

CNIC-00982
BINE-0027

CN9600982

中国核科技报告

核废物混凝土桶的研制

DEVELOPMENT OF NUCLEAR
WASTE CONCRETE DRUM
(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

MOL 27 No 1 1



温英惠：北京核工程设计研究院高级工程师，1967年毕业于北京工业大学化工系硅酸盐专业。

Wen Yinghui, Senior engineer of Beijing Institute of Nuclear Engineering. Graduated from Department of Chemical Technology, Beijing Industrial University in 1967, majoring in silicate.

CNIC-00982

BINE-0027

核废物混凝土桶的研制

温英惠

(北京核工程设计研究院)

摘 要

综述了核废物混凝土桶的原材料选择及性能、混凝土配方及性能、桶的规格及技术质量要求；阐述了制造要点、制造工艺、实验和检测及全过程有效的质量控制和保证。研制的核废物混凝土桶结构简单，原材料方便易得，混凝土配方合理。其技术指标：抗压强度大于 70 MPa；抗拉强度大于 5 MPa；渗氮率达 $(2.16 \sim 3.6) \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 水平；桶各部分尺寸误差均在 $\pm 2 \text{ mm}$ 以内；桶外表面平整，砂表面、空洞和裂纹均符合中国标准要求。该研究成果说明了我国已具有核废物混凝土包装转运容器的综合研制与生产能力，为实现我国核废物包装转运容器的标准化、系列化奠定了基础。

DEVELOPMENT OF NUCLEAR WASTE CONCRETE DRUM

(In Chinese)

Wen Yinghui

(BEIJING INSTITUTE OF NUCLEAR ENGINEERING)

ABSTRACT

The raw materials selection and the properties for nuclear waste concrete drum, the formula and properties of the concrete, the specification and technical quality requirement of the drum were described. The manufacture essentials and technology, the experiments and checks as well as the effective quality control and quality assurance carried out in the course of production were presented. The nuclear waste drum has a simple structure, easily available raw materials and rational formula for concrete. The compressive strength of the drum is more than 70 MPa, the tensile strength is more than 5 MPa, the nitrogen permeability is $(2.16 \sim 3.6) \times 10^{-18} \text{ m}^2$. The error of the drum in dimensions is $\pm 2 \text{ mm}$. The external surface of the drum is smooth. The drum accords with China standards in the sandy surface, void and crack. The results shows China has the ability to develop and produce nuclear waste concrete container and lays the foundation for standardization and series of the nuclear waste container for packing and transporting in China.

前言

随着核科学的不断发展，大量放射性废物不断产生，三废处理亟待解决。优良的包装可以发挥多方面作用。它可以确保搬运安全；有利于废物堆放操作；确保回取的可能性；在处置时提供有效的废物屏障。当前世界核发达国家广泛采用混凝土容器作为中、低放废物包装，实践证明其对辐射防护是安全可靠的。随着秦山、广东核电站建成投产，急需废物容器，为此我们开发研制了核废物混凝土桶。

1 规格及用途

核废物混凝土桶系贮存中、低放废物的专用容器，为确保国土和环境不受污染，我们根据所装废物放射性水平高低、种类及中低放废物包装容器设计要求，开发研制了四种型号的混凝土桶。规格如表 1 所示。

表 1 混凝土桶规格

型号	直径/m	高度/m	厚度/mm	容积/m ³	质量/t
C ₁	1.4	1.3	150	0.92	2~3
C ₂	1.4	1.3	300	0.40	4~5
C ₃	1.4	1.3	400	0.21	4~5
C ₄	1.1	1.3	150	0.48	2

混凝土桶均有焊接的钢筋网加强，并配有预埋槽钢吊装圈，可供专用抓具吊运。

C₁、C₂、C₃ 型桶配有桶盖及金属内筒，用于防备固化的废物在凝固和存放期间可能的膨胀及废物对混凝土桶的热冲击。C₄ 型桶内配有定位卡，以固定过滤器芯子。

C₁、C₂ 桶用于存放中放树脂及浓缩液的水泥固化物，C₃ 桶用于存放例外情况高水平树脂的水泥固化物，C₄ 桶用于存放过滤器芯子。图 1 为混凝土桶结构示意图。

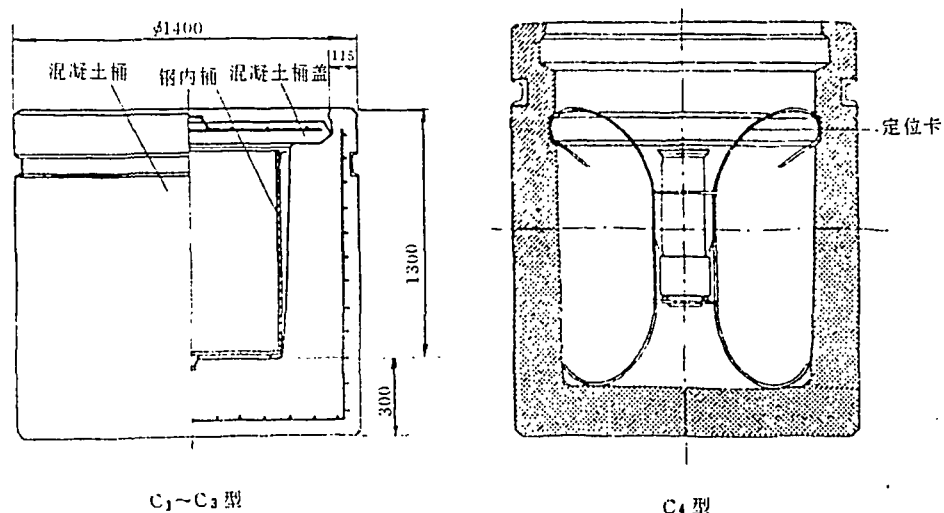


图 1 核废物混凝土桶结构示意图

2 技术要求

2.1 原材料

砂、石、水泥、拌合水和外加剂必须满足国家标准要求。

2.2 混凝土性能

混凝土性能应达到表 2 要求。

表 2 混凝土性能要求

序号	实验项目	验收标准	试验结果
1	坍落度/cm	5±3	2.6~4.6
2	28 d 质量损失 (试样 7 cm×7 cm×28 cm) /kg·m ⁻³	≤30	14.1~17.1
3	28 d 收缩 (试样 7 cm×7 cm×28 cm) /μm·m ⁻¹	≤600	242~303
4	28 d 抗压强度 (三个试样测量的算术平均值, 试样 10 cm×10 cm×10 cm) /MPa	≥55	77.9~82.2
5	28 d 抗拉强度 (三个试样测量的算术平均值, 试样 10 cm×10 cm×10 cm) /MPa	≥5	5.5~6.1
6	冻融实验 25 次冻融循环抗压 (抗拉) 强度 / 标准养护强度 / %	≥80	>96
7	25 次冻融后膨胀 /μm·m ⁻¹	≤500	0~6
8	28 d 渗氯 K/m ²	≤5×10 ⁻¹⁸	(2.16~3.6) × 10 ⁻¹⁸

注 1, 混凝土 28 d 的抗压强度应满足: $\sigma'_{28} > 0.85 \sigma'_e$ (CE-C_{min}) = 68.5 MPa; $\sigma'_{28} > 1.1 \sigma'_e = 60.5$ MPa

式中 σ'_{28} 为 3 次试验 (9 次测量) 算术平均值;

σ'_e 为 55 MPa (标准强度值);

CE 为用于本项研究中的水泥第 28 d 的抗压强度 (73.2 MPa);

C_{min} 为国家标准中对水泥强度等级规定的第 28 d 抗压强度的最小保证值 51.5 MPa (525 kg/m²)。

注 2, 要求导比配混凝土 28 d 的抗压强度应在 $\sigma'_{28} \pm 15\%$ 范围内。

从混凝土性能要求看, 该混凝土应具有高的抗拉强度和致密度。

2.3 混凝土桶的质量

桶的质量验收标准如下:

(1) 钢筋和 U 型钢 产品出模后, 目检桶外表面和底不得有钢筋外露, U 型钢焊接良好。

(2) 外观质量 桶外表面应光洁平整, 脱模后不应再进行人工或机械修整, 任何锃平、磨光或堵塞的痕迹都是不合格的。

(3) 砂表面 系指容器表面带有凸凹度不超过 0.1 mm 的缺陷, 如麻面、灰渣和脱皮。砂表面每片不得大于 100 cm², 即 10 cm×10 cm (正方形) 或 5 cm×20 cm (长方形)。片与片不能相连, 累积面积不得超过表面积 1/20。

(4) 空洞 系指容器表面带有深度大于 0.1 mm 的缺陷, 如气孔和预埋件周围没有填满的坑。空洞每片面积不得大于 25 cm², 即 5 cm×5 cm (正方形) 或 2.5 cm×10 cm (长方形)。片与片不能相连, 每平方米外表面空洞不得超过 2 片, 任何情况不允许有深度大于 1 cm 的空洞。

(5) 裂纹 宽度小于或等于 0.1 mm 的裂纹, 在外表面和底部长度不得大于 20 cm; 宽度大于 0.1 mm, 小于或等于 0.3 mm 的裂纹在外表面的长度不得大于 2 cm, 在底部的长度不得大于 5 cm; 任何情况下都不允许有宽度大于 0.3 mm 的裂纹。

(6) 内部质量 将桶沿轴线切成两半, 要求切割表面不得有直径大于 1 cm 的气泡, 骨

料分布均匀，没有明显的分层现象，钢筋分布均匀，位置不能发生明显移动。

(7) 尺寸公差 (详见表 10)

(8) 渗漏 将外观质量、尺寸检查合格的桶在检查后的第 7 天时充满水，将盖子盖好，在第 28 天时检测水的减少量，再一次充满水，盖好盖，再过 21 天进行检查，桶应无渗漏。

3 实验及其结果

整个研制分两个阶段，首先进行了桶的设计、原材料选择、混凝土配方、实验桶制作和切割检查，然后进行了工装和实验设备研制，桶的工业生产和验收。

3.1 原材料选择

我们严格按技术要求对砂、石、水泥等进行了千组以上的试验，最后选用了如下的原材料：

(1) 砂

选用永定河砂。粒度分析 (0.08~5 mm 方孔筛) 结果如表 3 所示。

表 3 永定河砂粒度分析

筛孔尺寸/mm	规定通过百分比/%	试验通过百分比/%
5.0	97~100	100
4.0	94~99	96.4
2.5	85~97	83.0
1.6	72~93	75.3
1.0	55~87	68.3
0.8	45~85	62.4
0.5	30~60	47.2
0.315	15~35	25.9
0.200	5~20	13.4
0.160	1~15	8.1
0.100	0~7	3.0
0.080	0~5	2.1

粒度分析结果符合要求。

碱活性反应试验结果如图 2 所示。

参照标准：《普通混凝土用砂质量标准及检验方法》修订版 (JGJ52-92)。

原始滤液中 SiO_2 的浓度 $S_c = 0.02 \text{ mol/L}$ ；碱液的分解量浓度 $R_c = 0.057 \text{ mol/L}$ 。

检测结果表明 N 点在不反应骨料区，不会发生碱骨料反应。

其它性能检测结果如表 4 所示，其结果符合要求。

表 4 永定河砂性能

检测项目	验收标准	试验结果
脆性指数	FS<30	18.2
砂当量	80<ES<90	92.0
亚甲蓝实验/g	VB<1	0.7
比色实验		合格
视比重		2.69
Cl^- 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	<100	10
SO_4^{2-} 含量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	<4	0.72

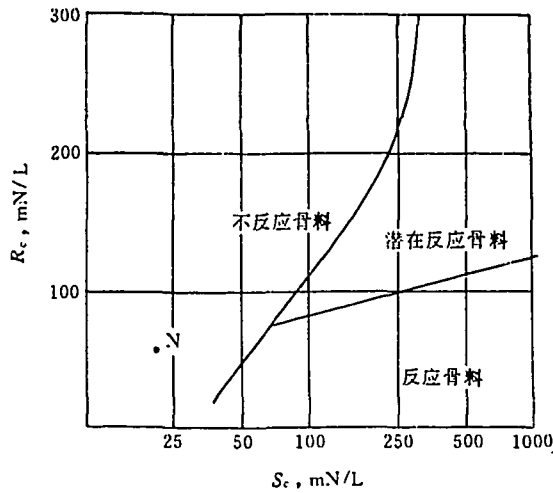


图2 碱活性反应试验结果

检测结果中，砂当量略大于验收指标。砂当量偏大将影响混凝土泵送性能，但此材料用于预制混凝土构件，不需泵送；砂子干净还有利于制备性能好的混凝土，对产生品质量不会产生坏的影响。

(2) 石子

选用门头沟沙石厂生产的石灰石碎石，其岩相为：

碳酸钙 (CaCO_3) 约 60% 以上；

白云石 [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] 约 20%；

云母类矿物约 3%；

墨色不透明矿物约 10%。

粒度分析 (5~20 mm 方孔筛) 结果如表 5 所示。

表 5 石灰石碎石粒度分析

筛孔孔径/mm	通过率/%
20	100
16	82.6
10	32.9
6.3	4.1
5.0	1.4

碱活性反应试验结果如图 3 所示。

参照标准：《普通混凝土用碎石或卵石质量标准及检验方法》修订版 (JGJ53-92)。

原始滤液中 SiO_2 的浓度 $S_c = 0.007 \text{ mol/L}$ ；碱液的分解量浓度 $R_c = 0.243 \text{ mol/L}$ 。

检测结果表明石灰石碎石 (M 点) 在非活性骨料区内，是非活性骨料，不会有碱骨料反应发生。

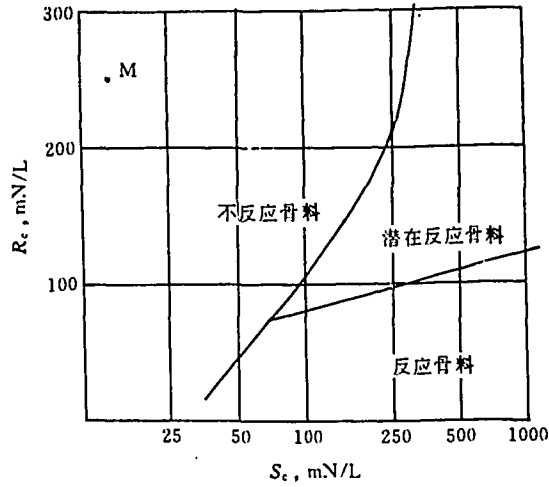


图3 碱活性反应试验结果

其它性能检测结果如表6所示，其结果符合要求。

表6 石灰石性能

检测项目	验收标准	试验结果
吸水率/%	Ab<4	0.39
洛杉矶指数	LA<30	25.14
耐磨性	MDE<25	14.6
清洁度/%	P<2	0.2
平整度指数/%	A<25	11.6
视比重		2.69
Cl ⁻ 含量/mg·kg ⁻¹	<50	10
SO ₄ ²⁻ 含量/g·kg ⁻¹	<4	0.36

(3) 水泥

选用冀东水泥厂的525号硅酸盐水泥，其各项性能如表7所示，其结果符合要求。

表7 冀东水泥厂525号硅酸盐水泥性能

检测项目	验收标准	试验结果
凝结时间	初凝不得早于45 min 终凝不得迟于12 h	初凝: 1:50 终凝: 2:21
假凝	不允许有假凝	无假凝
热、冷膨胀/mm	<5	热膨胀1.0 冷膨胀0.5
比表面积/cm ² ·g ⁻¹	>2500 <5000	3190
收缩和膨胀(28 d)/μm·m ⁻¹	<1000	收缩1100 膨胀1070
水化热(12 h)/J·g ⁻¹	<230	154.75
力学性能(28 d抗压强度)/MPa		73.2

检测结果中，水泥的收缩、膨胀值都略大于验收标准，这是由于验收引用的是法国标准，而实验时用的是中国标准砂，其粒径比法国标准砂细，砂细对水泥的收缩膨胀影响显著，另外我们实验用标准砂浆水泥用量大（法国用 450 g，中国用 540 g），故收缩和膨胀也大。

尽管水泥检测中收缩和膨胀值偏大，但用其配制的混凝土的收缩和膨胀值比验收标准要小得多，如指标规定混凝土收缩应小于 $600 \mu\text{m}/\text{m}$ ，膨胀应小于 $500 \mu\text{m}/\text{m}$ ，实验结果收缩为 $300 \mu\text{m}/\text{m}$ ，膨胀为 $4 \mu\text{m}/\text{m}$ 。因此，我们认为这一结果对混凝土性能无不利影响。

(4) 拌合水

选用饮用水，其各项性能指标如表 8 所示，结果符合要求。

表 8 饮用水质量

检测项目	验收标准	试验结果
悬浮物含量/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	<2	0.13
可溶物含量/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	<2	0.92
Cl^- 含量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	<250	170
SO_4^{2-} 含量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	<250	120
Mg^{++} 含量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	<125	50.5

(5) 外加剂

选用 FE 苯系高效减水剂和硅灰，用以改善混凝土和易性，增加密实性，提高抗拉强度。以上选择的原材料各项实验和性能完全达到技术要求。

3.2 混凝土配方

实验要求该混凝土高强、高致密。根据性能要求和生产实际，我们按表 9 参数，通过反复实验确定了混凝土基本配比和养护制度。

表 9 混凝土配比参数

项目	选择范围
水泥用量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	400~550
砂率/%	25~33
外加剂种类和掺量/%	$M_{1112} + M_{1113}$ 抗渗剂 FE 高效减水剂 (0.5~1)
养护制度	硅灰 (4~10) 自然养护 40~70°C 蒸汽养护

对下列混凝土配比进行了试验：

基本配比：拌和 3 次；

导出配比 I 砂率增加 10%，拌和两次；

导出配比 II 砂率减少 10%，拌和两次；

导出配比 III 水泥用量增加 $25 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，拌和两次；

导出配比 IV 水泥用量减少 $25 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，拌和两次。

试验结果:

基本配比各项性能如表 2 所示,符合要求。 $\sigma'_{28} = 77.9 \text{ MPa} > 60.5 \text{ MPa} > 68.5 \text{ MPa}$,符合要求。

导出配比 I $\sigma'_{28} + 6\%$;

导出配比 II $\sigma'_{28} + 3\%$;

导出配比 III $\sigma'_{28} + 2\%$;

导出配比 IV $\sigma'_{28} + 1\%$ 。

符合要求。

由于配比选择了比较合理的水泥用量、砂率和水灰比,混凝土性能完全达到技术要求,苯系高效减水剂和硅灰的掺入,也使混凝土各项性能都得到了改善;尤其是对增强抗渗性和提高抗拉强度起到了良好的作用,通过硅灰不同掺量对比实验,选择了最佳掺量。

3.3 混凝土桶

在原材料,混凝土配方选定之后,我们模拟生产工艺试制了实验桶,并将桶沿轴线纵向切成两半,检查内部质量。结果表明,实验桶内部质量完全达到技术要求,图 4 为切割后的混凝土桶。

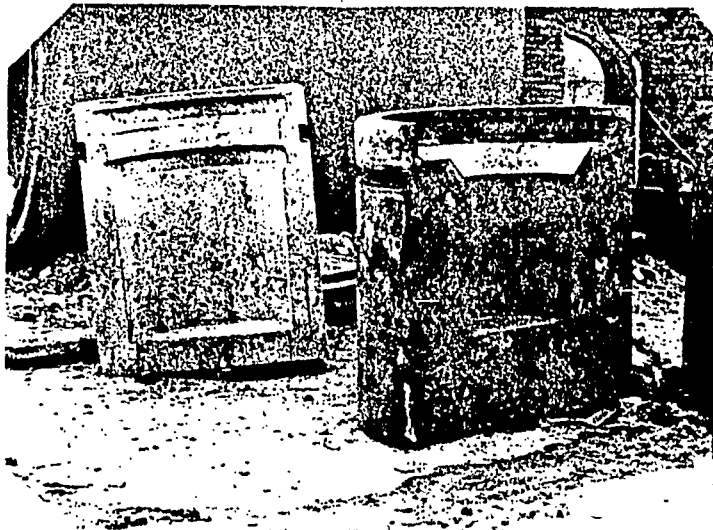


图 4 切割后的核废物混凝土桶内部质量

从 1989 年 7 月到 1992 年 7 月,历时三年,我们生产了 700 多个混凝土桶,并对每个桶进行了认真细致的检查。结果合格率达 90% 以上,各项性能指标完全符合 2.3 节的技术要求。

(1) 桶的外高、外径、内径及内外轴线同心度均与技术要求相一致,各部位尺寸误差都在 $\pm 2 \text{ mm}$ 以内;

(2) 桶表面平整,没有可见钢筋,砂表面、空洞及裂纹均符合验收标准;

(3) 混凝土强度达到设计要求,抗压强度大于 70 MPa ,抗拉强度大于 5 MPa ;

(4) 桶均无渗漏。

表 10 为混凝土桶的部分指标。

表 10 核废物混凝土桶部分指标

外形尺寸/mm	标准	实测	允许误差	实际误差
外高: C ₁ ~C ₄	1300	1298~1302	±2	±2
外径: C ₁ ~C ₃	1400	1398~1402	±2	±2
C ₄	1100	1098~1102	±2	±2
内径: 桶口C ₁	1170	1168~1172	±5	±2
C ₂	1170	1168~1172	±5	±2
C ₃	1170	1168~1172	±5	±2
C ₄	870	868~872	±5	±2
上部C ₁	1120	1118~1122	±5	±2
C ₂	1120	1118~1122	±5	±2
C ₃	1120	1118~1122	±5	±2
C ₄	820	818~822	±5	±2
下部C ₁	1080	1078~1082	±5	±2
C ₂	778	776~780	±5	±2
C ₃	590	588~592	±5	±2
C ₄	780	778~782	±5	±2
内外轴线同心度			±4	±2
渗漏	无	无		
混凝土强度				
抗压强度 (28 d) /MPa	>55	77.9~82.2		
抗拉强度 (28 d) /MPa	>5.0	5.5~6.1		

通过全面检查验收,分析评定,我们研制的核废物混凝土桶质量已达国外同类产品先进水平,第一批产品 596 个混凝土桶已运到广东大亚湾核电站现场投入使用。

图 5 为我们研制的核废物混凝土桶。

4 具体做法

我们采取研究院与工厂联合,分段开发研制的办法。研究院负责方案设计审查、制定技术指标、验收标准及质控措施、原材料选择及混凝土配方设计、从设计到生产的全面质量管理及采取 QA、QC 监督,以保证桶的整体质量。工厂则负责桶的加工。

在研制期间我们主要抓了以下几方面的工作:

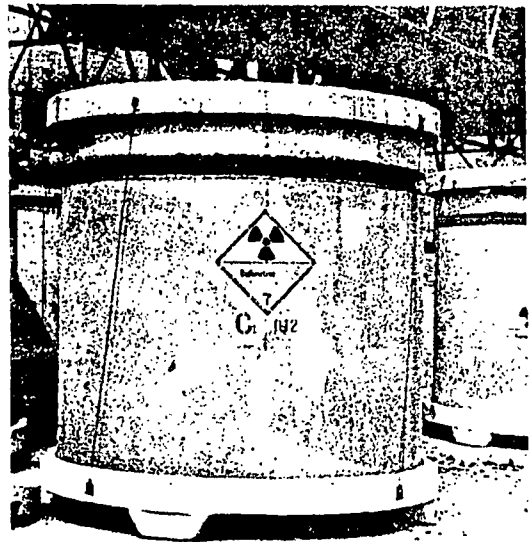


图 5 核废物混凝土桶

(1) 按照技术要求控制原材料（砂、石、水泥、外加剂……）。

对砂和石子定期地进行了下面检查实验：

每 100 个桶：粒度分析、清洁度、亚甲蓝试验， Cl^- 含量；

每 200 个桶：扁平度、比色实验；

每 500 个桶或每年：洛杉矶指数，耐磨性。

不得使用存放时间超过 6 个月的骨料。

对水泥进行了下面的检查实验：

每批供货当天进行凝结、假凝、热冷膨胀、比表面检查、留样封存；

每月进行一次 28 d 力学性能和水化热实验；

不得使用存放时间超过 3 个月，温度高于 $70^{\circ}C$ ，清扫容器残留或受潮水泥。

(2) 认真控制混凝土配比、浇注、养护、脱模等工艺参数。

(3) 系统地进行混凝土性能检查实验。

用基本配比进行了坍落度、28 d 抗压和抗拉强度、重量损失和收缩、渗氮、冻融实验。

混凝土配料允许偏差（重量）控制：

砂 $\pm 3\%$ ；石子 $\pm 3\%$ ；水泥 $\pm 2\%$ ；水 $\pm 2\%$ ；外加剂 $\pm 5\%$ 。

(4) 严格进行桶的验收。

验收中，每种型号的桶取一个进行如下检查：

钢筋网的安装、砼浇注、振捣、养护、脱模；

桶脱模 7 d 后逐个进行尺寸检查和渗漏实验；

按 2.3 节进行直观检查，桶外观质量是用户对质量评价的直接窗口，为此我们将其作为停工待检点，进行了严格把关，逐个检查。每个桶都建立了工作卡，记录强度、外形尺寸、表面质量及渗漏情况，作为质量依据，合格证明。

(5) 质量管理

核废物混凝土桶的研制能获得圆满成功与我们在整个研制过程中抓了从设计到生产的全面质量管理，有效的 QA，QC 监督分不开。在桶研制的全过程中我们始终遵循了 PDCA 循环的工作程序，即计划（P）——执行（D）——检查（C）——总结（A）的管理方法。从组织上、制度上保证了桶的研制处于受控状态。

5 结 论

(1) 研制的核废物混凝土桶原材料方便易得，混凝土配方合理，其抗压强度大于 70 MPa，抗拉强度大于 5 MPa，渗氮率达 $(2.16 \sim 3.6) \times 10^{-18} m^2$ 水平，桶各部位尺寸误差均在 $\pm 2 mm$ 以内，外表面平整，砂表面、空洞、裂纹均符合我国标准要求。

(2) 桶结构合理，可与专用吊具配合使用，便于实现远距离操作，为我国各核电厂中、低放废物处理、包装、转运、贮存开辟了一条新路。

(3) 在研制混凝土桶同时，还配套开发研制了高精度模具、高频振动台、专用吊具、切割机 and 渗氮仪，解决了低温蒸养工艺的一些高难技术，填补了国内多项空白，说明我国已具有核废物混凝土包装转运容器的综合研制与生产能力。

(4) 贯彻全面质量管理，进行有效的 QA，QC 监督，是开发研制获得成功的保证。

(京)新登字 077 号

图书在版编目 (CIP) 数据

核废物混凝土桶的研制 = DEVELOPMENT OF NU-
CLEAR WASTE CONCRETE DRUM/温英惠著. —北京:
原子能出版社, 1995. 6
ISBN 7-5022-1377-5

I. 核… I. 温… III. 放射性废物贮存-放射性废物设
施 IV. TL942

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 08722 号



原子能出版社出版发行

责任编辑: 孙凤春

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

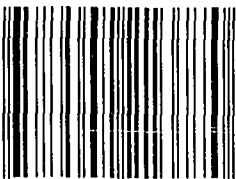
开本 787×1092 1/16·印张 1/2·字数 20 千字

1995 年 6 月北京第一版·1995 年 6 月北京第一次印刷

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-1377-5



9 787502 213770 >