

## 钢渣粉固化改良膨胀性黏土机理研究进展

孙银磊, 余川, 廖磊, 李志妃

### Mechanism of steel slag powder stabilization and improvement of expansive clay

SUN Yinlei, YU Chuan, LIAO Lei, and LI Zhifei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311064>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 侵蚀环境中碱渣-矿渣固化淤泥的力学性质

Mechanical properties of the soft soil stabilized with soda residue and ground granulated blast furnace slag under the erosion environment

何俊, 栗志翔, 石小康, 王小琦 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 83-89

#### 某铁路隧道底鼓段粉砂质泥岩微宏观物理力学特性研究

A study of the micro-macro-physical and mechanical properties of silty mudstone in the bottom drum section of a railway tunnel

刘超, 袁伟, 路军富, 张钊 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 108-115

#### 高含水量冻粉黏土应力-应变曲线特性的试验研究

An experimental study of the stress-strain characteristics of frozen silty clay with high moisture content

张遂, 匡航, 靳占英, 徐国方 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 116-124

#### 利用原子力显微镜探针刺入测试黏土颗粒水化膜厚度的试验研究

An experimental study of the measuring hydration film thickness of clay particles with atomic force microscope probe

郭永春, 屈智辉, 许福周, 周相贵 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 105-112

#### 改良花岗岩残积土进失水能力及接触角试验研究

Water entrance-and-release capacity and contact angle of improved granite residual soil

汤连生, 刘其鑫, 孙银磊, 许瀚升 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 144-156

#### 含石量对软质岩土石混合料土力学特性影响研究

A study of the effect of rock content on mechanical properties of soil-soft rock mixture

邵忠瑞, 罗雪贵, 郭娜娜 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 111-111



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311064

孙银磊, 余川, 廖磊, 等. 钢渣粉固化改良膨胀性黏土机理研究进展 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(1): 113-129.  
SUN Yinlei, YU Chuan, LIAO Lei, et al. Mechanism of steel slag powder stabilization and improvement of expansive clay[J].  
Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(1): 113-129.

## 钢渣粉固化改良膨胀性黏土机理研究进展

孙银磊, 余川, 廖磊, 李志妃  
(云南大学建筑与规划学院, 云南昆明 650500)

**摘要:** 在长期湿热环境下, 膨胀性黏土易发生路基变形、边坡失稳和滑坡崩塌等地质灾害。因此, 有必要深入分析钢渣粉 (steel slag powder, SSP) 改良膨胀性黏土的宏观和微观特性, 以解决相关工程问题, 并推动钢渣的高值化和资源化利用。文章全面回顾了 SSP 改良膨胀性黏土的研究现状, 系统归纳了 SSP 的理化特性和胶凝活性, 阐述了碱激发剂对 SSP 活性的激发原理, 揭示了 SSP 改良膨胀性黏土的微观机制和力学特性。主要结论如下: (1) SSP 含有丰富的活性矿物成分, 能够与黏土颗粒发生离子交换及水化反应, 从而改变黏土微观结构和理化性质; (2) SSP 的化学成分、结构性质等会受到生产工艺及使用环境的影响, 进而影响其化学活性。通过降低 SSP 粒径、添加碱性激发剂或复合改性可以提高其胶凝活性及水化速率; (3) SSP 作为土壤改良剂可以显著改善膨胀性黏土的性能, 包括胀缩性和力学特性; (4) 对于 SSP 与黏土之间的相互作用机制及复合激发剂的应用效果研究还相对不足, 需要进一步探索; (5) 未来应考虑不同因素耦合下的化学-矿物成分及土体微观结构演变规律, 从宏观观角度建立土体在水-化-力作用下的力学特性。通过深入开展 SSP 改良土的微观机理和工程特性研究, 可提高其工程应用价值, 为固废资源的再循环利用和环境保护提供重要思路。

**关键词:** 钢渣粉; 胶凝活性; 胀缩性; 黏土矿物; 改良机制; 力学特性

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)01-0113-17

## Mechanism of steel slag powder stabilization and improvement of expansive clay

SUN Yinlei, YU Chuan, LIAO Lei, LI Zhifei

(School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China)

**Abstract:** Expansive clay is prone to geological disasters such as roadbed deformation, slope instability, and landslides under long-term hot and humid conditions. To address these engineering challenges and promote the high-value, resource-efficient use of steel slag, it is crucial to investigate the macroscopic and microscopic characteristics of steel slag powder (SSP)-improved expansive clay. This paper provides a comprehensive review of the current research on SSP-improved expansive clay, systematically summarizing the physicochemical properties and gelling activity of SSP. Additionally, the excitation principle of alkali excitors on the activity of SSP was described, and the micro-mechanism and mechanical properties of SSP improved expansive clay were revealed. The main conclusions are as follows: (1) SSP contains abundant active mineral components that can

收稿日期: 2023-11-30; 修订日期: 2024-05-07

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目(42102303); 云南省自然科学基金项目(202401CF070174); 云南大学第三届专业学位研究生实践创新项目(ZC-23234031)

第一作者: 孙银磊(1986—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事非饱和土和特殊土研究。E-mail: [sunylei@mail2.sysu.edu.cn](mailto:sunylei@mail2.sysu.edu.cn)

通讯作者: 余川(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事黏性土改良研究。E-mail: [yuchuan@stu.ynu.edu.cn](mailto:yuchuan@stu.ynu.edu.cn)

undergo ion exchange and hydration reaction with clay particles, thus changing the microstructure and physicochemical properties of clay. (2) The chemical composition and structural properties of SSP will be affected by the production process and the use of the environment, which in turn affects its chemical activity. By reducing the particle size of SSP, adding alkaline excitors or compound modification can improve its cementation activity and hydration rate. (3) SSP as a soil conditioner can significantly improve the performance of expansive clay, including expansion and contraction and mechanical properties. (4) The studies on the interaction mechanism between SSP and clay and the application effect of composite excitors remain insufficient and requires further investigation. (5) Future research should consider the chemical and physical properties under the coupling of different factors, including the chemical-mineral composition and the microstructure evolution law of the soil, as well as the mechanical properties of the soil under the water-chemical-force interactions. By further exploring the micro-mechanism and engineering properties of SSP-amended soils, the value of their engineering applications can be improved, providing valuable insights for the recycling of solid waste resources and environmental protection.

**Keywords:** steel slag powder; gelling activity; swelling-shrinkage; clay mineral; improving mechanism; mechanical propertie

膨胀性黏土作为一种特殊的高塑性土<sup>[1]</sup>,其含有大量裂隙和亲水性矿物(伊利石、绿泥石和蒙脱石),遇水后裂隙易发育并扩散,导致黏土颗粒吸水膨胀,失水收缩干裂<sup>[2-3]</sup>。膨胀性黏土的变形具有复杂性、多发性、反复性和长期潜在性,为了克服其膨胀收缩性和软化崩解性,众多科研人员采用石灰<sup>[4]</sup>、水泥<sup>[5]</sup>、粉煤灰<sup>[6]</sup>、氯化钙<sup>[7]</sup>等添加剂对膨胀性土进行化学改良。这些改良剂通过与颗粒间的胶结作用、离子交换、硬凝和碳化作用,有效抑制了土体的胀缩性和裂隙发展。然而,传统改良剂的生产成本和二氧化碳排放量较高,为了适应“碳达峰-碳中和”的绿色、经济、环保可持续发展的战略需求,磷石膏、聚丙烯、碱矿渣和钢渣粉(steel slag powder, SSP)等替代改性剂逐渐被应用,其中钢渣粉已广泛应用于膨胀性黏土改良、农业肥料、道路建设等领域<sup>[8]</sup>。

钢渣粉是粗钢生产过程中的一种工业废弃物。中国粗钢总产量约占世界总量的 1/2,其中钢渣年产量高达 1.1 亿吨<sup>[9-10]</sup>。相比于日本、欧洲和澳大利亚等工业发达国家,中国的钢渣综合利用率仅为 29.5%<sup>[11]</sup>。其主要用于土木工程(10.1%)、水泥生产(9.3%)、土壤改良和道路建设(7.5%)以及其它用途(2.6%)<sup>[12]</sup>。我国 SSP 综合利用率较低的主要原因包括生产制造工艺的滞后、科研水平的不足、法律政策的限制以及缺乏行之有效的应用标准。如果我国不加快提高钢渣的回收利用率,将会导致大量环境污染和土壤资源的浪费<sup>[13]</sup>。由于钢渣粉中含有特殊的矿物和化学成分(如氧化铁和氧化钙等),它可以与土体中的水分和黏土

颗粒发生离子交换及胶结反应,从而形成稳定的凝胶物质,填充裂隙并有效地黏结土颗粒。这一过程能够提高土体结构的密实性和整体性,显著改善膨胀土的塑性、自由膨胀率、未固化强度和排水性能等<sup>[14-15]</sup>。利用钢渣粉改良问题土的工程性质,不仅符合低碳和环保发展理念,还可以提高固废资源的高附加值利用,并降低工程处理成本。本文从宏观及微观角度分析总结了钢渣粉的性质和组成、改良土的机理、工程效果以及应用前景,旨在全面阐述钢渣粉改良土的研究优势。在此基础上,对 SSP 改良土存在的不足及未来的发展方向提出几点建议,以期为问题土的改良提供新的思路和途径。

## 1 钢渣粉的特性

### 1.1 钢渣粉的理化特性

钢渣粉是在高温环境下通过转炉、电炉或平炉生产分离出的工业副产品,主要由矿石、石灰石( $\text{CaCO}_3$ )、焦炭和氧等原料组成<sup>[16-17]</sup>。根据钢渣粉的生产工艺及碱度值  $R=m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2+\text{P}_2\text{O}_5)$ ( $m$  为质量)的不同,可将其分为高炉渣(blast furnace slag, BFS)、电弧炉渣(electric arc furnace, EAF)、钢包炉渣(ladle furnace slag, LFS)或碱性氧炉渣(basic oxygen furnace, BOF)<sup>[18]</sup>。其中,当钢渣粉  $R<1.8$  时,称为低碱度钢渣; $R=1.8 \sim 2.5$  时,称为中碱度钢渣; $R>2.5$  称为高碱度钢渣,此时易形成  $\text{C}_2\text{S}$  和  $\text{C}_3\text{S}$  等矿物<sup>[11,19]</sup>。Oluwasola 等<sup>[20]</sup>认为转炉钢渣具有良好的压实性好、吸水率低、良好的内摩擦力及排水自由等优点。由于炼钢厂生产工艺(如:废

金属和铁水中存在的杂质、温度、气体环境、铁矿石成分以及铁矿石与烧结矿的比例、冷却速度、助熔剂掺量等)的差异性<sup>[21]</sup>, 容易导致钢渣粉的矿物成分、电导率、表面积、化学组成、孔隙率和 PH 值等理化性质的变化<sup>[22]</sup>。综上所述, SSP 具有良好的吸水性、高密度、较大的比表面积、丰富的棱角、较高的硬度等一系列特定的性质, 适当提高 SSP 碱度可增加其水化活性。但由于 SSP 体积安定性较差及生产工艺的影响, 很大程度上限制其工程应用领域。

钢渣粉主要的矿物成分包括橄榄石( $2\text{MgO}\cdot 2\text{FeO}\cdot \text{SiO}_2$ )、 $\text{FeAlO}_3(\text{CaO})_2$ 、 $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ 、 $4\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{FeO}_3(\text{C}_4\text{AF})$ 、铁酸二钙( $2\text{CaO}\cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}_2\text{F}$ )、 $\beta$ -硅酸二钙( $2\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ )或  $\alpha$ - $\text{C}_2\text{S}$ 、 $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ 、 $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ 、镁硅钙石( $3\text{CaO}\cdot \text{MgO}\cdot$

$2\text{SiO}_2$ )、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、硅酸三钙( $3\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_3\text{S}$ )、惰性矿物(简称为“RO 相”)和  $\text{CaO}\cdot \text{FeO}\cdot \text{MnO}\cdot \text{MgO}$  等组成<sup>[17]</sup>。大量研究表明 SSP 属于含钙量较高的固体废物, 其中,  $\text{C}_2\text{S}$ 、 $\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{C}_2\text{F}$  和  $\text{C}_4\text{AF}$  构成的 SSP 与硅酸盐水泥矿物成分相似。虽 SSP 的衍射峰较为复杂, 矿物晶体形状不规则, 但 SSP 中的固体可溶性成分含量较高, 有利于水化溶解, 形成胶凝状物质, 进而改良土壤的胶结性能<sup>[22-24]</sup>。另外, SSP 的冷却速度、化学组成、熔剂类型、颗粒形状、颗粒大小分布及性质对土壤改良效果会产生重要影响。因此, 对不同工艺条件下的 SSP 化学成分和含量(表 1)进行详细分析对于土壤改良具有重要意义。

表 1 国内外钢渣粉主要的化学成分与质量分数

Table 1 Main chemical composition and mass fraction of steel slag powder at home and abroad

来源/产地	工艺类型	各化学成分质量分数/%								参考文献
		CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	其它	
新加坡	BOF	22.48	19.38	8.49/30.54	5.27	9.51	1.10	0.35	1.23	[25]
印度	BOF	52.30	15.30	—/16.20	1.30	1.10	0.39	0.86	—	[26]
瑞典	BOF	45.00	11.10	13.20/10.70	1.90	9.60	3.10	—	0.79	[27]
	EAF	38.80	14.10	20.90/5.60	6.70	3.90	5.00	—	1.45	
罗马尼亚	EAF	36.20	15.80	—/8.20	3.80	7.60	8.70	0.70	—	[28]
希腊	EAF	35.70	17.53	26.36/—	6.25	6.45	2.50	—	2.07	[29]
法国	BOF	45.00	10.80	32.00/—	1.90	4.50	2.60	1.40	0.90	[30]
浙江嘉兴	EAF	48.80	34.30	9.10/—	4.80	1.10	—	—	—	[31]
江苏南京	EAF	48.00	14.73	20.44/14.30	4.06	7.62	—	1.04	1.60	[32]
石家庄	EAF	65.14	22.17	0.51/—	5.03	4.03	2.35	—	0.15	[33]
河北省	BOF	64.84	21.87	0.54/—	6.12	4.85	—	—	3.78	[34]
马鞍山	BOF	59.17	17.79	9.65/—	4.87	6.23	—	1.35	0.89	[35]

注: —表示无此成分。

综上所述, SSP 化学组成主要包括氧化铁( $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、 $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 质量分数分别为 8% ~ 30%、35% ~ 65%、10% ~ 20%、3% ~ 10% 和 1% ~ 6%, 其中还含少量的  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{SO}_3$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  等。生产工艺主要是 EAF 和 BOF, 其中 EAF 生产的矿物成分有丝光石( $\text{C}_3\text{MS}_2$ )和克氏石矿(CFS)等, 这些惰性物质在常温下不发生水化反应, 结合能较差。而 BOF 生产的矿物成分主要为  $\text{C}_2\text{S}$ 、 $\text{C}_2\text{F}$ 、 $\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaO}$  等, 其水硬活性主要来源于  $\text{C}_3\text{S}$  和  $\text{C}_2\text{S}$  含量, 含量越高水化活性越高。然而, 在不同生产工艺下, SSP 的化学成分、结构特性、矿物组成、粒度、含量及性能显著变化。特别是 SSP 中高含量的游离  $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$ , 会与孔隙中的水分产生化学反应, 导致 SSP 体积迅速膨胀, 从而降低其体积稳定性。因此, 不同的生产工艺

会直接影响 SSP 的化学活性及稳定性, 进而对土体改良效果产生重要影响。

## 1.2 钢渣粉的胶凝活性

钢渣粉的胶凝活性对其改良土体的效果具有重要影响。水化活性越高, 产生的水化产物, 如 C-A-G 和 C-S-H 凝胶、钙矾石(Aft)和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  等, 就越多, 与黏土矿物颗粒接触面积就越大, 包裹填充裂隙就越紧密, 颗粒间黏结力和整体稳定性就越好。当 SSP 中  $m(\text{Al})/m(\text{Ca})$  比例高于  $m(\text{Ca})/m(\text{Si})$  时, 改良土的胶凝特性和力学强度表现较好<sup>[36]</sup>。然而, 由于 SSP 中的硅铝酸盐矿物是在高温下形成的玻璃体结构, 晶粒较大、结构密度较高, 并且含有 Si—O 和 Al—O 化学键, 导致部分  $\text{C}_3\text{S}$  和  $\text{C}_2\text{S}$  晶体在常温下水化活性低。Wang 等<sup>[37]</sup>认为提高 SSP 颗粒细度、养护温度或溶液碱度可加速

其早期水化速率,其中碱激发剂的作用效果更加显著<sup>[38]</sup>。目前,常用的碱激发剂包括氢氧化钠(NaOH)、石灰(CaO)、水泥(CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SO<sub>3</sub>)、水玻璃(Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)、硫酸钠(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)、铝酸钠(NaAlO<sub>2</sub>)、硅灰(CaSiO<sub>3</sub>)、硫酸铝(Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>)和石膏(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)等<sup>[39-40]</sup>。王强<sup>[41]</sup>证明了在适宜的碱性环境下 SSP 中的四面体会发生解聚,导致 Si—O 和 Al—O 化学键断裂,从而提高 SSP 的水化反应速率。此外,王琴等<sup>[42]</sup>、邵雁等<sup>[43]</sup>考察 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、NaOH、Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaAlO<sub>2</sub> 等 6 种不同化学激发剂对 SSP 活性的影响,结果显示 3%~7% 的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 是效果及稳定性最好的化学激发剂。综上研究表明,碱激发剂可以提高反应体系的碱度,促进 SSP 中的阳离子交换,进而破坏 SSP 中的玻璃网状结构,促使水化产物(C-S-H)的转化和钙矾石(Aft)晶体的生成,形成更加稳定的水化产物和结构,从而提高 SSP 矿物组分的溶解和反应。

Sun 等<sup>[44]</sup>认为碱活化 SSP 水化产物 Ca(OH)<sub>2</sub> 的含量较低,结晶性较差,单一激发剂很难提高钢渣粉胶凝材料活性,而复合碱激发剂的改良效果更好<sup>[45]</sup>。鉴于单一激发剂对 SSP 催化效果并不明显,实践中通常采用 2 种或以上的激发剂复合使用,以获得更优异的 SSP 性能。朱伶俐等<sup>[46]</sup>指出氢氧化钠、生石灰、水玻璃、石膏、明矾、高岭土、水泥熟料、硫酸钠、三乙醇胺、硫酸铝钾和硫酸铝等作为复合激发剂可显著提高 SSP 的水化活性,加快其水化胶凝速度。樊传刚等<sup>[47]</sup>发现采用 5% 石膏和碱激发剂作为复合激发剂可以有效催化 SSP 的活性,提高胶凝材料的抗压强度。而范立瑛等<sup>[48]</sup>的研究则发现高岭土对 SSP 活性没有催化作用,同时认为复配激发剂(3% 硫酸铝+2% 水泥熟料+0.2% 水玻璃+0.8% 三乙醇)具有良好的激发效果。程从密等<sup>[49]</sup>认为 1%CaSO<sub>4</sub>·1/2H<sub>2</sub>O 和 0.4%NaOH 复合改良 SSP-水泥早强效果最佳。温建<sup>[50]</sup>的研究表明 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和氯化钙对钢渣粉-水泥胶凝强度具有增强作用,当氯化钙掺量为 4% 时,激活效果最好。此外,魏瑞丽等<sup>[51]</sup>指出铝酸钠、硅灰都能提高 SSP 的活性,但硫酸钠对 SSP 的激发效果较差。而 You 等<sup>[52]</sup>研究表明硅灰、NaOH 两种激发剂的激发效果最为突出。邵俐等<sup>[53]</sup>的研究结果显示加入石膏和硫酸钠能加快矿渣水化反应,降低冻融循环对固化土的影响,并表示硫酸钠的抵抗性更强。梅杨<sup>[54]</sup>认为激发剂类型对胶凝材料强度影响最为显著,其中双掺 Ca(OH)<sub>2</sub> 和 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 最佳比例为 5:1,掺量为 4% 时对矿粉活性激发效果最好。综上分析,复合激发剂对钢渣粉胶

凝活性和强度增强效果更加显著,改良土体的力学特性也更加优异。由于激发剂种类多样性、掺量差异性,以及激发剂对 SSP 以及激发剂与激发剂之间的反应机理尚未深入分析,导致复合改良效果也不尽相同。因此,尽管复合激发剂对 SSP 具有较好的激发效果,但仍需进一步确定复合碱激发剂的最佳掺量、组合方式及应用条件。

## 2 膨胀性黏土破坏机制

膨胀性黏土具有失水收缩与吸水膨胀的特性,容易导致土体内部和表面产生大量微裂隙,致使雨水渗入并降低土体的强度,从而引起土体的整体性破坏。这个过程主要包括物化作用、吸水膨胀和楔裂压力等共同作用<sup>[55]</sup>。2001 年,谭罗荣等<sup>[56]</sup>提出膨胀性黏性土都会经历吸水-失水-泥化-崩解-破坏,并指出土体崩解破坏的前提是结构扰动破坏、失水产生收缩拉裂及吸水产生膨胀应力破坏 3 个过程。膨胀性黏土崩解破坏机制包含黏土矿物遇水产生的膨胀力、孔隙中气泡溢出产生的推力、水膜楔入力及浮重力等作用,这些作用打破了土体内部联结力与崩解力之间的平衡,导致土体结构破坏。由于膨胀土含有蒙脱石和伊利石,水敏性较强,这是导致土体内部胶结膨胀、结构破坏、结构衰变和强度衰减的主要原因<sup>[57]</sup>。遇水后,膨胀土内部会发生差异膨胀和变形,水压力作用下,孔隙、裂隙扩展引起膨胀崩解破坏<sup>[58]</sup>。马婧等<sup>[59]</sup>指出在化-水-力协同作用下,颗粒间发生离子交换、化学反应和水合斥力会影响蒙脱石层间膨胀、扩散双电层膨胀以及层叠体裂解,见图 1(a)。张凌凯等<sup>[60]</sup>提出膨胀土在干湿-冻融循环作用下的破坏机制,即干湿循环会增加膨胀土裂隙,冻融循环过程会导致黏土颗粒间的微裂隙被崩解破坏的细颗粒填充,从而减弱颗粒间的黏聚力,见图 1(b)(c)。总之,吸水-失水-冻融作用会导致部分胶结物被稀释、软化或溶解,裂隙贯通形成非均匀的孔隙水压力,使土体局部产生应力集中。与此同时,颗粒间的黏聚力、内摩擦力以及颗粒间咬合力也会减弱,土颗粒间基质吸力小于膨胀力,进而导致岩土颗粒碎裂、剥落和崩解。

黏土矿物的胀缩性易受温度和水分影响<sup>[62]</sup>,环境温度的升高或降低均可导致土壤中矿物颗粒边界的热膨胀或冷缩,进而引发黏土颗粒内部产生拉或压应力,从而使土体出现不均匀膨胀收缩应力。在此过程中,团聚体内产生微裂纹并不断扩展,当温度升降速率较快时,此现象更为显著<sup>[63]</sup>。这是因为温度升降速

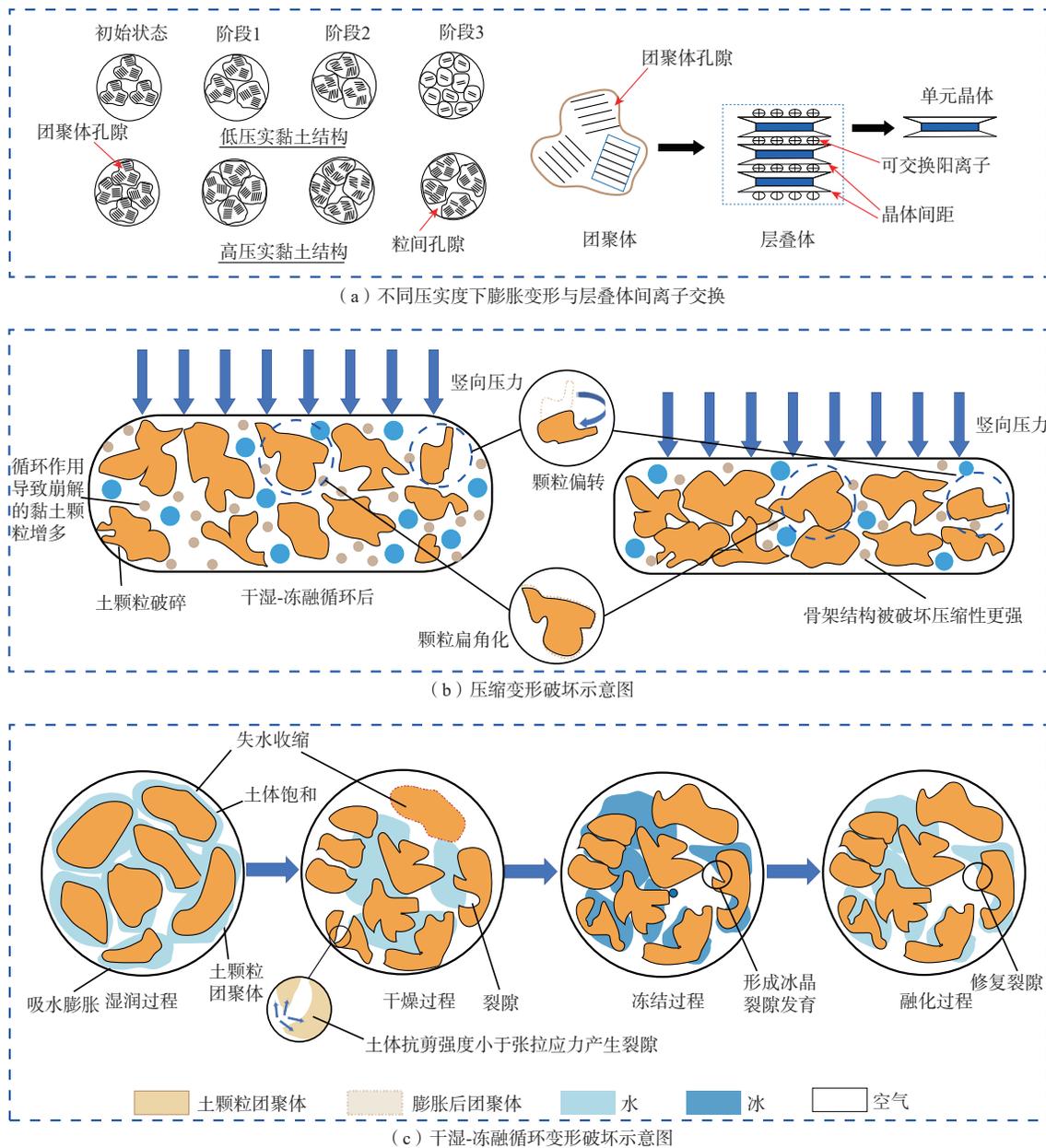


图 1 膨胀性黏土变形破坏机制 (据文献 [60 - 61])

Fig. 1 Deformation and failure mechanism of expansive clay (adapted from Ref. [60 - 61])

率越大, 土壤中矿物颗粒之间或颗粒内部的不协调变形将更加显著, 从而使土壤中的微裂纹扩展更为严重且数量更多。同时, 土壤表面的水分蒸发速度较快, 而内部蒸发速度较慢, 使得含水率分布不均匀形成水力梯度, 产生内外应力差, 导致裂纹形成。吴道祥等<sup>[64]</sup>从黏性土的化学成分与细观结构特征入手, 发现黏土矿物中的蒙脱石结构单元层间以 O—O 键相联结, 键力极弱, 遇水后具有氧键的强极化水分子很容易楔入其中, 使其分开。同时极化水分子变为水化阳离子  $H_3O^+$  进入结构单元层间和水化膜之中, 使层间间距及水化膜厚度增大, 进而造成颗粒体积膨胀。由于内部体积

膨胀的不均匀性, 导致土体内部出现不均匀应力而使土颗粒碎裂破坏<sup>[65]</sup>。综上所述, 化学-水-力的相互作用均会导致土体吸水膨胀, 并在其内部产生不均匀应力以及溶解掉部分胶结物。随着胶结物稀释、软化、溶解和流失, 导致颗粒间发生膨胀、收缩, 甚至失去胶结力而崩解。同时, 由于膨胀性黏土矿物的亲水性和孔隙的连通性, 使得孔隙的导水性和容水能力增强, 扩大水和岩体的接触面。当化学溶液和水侵入孔隙、裂隙中时, 多相界面的离子水化膜增厚, 导致岩土体发生膨胀破坏。其中, 影响土壤膨胀破坏的因素主要包括雨水侵蚀、土壤有机质含量、土壤扰动情况、黏

粒含量、矿物成分、成土过程、土壤胀缩性、pH 以及土壤所受到的外部应力等。

### 3 钢渣粉改良土的微观机理

#### 3.1 物理改良

钢渣粉所含矿物主要是氧化钙、氧化铁和氧化硅, 矿物质量分数高达 80%<sup>[66]</sup>。同时, SSP 的孔隙率大、自身体积小、较为坚硬、比表面积高, 且具有很强的胶凝特性<sup>[67]</sup>。石荣剑等<sup>[68]</sup>发现钢纤维能有效抑制水分入侵和冰透镜体的生长, 从而减小土体的膨胀率。因此以 SSP 作为改良剂填充土壤颗粒之间的孔隙, 可以提高土壤的密实度和水稳定性, 在这个过程中, 土颗粒与 SSP 发生排列和组合。SSP 作为一种新型的土壤改良材料, 可以与土体发生复杂的物理、化学相互作用。但针对 SSP 改良问题土方面的研究相对较少, 其微观改良机理也尚未被系统论述。因此, 本文拟从物理和化学 2 个方面分析其改良机制, 探索 SSP 改良固化土壤的内部微观结构变化, 进而完善 SSP 改良土的相关研究理论。根据钢渣粉粒径的不同, 其作用机制也会有一定差异。当钢渣粒径较大时, 主要起到骨料支撑土颗粒的作用, 可以使土颗粒包裹在钢渣孔隙之间, 从而有效提高土体的整体稳定性和强度。随着钢渣细度的增加, 物体表面的晶体结构会遭到破坏, 晶格及键能减小, 比表面积增大, 与黏土颗粒表面的接触面积增大, 因此可以有效填充土壤裂隙或孔隙, 增加土壤的密实度。

综上所述, 物理改良机理主要包括细颗粒填充作用、摩擦作用及粗颗粒的骨架支撑作用。1) 钢渣粉颗粒具有一定的粒径和形状, 当 SSP 与膨胀性黏土混合时, 钢渣粉细颗粒可以填充土壤颗粒之间的孔隙, 增加土壤的密实度和稳定性。2) 钢渣粉细颗粒间具有一定的摩擦作用, 提高团粒间的摩擦力, 进而增加膨胀土的内聚力和抗剪强度。3) 大颗粒的钢渣粉具有较高的强度和刚度, 可以增加土壤的整体强度和刚度, 提高土壤的承载能力和抗沉降性能, 从而改善膨胀土的工程性质。

#### 3.2 化学改良

激发剂作用下 SSP 改良土发生了阳离子交换, 即氧化钙中电离出的  $\text{Ca}^{2+}$  和土壤表面的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  发生吸附交换, 从而减少了扩散层厚度, 缩小了黏土颗粒间距, 提高颗粒间的黏结性能, 使得黏土颗粒发生团聚<sup>[69]</sup>。同时, 氧化钙还会与土壤中的水和二氧化碳反应生成钙碳酸盐, 形成密实骨架结构, 从而提高土壤

的抗压强度和抗渗性能。吴子龙等<sup>[31]</sup>探讨了 SSP、偏高岭土掺入水泥改良土的微观机制, 发现由于 SSP 与水泥的组分含量存在差异, 当钢渣粉中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较少时, 矿物水化活性低, 不利于形成水化铝(硅)酸钙胶凝物质, 因此不利于提高土体早期强度。另外, SSP 中的玻璃体硅酸钙早期水化程度低且缓慢, 无法快速反应形成胶体和钙矾石填充土体孔隙。同时, 由于 SSP 具有广泛的矿物化学成分, 碳化过程中会改变 SSP 的物理、化学、矿物学和力学性能<sup>[11]</sup>。Yu 等<sup>[70]</sup>也验证了这一观点, 他们发现经过碳化处理的 SSP 可显著提高土体的抗剪强度。但改良过程中生成的方解石易附着在黏土颗粒表面, 由于方解石对高岭石、蒙脱石的胶结作用弱于石英, 导致片状的高岭石和蜂窝状的蒙脱石在干湿循环后容易流失。综上所述, SSP 改良土的过程中, 发生了离子交换、水化反应和物质转化等化学反应。从微观角度分析, SSP 易发生水化反应生成无定形水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)、水化硅铝酸盐(C-A-F-H)和少量的钙矾石(Aft)等凝胶物质填充在孔隙中, 并包裹颗粒表面形成稳定的团聚体。同时形成的板状  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  以结晶形式分布在颗粒表面, 增强颗粒间的黏聚力。

鉴于钢渣粉表面分布大量的阳离子(如  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  等), 能与黏土矿物发生离子交换和化学反应, 生成水化产物 C-S-H 凝胶, 进而提高土体的密实性和胶结力<sup>[71]</sup>。刘翼飞等<sup>[72]</sup>指出, 碱性环境下的  $\text{Ca}^{2+}$  可以与  $\text{Na}^+$  进行离子交换反应, 导致孔隙中游离的  $\text{Ca}^{2+}$  吸附在黏土颗粒表面, 从而生成填充和黏结作用的胶结物质, 增强土体结构的密实性。Tian 等<sup>[73]</sup>则利用脱硫碳化钢渣粉(desulfurization steel slag, DS)改良土壤, 并发现 DS 可以提供高浓度的  $\text{Ca}^{2+}$  形成团聚体, 从而有效抑制干裂缝的发育和扩展, 降低裂缝面积密度和平均裂缝宽度。综上所述, SSP 中含有一定的活性矿物成分, 与水接触时会发生水化反应, 生成水化产物 C-S-H、C-A-H 和微量钙矾石等。同时, SSP 中的某些成分可以与黏土颗粒中的矿物质发生离子交换及吸附反应, 形成凝胶和新的物质。这些产物可以填充土壤颗粒之间的孔隙, 增加土壤的密实度和稳定性(图 2)。此外, 为了提高钢渣粉的物理、化学活性和早期强度, 可以采用细度更高的钢渣粉, 增加其表面接触面积。同时也可以添加化学激发剂(如水泥、石灰、水玻璃、粉煤灰、碳酸钠、矿碱和 NaOH 等), 在碱性环境中激发 SSP 的水化活性, 提高其水化凝胶产物的形成速度, 增加土体早期强度。

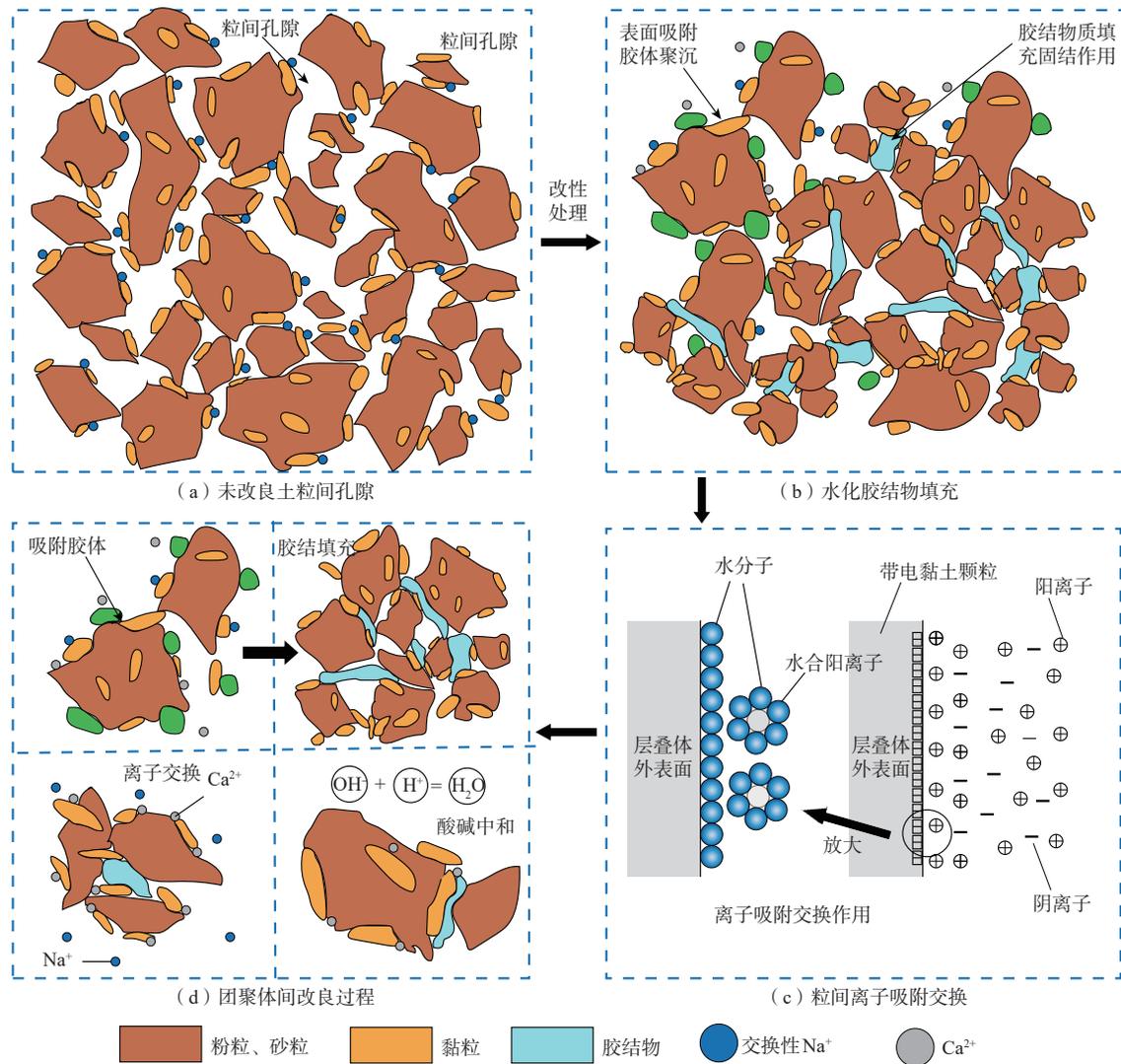


图 2 化学改良土微观结构 (据文献 [59, 72])

Fig. 2 Microstructure of chemically modified soil (adapted from Ref. [59, 72])

### 3.3 复合改良

钢渣粉中的硅铝酸盐矿物是在高温下形成的玻璃体结构, 主要以硅氧/铝氧四面体的形式存在, 晶格较大, 结构密度较高, 化学活性和吸附性较弱, 导致 SSP 中的 C<sub>3</sub>S 和 C<sub>2</sub>S 晶体在常温下的水化速率和胶凝活性较低<sup>[30]</sup>。因此, 需要添加一定的激发剂提高其化学活性<sup>[74-75]</sup>, 促进 SSP 水化反应生成胶凝物质, 增加土壤的密实度和稳定性<sup>[11]</sup>。吴子龙等<sup>[31]</sup>、于佳丽<sup>[76]</sup>发现在碱性(NaOH)环境中可以激发 SSP 的水化活性, 提高其水化产物的形成速度, 增加土体固化强度。然而, 由于固化过程中发生大量 Na<sup>+</sup>交换, 变为易水化的钠型黏土, 使其吸水膨胀能力增强。Gu 等<sup>[67]</sup>进一步研究发现 NaOH、NaCl 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 可以提高 SSP 反应物的活性, 当 NaCl 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 掺量为 5% 时, 无侧限抗压强度 (unconfined compression strength, UCS) 分别提

高 8.02 MPa 和 10.88 MPa, 说明催化剂可以有效提高改良土早期强度。同时, 发现碱激发剂的加入可以促进改良剂发生水化反应, 生成更加稳定的凝胶物质, 充分填充土体微裂隙, 絮凝状胶结物包裹颗粒形成密实结构, 减小水分入侵, 增强土体黏结性和强度<sup>[33]</sup>。因此干湿循环后土体颗粒排列仍保持密实, 只是部分胶结物被溶解, 使得裂隙有所提高。Zhang 等<sup>[77]</sup>、王小龙等<sup>[78]</sup>发现加入适量的碱激发剂可以提高微粉的活性, 提高其早期固化强度(图 3)。并指出可以利用水玻璃加氢氧化钠溶液作为激发剂, 同时加入工业废渣和偏高岭土以调节土中的铁、硅、铝等氧化物比例, 提高土体整体性、抗崩解性和强度。这是由于 SSP 中存在硅酸钙类的水硬性胶凝材料, 激发剂作用下会促进 SSP 与黏土颗粒发生离子交换、胶结、固化和碳化等反应。综上所述, SSP 水化活性较低, 加入氯化钙、

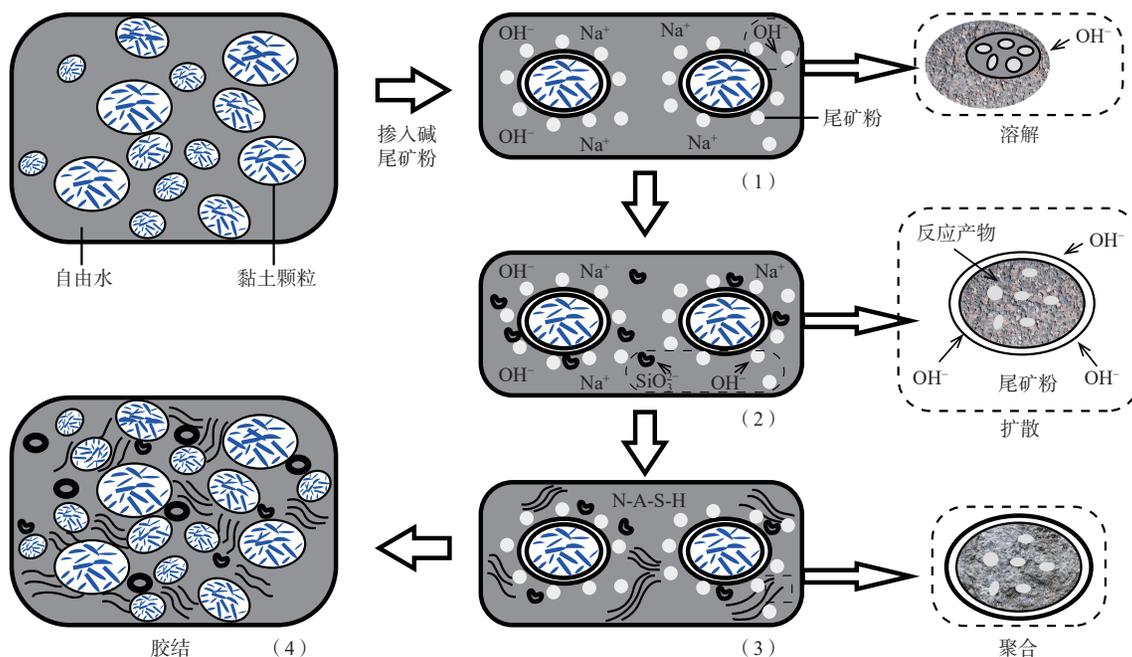


图 3 碱激发剂催化矿粉作用机理 (据文献 [79])

Fig. 3 Mechanism of alkali activator catalyzing mineral powder (adapted from Ref. [79])

氢氧化钠等可提高其反应活性。同时 NaOH、CaCl<sub>2</sub> 作为转炉炉渣的活性催化剂,可以显著改善其物理、化学性质,提高 SSP 的水化反应速率。碱激发 SSP 主要机理是:碱激发剂促进了玻璃体结构的解离并重新缩聚成新的 C-S-H、C-A-H 和 Ca(OH)<sub>2</sub> 凝胶物质,将土颗粒胶结在一起形成密实网络结构,抑制裂隙扩展。同时还生成钙矾石填充在团聚体中起到支撑的框架作用,与凝胶物质共同形成空间网状结构包裹填充土颗粒,提高土体的整体性和强度。

钢渣粉本身具有较低的化学活性和胶结性。然而,通过添加碱激发剂(如石灰、水泥、粉煤灰和氢氧化钠等)或调整其化学组分,可以提高其反应速率,并激发其化学反应活性,从而增强其胶结力和黏结强度(图 4)。项国圣等<sup>[35]</sup>研究石灰-SSP 改良土微观机理,

发现 SSP 中含有凝胶矿物,能够与土体中低价离子发生交换生成絮凝物质填充在孔隙间,同时石灰可以提供碱性环境,促进并激发钢渣粉水化反应生成 C-S-H 凝胶物质,填充在颗粒间,增强颗粒间的接触面积和连接性。Wu 等<sup>[7]</sup>利用 X-射线衍射、扫描电镜和压汞孔隙度测定等方法,分析了 SSP 改良膨胀土的微观机理,发现活性激发剂(NaOH)作用下, SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、Al<sup>3+</sup>和 Ca<sup>2+</sup>可以快速反应生成 C-S-H、C-A-H 和 Ca(OH)<sub>2</sub> 等水化产物填充、包裹土颗粒,固化前期,黏土矿物与水化产物发生吸附、离子交换、胶结等化学反应,提高颗粒间的密实度和胶结力,使土颗粒团聚在一起形成稳定结构。吴燕开等<sup>[80]</sup>通过室内试验研究干湿循环作用下 SSP-水泥改良膨胀土,发现在缺乏催化剂的情况下,SSP 自身水化反应慢,需要 60 d 才能完全反应。

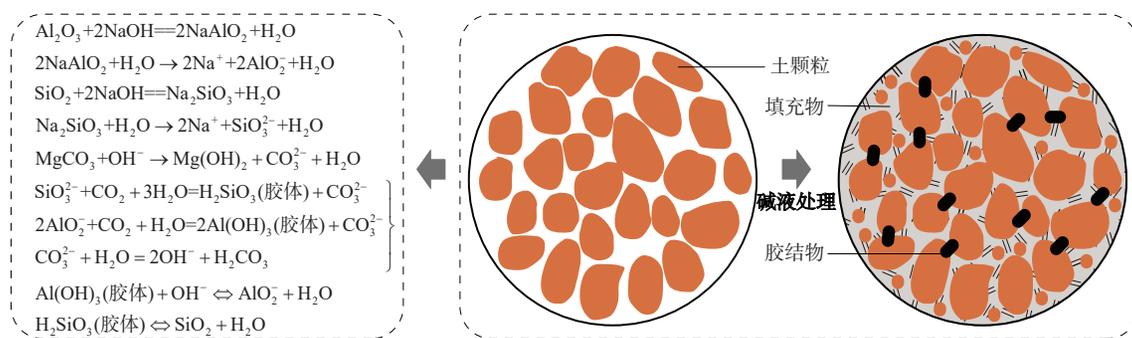


图 4 碱液处理反应机理 (据文献 [78])

Fig. 4 Reaction mechanism of alkali treatment (adapted from Ref. [78])

而掺入少量的 NaOH 可以提高其水化活性, 使其在短时间内可以完全水化生成钙矾石填充孔隙, 钙矾石是一种不溶于水的结晶物质, 可以提高土体的整体性, 从而使土体强度迅速增长。韩天<sup>[81]</sup>、柴石玉等<sup>[24]</sup>研究了碱激发 SSP 协同改良土微观机制, 发现 NaOH 的加入提高了 SSP 反应活性, 生成了针棒状的水化硅酸钙、碳酸钙晶须和不定形状的硅铝酸盐凝胶物质填充裂隙, 使孔隙率减小。此外, 随着时间的推移, 凝胶物质会逐渐增多, 颗粒间黏结程度增强, 逐渐形成团聚体, 增加土颗粒间的接触面积。综上所述, SSP 改良剂与土体中离子发生交换生成  $C_2S$  和  $C_3S$ , 降低土颗粒的双电层厚度, 同时石灰 (CaO) 与钢渣粉中的活性  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$  发生反应, 在石灰的催化下形成 C-S-H、C-A-H 和  $Ca(OH)_2$  等物质填充在裂隙中, 增强颗粒间的接触面积和吸力, 从而有效提高土体的黏聚力、整体性和强度。需要注意的是, SSP 改良膨胀土的物理机制和化学机制是相互作用的, 物理机制主要通过填充和摩擦作用改善土壤的工程性质, 而化学机制则通过离子交换反应、水化反应、矿物质转化等方式改善土壤的结构和性质。这些机制共同作用, 使得钢渣粉能够有效地改良膨胀土。

## 4 钢渣粉改良土的力学特性

### 4.1 单独改良土力学特性

目前, 许多学者进行了室内试验, 包括比重试验、粒度分析试验、自由膨胀率试验、Atterberg 极限试

验、压实试验、三轴压缩试验、加州承载比 (California bearing ratio, CBR)、UCS 和液塑限试验等, 并从 SSP 粒径及掺量、初始含水率、压实度、干湿-冻融循环等方面探索改良土的膨胀性能、渗透性能、抗冻性能、水分特性和力学变化规律。研究表明, SSP 的掺入显著改善了土体的胀缩性, 并提高了土体的抗剪强度<sup>[82]</sup>。左德元等<sup>[83]</sup>首次提出将 SSP 作为路基材料固化剂, 通过颗粒级配、比重、压缩、渗透等试验发现, SSP 填料具有较高的强度, 压缩性低, 渗水性好。Akinwumi<sup>[16]</sup>发现 SSP 的掺入增加了土体的干密度, 改变了土体的压实特性, 提高了土体的比重、渗透性、CBR 值和无侧限抗压强度。此外, 随着 SSP 掺量的增加, 当掺量为 8% 时能够降低黏土的塑性和膨胀性, 提高土体早期未固化的强度。袁明月等<sup>[84]</sup>通过室内试验研究钢渣微粉改良膨胀土的力学特性, 发现钢渣微粉改良膨胀土的塑限增加、液限降低; 当其掺量为 5% 时, 试样在干湿循环作用下的膨胀率降低, 抗剪强度增加。吴燕开等<sup>[85]</sup>研究指出, 当 SSP 掺量为 10% 时土体抗膨胀性最优。鉴于 SSP 粒径和掺量对土体强度影响较大, 因此建议 SSP 粒径小于 0.5 nm, 此时 SSP 可以和土体充分接触并有效填充颗粒间隙。综上所述, 适当的 SSP 掺量和合适的粒径可以抑制土壤的自由膨胀率, 降低土壤的液塑限, 并提高土壤的抗剪强度和早期固化特性, 有效抑制干湿循环下土壤强度的衰减速率。如图 5 所示, 不同 SSP 掺量下土壤的自由膨胀率和抗剪强度呈现不同的变化。

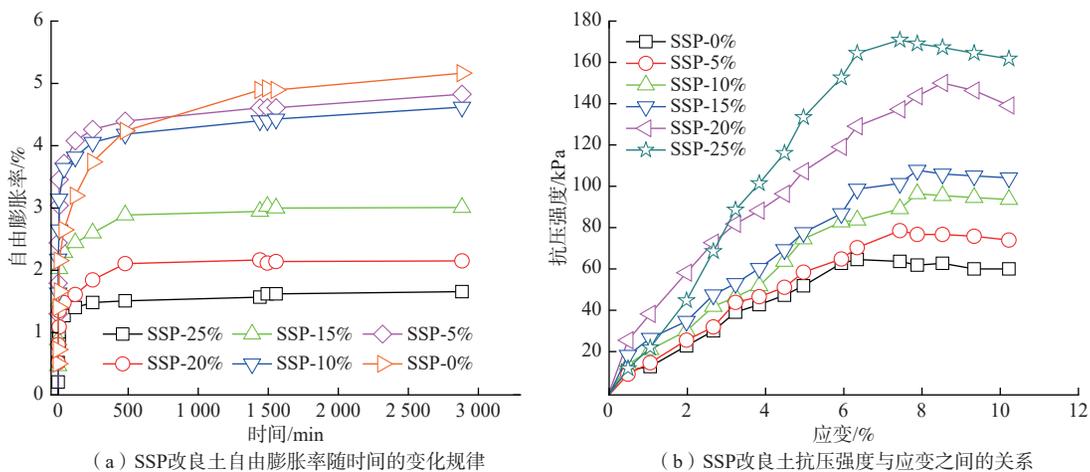


图 5 不同 SSP 掺量下土体自由膨胀率和抗剪强度变化 (据文献 [13, 87])

Fig. 5 Changes of free expansion rate and shear strength of soil under different SSP contents (adapted from Ref. [13, 87])

钢渣粉不仅可以改良膨胀土的塑性和膨胀性, 还可以提高土体最优含水率、干密度和抗剪强度<sup>[86]</sup>。但

不同 SSP 掺量下土体的膨胀率和强度改善效果各有不同。Aldecky 等<sup>[87]</sup>研究发现, 当 SSP 掺量为 20% 时,

土壤的自由膨胀率和塑性指数降低了 58.3% 和 26.3%; 同时最大干密度、抗压强度和 CBR 值分别提高了 6.9%、100% 和 154%。而 Wang 等<sup>[88]</sup>发现, 当含水率为 50% 时, 土体黏聚力随 SSP 掺量的增加也随之增加; 而当含水率介于 70% ~ 90% 之间时, 黏聚力随 SSP 掺量增加而减小。这表明试样含水率分别为 50% 和 70% 时土体抗剪强度达到最优。此外, Yu 等<sup>[70]</sup>通过干湿循环、UCS、X-射线衍射、热重和扫描电镜等试验研究了碳化钢渣粉改良土的强度性能及微观结构变化, 发现经过碳化处理的钢渣粉可显著提高土体的抗剪强度。金明亮等<sup>[89]</sup>利用钢渣粉稳定路基土, 研究表明钢渣粉粒径为 0 ~ 3 mm、最小掺量为 15% 时, 稳定土的强度随掺量的增加而增强, 浸水膨胀率减小, CBR 远超规范要求。然而, 程光前<sup>[90]</sup>提出, 对于钢渣粉改良膨胀土性能, 较高力学特性的最佳掺量为 15%, 超出该值将会使土壤的强度和胀缩性减弱。Worku 等<sup>[91]</sup>分析钢渣粉改良膨胀土物理、力学特性, 发现当 SSP 掺量为 25% 时, 膨胀土液限、塑限、塑性指数和自由膨胀率分别降低 25.6%、17.8%、7.8% 和 46.4%, 而 UCS 从 94.3 kPa 提高到 260.6 kPa。综上所述, 15% ~ 25% 掺量下, 钢渣粉可以显著改善土体的胀缩性和力学强度。然而, 目前钢渣粉的最佳掺量仍存在争议。这一争议可能是由于钢渣粉的生产工艺和产地不同, 导致其力学性能和矿物化学性质存在差异, 进而影响土壤的改良效果。因此, 钢渣粉在掺量上可能需要针对不同情况进行调整, 以达到更好的改良效果。

#### 4.2 与其它材料复合改良土力学特性

通过学者们持续的探索和研究, 发现通过物理研磨法将材料结构转变为非晶相, 或者采用化学激发剂与其他材料进行复合使用, 可显著提高改良土的力学性能<sup>[13]</sup>。在相关研究中, 蔡晓飞<sup>[92]</sup>对石灰-SSP 改良路基土力学特性进行了研究, 发现当石灰掺量为 8% ~ 12%, SSP 掺量为 25% 时, 土体强度显著提高。崔伟<sup>[93]</sup>研究了石灰-SSP 改良土性能, 从 SSP 掺量、养护期龄、配比等方面分析土体强度, 结果表明 SSP 改良土的强度较高, 水稳定性和温度稳定性也较好。另外, Gu 等<sup>[67]</sup>研究了不同掺量下的 SSP-石灰复合改良路基土的无侧限抗压强度, 当 SSP、石灰掺量分别为 50%、5%, 养护 28 d 时, 无侧限抗压强度由 0.73 MPa 增加到 4.09 MPa, 此时改良土的综合性能最佳。袁明月等<sup>[84]</sup>研究石灰、SSP 改良膨胀土力学特性, 通过 UCS、干湿循环和自由膨胀率试验发现 SSP 可以延缓土体裂隙发展, 减小土体膨胀性, 其土体强度优于石灰。而厚

荣斌<sup>[94]</sup>通过三轴试验、CBR 研究 SSP/石灰/稻壳灰改良膨胀土性能, 发现当 SSP 掺量为 20% 时, 土体塑性降低 66.2%、强度增加 96%、CBR 增加 97.5%。Wang 等<sup>[95]</sup>研究 SSP-碱渣共同改良软黏土工程性能, 发现钢渣粉的加入能显著改善土体的 UCS。项国圣等<sup>[35]</sup>研究石灰-SSP 共同改良膨胀土的力学特性, 发现随掺量增加土体膨胀率、最优含水率和界限含水率降低, 最大干密度增加。Alemshet 等<sup>[96]</sup>利用粉煤灰-SSP 作为膨胀土稳定剂, 发现钢渣粉、粉煤灰掺量分别为 20% 和 10% 时, 改良土抗剪强度和 CBR 值分别提高 97.47% 和 84.82%。上述研究侧重于探讨石灰对 SSP 改良膨胀土的力学特性影响的方面。尽管研究表明石灰、粉煤灰等可以有效提高 SSP 改良土体的整体性和力学强度, 然而, 尚未对不同材料复配、不同养护温度、不同压实度及干湿循环作用等因素对 SSP 改良土宏观力学特性的影响进行系统分析。

物理及化学改良剂相互作用可有效改善黏性土的综合性能, 提高 SSP 的反应速率。Wang 等<sup>[97]</sup>研究钢渣粉-废橡胶颗粒改良土强度特性, 发现钢渣粉掺入可以有效提高土体的抗剪强度和动弹性模量, 剪切模量随钢渣粉掺量、围压增大而增大, 随含水率增加而减小; 主要是橡胶颗粒可以降低土体的密度, 提高其内摩擦角。而 Shahbazi 等<sup>[98]</sup>发现, 当钢渣粉掺量为 14% 时, 其 UCS、膨胀率和膨胀压力分别提高 111%、89% 和 84%。随后宋心斌<sup>[99]</sup>研究钢渣粉-水泥-石灰稳定路基土性能, 发现复合改良土强度较高、稳定性较好。吴燕开等<sup>[80]</sup>通过室内试验研究干湿循环作用下 SSP-水泥改良膨胀土的体积变化率和膨胀率, 发现改良土膨胀率减小 95% 以上, 而体积变化率减小 85%。而吴子龙等<sup>[31]</sup>通过抗压强度、劈裂抗拉强度和击实试验, 他们发现在 SSP 与水泥改良土中, 最优含水率显著提高, 而最大干密度和强度增幅较小; 但当 SSP 超过最佳掺量时, 土体的强度逐渐减小。与此同时, 黄祥<sup>[100]</sup>、Wu 等<sup>[7]</sup>发现矿渣、石灰、偏高岭土和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  掺量分别为 28.6%、57.1%、9.5%、4.8% 时, 改良土养护 28 d 后的 UCS 为 10.9 MPa。之后韩天<sup>[81]</sup>、唐博等<sup>[34]</sup>利用碱激发剂催化 SSP-水泥复合改良膨胀土, 发现其改良土体膨胀率最小, 三轴抗剪强度和 UCS 明显提高, 但是后期强度增长缓慢。主要原因是前期碱激发剂加快 SSP 水化反应, 强度已增长较大, 因此后期表现较为缓慢, 说明碱激发剂不能提高其后期强度。综上所述, SSP 中掺入水泥、石灰、激发剂及其它改良剂可有效提高土体的综合性能, 显著增强 SSP 的水化活

性,提高其化学反应程度。然而,对于不同复合改良材料的适用性和效果尚未得到全面的了解,需要更多关于不同掺量与不同类型的复配材料改良土的力学性能。其次,目前对于 SSP 改良土体的长期稳定性和环境影响的研究相对较少,尤其是在实际工程应用中的长期性能表现和环境影响方面的研究还有待加强。此外,SSP 改良材料的配比设计、施工工艺以及与土体的相互作用等方面也需要进一步深入研究,以确保改良效果的可靠性和实用性。

## 5 结论与展望

钢渣粉作为一种新型土壤固化改良剂,在改良膨胀性黏土的胀缩性、抗压强度、剪切强度和抗变形等方面具有突出优势。能够与黏土颗粒发生阳离子交换吸附在表面,反应形成 C-S-H 凝胶和微量钙矾石填充并胶结团粒,进而改变黏土颗粒的物理化学性质和微观结构,提高其工程性能。利用钢渣粉改良膨胀性黏土的工程性质,既符合低碳、绿色、环保发展理念,又可提高固废资源的高附加值利用、降低工程处理成本。然而,当前存在一些问题需要进一步研究和解决:

(1) 钢渣粉生产工艺的差异导致其化学成分、结构性质、矿物组成、粒度、表面积、孔隙率及性能发生显著变化,进而影响其化学活性和改良效果。今后需进一步完善和规范相关工艺标准,提高 SSP 的转化效率和胶凝活性。因此,提高 SSP 活性及性能是未来研究的重点。

(2) 钢渣粉中含有大量游离的氧化钙和氧化镁,会与空气中水分发生化学反应,使 SSP 体积迅速膨胀,造成 SSP 稳定性极差。虽可以考虑采用碳酸化工艺克服其安定性不良的因素,但 SSP 碳酸化应用于土体改良整体性能的研究尚缺不足。

(3) 钢渣粉改良膨胀性黏土的微观机理及复合激发剂之间的反应机制研究还相对不足,需要进一步探索碱激发剂、SSP 与黏土之间的相互作用机制,并通过试验和数值模拟等手段建立宏微观力学响应规律,为 SSP 改良膨胀性黏土提供更加科学的理论基础。

(4) 土体改良的效果受到改良剂类型、添加量、混合方式和使用环境等多种因素的影响和控制,未来应考虑不同因素耦合下的化学-矿物成分及土体微观结构演变规律,从宏微观角度建立土体在水-化-力作用下的力学特性及耐久性评价体系。进而从更广泛的实际应用和环境影响出发,深入研究 SSP 改良土体的适用性、长期性能和环境影响等方面的问题。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 许雷,刘斯宏,鲁洋,等.冻融循环下膨胀土物理力学特性研究[J].岩土力学,2016,37(增刊2):167-174. [XU Lei, LIU Sihong, LU Yang, et al. Physico-mechanical properties of expansive soil under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup 2): 167-174. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 徐彬,殷宗泽,刘述丽.膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J].岩土力学,2011,32(1):44-50. [XU Bin, YIN Zongze, LIU Shuli. Experimental study of factors influencing expansive soil strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 44-50. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 张功基,李长冬,孟杰,等.浸水作用下泥岩膨胀特性及其关键界面响应机制[J/OL].中国地质灾害与防治学报,(2024-11-25)[2024-12-05]. [ZHANG Gongji, LI Changdong, MENG Jie, et al. Mudstone swelling characteristics and key interface response underwater immersion[J/OL]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, (2024-11-25)[2024-12-05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2852.p.20241122.1852.002.html>. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] DU Yanjun, LI Shenglin, HAYASHI S. Swelling-shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, China[J]. Engineering Geology, 1999, 53(3/4): 351-358.
- [ 5 ] SARIDE S, PUPPALA A J, CHIKYALA S R. Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays[J]. Applied Clay Science, 2013, 85: 39-45.
- [ 6 ] NALBANTOĞLU Z. Effectiveness of Class C fly ash as an expansive soil stabilizer[J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(6): 377-381.
- [ 7 ] WU Jun, LIU Qianwen, DENG Yongfeng, 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.
- [ 8 ] SHALABI F I, ASI I M, QASRAWI H Y. Effect of by-product steel slag on the engineering properties of clay soils[J]. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 2017, 29(4): 394-399.
- [ 9 ] 李宇,刘月明.我国冶金固废大宗利用技术的研究进展及趋势[J].工程科学学报,2021,43(12):1713-1724. [LI Yu, LIU Yueming. Progress and trend of bulk

- utilization technology of metallurgical solid wastes in China[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(12): 1713 – 1724. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 龙红明, 武皓天, 于先坤, 等. 钢渣用于土壤修复与改良的研究进展 [J]. *中国冶金*, 2023, 33(2): 1 – 7. [ LONG Hongming, WU Haotian, YU Xiankun, et al. Research status of steel slag used for soil remediation and improvement[J]. *China Metallurgy*, 2023, 33(2): 1 – 7. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] GUO Jianlong, BAO Yanping, WANG Min. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management[J]. *Waste Management*, 2018, 78: 318 – 330.
- [ 13 ] KABETA W F, LEMMA H. Modeling the application of steel slag in stabilizing expansive soil[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2023, 9(4): 4023 – 4030.
- [ 14 ] POH H Y, GHATAORA G S, GHAZIREH N. Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006, 18(2): 229 – 240.
- [ 15 ] MALASAVAGE N E, JAGUPILLA S, GRUBB D G, et al. Geotechnical performance of dredged material—Steel slag fines blends: Laboratory and field evaluation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(8): 981 – 991.
- [ 16 ] AKINWUMI I. Soil modification by the application of steel slag[J]. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2014, 58(4): 371 – 377.
- [ 17 ] YILDIRIM I Z, PREZZI M, CARRARO J A H. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2011, 2011: 463638.
- [ 18 ] WU X R, WANG P, LI L S, et al. Distribution and enrichment of phosphorus in solidified BOF steelmaking slag[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2011, 38(3): 185 – 188.
- [ 19 ] 王安, 吴美玲, 李忠元, 等. 钢渣应用于土壤修复的研究进展 [J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(4): 1535 – 1543. [ WANG An, WU Meiling, LI Zhongyuan, et al. Research progress on the application of steel slag for soil remediation[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(4): 1535 – 1543. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] OLUWASOLA E A, HAININ M R, AZIZ M M A. Characteristics and utilization of steel slag in road construction[J]. *Jurnal Teknologi*, 2014, 70(7): 117 – 123.
- [ 21 ] 赵计辉, 阎培渝. 钢渣的体积安定性问题及稳定化处理的国内研究进展 [J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(2): 477 – 484. [ ZHAO Jihui, YAN Peiyu. Volume stability and stabilization treatment of steel slag in China[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(2): 477 – 484. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] RASHAD A M. A synopsis manual about recycling steel slag as a cementitious material[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(5): 4940 – 4955.
- [ 23 ] OLUWASOLA E A, HAININ M R, AZIZ M M A, et al. Potentials of steel slag and copper mine tailings as construction materials[J]. *Materials Research Innovations*, 2014, 18(sup6): S6 – 250-S6-254.
- [ 24 ] 柴石玉, 张凌凯. 碱激发粉煤灰-钢渣粉协同固化膨胀土力学特性与微观机理研究 [J]. *材料导报*, 2023, 37(增刊 1): 261 – 268. [ CHAI Shiyu, ZHANG Lingkai. Mechanical properties and mechanism analysis of expansive soil solidified by alkali-activated fly ash and steel slag powder[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(Sup 1): 261 – 268. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 25 ] QIAN Guangren, SUN D D, TAY J H, et al. Autoclave properties of kirschsteinite-based steel slag[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(9): 1377 – 1382.
- [ 26 ] REDDY A S, PRADHAN R K, CHANDRA S. Utilization of Basic Oxygen Furnace (BOF) slag in the production of a hydraulic cement binder[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2006, 79(2): 98 – 105.
- [ 27 ] TOSSAVAINEN M, ENGSTROM F, YANG Q, et al. Characteristics of steel slag under different cooling conditions[J]. *Waste Management*, 2007, 27(10): 1335 – 1344.
- [ 28 ] NICOLAE M, VILCIU I, ZAMANA F. X-ray diffraction analysis of steel slag and blast furnace slag viewing their use for road construction[J]. *Upb Sci. Bull*, 2007, 69(2): 99 – 108.
- [ 29 ] TSAKIRIDIS P E, PAPANIMITRIOU G D, TSIVILIS S, et al. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production[J]. *Journal of Hazardous Materials*,

- 2008, 152(2): 805 – 811.
- [ 30 ] BELHADJ E, DILIBERTO C, LECOMTE A. Characterization and activation of Basic Oxygen Furnace slag[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(1): 34 – 40.
- [ 31 ] 吴子龙, 朱向阳, 邓永锋, 等. 掺入钢渣与偏高岭土水泥改性土的性能与微观机制 [J]. *中国公路学报*, 2017, 30(9): 18 – 26. [ WU Zilong, ZHU Xiangyang, DENG Yongfeng, et al. Behavior and micro-mechanism of cement-based modified compaction soil composed of steel slag and metakaolin[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(9): 18 – 26. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 32 ] 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 Mingyue, ZHANG Fuhai, WANG Yuanhang. 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 with English abstract) ]
- [ 33 ] 吴燕开, 王浩, 苗盛瑶, 等. 钢渣粉水泥改良膨胀土干湿循环下力学性能及机理分析 [J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(2): 41 – 50. [ WU Yankai, WANG Hao, MIAO Shengyao, et al. Mechanical properties and mechanism of expansive soil modified by steel slag powder cement under dry-wet cycles[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2021, 40(2): 41 – 50. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 34 ] 唐博, 何艾雨. 不同改良方案下膨胀土路基物理力学特性 [J]. *路基工程*, 2022(2): 195 – 199. [ TANG Bo, HE Aiyu. Physical and mechanical properties of expansive soil subgrade under different improvement schemes[J]. *Subgrade Engineering*, 2022(2): 195 – 199. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 35 ] 项国圣, 葛磊, 谢胜华, 等. 钢渣和石灰改良膨胀土的工程特性研究 [J]. *安徽建筑大学学报*, 2023, 31(1): 30 – 34. [ XIANG Guosheng, GE Lei, XIE Shenghua, et al. Study on engineering characteristics of expansive soil modified by steel slag and crushed limestone[J]. *Journal of Anhui Jianzhu University*, 2023, 31(1): 30 – 34. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 36 ] XU Zhiming, MA Ying, WANG Jiahao, et al. Preparation and hydration properties of steel slag-based composite cementitious materials with high strength[J]. *Materials (Basel)*, 2023, 16(7): 2764.
- [ 37 ] WANG Qiang, YAN Peiyu. Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(7): 1134 – 1140.
- [ 38 ] 孙朋, 郭占成. 钢渣的胶凝活性及其激发的研究进展 [J]. *硅酸盐通报*, 2014, 33(9): 2230 – 2235. [ SUN Peng, GUO Zhancheng. Research progress on cementitious activity and its activation of steel slag[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2014, 33(9): 2230 – 2235. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 39 ] 李玉祥, 王振兴, 冯敏, 等. 不同激发剂对钢渣活性影响的研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2012, 31(2): 280 – 284. [ LI Yuxiang, WANG Zhenxing, FENG Min, et al. Study on the effect of different activators on activation of steel slag[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2012, 31(2): 280 – 284. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 40 ] 张同生, 刘福田, 李义凯, 等. 激发剂对钢渣胶凝材料性能的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(4): 469 – 474. [ ZHANG Tongsheng, LIU Futian, LI Yikai, et al. Influence of activators on the properties of steel slag cementitious materials[J]. *Journal of Building Materials*, 2008, 11(4): 469 – 474. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 41 ] 王强. 钢渣的胶凝性能及在复合胶凝材料水硬化过程中的作用 [D]. 北京: 清华大学, 2010. [ WANG Qiang. Cementitious properties of steel slag and its role in the hydration and hardening process of complex binder[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 42 ] 王琴, 白国强, 刘洋, 等. 不同化学激发剂对矿粉活性的影响研究 [J]. *四川建筑科学研究*, 2019, 45(4): 97 – 101. [ WANG Qin, BAI Guoqiang, LIU Yang, et al. Effect of different chemical activators on mineral powder activity[J]. *Sichuan Building Science*, 2019, 45(4): 97 – 101. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 43 ] 邵雁, 姜明明, 熊敬超, 等. 早强剂对钢渣-脱硫灰基胶凝材料的强度及水化性能影响 [J]. *环境工程*, 2022, 40(12): 134 – 141. [ SHAO Yan, JIANG Mingming, XIONG Jingchao, et al. Influence of admixtures on strength and hydration performance of steel slag & desulfurization ash based cementitious materials[J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(12): 134 – 141.

(in Chinese with English abstract) ]

- [ 44 ] SUN Jianwei, ZHANG Zengqi, ZHUANG Shiyu, et al. Hydration properties and microstructure characteristics of alkali-activated steel slag[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 241: 118141.
- [ 45 ] 吴蓬, 梁志强, 吕宪俊. 钢渣粉的胶凝性能及活化研究进展 [J]. 中国粉体技术, 2015, 21(4): 80 - 84. [ WU Peng, LIANG Zhiqiang, LYU Xianjun. Progress of research on cementitious property and activation of steel slag powders[J]. *China Powder Science and Technology*, 2015, 21(4): 80 - 84. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 46 ] 朱伶俐, 赵宇. 钢渣复合激发剂的实验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(5): 1164 - 1168. [ ZHU Lingli, ZHAO Yu. Experiment study of steel slag compounded activators[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2010, 29(5): 1164 - 1168. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 47 ] 樊传刚, 徐兰, 朱思伟, 等. 碱性激发钢渣水化活性的研究 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2006, 23(1): 30 - 33. [ FAN Chuangang, XU Lan, ZHU Siwei, et al. Study of the alkali activation on the steel slag[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2006, 23(1): 30 - 33. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 48 ] 范立瑛. 脱硫石膏基钢渣胶凝材料的研制 [D]. 济南: 济南大学, 2010. [ FAN Liying. Fabrication of flue gas desulphurization gypsum based steel slag cementitious materials[D]. Jinan: University of Jinan, 2010. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 49 ] 程从密, 何娟, 唐兵, 等. 电炉钢渣活性激发研究 [J]. 广州大学学报(自然科学版), 2012, 11(1): 53 - 57. [ CHENG Congmi, HE Juan, TANG Bing, et al. The investigation of hydraulic activated EAF slag[J]. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 2012, 11(1): 53 - 57. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 50 ] 温建. 钢渣的活性激发及资源化利用 [D]. 长沙: 中南大学, 2013. [ WEN Jian. Study on the activation and utilization of steel slag[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 51 ] 魏瑞丽, 李辉, 张婕. 钢渣活性激发的机理及研究进展 [J]. 材料导报, 2014, 28(21): 105 - 108. [ WEI Ruili, LI Hui, ZHANG Jie. Mechanism and recent development of steel slag activating activity[J]. *Materials Review*, 2014, 28(21): 105 - 108. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 52 ] YOU Nanqiao, LI Baoliang, CAO Ruilin, et al. The influence of steel slag and ferronickel slag on the properties of alkali-activated slag mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 227: 116614.
- [ 53 ] 邵俐, 李佩青, 王彬杰. 冻融循环对碱激发高炉矿渣微粉加固软土强度的影响 [J]. 公路交通科技, 2022, 39(1): 40 - 47. [ SHAO Li, LI Peiqing, WANG Binjie. Influence of freeze-thaw cycle on strength of soft soil solidified by alkali-activated ground granulated blast furnace slag[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2022, 39(1): 40 - 47. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 54 ] 梅杨. 大掺量矿渣微粉的碱激发机理研究 [J]. 中外公路, 2023, 43(2): 213 - 218. [ MEI Yang. Study on alkali excitation mechanism of large dosage slag fine powder[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2023, 43(2): 213 - 218. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 55 ] 王智猛. 红层泥岩及其改良土填筑高速铁路路基适应性及工程技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009. [ WANG Zhimeng. Study on applicability and technology for filling subgrade using red-mudstone and improved soil in high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 56 ] 谭罗荣, 孔令伟. 某类红粘土的基本特性与微观结构模型 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 458 - 462. [ TAN Luorong, KONG Lingwei. Fundamental property and microstructure model of red clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 458 - 462. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 57 ] 范文, 魏亚妮, 于渤, 等. 黄土湿陷微观机理研究现状及发展趋势 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 144 - 156. [ FAN Wen, WEI Yani, YU Bo, et al. Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 144 - 156. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 58 ] 崔雪雪. 干湿循环条件下川中红层软岩崩解特性与微观机理分析 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019. [ CUI Xuexue. Analysis of disintegration characteristics and microscopic mechanism of red bed soft rock in Central Sichuan Province under dry-wet cycle[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology,

2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 59 ] 马婧, 陈永贵, 刘聪, 等. 化学作用下压实膨润土膨胀力响应机制研究进展 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45(10): 2042 – 2051. [ MA Jing, CHEN Yonggui, LIU Cong, et al. Research progress in mechanisms of swelling pressures of compacted bentonite under chemical conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(10): 2042 – 2051. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 60 ] 张凌凯, 张浩, 崔子晏. 不同循环模式条件下膨胀土的力学特性变化规律及其物理机制研究 [J]. 土木工程学报, 2023, 56(10): 135 – 148. [ ZHANG Lingkai, ZHANG Hao, CUI Ziyang. Study on mechanical properties and physical mechanism of expansive soil under different cyclic modes[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(10): 135 – 148. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 61 ] 张浩, 张凌凯. 干湿-冻融循环条件下膨胀土剪切特性的劣化机制研究 [J]. 工程力学, 2024, 41(4): 94 – 105. [ ZHANG Hao, ZHANG Lingkai. Study on degradation mechanism of shear properties of expansive soil under drying-wetting-freezing-thawing cycles[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(4): 94 – 105. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 62 ] 李晋鹏, 汪磊, 王俊, 等. 考虑抗剪强度衰减特性的膨胀土边坡稳定性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 29 – 36. [ LI Jinpeng, WANG Lei, WANG Jun, et al. Stability analysis of expansive soil slopes considering shear strength decay characteristics [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 29 – 36. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 63 ] 刘建强, 许强, 郑光, 等. 贵州省鸡场滑坡地下水化学特征反映的水-岩(土)作用 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 132 – 140. [ LIU Jianqiang, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Water-rock/soil interaction reflected by the chemical characteristics of groundwater of Jichang landslide in Guizhou Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 132 – 140. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 64 ] 吴道祥, 刘宏杰, 王国强. 红层软岩崩解性室内试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 4173 – 4179. [ WU Daoxiang, LIU Hongjie, WANG Guoqiang. Laboratory experimental study of slaking characteristics of red-bed soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 2): 4173 – 4179. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 65 ] 赵明华, 邓颀宇, 曹文贵. 红砂岩崩解特性及其路堤填筑技术研究 [J]. 中国公路学报, 2003, 16(3): 1 – 5. [ ZHAO Minghua, DENG Jinyu, CAO Wengui. Study of the disintegration character of red sandstone and the construction techniques of red sandstone embankment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(3): 1 – 5. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 66 ] MENG H D, LIU L. Stability processing technology and application prospect of steel slag[J]. Steelmaking, 2000, 25(6): 74 – 78.
- [ 67 ] GU Xingyu, YU Bin, DONG Qiao, et al. Application of secondary steel slag in subgrade: Performance evaluation and enhancement[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 181: 102 – 108.
- [ 68 ] 石荣剑, 黄丰, 岳丰田, 等. 钢纤维改良土的分层冻胀试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45(7): 1430 – 1437. [ SHI Rongjian, HUANG Feng, YUE Fengtian, et al. Experimental study on delamination frost heave of steel fiber-improved soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(7): 1430 – 1437. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 69 ] 李丽华, 黄畅, 李文涛, 等. 稻壳灰-矿渣固化膨胀土力学与微观特性研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44(10): 2821 – 2832. [ LI Lihua, HUANG Chang, LI Wentao, et al. Study on mechanical and microscopic characterization of expansive soil solidified by rice husk ash-granulated blast furnace slag[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(10): 2821 – 2832. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 70 ] YU Chunyang, CUI Chunyi, WANG Yu, et al. Strength performance and microstructural evolution of carbonated steel slag stabilized soils in the laboratory scale[J]. Engineering Geology, 2021, 295: 106410.
- [ 71 ] 易富, 管茂成, 李军, 等. 稻壳灰-地聚物固化土力学特性及机理分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 94 – 101. [ YI Fu, GUAN Maocheng, LI Jun, et al. Mechanical properties and mechanism analyses of rice husk ash geopolymer solidified soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 94 – 101. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 72 ] 刘翼飞, 布泽凡, 蔡东廷, 等. Si/Ca 复合体系改性分散土的崩解特性及作用机制研究 [J]. 岩土力学,

- 2023, 44(5): 1341 – 1352. [ LIU Yifei, BU Zefan, CAI Dongting, et al. Disintegration characteristics and mechanism of dispersive soil modified by Si/Ca compound system[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(5): 1341 – 1352. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 73 ] TIAN Yu, XIA Runmin, YING Yuqian, et al. Desulfurization steel slag improves the saline-sodic soil quality by replacing sodium ions and affecting soil pore structure[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118874.
- [ 74 ] GOODARZI A R, SALIMI M. Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag[J]. *Applied Clay Science*, 2015, 108: 61 – 69.
- [ 75 ] MANSO J M, ORTEGA-LÓPEZ V, POLANCO J A, et al. The use of ladle furnace slag in soil stabilization[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 40: 126 – 134.
- [ 76 ] 于佳丽. 冻融循环下钢渣粉改良膨胀土工程力学特性试验研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2019. [ YU Jiali. Experimental study on engineering mechanical properties of expansive soil improved by steel slag powder under freeze-thaw cycles[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 77 ] ZHANG Yanzhao, PU Shaoyun, LI R Y M, et al. Microscopic and mechanical properties of undistributed and remoulded red clay from Guiyang, China[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 18003.
- [ 78 ] 王小龙, 李晓娟, 李渊, 等. 碱液处理红黏土抗压强度演变规律研究 [J]. *路基工程*, 2023(2): 226 – 229. [ WANG Xiaolong, LI Xiaojuan, LI Yuan, et al. On the evolution law of compressive strength of red clay treated with alkaline solution[J]. *Subgrade Engineering*, 2023(2): 226 – 229. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 79 ] 刘纪峰, 张会芝, 卢健, 等. 尾矿微粉掺量对红黏土无侧限抗压强度的影响 [J]. *三明学院学报*, 2022, 39(6): 79 – 84. [ LIU Jifeng, ZHANG Huizhi, LU Jian, et al. The influence of the tailings powder content on the uniaxial compressive strength of red clay[J]. *Journal of Sanming University*, 2022, 39(6): 79 – 84. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 80 ] 吴燕开, 乔晓龙, 李丹丹, 等. 干湿循环下钢渣粉水泥改良膨胀土室内试验研究 [J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 53(3): 319 – 329. [ WU Yankai, QIAO Xiaolong, LI Dandan, et al. Experimental study on expansive soil improved by steel slag powder-cement under dry-wet cycles[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 53(3): 319 – 329. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 81 ] 韩天. 干湿循环条件下钢渣微粉+水泥改良膨胀土力学特性及机理研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2019. [ HAN Tian. Study on mechanical properties and mechanism of expansive soil improved by steel slag powder and cement under dry-wet cycle[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 82 ] REZAEI-HOSSEINABADI M J, BAYAT M, NADI B, et al. Sustainable utilisation of steel slag as granular column for ground improvement in geotechnical projects[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01333.
- [ 83 ] 左德元, 邱宗明. 钢渣用于路基填料的试验分析 [J]. *路基工程*, 2001(3): 33 – 34. [ ZUO Deyuan, QIU Zongming. Test analysis of steel slag for subgrade filling[J]. *Subgrade Engineering*, 2001(3): 33 – 34. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 84 ] 袁明月, 张福海, 陈翔, 等. 钢渣微粉改良膨胀土室内试验研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2017, 15(2): 81 – 85. [ YUAN Mingyue, ZHANG Fuhai, CHEN Xiang, et al. Micro-powder improvements of steel slag treated expansive soil[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2017, 15(2): 81 – 85. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 85 ] 吴燕开, 胡锐, 赵位莹, 等. 钢渣粉掺合料改良膨胀土特性试验研究 [J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 36(1): 136 – 143. [ WU Yankai, HU Rui, ZHAO Weiyang, et al. Study on expansive soil properties improved by steel slag powder admixture[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2017, 36(1): 136 – 143. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 86 ] ZUMRAWI M M E, BABIKIR A A A. Laboratory study of steel slag used for stabilizing expansive soil[J]. *University of Khartoum Engineering Journal*, 2017, 4(1): 1 – 6.
- [ 87 ] ALDEEKY H, AL HATTAMLEH O. Experimental study on the utilization of fine steel slag on stabilizing

- high plastic subgrade soil[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2017, 2017: 9230279.
- [ 88 ] WANG Liyan, ZHANG Bin, XIE Hongmei, et al. Study on shear strength characteristics of marine silt modified by steel slag[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 9647977.
- [ 89 ] 金明亮, 王兴涛, 郑万鹏, 等. 钢渣作为胶凝剂稳定黄土路基研究与应用 [J]. *公路*, 2022, 67(9): 101 – 108. [ JIN Mingliang, WANG Xingtao, ZHENG Wanpeng, et al. Research and application of steel slag as gelling agent to stabilize loess subgrade[J]. *Highway*, 2022, 67(9): 101 – 108. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 90 ] 程光前. 钢渣粉改良膨胀土强度特性试验研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2023. [ CHENG Guangqian. Experimental study on strength characteristics of expansive soil improved by steel slag powder[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 91 ] WORKU F K. Application of steel slag in stabilizations of expansive soil: An experimental study[J]. *Archives of Civil Engineering*, 2023: 105-117.
- [ 92 ] 蔡晓飞. 石灰钢渣土用作公路底基层的试验研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2007. [ CAI Xiaofei. Research on the experiments about lime-steel slag-soil is used for highway sub-base[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 93 ] 崔伟. 钢渣—石灰改良盐渍土的试验研究 [J]. *山西建筑*, 2017, 43(18): 48 – 50. [ CUI Wei. On experimental research on slag-lime modified salinized soil[J]. *Shanxi Architecture*, 2017, 43(18): 48 – 50. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 94 ] 厚荣斌. 钢渣、稻壳灰和生石灰改良膨胀土的性能研究 [J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2017, 13(7): 208 – 210. [ HOU Rongbin. Study on the properties of expansive soil improved by steel slag, rice husk ash and quicklime[J]. *Highway Traffic Technology (Application Technology Edition)*, 2017, 13(7): 208 – 210. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 95 ] WANG Xuefei, ZHANG Zicheng, SONG Zihao, et al. Engineering properties of marine soft clay stabilized by alkali residue and steel slag: An experimental study and ANN model[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(11): 5089 – 5112.
- [ 96 ] ALEMSHET D, FAYISSA B, GEREMEW A, et al. Amelioration effect of fly ash and powdered ground steel slag for improving expansive subgrade soil[J]. *Journal of Engineering*, 2023, 2023: 1652373.
- [ 97 ] WANG Liyan, XIAO Xing, JI Wenwei, et al. Dynamic properties of the mucky clay improved with the steel slag and the rubber particles[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 294: 123489.
- [ 98 ] SHAHBAZI M, ROWSHANZAMIR M, ABTAHI S M, et al. Optimization of carpet waste fibers and steel slag particles to reinforce expansive soil using response surface methodology[J]. *Applied Clay Science*, 2017, 142: 185 – 192.
- [ 99 ] 宋心斌. 钢渣稳定土设计及路用性能研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018. [ SONG Xinbin. Study on design and road performance of steel slag stabilized soil[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2018. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 100 ] 黄祥. 废弃钢渣+轮胎颗粒改良海相淤泥强度特性试验研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019. [ HUANG Xiang. Experimental study on strength characteristics of marinemud under waste steel slag + tire particles[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2019. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 刘真真