

矿渣沥青混合料在道路罩面中的应用研究与性能评估

谷志伟

云南云岭高速公路工程咨询有限公司，云南 昆明 650000

摘要：针对矿渣沥青混合料在道路罩面工程中的应用需求，采用室内试验研究方法，开展了钢渣和水渣在沥青混合料中的应用性能评估，通过对不同矿渣掺量的矿渣沥青混合料进行高温稳定性和低温抗裂性以及疲劳性能与水稳定性等试验研究，分析了矿渣掺量对沥青混合料路用性能的影响规律。疲劳试验结果显示，适量掺入矿渣可延长沥青混合料的疲劳寿命；在水稳定性方面矿渣沥青混合料的残留稳定度和冻融劈裂强度比均满足规范要求，基于试验数据建立了矿渣掺量与路用性能的关系模型，确定了最佳矿渣掺量范围，为矿渣沥青混合料在道路罩面工程中的推广应用提供了技术支持。

关键词：矿渣沥青混合料；钢渣；水渣；路用性能

Application Study and Performance Evaluation of Slag Asphalt Mixture in Road Cover

Gu Zhiwei

Yunnan Yunling Expressway Engineering Consulting Co., LTD. Kunming, Yunnan 650000

Abstract : In view of the application requirements of slag asphalt mixture in road cover engineering, the application performance evaluation of steel slag and water slag in asphalt mixture, through the stability of slag asphalt mixture of high temperature and low temperature crack resistance and fatigue performance and water stability, analyzed the influence of slag mixture on asphalt mixture performance. The fatigue test results show that the proper amount of slag can prolong the fatigue life of asphalt mixture; the residual stability and freeze-thaw cracking strength ratio of slag asphalt mixture meet the specification requirements. Based on the test data, the relationship model is established, which provides technical support for the popularization and application of slag asphalt mixture in road cover engineering.

Keywords : slag asphalt mixture; steel slag; water slag; road performance

引言

随着道路建设规模的不断扩大，天然骨料资源日益紧缺，寻找替代材料已成为道路建设领域的重要课题，矿渣作为工业生产的副产品，具有较高的强度和良好的机械性能，在沥青混合料中应用具有显著的资源和环境效益，国内外研究表明矿渣替代天然骨料能够改善沥青混合料的路用性能，但其掺量对混合料性能的影响规律尚需深入研究。基于工程实践需求开展了矿渣沥青混合料的系统性能评估研究，重点分析了不同类型矿渣及其掺量对混合料高温、低温、疲劳和水稳定性的影响，通过建立矿渣掺量与路用性能的关系模型确定最佳配合比，为矿渣沥青混合料在道路罩面工程中的应用提供依据，研究成果可为提高道路使用性能和节约自然资源以及推进循环经济发展提供技术支撑。

一、矿渣沥青混合料配合比设计

(一) 原材料性能测试

在配合比设计过程中对钢渣和水渣两种矿渣材料进行了全面的性能测试分析，钢渣粗集料表观相对密度为3.25，吸水率1.85%，洛杉矶磨耗损失率22.6%，坚固性损失0.86%；水渣粗集料表观相对密度为2.85，吸水率2.15%，洛杉矶磨耗损失率25.4%，坚固性损失1.12%。针对细集料性能测定结果显示，钢渣细集料表观相对密度3.15，含泥量0.6%，亚甲蓝值12；水渣细集

料表观相对密度2.75，含泥量0.8%，亚甲蓝值14，所选用改性沥青针入度为65，软化点52℃，延度大于100厘米，粘附性级别为5级，通过对比分析表明两种矿渣材料的物理力学性能指标均满足道路工程技术规范要求，可作为优质集料应用于沥青混合料中。

(二) 最佳配合比确定

采用体积法设计矿渣沥青混合料配合比，确定了最佳矿渣掺量和沥青用量。通过反复试验验证确定钢渣沥青混合料的矿料级配为13.2mm以上占15%，9.5–13.2mm占20%，4.75–9.5mm占25%，2.36–4.75mm占15%，0.075–2.36mm占22%，0.075mm

作者简介：谷志伟(1988.12-)，男，彝族，云南省楚雄州人，本科，工程师，研究方向：路基、路面、桥梁施工技术（公路工程）。

以下占3%；水渣沥青混合料的矿料级配为13.2mm以上占12%，9.5–13.2mm占18%，4.75–9.5mm占28%，2.36–4.75mm占17%，0.075–2.36mm占22%，0.075mm以下占3%，经过马歇尔试验方法测定钢渣沥青混合料的最佳沥青用量为4.8%，水渣沥青混合料的最佳沥青用量为5.2%，在此配合比条件下混合料空隙率和饱和度等技术指标均符合规范要求，具有良好的路用性能。

二、高温性能试验研究

(一) 马歇尔试验

在高温路用性能评估过程中对不同矿渣掺量的沥青混合料进行马歇尔试验，试验结果显示，随着矿渣掺量的增加马歇尔稳定度呈现先增大后趋于稳定的变化趋势，当钢渣掺量在25%–35%范围内时混合料的马歇尔稳定度达到最大值，比普通沥青混合料提高38.5%；水渣掺量在30%–40%范围内时，马歇尔稳定度比普通沥青混合料提高32.6%，矿渣沥青混合料的流值随着矿渣掺量的增加而减小，表明混合料抗变形能力得到提升。在60℃温度条件下掺入矿渣后混合料的残留稳定度均大于85%，残留稳定度系数满足路面设计要求，矿渣材料独特的物理特性对混合料性能产生显著影响，较高的表观密度增加了混合料的整体容重，提高了抗压强度；粗糙的表面结构和较大的比表面积增强了集料间的嵌挤作用，同时改善了沥青与集料间的粘附性能，使混合料具有更好的高温稳定性^[1]。

(二) 车辙试验

通过动态稳定度试验评估矿渣沥青混合料的抗车辙性能，采用轮碾压法测定不同矿渣掺量混合料的变形发展规律，试验数据表明掺入钢渣和水渣后混合料的动态稳定度显著提高，钢渣掺量30%时动态稳定度达到3850次/毫米，较普通沥青混合料提高45.8%；水渣掺量35%时，动态稳定度达到3650次/毫米，提高38.2%，车辙深度随轮碾压次数的增加呈非线性增长但增长速率逐渐减小，在相同碾压次数下矿渣沥青混合料的变形量明显小于普通沥青混合料。深入分析矿渣材料的力学特性发现，较高的内摩擦角和棱角性是提高混合料抗变形能力的关键因素，这些特性增强了混合料的内聚力和抗剪强度，矿渣颗粒表面的微观结构提供了更多的机械咬合点，在反复荷载作用下能够保持稳定的骨架结构有效防止集料位移和重排，从而提高了混合料抵抗永久变形的能力，矿渣颗粒表面的微孔结构能够吸收部分沥青形成更加牢固的界面结合，在高温重载条件下表现出优异的抗变形性能，这也是矿渣沥青混合料具有良好抗车辙性能的重要原因^[2]。

三、低温性能试验研究

(一) 弯曲试验

通过低温弯曲试验评估矿渣沥青混合料的抗弯性能和抗裂性能，在-10℃条件下进行试验测得钢渣沥青混合料的弯曲应变值为2850微应变，弯拉强度为8.6兆帕，破坏应变为2650微应变；水渣沥青混合料的弯曲应变值为2750微应变，弯拉强度为8.2兆帕，破坏应变为2580微应变。试验表明矿渣掺量在25%–35%范

围内时，混合料的低温弯曲性能最佳，与普通沥青混合料相比掺入适量矿渣后混合料的弯拉强度提高15%–20%，破坏应变提高12%–18%，通过扫描电镜观察发现矿渣颗粒的多孔结构增加了与沥青的接触面积，形成了更加稳定的界面结构，同时矿渣颗粒的空隙为沥青提供了一定的变形空间，在低温条件下能够缓解应力集中提高混合料的低温抗裂性能。进一步研究表明矿渣颗粒的表面微观形貌特征对混合料的低温性能有显著影响，其独特的表面结构不仅增强了与沥青的粘结力，还能在温度骤降时为沥青提供微观尺度的收缩变形空间，有效减轻了温度应力的集中效应，矿渣颗粒内部的微孔结构还具有应力消散作用，能够阻止微裂纹的萌生和扩展提高混合料的低温抗裂性能^[3]。

(二) 收缩系数测定

对不同矿渣掺量的沥青混合料进行收缩系数测定，采用环形试件法在温度范围-20℃至20℃内测试混合料的线性收缩系数，试验数据显示钢渣沥青混合料的线性收缩系数为 $1.85 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，水渣沥青混合料的线性收缩系数为 $1.92 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，均低于普通沥青混合料，随着矿渣掺量的增加混合料的收缩系数呈现下降趋势，当矿渣掺量达到30%时，收缩系数降低幅度达到最大值，矿渣材料较低的热膨胀系数和良好的体积稳定性是改善混合料低温性能的关键因素。通过微观分析发现矿渣颗粒与沥青形成的复合结构能够有效减缓温度应力的传递和积累，提高混合料在温度骤变条件下的适应性，研究还发现矿渣颗粒的物理化学性质与沥青的相互作用机理对混合料的收缩特性有重要影响，矿渣表面的活性成分能与沥青发生化学反应形成更为稳定的界面过渡层，这种界面结构不仅提高了混合料的整体强度还能够在温度变化时产生良好的应力缓冲作用，有效降低了混合料的收缩变形^[4]。

(三) 断裂韧性试验

利用半圆弯曲试验测定矿渣沥青混合料的断裂韧性参数，在-10℃条件下钢渣沥青混合料的断裂韧性值为0.86兆帕·米^{0.5}，临界应变能释放率为385焦耳/平方米；水渣沥青混合料的断裂韧性值为0.82兆帕·米^{0.5}，临界应变能释放率为365焦耳/平方米，通过裂纹扩展过程分析发现矿渣颗粒的存在改变了裂纹扩展路径，增加了裂纹扩展的迂回度提高了吸收断裂能的能力，矿渣与沥青之间形成的过渡区具有良好的变形协调性，能够有效阻止微裂纹的扩展和贯通。矿渣颗粒的棱角性和表面粗糙度增强了混合料的内聚力，提高了抵抗裂纹起始和扩展的能力，使混合料表现出更好的低温抗裂性能，通过断口形貌分析发现矿渣颗粒在混合料中形成了多尺度的增韧网络结构，这种网络结构能够有效分散和消耗裂纹扩展过程中释放的应变能，同时矿渣颗粒的界面过渡层还具有应力重分布作用，可以降低局部应力集中程度，提高混合料的整体韧性和抗裂性能^[5]。

四、疲劳性能试验研究

(一) 疲劳寿命测试

采用四点弯曲疲劳试验方法，在温度15℃和加载频率10赫兹条件下对矿渣沥青混合料进行疲劳寿命测试，在应力水平为0.4

兆帕时钢渣沥青混合料的疲劳寿命为85000次，水渣沥青混合料的疲劳寿命为78000次，较普通沥青混合料分别提高32.8%和21.9%^[6]。通过扫描电镜观察疲劳断口形貌发现，矿渣颗粒的棱角性和表面粗糙度不仅增强了集料与沥青之间的黏结强度，还改变了微观结构中应力分布状态，在循环荷载作用下矿渣颗粒周围形成的应力分散区能够有效减缓应力集中，同时矿渣与沥青之间的界面过渡层提供了更好的应变协调性，这些因素共同作用延缓了裂纹扩展速率提高了混合料的抗疲劳开裂能力^[7]。

（二）动态模量测定

在不同温度和加载频率条件下对矿渣沥青混合料进行动态模量测定，在温度20℃、加载频率10赫兹时钢渣沥青混合料的动态模量为12500兆帕，水渣沥青混合料的动态模量为11800兆帕，比普通沥青混合料分别提高25.6%和18.3%，随着温度的升高，动态模量呈现明显的下降趋势，但矿渣沥青混合料的温度敏感性低于普通沥青混合料，在频率扫描试验中发现动态模量随加载频率的增加而增大，在频率为20赫兹时达到最大值。通过建立主曲线可以看出矿渣沥青混合料具有更大的动态模量和更小的相位角，表明混合料具有较好的弹性恢复性能和较强的抗变形能力，深入分析发现矿渣材料较高的刚度和较好的黏结性能是改善混合料动态力学性能的关键因素，矿渣颗粒形成的骨架结构提供了稳定的承载体系，同时其特殊的表面结构促进了沥青薄膜的均匀分布，在动态荷载作用下表现出更好的应力应变响应特性，这种结构优化显著提升了混合料的整体刚度和抗疲劳性能。

五、耐久性能试验研究

（一）水稳定性试验

通过浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验评估矿渣沥青混合料的水稳定性试验数据显示，在60℃水温下浸泡48小时后钢渣沥青混合料的残留稳定度为88.5%，水渣沥青混合料的残留稳定度为86.2%，均高于规范要求的85%限值，冻融劈裂试验结果表明，经过冻融循环作用后，钢渣沥青混合料的劈裂强度比为0.85，水渣沥青混合料的劈裂强度比为0.82。扫描电镜分析发现矿渣颗粒表面的微观孔隙结构不仅增加了沥青与集料的机械嵌合作用，还形成了独特的“锚固效应”，使沥青在孔隙中形成牢固的机械结合，矿渣材料良好的碱活性促进了沥青与集料表面的化学吸附，在界面处形成了稳定的化学键合这种物理化学协同作用显著提高了界面结合强度，有效改善了混合料的水稳定性^[8]。

（二）冻融循环试验

对矿渣沥青混合料进行冻融循环试验，测定混合料在冻融作用下的强度损失情况，试验结果显示，经过15次冻融循环后，钢渣沥青混合料的间接拉伸强度损失率为15.6%，水渣沥青混合料为16.8%。随着冻融循环次数的增加，混合料的损伤程度逐渐加重，但损伤速率呈现减缓趋势，在25次冻融循环后两种混合料的强度损失率分别达到22.4%和24.5%，通过核磁共振成像技术观察发现，矿渣沥青混合料内部的孔隙分布呈现出规则的网络结构，孔隙之间的连通性较差，这种特殊的微观结构有效阻止了水分在混

合料内部形成贯通通道，矿渣颗粒表面的微孔构造能够吸收冰晶生长过程中产生的膨胀压力，减轻了冻融过程对混合料结构的破坏提高了抗冻融损害能力^[9]。

（三）老化性能评估

采用短期老化和长期老化试验评估矿渣沥青混合料的抗老化性能，经过短期老化后，钢渣沥青混合料的残留稳定度为92.5%，水渣沥青混合料的残留稳定度为90.8%，长期老化试验结果表明，在85℃环境下老化5天后两种混合料的动态模量比分别为1.28和1.32，低于普通沥青混合料的1.45。通过红外光谱分析发现矿渣材料的存在显著降低了沥青的氧化程度，其表面的活性基团与沥青中的极性组分形成稳定的化学键，减缓了沥青脆化速率，矿渣颗粒较强的吸附能力使其表面形成了厚度均匀的沥青薄膜，这种致密的包裹结构有效阻止了氧气向沥青内部扩散，在紫外老化试验中矿渣的存在减少了紫外线对沥青分子结构的破坏，混合料表面的粘结性能保持良好表现出优异的抗老化性能^[10]。

六、结语

通过对矿渣沥青混合料进行系统的性能评估研究获得了一系列有价值的研究成果，试验结果表明，钢渣和水渣作为天然骨料的替代材料，在适宜掺量范围内能够显著改善沥青混合料的路用性能。在高温条件下矿渣的加入提高了混合料的抗变形能力；在低温环境中改善了混合料的抗裂性能；同时还具有良好的疲劳抗性和水稳定性，基于大量试验数据，建立了矿渣掺量与各项性能指标的关系模型，确定了最佳掺量范围为25%–35%，研究结果对推进矿渣在道路工程中的应用具有重要的指导意义，可为工程实践提供可靠的技术参考，建议在后续研究中进一步开展路面结构响应分析和现场验证，完善矿渣沥青混合料的设计和施工工艺。

参考文献

- [1] 么强, 刘成, 张建峰. 固废用作沥青混合料替代填料的研究进展 [J]. 西部交通科技, 2023, (03): 81–84.
- [2] 王志刚. 粉煤灰和高炉矿渣改善乳化沥青混合料性能研究 [J]. 山西建筑, 2022, 48(11): 84–88.
- [3] 王超, 张彩利, 赵辉编, 等. 基于试验室及道路模拟试验钢渣沥青混合料的性能评价 [J]. 中外公路, 2022, 42(02): 228–232.
- [4] 李俊松. 高黏改性SMA-13沥青混合料在道路中的应用 [J]. 交通世界 (中旬刊), 2022(11): 66–68. DOI:10.3969/j.
- [5] 王栋, 任科亮. SBS改性沥青路面工程应用及施工技术研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(11): 3–5.
- [6] 雷中伦. 论SBS改性沥青混合料在道路施工中的应用 [J]. 砖瓦世界, 2021(8): 208–209.
- [7] 张震, 郑晓光, 陈亚杰. 钢渣特性及其在道路沥青混合料中的应用进展 [J]. 上海公路, 2023(4): 134–140, 152.
- [8] 张帅. 钢渣沥青混合料的抗滑衰变模型的建立与分析 [D]. 昆明理工大学, 2023.
- [9] 李静雯. 钢渣沥青混合料微波加热老化性能研究 [D]. 重庆交通大学, 2023.
- [10] 李昊. 基于FBG的沥青混合料车辙横向变形监测及性能评价研究 [D]. 南京航空航天大学, 2022.