



中华人民共和国国家标准

GB/T 46613—2025

金属和合金的腐蚀 海洋环境全腐蚀区 混凝土结构中钢筋锈蚀测定及评定方法

Corrosion of metals and alloys—Test and evaluation for the corrosion of
steel bar embedded in concrete structure exposed to total corrosion
zones in marine environments

2025-10-31 发布

2026-05-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 试验条件 2

5 试验设施 2

6 材料及试剂 5

7 试件制备 5

8 测试步骤 8

9 试验维护 10

10 试验报告 11

附录 A (资料性) 3D 扫描结果及分析示例 12



前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国钢铁工业协会提出。

本文件由全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183)归口。

本文件起草单位：中国二十冶集团有限公司、冶金工业信息标准研究院、北京科技大学。

本文件主要起草人：徐宁、李倩、李晓刚、张佶、侯捷、杜翠薇、许海岩、田子健、赵建立、孙梦寒、巩俊松、魏尚起、李晓龙。



金属和合金的腐蚀 海洋环境全腐蚀区 混凝土结构中钢筋锈蚀测定及评定方法

警示——本文件涉及模拟全腐蚀区环境试验设施,操作人员进入试验设施存在触电风险,因此使用本文件的人员应采取避免设施漏电的措施。使用本文件的人员应进行岗前培训,试验设施内部设置绝缘橡胶垫、消防栓及必要的电气、消防设备,至少两人交替进入设施。本文件并未指出所有可能的安全问题,使用者有责任采取适当的安全和健康措施,并保证符合国家有关法规规定的条件。

1 范围

本文件规定了海洋环境全腐蚀区混凝土结构中钢筋锈蚀的测定及评定方法,包括试验条件、试验设施、材料及试剂、试件制备、测试步骤、试验维护和试验报告。

本文件适用于氯化物为主要腐蚀环境下混凝土结构中的钢筋锈蚀试验和评定。

本文件包括以下两种钢筋锈蚀测定方法,使用时按照实际条件进行选择。

方法 A——三维激光扫描法。通过钢筋锈蚀前后钢筋截面变化来描述钢筋腐蚀状态。

方法 B——失重法。通过钢筋锈蚀前后平均重量损失率来描述钢筋腐蚀状态。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 175 通用硅酸盐水泥

GB/T 5462 工业盐

GB/T 6682 分析实验室用水规格和试验方法

GB/T 10125 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验

GB/T 16545—2025 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除

GB/T 50152 混凝土结构试验方法标准

GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范

JGJ 52 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准

JGJ 55 普通混凝土配合比设计规程

JGJ/T 322 混凝土中氯离子含量检测技术规程

3 术语和定义

3.1

全腐蚀区 total corrosion zones

海洋环境垂直方向的所有腐蚀区域,自上而下包括大气区、浪溅区、潮汐区、全浸区和海泥区。

注:浪溅区通常也称为飞溅区,潮汐区通常也称为潮差区。

4 试验条件

4.1 模拟海洋环境试验条件如下：

- a) 氯离子浓度质量分数 1%~10%，建议采用 3%±0.2%；
- b) 实验室环境温度 20℃~40℃，建议采用 25℃±2℃；
- c) 溶液温度 15℃~30℃，建议采用 25℃±2℃；
- d) 每个循环周期 24 h，其中干燥时段和潮湿时段的比值为 1:1~1:5，通常为 1:2。

4.2 试验条件可按照实际要求进行协商。

4.3 为提高腐蚀速率、缩短试验时间，可提高氯离子浓度质量分数、溶液温度或调整干燥时段和潮湿时段的比值开展加速试验。

4.4 溶液温度通过电加热及制冷装置进行控制，实验室环境温度通过空调系统进行控制。试验温度和溶液温度宜保持一致。溶液放置后 3 d 进行试验。

5 试验设施

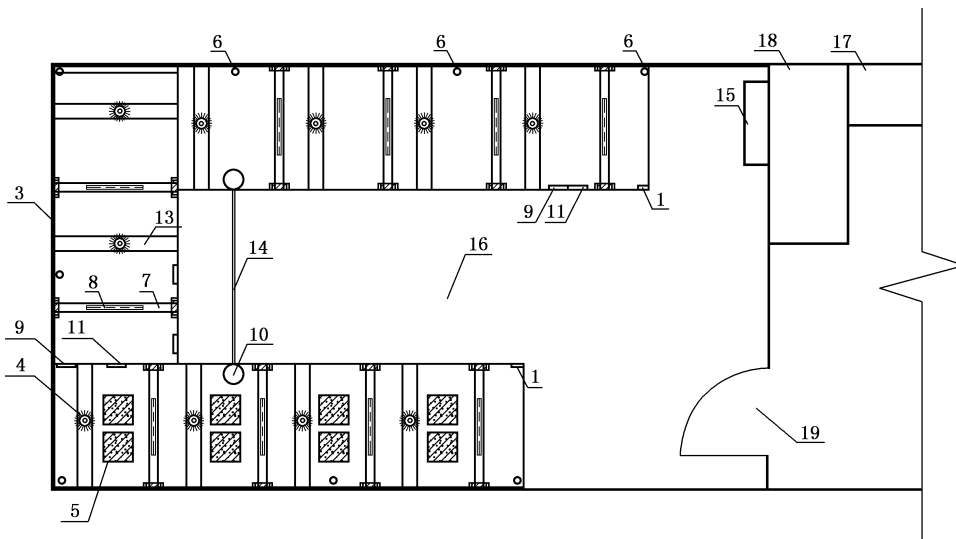
5.1 模拟海洋环境实验室

5.1.1 海洋模拟环境室应能模拟单一腐蚀区或全腐蚀区的海洋环境，包括大气区、浪溅区、潮汐区、全浸区和海泥区的环境条件，包括温度、湿度、盐雾浓度、氯化物溶液浓度、pH 及液位等。

5.1.2 海洋模拟环境室内根据试验时间、试验目的、试件尺寸和数量可划分为不同的试验池区域，每个试验池高度为 0.8 m~1 m。

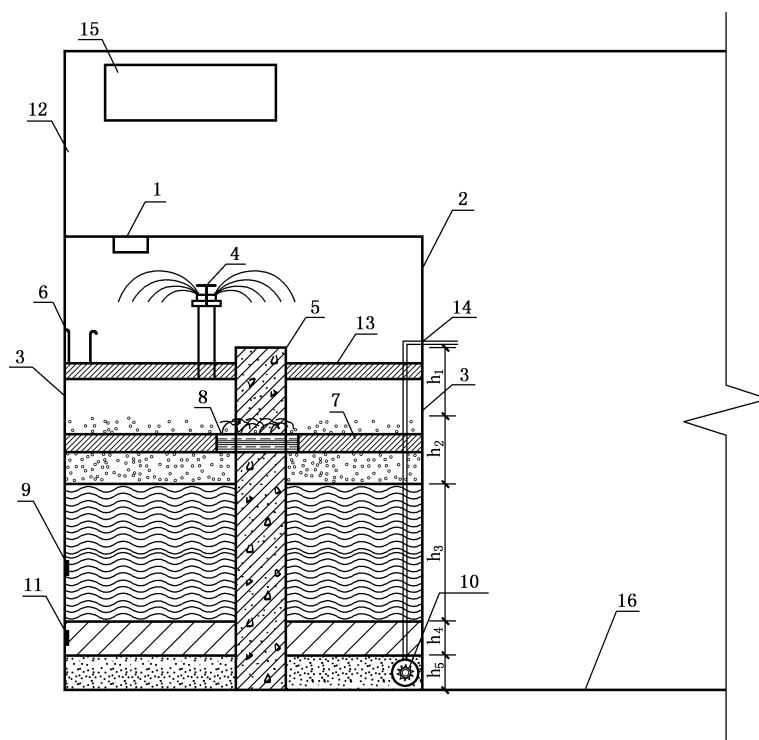
5.1.3 海洋模拟环境室应设置环境参数控制室。环境控制室应包括电控箱、温湿度控制器、盐雾发生装置等。

5.1.4 本文件提出了一种可模拟全腐蚀区的海洋模拟环境室布置形式，如图 1 所示。



a) 实验室内部平面示意图

图 1 模拟海洋实验室内部平、立面示意图



b) 实验室内部立面示意图

标引序号说明：

- | | |
|--------------|----------------|
| 1 —— 温湿度传感器； | 13 —— 试验池连接件； |
| 2 —— 盐雾罩； | 14 —— 水泵连接管； |
| 3 —— 试验池； | 15 —— 温湿度控制装置； |
| 4 —— 盐雾发生器； | 16 —— 实验室人行通道； |
| 5 —— 混凝土试件； | 17 —— 电控箱； |
| 6 —— 烧杯； | 18 —— 温湿度控制箱； |
| 7 —— 造浪支撑架； | 19 —— 实验室入口； |
| 8 —— 造浪装置； | h_1 —— 大气区； |
| 9 —— 电加热装置； | h_2 —— 浪溅区； |
| 10 —— 水泵； | h_3 —— 潮汐区； |
| 11 —— 制冷装置； | h_4 —— 全浸区； |
| 12 —— 环境室； | h_5 —— 海泥区。 |

图 1 模拟海洋实验室内部平、立面示意图（续）

5.2 模拟海洋各腐蚀区装置

5.2.1 大气区：盐雾发生装置

盐雾发生装置可实现连续或周期性的喷雾，喷雾应符合 GB/T 10125 要求。

5.2.2 浪溅区：浪溅装置

浪溅装置应能激起水面波动至设定的高度，应考虑浪溅周期、高度和均匀性等因素。可采用 PVC 管路+水泵的浪溅装置。在试验箱边缘安装多根直径为 100 mm 连接水泵的 PVC 管，并将水泵浸入溶

液中。装置开启时,试验池内的溶液由泵泵入 PVC 管至一定高度后引发浪溅作用拍打在混凝土试件上。

浪溅区用波高衡量海浪冲击强度,模拟波高范围为 0 mm~100 mm。

5.2.3 潮汐区:潮汐装置

潮汐区试验装置应保证水位呈周期性变化,根据试验目的和试验时间的要求设定溶液水位高低的循环机制,包括高低水位高度以及循环周期等。

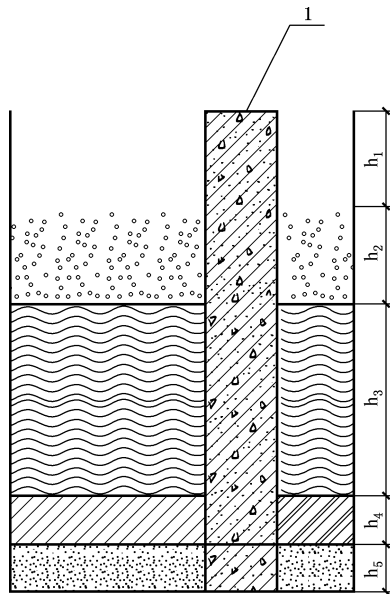
通过在两个试验池中分别布设水泵,在低水位时通过水泵将试验池中溶液抽入到容器中,高水位时将容器中溶液倒灌回试验池。

5.2.4 全浸区

全浸区应保证试件该区段浸入溶液中。

5.2.5 海泥区

模拟时应将海泥或海砂放置在容器底部。全腐蚀区见图 2。



标引序号说明:

- 1 —— 混凝土试件;
- h_1 —— 大气区;
- h_2 —— 浪溅区;
- h_3 —— 潮汐区;
- h_4 —— 全浸区;
- h_5 —— 海泥区。

图 2 全腐蚀区

6 材料及试剂

6.1 钢筋

钢筋直径选用范围 6 mm~25 mm,建议采用 16 mm。

6.2 混凝土

根据 JGJ 55 选用 C30 普通混凝土。水泥应符合 GB 175 的要求,推荐使用 42.5 级普通硅酸盐水泥,骨料应符合 JGJ 52 的要求,推荐采用 5 mm~10 mm 碎石作为粗骨料。根据试验需要对混凝土成分进行测试。

6.3 工业用盐

本文件采用氯盐为工业用盐,应符合 GB/T 5462 的规定。

6.4 试验用水

试验用水宜采用去离子水,去离子水应符合 GB/T 6682 的要求。
也可根据具体试验要求和条件采用纯净水或蒸馏水。

6.5 氯离子溶液

用工业用盐与试验用水按不同质量分数拌合配制满足试验要求的氯离子溶液。
浪溅区、潮汐区、全浸区和海泥区应采用同一溶液,氯离子浓度根据试验要求选择。

6.6 海泥

海泥区按一定比例将高岭土、膨润土与其他添加物混合,模拟出海泥的特性。

7 试件制备

7.1 混凝土试件浇筑

混凝土试件可选用圆柱体或棱柱体,圆柱体直径 50 mm~200 mm、高度 1 000 mm;棱柱体边长 50 mm~200 mm,高度 1 000 mm;混凝土保护层的厚度范围为 10 mm~35 mm。

推荐采用混凝土棱柱体试件,尺寸为 150 mm×150 mm×1 000 mm,如图 3 所示。内部放置 6 根钢筋,钢筋应固定在模具内部,钢筋保护层厚度可根据实际环境和试验要求进行调整,推荐取 15 mm。根据 JGJ 55 设计选用 C30 普通混凝土。

根据 GB 50204 的要求,拆模后,放置在养护室中养护 28 d。

混凝土棱柱体试件制作过程如下:首先用 4 块金属薄板制作成保护层为 15 mm“山”字形钢筋支架,模具两端各放置两块,使两块“山”字形金属薄板横竖交叉放置,支撑 6 根钢筋,然后向模具内浇筑混凝土,待混凝土初凝后、终凝前将 4 块金属薄板抽出,使 6 根钢筋在没有箍筋支撑的状态下,被混凝土包裹其中。

混凝土试件可根据实际结构形式进行设计。钢筋保护层的厚度、钢筋的数量和分布等具体参数取决于试验目的、试验时间等因素。

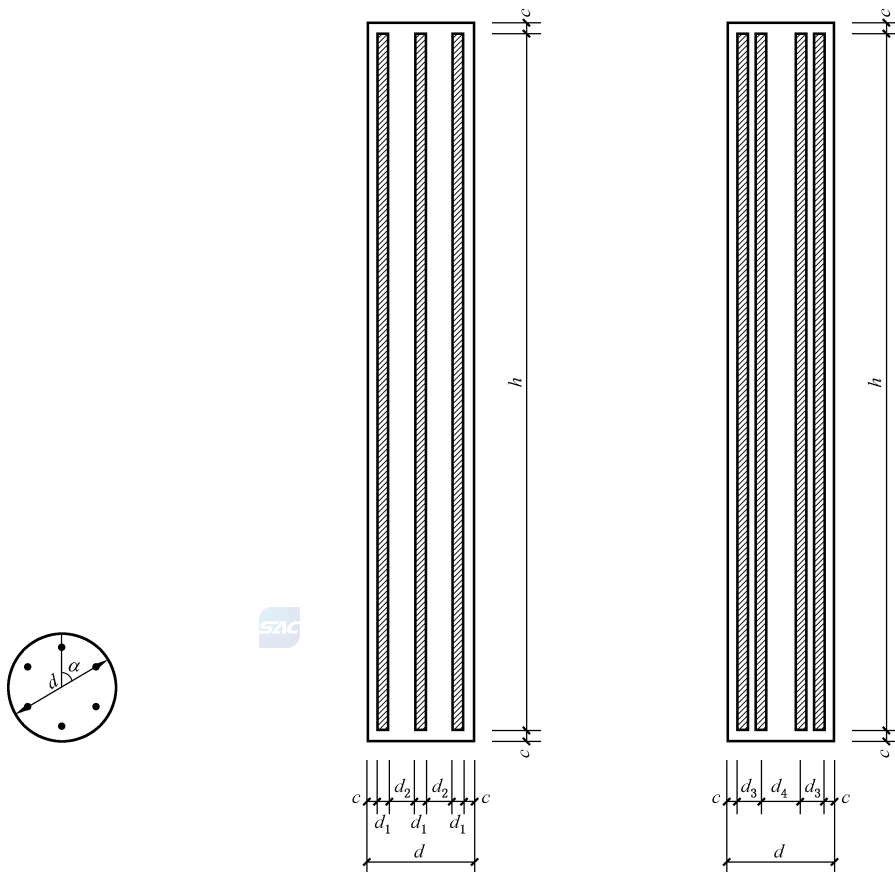
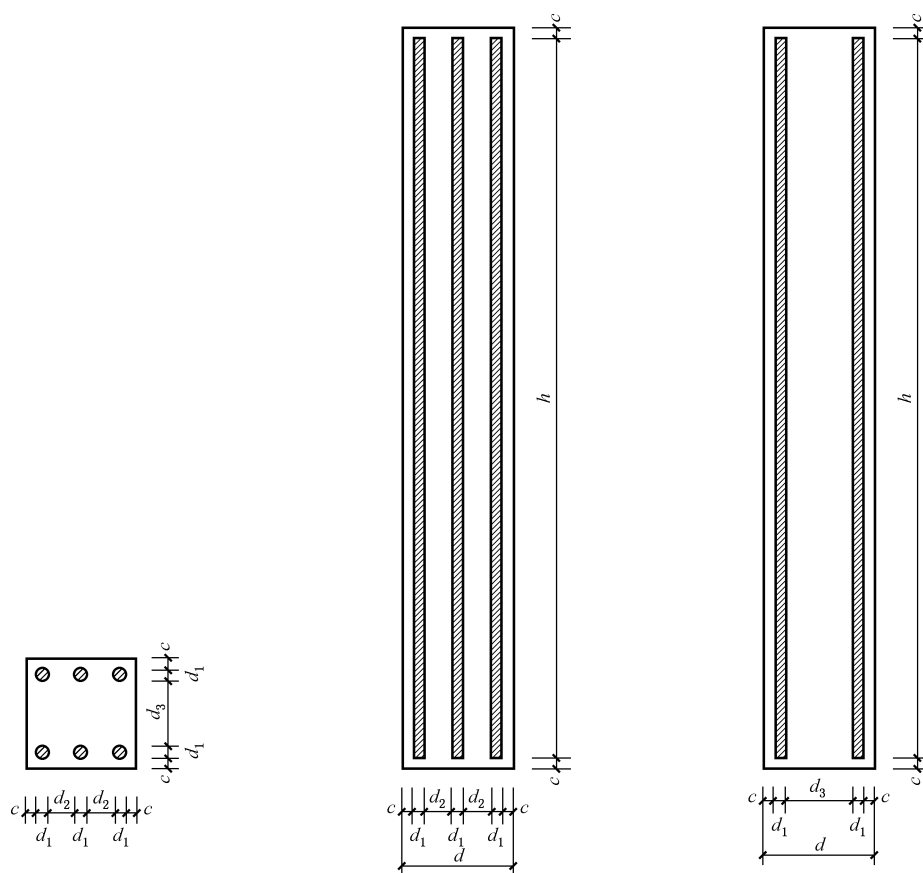


图3 圆柱体和棱柱体混凝土试件截面



标引序号说明：

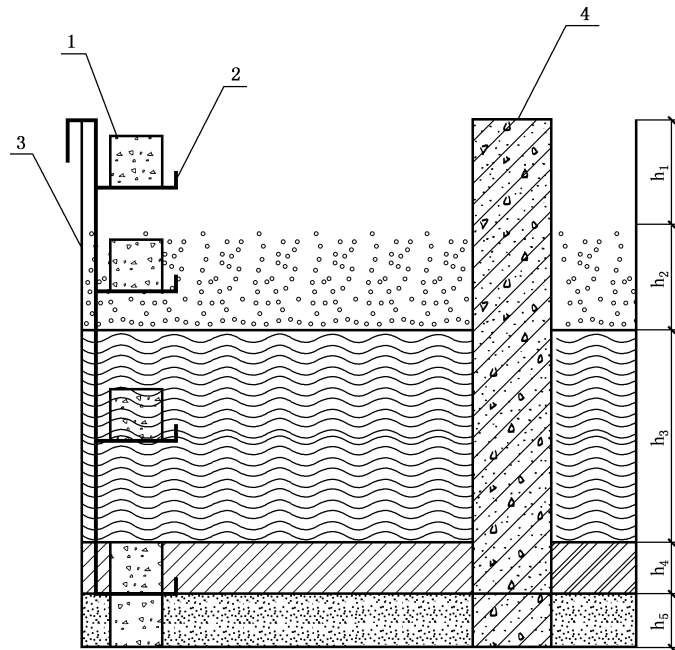
- h —— 混凝土试件高度；
- c —— 混凝土保护层厚度；
- d —— 混凝土圆柱体直径或棱柱体边长；
- d_1 —— 钢筋直径；
- d_2, d_3, d_4 —— 不同钢筋位置间距。

图3 圆柱体和棱柱体混凝土试件截面（续）

7.2 混凝土参照试块

混凝土参照试块为 100 mm×100 mm×100 mm 立方体，内部不配置钢筋。参照试件放置在模拟环境室内沿垂直向的不同腐蚀区域，在试验池壁竖向不同位置处挂置(图 4)。每个位置高度放 3 个平行混凝土参照试件。





标引序号说明：

- 1 —— 混凝土参照试块；
- 2 —— 试块放置支架；
- 3 —— 试验池；
- 4 —— 混凝土试件；
- h_1 —— 大气区；
- h_2 —— 浪溅区；
- h_3 —— 潮汐区；
- h_4 —— 全浸区；
- h_5 —— 海泥区。

图 4 混凝土参照试块布置图

8 测试步骤

8.1 A 方法——三维激光扫描法

8.1.1 钢筋预处理

按 GB/T 16545—2025 附录 A 方法对原始钢筋进行除锈。

8.1.2 试验前钢筋 3D 扫描模型

混凝土浇筑前，采用三维激光扫描仪对原始钢筋外表面进行 3D 扫描测试，在三维激光扫描仪对应的软件中形成钢筋三维模型。根据试验要求选择扫描精度，宜不低于 ± 0.02 mm。

8.1.3 混凝土浇筑

按 7.1 要求，对混凝土进行浇筑和养护。

8.1.4 试件放置

试件放置在海洋模拟环境室试验池中，试件间距应保证各测试表面处于同一环境中，设置的浪溅和

潮汐装置可作用于所有测试表面。监测和记录实验室的温度。

8.1.5 氯离子浓度测定

试验持续时间根据试验目的而定,根据菲克第二定律[式(1)]可根据氯离子扩散规律推断出钢筋腐蚀程度及对应的腐蚀时间 t [式(2)],当钢筋表面氯离子含量接近临界值时,建议每 4 周检测一次,钢筋锈蚀引起混凝土膨胀开裂后,建议每 2 周检测一次。在测试后期可根据需要增加测试频率。

当混凝土试件裂缝宽度大于 0.25 mm 时试验测试可结束。

$$C = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$t = \frac{x^2}{4D \cdot \left\{ \operatorname{erfc}^{-1} \left[\frac{C(x,t) - C_0}{C_s - C_0} \right] \right\}^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

C —— t 时刻混凝土表面 x 处氯离子浓度, %;

C_0 ——混凝土中氯离子初始浓度, %;

C_s ——表面氯离子浓度, %;

erf ——误差函数;

x ——氯离子扩散深度,单位为毫米(mm);

D ——氯离子扩散系数;

t ——氯离子扩散时间,单位为秒(s);

erfc ——互补误差函数。

沿参照试件厚度方向进行取粉,按 JGJ/T 322 中混凝土拌合物中水溶性氯离子含量测试方法对混凝土中氯离子浓度进行测定。

8.1.6 混凝土破型

按 GB/T 50152 要求对混凝土进行破型,取出锈蚀钢筋。

8.1.7 钢筋酸洗除锈

按 GB/T 16545—2025 附录 A 方法对破型后取出的钢筋进行除锈。

8.1.8 试验后钢筋 3D 扫描模型

对钢筋外表面进行 3D 扫描测试,精度应与 8.1.2 的测试方法相同。

8.1.9 锈蚀钢筋截面变化率

利用计算机分析钢筋 3D 扫描模型,软件自动将钢筋切割成薄的钢筋段,每一钢筋段长度由试验精度要求确定。计算每一钢筋段的体积,并根据式(3)计算体积变化率。

$$\xi_i = \frac{V_{i0} - V_i}{V_{i0}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

ξ_i ——体积变化率, %;

V_{i0} ——试验前初始体积,单位为立方毫米(mm^3);

V_i ——测试时体积,单位为立方毫米(mm^3);

$V_{i0} - V_i$ ——体积减少量,单位为立方毫米(mm^3);

i ——钢筋段编号。

3D 扫描分析示例见附录 A。

按照不同环境条件下钢筋体积变化率的大小对钢筋的腐蚀程度进行分级描述。

8.2 B 方法——失重法

8.2.1 锈蚀前钢筋重量测定

按 8.1.1 对钢筋进行预处理除锈,测量其初始重量 W_0 ,测量精度为 0.01 g。

8.2.2 混凝土浇筑

按 8.1.3 的规定,对混凝土进行浇筑和养护。

8.2.3 试件放置

按 8.1.4 的规定,对试件进行放置。

8.2.4 氯离子浓度测定

按 8.1.5 测试周期和测试方法要求,对混凝土中氯离子浓度进行测定。

8.2.5 混凝土破型

按 8.1.6 的规定,对混凝土进行破型,取出锈蚀钢筋。

8.2.6 钢筋酸洗除锈

按 8.1.7 的规定,对破型后取出的钢筋进行除锈。

8.2.7 锈蚀后钢筋重量测定

对除锈后的钢筋测量其锈蚀后重量 W_i ,测量精度为 0.01 g。

8.2.8 钢筋失重率

钢筋失重率按式(4)计算:

$$\eta_i = \frac{W_{i0} - W_i}{W_{i0}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

- η_i ——第 i 根钢筋的失重率, %;
- W_{i0} ——第 i 根钢筋的初始重量,单位为克(g);
- W_i ——第 i 根钢筋破型后的重量,单位为克(g);
- $W_{i0} - W_i$ ——第 i 根钢筋的失重量,单位为克(g);
- i ——钢筋的编号(用于区分多根钢筋试验)。

按照试件中不同位置处的 6 根钢筋的失重率大小对角部和中部钢筋或迎水面和背水面钢筋的腐蚀程度进行分级。

9 试验维护

试验过程中溶液浓度应保持在初始设定值。溶液的补充或更换以及盐雾发生器中氯盐溶液的补充

应定期进行。

电气设备和试验装置应定期检查维修。

10 试验报告

试验报告应包括以下几个部分：

- a) 试件：钢筋和混凝土的规格、等级，试件的形状、尺寸和数量；
- b) 试验设施；
- c) 试验条件，包括温度、湿度、溶液氯盐浓度、氯盐成分、不同腐蚀区段的高度等；
- d) 试验方法，包括试验准备、试验过程、测试时间、测试方法等；
- e) 人员及试验日期；
- f) 试验过程中溶液补充和更换情况、氯盐浓度监测、温湿度监测、测试照片；
- g) 试验前钢筋初始重量、3D扫描模型；
- h) 试验过程钢筋重量、3D扫描模型；
- i) 结果：钢筋的体积变化率、失重率和计算过程以及评定结果；
- j) 试验中出现的异常情况；
- k) 参考文件。



附录 A

(资料性)

3D 扫描结果及分析示例

混凝土柱 C2 浇筑于 2021 年 8 月 5 日,于 2021 年 10 月 5 日开始进行试验。混凝土强度等级为 C30,保护层为 15 mm,尺寸如图 A.1 所示。试验时的盐水浓度为 10%。

单位为毫米

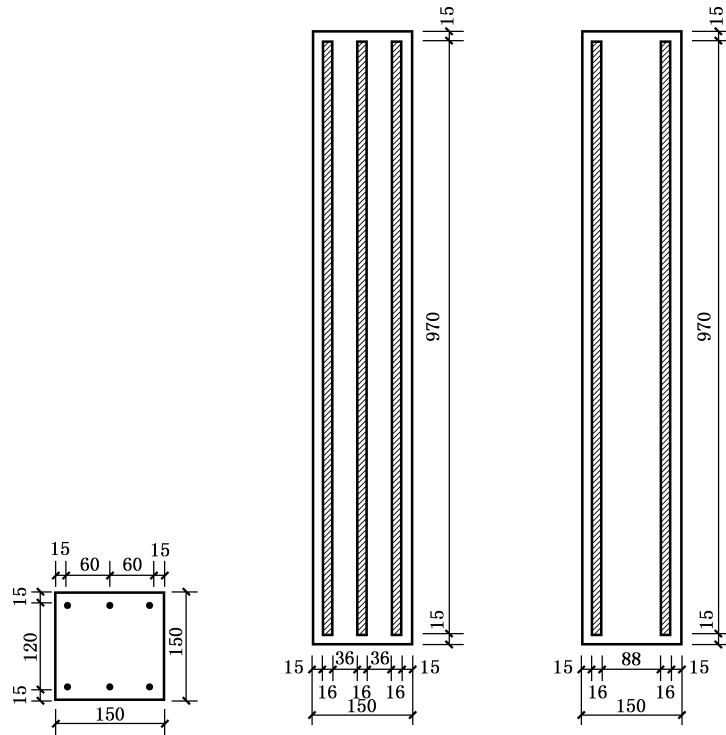


图 A.1 试验混凝土试件 C2 尺寸

混凝土试件锈蚀形态如图 A.2 所示。



图 A.2 混凝土试件 C2 锈蚀形态

混凝土柱试件 C2 中锈蚀钢筋三维形貌扫描结果及分析示例见图 A.3~图 A.4。

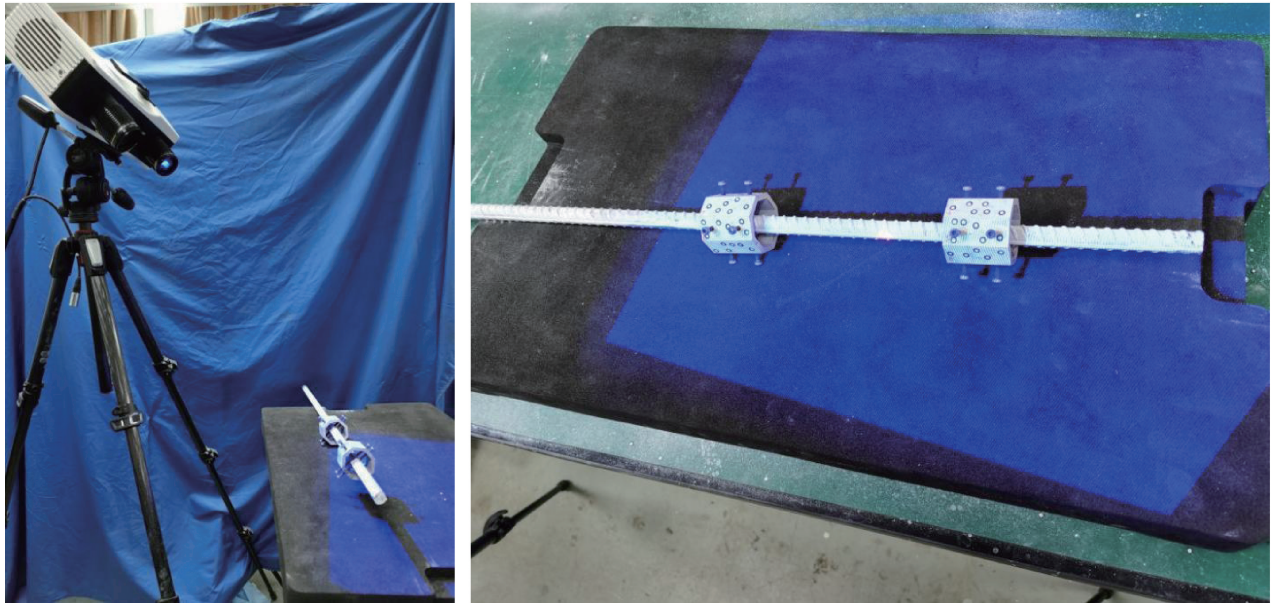


图 A.3 3D 扫描测试过程



a) 1号钢筋



b) 2号钢筋



c) 3号钢筋

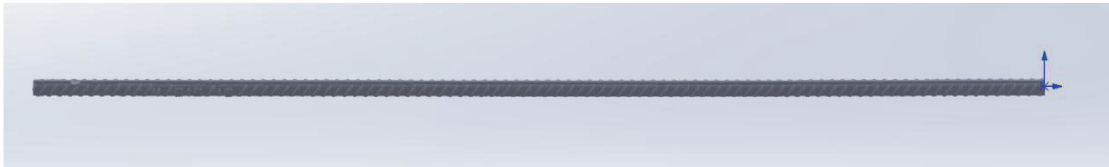


d) 4号钢筋

图 A.4 混凝土试件 C2 中钢筋的三维形貌扫描结果



e) 5号钢筋



f) 6号钢筋

图 A.4 混凝土试件 C2 中钢筋的三维形貌扫描结果 (续)

以 C2-1 为例,此试件潮汐区平均体积变化率为 3.53%,浪溅区平均体积变化率为 3.28%,钢筋腐蚀程度相对严重;全浸区、海泥区、大气区平均体积变化率分别为 2.80%、2.55%、2.44%,钢筋腐蚀程度相对较轻。见表 A.1。

表 A.1 C2-1 钢筋的平均体积变化率

对应区域 h	位置 mm	平均体积变化率 %	
大气区	0~100	2.06	2.44
	101~200	2.81	
浪溅区	201~300	3.37	3.28
	301~400	3.19	
潮汐区	401~500	3.76	3.53
	501~600	3.59	
	601~700	3.98	
	701~800	2.77	
全浸区	801~900	2.80	2.80
海泥区	901~1 000	2.55	2.55

按照试件中不同位置处的 6 根钢筋的平均失重率大小对角部和中部钢筋或迎水面和背水面钢筋的腐蚀程度进行分级。C2 试件中,迎水面角部 4 号钢筋平均失重率为 3.15%,钢筋腐蚀程度最严重;背水面角部 3 号、迎水面角部 6 号、背水面角部 1 号钢筋平均失重率分别为 2.87%、2.84%、2.82%,钢筋腐蚀程度相对严重;迎水面中部 5 号、背水面中部 2 号钢筋平均失重率分别为 2.69%、2.36%,钢筋腐蚀程度相对较轻。见表 A.2。

表 A.2 C2 钢筋的平均失重率

钢筋编号	位置	平均失重率 %
C2-1	背水面角部	2.82
C2-2	背水面中部	2.36
C2-3	背水面角部	2.87
C2-4	迎水面角部	3.15
C2-5	迎水面中部	2.69
C2-6	迎水面角部	2.84

