别采用现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300 中附录 D、E、F 的格式。

11.2.4 对于气承式膜结构建筑,应进行气密性测试,其结果应满足设计要求。

11.3 维护和保养

11.3.1 充气膜结构应定期进行如下检查:(检查时间间隔,按照设备增加补充,补充过滤器)

- 1 膜片间的焊缝、膜单元间的连接、膜体与其它结构间的连接处于正常的状态,无异常泄漏;
- 2 膜结构的外部及内部与新增结构及设施保持使用维护手册中要求的安全距离;
- 2 索的保护套及连接节点处于正常状态,无破损、松动等异常情况;
- 4 电机、风机及配件性能完好,定期加油维护,能够维持正常的充气压力;
- 5 充气设备箱体的密闭性能;
- 6 充气设备的进风口、出风口、回风口无堵塞风险;
- 7 控制系统中的电子元器件、传感器正常,压力传送管道无堵塞,变频器和各报警设备功能完好;
- 8 备用电源的切换功能完好、备用电源有足够的燃料储备、蓄电池能正常工作;
- 9 门禁系统正常运转、无异常漏气;
- 10 空气过滤器通风良好,无堵塞。

11.3.2 膜面如有破损应按使用维护手册中的要求及时修补;

11.3.3 膜面如需清洁可选用专用的膜材清洗剂,可在备用膜材上做清洁测试,确保对膜面无损伤后方可进行整体清洁。

11.3.4 充气膜结构巡检、维护可按照日检查、周检查、季度检查、年检查进行，具体工作内容可参照附录 E 执行。

11.3.4 条文说明：

1 充气膜结构每日检查内压值、运行模式、控制柜状态、电机风机状态、膜结构有无破损、基础连接、钢缆及应急门状态等。

2 充气膜结构每周检查发电机、备用电机、气锁门、应急门、报警系统、气压检测管、过滤网等。

3 充气膜结构每季度检查主体结构膜材膜体、铝槽、防腐木、配套钢缆、铝板连接件、膜体与各连接部位、自动门、应急门、应急灯、各配套功能门、室内保温棉、照明系统。

附录 A 常见气承式膜结构风荷载体型系数的规定

项次

类别

体型及体型系数 μ_z

1

矩形平面，风
向角为 0°
(B 为结构短
边长度，下同)

f/B	μ_{s1}
1/3	+0.5
2/5	+0.55
1/2	+0.6

注：中间值按线性插值法计算

2

矩形平面，风
向角为 45°

n	μ_{s1}	μ_{s2}
1	$-\mu_{s1}$	-1.0
≥ 2	-0.3	$-\mu_{s1}-0.1$

注：中间值按线性插值法计算

3

矩形平面，风
向角为 90°

f/B	μ_{s1}
1/3	-0.4
2/5	-0.5
1/2	-0.6

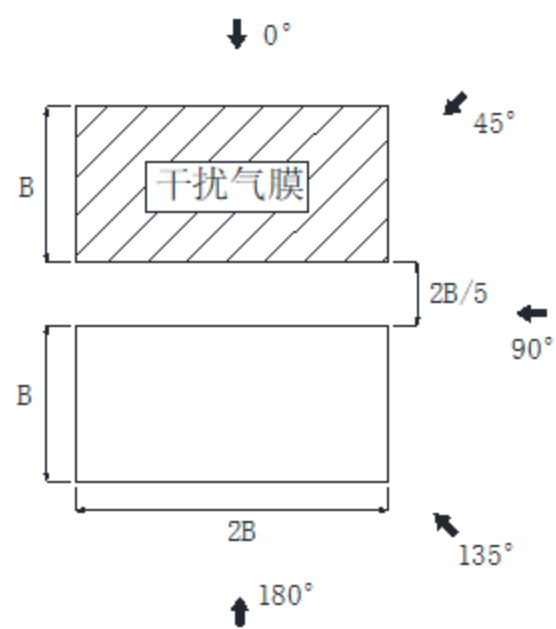
注：中间值按线性插值法计算

4

双矩形平面，
风向角为 0°
(双气膜间
距：B/10 ~
2B/5,下同)

间距	μ_{s1}
B/10	$\mu_{s1}+0.1$
B/5	$\mu_{s1}+0.15$
2B/5	$\mu_{s1}+0.2$

注：中间值按线性插值法计算



附录 B 确定 P 类、G 类膜材剪切模量的面内纯剪试验法

B.0.1 采用面内纯剪试验法确定剪切模量时,将试样固定在一个边框铰链而构成的正方形框架中,框架边平行于膜材的经向或纬向,并在膜材的经向和纬向导入与初期预应力相当程度的预张力。通过在框架对角线方向分别施加拉伸和压缩荷载,使膜材面内产生剪应力和剪应变,然后用两者的平均值计算膜材的面内剪切模量。

B.0.2 膜材试样为不小于 $16\text{cm} \times 16\text{cm}$ 的正方形,裁剪方向平行于膜材经向或纬向,每个检测批至少应包括 3 块试样。膜材试样按以下原则裁取:

1 试样应具有代表性,应避开褶皱、疵点,试样距整卷布端至少 3m,距布边至少 100mm,保证试样均匀分布于样品上。

2 试样的剪取应尽可能顺着相邻两组纱线的中间进行,保证试样长度方向边缘与相应方向的纱线平行,试样两侧边不能有纤维纱线的散失。

B.0.3 固定试样的四角铰接正方形框架内部尺寸不小于 $16\text{cm} \times 16\text{cm}$,加载装置采用等速伸长试验机,加载拉压速率为 10mm/min 。

B.0.4 按以下方法进行检测:

1 检测温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度为 $65 \pm 4\%$;按现行国家标准《纺织品 调湿和试验用标准大气》(GB/T 6529)规定的标准大气预调湿、调湿和检测。

2 试样的经向、纬向对齐面内剪切变形检测装置的框架,沿经向、纬向两个方向施加预张力,并固定试样。试样应安装牢固,预张拉过程中试样与框架之间不应有滑移。膜面的预张力可取 3.0kN/m 。

3 如图 B.0.4 所示,将固定到框架上的试样沿对角线方向安装在试验机上,按照恒定速率进行拉伸和压缩。重复拉压三次至预定位移,并记录第二次和第三次拉压过程中正负最大位移点对应的荷载值。

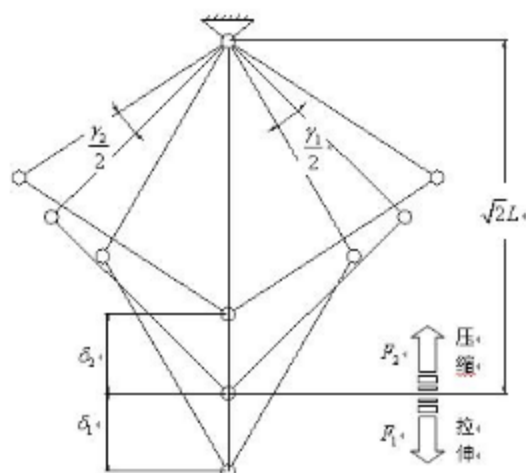


图 B.0.4 剪切模量试验装置图示意图

4 预定位移应使试验平面的剪切变形角为 $\pm 1^\circ$ 。在框架边长为 16cm 的情况下，拉压过程中正负最大位移为 2mm。

5 按式 B.0.4-1 计算试样剪切模量，单位取 N/mm^2 。取三次试验计算的平均值作为最终的试验结果，修约至 1N/mm^2 。

$$G = \frac{N_{xy1} + N_{xy2}}{(\gamma_1 + \gamma_2)t} = \frac{F_1 + F_2}{\sqrt{2}L(\gamma_1 + \gamma_2)t} \quad (\text{B.0.4-1})$$

$$\gamma_1 = 2 \left[\frac{\pi}{4} - \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{2}L + \delta_1}{2L} \right) \right] \quad (\text{B.0.4-2})$$

$$\gamma_2 = 2 \left[-\frac{\pi}{4} + \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{2}L - \delta_2}{2L} \right) \right] \quad (\text{B.0.4-3})$$

式中 G ——膜材的剪切模量， N/mm^2 ；

t ——膜材的厚度， mm ；

L ——正方形试样的边长， mm ；

F_1 ——第二次和第三次拉伸过程中记录的拉力值的平均值， N ；

F_2 ——第二次和第三次压缩过程中记录的压力值的平均值， N ；

N_{xy1} ——相应于 F_1 的单位宽度的面内剪切应力绝对值， N/mm ；

N_{xy2} ——相应于 F_2 的单位宽度的面内剪切应力绝对值， N/mm ；

γ_1 ——相应于 F_1 的剪切变形角，其数值由式 B.0.4-2 确定， rad ；

γ_2 ——相应于 F_2 的剪切变形角，其数值由式 B.0.4-3 确定， rad ；

δ_1 ——相应于 F_1 的在剪切变形检测器的对角线方向上的位移绝对值，mm；

δ_2 ——相应于 F_2 的在剪切变形检测器的对角线方向上的位移绝对值，mm。

当正方形试样边长 $L=16\text{cm}$ 时，可根据预先设定的 $\delta_1 = \delta_2 = 2.0\text{mm}$ ，代入式 B.0.4-2 和 B.0.4-3 分别求出 $\gamma_1 = 0.017757$ 和 $\gamma_2 = 0.017600$ 。

附录 C 确定 P 类、G 类膜材剪切模量的双轴试验法

C.0.1 试验采用双轴拉伸试验机对十字形切缝试样进行比例加载，得到剪切应力应变曲线后，计算得到膜材的剪切弹性模量。

C.0.2 膜材的剪切模量可按下列试验方法确定：

1 十字形双轴剪切试件（图 C.0.2-1）应按照膜材的经向、纬向对称取样，且试样核心区域的臂宽以及悬臂的臂长均不小于 160mm。经纬向与十字型臂呈 45°偏角。沿悬臂方向间隔 30mm~50mm 做均匀切缝处理，试样过渡圆弧半径 5mm~15mm。同一检测批的膜材至少选用三块试样进行试验。

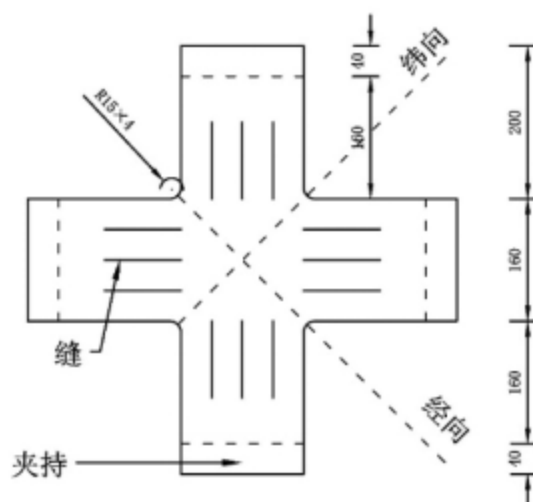


图 C.0.2-1 双轴剪切试件（单位：mm）

2 试验中可采用力控制，应保持恒定力增速拉伸，应取(1~10)kN/m/min。

3 试件固定于双轴拉伸试验机上，按下列步骤测量荷载应变值：

通过 x、y 轴错位线性加载得到剪应力。控制程序中通过加载周期和应力上、下限，确定预张拉水平，然后膜材 x 轴加载，y 轴卸载。具体步骤如下：

1) 保持试件主轴 x-y 轴的张拉荷载比例 1:1，沿主轴按照恒定力增量拉伸，加载至基准预张力值。采用引伸仪测试件核心主轴 x-y 轴应变，张拉荷载取试件主轴方向平均工程应力，并记录此时荷载-应变曲线；

2) 试件主轴方向错位同速加载，x 轴加载至上限，y 轴卸载至下限；

3) 加载后立即反向加载，x 轴卸载 y 轴加载至基准预张力，加载和卸载速度保持相同。

4) 改变试件主轴荷载方向，重复 2)、3)；

5) 重复 2) ~4) 步骤三次;

4 剪切模量计算方法

双轴剪切试件中心区域变形如图 C.0.2-2 所示, 虚线为变形前形状, 实线为变形后形状, α 为经向和纬向纱线的夹角, ΔL_x 及 ΔL_y 分别表示 x 方向以及 y 方向的变形, L 为正方形区域对角线长度的一半。根据几何关系, 可以得到:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{L + \Delta L_x}{L + \Delta L_y} = \tan^{-1} \frac{1 + \varepsilon_x}{1 + \varepsilon_y} \quad (\text{C.0.2-1})$$

其中, ε_x 和 ε_y 分别为变形区域在 x 方向以及 y 方向的应变。进一步可以得到工程剪应变 γ 表示为:

$$\gamma = \alpha - \frac{\pi}{2} \quad (\text{C.0.2-2})$$

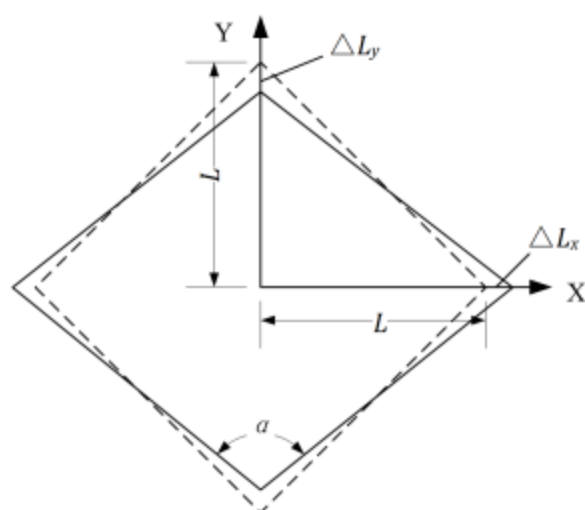


图 C.0.2-2 双轴剪切变形示意图

双轴剪切试件中心区域的应力如图 C.0.2-3 所示, 其中, σ_x 及 σ_y 为双轴拉伸应力, σ_ω 及 σ_f 为材料经向以及纬向的主应力, τ 为剪切应力。

$$\sigma_\omega = \sigma_f = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \quad (\text{C.0.2-3})$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \quad (\text{C.0.2-4})$$

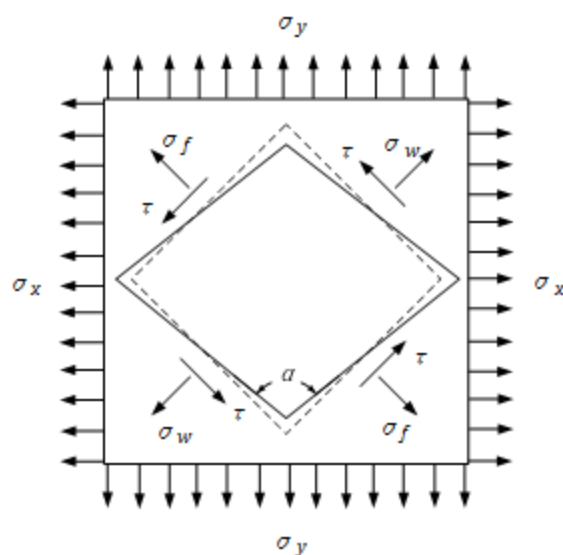


图 C.0.2-3 双轴剪切应力状态示意图

双轴剪切试验加载图谱如图 C.0.2-4 所示。由式 C.0.2-3 和式 C.0.2-4 计算得到纱线方向主应力以及剪应力变化过程如图 C.0.2-5 所示。

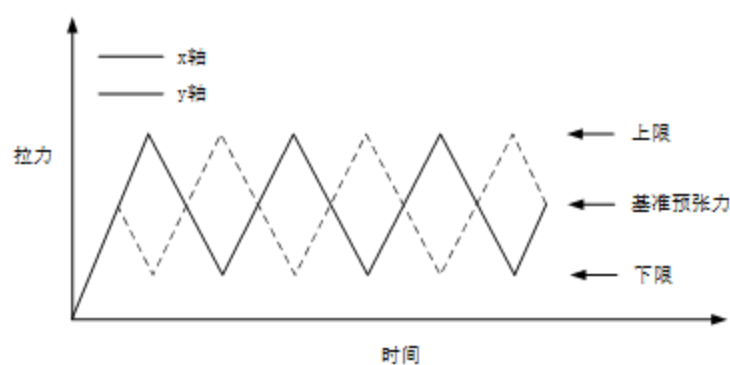


图 C.0.2-4 双轴剪切加载谱示意图

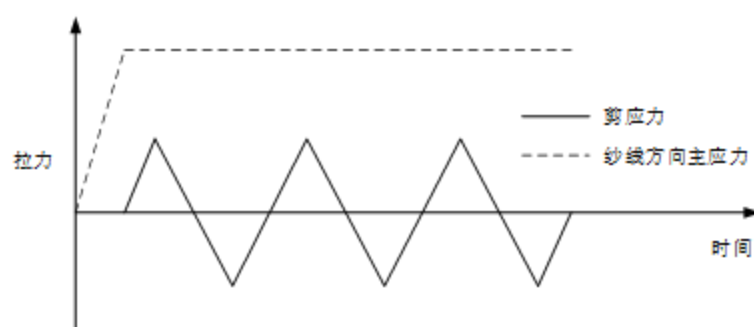


图 C.0.2-5 双轴剪切应力变化示意图

根据加载谱，按照第 3 条进行双轴剪切试验，通过循环剪切试验得到膜材的剪切应力应变滞回曲线后，取后两组稳定循环平均值作为计算值。最后取三组试件计算值均值作为膜材剪切模量值。

附录 D 气枕简化计算方法

D.0.1 在气枕初步设计，或设计分析条件受限，气枕内压设计可采用简化方法。

D.0.2 简化计算方法：

1 气枕式膜结构内压设计应考虑设计载荷与组合下的最不利效应进行设计，确定最小工作内压和最大工作内压，以及基于长期载荷、设备性能、能耗考虑确定的基准工作内压。

2 风载设计值一般大于内压 2 倍以上，风吸作用 (w_s) 在气枕上层膜外侧，上层膜向外拉伸，内压 (p_i) 降为零，则仅上层膜承受风吸，下层膜松弛，如图 D.0.2-1。

3 风压 (w_d) 作用在气枕外侧向内压，至内压 (p_i) 与外压平衡，当上层膜初张拉应力被外压完全抵消，则内压等于外压，外压仅由下层膜承受，上层膜松弛，如图 D.0.2-2。如风压 $w_d=500\text{Pa}$ ，则内压 $p_i \geq 500\text{Pa}$ 。

4 雪压增加或减少是一个较缓慢过程，气枕供气系统可以通过充放气实现设计内压稳定，因此，设计内压略大于雪压，如图 D.0.2-3。一般可取内压 $p_i=1.1S_{\max}$ 或 $p_i=S_{\max}+100\text{Pa}$ ，以及 $p_i > S_a$ (均值)， $S_{\max}$ 为最大雪荷载。如，最大雪荷载 $S_{\max}=500\text{Pa}$ ，雪荷载均值 350Pa ，则内压 $p_i=1.1S_{\max}=550\text{Pa}$ 或 $p_i=S_{\max}+100\text{Pa}=600\text{Pa}$ 。

5 当气枕较大，且受非均匀载荷时，宜采用内压耦合的非线性进行分析，或根据载荷分区简化为多气室分室简化设计分析。

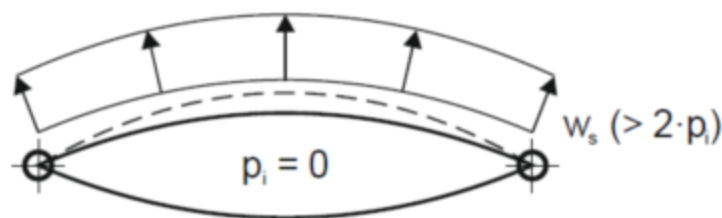


图 D.0.2-1 双层气枕承受风吸

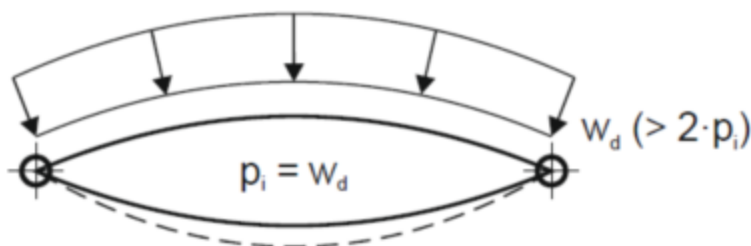


图 D.0.2-2 双层气枕承受风压

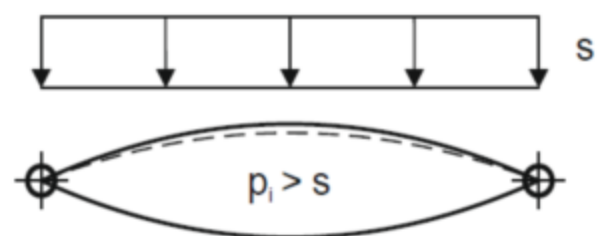


图 D.0.2-3 双层气枕承受雪压

附录 E 双轴拉伸应变补偿测试方法

E.0.1 至少一批或 $10,000\text{m}^2$ 膜材应不少于一组应变补偿测试；当膜材离散系数小于 5%，可 $20,000\text{m}^2$ 测试一组。

E.0.2 测试方法：

- 1 根据《膜结构技术规程》（CECS 158）附录 C 制作试件和加载控制；
- 2 根据第一类载荷确定结构膜材经纬主应力 F_w 、 F_f ；
- 3 采用双轴拉伸试验机，经纬向按照等比例施加 F_w 、 F_f ，再降低至 1kN/m ，三次循环，记录第 3 次循环载荷 F_w 、 F_f 对应的应变 ε_w 、 ε_f 作为对应载荷特征区应变补偿值。至少应一组试件，可取 3 组均值。

附录 F

每日例行维护工作单

检查员：_____

日期：_____

天气情况					
内压值 (Pa)		运行模式		室外温度	
制冷/采暖		室内温度		室内湿度	
控制柜状态					
电机风机状态					
监测与控制系统					
绕气膜建筑走一圈，检查有无破损			检查固定木条、钢缆及应急门		
其它说明					

每周例行维护工作单

检查员：_____

日期：_____

内容	操作方法	记录
气锁门检查	分别从内外部进出气锁门，门机应动作准确、迅速，互锁功能有效，门扇开闭无异常噪音。	
应急疏散门检查	应急门密封良好，允许有轻微的漏气，从内部可以正常推门开启，开至最大开度后可以保持开门状态，其它开度可以自行关闭。	
气压检测管检查	气膜内末端固定完好；管内无杂物、污水及堵塞；无挤压。	
过滤网清洗	清洗机械单元内铝合金尼龙过滤网，方法为取出过滤网，用毛刷刷除杂物并用清水冲洗干净，晾干后安装即可。	

月维护工作单

发电机检查	断开机械单元主电源，发电机自动启动供电，查验压力是否符合设定值，使发电机工作 15-30 分钟左右重新供应主电源电源，则发电机应自动停止运行。	
备用风机检查	启动备用风机，能够满足充气膜结构正常运行	

季度维护工作单

监测与控制系统检查	升高压力至高压保护值，主备用风机（若备用风机在运行状态）均停止运行，同时声光报警器启动；降低压力后，主备用风机均恢复原运行状态，声光报警器停止。此过程中系统预设的手机号应能收到相应报警信息。	
主体膜材	1、检查主体膜面是否有洞口、裂缝或其它损坏，检查焊接、缝合、连接、窗洞等处是否损坏。如果有，要立即修补； 2、检查开洞口处的膜面是否有过度的应力集中； 3、检查是否有材料堆积在离膜面比较近的距离，材料和灯具距离膜面的距离应该不小于 1 米。	
基础锚固	1、结构周边的每个锚固点是否安全、稳固； 2、检查地基或地面条件是否破坏	
索及索网	1、检查索网是否出现松弛或大位移的偏移现象，是否需要调整 2、索体或索具是否出现腐蚀及锈蚀的现象	
连接节点	检查连接节点处的构件或紧固件是否有脱落或松弛，如果需要的话进行坚固和维修	
送、回风风道	1、送、回风风道是否干燥、通畅，无异物和积水堵塞 2、风道内防水或保温处理层有无大面积脱落等情况	
空气泄漏	1、检查在基础周边、附属构件连接位置、门禁周围是否有异常的空气泄漏。	

	要及时通过聚乙烯、胶带或其它嵌缝材料进行对异常的空气泄漏处进行密封处理 2、检查膜面上所有的管道，确保无异常漏气	
铝槽、防腐木		
门禁系统	检查门禁及支撑构件是否水平、稳固的锚固在地基上 检查气闸门的互锁装置是否能正常的操作 检查门体开洞口处的膜面是否有过度的应力集中	

日期		记录人		天气情况	(如：雨、雪、风力、冰雹、温度、湿度)		
压力设置 (帕斯卡 Pa)		室内温度设置		室内温湿度		采暖或制冷状态	
主体结构维护、检查、检修情况							
主体结构膜材膜体检查、铝槽、防腐木、配套钢缆、铝板连接件、膜体与各连接部位							
自动门、应急门、应急灯、各配套功能门							
室内保温棉、照明系统							
设备及控制系统维护、检查、检修情况							
室外设备平台主配电柜、照明控制柜、照明装置柜运行状态							
机械单元内主控制柜运行状态							
主风机及电机、备用风机及电机运行状态							
采暖设备及制冷设备运行状态							
备用发电机控制系统运行状态							
智能管理系统运行状态							
室内压力管、报警功能运行状态							
发电机测试							
机械单元内初、中、高及各过滤器运行状态							
机械单元内交换盘管运行状态							
机械单元内如：风阀、风扇、排风							
检查空气过滤器是否堵塞，是否需要更换							
极端及恶劣天气应注意室内压力设置及变化							
维护、检查、检修结论及其它问题汇总：							

位 置	检查项目
充气设备	检查风机箱，不要有树叶、纸屑及雪的堵塞
	检查风机和电机的传送皮带，如果需要进行替换和调整
	全方面的检查电机和风机的运行状态。
	如果需要，给电机和风机轴承加润滑油
	检查备用风机是否能正常启动
控制系统	控制柜温度控制是否正常
	检查充气压力是否和设计要求的压力一致
	控制系统电子元器件是否正常无损坏
	各传感仪器、仪表是否正常无故障，报警设备是否功能完好
备用电源	检查备用电源的燃料储量 and 蓄电池是否正常
	定期断电测试发电机能否自动启动
基础锚固	结构周边的每个锚固点是否安全、稳固
	检查地基或地面条件是否破坏
主体膜材	检查主体膜面是否有洞口、裂缝或其它损坏，检查焊接、缝合、连接、窗洞等处是否损坏。如果有，要立即修补
	检查开洞口处的膜面是否有过度的应力集中
	检查是否有材料堆积在离膜面比较近的距离，材料和灯具距离膜面的距离应该不小于 1 米
索及索网	检查索网是否出现松弛或大位移的偏移现象，是否需要调整
	索体或索具是否出现腐蚀及锈蚀的现象
连接节点	检查连接节点处的构件或紧固件是否有脱落或松弛，如果需要的话进行坚固和维修
送、回风风道	送、回风风道是否干燥、通畅，无异物和积水堵塞
	风道内防水或保温处理层有无大面积脱落等情况

门禁系统	检查门禁及支撑构件是否水平、稳固的锚固在地基上
	检查气闸门的互锁装置是能否正常的操作
	检查门体开洞口处的膜面是否有过度的应力集中
空气泄漏	检查在基础周边、附属构件连接位置、门禁周围是否有异常的空气泄漏。 要及时通过聚乙烯、胶带或其它嵌缝材料进行对异常的空气泄漏处进行密封处理
	检查膜面上所有的管道，确保无异常漏气

位 置	
充气设备	周
控制系统	周
备用电源	周
基础锚固	周、月
主体膜材	
索及索网	
连接节点	
送、回风风道	

门禁系统	
空气泄漏	

检查项目	日	周	月	年
内压值				
发电机				
备用电机				
气锁门				
应急门、应急灯				
报警系统				
气压检测管				
过滤网				
膜材膜体				
连接部位				
室内保温棉				
照明系统				
极端及恶劣天气应注意室内压力设置及变化				