文章编号:1007-9629(2025)06-0544-08

钢渣稳定铁尾矿基层材料的强度与干缩性能

仇凯祥^{1,2}, 贾 坚¹, 张 洋³, 卢晓磊^{1,2,*}, 程 新^{1,2}

(1.济南大学建筑材料制备与测试技术重点实验室,山东济南250022;2.济南大学材料科学与工程学院,山东济南250022;3.济南建工集团建材科技有限公司,山东济南250001)

摘要:利用钢渣、脱硫石膏和矿渣等固废制备钢渣基胶凝材料(SSCM),并选取力学性能突出的 SSCM制备了钢渣稳定铁尾矿基层材料(SIBM),测试了SIBM的力学性能和耐久性能,并分析讨论 了SSCM对SIBM的补偿收缩机理。结果表明:最优配合比SSCM的28d抗压强度为31.5 MPa;当 SSCM灰剂量 w_{SSCM}≥8%时,SIBM的无侧限抗压强度满足二级公路轻交通设计要求,且干缩性能 优于水泥稳定铁尾矿基层材料(CIBM),水化产物钙矾石的大量形成与孔结构的改善是SIBM干缩 减少的重要原因。

关键词:基层材料;钢渣;铁尾矿;力学性能;干缩性能;微观结构 中图分类号:U414 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.06.007

Strength and Dry Shrinkage Characteristics of Steel Slag Stabilized Iron Tailings Base Materials

QIU Kaixiang^{1,2}, JIA Jian¹, ZHANG Yang³, LU Xiaolei^{1,2,*}, CHENG Xin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Preparation and Measurement of Building Materials, University of Jinan, Jinan 250022, China;
 2. School of Materials Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China;
 3. Jinan Construction Engineering Group Co., Ltd., Jinan 250001, China)

Abstract: Steel slag-based cementitious materials(SSCM) were prepared using solid wastes such as steel slag, desulfurization gypsum and blast furnace slag. The steel slag stabilized iron tailings base materials(SIBM) were prepared by SSCM with outstanding mechanical properties. The mechanical and durability properties of SIBM were tested, and the mechanism of SSCM compensating for shrinkage in SIBM was analyzed and discussed. The results indicate that the 28-day compressive strength of SSCM with the optimal mix proportion is 31.5 MPa. When the ash content of SSCM is greater than or equal to 8%, the unconfined compressive strength of SIBM meets the design requirements for second-class highway light traffic, and its dry shrinkage is superior to that of cement stabilized iron tailings base material(CIBM). The formation of great quantity of hydration product ettringite and the improvement of pore structure are important reasons for the reduction of dry shrinkage of SIBM. **Key words:** base material; steel slag; iron tailing; mechanical property; dry shrinkage; microstructure

钢渣和铁尾矿是钢铁工业产生的主要固体废弃物,钢渣综合利用率仅25%^[1],铁尾矿综合利用率也不足7%^[2]。大量钢渣和铁尾矿的堆放不仅造成土地资源浪费,也会破坏生态环境和威胁人民健康,因此

钢渣和铁尾矿的消纳问题亟待解决。

钢渣的低活性和惰性矿物限制了其应用^[3]。 Zhang等^[4]采用低掺量(20%)钢渣替代水泥时力学性 能突出;Zhao等^[5]利用钢渣和磷石膏制备固废胶凝材

收稿日期:2024-08-05;修订日期:2024-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52341201,52102020,U22A20126)

第一作者:仇凯祥(1999一),男,江苏泰州人,济南大学硕士生。E-mail:296713759@qq.com

通讯作者:卢晓磊(1986—),男,安徽亳州人,济南大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail:mse_luxl@ujn.edu.cn

料,发现掺入10%钢渣胶凝材料的28d抗压强度 为28.9 MPa;南雪丽等^[6]添加矿渣调控合适 的*m*(CaO+MgO)/*m*(SiO₂+Al₂O₃),激发了钢渣的 火山灰活性,提高了钢渣的活性和掺量;崔孝炜等^[7] 研究发现,脱硫石膏可加速钢渣与矿渣协同水化,且 大量针棒状水化产物钙矾石(AFt)晶体使试件的体 积产生了微膨胀^[8];栗东平等^[9]也验证了石膏、矿渣和 钢渣复合协同可显著提高材料的力学性能。

因选矿工艺改进,当前铁尾矿大部分粒径 d< 1 mm,相比其他固废基层材料^[10]存在颗粒细、级配差、 吸水率大和易开裂等问题。Lucas等^[11]利用水泥、石 灰和矿渣分别稳定铁尾矿,发现水泥固化效果最佳; Thomas等^[12]利用10%~20%铁尾矿替代土,其无侧 限抗压强度(UCS)满足设计强度要求;Ji等^[13]研究了 水泥稳定铁尾矿基层材料(CIBM)的耐久性,发现其 存在收缩大、易开裂等问题,且收缩随着水泥掺量的 增加而增大;宁宝宽等^[14]在CIBM中添加聚丙烯纤维 来减少干缩;此外,Li等^[15]研究发现钢渣用于路面基 层可改善基层干缩与抗冻性。

综上,利用水泥等传统胶凝材料固化铁尾矿的研 究已趋于成熟,存在的不足主要是基层材料吸水率高 和干缩大。而采用大掺量钢渣制备固废胶凝材料并 用于固化铁尾矿的研究尚处于起步阶段,尤其是其对 基层材料的补偿收缩机理研究较少。基于此,本文首 先以钢渣等固废为主要成分制备钢渣基胶凝材料 (SSCM),然后选取力学性能突出的SSCM制备钢渣 稳定铁尾矿基层材料(SIBM),并探究其力学、干缩和 抗冻性能等,最后借助X射线衍射仪(XRD)、扫描电 镜(SEM)和核磁共振分析仪(NMR)等手段揭示了 SSCM对SIBM的补偿收缩机理。

1 试验

1.1 原材料

原材料包括钢渣、脱硫石膏、矿渣粉、水泥和铁 尾矿,其化学组成(质量分数,本文涉及的掺量、比值 等除特殊说明外均为质量分数或质量比)见表1。石 灰为分析纯;标准砂由厦门艾思欧标准砂有限公司 生产;钢渣为转炉钢渣,比表面积为600 m²/kg,28 d 活性指数为0.82;矿渣粉为S95粒化高炉矿渣粉,比 表面积为500 m²/kg,活性指数为0.95;水泥为抚 顺 P·I 42.5基准水泥,其物理性能见表2;铁尾矿取自 青岛港,表观密度为2.7 g/cm³,塑性指数为10.3,其 粒径分布见表3。钢渣和铁尾矿的XRD图谱见图1。 由图1可见,钢渣的主要矿相为硅酸三钙、硅酸二钙、 赤铁矿、氧化亚铁矿、石英和黑钙铁矿等,铁尾矿的 主要矿相为石英、赤铁矿和针铁矿等。

表1 原材料的化学组成 Table 1 Chemical compositions(by mass) of raw materials

										Unit: ½
Material	SiO_2	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	$\mathrm{Fe_2O_3}$	CaO	SO_3	MgO	Na ₂ O	P_2O_5	MnO_2	IL
Steel slag	17.00	4.18	21.05	38.51		4.75	0.41	1.89	4.19	0.81
Blast furnace slag	30.50	14.43	0.50	35.71	2.88	8.13	0.54			1.67
Gypsum	3.28	1.30	0.32	32.16	40.37	0.92	0.13			7.69
Cement	20.53	4.45	3.17	62.05	2.10	2.81	0.55			1.74
Iron tailings	34.29	8.28	33.64	2.09		1.21	0.51	0.42	0.72	6.61

表 2 水泥的物理性能 Table 2 Physical properties of cement

Specific surface area/ $(m^2 \cdot kg^{-1})$	Standard consistency (by mass)/ %	Setting ti	me/min	Flexural str	ength /MPa	Compressive strength /MPa	
		Initial	Final	7 d	28 d	7 d	28 d
359	25.8	180	257	6.0	8.7	25.4	43.6

	表 3	铁尾矿的粒径分布
Table 3	Particle	size distribution of iron tailings

Item	Seieve size/mm							
Item	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
Passing ratio(by mass)/%	0	0	4.149	4.786	23.575	47.602	19.700	
Accumulate screening ratio(by mass)/ %	0	0	4.149	8.935	32.685	80.287	99.990	



Fig. 1 XRD patterns of steel slag and iron tailings

1.2 测试方法

根据GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》进行力学性能测试。试件水灰比为0.5,使用TYE—300型水泥胶砂力学性能试验机测试试件的抗折强度和抗压强度。

依据JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳 定材料试验规程》对SIBM的物理性能进行测试,通 过塑限预设含水率,由击实试验确定试件的最大干 密度与最佳含水率,以此进行力学性能和耐久性试 验。击实试验采用 YDDJ—B型电动击实仪,依据 JTG E51—2009中重型击实测试的甲类击实方式 (T 0804-1994)。UCS试验使用 YDLQ—200F型全 自动路面材料强度试验仪,加载速率1 mm/min。干 缩试件尺寸为50 mm×50 mm×200 mm,控制温度 为(20±1)℃,相对湿度 RH为(60±5)%,冻融循环 (Ftc)试件尺寸为 ϕ 50×50 mm,标准养护28 d(浸水 1 d)后,冻融5个循环(-18℃冻结16 h+20℃水浴 8 h为1个循环)。 采用德国布鲁克AXS公司 D8-Advance型XRD 对试件的物相进行分析,辐射源为CuKa,工作电压和 电流分别40 kV、40 mA,扫描角度(2 θ)为5°~70°;并 利用 Topas-V6 软件对 XRD 结果进行全谱拟合 (rietveld),内标物为Al₂O₃。采用德国ZEISS Gemini 360型场发射SEM对微观形貌进行观察,溅 射喷金,加速电压为3 kV。采用苏州纽曼 MicroMR20-025V低场NMR对孔结构进行表征分 析,恒定磁场为0.3 T,电磁线圈为25 mm,工作频率 为20 MHz。

2 结果与讨论

2.1 SSCM 配合比的优化

采用交叉试验研究 SSCM 的力学性能,在尽可能利用钢渣和确保强度的前提下,经过前期预试验,固定矿渣粉掺量 30.0%、石灰掺量 5.0%,通过脱硫石膏、水泥与钢渣掺量来调整 SSCM 的力学性能,其配合比见表4。

IInit. 0/

表4 SSCM的配合比 Table 4 Mix proportions(by mass) of SSCM

						Ont: /0
Group	Specimen	Gypsum	Cement	Steel slag	Lime	Blast furnace slag
	A-1	5.0	10.0	50.0	5.0	30.0
	A-2	5.0	15.0	45.0	5.0	30.0
А	A-3	7.5	10.0	47.5	5.0	30.0
	A-4	10.0	15.0	40.0	5.0	30.0
	A-5	10.0	10.0	45.0	5.0	30.0
	B-1	5.0	12.5	47.5	5.0	30.0
В	B-2	5.0	7.5	52.5	5.0	30.0
	B-3	5.0	5.0	55.0	5.0	30.0

SSCM的抗压强度和抗折强度见图2。由图2可见,A组中试件A-2的7、28d抗压强度最高,分别为

16.5、30.9 MPa;提高石膏掺量,A组中试件A-3、A-4和A-5的7、28 d抗压强度均明显降低,这可能是由于

较多的石膏延缓了体系水化^[16];试件A-1与A-4相 比,水泥掺量降低、钢渣掺量增大,其7d抗压强度和 抗折强度分别提升了17.8%、6.0%,表明较多水泥掺 量的试件强度不一定最佳,各原材料存在最优配合 比。基于此,将石膏掺量固定为5.0%,在试件A-2的 基础上降低水泥掺量,得到B组试件。由图2还可 见:随着水泥掺量的下降,B组试件的7d抗折强度降 低,而28d抗折强度变化不大;试件B-2的28d抗压



强度达最高值 31.5 MPa,此时钢渣粉掺量超过 50.0%,而水泥用量较少(7.5%);试件B-2的28d抗 压强度较7d时增长49.5%,可见其中后期强度增长 率较高,具有持续水化的特点。综上,试件B-2的力 学性能最佳,此时SSCM配合比m(钢渣):m(矿 渣):m(石膏):m(石灰):m(水泥)=52.5:30.0:5.0: 5.0:7.5。下文SSCM选用试件B-2进行后续的 SIBM试验。



图 2 SSCM 的抗压强度和抗折强度 Fig. 2 Compressive strength and flexural strength of SSCM

2.2 SIBM 的力学性能

2.2.1 SIBM 击实结果分析

参考同类型固废胶凝材料稳定基层材料时所用 灰剂量^[17-18],结合本文力学性能结果,设计灰剂量*w* 为 6%、8% 和 10%,制备的 SIBM 分别记为 SIBM-6%、SIBM-8%、SIBM-10%;对照组水泥 (PC)灰剂量为 6%,制备的 CIBM 记为 CIBM-6%。 试件的最大干密度和最佳含水率关系曲线见图3。 由图3可见:试件的最大干密度随着最佳含水率的增 加均呈现先增大再降低的规律,且随着灰剂量的增 加而增大,这可能是较多的胶凝材料改善了铁尾矿 间的润滑性,使基层材料更紧密,较大的干密度往往



Fig. 3 Relationship curves between maximum dry density and optimal moisture content of specimens

意味着基层材料结构更加致密,试件具有更高的强度;基层材料各试件的最佳含水率相差不大,其中灰剂量相差最大的试件SIBM-6%与SIBM-10%最佳含水率差仅为0.9%,这主要是因为各试件的主体材料均为铁尾矿,且其占比均在90%以上,因此相较于胶凝材料的种类和掺量,试件的主体材料对其最佳含水率影响更大。

2.2.2 SIBM力学性能分析

试件的无侧限抗压强度见图4。由图4可见: SIBM的UCS随着灰剂量的增加与龄期的延长而增加,该结果与击实结果一致;SIBM的灰剂量越大,干



密度越大,7 d UCS 越高,二者呈正相关;试件 SIBM-8%、SIBM-10%、CIBM-6%的UCS均大于 2.0 MPa,满足JTG D50—2017《公路沥青路面设计 规范标准》二级公路轻交通设计要求;虽然试件 SIBM-8%的7 d UCS略低于试件CIBM-6%,但其 28 d UCS却高于试件CIBM-6%,表明采用钢渣基胶 凝材料制备的基层材料后期强度具有持续增长的特 性,这与前文SSCM力学性能增长规律一致。基于 上述分析可知,SIBM选用灰剂量8%进行基层材料 的耐久性试验。

2.3 耐久性能

2.3.1 干缩性能

用干缩性能常用的评价指标干缩应变[8]来反映

基层材料的收缩情况。试件的干缩应变和失水率随 养护龄期的变化曲线见图 5。由图 5 可见:试件 SIBM-8%和CIBM-6%的干缩应变和失水率均随着 养护龄期的延长逐渐增加;与试件CIBM-6%相比, 试件 SIBM-8%干缩应变和失水率明显更小;试件 SIBM-8%和CIBM-6%的干缩变形和失水均主要发 生在养护龄期的前15d,其中试件SIBM-8%在前15d 的干缩应变达到总应变的85%,失水率达到总量的 90%,15d后试件的干缩应变和失水率变化均趋于平 缓直至最终稳定;当干缩应变基本完成时,试件 CIBM-6%的干缩应变为844.5×10⁻⁶,而试件 SIBM-8%的干缩应变为542.0×10⁻⁶。综上,试件 SIBM-8%的体积稳定性更好,不易产生收缩。





构建失水率与干缩应变之间的数学关系,有助于 理清基层材料各物理性能之间的关联,基于试件 SIBM-8%与CIBM-6%各龄期吸水率和干缩应变的 数据,采用一次函数对其进行拟合,结果见图6。由图6 可见,一次函数的拟合度*R*²均大于0.95,表明数据拟合 可信度高。试件SIBM-8%与CIBM-6%的干缩应变 与失水率符合线性关系,这为铁尾矿基层材料干缩应





变与失水率二者之间的关系提供数据支撑。此外,有 文献^[18]指出,胶凝材料对铁尾矿基层材料的干缩性能影 响较大,试件CIBM-6%相较于SIBM-8%干缩更大, 表明钢渣基胶凝材料能有效降低SIBM干缩,这可能 与水化产物的种类和含量以及试件的孔隙率有关。

2.3.2 水稳定性与抗冻性

水稳定性和抗冻性也是反映路面基层材料性能 优劣的重要指标。用吸水率和水稳定系数 $K_w^{[19]}$ 来表 征水稳定性,用冻融循环前后的UCS和残留抗压强 度比 B_{DR} 来表征抗冻性。试件的水稳定性与抗冻性 见图7。由图7可见,试件SIBM-8%和CIBM-6%的 吸水率均随着龄期的增长呈下降趋势,且试件 SIBM-8%的吸水率明显低于试件CIBM-6%;试件 SIBM-8%在28d龄期的吸水率低于2%,这可能是 由于试件SIBM-8%的干密度高于试件CIBM-6%, 相应的试件内部结构更密实,能够有效阻止水分的 迁移传输,导致干缩试验中试件SIBM-8%试件吸水 率更低;试件SIBM-8%的7、28d龄期 K_w 分别为 81.2%、94.2%,同龄期下试件SIBM-8%的 K_w 均高 于试件 CIBM-6%,表明试件 SIBM-8% 的水稳定性 优于试件 CIBM-6%^[20]。由图 7还可见,5次冻融后 试件 SIBM-8% 和 CIBM-6% 的 UCS 均下降,其*B*_{DR} 分别为 95.38%、93.81%,符合 JTG/T D31-062017《季节性冻土地区公路设计与施工技术规范》抗 冻性能技术要求,且试件SIBM-8%的UCS冻融残 留抗压强度比更高,表明SIBM具有更优异的抗冻 性,这可能与其吸水率低有关。





2.4 SIBM 水化产物定量及形貌

为消除铁尾矿中结晶性好的矿物对胶凝材料 水化产物组成含量的影响,测试了SSCM和PC净 浆水化产物的XRD图谱,结果见图8。由图8可 见:SSCM和PC净浆中主要水化产物为AFt、氢氧 化钙(CH)以及残留的石膏相;对比不同龄期水化 产物的特征衍射峰,PC净浆中AFt的28d衍射峰 较7d时有所减弱,表明AFt向单硫型水化硫铝酸 钙(AFm)转化;SSCM净浆中AFt衍射峰在7、28d 变化不大;对SSCM和PC水化产物进行定量分 析,发现28dSSCM净浆中AFt含量为4.82%,而 同龄期PC净浆中的AFt含量仅为2.87%,表明 SSCM体系中膨胀性产物AFt的生成量更大;此 外,SSCM净浆在28d时,石膏的特征峰仍存在,且





在 SSCM 净浆中未观察到 AFm 特征峰,表明此阶段 AFt 几乎没有向 AFm 转化,大量膨胀性产物 AFt 的存在不仅是强度增长的重要来源,也是干缩变形减少的主要原因^[21]。

试件 SIBM-8% 水化产物的 SEM 照片见图 9。 由图 9可见:7 d水化产物中有大量针棒状 AFt形成, 未发现 CH和片状 AFm,这与 XRD 结果一致, SIBM 体系中 AFt 作为早期主要的水化产物,相互搭接逐 步占据空隙形成了空间网状结构,是早期强度的重 要来源^[22], AFt 的膨胀特性也有效补偿了整体材料的 收缩变形^[10]; 而在水化龄期为 28 d时,除了观察到 AFt之外,水化产物中也发现大量水化硅(铝)酸钙 (C-(A)-S-H)凝胶^[23],且针棒状 AFt被 C-(A)-S-H凝 胶包裹,随着水化龄期的延长各水化产物相互填 充^[23],形成致密的结构,提高了整体稳定性。

2.5 孔结构

对试件 SIBM-8% 和 CIBM-6% 进行孔结构测试,结果见图 10。由图 10可见,试件 SIBM-8% 的累 计孔体积小于试件 CIBM-6%。根据吴中伟对孔级 的划分^[24],试件 SIBM-8% 和 CIBM-6% 中 90% 以上 孔为无害孔或少害孔,且试件 SIBM-8% 有害孔和多 害孔更少。由此可见,SSCM 能明显改善基层材料 的孔结构,使 SIBM 的结构更致密,在宏观性能上表 现为 UCS 的提升。这得益于 SSCM 早期强度的缓 慢形成,AFt 和凝胶等水化产物在颗粒孔隙间的填 充,使孔径细化、结构密实,试件吸水率和失水率均 降低,这也是 SIBM 具有低干缩性能和高抗冻性能的 原因。







图 10 试件的孔结构 Fig. 10 Pore structures of specimens

3 结论

(1)采用脱硫石膏、石灰和水泥协同激发钢渣和 矿渣粉活性,对提升大掺量钢渣基胶凝材料(SSCM) 强度效果显著。SSCM的最优配合比*m*(钢渣): *m*(矿渣):*m*(石膏):*m*(石灰):*m*(水泥)=52.5:30.0: 5.0:5.0:7.5,该配合比下其力学性能最佳,28 d 抗压 强度为 31.5 MPa。

(2) 钢渣稳定铁尾矿基层材料(SIBM)的干缩性 能和抗冻性提升显著。相比水泥稳定铁尾矿基层材 料(CIBM), 灰剂量为8%的SIBM(SIBM-8%)干缩 应变更小, 为542.0×10⁻⁶,5次冻融循环后残留抗压 强度比更高, 为95.38%, 具有更好的水稳定性。此 外,试件SIBM-8%的7d无侧限抗压强度为2.2 MPa, 强度符合二级公路轻交通设计要求。

(3)SSCM的强度来源是水化产物钙矾石(AFt) 和水化硅(铝)酸钙(C-(A)-S-H)凝胶,其中膨胀性水 化产物AFt对SIBM干燥收缩补偿发挥重要作用;此 外,SSCM能明显改善SIBM的孔结构,使SIBM的 孔隙率和孔径分布均优于CIBM,这也是其具有突出 强度和干缩性能的重要原因。

参考文献:

[1] 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 optimization of gelling activity and volume stability of steel slag[J]. Materials Reports, 2023, 37(11):119-127.(in Chinese)

- [2] 郝明月,李静,蔡基伟,等.磁铁尾矿砂在水泥基材料中的化 学稳定性研究[J].硅酸盐通报,2023,42(10):3688-3694.
 HAO Mingyue, LI Jing, CAI Jiwei, et al. Study on chemical stability of magnet tailings sand in cement-based materials[J].
 Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42 (10): 3688-3694.(in Chinese)
- ZHANG S F, NIU D T. Hydration and mechanical properties of cement-steel slag system incorporating different activators [J].
 Construction and Building Materials, 2023, 79:129981.
- [4] ZHANG S F, NIU D T, LUO D M. Enhanced hydration and mechanical properties of cement-based materials with steel slag modified by water glass[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 12:1830-1842.
- [5] ZHAO D Q, ZHANG B L, SHEN W G, et al. High industrial solid waste road base course binder: Performance regulation, hydration characteristics and practical application[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 313:127879.
- [6] 南雪丽,杨旭,张宇,等.钢渣-矿渣基胶凝材料协同水化机理研究[J].建筑材料学报,2024,27(4):366-374.
 NAN Xueli, YANG Xu, ZHANG Yu, et al. Study on synergistic hydration mechanism of steel slag-slag-based cementitious materials[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(4):366-374. (in Chinese)
- [7] 崔孝炜, 倪文, 任超. 钢渣矿渣基全固废胶凝材料的水化反应

机理[J]. 材料研究学报, 2017, 31(9):687-694.

CUI Xiaowei, NI Wen, Ren Chao. Hydration reaction mechanism of steel slag-based solid waste cementitious materials [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017, 31(9): 687-694.(in Chinese)

- [8] CHUF, LICH, WUCS. Research on the hydration process of solid waste-based cementitious materials and application in roadbase[J]. Frontiers in Energy Research, 2023(11):1348557.
- [9] 栗东平,平浩岩,张凯帆,等.钢渣-矿渣-脱硫石膏复合胶凝 材料的制备及水化机理[J].科学技术与工程,2023,23(6): 2558-2566.

LI Dongping, PING Haoyan, ZHANG Kaifan, et al. Preparation and hydration mechanism of composite materials containing steel slag, slag and desulfurization gypsum[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(6):2558-2566.(in Chinese)

 [10] 徐方,李恒,孙涛,等.过硫磷石膏矿渣水泥路面基层材料微观结构及力学性能[J].建筑材料学报,2022,25(3): 228-234,277.

XU Fang, LI Heng, SUN Tao, et al. Microstructure and mechanical properties of excess-sulfate phosphogypsum slag cementitious road base material[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(3):228-234, 277. (in Chinese)

- [11] LUCAS A C B, GABRIELA C S, JULIA C M, et al. Using iron ore tailings from tailing dams as road material [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(10):04016102.
- THOMAS S W S, SANDRA O, ROMILDO D T F, et al. Use of iron ore tailings and sediments on pavement structure [J]. Construction and Building Materials, 2022, 342:128072.
- [13] JI X P, SUN E Y, SUN Y L, et al. Study on crack resistance of cement-stabilized iron tailing [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2023, 24(2):2124251.
- [14] 宁宝宽,刘伟.特细铁尾矿砂综合利用研究[M].北京:化学工业出版社,2016:84.
 NING Baokuang, LIU Wei. Research on comprehensive utilization of extra fine iron tailings [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016: 84.(in Chinese)
- [15] LI H B, TONG Y F, ZHANG H B, et al. Study on road performance of cement fly ash stabilized steel slag—Concrete recycled macadam[J]. Materials, 2021, 14(24):7530.
- [16] 马璐璐,张翛,刘芳,等.赤泥-粉煤灰稳定煤矸石基层强度特 性及机理[J].建筑材料学报,2023,26(7):762-770.
 MA Lulu, ZHANG Xiao, LIU Fang, et al. Strength characteristics and mechanism of red mud-fly ash stabilized coal gangue base[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(7):

762-770.(in Chinese)

- [17] 孙兆辉,许志鸿,王铁斌,等.水泥稳定碎石基层材料干缩及 影响因素分析[J].建筑材料学报,2006,9(2):166-171. SUN Zhaohui, XU Zhihong, WANG Tiebin, et al. Research on dry shrinkage deformation properties of cement-stabilized macadam base course material[J]. Journal of Building Materials, 2006,9(2):166-171.(in Chinese)
- [18] 蒋应军,杨秀荣,李宁方,等.二灰碎石垂直振动试验方法及 评价[J].建筑材料学报,2015,18(2):351-356.
 JIANG Yingjun, YANG Xiurong, LI Ningfang, et al. Evalution of vertical vibration test method of lime-fiy ash-stabilized agggregate[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(2): 351-356.(in Chinese)
- [19] FENG D L, WANG J, WANG Y X, et al. Experimental study on solidification/stabilisation of high-salt sludge by alkali-activated GGBS and MSWI bottom ash cementitious materials[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19:e02417.
- [20] 王绪旺.无机结合料处治铁尾矿渣路用水稳定性试验研究[J].
 粉煤灰综合利用,2020,34(3):59-62,95.
 WANG Xuwang. Experimental study on the stability of road water used in treating iron tailings slag with inorganic binder[J].
 Fly Ash Comprehensive Utilization, 2020, 34(3):59-62,95.(in Chinese)
- [21] 胡力群,沙爱民.沥青路面水泥稳定类基层材料抗冲刷性能试 验及机理研究[J].中国公路学报,2003,16(1):16-19.
 HU Liqun, SHA Aimin. Experment and mechanism analysis for anti-erosion of cement stabilized soil material base-course of bituminous pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1):16-19.(in Chinese)
- [22] WANG H Y, GU X W, XU X C, et al. The effects of iron tailings on steel slag-based cementitious systems: Strength, hydration products, and volume stability[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 91:109702.
- [23] 许远辉,陆文雄,王秀娟. 钢渣活性激发的研究现状与发展[J]. 上海大学学报,2004,10(1):91-95.
 XU Yuanhuui, LU Wenxiong, WANG Xiujuan. Research and development in activation of steel slag activity [J]. Journal of Shanghai University, 2004, 10(1):91-95.(in Chinese)
- [24] 赵德强,张昺榴,朱文尚,等.道路基层复合胶凝材料的性能 调控[J].建筑材料学报,2020,23(5):1137-1143.
 ZHAO Deqiang, ZHANG Bingliu, ZHU Wenshang, et al. Performance regulation of road base composite binder [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5):1137-1143.(in Chinese)