

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.05.015

# 高钛重矿渣粗骨料在抗冲耐磨混凝土中的应用研究

叶新, 李朝政, 张虹

(中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650033)

**摘要:** 为充分利用某水电站工程附近的攀钢高钛重矿渣, 对攀钢高钛重矿渣粗骨料和其它原材料的各项性能进行了试验, 设计了合适的混凝土配合比, 对采用攀钢高钛重矿渣粗骨料的抗冲耐磨混凝土各项性能展开了试验研究, 涉及力学性能、变形性能、耐久性能及热学性能等, 并与采用灰岩粗骨料的混凝土性能进行了对比分析, 试验结果表明采用攀钢高钛重矿渣粗骨料的抗冲耐磨混凝土性能满足设计技术要求, 并且能提升混凝土的抗冲磨强度, 对类似工程具有一定的参考借鉴意义。

**关键词:** 水电站; 攀钢高钛重矿渣; 粗骨料; 抗冲耐磨混凝土; 性能对比

中图分类号: TU528.041

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)05-0083-04

## Application of High Titanium Heavy Slag Coarse Aggregate in Anti-impact and Wear-resistant Concrete

YE Xin, LI Chaozheng, ZHANG Hong

(Kunming Engineering Corporation Limited of Power China, Kunming, Yunnan 650033, China)

**Abstract:** In order to make full use of the high titanium heavy slag of Panzhihua Steel near a hydropower station project, the properties of high titanium heavy slag coarse aggregate and other raw materials of Panzhihua Iron and Steel Group were tested to determine suitable concrete mix ratio. Then the experimental study on the performance of wear-resisting concrete made of high titanium heavy slag coarse aggregate is carried out, which involves mechanical properties, deformation properties, durability properties and thermal properties. The performance of concrete with coarse limestone aggregate is compared and analyzed. The test results show that the performance of wear-resisting concrete with high titanium heavy slag coarse aggregate could meet the design technical requirements, and it can enhance the strength of concrete against impact grinding.

**Keywords:** hydropower station; Panzhihua high titanium heavy slag; coarse aggregate; anti-impact and wear-resistant concrete; performance comparison

高钛重矿渣是攀钢高炉冶炼钒钛磁铁矿时产生的一种无机材料, 主要成分有钛辉石、钙钛矿等矿物。攀钢高钛重矿渣水化活性低, 不适合作为矿物掺和料进行资源化利用。攀钢公司有大量的高钛重矿渣未得到有效利用, 迫切需要研究开发攀钢高钛重矿渣规模化、资源化的高效利用技术<sup>[1-4]</sup>。

某水电站是金沙江中游河段规划的8个梯级电站的最末一个梯级, 坝高159 m, 泄洪建筑物过流面最大流速43 m/s, 工程拟采用较高强度等级的C<sub>90</sub>50混凝土作为主要的抗冲耐磨层<sup>[5]</sup>。该水电站工程

离攀钢高钛重矿渣堆的直线距离较近, 针对高钛重矿渣结构稳定性好、多孔高强、比重大的物理特质, 开展了采用攀钢高钛重矿渣做为抗冲耐磨混凝土粗骨料的相关试验研究工作。

## 1 试验原材料

### 1.1 攀钢高钛重矿渣粗骨料

攀钢高钛重矿渣粗骨料颜色为深咖啡色, 有大量孔洞, 饱和面干吸水率大, 堆积密度较小, 空隙率大。攀钢高钛重矿渣粗骨料检测结果列于表1、表2。

试验结果表明高钛重矿渣粗骨料表观密度、超逊径含量、坚固性、有机质含量、硫化物及硫酸盐含

量均满足规范对粗骨料的品质要求<sup>[6]</sup>,由于存在孔洞,饱和面干吸水率和压碎指标偏大。

表 1 攀钢高钛重矿渣粗骨料性能(一)

碎石名称	粒径/mm	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )		饱和面干吸水率/%	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )		空隙率/%		超逊径含量/%		压碎指标/%
		干态	饱和面干		松散	振实	松散	振实	超径	逊径	
攀钢高钛重矿渣	10~20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16.3
	5~20	2914	2639	5.76	1163	1323	60.1	54.6	5	1	—
	20~40	2871	2655	4.53	1192	1336	58.5	53.5	3	1	—

表 2 攀钢高钛重矿渣粗骨料性能(二)

碎石名称	粒径/mm	有机质含量	硫化物及硫酸盐含量/%	坚固性/%
攀钢高钛重矿渣	10~20	合格	0.15	1
	20~40			0

## 1.2 其它原材料

其它试验原材料包括:42.5 级中热硅酸盐水泥,分选 I 级粉煤灰,胶凝材料主要化学性能见表 3<sup>[7-8]</sup>;采用石灰岩人工骨料进行对比试验,灰岩骨料性能符合一般规律,表观密度为 2 720 kg/m<sup>3</sup>,压碎指标为 7.1%;采用缓凝高效减水剂和高效型引气剂;抗冲磨材料采用 PVA 纤维,主要性能见表 4。

表 3 胶凝材料化学成分

名称	不同成分含量/%						
	碱含量	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	烧失量	SO <sub>3</sub>
中热水泥	0.34	59.93	5.12	4.81	4.23	1.85	2.34
I 级粉煤灰	1.03	2.68	29.89	4.01	1.82	1.97	0.51

表 5 混凝土设计技术要求

强度等级	混凝土种类	级配	抗渗等级	抗冻等级	强度保证率 P/%	强度标准差 σ/MPa	概率度系数 t	混凝土配制强度/MPa	坍落度/cm	含气量/%
C <sub>90</sub> 50	常态	二	W <sub>90</sub> 8	F <sub>90</sub> 100	95	5.5	1.65	59.1	4.0~7.0	3.0~4.5

表 6 C<sub>90</sub>50W8F100 二级配常态抗冲耐磨混凝土配合比

混凝土编号	粗骨料	水胶比	粉煤灰掺量/%	砂率/%	减水剂掺量/%	引气剂掺量/(1/万)	不同材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )					
							水	水泥	粉煤灰	抗冲耐磨材料(PVA)	砂	石
HY-1	灰岩	0.35	20	37	0.6	0.8	108	246.9	61.7	—	740.8	1291.0
HY-2	灰岩	0.35	20	37	0.6	0.8	115	262.9	65.7	0.9	727.4	1267.6
KZ-1	矿渣	0.35	20	43	0.6	—	120	274.3	68.6	—	834.2	1107.9
KZ-2	矿渣	0.35	20	43	0.6	—	130	297.1	74.3	0.9	811.9	1078.2

采用灰岩粗骨料单掺粉煤灰时,用水量为 108 kg/m<sup>3</sup>,掺入 PVA 纤维时,用水量增加为 115 kg/m<sup>3</sup>;粗骨料采用攀钢高钛重矿渣时,由于矿渣有较多孔,

## 2 抗冲耐磨混凝土配合比设计

该水电站采用较高强度等级的 C<sub>90</sub>50 混凝土作为主要的抗冲耐磨层,抗冲耐磨混凝土配合比设计技术要求见表 5。

表 4 PVA 纤维性能

断裂强度/MPa	初始模量/MPa	断裂伸长率/%	耐碱性能(极限拉力保持率)/%
1708.0	37400	7.5	99.1

本次试验采用单掺粉煤灰以及复掺 PVA 纤维和粉煤灰两种抗冲耐磨混凝土,分别采用灰岩粗骨料和高钛重矿渣粗骨料开展对比试验研究。根据常态基准混凝土试验结果,经过试拌调整和回归分析<sup>[9-10]</sup>,得到满足技术要求的抗冲耐磨混凝土配合比列于表 6。

不用掺引气剂,且砂率由 37% 增加到 43%,单掺粉煤灰时用水量为 120 kg/m<sup>3</sup>,掺入 PVA 纤维时用水量为 130 kg/m<sup>3</sup>。

### 3 高钛重矿渣粗骨料对抗冲耐磨混凝土性能的影响

#### 3.1 力学性能

采用高钛重矿渣粗骨料和灰岩粗骨料的抗冲耐磨混凝土强度均能满足设计要求,90 d 龄期抗压强度均可达 60.0 MPa,轴拉强度可达 4.0 MPa,静压弹模和轴拉弹模均达到 40 GPa,采用两种粗骨料的混凝土强度龄期发展系数相差不大,采用灰岩粗骨料的混凝土弹性模量略大于采用高钛重矿渣粗骨料的

混凝土弹性模量,可能跟高钛重矿渣粗骨料孔隙率较大有关<sup>[11]</sup>。

相同条件下,采用高钛重矿渣粗骨料的抗冲耐磨混凝土强度明显高于采用灰岩粗骨料的混凝土强度,分析原因为多孔的矿渣碎石表面导致浆体接触面积变大,形成销栓效应<sup>[12]</sup>,增强了界面的粘结力,同时造成骨料含水率高,锁水性能提升,后期水化过程中不断释放加强了混凝土的内养护<sup>[13]</sup>。具体试验成果见表 7、表 8。

表 7 抗冲耐磨混凝土力学性能

编号	粗骨料	粉煤灰掺量/%	PVA/(kg·m <sup>-3</sup> )	抗压强度/MPa				劈裂强度/MPa				轴拉强度/MPa			
				7 d	28 d	90 d	180 d	7 d	28 d	90 d	180 d	7 d	28 d	90 d	180 d
HY-1	灰岩	20	—	37.4	49.1	60.5	63.7	2.20	2.80	3.86	4.17	2.96	3.89	4.79	4.88
HY-2	灰岩	20	0.9	36.0	47.0	61.1	62.9	2.41	3.22	3.98	4.39	3.04	3.77	4.69	4.80
KZ-1	矿渣	20	—	39.0	55.8	69.3	72.7	2.23	2.84	3.89	4.34	3.04	3.47	4.19	4.91
KZ-2	矿渣	20	0.9	42.1	55.0	68.7	70.0	2.68	3.31	4.08	4.53	3.47	3.97	4.57	4.97

表 8 抗冲耐磨混凝土弹性模量

编号	粗骨料	粉煤灰掺量/%	PVA/(kg·m <sup>-3</sup> )	静压弹性模量/×10 <sup>4</sup> MPa				轴拉弹性模量/×10 <sup>4</sup> MPa			
				7 d	28 d	90 d	180 d	7 d	28 d	90 d	180 d
HY-1	灰岩	20	—	3.78	4.35	5.38	5.27	3.77	4.73	4.80	4.99
HY-2	灰岩	20	0.9	4.15	4.28	5.27	5.37	3.53	4.22	4.29	4.22
KZ-1	矿渣	20	—	3.24	3.74	4.37	4.42	3.63	3.79	4.01	4.38
KZ-2	矿渣	20	0.9	3.33	3.57	4.43	4.67	3.56	3.87	4.10	4.08

#### 3.2 变形性能

(1) 极限拉伸值。试验成果表明采用高钛重矿渣粗骨料和灰岩粗骨料的抗冲耐磨混凝土极限拉伸值相差不大,设计龄期和各个长龄期的抗冲耐磨混凝土极限拉伸值均大于 100 × 10<sup>-6</sup>。

(2) 干缩。试验表明抗冲耐磨混凝土干缩率与用水量正相关,复掺粉煤灰和 PVA 的混凝土干缩率高于单掺粉煤灰的混凝土干缩率,采用高钛重矿渣粗骨料的抗冲耐磨混凝土干缩率大于采用灰岩粗骨料的抗冲耐磨混凝土干缩率,单掺粉煤灰时,180 d 龄期的干缩率分别为 190 × 10<sup>-6</sup>和 313 × 10<sup>-6</sup>,复掺粉煤灰和 PVA 时,180 d 龄期的干缩率分别为 242 × 10<sup>-6</sup>和 333 × 10<sup>-6</sup>,数据图分析来看,混凝土早龄期时干缩率增大较快,随时龄期的增加,干缩率的变化率逐渐减少,最后趋于收敛<sup>[14]</sup>,干缩率曲线见图 1。

(3) 自生体积变形。采用灰岩粗骨料的抗冲耐磨混凝土自生体积变形基本呈微收缩变形<sup>[15]</sup>,测至 180 d 龄期时,变形值在 -5 × 10<sup>-6</sup> ~ 0 之间,采用高钛重矿渣粗骨料的抗冲耐磨混凝土自生体积变形为

微膨胀型,测至 180 d 龄期时,变形值在 15 × 10<sup>-6</sup> ~ 74 × 10<sup>-6</sup>之间,自生体积变形曲线见图 2。

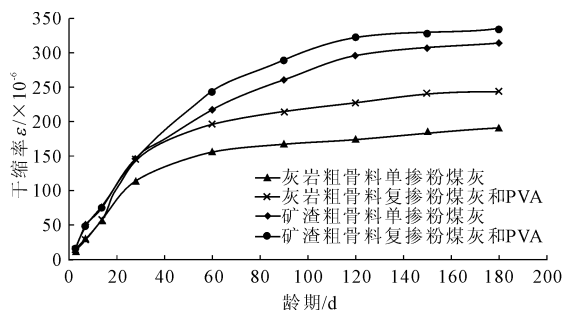


图 1 混凝土干缩率曲线

#### 3.3 耐久性

(1) 抗冻、抗渗性能。试验表明采用高钛重矿渣粗骨料和灰岩粗骨料的抗冲耐磨混凝土抗冻、抗冻性能相差不大,抗渗等级均大于 W8,抗冻等级均大于 F100,能够满足工程的设计要求。相同条件下,采用高钛重矿渣粗骨料的抗冲耐磨混凝土与采用灰岩粗骨料时对比,渗透试验的平均渗径略大,冻融试验的质量损失率略大和相对动弹模略小<sup>[16]</sup>。

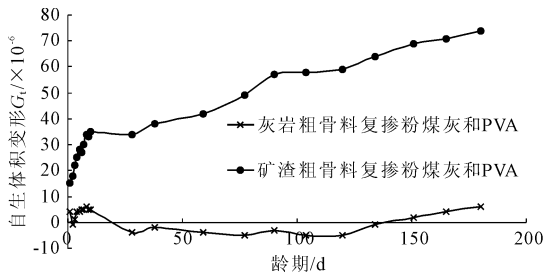


图 2 混凝土自生体积变形曲线

(2) 抗冲耐磨性能。试验结果表明采用抗冲耐磨 PVA 材料的混凝土抗冲耐磨强度高于单掺粉煤灰的混凝土,采用水下钢球法,攀钢高钛重矿渣粗骨料的抗冲耐磨混凝土抗冲耐磨强度可达  $17.1 \text{ h}/(\text{kg}/\text{m}^2)$ ,磨损率可低至  $1.78\%$ ,抗冲耐磨性能明显优于采用灰岩粗骨料的混凝土,抗冲耐磨混凝土抗冲耐磨性能试验结果列于表 9。

表 9 抗冲耐磨混凝土抗冲耐磨性能

混凝土强度等级	混凝土编号	水胶比	抗冲耐磨材料及掺量 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	粉煤灰掺量 $/\%$	抗冲耐磨强度 $/(\text{h} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$	磨损率 $/\%$
C <sub>90</sub> W8F100	HY-1	0.35	—	20	6.8	4.22
	HY-2	0.35	PVA 纤维 0.9	20	7.2	4.10
	KZ-1	0.35	—	20	10.5	2.80
	KZ-2	0.35	PVA 纤维 0.9	20	17.1	1.78

### 3.4 热学性能

采用灰岩粗骨料复掺 PVA 纤维的抗冲耐磨混凝土绝热温升回归方程为:  $T_t = 43.48(t - 0.60)/(t + 1.526)$ , 28 d 绝热温升为  $42.4^\circ\text{C}$ , 线膨胀系数为  $5.731 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , 采用攀钢高钛重矿渣粗骨料复掺 PVA 纤维的抗冲耐磨混凝土绝热温升回归方程为:  $T_t = 49.50t/(t + 2.035)$ , 28 d 绝热温升为  $46.1^\circ\text{C}$ , 线膨胀系数为  $7.302 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。试验表明采用攀钢高钛重矿渣粗骨料的混凝土与采用灰岩粗骨料的混凝土相比,28 d 绝热温升和线膨胀系数略大。

## 4 结论

(1) 攀钢高钛重矿渣粗骨料干态表观密度达到  $2900 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,但由于存在较多孔洞,其孔隙率、饱和面干吸水率以及压碎指标均比灰岩粗骨料大。

(2) 相同条件下,由于攀钢高钛重矿渣粗骨料孔隙率和吸水率大,采用矿渣粗骨料的抗冲耐磨混凝土单位用水量比采用灰岩粗骨料的抗冲耐磨混凝土增加约  $10 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,砂率增加约  $5\%$ 。

(3) 采用攀钢高钛重矿渣粗骨料的抗冲耐磨混凝土抗压强度高于采用灰岩粗骨料的抗冲耐磨混凝土,其它力学性能、极限拉伸值、抗冻抗渗和热学性

能相差不大,前者干缩率大、自生体积变形基本呈微膨胀型,后者自生体积变形基本呈微收缩变形,前者抗冲耐磨强度明显高于后者。

(4) 总体来看,采用攀钢高钛重矿渣粗骨料和灰岩粗骨料的抗冲耐磨混凝土力学性能、变形性能、热学性能和耐久性能均能满足设计要求,采用攀钢高钛重矿渣粗骨料可明显提升该水电站抗冲耐磨混凝土的抗冲耐磨强度,并能带来一定的社会、经济和生态效益。

### 参考文献:

- [1] 张虹,叶新,董海英,等. 电厂灰渣在大坝碾压混凝土中的应用研究[J]. 人民长江,2015,46(7):92-94.
- [2] 宋进,官仁权. 浅析钒钛科技含钛高炉渣综合利用[J]. 中国资源综合利用,2019,37(4):62-64.
- [3] 钱波,胡建春,戚明强,等. C30 西昌全高钛重矿渣骨料混凝土性能试验研究[J]. 硅酸盐通报,2018,37(6):62-66.
- [4] 李鹏,钱波,娄元涛. 西昌高钛重矿渣混凝土骨料性能试验研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(6):259-262.
- [5] 陈雪湘. 泄洪闸坝底板抗冲耐磨技术与探索应用[J]. 水利水电施工,2019(2):17-23.
- [6] 水工混凝土施工规范:DL/T 5144—2015[S]. 北京:中国电力出版社,2015:40-53.
- [7] 中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥:GB/T 200—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [8] 用于水泥和混凝土中的粉煤灰:GB/T 1596—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [9] 熊云川,肖术云,赵锡楠,等. 高强度抗冲耐磨混凝土配合比设计[J]. 施工技术,2020,49(12):384-386.
- [10] 陈嘉琨,李军,卢忠远,等. 水淬高钛矿渣活性粉末混凝土的制备及性能[J]. 西南科技大学学报,2021,36(2):28-35.
- [11] 黄金坤,姚文杰,严旺,等. 研石及粉煤灰混凝土力学性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(6):59-62.
- [12] 仲从春,李双喜,孟远远,等. 超高性能混凝土抗冲耐磨性能试验研究[J]. 人民黄河,2021,43(1):16-20.
- [13] 黄钟晖,张世荣,王炳华,等. 高性能铁尾矿细骨料再生混凝土碳化化学性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(1):28-33.
- [14] 罗凯,李军,卢忠远,等. 高钛矿渣膨珠制备轻骨料砂浆空心砌块研究[J]. 混凝土与水泥制品,2018(5):58-62.
- [15] 孙金坤,黄双华,陈科材,等. 不同纵筋率的复高钛重矿渣混凝土有腹筋约束梁抗剪性能试验研究[J]. 建筑科学,2016,32(7):78-85.
- [16] 彭成,肖苗良,叶恒达,等. 再生混凝土耐久性研究进展[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(6):126-130.