

钢渣矿粉煤矸石混合料的路用性能

孟文清¹, 吴依同¹, 张亚鹏¹, 刘金堂², 崔邯龙¹

(1. 河北工程大学土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 邯郸钢铁集团有限责任公司, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为了探究无碱激发剂的钢渣矿粉煤矸石混合料的力学性能, 以邯郸地区产出的固废类材料煤矸石、钢渣和矿粉为研究对象, 进行混合料力学性能实验研究, 实验表明, 混合料力学性能良好, 具有较高的工程应用价值。利用 Minitab 建立回归分析模型, 得到掺合料的相对掺量与力学性能间的回归方程, 方程可以有效揭示目标强度值和相对掺量间的关系, 可根据工程实际提供混合料配合比。利用 XRD 和 SEM 测试手段, 分析混合料在无碱激发剂环境下的强度形成机理, 对试样物相组成和微观结构进行分析研究, 结果表明, 该混合料的三种掺合料, 可以生成大量相互搭接且结构致密的凝胶材料, 使该混合料具有良好的力学性能。

关键词: 煤矸石混合料; 力学性能; 耐久性能; 回归分析; 微观结构

doi:10.12476/kczhly.202210260678

中图分类号: TU521.2+3 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 05-0182-08

引用格式: 孟文清, 吴依同, 张亚鹏, 等. 钢渣矿粉煤矸石混合料的路用性能[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(5): 182-189.

MENG Wenqing, WU Yitong, ZHANG Yapeng, et al. Mechanical properties of gangue-steel slag-ore powder mixture[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(5): 182-189.

煤矸石是与煤伴生的岩石, 是在煤炭开采和洗选加工过程中被分离出来的固体废弃物, 是目前堆存量最大的矿业废料之一^[1]。钢渣作为炼钢过程的主要副产物之一, 其产量随着工业的快速发展而迅速递增, 在建材行业利用时普遍具有掺入量低, 从而不能大规模利用的问题^[2]。矿粉是粒化高炉矿渣经过烘干/磨细(筛选)所得的矿石。传统煤矸石混合料设计思路是以石灰、水泥等作为激发剂, 激发煤矸石等工业固废材料中的活性成分, 但是随着我国“碳中和、碳达峰”目标的提出, 传统激发剂的生产和使用受到限制^[3]。将钢渣、矿粉掺入煤矸石制成混合料, 作为道路填料在道路工程中应用, 不仅可以减少水泥等材料的使用, 减少建筑成本, 做到绿色环保, 并且实现大量废弃物的重新利用, 解决因堆集而产生的环境问题, 显示出了明显的经济和社会效益^[4-5]。

以邯郸地区产出的煤矸石、钢渣和矿粉为研究对象, 利用均匀设计出 6 组不同配合比的无碱激发的混合料, 进行 7 d 无侧限抗压强度、180 d 脆裂抗拉强度和 180 d 抗压回弹模量实验, 验证该混合料的力学性能。通过 XRD 和 SEM 检测, 对水化产物形貌与结构进行分析与判定, 研究混合料强度形成机理, 结果表明三种掺合料, 在无碱激发剂环境下可以互相促进水化反应, 生成大量相互搭接, 结构致密的凝胶材料, 提高试块后期强度, 使该混合料具有良好的力学性能。

1 材料与方法研究

1.1 煤矸石主要技术指标

实验选用的煤矸石为邯郸地区的自然煤矸石, 主要化学成分见表 1, 其他技术指标见表 2。

收稿日期: 2022-10-26

基金项目: 邯郸市科学技术研究与发展计划方向 (21422111281, 21422091238, 214422053007); 河北工程大学创新基金项目 (SJ2101003131)

作者简介: 孟文清 (1966-), 男, 教授, 主要从事结构工程和路用固废材料的研究。

通信作者: 张亚鹏 (1977-), 女, 副教授, 研究方向为结构工程和路用固废材料。

表1 煤矸石主要化学成分 单位: %

Table 1 Chemical composition of coal gangues

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	CaO	SO ₃	Na ₂ O
54.72	26.89	6.33	1.08	4.00	2.84	1.99	1.19

表2 煤矸石主要技术指标

Table 2 Main technical indicators of coal gangues

指标	堆积密度 /(g/cm ³)	压碎值 /%	烧失量 /%	吸水率 /%	自由膨胀率 /%	耐崩解性 /%
实验结果	2.27	27.5	10.47	3.16	12.33	94.23

本文所选用的煤矸石以碳质页岩为主, 具有较好的体积稳定性, 满足 JTGT 3610—2019《公路路基施工技术规范》和 JTGD 30—2015《公路路基设计规范》要求。

1.2 钢渣

本文选用的钢渣采集自邯郸市某钢厂, 主要化学成分见表3, 其他技术指标见表4。

表3 钢渣主要化学成分 单位: %

Table 3 Chemical composition of steel slags

CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂
39.07	10.56	9.32	7.47	5.70	1.97	1.27	0.68

表4 钢渣主要技术指标

Table 4 Main technical indicators of steel slags

指标	表观相对堆积密度 /(g/cm ³)	吸水率 /%	浸水膨胀率 /%	压碎值 /%
实验结果	3.40	1.98	1.54	24.00

1.3 矿粉

矿粉样品为邯郸某建材公司的 S95 级矿粉, 主要化学成分见表5, 其他技术指标见表6。

表5 矿粉主要化学成分 单位: %

Table 5 Chemical composition of mineral powder

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	其他
39.47	33.98	15.18	7.77	0.028	0.77	0.71	2.09

混合料所选用的矿粉满足 GB/T 18046—2017《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》的指标要求。

1.4 实验方法

本文 7 d 无侧限抗压强度、180 d 剥裂抗拉强度和 180 d 抗压回弹模量实验参照 JTGE 50—2009《公路工程无机结合料稳定材料实验规程》进行。其中 7 d 无侧限抗压强度共六组, 每组制作试件 13 块, 在标准养护条件下养护 7 d 后采用 TL127- II 型道路材料的强度测定仪进行强度测试, 实验结果采用 3 倍均方差方法剔除异常值,

表6 矿粉主要技术指标

Table 6 Main technical indicators of mineral powder

项目名称	标准值	实验结果
密度/(g/cm ³)	≥2.8	2.90
比表面积/(m ² /kg)	≥400.0	428.00
活性指数 7 d/%	≥70.0	86.00
28 d/%	≥95.0	100.00
流动度比/%	≥95.0	100.00
凝结时间比/%	≤200.0	136.00
不溶物/%	≤3.0	0.02
含水量/%	≤1.0	0.10
烧失量/%	≤3.0	0.10
玻璃体含量/%	≥85.0	87.00

保证同一组实验的变异系数 $C_v \leq 15\%$ 。180 d 剥裂抗拉强度实验采用 WDW-50 防水卷材电子万能实验机, 每组试件 13 块, 共六组, 每一组实验的变异系数 C_v 均小于 15%。180 d 抗压回弹模量实验采用 WDW-50 防水卷材电子万能实验机, 每组试件 15 块, 共六组, 每一组实验的变异系数 C_v 均小于 15%。

本文 28 d 冻融循环实验参照 T 0858—2009《无机结合料实验规程》稳定材料冻融实验方法, 每组配比制作实验组试件 9 块, 对照组试件 9 块, 冻融组在 -20 ℃ 气冻箱中进行五次冻融实验, 并用 TL127- II 型道路材料的强度测定仪测定冻融后强度。由于没有干湿循环实验的相关规范, 本文在阅读大量文献的基础上, 参考前人的方案进行实验。试件标准养护 28 d 后, 放入 (20 ± 2) ℃ 的水中浸泡 24 h, 水面高于试件 2.5 cm。对照组试件泡水 24 h 后, 参照 T 0858—2009《无机结合料实验规程》进行无侧限抗压强度测试。干湿组试件放入 85 ℃ 烘箱中烘干 12 h, 放入烘箱时, 试块之间需要间隔 20 mm 以上。烘干完毕后放入 (20 ± 2) ℃ 的水中浸泡 8 h, 泡水完成后为一个循环。完成 15 次干湿循环或实验过程中质量损失超过 5% 则终止实验。本文根据 YB/T 4184—2018《钢渣集料混合料路面基层施工技术规程》的要求进行浸水膨胀率实验, 每组设置对照组试件、实验组试件各 9 块, 并采用 TL127- II 型道路材料的强度测定仪测定强度。

2 混合料配合比设计

由预实验结果确定实验用各原材料占煤矸石

混合料的质量百分数范围：煤矸石为 55.0%~75.0%；钢渣为 20.0%~40.0%；矿粉为 2.0%~5.0%。本文采用以煤矸石质量为基准的基准配合比方式，即各原材料的掺入量为相对掺入煤矸石质量的百分数 (煤矸石:钢渣:矿粉=1: x_1 : x_2)。对 x_1 、 x_2 各设置 6 个水平，进行均匀设计。结合各原材料的质量百分数范围和水平，调整原材料的配合比范围为：煤矸石 100%；钢渣为 30.0%~72.0%；矿粉为 3.17%~7.83%。选用均匀设计表 $U_6^*(6)$ 设计实验，根据均匀设计表及其使用表，得到均匀设计配合比，将结果换算得到实验中混合料中煤矸石、钢渣和矿粉质量百分数见表 7。

表 7 实验配合比方案
Table 7 Test matching protocol

配合比方案编号	1	2	3	4	5	6
煤矸石/%	74.5	69.3	64.7	63.2	59.3	55.9
钢渣/%	22.4	26.6	30.3	34.8	37.7	40.3
矿粉/%	3.1	4.1	5.0	2.0	3.0	3.8

3 结果与讨论

3.1 力学性能结果与讨论

3.1.1 无侧限抗压强度

根据煤矸石混合料的配合比方案，按照 JTGE 50—2009《公路工程无机结合料稳定材料实验规程》，进行七天无侧限抗压实验。

实验测得每组实验试块无侧限抗压强度，结果见表 8，同组实验变异系数满足 C_v 小于规定值 15% 的要求^[6]。

表 8 混合料饱水无侧限抗压强度

Table 8 Mixture saturated with water without lateral limit compressive strength

配合比方案编号	1	2	3	4	5	6
七天无侧限抗压强度/MPa	2.14	2.74	4.05	2.24	4.81	6.46

运用 Minitab 软件建立拟合回归方程，建立两项掺合料的相对掺量与混合料的无侧限抗压强度的回归方程如下：

$$R_C = 3.34 - 18.78x_1 + 48.7x_2 + 26.7x_1^2 \quad (1)$$

在该回归方程的摘要汇总中，复相关系数 $R^2=0.979$ ，方差分析显著性分析结果 $P=0.031$ 小于 0.05，表明回归方程拟合情况较好，能够较好地解释自变量与因变量之间的变化关系，该回归方程比较合适。

根据已建立的回归模型，用 Minitab 软件在均匀设计的范围内对其绘制成图，结果见图 1。

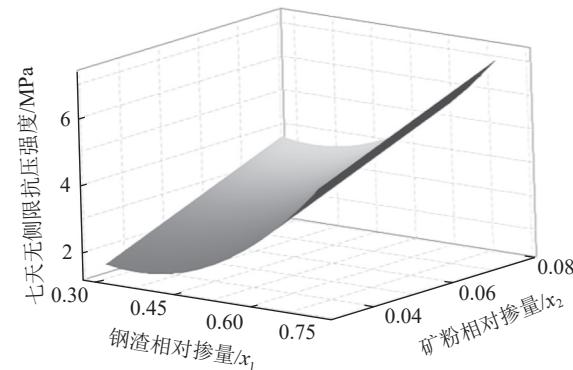


图 1 R_C 与 x_1 、 x_2 的曲面
Fig.1 Surfaces of R_C with x_1 and x_2

分析图 1 和回归方程可得，在本次实验的均匀设计配合比范围内，混合料中钢渣、矿粉的相对掺量对七天无侧限抗压强度的影响有显著性意义，且矿粉的相对掺量对强度影响趋势呈正相关线性，而钢渣的相对掺量对强度影响呈非线性上升趋势。

3.1.2 抗压回弹模量

按照 JTGE 50—2009《公路工程无机结合料稳定材料实验规程》进行回弹模量实验，实验结果见表 9，同组实验变异系数满足 C_v 小于规定值 15% 的要求^[7]。

表 9 不同龄期下混合料的抗压回弹模量

Table 9 Compression resilience modulus of mixtures at different ages

配合比方案编号	1	2	3	4	5	6
抗压回弹模量/MPa	954	966	1 000	1 030	1 011	1 098

运用 Minitab 软件建立拟合回归方程，建立两项掺合料的相对掺量与混合料的抗压回弹模量的回归方程如下：

$$E_C = 1274 - 591x_1 - 8500x_2 + 871x_1^2 + 79806x_2^2 \quad (2)$$

在该回归方程的摘要汇总中，复相关系数 $R^2=0.956$ ，方差分析显著性分析结果 $P=0.039$ 小于 0.05，表明回归方程拟合情况较好，能够较好地解释自变量与因变量之间的变化关系，该回归方程比较合适。

根据已建立的回归模型，用 Minitab 软件在均匀设计的范围内对其绘制成图，结果见图 2。

分析图 2 和回归方程可得，在本次实验的均

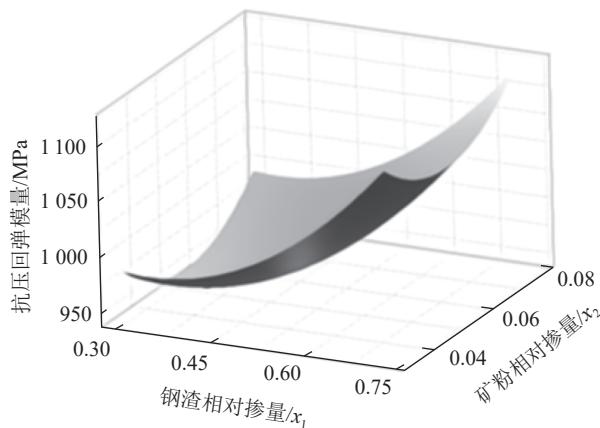


图2 E_c 与 x_1 、 x_2 的曲面
Fig.2 Surface of E_c and x_1 、 x_2

匀设计配合比范围内,混合料中钢渣、矿粉的相对掺量对抗压回弹模量的影响有显著性意义,混合料抗压回弹模量随着钢渣相对掺量的增加呈整体上升趋势,随着矿粉相对掺量的增加呈非线性上升趋势。

3.1.3 剥裂抗拉强度

按照 JTGE 50—2009《公路工程无机结合料稳定材料实验规程》进行煤矸石钢渣石灰混合料的剥裂抗拉强度实验,实验结果见表10,同组实验变异系数满足 C_v 小于规定值 15% 的要求。

表 10 不同龄期下混合料的剥裂抗拉强度
Table 10 Cracking tensile strength of mixtures at different ages

配合比方案编号	1	2	3	4	5	6
剥裂抗拉强度/MPa	0.66	0.77	0.79	0.74	0.82	0.83

运用 Minitab 软件建立拟合回归方程,建立两项掺合料的相对掺量与混合料剥裂抗拉强度的回归方程如下:

$$R_i = 0.5286 + 0.2863x_1 + 1.720x_2 \quad (3)$$

在该回归方程的摘要汇总中,复相关系数 $R^2=0.988$,方差分析显著性分析结果 $P=0.007$ 小于 0.05,表明回归方程拟合情况较好,能够较好地解释自变量与因变量之间的变化关系,该回归方程比较合适。

根据已建立的回归模型,用 Minitab 软件在均匀设计的范围内对其绘制成图,结果见图3。

分析图3和回归方程可得,在本次实验的均匀设计配合比范围内,混合料剥裂抗拉强度与钢渣相对掺量和矿粉相对掺量均呈线性正相关。

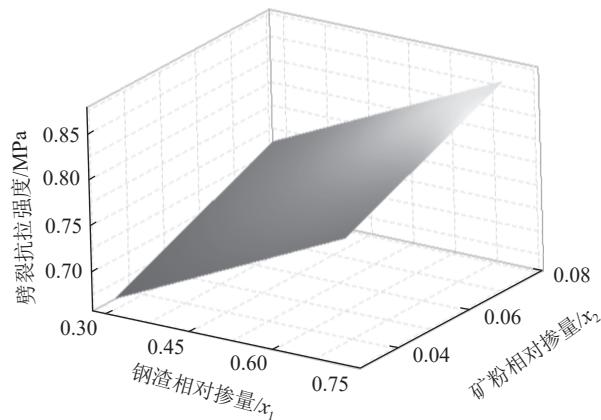


图3 R_i 与 x_1 、 x_2 的曲面
Fig.3 Surface of R_i and x_1 、 x_2

由三个回归模型可得,在混合料中煤矸石掺量为 55%~75%;钢渣掺量为 20%~40%;矿粉掺量为 2.0%~5.0% 的范围内,钢渣矿粉煤矸石混合料的三大力学性能变化趋势相似,钢渣和矿粉的掺入有效提高了混合料路用价值,能够满足 JTGD 2182—2020《公路工程质量检验评定标准》,半刚性基层和底基层材料的强度评定要求,且回归方程可以有效预报目标强度值和相对掺量间的关系,针对工程实际需要给出合理混合料配合比^[8]。

3.2 耐久性能结果与讨论

3.2.1 冻融循环实验

为了验证该混合料抗冻性能,根据 3.1 中实验结果,选取具有代表性的配合比 1 和配合比 6,参照 T 0858—2009《无机结合料实验规程》稳定材料冻融实验方法进行冻融循环实验,实验结果见表11。

表 11 混合料冻融循环实验结果

Table 11 Freeze-thaw cycle test results of mixtures

配合比 编号	对照组/ MPa	冻融循环组/ MPa	BDR值/ %	质量损失率/ %
1	5.06	3.62	71.54	2.13
6	13.73	10.59	77.13	1.77

结果显示两组配合比混合料在 5 个循环中质量损失均小于 5%, BDR 值大于 70%,说明混合料具有较好的抗冻性能,应用于道路路面基层时不存在冻裂,冻胀等工程隐患。结合混合料化学反应机理分析可知^[9],钢渣的掺入有效提高了混合料的路用抗冻性能。

3.2.2 干湿循环实验

由于没有干湿循环实验的相关规范,本文在阅读大量文献的基础上,参考前人的方案进行实验。

试件标准养护 28 d 后,放入 (20±2) °C 的水

中浸泡 24 h, 水面高于试件 2.5 cm。对照组试件泡水 24 h 后, 参照 T 0858—2009《无机结合料实验规程》进行无侧限抗压强度测试^[10]。

干湿组试件放入 85 ℃ 烘箱中烘干 12 h, 放入烘箱时, 试块之间需要间隔 20 mm 以上。烘干完毕后放入 (20±2) ℃ 的水中浸泡 8 h, 泡水完成后为一个循环。完成 15 次干湿循环或实验过程中质量损失超过 5% 则终止实验。

对照组和干湿循环组的实验结果见表 12, 变异系数小于 15%。

表 12 混合料干湿循环实验结果

Table 12 Mixture dry and wet cycle test results

对照组/MPa	干湿循环组/MPa	强度变化率/%	质量变化率/%
4.86	5.12	5.35	0.87

表 13 混合料浸水膨胀实验结果
Table 13 Mixture immersion expansion test results

浸水时间/d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
配合比1体积膨胀率/%	0.09	0.16	0.23	0.25	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
配合比6体积膨胀率/%	0.13	0.21	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28

结果显示混合料 10 d 浸水膨胀率小于 1.5%, 不存在膨胀隐患。混合料 5 d 后体积膨胀率不再发生变化, 这是由于矿粉的掺入对钢渣集料的膨胀存在抑制作用, 有效提高了混合料水稳性能。

三项实验结果表明, 该混合料具有良好的抗冻性能和水稳性能, 钢渣的掺入提高了混合料的耐久性能, 矿粉的掺入不仅能够代替常见碱性激发物质, 同时解决了钢渣因膨胀而不能大规模应用的问题, 具有较好的经济和社会效益。

3.3 微观分析

材料的组成影响其宏观性能和微观结构, 微观结构的改变, 导致宏观性能也发生变化。混合料中材料与水不断反应, 生成新物质, 影响试件力学性能发展进程, 由于材料组分复杂且多样, 因此, 需要对水化产物形貌与结构进行分析与判定, 研究混合料水化机理, 分析水化反应的主要影响因素^[11-12]。

通过 XRD 测试, 对不同养护龄期的混合料时间进行表征分析见图 4。由 XRD 可知, 混合料水化产物主要有 $\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2$ 、水化硅酸钙凝胶 (C-S-H) 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。试块 7 d 和 180 d 龄期内 XRD 相差较大, 随着养护龄期的延长, $\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2$ 和 C-S-H 含量逐渐增加, 衍射峰逐渐增强。说明试块在养护龄期内, 水化到一定程度, 水化产物大量

由表 12 中的实验结果可知, 对照组无侧限抗压强度经过 15 次干湿循环后, 增长了 0.26 MPa, 提升了 5.35%。结合无机结合料无侧限强度增长规律可知, 28 d 混合料的强度仍处于快速增长阶段, 在干湿循环过程中, 混合料内部的活性物质仍在发生水化反应, 经过 15 次干湿循环后, 强度总体呈上升趋势, 这说明煤矸石钢渣混合料作为路面基层应用有较好的水稳定性。

3.2.3 稳定性实验

为保证钢渣混合料在使用过程中不会因钢渣遇水膨胀而导致路面病害, 对钢渣混合料进行浸水膨胀率检测实验。按照 GTB 24175—2009《钢渣稳定性实验方法》进行浸水膨胀实验, 实验结果见表 13。

生成, 主要水化产物 C-S-H 凝胶特征峰和 $\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2$ 特征峰峰值均有明显上升^[13]。

7 d 龄期的 XRD 显示混合料内存在部分未参与化学反应的 SiO_2 , 和大量水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 凝胶。这是矿粉中大量存在的 CaO 水化生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 并为后续反应提供了碱性环境。经过水化生成 C-S-H 凝胶, 增加黏结效果, 提高了混合料 7 d 无侧限抗压强度。

180 d 龄期的 XRD 仍存在部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 凝胶, 但 SiO_2 衍射峰显著减弱, 这是因为矿粉掺料中的活性 SiO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和高碱性的 C-S-H 凝胶发生二次水化反应。二次水化反应不仅消耗了剩余 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 而且生成了 $\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2$ 等水化产物, 提高了钢渣集料的体积稳定性。矿粉的掺入, 有利于掺合料协同发挥晶核效应, 促进水化反应进行, 提高试块的力学性能。

对混合料不同龄期的 SEM 扫描见图 5。由图 5(a) 可知, 龄期为 7 d 的 SEM 显示, 养护初期水化产物数量少, 水化反应还未完全进行, 结构体系存在大孔隙, 且数量多, 结构稀疏。可以明显看出较少量不规则形团簇状的 C-S-H 凝胶、针棒状的钙矾石和未水化的矿粉颗粒^[14]。此时未水化的矿粉掺料, 粒径细, 发挥填充效应, 填补了骨架结构的空隙, 由于养护早期水化胶凝材料数

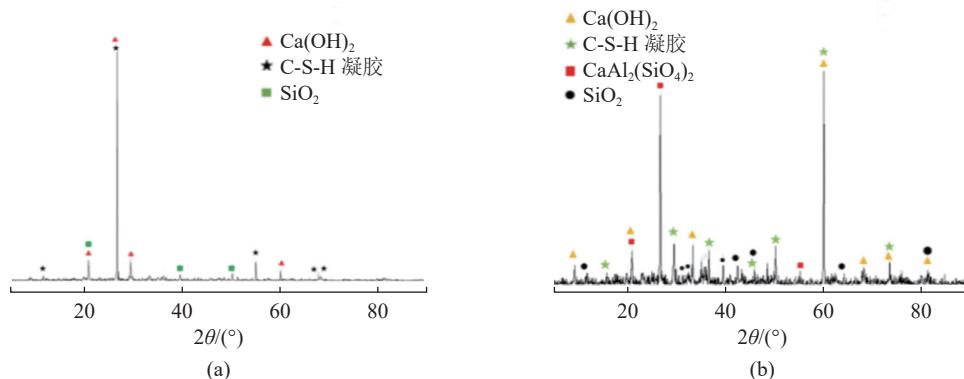


图4 混合料养护的XRD
Fig.4 XRD patterns at different time

量少, 整个体系内部水化胶凝效果不明显, 微观结构上存在孔隙较多, 在宏观上表现为, 试样7 d无侧限抗压强度较低。

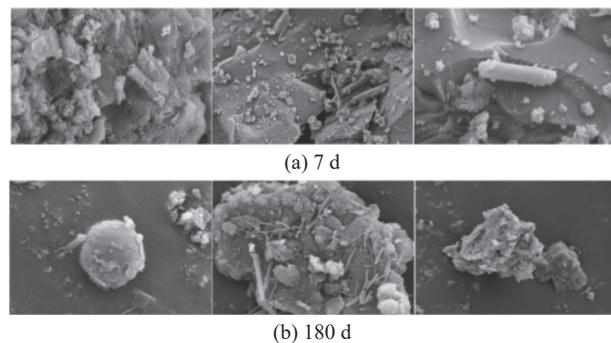


图5 混合料养护的SEM
Fig.5 SEM at different time

由图5(b)可知, 180 d龄期试块与7 d相比, 胶凝材料体系水化充分, C-S-H凝胶与 $\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2$ 相互搭接, 结构致密, 在水化体系内, 基本看不到未水化的矿粉颗粒, 生成C-S-H凝胶和硅酸铝钙数量增多, 孔隙数量减少。部分较少 SiO_2 , 未参加化学反应, 在胶凝体系中发挥晶核效应、填充效应, C-S-H凝胶与 $\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2$, 形成网状结构, 六角板状氢氧化钙包裹在C-S-H凝胶内部, 整个结构体系致密, 力学性能大幅提高, 与实验结果契合^[15]。

由X衍射分析和扫描电镜实验结果可得, 钢渣矿粉煤矸石混合料早期水化产物以 Ca(OH)_2 和C-S-H凝胶为主, 但凝胶材料生成较少, 晶体排布无序且较为疏松, 内部存在部分空隙, 力学性能有待进一步提升。180 d时生成大量水化产物C-S-H凝胶与 $\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2$, 团簇分布, 堆积密实, 混合料力学性能较早期大幅上升^[16]。微观形貌分析

表明, 三种掺合料在无传统碱激发剂掺入的环境下可以互相促进水化反应进行, 生成大量相互搭接, 结构致密的凝胶材料, 提高试块后期强度, 使该混合料具有良好的力学性能。

4 结 论

(1) 通过均匀实验, 在混合料中煤矸石掺量为55.0%~75.0%; 钢渣掺量为20%~40%; 矿粉掺量为2.0%~5.0% 的范围内, 钢渣矿粉煤矸石混合料具有较好的力学性能, 7 d无侧限抗压强度、180 d抗压回弹模量和180 d劈裂抗拉强度能够满足JTG 2182—2020《公路工程质量检验评定标准》, 半刚性基层和底基层材料的强度评定要求。

(2) 通过均匀实验和回归分析, 得到钢渣和矿粉的相对掺量 x_1 、 x_2 与7 d无侧限抗压强度、抗压回弹模量和劈裂抗拉强度之间的回归方程, 表明混合料的力学性能受钢渣和矿粉掺量变化的显著影响, 整体随着钢渣和矿粉的掺入而提高, 呈现相似的变化趋势。方程可以有效揭示目标强度值与相对掺量间的关系, 可根据工程实际提供混合料配合比。

(3) 通过冻融循环实验、干湿循环实验和浸水膨胀实验验证了该混合料具有较好的耐久性能, 在道路工程应用中具有较好的经济和社会效益。

(4) 利用XRD和SEM测试手段, 对混合料物相组成和微观结构进行分析研究, 探究该混合料在无碱激发剂环境下的强度形成机理, 微观形貌分析表明, 三种掺合料在无碱激发剂环境下可以互相促进水化反应进行, 生成大量相互搭接, 结构致密的凝胶材料, 使该混合料具有良好的力学性能。

参考文献：

- [1] 高小建, 马保国. 煤矸石资源化利用的经济效益与环境影响分析[J]. *中国矿业*, 2005(5):45-48.
- GAO X J, MA B G. Analysis of economic benefits and environmental impact of coal gangue resource utilization[J]. *China Mining*, 2005(5):45-48.
- [2] 梁晓杰, 常钧, 吴昊泽. 钢渣粉粒度对复合胶凝材料水化性能的影响[J]. 矿产综合利用, 2021(3):180-186.
- LIANG X J, CHANG J, WU H Z. Effect of particle size of steel slag powder on hydration performance of composite cementitious material[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(3):180-186.
- [3] 王冠凯. 煤矸石混合料在路基中的路用性能分析[J]. 中国公路, 2022(1):104-105.
- WANG G K. Analysis of road performance of coal gangue mixture in roadbed[J]. *China Highway and Highway*, 2022(1):104-105.
- [4] 曹静. 钢渣表面改性对沥青混合料疲劳耐久性的影响[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(2):32-35.
- CAO J. Effect of surface modification of steel slag on fatigue durability of asphalt mixture[J]. *New Building Materials*, 2020, 47(2):32-35.
- [5] 张映雪, 雷强, 罗润洲, 等. 掺入煤矸石及煤矸石灰的再生沥青混合料性能分析研究[J]. 中外公路, 2016, 36(3):278-280.
- ZHANG Y X, LEI Q, LUO R Z, et al. Performance analysis of recycled asphalt mixture mixed with gangue and gangue lime[J]. *Sino-Foreign Highway*, 2016, 36(3):278-280.
- [6] 周鑫, 高福宁, 任希庆, 等. CFB 粉煤灰路基填料无侧限抗压强度实验研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(8):30-36.
- ZHOU X, GAO F N, REN X Q, et al. Experimental study on unconfined compressive strength of CFB fly ash roadbed filler[J]. *Journal of Highway and Transportation Science and Technology*, 2021, 38(8):30-36.
- [7] 支鹏飞, 马红梅, 何政文. 基于预处理的钢渣膨胀性抑制措施及其机理研究[J]. *公路交通科技*, 2021, 38(10):30-38.
- ZHI P F, MA H M, HE Z W. Study on expansive inhibition measures and mechanism of steel slag based on pretreatment[J]. *Journal of Highway and Transportation Science and Technology*, 2021, 38(10):30-38.
- [8] 柴潮. 季冻区复合改性多孔钢渣沥青混合料力学性能及耐久性研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2021.
- CHAI C. Study on mechanical properties and durability of composite modified porous steel slag asphalt mixture in frost season[D]. Jilin: Jilin University, 2021.

- [9] 张建锋, 许家文. 石灰-粉煤灰-煤矸石混合料强度和水泥改性后抗冻性能实验[J]. *混凝土*, 2017(12):92-94.
- ZHANG J F, XU J W. Strength of lime-fly ash-gangue mixture and frost resistance test of cement after modification[J]. *Concrete*, 2017(12):92-94.
- [10] 马庆伟, 郭忠印, 李文博, 等. 不同因素对橡胶复合改性沥青高温性能影响分析[J]. 中外公路, 2022, 42(3):225-230.
- MA Q W, GUO Z Y, LI W B, et al. Analysis of the influence of different factors on the high temperature performance of rubber composite modified asphalt[J]. *Sino-foreign Highway and Highway*, 2022, 42(3):225-230.
- [11] 张浩, 于先坤, 徐修平, 等. 基于 XRD 与 SEM 研究风淬渣微粉用于重金属污染土壤的修复机理[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(1):278-284.
- ZHANG H, YU X K, XU X P, et al. Study on the remediation mechanism of wind-quenched slag powder for heavy metal contaminated soil based on XRD and SEM[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(1):278-284.
- [12] 吴庆, 朱袁洁, 许耀, 等. 基于 SEM 和 XRD 微观测试下单掺矿物掺合料透水混凝土性能分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2020, 34(3):112-118.
- WU Q, ZHU Y J, XU Y, et al. Performance analysis of permeable concrete with single mineral admixture based on SEM and XRD microscopic test[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2020, 34(3):112-118.
- [13] 王明, 刘黎萍, 罗东. 纳米尺度沥青微观结构特征演化分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(1):10-16.
- WANG M, LIU L P, LUO D. Evolution analysis of microstructure characteristics of nanoscale asphalt[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(1):10-16.
- [14] SOYEKWO FAIZAL, WEN HUI, LIAO DAN, et al. Fouling-resistant ionic graft-polyamide nanofiltration membrane with improved permeance for lithium separation from $MgCl_2/LiCl$ mixtures[J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 659.
- [15] 洪浩凯, 张恒龙, 黄立葵. 核磁共振、热分析和扫描电镜用于沥青材料表征的研究进展[J]. 公路交通科技, 2019, 36(12):15-28.
- HONG H K, ZHANG H L, HUANG L K. Research progress of nuclear magnetic resonance, thermal analysis and scanning electron microscopy for asphalt material characterization[J]. *Highway Transportation Science and Technology*, 2019, 36(12):15-28.
- [16] 孟勇军, 范柳鹏, 陈菁, 等. 废旧电池粉末改性沥青的微观特性及其性能[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10):34-44.

MENG Y J, FAN L P, CHEN J, et al. Microscopic characteristics and properties of powder-modified asphalt for

waste batteries[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10):34-44.

Mechanical Properties of Gangue-steel Slag-ore Powder Mixture

MENG Wenqing¹, WU Yitong¹, ZHANG Yapeng¹, LIU Jintang², CUI Hanlong¹

(1.Faculty of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2.Handan Iron and Steel Group Co., Ltd., Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: In order to explore the mechanical properties of the coal gangue-steel slag-ore powder mixture without alkali initiator, the solid waste materials coal gangue, steel slag and mineral powder produced in Handan Area were taken as the research objects, and the mechanical properties of the mixture were studied, and the test showed that the mixture had good mechanical properties and high engineering application value. The regression analysis model is established by Minitab to obtain the relative content and the regression equation between the admixtures, which can effectively reveal the relationship between the target strength value and the relative adhesion, and can provide the mixture ratio according to the actual project. XRD and SEM test methods were used to analyze the strength formation mechanism of the mixture in the alkali-free stimulant environment, and the phase composition and microstructure of the sample were analyzed and studied, and the results showed that the three admixtures of the mixture could generate a large number of overlapped and densely structured gel materials, so that the mixture had good mechanical properties.

Keywords: gangue mixture; mechanical properties; durability performance; regression analysis; microstructure

（上接第 181 页）

Adsorption of Heavy Metals Lead and Cadmium in Soil by Modified Lignite

CHU Haiyan¹, GAO Yeling¹, ZHANG Wei¹, WANG Wei², XU Duanping³

(1.Ordos Ecological Environment Career Academy, Ordos, Inner Mongolia 017010, China; 2.Technical Research Institute of CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Yulin, Shaanxi 719315, China; 3.College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Engineering Technology University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: In this paper, the adsorption and resolution mechanism of heavy metals Pb^{2+} and Cd^{2+} by modified lignite were studied. Methods: Four single-factor gradient variables (pH value, amount of lignite, adsorption time, adsorption temperature) were designed to carry out the adsorption contrast test before and after the sulfonation. The desorption effects of modified lignite on Pb^{2+} and Cd^{2+} in soil were measured at different pH value gradients. The results showed that the specific surface area of lignite increased from $165\text{ m}^2/\text{g}$ to $784\text{ m}^2/\text{g}$, and the adsorption rate of Pb^{2+} and Cd^{2+} on modified lignite was positively correlated with pH value of solution, addition of lignite, adsorption time and adsorption temperature. The adsorption equilibrium was reached at 120 min when the dosage of modified lignite was 6%, and the desorption of Pb^{2+} and Cd^{2+} was the lowest when pH value was 11, and the adsorption has high stability. Conclusions: the adsorption efficiency of modified lignite on heavy metals Pb^{2+} and Cd^{2+} in soil is higher than that before modification, and it can be used as an additive material for the treatment of heavy metal pollution in soil.

Keywords: modified lignite; adsorption; heavy metals in soil; lead; cadmium