

不同碳化条件下钢渣 f-CaO 降解规律 与膨胀性能优化试验研究

贾 耀¹, 刘 飞², 李冬冬³, 王逸飞¹, 刘尊青^{1*}

(1. 新疆农业大学交通与物流工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆兵团勘测设计院有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 新疆互力佳源环保科技有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要:为解决钢渣在道路工程应用中因游离氧化钙(f-CaO)水化导致的膨胀隐患及资源化利用率低的问题,采用碳化处理技术,通过单因素试验与正交试验探究温度、湿度、CO₂浓度及碳化时间对钢渣中 f-CaO 含量的影响,并结合膨胀率试验验证碳化处理对钢渣体积稳定性的改善效果。结果表明:碳化处理可显著降低钢渣中 f-CaO 含量,且 f-CaO 含量随温度升高、湿度增大、CO₂浓度提高及碳化时间延长呈降低趋势;正交试验优化得出最佳碳化工艺条件为温度 25℃、湿度 70%、CO₂浓度 20%、碳化时间 90 min,此条件下 f-CaO 含量降至最低,碳化效率最优,各因素影响程度依次为温度>CO₂浓度>碳化时间>湿度。膨胀率试验显示,最佳碳化组 10 d 浸水膨胀率仅 0.86%,远低于未碳化组的 1.8%,显著改善了钢渣体积稳定性。同时,将钢渣加入沥青混合料中,钢渣沥青混合料膨胀率也显著降低且表面结构完好,验证了碳化处理对改善钢渣体积稳定性的有效性。研究表明,钢渣碳化处理既能有效抑制膨胀、提升集料性能,又能实现 CO₂ 固存,为钢渣资源化利用及“双碳”战略实施提供了可行路径。

关键词:碳化处理;钢渣;游离氧化钙;体积稳定性;正交试验

中图分类号:TF09, X757

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2026)03-0107-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.03.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Experimental study on the degradation law of f-CaO and optimization of expansion performance in steel slag treatment under different carbonation conditions

JIA Yao¹, LIU Fei², LI Dongdong³, WANG Yifei¹, LIU Zunqing^{1*}

(1. College of Traffic and Logistics Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;
2. Xinjiang Production and Construction Corps Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi 830002, Xinjiang, China;
3. Xinjiang Huli Jiayuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: To address the issues of expansion risks caused by the hydration of free calcium oxide (f-CaO) in steel slag and its low utilization rate of resources in road engineering applications, a carbonation treatment technology was employed. Single-factor and orthogonal experiments were conducted to investigate the effects of temperature, humidity, CO₂ concentration, and carbonation time on the f-CaO content in steel slag. The improvement effect of carbonation treatment on the volume stability of steel slag is verified by expansion rate tests. The results show that carbonation treatment can significantly re-

收稿日期:2025-10-28;修回日期:2025-11-28;接受日期:2025-12-15

基金项目:国家自然科学基金(52268072);新疆农业大学校级研究生科研创新项目(XJAUAGRI2025067);校企联合攻关项目(HLJY2022KY0628A)。

作者简介:贾耀,1999年出生,男,四川邻水人,硕士,研究方向为钢渣材料在道路工程中的应用, E-mail: 1405364327@qq.com; *通信作者:刘尊青,1985年出生,男,江苏徐州人,硕士,高级工程师,研究方向为路基路面工程, E-mail: 542679854@qq.com。

duce the f-CaO content in steel slag, and the f-CaO content decreases with the increase of temperature, humidity, CO₂ concentration, and carbonation time. The optimal carbonation process condition, derived from orthogonal experiments, were temperature of 25 °C, humidity of 70%, CO₂ concentration of 20%, and carbonation time of 90 minutes. Under these conditions, the f-CaO content is minimized and carbonation efficiency was optimal, with the influence factors in descending order being temperature > CO₂ concentration > carbonation time > humidity. Expansion rate tests revealed that the optimal carbonation group exhibited a water immersion expansion rate of only 0.86% after 10 days, significantly lower than 1.8% of the uncarbonated group, demonstrating a significant improvement in the volume stability of steel slag. Additionally, incorporating carbonated steel into asphalt mixtures also significantly reduced the expansion rate while maintaining intact surface structure, confirming the effectiveness of carbonation treatment in improving the volume stability of steel slag. This study demonstrates that steel slag carbonation treatment not only effectively suppresses expansion and improves aggregate performance but also achieves CO₂ sequestration, providing a feasible pathway for the resource utilization of steel slag and the implementation of the "dual carbon" strategy.

Key words: carbonation treatment; steel slag; free calcium oxide (f-CaO); volume stability; orthogonal test

0 引言

我国是钢铁生产大国,其中粗钢产量约占全球总产量的 50%^[1],钢渣是钢铁冶炼过程中产生的固体废弃物,约占粗钢产量的 8%-15%^[2-3]。当前钢渣综合利用率低,大量堆存既占用土地,又会引发粉尘污染、重金属浸出等环境问题;同时钢铁行业作为 CO₂ 排放重点领域,其温室气体排放加剧气候变化,形成双重环境压力,严重影响生态系统环境。推动该领域碳减排是践行国家“双碳”战略的重要举措,在此背景下,碳捕获、利用与封存(CCUS)技术的应用具有重要现实意义^[4]。

矿物吸收 CO₂ 是一种由富含钙或镁离子等碱土金属的矿物与 CO₂ 发生反应,生成碳酸盐产物的过程^[5-6]。许多学者发现,钢渣中的含钙矿物相(如硅酸钙、游离氧化钙等)因其较高的碳化反应活性,在富 CO₂ 环境下能够快速发生碳化反应。这一过程不仅显著改善了钢渣的体积安定性和胶凝性能,还使其具备了优异的 CO₂ 封存能力,其最大 CO₂ 封存率可达 20%^[7]。

沥青道路建设对天然砂石需求巨大,导致此类可开采资源日趋枯竭。而钢渣兼具硬度大、耐磨性强等优异物理力学特性,是天然砂的优质替代选择^[8]。经钢渣及钢渣沥青混合料特性分析,钢渣在沥青路面推广应用中仍存在突出问题,未充分陈化的钢渣存在膨胀隐患,钢渣材料中富含 CaO 和 f-CaO,二者均会发生水化反应生成氢氧化钙(Ca(OH)₂),其中 f-CaO 水化反应更为剧烈,当钢渣应用于道路工程领域时,若材料发生一点程度的水化反应,就可能会导致道路结构性能受损,进而引发路面开裂、

变形等道路病害,而实际工程中钢渣多未经充分陈化处理,给道路长期使用埋下隐患^[9]。而现今钢渣膨胀抑制方法大多为:先对经热泼、滚筒或水淬预处理的钢渣进行破碎^[10],再转运至渣场堆存,待其自然陈化若干年后投入实际使用。但由于我国钢渣产量巨大^[11],该方式存在明显局限,不仅效率偏低、占用大量土地资源,更关键的是,钢渣长期露天堆存还易引发重金属、水资源、扬尘、放射性等^[12] 环境隐患。

为解决以上问题,笔者采用钢渣碳化处理技术,通过促使钢渣与 CO₂ 发生反应生成稳定化合物,即钢渣内的活性物质(如 f-CaO)与 CO₂ 反应,生成性质稳定的碳酸盐,既有效抑制钢渣膨胀隐患,又同步优化其集料性能。实践表明,以碳化养护方式制备钢渣制品已成为提升钢渣资源化利用率、兼具碳减排效益的有效技术路径^[13-15]。提升了钢渣材料在建设领域的稳定性。

1 原材料分析

1.1 钢渣材料分析

钢渣是钢铁冶炼过程中产生的副产品,含有硅酸盐、铁氧化物等成分。试验研究选用乌鲁木齐市八钢炼钢厂的钢渣,物理性能和化学组分如表 1、2 所示。

钢渣是典型的多孔材料,具有较高的孔隙率,因而钢渣对水和沥青的吸附能力更强。如图 1 所示为钢渣扫描电镜图像。

图 1(a) 为 5 000 倍放大,显示块状钢渣颗粒形貌,表面粗糙且周边散落细颗粒;图 1(b) 放大至 40 000 倍,清晰呈现钢渣表面精细结构,可见孔隙、细颗粒簇及纹理。

表 1 钢渣的物理性能
Table 1 Physical properties of steel slag

Crushing value	Apparent relative density	Bulk density relative to mass	Water absorption/%	Los Angeles suffered damage/%	The content of needle-like and flake-like particles/%	Adhesion level
13.6	3.585	3.462	1.0	18.4	4.5	5

表 2 利用 X 射线荧光光谱(XRF)测定钢渣的化学组分
Table 2 Chemical composition of steel slag determined by X-ray fluorescence spectrometry (XRF) %

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	f-CaO	Cl	P ₂ O ₅	loss
15.33	21.47	6.66	36.76	7.66	1.9	0.103	1.17	9.14

1.2 沥青及矿料分析

研究以玄武岩集料、钢渣粗集料、石灰石矿粉和石油沥青为原料。其技术指标如表 3、4、5 所示,其中针入度温度为 25 ℃、动力粘度试验温度为 60 ℃。

表 3 石油沥青试验结果
Table 3 Test results of petroleum asphalt

Penetration/0.1 mm	Softening point of bitumen/℃	10 ℃ Ductility /cm	Dynamic viscosity /(Pa·s)	Wax content/%	TFOT aging	
					Penetration ratio/%	Residual ductility/cm
74	47.5	>100	229.8	2.0	62	12

表 4 集料性能检测结果
Table 4 Test results of aggregate performance

Project	Apparent relative density	Water absorption/%	Crushing value/%	Soundness/%	Flaky and elongated particles content/%	Los Angeles suffered damage/%	Sand equivalent/%	Angularity/s
Basalt coarse aggregate	2.792	0.80	17	2.4	4.6	20.2	74	40
Basalt fine aggregate	2.826			18				
Steel slag coarse aggregate	3.585	1.0	13.6		4.5	18.4		

表 5 矿粉检测基本性能
Table 5 Basic performance test results of mineral powder

Performance density/(t·m ⁻³)	Water content/%	Hydrophilic coefficient	Plasticity index/%	Heat stability
2.650	0.2	0.82	3.8	stability

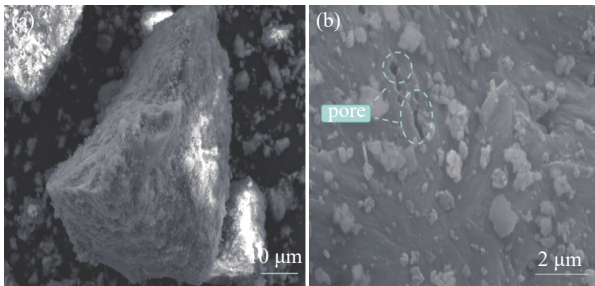
由表 3 沥青试验结果可以看出,研究所用的石油沥青产品质量均能满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2020)技术要求,此沥青针入度指数适中,针入度比、动力粘度和软化点高,低温延度高,蜡含量较低且具有较好的粘附性,表明此石油沥青质量优异,性能均衡,符合道路工程的技术要求。

由表 4、5 可知,玄武岩集料、矿粉的性能符合《公路工程集料试验规程》(JTG 3432-2024)的要求,具备出色的物理力学性能以及卓越的耐久性,且性质稳定,适用于沥青混合料制备及后续相关试验。

2 基于正交试验设计的游离氧化钙单因素分析

2.1 钢渣碳化试验原理

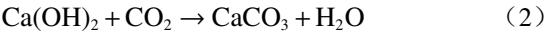
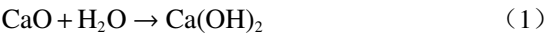
钢渣中存在一定比例的游离氧化钙(f-CaO)。为减少水化反应引起的道路灾害风险,采用 CO₂ 碳



(a) 钢渣微观形貌; (b) 钢渣空隙局部放大

图 1 钢渣在扫描电镜下的微观表面形态
Fig. 1 The microscopic surface morphology of steel slag under scanning electron microscope

化预处理技术,利用钢渣的碱性特征,模拟自然界矿物固碳过程,使其生成稳定的碳酸钙。典型反应如式 (1)(2) 所示。



通过乙二醇代用法测定钢渣中游离氧化钙(f-CaO)含量,将破碎、粉磨、筛分得到的粒径小于 200 μm 的钢渣粉末放入锥形瓶,与乙二醇-无水乙醇(1 000 mL 乙二醇+500 mL 无水乙醇配制)混合,并加入 0.2 g 酚酞粉末,置于测定游离氧化钙的仪器上加热搅拌溶液至出现粉红色,滴定苯甲酸-无水乙醇溶液(12.2 g 苯甲酸+1 000 mL 无水乙醇配制)至粉红色褪去,读数、计算得到钢渣游离氧化钙(f-CaO)含量。

2.2 各因素对钢渣微粉游离氧化钙含量的影响分析
温度、湿度、CO₂ 浓度、碳化时间这几个因素对

钢渣微粉游离氧化钙含量的影响如图2所示。

图2(a)~(d)考察了温度、湿度、CO₂浓度及碳化时间对钢渣微粉 f-CaO 含量的影响,各因素下 f-CaO 均呈前期快降、后期缓降特征。5~30℃时 f-CaO 整体下降,临界阈值温度约15℃,30℃以上升

温降效且增耗;湿度10%~90%时 f-CaO 整体下降,临界阈值湿度70%;CO₂浓度20%~100%时 f-CaO 整体下降,高浓度CaCO₃或阻碍CO₂传质^[16];碳化时间30~150min时 f-CaO 整体下降,临界阈值碳化时间约90min。

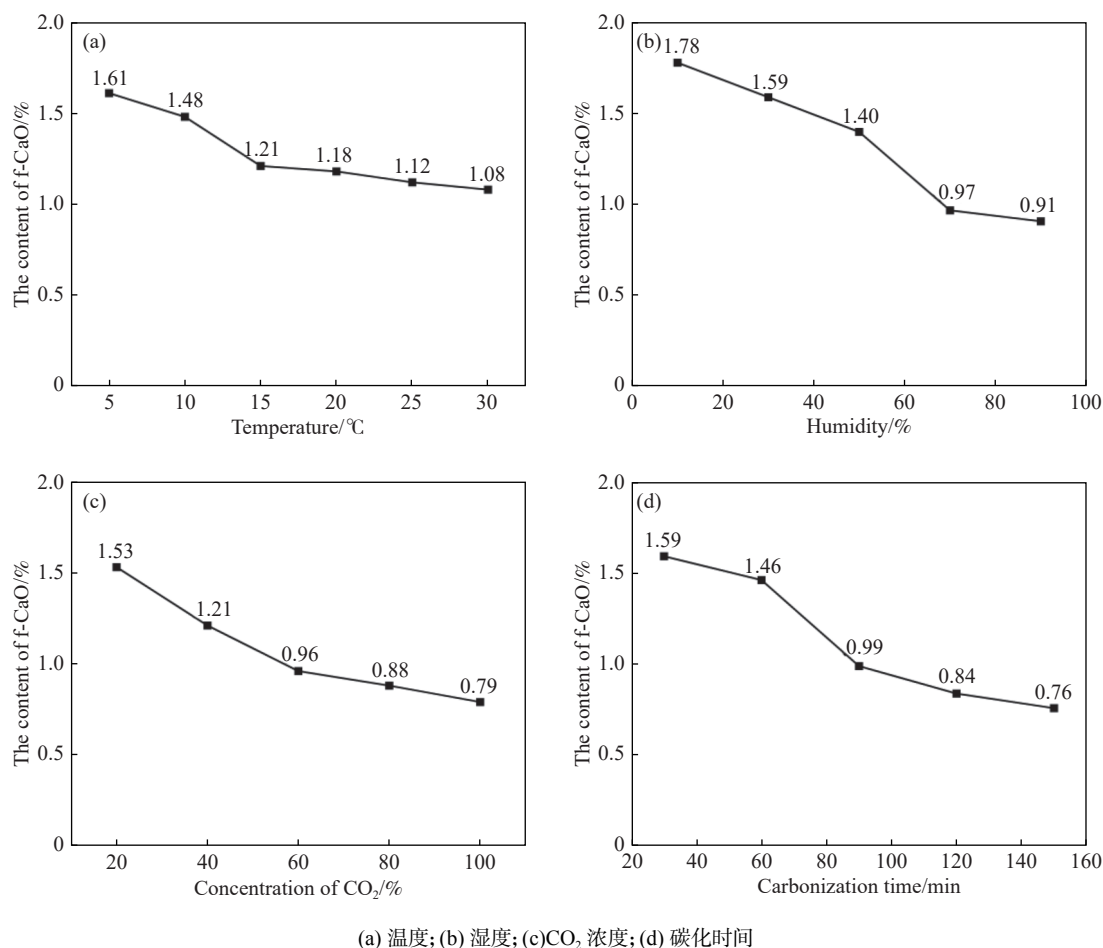


图2 各因素对钢渣微粉游离氧化钙含量的影响

Fig. 2 The influence of various factors on the free calcium oxide content of steel slag powder

2.3 基于正交试验的游离氧化钙影响因素分析

以钢渣微粉中 f-CaO 含量(%)为考察指标,对温度 A、湿度 B、CO₂ 浓度 C、碳化时间 D 等进行单因素试验。在单因素试验的基础上,每个因素设置3个水平,以 f-CaO 含量为指标,采用 L₉ (3⁴) 正

交表进行试验(1~9组不同碳化条件组),试验设计方案和试验结果如表6、7所示。

通过对表6、7中正交试验各试验组的试验数据进行统计分析,可得到表8中的极差分析结果,见表8。

表6 正交试验设计
Table 6 Orthogonal experimental table

Level	A(Temperature) /°C	B(Humidity)/%	C(Concentration of CO ₂)/%	D(Carbonization time) /min
1	5	30	20	30
2	15	50	40	60
3	25	70	60	90

从表8的极差分析可知,4个影响因素按显著程度从高到低依次为温度、CO₂ 浓度、碳化时间、湿度,即 R₁>R₃>R₄>R₂;通过对比 k₁、k₂、k₃ 值大小,

k 值越小,消解 f-CaO 的效率越高,因此选择各因素最佳方案为 A₃B₃C₁D₃,即温度 25℃、湿度 70%、CO₂ 浓度 20%、碳化时间 90 min。正交试验结果及

方差分析如表 9 所示。

由表 9 可知, 试验设计碳化因素水平组合并记录结果, 经方差分析, 因素 A、B、C、D 对响应变量均显著($P<0.05$); 试验误差与总变异的计算进一步验证了结果可靠性。

2.4 碳化试验数据分析

由正交试验得出最佳方案为 $A_3B_3C_1D_3$, 即温度 25 ℃、 CO_2 浓度 20%、碳化时间 90 min、湿度 70%,

设定为最佳碳化试验组, 碳化后测定其 f-CaO 含量。试验结果如图 3 所示。其中, Un-carbonized 为未碳化组, Optimum 为最佳条件碳化组, 1~9 组为不同碳化条件组。

由图 3 可见, 经检测最佳碳化试验组 f-CaO 含量约为 0.428 6%, 因此, 最佳碳化条件下碳化钢渣能够有效减少钢渣中 f-CaO 含量, 并且最佳碳化试验组碳化效率优于其他试验组。

表 7 正交试验结果及分析
Table 7 Orthogonal experiment results and analysis

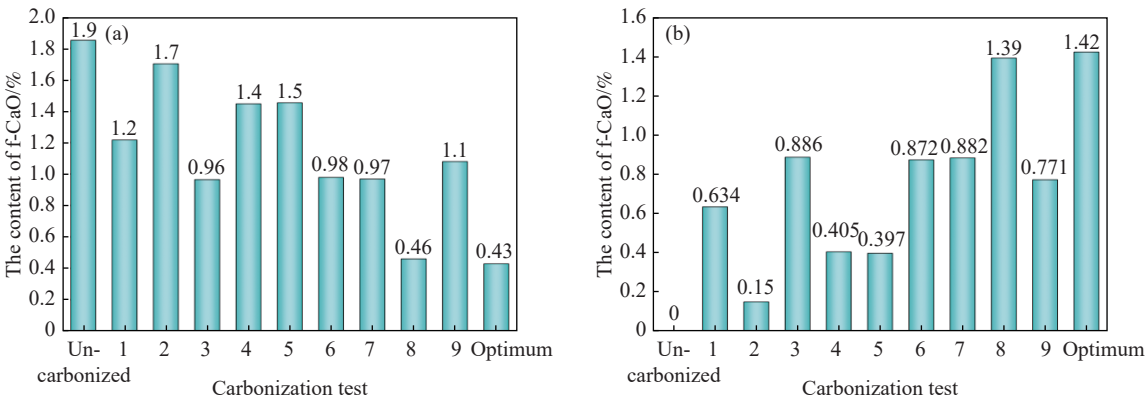
Numbering	A(Temperature) / ℃	B(Humidity) / %	C(Concentration of CO_2) / %	D(Carbonization time) / min	The content of f-CaO / %		
1	5	30	20	30	1.562 3	1.572 4	1.692
2	5	50	40	60	1.512 3	1.535	1.543 2
3	5	70	60	90	1.205 2	0.722 7	1.181
4	15	30	40	90	1.445 4	1.568 7	1.551 4
5	15	50	60	30	1.413 2	1.432 1	1.442 2
6	15	70	20	60	0.977 7	0.998	0.894 1
7	25	30	60	60	0.962 3	0.973 2	0.911 5
8	25	50	20	90	0.484 7	0.434 6	0.353 2
9	25	70	40	30	0.942 6	1.214 4	1.121 2

表 8 正交试验极差分析
Table 8 Orthogonal experiment range analysis

Factor	A(Temperature) / ℃	B(Humidity) / %	C(Concentration of CO_2) / %	D(Carbonization time) / min
K_1	12.527 6	12.239 9	8.970 3	12.393 1
K_2	11.723 9	10.151 3	12.435 0	10.308 9
K_3	7.398 1	9.258 4	10.244 4	8.947 7
k_1	1.391 9	1.359 9	0.996 7	1.377 1
k_2	1.302 6	1.112 7	1.381 6	1.145 4
k_3	0.822 0	1.028 7	1.138 2	0.994 1
Range analysis R	$R1:0.569 9$	$R2:0.331 2$	$R3:0.384 9$	$R4:0.382 8$

表 9 $L_9(3^4)$ 正交试验结果及方差分析
Table 9 $L_9(3^4)$ orthogonal experiment results and variance analysis

	Sum of squares of deviations	Degree of freedom	Mean square	F	P	Significant
A	1.834 6	2	0.917 3	67.125 6	4.512 37E-09	Significant
B	0.541 0	2	0.270 5	19.795 0	2.846 59E-05	Significant
C	0.755 6	2	0.377 8	27.647 6	3.249 09E-06	Significant
D	0.743 3	2	0.371 6	27.195 7	3.632 99E-06	Significant
Error	0.245 9	18	0.013 6			
Total	3.874 5	26				



(a) 碳化后钢渣中 f-CaO 含量; (b) 碳化钢渣消耗的 f-CaO 含量

图 3 碳化前后钢渣中游离氧化钙(f-CaO)的残留与消耗

Fig. 3 The influence of carbonated steel slag f-CaO content - Comparison chart of experimental groups

3 钢渣集料稳定性分析

3.1 钢渣击实试验

道路建设中应用钢渣时需对其稳定性进行膨胀性测定。依据《钢渣稳定性试验方法》(GB/T 24175-2009)的要求,研究对钢渣进行浸水膨胀性测定。试验前需先对钢渣样品筛分,再按表10中粒度分布的要求完成配比。

表10 钢渣粒度分布

Table 10 Granular size distribution of steel slag %						
31.5 mm	26.5 mm	13.2 mm	4.75 mm	2.63 mm	0.3 mm	0.075 mm
0	2.5	30	52.7	65	80	94

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)中的击实试验方法进行重型击实试验,确定最佳含水率和最大干密度。得到钢渣试样最大干密度为 2.626 g/cm^3 ,最佳含水率为7.2%。

称3份钢渣,加7.2%最佳含水量拌匀,闷放后制3个钢渣试样存放于密闭容器;模具中放垫块压实,压5 kg荷载压板于穿孔顶板,安装测定刻度表架及表(见图4);压5 kg荷载压板于穿孔顶板,安装测定刻度表架及表;将钢渣及装置浸恒温水箱,读 d_0 ;每日90℃水浴前读数,第十天读 d_{10} 。按公式(3)进行计算。

$$\gamma = \frac{d_{10} - d_0}{120} \times 100 \quad (3)$$

式中: γ 为浸水膨胀率,%;120为试件原始高度,mm; d_0 为百分表初读数,mm; d_{10} 为百分表终读数,mm。

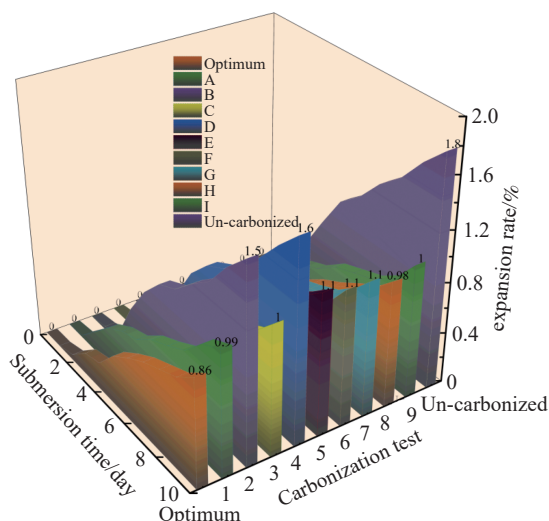


图4 不同碳化条件下膨胀率随时间变化试验

Fig. 4 Test on the variation of expansion rate over time under different carbonation conditions

3.2 自然陈化钢渣膨胀性能分析

针对自然陈化钢渣开展浸水膨胀试验,三组试

样的累计膨胀率随测试时间延长呈逐步递增趋势,最终平均膨胀率约为1.8%。该结果基本符合《耐磨沥青路面用钢渣》(GB/T 24765-2009)^[17]中的“ $\leq 2\%$ ”的技术要求,但考虑到道路工程的长期工作特性,仅达到标准限值下限可能存在潜在体积稳定性隐患,难以充分适配高等级公路对集料长期可靠性的需求^[18]。因此,为系统性抑制钢渣膨胀风险、提升其路用稳定性,需对钢渣材料采取碳化预处理技术措施。试验结果如图5所示。

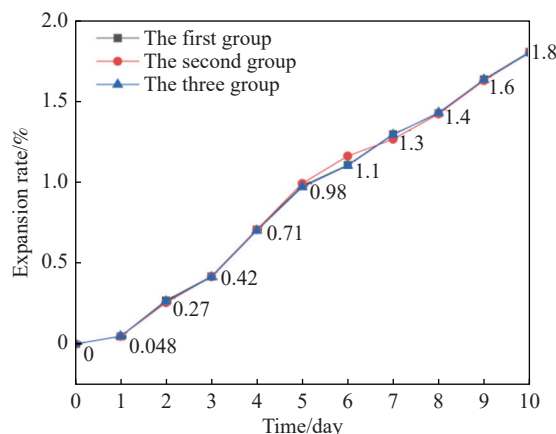


图5 自然陈化钢渣膨胀率

Fig. 5 Natural aging expansion rate of steel slag

3.3 不同碳化条件下钢渣膨胀率随时间变化规律分析

依据正交试验表中的试验序号,分别进行碳化后钢渣的膨胀率试验,结果如表11、12所示。

表11 1~9碳化条件表

Table 11 1~9 Carbonation conditions table

Numbering	Temperature/℃	Humidity/%	Concentration of CO ₂ /%	Time/min
1	5	30	20	30
2	5	50	40	60
3	5	70	60	90
4	15	30	40	90
5	15	50	60	30
6	15	70	20	60
7	25	30	60	60
8	25	50	20	90
9	25	70	40	30

由表12可知,碳化程度越高,膨胀率越低,且随浸水时间增长越平缓(10 d浸水时约0.86%);未碳化组膨胀率最高且随时间上升显著(10 d近1.8%);中间组别(1~9)介于两者之间,且多数组别随浸水时间延长,膨胀率普遍呈上升趋势。综上,最佳碳化组钢渣膨胀率显著降低,与上述f-CaO碳化试验结果一致,验证了钢渣碳化抑制膨胀的可行性。试验结果如图5所示。

表 12 不同碳化条件下钢渣膨胀率随时间变化试验结果
Table 12 Test results showing the variation of steel slag expansion rate over time under different carbonation conditions

Carbonization test	Expansion rate/%									
	1 day	2 day	3 day	4 day	5 day	6 day	7 day	8 day	9 day	10 day
Un-carbonized	0.05	0.26	0.42	0.70	0.97	1.11	1.30	1.43	1.64	1.80
1	0.02	0.17	0.32	0.41	0.46	0.58	0.65	0.74	0.91	0.99
2	0.03	0.08	0.41	0.65	0.83	0.90	1.05	1.18	1.39	1.55
3	0.03	0.14	0.30	0.44	0.51	0.60	0.66	0.77	0.85	1.02
4	0.02	0.24	0.39	0.67	0.84	0.92	1.05	1.21	1.41	1.58
5	0.03	0.08	0.41	0.48	0.56	0.66	0.72	0.87	0.98	1.11
6	0.02	0.08	0.29	0.44	0.50	0.61	0.67	0.80	0.84	1.06
7	0.03	0.08	0.29	0.43	0.49	0.62	0.68	0.75	0.88	1.06
8	0.01	0.05	0.20	0.25	0.43	0.54	0.63	0.73	0.82	0.98
9	0.03	0.08	0.29	0.42	0.49	0.61	0.67	0.72	0.84	1.05
Optimum	0.00	0.05	0.18	0.22	0.40	0.51	0.60	0.67	0.74	0.86

4 钢渣沥青混合料稳定性分析

4.1 钢渣沥青混合料配合比设计

钢渣沥青混合料配合比设计依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410-2025), 采用 AC-16C 型马歇尔设计方法进行混合料的设计与制备, 并对比钢渣加入前后沥青混合料与钢渣沥青混合料的基本路用性能^[17]。筛分后钢渣粒径主要分布于 5~10 mm, 采用体积替换法^[19], 将 AC-16C 沥青混合料中 5~10 mm 粗集料用同种粒径钢渣与玄武岩粗集料按比例(0、25%、50%、75%、100% 钢渣)混合配制, 以避免二者密度差异过大导致的曲线偏离问题^[20]。AC-16C 钢渣沥青混合料配合比设计见表 13。

表 13 AC-16C 钢渣沥青混合料级配组合设计
Table 13 Design of the grading combination for AC-16C steel slag asphalt mixture

Steel slag content/%	Basalt aggregate/%				5 ~ 10 mm steel slag aggregate/%	Mineral filler/%
	10 ~ 20 mm	5 ~ 10 mm	3 ~ 5 mm	0 ~ 3 mm		
0	30	28	13	25	0	4
25	30	21	13	25	8	4
50	30	14	13	25	15	4
75	30	6	13	25	23	4
100	30	0	13	25	29	4

采用马歇尔设计法确定最佳油石比, 钢渣掺量 0、25%、50%、75%、100% 时, 对应最佳油石比为 4.4%、4.5%、4.6%、4.7%、4.8%。基于响应曲面法以油石比、钢渣掺量和马歇尔击实温度为响应因

子, 稳定度、流值和空隙率为响应值, 构建二次回归模型, 通过多目标优化确定最佳配合比。确定钢渣最佳掺量为 75%、油石比为 4.65%、压实温度为 160 ℃。

4.2 钢渣沥青混合料路用性能分析

对两种混合料开展车辙试验、低温小梁弯曲试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验等室内路用性能试验, 验证其高温、低温及水稳定性是否符合规范要求, 同时探究钢渣掺量对沥青混合料路用性能的影响。试验结果如表 14 所示。

表 14 AC-16C 钢渣沥青混合料路用性能试验结果
Table 14 Test results of the pavement performance of AC-16C steel slag asphalt mixture

Item	High temperature stability/mm ⁻¹	Low temperature stabilit	Water stability/%	
			Residual stability	Tensile strength ratio
Steel slag asphalt mixture	2 431	3 250	80.6	79.1
Asphalt mixture	1 941	2 513	81.2	78.4
Technical requirements	≥800	≥2 300	≥75	≥75

由表 14 可知, 钢渣的掺入可有效提升 AC-16C 沥青混合料的路用性能: 在高温稳定性方面, 选择车辙动稳定度作为高温性能指标, 可知钢渣沥青混合料稳定度达 2 431 mm⁻¹, 较沥青混合料 1 941 mm⁻¹ 提升 61.2%, 二者均满足技术要求; 在低温抗裂性方面, 选择低温小梁弯曲试验作为低温性能指标, 可知钢渣沥青混合料低温弯曲破坏应变为 3 250, 较沥青混合料 2 513 提升 29.3%, 同样满足技术要求; 在水稳定性方面, 分别选择残留稳定性和冻融劈裂强度比作为水稳定性指标, 可知两类混合料的残留稳定度(80.6% 和 81.2%)与冻融劈裂强度比(79.1% 和 78.4%)均≥75%, 具备优良的水稳定特性。整体来看, 钢渣的掺入显著增强了沥青混合料的高温稳定性与低温抗裂性, 且未对水稳定性产生不利影响。

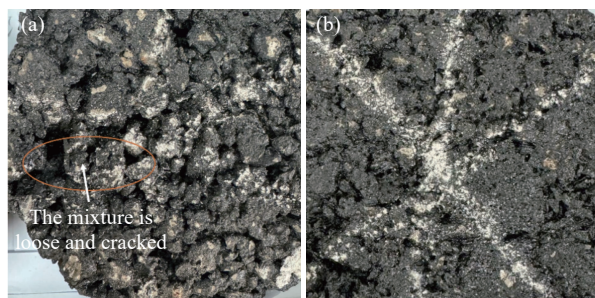
4.3 钢渣沥青混合料体积膨胀性分析

基于前文钢渣沥青混合料级配设计, 采用 75% 钢渣掺量、4.65% 油石比、160 ℃ 压实温度制备标准马歇尔试件, 试件经 60 ℃ 水浴浸泡 3 d 后测定体积变化, 以此评价混合料膨胀性。

由图 6(a) 所示, 混合料表面孔隙明显、集料松散解离(椭圆圈注区域), 沥青膜分布断续, 局部可见微裂纹, 整体结构致密性差, 呈现“离散化”特征。这是因为未碳化钢渣中存在过量的游离氧化钙(f-CaO), 遇水时会发生水化反应生成氢氧化钙(Ca(OH)₂), 该水化过程会引发钢渣自身膨胀, 进而导致沥青混合料产生膨胀开裂现象^[21]。图 6(b) 最佳碳

化钢渣沥青混合料表面集料嵌挤紧密, 沥青均匀裹覆, 无显著孔隙或开裂, 结构完整性强。

未预处理钢渣沥青混合料经 3 d 浸泡, 体积膨胀率为 1.78%; 碳化处理后, 最佳条件下膨胀率降至 0.68%, 膨胀性显著改善且满足规范要求, 试件表面结构完好, 结果与前文钢渣集料膨胀率、微粉 f-CaO 测定结果一致。试验结果如图 7 所示。



(a) 未碳化钢渣沥青混合料; (b) 最佳碳化钢渣沥青混合料

图 6 钢渣沥青混合料表面松散、开裂情况

Fig. 6 The steel slag asphalt mixture showing signs of looseness and cracking

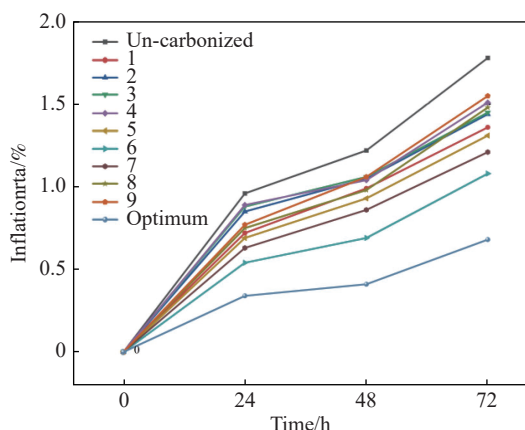


图 7 钢渣沥青混合料浸水膨胀率

Fig. 7 Expansion rate of steel slag asphalt mixture after water immersion

5 结论

1) 碳化处理可有效降低钢渣中 f-CaO 含量, 从而抑制钢渣的膨胀。单因素试验结果表明 f-CaO 含量随温度升高、湿度增大、CO₂ 浓度提高及碳化时间延长呈降低趋势。

2) 正交试验优化得出最佳碳化工工艺条件为: 温度 25 ℃、湿度 70%、CO₂ 浓度 20%、碳化时间 90 min。在此条件下, 钢渣中 f-CaO 含量降至最低, 显著低于未碳化组及其他试验组, 碳化效率最优; 各因素对 f-CaO 含量的影响程度从大到小依次为: 温度 > CO₂ 浓度 > 碳化时间 > 湿度。

3) 钢渣集料膨胀率试验显示, 未碳化钢渣的 10 d 浸水膨胀率达 1.8%, 而最佳碳化条件处理后的钢渣膨胀率降至 0.86%, 远低于未碳化组及多数中间试验组, 表明碳化处理能显著改善钢渣的体积稳定性, 有效解决钢渣在道路工程中因膨胀导致的水损害等问题。

4) 钢渣沥青混合料稳定性试验显示, 钢渣沥青混合料的膨胀率随时间延长呈持续上升趋势, 未碳化试件在 72 h 后膨胀率高达 1.78%, 而经碳化处理的试件膨胀率显著降低(最佳碳化方案膨胀率仅为 0.68%)。通过碳化反应消解了钢渣材料中的游离氧化钙, 从而抑制了水化反应引发的体积膨胀。

5) 钢渣碳化处理不仅消解了钢渣中的部分 f-CaO, 还通过与 CO₂ 反应实现了温室气体的封存, 同时提升了钢渣作为沥青混合料集料的性能, 为钢渣的高效资源化利用提供了可行路径, 符合“双碳”战略及道路建设领域对天然砂石替代材料的需求, 具有显著的环境效益与工程应用价值。

参考文献

- [1] LI X C, LI B. Low-carbon transition path of China's iron and steel industry under the global temperature control target[J]. Iron & Steel, 2019, 54(8): 224-231.
(李新创, 李冰. 全球温控目标下中国钢铁工业低碳转型路径[J]. 钢铁, 2019, 54(8): 224-231.)
- [2] ZHANG H Y, LIN W L, XING H W, et al. Research Status on the Influence of Treatment Process on Steel Slag Properties and Its Application[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2025, 37(9): 1123-1133.
(张海艳, 林文龙, 邢宏伟, 等. 处理工艺对钢渣性能影响及应用研究现状[J]. 钢铁研究学报, 2025, 37(9): 1123-1133.)
- [3] ZHANG J P. Current status and development of resource utilization of metallurgical solid waste[J]. Nonferrous Metals Engineering Design and Research, 2020, 41(5): 39-42.
(张建平. 冶金固废资源化利用现状及发展[J]. 有色冶金设计与研究, 2020, 41(5): 39-42.)
- [4] MO L W, LIU P, XU M C. Carbonation of steel slag and its application in low-carbon manufacturing of building materials[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(12): 1122-1128.

- (莫立武, 刘朋, 徐茂淳. 钢渣碳化及其在建筑材料低碳制造中的应用[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(12): 1122-1128.)
- [5] HUIJGE W J J, WITKAMP G J, COMANS R N J. Mineral CO₂ sequestration by steel slag carbonation[J]. Environmental science & technology, 2005, 39(24): 9676-9682.
- [6] BUKOWSK J M, BERGER R L. Reactivity and strength development of CO₂ activated non-hydraulic calcium silicates[J]. Cement and Concrete Research, 1979, 9(1): 57-68.
- [7] BACIOCCHI R, COSTA G, DI GIANFILIPPO M, *et al.* Thin-film versus slurry-phase carbonation of steel slag: CO₂ uptake and effects on mineralogy[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 283: 302-313.
- [8] ZHANG Y P, WANG Y M, WANG H T, *et al.* Research on the influence of carbonated steel slag on the properties of self-leveling mortar of low-carbon cementitious materials[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2025, 38(1): 64-70.
(张亚鹏, 王一茗, 王会涛, 等. 碳化钢渣对低碳胶凝材料自流平砂浆的性能影响研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2025, 38(1): 64-70.)
- [9] ZHAO Y L, WU Z, HUANG X M. Experimental study on water stability of asphalt mixture[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2001, (3): 99-102.
(赵永利, 吴震, 黄晓明. 沥青混合料水稳定性的试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2001, 31(3): 4.)
- [10] LIU X, YAN F, WANG W J, *et al.* Discussion on the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in the comprehensive utilization of steel slag[J]. Environmental Science and Technology, 2025, 38(4): 61-65,80.
(刘欣, 颜凡, 王文君, 等. 钢渣综合利用减污降碳协同效应探讨[J]. 环境科技, 2025, 38(4): 61-65,80.)
- [11] WU X Q, WANG Y. A brief discussion on the current status of comprehensive utilization of steel slag[J]. Low Carbon World, 2021, 11(3): 10-11.
(伍秀群, 王阳. 浅谈钢渣的综合利用现状[J]. 低碳世界, 2021, 11(3): 10-11.)
- [12] China Iron and Steel Industry Association. GB/T 24175-2009, Test method for stability of steel slag[S]. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China; Standardization Administration of the People's Republic of China, 2009.
(中国钢铁工业协会, GB/T 24175-2009, 钢渣稳定性试验方法[S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局; 中国国家标准化管理委员会, 2009.)
- [13] RUAN W, HU S K, CHEN Z H, *et al.* Study on volume stability of steel slag base material based on expansion mechanism[J]. Highway, 2013(4): 169-174.
(阮文, 胡圣魁, 陈泽宏, 等. 基于膨胀机理的钢渣基层材料体积安定性研究[J]. 公路, 2013(4): 169-174.)
- [14] GANG L A, A K S, B S V D L A, *et al.* Recycling and utilization of high volume converter steel slag into CO₂ activated mortars – The role of slag particle size - ScienceDirect[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 160: 104883.
- [15] JANG J G, KIM G M, KIM H J, *et al.* Review on recent advances in CO₂ utilization and sequestration technologies in cement-based materials[J]. Construction & Building Materials, 2016, 127(30): 762-773.
- [16] MO L T, LIN S, MENG X Y, *et al.* Study on volume expansion characteristics and cracking simulation of steel slag[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 180-189.
(磨炼同, 林顺, 孟秀元, 等. 钢渣体积膨胀特性研究与胀裂模拟[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 180-189.)
- [17] LIU X C. Study on performance of OGFC-13 asphalt mixture with different steel slag contents[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
(刘兴成. 不同钢渣掺量的 OGFC-13 沥青混合料性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.)
- [18] WANG Y Z. Study on physicochemical properties of steel slag, its modification and performance of asphalt mixture[D]. Nanjing: Southeast University, 2023.
(王耀正. 钢渣理化特性及其改性与沥青混合料性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.)
- [19] LI X L. Study on design and pavement performance of pinggang steel slag asphalt surface course mixture[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.
(李晓龙. 萍钢钢渣沥青表面层混合料设计及路用性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.)
- [20] PENG G. Optimization of preparation process for warm-mix rubber asphalt based on multi-index orthogonal test[J]. Highway, 2016, 61(11): 179-183.
(彭刚. 基于多指标正交试验的温拌橡胶沥青制备工艺优化[J]. 公路, 2016, 61(11): 179-183.)
- [21] ZHAO J X. Study on freeze-thaw damage characteristics of graphene-basalt fiber asphalt mixture[D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2024.
(赵锦轩. 石墨烯-玄武岩纤维沥青混合料冻融损伤特性研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2024.)