

# 铁尾矿粉在承德双峰寺碾压混凝土坝中的应用

王铁强

(河北省水利科学研究院, 石家庄 050051)

**摘要:** 通过大量试验,探讨了用铁尾矿粉和天然中砂以一定比例混和成人工砂后对水工碾压混凝土工作性能、力学性能和耐久性能的影响。结果表明,当铁尾矿粉与天然中砂的比例为7:3时,其硬化混凝土的抗压强度、劈拉强度、轴心抗压强度和轴心抗拉强度均有明显提高;可使混凝土具有较高的早期抗压强度,且后期抗压强度具有较大幅度的提高;可使混凝土抗氯离子渗透性、抗渗性能和抗冻性能得到明显增强。

**关键词:** 碾压混凝土;铁尾矿粉;工作性能;力学性能;耐久性能

**中图分类号:** TV431 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0148-05

## Application of iron ore tailings powder in the roller compacted concrete dam of Shuangfeng Temple in Chengde

WANG Tie qiang

(Hebei Provincial Academy of Water Resources, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** Through a lot of experiments, the effects of artificial sand made by the mixing of the iron ore tailings powder and natural medium sand under a certain proportion on the hydraulic properties, mechanical properties, and durability of roller compacted concrete were analyzed. The results showed that when the ratio between the iron ore tailings powder and natural medium sand is 7:3, the compressive strength, splitting tensile strength, axial compressive strength, and axial tensile strength of the hardening concrete increase significantly, the early and late compressive strengths of the concrete enhance, and the permeability, permeability resistance, and freezing resistance performance of chloride ion in the concrete improve.

**Key words:** roller compacted concrete; iron ore tailings powder; working performance; mechanical property; durability

随着钢铁工业的发展,铁尾矿在工业固体废弃物占的比例也越来越大<sup>[1]</sup>,不仅占用了大量耕地而且对空气和水源造成严重污染<sup>[2-3]</sup>,所以铁尾矿的合理开发利用问题已引起广泛重视。据分析,尾矿利用将是21世纪矿产综合利用范围最广、潜力最大的领域,尾矿将是人们争先利用的新资源和矿山企业振兴的坚实物质基础<sup>[4-5]</sup>。目前国内外对尾矿综合利用的大体思路是:对有利用价值的铁尾矿进行再选、利用尾矿充填采空区或生产具有高附加值的建筑装饰材料<sup>[6-7]</sup>,但把铁尾矿粉应用到碾压混凝土中的研究还较少。

本文拟通过试验,探讨铁尾矿粉在承德双峰寺水库枢纽主要永久建筑物碾压混凝土中的应用。该工程共有混凝土

56.22万m<sup>3</sup>,其中碾压混凝土38.03万m<sup>3</sup>;变态混凝土4.47万m<sup>3</sup>,常态混凝土13.72万m<sup>3</sup>。由于采用天然砂石料,砂中细粉含量较少,无法满足碾压混凝土施工要求,为了保证碾压混凝土的黏聚性、可碾性及层间结合,考虑采用部分铁尾料(其中小于0.16mm颗粒含量较多)替代部分天然砂,以增加天然砂中小于0.16mm颗粒含量。

## 1 试验原材料及配合比

### 1.1 试验原材料

(1)水泥。采用河北唐山市某水泥有限公司生产的P.O42.5水泥,其主要性能见表1。

表1 水泥的主要物理性能

Tab.1 Main physical properties of the cement

指标名称	强度等级	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	标准稠度用 水量(%)	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
				初凝	终凝	3d	28d	3d	28d
指标值	P·O42.5	360	25.8	203	258	28.5	59.4	5.6	8.4

收稿日期:2014-06-00 修回日期:2014-11-14 网络出版时间:2014-12-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1137.006.html>

作者简介:王铁强(1976-),男,山东德州人,高级工程师,主要从事水利工程质量检测工作。E-mail:57987221@qq.com

(2) 掺合料。采用河北唐山市某粉煤灰厂生产的 F 类 0 级粉煤灰, 细度(45 μm 筛余量)7.4%, 需水量比 96%。

(3) 细骨料。采用工程所在地的天然河砂和当地的铁矿尾粉按一定比例混合而成(满足碾压混凝土细骨料要求的细

度模数和含粉量)。

(4) 天然河砂。表观密度 2 640 kg/m<sup>3</sup>, 细度模数 2.77。

(5) 铁矿尾粉。表观密度 3 150 kg/m<sup>3</sup>, 细度模数 1.27, 其主要化学指标见表 2。

表 2 铁矿尾粉的化学指标检测结果

Tab. 2 Test results of the chemical indexes of iron ore tailings powder

检测项目	有机质	轻物质	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	烧失量	Cl <sup>-</sup> / 10 <sup>-5</sup>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	亚甲蓝 MB 值
检测结果	浅于标准色	0	4.32	15.30	15.07	47.90	0.81	1.01	0.05	4.39	8	9.94	1.0

(6) 粗骨料。采用工程所在地的天然卵石, 粒径分别为 5~20 mm、20~40 mm、40~80 mm, 表观密度 2 670 kg/m<sup>3</sup>, 压碎指标 6.6%。

(7) 外加剂。采用河北石家庄某外加剂厂生产的 Gk-4A 固状缓凝高效减水剂和 GK-9A 固状引气剂。

### 1.2 试验配合比

试验采用铁尾矿粉取代不同用量的砂子<sup>[8,9]</sup>, 然后按表 3 的配合比成型混凝土试件。试验以 R0 为基准组, 研究不同掺量的铁尾矿粉对碾压混凝土力学性能和耐久性能的影响。

表 3 混凝土配合比

Tab. 3 Mixing proportion of the concrete

试件组号	水泥 /(kg·m <sup>-3</sup> )	天然砂 /(kg·m <sup>-3</sup> )	铁尾矿粉 /(kg·m <sup>-3</sup> )	石子 /(kg·m <sup>-3</sup> )	水胶比	水 /(kg·m <sup>-3</sup> )	砂率 (%)	减水剂 (%)	引气剂 (%)
R0	188	788	0	1335	0.44	83	36	0.5	0.15
R1	188	630	158	1335	0.44	83	36	0.5	0.15
R2	188	522	236	1335	0.44	83	36	0.5	0.15
R3	188	473	315	1335	0.44	83	36	0.5	0.15

注: R1、R2、R3 铁尾矿粉与天然河砂的比例依次为 2: 8、3: 7、4: 6; 根据粗集料不同比例组合密度试验结果及骨料分离情况综合考虑, 碾压混凝土三级配合料比例为: 小石: 中石: 大石= 30: 40: 30。

## 2 用铁尾矿粉替代天然砂可行性分析

用一定量的粒径小于 0.16 mm 的铁尾矿粉替代部分水泥(依次替代水泥量为 0%、20%、30%、40%), 不同掺量粒径小于 0.16 mm 铁尾矿粉热学性能检测结果见图 1。

用一定量的粒径小于 0.16 mm 的铁尾矿粉替代部分水泥, 按照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB 17671-1999)<sup>[10]</sup>进行试验, 试件成型后按照标准养护条件, 养护至规定龄期, 测定不同铁尾矿粉掺量(依次替代水泥量为 0%、20%、30%、40%)、相同养护条件下试件的抗折和抗压强度。铁尾矿粉水泥胶砂强度检测结果见表 4。

按不同比例用铁尾矿粉取代同等质量的天然河砂, 依据

《水工混凝土试验规程》SL 352-2006<sup>[11]</sup>测试其级配(以下试验均按此规程进行测试), 结果见表 5。

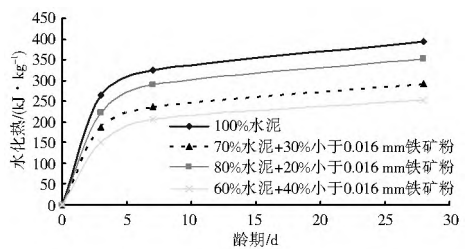


图 1 铁尾矿粉热学性能与龄期关系

Fig. 1 Relationship between the thermal properties and age of the iron ore tailings powder

表 4 粒径小于 0.16 mm 铁尾矿粉水泥胶砂强度检测结果

Tab. 4 Test results of the colloidal mortar strength of iron ore with the diameter of less than 0.16 mm

水泥种类	检测项目	抗压强度 MPa(抗压强度比)		抗折强度 MPa(抗折强度比)	
		3 d	28 d	3 d	28 d
	100% 水泥	28.5(100%)	64.0(100%)	4.6(100%)	8.4(100%)
冀东水泥	80% 水泥+ 20% 小于 0.016 mm 铁尾矿粉	17.3(61%)	46.1(72%)	3.4(75%)	6.5(77%)
P·O42.5	70% 水泥+ 30% 小于 0.016 mm 铁尾矿粉	15.0(53%)	38.6(60%)	3.1(67%)	5.7(68%)
	60% 水泥+ 40% 小于 0.016 mm 铁尾矿粉	13.7(48%)	35.2(55%)	2.6(56%)	4.4(52%)

注: 表中括号内数据为检测值与纯水泥同龄期胶砂强度的比值的百分数。

由上述试验得到以下结论。

(1) 小于 0.16 mm 的铁尾矿粉不会增加水化热且无活性, 可作为填充料改善碾压混凝土的和易性和碾压混凝土的粘聚性和可碾性。

(2) 天然砂的筛分结果符合中砂要求。

(3) 铁尾矿粉的 MgO 含量较高。为了保证工程的安全, 采用 40% 小于 0.08 mm 的铁尾矿粉替代水泥进行水泥净浆压蒸安定性试验, 试验结果表明铁尾矿粉对混凝土的安定性

无不利影响这与人工砂中 MgO 无活性(非轻烧 MgO)有关。

(4) 当天然砂: 铁尾矿粉= 7: 3 时, 混合砂的的细度模数及小于 0.16 mm 细粉颗粒可满足碾压混凝土用砂要求。

## 3 铁尾矿粉对碾压混凝土性能的影响

### 3.1 铁尾矿粉对碾压混凝土工作性能的影响

不同替代比例铁尾矿粉对碾压混凝土碾压混凝土 VC 值(用于测定碾压混凝土拌合物的工作度)影响分析结果见图 2。

表 5 细骨料颗粒级配检测结果

Tab. 5 Test results of the grain composition of fine aggregate

天然砂: 铁尾矿粉	筛孔尺寸公称	5.00	2.50	1.25	0.630	0.315	0.160	0.080	< 0.080	细度模数 <i>F<sub>M</sub></i>
100: 0 (纯天然砂)	分计筛余 (%)	6.6	13.6	10.8	24.8	33.0	7.8	3.2		2.77
	累计筛余 (%)	7	20	31	56	89	97	100		
0: 100 (纯人工砂)	分计筛余 (%)	2.4	2.1	1.8	7.3	25.9	30.5	18.8	11.2	1.27
	累计筛余 (%)	2	4	6	14	40	70	89	100	
80: 20	分计筛余 (%)	5.8	11.3	9.0	21.3	31.6	12.3	8.6		2.45
	累计筛余 (%)	6	17	26	47	79	91	100		
70: 30	分计筛余 (%)	5.3	10.2	8.1	19.6	30.9	14.6	11.2		2.29
	累计筛余 (%)	5	16	24	43	74	89	100		
60: 40	分计筛余 (%)	4.9	9.0	7.2	17.8	30.2	16.9	13.9		2.15
	累计筛余 (%)	5	14	21	39	69	86	100		

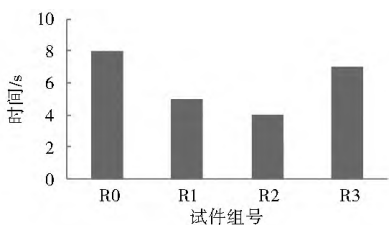


图 2 不同替代比例铁尾矿粉对 VC 值的影响

Fig. 2 Effects of iron ore tailings powder with different mixing proportions on the VC value

从图 2 可以看出,不掺铁尾矿粉时 R0 配比的 VC 值为 8 s,当掺入铁尾矿粉时配比 R1、R2、R3 的 VC 值都降至 8 s 以内,但随着掺替比例的增加即当掺替比例超过 30% 时,碾压混凝土的 VC 值开始增大,说明适当掺替比例的铁尾矿粉对改善碾压土的工作性能有好处。

VC 值的大小是决定碾压混凝土可碾性和层间结合技术的关键。随着铁尾矿粉的加入,增加了碾压混凝土中细颗粒含量,提高了碾压混凝土中浆量体积和浆砂比,使碾压混

土液化泛浆时间缩短,有利于碾压混凝土的层间结合但是,随着细颗粒含量的增加,碾压混凝土比表面积增大,需水量也提高,所以 VC 值出现先降低后增加的趋势。

### 3.2 铁尾矿粉对碾压混凝土力学性能的影响

不同掺量的铁尾矿粉碾压混凝土抗压强度结果见图 3,轴心抗压强度、劈裂抗拉强度和轴心抗拉强度结果见表 6。

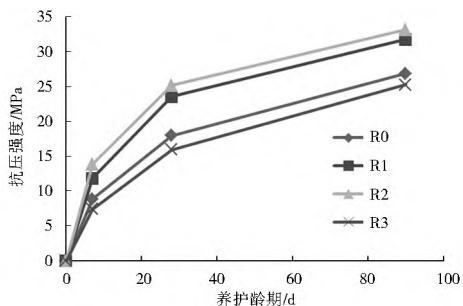


图 3 铁尾矿粉对碾压混凝土抗压强度的影响

Fig. 3 Effects of iron ore tailings powder on the compressive strength of roller compacted concrete

表 6 轴心抗压强度、劈裂抗拉强度和轴心抗拉强度与龄期关系

Tab. 6 Relationships between the axial compressive strength, splitting tensile strength, and axial tensile strength and age

试件组号	劈裂抗拉强度 / Mpa			轴心抗拉强度 / MPa			轴心抗压强度 / GPa		
	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d
R0	0.82	1.22	1.95	0.74	1.13	2.01	6.9	16.5	20.5
R1	1.16	1.92	2.53	1.02	1.82	2.35	8.5	17.2	22.1
R2	1.35	2.09	2.88	1.19	1.89	2.63	10.9	18.5	23.9
R3	0.72	1.15	1.82	0.69	1.08	1.96	6.5	15.3	18.9

由图 3 和表 6 可以看出,在相同水胶比和同掺量外加剂的条件下,随着铁尾矿粉替代天然砂的比例的不断增加,其抗压强度、劈拉强度、轴拉强度和轴心抗压强度均出现同一龄期时,先增大后减小的趋势。当铁尾矿粉的替代量达到 30% 时,其强度达到最大值同时从图表中也可看出,在替代比例为 20% 和 30% 时硬化混凝土具有较高的早期强度,当养护龄期从 28d 达到 90 d 时其抗压强度增长率分别为 35% 和 31%,说明碾压混凝土掺入铁尾矿粉对混凝土后期强度也具有一定优势。

碾压混凝土本身是一种相对贫水的拌和物,由于水量少、胶凝材料小,同时本工程采用天然卵石微细颗粒缺乏,不宜达到密实状态。而加入铁尾矿粉,一方面起到了填充作

用,使碾压混凝土的颗粒堆积体系更加连续,另一方面也降低了碾压混凝土的水粉比,增加了碾压混凝土的浆量从而使碾压混凝土密实度增加<sup>[12]</sup>,达到提高碾压混凝土力学性能的目的。但同时,由于铁尾矿粉属于惰性材料不参与水化反应,如果铁尾矿粉过量掺加,减少了参与水化反应的用水量,不利于碾压混凝土密实成型,导致碾压混凝土的强度有明显下降。

### 3.3 铁尾矿粉对碾压混凝土耐久性能的影响

#### 3.3.1 铁尾矿粉对碾压混凝土抗渗性能的影响

混凝土抗渗性能采用逐级加压法进行测试,抗渗等级以每组 6 个试件中 2 个出现渗水时的最大水压力表示。抗渗等级按公式:  $W = 10H - 1$  计算。不同替代比例铁尾矿粉碾

压混凝土 28 d 龄期的抗渗等级均能达到 W8,但是由于无法定量分析铁尾矿粉的掺入对碾压混凝土抗渗性能的影响,所以采用 NEL 法评价氯离子扩散系数<sup>13,14</sup>。其评价标准见表 7,不同替代比例铁尾矿粉碾压混凝土数据分析见表 8。

从表 8 中可以看出,试件编号为 R0 和 R3 的试件处于一个等级为表 7 中的 0 级,试件编号为 R1 和 R2 的试件处于一个等级为表 7 中的 1 级,说明 R0 和 R3 试件的要比 R1 和 R2 试件的渗透性能好,即一定掺量的铁尾矿粉可以提高碾压混

表 7 NEL 法评价氯离子扩散系数标准

Tab. 7 Evaluation standard of the diffusion coefficient of chloride ion based on NEL method

氯离子扩散系数/(10 <sup>-10</sup> cm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	混凝土渗透性能
> 1 000	Ⅴ (很高)
500~ 1 000	Ⅳ (高)
100~ 500	Ⅲ (中)
50~ 100	Ⅱ (低)
10~ 50	Ⅰ (很低)
5~ 10	0 (极低)
< 5	×(可忽略)

表 8 不同替代比例铁尾矿粉碾压混凝土氯离子渗透性

Tab. 8 Permeability of chloride ion in the roller compacted concrete with different mixing proportions of iron ore tailings powder

试件编号	氯离子扩散系数/(10 <sup>-10</sup> cm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	混凝土渗透性能
R0	54. 23	低
R1	38. 35	很低
R2	34. 27	很低
R3	80. 32	低

凝土的抗渗性能。原因是铁尾矿粉的掺入,使混凝土更加密实,而且铁尾矿粉的微填充作用阻断了碾压混凝土内部的毛细通道<sup>15</sup>,从而提高碾压混凝土的抗渗性能。

### 3.3.2 铁尾矿粉对水工混凝土抗冻融性能的影响

不同替代比例铁尾矿粉碾压混凝土 28 d 抗冻融性能结果见表 9。

表 9 混凝土 200 次快速冻融试验结果

Tab. 9 Test results of rapid freezing and thawing of concrete

试件组号	质量损失率(%)				相对动弹性模量(%)			
	50	100	150	200	50	100	150	200
R0	0. 38	0. 89	2. 56	3. 81	90	79	73	66
R1	0. 35	0. 77	2. 06	2. 53	93	84	79	70
R2	0. 31	0. 72	1. 98	2. 19	95	88	83	75
R3	0. 41	0. 93	2. 78	4. 02	88	73	70	63

从表 9 中可以看出,各替代比例的铁尾矿粉碾压混凝土试件 28 d 龄期均能达到 200 次冻融循环;随着替代量的增大各组试件的质量损失先减小后增大,相对动弹性模量先增大后减小,当替代比例不超过 30%,掺加铁尾矿粉对抵抗冻融破坏具有明显优势;当掺量超过 30%,混凝土试件也具有一定的抗冻融能力但效果不及普通试件好;随着掺量的继续加大,其抗冻融循环能力将达不到 200 次。

一定掺量的铁尾矿粉对碾压混凝土抗冻性能具有一定

的改善,这主要是由于铁尾矿粉的加入调节了碾压混凝土的级配体系,减少了混凝土内部空隙<sup>16</sup>,阻断了外部水进入混凝土内部的毛细孔道,从而提高混凝土抵抗冰冻破坏的能力。

## 4 结论

(1) 小于 0. 16 mm 的铁尾矿粉不会增加水化热且无活性,可作为填充料改善碾压混凝土的和易性和碾压混凝土的粘聚性和可碾性。

(2) 当天然砂:铁尾矿粉=7:3 时,混合砂的的细度模数及小于 0. 16 mm 细粉颗粒可满足碾压混凝土用砂要求。

(3) 当铁尾矿粉的替代比例不大于 30% 时,可以提高碾压混凝土的工作性能、早期抗压强度和后期强度;当铁尾矿粉的替代比例超过 30% 时,碾压混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度、轴心抗拉强度、轴心抗压强度变化均明显降低。

(4) 当铁尾矿粉的掺替比例为 30% 时,对碾压混凝土的抗冻和抗渗性能均有所改善。综合本文研究结果,铁尾矿粉作为一种料填充材料应用到混凝土当中在技术上是可行的。铁尾矿粉作为一种矿山废弃物,在不改变碾压混凝土力学性能和耐久性能的前提下,最大化的利用具有一定的经济价值和环保效益,并符合绿色环保可持续发展战略要求,具有很大的应用潜力。

### 参考文献(References):

[1] 朱申红. 矿业固体废物——尾矿的资源化[J]. 环境与开发, 1999, 14(1): 24-28. (ZHU Sherr hong, Mining solid waste, tailings comprehensive utilization [J]. Environment and Development, 1999, 14(1): 24-28. (in Chinese))

[2] 颜学军. 矿山尾矿资源的综合利用和环境保护[J]. 稀有金属与硬质合金, 2005, 33(3): 23-25. (YAN Xue jun. Mine tailings resources comprehensive utilization and environmental protection [J]. Rare Metals and Cemented Carbide, 2005, 33(3): 23-25. (in Chinese))

[3] 闫满志;白丽梅;张云鹏. 等. 我国铁尾矿综合利用现状问题及对策[J]. 矿业快报, 2008(7): 9-13. (YAN Marr zhi, BAI Li mei, ZHANG Yur peng, et al. The problem of iron tailings comprehensive utilization present situation and countermeasure [J]. Mining Letters, 2008(7): 9-13. (in Chinese))

[4] 韩冬芸. 铁尾矿整体综合利用技术[J]. 矿业快报, 2007, 23(5): 11-13. (HAN Dong yun. Iron tailings comprehensive utilization of the overall technology [J]. Journal of Mining Letters, 2007, 23(5): 11-13. (in Chinese))

[5] 肖力光,伊晋宏,崔正旭. 国内外铁尾矿的综合利用现状[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2010, 27(4): 22-26. (XIAO Li guang, YI Jir hong, CUI Zheng xu. Iron tailings comprehensive utilization present situation at home and abroad [J]. Journal of Jilin Architectural Engineering College, 2010, 27(4): 22-26. (in Chinese))

[6] 范海宝,魏开宝,谢鹏. 铁尾矿资源利用现状及发展趋势 [A]. 第二十届“冀鲁川辽晋粤”七省矿业学术交流会议论文集 [C]. 2013. (FAN Hai bao; WEI Ka ba o; XIE Peng; Iron tailings resource utilization present situation and development trend [A]. The twentieth "Ji Lu Chuan Liao Jin Yue" seven provinces mining academic symposia proceedings [C]. 2013. (in Chinese))

- [7] 何兆芳. 尾矿在预拌混凝土中应用的试验研究[J]. 商品混凝土, 2009(6). (HE Zhaofang. Tailings in the applications of ready mixed concrete experimental study[J]. Journal of Commodity Concrete, 2009(6). (in Chinese))
- [8] 郑永超, 倪文, 张旭芳, 等. 用细粒铁尾矿制备细骨料混凝土的试验研究[J]. 金属矿山, 2009(12). (ZHENG Yongchao, NI Wen, ZHANG Xufang, et al. Preparation of fine aggregate concrete with fine grained tailings test study[J]. Metal Mine, 2009(12). (in Chinese))
- [9] 徐宝华, 宋姗. 尾矿砂复配在混凝土生产中的研究及应用[J]. 商品混凝土, 2010(1). (XU Baohua, SONG Shan. Tail ore distribution of research and application in the production of concrete[J]. Journal of Commodity Concrete, 2010(1). (in Chinese))
- [10] GB 17671-1999, 水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)[S]. (GB 17671-1999, Method of testing cements-Determination of strength(ISO)[S]. (in Chinese))
- [11] SL352-2006, 水工混凝土试验规程[S]. (SL352-2006, Test code for hydraulic concrete[S]. (in Chinese))
- [12] 蔡基伟, 张勇, 封孝信, 等. 铁尾矿粉对混凝土工作性与强度的影响[J]. 商品混凝土, 2009(8): 32-35. (CAI Jiwei, ZHANG yong, FENG Xiaoxin, et al. Iron ore tail's influence on the workability and strength of concrete[J]. Commercial Concrete, 2009(8): 32-35. (in Chinese))
- [13] 黄智德, 彭志辉, 彭家惠, 等. NEL 法测定海工混凝土氯离子扩散系数的应用研究[A]. 第七届全国混凝土耐久性学术交流会论文集[C]. 2008. (HUANG Zhide; PENG Zhihui. PENG Jiahui, et al. NEL method determination of Marine engineering concrete chloride ion diffusion coefficient of applied research[A]. The 7th national conference on concrete durability[C]. 2008. (in Chinese))
- [14] 易成, 郭婷婷, 程涛, 等. NEL 法与 ASTM C1202 法氯离子渗透性对比试验研究[J]. 混凝土, 2007(3): 4-6. (YI Cheng; GUO Tingting; CHENG tao, et al. NEL method and ASTM C1202 method the chloride ion permeability contrast test research[J]. Concrete, 2007(3): 4-6. (in Chinese))
- [15] 栾宏图. 影响混凝土抗渗性能的因素[J]. 民营科技, 2008(12): 194. (LUAN Hongtu. The influence factors of permeability of concrete[J]. Private Science and Technology, 2008(12): 194. (in Chinese))
- [16] 马德宝, 王玉龙. 混凝土抗冻耐久性性能的研究进展[J]. 科技资讯, 2008(12). (MA Debao; WANG Yulong. The research progress of concrete frost resistance durability performance[J]. Journal of Information Science and Technology, 2008(12). (in Chinese))

(上接第 147 页)

- [7] Lacy S J, Prevo st J H. A procedure for locating the free surface[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1987, 11(6): 585-601.
- [8] 速宝玉, 朱岳明. 不变网格确定渗流自由面的结点虚流量法[J]. 河海大学学报, 1991, (5): 113-117. (SU Baoyu, ZHU Yue ming. The same grid determination of seepage free surface nodal virtual flux method[J]. Journal of Hohai University, 1991(5): 113-117. (in Chinese))
- [9] 陈守开, 刘尚蔚, 郭利霞, 等. 中、小型土石坝渗流场三维有限元分析方法及应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(4): 612-621. (CHEN Shou kai, LIU Shang wei, GUO Lixia, et al. 3-D Finite element method of seepage field of middle small earth rock dam and its application[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(4): 612-621. (in Chinese))
- [10] 柴军瑞. 混凝土坝渗流场与稳定温度场耦合分析的数学模型[J]. 水力发电学报, 2000, 68(1): 27-25. (CHAI Junrui. On mathematical model for coupled seepage and temperature field in concrete dam[J]. Journal of Hydro Electric Engineering, 2000, 68(1): 27-25. (in Chinese))
- [11] 李凤志. 渗流自由面分析的比例边界有限元法[J]. 计算物理, 2009, 26(5): 665-670. (LI Fengzhi. Scaled Boundary Finite element Method for Seepage Free Surfaces Analysis[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2009, 26(5): 665-670. (in Chinese))
- [12] 刘文, 钟小彦, 覃昕慧, 等. 西夏水库防渗方案渗流场的有限体积法数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2008, 6(3): 58-61. (LIU Wen, ZHONG Xiaoyan, QIN Xinhui, et al. Numerical simulation for seepage field of Xixia Reservoir by finite volume method[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2008, 6(3): 58-61. (in Chinese))
- [13] 曹纪刚, 乐陶. 某山谷型尾矿库三维渗流场模拟分析[J]. 金属矿山, 2013, 441(3): 36-38. (CAO Jigang, YUETao. Numerical simulation on the three dimensional flow field of a valley-type tailings pond[J]. Metal Mine, 2013, 441(3): 36-38. (in Chinese))
- [14] 王建新, 朱岳明, 吴世勇. 深圳抽水蓄能电站地下厂房渗流特性研究[J]. 水电能源科学, 2008, 26(1): 71-74. (WANG Jianxin, ZHU Yue ming, WU Shiyong. Analysis of seepage characteristics of underground powerhouse of Shenzhen Pumped Storage Power Station[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(1): 71-74. (in Chinese))
- [15] 崔皓东, 朱岳明. 有自由面渗流分析的改进节点虚流量全域迭代法[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2009, 33(2): 238-241. (CUI Haodong, ZHU Yue ming. Improved procedure of nodal virtual flux of global iteration to solve seepage free surface[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2009, 33(2): 238-241. (in Chinese))