文章编号:1008-1534(2026)05-0421-07

铁尾矿料特性对沥青面层路用性能的影响机制研究

刘新杰,焦晓磊,潘大民,李源渊

(天津市公路事业发展服务中心,天津 300182)

摘 要:为了解决天然石料短缺与铁尾矿固废堆积的突出矛盾,推动工业固废在道路工程中的资源化应用,以天津地区铁尾矿料为研究对象,系统评估其在沥青面层中的适用性及长期服役性能。采用微观岩矿鉴定分析和宏观技术指标试验相结合的方式,揭示了铁尾矿料的矿物组成、材料特性以及花白料(蚀变颗粒)含量对路用性能的影响机制。结果表明:铁尾矿料表观密度和吸水率优于传统集料,压碎值和洛杉矶磨耗值满足规范要求;花白料含量对沥青混合料性能影响显著,当花白料含量超过 40%(质量分数)时,沥青混合料残留稳定度和冻融劈裂强度比显著下降,长期老化后最大弯拉应变持续降低并低于规范限值。研究明确了花白料含量对沥青混合料路用性能的影响规律,可为铁尾矿料在沥青面层中的资源化应用提供关键性能控制依据。

关键词:道路工程其他学科;铁尾矿料;沥青混合料;材料特性;路用性能

中图分类号:U414 **文献标识码**:A **DOI**: 10.7535/hbgykj.2026yx05005

Influence mechanism of iron tailings characteristics on pavement performance of asphalt surface layers

LIU Xinjie, JIAO Xiaolei, PAN Damin, LI Yuanyuan

(Tianjin Highway Development Service Center, Tianjin 300182, China)

Abstract: In order to solve the prominent contradiction between natural stone shortage and iron tailings solid waste accumulation, and to promote the resource utilization of industrial solid waste in road engineering, The applicability and long-term service performance of iron tailings materials in asphalt surface layers in Tianjin area were systematically evaluated. By combining microscopic mineral identification analysis with macroscopic technical index experiments, the influence mechanism of mineral composition, material properties, and alteration particle content in iron tailings materials on pavement performance was revealed. The results indicate that iron tailings materials exhibit higher apparent density and lower water absorption compared to traditional aggregates, while their crushing value and Los Angeles abrasion value meet the specification requirements. The alteration particle content significantly impacts the asphalt mixture performance. When the content (mass fraction) exceeds 40%, the residual stability and freeze-thaw splitting strength ratio decrease notably, and after long-term aging, the maximum flexural strain continuously declines and falls below the specification limit. This study clarifies the influence patterns of altered particle content on the pavement performance of the asphalt mixture, can provide key performance control basis for the

收稿日期:2025-11-25;修回日期:2026-08-11;责任编辑:丁军苗

基金项目:天津市交通运输科技发展计划项目(2025-02)

第一作者简介:刘新杰(1969—),男,天津人,正高级工程师,主要从事交通运输管理及固废资源化等方面的研究。

通信作者:李源渊高级工程师。E-mail: jkylszx107@163.com

刘新杰,焦晓磊,潘大民,等.铁尾矿料特性对沥青面层路用性能的影响机制研究[J].河北工业科技,2026,43(5):421-427.

Liu Xinjie, Jiao Xiaolei, Pan Damin, et al. Influence mechanism of iron tailings characteristics on pavement performance of asphalt surface layers[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2026, 43(5): 421-427.

resource utilization of iron tailings in asphalt surface layers.

Keywords: other disciplines of road engineering; iron tailings material; asphalt mixture; material characteristics; pavement performance

随着中国经济社会快速发展，交通基础设施建设规模持续扩大，高速公路、国省干线公路等重大工程对高品质石料的需求呈现指数级增长。然而，受制于天然石材资源分布不均、生态保护政策趋严及运输成本攀升等多重因素，传统石料供应链的稳定性受到严峻挑战，供需失衡问题突出，资源短缺已成为制约交通可持续发展的瓶颈[1]。在此背景下，推动固废资源替代天然石材成为破解困局的关键路径[2]。其中，铁尾矿料因其区域性富集特征与潜在工程价值备受关注[3-5]。

铁尾矿料具备较大的资源化潜力，其物理力学性能接近甚至超越天然石材，是优质的替代材料[6]。目前针对铁尾矿料的研究多集中于道路基层与路基领域。刘洋等[7]系统探讨了铁尾矿料作为路基填料的施工技术与综合效益；刘金伊[8]聚焦水泥稳定碎石基层，验证其力学性能与工程可行性；王宗璞[9]对铁尾矿料在路基工程中的适用性进行了评估。此外，王冬旭等[10]通过材料设计，开发出铁尾矿基胶凝材料，验证了其在标准养护下具备良好抗冻性与水化稳定性，为铁尾矿的高附加值利用提供了新路径。然而，既有研究多集中于承重结构层与胶凝体系，尚未系统开展铁尾矿料在沥青面层中的资源化应用研究。铁尾矿料矿物组分复杂[11]，与沥青界面黏附性弱，用于沥青面层时易引发混合料耐久性不足的问题，严重制约其规模化利用，亟需开展系统深入的研究。

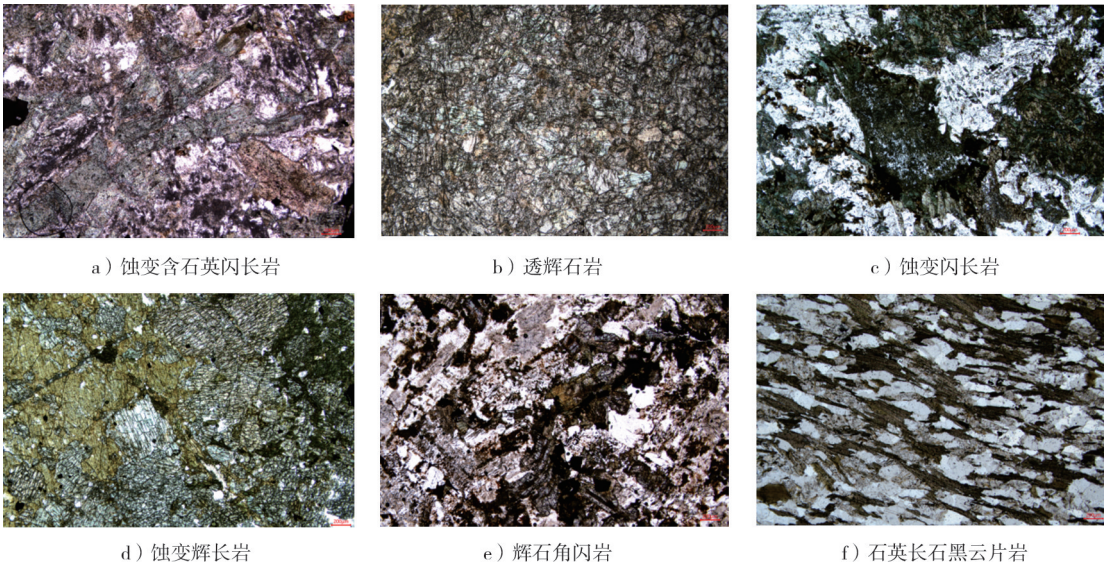
基于此，本文以天津地区铁尾矿料为研究对象，系统评估其在沥青面层中的适用性及核心控制参数，重点研究花白料含量对沥青混合料路用性能的影响规律，并引入长期老化条件以评估其性能衰减特征，以期为铁尾矿料在道路工程中的规范应用提供技术支撑。

1 铁尾矿料特性分析

1.1 岩矿分析

本研究选取了具有代表性的铁尾矿料样品，委托地质矿产测试中心采用薄片鉴定法进行岩矿鉴定，以明确其矿物组成特征。

铁尾矿料样品鉴定结果表明，其矿物组成通常由主矿物和副矿物组成。其中，主矿物包含角闪石（40%～60%）（体积分数，下同）、斜长石（30%～50%）、石英（5%～30%）、辉石（部分样品达 40%～50%）、黑云母（5%～40%）。副矿物一般为锆石或磷灰石，其岩相在室内定名为蚀变含石英闪长岩、透辉石岩、蚀变闪长岩、蚀变辉长岩、辉石角闪岩、石英长石黑云片岩等。图 1 为单偏光显微镜下部分铁尾矿料样品岩矿鉴定照片。这些岩石类型主要为侵入岩（如闪长岩、辉长岩）和变质岩（片岩），且普遍经历了蚀变作用，像绿泥石化、钠黝帘石化等，这主要是岩浆活动与后期热液或变质改造共同作用的结果[12]。



a）蚀变含石英闪长岩　b）透辉石岩　c）蚀变闪长岩

d）蚀变辉长岩　e）辉石角闪岩　f）石英长石黑云片岩

图 1 单偏光显微镜下部分铁尾矿料样品岩矿鉴定照片

Fig. 1 Mineral identification photos of some iron tailings samples under a single polarized light microscope

蚀变对铁尾矿料性能的影响是多方面的：1）外观方面　岩石颜色加深，呈现斑点状或条带状纹理特征，即花白料颗粒；2）矿物成分方面　主矿物次生转化，硬度和抗风化能力降低，颗粒间胶结作用减弱，还可能生成有害矿物；3）材料性能方面　微观结构改变，抗压和抗剪强度下降，水化反应产生的膨胀性次生矿物会加剧内部应力集中，引发结构开裂，化学稳定性也发生改变，可能激活潜在活性组分，引发碱骨料反应风险，硫化矿物氧化还会降低体系 pH，加速重金属离子溶解释放。

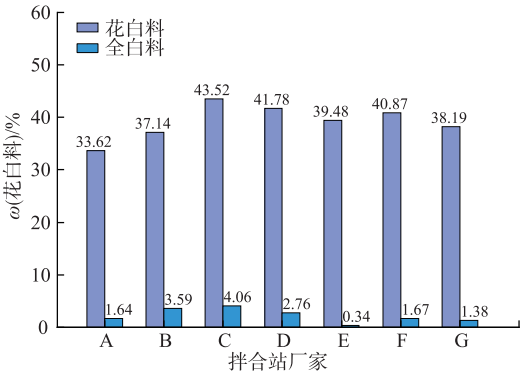
不过，在道路工程应用场景中，铁尾矿料经破碎加工后，在沥青面层体系里具有一定优势。一方面，其经破碎后形成的级配集料比表面积减小，矿物反应活性衰减；另一方面，沥青面层的密闭包裹作用和高温施工过程，能有效抑制其蚀变。沥青膜不仅阻断了水分渗透路径，其疏水特性还能抑制界面电化学反应，高温施工使残余硫化物转化为稳定的硫酸盐形态。并且，道路服役环境的动态荷载和温度变化等因素也有助于消除蚀变诱发条件。铁尾矿料在沥青面层应用中的次生蚀变风险可忽略不计。但铁尾矿料本身存在棱角颗粒多、级配差、抗压强度低于玄武岩等问题，在实际应用中仍需综合考量。

1.2　花白料含量检测

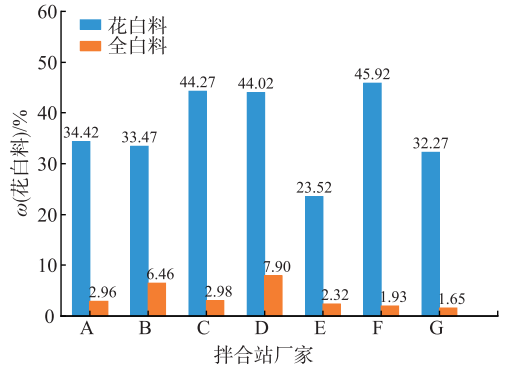
由于花白料中次生矿物的物理化学性质异于原生矿物，铁尾矿料中花白料含量可能会影响集料的力学强度、水稳定性及与沥青的黏附性，因此，需通过检测花白料含量对铁尾矿料进行初步定量评估，以确保沥青面层的耐久性与结构稳定性。

花白料的界定以颗粒表面蚀变矿物分布特征为依据。采用四象限目测法，将湿润后的颗粒平放在操作台上，选取花白色斑点或条带状纹理分布最密集、蚀变程度最高的表面作为观察面，目视将其表面划分为 4 个均等区域，观察每个区域内的花白色斑点或条带状纹理。若单个区域中花白部分覆盖面积大于等于 50%，则该区域被标记为“显著蚀变区”；若颗粒表面有 2 个及以上区域被标记为“显著蚀变区”，即判定该颗粒为花白料。该阈值基于前期大量分拣试验验证，可有效区分花白颗粒与常规颗粒。

采用水洗预处理工艺，对取自 7 家沥青拌合站的铁尾矿料样品进行花白料颗粒含量的检测，结果如图 2 所示。由图 2 可知，各拌合站现存铁尾矿料花白率普遍较高，约为 30%～50%，这与料源地质蚀变历史和破碎工艺有关。



a）粒径为10~15 mm的铁尾矿料



b）粒径为5~10 mm的铁尾矿料

图 2　铁尾矿料中花白料含量

Fig. 2　Content of altered particles in tailings

1.3　技术指标分析

本文选取 2 家具有代表性的铁尾矿料样品（记为样品 A、样品 B），花白料含量约为 35%（质量分数，下同），粒径分别为 10～15 mm、5～10 mm，进行材料的技术指标分析，具体结果如表 1、表 2 所示。

对照《公路沥青路面施工技术规范》[13] 中对粗集料的规格粒径要求，对表 1 数据进行分析，可以看出：样品 A、B 中 10～15 mm 粒径颗粒 9.5 mm 筛孔的通过率均超出规范值，5～10 mm 粒径的样品 A 的 4.75 mm 筛孔通过率超出规范值。说明铁尾矿料的粒径整体偏细，后续应用时应注意颗粒级配问题，通过调配各粒径材料比例或与常规集料复配，进行级配曲线优化。

由表 2 数据可知，在物理性能方面，铁尾矿料表观相对密度显著高于石灰岩、玄武岩，吸水率远低于规范限值，表明其内部结构致密，抗水损能力优异；但其含泥量存在超标现象，需通过水洗、降尘等加工工艺优化解决。在力学性能方面，压碎值、洛杉矶磨耗值及软弱颗粒含量均满足规范要求，表明其抗荷载能力与天然集料相当。其他特性分析显示，铁尾矿料与沥青黏附性、坚固性损失率均满足规范要求，浸水膨胀率为 0%，且无铁分解现象，证明其在湿热、冻融及化学侵蚀环境下具备优异体积安定性与化学稳定性。

表 1 铁尾矿料颗粒级配

Tab. 1 Particle size distribution of iron tailings

粒 径	样 品	ω(通过筛孔颗粒)/%						
		19 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm
10～15 mm	样品 A	100.0	88.9	28.9	2.8	1.9		
	样品 B	100.0	97.7	36.3	1.0	0.9		
	规范要求	100	90～100	0～15	0～5			
5～10 mm	样品 A		100.0	97.9	19.8	8.0	5.7	4.6
	样品 B		100.0	97.6	4.0	0.9		
	规范要求		100	90～100	0～15	0～5		

注:“规范要求”指《公路沥青路面施工技术规范》的要求。

表 2 技术指标试验结果

Tab. 2 Test results of technical indicators

技术指标	10～15 mm		5～10 mm		规范要求	
	样品 A	样品 B	样品 A	样品 B	表面层	其他层次
表观相对密度	3.050	3.152	3.056	3.048	≥2.60	≥2.50
吸水率/%	0.55	0.68	0.72	0.91	≤2.0	≤3.0
ω(针片状颗粒)/%	9.2	5.8	6.2	9.0	≤15	≤18
含泥量/%	0.6	1.3	2.1	2.4	≤1	≤1
压碎值/%	14.6	12.2			≤26	≤28
洛杉矶磨耗值/%	16.9	15.8	17.5	18.1	≤28	≤30
ω(软弱颗粒)/%	0.0	0.0	0.0	0.0	≤3	≤5
与 SBS 改性沥青的黏附性	4 级	4 级	4 级	4 级	≥4 级	≥4 级
坚固性/%	0.1	0.3	0.1	0.1	≤12	≤12
浸水膨胀率/%	0.0	0.0	0.0	0.0		
铁分解稳定性	均未发生铁分解					

注:“规范要求”指《公路沥青路面施工技术规范》的要求。

2 试验方案

2.1 配合比设计

本文采用马歇尔方法进行 AC-13C 型改性沥青混合料目标配合比设计。

由“1.3”项可知,样品 A 与样品 B 总体技术指标差异不大。综合对比,样品 B 在颗粒规格与级配方面更具代表性,且其压碎值优于样品 A,力学性能略优。因此,选用样品 B 进行后续配合比与性能研究,以保障试验结果的代表性与可靠性。粗集料采用铁尾矿料样品 B 的 10～15 mm、5～10 mm 2 档粒径,并掺配玄武岩 3～5 mm 粒径;细集料选用玄武岩 0～3 mm,沥青采用 SBS I-D 改性沥青,最佳油石比为 5.1%。

2.2 试件制备

按目标花白料含量 30%～60%(梯度间隔为 5%),通过质量替代法将分拣后的花白料与常规铁尾矿料混合,人工配制不同花白料含量的矿料。按照“2.1”项下矿料级配与最佳油石比,在室内拌制沥青混合料。采用击实法成型马歇尔试件,采用轮碾法成型车辙试件。

为模拟混合料服役期性能衰减,参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》[14]中 T0734 热拌沥青混合料加速老化方法,对部分试件进行长期老化处理。试件在进行长期老化试验前必须先经过短期老化。短期老化设置烘箱温度为成型温度±5 ℃,在强制通风条件下连续加热 2 h±5 min;长期老化设置烘箱温度为(85±3) ℃,在强制通风条件下连续加热(120±0.5) h。

3 混合料路用性能试验与分析

3.1 水稳定性

水稳定性是沥青混合料抵抗水分侵蚀的关键性能,直接影响沥青路面的耐久性。水分侵入会弱化沥青-集料界面黏附,引发沥青膜剥离与混合料结构破坏,尤其在多雨或冻融季节更为显著。铁尾矿料矿物组成复杂且花白料含量较高,其材料特性可能进一步加剧水损害风险[15]。

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》[14]中 T0709 开展浸水马歇尔试验。将马歇尔试件分为 2 组:一组在 60 ℃水浴中恒温 30 min 测定马歇尔稳定度;另一组在 60 ℃水浴中恒温 48 h 后测定马歇尔稳定度。用 2 组试件的稳定度比值(浸水残留稳定度)来表征混合料的水稳性。首先,根据《公路工程沥

青及沥青混合料试验规程》[14]中 T0729 开展冻融劈裂试验，将制作的标准马歇尔试件随机分为 2 组（每组不低于 4 个），测定试件的直径及高度。第 1 组室温下备用；第 2 组在 97.3～98.7 MPa 的真空条件下保持 15 min，然后常压浸水 0.5 h，取出放入塑料袋，加入 10 mL 水，扎好口袋后放入（－18±2）℃的恒温冰箱内，保持（16±1）h，将试件取出后撤去塑料袋放入（60±0.5）℃的恒温水槽中保温 24 h。将 2 组试件全部浸入（25±0.5）℃的恒温水槽不少于 2 h（试件间距大于 10 mm）。最后，在室温 25 ℃条件下以 50 mm/min 加载速率进行劈裂试验，并计算冻融劈裂强度比。

采用残留稳定度与冻融劈裂强度比双指标评价水稳定性。前者反映沥青混合料在常规浸水下的强度衰减，花白料含量对沥青混合料的残留稳定度影响趋势图如图 3 所示；后者模拟冻融交替环境的抗损伤能力，花白料含量对沥青混合料的冻融劈裂强度比影响趋势如图 4 所示。

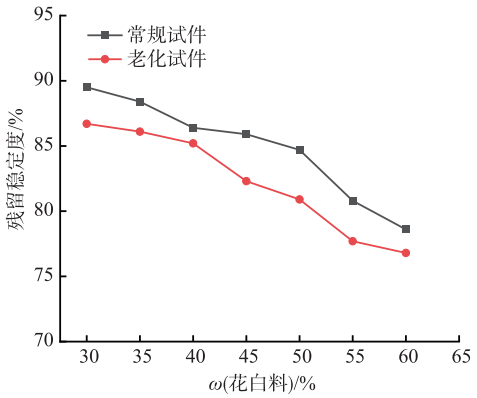


图 3　花白料含量对沥青混合料的残留稳定度影响趋势图

Fig. 3　Trend diagram of the influence of altered particle content on residual stability of asphalt mixture

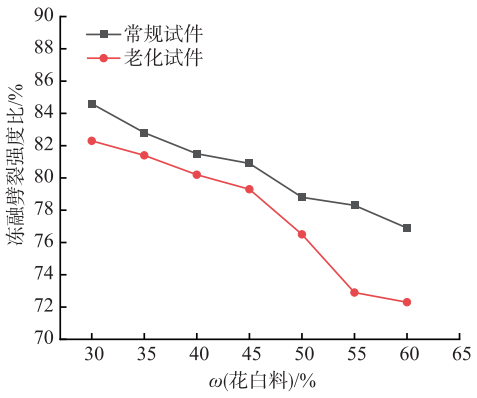


图 4　花白料含量对沥青混合料的冻融劈裂强度比影响趋势图

Fig. 4　Trend diagram of the influence of altered particle content on freez-thaw splitting strength ratio of asphalt mixture

由图 3 可知，随花白料含量增加，常规试件与老化试件的残留稳定度均呈下降趋势，这表明花白料含量的增加削弱了沥青与集料的黏附性，加剧了水分侵蚀，导致水稳定性降低。老化试件的残留稳定度普遍低于常规试件，且高花白料含量老化试件的残留稳定度下降更显著，说明沥青混合料的老化过程使沥青硬化脆化，抗水损害能力下降。规范要求残留稳定度不小于 85%。常规试件在花白料含量小于等于 45%时满足要求，而老化试件仅在含量小于等于 40%时达标。实际工程中需严格控制花白料含量，并考虑老化因素，以确保长期耐久性。

由图 4 可知，随着花白料含量的增加，常规试件和老化试件的冻融劈裂强度比均呈下降趋势，表明花白料含量越高，沥青混合料抗冻融能力越差。老化试件的冻融劈裂强度比下降斜率更大，尤其在高花白料含量区间趋势更明显，这表明老化试件因沥青脆化导致抗冻融能力减弱，老化过程放大了花白料对水稳定性的负面影响。另外常规试件在花白料含量 45%时冻融劈裂强度比接近规范限值，继续增加花白料含量，冻融劈裂强度比低于规范要求，而老化试件在含量 40%时已接近规范限值，继续增加花白料含量，冻融劈裂强度比逐渐降低。实际工程中需将花白料含量控制在较低水平，以确保沥青混合料的长期抗冻融性能。

综上所述，花白料含量增加显著降低沥青混合料的水稳定性，老化进一步加剧这一趋势。工程中需兼顾材料配比与抗老化性能，优化设计以提升沥青混合料路用性能，同时，需加强施工质量控制，避免花白料分布不均引发的局部水损害风险。

3.2　高温稳定性

沥青混合料是一种黏弹性材料，其性能与温度和荷载作用时间密切相关。通常在夏季气温达到 25～30 ℃时，沥青路面就会发生高温失稳现象，而车辙是其中最具危害的破坏形式。高温失稳现象形成可归结为高温条件下沥青面层因沥青软化而进一步密实，使得沥青对矿质骨架的约束作用降低而使骨架失稳，发生路面结构的重新排列。

采用车辙试验对沥青混合料的高温稳定性进行检验。车辙试验按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》[14]中 T0719 进行。将试件连试模置于（60±1）℃的恒温室中保温不少于 5 h（小于 24 h），把试块放在车辙试验仪上进行试验，试验温度为（60±0.5）℃，试验轮与试件的接触压强为（0.7±0.05）MPa，试验轮在试件的中央部位、行走方向必须与试件碾压方向一致，开启试验机，测试并计算动稳定度。花白料含量对沥青混合料的动稳定度影响趋势图如图 5 所示。

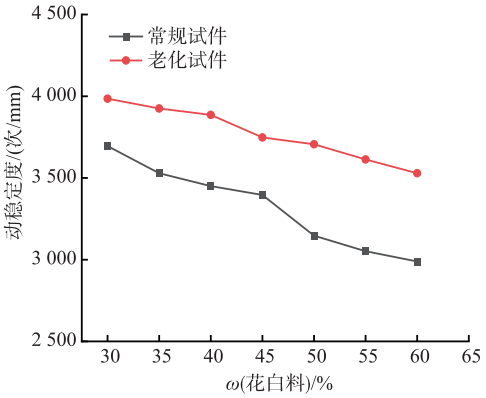


图 5 花白料含量对沥青混合料的动稳定度影响趋势图

Fig. 5 Trend diagram of the influence of altered particle content on dynamic stability of asphalt mixture

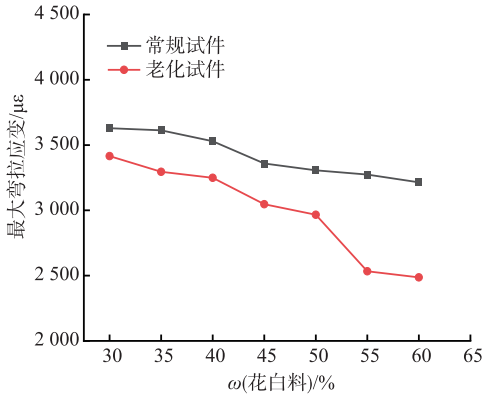


图 6 花白料含量对沥青混合料最大弯拉应变的影响趋势图

Fig. 6 Trend diagram of the influence of altered particle content on maximum flexural strain of asphalt mixture

由图 5 可知,随着花白料含量的增加,常规试件与老化试件的动稳定度均呈现下降趋势。这表明花白料含量的增加削弱了沥青混合料的骨架结构稳定性,导致高温抗车辙能力降低。而老化试件的动稳定度普遍高于常规试件,这种现象可能与沥青老化后的硬化有关。老化使沥青黏度增加、刚性增强,从而提高了沥青混合料在高温下的抗变形能力。但这种硬化也可能伴随脆性增加,会对低温抗裂性或水稳定性产生负面影响。常规试件与老化试件的动稳定度均满足规范要求,但常规试件动稳定度在花白料含量 60%时接近规范下限,建议实际工程中将花白料含量控制在较低水平。

3.3 低温抗裂性

低温开裂是低温季节沥青路面破坏的主要形式之一,其一方面破坏了沥青路面的整体性、连续性及美观,另一方面水分从裂缝不断进入使基层甚至路基软化,导致路面的承载能力下降,影响了行车的舒适性,并缩短了路面使用寿命。根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》[14]中 T0715,对常规试件及老化试件进行低温弯曲试验,试验温度为(−10±0.5) ℃,加载速率为 50 mm/min,采用的试件为按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》[14]中 T0703 轮碾法成型的车辙试件切割而成的 250 mm×30 mm×35 mm 的棱柱体小梁,其跨径为 200 mm。首先,将试件在低温箱中恒温不少于 3 h;然后,将试件取出立即安放到支座上,试件上下方向与试件成型时的方向一致;最后,开动试验机在跨中按规定速率施加集中荷载直至试件破坏,计算试件破坏时的梁底最大弯拉应变。花白料含量对沥青混合料最大弯拉应变的影响趋势图如图 6 所示。

由图 6 可知,花白料含量对沥青混合料的低温抗裂性能具有显著影响。在常规试件中,随着花白料含量从 30%增至 60%,最大弯拉应变从 3 629.4 με 降至 3 214.9 με,呈现线性下降趋势,说明花白料含量增加会削弱混合料的柔韧性,降低其低温抗裂性。这可能与花白料比例升高导致沥青胶结作用减弱有关,混合料内部黏结力下降,低温下更易开裂。同一花白料含量下,老化试件的弯拉应变均低于常规试件,这表明老化过程加剧了沥青混合料性能的劣化,高花白料含量试件更为显著。沥青在老化后硬化、弹性丧失,导致应力松弛能力下降,且高花白料含量可能减少沥青有效包裹面积,进一步加速老化的负面影响,使混合料脆性增加。老化试件在花白料含量大于 55%时,弯拉应变已低于规范要求,说明高花白料含量的混合料在长期使用中抗裂性能不足。因此,实际工程中需严格控制花白料比例,并结合抗老化措施提升沥青混合料的耐久性。

4 结 语

本研究以天津地区铁尾矿料为研究对象,系统评估了其在沥青面层中的资源化应用潜力,重点探讨了花白料(蚀变颗粒)含量对沥青混合料路用性能的影响机制,旨在缓解天然石料资源短缺与铁尾矿料固废堆积之间的矛盾,推动工业固废在道路工程中的高效、可持续利用。主要研究结论如下。

1) 不同拌合站及粒径的铁尾矿料花白率差异较大,10~15 mm 粒径样品花白率相对较高。铁尾矿料表观相对密度显著高于石灰岩、玄武岩,吸水率远低于规范限值,但含泥量存在超标现象。其压碎值、洛杉矶磨耗值及软弱颗粒含量均满足规范要求,与沥青黏附性良好,坚固性损失率优于天然石材,浸水膨胀率为 0%且无铁分解现象,在湿热、冻融及化学侵蚀环境下具备的优异体积安定性与化学稳定性。

2）花白料含量是影响铁尾矿料沥青混合料路用性能的核心控制参数。在水稳定性方面，沥青混合料的残留稳定度与冻融劈裂强度比均随花白料含量增加而显著降低，花白料含量在常规试件中小于等于 45%、在老化试件中小于等于 40%时满足规范要求，老化加剧沥青脆化，削弱抗水损害能力。在高温稳定性方面，沥青混合料动稳定度随花白料含量增加而下降，但老化后因沥青硬化有所提升，所有试件动稳定度均满足规范要求，但常规试件花白料含量为 60%时接近规范下限。在低温抗裂性方面，沥青混合料最大弯拉应变随花白料含量增加呈线性下降，老化后降幅增大，老化试件在花白料含量大于 55%时低于规范要求。

本研究系统揭示了花白料含量对沥青混合料关键路用性能的影响规律，并提出了其在沥青面层应用的性能控制阈值，为铁尾矿料的资源化利用提供了直接的技术支撑。受样品采集条件所限，本研究的试验结论对于其他岩性来源或不同地域铁尾矿料的普适性尚需进一步验证；此外，室内老化试验与真实服役环境下的长期性能演变仍存在一定差异。后续研究可在拓展材料来源与地域范围的基础上，进一步验证花白料含量阈值的适用性，并结合长期跟踪观测与实体工程试验，评估铁尾矿料沥青混合料在实际服役条件下的性能衰减规律，为其在道路工程中规模化应用提供更全面的理论依据与技术支撑。

参考文献/References：

[1] 顾晓薇，张延年，张伟峰，等. 大宗工业固废高值建材化利用研究现状与展望[J]. 金属矿山，2022(1)：2-13.
Gu Xiaowei，Zhang Yannian，Zhang Weifeng，et al. Research status and prospect of high value building materials utilization of bulk industrial solid waste[J]. Metal Mine，2022，(1)：2-13.

[2] 尹诚悦，邱娟娟，王逵，等. 山东省工业固体废物处置现状及对策研究[J]. 山东化工，2025，54(6)：232-234.
Yin Chengyue，Qiu Juanjuan，Wang Kui，et al. Research on the current status and countermeasures of industrial solid waste disposal in Shandong Province[J]. Shandong Chemical Industry，2025，54(6)：232-234.

[3] 陈超，白海娟. 河北省铁尾矿分布特点与综合利用模式[J]. 现代矿业，2016，6(6). 194-196.
Chen Chao，Bai Haijuan. Distribution characteristics and comprehensive utilization mode of the iron tailings in Hebei Province[J]. Modern Mining，2016，6(6). 194-196.

[4] 张意江，陈生水，傅中志. 铁矿尾矿料微观结构与压缩特性试验研究[J]. 岩土工程学报，2020，42(增刊 2)：61-66.
Zhang Yijiang，Chen Shengshui，Fu Zhongzhi. Experimental study on microstructure and compressibility of iron ore tailings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2020，42(S2)：61-66.

[5] 李涛，党斌. 不同取代类型铁尾矿混凝土抗压性能试验研究[J]. 河北工业科技，2016，33(3)：240-245.
Li Tao，Dang Bin. Experimental study on the compressive strength of iron tailings concrete with different replacement types[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology，2016，33(3)：240-245.

[6] 郭晓霞，陈之祥，邵龙潭，等. 细粒铁尾矿的沉积特性与基本物理力学性质试验研究[J]. 岩土工程学报，2020，42(7)：1220-1227.
Guo Xiaoxia，Chen Zhixiang，Shao Longtan，et al. Experimental study on sedimentary behavior and basic physical mechanical properties of fine iron tailings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2020，42(7)：1220-1227.

[7] 刘洋，杨超越. 铁尾矿料路基填筑施工技术应用[J]. 黑龙江交通科技，2025，48(8)：25-28.
Liu Yang，Yang Chaoyue. Application of iron tailing material roadbed filling construction technology[J]. Communications Science and Technology，2025，48(8)：25-28.

[8] 刘金伊. 尾矿料在公路基层中的应用研究[D]. 华北理工大学，2023.
Liu Jinyi. Research on the Application of Tailings in Highway Base[D]. Tangshan：North China University of Science and Technology，2023.

[9] 王宗璞. 张家口赤城地区尾矿料在高速公路工程中的应用[J]. 北方交通，2021(8)：73-74.
Wang Zongpu. Application of tailings material in expressway engineering in Chicheng area of Zhangjiakou[J]. Northern Communications，2021(8)：73-74.

[10] 王冬旭，陈洪彬，李万兴，等. 新型铁尾矿基胶凝材料的制备及充填性能研究[J]. 现代矿业，2025，41(10)：233-236.
Wang Dongxu，Chen Hongbin，Li Wanxing，et al. Research on preparation and filling performance of new iron tailings-based gelling materials[J]. Modern Mining，2025，41(10)：233-236.

[11] 刘冠男，暴环宇，张长青，等. 冀东地区尾矿资源调查及综合利用建议[J]. 中国矿业，2024，33(6)：111-119.
Liu Guannan，Bao Huanyu，Zhang Changqing，et al. Survey and comprehensive utilization recommendations for tailings in the eastern Hebei Province[J]. China Mining Magazine，2024，33(6)：111-119.

[12] 董金玉，石尚，李建勇，等. 蚀变岩工程分级与物理力学性质研究[J]. 工程地质学报，2022，30(3)：966-974.
Dong Jinyu，Shi Shang，Li Jianyong，et al. Study on engineering classification and physical and mechanical properties of altered rock[J]. Journal of Engineering Geology，2022，30(3)：966-974.

[13] JTG F40—2004　公路沥青路面施工技术规范[S].

[14] JTG 3410—2025　公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

[15] 李淑燕，王鸿源，冯海暴. 冻融与硫酸盐作用下铁尾矿混凝土损伤性能研究[J]. 河北工业科技，2025，42(2)：128-136.
Li Shuyan，Wang Hongyuan，Feng Haibao. Study on damage properties of iron tailings concrete under freeze-thaw and sulfate action[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology，2025，42(2)：128-136.