

基于多尺度特性的玄武岩集料沥青路面抗滑表层研究进展

毛诗伟¹, 罗新华¹, 谢 斌¹, 夏雨欣²

¹赣州康大高速公路有限责任公司, 江西 赣州

²湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年7月22日; 录用日期: 2026年9月7日; 发布日期: 2026年9月16日

摘 要

路面抗滑性能是道路交通安全的核心保障。玄武岩集料因其高硬度、高耐磨性及稳定的微观结构, 被全球道路工程界视为构筑高耐久性抗滑表层的首选骨料。本文从材料基因、细观形貌、宏观性能及界面行为等多尺度视角, 系统综述了玄武岩集料的应用研究进展。通过对比玄武岩、花岗岩及石灰岩的关键路用性能, 量化了玄武岩在磨光值等核心指标上的显著优势; 阐述了基于“差异磨光”原理的玄武岩-石灰岩复合设计方法及其提升抗滑耐久性的细观机理; 梳理了抗滑性能的多阶段衰变规律与现有预测模型的局限性; 评述了分子动力学模拟、数字图像处理及数字孪生等前沿评价方法在揭示机理与优化设计中的应用; 总结了工程实践现状, 并展望了面向绿色低碳与智能运维的未来研究方向, 以期高安全、长寿命沥青路面抗滑表层的设计与养护提供系统的理论参考。

关键词

道路工程, 玄武岩集料, 沥青路面, 抗滑性能, 衰减规律, 多尺度研究

Research Progress on Anti-Skid Surface Course of Asphalt Pavement with Basalt Aggregates Based on Multi-Scale Characteristics

Shiwei Mao¹, Xinhua Luo¹, Bin Xie¹, Yuxin Xia²

¹Ganzhou Kangda Expressway Co., Ltd., Ganzhou Jiangxi

²School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: July 22, 2026; accepted: September 7, 2026; published: September 16, 2026

文章引用: 毛诗伟, 罗新华, 谢斌, 夏雨欣. 基于多尺度特性的玄武岩集料沥青路面抗滑表层研究进展[J]. 交通技术, 2026, 15(5): 628-638. DOI: 10.12677/ojtt.2026.155054

Abstract

Pavement anti-skid performance serves as a core guarantee for road traffic safety. Owing to its high hardness, excellent wear resistance and stable microstructures, basalt aggregate is recognized by the global road engineering community as the preferred aggregate for constructing highly durable anti-skid surface courses. From multi-scale perspectives, including material properties, mesoscopic morphology, macroscopic performance and interfacial behavior, this paper systematically reviews the research progress on the application of basalt aggregates. By comparing the key pavement performances of basalt, granite and limestone, the prominent advantages of basalt in core indicators such as polished stone value are quantified. The compound design method of basalt-limestone based on the “differential polishing” principle and its mesoscopic mechanism for improving anti-skid durability are elaborated. The multi-stage deterioration law of anti-skid performance and limitations of existing prediction models are summarized. The applications of advanced evaluation methods, including molecular dynamics simulation, digital image processing and digital twin in mechanism revelation and design optimization are discussed. Current engineering practices are summed up, and future research directions oriented toward low-carbon development and intelligent operation and maintenance are prospected. This work is expected to provide systematic theoretical references for the design and maintenance of anti-skid surface courses of high-safety and long-life asphalt pavements.

Keywords

Road Engineering, Basalt Aggregates, Asphalt Pavement, Anti-Skid Performance, Deterioration Law, Multi-Scale Research

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

作为道路结构的表层功能层，沥青路面抗滑表层长期经受车辆轮胎的往复磨蚀，同时持续承受温湿度变化、雨水侵蚀等外界环境的耦合作用，其抗滑性能与耐久稳定性直接决定道路行车安全水平[1]。当前道路交通流量逐年攀升，重载、超载车辆通行占比不断提高，工程中常用石灰岩等碳酸盐岩集料铺筑的抗滑表层，普遍存在抗滑性能衰减速率快、服役稳定性差的问题。山区长大纵坡、急弯路段以及多雨潮湿区域的行车工况更为复杂，这类特殊路段对路面抗滑耐久性能要求更高，路面摩擦力衰减过快极易诱发各类行车安全隐患[2]。对此，通过优选高耐磨、性能稳定性佳的优质集料，优化沥青抗滑表层的长期服役状态，有效减缓路面抗滑性能的劣化速度，是现阶段道路工程领域极具研究价值与现实意义的重点研究方向。

玄武岩属于储量丰富的基性岩浆岩，整体力学性能优异，不仅结构强度高、抗磨抗压能力强、压碎指标优良，同时与沥青材料的粘结适配性更佳，因此非常适用于修筑高等级沥青路面抗滑功能层[3]。但纯玄武岩集料造价偏高，且部分区域储量有限，难以大规模推广应用。为此，工程中常将玄武岩与石灰岩集料进行合理复配利用，在充分发挥玄武岩优异耐磨抗磨光优势、保障路面长期抗滑稳定性的同时，借助石灰岩粘附效果好、取材经济的特点，有效控制工程造价。该复合集料配比方式兼顾了路用服役性能与工程经济效益，是现阶段提升沥青抗滑表层综合品质的实用技术手段[4] [5]。

当下业内针对玄武岩集料以及掺配该集料的复合沥青混合料开展了大量试验研究,其中针对路面抗滑性能衰减特征与内在作用机制的相关探索,已经跳出单一宏观性能测试的局限,逐步朝着多尺度分析的方向拓展[6][7]。将集料微观矿物成分、细观表面纹理形态,和混合料宏观骨架结构、集料-沥青界面相互作用结合起来开展联动分析,能够打通微观材料特性与路面宏观服役表现之间的关联,也是深挖材料性能演化本质的重要手段[8]。本文立足于多尺度分析思路,整合现有各类相关研究文献,分别围绕玄武岩集料自身基础性能、抗滑作用机制、改良沥青混合料的实际效果、长期荷载下抗滑指标衰减特征以及现场工程优化手段展开全面综述。文中归纳现有研究得出的演变规律、拆解性能劣化内在机理,梳理当前研究尚存的难点,同时预判该领域后续发展方向,以此促进玄武岩集料在沥青路面抗滑表层工程中实现更合理的应用,带动配套工艺与材料技术迭代创新。

2. 玄武岩集料的抗滑机理与多尺度基因特性

集料的抗滑性能根植于其材料基因,即矿物组成与微观结构,这些基因特性决定了其在宏观尺度上的耐磨与抗滑行为[8]。

2.1. 矿物组成与微观构造

从矿物组分角度分析,玄武岩的主要构成矿物包括辉石、长石与橄榄石。其中辉石、橄榄石具备 5.5~7.0 的莫氏硬度,同时拥有优良韧性;集料长期经受车辆磨损作用时,这类矿物不会大面积脆裂脱落,表面会持续留存大量尖锐微细凸起结构[9][10]。反观石灰岩,其主体矿物方解石莫氏硬度仅为 3,耐磨耗能力偏弱;花岗岩内含莫氏硬度 7 的高硬度石英,但石英晶体脆性突出,长期磨耗后晶体极易剥离,集料表面最终趋于平整光滑[11]。综合对比三类岩石矿物特性能够看出,玄武岩的矿物搭配兼顾了硬度与韧性两项关键指标,这也是该集料磨光值 PSV 表现突出、抗磨光能力优越的根本原因。再从微观表面结构展开对比,依托 SEM 扫描电镜、AFM 原子力显微镜等微观观测设备观测可见:无论原生断面还是经过短期荷载磨耗后的玄武岩集料,表面都布满凹凸纹理,棱角分明锐利[11][12]。这类微米、纳米级细微凸起可快速破除轮胎与路面接触区域的积水薄膜,大幅提升路表摩擦系数。石灰岩集料本身表面微观起伏较少,持续磨蚀后表面凸起结构会快速被打磨平整。两类集料微观形貌的固有差异,最终直观反映在路面整体抗滑水平与长期抗滑耐久性能上。

2.2. 细观形貌特征与量化表征

集料颗粒形貌是连接微观矿物与宏观性能的桥梁。宏观上,玄武岩破碎后颗粒多呈立方体状,棱角鲜明,针片状含量低,有利于构建强力的骨架嵌挤结构,提供优异的初始宏观构造深度(MTD)[13]。

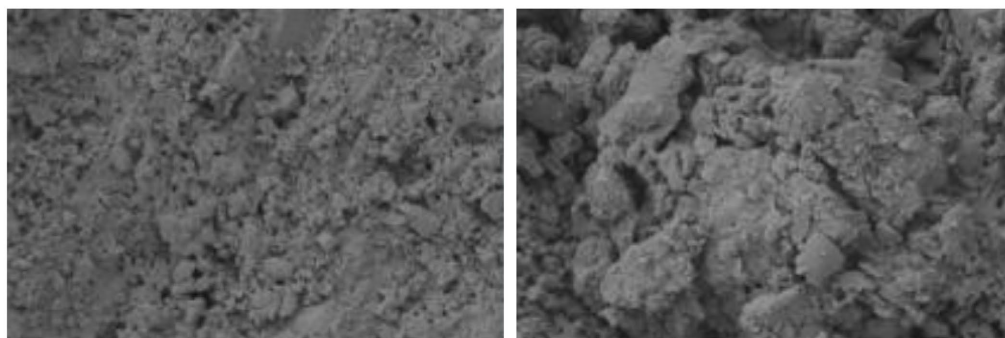


Figure 1. Microstructure of basalt aggregate observed via SEM [16]

图 1. 玄武岩 SEM 微观构造[16]

集料表面微观纹理的定量表征一直是相关研究的核心重点，同时也是一大技术难题。仅依靠轮廓算术平均偏差 Ra 这类二维表征参数，很难完整还原集料表面复杂的三维凹凸形态，分形理论的出现很好弥补了这一短板，为纹理分析提供了可靠的研究手段[14]。玄武岩集料的微观表面形态见图 1。现有试验结果显示，玄武岩集料表面纹理对应的分形维数 D 明显高于石灰岩，同时多重分形谱的结构也更为复杂，代表该集料在不同尺寸层级下都保有充足粗糙构造，该特性和路面摩擦系数、尤其是潮湿工况下的抗滑能力存在显著正相关关系[14]。三维激光扫描技术可以完整采集集料整体表面形貌数据，不过现阶段仍缺少通用性较强的数学模型，能够建立各类纹理特征参数和路面抗滑性能之间的稳定对应关系，相关理论还有待进一步完善[15]。

3. 宏观路用性能对比：数据驱动的优越性分析

3.1. 不同岩性集料路用指标对比

为系统比较不同岩性集料的路用特性及其对沥青混合料性能的潜在影响，根据文献研究，汇总对比如表 1 所示。

Table 1. Comparison of basic characteristics of aggregates with different lithologies and their influences on properties of asphalt mixtures

表 1. 不同岩性集料基本特性及其对沥青混合料性能的影响对比

性能指标	玄武岩集料	花岗岩集料	石灰岩集料	对混合料性能的主要影响
压碎值(%)	低(通常<16)	低(通常<20)	较高(通常 20~26)	玄武岩与花岗岩有助于提升混合料整体抗压碎能力与结构耐久性[17]。
磨耗值(%)	低(通常<20)	低(通常<25)	较高(通常 25~35)	低磨耗值直接对应高耐磨性，是保障长期抗滑性能的关键[17]。
磨光值(PSV)	高(通常>48)	高(通常>45)	较低(通常 40~45)	核心抗滑耐久性指标。高 PSV 意味着集料微观纹理抗磨光能力强，玄武岩因其硬矿物含量高，耐磨光能力最强 [5] [18]。
与沥青粘附性	良好(通常≥4 级)	一般(通常 3~4 级)	优良(通常 5 级)	石灰岩碱性最强，黏附性优。玄武岩次之但可满足规范要求，花岗岩常需抗剥落剂处理[4] [13]。
主要矿物成分	辉石、长石、橄榄石	石英、长石、云母	方解石、白云石	矿物硬度与韧性决定综合耐磨性：玄武岩矿物组合(辉石、橄榄石)在硬度与韧性上平衡较好[9] [10]。
微观纹理特征	丰富、尖锐	丰富，但石英晶面可能光滑	相对平滑	尖锐的微凸体(玄武岩)更利于刺破水膜，提供更高且持久的摩擦[11]。
典型应用	高等级公路抗滑表层，机场道面	广泛用于各结构层	广泛用于各结构层	玄武岩是磨耗层的首选材料，尤其用于高安全路段。

由表 1 可知，玄武岩在决定长期抗滑性能的磨光值(PSV)上具有压倒性优势，玄武岩集料在压碎值、磨耗值等力学与耐磨指标上均表现优异，虽其与沥青的粘附性略逊于石灰岩，但仍能达到路用要求，通过改性沥青或抗剥落剂极易弥补提升。而花岗岩在 PSV 和黏附性上均存在不确定性。因此，从提升抗滑表层长期耐久性的核心需求出发，玄武岩集料展现出显著的优势。

3.2. 玄武岩 - 石灰岩复配与“差异磨光”机理

表 2 将同批实测数据与跨文献定性结论分开列示。这样既保留玄武岩的力学优势，又避免把不同矿源、粒级和标准下的区间值拼接成虚假的精确比较。对工程设计而言，矿物学、磨耗、磨光、黏附和形貌应联合筛选；任何一个指标均不能独立保证长期抗滑。

Table 2. Evidence-based comparison of basalt, granite and limestone aggregates
表 2. 玄武岩、花岗岩和石灰岩集料的证据化比较

指标	玄武岩	花岗岩	石灰岩	证据与限制
矿物/硬度	辉石、长石、 橄榄石；约 5.5~7	石英、长石、云母； 硬度差异大且石英脆	方解石为主；约 3	矿物组成随矿源变化[19] [20]
洛杉矶磨耗损失	6.8%	未在同批试验中报告	14.5%*	同一研究批次实测[16]
单轴抗压强度	217.4 MPa*	未在同批试验中报告	97.7 MPa*	同一研究批次实测[16]
吸水率	0.75%*	未在同批试验中报告	1.36%*	同一研究批次实测[16]
沥青黏附等级	4 级*	受酸性矿物影响， 常需改善	5 级*	同一研究采用沸煮法[16]
磨后纹理保持	总体较高，但受 风化/孔隙控制	可能保持粗糙， 也可能晶粒剥落	通常衰减较快	跨研究定性综合[6] [21]
工程角色	耐磨骨架与 高摩擦相	区域性替代或复配相	经济、黏附性较好的 软相	需结合级配、运输距离和 寿命成本

注：带“*”数据均来自 Meng 等[16]同一批贵州安顺集料，可作材料机制示例，但不可直接外推为所有玄武岩或石灰岩的典型值。其余条目为多文献定性综合，不是原始试验数据，也不是数值估算。项目应用前应按现行试验标准对实际矿源复验。

差异磨光不是两种集料磨光值的简单线性平均，而是“材料去除 - 应力重分配 - 纹理再生 - 颗粒损伤”循环。初始阶段，轮胎首先剪切并迁移集料顶面的沥青膜，暴露粗集料；随后软相(如石灰岩)更快磨耗并下凹，硬相(如玄武岩)保留凸起。路表承载逐渐向硬相转移，使硬相峰顶承受更高接触应力，同时软硬相边界形成新的高度梯度和排水通道。这种不断更新的几何不均匀性可同时提高微观黏着与宏观滞后贡献，从而减缓摩擦衰减[22]。

但该机制存在两个失效边界。其一，硬相不足或被沥青膜/细料遮蔽时，软相连续磨平，无法形成有效承载网络；其二，硬相突出过大且周边软相支撑不足时，边缘应力集中会诱发松动、拔出和松散，宏纹理虽短期增大，却以材料损失和耐久性下降为代价。因此，评价指标应同时包含摩擦、纹理、质量损失和颗粒脱落，而不能只比较某一磨耗时刻的 BPN 或 MTD。

3.3. 关键控制因素、适用范围与优化方向

(1) 硬度与磨耗反差：AHV/COH、PSV 和洛杉矶磨耗值分别描述矿物学、抗磨光和抗破碎的不同侧面。反差过小，次生纹理不足；反差过大而界面/骨架约束不足，则可能拔出。后续优化应以“目标高差形成速度 + 允许质量损失”为双目标，而非追求最大硬度比[23]。

(2) 粒径与暴露位置：大粒径硬质集料更容易进入轮胎有效接触区并形成承载骨架；过小硬颗粒可能被胶浆包裹，过大的孤立硬颗粒又会放大边缘应力。因此应采用分粒级复配，分别报告各档玄武岩体积分数、表面暴露率和硬相空间连通性。现有文献尚不足以给出跨级配通用的“最佳粒径比”，这是后续试验设计的关键空白[9]。

(3) 掺量与分布：掺量过低不能形成连续耐磨支撑，过高则逐渐退化为单一玄武岩体系，差异磨光增

益和经济优势同时减弱。SMA-5 超薄磨耗层中 40%~60%煅烧铝矾土、HFST 中 25%~50%石灰岩以及某 AC-16 工程中约 40%玄武岩均显示了成本与摩擦的局部折中；这些比例对应不同材料、密度、粒级、黏结体系和磨光设备，不能互相替代，也不构成普遍推荐值。

(4) 界面与环境：水分既降低轮胎-路面真实接触，又可竞争吸附并削弱沥青-集料界面；温度改变橡胶黏弹性和沥青膜强度。玄武岩的耐磨优势若伴随黏附不足，可能被水损伤和颗粒脱落抵消。应将湿态磨光、冻融/老化和界面黏附功能纳入配比筛选。

(5) 研究挑战：当前试验常把掺量、粒级和矿源同时改变，使“硬度反差效应”与“级配/暴露效应”混杂。建议采用正交或响应面试验，将 AHV/COH、硬相粒级、体积分数和界面处理作为独立因素；利用三维扫描跟踪同一颗粒，并以拔出率、质量损失、 Δh 分布和摩擦共同验证机理。

4. 抗滑性能衰减规律与预测模型

4.1. 衰减过程与阶段特征

沥青路面抗滑性能在行车荷载与环境因素的耦合作用下并非线性衰减。基于加速加载试验的观测，其衰变普遍呈现两阶段特征[19] [24]：

第一阶段(快速衰减期)：发生在服役初期。集料表面尖锐的微凸体(沥青膜及部分集料棱角)被迅速磨平，宏观构造深度(MPD)与微观纹理均发生显著变化，导致抗滑指标(如摆值 BPN、国际摩阻指数 IFI)下降较快。

第二阶段(稳定衰减期)：路面抗滑劣化进入平稳衰减阶段后，车辆长期碾压打磨会让集料表层微细凹凸构造逐步定型，摩擦系数下降速度明显放缓并稳定在固定区间。该阶段对应的稳态摩擦水平，是判定石料长效防滑能力的关键依据。玄武岩骨料表层以高硬度耐磨矿物为骨架，进入稳定磨耗阶段后性能损耗幅度极小，能够长期维持较高的残余摩擦水平。借助分形方法对磨耗全过程开展量化分析可以发现，随着路面纹理不断被打磨，表面分形维数持续下降，多重分形谱的复杂程度同步降低，能够直观量化表征集料表面粗糙构造不断损耗的全过程[14]。

4.2. 衰减模型

为预测性能随轴载次数的变化，发展了多种模型[24] [25]。经典指数模型、Asymptotic 模型等参数物理意义不明确。更具实用性的是基于集料特性的模型，例如将衰变速率与集料 PSV 关联。其中，能较好拟合上述两阶段特征的模型形式可表达为：

$$S(N) = S_0 - \alpha(1 - e^{-\beta N}) \quad (1)$$

式中： $S(N)$ 为磨耗 N 次后的抗滑指标值(如 IFI 的 F60)； S_0 为初始抗滑值； α 为总衰减潜力(S_0 与理论无穷次磨耗后稳定值 S_∞ 之差)； β 为衰减速率参数。通过拟合获取模型参数 α 和 β ，可以定量对比不同混合料的衰减幅度与速率。

但目前已有的性能衰减预测模型大多只考虑单一交通荷载条件，无法精准模拟雨水、温度变化、沥青材料老化等多种外界条件共同作用下，路面抗滑指标的变化规律[26]。潮湿环境中轮胎与路表之间的摩擦行为，同时包含吸附黏结、滞后损耗、界面排水等多重作用机制，现有数学模型难以完整刻画这类复合作用效果[26]。后续研究应当构建能够耦合多物理场条件的全新抗滑衰变预测模型。

4.3. 不同岩性集料衰变性能对比

基于加速磨耗试验数据，可以对比不同集料类型沥青混合料的抗滑性能衰变过程。综合文献研究，以国际摩阻指数 IFI 的 F60 值分量为例，纯集料沥青混合料的衰变特征对比如表 3 所示。

Table 3. Comparison of anti-slip performance (IFI-F60) decay characteristics of asphalt mixtures with different lithological aggregates

表 3. 不同岩性集料沥青混合料抗滑性能(IFI-F60)衰变特征对比

集料类型	初始 F60 值 (约)	平均衰减速率 ($\Delta F60/h$)	7 小时磨耗后 F60 稳定值(约)	性能排序与核心依据
玄武岩混合料	0.39	最慢, 约 0.015	0.285	最优。衰变后期优势明显, 衰减模型参数 β 值小, 表明衰减缓慢, 长期性能稳定[10]。
花岗岩混合料	0.385	中等, 约 0.020	0.245	次之。综合性能介于玄武岩与石灰岩之间, 衰减速率中等[8]。
石灰岩混合料	0.38	最快, 约 0.026	0.20	最差。衰减最快, 稳定值最低, 难以满足重交通路段长期抗滑需求[4] [11]。

注: 表中“平均衰减速率”根据文献衰变曲线示意图数据估算, 计算公式为: $(F_{60\text{初始}} - F_{60,7h})/7$, 该值反映了整个磨耗周期内抗滑性能的平均下降速度。

4.4. 关键影响因素分析

工程上常搭配玄武岩与石灰岩制备复合集料, 这类混合料的抗滑耐久衰减过程会受到多重条件共同制约。通过参数敏感性分析结果能够看出, 各项影响因子的作用强度由高到低依次为玄武岩掺配比例、车辆荷载大小、路表水流冲刷强度[5] [27]。

材料因素: 玄武岩掺量是控制衰减速率与最终稳定值的最主要因素。掺量越高, 混合料整体硬度和耐磨性越强, 衰变曲线越平缓, 长期稳定值越高[5]。沥青化学组分(SARA)影响沥青膜强度与耐磨性[28]。级配类型(如 SMA)通过影响骨架稳定性间接作用于抗滑耐久性。

环境与荷载因素: 水的润滑、冲刷及诱发黏附失效是关键, 会加剧衰减[26]; 荷载增大直接加剧了集料表面的接触应力与疲劳磨损[19]。

界面因素: 沥青 - 集料黏附性的水损害是内在原因。需采用表面能理论、分子动力学(MD)模拟深入研究水分子在界面的竞争吸附[29] [30]。

4.5. 不同预测模型的优缺点及适用范围

表 4 对常见模型作集中比较。

Table 4. Strengths, limitations and application scope of anti-slip performance prediction models

表 4. 抗滑性能预测模型的优缺点与适用范围

模型类别	核心输入/假设	优点与适用范围	局限与使用条件
指数/渐近经验模型	磨耗次数或时间; 单调趋于 S_0	参数少、易拟合; 适合单一设备、单一环境下材料横向比较	不能描述初期上升与突变; β 和 S_0 跨设备/矿源可迁移性低[16] [24]
分段、对数或双时间常数模型	预设阶段或两个衰减时间尺度	可表达快速期与稳定期; 便于识别维护拐点	分段点主观; 参数相关性强; 外推易失真[31]
机理磨损/轮胎 - 路面模型	3D 纹理、接触压力、橡胶、水膜、材料去除律	解释纹理尺度和应力贡献; 适合方案分析与边界条件外推	参数标定与计算成本高; 颗粒拔出、沥青老化等仍常被简化[32]
统计回归/概率模型	交通、气候、年龄、材料与现场摩擦	实现简便, 可给出显著性和置信区间; 适合区域养护数据库	线性/固定分布假设难处理 强非线性; 共线性和缺失数据影响大[33]
树模型、Boosting 与 NGBBoost	多维纹理、材料和环境特征	处理非线性和交互; NGBBoost 可输出概率分布与不确定性	依赖样本覆盖; 小样本过拟合、域外外推和黑箱问题突出[33]

续表

LSTM/Transformer 时序模型	连续摩擦/纹理序列及外生变量	保留时序依赖; 适合滚动预测和预防性养护	需要足够长、同频、无漂移的序列; 物理一致性需额外约束[34]
数字孪生/物理-数据混合模型	机理模型 + 传感监测 + 在线参数更新	可把室内、现场和运营数据闭环; 适合寿命期动态决策	数据标准、传感可靠性、同化算法和跨项目迁移尚不成熟[35]

模型选择应由决策任务驱动。材料筛选阶段可用指数/分段模型比较 β 、 S_0 和转折点; 结构设计阶段宜采用 3D 纹理-接触-磨损机理模型检验速度、水膜和轮胎参数; 路网养护阶段可用概率 Boosting 或时序模型处理多源现场数据; 需要在线更新时再构建数字孪生。同一研究最好同时提供一个透明基线模型与一个高性能模型, 以量化复杂算法带来的真实增益[35]。

可迁移性验证至少包括三层: 不同试件批次的内部验证、不同矿源/级配的外部验证、室内到现场的时间尺度校准。若仅以单一试验曲线随机拆分训练集和测试集, 模型可能记住同一试件的时间轨迹而高估泛化能力。近期 LTPP、领域知识约束 CNN 和 Transformer 研究说明, 多源数据与物理先验能提高预测能力, 但缺失矿物组成、微纹理或水膜信息仍会造成结构性偏差。

5. 性能评价与设计方法的前沿进展

5.1. 多尺度仿真与智能方法

分子动力学(MD)模拟: 传统研究主要通过煮沸法、表面能测试评价沥青-集料黏附性能, 仅能获得宏观等级与能量参数, 既无法解释玄武岩与石灰岩黏附性差异的矿物学根源, 也难以动态观测水分子侵蚀界面的失效过程。分子动力学(MD)模拟可从原子分子层面突破这一瓶颈: 其一, 可精准还原沥青中各组分(沥青质、胶质、芳香分、饱和分)在玄武岩典型矿物(辉石、橄榄石、拉长石)表面的吸附构型, 定量计算不同矿物与沥青的界面吸附能, 从材料基因层面解释玄武岩兼具良好耐磨性与合格黏附性的内在机制, 弥补了传统试验无法拆分单矿物贡献的不足[29][36]; 其二, 可模拟水分子在集料-沥青界面的竞争吸附、扩散与置换全过程, 量化水作用下界面黏附能的衰减幅度, 还原“水分子侵入界面→沥青膜逐步脱附→界面黏结失效”的完整动态路径, 从本质上揭示潮湿环境加速抗滑性能衰减的界面机理, 同时可模拟抗剥落剂、改性沥青对界面的补强效果, 为界面改性方案提供分子层面的设计依据。

离散元法(DEM)与数字图像处理: 传统加速磨耗试验仅能测试不同磨耗阶段的宏观抗滑指标(BPN、MTD), 无法追踪集料颗粒位移、内部力链转移与纹理演化的细观过程; 同时集料表面纹理多依赖二维参数表征, 难以完整反映三维形貌特征与抗滑性能的定量关联, 导致“差异磨光”机制长期停留在定性推断层面。数字图像处理与三维激光扫描技术结合, 可重构集料真实三维形貌, 提取三维分形维数、棱角指数、纹理深度谱等多维度特征参数, 突破传统二维表征的信息局限性, 为细观纹理与宏观抗滑性能的关联建模提供精准量化输入[37]。在此基础上, 离散元法(DEM)可构建基于真实集料形貌的数值模型, 复现车辆磨耗荷载下复合集料体系的颗粒位移、接触力链重分布、颗粒磨损与拔出全过程, 定量刻画不同玄武岩掺量下软硬集料的相对高差演化规律, 从力学层面解释“硬相掺量过高易引发颗粒松散脱落”的失效边界, 完整还原“材料去除-应力重分配-纹理再生”的差异磨光循环机制, 弥补了传统试验无法观测内部细观力学演化的技术短板。

数字孪生: 传统抗滑性能预测多基于室内试验建立静态模型, 与现场实际服役环境存在明显尺度差异, 无法结合路面实时服役状态动态更新预测结果, 难以支撑全生命周期的预防性养护决策。数字孪生技术为实现“室内-现场”的衔接提供了核心路径: 依托 CT 扫描采集路面真实细观构造, 构建高精度数字化孪生体, 同步对接实体道路的实时监测数据(抗滑系数、交通流量、环境温湿度), 可持续动态修正衰

减模型参数,实现服役过程中抗滑性能的实时推演与长期预判,突破传统静态预测与现场工况脱节的瓶颈[38]。同时,数字孪生模型可模拟不同养护方案的性能恢复效果与寿命增益,为预防性养护时机选择、方案比选提供定量决策依据,推动抗滑表层管控从“事后检测评价”向“事前预测管控”转型。

材料信息学与机器学习:传统配比优化多依赖正交试验与单因素分析,试验周期长、成本高,且难以精准解耦集料掺量、级配、沥青性能、环境条件等多因素的非线性交互效应;传统抗滑衰减经验模型参数物理意义模糊,仅能适配单一工况,多场耦合下的预测精度不足。材料信息学与机器学习技术可有效破解这一难题:一方面,可整合集料岩性、矿物组成、级配特征、沥青性能、环境条件等多维度数据,挖掘各因素间的非线性交互作用,量化不同因素对抗滑耐久性的贡献权重,替代传统“逐一试错”的研发模式,快速锁定关键控制因子,显著提升复合集料配比优化的效率[39];另一方面,以梯度提升树、LSTM 为代表的机器学习模型可精准拟合抗滑性能的非线性衰减规律,同时耦合交通荷载、温湿度、水侵蚀等多源影响因素,解决传统经验模型难以处理多场耦合的局限,还可输出预测结果的置信区间,量化预测不确定性,提升模型的工程适用性。

5.2. 基于性能的优化设计方法

上述多尺度评价方法的发展,推动玄武岩抗滑表层设计从经验匹配向“性能目标导向-多尺度验证-全流程管控”的精细化设计模式升级,核心设计原则如下:

掺量精准优化:以目标抗滑耐久性与工程造价为双控指标,依托机器学习模型快速开展多参数寻优,替代传统试配试验。对于高安全要求的长大纵坡、急弯路段,优先采用纯玄武岩集料保障长期抗滑性能;对于常规路段,推荐采用 40%~50%玄武岩与石灰岩复配的方案,通过差异磨光效应兼顾长期抗滑性与工程经济性[5]。

级配与骨架强化设计:采用 SMA、断级配等骨架密实型结构,通过离散元数值模拟验证粗集料的嵌挤稳定性与力链传递特征,确保玄武岩粗集料形成连续稳定的承载骨架,提升宏观构造深度与长期抗磨光能力;结合数字图像处理技术监控集料针片状含量与棱角性,从原材料端保障骨架结构质量[37]。

全过程质量控制:严格管控集料洁净度与沥青黏附等级,针对玄武岩黏附性略逊于石灰岩的特点,配套采用改性沥青或抗剥落剂进行界面补强,通过分子动力学模拟提前验证改性方案的界面增强效果;优化拌和、摊铺与压实工艺,减少集料离析与破碎,依托数字孪生技术开展施工质量动态管控,保障设计性能的现场落地。

6. 结论与展望

本文从多尺度角度梳理了玄武岩集料沥青抗滑表层现有研究成果,结合材料特性、复合集料设计、性能衰变规律与数字化研究手段形成完整分析,得到主要结论如下。

玄武岩矿物组分硬度、韧性表现优异,表面天然形成复杂微细纹理,磨光、抗磨光等关键路用指标优于其他石料,是修建长寿命抗滑表层的优质原料。利用差异化磨光特性将玄武岩与石灰岩混合使用,既能长期维持路面防滑能力,又能降低工程造价;其中玄武岩掺配比例,是改变复合集料抗滑性能衰减趋势的首要控制因素。

在车辆荷载、雨水、温度循环的共同作用下,路面抗滑性能会呈现两段式变化,前期摩擦系数快速衰减,后期逐步趋于稳定,但现有预测模型大多难以同时兼顾多环境因素耦合带来的复杂劣化效果。分子动力学模拟、数字孪生、材料信息学等多尺度数字化方法,能够从微观层面揭示集料磨损内在机理,同时辅助完成路面性能预测与集料配比优化,是突破当前研究局限的重要工具。

结合道路低碳化、智慧化发展需求,后续研究将围绕微观机理精细化表征、多场耦合智能预测、低

碳混合料开发、全流程智能运维四大方向协同开展。首先借助原位扫描电镜、原子力显微镜、同步辐射CT等设备开展跨尺度定量观测,记录荷载与水耦合作用下玄武岩表面纹理、集料界面的持续变化,量化微观形貌损伤规律,建立微观构造与宏观抗滑性能之间的关联模型[12]。其次综合材料、荷载、温湿度等多种边界条件构建多物理场耦合衰减模型,融合长期道路监测数据与机器学习算法搭建抗滑表层数字孪生平台,实现全生命周期抗滑性能动态预测,为寿命评估、智能预防性养护提供技术支撑[38][39]。在此基础上还需完善玄武岩低碳应用配套技术,分析其在温拌、再生、低碳沥青混合料中的适配效果,阐明优良路用性能的内在机理,并对各类复合铺装方案开展全生命周期环境效益评估。最后搭建基于实时抗滑监测数据的道路智能运维平台,同步完善覆盖集料检测、混合料设计、养护决策全流程的行业标准体系。

基金项目

江西省交通运输厅科技项目(项目编号:2025YB046):冷拌冷铺全玄武岩长效超粘磨耗层技术研究与应用。

参考文献

- [1] 黄晓明,郑彬双. 沥青路面抗滑性能研究现状与展望[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 32-49.
- [2] Ibrahim, A., Faisal, S. and Jamil, N. (2009) Use of Basalt in Asphalt Concrete Mixes. *Construction and Building Materials*, **23**, 498-506. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.026>
- [3] 艾长发,赵静,阳恩慧,等. 石灰岩与玄武岩混合粗集料性能试验研究[J]. 公路, 2014, 59(1): 182-187.
- [4] 蒋进,郇国凯,陈桂锋,等. 不同玄武岩掺量对沥青混合料抗滑性能影响研究[J]. 公路工程, 2024, 49(1): 139-143, 168.
- [5] 郇国凯. 掺玄武岩集料的沥青路面抗滑性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [6] 李松,翟嘉辉,熊锐. 基于集料特性的沥青路面抗滑性能研究进展[J]. 青海交通科技, 2018(2): 81-86.
- [7] 桂志敬,刘恒权,张智勇. 路面纹理构造特征表征与抗滑性能检测技术研究进展[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012, 8(4): 62-66.
- [8] 邢超,谭忆秋,张凯,等. 基于材料基因组方法的沥青混合料基因特性综述及展望[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 76-90.
- [9] 王丹. 石灰岩与玄武岩混合集料沥青路面表层抗滑性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [10] 孙明. 沥青路面玄武岩集料压碎值影响因素分析研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- [11] 陈先华,陈胜霞,黄晓明,等. 沥青路面的磨光研究: 从宏观到微观尺度[J]. 中外公路, 2013, 33(2): 45-50.
- [12] 张起森,肖鑫. 沥青及沥青混合料本构模型与微观结构研究综述[J]. 中国公路学报, 2016, 29(5): 26-33.
- [13] 何佳. 石灰岩与玄武岩混合集料沥青路面长期抗滑性能衰减规律研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [14] 高茜楠,吕润华,耿靖杰. 基于纹理分形特性的沥青路面抗滑性能研究综述[J]. 交通信息与安全, 2022, 40(5): 12-22.
- [15] 董仕豪,韩森,宿金菲,等. 沥青路面纹理三维重构及评价方法研究综述[J]. 中国公路学报, 2025, 38(2): 60-84.
- [16] Meng, Y., Chen, Z., Wang, Z., Lu, H., Qing, G., Liu, Z., et al. (2024) Evaluating the Anti-Skid Performance of Asphalt Pavements with Basalt and Limestone Composite Aggregates: Testing and Prediction. *Buildings*, **14**, Article 2339. <https://doi.org/10.3390/buildings14082339>
- [17] 郑木莲,朱洪涛,陈拴发,等. 路面抗滑性能测试技术与评价模型研究进展[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2008, 4(S1): 313-318.
- [18] 关博文,刘佳楠,房建宏,等. 基于抗滑性能的沥青路面纹理分形特征的研究进展[J]. 青海交通科技, 2018(2): 76-80.
- [19] Zhang, C., Zeng, L., Wang, H. and Qu, X. (2024) The Impact of Coarse Aggregate Mineral Compositions on Skid Resistance Performance of Asphalt Pavement: A Comprehensive Study. *PLOS ONE*, **19**, e0308721.

- <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308721>
- [20] Kane, M. and Edmondson, V. (2020) Long-Term Skid Resistance of Asphalt Surfacing and Aggregates' Mineralogical Composition: Generalisation to Pavements Made of Different Aggregate Types. *Wear*, **454**, Article ID: 203339. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203339>
- [21] Lei, J., Zheng, N., Bi, J., Zhao, F., Wang, Y. and Yang, J. (2024) Research on the Evolution Law of Aggregate Micro-Texture during Long-Term Wearing of Asphalt Pavement. *Construction and Building Materials*, **444**, Article ID: 137846. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137846>
- [22] Huan, X., Sheng, Y., Zhao, X., Li, L., Xue, H., Ye, Z., *et al.* (2023) Skid-Resistance Durability and Wear/Polish-Resistance Behaviors of Ultra-Thin Friction Course Designed Based on the Differential Polishing of Aggregates. *Journal of Building Engineering*, **78**, Article ID: 107585. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107585>
- [23] Reddy, G.S., Abdallah, I.N. and Nazarian, S. (2025) Contributions of Aggregate Mineralogical and Morphological Parameters to Aggregate Frictional Performance. *Construction and Building Materials*, **478**, Article ID: 141413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141413>
- [24] 王永平, 黄继蓉. 室内沥青路面抗滑性能衰减规律研究及模型分析综述[J]. 中外公路, 2015, 35(3): 299-302.
- [25] 余苗, 童铨尧, 孔令云, 等. 轮胎-沥青路面摩擦测试及抗滑模型研究综述[J]. 公路交通科技. 2020, 37(10): 12-24.
- [26] 王威娜, 徐青杰, 周圣雄, 等. 沥青-集料黏附作用评价方法综述[J]. 材料导报, 2019, 33(13): 2197-2205.
- [27] 张晨旭, 陈华鑫, 李毅, 等. 提升沥青路面抗水损害能力措施综述[J]. 材料导报, 2013, 27(S2): 293-297.
- [28] 张宏飞, 张久鹏, 王帅, 等. 沥青化学组分与宏观性能靶向关系研究综述与展望[J]. 材料导报, 2025, 39(4): 60-74.
- [29] 汪海年, 丁鹤洋, 冯珀楠, 等. 沥青混合料分子模拟技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 1-14.
- [30] 梁波, 廖威, 郑健龙. 改性剂与沥青相容性作用中分子动力学模拟综述[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(5): 54-85.
- [31] Yan, C., Li, Q., Wang, J., Yang, H. and Wu, Y. (2024) Evaluation for Long-Term Skid Resistance of Ultra-Thin Asphalt Overlay Based on Texture Characteristics. *Construction and Building Materials*, **438**, Article ID: 137151. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137151>
- [32] He, Y., Cui, Z., Yang, X., Wang, C., Cui, K., Fan, Z., *et al.* (2024) Investigating Intrinsic Factors in Pavement Skid Resistance Deterioration Using an Integrated Tribology Model. *Tribology International*, **199**, Article 109997. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109997>
- [33] Zhan, Y., Li, J.Q., Liu, C., Wang, K.C.P., Pittenger, D.M. and Musharraf, Z. (2021) Effect of Aggregate Properties on Asphalt Pavement Friction Based on Random Forest Analysis. *Construction and Building Materials*, **292**, Article ID: 123467. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123467>
- [34] Zhan, Y., Chen, Y., Lin, X., Zhang, Y., Zhang, A. and Ai, C. (2023) Prediction of the Skid-Resistance Deterioration in Asphalt Pavement Based on Peephole-LSTM Neural Network. *International Journal of Pavement Engineering*, **24**, Article ID: 2277815. <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2277815>
- [35] Li, Y., Liu, C., Weng, Z., Wu, D. and Du, Y. (2025) Aggregate-Level 3D Analysis of Asphalt Pavement Deterioration Using Laser Scanning and Vision Transformer. *Automation in Construction*, **178**, Article ID: 106380. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106380>
- [36] 李松, 翟嘉辉, 熊锐, 等. 基于差异磨光的沥青路面抗滑性能研究进展[J]. 中外公路, 2021, 41(5): 47-52.
- [37] 龚芳媛, 拜佳威, 陈祎, 等. 沥青混合料中集料迁移的表征方法与评价指标综述[J]. 材料导报, 2024, 38(11): 118-131.
- [38] 于华南, 姚丁, 钱国平, 等. 基于细观结构特征的沥青混合料性能数字孪生模型研究综述[J]. 中国公路学报, 2023, 36(3): 20-44.
- [39] 刘志杨, 董泽蛟, 周涛, 等. 基于材料信息学的沥青混合料性能提升综述及展望[J]. 中国公路学报, 2024, 37(4): 98-120.