

高钛重矿渣用作地坪耐磨骨料的综合评价与应用技术研究

王婷婷, 涂崇甫, 程 垚, 赵继涛

攀枝花学院土木与建筑工程学院, 四川 攀枝花

收稿日期: 2026年6月6日; 录用日期: 2026年6月30日; 发布日期: 2026年7月6日

摘 要

为综合评价高钛重矿渣用作地坪耐磨骨料的技术经济性,以市售硅砂和锡钛合金为参照,共设置纯硅砂、纯锡钛合金及二者分别与高钛重矿渣按1:1复配五组方案,系统测试了砂浆的力学性能和耐磨性能。在五组对比中,纯高钛重矿渣组的28 d抗压强度(110.3 MPa)和耐磨度比(468%)均为最高,分析认为其突出的耐磨性能与矿渣粗糙多孔表面同水泥浆体之间形成的强机械啮合有关;经济上,其原材料成本仅120元/吨,面层材料成本较硅砂体系降低25%~35%。综合考虑,高钛重矿渣兼具优异的耐磨性和明显的成本优势,是替代传统耐磨骨料的理想备选材料。本文同时还对优化级配和硅烷表面改性工艺进行了探讨。

关键词

高钛重矿渣, 地坪耐磨骨料, 综合评价, 施工工艺, 技术优化

Comprehensive Evaluation and Application Technology Research on High-Titanium Heavy Slag Used as Floor Wear-Resistant Aggregates

Tingting Wang, Chongfu Tu, Yao Cheng, Jitao Zhao

School of Civil and Architecture Engineering, Panzhihua University, Panzhihua Sichuan

Received: June 6, 2026; accepted: June 30, 2026; published: July 6, 2026

Abstract

In order to comprehensively evaluate the technical economy of high-titanium heavy slag as a wear-

文章引用: 王婷婷, 涂崇甫, 程垚, 赵继涛. 高钛重矿渣用作地坪耐磨骨料的综合评价与应用技术研究[J]. 材料化学前沿, 2026, 14(3): 230-239. DOI: 10.12677/amc.2026.143024

resistant aggregate for flooring, with reference to the commercially available silica sand and tin-titanium alloy, a total of pure silica sand, pure tin-titanium alloy and the two are set up with high-titanium heavy slag according to 1:1, and the mechanical properties and wear resistance of mortar are systematically tested. Among the five groups of comparisons, the 28 d compressive strength (110.3 MPa) and wear resistance ratio (468%) of the pure high titanium heavy slag group are the highest. The analysis believes that its outstanding wear resistance is related to the strong mechanical interlocking formed between the rough porous surface of the slag and the slurry. Economically, the cost of its raw materials is only 120 yuan/ton, and the cost of surface materials is 25% to 35% lower than that of the silica sand system. Comprehensively considered, high-titanium heavy slag has both excellent wear resistance and obvious cost advantages, and is an ideal alternative material to replace traditional wear-resistant aggregates. This paper also discusses the optimization of grading and silane surface modification process.

Keywords

High Titanium Heavy Slag, Floor Wear-Resistant Aggregates, Comprehensive Evaluation, Construction Technology, Technical Optimization

Copyright © 2026 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. 引言

地坪是工业建筑、仓储物流以及商业设施等场所的重要组成部分，其耐磨性能直接决定了工程的使用寿命与维护成本。当前市场主流的耐磨骨料主要有两类：一类是以硅砂为代表的天然骨料，价格虽然相对适中，但天然资源日益枯竭，开采过程会对生态环境造成不可逆的破坏；另一类是锡钛合金等高性能骨料，尽管硬度和耐磨性十分优异，但高昂的价格大幅提高了工程成本，限制了其在普通工程中的推广应用。两类主流骨料均无法同时满足高强度与经济性的要求，探索一种兼顾两者的新型耐磨材料成为地坪行业亟待解决的问题。

攀西地区蕴藏丰富的钒钛磁铁矿，冶炼过程中产生大量高钛重矿渣。高钛重矿渣是高炉冶炼钒钛磁铁矿时产生的熔融矿渣在空气中自然冷却或水淬形成的一种以钛辉石、钙钛矿等矿物为主的无机材料[1]，其外观呈灰黑色，带有微孔结构，且属于非活性材料，每年产出近 400 万 t，历史堆积量已接近 7000 万 t [2]，该矿渣 TiO 含量较高，具有高强度、多孔结构、角度状颗粒形态等特点，初步显示出作为高性能耐磨骨料的潜力。目前，攀枝花地区已将高钛重矿渣分级破碎制成粗、细骨料及矿渣微粉，应用于道路桥梁、工业厂房等混凝土工程中，但针对其作为地坪耐磨骨料的系统研究及工程应用评价仍相对缺乏。

本研究在前期实验工作的基础上，围绕高钛重矿渣地坪材料的综合性能、技术优化以及施工工艺进行综合分析，以期在实验室数据与工程应用之间建立可参照的技术路径，为该类工业固废在地坪材料中的实际推广提供依据。

2. 实验材料与方法

2.1. 实验材料

高钛重矿渣：实验用高钛重矿渣由攀枝花钢城集团有限公司提供，矿渣中 TiO₂ 含量达 27.38%，地坪基层混凝土所用粗骨料粒径为 5~25 mm，细骨料细度模数 2.6，属二区级配；地坪面层所用高钛重矿渣经电动筛分机筛分，保留粒径在 10~70 目之间。

水泥：采用 P.O42.5R 水泥，符合《通用硅酸盐水泥》(GB175-2023)¹标准要求。

硅灰：SiO₂ 含量达 96.50%，具有高火山灰活性，用于填充水泥颗粒间空隙并改善界面过渡区结构。

减水剂：聚羧酸高性能减水剂，减水率 26%，能够显著降低水胶比，提高混凝土密实度和强度。

对比骨料：选用市售硅砂(200~500 元/吨)和锡钛合金(2000~4200 元/吨)作为对照组。两种骨料的基本性能参数如表 1 所示。

Table 1. Compare the basic performance parameters of aggregates

表 1. 对比骨料基本性能参数

骨料类型	粒径范围(目)	莫氏硬度	压碎指标(%)	表观密度(kg/m ³)
硅砂	20~70	7	12.5	2650
锡钛合金	20~60	8~8.5	6.5	3100
高钛重矿渣	10~70	6~7	8	2850

2.2. 骨料组合方案设计

为系统评价高钛重矿渣的独立应用性能及与其他骨料的复配效应，共设置五组对比方案：

A 组(纯硅砂)：100%硅砂，代表市场中端基准材料；

B 组(矿渣 - 硅砂复配)：50%高钛重矿渣 + 50%硅砂；

C 组(全高钛重矿渣)：100%高钛重矿渣，本研究主体材料；

D 组(矿渣 - 锡钛合金复配)：50%高钛重矿渣 + 50%锡钛合金；

E 组(纯锡钛合金)：100%锡钛合金，代表市场高端对比材料。

其中，A 组与 E 组数据由合作企业参照相同实验条件提供，作为评价基准；B、C、D 三组为本研究实验实测数据。

2.3. 配合比设计

依据《混凝土地面用水泥基耐磨材料》(JCT906-2023)²，以流动度 $D = 130 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ 为控制指标，经反复调整水灰比与减水剂掺量，确定了 B、C、D 三组地坪砂浆的最佳配合比，见表 2。

Table 2. Floor mortar ratio of the experimental group

表 2. 实验组地坪砂浆配合比

组别	水灰比	水泥/g	硅粉/g	高钛高炉渣/g	对比骨料/g	水/g	减水剂/g	流动度/mm
B 组	0.26	770	22	715	715	205.9	1.98	124
C 组	0.28	770	22	1430	0	221.8	2.64	121
D 组	0.22	770	22	715	715	174.2	1.1	122

2.4. 试件制备与养护

试件制备包括基层混凝土与面层耐磨砂浆两部分。基层采用高钛高炉渣配制 C40、C60、C80 高性能混凝土，成型试件用于力学性能测试以及耐磨度与莫氏硬度测试，见图 1；面层则分别制备 40 mm × 40 mm × 160 mm 试件，用于力学性能与耐磨性能测试，见图 2。所有试件成型振实后，在标准养护条件(温度 20℃ ± 2℃，相对湿度 ≥ 95%)下养护至规定龄期进行测试。

¹<https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=5929251A9CAE62383D664FA99230B82E>

²<https://www.antpedia.com/standard/1052899375-1.html>



Figure 1. Floor grass-roots concrete specimen
图 1. 地坪基层混凝土试件



Figure 2. Floor surface layer mortar specimen
图 2. 地坪面层砂浆试件

2.5. 测试方法

力学性能测试：地坪基层混凝土强度按照 GB/T 50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》³进行，实验设备 SYE-3000D 电液式压力试验机；面层砂浆抗压/抗折强度按照 GB/T 17671-2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》⁴进行测试，实验设备 HYE-300B 微机电液伺服压力试验机。

耐磨性能测试：按照 GB/T 16925-1997《混凝土及其制品耐磨性实验方法(滚珠轴承法)》⁵标准，采用滚珠轴承式耐磨实验机 NS-2 型测试地坪耐磨度。将试件安装在实验机上，在规定载荷和转速下运行规定转数，测量试件磨损深度或质量损失，计算耐磨度比。

表面硬度测试：依据 GB231.1-2018《金属布氏硬度实验方法》⁶进行测试，实验设备微机控制电子万能实验机，最大负荷 5 KG。

3. 结果与分析

3.1. 地坪基层高钛渣矿渣混凝土实验研究

由于高钛重矿渣的多孔结构，使其具有远高于普通混凝土用砂、石的吸水率，当将其用于混凝土配制时，将显著影响混凝土的工作性能以及力学性能。本研究开展了 C40、C60、C80 三个强度等级的高钛重矿渣混凝土配合比实验研究，水胶比分别为 0.37、0.26、0.24，通过调整水泥、硅粉、矿粉掺量，测试 28d 抗压强度分别达到 49 MPa、62 MPa 和 85 MPa，均达到配合比设计目标。对高强度 C80 混凝土进行硬度和耐磨性检测，莫氏硬度达 5，耐磨度值为 1.1 (高于基准砂浆 0.9)。

结果表明，高钛重矿渣混凝土具有较高的强度、硬度和一定的耐磨性能，能够满足地坪基层的使用要求，在验证高钛重矿渣基层混凝土可行性的基础上，本研究重点针对面层耐磨砂浆开展五组对比实验。

³https://zjj.sm.gov.cn/xxgk/fgwj/jsbz/202011/t20201117_1591294.htm

⁴<https://www.antpedia.com/standard/1149097354-1.html>

⁵<https://www.antpedia.com/standard/334738-1.html>

⁶<https://www.antpedia.com/standard/1026445026-1.html>

3.2. 地坪面层高钛渣矿渣砂浆实验研究

3.2.1. 力学性能

五组砂浆的抗压、抗折强度测试结果如表 3 所示。

Table 3. Mechanical properties of five groups of floor mortar
表 3. 五组地坪砂浆力学性能

组别	7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa	7 d 抗折强度/MPa	28 d 抗折强度/MPa
A 组	93.6	107.8	14.7	15.6
B 组	88.4	107.9	12.8	16.4
C 组	91.2	110.3	12.6	14.8
D 组	93.2	113	12.4	14.2
E 组	102.7	119.2	16.5	19.4
标准要求	/	80	/	11.5

实验组试件 28 d 抗压强度均远超标准要求(80 MPa), 纯高钛重矿渣组达 110.3 MPa, 与掺锡钛合金组(113 MPa)接近, 较掺硅砂组提高 2.2%。7 d 强度达 28 d 强度的 80%以上, 表现出良好的早强特性。

3.2.2. 耐磨性能

耐磨性能是地坪材料的核心指标。五组砂浆的耐磨测试结果如表 4 所示。

Table 4. Test results of wear resistance
表 4. 耐磨性能测试结果

组别	耐磨值	耐磨度比%
A 组	3.31	368
B 组	4.07	452
C 组	4.21	468
D 组	3.34	371
E 组	3.37	374
基准砂浆	0.9	/
行业标准	/	300

纯高钛重矿渣组(C 组)耐磨度比达 468%, 远高于行业标准(300%), 为五组中的最优值; 与矿渣-硅砂复配组(B 组, 452%)和纯锡钛合金组(E 组, 374%)相比, 分别高出 16 个和 94 个百分点。该组在耐磨性能上的优势较为突出, 这一结果的机理可从三方面解释:

- 1) 高钛重矿渣中 TiO_2 含量高达 27.38%, 钛元素的存在有助于形成高硬度的钛辉石等矿物相, 为材料提供了良好的耐磨基础[3];
- 2) 矿渣表面粗糙且分布大量微孔, 显著增大了与水泥浆体的实际接触面积, 两者之间形成了更强的机械咬合力, 使得界面过渡区更加密实, 有利于应力在骨料与基体间的传递和分散[4] [5];
- 3) 与主要依赖超高硬度抵抗磨损的锡钛合金不同, 高钛重矿渣的磨损破坏路径表现出不同特征。已

有研究表明, 该类矿渣混凝土的破坏面往往穿越骨料而非沿界面剥离[4], 反映出其骨料-浆体界面结合强度较高。在反复磨损作用下, 较强的界面结合有助于避免骨料过早剥落, 使基体能够在更长时间内维持整体性。

图3 为高钛渣矿渣地坪断裂后表面的 SEM 微观图, 为机理 3 提供了证明: 水泥水化的产物填充于矿渣表面微孔中, 界面过渡区无微裂缝, 结构均匀, 断裂面多穿过矿渣骨料, 未出现沿骨料-浆体界面剥离的破坏特征, 这表明了骨料与浆体之间的机械啮合强度已经超过了骨料本身的抗拉抗剪强度。

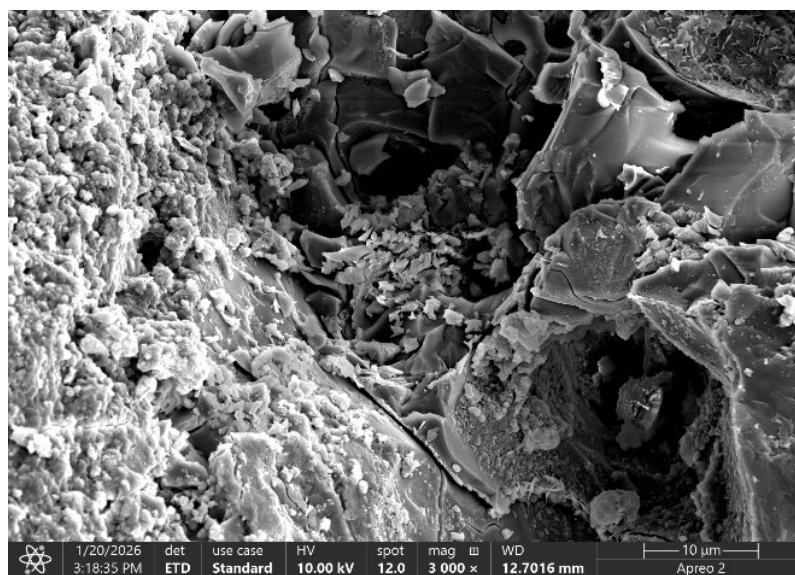


Figure 3. Microstructure (SEM) of high titanium heavy slag mortar
图 3. 高钛重矿渣砂浆的微观结构(SEM)

3.3. 经济性分析

耐磨骨料的原材料成本对比如表 5 所示, 表 6 为全高钛重矿渣耐磨地坪材料成本。

Table 5. Comparison of raw material costs

表 5. 原材料成本对比

骨料类型	单价(元/吨)
硅砂	200~500
锡钛合金	2000
高钛重矿渣	120

Table 6. Cost of wear-resistant flooring materials for full-height titanium heavy slag

表 6. 全高钛重矿渣耐磨地坪材料成本

项目	水泥	硅粉	高钛重矿渣	水	减水剂	总计	地坪面层/m ² (厚度 40 mm)
用量/g	770	22	1430	221.8	2.64	2446.44	5000
价格/元	390/t	1100/t	120/t	50/t	15,500/t	0.54821	1.12/m ²

注: 按 40 mm 厚度、密度换算的每平方米骨料用量估算, 本表格仅为材料成本, 未计算施工成本、地坪厂家生产成本等。

高钛重矿渣原材料成本仅 120 元/吨，远低于硅砂和锡钛合金，成本优势主要来源于三个方面：一是矿渣作为工业固废本身获取成本低廉；二是优化的预处理工艺(破碎、筛分、磁选除铁)有效控制了加工成本；三是攀西地区资源丰富，可就地取材，减少长途运输费用。

按 40 mm 厚度计算，每平方米面层材料的成本约为 1.12 元，明显低于同等厚度下市场常用的骨料体系，进一步考虑其优异的耐磨性能对地坪使用寿命的延长作用，有望减少后期维修和更换频次，从而在长期运营中带来更低的综合成本。

3.4. 五组骨料性能定位

基于上述分析，可将五组骨料的性能定位概括如下：

A 组(纯硅砂)：性能均衡的传统选择，技术成熟，成本较高且资源日益紧张，可作为基准参照；

B 组(矿渣 - 硅砂复配)：用高钛重矿渣替代 50%的硅砂，耐磨度比提升至 452%，同时原材料成本下降了约 27%，兼顾耐磨性能和经济性，可作为中等预算工程的技术方案；

C 组(全高钛重矿渣)：性能优异、成本低廉的替代型材料，在耐磨性能上具有独特优势，综合性价比最高；

D 组(矿渣 - 锡钛合金复配)：用高钛重矿渣替代 50%的锡钛合金，耐磨度比 371%，较纯锡钛合金组(374%)略有下降，但成本降低约 46%，可作为高端材料的经济性替代方案；

E 组(纯锡钛合金)：高强度、高硬度的性能导向型材料，适合特种需求，但成本较高。

4. 技术优化研究

基于上述性能评价结果，高钛重矿渣展现出良好的应用前景。为进一步提升其工程适应性，从级配、改性和工艺三个方面开展优化研究。

4.1. 级配优化

高钛重矿渣的堆积密度随粒径减小而增大，若单纯追求最大堆积密度而全部采用细骨料，虽可获得高密实度，但细颗粒过多会增大比表面积和颗粒摩擦力，导致流动性下降、施工困难；反之，若全部采用粗骨料虽流动性较好，但堆积密度低、空隙率高，将削弱骨架支撑作用和力学强度。同时，堆积状态下高钛重矿渣的空隙率随着粒径增大呈现出上升趋势，说明粒径越大，颗粒堆积后形成的空隙越多，单一粒级难以达到理想的密实状态[6]。

本研究选取高钛重矿渣粒径范围为 10~70 目(0.212~2.0 mm)用作地坪面层骨料，属细骨料范畴，堆积状态下，上述空隙率随粒径变化的基本关系在其内部各粒级之间同样存在。为进一步提升面层砂浆的密实度与耐磨性能，将 10~70 目筛分为三个粒级，如表 7 所示。

Table 7. Grain-level division of surface aggregates

表 7. 面层骨料粒级划分

目	对应粒径/mm	粒级
10~20	0.85~2.0	较粗粒级
20~40	0.425~0.85	中间粒级
40~70	0.212~0.425	较细粒级

按照紧密堆积原理，以较粗粒级为骨架、中间及较细粒级逐级填充，可在提高堆积密度的同时减少水泥浆体用量。在表 7 三级筛分的基础上，通过复配实验考察了不同粒级对比对堆积密度和空隙率的影响。

响，确定了面层骨料中较优的粒级组合比例。

4.2. 表面改性

高钛重矿渣骨料表面存在大量微孔及结构缺陷，这决定了对其进行表面改性的必要性。未经处理的骨料会引发三方面问题：

- 1) 微孔形成水分渗透通道，降低材料的抗渗性与耐久性；
- 2) 界面过渡区因骨料表面多孔而成为薄弱环节，一定程度削弱骨料与胶凝材料之间的粘结强度；
- 3) 在受力状态下，孔隙边缘易产生应力集中，诱发微裂缝的萌生与扩展。

本研究分别选取了硅烷类和环氧树脂类两种作用机制不同的固化剂进行表面改性。硅烷类固化剂分子尺寸较小，能够渗透进入骨料内部孔隙，通过水解缩合反应形成网状交联聚合物，在骨料表面及内部孔壁构筑致密的憎水保护层，其活性官能团还能与水泥水化产物发生化学键合，产生“分子桥”效应，从内部强化界面结合[7]。环氧树脂类固化剂主要在骨料表面形成连续的膜状覆盖层[8]，通过物理填充孔隙与裂缝，在水分和材料毛细孔道之间建立隔离屏障。两类固化剂分别从内渗透与外表覆两种路径对骨料进行改性，为后续对比优选提供了依据。

两种改性方法均可不同程度地改善界面过渡区，但二者的作用层次有明显区别：硅烷能够渗透到骨料的内部，从孔壁到表面形成整体改性；环氧树脂则主要作用于骨料表层，形成物理隔离。经改性处理后，骨料的孔隙率降低(如图4所示)，抗渗性和力学性能均有改善，有利于延长材料在实际使用条件下的寿命。

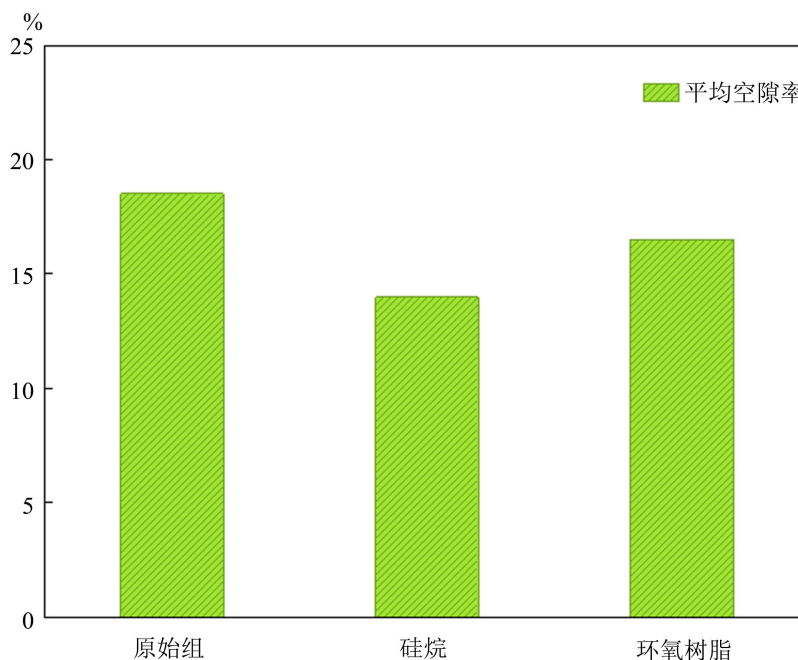


Figure 4. The average porosity of concrete under different reinforcement materials

图4. 不同强化材料下混凝土的平均孔隙率

4.3. 工艺适配

考虑到实验室确定的优化参数在复杂现场条件下可能不完全适用，本研究模拟了高温大风和低温两种典型工况，考察了水胶比、搅拌时间等关键工艺参数在不同环境条件下的适应性和允许波动范围。

C 组纯高钛重矿渣面层砂浆的实验室基准水胶比为 0.28 [9] [10], 该值是在流动度 120 ± 5 mm 的控制指标下经配合比优化得到的。由于现场环境与实验室条件存在明显差异, 水胶比不宜直接照搬。综合本研究的现场模拟测试结果, 在高温或大风等水分蒸发速率较快的工况下, 建议在基准水胶比基础上适当增加用水量, 以补偿搅拌、运输和摊铺过程中的水分损失, 保证施工和易性; 在低温条件下, 则应在满足施工流动度的前提下从严控制用水量, 避免多余水分滞留导致基体密实度降低和后期强度受损。需要指出的是, 本节所述内容主要基于现场模拟浇筑情况下对砂浆工作性能的定性观察以及施工可行性判断, 尚未进行系统的变量控制实验, 故水胶比、现场条件与砂浆的力学性能之间的具体量化关系有待后续研究确定。

5. 基于材料特性的施工工艺要点

高钛重矿渣表面粗糙多孔、吸水率较高的特性, 决定了其施工工艺与普通硅砂耐磨地坪存在显著差异。基于工程实验段反馈, 针对提浆时机、材料撒布与表面处理提出以下差异化控制要点:

1) 提浆与初次收面: 普通耐磨地坪是在混凝土初凝后 3~4 h 后进行提浆收面, 控制指标为脚踩下陷 ≤ 5 mm, 高钛重矿渣需提前 30~60 min 开始作业, 控制指标为脚踩下陷 ≤ 3 mm, 防止高钛重矿渣因骨料吸水率高, 加速基面表层水分的吸附与下渗而造成的面层失水起粉。

2) 首次铺撒骨料: 普通耐磨地坪撒布 2/3 材料后立即揉压, 高钛重矿渣需撒布后静置观察 2~3 min, 待骨料充分吸水“返潮”变灰暗后再揉压, 目的是降低界面局部水灰比, 增强骨料与浆体的机械咬合力。

3) 固化剂施工: 普通耐磨地坪施工工艺是常规滩涂浸泡, 高钛重矿渣应适当延长浸泡时间至 4 h 以上, 并采用低速研磨, 使得矿渣表面微孔充分渗透填充。若渗透不充分, 抛光时易产生孔洞“发花”现象。

4) 养护方式: 普通耐磨地坪养护时需覆盖洒水或覆膜, 而高钛重矿渣严禁高压水枪直接冲刷, 需喷洒养护剂或覆盖土工布缓慢补水, 防止水流扰动未完全硬化的矿渣颗粒, 导致面层露砂。

上述差异化控制措施已在若干试点工程中得到应用, 从实际施工效果看, 调整提浆时机和撒布工艺后, 面层开裂、脱皮等与高吸水性相关的质量问题明显减少, 有助于将高钛重矿渣的耐磨性能优势在工程层面落到实处。

6. 讨论

本研究系统评价了高钛重矿渣用作地坪耐磨骨料的力学性能、耐磨性能及经济性, 但仍存在以下局限, 需在后续工作中进一步完善:

1) 未涉及长期性能与抗化学侵蚀性能: 本研究以 28 d 龄期作为测试的终点, 高钛重矿渣在更长周期内的性能未能考察, 同时, 在一些特殊工况下, 如工业地坪常面临油污、酸碱性介质侵蚀, 尚未对高钛重矿渣地坪的抗化学侵蚀能力做测试, 矿渣的多孔结构是否能成为腐蚀介质渗透的通道, 以及表面改性对这一风险的改善程度, 有待后续研讨。高钛重矿渣用作地坪耐磨骨料在实际使用中能否长期维持其耐磨的优势, 需通过长期暴露试验加以验证。

2) 体积稳定性差与收缩开裂风险: 高钛重矿渣的多孔结构有利于与水泥浆体形成机械啮合, 但同时也存在着硬化干燥过程中骨料内部储存的水分逐渐释放, 可能增大砂浆的干燥收缩的问题, 这会导致微裂缝或面层开裂, 本研究在实验阶段未观察到明显收缩裂缝, 但考虑到实验室条件与现场条件的温湿度有所出入, 高吸水率对于体积稳定性的潜在影响仍需系统性干燥收缩试验进行评估。

3) 有效水灰比失控: 在砂浆拌合过程中, 矿渣骨料快速吸收部分拌合水, 使浆体中实际水灰比偏离设计值, 若不预先调整用水量, 将导致流动度下降、施工困难, 若为恢复流动度而额外加水, 则破坏配合比设计, 造成强度降低。

4) 工艺参数优化的量化不充分: 如 3.3 节所述, 不同施工条件下工艺参数的调整基于定性观察, 缺乏系统的变量控制实验数据支撑, 量化关系有待研究确定。

7. 结论

根据上述实验结果与综合分析, 得出以下结论:

1) 五组骨料体系中, 纯高钛重矿渣组(C组)的 28 d 抗压强度(110.3 MPa)和耐磨度比(468%)均为最高值, 在本实验条件下表现出最优的综合性能, 证实了高钛重矿渣独立作为地坪耐磨骨料是可行的。

2) 高钛重矿渣具有显著的经济优势。原材料成本仅 120 元/吨, 每平方米面层材料成本仅 1.12 元, 较传统材料降低 25%~35%, 实现了工业固废的高值化资源化利用。

3) 通过多粒级复配优化和表面改性处理, 面层砂浆的密实度和流动性均可得到不同程度的改善, 其中硅烷改性对骨料-浆体界面结合质量的提升效果尤为明显。

4) 通过模拟不同施工工况, 提出了水胶比、提浆时机等关键参数的建议控制范围, 为工程应用提供参考。

综上所述, 高钛重矿渣兼具卓越的耐磨性能与显著的经济优势, 是替代传统地坪耐磨骨料的理想绿色建材。

基金项目

“工业固态废弃物土木工程综合开发利用”四川省高校重点实验室重点项目: 高钛高炉渣全替代制备耐磨地坪关键技术及强化机理研究(SC_FQWLY-2025-Z-02)。

参考文献

- [1] 陈梦义. 高钛重矿渣在混凝土中的应用进展[J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38(6): 37-42.
- [2] 王伟, 汪杰, 梁月华. 高钛重矿渣作为集料用于沥青混合料的可行性分析研究[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(4): 87-93.
- [3] 赵剑. 高钛高炉渣粘温特性及分子动力学模拟[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 华北理工大学, 2023.
- [4] 王浩, 李小伟, 王军. 高钛重矿渣混凝土破坏机理及数值模拟[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(1): 105-112.
- [5] 李晓英, 李军, 卢忠远. 高钛矿渣骨料超高性能混凝土性能及其浆-骨界面作用机制研究[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(10): 17-24.
- [6] 游天才. 高钛重矿渣混凝土应用技术研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2007.
- [7] 赵毅, 沈龚, 缪一新, 等. 硅烷偶联剂在混凝土中应用的研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(5): 1496-1501.
- [8] 阎培渝, 岳蕾, 代丹, 等. 环氧树脂乳液对油井水泥水化过程和力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(7): 2019-2023.
- [9] 赵继涛, 余韵, 李厚鹏, 徐茂炎, 贺小双. 攀西地区高钛高炉渣制备地坪耐磨层砂浆的试验研究[J]. 四川建材, 2024, 50(10): 12-1417.
- [10] 攀枝花学院. 一种基于高钛高炉渣的地坪耐磨层砂浆及其制备方法[P]. 中国专利, CN119430792B. 2025-08-15.