



钢渣微粉-焚烧炉渣复合固化路基土的强度特性 与微观机制

邵飞洋¹, 项国圣¹, 张红日², 王鑫鑫¹, 宋绍辉¹

(1. 安徽工业大学 建筑工程学院; 安徽 马鞍山 243032; 2. 广西交科集团有限公司, 南宁 530000)

摘要:为缓解砂石原料短缺问题并推动钢渣与生活垃圾焚烧炉渣(MSWIBA)的资源化利用,以MSWIBA和天然土体为基材,外掺钢渣微粉制备路面基层混合土材料。采用宏观与微观相结合的研究手段,通过7d无侧限抗压强度试验、三轴压缩试验分析材料宏观力学性能,借助XRD(X射线衍射)、SEM(扫描电子显微镜)测试表征微观结构特征,系统探究钢渣微粉掺量及MSWIBA占比对改良土强度的影响规律,并揭示其固化作用机理。宏观结果表明:钢渣微粉与MSWIBA的掺入能显著提升改良土的力学性能,其强度随两者掺量变化均呈现先升高后降低的特征,据此确定了最优配合比;微观分析表明:固化效应源于钢渣微粉水化生成的胶凝物质、MSWIBA在碱性环境中的活性激发,以及MSWIBA与土颗粒的堆叠摩擦作用,共同优化了材料内部结构。

关键词:钢渣;生活垃圾焚烧炉渣;抗压强度;微观结构;路基材料

中图分类号:U414 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Strength characteristics and microscopic mechanism of roadbed soil stabilized by steel slag micro-powder and incineration slag composite

SHAO Feiyang¹, XIANG Guosheng¹, ZHANG Hongri², WANG Xinxin¹,
SONG Shaohui¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, Anhui, P. R. China; 2. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, P. R. China)

Abstract: To alleviate the shortage of sand and gravel raw materials and promote the resource utilization of steel slag and municipal solid waste incineration bottom ash (MSWIBA), this study used MSWIBA and natural soil as base materials, with steel slag micro-powder added externally to prepare mixed soil materials for pavement bases. A combination of macroscopic and microscopic research methods was adopted: macroscopic mechanical properties were analyzed via 7-day unconfined compressive strength tests and triaxial compression tests, while

收稿日期:2025-09-20

基金项目:国家自然科学基金(No.42577533);广西科技计划(桂科ZY24212023);广西重点研发计划(桂科AB23026071)

作者简介:邵飞洋(2001-),男,主要从事固废资源化利用研究,E-mail:s994890899@163.com。

张红日(通信作者),男,正高级工程师,博士,E-mail:sjtu8057258@sjtu.edu.cn。

Received: 2025-09-20

Foundation items: Funding Project: National Natural Science Foundation of China (No. 42577533); Guangxi Science and Technology Program Project (Guike ZY24212023); Guangxi Key Research and Development Program Project (Guike AB23026071)

Author brief: SHAO Feiyang (2001-), main research interest: resource utilization of solid waste, E-mail: s994890899@163.com.

ZHANG Hongri (corresponding author), senior engineer, PhD, E-mail: sjtu8057258@sjtu.edu.cn.

microstructural characteristics were characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The influence regularities of steel slag micro-powder dosage and MSWIBA proportion on the strength of improved soil, as well as their solidification mechanisms, were systematically explored. The results show that the addition of steel slag micro-powder and MSWIBA can significantly enhance the mechanical properties of the improved soil, and the strength first increases and then decreases with the change of their dosages, based on which the optimal mix ratio is determined. The solidification effect stems from the cementitious substances generated by the hydration of steel slag micro-powder, the activation of MSWIBA in an alkaline environment, and the stacking and friction effects between MSWIBA and soil particles, which collectively optimize the internal structure of the material. The research provides a feasible reference for the preparation of base materials by MSWIBA and steel slag resource utilization.

Keywords: steel slag; municipal solid waste incineration bottom ash (MSWIBA); compressive strength; micro-structure; subgrade materials

全球城市化进程的加速使得城市生活垃圾产生量激增,目前每年已达约 20 亿 t,预计到 2050 年将进一步攀升至 35 亿 t^[1]。当前,填埋与焚烧是处理城市生活垃圾的主要方式^[2],而在焚烧产生的残余物里,炉渣占比约 80%,属于一般固体废物^[3-4];剩余部分为飞灰,由于含有重金属、二噁英等有害成分,被划定为危险废物,必须经过专门的稳定化处理才能进行后续处置^[5]。需要指出的是,炉渣经过恰当处理可转化为具有一定强度和合理粒径分布的炉渣集料^[6-7],其内部含有的水泥熟料矿物以及活性 SiO_2 、 Al_2O_3 ^[8-9],赋予了它良好的胶凝活性,能够通过水化反应与火山灰发生反应生成胶凝产物,从而有效提高材料整体的内聚力^[10]。目前已有许多学者对生活垃圾焚烧炉渣(MSWIBA)进行了研究。

Zhao 等^[11]针对不同粒径炉渣进行了 120 d 的模拟试验,从微观形貌与结构、矿物组成等方面深入阐明了不同预处理方式对炉渣强度发展的影响机制,为炉渣在道路建设领域的精准高效利用提供了重要参考。张翠榕等^[12]使用城市生活垃圾焚烧炉渣底灰(MIBA)部分替代水泥制备生活垃圾焚烧炉渣泡沫混凝土(MIBAF),结果发现在 4 种碱激发剂下,炉渣底灰均表现出较好的活性,促进了水化反应的进行。张彬彬等^[13]将 6% 的矿渣等质量替换为 MSWIBA,制备碱矿渣水泥净浆,结果发现,MSWIBA 的掺入较对照组具有更高的抗压强度和耐高温性能。Arm^[14]考察了不同焚烧厂的炉渣,将焚烧炉渣的弹性模量及塑性变形与普通砂石材料进行对比分析,发现焚烧炉渣可以替代级配碎石等传统道路基层材料。马鹏等^[15]通过正交试验方法,研究了以生活垃圾焚烧炉渣泥为主要原料制备陶粒的工艺参数,并分析了陶粒的物理力学性能和重金属浸出特性,结果表明,通过优化烧制工艺,可制备出堆积密度为 783 kg/m^3 、抗压强度为 7.9 MPa 、

1 h 吸水率为 9.8% 的陶粒,其各项性能指标均符合轻集料国家标准。刘栋等^[16]研究了垃圾焚烧炉渣集料(BAA)的胶凝特征,结果表明,BAA 含有水泥熟料矿物和活性 SiO_2 、 Al_2O_3 ,体现出水硬性和火山灰活性特征。Sormunen 等^[17]为研究 MSWIBA 在实际工程应用中的力学性能,分别修建了 MSWIBA 结构层和天然骨料结构层,对比分析其使用期间的力学性能,结果表明,MSWIBA 结构层的中下部结构性能与天然骨料一致,可将 MSWIBA 用于道路和现场结构的较低结构层。

与此同时,作为钢铁工业副产物的钢渣,因其丰富的矿物成分和化学反应活性,在建筑材料领域的应用潜力也逐渐显现^[18-19]。钢渣可作为土壤改良剂,改善土壤的物理和化学性质^[20-22]。Wu 等^[23]通过调整和活化废钢渣,制备出一种新型胶凝材料,并用其改性膨胀土,改性后的膨胀土工程性能显著提升,满足公路路基建设标准。袁明月等^[24]发现钢渣微粉改良膨胀土与石灰改良土在改良机理上有相似性,且钢渣微粉的强度改良效果明显优于石灰。Xu 等^[25]将钢渣与黏土混合,发现钢渣掺量为 40% 时,土混合料的抗剪强度、阻尼比和剪切刚度较好。钢渣还可作为道路建设中的骨料,用于沥青混合料、路基和路面^[26-27]。Aziz 等^[28]发现钢渣的疏水性使其与沥青结合料具有良好的黏附性,有助于抵抗道路的剥落和其他缺陷。黄伟等^[29]向土中掺入钢渣及矿渣微粉,发现 50% 钢渣+50% 土并掺入占钢渣重量 40% 的矿渣微粉时,混合土体强度值可达 7.19 MPa 。然而,目前炉渣和钢渣的应用对二者的消耗量有限,大量剩余的炉渣和钢渣不得不进入填埋场,不仅造成资源的严重浪费,还加剧了填埋场的占地压力与处置成本。另一方面,中国许多地区面临砂石资源匮乏的困境,在修筑农村公路等低等级公路时,常采用石灰、水泥稳定细粒土作为路面基

层,但此类基层不仅造价偏高,且耐久性较差,严重影响道路的使用寿命^[30]。

笔者拟结合中国东部地区土壤及大量堆存的 MSWIBA 和钢渣,采用钢渣微粉稳定 MSWIBA 混合土的方式,通过宏观(无侧限抗压强度试验、三轴压缩试验)和微观试验(XRD、SEM)探究其力学性能及固化机理,在此基础上,综合评价钢渣-MSWIBA 混合土作为公路基层材料的可行性与适用性。

1 试验材料和方法

1.1 原材料

土样取自马鞍山公路工地开挖场地,采集于地表以下 2~3 m 深度。有机质含量低。使用前需对其进行破碎、烘干。测得土体液限为 39.6%,塑限为 20.8%,塑性指数 I_p 为 18.8。该土样的最佳含水率为 18.2%、最大干密度为 1.85 g/cm³。

MSWIBA 取自安徽省某垃圾焚烧厂,含有石英、长石等硅铝质颗粒及玻璃体等组分,其化学成分如表 1 所示。从中可以看出该 MSWIBA 中 SiO₂ 及 CaO 占比较大,为 39.96% 和 31.55%;Fe₂O₃ 和 Al₂O₃ 的占比分别为 4.45% 和 10.02%。对 MSWIBA 进行毒性浸出实验,实验方法依据 TCPL,浸出结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,测定的 6 种主要重金属污染的浸出值均小于国家标准,即 MSWIBA 属于一般固体废弃物。MSWIBA 粒径为 2 mm 以下,土体和 MSWIBA 的级配曲线见图 1。

表 1 MSWIBA 化学成分

Table 1 Chemical composition of MSWIBA

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	其他
39.96	4.45	10.02	3.75	31.55	2.05	8.22

表 2 MSWIBA 毒性浸出

Table 2 Toxic leaching of MSWIBA

控制量指标	实测值/(mg/L)	浸出毒性标准限值/(mg/L)
Ba	0.459	100
Cd	0.021	1
Cr	0.432 8	5
Cu	1.003 5	100
Pb	0.034	5
Zn	8.589 3	100

所用钢渣为安徽省马鞍山市马钢钢渣,其陈伏时间已超过两年,表观密度为 3 400 kg/m³,堆积密度为 1 670 kg/m³。钢渣和硅酸盐水泥的成分较为相似,含有硅酸三钙和硅酸二钙等具有活性的物

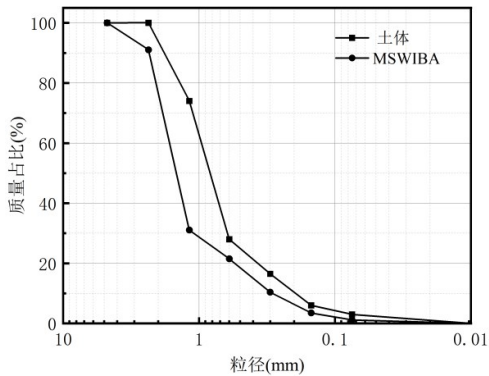


图 1 土和 MSWIBA 的级配曲线

Fig.1 Gradation curves of soil and MSWIBA

质。其主要成分是 Ca、Si、Fe、Mg、Al、Mn 等的氧化物,其化学成分如表 3 所示。其中含量最多的是 CaO 和 Fe₂O₃,将其研磨后过 0.075 mm 筛,取筛下钢渣用于实验。图 2 为实验用材料。

表 3 钢渣化学成分

Table 3 Chemical composition of steel slag

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	其他
58.85	12.80	5.21	14.39	2.63	2.20	2.74



(a) 待改良土 (b) 钢渣微粉 (c) 生活垃圾焚烧炉渣

图 2 试验材料

Fig.2 Test materials

1.2 试验方法

1.2.1 试样制备

按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024)试验方法,按照表 4 中各试验材料的配比,准确称取所需土、MSWIBA、钢渣微粉的量混合均匀。按实验所得最佳水质量分数称取纯水加入混合土中,继续搅拌 20 min 视为搅拌完成,随后装入密封袋静置闷料 12 h,确保水分在混合土中均匀分布。按压实度为最大干密度的 96% 将拌制完成的混合土利用千斤顶和试模静压成 Φ50 mm×H50 mm 的圆柱形试件,用保鲜膜密封包裹,在标准养护箱(养护温度为(23±1)℃,相对湿度为 98%)中养护至指定龄期;为了保证数据的可靠性,每组试样取 3 个平行样本,取平均值分析结果。

1.2.2 无侧限抗压强度试验

试验选用浙江土工生产的 STLQ-3 型路面材料强度试验仪进行试验,试验过程中保持速率约为 1 mm/min,记录试件破坏时的最大荷载 P ,试件的

表 4 实验材料配合比

Table 4 Mix ratio of test materials

MSWIBA 与土体质量比/%	钢渣微粉含量/%
30、40、50、60、70	0、5、10、15、20

注:钢渣微粉含量为钢渣微粉质量占 MSWIBA 和土体总质量的百分比。

无侧限抗压强度 R_c 用式(1)计算得出。

$$R_c = \frac{P}{A} = 0.51P. \quad (1)$$

式中: P 为试件破坏时最大荷载,N; A 为试件截面积, mm^2 。

1.2.3 三轴压缩试验

应用应力-应变控制式三轴剪切渗透试验仪对试样进行不固结不排水(UU)三轴压缩试验。试样制备采用 $\Phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 标准圆柱体(分3层击实制样),标准条件下养护 7 d。围压设定为 50、100、200 kPa。以 $0.05\%/\text{min}$ 恒定轴向应变速率加载,加载至试样破坏或轴向应变 $15\% \sim 20\%$;每个围压点至少做 3 件平行试样以保证统计可靠性。

1.2.4 微观分析

采用 XRD 测试物质发生反应后的矿物成分,试验采用德国 Bruker 公司 D8 ADVANCE X-射线衍射仪进行衍射图谱测试, 2θ 扫描范围为 $10^\circ \sim 80^\circ$ 。采用 SEM 观测物体颗粒微观结构,试验采用日本电子株式会社 JSM-6490LV 扫描电子显微镜进行扫描电镜测试,扫描前依照要求对测试试件进行真空镀金。

2 结果与分析

2.1 无侧限抗压强度

2.1.1 MSWIBA 含量的影响

图 3 为改良土 7d 无侧限抗压强度与 MSWIBA 含量的变化关系。可见,当 MSWIBA 质量占比处于 $30\% \sim 50\%$ 区间时,强度随其占比增加呈持续增长趋势,且所有配合比强度峰值均对应 50% 占比。以钢渣微粉掺量 15% 组为例,MSWIBA 占比从 30% 提升至 50% 时,强度增幅达 24.2% 。从力学机制看,低 MSWIBA 含量阶段(土占比高),强度主要依赖土颗粒的堆砌咬合与表面摩擦,胶结物质匮乏,结构稳定性弱。随着 MSWIBA 占比增加,其含有的石英、长石等硅铝质颗粒及玻璃体,一方面通过颗粒堆砌与摩擦增强结构骨架稳定性;另一方面,在钢渣微粉反应营造的碱性环境中,硅铝质组分逐步激活,钢渣微粉释放的 Ca^{2+} 、 OH^- ,与 MSWIBA 及土体中活性 SiO_2 、 Al_2O_3 协同,促使 C-S-H 凝胶等胶结物质大量生成。这种胶结物与土颗粒

团聚体结合,既强化颗粒黏结,又填充内部孔隙,进一步强化土体结构。

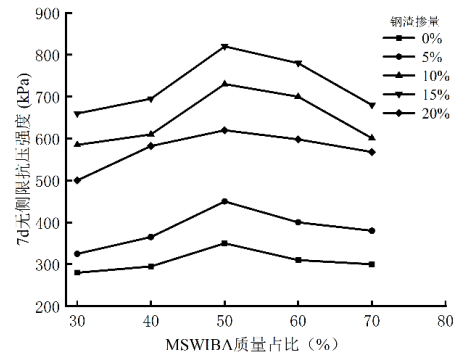


图 3 不同 MSWIBA 掺量下改良土 7d 无侧限抗压强度

Fig.3 7-day unconfined compressive strength of improved soil under different slag dosages

当 MSWIBA 质量占比为 $50\% \sim 70\%$ 时,强度则随着炉渣质量占比增加持续下降, 15% 钢渣微粉掺量时, 70% MSWIBA 质量占比相较于 50% 的强度降幅为 17.2% ,这是因为 MSWIBA 掺量过高时,颗粒间空隙率反而增大,导致密实度下降,同时过量 MSWIBA 使得改良土中黏粒含量降低,削弱了整体黏结性。

对比不同 MSWIBA 掺量组,在 10% 和 15% 钢渣微粉掺量下, 60% MSWIBA 占比强度较 40% MSWIBA 占比分别提高了 14.75% 和 12.23% ;而 70% MSWIBA 占比相较于 30% 则提高了 2.7% 和 3% ,这印证了 MSWIBA 能有效替代天然土体作为骨料。

2.1.2 钢渣微粉含量的影响

图 4 为改良土 7d 无侧限抗压强度随钢渣微粉含量的变化。由图 4 可知,在钢渣微粉掺量为 $0\% \sim 15\%$ 时,改良土强度随钢渣微粉掺量增加呈明显提升趋势。这一现象的主要原因在于:钢渣微粉中含有的硅酸三钙(C_3S)、硅酸二钙(C_2S)及铝酸三钙(C_3A)等组分,与水发生水化反应后生成水化硅酸钙凝胶(C-S-H)和钙矾石(Aft)等胶凝产物。其中,C-S-H 凝胶可包裹土壤中的黏土矿物,通过形成三维网状结构将松散颗粒粘结为整体;钙矾石(Aft)晶体则能填充孔隙以提高基体密实度,使土粒间联结更紧密,进而提升土体强度。

分析表明,钢渣微粉掺量为 5% 时强度呈小幅提升,以渣土比(MSWIBA 与土质量比值) $5:5$ 为例, 5% 钢渣微粉掺量的强度较对照组(未掺钢渣微粉)提升 28.57% ;而钢渣微粉掺量为 15% 时,强度较 5% 钢渣微粉掺量和对照组分别提升 134.28% 和 82.22% 。这是因为钢渣微粉掺量较少时,参与水化反应的物质不足,水化产物较少,强度主要由

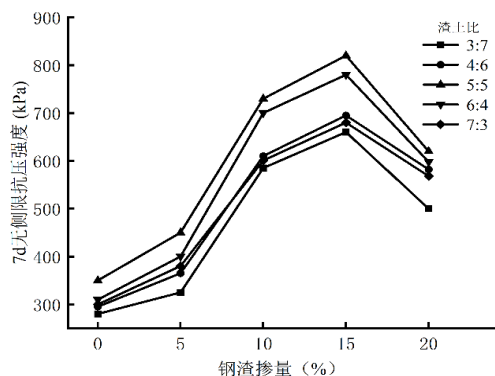


图4 不同钢渣微粉掺量下改良土7d无侧限抗压强度

Fig.4 The 7-day unconfined compressive strength of improved soil under different dosages of steel slag micro-powder

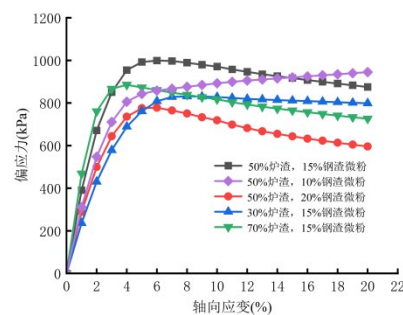
颗粒堆砌与摩擦作用产生;随着钢渣微粉掺量增加,水化反应趋于充分,水化产物增多,基体更加密实。然而,当钢渣微粉掺量超过15%时,所有配合比下试样强度均呈下降趋势,原因在于过高的钢渣微粉掺量会导致反应不完全,未反应的钢渣微粉堆积形成架空结构,使基体密实度降低,从而造成强度下降;此外,高掺量钢渣微粉中的游离氧化钙(f-CaO)反应会产生膨胀应力,导致基体内部产生微裂纹,引发结构内部破坏,进一步降低强度。

综上分析,钢渣微粉掺量为5%~10%时,所有配合比试样强度增长较快,至15%钢渣微粉掺量时,强度增幅则有所减小,掺量超过15%时,强度则呈现下降趋势。因此,实际工程中可结合成本等因素对钢渣微粉掺量进行进一步优化。

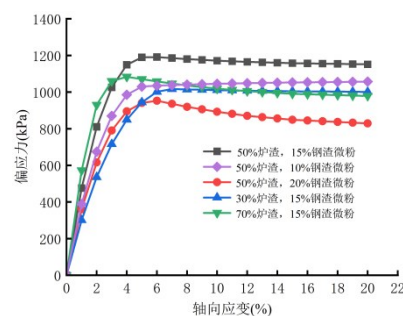
2.2 三轴剪切试验结果分析

图5为不同配合比试样在不同围压下的不固结不排水实验得到的应力-应变曲线。由图5可以看出,试样的峰值强度随着钢渣微粉和炉渣掺量的增加先增大后减小,并在炉渣占比50%并外掺15%钢渣微粉时达到峰值。此外,同一配比试样在不同围压下,围压越大其峰值强度越强。计算得出不同改良土的黏聚力和内摩擦角如表5所示。根据表中数据可见,随钢渣和炉渣掺量比例的变化,混合土的抗剪强度指标(内摩擦角与黏聚力)呈现出一定的规律性波动。以50%炉渣系列为例,内摩擦角由10%钢渣时的 34° 略升至15%钢渣时的 35.01° ,随后在20%钢渣时降至 32.51° ,表明适量钢渣有助于提高颗粒间的摩擦咬合作用,但过量掺入会导致颗粒级配不均及界面结合减弱,从而降低摩阻性能。同样,黏聚力从194 kPa上升至214 kPa后下降至170 kPa,说明钢渣微粉的适量掺入(约15%)可促进水化反应生成C-S-H凝胶,提高胶结致密度,而过高掺量则因未充分反应的惰性颗粒增多,形成弱界

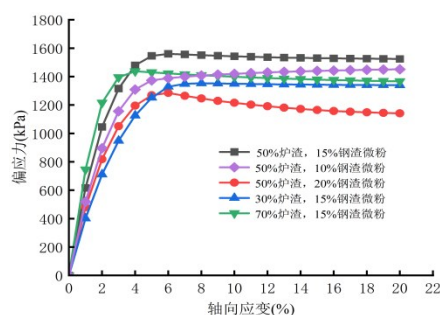
面层。不同炉渣比例下(30%与70%炉渣)的对比结果亦表明,过高或过低的炉渣含量均不利于形成稳定的结构骨架:30%炉渣体系中有效胶结物质不足,强度偏低;而70%炉渣体系孔隙增大、结构松散。总体而言,50%炉渣+15%钢渣为较优组合,可在颗粒骨架支撑与胶结反应间实现平衡,使内摩擦角与黏聚力同时达到较高水平,从而获得最优的抗剪性能。



(a) 50 kPa 围压



(b) 100 kPa 围压



(c) 200 kPa 围压

图5 不同围压下不同配比试样的三轴试验应力-应变曲线

Fig.5 Triaxial stress-strain curves of specimens with different mix ratios under different confining pressures

表5 不同改良土的黏聚力和内摩擦角

Table 5 Cohesion and internal friction angle of different improved soils

试样配合比	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa
50% 炉渣+15% 钢渣	35.01	214
50% 炉渣+10% 钢渣	34.00	194
50% 炉渣+20% 钢渣	32.51	170
30% 炉渣+15% 钢渣	33.50	177.32
70% 炉渣+15% 钢渣	34.06	180.55

3 微观机理分析

为探究 MSWIBA 及钢渣微粉固化土的机理,基于 MSWIBA 混合土的最佳配合比(50%MSWIBA+50%土,并外掺占 MSWIBA 与土总质量 15% 的钢渣微粉),分别制备 4 类试样:100% 土(标号 A);50% 纯 MSWIBA+50% 土(标号 B);100% 纯土+15% 钢渣微粉(标号 C);50%MSWIBA+50% 土+15% 钢渣微粉(标号 D)。将试样标准养护 28 d 后进行 X 射线衍射(XRD)试验,结果如图 6 所示。由图 6 可见,4 类试样的衍射峰位置和数目大致相同,但衍射峰强度存在差异,表明其矿物组成相似但结晶度不同。

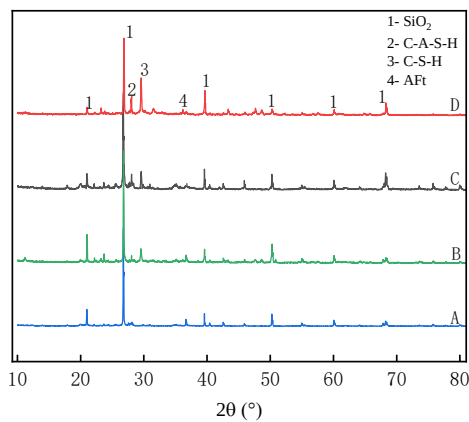


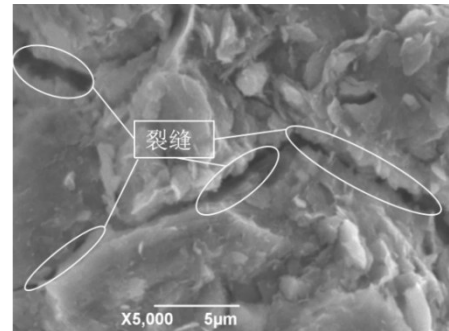
图 6 不同配比下改良土 XRD 图

Fig.6 XRD patterns of improved soil at different ratios

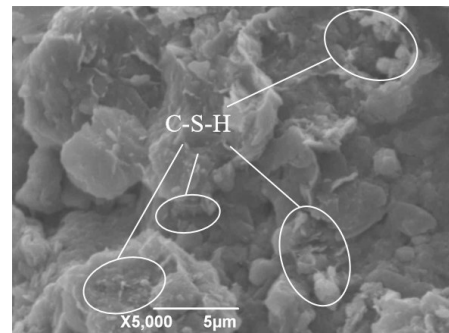
图中 1 号峰为二氧化硅(石英)的衍射峰,2 号峰为钙铝硅酸盐水合物(C-A-S-H)的衍射峰,3 号峰为水化硅酸钙凝胶(C-S-H)的衍射峰。4 号峰为钙矾石(AFt)的衍射峰。对比 A 组与 B 组可知,MSWIBA 的掺入使试样中出现新的 C-S-H 凝胶衍射峰,说明 MSWIBA 可促进水化产物生成,这与 MSWIBA 成分中含有的 CaO 等活性组分密切相关。然而有限的水化产物仅能提供有限的强度增益,这与未掺钢渣微粉时强度基数较低的宏观现象相符。对比 D 组与 B 组发现,加入钢渣微粉后,CASH 和 C-S-H 凝胶的衍射峰强度显著提升,且有新的 AFt 衍射峰生成,这是由于钢渣微粉中含有的硅酸三钙(C_3S)、硅酸二钙(C_2S)及铝酸三钙(C_3A)等组分,与水发生水化反应后生成(C-S-H、AFt)等胶凝产物,基体结构更密实,进而提升强度,这些大量生成的 C-S-H 凝胶、C-A-S-H 和 AFt 晶体,这正是改良土强度随钢渣掺量增加(0%~15%)而大幅提升(图 4)以及黏聚力显著增强(表 5)的根本化学原因。进一步对比 D 组与 C 组可知,MSWIBA 的加入使得 C-S-H、C-A-S-H、AFt 衍射峰增强,这表明 MSWIBA 在钢渣微粉形成的碱性环境下活性逐现,

进一步促进了水化反应,从而使得胶凝物质增多。这解释了在相同钢渣掺量下,MSWIBA 作为骨料的体系(D 组)比纯土体系(C 组)具有更优的潜力,为 50% MSWIBA 含量时强度达到峰值的现象提供了化学层面的支撑。

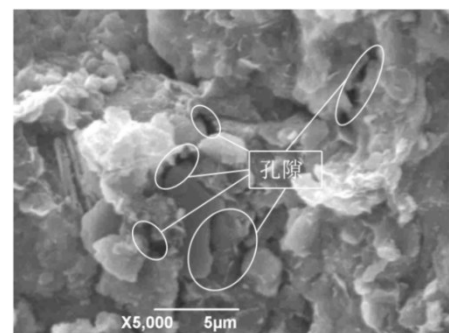
为探究 MSWIBA 混合土不同渣土比(MSWIBA 与土质量之比)微观结构变化,基于 MSWIBA 混合土最佳配合比外掺 15% 钢渣微粉,分别制备 30%MSWIBA+70% 土、50%MSWIBA+50% 土、70%MSWIBA+30% 土不同比例的 MSWIBA 混合土,标准养护 7 d 后取样进行扫描电镜试验,试验结果如图 7 所示。由图 7 可知,MSWIBA30%+70% 时,土相对 MSWIBA 占比大,从而基本单元体主要由土颗粒团聚堆叠形成;微观结构孔隙较大,且裂缝较宽,互相连通;表



(a) 渣土比=3:7



(b) 渣土比=5:5



(c) 渣土比=7:3

图 7 15% 钢渣微粉掺量不同渣土比下改良土 SEM 图
Fig.7 SEM images of improved soil with different slag-soil ratios and 15% steel slag micro-powder content

面的 C-S-H 凝胶较少,团聚体间黏结力较小,这种疏松且弱连接的结构直接导致了其较低的宏观力学强度,对应于图 3 强度曲线的左侧上升段。MSWIBA50%+50% 土时基本单元体由土颗粒和 MSWIBA 颗粒共同堆叠形成,表面存在少量孔隙,其间存在未连通的细微裂缝;表面的 C-S-H 凝胶分布较广,团聚体间黏结力大。这种致密、胶结充分的微观结构,是试样宏观无侧限抗压强度达到峰值(图 3)、同时获得优良抗剪性能(表 5)的物理基础。MSWIBA70%+30% 时,MSWIBA 相对土占比大,从而基本单元体主要由 MSWIBA 颗粒团聚堆叠形成;砂颗粒之间的孔隙由于没有充足的土壤颗粒填充,造成颗粒之间的裂缝较宽,密实度降低,进而使得改良土性能有一定的降低。这种“骨架”过剩而“填充”不足的结构缺陷,直接解释了强度在 MSWIBA 掺量超过 50% 后开始下降的现象。

为研究 MSWIBA 混合土强度形成机理,按照 MSWIBA 混合土的最佳配合比分别制备 50% 纯 MSWIBA 混合土、50% 纯 MSWIBA+5% 钢渣微粉混合土、50% 纯 MSWIBA+10% 钢渣微粉混合土、50% 纯 MSWIBA+15% 钢渣微粉混合土、50% 纯 MSWIBA+20% 钢渣微粉混合土,标养 7 d 后取样进行扫描电镜试验,揭示 MSWIBA 混合土在不同固化作用下结构差异,试验结果如图 8 所示。由纯 MSWIBA 混合土 5000 放大倍数下的电镜图可以

看出:基本单元体主要呈微粒状、片状,局部有形状不规则团粒的现象;基本单元体间呈点面或面面接触方式,堆叠形成架空结构,结构疏松,仅有少量的胶结物质填充于其中。胶结物质的出现主要由于素土及 MSWIBA 中活性的金属氧化物,可以一定程度上将基本单元体黏结起来,具有一定的联结力。而随着钢渣微粉的掺入微观结构主要特征为孔隙减小,呈细微状,且孔隙间不再连通,可见基本单元体间连接更为紧密;基本单元体间呈面面接触方式;表面分布有黏性物质,孔隙中也被大量填充,联结成一体。当钢渣微粉掺量为 15% 时:微观结构主要特征为基本形成一整体,无明显孔隙,仍存在细微小裂缝但不连通;基本单元体呈现更大的团聚体有大量钢渣微粉水化产物水化硅酸钙凝胶(C-S-H 凝胶)呈纤维状和片状填充于其中。钢渣微粉发挥其胶凝性,使得整体材料孔隙率降低,结构变得密实,宏观表现为强度得到提升,与试验结果相吻合。而当钢渣微粉掺量超过 15% 时,微观结构主要特征为结构裂缝增多,基体变得松散,表面存在网状胶凝产物,但存在过多未反应的钢渣微粉,钢渣微粉产生聚集,致使结构分布不均匀,结构强度较低。这种因材料过量、反应不均导致的结构不均匀性和内部微裂纹,正是当钢渣掺量超过 15% 后抗压强度与抗剪强度均开始下降的根本原因。

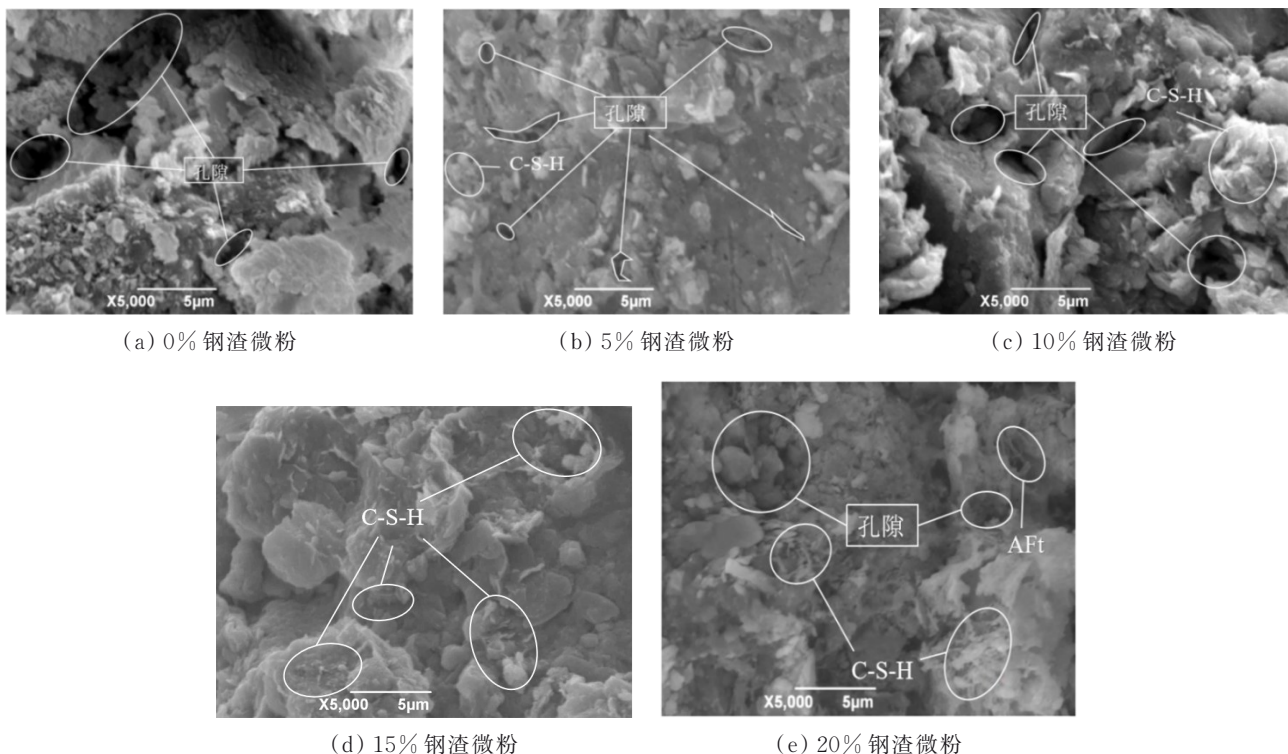


图 8 5:5 渣土比下不同钢渣微粉掺量的改良土 SEM 图

Fig.8 SEM images of improved soil with different steel slag micro-powder dosings at a 5:5 slag-soil ratio

影响 MSWIBA 混合土性能的主要因素有:孔隙、裂缝、基本单元体类型、水化产物等。钢渣微粉和 MSWIBA 的掺入使得颗粒间摩擦增强,基本单元体主要以团聚体类型为主,体积显著增大,之间的间距减小,进而孔隙减小,密实度增大;另一方面水化反应生成大量的水化产物 C-S-H 凝胶填充于孔隙间对提高基体密实性、提升强度具有重要作用。根据 7 d 无侧限抗压强度可以得出最优配合比为:50%MSWIBA+50%土体,并外掺 15% 钢渣微粉。试样强度为 0.82 MPa,满足《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)中基层及底基层强度要求。

4 讨论

4.1 工程应用

制备的钢渣微粉-MSWIBA 复合固化土,核心应用场景为低等级公路路面基层,替代传统石灰/水泥稳定细粒土或天然砂石骨料。传统基层材料存在造价高(水泥/石灰成本占比超 30%)、耐久性差(易开裂)等问题,而本材料以固废为主要原料,兼具经济性与环保性。根据《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)要求,低等级公路柔性基层 7 d 无侧限抗压强度需 ≥ 0.5 MPa。钢渣微粉-MSWIBA 复合固化土最优配合比(50%MSWIBA+50%土体+15%钢渣微粉)的 7 d 无侧限抗压强度达 0.82 MPa,比规范要求高 36.7%;与天然砂石骨料(常规 7 d 抗压强度 0.5~0.7 MPa)相比,强度提升 17.1%~64.0%,完全满足路面基层强度需求,可替代传统砂石原料。

在实际应用时需注意室内试验与现场实际环境的差异:1)养护条件:室内为标准环境($(23\pm 1)^{\circ}\text{C}$, 98% 相对湿度),而现场可能面临高温($> 35^{\circ}\text{C}$)、降雨或低温($< 5^{\circ}\text{C}$),易导致含水率波动($\pm 3\%$)及养护不充分,建议现场采用覆膜+洒水养护,低温时采取保温措施;2)压实控制:室内压实度精准控制为 96%,现场可能因机械精度差异导致压实度波动($\pm 2\%$),需增加压实度检测频次(每 50 m 检测 1 组);3)材料均匀性:室内材料混合均匀,现场可能因 MSWIBA 筛分不彻底(含少量 > 2 mm 颗粒)导致局部强度偏低,需加强原料预处理环节的质量管控。

4.2 展望

在无侧限抗压试验和三轴压缩试验的基础上,证实了改良土其卓越的力学特性。在此基础上,在后续研究中应重点开展水稳定性试验、承载比试验、耐久性试验等,以进一步评估改良土的性能,为

该新型改良土的工程适用性提供更为全面和可靠的评价。

5 结语

以生活垃圾焚烧炉渣、天然土体为原料,掺入钢渣微粉制备路面基层用 MSWIBA 混合土,并通过一系列性能试验与微观测试,得出以下结论:

1)钢渣微粉与 MSWIBA 可显著提升天然土体的工程性能:7d 无侧限抗压强度随钢渣微粉掺量(0%~20%)及 MSWIBA 占比(30%~70%)增加均呈“先升后降”趋势。当配合比为 50% MSWIBA+50% 土体+15% 钢渣微粉时,强度达峰值(0.82 MPa),较无钢渣微粉组(0% 掺量)提升 82.22%,较 MSWIBA 占比 30% 组提升 24.2%;而 MSWIBA 占比超 50% 后强度下降,70% 占比组较 50% 组降幅 17.2%,钢渣微粉超 15% 后因未反应颗粒架空及微裂纹产生,强度较 15% 组下降 12.5%(以渣土比 5:5 为例)。该最优配合比满足公路基层强度要求。

2)钢渣微粉的水化反应是强度提升的核心:钢渣微粉中 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 与水反应生成 C-S-H 凝胶、C-A-S-H 凝胶及 AFt 晶体,XRD 测试显示最优配合比组的 C-S-H 衍射峰强度较无钢渣微粉组提升较大,AFt 衍射峰新增;SEM 观测显示该组基体孔隙率较小,胶凝物质填充孔隙并黏结颗粒,显著提升基体密实度。

3)MSWIBA 在钢渣微粉水化产生的碱性环境中进一步加速水化进程,使胶凝物质总量增加;渣土比为 50:50 时,土颗粒与 MSWIBA 颗粒通过堆叠作用及表面摩擦实现紧密结合,协同增强结构稳定性,从而使宏观强度达到最大值。

参考文献

- [1] YATOO A M, HAMID B, AHMAD SHEIKH T, et al. Global perspective of municipal solid waste and landfill leachate: Generation, composition, eco-toxicity, and sustainable management strategies [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(16): 23363-23392.
- [2] TRINDADE A B, PALACIO J C E, GONZÁLEZ A M, et al. Advanced exergy analysis and environmental assesment of the steam cycle of an incineration system of municipal solid waste with energy recovery [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 157: 195-214.
- [3] WOO B H, JEON I K, YOO D H, et al. Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash as fine aggregate of cement mortars [J]. Sustainability, 2021, 13(16): 8832.

- [4] BANDARRA B S, SILVA S, PEREIRA J L, et al. A study on the classification of a mirror entry in the European list of waste: Incineration bottom ash from municipal solid waste [J]. *Sustainability*, 2022, 14(16): 10352.
- [5] LAN T, MENG Y, JU T Y, et al. Synthesis and application of geopolymers from municipal waste incineration fly ash (MSWI FA) as raw ingredient - A review [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 182: 106308.
- [6] CHENG Y Z, GAO G H, CHEN L J, et al. Physical and mechanical study of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash with different particle size distribution [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 416: 135137.
- [7] XUE M, HU W, HUANYU L, et al. Beneficial reuse of municipal solid waste incineration bottom slag in civil engineering [J]. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2022, 12(2): 8306-8310.
- [8] 白宇帆, 徐永福. 垃圾焚烧炉渣物理化学及力学特性研究[J]. *公路*, 2021, 66(11): 318-322.
BAI Y F, XU Y F. Study on physical, chemical and mechanical properties of waste incineration slag [J]. *Highway*, 2021, 66(11): 318-322. (in Chinese)
- [9] JIKE N, XU C J, YANG R J, et al. Pervious concrete with secondarily recycled low-quality brick-concrete demolition residue: Engineering performances, multi-scale/phase structure and sustainability [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 341: 130929.
- [10] BAWAB J, KHATIB J, KENAI S, et al. A review on cementitious materials including municipal solid waste incineration bottom ash (MSWI-BA) as aggregates [J]. *Buildings*, 2021, 11(5): 179.
- [11] ZHAO Y, XU F C. Experimental study on the influence of curing conditions on the mechanical performance of municipal solid waste incinerated-bottom ash (MSWI-BA) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(38): 89101-89113.
- [12] 张翠榕, 张鸿儒, 江隽杰, 等. 碱激发生活垃圾焚烧炉渣底灰泡沫混凝土制备及性能研究[J]. *材料导报*, 2024, 38(22): 189-195.
ZHANG C R, ZHANG H R, JIANG J J, et al. Investigation on preparation and performance of alkali-activated municipal waste incineration bottom ash (MIBA) foam concrete [J]. *Materials Reports*, 2024, 38(22): 189-195. (in Chinese)
- [13] 张彬彬, 马宇, 梁咏宁, 等. 含生活垃圾焚烧炉渣的碱矿渣水泥耐高温机理[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(3): 299-306.
ZHANG B B, MA Y, LIANG Y N, et al. Research on high temperature resistance mechanism of alkali-activated slag paste containing municipal solid waste incineration bottom ash [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2024, 52(3): 299-306. (in Chinese)
- [14] ARM M. Variation in mechanical properties of MSW incinerator bottom ash: Results from triaxial tests [M]// WOOLLEY G R, GOUMANS J J J M, WAINWRIGHT P J. *Waste Materials in Construction Wascon 2000 - Proceedings of the International Conference on the Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection*, Harrogate, England 31 May, 1-2 June 2000. Amsterdam: Elsevier, 2000: 567-578.
- [15] 马鹏, 张成, 宋成芳, 等. 生活垃圾焚烧炉渣泥陶粒的制备及性能研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, 40(4): 867-874.
MA P, ZHANG C, SONG C F, et al. Preparation and properties of ceramsite from domestic waste incineration slag sludge [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2023, 40(4): 867-874. (in Chinese)
- [16] 刘栋, 李立寒. 生活垃圾焚烧炉渣集料的胶凝特征[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(3): 377-383.
LIU D, LI L H. Cementitious properties of municipal solid waste incineration bottom ash aggregate [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(3): 377-383. (in Chinese)
- [17] SORMUNEN L A, KOLISOJA P. Construction of an interim storage field using recovered municipal solid waste incineration bottom ash: Field performance study [J]. *Waste Management*, 2017, 64: 107-116.
- [18] 顾晓薇, 王营, 孙殿兴, 等. 复合激发剂作用下矿渣-钢渣胶凝体系的宏微观特性[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(8): 375-386.
GU X W, WANG Y, SUN D X, et al. Macroscopic and microscopic characteristics of slag-steel slag cementitious system under action of composite activator [J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(8): 375-386. (in Chinese)
- [19] 戚庭野, 成思远, 冯国瑞, 等. 碱激发钢渣-粉煤灰固废充填材料的制备及强度形成机理[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(6): 236-249.
QI T Y, CHENG S Y, FENG G R, et al. Preparation of alkali-activated steel slag-fly ash based full solid waste filling material and strength formation mechanism research [J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(6): 236-249. (in Chinese)
- [20] O'CONNOR J, NGUYEN T B T, HONEYANDS T, et al. Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 419: 126478.
- [21] DEVNITA R, ARIFIN M. Utilization of steel slag in

- improving soil characteristics [J]. *International Journal of Agriculture, Environment and Bioresearch*, 2024, 9(1): 125-136.
- [22] 唐先习, 张徐军, 李昊杰. 钢渣-煤矸石地聚合物固化黄土的力学特性评价与固化原理分析[J]. *岩土力学*, 2025, 46(4): 1205-1214.
- TANG X X, ZHANG X J, LI H J. Evaluation of mechanical properties and analysis of solidification principles of loess solidified with steel slag-coal gangue geopolymer [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2025, 46(4): 1205-1214. (in Chinese)
- [23] WU J, LIU Q W, DENG Y F, et al. Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways [J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(4): 955-965.
- [24] 袁明月, 张福海, 王远航. 钢渣改良膨胀土试验效果与机理分析[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(2): 67-70.
- YUAN M Y, ZHANG F H, WANG Y H. Experiments and mechanism of slag improving expansive soil [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2018, 35(2): 67-70. (in Chinese)
- [25] XU W S, ZHU Y N, KANG H R, et al. Study on the cyclic shear performance of waste steel slag mixed soil [J]. *Buildings*, 2023, 13(12): 3133.
- [26] DONDI G, MAZZOTTA F, LANTIERI C, et al. Use of steel slag as an alternative to aggregate and filler in road pavements [J]. *Materials*, 2021, 14(2): 345.
- [27] HAININ M R, AZIZ M M A, ALI Z, et al. Steel slag as a road construction material [J]. *Jurnal Teknologi*, 2015, 73(4): 33-38.
- [28] AZIZ M M A, HAININ M R, YAACOB H, et al. Characterisation and utilisation of steel slag for the construction of roads and highways [J]. *Materials Research Innovations*, 2014, 18(Sup6): S6-255-S6-259.
- [29] 黄伟, 邱鹏, 唐刚, 等. 钢渣混合土基层材料制备及性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(10): 3237-3242, 3265.
- HUANG W, QIU P, TANG G, et al. Study on preparation and performance of road base material of steel slag mixed soil [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(10): 3237-3242, 3265. (in Chinese)
- [30] 庄少勤, 谢华昌, 凌建明. 水泥-石灰土的路用性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2001, 4(2): 180-183.
- ZHUANG S Q, XIE H C, LING J M. Study on the performance of cement-lime stabilized soil for road subgrade [J]. *Journal of Building Materials*, 2001, 4(2): 180-183. (in Chinese)
- (编辑 XXX)