露天矿运输道路水稳层改性材料综合性能研究*

黄敏[1,2,3]，温晨[1,2,3]，黄明发[1,2,3]，高忠[1,2,3]，饶帝军[1,2,3]

(1.紫金矿业集团股份有限公司， 福建 上杭县 364200；
2.紫金(长沙)工程技术有限公司， 湖南 长沙 410036；
3.低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室， 福建 上杭县 364200)

摘要：针对露天矿山传统碎石运输道路耐久性、水稳定差等问题，利用矿山周边固废对运输道路进行改性，通过实验室试验确定水稳层的爆破废石与周边土的比例，探讨含不同固化剂掺量水稳层的无侧限抗压强度、水稳定性能及耐久性能。研究结果表明，未改性材料的无侧限抗压强度低于0.2 MPa，而当爆破废石与路边土比例为4∶6时，可以充分发挥爆破废石强度且路面可以较好成形；固化剂可以显著提高材料强度，当固化剂掺量为8%时，无侧限抗压强度超过2.5 MPa，水稳性系数为137.68%，试样的饱水抗压强度超过初始无侧限抗压强度，在干湿循环试验中，试样抗压强度随着循环次数的增加先大幅增长后略微下降，当固化剂掺量大于6%时，耐久性有明显提升。采用石土比4∶6、掺量8%的组合开展弯沉值试验，并进行综合成本分析，结果显示，改性后路面弯沉值为9.07(0.01 mm)，路面质量显著提升，综合成本为47.5元/m^2，较原碎石路面成本降低明显。

关键词：露天矿运输；水泥稳定碎石层；改性路面；固化剂；无侧限抗压强度

中图分类号：TD57；TD315 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)06-0087-07

Comprehensive Performance of Modified Materials for Cement Stabilized Layer of Open-Pit Mine Transportation Road

HUANG Min[1,2,3], *WEN Chen*[1,2,3], *HUANG Mingfa*[1,2,3], *GAO Zhong*[1,2,3], *RAO Dijun*[1,2,3]

(1.Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang, Fujian 364200, China;
2.Zijin (Changsha) Engineering Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410036, China;
3.State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-grade Refractory Gold Ores, Shanghang, Fujian 364200, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor durability and water stability of traditional gravel transportation roads in open-pit mines, the transportation roads were modified using solid waste around the mine. The ratio of blasting waste rock and surrounding soil in the cement stabilized layer was determined by laboratory tests. The unconfined compressive strength, water stability and durability of the cement stabilized layer with different the dosages of curing agent were discussed. The results show that the unconfined compressive strength of the unmodified material is lower than 0.2 MPa, and when the ratio of blasting waste rock and surrounding soil is 4∶6, the strength of blasting waste rock can be fully utilized and the pavement can be well formed. The curing agent can significantly improve the strength of the material. When the dosage of curing agent is 8%, the unconfined compressive strength exceeds 2.5 MPa, the water stability coefficient is 137.68%, and the saturated compressive strength of the sample exceeds the initial unconfined compressive strength. In the dry-wet cycle test, the compressive strength of the sample increases significantly and then decreases slightly with the increase of the number of cycles. When the dosage of curing agent is more than 6%, the durability is significantly improved. The deflection value test and comprehensive cost analysis were carried out using the combination of stone-soil ratio of 4∶6 and dosage of 8%. The results show that the deflection value of the modified pavement is 9.07 (0.01 mm), the pavement quality was significantly improved, and the

* **收稿日期**：2024-07-26

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC2903900)；福建省自然科学基金项目(2019J05039)；福厦泉国家自主创新示范区协同创新平台项目(35022CQX72021009)

作者简介：黄敏(1985—)，男，湖南长沙人，博士研究生，高级工程师，主要从事采矿技术及岩石力学方面的研究工作。E-mail：397982842@qq.com

通信作者：温晨(1998—)，男，河南安阳人，硕士，助理工程师，主要从事控制爆破及岩石力学方面的研究工作。E-mail：1398448249@qq.com

comprehensive cost is 47.5 yuan/m^2, which is significantly lower than that of the original gravel pavement.

Key words: Open-pit mine transportation, Cement stabilized macadam layer, Modified pavement, Curing agent, Unconfined compressive strength

0 引言

金属矿山露天开采过程中,修建一条高质量且低成本的运输道路直接影响矿用运输车辆的运输效率和轮胎损耗,进而决定矿石及废料的运输成本[1]。成本控制一直是采矿业的核心关注点,有效控制成本有利于提高矿业公司的核心竞争力[2]。然而,在相当长的一段时间内,部分矿山管理人员认为矿山道路服务年限短且卡车牵引力好而忽视运输道路的质量,导致矿卡轮胎的损耗率较高、道路通行率低等[3]。因此,有效利用矿山周边材料修筑露天矿山运输道路,在保证道路质量的同时降低修筑成本具有重要的研究意义[4-5]。

朱晓寒[6]利用地聚合物材料将原有路面进行重筑以提高路面质量;赵彬宇[7]通过碱激发作用与矿渣、粉煤灰等材料生成一种强度高、耐用性强的水硬性胶凝材料;徐昆等[8]利用煤矿周边固废研究了矿渣粉煤灰掺量、水玻璃模数和水胶比对材料强度的影响;杨雨清[9]研究发现纤维材料与硅铝质添加剂能明显改善地聚合物力学性质;赵新佳[10]通过冻融试验发现,冻融前的试样破裂区以粉煤灰集聚为主,冻融后的试样破裂区以矿渣集聚为主。与高速公路不同,矿山道路的修筑往往过于粗犷,众多矿山仅采用碎石压实路面,缺少水稳层,这导致随着时间的推移,道路易于破损,因此,需借鉴高标准公路的修筑标准,并结合矿山附近的材料修筑适合大型卡车的矿山运输道路。

水稳层即水泥稳定碎石层(CSM),属于道路结构主要承载层中的半刚性基层,具有强度高、造价低、稳定性好、刚性大等优点,广泛应用于我国高速公路的修建中[11-13]。当前,公路工程领域学者通过在水稳层中添加聚丙烯纤维[14]、废弃橡胶粉[12]、活性再生砖粉[15]、红砂岩集料[16]、钢渣[17]、建筑垃圾[18]等改性材料改善水稳层性能,其作用类似于水泥钢纤维,可通过强度性能、水稳性能及耐久性能综合评估。

紫金山金铜矿自 2017 年采用多层多元露天矿运输道路结构后,其底基层为大直径爆破废石(直径为 80～150 mm),基层为中等直径爆破废石(直径为 20～80 mm),面层为爆破废石粉末(直径 0～20 mm)。现场实践结果表明,采用新型多元多层结构后露采运输道路轮胎磨损率开始下降,行车效率相对提升,但转弯处、上坡等部分路段仍面临着水稳定性差、耐久性差等问题。本文采用爆破废石和路边土作为主体筑路材料,水淬钢渣、水泥、生石灰作为固化剂原料,通过改变石土比和固化剂掺量,研究改性后水稳层的强度性能、水稳定性和耐久性,并开展工业试验,对比改性路面与改性前的碎石区域的弯沉值,验证其工程应用效果。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

爆破废石,由矿山破碎站生产,属于细料,直径为 20～80 mm,主要成分为石英(73.3%)、黄铁矿(12%)、明矾石(8.9%)、地开石(3.5%)。

路边土,主要由露天坑周围土、爆破废石粉末及部分淤泥组成,天然含水率高,孔隙率较大,经测定其天然含水率为 48.1%,塑限为 11.3%,液限为 31.2%,塑性指数为 19.5,最优含水率为 13.6%,最大干密度为 1.6 g/cm^3。

固化剂,由笔者团队自主研发,其主要成分为水淬钢渣 70%～85%,水泥 10%～15%,生石灰 5%～10%,活性指数 92,相对于水泥,固化剂具备良好的固化性能。此外,经液塑限测试可知,固化剂塑限为 23.2%,液限为 30.1%。

1.2 试验方法

1.2.1 强度性能试验

因本文研究未涉及露天矿山运输道路强度要求的相关规范,仅参考《公路路面基层施工技术细则》《土工试验方法标准》《公路土工试验规程》等公路类相关规范,开展无侧限抗压试验,对改性前后水稳层的强度特性进行评价。采用静压制样法制备试样,直径为 50 mm、高度 50 mm,根据前期击实试验及拌合含水率试验确定出最优的拌合含水率为 9.0%,并确定出非改性材料的最优配比,利用该配比开展不同固化剂掺量的强度试验,具体方案见表 1。

表 1 不同掺量和配比下无侧限抗压试验方案

Table 1 Unconfined compression test schemes under different dosage and ratio

试样	固化剂掺量/%	配比(石∶土)	拌合含水率/%	测试参数
爆破废石+路边土	0	3∶7, 4∶6, 5∶5, 6∶4, 7∶3	9	无侧限抗压强度 q_u
爆破废石+路边土+固化剂	2, 4, 6, 8, 10	最优配比	9	无侧限抗压强度 q_u

1.2.2 水稳定性能试验

水稳定性能即路基受水的影响程度,表现为路基的防水或抗水性能。通过真空饱水马歇尔试验进行评价,评价指标为水稳性系数 α,α 为试样真空饱和后测得的保水无侧限抗压强度与养护后直接测得的无侧限抗压强度的比值。仅对改性水稳层材料开展水稳定性能试验,试验方案见表 1,试样制备与前文相同。

1.2.3 耐久性能试验

本文主要研究干湿交替作用下改性水稳层的耐久性能,试验方案见表 1,试样制备与前文相同,干湿交替试验参考美国材料试验协会的 ASTM D4843 方法[19]。测试项目主要包括土样质量损失和无侧限抗压强度。

干湿交替试验满足土样累积质量损失率超过 30%、试样出现较明显的裂隙或损坏、干湿循环次数达 10 次(1 次干湿循环包括经历 1 次完整的干循环和 1 次完整的湿循环)任一条件时,试验结束。随后计算土样质量损失率,包括干燥质量损失率、润湿质量损失率、干湿质量损失率和累积质量损失率,其计算方法见式(1)。

$$\begin{cases} L_{Di}=\dfrac{M_{Di}-M_0}{M_0}\times 100\% \\ L_{Wi}=\dfrac{M_{Wi}-M_0}{M_0}\times 100\% \\ L_i=L_{Di}+L_{Wi} \\ C_{Li}=\sum_{i=1}^{n}L_i \end{cases} \tag{1}$$

式中:L_{Di} 和 L_{Wi} 分别为干燥和润湿过程中的土样质量损失率,%;M_{Di} 和 M_{Wi} 分别为干燥和润湿过程中的土样干质量损失,g;M_0 为土样干质量,g;L_i 为第 i 次干湿循环后的土样质量损失率,%;C_{Li} 为土样累积质量损失率,%。

2 试验结果及讨论

2.1 强度性能试验结果

参照《公路路面基层施工技术细则》,试验所采用的固化剂的主要成分为水淬钢渣,参照石灰粉煤灰稳定材料强度标准进行评价,但矿区自卸汽车载重较大且固化剂中含有一定量水泥,应同时考虑水泥粉煤灰稳定材料的强度标准。紫金山金铜矿露天采场运输车辆月出勤台数一般为 170～200 辆,日通行量小于 2 000 次(双车道),属于四级公路、中轻交通,综合考虑将石灰粉煤灰稳定材料强度 $q_{u1}=0.7$ MPa 和水泥粉煤灰稳定材料强度 $q_{u2}=2.5$ MPa 作为改性前后水稳层材料强度高低的判别标准。

不同配比下未改性水稳层的无侧限抗压强度试验结果如图 1 所示,其中 7∶3 配比因制备过程中试样石子裸露无法成型,不考虑此配比。由图 1 可知,未改性材料均不满足规范强度要求,试样的无侧限抗压强度随着爆破废石比例的增加呈先减小后增加(增加量十分有限)的趋势,当石土配比小于 4∶6 时,土的黏结作用对试样强度贡献较大;当石土配比大于 4∶6 时,石子的强度开始发挥作用,但当爆破废石掺量过大时,可能出现因土质成分不足而导致试样无法成型或压实度不符合要求等问题,因此选定配比为 4∶6 作为本文最优配比方案以开展后续试验。

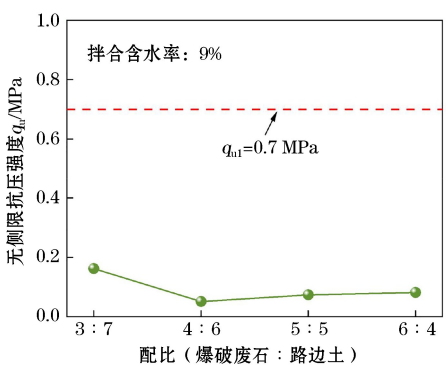


图 1 不同配比下未改性水稳层的无侧限抗压试验结果

Fig.1 Results of unconfined compression test of unmodified cement stabilized layer under different ratios

结合未改性水稳层的无侧限抗压试验结果所得结论开展不同固化剂掺量下改性水稳层的无侧限抗压试验,结果如图 2 所示。由图 2 可知,掺入固化剂后,水稳层的无侧限抗压强度明显提升,所有掺量下 q_u 均大于 q_{u1},且 q_u 随着固化剂掺量的增加而逐渐

增大,当固化剂掺量大于 8%时,满足规范中水泥粉煤灰稳定材料强度要求($q_u > q_{u2}$)。因此,为保证露天矿运输道路强度符合要求,改性水稳层材料的固化剂掺量应大于 8%。

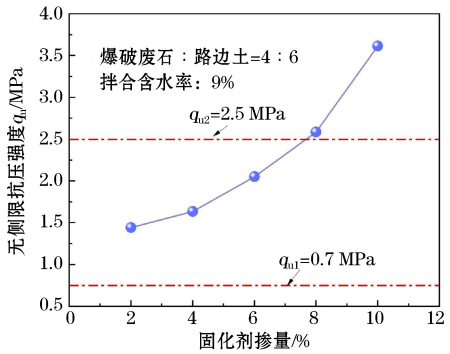


图 2 不同掺量下改性水稳层的无侧限抗压试验结果

Fig.2 Results of unconfined compression test of modified cement stabilized layer under different dosages

2.2 水稳定性能试验结果

水稳性系数只能反映材料水稳性能强弱,无法判断是否符合强度要求,因此,参考《公路路面基层施工技术细则》中石灰稳定土的 7 d 浸水抗压强度要求标准,即饱水抗压强度 $q'_u > 0.8$ MPa。不同固化剂掺量下水稳层的水稳性能试验结果如图 3 所示,由图 3 可知,试样的饱水抗压强度随着固化剂掺量的增加而增大,掺量大于 4%时满足强度要求。

此外,不同固化剂掺量下水稳性系数 α 同样随着掺量的提高而增大,当固化剂掺量为 8%时,水稳性系数为 137.68%,饱水抗压强度已超过初始无侧限抗压强度。在这种情况下,养护过程中由于含水量不足而无法进行的胶凝反应将在分级饱和过程中继续进行,试样的无侧限抗压强度持续提升,表现为饱水抗压强度大于初始抗压强度。

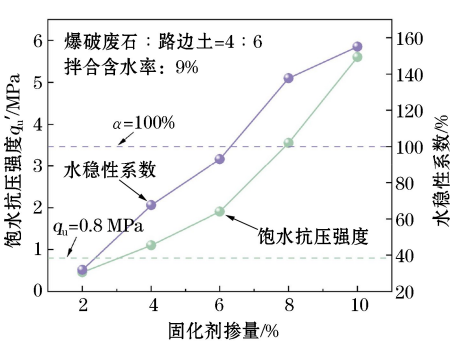


图 3 不同固化剂掺量下水稳层的水稳性能测试结果

Fig.3 Results of water stability performance test of cement stabilized layer under different dosages of curing agent

2.3 耐久性能试验结果

不同固化剂掺量下水稳层的耐久性能测试结果如图 4 所示。由图 4(a)可知,固化剂掺量为 2%和 4%时,试样未完成 10 次试验就发生了破坏;固化剂掺量为 6%、8%、10%时,试样质量损失率先增大后减小,7 次干湿循环之后基本维持在−0.5%~0.7%之间。由图 4(b)可知,固化剂掺量为 2%和 4%时,试样耐久性能较差,其发生破坏时累积质量损失率分别为−23.76%和−8.23%;固化剂掺量为 6%、8%、10%时,试样经 10 次干湿循环后的累计质量损失率约为−3.0%~−1.5%,完整性均较好。因此,当固化剂掺量超过 6%后,试样整体的耐久性能有明显提升。

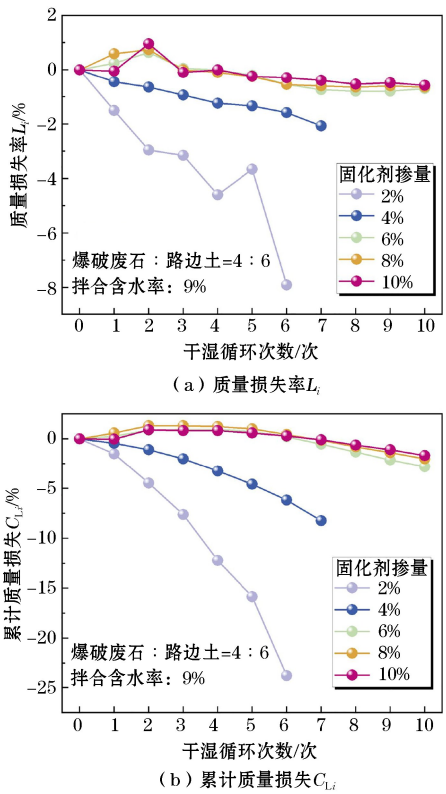


图 4 不同固化剂掺量下水稳层的耐久性能测试结果

Fig.4 Durability test results of cement stabilized layer under different dosages of curing agent

基于以上分析结果,干湿循环后试样的无侧限抗压强度如图 5 所示。由图 5 可知,前 3 次循环试验中,试样的无侧限抗压强度均有不同程度的提高,且无侧限抗压强度随着固化剂掺量的提高而增大,这是因为制样时掺入的固化剂在 28 d 的养护龄期内未完全消化,随着干湿循环试验的进行,试样发生系列反应(水化反应、火山灰反应、重金属氢氧化物

沉淀反应),相当于在增大孔隙水含量的同时延长了养护龄期,导致反应产物的胶结和填充作用愈加明显,进而引起水稳层材料强度持续提升。

继续进行试验,2%和4%掺量的试样其无侧限抗压强度急剧下降,并在第6次循环后发生破坏,而6%、8%和10%掺量的试样其强度仅略微下降后趋于稳定。产生这种变化的原因主要有两个方面:一是试样中的土质成分交替发生脱水收缩和吸水膨胀变形,从而在土颗粒的胶结点位产生循环应力,当干湿交替引起的土颗粒间应力超过土颗粒黏结强度时,土颗粒间团聚作用破坏,薄弱胶结点位分离,形成微裂隙,随着干湿循环作用次数的增加,微裂隙逐渐发育,在宏观上则表现为土体强度的降低;二是爆破废石含有一定量的金属,随着干湿循环次数的增加,土颗粒或爆破废石表面吸附的重金属逐渐解吸附,转化为孔隙水中的游离态重金属离子,根据双电层理论,黏土颗粒表面电位降低,吸附水膜变厚,土颗粒间的黏聚力降低,导致试样在宏观上表现为无侧限抗压强度降低。

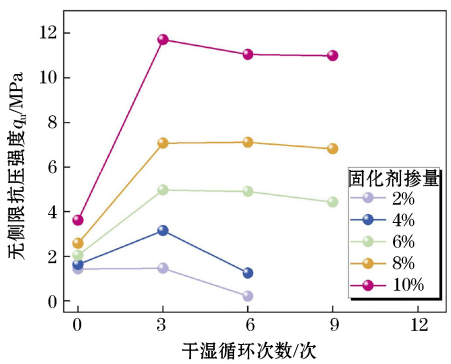


图5 干湿循环后无侧限抗压强度试验测试结果

Fig.5 Results of unconfined compressive strength test after dry-wet cycle

3 工业试验

3.1 工程概况

在紫金山金铜矿露天采场开展工业试验,选定含上坡、拐弯的一段碎石路面,位于730 m中段。采用路拌法按8%固化剂掺量与爆破废石细料、路边土均匀拌合,制成混合料,其中石土比为4∶6,拌合含水率为9%。拌合完成后采用分层压实法,使用25 t轮胎压路机分3层压实路面。

3.2 试验方法

弯沉值是指荷载作用于路基/路面前后,路基/路面产生的变形量大小,计算单位为0.01 mm。弯沉值可反映路面对变形的抵抗能力,弯沉值越低,路面在荷载作用下发生变形的可能性越小。本文采用贝克曼梁法开展弯沉试验,通过对比730 m中段原有碎石路面、730 m中段改性路面和670 m中段的一处破损路面的弯沉值来评价路面改性效果,每个区域选取5个测量点位,并取平均值。

3.3 试验结果分析

贝克曼梁法适用于测试路基及沥青路面的回弹弯沉。贝克曼梁法的基本原理是根据测试前后百分表读数变化来计算路面弯沉值,并基于气温、设计厚度、材料类型进行修正。而本研究中支点处不产生额外变形,无需进行支点变形修正。现场弯沉值测试结果见表2。由表2可知,相对于原有的碎石路面,改性路面的弯沉值显著降低,特别是670 m中段处的破损碎石路面,因路面压实较好且使用时间较短,随着使用时间的增加,路面发生破损严重,如果不能及时修补,路面承载和抗变形能力会急剧下降,严重损害路面质量。而改性后路面的弯沉值降低明显,有效提升了路面质量,工况较好。

表2 现场弯沉量测试结果

Table 2 Results of on-site deflection test

路面类型	测量弯沉值/(0.01 mm)	修正弯沉值/(0.01 mm)
730 m中段碎石路面	16.8	17.31
730 m中段改性路面	8.8	9.07
670 m中段破损路面	260.8	271.54

3.4 综合成本分析

通过现场调查分析,原碎石路面单价为28元/m^2,固化剂的成本为440元/t,筑路单价约为10.5元/m^2,而改性路面的机械和人工成本增加不明显,分析时不考虑该部分,计算可得改性路面相对成本为38.5元/m^2。

统计分析结果表明,原矿山碎石路面维护间隔为2个月,而改性路面维护间隔为6个月。单次维护费用预计为67.5万元,单价为4.5元/m^2,综合计算,原碎石路面成本为55元/m^2,改性路面成本为47.5元/m^2。

4 结论

本文基于无侧限抗压强度试验、真空饱水马歇尔试验、干湿循环试验及现场工业试验,研究了露天矿山运输道路水稳层改性材料性能,得到以下主要结论。

(1) 对不同爆破废石、路边土配比的未改性材料开展无侧限抗压强度试验,结果表明,爆破废石与路边土的配比为 4∶6 可以充分发挥爆破废石强度,路压实成形效果较好。

(2) 在改性水稳层的无侧限抗压强度试验中,当固化剂掺量超过 8%时,材料强度满足规范要求。

(3) 在改性水稳层的水稳性能测试试验中,当固化剂掺量大于 4%时,材料的饱水抗压强度满足强度要求,固化剂掺量为 8%时,水稳性系数为 137.68%,超过初始无侧限抗压强度。

(4) 在改性水稳层的干湿循环试验中,当固化剂掺量大于 6%时,试样的耐久性较好,无侧限抗压强度随着循环次数的增加先大幅增长后略微下降。

(5) 工业试验结果表明,改性路面弯沉值显著降低,有效提升了路面质量。改性路面成本为 47.5 元/m^2,原碎石路面成本为 55 元/m^2,改性路面成本降低明显。

参考文献(References):

[1] 韩智慧.露天煤矿采场运输道路平整度分级研究及应用[D].徐州:中国矿业大学,2023.
HAN Zhihui. Research and application of smoothness grading of transportation road in open-pit coal mining area [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2023.

[2] ZHAO Ziyu, BI Lin. A new challenge: path planning for autonomous truck of open-pit mines in the last transport section[J]. Applied Sciences,2020,10(18):6622.

[3] 覃怀锐.露天矿道路重塑流程及筑路工艺研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
QIN Huairui. Study on road remodeling process and road construction technology of open pit-mine[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2022.

[4] CHEN Keyu, WU Dazhi, YI Ming, et al. Mechanical and durability properties of metakaolin blended with slag geopolymer mortars used for pavement repair [J]. Construction and Building Materials,2021,281:122566.

[5] 黄泽斌.提高露天矿山采区道路修筑与养护质量的措施[J].金属矿山,2008(2):149-151.
HUANG Zebin. Measures to improve the road construction and maintenance quality in the open-pit mining area[J]. Metal Mine,2008(2):149-151.

[6] 朱晓寒.基于地聚合物改性的露天矿山道路力学及疲劳性能研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
ZHU Xiaohan. Study on mechanics and fatigue properties of open-pit mine road based on geopolymer modification[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2022.

[7] 赵彬宇.基于碱激发胶凝材料的露天煤矿重塑道路泛霜试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
ZHAO Binyu. Experimental study on salt frost precipitation of remolded road in open pit coal mine based on alkali activated cementitious material [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2022.

[8] 徐昆,刘宇,杨雨清,等.基于粉煤灰-矿渣地聚合物的露天矿山运输道路筑路工艺研究[J].煤炭工程,2021,53(增刊1):13-17.
XU Kun, LIU Yu, YANG Yuqing, et al. Construction technology of open pit mine transportation road based on fly ash slag geopolymer[J]. Coal Engineering,2021,53(Suppl.1):13-17.

[9] 杨雨清.露天矿山地聚合物路面材料与道路结构设计研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.
YANG Yuqing. Research on polymer pavement materials and road structure design in open pit mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2023.

[10] 赵新佳.基于地聚物改性的高寒露天煤矿道路冻融损伤试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
ZHAO Xinjia. Experimental study on freeze-thaw damage of high-cold surface coal mine road based on geopolymer modification[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2022.

[11] 张阳,王傲鹏,张靖霖,等.水泥稳定碎石材料干燥收缩研究综述[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(2):297-311.
ZHANG Yang, WANG Aopeng, ZHANG Jinglin, et al. Dry shrinkage in cement-stabilized macadam: a review[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2023,53(2):297-311.

[12] 王可良,李淑媛,范圣伟,等.废弃橡胶粉对水泥稳定碎石抗疲劳性能的影响[J].建筑材料学报,2024,27(1):84-89+98.
WANG Keliang, LI Shuyuan, FAN Shengwei, et al. Effect of waste rubber powder on fatigue performance of cement stabilized gravel[J]. Journal of Building Materials,2024,27(1):84-89+98.

[13] 蒋应军.水泥稳定碎石基层收缩裂缝防治研究[D].西安:长安大学,2001.
JIANG Yingjun. Study on the shrinkage crack prevention and cure problem on the stable crushed stones base[D]. Xi'an:Chang'an University,2001.

[14] 袁龄卿,梁乃兴,赵春花,等.PVA 纤维分散程度对水泥砂浆和水泥稳定碎石力学性能的影响[J].建筑材料学报,2021,24(5):921-929.
YUAN Lingqing, LIANG Naixing, ZHAO Chunhua, et al. Effect of PVA fibers dispersion on mechanical properties of cement mortar and cement stabilized macadam[J]. Journal of Building Materials,2021,24(5):921-929.

[15] 刘鑫.再生砖粉活性及其在道路水稳层中的应用研究[J].公路,2023,68(4):70-75.

LIU Xin. Research on the activity of waste sintered recycled brick powder and its application in road water stability layer [J]. Highway,2023,68(4):70-75.

[16] 陈福玲,温郁斌,单俊鸿,等.红砂岩集料对水稳基层强度与抗软化性能的影响[J].硅酸盐通报,2022,41(9):3138-3147. CHEN Fuling, WEN Yubin, SHAN Junhong, et al. Influence of red sandstone aggregate on strength and softening resistance performance of cement stabilized base [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2022,41(9):3138-3147.

[17] 杨义,谭波,李育林,等.基于碱激发下精炼钢渣水稳基层材料制备及性能[J].桂林理工大学学报,2022,42(4):905-909. YANG Yi, TAN Bo, LI Yulin, et al. Preparation and properties of water stabilized base material of refined steel slag based on alkali excitation [J]. Journal of Guilin University of Technology,2022,42(4):905-909.

[18] 曾梦澜,田振,肖杰,等.含建筑垃圾水稳碎石路面基层材料的使用性能[J].武汉理工大学学报,2016,38(1):34-38. ZENG Menglan, TIAN Zhen, XIAO Jie, et al. Performance of cement stabilized crushed stone pavement base materials containing construction waste [J]. Journal of Wuhan University of Technology,2016,38(1):34-38.

[19] American Society for Testing Materials. Standard test methods for wetting and drying test of solid wastes [S]. Washington:American Society for Testing Materials,2009.