

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2025.01.009

引用格式: 陈国贤, 刘龙武, 周泽敏, 等. 高黏土含量化学发泡泡沫轻质土制备方法和工艺研究[J]. 公路与汽运, 2025, 41(1): 40-45.

Citation: CHEN Guoxian, LIU Longwu, ZHOU Zemin, et al. Research on preparation method and process of foamed light soil with high clay content by chemical foaming[J]. Highways & Automotive Applications, 2025, 41(1): 40-45.

高黏土含量化学发泡泡沫轻质土制备方法和工艺研究*

陈国贤, 刘龙武, 周泽敏, 邹晨, 黄振兴

(长沙理工大学土木工程学院, 湖南长沙 410114)

摘要: 为提高废弃土料利用率, 降低轻质土的成本, 文中采用红黏土取代部分水泥, 开展泡沫轻质土配合比及制备工艺室内试验研究。通过正交试验分析黏土掺量、双氧水掺量、水料比、稳泡剂掺量对泡沫轻质土抗压强度和密度的影响, 利用极差分析与加权系数法, 得到其影响大小为双氧水掺量 > 水料比 > 黏土掺量 > 稳泡剂掺量; 通过单因素试验分析, 得到孔结构是影响泡沫轻质土密度和抗压强度的主要原因, 泡沫轻质土内部孔结构分层、串孔会导致泡沫轻质土抗压强度降低; 利用功效系数法计算得到泡沫轻质土的适宜配合比为黏土掺量 75.0%、双氧水掺量 0.1%、水料比 0.50、稳泡剂掺量 1.0%; 对泡沫轻质土的制作搅拌时间与经济性进行评价, 得到适宜搅拌时间为 120 s, 泡沫轻质土的成本为 205 元/m³, 比泡沫混凝土降低 41.43%~54.44%。

关键词: 公路; 泡沫轻质土; 黏土; 化学发泡剂; 配合比; 经济指标; 制作工艺

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2025)01-0040-06

随着经济的快速发展, 部分早期建设的高速公路已无法满足日益增长的交通量需求, 催生了大量道路扩建工程。由于旧路已使用多年, 路基沉降已基本完成, 考虑到新建路基沉降及滑移破坏问题, 修筑时须使用密度较低且具有一定强度的路基材料^[1]。泡沫混凝土是将泡沫加入由水泥、骨料、掺合料、外加剂和水制成的浆料中, 经混合搅拌、浇筑成型、养护而成的轻质微孔混凝土。由于混凝土内部含有大量封闭的泡沫气孔, 泡沫混凝土不仅质量轻, 且具有较高的强度^[2-5]。泡沫混凝土在路堤填筑方面最突出的优点是可以直立填筑, 强度可调控, 可减少土地的占用和工期。近年来, 泡沫混凝土被越来越多地应用于桥头台背路基换填、道路加宽和桥梁减跨等建设工程^[6-7], 水泥消耗量增大。为减少水泥用量, 孙赛炜等采用偏高岭土等量取代水泥制备泡沫轻质土, 通过正交试验研究偏高岭土泡沫轻质土的最优配合比, 分析胶凝材料用量、偏高岭土掺量及水胶比对轻质土抗压强度的影响, 并对其干缩、干湿

循环、抗冻性能及微观形貌进行试验研究, 确定其最佳配合比, 结果表明, 对泡沫轻质土抗压强度影响大小为偏高岭土掺量 > 胶凝材料用量 > 水胶比, 偏高岭土泡沫轻质土的最佳配合比为水泥: 偏高岭土: 发泡剂: 水 = 1: 0.25: 0.025: 0.69^[8]; 赵正峰等采用黏土、电石渣、石膏和矿渣固废替代全部水泥制备泡沫轻质土, 研究黏土掺量对固废泡沫轻质土耐久性的影响, 建议采用泡沫轻质土作为路床填料时黏土掺量小于 25%, 作为路堤填料时黏土掺量小于 35%^[9]。实际工程中使用的轻质材料为聚苯乙烯(EPS)颗粒, EPS颗粒混合轻质土具有密度小、强度高、强度可调节、经济性好等优点^[10-13]。但用于公路建设, 对EPS颗粒的需求量巨大。为此, 采用化学发泡方式, 加入双氧水和稳泡剂代替EPS颗粒, 制备质量较轻、抗压强度良好的泡沫改良土。但现有研究制备的泡沫轻质土中水泥占比仍在50%以上, 在经济落后的乡镇道路工程中使用泡沫轻质土难以满足经济性的要求。本文拟将水泥占比降至

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278439)

30%,通过正交试验分析黏土掺量、双氧水掺量、稳泡剂掺量、水料比对泡沫轻质土性能的影响,结合单因素试验结果,在考虑多个指标的情况下,使用功效系数法确定适宜的配合比并进行经济性评价,为高黏土泡沫轻质土的开发应用提供基础数据。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验用土为长沙市天心区某边坡普通红黏土,烘干碾碎后过筛(筛孔直径为 0.5 mm),液限为 49.3%,塑限为 23.9%。水泥为普通硅酸盐水泥 P·O42.5 级,其基本化学指标见表 1。发泡剂采用质量分数为 30%的过氧化氢溶液,稳泡剂为工业硬脂酸钙粉末。

表 1 水泥的基本化学指标

化学式	质量分数/%	化学式	质量分数/%
SiO ₂	21.43~22.17	CaO	64.39~66.23
Al ₂ O ₃	4.75~5.83	MgO	1.12~2.08
Fe ₂ O ₃	3.31~3.91		

1.2 正交试验设计

根据相关文献研究结果及预试验得到的初步试验结果,设计黏土掺量为 60%~80%、双氧水掺量为 0.1%~0.3%、水料比为 0.5%~0.6%、稳泡剂掺量为 0.67%~1.33%。选取无侧限抗压强度和密度作为试验考核指标,黏土掺量、双氧水掺量、水料比、稳泡剂掺量为影响因素,进行四因素、三水平正交试验,因素水平设计见表 2。

1.3 试验方法

由软土路段岩土工程勘察和设计资料得到软土地基承载力参数,通过初步计算得到路堤填筑高度

表 2 正交试验因素水平设计

水平	各因素的值			
	黏土掺量/%	双氧水掺量/%	水料比/%	稳泡剂掺量/%
1	80	0.1	0.50	0.67
2	70	0.2	0.55	1.00
3	60	0.3	0.60	1.33

为 3.2 m 时泡沫轻质土的设计密度为 1.1 g/cm³,抗压强度满足 JTG/T D31-02—2013《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》的要求^[14],泡沫轻质土 7 d 抗压强度不低于 300 kPa。

采用搅拌法制作泡沫轻质土试块,将新取的红黏土烘干后碾碎,过 2 mm 筛备用。按表 2 所示各因素水平称取所需水泥、干黏土、双氧水、水、稳泡剂,黏土占比=干黏土质量/(干黏土+水泥的总质量)×100。试块制作前先将水泥和土干粉混合,预混合干粉并进行第一次加水,再预混合双氧水并进行第二次加水,所有材料全部混合后搅拌 120 s,之后快速倒模(100 mm×100 mm×100 mm),自然养护 24 h 后刮平、脱模,在 26 ℃环境下自然养护 7 d。采用由 TSZ30-2.0 型台式三轴仪改装的应变控制式无侧限抗压强度仪测试试块的无侧限抗压强度和密度,利用控制变量法分别对黏土掺量、双氧水掺量、稳泡剂掺量、水料比进行单因素试验。

2 试验结果分析

2.1 正交试验结果的极差分析

对设计的 9 组配合比(见表 3)进行 7 d 抗压强度和密度测试,并对试验结果(见表 3)进行极差分析^[15],结果见表 4。

表 3 试验配合比设计及试验结果

配合比编号	黏土掺量/%	双氧水掺量/%	水料比	稳泡剂掺量/%	密度/(g·cm ⁻³)	抗压强度/kPa
1	80	0.1	0.50	0.67	1.415	805.150
2	80	0.2	0.55	1.00	1.051	327.254
3	80	0.3	0.60	1.33	0.767	114.148
4	70	0.1	0.55	1.33	1.122	689.148
5	70	0.2	0.60	0.67	1.053	517.248
6	70	0.3	0.50	1.00	0.912	713.415
7	60	0.1	0.60	1.00	1.031	803.024
8	60	0.2	0.50	1.33	0.986	805.248
9	60	0.3	0.55	0.67	0.884	500.157

表 4 试验结果的极差分析

项目		黏土掺量	双氧水掺量	水料比	稳泡剂掺量	密度	抗压强度
密度极差分析	K_1	3.233	3.568	3.313	3.352	9.221	—
	K_2	3.087	3.09	3.057	2.994		
	K_3	2.901	2.563	2.851	2.875		
	R	0.062	0.335	0.154	0.159		
抗压强度极差分析	K_1	1 246.552	2 297.322	2 323.813	1 822.555	—	5 274.792
	K_2	1 919.811	1 649.750	1 516.559	1 843.693		
	K_3	2 108.429	1 327.720	1 434.420	1 608.544		
	R	287.292	323.200	296.464	78.383		

极差值 R 能反映单指标情况下因素的影响大小,但不能综合比较因素的影响大小顺序。因此,利用加权系数法计算掺合料对泡沫轻质土的综合影响大小。按式(1)计算各因素的权系数,计算结果见表 5。

$$\omega_j = \frac{R_j}{R_A + R_B + R_C + R_D} \quad (1)$$

式中: ω_j 为因素 j 的权系数, $j = A, B, C, D$, 分别代表黏土掺量、双氧水掺量、水料比、稳泡剂掺量; R_j 为因素 j 的密度极差值。

表 5 各因素的权系数

因素	权系数	
	抗压强度	密度
黏土掺量	0.302	0.087
双氧水掺量	0.328	0.472
水料比	0.291	0.217
稳泡剂掺量	0.079	0.224

考虑到抗压强度和密度对泡沫轻质土的评价同样重要,分别取抗压强度、密度权系数的 1/2,然后加和得到各因素的综合影响系数:黏土掺量的综合影响系数为 0.195,双氧水掺量的综合影响系数为 0.400,水料比的综合影响系数为 0.254,稳泡剂掺量的综合影响系数为 0.151。比较各因素的综合影响系数,各因素对泡沫改良土的综合影响大小为双氧水掺量 > 水料比 > 黏土掺量 > 稳泡剂掺量。

2.2 各因素对泡沫轻质土性能的影响

利用控制变量法分别对双氧水掺量、水料比、黏土掺量、稳泡剂掺量进行单因素试验,分析各因素对泡沫轻质土性能的影响,确定泡沫轻质土配合比。

2.2.1 黏土掺量对泡沫轻质土性能的影响

对黏土掺量进行单因素试验,试验结果见图 1。由图 1 可知:随着黏土掺量的减少,泡沫轻质土的抗压强度增大,密度先快速下降后趋于一个稳定值。水泥与土之间发生一系列化学反应,土颗粒之间生成水泥凝胶体,并形成大量纤维状结晶,泡沫轻质土强度提高^[16];密度的主要影响因素是试块内部孔结构,黏土掺量过大时,浆料在搅拌初期非常黏稠,会抑制双氧水的发泡,极大降低发泡效率,导致密度增大。

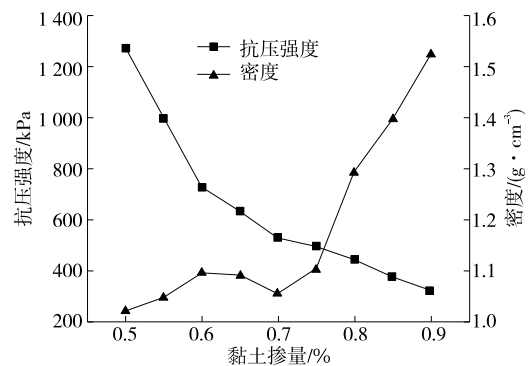


图 1 黏土掺量与泡沫轻质土抗压强度、密度的关系

2.2.2 双氧水掺量对泡沫轻质土性能的影响

双氧水掺量单因素试验结果见图 2~3。由图 2~3 可知:随着双氧水掺量的增加,泡沫轻质土的密度和抗压强度下降,其中抗压强度的下降先快后慢,密度则均匀下降。双氧水是泡沫轻质土的发泡剂,试件内部气孔的形成与双氧水掺量息息相关,双氧水掺量较少时,试块内部气孔的体积率不大,受力状态为孔结构与轻质土结构共同受力,抗压强度较大;双氧水掺量增大时,气孔的体积均匀增大,密度均匀下降,但随着孔体积的增大,试块内部孔结构体积率的占比增大,孔结构逐渐成为主要的受力对

象,抗压强度大幅度降低;孔结构增大到一定体积时,抗压完全依靠孔结构,即使孔体积继续增大,抗压强度也仅缓慢下降。

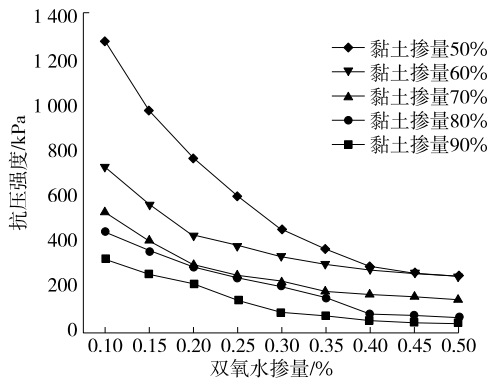


图 2 双氧水掺量与泡沫轻质土抗压强度的关系

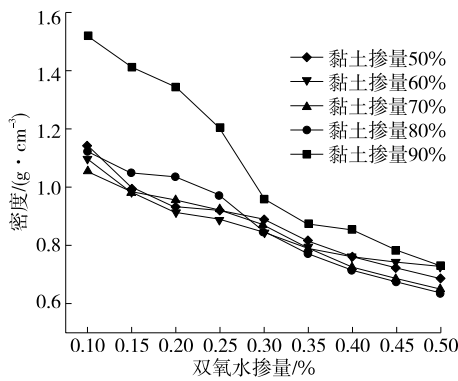


图 3 双氧水掺量与泡沫轻质土密度的关系

2.2.3 水料比对泡沫轻质土性能的影响

水料比单因素试验结果见图 4。由图 4 可知:随着水料比的增加,泡沫轻质土的密度和抗压强度下降,且下降速度先快后慢。水料比是影响水泥浆料稠度的主要因素,由于化学发泡剂的发泡在搅拌停止后还会持续进行,水料比增加会使泡沫轻质土浆料变稀,双氧水的发泡逐渐剧烈,气孔体积过大,导致密度快速下降,且气孔在浆料初凝前容易受到浮力的影响,试块上层气泡大量集中,导致气孔之间相互贯穿^[17],出现孔结构分层,进而造成试块上部首先出现裂缝(见图 5),泡沫轻质土强度降低。因此,水料比的取值不仅要满足双氧水的化学反应要求,还要保证水泥浆料的稠度不能过低。

2.2.4 稳泡剂掺量对泡沫轻质土性能的影响

稳泡剂掺量单因素试验结果见图 6。由图 6 可知:随着稳泡剂掺量的增加,泡沫轻质土的密度和抗压强度下降,稳泡剂掺量大于 0.8% 时,密度和抗压

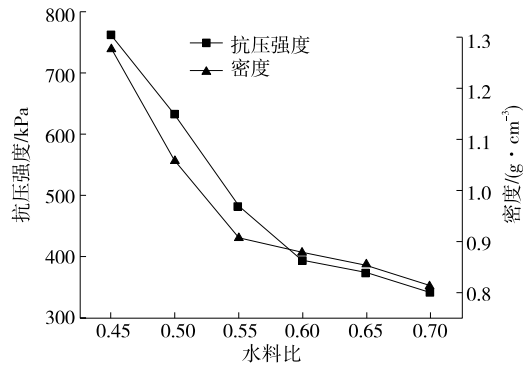


图 4 水料比与泡沫轻质土抗压强度、密度的关系



图 5 水料比过大发生串孔时孔分布与单轴受压开裂形态

强度下降速率较大。随着稳泡剂掺量的增加,泡沫轻质土内部气孔的体积和数量成倍增加,稳泡剂掺量增大到一定时,试块内部孔结构发生变化,出现气孔坍塌、孔结构分层、串孔现象(见图 7),导致应力集中破坏,表现为抗压强度快速下降。

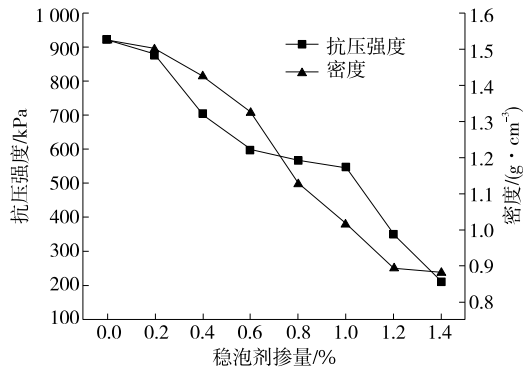


图 6 稳泡剂掺量与泡沫轻质土抗压强度、密度的关系

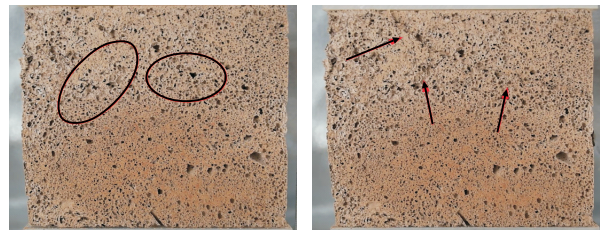


图 7 稳泡剂掺量过大发生串孔时孔分布和单轴受压开裂形态

2.3 配合比确定

功效系数法是一种针对多个目标进行综合评价的方法^[18],能满足复杂体系下多指标评价要求^[19]。

采用功效系数法,根据上述单因素试验结果计算泡沫轻质土密度和抗压强度的功效系数、总功效系数,结果见表 6。

表 6 泡沫轻质土密度和抗压强度的功效系数

试验编号	密度的功效系数	抗压强度的功效系数	总功效系数	试验编号	密度的功效系数	抗压强度的功效系数	总功效系数
A1	27.60	74.83	45.45	B8	111.50	41.45	67.98
A2	40.20	85.24	58.54	B9	115.30	38.54	66.66
A3	50.60	98.87	70.73	C1	52.20	162.50	92.10
A4	69.60	125.15	93.33	C2	74.20	136.43	100.61
A5	74.40	115.89	92.85	C3	89.30	106.47	97.51
A6	70.80	114.22	89.93	C4	92.20	89.04	90.61
A7	70.30	111.35	88.48	C5	94.60	85.05	89.70
A8	67.50	115.25	88.20	C6	98.70	78.47	88.00
A9	65.80	117.22	87.82	D1	27.60	194.75	73.31
B1	74.40	115.89	92.85	D2	29.90	185.71	74.52
B2	81.80	90.45	86.02	D3	37.50	150.45	75.11
B3	84.30	69.69	76.65	D4	47.60	130.03	78.67
B4	87.60	60.69	72.91	D5	67.20	123.64	91.15
B5	92.80	54.85	71.35	D6	78.40	119.65	96.86
B6	101.20	46.45	68.56	D7	90.60	80.03	85.15
B7	107.60	43.65	68.53	D8	91.80	52.45	69.39

注:A1~A9、B1~B9、C1~C6、D1~D8 分别为黏土掺量、双氧水掺量、水料比、稳泡剂掺量试验编号,A1~A9 分别对应黏土掺量 90%、85%、...、50%,B1~B9 分别对应双氧水掺量 0.10%、0.15%、...、0.50%;C1~C6 分别对应水料比 0.45、0.50、...、0.70;D1~D8 分别对应稳泡剂掺量 0.0、0.2%、...、1.4%。

由表 6 可知:黏土掺量(A 组试验)中,A4 组对应的总功效系数最大,黏土掺量宜取 75.0%。同理,双氧水掺量宜取 0.1%,水料比宜取 0.50,稳泡剂掺量宜取 1%。

3 适宜搅拌时间与经济性分析

3.1 搅拌时间试验分析

泡沫轻质土由轻质土与气孔体系构成,其水胶比通常很大,按设计配合比制作泡沫轻质土的过程中,气孔大小和均匀性都容易受到搅拌时间的影响,需进行搅拌时间试验确定泡沫轻质土制作中适宜的搅拌时间。

根据前述配合比,设计搅拌时间(双氧水加入后的搅拌时间)为 30~240 s,进行搅拌时间对泡沫轻质土密度和抗压强度影响的试验研究,试验结果见图 8。

由图 8 可知:随着搅拌时间的增大,泡沫轻质土的密度和抗压强度上升,表明搅拌时间会直接影响

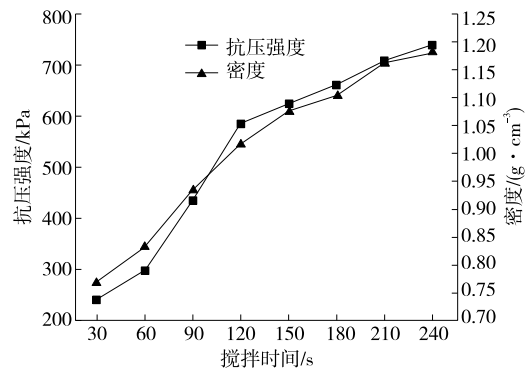


图 8 搅拌时间与泡沫轻质土密度、抗压强度的关系

泡沫轻质土内部孔结构。其中密度呈均匀上升趋势;抗压强度在 60 s、120 s 处出现拐点,搅拌时间过短时容易导致串孔现象,强度明显降低,搅拌时间为

120 s 时气孔形态和分布趋于均匀,抗压强度增加速率减缓。考虑到搅拌过程中过氧化氢产生的气体会随着搅拌过程不断溢出,双氧水的发泡利用率不断降低,搅拌时间不宜过长,宜取 120 s,此时既能使气孔分布均匀,也能使发泡利用率达到最大。

3.2 经济性分析

利用黏性土等量代替水泥,并使用双氧水作为发泡剂制作泡沫轻质土,其性能能满足路堤填筑要求。

制备泡沫轻质土的主要材料包括水泥、黏性土、双氧水(质量分数为 30%)、硬脂酸钙粉末,其中水泥、双氧水、硬脂酸钙的价格按市场价格计算,分别为 490 元/t、16 元/t、80 元/t。土利用当地路基开挖工程废土,在综合考虑回收利用及加工费用的基础上,得到土掺量为 75% 时泡沫轻质土的制作成本为 205 元/m³。利用双氧水作为发泡剂的泡沫混凝土的价格为 350~450 元/m³,与泡沫混凝土相比,泡沫轻质土的成本降低 41.43%~54.44%。利用高掺量的黏土代替水泥制作泡沫轻质土更经济。

4 结论

(1) 黏土掺量、双氧水掺量、水料比、稳泡剂掺量对泡沫轻质土抗压强度和密度的影响大小为双氧水掺量>水料比>黏土掺量>稳泡剂掺量。

(2) 泡沫轻质土内部孔结构分布对其抗压强度影响较大,孔结构的分层、串孔会导致泡沫轻质土抗压强度急剧降低。

(3) 泡沫轻质土的适宜配合比组合为黏土掺量 75.0%、双氧水掺量 0.1%、水料比 0.50、稳泡剂掺量 1%。

(4) 若泡沫轻质土的搅拌时间太短,则孔结构分布不均匀;时间太长,则气体溢出严重,发泡效果差。适宜搅拌时间为 120 s。

(5) 按市场价格计算,泡沫轻质土的成本为 205 元/m³,相较于泡沫混凝土(350~450 元/m³),其成本降低 41.43%~54.44%,采用高掺量的黏土代替水泥制作泡沫轻质土的经济效益显著。

参考文献:

[1] 贺仲仕.气泡砗在软土地区路基拓宽工程中的应用[J].公路与汽运,2012(4):155-157+244.
[2] 宋强,张鹏,鲍玖文,等.泡沫混凝土的研究进展与应用[J].硅酸盐学报,2021,49(2):398-410.

[3] RAJ A,SATHYAN D,MINI K M.Physical and functional characteristics of foam concrete;a review[J].Construction and Building Materials,2019,221:787-799.
[4] FALLIANO D,DE DOMENICO D,RICCIARDI G,et al.Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete;effect of curing conditions,cement type,foaming agent and dry density[J].Construction and Building Materials,2018,165:735-749.
[5] 李国华.泡沫轻质土在桥头路基治理中应用研究[J].公路与汽运,2021(2):56-57+60.
[6] 曾嵘,王继敏.泡沫混凝土在公路工程中的应用[J].黑龙江交通科技,2018,41(9):8-9.
[7] 侯明显,朱先昌,李国青,等.泡沫混凝土的研究与应用概述[J].硅酸盐通报,2019,38(2):410-416.
[8] 孙赛炜,刘勇,陈伟,等.偏高岭土对路基填料泡沫轻质土性能的影响研究[J].混凝土,2020(1):95-99.
[9] 赵正峰,王国栋,王笑风,等.掺加黏土的固废基泡沫轻质土强度和耐久性研究[J].交通科学与工程,2024,40(1):45-51+59.
[10] 顾建武.EPS 颗粒混合轻质土在高速公路的应用[J].公路,2013,58(10):9-12.
[11] ZHANG F,YANG D,ZHANG L.Research on filling scheme and deformation properties of wide subgrade of foamed lightweight soil on soft ground[J].IOP Conference Series.Earth and Environmental Science,2018,108(2):22051.
[12] LUO R D,LIANG L,LIU G B,et al.Experimental study on thermodynamic characteristics of EPS lightweight soil[J].E3S Web of Conferences,2020,198:1043.
[13] 李明东,朱伟,马殿光,等.EPS 颗粒混合轻质土的施工技术及其应用实例[J].岩土工程学报,2006,28(4):533-536.
[14] 交通部第一公路勘察设计院.公路软土地基路堤设计与施工技术规范:JTJ 017—96[S].北京:人民交通出版社,1997.
[15] 马永炯,杨安,洪芬,等.基于正交试验的泡沫混凝土配合比设计[J].混凝土,2021(7):147-150.
[16] 王淑波.水泥土添加剂的室内试验研究[D].天津:天津大学,2007.
[17] HOU L,LI J,LU Z Y,et al.Influence of foaming agent on cement and foam concrete[J].Construction and Building Materials,2021,280:122399.
[18] 张萌,骆文进.混杂纤维轻骨料混凝土力学性能试验研究[J].混凝土与水泥制品,2021(5):48-52.
[19] 谢洪阳,董建军,戴宜文,等.再生微粉泡沫混凝土的配合比设计[J].混凝土与水泥制品,2022(7):87-91.