

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.05.056

# 土壤固化剂及其工程性能研究进展

金柯宇<sup>1</sup>, 徐奋强<sup>1</sup>, 李庆辉<sup>2</sup>, 毛溢典<sup>1</sup>, 李越阳<sup>1</sup>, 杨嘉毅<sup>1</sup>, 杭麟然<sup>1</sup>

(1.南京工程学院建筑工程学院, 江苏 南京 211167; 2.江苏路业建设有限公司, 江苏 南京 210019)

**摘要:** 土壤固化剂能够改善土体的抗剪强度、渗透性和水稳定性等工程特性, 是传统土壤固化材料水泥、石灰的新扩展, 已广泛应用于软土地基加固工程。通过总结土壤固化剂的类型、材料组分、固化机理和固化特性等方面的国内外最新研究进展, 提出了土壤固化剂研究方向和拟解决的关键技术问题, 为土壤固化新材料的研发和工程应用提供新思路。

**关键词:** 固化剂; 组成特性; 固化机理; 力学特性

**中图分类号:** TU472

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2023)05-0218-05

## 0 引言

随着道路、园区等土建工程的快速推进, 大量的矿山、砂石等原材料的开采, 以及大量建筑垃圾和渣土的产生, 工程建设面临建材趋紧和弃土处理的双重压力。因此, 采取有效措施解决弃土再生利用、节约资源, 规避水泥、石灰等传统无机固化材料干缩开裂、早强低、水稳定差的缺陷, 探索环保型土壤固化剂, 实现弃土资源化、无害化、科技化综合利用是当务之急。因此, 新型离子类、有机类、生物酶类等新型土壤固化剂日趋发展<sup>[1]</sup>。国外发达国家已于20世纪70年代开启了土壤固化新学科, 并研制出各类新型固化剂, 如EN-1、Toogood、Aught-Set等。20世纪90年代, 我国借鉴国外技术研发出系列土壤固化剂<sup>[2]</sup>, 如SH型<sup>[3]</sup>、路液(roadyes)<sup>[4]</sup>等。相较发达国家, 我国的研究成果在产品效能和固化机制方面尚存在较大差距。我国的土体固化剂研发呈现百花齐放的景象, 但成熟产品较少, 并没有形成门类健全、针对性强、施工工艺标准的体系或学科。

现从固化剂材料组分的角度分类阐述土壤固化剂研究现状和固化机理, 分析各类土壤固化剂的应用特性和固化土的承载特性, 提出土壤固化剂的发展方向 and 关键技术, 以期为土壤固化剂材料的研发和工程应用提供新的思路。

收稿日期: 2022-07-17

基金项目: 江苏省高等学校大学生实践创新训练计划(20221127685Y)

作者简介: 金柯宇(2003—), 男, 本科在读, 专业为土木工程。

## 1 固化剂的分类与固化机理

土壤固化剂按材料组成可分为无机、有机和复合类固化剂, 按固化机理可分为物理过程、化学过程和物理化学过程。常见的固化剂有无机类、有机类、离子类、生物酶类和复合类5种。无机土壤固化剂主要有水泥、石灰及工业废渣等, 多呈粉末状固态。有机土壤固化剂主要有高分子型、木质素及复合类有机固化剂, 如应用较成熟的美国EN-1、澳大利亚Doadbond、南非Con-Aid, 复合类如日本Aught-set, 近年新开发的国产路液、CH固化剂<sup>[5]</sup>及各类聚丙烯酸类高聚物固化剂等<sup>[6]</sup>。生物类固化剂主要有泰然酶、Fujibeton酶及Eko酶等<sup>[7]</sup>。土壤固化剂一般通过胶结或隔膜土粒改善土体结构, 提升土体物理、力学特性, 被广泛应用于岩土工程领域<sup>[8]</sup>。

土壤固化剂主要组分与土体发生物理、化学反应, 主要表现为离子交换、吸附作用、水化反应, 以及水化产物的胶凝和堵塞孔隙作用, 以改善土粒间接触, 胶结土粒间的连接。离子交换主要是固化剂中高价离子与土粒表面水膜中的低价离子发生交换作用, 使土粒水膜表面双电子层减薄, 土粒孔隙变小, 土体致密, 早期强度提高, 进而改善土体的冻融性和水稳定性。水化反应主要是固化剂的水解产物, 如硅酸钙凝胶、硫酸钙凝胶等具有的填充和胶结作用提高土体强度<sup>[9]</sup>, 如液体硅酸钠基TX-85处理热带红土时取得较明显的效果<sup>[10]</sup>。生物类固化剂通过生物蛋白的胶结作用加固土体。

## 2 无机类固化剂

### 2.1 固化剂组成和固化机理

无机类固化剂主要包括水泥、石灰、工业废弃粉(煤灰、矿渣)等。这类固化剂主要通过水化反应、离子交换、结晶胶结作用固化土体,固化剂水化产物水化硅酸钙、水化硫酸钙、水化铝酸钙形成较高强度的凝胶结构体系,部分凝胶黏结土粒形成网架,达到固化土的目的。代表性产品如168麦道、GA固化剂、HEC、PSS、SG系列土壤固化剂。目前新型无机固化剂主要由催化剂、稳定剂或激发剂等组分组成,主要为硫酸盐、石膏、水泥窑粉尘、纳米二氧化硅、赤泥,以及多种碱金属、硼、铁等元素合成的催化剂。无机固化剂固化土体的研究多是基于这类材料的不同配比或复合而展开的。

### 2.2 固化土工程性能

Khadka等<sup>[11]</sup>采用偏高岭石和粉煤灰合成低聚物,并用石灰和石膏作为催化剂对高含硫量的膨胀土进行改性,在添加剂掺量为6.0%~9.5%时膨胀土的膨胀率最小。Yu等<sup>[12]</sup>等采用硅酸钠作为激发剂固化土壤,当SiO<sub>2</sub>与Na<sub>2</sub>O的摩尔比在0.9~1.2范围内,土壤28d的抗压强度可达4.2MPa,完全能够满足工程设计的需要。为了解决水泥窑粉尘废弃物问题,研究者采用水泥窑粉尘用于固化土壤。水泥窑粉尘能够增强土壤无侧限抗压强度<sup>[13]</sup>,与未添加水泥窑粉尘的土壤相比,添加水泥窑粉尘土壤的28d无侧限抗压强度可达1MPa,无侧限抗压强度增强了将近10倍<sup>[14]</sup>。Ghavami等<sup>[15]</sup>采用纳米二氧化硅和粉煤灰作为激发剂,研究了水泥窑粉尘对土壤的固化性能,土壤28d的无侧限抗压强度可以达到2.5MPa。也有研究将赤泥用于公路建设中<sup>[16]</sup>。陈立东等<sup>[17]</sup>采用CaO改性赤泥固化黄土,当赤泥掺量达到45%~60%时,强度在此区间达到最大值,强度相比水泥固化土可提高2.5~4倍。

### 2.3 固化土的工程特点

水泥、石灰类传统固化剂,以及催化剂、激发剂等混合物组成的新型固化剂,主要是靠其自身的水解、水化反应,一方面消耗土壤中的水分降低土体含水率,增加强度;另一方面水化产物的胶结作用和离子交换更进一步提高了土体强度。然而,该类固化剂耗费大,成本高,易污染,施工困难,难以恢复再生,对环境保护不利,已不适合社会发展对环境保护的

要求。鉴于水泥、石灰的需求巨大,难以替代,目前新型无机固化剂研发的关键仍在于激发剂,以减缓无机材料的用量。因此,激发剂的研发需要基于环保、高效的社会需求,寻求纳米材料、天然活性剂等材料作为研究的方向。

## 3 有机类固化剂

### 3.1 固化剂组成和固化机理

有机类固化剂一般为液体,主要分为树脂、磺化油、增塑剂、聚合物,以及高分子材料一种或多种配制而成,如聚氨酯、聚丙烯酸、聚乙烯醇、聚丙烯纤维等<sup>[18]</sup>。

代表性产品有美国的Magic系列固化剂、EN-1、ISS、南非Con-Aid、澳大利亚路基实固化剂等。该类固化剂的固化机理一般通过离子交换作用和吸附作用促进土粒的致密性,属物理作用。固化剂中的高价阳离子通过交换作用取代土粒水膜表面的低价阳离子,使水膜电荷密度增大,土粒表面负电势降低,水膜厚度减薄而土粒斥力减弱,易于压实,土粒间距缩小,电势减小<sup>[19]</sup>,高分子链也会嵌入水膜电子层起到镶嵌作用,形成封闭空间,从而改善土体的水稳定性,提高土体的抗弯折能力。可见,有机类固化剂用于路基填筑具有其独特的优势。

### 3.2 固化土工程性能

聚氨酯类材料由于其黏度和低密度、形成凝胶时间短、强度高,以及固化后化学惰性等特点,常用作土壤固化剂。其主要成分包括异氰酸酯、多元醇、催化剂、表面活性剂、交联剂等<sup>[20]</sup>。

聚氨酯固化剂不仅用于路面底基层、基层中解决路基沉降问题,也用于膨胀土的稳定<sup>[21]</sup>。Liu等<sup>[22]</sup>将聚氨酯添加到砂性土壤中,当聚氨酯的掺量从10%增加到40%时,土壤的无侧限抗压强度和抗拉强度分别从65.40kPa和25.40kPa增加到148.54kPa和64.71kPa,主要由于聚氨酯在土壤表面形成网络结构膜,致使土壤颗粒之间紧密黏接。Tao等<sup>[23]</sup>研究发现聚氨酯泡沫加入到中国南海碳酸盐沙土中能够有效提高碳酸盐沙土的强度和硬度。陈志昊等<sup>[24]</sup>采用新型聚氨酯固化剂和聚丙烯纤维复合物固化砂土,当聚氨酯含量为4%、土壤干密度为1.5g/cm<sup>3</sup>时,聚丙烯纤维含量从0.2%到0.8%,抗拉强度从79.06kPa增加到194.5kPa。

研究者对聚乙烯醇、黄原胶、丁苯橡胶乳浊液、聚丙烯纤维等有机固化剂也做了大量的研究。

Mirzababaei 等<sup>[25]</sup>研究了聚乙烯醇对膨胀黏土工程特性的影响。聚乙烯醇可有效改善土体的水稳定性,固化土试样浸没在水中可以持续 4 d,而原状土在浸没水中 30 min 完全破裂。Ghasemzadeh 和 Modiri<sup>[26]</sup>将野生杏树枝干分泌的植物胶——黄原胶作为土壤固化剂。当黄原胶掺量为 2% 时,养护 28 d 的沙土试样的无侧限抗压强度可达 1.5 MPa,较没有改良的土样强度有显著提高。Almajed 等<sup>[27]</sup>采用丁苯橡胶乳浊液、聚丙烯纤维和大麻纤维固化沙土,丁苯橡胶最佳掺量为沙土的 2%,聚丙烯纤维的最大掺量为 0.5%,大麻纤维掺量为 1% 时效果最佳。

### 3.3 固化土的工程特点

有机类固化剂多呈液态,浓度高,具有一定的毒性,其加固机理主要是改变土粒表面水膜的厚度和电势,对土体耐久性和耐水性改进效果较好。该类固化剂主要是物理作用,固化效果不如无机类明显,一般与水泥、石灰等结合应用,由于其固化机理复杂,难以量化分析,理论体系完善也限制了其进一步的应用和研发,其浓度较高用量较少给施工拌合均匀性带来一定困难,后续有机类固化研发的关键是固化机理的研究、复合型和增塑型固化剂的研发。

## 4 离子固化剂

### 4.1 固化剂组成和固化机理

离子土壤固化剂主要是由硫酸、磺化油、磷酸、表面活性剂、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、水等物质组成的浓缩液体。其固化机理主要是通过固化剂的离子与土粒水膜表面的离子发生交换和吸附反应,减薄水膜,降低电位势能,减小土粒矿物层间距<sup>[28]</sup>,如图 1 所示,土粒间引力增大,促进土壤颗粒之间结合,水化产物形成凝胶,增进土体之间的强度,部分离子与土粒结合并促进薄膜水电离形成  $\text{OH}^{-}$  包裹土粒形成溶胶并与土粒周边阳离子组成双电子层结构,薄膜水溢出,土体呈憎水性,进而改进土粒的水稳定性。代表性产品有美国 EN-1、南非 ISS-2500、澳大利亚 Roadband,以及国产的 CHF、Toogood 固化剂等。

### 4.2 固化土工程性能

吴雪婷等<sup>[29]</sup>采用 ISS 离子固化剂固化淤泥,通过离子交换作用使土粒表面扩散层厚度变薄和  $\xi$  电势降低,土粒聚集和凝结,孔隙变小,淤泥压缩性减小,有效提高了土颗粒之间的黏结强度和稳定性。

李建东等<sup>[30]</sup>将含有多种酸性表面活性剂的液体状磺化有机化合物添加到黄土中。由于阳离子交换

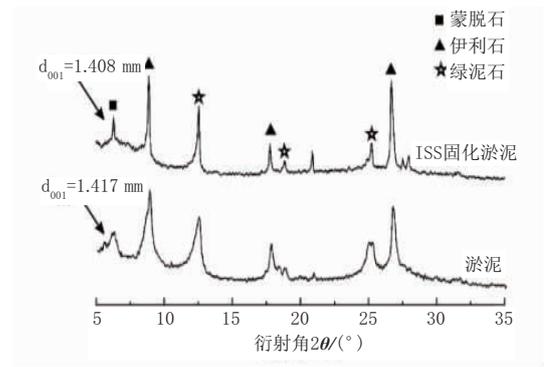


图 1 离子固化剂固化淤泥 X 射线衍射图

破坏了土粒表面的双电层结构,加之磺化油的疏水作用,减小了土体塑限,增大液限和塑性指数,促进土颗粒间聚集和凝结,当固化剂掺量为  $0.3 \text{ L/m}^3$  时,浸水和未浸水承载比值较素土分别增大了 3.97 倍和 2.25 倍,无侧限抗压强度提高了 1.43 倍,可见固化效果明显。游庆龙等<sup>[31]</sup>采用 EN-1 离子固化剂对金华当地红黏土进行加固。红黏土塑性指数降低,强度有所增加。Yang 等<sup>[32]</sup>采用传统的电解质(1-乙烯基-3-乙基咪唑溴单体)固化纳基膨润土,通过离子交换去除钠基膨润土中的孔隙水,有效降低了黏土的膨胀性。

### 4.3 固化土的工程特点

离子类土壤固化剂多为液态,呈酸性,易溶于水,不易储存,施工成本较低,容易拌合,能够提升土粒的强度和水稳定性,但一般不适于碱性土壤,使其应用范围受限。由于其固化机理多为离子交换和吸附作用,少有水化反应,单独使用固化效果并不显著,需要结合水泥、石灰等无机固化剂共同应用。为此,研究高分子型离子固化剂或复合型固化剂,提高组分的水化反应和吸附特性,减小土粒水膜厚度,降低电位势能,扩大适用范围将是离子型固化剂研发的关键。

## 5 生物酶类固化剂

### 5.1 固化剂组成和固化机理

生物酶固化剂是一种新型的土壤稳定材料,本质上由植物纤维提取,通过其吸附胶结作用产生土体强度。目前已出现一系列商业化产品,如 Renolith 酶(利路力)、Perma-Zyme 酶(怕玛酶或派酶)、Terra-Zyme 酶(泰然酶)、Fujibeton 酶及 Eko 酶等<sup>[33]</sup>。Renolith 酶覆盖到土壤颗粒表面,水分蒸发后会形成具有较强的抗拉强度和韧性的土壤聚合物基质,从而防止水泥路面开裂<sup>[34]</sup>。Perma-Zyme 酶由美国于 20 世纪 40 年代研制成功,为可兼容物,不含聚合物,无

毒无害<sup>[35]</sup>。Terra-Zyme 酶是蔬菜提取物,绿色环保,能够代替粒料基层和粒料底基层<sup>[36]</sup>。

## 5.2 固化土工程性能

吕文斌<sup>[7]</sup>研究发现派酶固化土时,当派酶稀释比为 1:1000 时,派酶处理过的路基的压实度能够超过 100%,抗压强度为 3.07 MPa。吴冠雄<sup>[37]</sup>采用 Nature Plus 公司生产的 Terra-Zyme 酶作为土壤酶固化剂,当土壤中大于 4.75 mm 颗粒含量增加,生物酶混合料的最大干密度增大,最佳含水率减小,生物酶固化土能够明显提高道路的承载力。Eko 酶添加到赤泥中,当 Eko 酶掺量为 4% 时,赤泥的干密度最大,在养护 45 d 后,赤泥的 CBR 值提高了 5.8 倍,无侧限抗压强度提高了 5.7 倍<sup>[38]</sup>。也有研究者<sup>[39]</sup>将海藻多糖加入土壤中,海藻多糖通渗透扩散包裹土颗粒,达到凝胶固结作用,改善土体强度。一般海藻多糖施用量为 0.25% 时,土壤崩解系数减少 66.1%。

## 5.3 固化土的工程特点

生物酶固化剂目前研究相对较少,具有无毒环保等特点,在短时间内能够提高土体的强度和硬度,但其长久性需要进一步研究探索。此外,可以考虑生物酶固化剂与植被加固相结合,提升加固效果。

## 6 结语与展望

通过总结分析近几年最新土壤固化研究与应用进展,为新型土壤固化剂在基建中的推广应用提供参考。目前应用在基建中的固化剂为无机固化剂、有机类固化剂、离子固化剂和酶类固化剂。这些土壤固化剂的研究主要集中在土壤的工程力学特性等方面,如无侧限抗压强度、抗崩解性、膨胀系数和渗透系数,以及微观架构等方面。国外历经 50 余年的研发和应用,已形成完善的学科体系。而我国在该领域的研究尚处在起步阶段,研发时间短,产品单一,通用性不强,成熟的商业化产品较少,在后续的研究中应加大投入、完善土体固化体系,建议从以下方面考虑研发。

(1) 鉴于我国幅员辽阔,土壤类型复杂,某一类固化剂难以通用,使得固化效果差异较大。因此,急需研发兼容性高的土壤固化剂,扩大土壤固化剂使用范围,考虑吸附效应、水化效应和增塑性方面的材料研发,促进复合型固化剂的诞生。

(2) 加强土体固化机理的研究,目前国内外学者采用宏观强度、渗透、变形等测试,以及微观 SEM(电子显微镜)、XRD(X 射线衍射)、TOC 试验、热重

(TG/DTG),取得大量研究成果。但固化机理尚不明朗。因此,还需要对固化剂的水化反应的量化分析,土粒胶结程度、双电层变化规律,孔隙分布特性等方面展开研究。

(3) 完善固化剂固化体系的建设,加强成熟固化剂应用行业规程的制定,有关其案例推广、适用范围、掺量、拌合、施工配合比、施工、养护、后续监测等完善的应用体系。

(4) 强化环保型快速固化剂的研究。在土壤固化剂的应用中,应充分利用其“点土成石”的快速修复特性,如城市道路应急、抢险救灾、机场的快速修复,研发新型快速固化剂。因此,需深入研究土壤固化剂对土壤快速固化效应的工程特性及其对周围环境和生态的影响。

### 参考文献:

- [1] Behnood A. Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques[J]. *Transportation Geotechnics*, 2018, 17: 14-32.
- [2] 俞家人,陈永辉,陈庚,等.地聚物固化软黏土的力学特征及机理分析[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(2): 364-371.
- [3] 刘宏伟. SH 及石灰固化土吸水性和失水性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [4] 郭霄汉. 路液改良土力学性质及微观特性试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [5] 周海龙, 申向东. 土壤固化剂的应用研究现状与展望[J]. *材料导报*, 2014, 28(9): 134-138.
- [6] 刘建成. 高性能聚氨酯砂土固结材料研究与应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [7] 吕文斌. 派酶土壤固化剂在道路工程中的应用研究[J]. *上海公路*, 2010(1): 49-52.
- [8] 张冠华, 牛骏, 孙金伟, 等. 土壤固化剂及其水土保持应用研究进展[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 28-34.
- [9] 力乙鹏, 李婷. 土壤固化剂的固化机理与研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34: 1273-1298.
- [10] Latifi N, Marto A, Eisazadeh A. Physicochemical behavior of tropical laterite soil stabilization with non-traditional additive [J]. *Acta Geotechnica*, 2016, 11(2): 433-443.
- [11] Khadka S D, Jayawickrama P W, Senadheera S, et al. Stabilization of highly expansive soils containing sulfate using metakaolin T and fly ash based geopolymer modified with lime and gypsum[J]. *Transportation Geotechnics*, 2020, 23: 100327.
- [12] Yu J, Chen Y, Chen G, et al. Experimental study of the feasibility of using anhydrous sodium metasilicate as a geopolymer activator for soil stabilization[J]. *Engineering Geology*, 2020, 264: 105316.
- [13] Abdel-Gawwad H A, Heikal M, Mohammed M S, et al. Sustainable disposal of cement kiln dust in the production of cementitious materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232: 1218-

- 1229.
- [14] Rimal S, Poudel R, Gautam D. Experimental study on properties of natural soils treated with cement kiln dust [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2019, 10: e00223.
- [15] Ghavami S, Naseri H, Jahanbakhsh H, et al. The impacts of nano-SiO<sub>2</sub> and silica fume on cement kiln dust treated soil as a sustainable cement-free stabilizer[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 285: 122918.
- [16] Mukiza E, Zhang L, Liu X, et al. Utilization of red mud in road base and subgrade materials: A review [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2019, 141: 187-199.
- [17] 陈立东,宋志. CaO 改性赤泥固化剂固化黄土的力学性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(1): 213-218.
- [18] Xu G, Ding X, Kuruppu M, et al. Research and application of non-traditional chemical stabilizers on bauxite residue (red sand) dust control, a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 616-617: 1552-1565.
- [19] Pu S Y, Zhu Z D, Wang H R, et al. Mechanical characteristics and water stability of silt solidified by incorporating lime, lime and cement mixture, and SEU-2 binder [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 214: 111-120.
- [20] Saleh S, Yunus N, Ahmad K, et al. Improving the strength of weak soil using polyurethane grouts: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 202: 738-752.
- [21] Al-Atroush M E, Sebaey TA. Stabilization of expansive soil using hydrophobic polyurethane foam: A review [J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 27: 100494.
- [22] Liu J, Chen Z, Kanungo D, et al. Topsoil reinforcement of sandy slope for preventing erosion using water-based polyurethane soil stabilizer[J]. *Engineering Geology*, 2019, 252: 125-135.
- [23] Tao G, Yuan J, Chen Q, et al. Chemical stabilization of calcareous sand by polyurethane foam Adhesive [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 295: 123609.
- [24] 陈志昊,刘瑾,钱卫,等. 高分子固化剂 / 纤维改良砂土的抗拉强度试验研究[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(2): 350-359.
- [25] Mirzababaei M, Arulrajah A, Ouston M. Polymers for stabilization of soft clay soils[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 189: 25-32.
- [26] Ghazemzadeh H, Modiri F. Application of novel Persian gum hydrocolloid in soil stabilization [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 246: 116639.
- [27] Almajed A, Abbas H, Almusallam T, et al. Stabilization of sand using energy efficient materials under normal and extreme hot weathers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 285: 124914.
- [28] 吴雪婷,程明峰,唐杉,等. ISS- 水泥联合固化淤泥的微观机理研究[J]. *工程勘察*, 2020, 48(1): 14-19.
- [29] 吴雪婷,项伟,王臻华,等. 离子土固化剂固化淤泥的微观机理研究[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(5): 1285-1291.
- [30] 李建东,王旭,张延杰,等. F1 离子固化剂加固黄土强度及微观结构试验研究[J]. *东南大学学报*, 2021, 51(4): 618-624.
- [31] 游庆龙,邱欣,杨青,等. 离子土壤固化剂固化红黏土强度特性[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(5): 64-71.
- [32] Yang L, Jiang G, Shi Y, et al. Application of ionic liquid and polymeric ionic liquid as shale hydration inhibitors[J]. *Energy Fuels* 2017, 31: 4308-4317.
- [33] Kushwaha S S, Kishan D, Chauhan M S, et al. Stabilization of Red mud using eko soil enzyme for highway embankment [J]. *Materials Today: Proceedings*. 2018, 5: 20500-20512.
- [34] Rajoria I V, Kaur S. A review on stabilization of soil using bio-enzyme [J]. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2014, 3(1): 75-78.
- [35] 周海龙,申向东,薛慧君. 派酶土壤固化剂在我国的应用与研究现状[J]. *硅酸盐通报*, 2013, 32(9): 1780-1784.
- [36] Saini V, Vaishnav P. Soil stabilization by using terrazyme [J]. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 2015, 8(4): 566-573.
- [37] 吴冠雄. 生物酶土壤固化剂加固土现场试验研究[J]. *公路工程*, 2013, 38(1): 70-74, 81.
- [38] Kushwaha S S, Kishan D, Dindorkar N. Stabilization of expansive soil using eko soil enzyme for highway embankment [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5: 19667-19679.
- [39] 李昊,程冬兵,孙宝洋,等. 海藻多糖抗蚀剂对土壤抗剪与入渗特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(22): 144-150.

\*\*\*\*\*

(上接第 214 页)

- [14] 周启伟,凌天清,郝增恒,等. 水性环氧树脂-乳化沥青共混物特性分析[J]. *建筑材料学报*, 2018(3): 414-419.
- [15] 万晓敏. 环氧树脂乳化沥青粘层油性室内试验研究[J]. *公路交通技术*, 2022(1): 50-53.
- [16] 刘亚洲,王银燕. 制备方法与水性环氧树脂掺量对乳化沥青性能影响研究[J]. *公路交通技术*, 2021(6): 54-59.
- [17] 崔通,任海生,黄维蓉,等. 高性能水性环氧乳化沥青的制备及性能研究[J]. *公路交通技术*, 2020(3): 20-25.
- [18] 陈森荣. 水性环氧树脂改性乳化沥青胶结料界面粘结性能研究[J]. *公路交通技术*, 2019(5): 36-41.
- [19] 拓守俊,尚飞,吴文军. 高性能封层预防性养护技术研究[J]. *公路交通技术*, 2021(2): 34-39.
- [20] 王佳炜,李力,赵可,等. 稀浆封层用水性环氧-乳化沥青的制备及配合比设计[J]. *公路工程*, 2014(6): 66-68.
- [21] 陈谦,王朝辉,傅豪,等. 基于性能演变的水性环氧沥青开普封层施工方法优化[J]. *中国公路学报*, 2021(7): 237-245.