

钢渣水泥稳定混合料的耐久性研究：抗冻融、抗渗与硫酸盐侵蚀性能

许方勇

武汉都市区环线北段投资管理有限公司，湖北 武汉

收稿日期：2025年7月27日；录用日期：2025年8月17日；发布日期：2025年8月29日

摘要

在道路工程可持续发展需求日益迫切的背景下，钢渣作为工业固废在水泥稳定混合料中的应用已得到力学性能验证，但其长期耐久性数据仍存在缺口。为探究钢渣混合料在复杂环境下的服役性能，以4%水泥含量为基准，设计钢渣掺量25%、50%、75%的三组混合料，通过快速冻融循环(-20℃~20℃, 50次)、渗水系数测试及5% Na₂SO₄溶液侵蚀试验，系统分析其抗冻融、抗渗及抗硫酸盐侵蚀性能。结果表明：50%钢渣掺量时冻融后抗压强度损失率最低(12.3%)，渗水系数较纯砾石混合料降低28.5%；硫酸盐侵蚀下钢渣混合料膨胀率随龄期呈先升后降趋势，28天峰值达0.32%。本文为钢渣混合料在寒区、盐渍土等特殊环境道路基层的应用提供了关键数据支撑。

关键词

钢渣，水泥稳定混合料，耐久性，抗冻融，抗渗性，硫酸盐侵蚀

Research on the Durability of Steel Slag Cement Stabilized Mixture: Freeze-Thaw Resistance, Impermeability and Sulfate Erosion Resistance

Fangyong Xu

Wuhan City Circle Line North Section Investment Management Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Jul. 27th, 2025; accepted: Aug. 17th, 2025; published: Aug. 29th, 2025

Abstract

Against the backdrop of the increasingly urgent demand for sustainable development in road engi-

文章引用：许方勇. 钢渣水泥稳定混合料的耐久性研究：抗冻融、抗渗与硫酸盐侵蚀性能[J]. 土木工程, 2025, 14(9): 2159-2167. DOI: 10.12677/hjce.2025.149233

neering, the application of steel slag as industrial solid waste in cement-stabilized mixtures has been verified for mechanical properties, but there is still a gap in its long-term durability data. To explore the service performance of steel slag mixtures in complex environments, three groups of mixtures with steel slag dosages of 25%, 50%, and 75% were designed based on a 4% cement content. Through rapid freeze-thaw cycles (-20°C to 20°C , 50 times), water permeability coefficient tests, and erosion tests with 5% Na_2SO_4 solution, systematically analyze its freeze-thaw resistance, impermeability and resistance to sulfate erosion. The results show that when the steel slag content is 50%, the loss rate of compressive strength after freeze-thaw is the lowest (12.3%), and the water permeability coefficient is 28.5% lower than that of the pure gravel mixture. Under sulfate erosion, the expansion rate of steel slag mixture showed a trend of first increasing and then decreasing with age, reaching a peak of 0.32% at 28 days. This article provides key data support for the application of steel slag mixtures in road base layers in special environments such as cold regions and saline soil.

Keywords

Steel Slag, Cement-Stabilized Mixture, Durability, Freeze-Thaw Resistant, Impermeability, Sulfate Erosion

Copyright © 2025 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

水泥稳定基层作为道路结构的承重核心，其耐久性直接影响路面使用寿命。传统砾石基层在冻融循环、雨水渗透及硫酸盐介质作用下易发生结构劣化，而钢渣作为钢铁工业副产品，因高硬度、耐磨性及潜在活性被视为理想替代骨料[1]-[4]。然而，现有研究虽已证实钢渣对混合料力学性能的提升作用，但缺乏其在抗冻融、抗渗及硫酸盐侵蚀等耐久性指标的系统数据，导致钢渣混合料在寒区、沿海及盐渍土地地区的应用受到限制。

以我国北方地区为例，年均冻融循环次数达 50~80 次，传统基层材料在 30 次冻融后强度损失率常超过 20%；南方多雨地区基层渗水系数若大于 100 mL/min，易引发唧泥病害；西北盐渍土区硫酸盐含量高(>2%)，基层膨胀破坏风险显著增加。因此，明确钢渣混合料的耐久性特征，对拓展其工程应用场景具有迫切的现实意义。

国内外关于钢渣在道路工程中的耐久性研究主要集中于沥青混合料领域[5]-[11]，而在水泥稳定材料中，相关研究仍存在明显空白：抗冻融机制不明确、抗渗性能研究不足、硫酸盐侵蚀机理模糊，缺乏钢渣掺量与耐久性指标的量化关系研究。

本研究以 4%水泥含量为基准配合比，通过控制钢渣掺量(25%、50%、75%)，开展抗冻融、抗渗及硫酸盐侵蚀试验，旨在建立钢渣掺量与耐久性指标的量化关系，提出钢渣混合料在特殊环境下的最优掺量建议，为工程应用提供技术依据。

2. 实验材料及方法

2.1. 实验材料

2.1.1. 骨料

钢渣：取自河北某钢铁厂，破碎筛分后粒径 $\leq 20\text{ mm}$ ，主要化学成分为 CaO (24.98%)、 Fe_2O_3 (25.45%)、 SiO_2 (17.08%)，孔隙率 18.5%，压碎值 16.2%；

砾石：黄河流域天然砾石，粒径 $\leq 20\text{ mm}$ ，孔隙率 4.2%，压碎值 22.5%；

级配设计：采用骨架密实型级配，通过 0.075 mm 筛孔质量分数 $\leq 5\%$ ， 4.75 mm 筛孔质量分数 40%~50%。

2.1.2. 胶凝材料

采用 P.O 42.5 级普通硅酸盐水泥作为胶凝材料，其各项性能指标均符合 GB 175-2007《通用硅酸盐水泥》标准要求。经检测，该水泥初凝时间为 2.5 h，终凝时间为 4.2 h，安定性合格；28 天抗压强度达到 48.6 MPa，抗折强度为 7.2 MPa，比表面积为 $358\text{ m}^2/\text{kg}$ ，三氧化硫含量 1.8%，烧失量 2.1%，各项参数为钢渣水泥稳定混合料性能研究提供了可靠的基础数据支撑。

2.2. 实验方法

2.2.1. 混合料配合比设计

以 4%水泥含量作为固定参数，设计了钢渣掺量分别为 25%、50%、75%的三组混合料。其中，25%掺量组旨在探索钢渣低掺量下的协同作用效果，50%掺量组作为中等掺量代表，用于分析材料性能的过渡变化，75%掺量组则聚焦高掺量工况下的潜在风险与性能表现。此外，为准确对比钢渣掺入后的材料性能差异，另设纯砾石 - 4%水泥混合料作为空白对照组，通过四组配合比(表 1)的系统试验，建立不同钢渣掺量与混合料耐久性指标的对应关系。

Table 1. Experimental mix ratio design
表 1. 实验配合比设计

组别	水泥含量(%)	钢渣掺量(%)	砾石掺量(%)
A (对照)	4	0	100
B	4	25	75
C	4	50	50
D	4	75	25

2.2.2. 试件成型

采用改良普氏试验(ASTM D1557 标准方法)对钢渣水泥稳定混合料进行击实试验，通过逐级添加含水量并严格控制击实功，最终确定其最佳含水量(OMC)与最大干密度(MDD)，具体试验结果详见表 2。随后，依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51-2009)要求，使用静力压实法制备直径为 $\Phi 100\text{ mm}$ 、高度为 200 mm 的圆柱体试件。试件成型后，立即移入标准养护室进行养护，养护条件严格控制为温度($20 \pm 2^\circ\text{C}$)、相对湿度 $\geq 95\%$ 。在养护过程中，分别在 7 d、28 d、90 d 三个关键龄期取出试件，开展后续耐久性测试，以系统研究不同养护阶段下混合料的性能变化规律。

Table 2. Compaction characteristic parameters of the mixture
表 2. 混合料压实特性参数

组别	最佳含水量(%)	最大干密度(g/cm^3)
A	5.2	2.15
B	5.8	2.22
C	6.5	2.30
D	7.0	2.25

2.3. 耐久性测试方法

2.3.1. 抗冻融试验

养护至 28 d 龄期的试件,经去离子水浸泡 48 h 充分饱水后,置于全自动冻融循环试验机中,在 -20°C ~ 20°C 温度区间内进行冻融循环试验,循环次数设定为 50 次。每完成 10 次冻融循环,取出试件采用精度 0.01 g 的电子天平测定质量损失率,并依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019)采用压力试验机测定抗压强度。通过计算抗压强度损失率与质量损失率,严格参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2009)中的评定准则,对钢渣水泥稳定混合料的抗冻性能进行系统评价。

2.3.2. 抗渗性试验

1) 渗水系数测试:采用路面渗水仪对成型试件开展测试,在试件顶面施加恒定的 0.1 MPa 水压,模拟实际工程中地下水及雨水渗透压力环境。通过精确计时,记录 30 min 内试件的渗水量,根据达西定律计算渗水系数,该系数直观反映混合料的密实程度与抗渗性能,系数值越小表明材料抗渗性越优。

2) 氯离子渗透试验:按照 ASTM C1202《混凝土抗氯离子渗透性的电测法标准试验方法》,将制备好的圆柱形试件置于直流电场装置中,在 6 h 测试周期内,测定通过试件的总电荷量。依据电荷量大小将材料抗渗等级划分为五个区间(<100 C 为极高抗渗,100~1000 C 为高抗渗等),以此量化评估钢渣水泥稳定混合料在氯盐侵蚀环境下的耐久性能,电荷量越低意味着材料抵御氯离子侵入的能力越强。

2.3.3. 硫酸盐侵蚀试验

将养护至 7 d 龄期的试件完全浸泡于浓度为 5%的 Na_2SO_4 侵蚀溶液中,溶液温度控制在 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$,并采用恒温养护箱保持温度恒定。试验过程中,每间隔 3 d、7 d、14 d、28 d、60 d 和 90 d,分别取出试件进行抗压强度测试和线性膨胀率测定。抗压强度测试采用压力试验机,加载速率设定为 0.5 MPa/s;线性膨胀率测定则通过高精度千分表配合位移传感器完成,精度可达 0.001 mm。通过系统分析不同钢渣掺量(0%、10%、20%、30%、40%)下试件抗压强度变化率及线性膨胀率随时间的演变规律,揭示钢渣掺量对混合料抗硫酸盐侵蚀性能的影响机制。

3. 结果及分析

3.1. 抗冻融性能

3.1.1. 强度损失率

不同钢渣掺量混合料冻融循环后的抗压强度损失率呈现出显著的规律性变化,具体数据如图 1 所示。研究数据表明,在冻融循环次数达到 50 次后,纯砾石混合料的抗压强度损失率高达 21.5%,其内部结构因反复冻融产生的冰晶膨胀应力而遭受严重破坏。与之形成鲜明对比的是,当钢渣掺量逐步提升至 50% 时,混合料的强度损失率降至最低水平,仅为 12.3%,展现出优异的抗冻性能。

深入探究其作用机理,钢渣颗粒的物理特性对混合料抗冻性能的提升发挥了关键作用。钢渣自身具有较高的硬度,在混合料压实过程中,能够有效抵抗外部压力,减少颗粒间的相互挤压变形,从而提升整体密实度。同时,钢渣特有的棱角形貌增加了颗粒间的嵌挤咬合作用,形成更为稳固的骨架结构,这种紧密的结构显著降低了水分在混合料内部的迁移通道,有效抑制了冻融过程中因水分结冰膨胀引发的结构损伤。此外,钢渣中部分活性成分还可能与水泥水化产物发生二次水化反应,进一步填充孔隙,增强界面过渡区的强度,从而协同提升混合料的抗冻耐久性能。

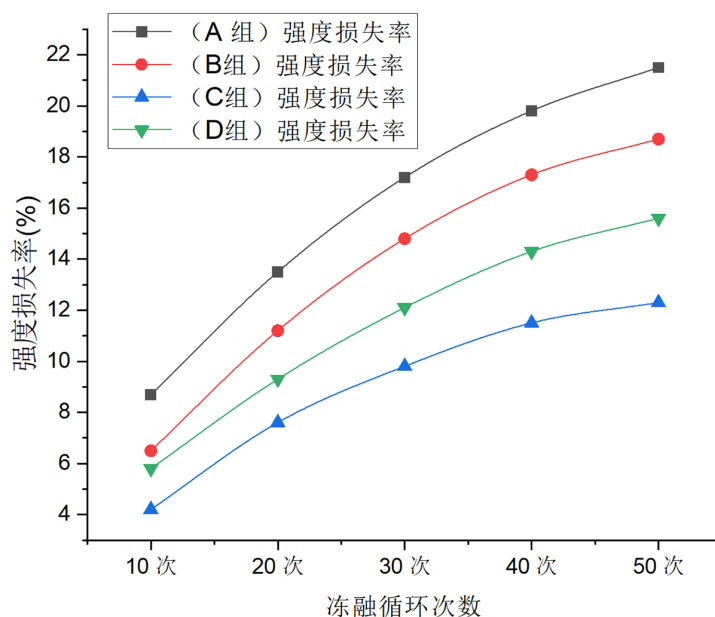


Figure 1. Data on the relationship between the number of freeze-thaw cycles and the strength loss rate

图 1. 冻融循环次数与强度损失率关系

3.1.2. 质量损失率

经过 50 次冻融循环后, 不同钢渣掺量的混合料质量损失率数据见图 2。试验结果显示, 当钢渣掺量提升至 50% 时, 混合料质量损失率降至 1.8%, 相较于纯砾石混合料 3.2% 的质量损失率, 降幅高达 43.75%。这一显著差异表明, 钢渣颗粒凭借其致密的晶体结构和优异的硬度特性, 在冻融循环过程中有效抑制了混合料表面的物理剥落与化学侵蚀, 显著提升了材料的抗磨损能力, 大幅减少了表面剥蚀现象, 为钢渣在道路基层材料中的应用提供了关键性能支撑。

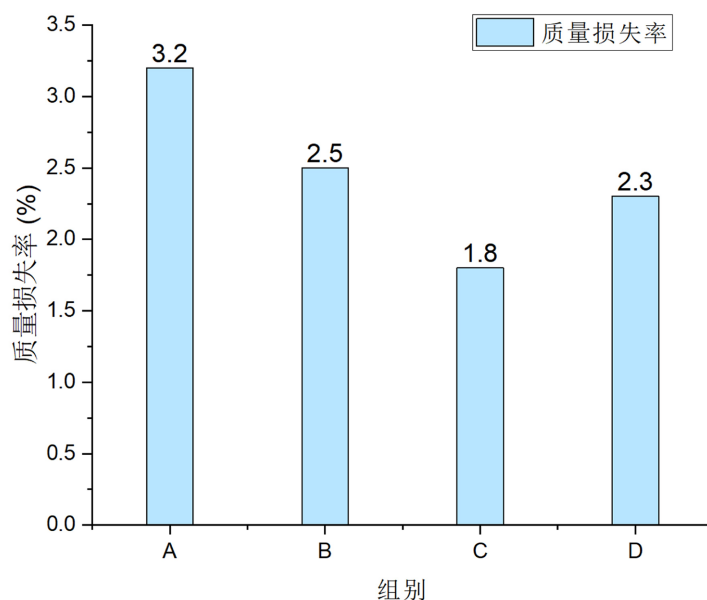


Figure 2. The mass loss rate of different groups after 50 freeze-thaw cycles

图 2. 50 次冻融循环后不同组别质量损失率

3.2. 抗渗性能

3.2.1. 渗水系数

在室内抗渗性能试验中,当钢渣掺量达到 50%时,混合料的渗水系数实测值为 89 mL/min,相较于纯砾石混合料的 125 mL/min,显著降低了 28.5%(见图 3)。进一步分析发现,钢渣颗粒独特的棱角形态在压实过程中,与周围骨料形成了互锁嵌挤的骨架结构,有效抑制了颗粒间的相对位移。同时,钢渣自身的孔隙结构在机械压力作用下,与砾石的空隙形成互补填充,使得压实后的混合料内部连通孔隙大幅减少。这种复合结构的优化不仅提升了材料的密实度,更显著增强了其抗渗性能,为工程应用中抵御水分侵入提供了可靠保障。

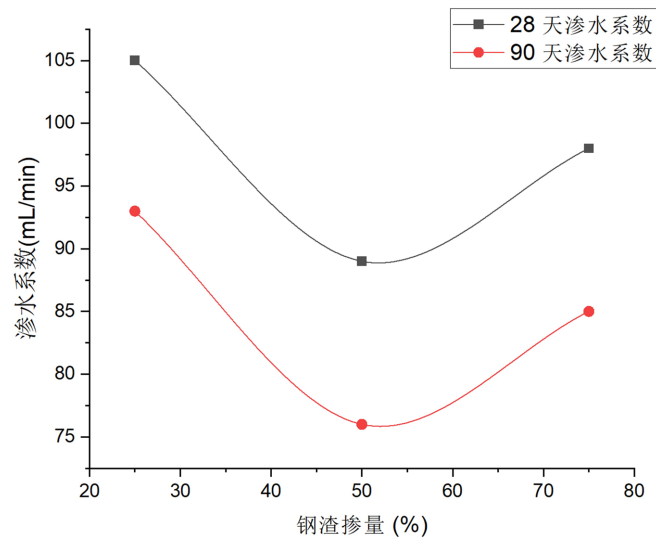


Figure 3. Diagrams of seepage coefficients with different steel slag dosages
图 3. 不同钢渣掺量的渗水系数

3.2.2. 氯离子渗透

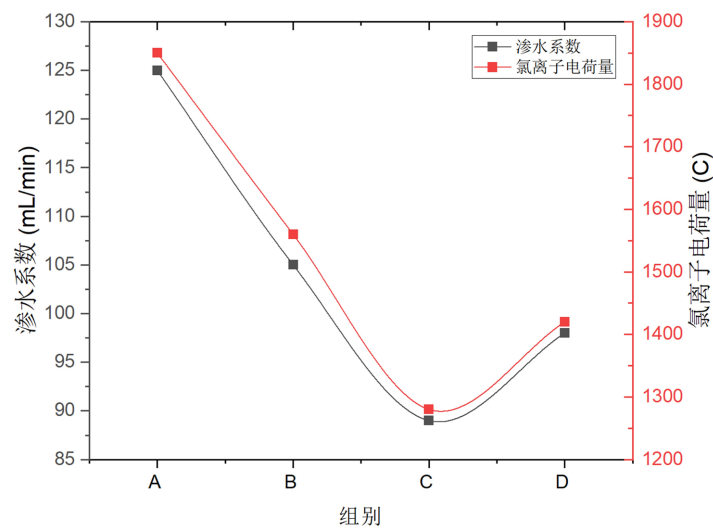


Figure 4. Test results of impermeability performance
图 4. 抗渗性能测试结果

氯离子渗透试验结果见图4。试验采用电通量法,在60 V直流恒电压作用下,持续通电6 h后,测定通过试件的电荷量以评价混合料的抗氯离子渗透性能。结果显示,随着钢渣掺量的增加,通过试件的电荷量呈现显著下降趋势。当钢渣掺量为50%时,电荷量降至1280 C,依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082),该数值已达到高抗渗等级(<1200 C)。这一结果充分证实,钢渣的加入可有效抑制氯离子迁移,其特殊的矿物组成和微观结构能够与氯离子发生物理吸附和化学结合作用,显著降低氯离子在混合料中的传输速率,从而大幅提高混合料的耐久性能,为钢渣在道路基层材料中的推广应用提供了重要的耐久性依据。

3.3. 抗硫酸盐侵蚀性能

3.3.1. 强度变化规律

在硫酸盐侵蚀环境模拟实验中,钢渣掺量为50%的钢渣水泥稳定混合料展现出独特的强度发展规律。如图5所示,试件在养护28 d时,抗压强度相较于初始强度增长至峰值,增幅达8.7%,显著高于同条件下纯砾石混合料的强度表现。随着侵蚀时间的持续延长,至90 d时,尽管强度增长趋势由快转缓,但仍维持3.2%的正向增长,说明该掺量下的混合料能够在较长周期内抵御硫酸盐的化学侵蚀与物理破坏作用。这一结果与纯砾石混合料在硫酸盐侵蚀后期出现强度衰退的现象形成鲜明对比,证实钢渣的掺入可有效改善水泥稳定混合料的抗硫酸盐侵蚀性能。

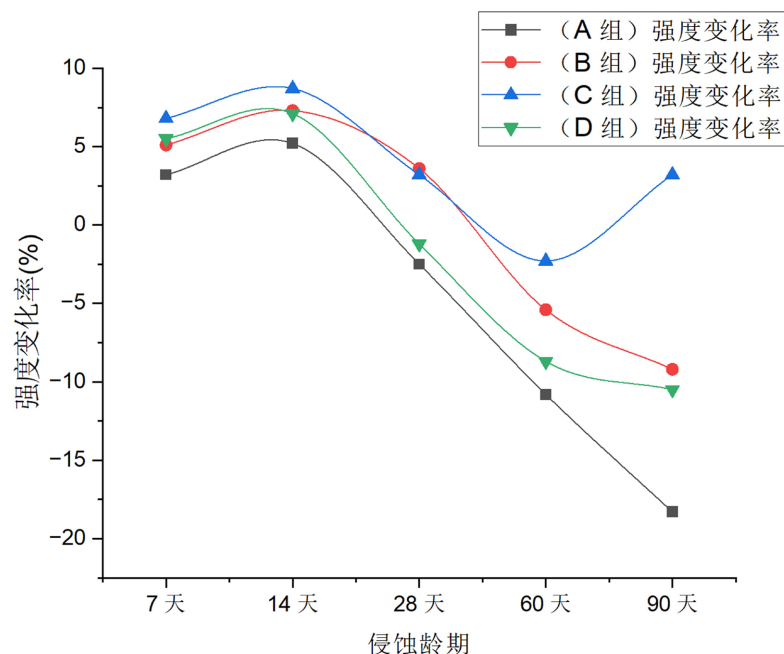


Figure 5. Graph of compressive strength change rate under sulfate erosion

图5. 硫酸盐侵蚀下抗压强度变化率图

3.3.2. 膨胀率发展

通过系统的试验监测发现,当钢渣掺量达到50%时,混合料在28 d龄期时的膨胀率达到峰值0.32% (见图6)。这一现象主要归因于体系中硫酸盐与水泥水化产物发生化学反应,生成钙矾石等具有显著膨胀特性的物质,从而导致体积增大。值得关注的是,随着养护时间的延长,由于混合料内部结构应力的重新分布与调整,膨胀率在达到峰值后出现了轻微的回落。

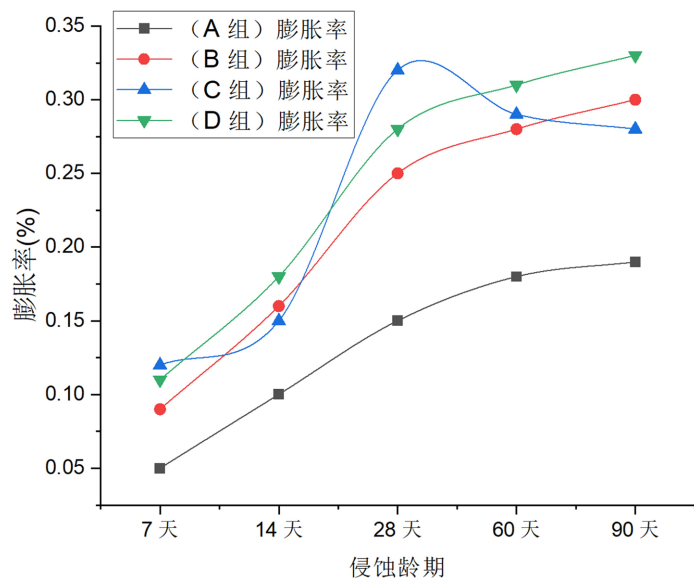


Figure 6. Linear expansion rate diagram under sulfate erosion
图 6. 硫酸盐侵蚀下线性膨胀率图

进一步分析表明，钢渣的掺入在整个反应过程中起到了关键作用。钢渣中的活性成分与水泥水化产物发生二次水化反应，不仅消耗了部分导致膨胀的有害产物，还在混合料内部形成了更加致密的网状结构。这种优化后的微观结构有效分散了膨胀应力，显著缓解了因膨胀而导致的结构破坏，从而提升了混合料的耐久性。

3.4. 钢渣掺量的优化分析

综合抗冻融、抗渗及硫酸盐侵蚀试验结果，从耐久性角度出发，对不同钢渣掺量进行综合评分(表 3)。评分标准涵盖强度损失率、渗水系数、膨胀率等关键指标，权重依据各环境因素对道路基层的危害程度设定。结果表明，50%钢渣掺量的混合料综合得分最高，其在抗冻、抗渗及抗硫酸盐侵蚀方面表现均衡，说明该掺量下混合料能有效应对寒区冻融、雨水渗透及盐渍土硫酸盐侵蚀等复杂环境。同时结合经济成本分析，考虑到钢渣的工业固废属性及替代天然骨料的经济效益，4%水泥 + 50%钢渣的配合比在保障耐久性的前提下，具备显著的性价比优势。

Table 3. Comprehensive durability score of steel slag dosage
表 3. 钢渣掺量耐久性综合评分

组别	抗冻融	抗渗性	硫酸盐侵蚀	综合评分
A	70	65	70	68.3
B	75	75	75	75.0
C	90	85	80	85.0
D	80	78	72	76.7

4. 结语

本研究通过系统的实验与分析，深入探究了不同钢渣掺量对水泥稳定混合料耐久性的影响，明确了钢渣在道路基层材料应用中的关键性能表现与最佳配比方案，为解决工业固废资源化利用与道路工程耐

久性需求之间的矛盾提供了科学依据。

1) 抗冻融性能: 50%钢渣掺量的混合料经 50 次冻融循环后, 抗压强度损失率 12.3%, 质量损失率 1.8%, 较纯砾石混合料分别降低 42.8%、43.75%, 适用于寒冷地区。

2) 抗渗性能: 该掺量下混合料渗水系数降低 28.5%, 氯离子渗透电荷量减少 30.8%, 达到高抗渗等级, 可在多雨及氯盐环境中保持结构稳定。

3) 硫酸盐侵蚀: 50%钢渣掺量时, 混合料膨胀率峰值 0.32%, 90 天强度保持率 96.8%, 有效抵御硫酸盐侵蚀, 为盐渍土地区选材提供参考。

4) 配比优化: 4%水泥 + 50%钢渣为最优配比, 兼具优异耐久性与经济环保效益, 适用于多种复杂环境道路基层。

参考文献

- [1] 孙俊鹏. 利用再生砖废料和钢渣作为混凝土生产替代骨料的剪切行为[J]. 房地产世界, 2021(7): 33-37.
- [2] 曾辉, 沈泽涵, 郅晓, 等. 钢渣骨料多孔结构对沥青混合料低温抗裂性能的影响机制[J]. 北京工业大学学报, 2024(1): 82-93.
- [3] 王辉, 张伟, 张玉柱, 等. 钢渣微珠替代细骨料对不同等级混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土, 2021(3): 83-85+89.
- [4] 黄东海, 杨一琛, 夏超群, 等. 宝钢滚筒渣替代近海水工混凝土骨料的试验研究[J]. 水运工程, 2021(7): 27-31.
- [5] 杨泓全, 王龙林, 王祺顺, 等. 季冻区钢渣沥青混合料路用性能和冻融耐久性[J]. 公路工程, 2022, 47(1): 123-129.
- [6] 岳企哲. 沥青路面超薄磨耗层中钢渣集料的应用[J]. 交通世界, 2025(10): 120-122.
- [7] 董儒柱, 颜峰, 邓霆锋, 等. 基于分形理论的钢渣细集料在沥青混合料中的应用[J]. 公路工程, 2023, 48(2): 111-115+170.
- [8] 牛敏, 申铁军. 路面工程钢渣沥青混凝土的试验检测与工程应用[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(3): 81-83.
- [9] 陈宗武, 冷真, 肖月, 等. 面向沥青混凝土矿料全替代的钢-铁渣梯级利用[J]. 中国公路学报, 2021(34): 190-203.
- [10] 屈莲花. 掺钢渣胶粉改性沥青混合料制备及性能研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2021(2): 12-14+18.
- [11] 常春清, 郭佳, 王岚. 钢渣替代集料的胶粉改性沥青混合料低温性能[J]. 公路, 2023, 68(10): 82-90.