

高密度混凝土辐射屏蔽试验研究与应用

伍崇明^{1,5}, 丁德馨², 肖雪夫³, 林兴君⁴, 王绍林³, 沈媛媛⁵

(1. 中南大学, 湖南长沙 410083; 2. 南华大学, 湖南衡阳 421001; 3. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;
4. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084; 5. 中国核工业第二四建设公司, 四川绵阳 621000)

摘要: 针对科研和工程需要, 对密度 4.60 t/m^3 屏蔽 γ 射线防辐射混凝土配合比设计、施工工艺、混凝土密实度和屏蔽均匀性等进行了系统研究, 解决了高密度混凝土施工中的均匀性、密实度问题, 提出了射线检测屏蔽混凝土密度和屏蔽均匀性的方法, 总结了高密度混凝土施工的技术措施。经工程实践证明, 配合比设计和施工工艺可行, 保证了工程实体施工质量。

关键词: 高密度混凝土; 配合比设计; 施工工艺; 屏蔽效果; 屏蔽均匀性

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2008)10-0956-05

Study and Application of High-Density Concrete in Radiation-Shielding Experiment

WU Chong-ming^{1,5}, DING De-xin², XIAO Xue-fu³, LIN Xing-jun⁴,
WANG Shao-lin³, SHEN Yuan-yuan⁵

(1. *Central South University, Changsha 410083, China;*

2. *Nanhua University, Hengyang 421001, China;*

3. *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*

4. *Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

5. *China Nuclear Industry 24th Construction Corporation, Mianyang 621000, China)*

Abstract: According to the demand for research and construction project, a series of systematic experiments and studies on shielding γ -ray radiation concrete with the density of 4.60 t/m^3 were made in such aspects as mix ratio design, construction technology, uniformly shielding etc. Such issues as uniformity in the construction and compactness were solved. The ray test method for uniformly shielding concrete was presented and some technical steps for this high-density concrete used in the process of test design or construction were summed up. A series of tests and practical applications show that this technology of mix ratio design and construction is feasible.

Key words: high-density concrete; mix ratio design; construction technology; shielding effect; shielding uniformit

目前,国内外防辐射混凝土技术主要有以下两种:1) 采用磁铁矿石、褐铁矿石或重晶石作粗细集料配制屏蔽混凝土,该技术是目前使用最为广泛的一种;2) 应用高性能混凝土技术,由于该方法未采用密度大的防辐射集料,因而必须通过增加混凝土厚度才能达到屏蔽射线的目的^[1]。如对于同一 γ 源,要使其辐射强度衰减一半,对于普通混凝土需 5.95 cm 厚,而对防辐射混凝土则只需 3.93~3.97 cm 厚即可^[2]。

配制和应用高密度防辐射屏蔽混凝土的技术难点主要有:1) 配制防辐射混凝土集料密度大,水灰比小,水泥用量大,水化放热速率高,收缩率大,因温升产生的应力可能造成混凝土开裂等^[1];2) 骨料与混凝土其他组成成分间密度差较大,混凝土施工的和易性、均匀性、密实度等较难得到有效控制和协调统一;3) 由于集料的特重原因,运输和浇筑过程中混凝土易产生离析;4) 对屏蔽混凝土的密实度和裂缝有较高要求^[3],施工应保证密实度、均匀性和不裂缝。

核工程中常用的屏蔽混凝土密度在 3.60 t/m³ 以下,密度大于 3.60 t/m³ 的屏蔽配合比设计与施工相关工程实例报道较少,目前,国内尚无试验和施工的相关经验。由于科研和工程应用需要,某工程中采用屏蔽 γ 射线混凝土的技术条件是:硬化后单位密度 4.60 t/m³,强度等级 C35、抗渗等级 P8。本试验研究的目的是获得屏蔽混凝土的施工用配合比,提供保证屏蔽混凝土施工均匀性、密实度的施工工艺,确保屏蔽混凝土施工质量可靠。

1 屏蔽混凝土配合比设计与试验

防辐射混凝土常用的粗骨料有钢块、钢段、磁铁矿、褐铁矿、重晶石、蛇纹石等^[2]。根据对 3.30、3.60 t/m³ 等屏蔽混凝土的科研试验研究和工程应用经验,选定的粗、细骨料性能试验结果列于表 1。

在普通混凝土配合比设计原理^[4]指导下,依据屏蔽混凝土密度、强度及抗渗等级等主要技术指标进行试验,对选定的试验配合比进行调整试验,研究影响屏蔽混凝土性能的各种参数。对各项指标综合比较后,推荐最佳配合比(表 2),混凝土 28 d 抗压强度为 37.0 MPa,大于 C35 等级,抗渗等级达到 P₁₀,高于 P₈。

混凝土中碱、氯离子含量是核工程混凝土控制指标之一,经计算,屏蔽混凝土中总碱含量 0.79 g/m³,总氯离子含量 82.4 g/m³,满足要求。

表 1 4.60 t/m³ 屏蔽 γ 射线混凝土所选骨料性能

材料名称	规格	表观密度/ (t·m ⁻³)	堆积密度/ (t·m ⁻³)
磁铁矿砂	人工混合 II 区中砂	4.62~4.59	2.25~2.51
赤铁矿石	5~16 mm 连续级	4.57~4.65	2.28~2.30
铸铁块	10 mm×12 mm、 16 mm×16 mm、 20 mm×25 mm、 25 mm×30 mm	7.5	4.35

表 2 配合比与混凝土性能

配合比/(kg·m ⁻³)					
水泥	水	矿砂	矿石	铸铁块	减水剂
350	170	1 400	250	2 650	7.0
混凝土性能					
抗压强度/ MPa	坍落度/ m	密度/ (t·m ⁻³)	粘聚性	泌水性	
37.0	110	4.87	适中	无	

2 施工工艺试验与接收试验

接收试验是用实验室最佳试验配合比,通过施工工艺模拟试验检验其可施工性;利用施工工艺模拟试验的实体屏蔽混凝土墙进行辐射均匀性试验,检验其屏蔽混凝土实体的密实度和均匀性,最终确认工程施工用配合比和施工工艺。模拟试验和接收试验同时进行。

选择 2 000 mm(宽)×1 500 mm(高)×300 mm(厚)的模型进行屏蔽混凝土浇筑试验,模拟工程应用情况在模型内绑扎钢筋网。混凝土分层浇筑,每层厚度不超过 300 mm。采用 ϕ 30 mm 的振捣棒和 ϕ 18 mm 的圆钢人工插捣两种振捣工艺。混凝土浇筑完成后设置保温棚,覆盖养护 14 d。两种工艺施工的混凝土墙体均无蜂窝、裂缝等外观缺陷,机械振捣优于人工振捣。屏蔽混凝土表观密度、抗压强度、抗渗

等级均满足试验要求。

3 屏蔽混凝土密度均匀性和屏蔽效果检验

射线法是通过测量辐射射线在无和有屏蔽材料存在时的剂量率值衰减来检验屏蔽材料密度均匀性的方法。为研究密度为 4.60 t/m^3 的屏蔽混凝土的均匀性、屏蔽效果及验证施工工艺,用射线法对模拟试验的屏蔽混凝土实体墙密度的均匀性进行测试。

3.1 有关参数及测量仪器

1) 屏蔽混凝土预计密度为 4.60 t/m^3 ; 屏蔽混凝土墙体厚度 300 mm 。

2) 采用 ^{60}Co 源 ($9.25 \times 10^8 \text{ Bq}$)。

3) Γ 常数, $\Gamma(^{60}\text{Co}) = 9.20 \times 10^{-15} \text{ C} \cdot \text{m}^2 / (\text{kg} \cdot \text{h} \cdot \text{Bq})$ 。

4) 质量衰减系数(混凝土和空气), $(\mu/\rho)(^{60}\text{Co}) = 0.0567 \text{ cm}^2/\text{g}$ 。

5) 使用仪器: SG-102 X、 γ 剂量率仪, 量程范围为 $0 \sim 10 \mu\text{Gy/h}$ ($0 \sim 1000 \text{ rad/h}$); RAM10N 可携式 γ 剂量率仪, 量程范围为 $0 \sim 5 \times 10^3 \mu\text{Gy/h}$ 。

3.2 试验布置

实验采用由钢筋焊接的固定式双肩吊篮, 一侧固定放置射线输出器, 另一侧安放探测器; 探测器的中心轴与射线输出器射线出射的中心轴处在同一直线上; 屏蔽混凝土屏蔽墙位于吊篮之间; 用吊车将置于两侧吊篮中的射线输出器和探测器沿屏蔽墙高度和长度方向自由移动。实验现场测量相对位置示意图示于图 1。

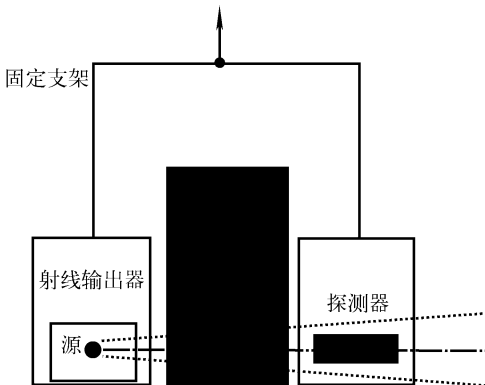


图 1 实验现场测量相对位置示意图

Fig. 1 Scheme of experiment site for measuring relative position

各屏蔽混凝土屏蔽墙测量位置点为宽度方向, 两侧各留 150 mm , 间隔 350 mm 设置 1 个测点; 高度方向上端留 100 mm , 下端留 100 mm , 间隔 250 mm 设置 1 个测点; 每块屏蔽混凝土屏蔽墙布置 18 个测点, 测点编号示于图 2。

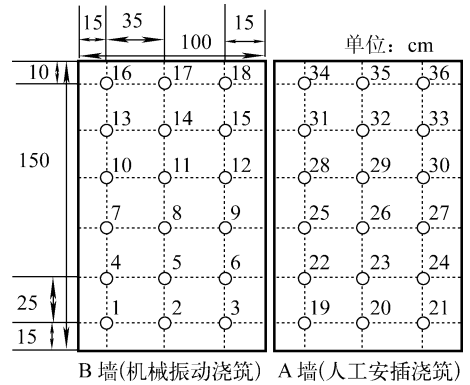


图 2 混凝土屏蔽墙测量位置布点示意图
Fig. 2 Scheme of concrete shielding wall for measuring location points

每次测量所涉及的屏蔽混凝土屏蔽墙材料尺寸与探测器尺寸、探测器与屏蔽墙间的距离、 γ 射线输出器的张角、放射源与屏蔽墙间的距离等因素有关。计算 1 次测量所涉及的混凝土屏蔽墙材料尺寸示意图如图 3 所示。

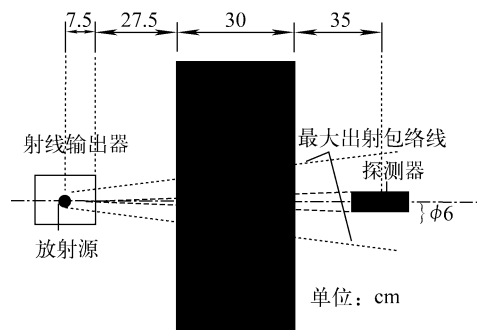


图 3 计算 1 次测量所涉及的混凝土屏蔽墙材料尺寸示意图

Fig. 3 Scheme of concrete shielding wall material dimension for accounting a measurement

采用相似三角形比例法可得到在屏蔽混凝土屏蔽墙近源一侧所涉及面积为 16.3 cm^2 (入射光斑直径 4.56 cm)。因此, 测量所涉及屏

蔽混凝土屏蔽墙材料尺寸为 1 个上底面积 5.4 cm^2 、下底面积 16.3 cm^2 、高 30 cm 的圆锥柱。

3.3 测量方法

采用 RAM10N 可携式 γ 剂量率仪,测量 ^{60}Co 源 γ 射线输出器在无屏蔽墙衰减下的剂量率。源与探测器的距离为 92 cm , 剂量率为 $405 \mu\text{Gy/h}$ 。

用 ^{60}Co 源 γ 射线输出器分别对两块屏蔽混凝土屏蔽墙上的各自 18 个测点进行剂量率测量,撤去放射源后,对各自 18 个测点进行本底剂量率测量,测量仪器为 SG-120 X、 γ 剂量率仪。

3.4 测量结果

1) 屏蔽混凝土屏蔽后的剂量率均匀性

为检验屏蔽墙屏蔽效果的均匀性,用各测点上测量的 ^{60}Co 源辐射射线透射剂量率均值,减去相同点上的本底剂量率均值,得到各测点上射线透射的剂量率值。采用机械搅拌振动浇筑 B 墙和采用人工插捣浇筑 A 墙的实验结果列于表 3。

2) 屏蔽混凝土墙的密度均匀性

要通过实验得到屏蔽墙各测点的密度,可采用窄束射线,或采用各向同性 γ 点源。为保护现场试验人员的安全,受现场条件所限,采用 CX-106B1 型核子秤 γ 射线输出器,其 γ 射线输出准直孔为长 7.5 cm 、张角 42° 、宽 0.5 cm 的三角板状,射线输出器结构示意图示于图 4。

本试验的射线束即非窄束也非各向同性点源,因而,射线经屏蔽墙衰减后的剂量率采用宽束射线式(1)计算:

$$D = D_0 B e^{-(\mu/\rho)\rho X} \quad (1)$$

式中: D 、 D_0 分别为经屏蔽墙衰减后、前的剂量率, nGy/h ; B 为剂量率累积因子,无量纲; μ/ρ 为屏蔽墙对射线的质量衰减系数, cm^2/g ; ρ 为屏蔽墙的密度, g/cm^3 ; X 为屏蔽墙的厚度, cm 。

用屏蔽墙的平均密度、厚度、经屏蔽墙衰减后和前的剂量率值,由式(2)求得其剂量率的平均累积因子(非精确值):

$$B = (D/D_0) e^{(\mu/\rho)\rho X} \quad (2)$$

由实验测得 ^{60}Co 源的射线无屏蔽墙存在时 92 cm 处的 $D_0 = 4.05 \times 10^5 \text{ nGy/h}$, 经屏蔽混凝土屏蔽墙衰减后的剂量率平均值 $D = (454.0 \pm 96.1) \text{ nGy/h}$ ($n = 36$), $X = 30 \text{ cm}$,

$\mu/\rho = 0.0567 \text{ cm}^2/\text{g}$, 平均密度 $\rho = 4.6 \text{ g/cm}^3$, 将它们代入式(2)得到 $B = 2.8$ 。

表 3 γ 射线法检验混凝土墙密度均匀性测量结果
Table 3 Measured results of concrete wall density uniformity using γ -ray transmitting method

B 墙测点编号	10^8 净剂量率 ¹⁾ / ($\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)	密度 / ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	39.0 ± 0	4.69
2	37.3 ± 0.6	4.72
3	33.5 ± 0.7	4.78
4	39.0 ± 1.0	4.69
5	40.0 ± 0	4.67
6	33.7 ± 0.6	4.77
7	31.8 ± 0.6	4.81
8	32.7 ± 0.6	4.79
9	32.5 ± 1.0	4.80
10	47.2 ± 1.2	4.58
11	50.8 ± 1.2	4.53
12	56.2 ± 2.3	4.42
13	45.8 ± 1.2	4.59
14	44.2 ± 0.6	4.62
15	43.2 ± 0.6	4.63
16	35.5 ± 1.0	4.74
17	40.7 ± 1.2	4.61
18	42.8 ± 0.7	4.66
	(40.3)	(4.67 ± 102 ²⁾)
A 墙测点编号	10^8 净剂量率 ¹⁾ / ($\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)	密度 / ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)
19	57.0 ± 1.2	4.46
20	59.6 ± 0.7	4.44
21	47.8 ± 0.6	4.57
22	33.5 ± 1.0	4.78
23	41.2 ± 1.2	4.66
24	50.8 ± 0.6	4.53
25	34.8 ± 0.6	4.76
26	50.8 ± 0.6	4.53
27	46.0 ± 0.6	4.59
28	44.5 ± 0	4.61
29	42.1 ± 0.6	4.64
30	51.8 ± 0.6	4.52
31	68.8 ± 0.6	4.35
32	51.2 ± 2.1	4.53
33	49.8 ± 0.6	4.54
34	53.5 ± 1.0	4.50
35	63.8 ± 1.2	4.40
36	55.5 ± 0.6	4.48
	(50.1)	(4.55 ± 112 ²⁾)

注:1) 已扣除本底剂量率贡献

2) 18 个测点密度的标准差

3) 括号内为均值

在射线的能量和输出几何确定不变、密度变化不大的条件下,剂量率累积因子 B 趋于一不变值,则各测点对应的屏蔽墙体的密度用式(3)计算:

$$\rho = [\ln(D_0 B)/D]/[(\mu/\rho)X] \quad (3)$$

各测点对应的屏蔽墙体的密度列于表3中。

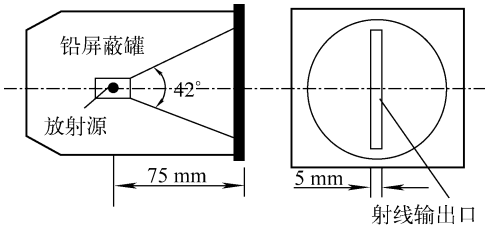


图4 射线输出器结构示意图

Fig. 4 Scheme of rays out-putter structure

3.5 数据分析

机械振捣工艺 18 个检测点中有 4 个点的实测密度低于设计值, $\rho_{\max} = 4.81 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\min} = 4.42 \text{ g/cm}^3$; $\bar{\rho} \pm s = (4.67 \pm 0.10) \text{ g/cm}^3$; $(\rho_{\max} - \rho_{\min})/\bar{\rho} = 8.33\%$, $\bar{\rho} = 4.67 \text{ g/cm}^3$, 高于设计值 1.5%。人工振捣工艺 18 个检测点中有 13 个点密度低于设计值, $\rho_{\max} = 4.78 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\min} = 4.35 \text{ g/cm}^3$; $\bar{\rho} \pm s = (4.53 \pm 0.14) \text{ g/cm}^3$; $(\rho_{\max} - \rho_{\min})/\bar{\rho} = 9.38\%$, $\bar{\rho} = 4.53 \text{ g/cm}^3$, 低于设计值 1.5%。说明机械振动工艺比人工安插工艺屏蔽混凝土墙的均匀性好, 机械振捣工艺比人工插捣工艺屏蔽效果好。

4 结语

对混凝土的实体均匀性和密实度可通过射线法和钻芯取样法探测和验证。在对其均匀性或密实度检测时,应研究取样的大小或范围,方可真实反映实体的实际情况。墙体厚度对测试结果有一定影响。试验墙体厚度为 300 mm, 而混凝土中最大颗粒为 25 mm × 30 mm, 已占到墙厚的 10%, 造成混凝土墙体内部物质组成均匀性的“先天性”不足, 给试验测试带来一定的偏差, 墙体施工的厚度(包括不平度)偏差即使相差 30 mm, 也对射线测量值产生 2.2 倍的

偏差效果。在实际工程应用中, 墙厚远大于 300 mm, 这对混凝土的整体均匀性有利, 混凝土块体尺寸越大, 组成物质相对分散分布越均匀, 这已通过试块的表观密度均大于射线实体检测结果这一现象得以证实。

常规浇筑倾倒混凝土时应尽可能降低下落高度, 防止引入过多的空气, 从而降低混凝土的密实度, 同时控制分层厚度振捣时间。对密度大于 4.00 t/m³ 的屏蔽混凝土, 除采用常规浇筑施工外, 还可采用预填骨料法、捣浆法和压力灌浆法施工^[5]。

该试验研究结果已应用到实际工程中, 工程已竣工, 各项试验测试数据均满足设计要求和验收准则, 保证了工程施工后混凝土实体的密实度和均匀性。

参考文献:

- [1] 丁庆军, 张立华, 胡曙光, 等. 防辐射混凝土及核固化材料研究现状与发展[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(2): 16-19.
DING Qingjun, ZHANG Lihua, HU Shuguang, et al. The research situation of anti-radiative concrete and solidified materials for the nuclear wastes [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(2): 16-19(in Chinese).
- [2] 王萍, 王福川. 防辐射混凝土的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2000, 3(2): 182-186.
WANG Ping, WANG Fuchuan. Experimental study on the properties of radiation shield concrete [J]. Journal of Building Materials, 2000, 3(2): 182-186(in Chinese).
- [3] 周荣海, 王磊. 大体积防辐射混凝土的施工质量控制[J]. 建筑技术开发, 2003, 30(3): 78-79.
ZHOU Ronghai, WANG Lei. The construction quality control of radiation shield large volume concrete [J]. Building Technique Development, 2003, 30(3): 78-79(in Chinese).
- [4] 中华人民共和国建设部. JGJ/T55-2000 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京: [s. n.], 2001.
- [5] 国防科学技术工业委员会. EJ/T1144-2004 混凝土辐射屏蔽[S]. 北京: [s. n.], 2004.