

附件 2



中华人民共和国国家标准

GB □□□□ —20□□

低、中水平放射性废物高整体容器 ——混凝土容器

High integrity container for low-and-intermediate level radioactive solid
wastes——Concrete container

(征求意见稿)

(本稿完成日期：2014 年 7 月 31 日)

20□□-□□-□□发布

20□□-□□-□□实施

环 境 保 护 部 发 布
国 家 质 量 监 督 检 验 检 疫 总 局

目录

前言.....	1
1 适用范围.....	2
2 规范性引用文件.....	2
3 术语和定义.....	2
4 基本安全要求.....	3
5 产品性能要求.....	4
6 密封材料性能要求.....	5
7 检验方法.....	6
8 检验规则.....	8
9 标识.....	9
10 产品的贮存和运输.....	9
附录 A 产品的规格（规范性附录）	10
附录 B 质量损失测试方法（规范性附录）	13
附录 C 孔隙率测试方法（规范性附录）	14
附录 D 氮气渗透率测试方法（规范性附录）	16
附录 E 外表缺陷测定限定范围（规范性附录）	19
附录 F 放射性核素 Cs-137 扩散系数测定方法（规范性附录）	20
附录 G 高整体容器无损检测方法（规范性附录）	23

前言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国放射性污染防治法》，防治放射性污染，改善环境质量，保护人体健康，制定本标准。

本标准规定了用于低、中水平放射性废物的混凝土高整体容器（HIC）的基本性能要求和检验方法。

本标准起草单位：中国核电工程有限公司、上海核工程研究设计院、清华大学、中国原子能科学研究院、中国建筑材料科学研究总院。

本标准起草主要起草人：张志银、蔡挺松、严沧生、赵文浩、王鑫、钱磊、李克非、韩建国、包良进、吴浩、孙东辉。

本标准由环境保护部 xx 年 xx 月 xx 日批准。

本标准自 xx 年 xx 月 xx 日起实施。

本标准由环境保护部解释。

低、中水平放射性废物高整体容器——混凝土容器

1 适用范围

本标准规定了包装低、中水平放射性固体废物用混凝土高整体容器（HIC）的基本安全要求、产品性能要求、检验方法、检验规则、标识和产品的贮存和运输。

本标准适用于使用混凝土高整体容器整备、贮存、运输和处置低、中水平放射性固体废物的安全管理，适用于混凝土高整体的设计、制造、检验等活动。本标准不适用于 B 型货包的包装容器。

2 规范性引用文件

本标准内容引用了下列文件中的条款。凡是不注明日期的引用文件，其有效版本适用于本标准。

GB/T 175 通用硅酸盐水泥
GB/T 1596 用于水泥和混凝土中的粉煤灰
GB 5749 生活饮用水卫生标准
GB 9132 低中水平放射性固体废物近地表处置要求
GB 9133 放射性废物的分类
GB 11806 放射性物质安全运输规程
GB 12711 低、中水平放射性固体废物包装安全标准
GB/T 15219 放射性物质运输包装质量保证
GB/T 14684 建筑用砂
GB/T 14685 建筑用卵石、碎石
GB 16933 放射性废物包近地表处置的接收准则
GB/T 18046 用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉
GB/T 27690 砂浆和混凝土用硅灰
GB/T 50081 普通混凝土力学性能性能试验方法标准
GB/T 50082 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准
GB 50119 混凝土外加剂应用技术规范
DL/T 5126 聚合物改进型水泥砂浆试验规程
JG/T 5004 混凝土超声波检测仪

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1 高整体容器

在预期 300 年以上的寿期内，能够有效包容其中盛装的低、中水平放射性废物的容器。高整体容器可由不同材料制成（如混凝土、球墨铸铁、高密度聚乙烯和/或复合材料）。

3.2 孔隙率

孔隙率是指多孔物体内部的孔隙体积和物体总体积之比。

3.3 外表缺陷

混凝土容器表面凹凸度不超过 2mm 的缺陷，如外表面上的麻面、掉皮、起砂和空洞。

3.4 空洞

在混凝土容器结构的表面或内部，深度或长度超过 2mm 的坑凹、气泡、孔穴等未填满的空隙。

3.5 外形缺陷

混凝土容器表面在制作或搬运过程中因机械外力造成的缺棱、掉角和局部缺损等。

4 基本安全要求

4.1 一般安全要求

4.1.1 在长期贮存或最终处置条件下，对放射性内容物能够保持 300 年以上的包容性能。

4.1.2 高整体容器的结构材料应与其盛装的内容物及其所处的环境（如温度、湿度、压力、腐蚀性介质）相容。必要时，可以在容器内、外设置耐腐蚀的内衬、外包壳或涂层及带过滤器的排气装置。

4.1.3 应满足 GB 9132、GB 12711 和 GB/T15219 有关辐射安全的规定。当作为运输容器使用时，还应满足 GB11806 规定的要求，必要时，可增设减震装置。

4.2 特殊安全要求

4.2.1 对内容物的要求

- (1) 应是低、中水平放射性废物，其中游离液体含量不应超过废物体积的 1%。
- (2) 满足 GB 9132、GB 9133 和 GB 16933 和其他有关标准规定的要求。
- (3) 所装废物可以是带预包装容器的废物，也可以是不带预包装容器的废物。

4.2.2 对原材料的要求

用于制作混凝土高整体容器的原材料主要包括：水泥、集料、掺合料、增强材料、化学外加剂和拌合用水。对原材料质量的要求除应满足相应的国家或行业标准以外，还应满足混凝土耐久性要求而提出的对品种、性能的特殊要求。

水泥宜选用不低于 42.5 强度等级的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。

粗集料宜采用抗压强度高、表面相对粗糙的高纯度石灰岩非活性集料。

细集料宜采用质地均匀、级配良好、吸水率低的中粗河砂，含泥量应低于 1.0%，并在冲洗后使用。

化学外加剂应选用减水率高、能明显提高混凝土耐久性且质量稳定的产品。掺合料应选用品质稳定的品种。

拌和用水应符合 GB 5749 规定的要求。

增强材料应为耐腐蚀性材料。

4.2.3 硬化混凝土性能要求

- (1) 力学性能
 - ① 28 天立方体抗压强度 $\geq 60\text{MPa}$;
 - ② 28 天劈裂抗拉强度 $\geq 5.5\text{MPa}$;
 - ③ 28 天静力受压弹性模量 $\geq 35\text{GPa}$ 。
- (2) 物理性能
 - ① 28 天收缩 $\leq 300\mu\text{m/m}$;
 - ② 28 天质量损失 $< 30\text{kg/m}^3$;
 - ③ 养护 56 天后孔隙率 $\leq 12\%$ 。
- (3) 耐 γ 辐照性能

经 $\geq 10^6$ Gy 累积剂量辐照后, 抗压强度损失 $< 20\%$, 无肉眼可见裂纹。
- (4) 抗冻性能

混凝土抗冻等级不低于 F400。
- (5) 抗渗性能
 - ① 渗水高度 $\leq 5\text{mm}$;
 - ② 氮气渗透系数 $\leq 5.0 \times 10^{-18} \text{m}^2$;
 - ③ 铯-137 扩散系数(水介质) $\leq 1.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{d}$;
 - ④ 28 天氯离子迁移系数 $D_{\text{RCM}} < 1.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 。
- (6) 化学稳定性
 - ① 抗硫酸盐等级 $> \text{KS150}$;
 - ② 28 天碳化深度 $d < 0.1\text{mm}$ 。

4.2.4 对容器结构的要求

容器的结构应满足废物包暂存、运输和最终处置对容器结构的要求, 保证堆码和运输过程的稳定性。容器应设置用于抓取的构件并与吊具配套。

5 产品性能要求

5.1 外观质量

5.1.1 尺寸检验

容器尺寸应符合附录 A 中表 A1 和表 A2 规定的尺寸要求。

5.1.2 外表缺陷

容器表面应光洁平整, 每片外表缺陷的面积不得大于 100cm^2 , 片与片不能相连, 累计表面缺陷面积不能超过的容器总表面积的 10%。检验方法见 6.3.2。

5.1.3 外形缺陷

不影响容器强度和包容性能, 深度不大于 5mm 的外形残缺可不进行修补; 不影响容器强度和包容性能, 深度大于 5mm 的外形残缺可进行修补; 影响容器强度和包容性能的外形残缺不允许进行修补, 应按不合格产品处理。

5.1.4 空洞

容器表面每个空洞面积不得大于 20mm^2 , 洞与洞不能相连。每平方米外表面空洞不得超过 2 个。任何情况下不允许有深度 $> 5\text{mm}$ 的空洞。检验方法见 6.3.3。

5.1.5 裂纹

宽度 $\leq 0.1\text{mm}$ 的裂纹，在外表面的长度不得大于 100mm 。 $0.2\text{mm} \geq \text{宽度} > 0.1\text{mm}$ 的裂纹，在外表面的长度不得大于 20mm 。在任何情况下都不允许有宽度大于 0.2mm 的裂纹。检验方法见6.3.4。

5.2 内部质量

混凝土应密实，无直径 $> 5\text{mm}$ 的空洞；集料应分布均匀，无明显的分层现象；增强材料分布均匀；钢筋位置无明显移动，保护层厚度符合设计要求；混凝土与增强纤维、钢筋、预埋件结合良好，无脱离现象。

5.3 抗渗性能

应按6.3.6节的规定对混凝土高整体容器进行渗水试验，以检验其抗渗性能。容器内充满水28天后容器应无渗漏和润湿现象。

5.4 载荷性能

应按6.3.7节的规定对混凝土高整体容器进行堆码试验，以检验其载荷性能。堆码试验结束后，容器应无变形和破坏，并应满足产品抗渗水性能。

5.5 抗冲击性能

应按6.3.8节的规定对混凝土高整体容器进行跌落试验，以检验其抗冲击性能。容器跌落试验的合格指标为：跌落试验结束后，容器内容物无泄漏。

5.6 操作性能

混凝土高整体容器的装卸、吊运或栓固的操作构件或预埋件进行性能试验，应连续50次操作无故障，构件或预埋件无损坏。

5.7 无损检测

应按6.3.9节的规定对混凝土高整体容器进行无损检测。超声波速平均值(mv)、特征值(vk)、标准差(σ)、方差(Sv)和测得的超声波速最低值($vmin$)应满足以下关系： $mv - Sv \geq vk$ ； $vmin \geq vk - \sigma$ 。

6 密封材料性能要求

6.1 预制盖密封材料

预制盖密封材料用于配合混凝土高整体容器的结构形式对容器进行密封。预制盖密封材料除应满足4.2.3节硬化混凝土性能要求外，拉拔粘结强度应 $\geq 1.40\text{MPa}$ 。

6.2 浇注盖密封材料

浇注盖密封材料性能要求与4.2.2节原材料的质量要求和4.2.3节硬化混凝土性能要求相同。

7 检验方法

7.1 原材料检验方法

对于高整体容器原材料的检测，配方设计中有特殊要求的按照配方设计规定的方法进行；没有特殊要求时，则应按照相应的国家或行业标准的要求进行：

- (1) 水泥质量检测按照 GB/T 175 的规定进行；
- (2) 粗骨料质量检测按照 GB/T 14685 的规定进行；
- (3) 砂质量检测按照 GB/T 14684 的规定进行；
- (4) 粉煤灰质量检测按照 GB/T 1596 的规定进行；
- (5) 硅灰质量检测按照 GB/T 27690 的规定进行；
- (6) 矿渣粉质量检测按照 GB/T 18046 的规定进行；
- (7) 混凝土化学外加剂质量检测按照 GB 50119 的规定进行；
- (8) 符合 GB5749 《生活饮用水卫生标准》的饮用水可不经检测作为混凝土搅拌用水。

7.2 硬化混凝土性能检验方法

7.2.1 力学性能

- (1) 立方体抗压强度试验按 GB/T 50081 的规定进行；
- (2) 劈裂抗拉强度试验按 GB/T 50081 的规定进行；
- (3) 静力抗压弹性模量试验按 GB/T 50081 的规定进行。

7.2.2 物理性能

- (1) 收缩试验按 GB/T 50082 中收缩试验（接触法）的规定进行；
- (2) 质量损失试验方法见附录 B；
- (3) 孔隙率测试方法见附录 C。

7.2.3 耐 γ 辐照性能

辐照强度 $1.2-1.4 \times 10^3 \text{Gy/h}$ 。

7.2.4 抗冻性能

抗冻试验方法按 GB/T 50082 抗冻试验（快冻法）的规定进行。

7.2.5 抗渗性能

- (1) 抗水渗透性能按照 GB/T 50082（渗水高度法）进行试验，试验压力为 2.0MPa；
- (2) 氮气渗透率测试方法见附录 D；
- (3) 铯-137 扩散率测试方法见附录 F；
- (4) 氯离子迁移系数测试方法按 GB/T 50082 中快速氯离子迁移系数法的规定进行。

7.2.6 化学稳定性

- (1) 抗硫酸盐侵蚀试验按 GB/T 50082 的规定进行；
- (2) 碳化性能试验按 GB/T 50082 的规定进行。

7.3 容器性能检验方法

7.3.1 尺寸检验

用精度 0.5mm 的通用量具进行测量。

7.3.2 外表缺陷检验

将形状、大小如附录-E 中图 E-1 所示的透明胶片置于缺陷上测量缺陷的长度和宽度。

透明胶片由两片组成，每片长 100mm，宽 50mm。两片胶片可以选择在长或宽并行摆放。

用精度为 $10\text{mm}\pm 0.1\text{mm}$ 的深度计测量缺陷的深度。

7.3.3 空洞

用高 $10\text{mm}\pm 0.1\text{mm}$ ，直径 $10\text{mm}\pm 0.1\text{mm}$ 的深度计检查空洞的大小和深度。

7.3.4 裂纹测量

采用 0.01mm 精度的裂纹测试仪表检查裂纹宽度及长度。

7.3.5 内部质量检验

将检验的容器纵向对半切开，目视检查剖面混凝土密实程度和骨料的分布情况，用通用量具检测空洞的大小和增强材料（钢筋、纤维的）的分布情况。

7.3.6 抗渗性能

在脱模后的第 7 天，将外观质量和尺寸合格的容器里充满水、盖好盖，在第 28 天后检查容器有无渗漏和洒湿。

7.3.7 堆码试验

将容器放在坚固的平台上，容器内装密度为 $2000\text{kg}/\text{m}^3$ 的均匀固体物质，充填系数为 95%。堆码方式为正位直立，负载应均匀加在容器的上端面，负荷应为真实货包质量的 5 倍，持续 2h。也可采用等效的方法代替。

7.3.8 跌落试验

按表 7-1 规定的高度，对容器做 45° 斜位直落试验。试验时容器内装密度为 $2000\text{kg}/\text{m}^3$ 的均匀固体物质，充填系数为 95%。

试验用靶应是用钢板作为上表面的混凝土块。钢板和混凝土块的总质量不得小于跌落试件质量的 10 倍，钢板厚度不应小于 40mm，而且应与混凝土表面紧贴固定在一起，以保证试件冲击时靶子的抗位移或抗变形的力的任何增加不会显著地增加试件的损坏。

表 7-1 跌落试验的自由下落距离

额定质量 R ⁽¹⁾ kg	自由下落距离 m
R<5000	1.2
5000≤R<10000	0.9
10000≤R<15000	0.6
R≥15000	0.3

注：（1）额定质量 R 是指混凝土容器空桶或空箱质量与额定容量之和。

7.3.9 无损检测试验

混凝土高整体容器无损检测按附录 G 的规定进行。

7.4 密封材料拉拔黏结强度

预制盖混凝土高整体容器密封材料的拉拔黏结强度检验方法按 DL/T 5126 中“砂浆黏接抗拉强度”试验规定进行。

8 检验规则

8.1 型式试验

容器型式鉴定试验内容、方法和试验顺序按表 8-1 所列项目逐项进行试验。各项试验可在一个容器上进行，一批生产相同型式容器的鉴定试验容器数量不得少于 3 个。

表 8-1 型式试验测试项目

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
尺寸检验	外表缺陷	空洞	裂纹	内部质量	抗渗性能	载荷性能	抗冲击性能	操作性能	无损检验

高整体容器生产有下列情况之一时，应进行型式检验：

- (1) 新产品投产或老产品转产的试制定型鉴定；
- (2) 正式生产后，如结构、材料、工艺有较大改变，可能影响产品性能时；
- (3) 正式生产时，每年一次；
- (4) 产品长期停产后（超过 6 个月），恢复生产时；
- (5) 出厂检验结果与型式检验结果有较大差异时；
- (6) 国家质量监督机构提出或用户要求进行型式检验时。

8.2 出厂检验

逐个检查容器的尺寸和外观质量。逐一对容器进行无损检测。每批同一规格的产品抽 10%（至少一个）做渗水试验和堆码试验。如抽检判定不合格则判定该批产品不合格。

检验合格后，应为每个容器提供工作卡、材料合格证、产品检验报告和容器合格证书。

8.3 判定规则

8.3.1 型式检验判定规则

当一个样本不合格，则该项不合格。如一项不合格，则为该批不合格。

8.3.2 出厂检验判定规则

不合格的分类和各类型的判定项目见表 8-2。

表 8-2 混凝土 HIC 验收项目表

序号	检验项目	A 类	B 类	C 类
1	尺寸偏差 (1) (内部)			√
2	尺寸偏差 (1) (外部)			√
3	尺寸偏差 (1) (盖板)			√
4	尺寸偏差 (同轴度)			√
5	表面缺陷		√	
6	空洞		√	
7	裂纹		√	
8	外形缺陷		√	

9	无损检验	√		
10	抗渗性能	√		
11	堆码试验	√		
注(1): 容器在一维上存在尺寸偏差则为一项偏差。				

凡符合以下任何一种情况，即判定该产品不合格。如按照规定抽检判定不合格，则判定该批产品不合格：

- (1) A类不合格一项；
- (2) B类不合格一项，并C类不合格三项；
- (3) B类不合格两项，并C类不合格一项；
- (4) B类不合格三项。

9 标识

9.1 标志

在混凝土高整体容器外表面显著位置标识永久性的容器编号。在混凝土高整体容器外表面标识容器型号、生产厂家和生产日期。在混凝土高整体容器外表面显著的位置喷涂放射性标识。

9.2 标志的质量

容器的标识应醒目、清楚、耐久性好，不损失容器的性能。

10 产品的贮存和运输

10.1 产品贮存

混凝土高整体容器应存放在基础坚固的地面上，宜垂直码放，码放高度一般不得超过6层。

混凝土高整体容器存放期间，应防止受到化学侵蚀、恶劣气候和外力损害。

10.2 产品运输

混凝土高整体容器搬运、装卸时必须采用专用吊运工具轻装轻放。运输时应采用适当的措施，将容器紧固在运输工具上，并在容器间设置适当的缓冲或隔离的空间、材料或装置，以防碰撞、损坏。

附录 A 产品的规格（规范性附录）

根据外形的不同，混凝土高整体容器分为桶型容器和箱型容器。根据密封型式不同，混凝土高整体容器分为预制盖密封和浇注盖密封。

A1 容器的型号与尺寸

A1.1 桶型混凝土高整体容器型号、尺寸及偏差

表 A-1 桶型混凝土高整体容器型号、尺寸及偏差

序号	型号	有效容积 V (m ³)	内径 Di		内高 Hi (mm)	壁厚 δ (mm)	容器自重 S (t)	额定质量 C (t)
			桶底 Di1 (mm)	桶顶 Di2 (mm)				
1	CED I - G	0.30	630±2	680±2	940±2	100±1	0.80	1.4
2	CED II - G	0.60	750±2	840±2	1150±2	150±1	1.83	2.9
3	CED I - Z	0.30	630±2	680±2	940±2	100±1	0.80	1.4
4	CED II - Z	0.60	750±2	840±2	1150±2	150±1	1.83	2.9

注 1: I 型为适于放置标准的 200L 金属桶，II 型为适于放置标准的 400L 金属桶；
2: G 为预制盖，Z 为浇注盖；
3: 容器尺寸及壁厚为推荐值。

A1.2 箱型混凝土高整体容器型号、尺寸及偏差

表 A-2 箱型混凝土高整体容器型号、尺寸及偏差

序号	型号	有效容积 V (m ³)	内部尺寸			壁厚 δ (mm)	容器自重 S (t)	额定质量 C (t)
			长 L (mm)	宽 W (mm)	高 H (mm)			
1	CEB I - G	1.95	1300±2	1300±2	1150±2	150±1	4.86	8.76
2	CEB I - Z	1.95	1300±2	1300±2	1150±2	150±1	4.36	8.26

注 1: I 型可放置 4 个标准的 200L 金属桶
2: G 为预制盖，Z 为浇注盖；
3: 容器尺寸及壁厚为推荐值，用户可以根据需要选择其他规格的箱型容器。

A2 容器的结构

桶型混凝土高整体容器的结构示意图见图 A-1。

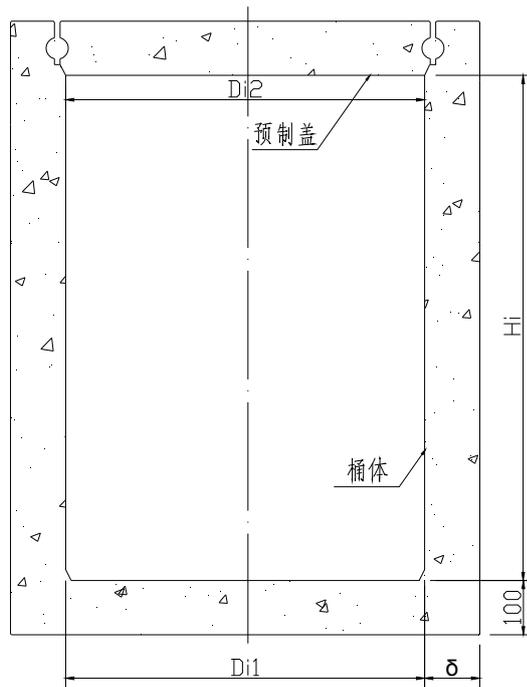


图 A-1 桶型混凝土高整体容器结构示意图

箱型混凝土高整体容器的结构示意图见图 A-2

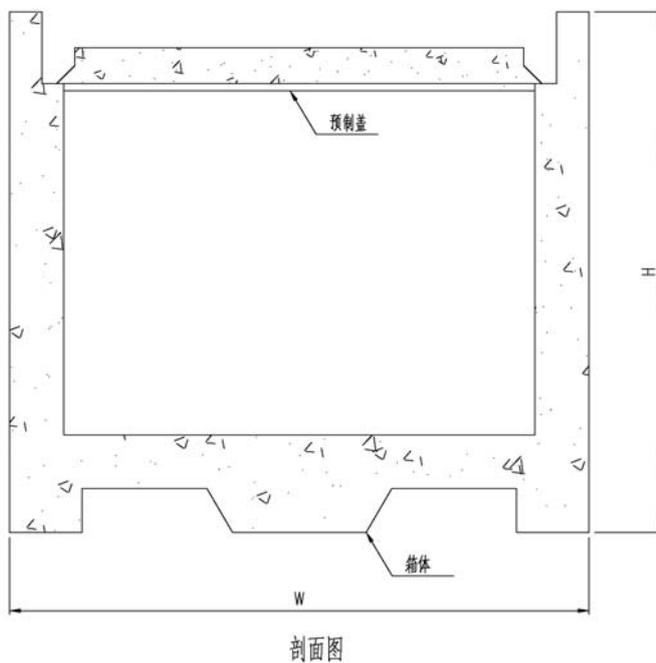


图 A-2 箱型混凝土高整体容器结构示意图

A3 容器盖及容器密封

混凝土高整体容器既可以采用预制盖密封，也可以采用浇注盖密封。

A3.1 预制盖密封

预制盖密封是在容器制造厂采用与容器体相同的材料预先制作容器盖，在容器装入废物

后，用密封材料将容器盖与容器体固定和密封。混凝土高整体容器的结构形式和密封材料应能保证容器体和预制容器盖的固定和密封后满足整个容器对内容物的包容性和耐久性要求。

A3.2 浇注盖密封

浇注盖密封是在容器制造厂仅制作容器体，在容器装入废物后，将与制作容器体相同的混凝土材料浇注到容器上部空间，混凝土凝固后形成容器盖实现对容器的密封。容器体的结构形式应保证在整备、转运和运输中浇注盖不脱落、不损坏，能满足整个容器对内容物的包容性和耐久性要求。

A4 符号

- CE—混凝土材料；
- CED—混凝土桶型容器；
- CEB—混凝土箱型容器；
- G—预制盖密封；
- Z—浇注盖密封；
- L—容器的外部长度；
- W—容器的外部宽度；
- H—容器的外部高度；
- D—桶型容器的外部直径；
- δ —容器壁厚；
- S—容器自重；
- R—额定质量。

附录 B 质量损失测试方法（规范性附录）

B1 范围

本测试方法的目的是测定高整体容器用混凝土材料在规定条件下的质量损失，作为其质量检验的基本物理参数。

本测试方法适用于高整体容器的素混凝土和纤维混凝土材料。

本测试可与收缩试验同时进行也可单独测试。

B2 基本原理

本测试方法通过测试混凝土试件在规定温度和湿度条件下的 28 天质量减少来确定材料的质量损失。

B3 仪器设备

B3.1 称量设备的最大量程应为 20kg，感应量不应超过 5g。

B3.1 混凝土标准试块成型设备。

B4 测试步骤

B4.1 混凝土试件成型在尺寸为 100mm×100mm×515mm 的棱柱体试模中，质量损失测量要求至少成型 1 组试件，每组有 3 个试件。

B4.2 混凝土材料浇注在试模后，置于标准养护条件下直至 3 天龄期，养护温度和湿度应符合 GB/T50081 的规定。

B4.3 试件在 3 天龄期脱模，进入温度为 20±2℃、相对湿度为 60±5%的恒温、恒湿环境，并称量试件的质量 m_i^0 。

B4.4 试件在恒温恒湿环境静置 28 天，试件的放置要求应符合 GB/T 50082-2009 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: 8.2 接触法（收缩试验）》的要求。

B4.5 测量试件 28 天静置后的质量 m_i^1 。

B5 质量损失计算

单个混凝土试样的质量损失率由下式计算，

$$d_m^i = \frac{m_i^0 - m_i^1}{V} \quad (\text{B-1})$$

d_m^i — 第 i 个混凝土试件的质量损失 (kg/m³)，精确至 0.1；

V — 混凝土试件的体积 (dm³)，本标准中取 5.15 dm³；

m_i^0 — 第 i 个混凝土试件的初始质量 (g)；

m_i^1 — 第 i 个混凝土试件的 28 天静置质量 (g)；

每组试件的质量损失率应以三个试件的质量损失率的算术平均值作为该组试件的质量损失率测定值。当组中某个试件质量损失出现负值，或者一组中的最大值（最小值）与平均值的偏差超过 15%，应认定该组数据无效。

附录 C 孔隙率测试方法（规范性附录）

C1 范围

本测试方法的目的是测定高整体容器用混凝土材料的总孔隙率，作为其质量检验的基本物理参数。

本测试方法适用于高整体容器的素混凝土和纤维混凝土材料。

C2 基本原理

本测试方法通过测试混凝土试件的饱水状态和干燥状态的含水率差别来确定材料的孔隙率。

C3 仪器设备

测试使用的仪器设备如下：

- (1) 天平：感量（最小分度值）0.1g；
- (2) 混凝土标准试块成型设备；
- (3) 岩石切割机；
- (4) 烘箱；
- (5) 真空抽气装置；
- (6) 盛水容器。

C4 测试步骤

C4.1 混凝土材料成型在 100×100×100mm 的标准试模中，试件成型和养护过程应符合国家标准 GB/T50081 的规定，试件 1 天龄期脱模，置于标准养护条件（温度 20±2℃，相对湿度 95%以上）下，直至 56 天龄期。

C4.2 使用岩石切割机在混凝土试件中部切出厚度为 20mm 的试样，每个试件切出 3 块试样。

C4.3 将切出的试样放入真空饱水设备进行真空饱水，真空度保持在 1~5kPa，持续饱水时间为 4h。真空饱水设备可参考 GB/T 23561.5-2009 《煤和岩石物理力学性质测定方法，第 5 部分：煤和岩石吸水性测定方法》，真空饱水操作过程可参考 GB/T 50082-2009 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准：7 抗氯离子渗透试验》。

C4.4 将所有混凝土试样取出放入盛水容器，容器水面应超过试件顶部，静置 18h。

C4.5 在盛水容器中称取每个试样的浮重 w_b ，精确到 0.1g。

C4.6 称量每个的试样的饱水质量 m_s ，精确到 0.1g。

C4.7 将所有试样放入烘箱，烘箱温度调到 105℃，持续烘干 48h。

C4.8 将试样取出烘箱，自然条件降温至室温，称量其质量 m_d ，精确到 0.1g。

C5 孔隙率计算

每个混凝土试样的孔隙率由下式计算，

$$\phi_i = \frac{m_s^i - m_d^i}{m_s^i - w_b^i} \quad (C-1)$$

其中， ϕ_i ：为混凝土试样 i 的孔隙率 (-)；

m_s^i : 为混凝土试样 i 的饱水质量 (g);

m_d^i : 为混凝土试样 i 的干燥质量 (g);

w_b^i : 为混凝土试样 i 的浮重 (g)。

混凝土材料的孔隙率取三个试样的算术平均值, 计算结果取一位小数。测试报告中应列出单个试样的测试值, 以及三个试样的平均值。

附录 D 氮气渗透率测试方法（规范性附录）

D1 测试范围

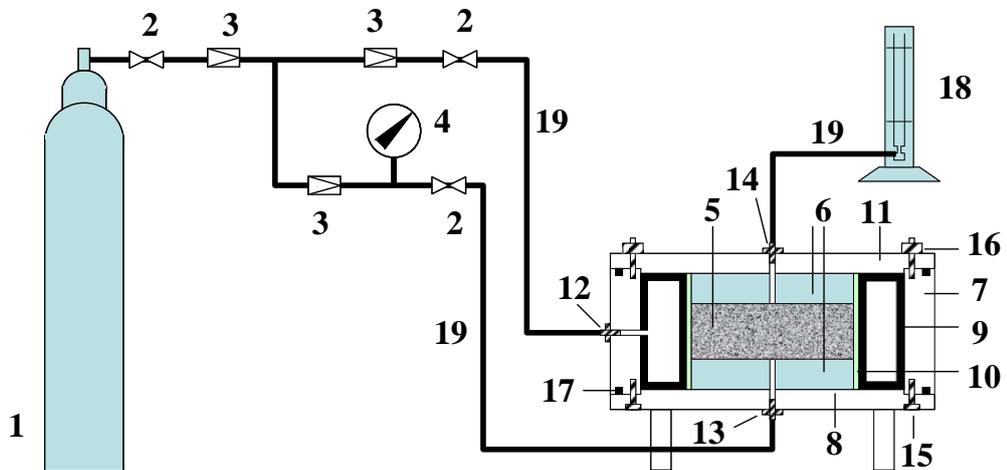
测试高整体容器用混凝土的气体固有渗透率，确定混凝土对气体渗透的抵抗能力。本测试方法适用于高整体容器用素混凝土和纤维混凝土材料。

D2 基本原理

本测试方法使用氮气为渗透介质，采用对混凝土试件两侧施加气体压力梯度的方法，测量氮气在材料中达到稳定流动状态时的气体流量；进一步测量在不同压力梯度下的稳定流量，经回归分析得到材料的固有渗透率。

D3 试验仪器设备

本测试方法的气体渗透装置如图 D-1 所示，包括了整体装置和气体渗透单元的组成。



1- 高压氮气瓶；2-气路开关；3-减压阀；4-高精度压力表；5-混凝土试件；6-PVC 圆垫板；7-圆钢套；8-底板；9-充气橡胶囊；10-橡胶密封套；11-顶板；12-橡胶套进气嘴；13-渗透单元进气嘴；14-渗透单元出气嘴；15-底板螺栓；16-顶板螺栓；17-O 形密封圈；18-皂膜流量计；19-气路塑料管

图 D-1 气体渗透装置图

装置各部分具体要求如下：

1-高压氮气瓶：钢瓶符合 GB5099 标准，最低工作压力 2MPa；

4-高精度压力表：量程 1MPa，精度 1kPa；

18-皂膜流量计：量程 0.1~100mL/min。

D4 试件与处理

D4.1 拌合后的混凝土浇筑在内径为 150mm、高度至少为 200mm 的钢模中，充分振捣成型。在 3 天龄期拆模，并置于标准养护条件下直至 56 天龄期，养护温度和湿度应符合 GB/T 50081 的规定。

D4.2 使用岩石切割机从混凝土柱体中部切出厚度为 50mm 的圆饼试件，厚度切割误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ ，每个圆柱至少切割出 3 个圆饼试件。

D4.3 将圆饼试件置入 60 °C 烘箱干燥 7 天, 然后再将圆饼试件置于温度为 20±2 °C、湿度为 60±5%环境中 14 天。在干燥前后分别称取试件的质量, 精确到 0.1g。

D5 测试步骤

D5.1 将混凝土圆饼试件侧面涂环氧树脂, 并在室温干燥。

D5.2 按照图 D-1 装置组装气体渗透单元, 并分别置入充气橡胶囊 9、橡胶密封套 10、PVC 圆垫板 6 和处理好的混凝土试件 5, 盖上渗透单元顶板 11 并紧固螺栓 16。

D5.3 按照图 D-1 组装气路, 连接高压氮气瓶 1、气体渗透单元和皂膜流量计 18。

D5.4 利用减压阀 3 将钢瓶高压氮气调压至 1MPa 左右, 再打开连接充气橡胶囊 9 的调压阀并调整压力至 0.7MPa, 打开其后的气路开关给充气橡胶囊充气。

D5.5 打开连接渗透单元底板进气嘴 13 的调压阀, 将压力稳定在 0.15MPa, 然后打开其后的气路开关; 每隔 20min 使用皂膜流量计测量一次渗透单元出气嘴的气体流量, 待前后两次测量流量误差小于 1%时记录此时的气体流量。

D5.6 调整连接渗透单元进气口的调压阀的气体压力, 按步骤 D5 的方法分别测试进气口气体压力在 0.20MPa、0.30MPa 和 0.40MPa 下的出气嘴流量。

D5.7 关闭高压气瓶开关, 给充气橡胶囊放气; 打开渗透单元顶板, 取出混凝土试件, 重复 F5.2-F5.6 进行下一个混凝土试件的测量, 直至所有混凝土试件测试完毕。

D6 测试结果

D6.1 表观渗透率计算

根据每个进气嘴压力水平下的稳定气体流量, 按照式 (1) 计算表观气体渗透率,

$$k_a = \frac{\mu L Q P_{atm}}{A(P - P_{atm})P_m} \quad (D-1)$$

式中:

k_a : 混凝土表观气体渗透率 (m^2);

P_{atm} : 测试条件下的大气压力 (Pa);

P : 渗透单元进气嘴的绝对压力 (Pa), 150,000-400,000 (Pa);

P_m : 渗透单元进气嘴和出气嘴的平均压力 (Pa), 等于 $(P+P_{atm})/2$;

Q : 渗透单元出气嘴的稳定气体流量 (m^3/s);

L : 试件厚度 (m), 0.05m;

μ : 氮气的动粘度系数 (Pa.s), 1.76×10^{-5} Pa.s;

A : 混凝土试件横截面积 (m^2), 0.01766 m^2 。

D6.2 固有渗透率回归

根据 4.5.1 计算混凝土试件在 4 个压力水平下的表观渗透率, 然后对不同压力下的 $1/P_m$ 与对应的表观渗透率 k_a 按照式 (E-2) 进行线性回归:

$$k_a = b \times \frac{1}{P_m} + k_v \quad (D-2)$$

所得回归参数 k_v 即为混凝土试件的固有渗透率, 精确到 $0.1 \times 10^{-18} m^2$ 。

D6.3 测试报告

测试报告首先应记录高整体容器材料的配合比, 测试日期和试件的数量与编号。对每个试件, 应记录试件的厚度 (精确到 0.1mm)、试件干燥前后的质量 (精确到 0.1g)、不同压

力水平下的表观气体渗透率（精确到 $0.1 \times 10^{-18} \text{m}^2$ ）以及回归得到的材料固有渗透率（精确到 $0.1 \times 10^{-18} \text{m}^2$ ）。

附录 E 外表缺陷测定限定范围（规范性附录）

E1 外表缺陷测定限定范围

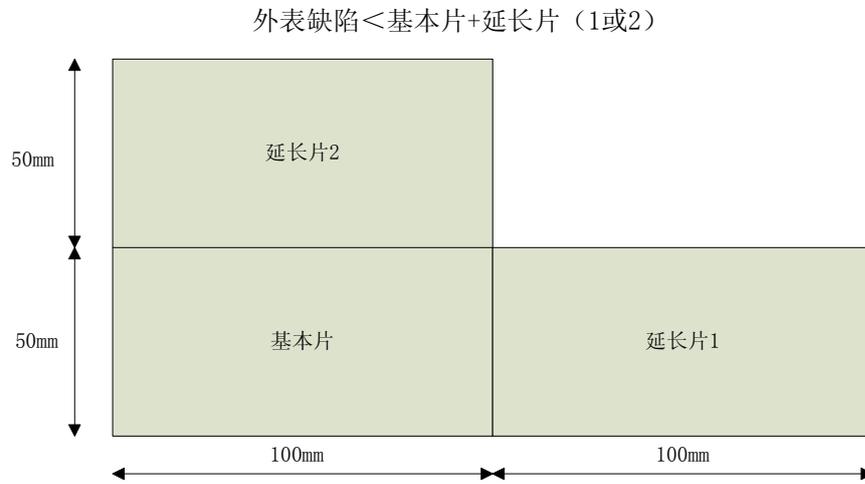


图 E-1 外表缺陷测定限定范围

附录 F 放射性核素 Cs-137 扩散系数测定方法（规范性附录）

F1 范围

本测试方法的目的是测定铯-137 离子在高整体容器用混凝土材料中的扩散速率，做为评价该混凝土材料包容、阻滞放射性核素的基本参数之一。

本测试方法适用于高整体容器的素混凝土和纤维混凝土材料。

F2 基本原理

铯-137 离子由水溶液中向混凝土试块内部扩散，测量不同深度处铯-137 的浓度，绘出铯-137 浓度变化曲线，通过公式拟合获得表观扩散系数。

F3 仪器设备

- 天平：感量 0.01 克；
- 混凝土试块成型设备， $\Phi 100 \times 100 \text{mm}$ ；
- 切割机；
- 抛光机；
- 扩散装置（带磁转子搅拌器）；
- 磨削机；
- 伽马谱仪。

F4 测试步骤

- F4.1 混凝土材料成型在 $\Phi 100 \times 100 \text{mm}$ 的试模中，试块成型和养护过程应符合国家标准 GB/T 50081 的规定，试块 1 天龄期脱模，在标准条件（温度 $20 \pm 2^\circ \text{C}$ ，相对湿度 95% 以上）下养护 28 天。
- F4.2 室温下，将试块完全浸没在自来水中，静置 30 天。
- F4.3 将试块的上下端面用抛光机打磨光滑，表面粗糙度小于 0.02mm。
- F4.4 将试块放入聚四氟乙烯套筒中，在试块和套筒之间的缝隙中注入环氧树脂，并在室温下干燥，保证液体不会从缝隙中渗漏。
- F4.5 将装有试块的聚四氟乙烯套筒固定在源液池和样品收集池之间（见图 F-1），向源液池和样品收集池中注入饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液，静置 7 天，观察是否有液体渗漏。
- F4.6 将源液池中溶液倒出，再往源液池中注入含 Cs-137 的饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液 2L；在源液池中加入 1 mL 活度浓度为 50000Bq/mL 的氡水，打开磁转子搅拌器，使溶液充分混合均匀。
- F4.7 每隔 15 天从源液池取 0.1ml 水溶液，用伽马谱仪测量 Cs-137 浓度。
- F4.8 定期从样品收集池中取 1 mL 水溶液，测量其中 H-3 和 Cs-137 的浓度。每次从样品收集池中取完样之后，补充相同体积的饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液。
- F4.9 扩散实验稳定运行 210 天后，小心移去源液池和样品收集池，用饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液对试块的上下端面进行冲洗，脱掉聚四氟乙烯套筒，再用饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液进行冲洗，在阴凉处静置风干。
- F4.10 将风干的试块称重，测量高度，然后从与源液池接触的一端开始沿轴向进行磨削，磨了一定厚度之后，再对试块进行称重，测量高度；磨削过程中对粉末进行收集，粉末

称重，计算收率，对粉末样进行 Cs-137 活度测量。

F4.11 重复 F4.10 对试块进行逐层磨削，直至粉末样中测不出 Cs-137。

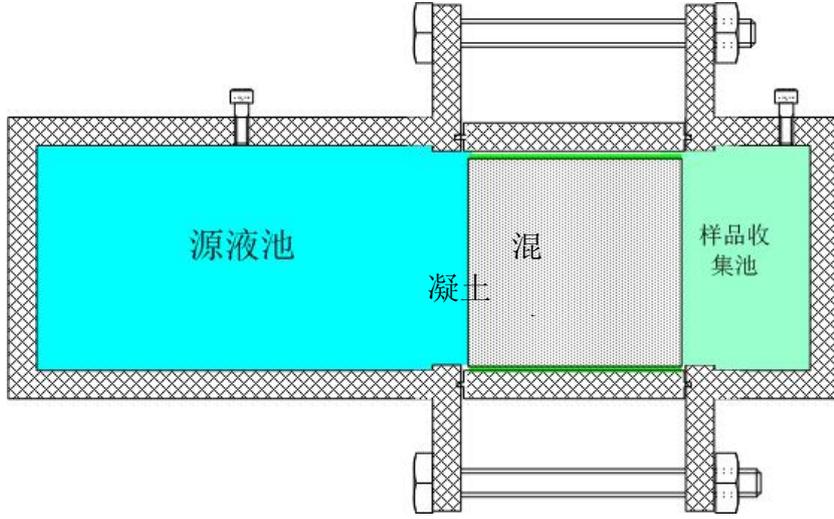


图 F-1 混凝土试块 Cs-137 扩散装置

F5 测试结果

根据扩散方程

$$D_i \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \alpha \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{F-1})$$

在半无限大模式下：

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \exp\left[\alpha \frac{x}{H_f} + \frac{D_i \alpha}{H_f^2} t\right] \times \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_i t/\alpha}} + \frac{\sqrt{D_i \alpha t}}{H_f}\right) \quad (\text{F-2})$$

式中：

C_0 : 源液池中 Cs-137 的初始浓度 (Bq/L) ;

$C_{(x,t)}$: 时间 t 时距离端面 x 处孔隙水中 Cs-137 的浓度；

混凝土试块

α : 容量因子 (-)

D_i : 有效扩散系数 (m^2/s)

H_f : 源液池长 (m)

而实验过程中，实际所测混凝土试块中的核素浓度和孔隙水中核素以及吸附在混凝土样品上核素的总和有关。

$$AC_r = \frac{A_r}{m} = \frac{cV_{pw} + cmK_d}{m} \quad (\text{F-3})$$

式中：

AC_r : 磨削下来混凝土试块粉末样品中 Cs-137 的活度浓度 (Bq/g)

A_r : 磨削下来混凝土试块粉末样品中的 Cs-137 的活度 (Bq)

m: 磨削下来混凝土试块粉末样品的质量 (kg)

V_{pw} : 空隙水体积 (m³)

c: 孔隙水中 Cs - 137 的浓度 (Bq/m³)

式 (F-2) 与 (F-3) 合并

$$AC_r = \frac{V_{pw} + mK_d}{m} C_0 \exp\left[\alpha \frac{x}{H_f} + \frac{D_i \alpha}{H_f^2} t\right] \times \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_i t/\alpha}} + \frac{\sqrt{D_i \alpha t}}{H_f}\right) \quad (\text{F-4})$$

根据磨削样品测得的混凝土试块内部核素浓度, 用方程 (F-4) 拟合, 可得出 Cs-137 的表观扩散系数。

附录 G 高整体容器无损检测方法（规范性附录）

G1 测试范围

无损检测用于测试混凝土高整体容器成品质量，作为混凝土高整体容器质量检验依据。

G2 基本原理

本方法采用混凝土超声波速仪对混凝土高整体容器进行无损检测，通过测量超声波在容器壁厚方向上的传播速度来判断高整体容器的质量。

G3 测试仪器与设备

G3.1 混凝土超声波速仪应符合《混凝土超声波检测仪》JG/T 5004 的要求，并在计量检定有效期内使用。

G3.2 模拟式和数字式超声波仪应满足标准 CECS 02: 2005《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》中 4.1.4 条至 4.1.6 条的规定。

G4 测试步骤

G4.1 混凝土高整体容器的无损检测在成品养护 28 天后进行。

G4.2 高整体容器超声测点数不应小于 10 个，测点应均匀覆盖高整体容器的侧壁、底部和密封盖。

G4.3 在测点上使用超声波速仪测量超声波在厚度方向的传播时间，每一测点反复测试不应少于 3 次，取稳定值作为测试结果。

G4.4 通过测点处容器厚度与超声波传播时间计算超声波速 v (m/s)：

$$v = \frac{\delta}{\Delta t} \quad (\text{G-1})$$

其中： δ 为容器厚度 (m)； Δt 为超声波传播时间 (s)。

G4.5 重复 G4.2-G4.4，测量所有测点的超声波速。

G5 质量检验标准

G5.1 按照下式计算全部测点超声波速的平均值 m_v 和方差 s_v ：

$$m_v = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}, \quad s_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - m_v)^2}{n-1}} \quad (\text{G-2})$$

其中： n 为测点总数。

G5.2 超声波速平均值、方差和测得的超声波速最低值 v_{\min} 应满足以下关系：

$$\begin{aligned} m_v - s_v &\geq v_k \\ v_{\min} &\geq v_k - \sigma \end{aligned} \quad (\text{G-3})$$

其中 v_k, σ 为混凝土高整体容器超声波速统计分布的特征值和方差，该特征值和方差应在同类产品的型式试验过程中，通过对已确认合格产品进行的多次超声波检测试验和数据统计中的得到。

G5.3 如所有测点的超声波速满足 (G-3 式)，则判定为无损检测质量合格；如不能满足 (G-3

式)的要求,则需要在混凝土高整体容器上再取相同数量测点(不少于 10 个)进行超声波速测量,将测试结果和首次测试结果合并分析,按照(G-3 式)进行质量判断,如满足仍视为质量合格,如不满足则视为无损检测质量不合格。
