

分类号：
学号：20222110048

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



风积沙油污泥热解残渣泡沫轻质土 力学性能与耐久性研究

学位申请人	任克旗
指导教师	王勇 副教授 刘杰 正高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	土木工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2025年05月

分类号：
学号：20212110030

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



风积沙油污泥热解残渣泡沫轻质土 力学性能与耐久性研究

学位申请人	任克旗
指导教师	王勇 副教授 刘杰 正高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	土木工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2025年05月

**Study on the Mechanical Properties and Durability of Aeolian
Sand-Oil Sludge Pyrolysis Residue Foam Lightweight Soil**

A Dissertation Submitted to
Shihezi University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Civil and Hydraulic Engineering

By

Ren Ke-qi
(Hydraulic Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Wang Yong
Senior Engineer. Liu Jie

May, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：

任克旗

时间： 2025年5月2日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：

任克旗

时间： 2025年5月2日

导师签名：

子勇

时间： 2025年5月2日

摘要

泡沫轻质土具有质量轻、强度高、流动性、自立性和密度可调等优点。结合新疆地区地处偏远，大批量运输路基建筑材料成本较高的背景条件，考虑提升闲置资源和固废资源利用率，因此尝试将风积沙与油污泥热解残渣作为外掺料，制备风积沙油污泥热解残渣泡沫轻质土（Aeolian sand oil sludge pyrolysis residue foam light soil, SOFS）新材料。将 SOFS 应用于路基修建中，既可以有效利用固废与闲置材料实现绿色发展，又能够降低路基修建成本。

本研究中，首先通过预试验确定影响泡沫轻质土性能的不同因素水平，并进行正交试验设计。其次，开展流动度、湿密度、无侧限抗压、劈裂抗拉和抗折试验，研究了 SOFS 的物理力学性能以及不同因素水平对物理力学性能的影响，通过方差分析、极差分析和综合平衡法从 25 组配合比中筛选出 5 组物理力学性能较好的配合比，并验证该材料应用于路基建设的可行性。然后，基于物理力学试验筛选出的 5 组配合比，进行干燥收缩、冻融循环和干湿循环试验。研究不同影响因素对 SOFS 耐久性能的影响，并筛选出最佳配合比。最后，以筛选出的最佳配合比为定量，选取四种不同发泡剂进行力学试验和耐久性试验，以从发泡剂角度研究影响 SOFS 性能的主要因素。主要研究成果如下：

(1)通过预试验确定了每立方米样品中风积沙掺量范围为 0~150 g、油污泥热解残渣掺量范围为 0~150 g、水固比选取区间为 0.29:1~0.33:1。根据泌水率、发泡倍数和密度筛选出的最佳发泡剂类型为 HT 复合发泡剂。通过物理力学试验方差分析发现，对流动度影响程度最大的因素为风积沙掺量，且风积沙掺量与流动度的关系呈正相关。对湿密度、无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度影响程度最大的因素均为泡沫与浆液体积比，且均与泡沫与浆液体积比呈负相关。

(2)根据微观分析可知，水化生成的 C-S-H 絮状物有利于 SOFS 试件结构稳定。若试件结构内部没有裂缝和贯通孔、孔壳直径小且均匀、孔壳在试件内部结构整体分布均匀，则试件的抗压强度较高。物理试验与抗压强度试验结果显示，SOFS 材料可用于高速公路中路面底面深度为 0~0.8 m 的路基填筑。通过物理力学试验极差分析，明确了性能较佳的 5 组组合和对应的配合比。

(3)水固比、油污泥热解残渣掺量和风积沙掺量对 SOFS 的干燥收缩性能影响较大。水固比、泡沫直径、泡沫群体积对 SOFS 的干湿循环和冻融循环起主要影响作用。通过物理力学与耐久性试验，筛选出的最佳配合比为 H14。从发泡剂角度分析，不同发泡剂制备的 SOFS 的力学性能与耐久性的影响因素为发泡剂的发泡倍数、泡沫稳定性、泡沫直径大小、泡沫在浆液结构中的分布状态和泡沫间的壁厚。

关键词：风积沙；油污泥热解残渣；泡沫轻质土；物理力学性能；耐久性

Abstract

Foam lightweight soil has the advantages of low mass, high strength, fluidity, self-standing ability, and adjustable density. Considering the background that Xinjiang region is located in a remote area and the cost of transporting a large quantity of subgrade construction materials is relatively high, and taking into account the improvement of the utilization rate of idle resources and solid waste resources, an attempt is made to use aeolian sand and oil sludge pyrolysis residue as admixtures to prepare a new material, namely Aeolian sand oil sludge pyrolysis residue foam light soil (SOFS). Applying SOFS to subgrade construction can not only effectively utilize solid waste and idle materials to achieve green development, but also reduce the cost of subgrade construction.

In this study, first of all, different factor levels affecting the performance of foam lightweight soil are determined through preliminary tests, and an orthogonal test design is carried out. Secondly, fluidity, wet density, unconfined compression, splitting tensile, and flexural tests are carried out to study the physical and mechanical properties of SOFS and the influence of different factor levels on the physical and mechanical properties. Through variance analysis, range analysis, and comprehensive balance method, 5 groups of mix ratios with better physical and mechanical properties are screened out from 25 groups of mix ratios, and the feasibility of applying this material to subgrade construction is verified. Then, based on the 5 groups of mix ratios screened out from the physical and mechanical tests, drying shrinkage, freeze-thaw cycle, and dry-wet cycle tests are carried out. The influence of different influencing factors on the durability performance of SOFS is studied, and the optimal mix ratio is screened out. Finally, taking the screened optimal mix ratio as a fixed quantity, four different foaming agents are selected for mechanical tests and durability tests to study the main factors affecting the performance of SOFS from the perspective of foaming agents. The main research achievements are as follows:

(1) Through preliminary tests, the dosage range of aeolian sand in each cubic decimeter of sample is determined to be 0-150 g, the dosage range of oil sludge pyrolysis residue is 0-150 g, and the selection range of the water-solid ratio is 0.29:1-0.33:1. The best type of foaming agent screened according to the bleeding rate, foaming multiple, and density is the HT composite foaming agent. Through the variance analysis of physical and mechanical tests, it is found that the factor with the greatest influence on fluidity is the dosage of aeolian sand, and the relationship between the dosage of aeolian sand and fluidity is positively correlated. The factor with the greatest influence on wet density, unconfined compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength is the volume ratio of foam to slurry, and all of them are negatively correlated with the volume ratio of foam to slurry.

(2) According to the microscopic analysis, the C-S-H flocs generated by hydration are conducive to

the structural stability of SOFS specimens. If there are no cracks and through holes in the internal structure of the specimen, the diameter of the hole shell is small and uniform, and the hole shell is evenly distributed in the overall internal structure of the specimen, then the specimen has a relatively high compressive strength. The results of physical tests and compressive strength tests show that the SOFS material can be used for subgrade filling at a depth of 0-0.8 m from the bottom surface of the pavement in expressways. Through the range analysis of physical and mechanical tests, 5 groups of combinations with better performance and the corresponding mix ratios are determined.

(3) The water-solid ratio, the dosage of oil sludge pyrolysis residue, and the dosage of aeolian sand have a great influence on the drying shrinkage performance of SOFS. The water-solid ratio, the diameter of foam, and the total volume of foam play a major role in the dry-wet cycle and freeze-thaw cycle of SOFS. Through physical and mechanical and durability tests, the optimal mix ratio screened out is H14. From the perspective of foaming agents, the influencing factors of the mechanical properties and durability of SOFS prepared by different foaming agents are the foaming multiple of the foaming agent, the stability of the foam, the diameter of the foam, the distribution state of the foam in the slurry structure, and the wall thickness between foams.

Key words: Aeolian sand; Pyrolysis residue of oily sludge; Foamed lightweight soil; Physical and mechanical properties; Durability

目录

Abstract	II
第一章 绪论.....	1
1.1 背景及研究意义.....	1
1.2 外掺料泡沫轻质土国内外研究现状.....	3
1.2.1 外掺料泡沫轻质土物理力学性能研究.....	3
1.2.2 外掺料泡沫轻质土耐久性研究.....	6
1.2.3 外掺料泡沫轻质土性能改良研究.....	7
1.3 研究内容及技术路线.....	9
1.3.1 主要研究内容.....	9
1.3.2 研究技术路线.....	11
第二章 SOFS 试验方案设计.....	12
2.1 引言.....	12
2.2 试验原材料的选取.....	12
2.3 SOFS 配合比设计.....	14
2.3.1 配合比设计的基本原则.....	14
2.3.2 配合比设计的计算步骤.....	14
2.3.3 各影响因素水平的确定.....	15
2.3.4 正交试验设计.....	17
2.4 试验方案设计.....	18
2.4.1 SOFS 试件的制备与养护.....	18
2.4.2 SOFS 的物理力学试验方案设计.....	18
2.4.3 SOFS 耐久性试验方案设计.....	22
2.4.4 电子微观试验方案设计.....	26
2.4.5 发泡剂基本性能试验方案设计.....	27
2.4.6 试验设计关系图.....	28
2.5 本章小结.....	29
第三章 SOFS 的物理力学性能研究.....	30
3.1 引言.....	30
3.2 SOFS 流动度分析.....	30
3.3 SOFS 湿密度分析.....	31
3.4 SOFS 无侧限抗压强度分析.....	33

3.4.1 各因素对抗压强度的影响	33
3.4.2 微观电镜分析	36
3.4.3 XRD 分析	38
3.5 SOFS 劈裂抗拉强度分析	39
3.6 SOFS 抗折强度分析	42
3.7 物理力学试验极差分析	46
3.8 本章小结	50
第四章 SOFS 的耐久性研究	52
4.1 引言	52
4.2 SOFS 干燥收缩性能分析	52
4.2.1 干燥收缩试验收缩值分析	52
4.2.2 干燥收缩试验质量分析	55
4.3 SOFS 干湿循环试验分析	57
4.3.1 干湿循环试验循环组试件表观分析	57
4.3.2 干湿循环对试件质量变化分析	60
4.3.3 循环组试件劈裂抗拉强度分析	63
4.3.4 干湿强度系数分析	64
4.4 SOFS 冻融循环试验分析	66
4.4.1 冻融循环循环组试件表观分析	66
4.4.2 冻融循环试验试件质量变化分析	68
4.4.3 冻融循环试验试件强度损失分析	71
4.5 本章小结	74
第五章 不同发泡剂制备的 SOFS 性能研究	75
5.1 引言	75
5.2 不同发泡剂制备的泡沫群基本性能试验研究	75
5.3 不同发泡剂制备的 SOFS 力学性能研究	76
5.3.1 不同发泡剂制备的试件力学试验强度研究	77
5.3.2 不同发泡剂制备的试件力学试验质量研究	78
5.4 不同发泡剂制备的 SOFS 耐久性研究	79
5.4.1 不同发泡剂制备的 SOFS 干缩性能研究	79
5.4.2 不同发泡剂制备的 SOFS 干湿循环研究	82
5.4.3 不同发泡剂制备的 SOFS 冻融循环研究	86
5.5 本章小结	91
第六章 结论、创新点与展望	93

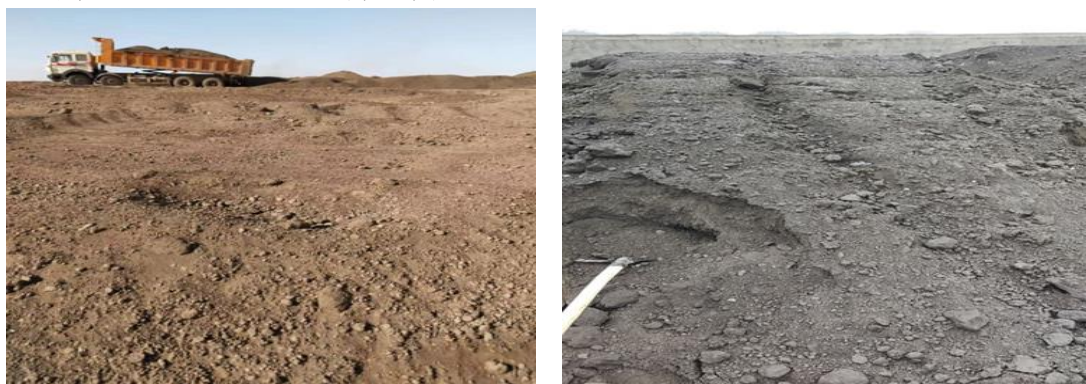
6.1 结论.....	93
6.2 创新点.....	94
6.3 展望.....	95
参考文献.....	96
致谢.....	102
作者简介.....	103

第一章 绪论

1.1 背景及研究意义

随着城市化进程的推进，我国基础设施的建设迎来了大规模发展。在基础建设过程中，出现了因自然资源过度使用、原料远距离运输而导致的资源短缺、环境恶化等问题。对此，国家提出了资源合理化利用及有效利用固体废弃物等绿色发展理念。因此，使用固废与闲置资源代替早期工程惯用的建筑材料成为重要的研究趋势^[1-4]。新疆沙漠石油开采地区存在着大量油污泥热解残渣固废和风积沙闲置资源。

含油污泥是清洗各种被油污染的运输储存容器而产生的清淤以及石油开采过程中污染的泥土^[5,6]。含油污泥主要由水、油、泥三种物质组成，含有原油、蜡质、沥青质、胶体和少量重金属等物质，其属于固废^[7]。含油污泥不可以直接用于生产或与土地混合用于耕种生产，如果长期堆积会进一步对环境产生影响，因此对于含油污泥应该有合理的处置方式^[8,9]。目前处置含油污泥的方式主要有预处理-调质-离心工艺、生物处理法、溶剂萃取法、固化处理和热解处理^[10]。其中预处理-调质-离心工艺工序复杂，生物处理法降解速度缓慢和多种有机物无法降解，溶剂萃取法成本高且漏苯后容易进一步污染环境，固化处理稳定性较差。而热解处理可将油、水和固体物质有效分离且操作简单、生产效率高、固相物质重金属含量较低，可用于再生产，其中固相物质即为油污泥热解残渣^[7]，如图 1-1 所示。对于含油污泥进行热解处理作为目前最有效的处置方式，其残渣在新疆地区多采用露天堆积或用作催化剂与吸附剂^[11]，因此如何实现油污泥热解残渣的大批量高效利用成为当前亟待解决的问题。



(a)油污泥热解残渣堆积图

(b)油污泥热解残渣取料图

图 1-1 油污泥热解残渣

Figure 1-1 Pyrolysis Residue of Oil Sludge

风积沙是在风力的长期作用下，将地表一定粒径的沙尘吹起，遇到一定阻碍或风力减小的情况下，堆积聚集起来沙物质，如图 1-2 所示，新疆有大量地区被风积沙覆盖。风积沙的级配不良、保水性差、易受外力作用松散变形且在风的作用下会对当地居民产生不良影响^[12]。在工程应用中会考虑使用河沙，但长期使用河沙会导致水质恶化、破坏生态系统、增加了发生洪水风险、加快了资源枯竭的进程^[13]。且在新疆地区使用河沙进行基础建设，运输成本较高。因此本研究中利用新疆就地取材的优势，探索使用风积沙代替河沙使用外掺料制备泡沫轻质土，应用于基础建设中。



图 1-2 风积沙取料图

Figure 1-2 Material Sampling Diagram of Aeolian Sand

泡沫轻质土具有轻质、高强、可塑性、自立性等特点，性能优异。因此泡沫轻质土经常被用于解决沙漠道路路基不均匀沉降这类工程领域，应用极为广泛^[14-16]。泡沫轻质土由水泥、水、发泡剂制备而成，造价较高，结构中存在内应力^[17]，为降低造价和减少内应力，常用的方法是在泡沫轻质土中添加外掺料。风积沙与油污泥热解残渣作为粒径较小的自然资源和固废，且粒径都小于 5 mm，符合泡沫轻质土中外掺料的基本要求^[18]。因此尝试添加风积沙与油污泥热解残渣作为外掺料来制备泡沫轻质土，如图 1-3 所示。这样既可以解决新疆沙漠地区油污泥热解残渣固废资源与风积沙闲置利用问题，还可以降低工程造价和减少环境污染。



(a)SOFS 试件图

(b)SOFS 制备图

图 1-3 SOFS 制备及试件图

Figure 1-3: Diagram of the Preparation of SOFS and Specimens

基于此, 本文利用风积沙与油污泥热解残渣为外掺料, 制备了风积沙油污泥热解残渣泡沫轻质土 (Aeolian sand oil sludge pyrolysis residue foam light soil, SOFS) 新材料, 并研究了 SOFS 的物理力学性能与耐久性能, 以及从不同类型发泡剂角度分析影响 SOFS 性能的主要因素。通过试验验证了 SOFS 应用于路基修建的可行性, 以期为沙漠地区路基修建提供有效参考。

1.2 外掺料泡沫轻质土国内外研究现状

外掺料泡沫轻质土是由水泥、水、泡沫群和外掺料混合搅拌而成的浆液, 浇筑凝结而成的固体物质。外掺料泡沫轻质土的性能主要受外掺料的添加量、水固比、泡沫与浆液体积比、发泡剂稀释倍数、发泡剂类型和搅拌时间这些因素的影响。外掺料泡沫轻质土具有轻质、高强、流动性、密度可调节性、自立性、刚度和可塑性等特点, 因此经常被用于高速公路扩建、软土地基处理、桥背回填等工程领域, 应用极为广泛^[19-24]。外掺料泡沫轻质土用于沙漠道路路基修筑时, 应主要考虑其物理力学性能和耐久性能。

1.2.1 外掺料泡沫轻质土物理力学性能研究

国内外学者已经对外掺料泡沫轻质土的物理力学性能有了大量研究, 并将外掺料泡沫轻质土成熟地应用于工程实践, 如图 1-4 所示。

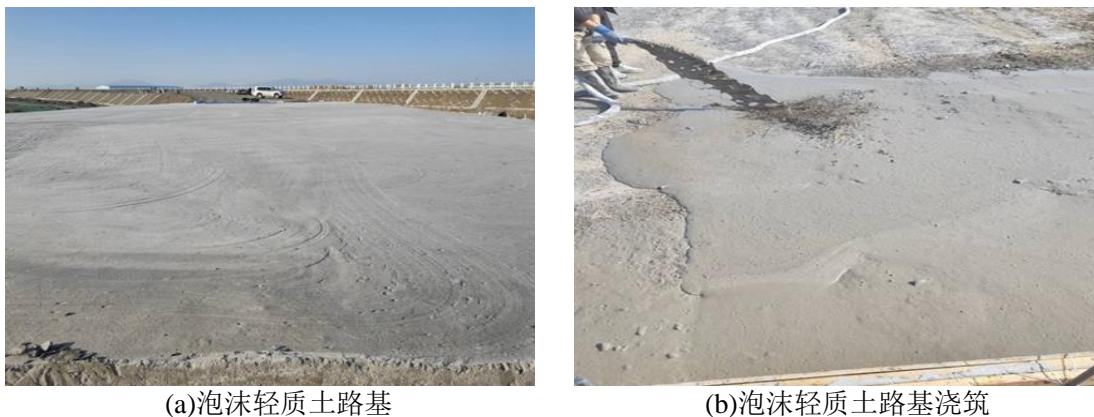


图 1-4 泡沫轻质土工程应用图

Figure 1-4 Engineering Application Diagram of Foam Lightweight Soil

纤维类外掺料可显著改善泡沫轻质土的弯曲性能。为提高泡沫轻质土的弯曲韧性, X 等^[25]以聚乙烯醇与聚丙烯纤维为外掺料制备泡沫轻质土, 经试验研究得出两种纤维可以使泡沫轻质土的抗折性能得到提升, 其中聚丙烯纤维对泡沫轻质土的弯曲韧性影响更大, 且可以增加泡沫轻质土的延展度与弯曲变形量。陈成华等^[26]以短纤维和纤维网为外掺料制备泡沫轻质土, 并进行了无侧限抗压强度和抗折强度试验, 并提出了最佳纤维长度、纤维掺量和阈值。

工业废渣替代水泥的力学研究成果显著：黄学明等^[27]分别使用矿粉和粉煤灰作为外掺料制备泡沫轻质土，进行了流动度、湿密度与无侧限抗压强度的室内和室外试验，分析了影响流动度、湿密度与无侧限抗压强度的因素，并且提出湿密度与无侧限抗压强度呈正相关关系，湿密度与流动度呈负相关关系，解决了由于流动度不合理而导致的软弱夹层，和强度不足导致结构沉陷等问题。欧孝夺等^[28]在制备泡沫轻质土过程中添加铝土尾矿外掺料，提出铝土尾矿不仅可以作为外掺料，还可以作为胶凝材料用于制备泡沫轻质土。并研究了不同湿密度对铝土尾矿泡沫轻质土流动度、无侧限抗压强度和微观结构的影响，通过室内试验表明湿密度与无侧限抗压强度呈正相关。彭远胜等^[29]使用铝土尾矿作为外掺料制备泡沫轻质土，基于 Weibull 分布函数建造了受压本构模型，发现随着铝土尾矿掺量的增加，泡沫轻质土的抗压强度逐渐降低。赵正峰等^[30]利用工业废渣为外掺料制备复合胶凝材料与工业废渣泡沫轻质土，开展了流动度、湿密度和无侧限抗压强度室内试验，同时分析了影响这三种物理力学指标的影响因素，并根据试验结果筛选出最佳制备工艺。姚运仕等^[31]分别以砂粉、盐渍土和粉煤灰为外掺料制备泡沫轻质土，分别研究了单独添加这三种外掺料制备的泡沫轻质土的无侧限抗压强度，以及使用盐渍土与粉煤灰复掺制备的泡沫轻质土的无侧限抗压强度，结果表明单掺三种外掺料对泡沫轻质土的无侧限抗压强度皆不利，而复配盐渍土与粉煤灰会引发碱基发反应从而有利于提高泡沫轻质土的无侧限抗压强度。张洪智等^[32]使用经磨细处理的循环流化床粉煤灰为外掺料制备泡沫轻质土，研究了循环流化床粉煤灰对泡沫轻质土流动度、凝结时间、需水量、水化热和力学性能的影响，结果表明，循环流化床粉煤灰的掺量与泡沫轻质土的凝结时间、水化速度和水化热成反比，与需水量成正比。彭远胜等^[33]使用铝土尾矿作为外掺料制作泡沫轻质土，结合正交试验以流动度、湿密度和无侧限抗压强度作为评审指标判断铝土尾矿泡沫轻质土敏感性分析，明确了影响程度由大到小分别为泡沫群体积、水泥掺量和铝土尾矿掺量。

学者积极探索环保替代材料的力学研究：Zhang 等^[34]使用氧化镁为外掺料，二氧化碳替代空气进行发泡，从而制备泡沫轻质土，在不同龄期进行微观检测试验和力学性能试验，结果表明氧化镁泡沫轻质土不仅力学性能较好而且具有固碳作用。Alharthai 等^[35]使用棕榈油燃料灰、稻壳灰和竹叶灰作为外掺料替代不同质量占比的水泥制作泡沫轻质土，开展了湿密度、凝结时间、隔热性能、无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度和微观检测试验，试验结果显示，农作物废弃物制备的泡沫轻质土符合砌筑强度标准。刘松玉等^[36]为降低成本和减少碳排放，利用蛇纹石尾矿为外掺料混合镁矿和渣土制备泡沫轻质土，并开展了物理力学试验，分析了蛇纹石掺量、湿密度和水固比对泡沫轻质土的影响，发现该材料 28 d 无侧限抗压强度可达到 1.34 Mpa，这表明利用蛇纹石尾矿为外掺料混合镁矿渣土制备泡沫轻质土，既实现了固碳与固废利用又可作为填充料应用于工程。Riyap 等^[37]使用稻壳改性偏高岭土泡沫轻质土，提出稻壳添加量与水泥用量是决

定泡沫轻质土抗压强度的主要因素，并从宏观与微观角度分别分析了水泥掺量和稻壳添加量对泡沫轻质土抗压强度的影响。

其他材料作为外掺料的力学研究：张宏博等^[38]将粉土作为外掺料制备泡沫轻质土，以围压、湿密度和粉土掺量为变量研究粉土基泡沫轻质土劈裂抗拉强度与抗压强度。丁庆军等^[39]将具有缓凝作用的磷石膏作为制备泡沫轻质土的外掺料，并使用水玻璃作为碱激发剂提高泡沫轻质土的流动度、无侧限抗压强度与抗折强度。Xiao 等^[40]使用废弃的混凝土再生粉末作为外掺料制备泡沫轻质土，开展了无侧限抗压强度与导热系数试验，发现导热系数与无侧限抗压强度都随着混凝土再生粉末掺量的增加而出现不同程度的降低。王立军等^[41]进行了浸水吸水试验，研究了吸水率与湿密度的关系，并提出初始浸水体积与总体积的比值与湿密度呈线性相关关系，同时还应注意浸水时间与底部是否与水面接触。何启庆等^[42]为减小地基不均沉降和应力，使用石灰石粉作为外掺料制备泡沫轻质土，并进行了宏观和微观试验，结果表明流动度和无侧限抗压强度会随着石灰石粉掺量的增加而降低，但石灰石粉得掺入有利于泡沫的分散和泡沫轻质土的早期强度。蒋红光等^[43]将除尘灰作为外掺量制作泡沫轻质土以应用于交通基建，并开展了无侧限抗压强度试验，试验表明除尘灰掺量为 50 % 时 28 d 无侧限抗压强度可达到 2.08 Mpa。刘英等^[44]将粉质黏土作为外掺料制备泡沫轻质土，对比分析不同掺量的粉质黏土掺量、湿密度、泡沫群体积和养护龄期对泡沫轻质土流动度与无侧限抗压强度的影响，试验表明，泡沫群体积会影响泡沫轻质土浆液的流动度，粉质黏土与泡沫群体积量过大会影响泡沫轻质土无侧限抗压强度。马川义等^[45]使用拜耳赤泥作为外掺料制备泡沫轻质土并应用于交通建设中，分析了水胶比和减水剂对泡沫轻质土的流动性与无侧限抗压强度的影响，并进行室内试验得到了制备拜耳赤泥的最佳配合比。张彩丽等^[46, 47]以钢渣为外掺料制备高性能的泡沫轻质土，开展了控制不同湿密度、钢渣掺量和水灰比的泡沫轻质土流动度试验、无侧限抗压强度试验与盐酸腐蚀试验，得到了流动度与无侧限抗压强度的变化规律。通过计算机断层扫描技术试验，并基于灰色理论研究了空隙结构与无侧限抗压强度之间的关系。

综上所述，国内外学者对于泡沫轻质土物理力学性能的研究，主要集中于聚丙烯纤维、矿粉、粉煤灰、铝土尾矿、砂粉、盐渍土、磷石膏、粉土、工业废渣、纤维、纤维网、石灰石粉、除尘灰、粉质黏土、拜耳赤泥、钢渣和蛇纹石尾矿等单一外掺料来制备相应泡沫轻质土。使用这些外掺料制备的泡沫轻质土物理力学性能较好，可有效应用于道路路基建设及相关工程应用中。但是大量学者研究外掺料制备的泡沫轻质土物理力学性能时，缺少了对外掺料的预处理。在新疆沙漠石油开采地区，使用这些外掺料制备泡沫轻质土并应用于道路路基修筑，需要考虑运输成本与时间成本。因此，本研究中尝试使用其他外掺料，在新疆沙漠石油开采地区就地取材，使用预处理的风积沙与油污泥热解残渣作为外掺料制备泡沫轻质土并应用于道路路基修筑中。

1.2.2 外掺料泡沫轻质土耐久性研究

目前国内外学者对于泡沫轻质土的耐久性研究已经有了大量研究。泡沫轻质土如果干燥收缩幅度过大会导致裂痕的产生。影响泡沫轻质土干缩幅度的因素主要有水泥品种、水泥含量、外掺料含量、环境温度、湿度和制备泡沫轻质土所用颗粒直径^[48]。

工业固废与矿物资源化耐久性方面研究：赵正峰等^[30]以工业废渣为外掺料制备泡沫轻质土，对比了工业废渣泡沫轻质土和普通泡沫轻质土的干燥收缩试验与冻融循环试验，得到了相同条件下工业废渣泡沫轻质土抗干缩性能与抗冻融循环能力均高于普通泡沫轻质土。姚运仕等^[31]分别对比了以砂粉、盐渍土、粉煤灰为外掺料制备相应泡沫轻质土，开展了干缩试验、干湿循环与冻融循环试验，得到了盐渍土与粉煤灰复配质量占总胶凝材料质量的 40% 时，容重为 800kg/m^3 时，泡沫轻质土耐久性最好。蒋红光等^[43]使用工业固废除尘灰为外掺料制备除尘灰泡沫轻质土，开展了冻融循环试验、干湿循环试验和微观电镜与 X 光衍射试验，发现冻融循环与干湿循环后除尘灰泡沫轻质土的强度损失分别为 13.8 % 和 17.3 %，符合耐久性强度要求，由微观检测发现在碱性环境中除尘灰有助于泡沫轻质土强度。张彩丽等^[46]使用大掺量钢渣为外掺料制备钢渣泡沫混凝土，以不同水灰比、钢渣掺量和湿密度为变量进行干湿循环试验与冻融循环试验，发现这些变量对水稳性和抗冻性影响较小。叶仙松等^[49]以电厂煤渣为外掺料制备泡沫轻质土，通过对比有水无水养护条件记录相应的软化系数与无侧限抗压强度，反映浸水时间对煤渣基泡沫轻质土的影响。赵帆等^[50]使用循环流化床粉煤灰、赤泥、钢渣和脱硫石膏为外掺料混合制备泡沫轻质土，开展了干湿循环和冻融循环试验，得到了泡沫轻质土耐久性强度机理和破坏外观特征。

土类作为外掺料的耐久性研究：孙赛炜等^[51]使用偏高岭土为外掺料制备泡沫轻质土，使用正交试验筛选出最优配合比，并分析了偏高岭土掺量、水胶比和胶凝材料用量因素显著性影响分析，基于最优配合比进行了干缩试验、冻融循环与干湿循环试验筛选出最佳配合比，同时还对耐久性影响因素进行了分析。侯智坚等^[52]使用不同掺量的粉质黏土为外掺料制备相应的泡沫轻质土，开展了干湿循环耐久性试验，得到了粉质黏土掺量与粉质黏土泡沫轻质土的抗干湿循环能力成反比，并总结出了合理的粉质黏土掺量。

针对耐久性采用不同试验方法研究：Chen 等^[53]使用宏观和微观角度对泡沫轻质土的抗冻性进行了试验研究，发现经冻融循环后泡沫轻质土的质量损失率与强度损失率分别达到了 6.62 % 和 37.61 %，空隙与不规则空隙分别增加了 25.84 % 和 18.39 %。Zhang 等^[54]使用单因素和多因素对泡沫轻质土抗压能力与抗冻融循环能力进行了正交试验与试验检测，得到试件密度和水是影响泡沫轻质土无侧限抗压强度与冻融循环能力的主要因素。