

中国工程建设标准化协会

环境作用下混凝土结构性能退化实验标准
(征求意见稿)

**Standard for test methods of performance evolution of concrete
structures under environmental actions**

T/CECS ***-202*

主编单位：同济大学

批准单位：中国工程建设标准化协会

执行日期：202*年*月*日

2022 上海

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发（2018 年第一批协会标准制订、修订计划）的通知》（建标协字〔2018〕015 号）的要求，同济大学会同有关单位经认真调查研究、总结实践经验、参考国内外有关标准，广泛征求行业内各方面的意见，制定本标准。

本标准共分 14 章，5 个附录。主要内容是：总则、术语与符号、基本规定、混凝土结构碳化与钢筋锈蚀试验、混凝土结构氯盐侵蚀与钢筋锈蚀试验、混凝土结构硫酸盐侵蚀试验、混凝土结构冻融试验、混凝土结构电加速锈蚀试验、混凝土结构自然暴露试验、侵蚀混凝土力学性能试验、锈蚀钢筋与混凝土间粘结性能演化试验、混凝土保护层锈胀开裂试验、锈蚀钢筋几何参数量测和力学性能试验、环境作用效应试验后混凝土结构受力性能试验。

本标准由中国工程建设标准化协会混凝土结构专业委员会归口管理，由同济大学负责技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请寄送解释单位（地址：上海市四平路 1239 号土木工程学院建筑工程系，邮政编码：200092）。

本 标 准 主 编 单 位：同济大学

本 标 准 参 编 单 位：

浙江大学

东南大学

浙江工业大学

南京航空航天大学

中交四航工程研究院有限公司

西安建筑科技大学

中南大学
河南工业大学
上海海事大学
温州理工学院
中国二十冶集团有限公司
爱斯佩克环境仪器（上海）有限公司
苏州市东华试验仪器有限公司
杭州邦威机电控制工程有限公司

本标准主要起草人员：

顾祥林、张伟平、黄庆华、姜超、余倩倩、
冯金阳、张云鹏、李崇凯
金贤玉、金南国，田野
蒋金洋
余红发
熊建波
蒋志律、付传清
刘西光、郭冰冰
宋 力
周彬彬
陈 辉
徐 宁
张庆章
刘龙官、李路、陈志辉
王毅成、陈晓龙、李建华、王辉

本标准主要审查人员：

目 次

1	总则	10
2	术语与符号	11
2.1	术语	11
2.2	符号	12
3	基本规定	16
3.1	一般原则	16
3.2	试验设备	18
3.3	试验试件	20
3.4	相似性	22
4	混凝土结构碳化与钢筋锈蚀试验	24
4.1	一般规定	24
4.2	试验设备	24
4.3	试验试件	25
4.4	试验方法	26
4.5	测试内容与方法	27
5	混凝土结构氯盐侵蚀与钢筋锈蚀试验	30
5.1	一般规定	30
5.2	试验设备	30
5.3	试验试件	31
5.4	试验方法	32
5.5	测试内容与方法	34
6	混凝土结构硫酸盐侵蚀试验	36
6.1	一般规定	36
6.2	试验设备	36
6.3	试验试件	37
6.4	试验方法	37
6.5	测试内容与方法	38
7	混凝土结构冻融试验	40
7.1	一般规定	40

7.2	试验设备	40
7.3	试验试件	41
7.4	试验方法	42
7.5	测试内容与方法	44
8	混凝土结构电加速锈蚀试验	45
8.1	一般规定	45
8.2	试验设备	45
8.3	试验试件	45
8.4	试验方法	46
8.5	测试内容与方法	48
9	混凝土结构自然暴露试验	49
9.1	一般规定	49
9.2	试验场地	49
9.3	试验设备	49
9.4	试验试件	50
9.5	试验方法	51
9.6	测试内容与方法	52
10	侵蚀混凝土力学性能试验	53
10.1	一般规定	53
10.2	试验设备	53
10.3	试验试件	53
10.4	试验方法	54
10.5	测试内容与方法	54
11	锈蚀钢筋与混凝土间粘结性能试验	56
11.1	一般规定	56
11.2	试验试件	56
11.3	试验设备	58
11.4	试验方法	59
11.5	测试内容与方法	60
12	混凝土保护层锈胀开裂试验	62
12.1	一般规定	62

12.2	试验试件	62
12.3	试验方法	62
12.4	测试内容与方法	63
13	锈蚀钢筋几何形貌测试与力学性能试验	65
13.1	一般规定	65
13.2	试验设备	65
13.3	试验试件	65
13.4	试验方法	66
13.5	量测内容与方法	67
14	环境作用效应试验后混凝土结构受力性能试验	72
14.1	一般规定	72
14.2	试验试件	72
14.3	试验设备	72
14.4	试验加载	72
14.5	试验量测	74
14.6	数据处理与分析	74
附录 A	模拟一般环境作用与自然一般环境作用的相似性	76
附录 B	海水潮汐区模拟试验装置	77
附录 C	模拟氯盐环境作用与自然氯盐环境作用的相似性	79
附录 D	硫酸盐侵蚀混凝土应力-应变关系	81
附录 E	冲击试验装置	85
本标准用词、用语说明		88
引用标准名录		89
条文说明		90

Contents

1	General Provisions.....	13
2	Terms and Symbols	14
2.1	Terms	14
2.2	Symbols	15
3	Basic requirements	19
3.1	General requirements.....	19
3.2	Equipments	21
3.3	Specimens.....	23
3.4	Similarity	25
4	Tests of carbonization and steel bar corrosion of concrete structures	27
4.1	General requirements.....	27
4.2	Equipments	27
4.3	Specimens.....	28
4.4	Methods	29
4.5	Measurements.....	30
5	Tests of chloride ingress and steel bar corrosion of concrete structures	33
5.1	General requirements.....	33
5.2	Equipments	33
5.3	Specimens.....	34
5.4	Methods	35
5.5	Measurements.....	37
6	Tests of sulphate attack of concrete structures	39
6.1	General requirements.....	39
6.2	Equipments	39
6.3	Specimens.....	40
6.4	Methods	40
6.5	Measurements.....	41
7	Tests of freeze-thaw cycles of concrete structures	43
7.1	General requirements.....	43

7.2	Equipments	43
7.3	Specimens.....	44
7.4	Methods	45
7.5	Measurements.....	47
8	Tests of galvanostatic accelerated corrosion of concrete structures.....	48
8.1	General requirements.....	48
8.2	Equipments	48
8.3	Specimens.....	48
8.4	Methods	49
8.5	Measurements.....	51
9	Tests of natural exposure of concrete structures	52
9.1	General requirements.....	52
9.2	Sites	52
9.3	Equipments	52
9.4	Specimens.....	53
9.5	Methods	54
9.6	Measurements.....	55
10	Tests of mechanical properties of eroded concrete	56
10.1	General requirements.....	56
10.2	Equipments	56
10.3	Specimens.....	56
10.4	Methods	57
10.5	Measurements.....	57
11	Tests of bonding performance between corroded reinforcements and concrete	59
11.1	General requirements.....	59
11.2	Specimens.....	59
11.3	Equipments	61
11.4	Methods	62
11.5	Measurements.....	63
12	Tests of corrosion-induced cracking of concrete cover	65
12.1	General requirements.....	65

12.2 Specimens.....	65
12.3 Methods	65
12.4 Measurements.....	66
13 Tests of geometric morphology and mechanical properties of corroded reinforcements	68
13.1 General requirements.....	68
13.2 Equipments	68
13.3 Specimens.....	68
13.4 Methods	69
13.5 Measurements.....	70
14 Tests of mechanical performance of concrete structures after environmental actions	75
14.1 General requirements.....	75
14.2 Specimens.....	75
14.3 Test parameters.....	75
14.4 Equipments	75
14.5 Methods	75
14.6 Measurements.....	77
14.7 Data processing.....	77
Appendix A Similarity between simulated environmental effects and natural environmental effects under atmospheric environment.....	79
Appendix B Simulation equipment of seawater tidal zone	80
Appendix C Similarity between simulated environmental effects and natural environmental effects under chloride environment	82
Appendix D Stress-strain relation of sulfate-attacked concrete	84
Appendix E Equipment of impact test.....	88
Expansion of wording in this standard.....	91
List of equoted standards.....	92
Expansion of provisions.....	93

1 总则

1.0.1 为规范与统一混凝土结构环境作用效应试验方法和环境作用效应试验后受力性能试验方法，确保环境作用下混凝土结构性能演化试验科学合理，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于混凝土结构环境作用效应试验和环境作用效应试验后受力性能试验。

1.0.3 混凝土结构环境作用效应试验和环境作用效应试验后受力性能试验，除应符合本标准的规定外，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 环境作用 environmental action

温度、湿度、二氧化碳、氧、酸、盐等引起混凝土结构性能退化的环境气候作用和侵蚀介质作用。

2.1.2 环境作用效应 effect of environmental action

环境气候和侵蚀介质共同作用引起的混凝土材料和结构性能的变化。

2.1.3 一般环境 atmospheric environment

无冻融、氯化物和其他化学腐蚀物质作用的混凝土结构或构件的暴露环境，本标准特指一般大气环境。

2.1.4 冻融环境 freeze-thaw environment

混凝土结构或构件经受反复冻融作用的暴露环境。

2.1.5 氯盐环境 chloride environment

混凝土结构或构件受到氯盐侵入并引起内部钢筋锈蚀的暴露环境，包括海洋环境、除冰盐环境和其它氯化物环境。

2.1.6 海洋环境 marine environment

混凝土结构或构件受到海洋氯盐侵入作用并引起内部钢筋锈蚀的暴露环境，包括海洋环境大气区、浪溅区、潮汐区及淹没区。

2.1.7 除冰盐环境 deicing salt environment

混凝土结构或构件受到除冰盐侵入作用并引起内部钢筋锈蚀的暴露环境。

2.1.8 硫酸盐环境 sulfate environment

混凝土结构或构件受到自然环境中硫酸盐化学物质腐蚀作用的暴露环境，具体包括水、土中硫酸盐化学腐蚀环境。

2.1.9 干湿时间比 time ratio of drying and wetting processes

混凝土干燥过程持续时间与混凝土表面直接接触到溶液的润湿过程持续时间的比值。

2.1.10 钢筋的锈蚀率 corrosion rate of steel bar

锈蚀钢筋去除表面松散锈蚀产物后，剩余钢筋横截面积与未锈蚀时的横截面积的比率。

2.1.11 人工模拟环境箱 environmental chamber

用以模拟自然环境作用的封闭或近似封闭的箱体。

2.1.12 环境作用效应试验 test for effect of environmental action

环境作用对混凝土结构和材料性能影响的试验。

2.1.13 性能演化试验 performance evolution test

在环境作用影响下混凝土材料、构件和结构性能变化过程试验，包括环境作用效应试验和环境作用效应试验后力学性能试验。

2.2 符号

A ——图片碳化区域面积；

A_{av} ——锈蚀钢筋平均横截面积；

A_i ——锈蚀钢筋横截面积；

A_{min} ——锈蚀钢筋最小横截面积；

A_0 ——钢筋原始横截面积；

B ——图片中试件的边长；

B' ——真实试件的边长；

C_A ——模拟一般环境的二氧化碳浓度；

C'_A ——自然一般环境的二氧化碳浓度；

C_d ——真实试件的碳化深度；

D ——引伸计标距范围内锈蚀钢筋受拉变形量；

D_{max} ——梁跨中最大挠度；

E ——冲击能量；

EA ——模拟环境作用值；

EA' ——自然环境作用值；

E_P ——耗散能量；

F ——法拉第常数；

F_t ——钢筋加载端的拉拔力或拉伸力；
 I ——外加电流强度（A）；
 I_p ——冲量；
 K_t ——锈蚀钢筋锈坑处理论应力集中系数；
 M ——铁的摩尔质量；
 N_t ——环境作用时间 t 后的试件疲劳寿命；
 N_0 ——与受侵蚀构件同龄期的一组对比试件疲劳寿命；
 P ——冲击力；
 P_m ——平均冲击力；
 Q ——模拟环境作用效应值；
 Q' ——自然环境作用效应值；
 RH_A ——模拟一般环境的相对湿度；
 RH'_A ——自然一般环境的相对湿度；
 R_0 ——与受侵蚀构件同龄期的一组对比试件承载力；
 R_t ——环境作用时间 t 后的试件剩余承载力；
 T ——试验温度；
 T_A ——模拟一般环境的温度；
 T'_A ——自然一般环境的温度；
 T_C ——模拟氯盐环境的温度；
 T'_C ——自然氯盐环境的温度；
 T_d ——冲击力作用时间；
 T_0 ——实际工程服役环境的年平均温度；
 V_F ——静力拉拔试验中按荷载控制加载速度；
 Z ——金属离子价数；
 a_t ——环境作用时间 t 后的试件变形；
 a_0 ——与受侵蚀构件同龄期的一组对比混凝土结构构件变形；
 b ——为双曲线虚半轴长；
 c_0 ——混凝土内部初始氯离子含量占混凝土质量的百分比；
 c_{crit} ——临界氯离子含量占混凝土质量的百分比；

c_s ——模拟氯盐环境下混凝土表面氯离子含量占混凝土质量的百分比；

c_s ——自然氯盐环境下混凝土表面氯离子含量占混凝土质量的百分比；

d ——钢筋直径；

$\text{erf}^{-1}(\cdot)$ ——误差函数的反函数；

f_a ——龄期系数；

$f(\cdot)$ ——模拟环境作用下混凝土试件环境作用效应计算函数；

$f^{-1}(\cdot)$ —— $f(\cdot)$ 的反函数；

$g(\cdot)$ ——自然环境作用下混凝土试件环境作用效应计算函数。

$g^{-1}(\cdot)$ —— $g(\cdot)$ 的反函数；

h ——落锤下落高度；

i ——锈蚀电流密度 (A/m^2)；

k ——为双曲线渐近线斜率；

k_{yc} ——锈蚀钢筋的名义屈服强度相对值；

k_{uc} ——锈蚀钢筋的名义极限强度相对值。

l ——引伸计的标距；

l_b ——待锈钢筋长度；

l_{bond} ——试件的有效粘结长度；

m ——锈蚀钢筋经过酸洗处理后的质量；

m_h ——落锤质量；

m_w ——锈蚀钢筋经过酸洗处理后的排水质量；

m_{w0} ——钢筋锈蚀前排水质量；

m_{w01} 、 m_{w02} ——分别为基准校正用的两根钢筋的初始排水质量；

m_{w1} 、 m_{w2} ——分别为基准校正用的两根钢筋酸洗后的排水质量；

m_0 ——钢筋锈蚀前质量；

m_{01} 、 m_{02} ——分别为基准校正用的两根钢筋的初始质量；

m_1 、 m_2 ——分别为基准校正用的两根钢筋酸洗后的质量。

n ——提取的锈蚀钢筋横截面积数量；

n_{CT} ——温度对混凝土中氯离子扩散系数加速倍数；

n_{ST} ——温度对混凝土中硫酸根离子扩散系数加速倍数；

q ——活化常数；
 q_c ——混凝土内部氯离子扩散活化系数；
 q_s ——混凝土内部硫酸根离子扩散活化系数；
 t ——模拟环境作用时间；
 t' ——自然环境作用时间；
 t_s ——锈蚀持续时间；
 t_A ——模拟一般环境作用时间；
 t'_A ——自然一般环境作用时间；
 t_C ——模拟氯盐环境作用时间；
 t'_C ——自然氯盐环境作用时间；
 ΔN ——试件疲劳寿命降低率；
 ΔR ——试件承载力降低率；
 Δa ——试件变形增加率；
 Δm ——钢筋质量损失量；
 α_{yc} ——锈蚀钢筋屈服荷载相对值；
 α_{uc} ——锈蚀钢筋极限荷载相对值；
 $\alpha_{\delta c}$ ——锈蚀钢筋极限延伸率相对值；
 λ ——时间比；
 λ_A ——模拟一般环境作用和自然一般环境作用时间比；
 λ_C ——模拟氯盐环境作用和自然氯盐环境作用时间比；
 δ_c ——锈蚀钢筋极限延伸率；
 δ_0 ——未锈蚀钢筋极限延伸率；
 ε_s ——引伸计标距范围内锈蚀钢筋平均应变；
 η_s ——钢筋的平均锈蚀率；
 $\eta_{s,\max}$ ——锈蚀钢筋的最大截面锈蚀率；
 ρ ——椭圆长轴末端的曲率半径；
 σ_s ——锈蚀钢筋名义应力；
 τ ——试件的平均粘结应力

3 基本规定

3.1 一般原则

3.1.1 环境作用下混凝土结构性能演化试验的目的是探明各类环境下混凝土结构的环境作用效应和受力性能演化规律，揭示性能演化机理，预测使用寿命，包含环境作用效应试验和环境作用效应试验后受力性能试验。

3.1.2 混凝土结构环境作用效应试验应根据试验目的按表 3.1.2 的规定确定混凝土结构的环境作用类别和环境作用。

表 3.1.2 环境类别、混凝土结构劣化机理及环境作用

类别和名称			混凝土结构劣化机理	环境作用
A 一般环境	Aa	一般大气环境	大气中二氧化碳气体侵入混凝土保护层造成钢筋脱钝锈蚀	大气温度、大气相对湿度、二氧化碳气体浓度、干湿循环、风等
B 冻融环境	Ba	普通冻融环境	混凝土中孔隙水反复冻融引起的膨胀作用导致混凝土逐层损伤	冻结温度、融化温度、降温速率、冻融循环次数等
	Bb	盐冻环境	混凝土中含盐孔隙水反复冻融引起的膨胀作用导致混凝土逐层损伤	冻结温度、融化温度、降温速率、冻融循环次数、氯盐浓度等
C 氯盐环境	Ca	海洋环境：大气区	海洋大气中氯盐侵入引起钢筋锈蚀	大气温度、大气相对湿度、氯离子沉降量等
	Cb	海洋环境：浪溅区	海浪中氯盐侵入引起钢筋锈蚀	大气温度、大气相对湿度、干燥时间、湿润时间、氯盐浓度等
	Cc	海洋环境：潮汐区	高潮和低潮交替过程海水中氯盐侵入引起钢筋锈蚀	大气温度、大气相对湿度、水温、干燥时间、湿润时间、氯盐浓度等
	Cd	海洋环境：淹没区	海水浸泡过程中氯盐侵入引起钢筋锈蚀	水温、氯盐浓度等
	Ce	土中和地下水中的氯盐环境	土壤中和地下水中的氯盐侵入引起钢筋锈蚀	土壤/水的温度、氯盐浓度等
	Cf	除冰盐环境	除冰盐等环境中的氯盐侵入引起钢筋锈蚀	大气温度、大气相对湿度、氯盐浓度等
D 硫酸盐环境	Da	大气区	结构接触空气中盐分，不与盐溶液直接接触，	大气温度、大气相对湿度、干燥时间、湿润时间大气中硫酸盐沉积量

			空气中的硫酸盐等侵入引起混凝土损伤，有干湿循环	等
	Db	土中无地下水区	最高地下水位以上的土壤中	土壤温度、土壤孔隙相对湿度、硫酸盐含量等
	Dc	土中地下水位变动区	土壤和地下水中的硫酸盐等侵入引起混凝土损伤，有干湿交替	土壤/水的温度、土壤中空气相对湿度、干燥时间、湿润时间、硫酸盐浓度等
	Dd	土中地下水浸泡区	土壤和地下水中的硫酸盐等侵入引起混凝土损伤	土壤/水的温度、硫酸盐浓度等

3.1.3 混凝土结构环境作用效应试验应根据结构所处环境类别、可接受的试验总时长和所具备的试验条件等情况选择进行自然暴露试验或室内模拟环境作用效应试验，或者同时进行自然暴露试验和室内模拟环境作用效应试验。室内模拟环境作用效应试验应确保混凝土结构的环境作用效应和受力性能演化机理与其在自然环境中的演化机理一致。

3.1.4 当研究荷载作用效应对混凝土材料与结构环境作用效应的影响时，可根据需要开展下列试验：

- 1 静力荷载持续作用下混凝土材料与结构的环境作用效应试验；
- 2 疲劳荷载与环境共同作用下混凝土材料与结构的环境作用效应试验；
- 3 静力、疲劳、低周反复、冲击等荷载作用后混凝土材料与结构的环境作用效应试验。

3.1.5 当开展静力荷载持续作用下或疲劳荷载与环境共同作用下混凝土材料与结构的环境作用效应试验时，若环境箱内环境作用的腐蚀作用较强，应采用安装于环境箱外部的加载设备进行加载，此时应做好加载设备与环境箱接口的密封，保证试验加载时环境箱内环境作用不受影响，同时环境箱外的加载设备也不受环境箱环境作用的影响；若环境箱内的环境作用的腐蚀作用很弱，可采用安装于环境箱内部的加载设备进行加载，加载方式可为试件互为支座的对顶加载、悬挂重物集中力加载、重物均布加载、散体均布加载、水压均布加载、弹簧自平衡支架、试件互为支座的对顶加载、杠杆集中力加载等。加载除应满足《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152 中的规定外，还应满足下列规定：

- 1 试验过程中传力铰链、支座等保持润滑，能有效地转动或滚动；

- 2 所采用的重物或砝码在试验过程中重量不会发生改变；
- 3 加载位置处不作为试验试件环境作用有效部位；
- 4 与加载设备距离太近或受影响太大的试验试件区域不作为环境作用试验有效部位。

3.1.6 当开展混凝土结构同时受荷载与环境作用时，若疲劳荷载与环境作用的加速倍率相同，应采用疲劳荷载与环境同步作用试验的方法；若疲劳荷载与环境作用的加速倍率不一致，可采用疲劳荷载与环境交替作用试验的方法。

3.1.7 当先对试件进行静力加载、低周反复加载、疲劳加载、机械冲击等受力作用，使混凝土结构试件具有初始损伤，再对试件进行模拟环境作用时，对具有初始损伤的试件应记录其损伤历史、形貌和其他主要损伤主要参数。

3.1.8 环境作用效应试验的总时长、阶段周期和子阶段周期等应根据试验目的、环境条件以及试件响应等综合确定。试验总时长应包含一个或一个以上的阶段周期。每个阶段周期的结束时间点为阶段测试时间点。在阶段测试时间点应进行环境参数的全面检测和试件响应的全面检测。每个阶段周期内宜包括两个或多个试验子阶段周期。每个子阶段周期的结束时间点为普通测试时间点，在每个普通测试时间点应测试试环境参数和主要的试件响应。

3.2 试验设备

3.2.1 试验设备应包括环境模拟试验设备、加载设备、量测仪器和取样设备等。

3.2.2 环境模拟试验设备宜由环境箱体、环境作用发生装置和控制系统组成。环境模拟试验设备试验空间容积不应小于试件体积的 3 倍。环境模拟试验设备的控制系统应能实时监测和动态显示环境箱体内所控制的环境参数值，如箱体内空气温度、空气相对湿度、气体浓度、水温、试件内部温度和相对湿度等环境参数实时值，并进行存储，具有断电停机后自动记忆和继续试验的功能。重要的环境箱内参数应具有冗余测点，防止因单测点失效而缺失关键参数，并可相互对照测量结果。

3.2.3 环境箱体和环境作用发生装置应具有足够的抗腐蚀性，长期试验过程中能保证自身性能的同时，不会对试验试件、试验环境和试验人员产生不利影响。

3.2.4 当进行碳化试验和盐雾试验时，环境模拟试验设备应能确保箱体有可靠

的专用孔道与大气相通并使箱体内部相通，保持箱体内部微正压状态。

3.2.5 环境模拟试验设备在环境箱体内和箱体外部均应安装合适的气体浓度、温度、压力等的可靠传感器，对环境箱和组成设备内出现超出正常工作范围的情况进行及时报警，并具有强制停机等功能，以保护试验试件、试验人员和试验设备本身。报警应包括足够令人察觉和警惕的视觉和声音等形式。

3.2.6 环境模拟试验设备的内部必须有从内部方便开启试验箱门的紧急开箱门装置。

3.2.7 当环境模拟试验设备进行长期环境试验，且人员必须较频繁进入试验箱内观察试件和维护设备时，环境模拟试验设备应配备缓冲间。

3.2.8 加载设备应满足下列规定：

1. 能施加静力荷载、疲劳荷载、反复荷载或冲击荷载；
2. 所施加的荷载具有明确的作用点和分布；
3. 当加载设备的整体或局部需要与试件同时受环境作用时，能抵抗本标准第4章~第9章中对应环境作用的而不被侵蚀，或者被侵蚀后仍满足以上第1和第2款的要求。

3.2.9 支承装置应满足下列要求：

1. 应保证试验试件的边界约束条件和受力状态与设计方案或实际结构一致；
2. 支承装置应具有足够的刚度、承载力和稳定性；
3. 用于环境与荷载共同作用试验的支承装置还应能抵抗本标准第4章~第9章中对应环境作用的侵蚀。支承装置不被侵蚀，或者被侵蚀后仍满足以上第1和第2款的要求。

3.2.10 量测仪器应满足下列规定：

- 1 可测量结构和构件试件中荷载作用或者环境作用；
- 2 可测量结构或构件试件中荷载作用效应或环境作用效应；
- 3 具有足够的测量精度；
- 4 当量测设备的整体或局部需要与试件同时受环境作用时，能抵抗环境的侵蚀作用。

3.3 试验试件

3.3.1 本标准的试验对象包括混凝土材料试件、钢筋试件、钢绞线试件、混凝土中钢筋试件、混凝土中钢绞线试件、混凝土构件和结构试件，其尺寸和数量应满足：

1. 混凝土材料试件的几何形状符合表 3.3.1-1 的规定。1 组试件应包括 3 个平行试件。混凝土试件的最小横截面尺寸宜符合《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2009)3.2.1 条的要求。横截面尺寸宜以 100 mm 为模数进行选择。

表 3.3.1-1 素混凝土试件的几何形状和数量要求

环境分类	几何形状	28d 强度所需试件组数	对比试件	试件数量
A 一般环境	立方体或棱柱体	1	最多对应每个测试点 1 组，可根据需要确定	每个阶段测试点 1 组
B 冻融环境	棱柱体			
C 氯盐环境	立方体			
D 硫酸盐环境	立方体			

2. 钢筋试件以裸钢筋为试验对象时，钢筋长度应不小于 300mm，且不小于 20 倍钢筋直径。每个阶段测试时间点应有 3 个以上的平行试样。

3. 钢绞线试件以裸钢绞线为试验对象时，钢绞线长度应不小于 450mm，且不小于 30 倍钢绞线直径；以一股钢绞线为对象时，长度应不小于 300mm，且不小于 20 倍直径；每个阶段测试时间点应有 3 个以上的平行试样。

4. 混凝土中钢筋试件宜采用长高比小于 3 的棱柱体或板，其中钢筋锈蚀段的长度应不小于 300mm，且不小于 20 倍钢筋直径。每个阶段测试时间点应有 3 个以上的平行试样。

5. 混凝土中钢绞线试件宜采用长高比小于 3 的棱柱体或板，其中钢绞线锈蚀段的长度应不小于 450mm，且不小于 30 倍钢绞线直径。每个阶段测试时间点应有 3 个以上的平行试样。

6. 混凝土构件试件或结构试件可为足尺模型试件或缩尺模型试件，试样形状根据工程结构原型、试验目的和能保证环境模拟时构件和结构不同部位的表面环境相一致或与自然环境一致综合确定。每个阶段测试时间点平行试件的数

量不应少于 2 个。缩尺模型可以为等比例缩尺模型，所有几何尺寸按等比例缩尺；也可以为非等比例缩尺模型，模型中有些几何尺寸缩尺，有些几何足尺，如保护层厚度足尺，而其他尺寸缩尺。混凝土构件和结构试件的几何形状、尺寸要求详见表 3.3.1-2。

表 3.3.1-2 混凝土构件和结构试件的几何形状、尺寸要求

模型试件类别		适用情况
足尺模型	足尺模型试件	适用所有的试验目的。
缩尺模型	等比例缩尺模型试件	适用于特定的机理研究
	非等比例缩尺模型试件	适用于仅关注侵蚀介质在混凝土保护层传输和影响

3.3.2 所有试验试件中钢筋的表面不得有锈坑或其它严重缺陷。钢筋应采用 12%盐酸溶液进行酸洗，经清水漂净后用石灰水中和，再用清水冲洗干净，擦干后应在干燥器中至少存放 4h，然后用合适的天平称取钢筋的初重。钢筋应存放在干燥器中备用。

3.3.3 同一个试验中的同规格素混凝土、带筋混凝土、混凝土构件和混凝土结构等试件均应采用同批混凝土拌制，并采用相同的养护条件进行养护。

3.3.4 同一个试验中的同规格钢筋试件、钢绞线试件、混凝土结构和构件试件中的钢筋都应采用同批次钢筋或钢绞线，并应与实际结构的几何形状和材质相同。

3.3.5 混凝土结构和构件试件的最小截面尺寸和公差应符合现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 5008-2009 的第 3.3 节规定。

3.3.6 试件表面有密封要求时，试件处理应符合下列规定：

- 1 一维侵蚀试验的试件可保持一个侧面或两个相对侧面，其余试件表面宜采用环氧树脂密封；
- 2 二维侵蚀试验的试件应保留两个相邻面，其余试件表面宜采用环氧树脂密封。

3.3.7 环境作用效应试验时，小型的试件可采用水平、竖立或倾斜等摆放方式；试件与试件之间、试件与试件架周边的距离不应小于 100mm。

3.3.8 进行混凝土构件试件或结构试件的环境作用效应试验时，宜同时留取材料性能试件，置于与构件试件或结构试件相同的环境中进行环境作用效应试验。材料性能试件宜包括：

1 混凝土传输性能平行试件，其几何形状、尺寸和数量应满足 3.3.1 条的第 1 款规定，用于获取不同阶段测试时间点混凝土材料被环境介质侵入情况；

2 混凝土力学性能平行试件，可采用符合《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 规定的标准棱柱体试件，用于获取不同阶段测试时间点混凝土材料力学性能指标；

3 混凝土中钢筋平行试件，其几何形状、尺寸和数量宜满足 3.3.1 条的第 4 款规定，用于获取不同阶段测试时间点钢筋锈蚀形态和力学性能；

4 混凝土中钢绞线平行试件，其几何形状、尺寸和数量应满足 3.3.1 条的第 5 款规定，用于获取不同阶段测试时间点钢绞线锈蚀形态和力学性能。

3.4 相似性

3.4.1 采用人工模拟环境箱进行混凝土结构的模拟环境作用效应试验时，可基于模拟环境作用效应与自然环境作用效应的相似性关系推定模拟环境作用时间或模拟环境作用参数取值。

3.4.2 模拟环境作用和自然环境作用下混凝土试件环境作用效应的时间相似性，应按下列步骤确定：

1. 建立模拟环境作用下混凝土试件环境作用效应时变关系：

$$Q = f(EA; t) \quad (3.6.3-1)$$

式中： t ——模拟环境作用时间；

EA ——模拟环境作用值；

Q ——模拟环境作用效应值；

$f(\cdot)$ ——模拟环境作用下混凝土试件环境作用效应计算函数。

2. 建立自然环境作用下混凝土试件环境作用效应时变关系：

$$Q' = g(EA', t') \quad (3.6.3-2)$$

式中： t' ——自然环境作用时间；

EA' ——自然环境作用值；

Q' ——自然环境作用效应值；

$g(\cdot)$ ——自然环境作用下混凝土试件环境作用效应计算函数。

3. 选定目标环境作用效应值 $[Q]$ ；

4. 基于环境作用效应等效，建立模拟环境与自然环境作用之间的时间相似性：

$$\lambda = \frac{t}{t'} = \frac{f^{-1}(EA; [Q])}{g^{-1}(EA'; [Q])} \quad (3.6.3-3)$$

式中： λ ——时间比；

$f^{-1}(\cdot)$ —— $f(\cdot)$ 的反函数；

$g^{-1}(\cdot)$ —— $g(\cdot)$ 的反函数。

3.4.3 模拟环境作用下混凝土试件的环境作用效应时变关系（式（3.6.3-1）），可按下列方法确定：

- 1 模拟环境试验法；
- 2 模拟环境第三方参照试验法；
- 3 模拟环境作用下环境作用效应理论或数值模拟计算法。

3.4.4 自然环境作用下混凝土试件的环境作用效应时变关系（式（3.6.3-2）），可按下列方法确定：

- 1 自然环境现场暴露试验法；
- 2 自然环境第三方参照试验法；
- 3 自然环境作用下环境作用效应理论或数值模拟计算法。

3.4.5 各环境类别需考虑的环境作用应按表 3.1.1 的规定确定。各环境类别下环境作用取值宜根据《混凝土结构环境作用与区划标准》（T/CECS ***-202*）的规定确定。

4 混凝土结构碳化与钢筋锈蚀试验

4.1 一般规定

4.1.1 一般环境下混凝土结构环境作用效应试验应优先采用加速碳化试验及由碳化引起的钢筋锈蚀试验。

4.1.2 一般环境的环境模拟试验方式和试验参数宜按表 4.1.2 的规定选用。

表 4.1.2 一般环境模拟试验方式及其试验参数

环境分类		环境模拟试验方式	试验参数
Aa	一般环境	恒定环境作用碳化试验	大气温度、大气相对湿度、二氧化碳气体浓度、干湿循环、风
		时变环境作用碳化试验	
		风作用碳化环境	

4.2 试验设备

4.2.1 一般环境作用模拟试验设备除应符合 3.2 中的相关规定外，尚应具备二氧化碳气体的气源和浓度控制装置，温度和相对湿度的调节和控制装置，且应符合下列规定：

1. 二氧化碳的控制范围宜覆盖（0~30）%；浓度允许偏差为±5%目标浓度值；
2. 环境箱内温度控制范围应覆盖（0~50）℃，允许偏差为±1℃；
3. 环境箱内相对湿度控制范围应覆盖（40~95）%，允许偏差为±3%；
4. 环境箱内循环风速应在（0.2~1.0）m/s 范围内。

4.2.2 干湿循环模拟宜另配备喷淋发生装置，且符合下列规定：

1. 喷淋量允许偏差为目标雨量的±10%；
2. 喷淋水宜为经过滤和净化的自来水；
3. 喷淋水的 pH 值在 6.5~7.2 之间，阻抗在（15000-25000）Ω 之间。

4.2.3 干湿循环模拟宜另配备模拟光照辐射装置，且符合下列规定：

1. 采用全光谱辐射装置模拟太阳辐射时辐照度宜控制为 1120W/m²，辐照

度偏差允许值为 $\pm 10\%$ ，各波段光的辐照度应符合表 4.2.3 要求；

表 4.2.3 模拟光照辐射装置的各波段光辐照度

类别	波长范围	辐照度要求
紫外 B	280nm~320nm	$5\text{W/m}^2 \pm 35\%$
紫外 A	320nm~400nm	$63\text{W/m}^2 \pm 25\%$
可见	400nm~780nm	$560\text{W/m}^2 \pm 10\%$
红外	780nm~3000nm	$492\text{W/m}^2 \pm 20\%$

2. 采用红外灯阵模拟太阳辐射模拟时，辐照度宜控制为 600W/m^2 ，辐照度偏差允许值为 $\pm 10\%$ 。

4.2.4 模拟风作用时，宜另配备风发生和控制装置，且符合下列规定：

- 1 可调节风速范围为 $(2.0 \sim 12.0) \text{ m/s}$ ；
- 2 在有效面积内风速误差不大于试验最大风速的 $\pm 10\%$ ；
- 3 在有效面积内风速均匀度不大于试验最大风速的 $\pm 10\%$ 。

4.2.5 二氧化碳测试系统应能测量人工模拟环境箱内二氧化碳浓度，测量精度应不低于试验最大二氧化碳浓度值的 $\pm 6\%$ 。

4.2.6 辐照度测试系统应能测量环境箱内辐照度，测量精度应不低于试验最大辐照度的 $\pm 5\%$ 。

4.2.7 钢筋锈蚀电流密度测量系统应能通过线性极化法或极化曲线推定法测定混凝土中钢筋的锈蚀电流密度，电位测量精度应不低于 $\pm 0.5\%$ ，可感知的最小电流可达 10nA 。

4.2.8 称量钢筋用的天平应具有合适的量程，称量精度应不低于 $\pm 0.01\text{g}$ 。

4.2.9 钢筋表面形态三维扫描系统的扫描精度应不低于 0.03mm 。

4.2.10 微型温湿度传感器采集系统的温度测量精度应不低于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，相对湿度测量精度应不低于 $\pm 3\%$ 。

4.3 试验试件

4.3.1 混凝土材料试件、混凝土中钢筋试件、混凝土中钢绞线试件、混凝土构

件试件和结构试件，其尺寸、几何形状和数量应符合本标准 3.3.1 条的要求，并满足 3.3 节中的其它规定。

4.3.2 宜按本标准 3.3.8 条的规定制作混凝土传输性能平行试件、混凝土力学性能平行试件、混凝土中钢筋试件平行试件和混凝土中钢绞线平行试件，置于一般环境作用模拟试验设备中进行同条件碳化试验，以获得与混凝土构件试件或结构试件具有相同被侵蚀程度的混凝土、钢筋或钢绞线。

4.3.3 混凝土材料试件、混凝土中钢筋试件、混凝土中钢绞线试件、混凝土构件试件和结构试件在试验开展前应标准养护 28d。试件标准养护后，宜放置恒温恒湿环境中，直到混凝土内部温度和湿度稳定；当仅为获取锈蚀钢筋时，试件可在 60℃下烘干 48h。

4.3.4 当开展荷载作用效应对混凝土构件或结构碳化影响的试验时，试件可通过静力加载、低周反复加载、疲劳加载、施加冲击荷载等方式获得初始损伤，也可通过诱导裂缝方法，在混凝土表面或内部形成所需的预设裂缝。

4.4 试验方法

4.4.1 一般环境下应优先采用恒定环境作用碳化试验，亦可根据试验目的采用时变环境作用碳化试验和风作用碳化试验等。

4.4.2 当开展加速碳化试验时，二氧化碳浓度值宜比实际混凝土结构所处环境中的二氧化碳浓度值高，但浓度值不宜高于 30%。

4.4.3 当开展恒定环境作用碳化试验时，应保持温度、相对湿度和二氧化碳浓度为恒定值，持续进行试验，直至混凝土碳化达到一定深度，或钢筋锈蚀达到一定程度结束。温度、相对湿度和二氧化碳浓度的大小可根据试验目的确定。当试验目的为加速重现实际混凝土碳化过程时，宜根据模拟一般环境作用与自然一般环境作用的相似性关系（附录 A）推定模拟一般环境作用时温度、相对湿度及二氧化碳浓度值。

4.4.4 当开展时变环境作用碳化试验时，可根据试验目的和所具备试验设备条件选择以下三种类型的试验：

1. 环境参数连续变化循环试验。通过控制环境箱内空气温度、相对湿度和二氧化碳浓度三个环境参数中的一个或多个，使其按预设时程曲线进行变化，

同时其它环境参数保持恒定，试验至混凝土碳化达到一定深度，或钢筋锈蚀达到一定程度结束。环境参数的变化周期应根据实际结构中决定混凝土碳化速度环境作用因素的变化周期和变化速度确定。非决定性环境参数可设置为恒定值。

2. 环境参数突变循环试验。通过将试件依次放入设定为不同恒定环境条件的环境箱中，使环境箱内空气温度、相对湿度和二氧化碳浓度三个环境参数中的一个或多个发生突变，并不断循环重复以上过程，直至混凝土碳化达到一定深度，或钢筋锈蚀达到一定程度结束。试验环境参数的大小和作用时间宜根据实际结构中决定混凝土碳化速度的典型环境作用值的大小和作用时间确定。

3. 干湿循环碳化试验。通过控制环境箱内空气为低相对湿度，或者对试件进行高强度辐照，再对试件进行喷淋湿润，不断循环，使试件处于干湿循环状态，直至混凝土碳化达到一定深度，或钢筋锈蚀达到一定程度结束。干燥时间宜根据实际混凝土结构处于干燥的时间和试验中控制的二氧化碳浓度值综合确定，宜使该时间内混凝土碳化深度与实际混凝土结构碳化深度一致；湿润时间宜比实际结构的湿润时间短，宜确保混凝土受碳化影响深度范围内的混凝土能达到水饱和状态。干燥可通过空气除湿干燥、水冷氙灯阵辐射或红外灯阵辐射等方式进行，此阶段宜控制环境箱内温度为实际结构的环境温度一致，采用空气除湿干燥时相对湿度宜控制在（30~40）%。二氧化碳浓度宜控制为 20%；湿润可通过连续喷淋试件（10mL/cm²·h）或将试件浸泡于清水中进行，此时箱体二氧化碳浓度不进行控制。

4.4.5 当开展风作用碳化试验时，宜保持温度、相对湿度和二氧化碳浓度为恒定值，控制风的强度使其以某个角度吹向试件，直至混凝土碳化达到一定深度，或试件中钢筋锈蚀达到一定程度结束。当试验目的为加速重现实际混凝土实际的碳化时，试验温度、相对湿度和风速宜设置为实际环境温度高于零度时的温度平均值和相对湿度平均值，二氧化碳浓度可控制为 20%。

4.5 测试内容与方法

4.5.1 当试验试件几何形状较复杂或尺寸较大等原因可能造成试验试件不同部位的表面环境形成差异时，应在试件关键表面处另外设置传感器来监测空气温

度、相对湿度和二氧化碳浓度。

4.5.2 混凝土内部关键部位不同深度的温度和相对湿度应优先采用内埋微型温湿度传感器来进行监测。微型温湿度传感器应先进行标定，在温湿度传感器的探头包裹防水透气布，然后将其捆绑于钢筋或与底部模板相连的尽量小的支架上。

4.5.3 应在普通测试时间点测量混凝土构件试件或结构试件的环境作用效应，包括混凝土碳化深度、钢筋的锈蚀电流密度、失重率和锈蚀率等。

4.5.4 应在阶段测试时间点全面测量环境作用参数和混凝土构件试件或结构试件中环境作用及其效应，包括二氧化碳浓度、混凝土碳化深度、钢筋的锈蚀电流密度、失重率和锈蚀率等。

4.5.5 混凝土碳化深度可通过一组混凝土传输性能平行试件测量获得，认为该组试件的碳化深度值为结构试件或构件试件在此时间点的碳化深度。可通过压力试验机将试件劈裂，使得劈裂面与混凝土碳化扩展方向一致，劈裂面距离试件边缘的距离宜不小于 30mm。刷去断面上的残余粉末。然后可按以下方法测量碳化深度：

1. 在劈裂面上均匀喷洒 1%的酚酞酒精溶液（酒精溶液中含 20%的蒸馏水），30s 后用钢尺测试混凝土碳化深度，碳化深度测量应精确至 0.5mm。当采用《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-20091 的 11.0.4 条中的第 5 款的间隔测量法获取碳化深度时，在劈裂面上每隔 10mm 测一个碳化深度，取所有测点的算数平均值作为碳化深度。其中，当某测点处的碳化分界线上刚好嵌有粗骨料时，取该骨料两侧处碳化深度的算数平均值作为该点的碳化深度。当采用拍摄描图法获取碳化深度时，先在劈裂面上相互垂直的两个方向分别放上精确至毫米的刻度尺，然后对劈裂表面采用标准 50mm 镜头进行拍照，在图像处理软件中根据照片中的刻度尺进行校准，使照片各个方向的比例一致，然后在图像处理软件中采用多线段描绘碳化分界线，当碳化分界线经过粗骨料时可认为该骨料两侧边碳化分界线，然后按下式计算碳化深度：

$$C_d = (A / B) \times (B' / B) \quad (4.5.5)$$

式中：A——图片碳化区域面积；

B——图片中试件的边长；

B'——真实试件的边长；

C_d——真实试件的碳化深度。

2. 在劈裂面上均匀喷洒彩虹试剂，当呈现红紫色时便立即测出从混凝土表面到呈现红紫色位置之间的距离为完全碳化的深度，然后采用条款 1 中的间隔测量法或拍摄描图法确定完全碳化深度。当需要获取部分碳化深度时，宜采用拍摄描图法。按条款 1 中方法对喷洒彩虹试剂并充分显色的劈裂面进行拍摄和尺寸校准后，根据彩虹试剂所附带的颜色与 pH 值对应指标图找到不同 pH 值对应的颜色，在图像处理软件中采用多线段描绘出不同碳化程度的分界线，获得劈裂面上的不同碳化程度分布图，然后按式（4.5.5）计算不同碳化程度的对应碳化深度。

3. 测试好碳化深度后，应将混凝土传输性能平行试件或原型试件的对应劈裂部位用环氧树脂将破型后试件的劈裂面封好，再放入箱内继续碳化，直到下一个阶段测试点。

4.5.6 钢筋锈蚀电流密度可通过线性极化测试方法获得。可采用电化学工作站进行动电位扫描，扫描速率宜为 0.167 mV/s，扫描电位（相对于开路电位）的范围宜为-10 mV 到+10 mV，根据测得极化电阻 R_p ，利用 Stern-Geary 公式计算到锈蚀电流密度，如下式所示：

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (4.5.6)$$

式中：当钢筋处于活化状态时 $B=52$ mV；当钢筋处于钝化状态时 $B=26$ mV。

4.5.7 钢筋平均锈蚀率 η_s 可采用本标准第 13 章中的称重法进行，也可采用三维激光扫描法进行。

4.5.8 钢筋沿长度方向的锈蚀不均匀性系数 R 应按本标准第 13 章中的三维激光扫描法进行。

5 混凝土结构氯盐侵蚀与钢筋锈蚀试验

5.1 一般规定

5.1.1 氯盐环境下混凝土结构环境作用效应试验应优先采用模拟环境下的加速氯盐侵蚀试验。

5.1.2 不同氯盐侵蚀环境对应的模拟试验方式和试验参数宜按表 5.1.2 的规定选用。

表 5.1.2 氯盐环境模拟试验方式及其试验参数

环境分类		模拟试验方式	试验参数
Ca	海洋环境：大气区	盐雾试验	氯盐溶液浓度、环境箱空气温度、相对湿度、干燥时间、喷雾时间、风速、试验时长
Cb	海洋环境：浪溅区	干湿循环试验	氯盐溶液浓度、环境箱空气温度、相对湿度、干燥时间、湿润时间、试验时长
Cc	海洋环境：潮汐区		
Cd	海洋环境：淹没区	全浸泡试验	氯盐溶液浓度、溶液温度、试验时长
Cf	除冰盐环境	冻融干湿循环试验	氯盐溶液浓度、饱水厚度、饱水时间、冻结温度、融化温度、冻结时间、融化时间、环境箱空气温度、相对湿度、干燥时间、试验时长

5.2 试验设备

5.2.1 盐雾试验采用的模拟环境试验设备除应符合 3.2 节中所有条款规定外，尚应具备模拟环境试验箱、喷雾发生和控制装置、温度控制系统和中控系统，且盐雾沉降量应控制为 $(1\sim 2)\text{ mL}/(80\text{ cm}^2\cdot\text{h})$ 。

5.2.2 干湿循环试验设备应符合 3.2 中所有条款规定，且应符合下列规定：

1. 具备模拟环境试验箱、温度控制系统、湿度控制系统和中控系统；
2. 潮汐区的干湿循环模拟优先采用自动控制水位的方式，其它情况可采用喷淋的方式；
3. 自动控制水位装置应具备水位控制器、水位传感器和抽排水系统，详见本标准的附录 B；

4. 喷淋装置的盐溶液最大喷淋量不应小于 $10\text{mL}/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$ ，喷淋方式可为连续喷淋或周期间歇喷淋。

5.2.3 全浸泡试验设备应包括具备温度控制系统的环境模拟室、加盖的水池或溶液箱。

5.2.4 混凝土取粉设备应可钻磨出距混凝土表面不同深度的混凝土粉末，并能控制每次削磨的深度，深度控制精度应不低于 0.2mm 。

5.2.5 氯离子测试系统应可测试溶液中氯离子的含量，可采用基于化学滴定法的测试系统，也可采用基于离子选择电极法的测试系统。采用基于离子选择电极法的测试系统时，应能屏蔽氯离子之外的阴离子对氯离子含量测试的不利影响，氯离子选择电极的测量范围宜为 $(5\times 10^{-5}\sim 1\times 10^{-2})\text{mol/L}$ ，参比电极应为双盐桥饱和甘汞电极，系统的测量误差应低于 $\pm 10\%$ 。

5.2.6 钢筋锈蚀电流密度测量系统应能通过线性极化法或极化曲线推定法测定混凝土中钢筋的锈蚀电流密度，电位测量精度应不低于 $\pm 0.5\%$ ，可感知的最小电流可达 10nA 。

5.2.7 称量钢筋用的天平应具有合适的量程，称量精度应不低于 $\pm 0.01\text{g}$ 。

5.2.8 钢筋表面形态三维扫描系统的扫描精度应不低于 0.03mm 。

5.2.9 微型温湿度传感器采集系统的温度测量精度应不低于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，相对湿度测量精度应不低于 $\pm 3\%$ 。

5.3 试验试件

5.3.1 混凝土材料试件、混凝土中钢筋试件和混凝土构件试件和结构试件，其尺寸、几何形状和数量应符合本标准 3.3 节中规定。

5.3.2 混凝土材料试件、混凝土中钢筋试件、混凝土中钢绞线试件、混凝土构件试件和结构试件在试验开展前应标准养护 28d。试件标准养护后，宜放置在恒温恒湿环境中，直到混凝土内部温度和湿度稳定。

5.3.3 宜按本标准 3.3.8 条规定制作混凝土传输性能平行试件、混凝土力学性能平行试件、混凝土中钢筋试件平行试件和混凝土中钢绞线平行试件，置于氯盐环境作用模拟试验设备中进行同条件试验，以获得与混凝土构件试件或结构试件具有相同被侵蚀状态的混凝土、钢筋或钢绞线。

5.3.4 当需要快速获取锈蚀钢筋试件时，可对混凝土中钢筋试件、混凝土中钢绞线试件、混凝土构件试件和结构试件采取下列措施：

1. 试验前将试件在 60℃烘箱中烘 48h，然后进行浸泡试验；
2. 在混凝土中内掺氯盐。

5.3.5 当开展荷载作用效应对混凝土结构氯盐侵蚀影响试验时，试件可通过静力加载、低周反复加载、疲劳加载、施加冲击荷载等方式获得初始损伤，也可通过诱导裂缝方法，在混凝土表面或内部形成所需的预设裂缝。

5.4 试验方法

5.4.1 混凝土结构氯盐侵蚀试验应采用纯氯化钠来配置盐溶液，溶液浓度可按下列规定选用：

- 1 采用混凝土结构服役环境中氯化钠溶液的浓度；
- 2 采用质量浓度 5%的氯化钠溶液；
- 3 所关注的其它浓度氯化钠溶液；
- 4 根据模拟氯盐环境作用与自然氯盐环境作用的相似性关系（附录 C）推定氯化钠溶液浓度值。

5.4.2 混凝土结构氯盐侵蚀试验的温度可根据本标准附录 C 提供的模拟氯盐环境作用与自然氯盐环境作用下混凝土试件的环境作用效应时间相似性确定。也可以根据研究目的采用其他温度值。

5.4.3 干湿循环的干燥阶段，人工模拟环境箱内的相对湿度应按以下规定选用：

- 1 根据混凝土结构服役环境的空气相对湿度确定；
- 2 相对湿度为 50%；
- 3 所关注的相对湿度值；
- 4 根据模拟氯盐环境作用与自然氯盐环境作用的相似性关系推定相对湿度值。

5.4.4 干湿循环试验中的循环制度应根据下列规定选用：

1. 模拟全日潮和半日潮时，试验周期应分别为 24h 和 12h；
2. 为加快氯离子侵蚀速度时，干湿时间比建议选为 5:1；

3. 对于其它情况，试验周期和干湿时间比可根据试验需要确定。

5.4.5 盐雾试验应按下列步骤进行：

1. 试验前应进行设备运行调试与标定、溶液配制、试件分类与编号等准备工作；
2. 试件应水平放置，且测试面应朝上放置并暴露在盐雾无阻碍沉降的位置；
3. 将氯盐溶液注入盐雾试验设备的溶液贮存罐中；
4. 开启盐雾试验装置，采用连续喷雾方式，试验参数应根据本标准第 5.4.1 条和第 5.4.2 条设定，并记录试验开始时间和试件状况等；
5. 试验过程中，应定期将氯盐溶液注入贮存罐、检查喷雾喷嘴连通性、记录喷雾累计时间与盐雾沉降量；
6. 试验测试应按本标准第 5.4.7 条第 6 款和第 7 款的规定执行。

5.4.6 干湿循环试验应按下列步骤进行：

1. 试验前应进行设备运行调试与标定、溶液配制、试件分类与编号等准备工作；
2. 对于水位控制方式，试件放置应能使其测试面与氯盐溶液充分接触；对于喷淋方式，试件测试面应正对喷淋口；
3. 将氯盐溶液注入试验装置的水箱内；
4. 开启干湿循环装置，试验参数应根据本标准第 5.4.1 条~第 5.4.4 条设定，并记录试验开始时间和试件状况等；
5. 试验过程中，应定期检测并调整氯盐溶液浓度，使其与试验开始时一致；
6. 试验测试应按本标准第 5.4.7 条第 6 款和第 7 款的规定执行。

5.4.7 全浸泡试验应按下列步骤进行：

1. 试验前应进行设备运行调试与标定、溶液配制、溶液箱放置、试件分类与编号等准备工作；
2. 将试件放入溶液箱（池）时，试件测试面不应与箱（池）底直接接触；
3. 在溶液箱（池）中注入氯盐溶液，注入时间不应超过 30min，且液面高于顶层试件上表面不应小于 20mm；

4. 试验参数应根据本标准第 5.4.1 条~第 5.4.2 条设定，并记录试验开始时间和试件状况等；
5. 试验过程中，应定期检测并调整氯盐溶液水位和浓度，使其与试验开始时一致；
6. 达到阶段测试时间点时，应根据本标准第 5.5 节规定测试试件性能，并应记录试件外观形貌和损伤等情况；测试结束后，若未破型试件表面在测试过程中发生密封破损，应密封处理后再继续试验；
7. 全部试验结束后，未破型试件可用于后续相关受力性能试验。

5.4.8 当试验中满足以下条件之一，可停止试验：

1. 达到设定的试验时间；
2. 氯盐侵蚀深度达到预定值；
3. 钢筋锈蚀率达到预定值。

5.5 测试内容与方法

5.5.1 当试验试件几何形状较复杂或尺寸较大等原因可能造成试验试件不同部位的表面环境形成差异时，应在试件关键表面处等位置另外设置传感器来监测试验的环境参数，如空气温度、相对湿度、氯离子沉降量等。

5.5.2 试验需要时，可在试件内部预埋温湿度传感器，监测试验过程中试件内部的温湿度响应。

5.5.3 应在阶段测试时间点全面测量环境作用参数和混凝土构件试件或结构试件中环境作用及其效应，包括氯离子沉降量、混凝土中氯离子含量、钢筋的锈蚀电流密度、失重率和锈蚀率等。

5.5.4 应在普通测试时间点测量混凝土构件试件或结构试件的环境作用效应，包括混凝土中氯离子含量、钢筋的锈蚀电流密度、失重率和锈蚀率等。

5.5.5 可通过一组混凝土传输性能平行试件来估计混凝土结构试件和构件试件距表面不同深度处的混凝土中氯离子含量。混凝土中的氯离子含量测试可根据《混凝土中氯离子含量检测技术规程》JGJ/T322 规定进行。

5.5.6 钢筋锈蚀电流密度可通过 4.5.6 条款规定的方法进行。

5.5.7 钢筋平均锈蚀率 η_s 可采用本标准第 13 章中的称重法或排水法进行，也可

采用三维激光扫描法进行。

5.5.8 钢筋沿长度方向的锈蚀不均匀性系数 R 应按本标准第 13 章中的三维激光扫描法进行。

6 混凝土结构硫酸盐侵蚀试验

6.1 一般规定

6.1.1 硫酸盐环境的环境模拟试验方式和试验参数宜按表 6.1.1 的规定选用。

表 6.1.1 硫酸盐环境模拟试验方式和试验参数

环境分类		模拟试验方式	试验参数
Da	大气区	干湿循环试验	环境箱空气温度、相对湿度、溶液温度、硫酸盐溶液浓度、干燥时间、湿润时间、试验时长
Db	土中无地下水区		
Dc	土中地下水位变动区		
Dd	土中地下水浸泡区	全浸泡试验	溶液温度、硫酸盐溶液浓度、试验时长

6.2 试验设备

6.2.1 硫酸盐环境模拟试验设备除应符合本标准第 3.2 节规定外，尚应符合下列规定：

1. 硫酸盐环境模拟试验设备的环境箱应能模拟硫酸盐溶液的浸泡作用，也能模拟混凝土试件的干燥过程，并能通过硫酸盐溶液水位变化的控制实现周期性干燥和浸泡作用的自动控制。
2. 环境箱内硫酸盐溶液的温度控制范围应覆盖（20~60）℃，允许偏差为±2℃。
3. 环境箱内空气温度的控制范围应覆盖（0~60）℃，允许偏差为±1℃；相对湿度控制范围应覆盖（40~95）%，允许偏差为±3%。

6.2.2 混凝土中硫酸根离子含量测定所用仪器应符合现行国家标准《水质硫酸盐的测定重量法》GB/T 11899 的规定。

6.2.3 混凝土试件膨胀测定用千分表或电子式位移计的量程不应小于 5mm，测量精度应不低于±0.001mm。

6.2.4 混凝土试件质量测定用电子秤量程不应小于 20kg，测量精度应不低于±1g。

6.2.5 试件截面剥蚀深度测定可采用游标卡尺或三维激光扫描仪，测量精度应不低于 $\pm 0.05\text{mm}$ 。

6.3 试验试件

6.3.1 混凝土材料试件、混凝土构件试件和结构试件，其几何形状、尺寸和数量应符合本标准 3.3 节的规定。

6.3.2 为了确定硫酸盐侵蚀下混凝土构件试件或结构试件混凝土损伤状态，宜按本标准 3.3.8 条规定制作混凝土传输性能平行试件和混凝土力学性能平行试件，置于硫酸盐环境模拟试验设备中进行同条件试验。

6.3.3 当开展硫酸盐侵蚀环境下混凝土材料力学性能时，宜留取混凝土材料强度对比试件，置于标准养护条件环境中，用于获取不同测试时间点的标准养护混凝土的抗压强度、弹性模量等力学性能，以对比分析硫酸盐侵蚀的影响。

6.3.4 在开展硫酸盐环境作用效应试验前，混凝土材料试件、混凝土构件试件和结构试件应标准养护 28d。

6.3.5 混凝土试件的硫酸盐环境作用试验可采用单面侵蚀、双面侵蚀或四面侵蚀。当需要获取硫酸盐侵蚀混凝土的应力-应变关系曲线时，宜采取对侧侵蚀方式，其它表面应采用环氧树脂进行密封。

6.4 试验方法

6.4.1 硫酸盐溶液宜优先采用纯无水硫酸钠配置。硫酸盐溶液浓度宜按以下规定选取：

- 1 采用混凝土结构服役环境中硫酸盐溶液的浓度；
- 2 采用质量浓度 5% 的硫酸钠溶液；
- 3 所关注的其它浓度硫酸钠溶液。

6.4.2 硫酸盐溶液 pH 值一般应维持在 6~8 之间。

6.4.3 硫酸盐溶液温度宜为 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，也可根据模拟硫酸盐侵蚀与自然硫酸盐侵蚀的相似关系和实验总时长确定，验证性实验也可根据服役环境确定。

6.4.4 干湿循环试验中干燥阶段的环境模拟箱相对湿度宜为 50%，也可根据服

役环境确定。

6.4.5 干湿循环试验的试验周期宜为 24h，湿润时间 6h，干燥时间 18h；也可根据实验时长和相似性确定，验证性实验也可根据服役环境确定。

6.4.6 全浸泡试验或者干湿循环试验中的浸泡阶段应确保硫酸盐溶液液面高于试件顶面 20mm 以上，并定期更换溶液确保溶液成分和浓度稳定。更换盐溶液时，从排出溶液到注入新溶液完成的总时间不应大于 60min。

6.4.7 干湿循环试验中的干燥时间、湿润时间以及干燥阶段的温度、相对湿度应由室内模拟环境试验系统自动测量与记录。

6.4.8 试验总时长宜符合下列规定：

1. 全浸泡试验的一个试验总时长宜为 7d 的整数倍；
2. 干湿循环试验的一个试验总时长宜为 7 个干湿循环周期的整数倍。

6.4.9 当试验出现下列情况之一时，可停止试验：

1. 达到预设的总试验时长；
2. 混凝土试件截面剥蚀深度达到预设的侵蚀深度。

6.5 测试内容与方法

6.5.1 混凝土结构硫酸盐侵蚀试验测试内容宜包括试件几何尺寸变化、试件质量变化、表面剥蚀厚度、混凝土内部硫酸盐含量分布。

6.5.2 试件膨胀量测定应符合现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 的有关规定，并按下式计算：

$$\Delta\epsilon = \frac{L_{Sn} - L_{S0}}{L_{S0}} \times 100 \quad (6.5.2)$$

式中： $\Delta\epsilon$ ——试件膨胀率（%），精确至 0.001%；

L_{S0} ——一组试件的初始长度测定值（mm），精确至 0.001mm；

L_{Sn} ——一次试验循环后的一组试件长度测定值（mm），精确至 0.001mm。

6.5.3 试件质量和质量损失率测定应符合现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 的有关规定，按下式计算：

$$\Delta M_s = \frac{M_{s0} - M_{sn}}{M_{s0}} \times 100 \quad (6.5.3)$$

式中： ΔM_s ——试件质量损失率（%），精确至 0.1%；

M_{s0} ——侵蚀试验前的一组试件质量测定值（g），精确至 1g；

M_{sn} ——第 n 次测试周期的一组试件质量测定值（g），精确至 1g。

6.5.4 试件剥蚀深度测定应符合《混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法标准》T/CECS 762-2020 的相关方法，并按下式计算：

$$d_s = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} d_k \quad (6.5.4)$$

式中： d_s ——单个试件第 n 个测试周期的截面平均剥蚀深度（mm），精确至 0.1mm；

d_k ——单个试件第 n 个测试周期的横截面上第 k 个点的剥蚀深度测定值（mm），精确至 0.1mm。

6.5.5 为获取混凝土构件或结构构件内部硫酸根离子含量，可通过测量与混凝土构件或结构构件同批次混凝土浇筑且同条件养护的混凝土传输性能平行试件的内部硫酸根离子含量近似获取。

6.5.6 当试件几何形状较复杂或尺寸较大等原因可能造成试验试件不同部位的表面环境形成差异时，应在试件关键表面处另外设置传感器来监测环境模拟试验室内的温度、相对湿度。

6.5.7 混凝土内部硫酸根离子含量测定时，应先去除混凝土中的粗骨料，将砂浆粉碎和研磨直至通过公称直径 0.16mm 的筛，研磨后砂浆粉末置于（105±5）℃的烘箱中烘 2h，取出后放入干燥器冷却至室温，取其中的（2~20）g（精确至 0.01g），然后按现行国家标准《水质硫酸盐的测定重量法》GB/T 11899 的有关规定测定粉末中的硫酸根离子含量。

6.5.8 硫酸盐溶液 pH 值可采用 pH 计或试纸测定，且宜每 3d 测试一次。

7 混凝土结构冻融试验

7.1 一般规定

7.1.1 冻融环境下混凝土结构性能演化加速试验应优先考虑通过冻融试验获取冻融损伤混凝土、冻融损伤混凝土构件或冻融损伤结构。

7.1.2 冻融环境的环境模拟试验方式和试验参数宜按表 7.1.2 的规定选用。

表 7.1.2 冻融环境模拟试验方式和试验参数

环境分类		环境条件	模拟试验方式	试验参数
Ba	普通冻融环境	水位变动区或受雨淋的构件	气冻水融	空气冻结温度和速度、水融解温度和速度、冻融次数
		水中浸泡环境	水冻水融	水冻结温度和速度、水融解温度和速度、冻融次数
Bb	盐冻环境	水位变动区的构件	气冻盐水融	空气冻结温度和速度、水融解温度和速度、冻融次数、盐水浓度
		盐水中浸泡环境	盐水冻盐水融	水冻结温度和速度、水融解温度和速度、冻融次数、盐水浓度

7.2 试验设备

7.2.1 冻融环境作用模拟试验设备除应符合本标准 3.2 中所有条款规定外，尚应具备箱体温度控制装置，且应符合下列规定：

1. 气冻水融环境作用模拟试验设备以空气为介质对混凝土试件进行降温冻结，以水为介质对于混凝土试件进行升温融化，主要设备应包括冻融环境箱体、空气制冷系统、水升降温系统；
2. 气冻盐水融环境作用模拟试验设备以空气为介质对混凝土试件进行降温冻结，以盐水为介质对于混凝土试件进行升温融化，主要设备应包括冻融环境箱体、空气制冷系统、盐水升降温系统；
3. 水冻水融和盐水冻盐水融环境作用模拟试验设备以防冻液为介质对混凝土试件进行降温冻结和升温融化，主要设备应包括冻融环境箱体、盐水升降温

系统和试件盒；

4. 水冻水融和盐水冻盐水融环境作用模拟试验设备的试件盒应采用具有弹性的橡胶材料制作。当不考虑试件周围水或盐水冻结后对试件压缩作用时，橡胶盒底部应有 5mm 高的突起；橡胶盒内壁距混凝土试件对应面的距离宜为 5mm；盒内加水或盐水后水面应至少高出试件 5mm。当需要考虑试件周围水或盐水冻结后对试件压缩作用时，橡胶盒内壁距混凝土试件对应面的距离，以及盒内加水或盐水后水面高出试件的高度均应按混凝土结构周围的实际水层或盐水层的厚度取值；

5. 环境箱内冻结时的最低温度应可达 $(-20\sim-18)^{\circ}\text{C}$ ；

6. 环境箱内融化时的最高温度应可控制为 $(5\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ；

7. 试验时环境箱内各点出温度差应不应大于 2°C ；

8. 温度传感器的测量精度应高于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

7.2.2 共振法混凝土动弹性模量测定仪的输出频率可调范围应为 $(100\sim 20000)$ Hz，输出功率应能使试件产生受迫振动。

7.2.3 试件尺寸测定可采用直尺或钢卷尺，测量精度应不低于 $\pm 1\text{mm}$ 。

7.2.4 试件截面剥蚀深度测定可采用游标卡尺或三维激光扫描仪，测量精度应不低于 $\pm 0.05\text{mm}$ 。

7.3 试验试件

7.3.1 混凝土材料试件、混凝土构件试件和结构试件的尺寸、几何形状和数量除应符合本标准 3.3.1 条的规定外，尚应满足 3.3 节中的其他规定。

7.3.2 宜按本标准 3.3.8 条规定制作混凝土力学性能平行试件，置于冻融环境模拟试验设备中进行同条件试验，以获得与混凝土构件试件或结构试件具有相同损伤状态的混凝土。

7.3.3 宜留取混凝土材料强度对比试件，置于标准养护条件环境中，用于获取普通测试时间点的标准养护混凝土的抗压强度、弹性模量等力学性能，与冻融环境作用下的结构试件或构件试件的混凝土材料力学性能进行对比。

7.3.4 混凝土材料试件、混凝土构件试件和结构试件在试验开展前应标准养护 28d。

7.3.5 当开展荷载作用效应对混凝土结构冻融损伤影响试验时，试件可通过静力加载、低周反复加载、疲劳加载、施加冲击荷载等方式获得初始损伤，也可通过人工预设裂缝方法或诱导裂缝方法获得初始损伤。

7.4 试验方法

7.4.1 冻结温度应根据工程结构表面所测得的实际环境温度确定，当无实测温度时，可根据结构所处位置的最冷月日平均最低温度、地表温度和距地高度按《混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法标准》（T/CECS 762-2020）7.3.2 条款确定。混凝土强度低于 60MPa 的混凝土结构，最低冻结温度宜为-18℃。

7.4.2 融化温度宜为（5±2）℃。

7.4.3 盐水应采用化学纯氯化钠配制的盐溶液，且盐溶液浓度按下列规定选用：

1. 可采用工程服役环境的实际盐溶液浓度；
2. 可采用质量浓度 3%的氯化钠溶液；
- 3 所关注的其它浓度氯化钠溶液。

7.4.4 试验前应对设备进行调试与标定，并配置好蒸馏水或者盐溶液。

7.4.5 应至少在一组平行试件中的一个试件的中心位置预埋温度传感器。

7.4.6 用于气冻水融和水冻水融法的试件应在标准养护 24 天时取出，并立即放置于（20±2）℃水中浸泡 4d，浸泡时水面应高出试件顶面（20~30）mm。

7.4.7 用于气冻盐水融和盐水冻盐水融法的试件应在标准养护 24 天时取出，并立即放置于（20±2）℃盐溶液中浸泡 4d，浸泡时盐溶液面应高出试件顶面（20~30）mm。

7.4.8 气冻水融法试验应按下列步骤进行：

1. 当按 7.4.6 条的要求将试件在水中浸泡 4d 后，应及时取出，用干净棉纱布擦除表面水分，分别编号，也可根据测量条件和需要对试件进行称重。然后按编号置于试件架内，且试件架与试件的接触面积不宜超过试件底面积的 1/5，试件与箱体内壁之间至少留有大于箱体内在该方向的净尺寸的 1/10 的距离。试件架中各试件直径的净距至少大于 30mm。

2. 测温试件之一应放置于冻融设备箱体的中心位置，其他测温试件应放置于箱体对角线边缘的位置处。

3. 装好试件后，控制冻融箱内温度开始下降，下降至冻结温度的时间应在 2h 内，最高降温速率宜低于 $20^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。冻融箱内温度降至冻结温度值保持不变，冻结时间从冻融箱内温度降至冻结温度值后开始计算。

4. 每次冻融循环中试件的冷冻时间应不小于 4h，预埋有温度传感器试件的中心温度应在（冻结温度 ± 2 ） $^{\circ}\text{C}$ 内，且在这个温度范围内至少保持 1h。

5. 冷冻结束后，应立即往试验箱内通入（ 5 ± 2 ） $^{\circ}\text{C}$ 的水，试件开始转入融化状态。使远离试件表面的水保持这个温度，过程中试件中心最高温度应在（ 5 ± 2 ） $^{\circ}\text{C}$ 内，且在这个温度范围内至少保持 0.5h。融化时间不应小于 4h，融化结束后进入下一个冻融循环。

6. 宜每 25 个冻融循环进行一次外观检查，当日测出现严重损伤时应根据测量条件和需要对试件进行称重，并详细记录损伤情况和重量损失率。

7. 当达到预期损伤后试验停止。

7.4.9 气冻盐水融法试验应与 7.4.8 的气冻水融法一致，但需将其中的热交换介质水替换为盐水。

7.4.10 水冻水融法试验应按下列步骤进行：

1. 当按 7.4.6 条的要求将试件在水中浸泡 4d 后，应及时取出，用干净棉纱布擦除表面水分，分别编号，也可根据测量条件和需要对试件进行称重。根据需要测定试件的其它初始特征参数。然后按编号置于试件架内，且试件架与试件的接触面积不宜超过试件底面积的 $1/5$ ，试件与箱体内壁之间至少留有大于箱体在该方向的净尺寸的 $1/10$ 的距离。试件架中各试件直径的净距至少大于 30mm。

2. 将试件放入试件盒。试件盒材料和尺寸和试件放置应满足 7.2.1 的要求。

3. 测温试件之一应放置于冻融设备箱体的中心位置，其他测温试件应放置于箱体对角线边缘的位置处。

4. 装好试件后，控制冻融环境箱内温度开始下降，每次冻融循环宜在控制在（2~4）h 内完成，且用于融化的试件不得少于整个冻融循环时间的 $1/4$ 。冻融和融化过程中，温度达所最高温和最低温并保持在这个温度的时间均应不少于 0.5h。在冷冻和融化过程中，试件中心的最低温度和最高温度分别控制在（ -18 ± 2 ） $^{\circ}\text{C}$ 和（ 5 ± 2 ） $^{\circ}\text{C}$ 的范围内。在任意时间时刻，试件中心温度不得高于 7°C 。

试件内外温差不宜超过 28℃。

5. 宜每 25 个冻融循环进行一次外观检查，当目测出现严重损伤时应根据测量条件和需要对试件进行称重，并详细记录损伤情况和重量损失率。

7.4.11 盐水冻盐水融法试验应与 7.4.10 的水冻水融法一致，但需将其中的热交换介质水替换为盐水。

7.4.12 试验出现以下情况之一时，可停止试验：

1. 达到预设的总冻融次数；
2. 试件质量损失率达到预设的损失率；
3. 混凝土试件截面剥蚀深度达到预设的侵蚀深度。

7.5 测试内容与方法

7.5.1 进行气冻水融和气冻盐水融试验时，应在环境箱内中心位置和对角线两端安设传感器，传感器距离试件和箱壁的距离应大于 20mm，在冻融循环过程中各点温度的极差不得超过 2℃。

7.5.2 进行水冻水融和盐水冻盐水融试验时，应在环境箱内防冻液中心和对角线两端安设传感器，在冻融循环过程中各点温度的极差不得超过 2℃。

7.5.3 气冻水融法试验、气冻盐水融法试验、水冻水融法试验和盐水冻盐水融法试验宜每 25 个冻融循环进行一次外观检查，当目测出现严重损伤时应根据测量条件和需要对试件进行称重，并详细记录损伤情况和重量损失率。重量损失率应按现行《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/50082 中“抗冻试验”一节所规定的方法进行和计算。

7.5.4 试件质量和质量损失率测定应按本标准 6.5.3 条规定进行。

7.5.5 试件剥蚀深度测定应按本标准 6.5.4 条规定进行。

8 混凝土结构电加速锈蚀试验

8.1 一般规定

8.1.1 混凝土结构环境作用效应加速试验应优先考虑通过本标准第 4 章的混凝土结构碳化与钢筋锈蚀试验和第 5 章的混凝土结构氯盐侵蚀与钢筋锈蚀试验的试验方法进行。当试验受时间或其它条件受限而无法采用前述试验方法，且重点关注锈蚀钢筋或锈蚀混凝土结构构件的受力性能时，可采用电加速锈蚀试验，以快速获取锈蚀钢筋、锈蚀钢绞线、锈蚀混凝土构件和锈蚀混凝土结构。

8.1.2 电加速锈蚀试验的试验参数应包含锈蚀电流密度和通电持续时间。

8.2 试验设备

8.2.1 电加速锈蚀试验的基本设备应包括可控制输出电压和电流大小的直流电源、辅助电极、可盛放电解液和试验试件的锈蚀池和所需的连接金属导线。其中：

1. 直流电源的输出电压和电流均可调可控，实际控制电压的允许误差应小于目标控制值的 $\pm 1\%$ ，实际控制电流控制精度的允许误差应小于目标控制值的 $\pm 1\%$ 。
2. 辅助电极宜选用不锈钢筋、不锈钢板、不锈钢丝网等惰性材料。

8.2.2 恒力张拉装置可对钢筋或钢绞线施加预应力，该装置应配置可浸泡钢筋试件或钢绞线试件的一部分或全部的锈蚀池。

8.3 试验试件

8.3.1 钢筋试件、钢绞线试件、混凝土中钢筋试件、混凝土中钢绞线试件、混凝土构件试件和混凝土结构试件，其尺寸、几何形状和数量均应符合本标准 3.3.1 条的要求，并满足 3.3 节中的其它规定。

8.3.2 混凝土中钢筋试件、混凝土中钢绞线试件、混凝土构件试件和结构试件在试验开展前应标准养护 28d。

8.3.3 当进行钢筋试件电加速锈蚀试验时，钢筋两端的电线焊接处应用绝缘胶布及环氧树脂浸渍的纱布包裹牢固，钢筋外伸端应用环氧树脂进行密封处理。

8.3.4 混凝土梁、柱构件中，箍筋与纵筋连接处应用绝缘胶布等进行绝缘处理。

8.3.5 开展带损伤混凝土结构结构的电加速锈蚀时，试件可通过静力加载、低周反复加载、疲劳加载、施加冲击荷载等方式获得初始损伤，也可通过诱导裂缝方法，在混凝土表面或内部形成所需的预设裂缝。

8.4 试验方法

8.4.1 混凝土中的钢筋均匀锈蚀，可根据试验目的需要，进行全浸泡法、半浸泡法、贴面法、内置电极法等通电加速锈蚀试验。

8.4.2 采用全浸泡法进行电加速锈蚀试验，钢筋混凝土试件应全部置于电解质溶液中，试件内待锈蚀钢筋接稳流电源正极；辅助电极应置于电解质溶液中，接入稳流电源的负极。

8.4.3 采用半浸泡法进行电加速锈蚀试验，钢筋混凝土试件应部分浸泡在电解质溶液中，电解质液面高度应控制在钢筋之下 30mm~50mm。大体积试件，宜在试件上表面浇筑围堰，并加入电解质溶液。试件内待锈蚀钢筋接稳流电源正极；辅助电极置于电解质溶液中，接入稳流电源的负极。

8.4.4 采用贴面法试验进行电加速锈蚀试验，钢筋混凝土试件表面应由吸满电解质溶液的海绵以及不锈钢丝网包裹，试件内待锈蚀钢筋接稳流电源正极，不锈钢丝网作为辅助电极连接电源负极。

8.4.5 采用内置辅助电极法进行电加速锈蚀试验，钢筋混凝土试件应将所需的辅助电极一同浇筑，辅助电极应与钢筋绝缘；也可以利用试件内其他合适位置的钢筋作为辅助电极。试件内待锈蚀钢筋接稳流电源正极，辅助电极连接电源负极。在通电过程中，试件表面应包裹吸足电解质溶液的海绵或者定期喷洒电解质溶液保持湿润。

8.4.6 多根钢筋共用一个直流电源通道时应采用并联接线方法，通电设备的电流控制值是所有并联钢筋表面面积与电流密度的乘积之和。通电后应定期检查及校正每根线路上的电流值。

8.4.7 混凝土中钢筋沿圆周非均匀锈蚀试验宜采用内置辅助电极法进行。辅助电极应选用直径不大于钢筋的不锈钢丝，宜与钢筋平行设置，并位于保护层一侧，辅助电极的直径和与钢筋的距离可根据经验确定，或采用数值模拟方法预测。

8.4.8 钢筋通电锈蚀持续时间应根据法拉第定律按下式计算，达到预计通电时间后，关闭电源。

$$t_s = \frac{Z \cdot F \cdot \Delta m}{M \cdot I} = \frac{Z \cdot F \cdot \Delta m}{M \cdot i \cdot \pi \cdot d \cdot l_b} \quad (8.4.8)$$

式中： t_s ——锈蚀持续时间（s）；

M ——铁的摩尔质量（56g/mol）；

I ——外加电流强度（A）；

Δm ——钢筋质量损失量（g）；

Z ——金属离子价数（取2）；

F ——为法拉第常数（96500 A·s/mol）

i ——锈蚀电流密度（A/m²）；

d ——待锈钢筋直径（m）；

l_b ——待锈钢筋长度（m）。

8.4.9 通电锈蚀电流密度不宜高于 100 μA/cm²。

8.4.10 电解质溶液宜为质量分数为（3.5~5）%的 NaCl 溶液，试验过程中应定期检查电解质溶液液面高度并及时进行补充。

8.4.11 混凝土构件和结构试件的电加速锈蚀试验时，当不考虑纵筋和箍筋之间的耦接效应时，试件中的纵筋和箍筋连接处应绝缘处理，并对纵筋和箍筋分别通电锈蚀，分别控制箍筋和纵筋的锈蚀速率。

8.4.12 张拉钢绞线在混凝土中的锈蚀宜将试件并联连接，置于 NaCl 溶液中，锈蚀时液面以不超过锈蚀钢筋底面为准。用电线连接直流稳压稳流电源与钢筋端部连接的电线以及用作阴极的铜片。

8.4.13 电加速锈蚀预应力钢丝宜将预应力钢丝置于 NaCl 溶液，采用自平衡装置施加拉应力，钢丝与直流电源正极连接，电源负极连接放置在锈蚀液中的铜

棒，形成闭合电路进行通电加速锈蚀。

8.5 测试内容与方法

8.5.1 钢筋平均锈蚀率 η_s 可采用本标准第 13 章中的称重法或排水法进行，也可按三维激光扫描法进行。

8.5.2 钢筋沿长度方向的锈蚀不均匀性系数 R 应按本标准第 13 章中的三维激光扫描法进行。

9 混凝土结构自然暴露试验

9.1 一般规定

9.1.1 当试验试件和其它条件均允许时，混凝土结构环境作用效应试验均应优先采用自然暴露方法，以真实展现环境作用下结构的性能演化过程，获取演化过程中的关键参数，标定试验室试验的结果。

9.1.2 自然暴露试验应根据试验目的按表 3.1.2 的规定确定混凝土结构的环境作用类别和环境作用。

9.2 试验场地

9.2.1 选定自然暴露试验场地前，应搜集场试验地处的气候环境条件、水文条件等已有环境作用的资料；有需要时还应进行主要环境作用的现场调查和测量。

9.2.2 暴露场地应优先选择混凝土结构的实际使用场地，也可选择与实际混凝土结构服役场地属于同环境类别，同时环境条件接近的自然暴露场地。

9.2.3 硫酸盐盐渍土暴露试验场地宜设在我国东南滨海盐渍土地区或我国西部盐渍土地区。

9.2.4 海洋氯化物环境暴露试验场地宜设在我国大陆沿海地区的海边或海岛上。海洋氯化物环境暴露试验场地应具备设置大气区、浪溅区、潮汐区和水下区的地势条件。

9.2.5 普通冻融暴露试验场地宜设在我国东北、华北和西北地区的河岸、水库或海边。除冰盐、除冰液等盐冻环境宜设在我国东北、华北和西北地区的高速公路的边缘。

9.3 试验设备

9.3.1 加载装置和支撑装置应满足《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152 的有关规定外，还应能抵抗对应环境作用的不利影响，不被环境作用侵蚀，或者被侵蚀后仍满足《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152 的有关要求。

9.3.2 量测设备应能直接抵抗环境作用的侵蚀，或通过采取措施后能抵抗环境作用的侵蚀而正常工作。此外，还应优先选择满足以下功能要求的量测设备：

1. 设备低功耗，可利用现场的绿色能源供电而不间断运行，或通过定期更换蓄电池实现不间断运行；
2. 设备免维护或维护工作量小；
3. 能进行长期不间断监测和数据记录。

9.3.3 大气温度测量系统的测量精度应不低于 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度测量系统的测量精度应不低于 $\pm 5\%$ 。

9.3.4 二氧化碳测试系统应能测量大气中二氧化碳浓度，测量精度应不低于现场最大二氧化碳浓度值的 $\pm 6\%$ 。

9.3.5 辐照度测试系统应能测量环境的太阳辐照度，测量精度应不低于试验最大辐照度的 $\pm 5\%$ 。

9.3.6 钢筋锈蚀电流密度测量系统应能通过线性极化法或极化曲线推定法测定混凝土中钢筋的锈蚀电流密度，电位测量精度应不低于 $\pm 0.5\%$ ，可感知的最小电流可达 10nA 。

9.3.7 称量钢筋用的天平应具有合适的量程，称量精度应不低于 $\pm 0.01\text{g}$ 。

9.3.8 钢筋表面形态三维扫描系统的扫描精度应不低于 0.03mm 。

9.3.9 温湿度传感器采集系统的温度测量精度应不低于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度测量精度应不低于 $\pm 3\%$ 。

9.4 试验试件

9.4.1 混凝土材料试件、混凝土中钢筋试件、混凝土中钢绞线试件、混凝土构件试件和混凝土结构试件，其尺寸、几何形状和数量应符合本标准 3.3.1 条的要求，并满足 3.3 节中的其它规定。

9.4.2 当自然暴露试验的目的是为了标定室内环境作用效应试验的结果时，自然暴露试验所采用的试验试件应尽可能与试验室试验试件完全相同。

9.4.3 宜按本标准 3.3.8 条的第（1~4）款制作混凝土传输性能平行试件、混凝土力学性能平行试件、混凝土中钢筋试件平行试件和混凝土中钢绞线平行试件，置于与混凝土结构试件或构件试件相同的自然暴露环境下，以获得与混凝土

土构件试件或结构试件具有相同被侵蚀状态的混凝土、钢筋或钢绞线。

9.4.4 混凝土结构试件应放置于坚固且平整的地面或人工制作的平台，应采取措施使试件能稳定地保持在安装位置处。应做好所有试件的保护，避免试件被大风、大雨、水流、水浪、潮汐、山洪、野外动物等影响而移动位置或损坏，避免受不属于预计环境作用的有害空气、酸雨、灰尘、动物排泄物、海洋生物等的意外影响。

9.4.5 试件应做好永久标记，或采用摆放位置区分等有效方法区别试件。

9.5 试验方法

9.5.1 设计试验结构试件前，应先根据确定试验场地上各环境分区的高程范围。

各典型环境类别的环境分区宜根据所处高程不同按以下规定划分：

1. 冻融环境分为水下区、水位变动区和大气区；
2. 海洋氯盐环境分为淹没区、潮汐区、浪溅区和大气区；
3. 硫酸盐环境和盐渍土环境分为土中地下水浸泡区、土中地下水位变动区、土中无地下水去、大气区。

9.5.2 试验结构试件应根据试验目的和试验场地条件确定结构试件的层数、层高、开间、进深、朝向、受力等结构和建筑参数。

9.5.3 一般环境自然暴露试验的结构试件设计，宜分别考虑室内环境和室外环境与原型结构的一致性，并宜考虑日晒方向、日晒时间、风向和淋雨等对试验试件周围二氧化碳浓度和试件干湿循环的影响。

9.5.4 冻融环境自然暴露试验的结构试件设计，应确定试验试件模拟的环境分区为水下区、水面区和大气区三者中的一种或多种。大气区应考虑日晒方向、日晒时间、风向、风速和淋雨情况等对试验试件饱水情况影响。

9.5.5 海洋氯盐环境暴露试验的结构试件设计，应确定试验试件模拟的环境分区为淹没区、潮汐区、浪溅区和大气区三者中的一种或多种。潮汐区应考虑试验现场以年为周期的潮汐变化规律的影响；浪溅区应考虑局部地形和试件结构对浪溅的影响；大气区应考虑日晒方向、日晒时间、风向、风速和淋雨情况等对试验试件干湿循环情况的影响。

9.5.6 硫酸盐暴露试验和盐渍土暴露试验的结构试件设计，应确定试验试件模拟

的环境分区为土中地下水浸泡区、土中地下水位变动区、土中无地下水区、大气区中的一种或多种。应明确试验现场地下水位的变化规律，以进行浸泡区、土中地下水位变动区试验试件的设计。

9.5.7 海洋氯盐环境暴露试验时，可将试验试件安装于浮动平台上，以模拟试验试件在潮位不变的自然暴露情况。浮动平台应具有足够的抗倾倒和抗移位性能，具有抵抗海水腐蚀的能力。

9.5.8 进行暴露试验时，混凝土材料试件、混凝土中钢筋试件和混凝土中钢绞线试件可放置于对应的混凝土结构试件上，或结构试件附近处，使结构试件和其它试件具有相同的环境作用，且不影响结构试件的受力情况。

9.5.9 自然暴露试验时，对试验试件施加静力荷载宜优先采用重力加载方法和自平衡加载方法，包括悬挂重物集中力加载、重物均布加载、散体均布加载、水压均布加载、弹簧拉压加载、试件互为支座的对顶加载、杠杆集中力加载等。

9.6 测试内容与方法

9.6.1 自然暴露试验试验展开时，宜在现场布置监测设备对本标准 3.1.2 条中对应环境类别的主要环境作用进行长期监测，或在阶段测试时间点和普通测试时间点对主要环境作用进行定期检测或测量。

9.6.2 应尽可能设法实现对试验现场的远程监控。除必要的现场测试外，还应定期到现场进行现状观察和维护。

9.6.3 一般环境自然暴露试验对环境作用和试件响应的测试内容与方法还应符合本标准 4.5 节中所有条款规定。

9.6.4 海洋氯盐侵蚀环境自然暴露试验对环境作用和试件响应的测试内容与方法还应符合本标准 5.5 节的所有条款规定。

9.6.5 硫酸盐盐渍土侵蚀环境自然暴露试验对环境作用和试件响应的测试内容与方法还应符合本标准 6.5 节的所有条款规定。

9.6.6 冻融环境自然暴露试验对环境作用和试件响应的测试内容与方法还应符合本标准 7.5 节的所有条款规定。

10 侵蚀混凝土力学性能试验

10.1 一般规定

10.1.1 一般环境、硫酸盐环境、氯盐环境和冻融环境下被侵蚀混凝土材料的力学性能宜优先按本章的方法确定。

10.2 试验设备

10.2.1 试验加载所使用的试验机应定期检验校准，并处于检验校准有效期内。

10.2.2 实验室加载用试验设备的精度、误差应符合下列规定：

1. 万能试验机、拉力试验机、压力试验机的精度不应低于 1 级；
2. 电液伺服结构试验系统的荷载量测允许误差为量程的 $\pm 1.5\%$ 。

10.2.3 用于微变形测量的仪器应符合下列规定：

1. 微变形测量仪器可采用电阻应变片、激光测长仪、千分表、引伸仪或位移传感器等。采用千分表或位移传感器时应备有微变形测量固定架，试件的变形通过微变形测量固定架传递到千分表或位移传感器。采用电阻应变片或位移传感器测量试件变形时，应备有数据自动采集系统，条件许可时，可采用荷载和位移数据同步采集系统；

2. 当采用千分表或其他位移传感器时，其测量精度应为 $\pm 0.001\text{mm}$ ；当采用电阻应变片、激光测长仪或引伸仪时，其测量精度应为 $\pm 0.001\%$ ；

3. 标距应为 150 mm。

10.3 试验试件

10.3.1 用于获取侵蚀混凝土力学性能的试件，其几何形状、尺寸、数量应符合本标准第 3.4 节的规定，且环境作用实验应符合本标准第 4 章~第 9 章的规定。

10.3.2 当进行环境作用效应试验以获得侵蚀混凝土力学性能试件时，应采取对侧侵蚀方式。

10.3.3 应同时设置混凝土材料力学性能对比试件，并置于标准养护条件环境中。

10.4 试验方法

10.4.1 侵蚀试件力学性能的测试周期宜与环境作用效应试验测试周期保持一致。

10.4.2 当试件达到测试周期时，从环境箱取出后，应检查其几何形状及尺寸，尺寸公差应满足本标准第 3.4 节的规定，当试件有严重剥落、掉角等缺陷时，应先用高强石膏补平后再进行力学性能试验。试件取出后应尽快进行试验。

10.4.3 当为获取侵蚀混凝土应力-应变关系时，应记录试件轴压或轴拉试验的全过程曲线。

10.5 测试内容与方法

10.5.1 对于被侵蚀后全截面混凝土损伤程度基本均匀的情况，可直接根据不同侵蚀时间下混凝土棱柱体试件轴压或轴拉试验的荷载变形关系曲线，获取不同损伤程度混凝土受压或受拉应力-应变本构关系。

10.5.2 对于被侵蚀后可将混凝土沿横截面分为侵蚀混凝土和未侵蚀混凝土两部分，未被侵蚀的部分性能一致，而被侵蚀的部分损伤程度基本均匀的情况，可假定侵蚀部分混凝土力学性能相同，通过部分侵蚀混凝土棱柱体试件和同龄期未侵蚀混凝土棱柱体试件轴压或轴拉试验荷载变形关系曲线的对比分析，通过反演建立侵蚀混凝土的应力-应变本构关系。

10.5.3 对于被侵蚀后可将混凝土沿横截面分为侵蚀混凝土和未侵蚀混凝土两部分，未被侵蚀的部分损伤程度基本均匀，而被侵蚀的部分存在表层脱落的情况，譬如冻融损伤混凝土，可沿横截面分为剥落层、侵蚀损伤混凝土和未损伤混凝土三部分，可假定侵蚀损伤部分混凝土力学性能相同，通过侵蚀损伤混凝土棱柱体试件和同龄期未损伤混凝土试件轴压或轴拉试验荷载变形关系曲线的对比分析，通过反演建立不同损伤程度混凝土的应力-应变本构关系。

10.5.4 对于被侵蚀后可将混凝土沿横截面分为侵蚀混凝土和未侵蚀混凝土两部分，被侵蚀部分损伤程度存在梯度，而未被侵蚀的部分损伤程度基本均匀的情况，可假设侵蚀部分混凝土损伤程度近似按线性或抛物线分布，通过部分侵蚀混凝土棱柱体试件和同龄期未侵蚀混凝土棱柱体试件轴压或轴拉试验荷载变形

关系曲线的对比分析，通过反演建立不同损伤程度混凝土的应力-应变本构关系。

10.5.5 对于被侵蚀后可将混凝土沿横截面分为侵蚀混凝土和未侵蚀混凝土两部分，被侵蚀部分损伤程度存在梯度，而未被侵蚀的部分损伤程度基本均匀的情况，也可以根据侵蚀混凝土内实测侵蚀产物含量分布或损伤程度分布，通过部分侵蚀混凝土棱柱体试件和同龄期未侵蚀混凝土棱柱体试件轴压或轴拉试验荷载变形关系曲线的对比分析，通过反演建立不同损伤程度混凝土的应力-应变本构关系。附录 D 给出采用该方法建立硫酸盐侵蚀混凝土本构关系的过程。

10.5.6 对于被侵蚀后表层混凝土脱落，而未脱落的被侵蚀混凝土损伤程度存在梯度的情况，在部分侵蚀混凝土棱柱体试件和同龄期未侵蚀混凝土棱柱体试件轴压或轴拉试验荷载变形关系曲线的对比分析时，应考虑表层脱落的影响。

11 锈蚀钢筋与混凝土间粘结性能试验

11.1 一般规定

11.1.1 本方法适用于锈蚀光圆钢筋和变形钢筋与混凝土间粘结性能的测试。

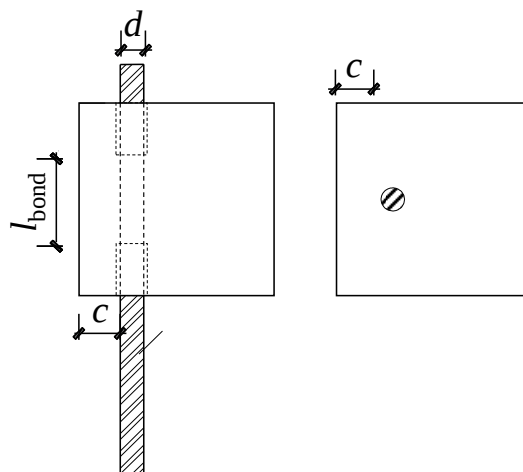
11.2 试验试件

11.2.1 试件形式应根据试验目的和试验条件按表 11.2.1 选用。

表 11.2.1 粘结性能试件类型

试件形式		特点	适用范围
拉拔 试件	中心拉拔	受力简单明确；试件小。	基本的粘结作用机理试验
	偏心拉拔		
梁式试件		能反应实际构件复杂受力状态的影响；试件大。	混凝土构件不同受力、不同配筋等对钢筋与混凝土间粘结性能的影响
半梁式试件		能反应实际构件受力状态；试件较梁式试件小。	

11.2.2 锈蚀钢筋与混凝土间的粘结-滑移关系试验应优先采用图 11.2.2 所示的偏心拉拔试件。



d — 钢筋直径； c — 保护层厚度； l_{bond} — 有效粘结长度

图 11.2.2 偏心拉拔试件参数示意图

11.2.3 试件设计应考虑钢筋锈蚀率、钢筋直径、钢筋位置、钢筋表面几何形状、混凝土强度、保护层厚度、粘结长度、横向钢筋等影响因素，采用正交试验设计方法或均匀试验设计方法进行系列试验。采用拉拔试件时，同组试件数量不应少于 3 个。采用梁式试件和半梁式试件时，同组试件数量不应少于 2 个。

11.2.4 锈蚀钢筋与混凝土间粘结性能试件的参数设计应满足以下要求：

1 拉拔试件尺寸应根据钢筋直径及混凝土保护层厚度要求确定，最小边长不宜小于 150 mm

2 钢筋的直径和横肋形状应具有代表性，当需要进行高锈蚀率试验时钢筋直径不宜过小；

3 保护层厚度不宜超过 2.5 倍钢筋直径；

4 当试验目的为获取锈蚀钢筋与混凝土的粘结-滑移关系时，试验试件的粘结长度与钢筋直径之比应满足以下要求：

$$l_{bond} / d \leq 5 \quad (11.2.4)$$

式中： d ——钢筋直径（mm）；

l_{bond} ——试件的有效粘结长度（mm）。

5 拉拔试件设计时，在试件加载端和自由端均应设置一段非粘结段，加载端非粘结段长度宜与有效粘结长度相当，自由端非粘结长度应根据试件高度确定；

6 设计梁式试件时，宜配置箍筋并进行抗弯和抗剪承载力验算，以确保构件发生粘结破坏。

11.2.5 试件制作应满足以下规定：

1. 试件浇筑前，应在钢筋除锈后对非粘结段表面涂抹环氧树脂进行防锈处理；
2. 当设置非锈蚀箍筋时，应对箍筋表面涂抹环氧树脂进行防锈处理，并对纵筋与箍筋接触位置进行绝缘处理
3. 试件应在钢模或牢固的试模中成型，模板上应预留钢筋定位孔；
4. 试件中的无粘结部分的钢筋应套上硬质的光滑塑料套管，套管末端与钢筋之间空隙应封闭，不得漏浆、漏水；
5. 钢筋应水平设置在模具内，拉拔试件中受拉钢筋应垂直于试件承压面，钢

筋纵肋宜朝向最薄保护层方向；

6. 试件的浇注面应与钢筋纵轴平行，宜采用振动台振捣；

7. 试件浇筑时应按 3.4.2 的相关规定制作混凝土材料性能试件，试件浇筑完成后应在标准条件下养护 28 天后开展钢筋锈蚀试验。

11.2.6 锈蚀钢筋混凝土粘结性能试验试件可根据试验目的采取合适的加速环境作用效应试验来获取，一般环境下锈蚀钢筋混凝土试件的获取应满足本标准第 4.4 节中的相关规定，氯盐环境下锈蚀钢筋混凝土试件的获取应满足本标准第 5.4 节中的相关规定，电加速锈蚀方法获取锈蚀钢筋混凝土试件应满足本标准第 8.2 节中的相关规定。

11.2.7 采用通电加速锈蚀方法获取锈蚀钢筋混凝土试件时，宜采用半浸泡法或贴面法，避免锈蚀产物大量逸出，且锈蚀电流密度不宜不高于 $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

11.2.8 对于混凝土表面已产生锈胀裂缝的试件，应在试验开始前按本标准 12.4.4 条规定测量并记录混凝土保护层锈胀裂缝的分布及其宽度。

11.3 试验设备

11.3.1 试验用加载设备的精度、误差应满足《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152 中第 5.2 节的相关规定。

11.3.2 拉拔试验的加载宜采用如图 11.3.2 所示的装置，加载装置应满足以下要求：

1. 加载装置承压垫板的边长不应小于拔出试件的边长，其厚度不应小于 15mm，垫板中心孔径应为 2 倍钢筋直径；
2. 宜在试件承压面垫特氟龙薄板，以减小承压面摩擦作用对粘结性能的影响；
3. 加载过程中应保持钢筋轴线与试件承压面相互垂直。

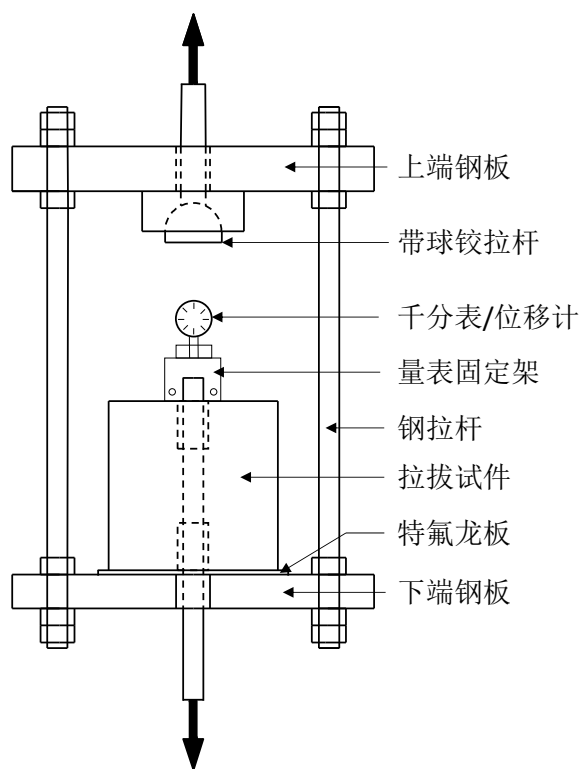


图 11.3.2 拉拔试验加载装置示意图

11.3.3 梁式试验应根据试件设计和试验目的选用跨中单点加载或三分点加载方式，支撑及加载装置应满足《混凝土结构试验方法标准》GB/T50152-2012 中第 5.1 节中的相关规定。

11.4 试验方法

11.4.1 静力下锈蚀钢筋与混凝土间粘结性能试验的加载应满足以下要求：

1. 静力下锚固性能试验宜采用力控制加载方法，其中拉拔试验的加载速率可按《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152-2012 中给出的方法计算：

$$V_F = 0.03d^2 \quad (11.4.1)$$

式中： V_F ——荷载加载速度（kN/min）。

2. 粘结-滑移关系试验应采用位移控制或者力和位移混合控制加载，按位移控制加载速率不宜超过 0.5 mm/min；

3. 混凝土保护层部分锈胀开裂或完全锈胀开裂的拉拔试验，应降低加载速率。

11.4.2 静力下粘结性能试验应在达到下列任何一种情况时停止加载：

1. 受拉钢筋被拔出或混凝土保护层严重劈裂，锚固失效；
2. 受拉钢筋屈服；
3. 粘结应力-滑移曲线下降段基本保持水平。

11.4.3 疲劳荷载下锈蚀钢筋与混凝土间粘结性能试验加载应满足以下要求：

1. 粘结性能疲劳试验前应先开展相同试件的静力荷载试验，将静力下粘结强度作为疲劳荷载幅值设计依据，且静力下粘结强度宜取不少于三个相同试件静力粘结强度的平均值；
2. 疲劳荷载下粘结强度试验宜应按力控制加载，等幅疲劳荷载宜采用正弦形式；
3. 疲劳荷载频率应根据试验目的、荷载幅值和试验设备条件确定，但荷载频率不宜大于 10 Hz；
4. 对钢筋锈蚀率较高或混凝土保护层锈胀开的试验进行疲劳加载时，疲劳荷载幅值不宜过大，且应降低疲劳荷载频率；
5. 疲劳荷载下粘结性能试验应在达到下列任何一种情况时停止加载：
6. 受拉钢筋被拔出或混凝土劈裂导致疲劳荷载无法施加到设计值；
7. 疲劳荷载循环次数到达设计值。

11.5 测试内容与方法

11.5.1 静力作用下锈蚀钢筋与混凝土间粘结性能试验的量测内容应包括钢筋拉拔力的大小和自由端相对滑移。钢筋自由端相对位移测量时，宜将位移计的支座采用 502 胶水牢固粘贴拉拔试件钢筋自由端对应的面上，宜位于钢筋形心和拉拔试件形心的连线且靠近一侧；位移计与最近的钢筋表面宜保持不小于 5mm 的间距；机械位移计的顶针或激光位移计的激光点宜位于钢筋截面形心处；位移计测量轴线应与钢筋轴线平行。

11.5.2 静力作用下锈蚀钢筋与混凝土间粘结性能试验还宜量测加载端相对滑移、混凝土表面裂缝宽度、表面混凝土应变等。在粘结试验前应先测量和记录混凝土表面的裂缝开展情况，特别是钢筋锈胀开裂引起裂缝的位置、形态、宽度和长度。混凝土表面裂缝宽度荷载、位移和裂缝宽度的测量方法还应符合国家现

行标准《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152 中相关内容的规定。

11.5.3 疲劳荷载作用下的粘结性能试验应记录荷载循环周期，并量测各周期内荷载极值对应的相对滑移。

11.5.4 加载端相对滑移值的应扣除加载端钢筋位移测量点至有效粘结混凝土点之间的钢筋拉伸变形量，该变形量可通过在该区间的钢筋上粘贴应变片测得钢筋应变，变形量为钢筋应变与该区间长度的乘积。

11.5.5 粘结-滑移试验中的钢筋与混凝土相对滑移量可取为自由端相对滑移；若同时测量自由端与加载端的相对滑移时，钢筋混凝土相对滑移量也可取为自由端与加载端滑移量的平均值。

11.5.6 测量混凝土表面裂缝宽度发展时，引伸计应布置在锈胀裂缝处，若试件表面无明显锈胀裂缝，引伸计宜布置在粘结段中间高度的保护层最薄位置处。

11.5.7 锈蚀钢筋混凝土粘结性能试验结束后，应将锈蚀钢筋取出按本标准 13.2.2 条文中的方法处理，并按 13.3 中的规定进行钢筋锈蚀率和表面形貌量测。

11.5.8 各荷载值下对应的锈蚀钢筋与混凝土间名义粘结应力应按下式计算：

$$\tau = \frac{F_t}{\pi d l_{\text{bond}}} \quad (11.5.8)$$

式中： τ ——试件的平均粘结应力（MPa）；

F_t ——钢筋的加载端拉拔力（N）；

d ——钢筋直径（mm）；

l_{bond} ——试件的有效粘结长度（mm）。

11.5.9 锈蚀钢筋与混凝土间的粘结强度 τ_u 应取为平均粘结应力的最大值。

11.5.10 锈蚀钢筋与混凝土间粘结应力-滑移曲线的特征值应按下列规定确定：

1. 锈蚀钢筋与混凝土间的化学胶着力可取为钢筋自由端开始滑移时的荷载值；
2. 峰值滑移应取为粘结应力达到峰值时对应的相对滑移值；
3. 锈蚀钢筋与混凝土的残余粘结应力可取为粘结应力-滑移曲线水平段的应力值或相对滑移达到钢筋横肋间距时的粘结应力值。

11.5.11 疲劳荷载作用下的粘结性能试验宜进行钢筋与混凝土间相对滑移随荷载循环次数的增长的相关关系分析。

12 混凝土保护层锈胀开裂试验

12.1 一般规定

12.1.1 本方法适用于混凝土构件中钢筋锈蚀产物体积膨胀引起的混凝土保护层裂缝产生与发展乃至脱落过程的试验研究。

12.1.2 混凝土中钢筋锈胀开裂的过程可根据钢筋起锈时刻、混凝土内裂、混凝土表面开裂三个重要时间节点划分为未锈蚀、锈蚀产物填充界面孔隙、混凝土锈胀裂缝由内向外发展、混凝土表面裂缝宽度扩展四个阶段。

12.2 试验试件

12.2.1 混凝土材料、构件和结构试件的尺寸、几何形状和数量应符合本标准 3.3.1 条的规定。

12.2.2 混凝土保护层锈胀开裂试件可根据试验目的选择圆柱体或长方体，混凝土保护层厚度宜取 1~2.5 倍钢筋直径。

12.2.3 试件浇筑前需对钢筋进行除锈处理，并称量每根钢筋的初重或扫描钢筋三维形貌，对非锈蚀段涂抹环氧树脂进行防锈处理。

12.2.4 试件宜在钢模中成型或确保足够的刚度，模板上应预留钢筋位置孔，使保护层实际厚度与设计值相符。试件的浇注面应与钢筋平行，宜采用振动台振捣。

12.2.5 混凝土保护层锈胀开裂试件在试验前应标准养护 28d。

12.2.6 一般环境或氯离子环境下中部钢筋锈胀开裂试验和角部钢筋锈胀开裂试验分别对应为一维侵蚀试验和二维侵蚀试验，试件表面密封应满足本标准 12.3.4 条的相关规定。

12.3 试验方法

12.3.1 一般环境作用下混凝土保护层锈胀开裂试验应满足本标准第 4.4 节中的相关规定。

12.3.2 氯盐环境作用下开展混凝土保护层锈胀开裂试验时应满足第 5.4 节中的相关规定。

12.3.3 采用电加速锈蚀试验方法开展混凝土保护层锈胀开裂试验应满足第 8.2 节中的相关规定。

12.3.4 一般环境作用或氯盐环境作用下的混凝土保护层锈胀开裂试验，还应符合下列规定：

- 1 试验过程中应将最薄保护层所在的试件表面朝上放置；
- 2 模拟中部钢筋锈蚀引起混凝土保护层锈胀开裂时，应将垂直于最薄保护层所在表面的两个侧面采用环氧树脂密封；
- 3 模拟角部钢筋锈蚀引起混凝土保护层锈胀开裂时，可将与该角部钢筋相邻两暴露侧面之外的试件其它侧面采用环氧树脂密封。

12.3.5 采用电加速锈蚀方法进行混凝土保护层锈胀开裂试件中钢筋加速锈蚀时，宜采用本标准 8.4.3 条所规定半浸泡法或本标准 8.4.4 条所规定的贴面法进行；需要模拟钢筋沿圆周不均匀锈蚀时，宜按本标准 8.4.7 条所规定的内置辅助电极加速锈蚀方法进行钢筋锈蚀。

12.4 测试内容与方法

12.4.1 混凝土保护层锈胀开裂试验的测试内容应包括混凝土保护层外裂时刻和混凝土表面裂缝宽度的监测；测试设备和条件允许情况下，宜包括钢筋起锈时刻、混凝土保护层内裂时刻、混凝土保护层内裂缝发展、锈蚀产物组分及体积膨胀率测定等。

12.4.2 混凝土钢筋起锈时刻、混凝土保护层内裂及内部裂缝发展、混凝土表面开裂时刻、混凝土表面裂缝扩展和锈蚀产物组分及体积膨胀率的量测方法可根据试验目的和试验条件按下表选用：

表 12.4.2 混凝土保护层锈胀开裂试验量测内容及量测方法

量测内容	量测方法
混凝土中钢筋锈蚀	电化学分析法、EDS 能谱分析方法等
保护层内裂时刻及裂缝发展	CT 扫描或声发射等传感器等内部损伤检测方法
保护层外裂时刻	开裂直接观察法、仪表动态判定法、应变量测判断法、数

	字图像技术
混凝土表面裂缝宽度量测	刻度放大镜、电子裂缝观测仪、振弦式测缝针等仪器
混凝土表面应变场	应变片或 DIC 技术
锈蚀产物组分及体积膨胀率	扫描电子显微镜和 X 射线衍射分析等

12.4.3 电化学分析法测量混凝土中钢筋锈蚀时应优先选用极化电阻为测量指标。

12.4.4 混凝土表面裂缝的观测和宽度测量应按现行国家标准《混凝土结构试验方法标准》GB/T50152-1992 第 6.5 节中的有关规定进行，且各类测量仪表精度应满足相关要求。

12.4.5 混凝土保护层的外裂时刻应按混凝土表面开始出现肉眼可见裂纹的时刻确定。

12.4.6 混凝土保护层锈胀开裂试验结束后，锈蚀钢筋的获取和处理，钢筋锈蚀率和表面形貌的测量应满足本标准第 13 章中的相关内容。

13 锈蚀钢筋几何形貌测试与力学性能试验

13.1 一般规定

13.1.1 锈蚀钢筋几何形貌宜通过三维激光扫描建立几何模型，在此基础上获取锈坑形态、横截面形态、最小截面积以及横截面积沿纵向不均匀分布。

13.1.2 锈蚀钢筋的平均锈蚀率可采用称重法或排水法测定，也可采用三维激光扫描法获得；最大截面锈蚀率可利用三维激光扫描获得最小截面积进行计算。

13.2 试验设备

13.2.1 称量钢筋质量的天平应具有合适的量程，称量精度应不低于 $\pm 0.01\text{g}$ 。

13.2.2 利用排水法量测锈后钢筋体积的量筒或其他容器，精度应不低于 0.001cm^3 。

13.2.3 钢筋表面形态三维扫描系统的扫描精度应不低于 0.03mm 。

13.2.4 万能试验机应能控制荷载变化速度和夹持钢筋试件两端的夹头的分离速度，应配备标距为 50mm 或 100mm 的引伸计；试件破坏荷载应大于试验机全量程的 20% 且小于全量程的 80% ；荷载测量精度应不低于 $\pm 1\%$ ，引伸计测量精度应不低于 $\pm 0.005\text{mm}$ 。

13.3 试验试件

13.3.1 锈蚀钢筋试件的获取可采用以下方法或途径获得：

- 1 按照本标准第 4 章、第 5 章、第 8 章或第 9 章中的方法获得锈蚀钢筋混凝土结构或构件，然后破型获取其中的锈蚀钢筋；
- 2 从既有混凝土结构或构件中破型获取；
- 3 特定情况下的锈蚀裸钢筋。

13.3.2 锈蚀混凝土结构或构件破型后，应按《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》（GB/T 50082-20091）对钢筋进行酸洗除锈和称重：

- 1 取出试件中的钢筋，并刮去钢筋上粘附的混凝土；
- 2 依次用 12%盐酸溶液酸洗，清水漂净，石灰水中和，清水冲洗干净，干净棉布擦干，然后在干燥器中存放 4h 以上；
- 3 称量酸洗处理后的锈蚀钢筋质量 m ；
- 4 取两根尺寸与锈蚀钢筋相同的同类无锈钢筋作为基准校正用钢筋，分别称重获得初始质量 m_{01} 和 m_{02} ；
- 5 采用步骤 2 中的同样方法对两根基准校正用钢筋进行酸洗，称量获得酸洗处理后的质量 m_1 和 m_2 。

13.3.3 当需要测量锈蚀钢筋的力学性能时，锈蚀钢筋试件的长度宜截取为 300~400mm 长。

13.4 试验方法

13.4.1 采用三维激光扫描技术测量锈蚀钢筋或钢丝三维形貌，应按以下规定进行：

1. 使用三维激光扫描仪对锈蚀钢筋表面进行激光扫描，由 CMOS 摄像机采集被测锈蚀钢丝表面的光刀曲线，获得锈蚀钢筋表面的点云数据；
2. 对点云数据进行优化处理，去除锈蚀钢筋模型以外的点云数据，并进行滤波、除噪等处理，提高数据的信噪比，获取优化后的锈蚀钢筋点云数据；
- 3 利用钢筋表面的点云数据，拟合出钢筋轴线，进行点云数据的网格化处理及快速曲面构建，通过曲线缝合把封闭的锈蚀钢筋曲面转换成锈蚀钢筋三维几何模型；

13.4.2 采用三维激光扫描技术测量锈蚀预应力钢绞线三维形貌，应按以下规定进行：

- 1 将锈蚀钢绞线披散，对钢绞线中的每根钢丝按照 13.3.2 的规定进行酸洗除锈；
- 2 按照 13.4.1 的规定获取每根钢丝表面的点云数据；
- 3 对于螺旋型钢绞线边丝，拟合出螺旋轴，对于直线型钢绞线中丝，拟合出轴线，再分别按照 13.4.1 的规定构建锈蚀钢绞线边丝和中丝的三维几何模型。
- 4 在三维几何模型中，将边丝的螺旋轴线与中丝轴线对齐，并调整边丝角

度使得模型与实际锈蚀钢绞线一致，重构锈蚀钢绞线三维几何模型。

13.4.3 锈蚀钢筋、钢丝或钢绞线力学性能测试，应根据《GB/T228.1-2010 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》的方法进行，并满足以下要求：

- 1 锈蚀钢筋、钢丝或钢绞线试件需保证两端有不少于 50mm 的夹持段；
- 2 在夹持端上包覆适合厚度的铝板，使拉伸试验机的夹具与被夹持的钢筋之间无缝隙，避免钢筋拉断时断口发生在夹持端上或紧靠夹持端的平行段上；
- 3 通过夹头上对钢筋两端施加不超过锈蚀钢筋预期屈服荷载的 5%的预拉力，确保锈蚀钢筋试样与夹头对中；
- 4 通过控制两个试验机夹头的分离速度来控制钢筋拉伸速率；
- 5 引伸计夹在钢筋平行段中锈蚀最严重的部位，引伸计标距可选择 50mm 或者 100mm；
- 6 试件拉断后，用游标卡尺（精确至 0.02mm）量取标距范围内钢筋的伸长量，计算延伸率。

13.4.4 锈蚀钢筋、钢丝或钢绞线疲劳寿命测试，应根据以下规定进行：

- 1 根据测试需求选择合适的名义疲劳应力，使用名义疲劳应力与锈蚀钢筋、钢丝或钢绞线平均横截面积的乘积作为试验中的疲劳荷载；
- 2 对于高强钢筋，疲劳加载频率不宜超过 120Hz；
- 3 按照 13.4.3 的规定将试件夹紧、预拉、对中，并进行疲劳加载。

13.5 量测内容与方法

13.5.1 采用称重法测量锈蚀钢筋平均锈蚀率时，单根钢筋的平均锈蚀率应按式（13.5.1）计算，从同一根钢筋上截取的锈蚀钢筋试件的平均锈蚀率取这组钢筋的单根钢筋平均锈蚀率的平均值。

$$\eta_s = \frac{m_0 - m - \frac{(m_{01} - m_1) + (m_{02} - m_2)}{2}}{m_0} \quad (13.5.1)$$

式中： η_s ——钢筋的平均锈蚀率，精确至 0.01；

m_0 ——钢筋锈蚀前质量（g）；

m ——锈蚀钢筋经过酸洗处理后的质量（g）；

m_{01} 、 m_{02} ——分别为基准校正用的两根钢筋的初始质量（g）；

m_1 、 m_2 ——分别为基准校正用的两根钢筋酸洗后的质量（g）。

13.5.2 采用排水法测量锈蚀钢筋平均锈蚀率时，应选择具有溢水口的容器，容器应保证锈蚀试件可全部浸入，在容器上加满水，分别将未锈蚀试件和锈蚀试件放入容器中，记录溢出水的质量，则锈蚀试件的平均锈蚀率可按式（13.5.2）计算：

$$\eta_s = \frac{m_{w0} - m_w - \frac{(m_{w01} - m_{w1}) + (m_{w02} - m_{w2})}{2}}{m_{w0}} \quad (13.5.2)$$

式中： m_{w0} ——钢筋锈蚀前排水质量（g）；

m_w ——锈蚀钢筋经过酸洗处理后的排水质量（g）；

m_{w01} 、 m_{w02} ——分别为基准校正用的两根钢筋的初始排水质量（g）；

m_{w1} 、 m_{w2} ——分别为基准校正用的两根钢筋酸洗后的排水质量（g）。

13.5.3 采用三维激光扫描技术计算锈蚀钢筋最大截面锈蚀率时，应在按 13.4.1 和 13.4.2 条规定确定的锈蚀钢筋的三维几何模型中沿轴线方向每间隔 1mm 提取锈蚀钢筋横截面积，从中获取最小横截面积，最大截面锈蚀率可按下式计算：

$$\eta_{s,\max} = \frac{A_0 - A_{\min}}{A_0} \quad (13.5.3)$$

式中： $\eta_{s,\max}$ ——锈蚀钢筋的最大截面锈蚀率，精确至 0.01；

A_0 ——钢筋原始横截面积（mm²）；

$A_{\min}$ ——锈蚀钢筋最小横截面积（mm²）。

13.5.4 锈蚀钢筋或钢丝锈坑的几何形态宜按以下方法计算：

1 在按 13.4.1 和 13.4.2 条规定确定的锈蚀钢筋三维几何模型中建立与锈坑曲面相交的平面 1 和平面 2，其中平面 1 经过锈蚀钢筋轴线和锈坑最低点，平面 2 垂直于锈蚀钢筋轴线且经过锈坑最低点；

2 图形分析出锈坑曲面与平面 1、平面 2 相交形成的纵向曲线 1 和横向曲线 2 上各点的坐标信息；

3 对提取的锈坑纵向曲线 1 和横向曲线 2 进行如式（13.5.4-1）所示的双曲线或其他合适的曲线拟合。

$$y = a \times \sqrt{1 + x^2 / b^2} - a = a \times \sqrt{1 + k^2 x^2 / a^2} - a \quad (13.5.4)$$

式中： a ——为双曲线实半轴长（mm）；

b ——为双曲线虚半轴长（mm）；

k ——为双曲线渐近线斜率 $k = a/b$ 。

13.5.5 利用按 13.4.1 和 13.4.2 条规定确定的锈蚀钢筋三维几何模型，单根锈蚀钢筋平均横截面积可按下式计算：

$$A_{av} = \sum A_i / n \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (13.5.5)$$

式中： A_i ——单根锈蚀钢筋沿轴线每 1mm 距离上的横截面积（mm²）；

n ——提取的横截面积数量。

13.5.6 钢筋沿长度方向的锈蚀不均匀性系数 R 应按式（13.5.6）计算。

$$R = A_{av} / A_{min} \quad (13.5.6)$$

式中： A_{av} ——锈蚀钢筋平均横截面积（mm²）；

A_{min} ——锈蚀钢筋最小横截面积（mm²）。

13.5.7 统计锈蚀钢筋或钢丝不均匀锈蚀系数 R 的概率分布，应按以下方法进行：

1 将锈蚀钢筋或钢丝沿长度方向分为若干截断单元，每个截断单元长度取不小于 50 mm；

2 按 13.5.5 条规定，获取每个截断单元的横截面积最小值 A_{min} 和整根锈蚀钢筋或钢丝的平均横截面积 A_{av} ；

3 按 13.5.6 条规定，计算每个截断单元的不均匀系数 R ；

4 统计不均匀系数 R 的概率分布参数。

13.5.8 对于锈蚀钢绞线，因中丝和边丝的平均锈蚀率不同，宜确定中丝和边丝平均锈蚀率的相关关系，并分别按照本标准 13.5.7 条的规定统计中丝和边丝不均匀锈蚀系数。

13.5.9 锈蚀钢筋、钢丝或钢绞线名义应力 σ_s 和平均应变 ε_s 应分别按式（13.5.9-1）和（13.5.9-2）计算。

$$\sigma_s = F / A_{av} \quad (13.5.9-1)$$

$$\varepsilon_s = D / l \quad (13.5.9-2)$$

式中： F ——钢筋拉伸力（N）；

D ——引伸计标距范围内锈蚀钢筋受拉变形量（mm）

σ_s ——锈蚀钢筋名义应力（MPa）；

ε_s ——引伸计标距范围内锈蚀钢筋平均应变（无量纲）；

l ——引伸计标距（mm）。

13.5.10 锈蚀钢筋、钢丝或钢绞线的名义屈服强度和名义极限强度，按式（13.5.10）计算。

$$\begin{cases} k_{yc} = \frac{\alpha_{yc}}{(1-\eta_s)} f_{y0} \\ k_{uc} = \frac{\alpha_{uc}}{(1-\eta_s)} f_{u0} \end{cases} \quad (13.5.10)$$

式中： α_{yc} 、 α_{uc} ——锈蚀钢筋屈服荷载相对值、极限荷载相对值，即锈蚀钢筋屈服荷载（极限荷载）与未锈钢筋屈服荷载（极限荷载）之比；

k_{yc} 、 k_{uc} ——锈蚀钢筋名义屈服强度和极限强度，即锈蚀钢筋屈服荷载和极限荷载与平均横截面积之比；

f_{y0} 、 f_{u0} ——未锈钢筋屈服强度和极限强度。

13.5.11 锈蚀钢筋或钢丝应力也可取拉伸荷载与最小横截面积的比值，见式（13.5.11-1）；相应的锈蚀钢筋或钢丝屈服强度和极限强度按式（13.5.11-2）计算。

$$\sigma_{s,t} = \sigma_s \cdot R \quad (13.5.11-1)$$

式中： $\sigma_{s,t}$ ——锈蚀钢丝最小截面处应力（N）；

σ_s ——锈蚀钢丝名义应力

$$\begin{cases} f_{yc} = k_{yc} \cdot R \\ f_{uc} = k_{uc} \cdot R \end{cases} \quad (13.5.11-2)$$

式中： f_{yc} 、 f_{uc} ——锈蚀钢筋或钢丝屈服强度和极限强度（MPa）；

13.5.12 锈蚀钢筋极限延伸率相对值应按下式进行计算。

$$\alpha_{\delta c} = \delta_c / \delta_0 \quad (13.5.12)$$

式中： δ_0 、 δ_c ——未锈蚀钢筋和锈蚀钢筋的极限延伸率；

13.5.13 锈蚀钢筋力学性能特征参数统计应符合以下规定：

1. 根据一批锈蚀钢筋单轴拉伸试验结果，统计锈蚀钢筋力学性能特征参数的概率分布；

2 力学性能特征参数进行正态性检验应根据中华人民共和国国家标准《数据的统计处理 and 解释—正态性检验》（GB/T 4882）规定进行，当检验数据个数 $8 < n < 50$ 时用夏皮洛—威尔克(Shapiro-Wilk)方法检验，否则用爱泼斯—普利（Epps-Pulley）方法检验。

3 锈蚀钢筋力学性能特征参数的统计量应包括平均值和标准差。

4 宜采用最小二乘法回归获取锈蚀钢筋力学性能特征参数统计量与锈蚀钢筋平均锈蚀率的相关关系。

13.5.14 锈蚀钢筋、钢丝、钢绞线疲劳寿命宜采用二参数 Weibull 分布进行拟合，统计量包括尺度参数和形状参数，宜采用最小二乘法拟合统计量与平均锈蚀率、疲劳应力幅的相关关系。

13.5.15 锈蚀钢筋、钢丝、钢绞线疲劳拉伸剩余力学性能特征参数按照 13.5.13 的规定进行统计分析，统计量包括平均值和变异系数，宜采用最小二乘法回归获取统计量与锈蚀钢筋平均锈蚀率、损伤度的相关关系。

14 环境作用效应试验后混凝土结构受力性能试验

14.1 一般规定

14.1.1 为认识混凝土结构受力性能演化规律，可进行环境作用效应试验后的受力性能试验。

14.1.2 环境作用效应试验后受力性能试验包括单调加载试验、低周反复加载试验、疲劳加载试验和冲击试验等。

14.2 试验试件

14.2.1 用于环境作用效应试验后受力性能试验的混凝土结构或构件试件的数量、尺寸和制作应满足 3.3 节的规定。

14.2.2 环境作用效应试验后受力性能试验的混凝土结构和构件试件，可通过本标准第 4 章~第 9 章的环境作用效应试验获得。

14.3 试验设备

14.3.1 加载设备应满足本标准 3.2.8 条规定；支承装置应满足本标准 3.2.9 条规定；量测仪器应满足本标准 3.2.10 条规定。

14.3.2 冲击荷载加载设备应符合下列规定：

1. 落锤可以自由落体形式冲击测试试件；
2. 冲击锤头和落锤高度可以调整；
3. 支撑试件的支座可为简支或固支，应有足够的刚性确保落锤的冲击能量全部作用于试验试件上，不应阻碍结构构件变形的自由发展。

14.4 试验加载

14.4.1 环境作用效应试验后，应先使用棕毛刷或小铲子去除试件表面的粉尘、浮屑、盐固体颗粒残余、锈蚀产物痕迹等，然后宜用拍照、描绘和描述等形式记录试件表面的以下信息：

1. 描绘混凝土表面开裂情况，包括锈蚀裂缝位置、分布、形态、裂缝宽度，当混凝土表面颜色过深而难以分辨裂缝时，可在混凝土表面喷洒一层厚度小于 0.02mm 的白漆后再观察、描绘和记录；

2. 记录钢筋锈蚀情况，包括锈蚀产物颜色、分布情况等，必要时应分析锈蚀产物的化学成分；

3. 试件的挠度和变形，采用直接测量或三维激光扫描技术获取试件关键部位的变形量。

14.4.2 钢筋和混凝土的应变测量装置宜在环境作用效应试验后安装或粘贴，应变测量装置宜选用电阻应变片、振弦应变计、光纤光栅应变计、引伸计等。当需要在钢筋表面的粘贴电阻应变片时，宜使用凿子或小型混凝土切割机小心去除钢筋表面的混凝土局部保护层，切除的混凝土面积应尽可能小且不影响其他部位混凝土，露出钢筋后采用砂纸或小型电磨头磨平钢筋局部表面，粘贴好应变片和接线端子后，用 703 胶水覆盖应变片，然后用与试件混凝土相同规格的砂浆填充、抹平，养护 3d 以上，同时应记录下混凝土保护层开凿位置和填充情况。

14.4.3 应按《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081 方法测得与混凝土结构试件同条件养护的混凝土强度试块的力学性能，按本标准 13.4.3 条规定的方法测得钢筋试样的力学性能。

14.4.4 根据实测材料参数，计算获得单调加载试验和低周反复加载试验的各级荷载控制值、疲劳加载试验的荷载控制值；计算获得量测指标的预估值，作为试验加载的控制值或现象观测是否正常的依据值。

14.4.5 安装好加载设备和量测仪器仪表后，应对试件进行预加载，检查是否能够正常加载，各种量测仪器是否正常工作，试件的响应是否在正常范围内。

14.4.6 预加载结束后，卸载，调整好加载设备和测量仪表后，进行正式加载。

14.4.7 疲劳加载结束后，应按测试试件的剩余承载力和变形。

14.4.8 当试验出现下列情况之一时，可停止试验：

- 1 试件发生断裂破坏；
- 2 试件剩余承载力小于极限承载力的 85%；
- 3 达到设定的试验次数。

14.5 试验量测

14.5.1 环境作用效应试验后单调加载试验、反复加载试验和疲劳加载试验的量测内容和方法应满足《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152 的有关规定。测量内容宜根据试验目的在以下项目中选择：

- 1 荷载：包括均布荷载、集中荷载和其他形式的荷载；
- 2 位移：试件的变形、挠度、转角或其他形式的位移；
- 3 裂缝：试件的开裂荷载、裂缝形态、位置、宽度；
- 4 应变：混凝土应变和钢筋应变；
- 5 其他需要量测的项目。

14.5.2 环境作用效应试验后的冲击试验的量测内容和方法应符合下列规定：

- 1 试验的量测内容宜包括落锤的加速度、冲击力、试件跨中截面应变分布、跨中挠度和裂缝开展情况；
2. 受弯或偏心受压构件的挠度测点应布置在构件跨中或挠度最大的部位截面的中轴线上；
3. 宽度大于 600mm 的受弯或偏心受压构件，挠度测点应沿构件两侧对称布置；
4. 具有边肋的单向板，除应量测构件边肋挠度外，还宜量测板宽中央的最大挠度；
5. 量测使用极限状态对应试验荷载值作用下的试件最大裂缝宽度；
6. 量测各级荷载作用下的主要裂缝宽度、长度及裂缝间距，并应在试件上标出，绘制裂缝展开图；
7. 可采用高速摄像机全程记录裂缝和变形发展情况；
8. 当试验过程中需要控制变形时，应量测试件整体变形和裂缝的发展情况。

14.6 数据处理与分析

14.6.1 冲击能量可按式（14.6.1）来计算。

$$E = m_h gh \quad (14.6.1)$$

式中： E ——冲击能量 (J)；

h ——落锤下落高度 (m)；

m_h ——落锤质量 (kg)。

14.6.2 根据冲击试验的加速度时程、冲击力时程、位移时程、钢筋和混凝土应变时程和破坏过程，可计算表征冲击性能的关键物理量：冲量 I_p 、耗散能量 E_p 、平均冲击力 P_m 、冲击力时间 T_d 和跨中最大挠度 $D_{\max}$ 。冲击试验荷载特征值冲量 I_p （冲击力时程曲线积分）、耗散能量 E_p （冲击力-位移曲线积分）和平均冲击力 P_m 可以通过式（14.6.2-1）、（14.6.2-2）和（14.6.2-3）计算得到。

$$I_p = \int_0^{T_d} P dt \quad (14.6.2-1)$$

$$E_p = \int_0^{D_{\max}} P d\delta \quad (14.6.2-2)$$

$$P_m = \frac{I_p}{T_d} \quad (14.6.2-3)$$

式中： I_p ——为冲量；

E_p ——耗散能量；

P ——冲击力；

P_m ——平均冲击力；

T_d ——冲击力作用时间，基于加速度时程曲线取值，试验时建议配置高速摄像机进行全过程采集；

$D_{\max}$ ——梁跨中最大挠度。

附录 A 模拟一般环境作用与自然一般环境作用的相似性

A.0.1 模拟一般环境作用与自然一般环境作用下混凝土试件的环境作用效应时间相似性可按式计算：

$$\lambda_A = \frac{t_A}{t'_A} = \begin{cases} \left(\frac{T'_A}{T_A}\right)^2 \cdot \left(\frac{1-RH'_A}{1-RH_A}\right)^{2.2} \cdot \left(\frac{C'_A}{C_A}\right), & RH_A \geq 55\% \text{ 且 } RH'_A \geq 55\%; \\ 1.755 \cdot \left(\frac{T'_A}{T_A}\right)^2 \cdot \frac{(1-RH'_A)^{2.2}}{RH_A^2} \cdot \left(\frac{C'_A}{C_A}\right), & 0 < RH_A < 55\% \text{ 且 } RH'_A \geq 55\%; \\ 0.570 \cdot \left(\frac{T'_A}{T_A}\right)^2 \cdot \frac{(RH'_A)^2}{(1-RH_A)^{2.2}} \cdot \left(\frac{C'_A}{C_A}\right), & RH_A \geq 55\% \text{ 且 } 0 < RH'_A < 55\%; \\ \left(\frac{T'_A}{T_A}\right)^2 \cdot \left(\frac{RH'_A}{RH_A}\right)^2 \cdot \left(\frac{C'_A}{C_A}\right), & 0 < RH_A < 55\% \text{ 且 } 0 < RH'_A < 55\%. \end{cases} \quad (\text{A.0.1})$$

式中， λ_A ——模拟一般环境作用与自然一般环境作用时间比；

t_A ——模拟一般环境作用时间（天）；

t'_A ——自然一般环境作用时间（天）；

RH_A ——模拟一般环境的相对湿度（%）；

RH'_A ——自然一般环境的相对湿度（%）；

T_A ——模拟一般环境的温度（℃）；

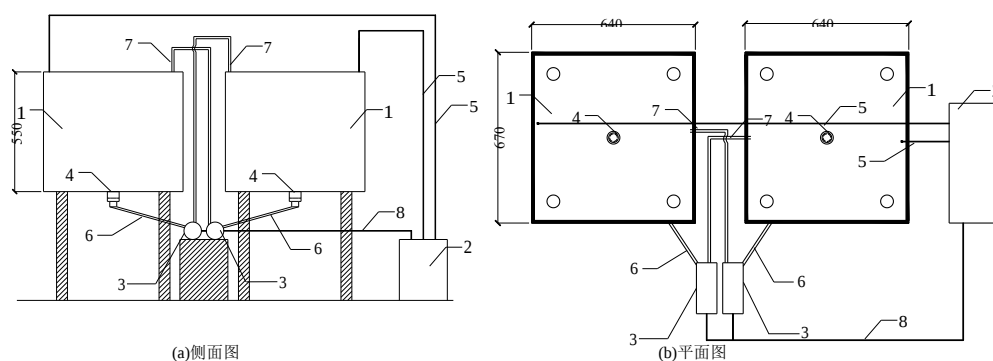
T'_A ——自然一般环境的温度（℃）；

C_A ——模拟一般环境的二氧化碳浓度（ppm）；

C'_A ——自然一般环境的二氧化碳浓度（ppm）。

附录 B 海水潮汐区模拟试验装置

B.0.1 试验装置主要有试验箱、微电脑时控开关、水位控制器、水位传感器、水泵等组成，如图 A.1 所示。



说明：1.试验箱；2.电源及控制系统；3.水泵；4.转换接头；5.水位传感器导线；6.水泵进水软管；7.水泵出水软管；8.电线

图 B.1 海水潮汐区加速模拟试验装置的组成

B.0.2 试验装置有 6 天工作制、5 天工作制、3 天工作制、每日相同、每日不同等工作模式可以选择，可以根据实际情况需要设定干湿循环制度。通过水泵抽排水使两个试验箱中的混凝土试件交替处于湿润和干燥状态来模拟处于海洋潮汐区的混凝土周期性湿润和干燥的过程，抽排水过程能够按照设定程序自动实现，试验装置工作原理如图 A.2 所示。

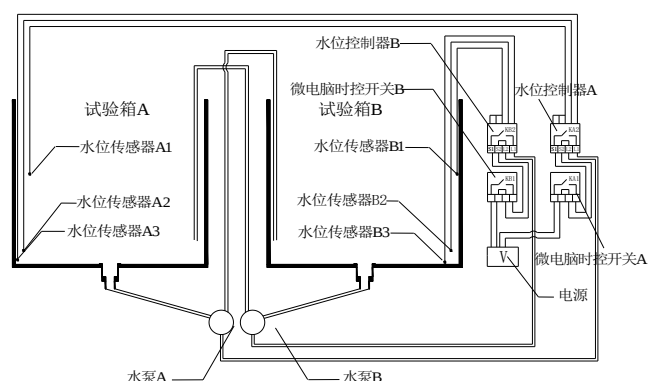


图 B.2 海水潮汐区加速模拟试验装置工作原理

B.0.3 举例说明该装置的设置及运行情况。初始设置：时控开关 A，8:00 开，8:05 关；时控开关 B，20:00 开，20:05 关。试验箱 A 有溶液，试验箱 B 无溶液。

运行情况：

(1) 8:00, KA1 自动闭合, KA2 闭合, 水泵 A 开始将试验箱 A 中的溶液抽向试验箱 B。

(2) 试验箱 A 中水位下降到水位传感器 A2 时,KA2 断开, 形成断路, 水泵 A 停止工作, 8:05, KA1 自动断开;

(3) 20:00, KB1 自动闭合, KB2 也闭合, 水泵 B 开始将试验箱 B 中的溶液抽向试验箱 A。

(4) 试验箱 B 中水位下降到水位传感器 B2 时, KB2 断开, 形成断路, 水泵 B 停止工作, 20:05, KB1, 断开。

根据以上方式 A、B 箱体中试件交替处于湿润和干燥状态循环下去。

附录 C 模拟氯盐环境作用与自然氯盐环境作用的相似性

C.0.1 模拟氯盐环境作用与自然氯盐环境作用下混凝土试件的环境作用效应时间相似性可按下式计算：

$$\lambda_c = \frac{t_c}{t'_c} = \left(\frac{T'_c}{T_c} \right)^{\frac{1}{1-f_a}} \cdot e^{q \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{T'+273} \right) \frac{1}{1-f_a}} \cdot \left(\frac{\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{c_{\text{crit}} - c_0}{c'_s - c_0} \right)}{\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{c_{\text{crit}} - c_0}{c_s - c_0} \right)} \right)^{\frac{2}{1-f_a}} \quad (\text{C.0.1})$$

式中， λ_c ——模拟氯盐环境作用与自然氯盐环境作用时间比；

t_c ——模拟氯盐环境作用时间（天）；

t'_c ——自然氯盐环境作用时间（天）；

T_c ——模拟氯盐环境的温度（℃）；

T'_c ——自然氯盐环境的温度（℃）；

c_0 ——混凝土内部初始氯离子含量（占混凝土质量）（100%）；

c_{crit} ——临界氯离子含量（占混凝土质量）（100%）；

c_s ——模拟氯盐环境下混凝土表面氯离子含量（100%）；

c'_s ——自然氯盐环境下混凝土表面氯离子含量（100%）；

f_a ——龄期系数，按附录 C 表 C.0.1-1 规定确定；

q ——活化常数（K），按附录 C 表 C.0.1-2 规定确定；

$\operatorname{erf}^{-1}(\)$ ——误差函数的反函数。

表 C.0.1-1 龄期系数 f_a

胶凝材料 海洋环境	硅酸盐水泥	硅酸盐水泥+ 粉煤灰	硅酸盐水泥+矿 渣	硅酸盐水泥+ 硅粉
淹没区	0.3	0.69	0.71	0.62
潮汐、浪溅区	0.37	0.93	0.60	0.39
大气区	0.65	0.66	0.85	0.79

表 C.0.1-2 活化常数 q

水胶比	0.4	0.5	0.6
活化常数 q (K)	6000	5450	3850

附录 D 硫酸盐侵蚀混凝土应力-应变关系

D.1 硫酸盐侵蚀混凝土分层

D.1.1 定义参数 A_{mn} 为第 m 个测试龄期、由试件内部未受侵蚀的部分至侵蚀表面的第 n 个硫酸根离子含量在垂直侵蚀表面方向所占面积，其中， $m \geq 1$ ， $1 \leq n \leq m$ ，未受侵蚀的部分在垂直于侵蚀表面方向的面积记为 A_{m0} 。则混凝土截面积 A 为：

$$A = A_{m0} + A_{m1} + A_{m2} + A_{m3} + \cdots + A_{m(m-1)} + A_{mm} \quad (\text{D.1.1})$$

其分层情况如图 D.1.1 所示。

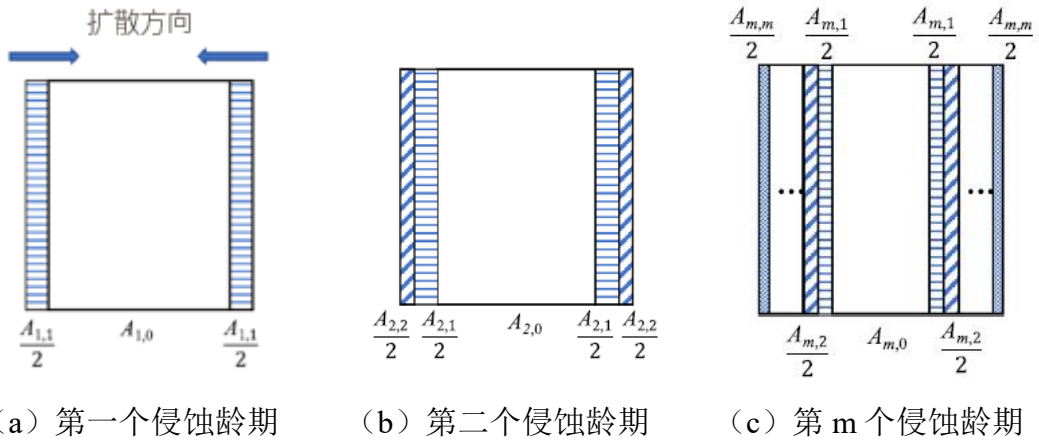


图 D.1.1 受侵蚀混凝土在不同侵蚀龄期下的分层情况

D.1.2 测定第一个侵蚀龄期混凝土内硫酸根离子含量分布，则混凝土截面积 A 为：

$$A = A_{10} + A_{11} \quad (\text{D.1.2-1})$$

则 A_{11} 层硫酸根离子平均含量 $\bar{U}_{11}$ 为：

$$\bar{U}_{11} = \frac{U_{11}}{d_{11}} \quad (\text{D.1.2-2})$$

$$A_{11} = 2 \times L \times d_{11} \quad (\text{D.1.2-3})$$

式中： $\bar{U}_{11}$ ——第一侵蚀龄期，受侵蚀混凝土第一层硫酸根离子平均含量；

U_{11} ——第一侵蚀龄期，受侵蚀混凝土第一层硫酸根离子总含量；

d_{11} ——第一侵蚀龄期，由试样内部未受侵蚀部分至侵蚀表面的第 1 层的深度；

A_{11} ——第一侵蚀龄期，由试样内部未受侵蚀部分至侵蚀表面的第 1 层的面积，与 d_{11} 相对应；

L ——侵蚀表面宽度。

D.1.3 定义对应于 A_{m1} 、 A_{m2} 、 A_{m3} 、... $A_{m(m-1)}$ 、 A_{mm} 层中的硫酸根离子平均含量分别为 $\bar{U}_{m1}$ 、 $\bar{U}_{m2}$ 、 $\bar{U}_{m3}$ 、... $\bar{U}_{m(m-1)}$ 、 $\bar{U}_{mm}$ ，其满足以下关系：

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{U}_{m1} = \bar{U}_{(m-1)1} = \cdots = \bar{U}_{31} = \bar{U}_{21} = \bar{U}_{11} \\ \bar{U}_{m2} = \bar{U}_{(m-1)2} = \cdots = \bar{U}_{42} = \bar{U}_{32} = \bar{U}_{22} \\ \bar{U}_{m3} = \bar{U}_{(m-1)3} = \cdots = \bar{U}_{53} = \bar{U}_{43} = \bar{U}_{33} \\ \vdots \\ \bar{U}_{m(m-1)} = \bar{U}_{(m-1)(m-1)} \end{array} \right. \quad (D.1.3)$$

式中： $\bar{U}_{mn}$ 为第 m 个测试龄期下，第 n 层硫酸根离子平均含量。

D.1.4 测定第二个侵蚀龄期测混凝土内硫酸根离子含量分布，则混凝土截面积 A 为：

$$A = A_{20} + A_{21} + A_{22} \quad (D.1.4-1)$$

由

$$\bar{U}_{21} = \frac{U_{21}}{d_{21}} = \frac{U_{11}}{d_{11}} = \bar{U}_{11} \quad (D.1.4-2)$$

计算得到第二个侵蚀龄期下，第一层厚度 d_{21} 及第一层硫酸根离子平均含量 $\bar{U}_{21}$ ，继而可计算第二个侵蚀龄期下，第二层厚度 d_{22} 及第二层硫酸根离子平均含量：

$$A_{21} = 2 \times L \times d_{21} \quad (D.1.4-3)$$

$$d_{22} = d_2 - d_{21} \quad (D.1.4-4)$$

$$U_{22} = U_2 - U_{21} \quad (D.1.4-5)$$

$$\bar{U}_{22} = \frac{U_{22}}{d_{22}} \quad (D.1.4-6)$$

$$A_{22} = 2 \times L \times d_{22} \quad (D.1.4-7)$$

式中： d_2 ——第二个侵蚀龄期，硫酸根离子侵蚀深度；

d_{22} ——第二个侵蚀龄期，第二层深度；

U_2 ——第二个侵蚀龄期，混凝土内侵蚀硫酸根离子总量；

- U_{22} ——第二个侵蚀龄期，第二层硫酸根离子含量；
 $\bar{U}_{22}$ ——第二个侵蚀龄期，第二层硫酸根离子平均含量；
 A_{21} ——第二个侵蚀龄期，第一层的面积，与 d_{21} 相对应；
 A_{22} ——第二侵蚀龄期，第二层的面积，与 d_{22} 相对应；
 L ——侵蚀表面宽度。

D.1.5 测定第 m 个侵蚀龄期混凝土内硫酸根离子含量分布，则混凝土截面积 A 为：

$$A = A_{m0} + A_{m1} + A_{m2} + \cdots + A_{mm} \quad (D.1.5-1)$$

由

$$\bar{U}_{m1} = \frac{U_{m1}}{d_{m1}} = \frac{U_{11}}{d_{11}} = \bar{U}_{11} \quad (D.1.5-2)$$

$$\bar{U}_{m2} = \frac{U_{m2}}{d_{m2}} = \frac{U_{22}}{d_{22}} = \bar{U}_{22} \quad (D.1.5-3)$$

⋮

$$\bar{U}_{m(m-1)} = \frac{U_{m(m-1)}}{d_{m(m-1)}} = \frac{U_{(m-1)(m-1)}}{d_{(m-1)(m-1)}} = \bar{U}_{(m-1)(m-1)} \quad (D.1.5-4)$$

计算得第 m 个侵蚀龄期下，第一层、第二层、 $\cdots$ 、第 $(m-1)$ 层深度 d_{m1} 、 d_{m2} 、 $\cdots$ 、 $d_{m(m-1)}$ 。继而可计算第 m 个侵蚀龄期下，第 m 层厚度 d_{mm} 及第 m 层平均硫酸根离子含量 $\bar{U}_{mm}$ ：

$$d_{mm} = d_m - d_{m1} - d_{m2} - \cdots - d_{m(m-1)} \quad (D.1.5-5)$$

$$\bar{U}_{mm} = \frac{U_{mm}}{d_{mm}} \quad (D.1.5-6)$$

- 式中： d_m ——第 m 个侵蚀龄期，硫酸根离子侵蚀深度；
 d_{mm} ——第 m 个侵蚀龄期，第 m 层深度；
 U_{mm} ——第 m 个侵蚀龄期，第 m 层硫酸根离子总量；
 $\bar{U}_{mm}$ ——第 m 个侵蚀龄期，第 m 层硫酸根离子平均含量。

D.2 不同硫酸根离子含量混凝土的应力-应变关系

D.2.1 对第一个侵蚀龄期，获得实测标准养护混凝土和硫酸盐侵蚀混凝土荷载-应变关系曲线的拟合曲线。在此基础上，通过基于拉格朗日插值多项式的求导方法，对拟合曲线进行求导，得到对应的界面轴向刚度 $[EA] - \varepsilon$ 应变关系曲

线。

假定不同层之间变形相等，承担的轴力与轴向抗压刚度成正比，即视为并联体系，根据变形协调条件可以得到：

$$[E_0 A_{10}] + [E_1 A_{11}] = [EA]_1 \quad (D.2.1-1)$$

$$E_1 = \frac{1}{A_{11}} ([EA]_1 - [E_0 A_{10}]) \quad (D.2.1-2)$$

式中： E_0 ——未受侵蚀混凝土的切线模量；

$[EA]_1$ ——第一个侵蚀龄期下受侵蚀混凝土的轴向截面刚度；

E_1 ——第一个侵蚀龄期，第一层受侵蚀混凝土切线模量，对应于 d_{m1} 。

D.2.2 对第 m 个侵蚀龄期，同理则有：

$$[E_0 A_{10}] + [E_1 A_{11}] + \cdots + [E_m A_{mm}] = [EA]_m \quad (D.2.2-1)$$

$$E_m = \frac{1}{A_{mm}} ([EA]_m - [E_0 A_{10}] - \frac{E_{Hm}}{E_{H1}} [E_1 A_{11}] - \cdots - \frac{E_{Hm}}{E_{H(m-1)}} [E_{m-1} A_{(m-1)(m-1)}]) \quad (D.2.2-2)$$

式中： E_0 ——未受侵蚀混凝土的切线模量；

$[EA]_m$ ——第 m 个侵蚀龄期下受侵蚀混凝土的轴向截面刚度；

E_i ——第 m 个侵蚀龄期，第 m 层受侵蚀混凝土切线模量，对应于 d_{mi} ；

E_{Hi} ——第 i 个侵蚀龄期，标准养护混凝土的切线模量。

D.2.3 在得到不同硫酸根离子含量的混凝土的切线模量-应变 $E_m - \varepsilon$ 关系曲线的基础上，基于数值积分，可得不同硫酸根离子含量混凝土的应力-应变关系：

$$\sigma_m(\varepsilon) = \int E_m(\varepsilon) d\varepsilon \quad (D.2.3)$$

附录 E 冲击试验装置

E.0.1 落锤冲击试验机：试验装置主要有落锤试验机、试件支座、动态采集系统、激光位移计、导轨等组成，如图 E.0.1 所示。

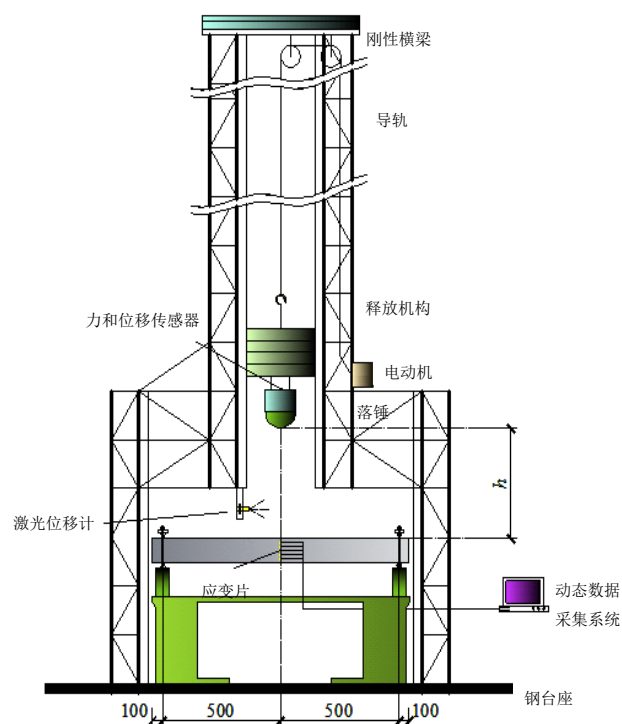


图 E.0.1 落锤式冲击试验机

E.0.2 落锤锤头尺寸：冲击锤头建议采用推荐尺寸：直径： $120\pm 1\text{mm}$ ，端部半径： $60\pm 1\text{mm}$ ，加砝码后落锤质量： $100\sim 300\text{kg}$ ，如图 E.0.2 所示。

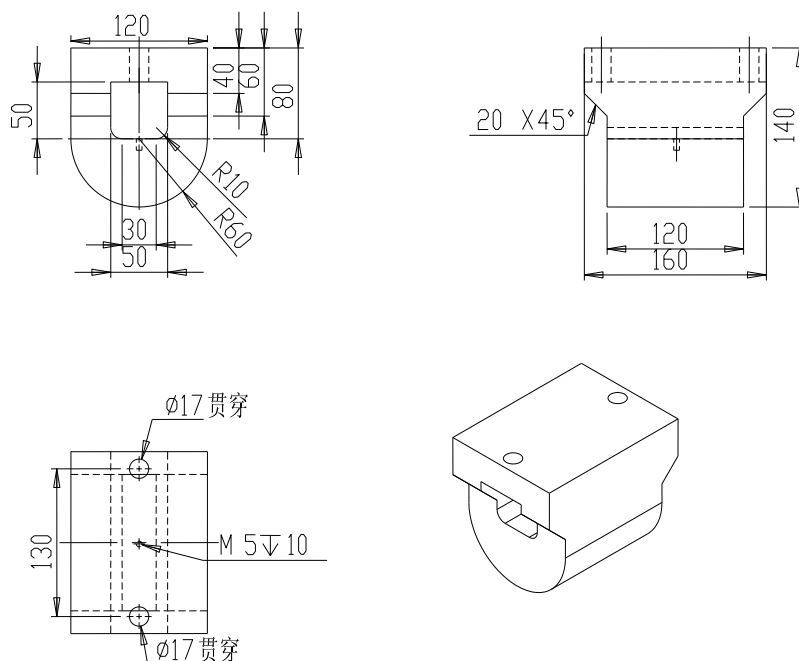
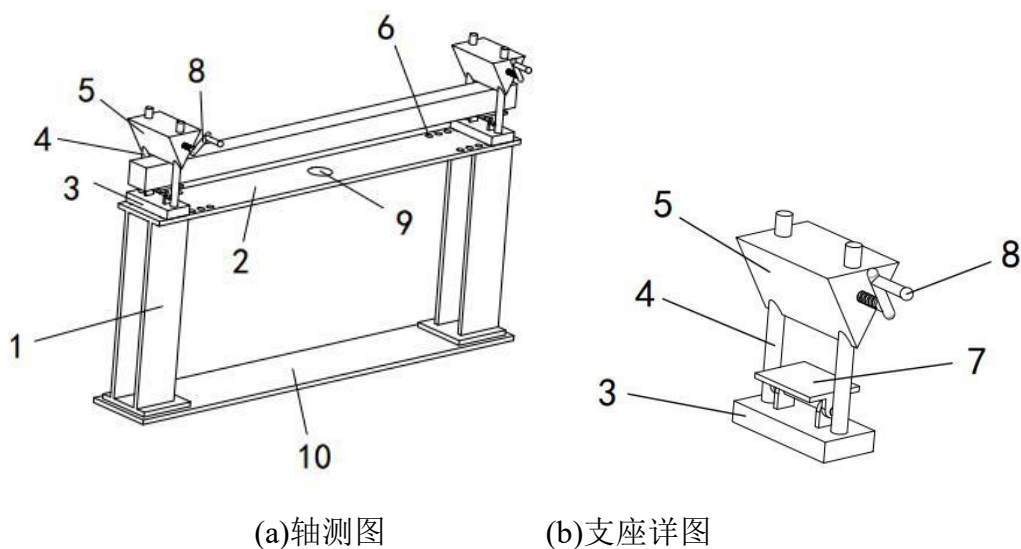


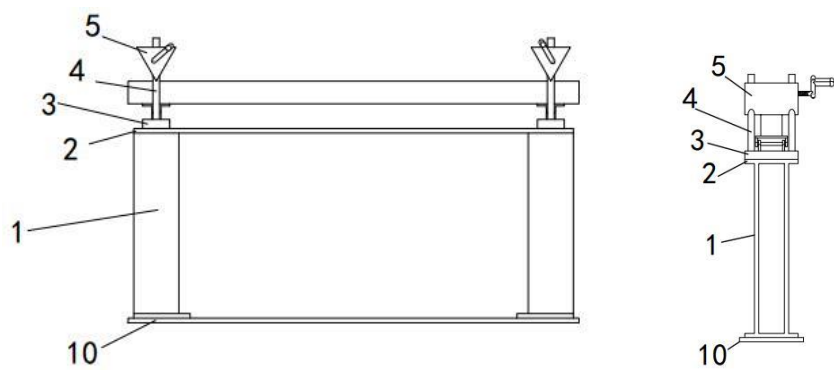
图 E.0.2 落锤锤头

E.0.3 落锤冲击试件支座：一种落锤冲击构件试验的支座装置。减少了支座对试验构件跨度、测试冲击构件挠度曲线和破坏过程的影响。它包括支座（1）、支座顶板（2）、垫板（3）、竖杆（4）、压板（5）、调整跨度孔（6）、铰支座（7）、锁紧手柄（8）、测距孔（9）和底板（10）。本支座的优点为支座在保证对试验构件的固定效果的同时，又不减少落锤冲击试验构件试验的精度，如图 E.0.3 所示。



(a)轴测图

(b)支座详图



(c) 正面图

(d) 侧视图

图 E.0.3 落锤冲击试件支座

本标准用词、用语说明

1 为了便于在执行本标准条文时区别对待，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，在正常情况下均应该这样做的：

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，在条件允许时首先应该这样做的：

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 条文中指明按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《混凝土物理力学性能试验方法标准》 GB/T 50081-2019
- 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》 GB/T 50082-2009
- 《混凝土结构试验方法标准》 GB/T 50152-2012
- 《混凝土结构耐久性设计标准》 GB/T 50476-2019
- 《水质 硫酸盐的测定 重量法》 GB 11899-1989
- 《水泥化学分析方法》 GB/T 176-2017
- 《混凝土耐久性检验评定标准》 JGJ/T 193-2009
- 《混凝土中氯离子含量检测技术规程》 JGJ/T322-2013
- 《预应力混凝土枕疲劳试验方法》 TB/T 1878-2002
- 《混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法标准》 T/CECS 762-2020

中国工程建设标准化协会

环境作用下混凝土结构性能退化实验标准

T/CECS ***-202*

条文说明

1 总则

1.0.1 工程结构性能演化实质上是环境和荷载共同作用下工程材料、构件乃至结构性能的变化问题。近年来国内外学者开展了大量环境作用下混凝土结构性能演化试验。但不同研究中采用的模拟方法、试验条件、试件几何形状和个数、采集数据精度、数据处理方法均各异，试验数据往往不具有可比性，限制了对已有试验的综合利用，阻碍了已有理论的发展和试验结果的应用。国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/50082-2009给出了材料层面上混凝土抗冻试验、抗水渗透试验、抗氯离子渗透试验、碳化试验、混凝土中钢筋锈蚀试验、抗硫酸盐侵蚀试验、碱骨料反应试验等的标准试验方法，但未给出构件或者结构层面上的性能退化试验方法。国家标准《混凝土结构试验方法标准》GB50152-2012给出了不同混凝土构件结构性能试验试件制作、加载制度与方法、数据采集与处理等技术要求，但未给出环境作用模拟及环境作用下结构性能退化试验方法。行业标准《混凝土耐久性检验评定标准》JGJ/T193-2009给出了混凝土抗冻、抗水渗透、抗氯离子侵蚀、抗碳化、抗硫酸盐侵蚀等耐久性能的等级划分、检验方法和评定标准，未涉及性能退化试验方法。ASTM G109-07(2013) Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments、ASTM C1202-17a Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration等系列标准均仅给出材料层面上氯离子侵蚀、硫酸盐侵蚀、碱骨料反应、钢筋锈蚀等实验或检验方法。《混凝土结构耐久性室内环境模拟试验方法标准》T/CECS 762-2020主要关注环境模拟试验，尚未涉及钢筋电加速锈蚀、锈蚀钢筋力学性能、锈蚀钢筋与混凝土的粘结性能测试、锈蚀构件和结构的力学性能试验等的相关标准方法。因此，有必要编制一本关于混凝土结构性能演化试验方法的标准，从而规范与统一混凝土结构环境作用的模拟方法、模拟环境或自然环境作用下混凝土结构受力性能演化试验方法，以及试件制作、数据采集和数据处理等技术要求，加强试验数据的可比性。

1.0.2 本条确定本标准的适用范围。本标准的环境作用效应试验包括混凝土结构碳化与钢筋锈蚀试验、混凝土结构氯盐侵蚀与钢筋锈蚀试验、混凝土结构硫酸盐侵蚀试验、混凝土结构冻融试验和混凝土结构自然暴露试验等。

1.0.3 本条明确了本标准与其他相关标准的关系。本标准没有覆盖到的环境作用及受力性能试验应执行其他相关标准。

3 基本规定

3.1 一般原则

3.1.1 环境作用效应试验包括环境作用对混凝土结构和材料性能影响的试验和荷载与环境共同作用对混凝土结构和材料性能影响的试验。

3.1.2 不考虑人类工业生产造成的各类化学侵蚀环境，混凝土结构所处的环境可分为一般环境、冻融环境、氯盐环境、硫酸盐环境四大类。由于含氯盐和不含氯盐的水溶液的冰点和膨胀特性不一样，冻融环境根据造成混凝土饱和的水溶液中是否含氯盐分为普通冻融环境和盐冻环境两个亚类。氯盐侵蚀环境根据侵蚀介质化学成分的不同可细分为海洋环境、土中和地下水中氯盐环境和除冰盐环境。其中，根据海水对工程结构的作用方式不同，海洋环境分再为大气区、浪溅区、潮汐区和浸泡区四个小类。以上环境分类与《混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法标准》（T/CECS 762-2020）和《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476-2019 基本一致。

3.1.3 选择自然暴露试验可以直接获得试验试件在自然环境下真实的作用效应以揭示受力性能演化机理，但可能需要经历长期的暴露才能获得预期的结果。模拟环境作用效应试验可以通过改变环境作用的严酷程度等方式来改变试件的性能演化速度，通过周期较短的加速试验就可以获得所需的结果。

3.1.4 研究荷载作用效应对混凝土材料与结构环境作用效应的影响时需要进行荷载与环境共同作用下的结构环境作用效应试验。混凝土结构在服役时往往承受静力荷载（如结构自身重力）、疲劳荷载（如桥梁上的车辆荷载）、冲击荷载（如被车辆撞击的高速公路护栏），这些荷载与环境作用同时、先后或间隔作用于混凝土结构，可能显著影响混凝土结构中环境作用的效应，改变结构的受力性能演化规律，因此需要开展相应的环境作用效应试验。

3.1.6 开展荷载与环境共同作用下的环境作用效应试验时，为缩短总试验时长，需要对疲劳荷载和环境作用进行加速，即试验时的疲劳荷载加载频率比实际大，环境作用比实际严酷，因此两者分别对应一个加速倍率。当加速倍率相同时，试验时疲劳荷载与环境同步作用试验可达到与实际结构一致的结果；当加速倍率不同时，则可通过疲劳荷载与环境交替作用试验的方法实现与实际结构一致

的结果，比如当疲劳荷载的加速倍率更大时，则可以通过先进行一定次数的疲劳加载，然后停止加载并进行环境作用效应试验，接着交替重复以上过程直至达到所需结果。

3.1.8 设计环境作用效应试验时，需预估试验试件的性能退化速度，由此预估整个试验所需时长，制定获取结构在整个试验周期内性能演化规律需要进行环境作用效应后受力性能试验的时间节点，从而确定试验试件的数量。每个环境作用效应后受力性能试验的时间节点的间隔即为试验的阶段周期。每个阶段周期结束对环境参数和试件响应进行全面测量，可以检验环境参数在控制范围内，并对试验试件进行非破坏和破坏性试验，以检查其环境作用响应和受力性能变化是否在预期范围内。当一个阶段周期较长，或试验重要性等级较高，或环境参数难以准确控制时，则应在每个阶段周期内再细分若干子阶段周期，在每个子阶段周期内全面检测试验环境参数和主要的试件响应。

3.2 试验设备

3.2.4 一般大气环境下的碳化试验时，需要往环境箱内通入二氧化碳气体或二氧化碳与空气的混合气体，当进行盐雾试验时则需要往环境箱体内通入盐水和空气，若环境箱体为密封状态，则环境箱体内压力会不断上升。一般可在箱体上上部开设大小合适的孔洞后利用非金属管道将环境箱内气体环境与试验室外的大气环境联通，当环境箱体内压力上升时，箱内气体可通过该孔洞排到试验室外，从而不影响箱体外的试验室内部环境和人员。

3.2.6 环境模拟试验设备的内部设置可从内部开启试验箱门的紧急开箱门装置，可避免人员被误关箱体内而无法逃出。

3.2.7 环境模拟试验设备设置缓冲间则可大大减少人员进出环境箱引起箱体内外空气与箱体外部空气直接交换量，从而保证箱体内试验环境条件的稳定。

3.3 试验试件

3.3.1 混凝土材料环境作用效应试验时的试件几何形状和尺寸与《混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法标准》（T/CECS 762-2020）基本一致。本标准推荐在一般环境作用效应试验时选用棱柱体，采用棱柱体试验可以使控制二氧化碳沿棱柱体截面高度方向侵入，并密封其它 5 个面，碳化一定时间后沿棱柱体横

截面劈开，测试碳化深度，之后密封劈开面余下混凝土继续碳化后可采用同样方法测试下一阶段的碳化深度，从而实现一个试件的多次测量，相比每个立方体试件只能测试一次碳化深度的方法，可以更好避免不同试件间材料的离散性对试验结果的影响。由于棱柱体一次可以测试多次碳化深度，因此试件组数可以相对减少。混凝土试件的最小横截面尺寸一般宜大于最大骨料最大公称直径的 3 倍，且宜以 100mm 为模数。

3.3.7 环境作用效应试验时，试件的摆放方式可能影响试件表面的环境条件，如盐雾试验时，水平摆放、倾斜摆放的试件表面的盐雾沉降量有所不同，应注意使试件表面环境与实际结构一致或达到预期效果。试件与试件之间、试件与试件架周边的距离为 100mm 是最小要求，当试件形状较为复杂、摆放较无规律，或环境条件易受影响时，应以整个环境箱内试件周围环境均能达到所需的均匀程度来确定实际所需间距。

3.4 相似性

3.4.1 环境作用是温度、湿度、二氧化碳、氧、酸、碱、盐等引起混凝土结构性能退化的环境气候作用和侵蚀介质作用。环境气候和侵蚀介质共同作用引起的混凝土材料和结构性能的变化为环境作用效应。模拟环境作用效应是模拟环境作用 and 时间的函数，自然环境作用效应亦是自然环境作用 and 时间的函数。若已知模拟环境作用效应与自然环境作用效应之间的相似关系，那么一方面可根据模拟环境作用参数值推定模拟环境作用时间，另外一方面可根据模拟环境作用时间推定模拟环境作用参数取值。

3.4.2 本条给出了模拟环境作用和自然环境作用下混凝土试件环境作用效应的时间相似性关系的一般性确定步骤。

3.4.3~3.4.4 模拟环境或自然环境作用下混凝土试件环境作用效应时变关系可采用模拟环境或自然环境现场暴露试验法、模拟环境或自然环境第三方参照试验法以及模拟环境或自然环境下环境作用效应理论或数值模拟计算法等方法确定。模拟环境或自然环境现场暴露试验法即将混凝土试件置于模拟环境或自然环境中，获得环境作用效应的时变数据，从而获得模拟环境或自然环境作用效应时变关系。模拟环境或自然环境第三方参照试验法即参考第三方开展的相同混凝

土的模拟环境或自然环境作用效应试验，获得模拟环境或自然环境作用效应时变关系。模拟环境或自然环境作用下环境作用效应理论或数值模拟算法即通过验证的环境作用效应理论或数值模型，预测模拟环境下或自然环境下环境作用效应时变关系。

3.4.5 《混凝土结构环境作用与区划标准》（T/CECS ***-202*）通过对我国大量气象站点的历史累积数据统计分析，提出了我国国土范围内混凝土结构的环境作用代表值取值原则与方法。当无法通过实际调查获取环境作用值时，可根据该标准规定确定混凝土结构的环境作用参数值大小。

4 混凝土结构碳化与钢筋锈蚀试验

4.1 一般规定

4.1.1 采用加速碳化试验及由碳化引起的钢筋锈蚀试验时，混凝土中钢筋锈蚀形态、锈蚀产物组成、锈蚀产物对混凝土保护层的锈胀作用等均与自然暴露试验结果接近，而采用电加速锈蚀试验则往往无法难以达到同样的效果。

4.2 试验设备

4.2.1 测量温度偏差、相对湿度偏差和二氧化碳气体浓度偏差时，在环境箱内分上、中、下三层布置测点，每一层的测点包括四个角点和所在层平面的中心点。中层的中心点为环境箱的几何中心点。除几何中心测点之外，其它测点距离环境箱内壁的距离为环境箱对应边长的 $1/10$ ，且最大距离不大于 500mm ，最小距离不小于 50mm 。测点具体数量和位置可参考《电子电工产品环境试验设备检验方法 温度试验设备》GB/T 5170.2-2008 8.1 条款。把试验设备的温度、相对湿度和二氧化碳浓度控制器调到所要求的标称值上，达到该值后，稳定 30min ，开始记录个测量点的温度、相对湿度和二氧化碳浓度值，每隔 1min 记录一次，在 30min 内共记录 30 次。测量值的上偏差为各测点 30min 内实测值的最高值减去标称值；下偏差为各测点 30min 内实测值的最低值减去标称值。为了使环境箱内各点处的环境条件一致，箱内的循环风速应控制在 $0.2/\text{s} \sim 1.0\text{m}/\text{s}$ 范围内。

4.2.9 利用激光三维扫描方法来扫描钢筋锈蚀率，可以获得沿钢筋长度方向的锈蚀形态分布，对于比较长的钢筋可以通过分段扫描来获得整根钢筋沿长度的锈蚀形貌。为了获得钢筋上微小锈坑，扫描的精度越高越好。根据现有三维扫描技术，最高的可达到接近 10 微米的级别，在此要求扫描精度达到 30 微米以上。

4.4 试验方法

4.4.2 自然环境中二氧化碳浓度一般为 $0.03\sim 0.2\%$ ，混凝土碳化速度很慢，试验时加大二氧化碳浓度值可加速碳化试验的速度。有试验研究表明，当二氧化碳气体浓度过高，如高于 50% 时，则早期碳化速度快，后期碳化速度慢，与自然环境作用下混凝土碳化速度与碳化时间的 $1/2$ 次方成正比的规律不符，表明高浓度二氧化碳条件下混凝土的碳化机理可能发生了改变。

4.4.3 由于我国已有的很多混凝土材料碳化试验采用 20%的二氧化碳浓度，故恒定环境作用碳化试验常将浓度值控制为 20%，这样可与已有的大量碳化试验结果做对比。

4.4.5 已有试验研究表明相同二氧化碳浓度环境下混凝土的风速不同，引起的碳化深度不同。

5 混凝土结构氯盐侵蚀与钢筋锈蚀试验

5.1 一般规定

5.1.1 采用氯盐加速侵蚀试验时，混凝土中钢筋锈蚀形态、锈蚀产物组成、锈蚀产物对混凝土保护层的锈胀作用等均与氯盐侵蚀自然暴露试验的结果接近，而采用电加速锈蚀试验则往往无法难以达到同样的结果。

5.3 试验试件

5.3.4 混凝土烘干后孔隙中水分基本被蒸发，浸泡入水中时由于毛细孔的吸附作用，氯离子随水分快速进入混凝土中，加快氯离子的传输速度。

5.4 试验方法

5.4.1 进行氯盐侵蚀试验时，大多标准建议采用氯化钠溶液，这有利于不同的试验之间进行比较。当结构所处环境中的侵蚀介质为其它氯盐时，可以采用对应的氯盐溶液，比如氯化钾溶液。海水中氯离子质量浓度一般低于 2%。采用质量浓度 5% 的氯化钠溶液即可保证具有一定的加速作用，也可保证氯盐对结构的侵蚀机理相同，有利于试验之间的对比。当进行机理性研究时，氯盐浓度则由研究者根据需要选定。

5.4.2 相对湿度长期低于 50% 时，混凝土中水泥浆体会由于毛细孔中的水分蒸发而干缩，因此在混凝土内部形成损伤，造成混凝土传输性能的较明显变化，因此试验中若无特殊目的，应避免干燥是的相对湿度不低于 50%。对于机理性研究时，相对湿度则可根据研究需要选定。

6 混凝土结构硫酸盐侵蚀试验

6.1 一般规定

6.1.1 规定了硫酸盐侵蚀环境模拟试验时，大气区、土中无地下水区和土中地下水位变动区的环境由于周期性的雨淋、地下水位变动影响，适合采用干湿循环试验来模拟；土中地下水浸泡区则采用全浸泡试验模拟。

6.2 试验设备

6.2.1 规定了环境模拟试验设备的基本功能要求，温度和湿度控制要求。

6.2.2 规定了硫酸根离子含量测定所用仪器应符合的要求。

6.2.3 规定了测量试件膨胀的千分表或电子式位移计的量程及精度测量。

6.2.4 规定了测量试件质量所需电子秤的量程及测量精度。

6.2.5 规定了试件尺寸测定所需直尺或钢卷尺的测量精度

6.2.6 规定了试件截面剥蚀深度测定可用游标卡尺或三维激光扫描仪，并规定了测量精度。

6.3 试验试件

6.3.2 平行试件用于测定阶段试验周期试验试件响应。

6.3.3 留取材料强度对比试件，与硫酸盐侵蚀试件进行对比可以确定侵蚀对材料强度影响的程度。

6.3.5 试验时为保证侵蚀介质的侵蚀路径沿一维或二维方式进行，故对试件其它面进行密封处理。同时，也可避免因其他面发生侵蚀而影响结果。当需通过反演建立不同硫酸盐侵蚀损伤程度混凝土的应力-应变本构关系时，需获得硫酸盐侵蚀混凝土棱柱体试件和同龄期末损伤混凝土试件轴压试验的荷载变形关系，故宜采取对侧侵蚀方式以方便进行轴压试验。

6.4 试验方法

6.4.1 采用硫酸钠溶液进行硫酸盐侵蚀试验有利于不同的试验之间进行比较。当结构所处环境中的侵蚀介质为其它硫酸盐时，可以采用对应类型的硫酸盐溶液。采用混凝土结构服役环境中硫酸盐溶液的浓度进行试验，可以再现自然暴露试验的结果。《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T50082 采

用了 5%质量浓度的硫酸钠溶液作为侵蚀溶液，故采用 5%质量浓度有利于与既有成果进行对比。当进行机理性研究时，硫酸盐浓度则由研究者根据需要选定。

6.4.2 试验时，试件中渗出的物质可能会引起溶液 pH 值变化，而溶液 pH 值对侵蚀产物热力学和动力学反应影响显著，为了保障试验侵蚀机理、过程和结果与现场服役状况下退化情况相同，故需保证 pH 值在 6~8 范围内。

6.4.3 提高温度可以加速硫酸根离子扩散以及离子反应速率。为了达到加速硫酸盐侵蚀的目的，试验多选择较高的试验温度，但考虑到无水硫酸钠和十水硫酸钠晶型转化温度，故设定了一个低于该转化温度的值，即 30℃。

6.4.4 相对湿度长期低于 50%时，混凝土中水泥浆体会由于毛细孔中的水分蒸发而干缩，因此在混凝土内部形成损伤，造成混凝土传输性能的较明显变化，因此试验中若无特殊目的，应保证干燥时的相对湿度不低于 50%。对于机理性研究时，相对湿度则可根据研究需要选定。

6.4.5 研究表明，干燥时间与湿润时间比以及干燥时间影响硫酸盐侵蚀混凝土劣化程度。随着干湿比的增加，相同时间内硫酸盐侵蚀混凝土劣化程度先增大后降低。结合干湿制度，确定试验周期为 24h，其中湿润时间为 6h，干燥时间为 18h。

6.4.6 保证试件各表面能够与溶液充分浸泡，同时浸泡时试件表面的水压不会太高。尽量控制试件溶液浸泡时间一致，也减少因水汽蒸发所引起的溶液浓度变化，要求从排出溶液到注入新溶液完成的总时间不大于 60min。

6.4.8 对于全浸泡时间为保持侵蚀时间的便于计算故也选取以天为单位，且宜以 7d 及其整数倍为基准时间。一个干湿循环周期为 24h，为了与全浸泡相对应，故相应的试验总时长宜也为 7d 及其整数倍数。

6.4.9 规定了抗硫酸盐侵蚀试验结束的条件，两个指标只要有一个被超出即可结束试验。

6.5 测试内容与方法

6.5.2 《水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法》GB/T749-2008、《水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法》GB/T749-2008、美国《暴露于硫酸盐中波特兰水泥的潜在膨胀测试方法》ASTM0452-95 和《混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法标准》

T/CECS 762-2020 均以膨胀率作为混凝土硫酸盐侵蚀指标，故本标准参照上述标准将膨胀指标作为混凝土硫酸盐侵蚀评价指标。

6.5.3 硫酸盐侵蚀会导致混凝土试件质量发生变化，侵蚀初期混凝土试件质量增大，随着侵蚀发展其质量降低。在部分标准中，采用了质量变化率作为评价指标。因此，也推荐了该指标参数作为混凝土硫酸盐侵蚀劣评价指标。测试方法参照现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T50082 中的有关规定。

6.5.4 混凝土试件截面剥蚀深度是混凝土表面侵蚀程度及其速率的重要参数，通过特定时间内截面剥蚀深度变化计算相应的侵蚀时间，可为预测混凝土硫酸盐侵蚀耐久性评估和使用寿命的数值模拟提供必要的参数。故本标准推荐该指标参数作为混凝土硫酸盐侵蚀劣评价指标。测试方法参照《混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法标准》T/CECS 762-2020 的有关规定。

6.5.5 混凝土内硫酸根离子侵蚀深度以及侵蚀区域内硫酸根离子含量是评价混凝土内硫酸盐侵蚀状况的重要指标。其测定参考现行国家标准《水泥化学分析方法》GB/T176 的有关规定。

6.5.7 采用混凝土硫酸盐侵蚀模型和 Fick 定律量化混凝土硫酸盐侵蚀状况，试件表面温度、湿度是重要参数。故当试件几何形状较复杂或尺寸较大等原因可能造成试验试件不同部位的表面环境形成差异时，应在试件关键表面处另外设置传感器来监测环境模拟试验室内的温度、相对湿度，以获得准确数据。

6.5.8 溶液中硫酸根离子含量应按现行国家标准《水质硫酸盐的测定重量法》GB/T11899 测定。为了监测溶液 pH 值以便保持溶液 pH 值在 6~8 范围内，宜每 3d 测量溶液 pH 值。

7 混凝土结构冻融试验

7.1 一般规定

7.1.2 吸水饱和的混凝土，当混凝土孔隙水在负温下由水转变成冰，体积膨胀可达 9%以上，对孔壁约束形成膨胀作用。此外，表面张力的作用使混凝土孔隙中水的冰点随孔径减小而降低，大的孔中孔隙水在-1℃到-1.5℃时开始结冰，而孔径很小的凝胶孔中的孔隙水形成冰核温度必须降至-78℃以下，此时冰与过冷水的饱和蒸气压差和过冷水之间的盐分浓度差引起水分迁移而形成渗透压。因此，冻融环境作用下混凝土的破坏是由孔隙水的反复冻结和融化的循环过程导致的由表及里的层层剥蚀破坏。影响混凝土冻融破坏程度的因素包括混凝土饱水程度、最低冻结温度、冻结速度、冻融循环次数、盐水浓度等。冻结温度越低，冻融破坏越严重。相对湿度大或者降水丰沛的环境中，混凝土内的饱水度也相应较高，抗冻能力则相对较低。冻融最低温度越低，有更多的小直径孔隙中的孔隙水被冻结成冰，则混凝土冻融损伤越大。中国水科院关于冻融最低温度对普通混凝土抗冻性影响的试验研究发现，最低温度为-5℃时，水灰比为 0.65 的混凝土能承受 133 次冻融循环；最低温度为-10℃时，仅能承受 12 次；而最低温度为-17℃时，能承受 7 次。降温速度快，混凝土的冻融损伤相对严重，这是因为降温速度快的时候，混凝土内外温差大，造成的温差应力大；同样，冻结后再升温的速度越快，混凝土的冻融损伤也相对严重。自然界的升降温速度相对较慢，一般 $\leq 3^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。标准冻融循环试验的升降温速度较快，一般 $> 6^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。因此标准冻融一次循环试验的混凝土损伤要比自然界一次冻融造成的损伤略为严重。孔隙水中所含盐的浓度大小也影响冻融破坏的程度，有研究表明当孔隙水中盐处于 3%~4%时，引起的冻融破坏最严重；当孔隙水的盐浓度变高或变低时，破坏程度反而会降低。

7.2 试验设备

7.2.1 规定了气冻水融环境作用、气冻盐水融环境作用、水冻水融环境作用和盐水冻盐水融环境作用四种模拟试验设备的基本组成、温度控制要求和温度传感器精度要求。

7.2.2 规定了共振法混凝土动弹性模量测定仪的基本要求。

7.4 试验方法

7.4.1 混凝土内部大部分毛细孔隙中的液态水在-18℃时可以冻结。要使混凝土的更小直径的凝胶孔中孔隙水都冻结，所需的温度需要达到-78℃以下，这对环境发生装置提出过高的要求。

7.4.2 融化温度过高，混凝土表面和被冻结的内部温度差会过大，造成过大温度梯度，形成较大的温度应力。自然暴露环境下混凝土结构表面的温度一般不会太高，借鉴《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/ T50082 规定融化温度为5℃。

7.4.3 相关研究表明（2~4）%氯化钠溶液在冻融循环时产生的混凝土剥蚀破坏作用最严重。当进行机理性研究时，氯盐浓度则由研究者根据需要选定。

7.4.8 规定了气冻水融法试验的方法和步骤。

7.4.9 规定了气冻盐水融法试验的方法和步骤。

7.4.10 规定了水冻水融法试验的方法和步骤。

7.4.11 规定了盐水冻盐水融法试验的方法和步骤。

7.5 测试内容与方法

7.5.1-7.5.2 试验过程中通过监测冻融环境箱中心点和某对角线两端点的温度，确保不同时刻各点的温度差最大值低于 2℃，由此保证环境箱内各点温度的均匀性和稳定性。

7.5.3 规定了试件重量损失率的测定时机和方法。

8 混凝土结构电加速锈蚀试验

8.1 一般规定

8.1.1 电加速锈蚀方法通过在钢筋或钢绞线上通以直流电使钢筋表面发生电解反应，使钢筋快速地形成类似于自然环境或试验室模拟环境下的锈蚀形态。此时钢筋的锈蚀机理和锈后钢筋的物理化学形态与混凝土结构在自然暴露环境下及试验室模拟环境下的均有不同程度的区别。然而通过合理设置电加速锈蚀的试验方法可以使电加速锈蚀后的钢筋锈蚀程度接近自然环境和试验室模拟环境作用下的锈蚀程度。

8.1.2 锈蚀电流密度参数反映钢筋锈蚀的速率。通电持续时间参数即钢筋持续锈蚀的时间。通过控制锈蚀电流密度和通电持续时间来控制钢筋的锈蚀程度。

8.3 试验试件

8.3.3 电加速锈蚀试验过程中，应避免钢筋电线焊接处以及钢筋外伸端发生锈蚀。

8.4 试验方法

8.4.1 处于长期浸泡、内湿外干、外湿内干环境下混凝土试件中钢筋锈蚀宜分别采用全浸泡试验、半浸泡试验、贴面试验或内置辅助电极试验方式进行。

8.4.6 同济大学的分析研究表明，钢筋在混凝土中加速锈蚀时钢筋串联（图 8.4.6-1）与并联（图 8.4.6-2）效果相同，试验中接线宜使用并联，以防止串联时如果线路中某处断路，下根钢筋则不能继续锈蚀。

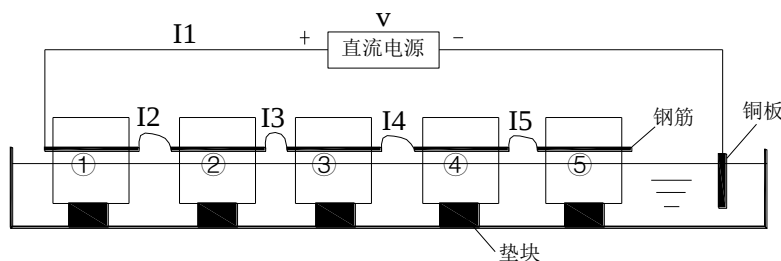


图 8.4.6-1 电加速锈蚀的串联接线方法

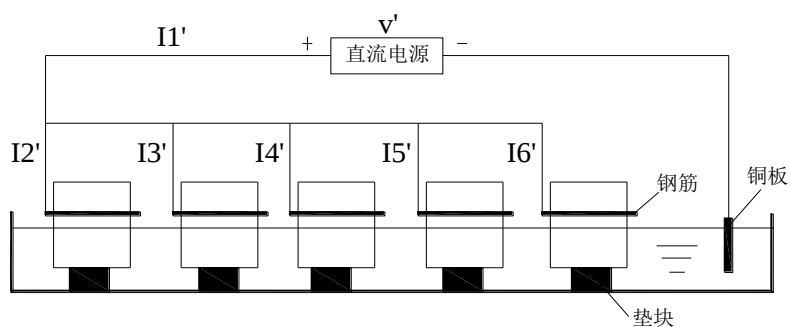


图 8.4.6-2 电加速锈蚀的并联接线方法

8.4.7 当阴阳极满足：（1）辅助电极（不锈钢丝）直径远小于锈蚀钢筋直径；（2）辅助电极（不锈钢丝）与锈蚀钢筋之间相距较近，辅助电极（不锈钢丝）到钢筋表面各点距离差值不可忽略时，钢筋沿纵向不同截面的锈蚀速度和锈蚀形态接近，同一截面的圆周表面上各点电流密度大小各不相同，钢筋沿截面的锈蚀为非均匀锈蚀。

8.4.9 电加速锈蚀时，进入混凝土保护层而到达钢筋表面的氧气量是一定的。当锈蚀电流密度控制得较小时，钢筋电解生成的二价铁离子可以获得较多的氧气，生成三氧化二铁和四氧化三铁，形成与自然环境下钢筋锈蚀相同的保护层锈胀作用，但是锈蚀电流密度过小时，钢筋锈蚀的速度很慢，试验时间过长。当锈蚀电流密度很大时，钢筋电解生成的二价铁离子无法获得足够的氧气，以二价铁离子形式直接进入电解溶液池，无法形成对混凝土保护层的锈胀作用。综合考虑锈蚀结果形态与自然锈蚀一致性和试验时长，要求通电锈蚀电流密度不高于 $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

9 混凝土结构自然暴露试验

9.1 一般规定

9.1.1 混凝土结构性能演化试验方法包括试验室内模拟环境试验和自然暴露试验。自然暴露试验在与结构服役的自然环境下进行试验，相比试验室内人工模拟的环境中进行的试验，能更真实地获得混凝土结构在自然环境下的性能演化规律，可直接获得混凝土结构的实际寿命。因此，当时间和其它条件允许时应该优先采用自然环境暴露试验方法。

9.2 试验场地

9.2.1 通过搜集试验场地气候环境条件、水文条件等已有资料可以快速获得场地的环境作用。当已有资料不足时，应通过现场调查和测量补充获得所需环境信息。

9.2.2 规定了自然环境暴露试验场地选择的基本原则：应能代表某种暴露试验类型的典型自然环境气候条件，或者与实际混凝土结构工程尽量接近的使用环境。

9.2.3 我国的盐渍土分布区域主要有东南滨海地区和西部内陆地区，成为盐渍土暴露试验场地选择的重要依据。

9.2.4 我国大陆海岸线长度18000多千米，拥有大小海洋岛屿6500多个。海洋暴露试验场地既要为我国大陆地区的工程建设服务，也要我国各类海洋岛屿的开发建设服务。对于海洋环境，由于受到风浪作用的影响，根据混凝土结构表面与海平面的高度差，分为四个区域：大气区、浪溅区、潮汐区和水下区。

9.2.5 混凝土材料和结构发生冻融破坏的条件是存在环境的正负温度交替变化和与水接触的结构表面环境，我国“三北”地区混凝土结构存在典型的冻融破坏现象，有必要将暴露试验场地安排在我国东北、华北和西北地区存在自然冻融循环作用的河岸、水库或海边。为了满足冬季冰雪天气条件下的公路和机场正常运行，公路抛撒以除冰盐，机场跑道喷洒除冰液，将造成混凝土路面、桥梁、隧道和机场跑道的以表面逐层剥蚀为主要特征的除冰盐（液）冻融破坏，这种盐冻破坏有别于一般水环境的冻融破坏，借鉴欧洲的盐冻暴露试验场地的选择经验，选择我国三北地区的高速公路的路边。在该位置规则排列的混凝土结构暴露试件能够既能够受到快速行驶汽车轮胎所飞溅的含除冰盐雪水冻融冲

击影响，又不影响车辆交通和道路维护保养。

9.3 试验设备

9.3.1 规定了加载装置和支撑装置应该满足《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152和《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152的有关要求。

9.3.2 规定了量测设备的基本要求，应该满足耐久性和可靠性要求。

9.3.3 现有温度测量仪器系统的测量精度比较高，普遍满足低于 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 的要求。相对湿度测量仪器系统的测量精度参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2009)11.0.4条第2款的要求。

9.3.4 一般农村室外大气中二氧化碳浓度为0.03%，城市室外大气为0.04%，室内可达0.1%。规定二氧化碳浓度测试系统的测量精度相对误差为 $\pm 6\%$ 是合适的。

9.3.5 规定了太阳辐照度的测量精度。

9.3.6 常用电化学工作站的电位和电流测量分辨率均为满量程的0.0015%，均满足条文规定的钢筋锈蚀电流密度测量系统的线性极化法测量精度要求。

9.3.7 采用千分之一感量的天平称量钢筋质量，称量精度为 $\pm 0.01\text{g}$ 。

9.3.8 规定了钢筋表面形态3D扫描测量系统的测量精度。

9.3.9 按照市售微型温湿度传感器采集系统的测量精度制定。

9.4 试验试件

9.4.1 规定各种试件须符合本标准第3.4.1条所列各类试件的尺寸、形状、数量和其它要求。

9.4.2 当自然暴露试验的试件和室内环境作用效应试验的试件在形状、尺寸、材料、浇筑和养护方法均完全一样时，进行试验结果对比和验证不用考虑尺寸效应、边界效应等不利因素的影响，效果最理想。

9.4.3 平行的材料试件可用于阶段试验周期中开展试验试件响应的全面检测。

9.4.4 实践表明自然暴露环境的恶劣情况往往超出想象，在长期的试验过程中，常常会发生暴露试件的意外损坏和丢失，导致数据缺失甚至影响了整个暴露试验的进程。条文规定了暴露试件的保护措施，以避免试件被移动位置或损坏，避免受到考察环境作用以外的意外因素影响。

9.4.5 自然暴露试验周期长，试件种类多，且易受各种因素影响而移位而引起试

件混淆，标记清晰、分区明确是最基本的试验要求。

9.5 试验方法

9.5.1 参考本标准3.1.2条对各环境类别进行分区。规定了冻融环境、海洋氯盐环境、硫酸盐环境和盐渍土环境应确定高程范围的环境分区。一般环境可不按高程进行分区，但可根据受环境直接影响程度的不同分为室内环境和室外环境两种，其中室外环境由于雨淋作用而具有干湿循环现象。

9.5.3 规定了一般环境暴露试验中结构试件设计应考虑的主要环境因素。一般环境中室内主要受人类活动的影响，二氧化碳浓度相比室外大气环境较高，室内温度和湿度受人工空气调节影响显著，但环境条件的变化总体较为平缓，相对接近恒定环境条件。室外则由于受太阳辐射的时长和角度不同，试件不同部位的表面温度不同；被雨淋和浸泡的时长不同，则试件不同部位的干湿循环情况不同；风向和风力既影响室外结构表面的二氧化碳浓度，也影响其干湿循环情况。

9.5.4 规定了冻融环境暴露试验中结构试件设计应考虑的主要环境因素。

9.5.5 规定了海洋氯盐环境暴露试验中结构试件设计应考虑的主要环境因素。

9.5.6 规定了硫酸盐暴露试验和盐渍土暴露试验中结构试件设计应考虑的主要环境因素。

9.5.7 以潮位不变的海洋环境自然暴露试验的方法设计为例，说明在自然环境中进行特殊试验的方法实现。

9.5.8 当自然暴露试验需要同时考察混凝土材料试件、混凝土中钢筋试件、混凝土中钢绞线试件和混凝土结构试件在相同自然环境中的性能演化时，要求这些不同种类的试件必须具有相同的暴露环境。当材料试件堆放于构件试件上时，可以作为构件试件的荷载，但是应注意这样的荷载是明确的，不易因外界环境变化而变化。对于不受力的材料试件、构件试件和结构试件，则应避免其受到意料之外的荷载。

9.5.9 规定了自然暴露试验时混凝土构件试件静力加载的方式。

9.6 测试内容与方法

9.6.1-9.6.2 鉴于自然环境的复杂性和不可预料性，对自然暴露试验场地上的主要

环境作用进行监测或定期检测，对试验现场试件和环境条件的远程监控，均很有必要。当出现异常必须进行及时维护。

9.6.3~9.6.6 规定了不同自然暴露环境下需要测试的内容。

10 侵蚀混凝土力学性能试验

10.1 一般规定

10.1.1 被侵蚀混凝土截面不同部分力学性能存在差异的情况，如一般大气环境、氯离子侵蚀、硫酸根离子侵蚀、冻融损伤，宜根据本章提出的方法测试不同损伤程度混凝土的力学性能。

10.2 试验设备

10.2.2 对试验机的要求，在国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T50081 中有详细规定。

10.2.3 本条参照现行国家标准《混凝土结构试验方法标准》GB50012 给出了常用的应变测量仪表，对各种应变测量仪表的精度及性能提出了要求。

10.3 试验试件

10.3.2 采用对侧侵蚀方式，使试件受侵蚀截面对称，便于轴压试验对中。

10.3.3 标准养护的对照组试件，可用于对比侵蚀混凝土力学性能下降程度。

10.4 试验方法

10.4.1 侵蚀试件力学性能测试周期宜与环境作用效应测试周期保持一致，便于建立力学性能变化与环境作用效应表征参数的关系。

10.4.2 规定了试件在受力试验前应该进行的外观尺寸检查工作内容和试件破损后的处理方法。试件表面严重破损后应采用高强石膏等材料找平后再进行抗压强度试验，保证力学性能测试结果的准确性。

10.4.3 规定当需通过反演方法获取侵蚀混凝土应力-应变关系时，应记录轴压或轴拉试验的全过程曲线。

10.5 测试内容与方法

10.5.1 侵蚀后全截面混凝土损伤程度基本均匀的典型例子是碱集料反应引起的损伤混凝土。由于碱集料是浇筑混凝土时内掺而来，因此引起混凝土相对均匀的内部损伤。

10.5.2 被侵蚀后可将混凝土沿横截面分为侵蚀混凝土和未侵蚀混凝土两部分，未被侵蚀的部分性能一致，而被侵蚀的部分损伤程度基本均匀的典型例子有碳化混凝土、油浸混凝土、氯离子侵蚀混凝土。

10.5.3 被侵蚀后可将混凝土沿横截面分为侵蚀混凝土和未侵蚀混凝土两部分，未被侵蚀的部分损伤程度基本均匀，而被侵蚀的部分存在表层脱落的典型例子是冻融损伤混凝土。

10.5.4 被侵蚀后可将混凝土沿横截面分为侵蚀混凝土和未侵蚀混凝土两部分，被侵蚀部分损伤程度存在梯度，而未被侵蚀的部分损伤程度基本均匀的的典型例子为盐酸侵蚀混凝土、表层脱落不明显情况下的硫酸盐侵蚀混凝土。

10.5.6 被侵蚀后表层混凝土脱落，而未脱落的被侵蚀混凝土损伤程度存在梯度的典型例子为表层脱落的硫酸盐侵蚀混凝土。

11 锈蚀钢筋与混凝土间粘结性能试验

11.1 一般规定

11.1.1 钢筋与混凝土间的粘结作用由化学胶着力、摩擦力和机械咬合力三部分组成，光圆钢筋的粘结作用主要由前两者构成，而机械咬合力是变形钢筋粘结作用的主要组成部分。钢筋锈蚀后钢筋几何形貌发生改变，界面上形成锈蚀产物层，锈蚀产物体积膨胀导致混凝土保护层开裂都会对粘结作用的各组分产生影响。

11.2 试验试件

11.2.1 试验研究是钢筋和混凝土间粘结问题的主要研究手段。由于粘结问题的复杂性和特殊性，当前大部分粘结试验都不能完全充分地反应工程实际构件中的粘结状态。目前常用的粘结试件形式主要包括拉拔或压出试件、梁式试件和半梁式试件等，每一种试件都有自身的优缺点，应根据试验目的和试验条件选用合适的粘结试件形式。

11.2.2 拉拔试件是应用最为广泛的试件形式。对于锈蚀钢筋的拉拔试验，锈蚀钢筋的获取往往要求较薄的保护层厚度，因此锈蚀钢筋多偏心放置于拉拔试件中。

11.2.3 钢筋与混凝土之间的粘结性能受众多因素影响，包括混凝土强度、保护层厚度与钢筋间距、粘结长度、钢筋直径、钢筋表面形状、钢筋浇筑位置、横向钢筋、侧向压力等。锈蚀钢筋与混凝土间的粘结性能还受到钢筋锈蚀率、钢筋锈蚀方法及环境参数、锈蚀钢筋几何形貌等的影响。此外，加载速率等也会影响粘结性能试验结果。因此，在试验设计时应以探究影响因素为主要变量进行试件设计。《混凝土结构试验方法标准》GB 50152-92 中规定钢筋与混凝土粘结强度对比试验拔出试件数量每组应制作 6 个；《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081-2019 中也规定混凝土与钢筋的握裹强度试验应以 6 个试件为一组。考虑到钢筋锈蚀试验阶段的多个测试时间点，可适当减少锈蚀钢筋拉拔试验的每组试件数量，但不宜少于三个。

11.2.4 拉拔试件尺寸的确定需考虑钢筋直径及混凝土保护层厚度，但不宜小于混凝土材性标准试件尺寸。变形钢筋的横肋与混凝土齿的机械咬合作用是粘结

作用的重要组成部分吗，因此其横肋形状应具有代表性。当需要较高钢筋锈蚀率试件时，钢筋直径不宜过小以避免锈蚀钢筋拉断发生在粘结破坏之前，但钢筋直径过大会延长环境作用达到设定锈蚀率所需要的时间。根据“CEB-fib bulletin 10 – Bond of reinforced concrete”中的相关条文规定，当粘结长度小于等于5倍钢筋直径时，粘结应力沿钢筋纵向分布相对均匀，可将平均粘结应力-滑移本构关系作为局部粘结应力-滑移本构关系。实际工程中粘结失效构件中钢筋周围的混凝土一般受拉，而拉拔试件中加载端混凝土受压，且试件承压面与底板之间存在摩擦力，故应在加载端设置非粘结段。

11.2.5 为了使粘结段钢筋真实锈蚀率比较接近设计值，应对非粘结段钢筋及箍筋进行防锈处理。钢筋在试件中应精准定位以保证保护层厚度满足设计要求并确保钢筋垂直于承压面。非粘结段塑料套管与钢筋间应密封防止泌浆，确保真实的无粘结状态。劈裂破坏试件的劈裂裂缝往往从纵肋位置发生萌生并发展。混凝土的浇筑、振捣与养护应满足相关要求以确保混凝土质量。

11.2.6 混凝土中锈蚀钢筋的获取包括一般环境下钢筋锈蚀、氯盐环境下钢筋锈蚀和电加速锈蚀方法，分别参考本标准第4、5、8章的内容。

11.2.7 采用电加速锈蚀方法时采用半浸泡法或贴面法能避免试件完全浸没在盐溶液中，在保证氧气含量充足的同时能避免锈蚀产物外逸。

11.2.8 钢筋锈蚀试验后力学试验前，按钢筋锈蚀情况和混凝土保护层开裂情况可分为未锈蚀、锈而未裂、部分锈胀开裂和完全锈胀开裂的四个阶段。钢筋锈胀和粘结作用均可能使混凝土保护层产生纵向劈裂裂缝。为了衡量钢筋锈蚀对粘结性能的影响，应将钢筋锈胀产生的锈胀裂缝宽度与粘结作用下产生锈胀裂缝的扩展做区分。因此锈蚀钢筋混凝土粘结试件在完成钢筋锈胀开裂后、粘结作用加载前应该测量并记录由于钢筋锈胀产生的裂缝分布及宽度。

11.3 试验设备

11.3.2 加载装置的框架应具有满足刚度要求，必要时可在下端钢板上增设承压垫板；加载过程中应保持钢筋轴线与试件承压面相互垂直可以避免钢筋受弯，当钢筋仅受拉力作用时，可以使钢筋周围混凝土均匀受力，粘结应力分布更均匀。

11.3.3 梁式试件中的粘结性能的观测为非纯弯段，因此应根据梁式试件设计和试验目的选择跨中单点加载或三分点加载方式。

11.4 试验方法

11.4.1 变形钢筋在发生拔出粘结破坏时，钢筋肋前混凝土往往发生压剪破坏，粘结应力达到最大值前钢筋与混凝土的相对滑移很小，一般自由端滑移只有 0.1~0.2mm；而粘结应力达到峰值之后粘结应力快速下降，相对滑移快速发展。因此， $\tau - s$ 曲线下降段，较小的应力增量就会引起很大的位移，宜采用位移控制。当混凝土保护层出现明显锈胀裂缝后，混凝土保护层横向约束能力大幅减弱，粘结破坏表现得更加脆性，故宜适当降低加载速度。

11.4.2 当钢筋与混凝土间的粘结性能过强或受拉钢筋直径较小时，可能在粘结破坏前发生钢筋受拉屈服；当钢筋锚固失效或严重劈裂破坏后则不再能继续承载；对于一般变形钢筋的粘结性能试验，随着钢筋与混凝土间的相对滑移增长，混凝土齿被剪碎，钢筋横肋与混凝土齿间的机械咬合力丧失，最终残余粘结应力主要由摩擦力提供，粘结应力-滑移曲线下降段最终趋于水平。

11.4.3 钢筋锈蚀率较高或混凝土保护层锈胀开的粘结试件其粘结强度降低且破坏形式更为脆性，粘结强度离散性增大，试件实际粘结强度可能低于疲劳荷载设计最大值。混凝土保护层锈胀开裂后粘结疲劳性能显著下降，疲劳寿命缩短，考虑到数据采集要求和避免试件突然破坏，宜采用较低疲劳荷载频率。

11.4.4 第一种情况适用于试件承受疲劳荷载直至发生粘结疲劳破坏的情况，用于探究粘结疲劳寿命及疲劳损伤累积。第二种情况适用于获取具有一定粘结疲劳损伤的试件，用于探究疲劳损伤对残余粘结性能的影响。

11.5 测试内容与方法

11.5.1 锈蚀钢筋粘结性能试验中通过测量钢筋拉拔力和相对滑移可以获得粘结应力-滑移曲线。钢筋自由端滑移应测量钢筋自由端与自由端对应混凝土表面间沿钢筋轴线的相对位移值。位移计测量轴线平行且靠近钢筋轴线可提高相对滑移的测量精度，排除混凝土变形等引起的测量误差。

11.5.2 除了钢筋自由端相对滑移外，当粘结长度较长时还应该测量加载端相对滑移。此外，对于劈裂破坏试件，测量混凝土表面应变和裂缝宽度可以用于衡

量混凝土保护层受拉损伤程度，但应区分钢筋锈胀和粘结性能试验加载导致的保护层混凝土受拉损伤。

11.5.3 为了探究疲劳荷载作用下相对滑移的发展应获取每个周期内荷载峰值对应的相对滑移值，使得滑移值随疲劳加载次数的发展具有纵向可比性。

11.5.4 加载端相对滑移应为有效粘结段端点处的相对滑移，但粘结性能试验中的加载端位移计固定在受拉钢筋上，故应扣除加载端的非粘结段以及位移计固定点到混凝土表面部分的钢筋受拉变形。

11.5.5 钢筋与混凝土间的粘结作用是从加载端向自由端发展的，当粘结段长度较长时，相对滑移从加载端到自由端也逐渐减小。因此，当同时测量加载端和自由端相对滑移时，应取平均值作为钢筋与混凝土间的相对滑移。

11.5.6 初始已锈胀开裂的粘结性能试件在加载过程中锈胀裂缝宽度增加而几乎不产生新裂缝；初始未明显锈胀开裂的试件，粘结试验中的劈裂裂缝通常在最薄保护层处产生并扩展。

11.5.7 锈蚀钢筋的粘结性能试验中应当测量钢筋的真实锈蚀率，以分析钢筋锈蚀率对粘结性能的影响。

11.5.8 该式计算得到有效粘结长度内的平均粘结应力；粘结-滑移关系试验可视为粘结应力均匀分布，局部粘结应力接近平均粘结应力。

11.5.10 钢筋与混凝土间粘结应力-滑移曲线的特征点包括初始滑移阶段、峰值点和残余阶段。钢筋与混凝土间发生相对滑移前粘结作用主要由化学胶着力提供，而粘结应力-滑移曲线最终水平段的残余粘结应力由摩擦力提供。

11.5.11 相对滑移是疲劳荷载作用下粘结性能演化的重要指标，也是拔出破坏模式下发生疲劳粘结破坏的判断准则；相对滑移随荷载周期的增长呈现三阶段增长规律且在整个疲劳寿命周期内具有较好的对称性，前半段可按指数型函数描述其增长规律。此外，对于劈裂破坏也可进行混凝土表面应变和表面裂缝宽度随荷载循环次数的增长规律分析。

12 混凝土保护层锈胀开裂试验

12.1 一般规定

12.1.1 混凝土保护层锈胀开裂试验是钢筋锈蚀过程中以混凝土保护层为观测对象，观察钢筋锈蚀引起混凝土保护层开裂甚至剥落的过程。

12.1.2 一般环境和氯盐侵蚀环境下，混凝土中的钢筋锈蚀往往开始于面向保护层一侧，然后逐步往里发展，钢筋横截面锈蚀形态不断发生变化。对于中部钢筋，不同时刻钢筋圆周上锈层厚度的峰值总出现在最靠近保护层表面的位置；对于角部钢筋，锈层厚度的峰值最先出现在对角线处，然后逐渐转移到锈胀裂缝开展的位置而呈现两个峰。钢筋在混凝土构件中的位置不同导致混凝土保护层锈胀开裂的现象有所差异。在钢筋混凝土结构服役过程中，有害介质侵入混凝土内部破坏钢筋表面钝化膜引发钢筋锈蚀，钢筋锈蚀产物体积膨胀在钢筋/混凝土界面上产生挤压力进而导致混凝土保护层受拉开裂。锈胀裂缝首先在钢筋周围的混凝土内界面产生，后由内向外逐渐发展直至贯穿混凝土保护层。混凝土表面开裂后，裂缝宽度随钢筋锈蚀率增加而扩宽。

12.2 试验试件

12.2.2 在自然暴露环境和人工模拟环境下，混凝土碳化和氯离子侵蚀都是十分缓慢的过程。减小混凝土保护层的厚度能缩短氯离子到达钢筋表面的所需的时间，进而提前钢筋起锈时间。同时，较薄的保护层有利于氧气在混凝土中的传输，使加速试验中钢筋周围的氧气含量相对充足，更接近自然锈蚀的情况。因此，总结根据已有试验的构造要求和取值经验，建议值保护层厚度取为 1~2.5 倍钢筋直径。

12.2.3 浇筑前的钢筋锈蚀不会对混凝土产生内胀力，但会影响试验后的钢筋锈蚀率实测值，因此试件浇筑前应进行除锈处理。

12.2.4 固定钢筋位置是为了减小混凝土保护层厚度实际值与设计值的误差，而保持与试件轴线平行是为了保证保护层厚度沿钢筋纵向均匀分布。

12.2.5 试件浇筑后混凝土应进行标准养护以保证混凝土质量。

12.2.6 一般环境及氯盐环境中的氯离子传输和钢筋锈蚀是一个缓慢的过程，中部钢筋与角部钢筋因为几何位置不同导致周边氯离子分布不同，中部钢筋的氯

离子传输近似于以为传输而角部钢筋的氯离子传输为二维传输。中部钢筋不同时刻钢筋圆周上锈层厚度的峰值总出现在最靠近保护层表面的位置；角部钢筋，锈层厚度的峰值最先出现在对角线处，然后逐渐转移到锈胀裂缝开展的位置而呈现两个峰。钢筋锈蚀形态的不同可能导致混凝土保护层锈胀开裂的现象有所差异。

12.3 试验方法

12.3.4 一般环境和氯盐环境中的锈胀开裂试验与混凝土中的氯离子传输紧密相关，考虑侵蚀溶液的重力作用或盐雾的沉降，将最薄保护层所在的表面朝上放置有利于氯离子传输。中部钢筋的氯离子传输近似于以为传输而角部钢筋的氯离子传输为二维传输，通过采用环氧树脂密封不同的混凝土表面可以实现一维或二维氯离子传输，进而模拟中部或角部钢筋的锈胀开裂。

12.3.5 采用半浸泡法和贴面法进行电加速锈蚀方法，由于混凝土保护层处于非完全饱和状态，空气中的氧气可以进入到钢筋表面，使电加速锈蚀过程中的铁离子与氧气发生反应，形成不易溶于水的氧化产物，部分保留在混凝土中，形成类似于自然环境条件下的钢筋锈蚀氧化产物，避免了钢筋通电后的二价铁离子基本全部被直接带到溶液中，无法在混凝土保护层内形成锈胀开裂效果。

12.4 测试内容与方法

12.4.1 传统的混凝土保护层锈胀开裂试验通过裂缝观测获取从钢筋锈蚀到混凝土保护层表面开裂时刻对应的钢筋锈蚀量和锈胀开裂后混凝土表面裂缝宽度随钢筋锈蚀率的发展规律。目前，电化学工作站、EDS 能谱分析、CT 扫描等监测手段实现了混凝土中的钢筋锈蚀、混凝土保护层内部裂缝发展的监测，为混凝土保护层锈胀开裂的全过程监测提供了技术手段。

12.4.2 此条文中不同量测内容提供的量测方法可供参考，应根据试验条件和试件状况选用合适的量测方法。

12.4.3 电化学分析法是相对简单准确的混凝土中钢筋锈蚀无损测量方法，通常的测量参数包括锈蚀电流和极化电阻，其中锈蚀电流仅适用于长时间连续测量，因此目前广泛采用测量极化电阻的方法。常用的极化电阻测量方法包括线

性极化法、交流阻抗法、充电曲线法和方波极谱法等。

13 锈蚀钢筋几何形貌测试与力学性能试验

13.1 一般规定

13.1.1 三维激光扫描仪的工作原理是激光三角法面形测量原理。三维激光扫描仪的激光二极管向被测物体发射近红外波长的激光束，由于被测物表面凹凸不平及曲率变化，投射的光束随此轮廓位置而起伏，通过摄像机图像传感器（Complementary Metal-Oxide Semiconductor, CMOS）获取被测物体表面的影像。这样就可以由激光束的发射角度和其在 CMOS 内的成像位置，根据几何三角关系获取被测物体表面每一个点的 x 、 y 、 z 空间坐标组成的点云图，利用点云数据便可以重构出物体表面任意曲面。

激光三角法面形测量原理如图 13.1.1 所示。点 $P(x, y, z)$ 为被测物体表面上一点，其在 XOZ 平面上的投影为 (x, z) ， P' 为 P 点在摄像机图像传感器 CMOS 上的成像点， P' 在以镜头中心 O 为原点的坐标系中的坐标为 (u, v) ， f 为摄像机的焦距， b 为光源中心与摄像机中心的距离， θ 为 P 点与光源中心连线同 X 轴的夹角。

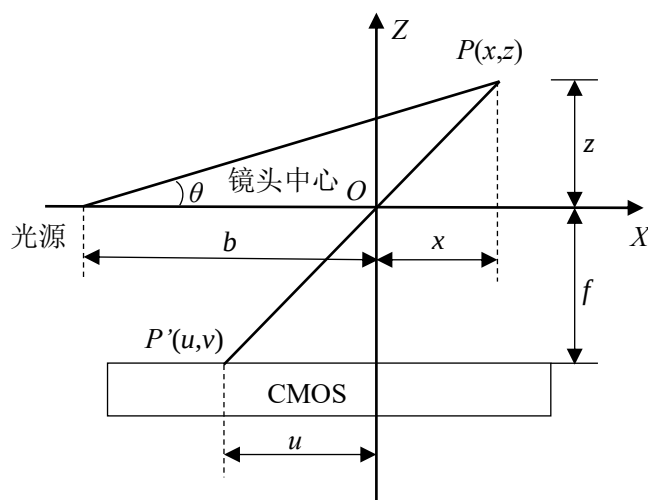


图 13.1.1 激光三角法面形测量原理

根据图中的几何相似关系，可以由以下各式求得 P 点的三维坐标值：

在 XOZ 平面上有：

$$\frac{f}{u} = \frac{z}{x} \quad (13.1.1)$$

$$\cot \theta = \frac{(b+x)}{z} \quad (13.1.2)$$

联立式(13.1.1)和式(13.1.2)可求得 P 点的 x 、 z 坐标:

$$x = \frac{bu}{f \cot \theta - u} \quad (13.1.3)$$

$$z = \frac{bf}{f \cot \theta - u} \quad (13.1.4)$$

同理, 在 YOZ 平面上有:

$$\frac{f}{v} = \frac{z}{y} \quad (13.1.5)$$

联立式(13.1.4)和式(13.1.5)可求得 P 点的 y 坐标:

$$y = \frac{bv}{f \cot \theta - u} \quad (13.1.6)$$

由以上各式可以求得被测物体表面任意一点的三维坐标值, 同理, 可以测得被测表面每一点的三维坐标值, 获得被测物体表面点云数据, 并利用点云数据建立被测物体的三维几何模型。

13.2 试验设备

13.2.3 钢筋表面形态三维扫描系统可选用三维结构光扫描仪, 三维结构光扫描能同时测量一个面, 扫描速度更快, 精度更高, 可达 0.03 mm。

13.3 试验试件

13.3.3 锈蚀钢筋试件长度可以根据试验机的范围合理选取, 一般不少于 300mm, 锈蚀段长度不少于 200mm。

13.4 试验方法

13.4.2 锈蚀预应力钢绞线三维形貌测量方法适用于预应力混凝土用钢绞线中 1×7 结构钢绞线。对于没有中丝的 1×2 结构钢绞线和 1×3 结构钢绞线, 将锈蚀钢绞线披散后可按 13.4.1 的规定获取每根钢丝表面的点云数据, 再拟合螺旋轴, 并构建锈蚀钢绞线的三维几何模型。

13.4.3 在进行锈蚀钢绞线拉伸试验时, 可在夹具与钢绞线之间垫一粘有金刚砂的铝片, 拉伸过程中, 夹头咬住铝片, 铝片紧密包裹住钢绞线, 接触面较大,

形成很大摩擦力，避免了钢绞线打滑或脆性断裂。

13.5 量测内容与方法

13.5.1~13.5.3 锈蚀钢筋锈蚀率的测试方法可根据研究需要选择。称重法或排水法一般用于确定锈蚀钢筋平均锈蚀率，最大界面锈蚀率一般用于分析锈蚀钢筋断裂截面的力学规律。

13.5.4 关于锈蚀钢筋锈蚀锈坑形态，通过对大量锈坑曲线进行拟合，发现用双曲线对锈坑纵向曲线 1 和横向曲线 2 进行拟合可以获得最佳拟合结果，如图 13.5.4 所示。

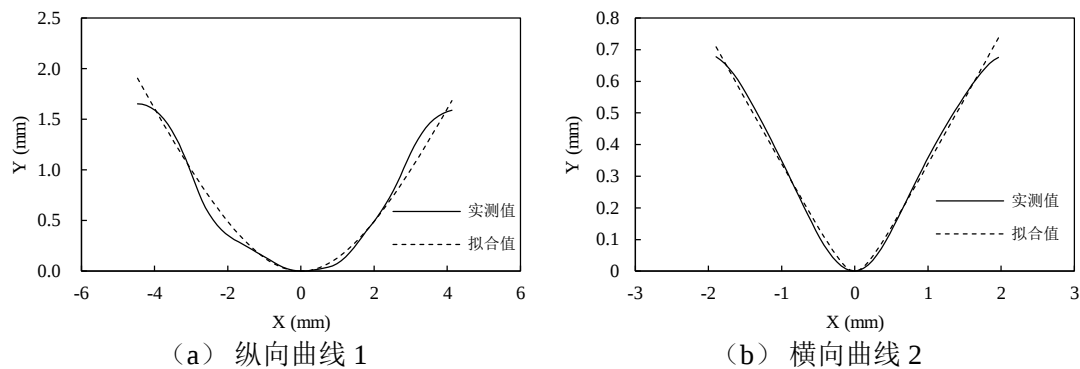


图 13.5.4 典型锈坑曲线及其拟合曲线

13.5.7 同济大学根据自相关分析方法对钢筋横截面积分布进行相关性分析表明，对于不同直径的钢筋当分段长度取为 50mm 时，自相关函数值能低于 0.3，及各个截断长度之间的相关性较弱。锈蚀钢筋延长度方向的锈蚀不均匀系数 R 服从 Gumbel 极值分布，其分布参数不仅与锈蚀钢筋平均锈蚀率相关，同时受截断长度影响。

13.5.8 研究发现锈蚀钢绞线中，中丝和边丝的平均锈蚀率的比值是一个不随平均锈蚀率变化的随机变量，其影响因素可能与锈蚀条件、钢绞线型号相关，需要进一步研究。

14 环境作用效应试验后混凝土结构受力性能试验

14.2 试验试件

14.2.2 混凝土结构试件开展了本标准第 4 章~第 9 章的一种环境作用效应试验后, 受到了环境作用的不同程度影响, 然后利用本章的试验方法对该试件进行加载, 获得试件的力学性能。

14.3 试验设备

14.3.2 本标准附录 E.1 中推荐了一种常规落锤冲击试验装置。由于不同构件尺寸不一致, 其承载能力和耗能能力也不同, 落锤高度需要调整。本标准附录 E.2 中推荐了一种常规落锤冲击试验机锤头。本标准附录 E.3 中推荐了一种常规试验支座装置。

14.4 试验加载

14.4.1 规定了试验试件在环境作用效应试验后应记录混凝土裂缝、钢筋锈蚀、变形等状态。

14.4.2 规定了试验试件的混凝土和钢筋的应变测量装置的安装方法。

14.4.4 加载试验前应通过测试的试件材料强度对构件受力性能进行预估, 得到具体的加载控制值。

14.5 试验量测

14.5.1 规定了环境作用效应试验后单调加载试验、反复加载试验和疲劳加载试验的量测内容和方法。

14.5.2 规定了环境作用效应试验后冲击试验的量测内容和方法。

14.6 数据处理与分析

14.6.1 规定了冲击试验中冲击能量的计算方法。

14.6.2 规定了冲击试验中冲击试验荷载特征值冲量 I_P 、耗散能量 E_P 和平均冲击力 P_m 的计算方法。

附录 A 模拟一般环境作用与自然一般环境作用的相似性

A.0.1 式(A.0.1)系采用《混凝土结构环境作用与区划标准》附录 G 的碳化深度计算模型，按本标准 3.4 节规定确定的。

附录 C 模拟氯盐环境作用与自然氯盐环境作用的相似性

C.0.1 式(C.0.1)系采用《混凝土结构环境作用与区划标准》附录 J 的临界氯离子含量侵蚀深度计算模型，按本标准 3.4 节规定确定的。