

# 铁尾矿砂中石粉含量对硫铝酸盐水泥基高性能混凝土耐久性能的影响

孙志磊<sup>1\*</sup>, 杜冲冲<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山东华森凤山建材有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>济南高新控股集团有限公司, 山东 济南

收稿日期: 2023年11月28日; 录用日期: 2024年1月8日; 发布日期: 2024年1月12日

## 摘要

铁尾矿砂是一种细骨料, 其材料性质与天然砂相近, 具有其表面粗糙、棱角多的特点; 铁尾矿砂是铁加工矿场在特定的经济技术条件下, 对铁矿石进行精细研磨并选择有用成分的废料。本文探讨了铁尾矿砂中石粉含量对硫铝酸盐水泥基高性能混凝土耐久性的影响, 主要研究铁尾矿砂中石粉含量对硫铝酸盐水泥基高性能混凝土性能(抗渗性和抗冻性)影响。研究得出: 随着其铁尾矿砂中石粉含量的增加, 其高性能混凝土抗渗性能和抗冻性能都逐渐提高。

## 关键词

铁尾矿砂, 硫铝酸盐水泥基高性能混凝土, 抗渗性, 抗冻性

# Effect of Stone Powder Content in Iron Tailings Sand on Durability of Aluminum Sulfate Cementitious High-Performance Concrete

Zhilei Sun<sup>1\*</sup>, Chongchong Du<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shandong Huaseng Fengshan Building Materials Co., Ltd., Jinan Shandong

<sup>2</sup>Jinan High-Tech Holding Group Co., Ltd., Jinan Shandong

Received: Nov. 28<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 8<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 12<sup>th</sup>, 2024

\*第一作者。

文章引用: 孙志磊, 杜冲冲. 铁尾矿砂中石粉含量对硫铝酸盐水泥基高性能混凝土耐久性能的影响[J]. 材料化学前沿, 2024, 12(1): 1-6. DOI: 10.12677/amc.2024.121001

## Abstract

Iron tailings sand is a fine aggregate with material properties similar to that of natural sand, with the characteristics of rough surface and multiple edges and angles; iron tailings sand is the waste discharged by iron processing ore factories that grind iron ore finely and select useful components under specific economic and technical conditions. This paper discusses the effect of stone powder content in iron tailings sand on the durability of aluminum sulfate cementitious high-performance concrete, and studies the effect of stone powder content in iron tailings sand on the properties of high-performance concrete (impermeability and frost resistance) of aluminum sulfate cementitious. Test results: With the increase of stone powder content in iron tailings sand, the impermeability and freeze resistance of high-performance concrete are gradually improved.

## Keywords

Iron Tailings Sands, Aluminum Sulfate Cementitious High-Performance Concrete, Impermeability, Frost Resistance

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

目前,高性能混凝土耐久性已成为国际工程界普遍关注的重大课题[1] [2]。随着科学技术的发展和人类文明的进步,人类生产活动涉及的范围越来越广,各种在严酷环境下使用的混凝土工程,如跨海大桥、海洋工程核反应堆、电站大坝等不断增多,这些工程关系国计民生,必须实现百年大计甚至千年大计,这就更加要求混凝土具有优异的耐久性即足够长的使用寿命[3] [4]。硫铝酸盐水泥基高性能混凝土具有快硬、早强、抗冻、抗渗、微膨胀及耐蚀性,其在寒冷地区、盐碱地区及水工工程中具有独特的优势[5] [6]。

铁尾矿化学成分中:氧化硅含量在 60%~80%之间,铁含量在 5%~15%之间,属高硅和高铁型尾矿。它们一般都经过破碎和分级处理,颗粒较细,级配良好,有些还因经过一定程度的煅烧或化学处理而具有一定的化学活性[7]。铁尾矿砂中铁相矿物多以磁铁矿形式存在,铁相矿物含量由生产工艺不同有所变化,一般小于 8%,生产工艺落后的,其含量在 8%~15%。从铁尾矿的成分上来说符合建筑用砂的指标要求[8]。

目前,铁尾矿砂的市场应用也较多,大部分都是应用在普通硅酸盐水泥基混凝土中,且铁尾矿砂普通硅酸盐水泥基混凝土已经广泛应用各类建筑工程中(市政、铁路、高速公路、港口,等),且铁尾矿砂普通硅酸盐水泥基混凝土工作性能,力学性能,耐久性能都满足相关工程和相关标准的要求[9] [10];而铁尾矿砂在硫铝酸盐水泥基高性能混凝土中的应用基本没有报道。

本文研究铁尾矿砂中石粉含量对硫铝酸盐水泥基高性能混凝土抗渗性能、抗冻性能影响,以适应实际工程所处的特定使用环境。

## 2. 试验材料、试验仪器、试验设计方案

### 2.1. 试验材料

水泥:硫铝酸盐水泥(SAC42.5),初凝和终凝时间分别为 26 min、50 min,安定性合格,烧失量 2.3%,

标准稠度用水量 26%, 为山东省淄博市淄博特种水泥有限公司; 粉煤灰: D 类一级灰, 细度 7.6%, 需水量比 93%, 烧失量 0.4%, 为山东省济南市济南黄台电厂产; 砂 S1: 天然中粗河砂, 含泥量 1.1%, 泥块含量 0.3%, 细度模数 2.80, 颗粒级配良好, 为山东省济南市港沟某砂厂产; 砂 S2: 铁尾矿砂, 石粉含量 1.22%, 泥块含量 0%, 细度模数 3.2, 颗粒级配一般, 表观密度 2780 Kg/m<sup>3</sup>, 为山东省济南山钢集团某铁尾矿堆放厂; 石粉: 专门收集的<0.075 mm 的铁尾矿砂细粉, 为山东省济南山钢集团某铁尾矿厂收集细粉; 碎石: 颗粒尺寸 5 mm~20 mm, 颗粒级配良好, 含泥量 0.4%, 泥块含量 0%, 针片状颗粒含量 5.7%, 压碎值 7.6%, 为山东省济南市莱芜区某石料厂产; 外加剂: 缓凝型聚羧酸高性能减水剂, 减水率 > 30%, 来自山东华伟科技有限公司; 缓凝剂: 硼酸, 分析纯, 纯度不低于 92%, 为天津市某化工市场产; 水: 为自来水。

表 1 为水泥和粉煤灰的化学成分分析, 表 2 为两种砂 S1 和 S2 的性能指标。

**Table 1.** Chemical composition of sulfur-aluminate cement and fly ash

**表 1.** 硫铝酸盐水泥、粉煤灰的化学成分

名称	化学成分/%									
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Loss
硫铝酸盐水泥	42.02	14.22	2.38	26.57	9.82	-	-	2.60	-	0.17
一级粉煤灰	4.87	50.21	5.38	28.16	1.61	1.47	0.68	1.72	0.02	2.55

**Table 2.** Technical indicators of natural river sand and iron tailings sand

**表 2.** 天然河砂、铁尾矿砂的技术指标

方筛孔尺寸	颗粒级配					项目	单位	检测值	
	累计筛余/%		级配区					河砂	铁尾矿砂
	S1	S2	一区	二区	三区				
4.75 mm	0	0	10~0	10~0	10~0	松散密度	kg/m <sup>3</sup>	1340	1540
2.36 mm	16	22	35~5	25~0	15~0	紧密密度	kg/m <sup>3</sup>	1660	1810
1.18 mm	37	41	65~35	50~10	25~0	表观密度	kg/m <sup>3</sup>	2630	2790
0.60 mm	56	67	85~71	70~41	40~16	细度模数	/	2.75	3.10
0.30 mm	75	89	95~80	92~70	85~55	亚甲蓝试验	/	/	1.0
0.15 mm	91	91	100~90	100~90	100~90	石粉含量	%	/	1.5
筛底	100	100	/	/	/	含泥量	%	0.8	/
/	/	/	/	/	/	泥块含量	%	0.3	0
/	/	/	/	/	/	吸水率	%	0.1	1.6
/	/	/	/	/	/	坚固性	%	6.9	4.8

## 2.2. 试验仪器

混凝土搅拌机, 万能压力机, 混凝土抗冻仪, 混凝土抗渗仪, 混凝土振动台, 坍落度筒, 含气量筒, 抗冻试模, 抗渗试模, 等等。

## 2.3. 设计方案

混凝土强度设计标号为 C35, 其配合比如表 3。

**Table 3.** C35-sulfur-aluminate cement-based high-performance concrete mix ratio  
**表 3.** C35-硫铝酸盐水泥基高性能混凝土配合比

编号	水泥/kg	粉煤灰/kg	河砂/kg	机制砂/kg	石粉掺量/%	石/kg	水/kg	水灰比	砂率	减水剂/%	缓凝剂/%
1#	278	118	774	-	-	1068	162	0.41	0.42	1.0	0.90
2#	278	118	-	774	0	1068	162	0.41	0.42	1.1	0.90
3#	278	118	-	751	3	1068	162	0.41	0.42	1.1	0.90
4#	278	118	-	728	6	1068	162	0.41	0.42	1.2	0.90
5#	278	118	-	704	9	1068	162	0.41	0.42	1.2	0.90
6#	278	118	-	681	12	1068	162	0.41	0.42	1.3	0.90
7#	278	118	-	658	15	1068	162	0.41	0.42	1.4	0.90
8#	278	118	-	635	18	1068	162	0.41	0.42	1.5	0.90
9#	278	118	-	611	21	1068	162	0.41	0.42	1.7	0.90

### 3. 试验结果与讨论

试验方案见下表 4 所示。

**Table 4.** Test results of slump and gas content of high-performance concrete  
**表 4.** 高性能混凝土坍落度和含气量的试验结果

编号	河砂/kg	机制砂/kg	石粉掺量/%	坍落度/mm			减水剂%	含气量/%
				初始	1.0 h	2.0 h		
1#	774	-	-	220	220	220	1.0	2.4
2#	-	774	0	220	220	220	1.1	2.2
3#	-	751	3	225	220	210	1.1	2.6
4#	-	728	6	220	235	225	1.2	3.2
5#	-	704	9	220	210	220	1.2	1.7
6#	-	681	12	220	230	220	1.3	2.5
7#	-	658	15	210	210	215	1.4	2.6
8#	-	635	18	210	220	205	1.5	3.2
9#	-	611	21	220	220	215	1.7	2.7

表 4 为通过调整外加剂的掺量, 使不同石粉含量的各组混凝土初始坍落度控制在 200 mm~220 mm, 以及混凝土含气量控制在 1.5%~3.5%之间, 然后对比石粉含量对硫铝酸盐水泥基高性能混凝土性能的影响。

#### 3.1. 铁尾矿砂中石粉含量对高性能混凝土抗冻性能的影响

表 5 为石粉掺量对混凝土抗冻性能的影响。

**Table 5.** Test results of the influence of stone powder dosage on the freezing resistance of high-performance concrete  
**表 5.** 石粉掺量对高性能混凝土抗冻性影响的试验结果

序号	石粉掺量		50 次	75 次	100 次	125 次	150 次	175 次	200 次
1 <sup>#</sup>	河砂	相对动弹性模量/%	96.5	88.4	79.6	63.4	50.3	—	—
		质量损失/%	-0.2	-0.1	-0.6	-0.3	-0.7	—	—
2 <sup>#</sup>	0	相对动弹性模量/%	96.9	89.6	78.4	61.0	48.7	—	—
		质量损失/%	+0.6	-0.9	+0.3	-1.3	-0.7	—	—
3 <sup>#</sup>	3%	相对动弹性模量/%	97.4	90.5	80.5	65.3	54.9	—	—
		质量损失/%	+1.2	-0.3	+0.3	-0.8	-0.5	—	—
4 <sup>#</sup>	6%	相对动弹性模量/%	98.6	95.2	85.4	74.6	67.3	56.1	—
		质量损失/%	-0.4	+2.2	-0.3	+1.3	-0.3	-0.5	—
5 <sup>#</sup>	9%	相对动弹性模量/%	99.4	96.7	89.3	83.1	75.3	63.9	53.8
		质量损失/%	-0.3	+0.9	-0.7	-0.7	-1.7	-0.9	-0.4
6 <sup>#</sup>	12%	相对动弹性模量/%	99.6	97.6	91.8	84.3	79.4	68.1	57.2
		质量损失/%	-0.3	+0.4	-0.9	-1.6	-0.6	-1.3	-0.3
7 <sup>#</sup>	15%	相对动弹性模量/%	99.6	97.5	92.7	86.4	81.6	69.5	59.4
		质量损失/%	-0.3	+0.7	-0.2	-0.6	-0.8	-1.3	+2.2
8 <sup>#</sup>	18%	相对动弹性模量/%	99.4	98.9	93.8	89.6	82.4	70.5	60.7
		质量损失/%	-1.3	+0.2	-1.2	-0.2	-0.3	-1.9	-2.3
9 <sup>#</sup>	21%	相对动弹性模量/%	99.2	98.6	95.2	92.4	84.6	74.7	66.9
		质量损失/%	-1.3	+0.2	-0.6	-1.3	-0.3	-2.4	-0.8

从表 5 中试验数据可以看出：针对抗冻性指标而言，当坍落度和含气量控制在规定范围时，当石粉掺加到硫铝酸盐水泥基高性能混凝土中，其高性能混凝土冻融循环次数随着石粉掺量的增大而逐渐增多，且石粉掺量越高增加越明显，即石粉掺量越大其抗冻性能越强；例如：2<sup>#</sup>试样(石粉掺量为 0%) 150 次就被冻坏，而 8<sup>#</sup>试样和 9<sup>#</sup>试样(石粉掺量为 18% 和 21%) 抗冻融循环次数可达 200 次。另外：其相对动弹性模量随着冻融循环次数的增加而逐渐减小；而其质量损失变化不大。另外，与 1<sup>#</sup>试样(纯河砂)对比，铁尾矿砂混凝土的冻融循环次数较多，即铁尾矿砂混凝土的抗冻性能优于天然河砂。主要原因：因为石粉的加入，填充水泥颗粒的空隙，细化晶粒，降低空隙率，且部分石粉可以作为水化晶粒的结合体，提高水泥水化产物的增长，从而使混凝土硬化结构密实度提到，且石粉的掺量越多，效果越明显。

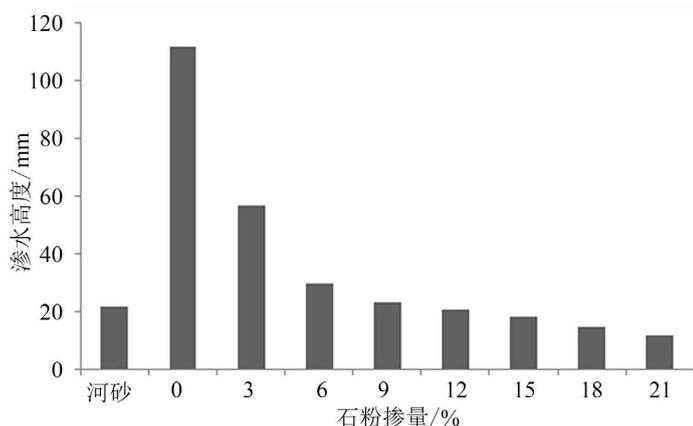
### 3.2. 铁尾矿砂中石粉含量对高性能混凝土抗渗性能的影响

表 6 和图 1 为石粉含量对混凝土抗渗性能的影响。

**Table 6.** Test results of the influence of stone powder content on the impermeability of high performance concrete in iron tailings sand

**表 6.** 石粉含量对铁尾矿砂高性能混凝土抗渗性能影响的试验结果

编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
石粉含量	河砂	0	3	6	9	12	15	18	21
渗水高度 $D_n$ /mm	21.6	112.1	56.7	29.8	23.4	20.8	18.1	15.0	11.8
相对渗透系数/ $10^{-10}$ cm/s	1.12	9.84	3.45	1.62	1.30	0.90	0.71	0.52	0.34



**Figure 1.** Effect of stone powder content on the impermeability of sulfur aluminate cement-based high performance concrete in iron tailings

**图 1.** 石粉含量对铁尾矿砂硫铝酸盐水泥基高性能混凝土抗渗性能的影响

从表 6 和图 1 中试验数据可以看出: 针对抗渗性指标而言, 当坍落度和含气量控制在规定范围时, 当石粉掺加到硫铝酸盐水泥基高性能混凝土中, 其高性能混凝土(24 h)的渗水高度随着石粉用量的增加而逐渐下降, 且石粉掺量越高渗水高度下降越明显; 另外, 与 1#试样(纯河砂)对比, 当石粉掺量低于 12% 时, 其铁尾矿砂混凝土的渗水高度较大, 当石粉含量超过 12% 后, 其铁尾矿砂混凝土的渗水高度较低, 即石粉超过 12% 后, 其铁尾矿混凝土的抗渗性能优于天然河砂。主要原因为: 铁尾矿砂中石粉含量的增加, 其混凝土硬化浆体中的有害孔和开闭孔逐渐变少, 凝胶孔或毛细孔逐渐变多, 提高硬化结构的致密性, 即石粉含量的增加将大大改善高性能混凝土内部结构。

#### 4. 结论

(1) 研究表明: 铁尾矿砂混凝土的工作性能和抗冻性能、抗渗性能可满足相关国家或行业标准或施工设计的要求。

(2) 随着石粉掺量的增加, 其混凝土抗冻性能逐渐提高, 且掺量越高其抗冻性能越高。

(3) 铁尾矿砂硫铝酸盐水泥基高性能混凝土中, 其混凝土抗渗性能随着石粉掺量的增加而逐渐提高; 当石粉掺量超过 12% 时, 其铁尾矿砂混凝土的抗渗性能优于天然河砂。

#### 参考文献

- [1] 罗兆辉, 李京玲, 成全喜, 王书祥. 改性聚丙烯纤维混凝土在水池结构中的抗渗应用研究[J]. 特种结构, 2010(2): 108-110.
- [2] 刘向楠, 唐新军, 苏建彪, 张涛, 张傲齐. 硫铝酸盐水泥混凝土抗高浓度硫酸镁侵蚀性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015(5): 161-167.
- [3] 肖阳, 张守杰. 引气剂对混凝土抗冻性和抗渗性影响研究[J]. 黑龙江水利, 2015(6): 38-42.
- [4] 胡文龙, 六赞群, 裴敏. 引气剂对硫铝酸盐水泥混凝土硫酸盐结晶破坏的影响[J]. 材料导报, 2019, S1(A1): 239-243.
- [5] 王永吉.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  对硫铝酸盐水泥熟料矿物形成及性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [6] 张仁磊. 混凝土抗渗性能现场检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
- [7] 张凯, 康洪震. 铁尾矿砂混凝土试配实验研究[J]. 科学资讯, 2015, 22(59): 59-60.
- [8] 李瑞敏, 马卫华. 铁尾矿砂混凝土研究现状及展望[J]. 山西建筑, 2015, 4(15): 107-108.
- [9] 黄天勇, 章银祥, 陈旭峰, 阎培渝. 铁尾矿砂在干混砂浆中的应用研究综述[J]. 混凝土, 2017(9): 133-135.
- [10] 张如林. 机制砂石粉含量对混凝土的性能影响研究[J]. 混凝土, 2016(3): 34-35.