

DOI:10. 12404/j. issn. 1671-1815. 2305400

引用格式:王溪唯, 胡力群, 成岩, 等. 掺钢渣沥青混合料体积膨胀性研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(16): 6901-6906.

Wang Xiwei, Hu Liqun, Cheng Yan, et al. Volume expansibility of asphalt mixture mixed with steel slag[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(16): 6901-6906.

掺钢渣沥青混合料体积膨胀性研究

王溪唯1,2,胡力群1,2*,成岩1,2,王培恩3

(1. 长安大学公路学院,西安710064; 2. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室,西安710064; 3. 乌拉特前旗交通运输局,巴彦淖尔014400)

摘 要 钢渣作为中国存量较大的工业固体废弃物,目前对其利用率仅为30%,限制钢渣大规模资源化利用的主要原因在于钢渣所含的非稳定性物质在富水条件下易发生水化反应,造成钢渣体积膨胀。通过采用直线位移传感器(linear variable displacement transducer,LVDT)测试法对掺钢渣沥青混合料小梁试件膨胀率进行测定,探究钢渣掺配比例、混合料油石比以及掺入钢渣粒径对混合料膨胀率大小的影响。结果表明:混合料中钢渣掺入不超过50%,混合料实际油石比在最佳油石比基础上提高1.5%,且使用大粒径钢渣,能更有效控制混合料膨胀率。此外,钢渣中的活性物质不断进行水化反应,将导致局部膨胀和集料剥落等损害发生。

关键词 路面材料;体积膨胀性;钢渣;沥青混合料中图法分类号 U414; 文献标志码 A

Volume Expansibility of Asphalt Mixture Mixed with Steel Slag

WANG Xi-wei^{1,2}, HU Li-qun^{1,2*}, CHENG Yan^{1,2}, WANG Pei-en³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. Urad Front Banner Transportation Bureau, Bayannur 014400, China)

[Abstract] Steel slag as a large stock of bulk of industrial solid waste in China, the current domestic of its utilization is only 30%. The main reason limiting the large-scale resource utilization of steel slag is that the unstable substance in steel slag is easy to hydrate in water, resulting in the volume expansion of steel slag. By using linear variable displacement transducer(LVDT) test method, the expansion rate of asphalt trabecular specimen with steel slag was measured, and the influences of steel slag mixing ratio, oil stone ratio and particle size of steel slag on the expansion rate of the mixture were explored. The results show that the expansion rate of the mixture can be controlled more effectively when steel slag is not more than 50% of the mixture, the actual oil stone ratio of the mixture is increased by 1.5% on the basis of the optimal oil stone ratio, and using large steel slag. In addition, the active substance in the steel slag is constantly hydrated, which will lead to local expansion and aggregate spalling and other damage.

钢铁产业是全球各类基础设施建设行业的上游动力产业,钢铁的冶炼势必会伴随产生大量固体衍生废弃物——钢渣,其产量为粗钢产量的15%~20%。中国每年钢渣产量约为1亿t,居全球首位,对生态环境造成的压力不容小觑。通过研究钢渣的物理力学性质,发现其与普通碎石性质相差不大,且抗压性能和与沥青的黏附性优于大部分常规石料^[13],同时钢渣骨料的掺入可提高沥青路面的抗车辙能力和抗磨耗性^[4],因此钢渣具备替代部分碎石集料作为路面材料的条件。目前欧美各国对

[Keywords] pavement material; volume expansibility; steel slag; asphalt mixture

钢渣的利用率可达 80% 以上,其中交通领域的利用率可达 49.7% [5],而中国钢渣二次利用率仅为 30%,其中只有 7.6% 的钢渣在道路工程建设中得以消耗,与一些发达国家相比差距较大 [6]。

制约钢渣用作路面材料的主要原因在于: 钢渣变异性较大, 遇水易发生体积膨胀, 工程质量无法保证。研究认为造成钢渣体积稳定性差的根本原因是钢渣中存在因炼钢过程中加入的石灰石未消耗完全而形成的游离氧化钙(f-CaO)、游离氧化镁(f-MgO)和金属氧化物形成的固溶体[7-8], 这些非稳

收稿日期: 2023-07-18 修订日期: 2024-03-21

基金项目: 内蒙古自治区交通运输科技项目(NJ-2022-07)

第一作者:王溪唯(1998—),女,汉族,内蒙古巴彦淖尔人,硕士研究生。研究方向:路基路面。E-mail:wxw@chd.edu.cn。

^{*} **通信作者**: 胡力群(1971—), 男, 汉族, 陕西西安人, 博士, 教授, 博士研究生导师。研究方向: 路面结构与材料。E-mail: hlq123@126. com。

定性物质水化反应生成的 Ca(OH)₂ 和 Mg(OH)₂ 晶体呈局部集中分布,晶体体积增长率分别为 92% 和 148% ^[9]逐渐增大,会产生局部膨胀压力导致钢渣内部结构不平衡 ^[10-11]。由于 Mg²⁺相比于 Ca²⁺堆积更紧密,f-CaO、f-MgO 和 RO 相三者中 f-CaO 的水化活性最高 ^[9]。磨炼同等通过建立钢渣集料体积膨胀演化模型,得出钢渣骨料的膨胀率与其 f-CaO 的含量高度正相关,且相比于钢渣内部的 f-CaO,钢渣表面的 f-CaO 更容易造成材料局部胀裂,故 f-CaO 对钢渣安定性影响更大 ^[7,12]。

钢渣体积膨胀直接影响掺钢渣沥青混合料的稳定性,从而造成沥青路面局部鼓包、开裂、材料脱落。降低钢渣膨胀率的主要方式包括:加长钢渣陈化时间,利用 CO₂气体对钢渣进行碳酸化处理,采用磷酸或纳米 SiO₂对钢渣表面进行无机改性处理,以及利用有机硅树脂对钢渣表面进行有机改性处理^[13-15]。

目前中外学者对掺钢渣沥青混合料体积膨胀性的研究大多是从钢渣本身出发,为区别于微观角度,现从钢渣沥青混合料整体出发,通过研究钢渣掺配比例、混合料油石比以及掺入钢渣粒径对混合料膨胀率的影响,给出抑制膨胀效果最佳的方案,以期为后续掺钢渣沥青混合料的使用提供设计和施工参考。

1 材料与方法

1.1 原材料性能

(1)钢渣。试验所用钢渣为内蒙古自治区包头钢铁集团有限公司龄期30个月的热焖渣,其粒径均小于26.5 mm,其中粒径大于2.36 mm的钢渣占总质量的83.23%,即钢渣原材料中粗集料居多。试验用钢渣的碱度为1.94,属于中碱度钢渣,其化学成分如表1所示,物理力学性能如表2所示。

(2)沥青。本试验采用 SBS 改性沥青,其常规性能检测结果如表 3 所示,均符合《公路沥青路面施

表 1 钢渣化学成分

Table 1 Chemical composition of steel slag

化学成分	SiO_2	$\mathrm{Fe_2O_3}$	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	CaO	MgO	MnO	$\mathrm{P}_2\mathrm{O}_5$	其他
质量分数/%	15.5	30.9	2.0	34.4	6.2	4.5	2.2	4.5

表 3 SBS 改性沥青性能测试结果

Table 3 Performance test results of SBS modified asphalt

测试内容	针入度/ 0.1 mm	延度/ cm	软化点/ ℃	针入度指数 PI
测试结果	71.3	53.9	58	0.28
	60 ~ 80	≥30	≥55	≥ -0.4

工技术规范》(JTG F40—2004)要求。

(3)集料和填料:本试验所用的普通路用粗细集料均为石灰岩,其压碎值为17.3,表观相对密度为2.73。所用填料类型为石灰岩矿粉,表观密度为2.77,含水率为0.45%。

1.2 钢渣沥青混合料级配和油石比设计及修正

由于钢渣和石灰岩的密度相差较大,为避免实际合成级配与目标级配偏离过大,需要依据体积替代法对混合料的级配和油石比进行修正。本试验以设计配合比为基础,以毛体积相对密度为换算依据,对钢渣和碎石各粒径区间的质量占比进行修正。同时采用名义油石比,即沥青质量与制备相同体积混合料时所需典型矿料的质量之比,对混合料油石比进行修正,从而保证密度发生变化时混合料的油石仍具有可比性[16]。

考虑到钢渣中粗集料含量较多,且粗集料中f-CaO含量较少,故本试验选择钢渣部分替代粗集料区间,取 0、25%、50%、75%、100% 钢渣掺配比例,修正后的级配和油石比参数如表 4 所示。

1.3 钢渣沥青混合料膨胀性测试方法

为避免传统马歇尔试件检测法中所得试验数据离散性较大等问题,本试验采用 LVDT 位移传感器对钢渣沥青混合料小梁试件进行膨胀率,仪器模型及实物如图 1 所示。参考《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)中膨胀率的测试方法,令小梁试件在 60 ℃条件下水浴加热 72 h,同时全程采集数据,绘制试件的纵向膨胀曲线。

膨胀率的计算公式为

$$P = \frac{L_{\rm Z} - L_0}{L_{\rm z}} \tag{1}$$

式(1)中:P 为小梁试件膨胀率,%; L_0 为小梁初始长度,mm; L_z 为小梁水浴膨胀后的长度,mm。

表 2 钢渣物理力学性能指标

Table 2 Physical and mechanical properties of steel slag

性能指标 -	钢渣粒径/mm									
1生用匕1日7小	16 ~ 19	13.2 ~ 16	9.5 ~ 13.2	4.75 ~ 9.5	2.36 ~4.75	0.075 ~ 2.36	< 0.075			
f-CaO 含量/%	0.301	0.294	0.302	0.409	0.451	0.535	0.583			
表观相对密度	3.647	3.625	3.634	3.648	3.655	3.473	_			
吸水率/%	0.61	0.62	1.29	1.77	1.85	1.99	_			
压碎值				14.9						

表 4 不同钢渣掺量级配和油石比参数修正结果

Table 4	Parameters	of differen	t slag	mixing :	and oil	stone	ratio :	are modified
---------	------------	-------------	--------	----------	---------	-------	---------	--------------

10, 77 - 37		0 钢剂	查掺量	25% 钢	渣掺量	50%钢	渣掺量	75%钢	75% 钢渣掺量		100% 钢渣掺量	
粒径区间		原始	修正	原始	修正	原始	修正	原始	修正	原始	修正	
12.2.16	碎石	7.5	7.5	5.6	5.4	3.8	3.4	1.9	1.6	0	0	
13.2 ~ 16	钢渣	0	0	1.9	2.3	3.8	4.5	5.6	6.4	7.5	8.1	
0.5.12.2	碎石	19.8	19.8	14.9	14.2	9.9	9.0	5.0	4.3	0	0	
9.5 ~ 13.2	钢渣	0	0	5.0	6.2	9.9	11.8	14.9	16.9	19.8	21.5	
4.75 ~ 9.5	碎石	31.6	31.6	23.7	22.8	15.8	7.9	14.5	6.9	0	0	
4.75 ~ 9.5	钢渣	0	0	7.9	9.7	15.8	18.6	23.7	26.6	31.6	33.9	
2.36 ~ 4.75	碎石	9.9	9.9	8.2	7.7	5.5	4.9	2.7	2.3	0	0	
2.30 ~ 4.75	钢渣	0	0	2.7	3.4	5.5	6.4	8.2	9.2	10.9	11.7	
1.18 ~ 2.36	碎石	11.2	11.2	11.2	10.5	11.2	10.0	11.2	9.6	11.2	9.1	
0.6 ~ 1.18	碎石	5.4	5.4	5.4	5.1	5.4	4.8	5.4	4.6	5.4	4.4	
0.3 ~ 0.6	碎石	4.0	4.0	4.0	3.6	4.0	3.5	4.0	3.3	4.0	3.2	
0.15 ~ 0.3	碎石	2.1	2.1	2.1	1.9	2.1	1.8	2.1	1.7	2.1	1.7	
0.075 ~ 0.15	碎石	1.5	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	1.5	1.3	1.5	1.2	
矿粉		6.0	6.0	6.0	5.8	6.0	5.3	6.0	5.3	6.0	5.1	
最佳油石片	Ł	4.	77	4.	67	4.	54	4.	45	4.	33	
最佳名义油石	比	4.	77	4.	87	4.	98	5.	10	5.	19	



图 1 仪器设计模型与实物

Fig. 1 Instrument design model drawing and physical drawing

2 试验结果与分析

2.1 钢渣掺配比例对混合料膨胀性的影响

本试验以钢渣掺配比例作为变量,通过测定5种钢渣掺量小梁试件的膨胀值,评价钢渣掺量对沥青混合料膨胀性的影响。如图2所示,掺入钢渣后沥青混合料的膨胀率明显高于纯碎石对照组,且膨胀率与钢渣掺量呈正相关,故可认为掺入钢渣会促进沥青混合料的膨胀。导致膨胀的主要物质是钢渣中的f-CaO和f-MgO,增加钢渣掺量,沥青混合料中的f-CaO和f-MgO总量相应提升,因此提高钢渣的掺配比例后混合料的膨胀率也会增大。但纯碎石沥青混合料膨胀率并非为0,表示即使不掺入钢渣,混合料体系内还有其他物质也能发生轻微膨胀。

根据各组膨胀率的增值(图2)可以看出,混合料

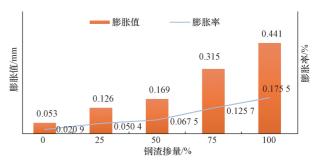


图 2 不同钢渣掺配比例试件的膨胀率

Fig. 2 Expansion rate of specimens with different steel slag mixing ratio



图 3 小梁试件局部鼓起与集料剥落 Fig. 3 Diagram of local bulging of trabecular specimen and aggregate spalling

膨胀率对应钢渣掺量并非线性增加,钢渣掺量超过 50%后混合料膨胀率涨幅明显,说明此时试件体积 产生突变膨胀。

同时试验过程中发现,水浴环境下小梁试件会出现局部鼓起及部分集料剥落等损害情况,且钢渣掺配比例越高,损害情况越严重,在钢渣掺量为75%和100%试验组中该损害情况更为明显,如图3所示。因此为控制掺钢渣沥青混合料的膨胀率和损害程度,钢渣掺量不宜超过50%。

2.2 钢渣粒径对混合料膨胀性的影响

通过对钢渣物理力学性能检测可知,钢渣中易导致体积膨胀的活性物质(f-CaO 和 f-MgO)含量会随粒径的增大而降低。本试验方案以50%钢渣掺量为基础,控制钢渣掺配比例和AC-13沥青混合料级配不变,自最大或最小粒径开始100%替换,直至钢渣体积占粗集料总体积的50%。所用钢渣粒径大小由粗度 S 表征,其计算公式为

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i L_i}{n} \tag{2}$$

式(2)中:S 为钢渣粒径粗度; m_i 为第 i 个粒径区间钢渣占集料体积百分比,%; L_i 为第 i 个粒径区间的中值长度,mm;n 为钢渣体积占粗集料的体积分数。

不同试验方案对应的各粒径钢渣占比如表 5 所示,可以看出,混合钢渣的粗度值与掺配粒径的大小相符,说明试验方案合理,选取的粗细粒径钢渣具有一定代表性。按照该方案制备小梁试件测得膨胀率结果如图 4 所示,可以看出,钢渣掺量一定的情况下,混合料中所用钢渣粒径越小其膨胀率越高。主要原因在于钢渣中 f-CaO 等活性物质的含量与钢渣粒径反相关,粒径越小含量越高,其次钢渣粒径越小其比表面积越大,活性物质与水接触面积增大,从而反应更充分,膨胀率也会相应增加。故在沥青混合料中掺钢渣时可适当控制钢渣破碎程度,尽量将其用于粗集料部分。

表 5 不同掺配类型中各粒径钢渣占比

Table 5 Proportion of steel slag of different particle sizes in different blending types

钢渣掺配类型	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	粗度 S
	粒径	粒径	粒径	粒径	
粗粒径钢渣	100	100	24	0	7.781
均匀粒径钢渣	50	50	50	50	5.988
细粒径钢渣	0	0	77	100	4.239

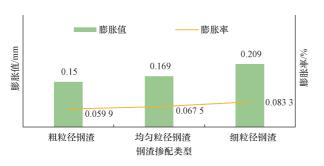


图 4 不同钢渣掺配类型试件的膨胀率

Fig. 4 Expansion rate of specimens with different mixing types of steel slag

2.3 油石比对混合料膨胀性的影响

本试验控制钢渣掺量为 50%,即各试验组密度不变,以 0.3%为区间自 50%钢渣掺量的最佳油石比上下各再取两值,共得 5 组油石比,即 3.94%、4.24%、4.54%、4.84%、5.14%。测出 5 组中的最小膨胀率后继续采用"插值法"以 0.15%为区间上下取值,求得最小膨胀率对应的油石比。试验过程中发现油石比为 3.94%时,混合料脱料严重,故该组数据不采用。最终不同油石比所对应的混合料膨胀率如图 5 所示。

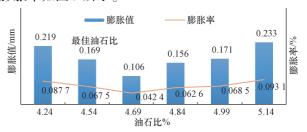


图 5 不同油石比试件的膨胀率

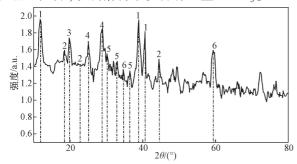
Fig. 5 The expansion rate of specimens with different mixing types of steel slag

由图 5 可知,钢渣沥青混合料的膨胀率在最佳 油石比附近的一定范围内,会随着油石比的增加而 呈现先增大后减小的趋势,且油石比为4.69%,即 在最佳油石比基础上增加 0.15% 时,混合料的膨胀 率最小。原因在于:适当增加油石比,钢渣未被沥 青包裹从而与水直接反应的面积会相应减小,在一 定程度上会降低钢渣沥青混合料的膨胀率。此时 混合料内部空隙尚未填满,钢渣膨胀所占用的空间 可能小于混合料内部空隙,故未造成试件整体明显 膨胀,因此油石比较最佳油石比提高 0.15% 时混合 料膨胀率最小。若继续提高油石比,沥青用量的增 加会使混合料内部可供钢渣膨胀的空间不足,从而 导致膨胀后应力集中,混合料膨胀率增大。油石比 过小,沥青包裹钢渣的面积太小,过多活性物质发 生水化反应,也会导致混合料的膨胀率提升,故油 石比为 4.24% 和 5.14% 时混合料膨胀率均较大。 因此,在沥青混合料中掺入钢渣时,可将实际油石 比在最佳油石比基础上提高 0.15%,从而达到控制 混合料膨胀率的目的。

2.4 剥落物成分及机理分析

在进行膨胀性试验过程中,发现小梁试件在经水浴处理后存在局部鼓起和集料剥落现象。通过 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)对剥落物的成分进行分析,结果如图 6 所示,可知剥落物主要成分为 $Ca(OH)_2$,同时含有少量的 $CaCO_3$,均为钢渣中 f-CaO等活性物质水化反应的生成物。

造成材料剥落的原因在于,钢渣本身具有亲水性,加之沥青的乳化作用,浸水后与沥青的粘附性将大幅减弱,从而导致原本包裹钢渣的沥青脱落,钢渣直接与水接触。以 f-CaO 为代表的活性物质与水反应生成 Ca(OH)₂等白色颗粒状物质,会在局部范围造成体积膨胀,反应式如图 7 所示。体积膨胀产生的空隙会使得水分深入内部继续参与反应,多次循环后试件便会出现明显膨胀和集料剥落等情况^[17]。由于水中 CO₂的含量较少,Ca(OH)₂碳酸化反应不充分,故剥落物中仅含有少量 CaCO₃。



1 为 $Ca(OH)_2$; 2 为 $3CaO \cdot SiO_2$; 3 为 $CaCO_3$; 4 为 RO 相; 5 为 $2CaO \cdot SiO_2$; 6 为 $Ca_2Fe_2O_5$

图 6 剥落物 XRD 成分分析

Fig. 6 XRD analysis of exfoliate

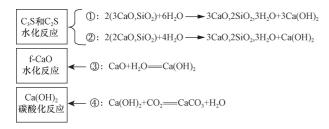


图 7 钢渣中活性物质水化反应公式 Fig. 7 Hydration reaction formula of active

substance in steel slag

3 结论

通过试验对不同因素影响下的钢渣沥青混合料膨胀率进行测定,并对各因素下混合料膨胀机理进行分析,为钢渣沥青混合料在实际工程中的应用提供更直观的参考。得出如下结论。

- (1)钢渣沥青混合料的膨胀率与混合料中钢渣的掺配比例呈非线性正相关。钢渣掺配比例越大混合料膨胀率越高,当掺配比例超过50%后混合料膨胀率涨幅明显增加。
- (2)钢渣沥青混合料的膨胀率与混合料中钢渣 的粒径大小呈非线性反相关。钢渣掺入量一定的 情况下,掺入的钢渣粒径越小,钢渣沥青混合料的 膨胀率越高。

- (3) 钢渣沥青混合料的膨胀率随混合料中油石比的增大呈先递减后递增趋势。混合料中加入沥青过多或过少都不利于抑制膨胀,当实际油石比在最佳油石比基础上提高 0.15% 时,控制混合料膨胀率的效果最好。
- (4)试验过程中白色 剥落物的主要成分为 Ca(OH)₂,是钢渣中的 f-CaO 等活性物质的水化产物,该物质会导致钢渣发生局部膨胀,同时水会通过膨胀产生的微裂缝深入内部参与反应,最终导致试件鼓包甚至集料剥落。

参考文献

- [1] 王丽艳,李劲松,陶云翔,等.废弃钢渣回填土工格栅加筋挡土墙的抗震性能振动台试验[J].中国公路学报,2021,34(1):35-46.
 - Wang Liyan, Li Jingsong, Tao Yunxiang, et al. Shaking table tests on seismic behavior of geogrid-reinforced retaining wall with waste steel slag backfill[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(1): 35-46.
- [2] Cui P, Wu S, Xiao Y, et al. Environmental performance and functional analysis of chip seals with recycled basic oxygen furnace slag as aggregate[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 405: 124441.
- [3] Esther L A, Scopus P, Irune I V, et al. Comprehensive analysis of the environmental impact of electric arc furnace steel slag on asphalt mixtures [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 123121.
- [4] Teixeira J E S L, Schumacher A G, Pires P M, et al. Expansion level of steel slag aggregate effects on both material properties and asphalt mixture performance [J]. Transportation Research Record, 2019, 267(3): 506-515.
- [5] 何亮,詹程阳,吕松涛,等。钢渣沥青混合料应用现状[J]. 交通运输工程学报,2020,20(2):15-33.

 He Liang, Zhan Chengyang, Lü Songtao, et al. Application status of steel slag asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(2):15-33.
- [6] 吴跃东,彭犇,吴龙,等. 国内外钢渣处理与资源化利用技术发展现状综述[J]. 环境工程, 2021, 39(1): 161-165. Wu Yuedong, Peng Ben, Wu Long, et al. Review on global development of treatment and utilization of steel slag[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(1): 161-165.
- [7] 李恩硕, 胡晨光, 苏航, 等. 钢渣中非稳定性物质微观结构和性能的研究现状与展望[J]. 金属矿山, 2022(7): 250-258. Li Enshuo, Hu Chenguang, Su Hang, et al. Research status and prospect of the microstructure and properties of unstable substance in steel slag[J]. Metal Mine, 2022(7): 250-258.
- [8] 高颖, 王伟赫, 陈萌, 等. 钢渣体积膨胀行为及改性方法研究进展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(33): 14040-14048.

 Gao Ying, Wang Weihe, Chen Meng, et al. Research progress on bulk expansion behavior and modification methods of steel slag[J].

 Science Technology and Engineering, 2021, 21(33): 14040-14048.
- [9] 王剑锋,常磊,王艳,等. 钢渣胶凝活性与体积稳定性优化研究现状[J]. 材料导报,2023,37(11):119-127. Wang Jianfeng, Chang Lei, Wang Yan, et al. Research status of improving cementitious activity and volume stability of steel slag

- [J]. Materials Reports, 2023, 37(11): 119-127.
- [10] Zhuang S Y, Wang Q. Inhibition mechanisms of steel slag on the early-age hydration of cement [J]. Cement and Concrete Research, 2021, 140: 1-14.
- [11] Feng J, Sun J. A comparison of the 10-year properties of converter steel slag activated by high temperature and an alkaline activator [J]. Construction and Building Materials, 2020, 234: 116948.
- [12] 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.

 Mo Liantong, Lin Shun, Meng Xiuyuan, et al. Volume expansion characteristics and crack simulation of steel slag[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 180-189.
- [13] Huo B, Li B, Huang S, et al. Hydration and soundness properties of phosphoric acid modified steel slag powder [J]. Construction and Building Materials, 2020, 254: 2872769.
- [14] Al-Yaqout A, El-Hawary M, Nouh K, et al. Improvement in corrosion resistance of recycled aggregate concrete by nano silica sus-

- pension modification on recycled aggregates [J] . Cement and Concrete Composites, 2020, 106:111-122.
- [15] 冉武平,张永太,艾贤臣,等. 工业固体废弃物矿化封存 CO₂ 研究综述[J]. 科学技术与工程,2023,23(16):6718-6727. Ran Wuping, Zhang Yongtai, Ai Xianchen, et al. Review of CO₂ sequestration research in industrial solid waste mineralization[J]. Science Technology and Engineering, 2023,23(16):6718-6727
- [16] 成岩. AC-13 钢渣沥青混合料膨胀性影响因素及路用性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
 Cheng Yan. Research on influencing factors of expansion and road performance of AC-13 steel slag asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [17] 陈云飞, 郑文俊, 周剑波, 等. 未陈化钢渣在水稳碎石基层的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36(8): 59-63.

 Chen Yunfei, Zheng Wenjun, Zhou Jianbo, et al. Application of unaged steel slag in cement stabilized macadam base[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2019, 36(8): 59-63.