

DOI: 10.11779/CJGE20240309

一维压缩条件下砂-黏土混合物热导率演化规律

张涛¹, 蔡国军², 杨玉玲^{*1}, 张家铭³, 周逸文³

(1. 南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京 210009; 2. 安徽建筑大学土木工程学院, 安徽 合肥 230601;

3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为揭示应力条件下天然砂-黏土混合物热导率的演化规律, 通过一维压缩试验、干密度和热导率测试, 研究混合物热导率 k 随应力水平和黏土掺量 f 的变化规律、热导率 k 与干密度 ρ_d 的内在联系、孔隙液对混合物堆积特性和传热效率的影响, 基于二元介质堆积理论, 构建考虑应力状态和黏土掺量的混合物热导率计算模型, 同时探讨了混合物结构演化特征和微观传热机理。结果表明: 砂-黏土混合物热导率 k 随黏土掺量 f 增加呈“先增大、后减小”趋势, 孔隙液既显著降低颗粒间热阻, 又提高 k 对 f 和应力水平变化的敏感性, 最大热导率值发生在 $f=40\%$ 附近; 干密度 ρ_d 变化与 k 相近, f 在 30%~40% 范围时, ρ_d 值最大; 增大竖向应力有利于提升混合物压实特性, 但孔隙液对 ρ_d 值影响甚微; 混合物临界掺量 f^* 、最小孔隙比 e_{\min} 与应力状态、孔隙液和颗粒形貌等密切相关; 提出的混合物热导率计算模型综合考虑了应力水平和组分含量的影响, 具有良好的适用性; 颗粒变形与破碎以及空间结构演变是进一步揭示多元颗粒混合物传热机制的重要内容。

关键词: 热传导; 堆积特性; 颗粒土; 竖向应力; 计算模型

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)08-1619-10

作者简介: 张涛(1986—), 男, 安徽肥东人, 博士(后), 副教授, 主要从事环境岩土和特殊地基处理等方面的研究工作。E-mail: zhangtao_seu@163.com。

Evolution of thermal conductivity of sand-clay mixtures under one-dimensional compression

ZHANG Tao¹, CAI Guojun², YANG Yuling¹, ZHANG Jiaming³, ZHOU Yiwen³

(1. College of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. College of Civil Engineering, Anhui

Jianzhu University, Hefei 230601, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The aim of this study is to reveal the evolution law of natural sand-clay mixtures under varied stress conditions. A series of one-dimensional compression tests and dry density and thermal conductivity measurements are conducted on both dry and saturated samples to investigate the variations of dry density ρ_d as well as thermal conductivity k with the increasing stress level and clay content f , and the influences of pore fluid on packing behaviors and heat flow efficiency of the mixtures. Based on the binary packing theory, a new thermal conductivity model for sand-clay mixtures considering the effects of stress state and clay content is developed and verified. In addition, the microstructural characteristics and the thermal conduction mechanisms of the binary granular mixtures are discussed. The results indicate that the thermal conductivity k of sand-clay mixtures exhibits a trend of ‘increasing first and then decreasing’ with an increase in the clay content f , and the pore fluid significantly reduces the thermal resistance among soil particles and increases the sensitivity of thermal conductivity to both the clay content f and stress level. The maximum k value is found around f of 40%. The dry density ρ_d presents a similar evolution with that of k , where the maximum ρ_d value is detected as the f is in the range of 30% to 40%. Increasing vertical stress is beneficial for improving the compaction behavior of the mixtures, while the presence of the pore fluid imposes a negligible effect on ρ_d . The critical clay content f^* and the minimum void ratio e_{\min} are closely related to the state of stress, pore fluid and particle morphology. The proposed model for the thermal conductivity of the sand-clay mixtures comprehensively incorporates

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (42225206); 国家自然科学基金项目 (41907248, 41807260) This work was supported by the National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars (Grant No. 42225206) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41907248, 41807260).

收稿日期(Received): 2024-04-06 **修回日期(Revised):** 2024-08-27 **接受日期(Accepted):** 2024-09-29 **网络出版日期(Online):** 2024-09-30

***通信作者** (E-mail: yangyuling_seu@163.com)

the hybrid effects of state of stress and fine content, which is also consistent with the binary packing theory and has good applicability. The particle deformation and breakage and the spatial structural evolution of the granular matter mixtures are recommended to further explore the thermal conduction mechanism.

Key words: thermal conduction; packing characteristic; granular soil; vertical stress; computational model

0 引言

在化石能源危机和“双碳”战略目标的背景下，合理开发清洁、高效可再生能源（如地热能、海洋能等）和发展建造多种形式的热工构筑物（如地热泵、地下热交换系统、能源桩等）已逐渐成为国际共识^[1]。热量在岩土体中的传递对这些开采系统和地下结构的优化设计、健康运营有着重要影响。对于岩土工程而言，大多数工况的温度低于 1000 K，且传递介质中流体活跃性较低（砾石、卵石等高渗透性土体除外），热量在岩土体中传递以热传导为主^[2]。热导率是表征介质热传导性能的关键参数，对于准确描述岩土体内温度场分布和散热、保温效率具有重要意义^[3]。

天然土体是大小不一的粗、细颗粒混合物，孔隙中常存在性质各异的孔隙液，当其服务于能源开采和热工建设时，受外部荷载、温度等多因素影响，传热性能发生改变。对于土体热导率与工程性质参数，如含水率、饱和度、孔隙率等之间的相关关系，已进行了大量研究，并获得了一些统一认识和计算模型^[4-5]。干密度是表征土体致密程度的重要参数，其值越大，土体越致密，颗粒间的接触点和接触面积越大，土体热导率越接近颗粒热导率^[2]。对于干燥土体，干密度值大对应孔隙率较小，导热性能必然较优^[6]；对于非饱和土体，干密度与饱和度联合影响土体导热性能，热导率值变化不一^[7]；对于饱和土体，热导率一般随干密度增大而增大，因为常见土颗粒的热导率值大于孔隙水^[8]。在揭示岩土材料传热机理方面，颗粒形貌和刚度、温度相变、应力条件等因素的影响逐渐被关注^[9-10]。张涛等^[11]测试了 5 种不同形貌干燥河砂的热导率，认为砂颗粒形貌与其接触特性密切相关，并引入“平均形貌因子”参数用于描述热导率变化。Abyzov 等^[12]系统研究了外荷载对聚丙烯、陶瓷、金属等多种

散粒材料热导率的影响，指出外荷载会改变颗粒间接触面积和配位数，增大压力有利于提高材料的热导率。然而，鲜有针对应力条件下天然粗、细颗粒土体混合物热导率演化规律，以及混合物孔隙液、堆积特性与传热性能内在联系的报道。此外，考虑粗、细颗粒组分和应力水平的混合物热导率评价模型也非常少见。

本文以一维压缩条件下天然河砂-黏土混合物的导热性能为研究对象，通过测试干燥、饱和状态下混合物的干密度 ρ_d 和热导率 k ，研究 k 随竖向应力、黏土掺量的演化规律，分析 k 和 ρ_d 的内在联系，查明孔隙液对混合物压实特性和传热效率的影响，基于二元颗粒介质堆积模型，构建考虑应力水平和黏土掺量的热导率计算模型，并探讨砂-黏土类粗、细颗粒混合物的微观传热机理。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为天然河砂和高岭土，分别代表混合物中的粗粒和细粒成分（如图 1 所示）。天然河砂相对质量密度 G_s 为 2.68，最大孔隙比 e_{\max} 为 0.98，最小孔隙比 e_{\min} 为 0.61，通过 X 射线荧光光谱分析得到其 SiO_2 含量为 97.6%（5 个测试试样的平均值）。高岭土由市场购得，其基本物理化学指标如表 1 所示，根据《土的工程分类标准：GB/T 50145—2007》，属于低液限黏土（CL）。高岭土的主要成分为 SiO_2 （58.90%）和 Al_2O_3 （36.61%），其全部化学成分如表 2 所示。图 2 为天然河砂和高岭土的颗粒粒径分布曲线，河砂粒径范围为 0.70~1.30 mm，平均粒径 d_{50} 为 1.02 mm；高岭土粒径范围为 0.40~150 μm ，平均粒径 d_{50} 为 5.76 μm 。

表 1 高岭土基本物理化学指标
Table 1 Basic physicochemical indices of tested kaolin clay

G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	比表面积 $A_s/(\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1})$	最优含水率 $w_{\text{omc}}/\%$	最大干密度 $\rho_{\text{dmax}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	pH (质量比, 土/水=1)	可交换阳离子/ $(\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1})$			
							Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}
2.63	33.6	21.4	43.8	18.5	1.65	8.7	1.26	0.12	5.12	0.29

表 2 高岭土化学成分
Table 2 Chemical compositions of tested kaolin clay

化学成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	CaO	Na_2O	SO_3	MnO	其他
含量/%	58.90	36.61	1.08	2.26	0.30	0.02	0.11	0.48	0.13	0.11



图1 试验天然河砂(左)和高岭土(右)

Fig. 1 Tested natural river sand (left) and kaolin clay (right)

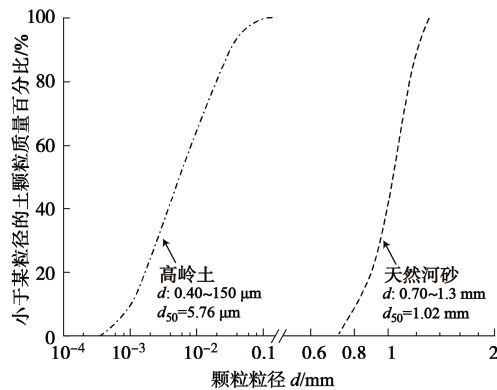


图2 天然河砂和高岭土颗粒粒径分布曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of tested river sand and kaolin clay

1.2 试验方法

将天然河砂用水洗净、风干后与高岭土按照一定掺量比例混合,并倒入电动搅拌机(转速 120 r/min)中,搅拌 3 min,确保两者混合均匀。高岭土掺量 f 按照干燥状态下高岭土与混合物总质量的百分比计算,设置范围为 0%~100%,增量为 10%,其中 0% 代表纯河砂试样、100% 代表纯高岭土试样。本文制备干燥和饱和两种不同状态的试样进行测试。干燥试样制备参照 Ladd^[13]提出的“欠压实”方法进行:将一定设计量的砂-黏土混合物分 5 层均匀填充至内径 61.8 mm,高度 150 mm 的圆柱形不锈钢模具中;采用击实锤对各层进行压实,锤质量 100 g,锤底直径 22 mm,落锤高度 2 cm。第一层锤击数为 60 次,后每层递减 5 次,最后一层锤击数为 40 次。该方法能够有效减小颗粒偏析,保证混合物的均匀性,增强试验结果的可靠性^[1, 9, 14]。饱和试样是将前述制备好的干燥试样模具的两端分别依次放置滤纸和透水石,并用饱和器固定,然后置于真空缸内进行抽气饱和,具体步骤参照规范《土工试验方法标准:GB/T 50123—2019》中进行。饱和过程完成后,按下式计算试样的饱和度 S_r :

$$\left. \begin{aligned} S_r &= \frac{(\rho - \rho_d)G_s}{e\rho_d} \times 100, \\ e &= \frac{G_s\rho_w}{\rho_d} - 1. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, ρ 为饱和后试样密度; ρ_w 为水的密度(本文取 1.0 g/cm³); e 为孔隙比; G_s 为混合物试样的土粒相对质量密度,计算式为

$$G_s = f \times 2.63 + (1 - f) \times 2.68 \quad (2)$$

式中, 2.63 和 2.68 分别为高岭土和河砂的相对质量密度值。饱和后试样的 S_r 计算值要求不低于 95%, 即认为达到饱和状态。

试验开始前需量测干燥状态下试样的质量 m_s , 用于计算干密度。一维压缩试验和热导率测试在改进的试验装置中进行(如图 3 所示), 刚性侧壁严格限制试样的横向变形, 热探针通过底座垂直贯入试样中心, 竖向荷载作用下, 砂-黏土试样产生一维压缩变形, 同时记录每级荷载下试样的热导率变化。竖向荷载初始值设为 12.5 kPa, 最大值设为 3200 kPa, 逐级加载, 荷载率(荷载增量与前一级荷载比值)为 1。热导率测试设备为美国 TEMPOS 热传导分析仪, 配备 TR-3 型探针, 其规格为: 直径 2.4 mm, 长度 100 mm, 测试精度 $\pm 10\%$ 。待每级荷载下试样变形稳定后, 进行热导率测试, 原理为瞬态线热源法, 一次测试过程持续时间约 5 min, 具体操作程序可参照美国 ASTM D5334 进行。每级竖向荷载下试样热导率值测试两次, 间隔 10 min, 确保探针冷却至室温后, 再进行下一次测量, 要求两次热导率值之间偏差不高于 2%, 并取其平均值作为测试结果。根据每级竖向荷载下试样的压缩变形量 Δl , 计算获得相应的干密度 ρ_d 值:

$$\rho_d = \frac{4m_s}{\pi d^2(h - \Delta l)} \quad (3)$$

式中: d 和 h 分别为试样的直径和初始高度 ($d=61.8$ mm, $h=150$ mm)。

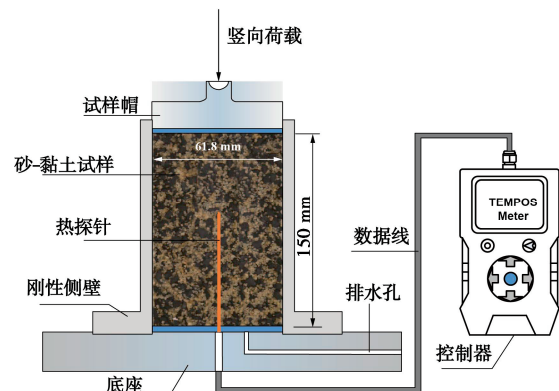


图3 改进一维压缩试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of modified one-dimensional oedometer test devices

2 试验结果与分析

2.1 砂-黏土混合物热导率

图 4 为干燥、饱和状态下砂-黏土混合物热导率随竖向应力的变化。随着竖向应力增加,热导率值不断增加,在半对数坐标中,两者呈近似线性关系。增大竖向应力会引起混合物试样压密、孔隙减小、土颗粒间接触紧密,这些都有利于提升热量在试样中的传递效率,增大热导率值^[15]。相同条件下,干燥与饱和状态试样的热导率值差异显著,接近一个数量级。热导率值巨大差异可主要归结于:常温常压下,水的热导率值 ($0.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) 约为空气的 24 倍 ($0.025 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),其导热性能显著优于空气^[16];饱和试样中孔隙气体被水分驱逐、替代,形成了新的、高效热量传递路径;此外,土颗粒表面的水膜及其“桥接”效应,也有助于颗粒之间热量的传导^[6]。

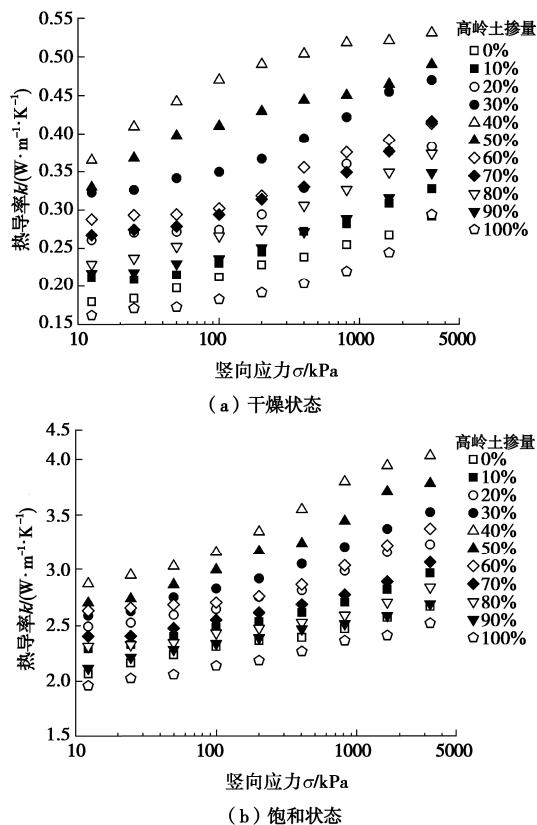


图 4 砂-高岭土混合物热导率随竖向应力的变化

Fig. 4 Variation of thermal conductivity for sand-kaolin clay mixtures with vertical stress

图 5 为干燥、饱和状态下混合物热导率与高岭土掺量之间的相关关系。不同竖向应力水平下,热导率随高岭土掺量增加的变化趋势一致,均表现为“先增大、后减小”的特征,热导率最大值发生在接近 40% 高岭土掺量处。在高岭土掺量不断增加过程中,干燥与饱和试样的热导率值变化范围分别为 $0.20\sim 0.50$, $2.00\sim 3.80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,变化幅度明显不及孔隙液的影响。

响。因此,对于一定压实度的砂-黏土混合物,增加饱和度是有效提升其导热性能的手段之一。

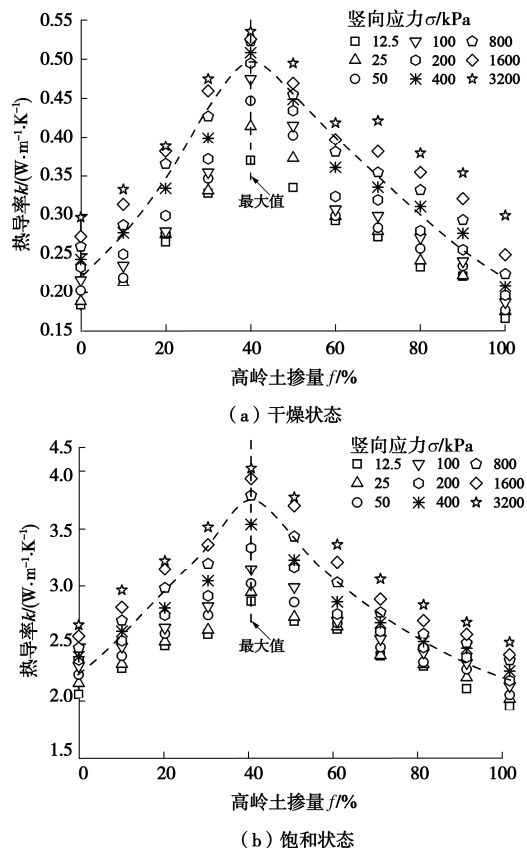


图 5 不同竖向应力状态下混合物热导率随高岭土掺量变化

Fig. 5 Variation of thermal conductivity with kaolin clay content at varied vertical stresses

2.2 砂-黏土混合物干密度

图 6 为干燥、饱和状态下砂-黏土混合物干密度随竖向应力的变化。随着竖向应力的不断增加,混合物干密度略有增大,干燥试样表现为土颗粒压密、孔隙率降低;饱和试样还伴随着孔隙水的挤出。不论孔隙液存在与否,混合物干密度对于竖向应力增加的响应规律相似,且增幅不大。这与图 4 热导率的变化特征截然不同。例如竖向应力由 12.5 kPa 增加至 3200 kPa, 50%高岭土掺量试样,干燥和饱和状态下干密度的增幅分别为 0.045 , $0.063 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。与此相比,竖向应力恒定条件下,高岭土掺量对混合物干密度的影响较为显著。例如竖向应力为 100 kPa 时,高岭土掺量由 0%增加至 30%,干燥和饱和试样的干密度增幅分别为 0.379 , $0.429 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。图 7 为干燥、饱和状态下混合物干密度与高岭土掺量之间的相关关系。可以看出:①干燥、饱和状态下,干密度与高岭土掺量之间呈现出相似的变化规律,即随着高岭土掺量增加,干密度呈“先增大,后减小”的趋势;②在一定高岭土掺量范围内,干密度表现峰值特征,本文掺量在 30%~40% 范围时,干密度峰值约为 $2.050 \text{ g}/\text{cm}^3$;③相同竖向应

力条件下, 纯砂试样 (0% 掺量) 的干密度高于纯高岭土试样 (100% 掺量)。

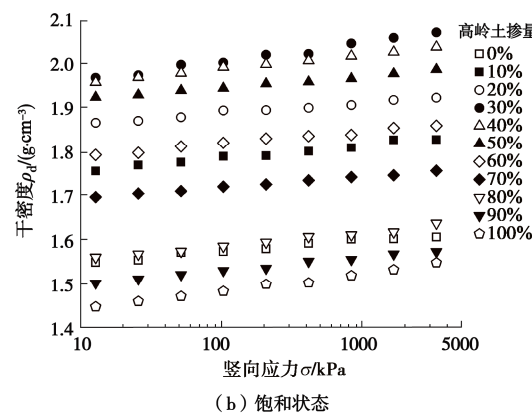
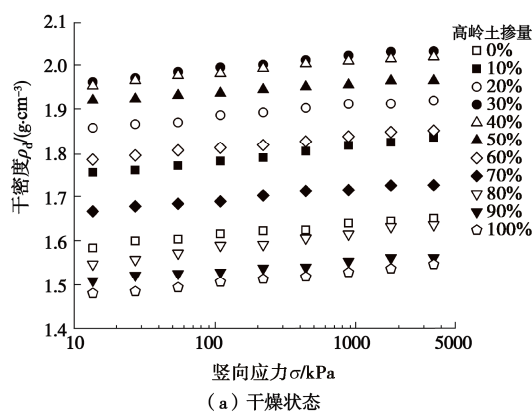


图 6 砂-高岭土混合物干密度随竖向应力的变化

Fig. 6 Variation of dry density for sand-kaolin clay mixtures with vertical stress

因此, 对于砂-黏土混合物而言, 竖向应力和孔隙液 (干燥和饱和) 对干密度的影响较小, 干密度主要取决于混合物中粗、细粒组分含量。细粒含量对混合物干密度影响显著, 30%~40% 范围时干密度值最大。这与前述热导率的变化规律相似, 但热导率对混合物中细粒含量 (高岭土掺量) 变化较干密度更为敏感。土颗粒的压实特性与颗粒形貌、表面粗糙度、静电引力等因素密切相关^[17], 这也是相同应力条件下, 纯砂试样与纯高岭土试样干密度值差异的主要原因。

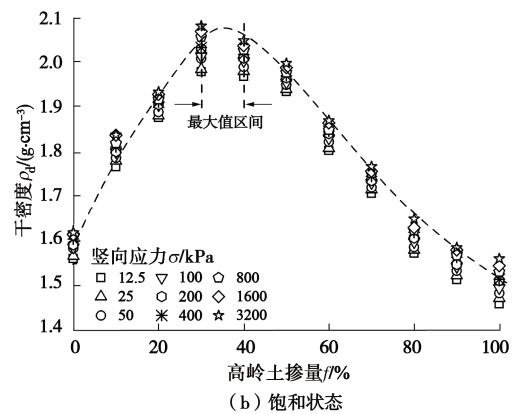
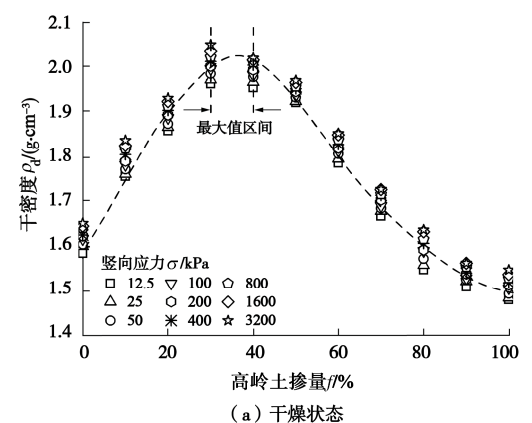


图 7 不同竖向应力状态下混合物干密度随高岭土掺量变化

Fig. 7 Variation of dry density with kaolin clay content at varied vertical stresses

2.3 热导率与干密度的相互关系

图 8 为干燥、饱和状态下砂-黏土混合物热导率与干密度的相关关系。不论高岭土掺量如何, 热导率与干密度呈正相关关系, 热导率随干密度增大而不断增大。干燥与饱和试样热导率随干密度的变化规律基本相同, 且干燥试样热导率的变化速率较大。土体干密度表征单位体积中固体颗粒部分的质量, 即粗、细颗粒的质量和, 工程上常用作评定土体紧密程度的标准。竖向应力不断增大, 导致砂-黏土混合物的紧密程度提高, 粗、细颗粒间的接触特性 (配位数、接触应力、接触面积等) 改善, 导热能力随之提升。土颗粒配位数 (coordination number) 为该颗粒与周围其他土颗粒的接触数目, 能反映土颗粒堆积体有关热量、力的传递等特性。Choo 等^[15]利用离散元模拟了干燥石英砂在不同应力状态下的热导率变化, 结果显示: 热导率随竖向应力 (0~1500 kPa) 增大而增大, 热导率增量逐渐趋于定值, 同时获得了砂颗粒间的接触应力分布。现有学者^[4, 18-19]对不同干密度的多种土体进行热导率测试, 结果如图 9 所示。不同粗、细颗粒土体热导率均随干密度增加而增大, 这与本文结果一致。此外, 与细颗粒土体 (黏土、粉土等) 相比, 粗颗粒土体 (细砂、粗砂等) 热导率随干密度的增速较大, 即热导率对干密度变化的响应更敏感。这种现象在砂-高岭土混合物试样中未有显著表现, 不同高岭土掺量试样热导率的变化速率大致相近 (如图 8 所示)。

值得注意的是, 干燥状态砂-高岭土混合物热导率的变化速率略高于饱和状态的混合物。这主要归因于混合物中传热路径的改变: ①干燥混合物的传热路径主要有土颗粒间接触、土颗粒自身、孔隙气体 (一般为空气); ②饱和混合物孔隙中气体全部被孔隙液 (一般为水) 驱替, 传热路径除了土颗粒间接触和土颗粒自身外, 还有土颗粒与孔隙液接触、孔隙液自身。土颗粒热导率值范围约为 1.0~5.0 W·m⁻¹·K⁻¹, 与水的热

导率值 ($0.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 较为接近, 是空气 ($0.025 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 的近百倍^[20]。因此, 砂-高岭土混合物从干燥转变为饱和后, 传热路径之间的效率差异降低, 导致竖向应力增加引起的热导率增量减小。已有研究报道也显示^[21-22], 随着含水率增加, 土体热导率随干密度增加的增速呈逐渐降低趋势, 这间接证明了本文结果的有效性。

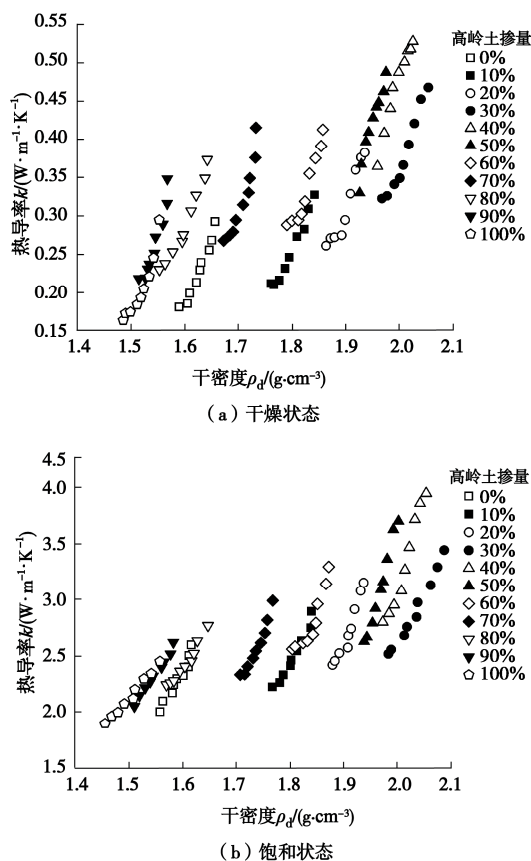


图 8 砂-高岭土混合物热导率和干密度的相关关系

Fig. 8 Relationships between thermal conductivity and dry density for sand-kaolin clay mixtures

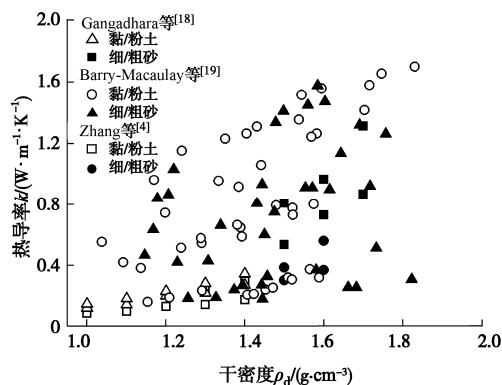


图 9 文献报道的不同类型土体热导率与干密度关系

Fig. 9 Correlation of thermal conductivity with dry density for varied soils reported in literature

3 砂-黏土混合物热导率演化规律

3.1 砂-黏土混合物堆积特性

砂和黏土分别是粗、细颗粒土体, 其混合物属于粗-细颗粒二元混合介质。此类介质的堆积特性、密实度和传热性能密切相关, 已有较多报道并具有统一认识。Lade 等^[23]认为: 当粗颗粒间的孔隙完全被细颗粒填充时, 混合物的孔隙比达到最小值, 并定义最小孔隙比时细粒土掺量为临界掺量。Choo 等^[24]在此堆积理论的基础上提出了计算细粒土临界掺量和混合物最小孔隙比的数学公式, 对于本文砂-高岭土混合物而言, 具体如下:

$$f^* = \frac{e_c G_{sf}}{G_{sc}(1 + e_f) + e_c G_{sf}} \quad (4)$$

式中: f^* 为高岭土临界掺量; e_c 和 e_f 分别为砂和高岭土的孔隙比; G_{sc} 和 G_{sf} 分别为砂和高岭土的颗粒相对质量密度 (本文 $G_{sc}=2.68$, $G_{sf}=2.63$)。

$$e_{\min} = \frac{n_c n_f}{\frac{n_c}{e_c} + \frac{n_f}{e_f}} \quad (5)$$

式中: e_{\min} 为砂-高岭土混合物最小孔隙比; n_c 和 n_f 分别为砂和高岭土的孔隙率。孔隙比 e 与孔隙率 n 之间的换算为

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (6)$$

图 10 为砂-高岭土混合物孔隙比随黏土掺量的理论计算结果。明显的, 不同竖向应力水平下, 干燥、饱和混合物的孔隙比变化趋势与 Lade 等^[23]的堆积理论完全一致, 两者临界状态 B 点的 f^* 值较为接近, 而 e_{\min} 值略有差别。为了进一步查明孔隙液、竖向压缩应力 σ 与 f^* 和 e_{\min} 值的内在联系, 对所有混合物试样按照式 (4) ~ (6) 进行计算, 其结果如图 11 所示。相同应力下, 干燥试样的临界掺量 f^* 值低于饱和试样; 临界掺量 f^* 值整体随竖向应力增加而降低, 干燥试样的这种趋势较显著, 饱和试样呈“阶段性”降低特征, 每个阶段内 f^* 值随竖向应力增加稍有增大, 产生与整体降低趋势相逆现象 (如图 11 (a) 所示)。本文砂-高岭土混合物的理论临界掺量 f^* 值在 26.0%~28.5% 范围内, 较干密度和热导率测试结果显示的 30%~40% 低。半对数坐标下, 最小孔隙比 e_{\min} 值与竖向应力呈较好的线性负相关关系, 且饱和试样的 e_{\min} 值高于干燥试样 (如图 11 (b) 所示)。不难理解, 竖向应力的增加会压缩颗粒间孔隙, 提升混合物的密实度。此外, 相较于空气, 孔隙液的存在会增加外荷载压缩孔隙的阻力。

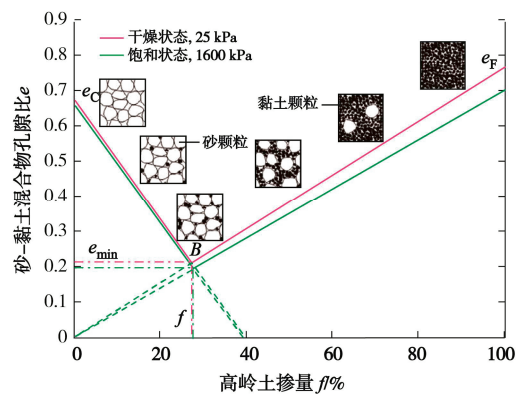
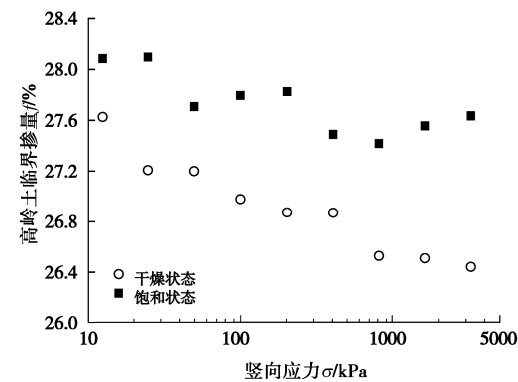
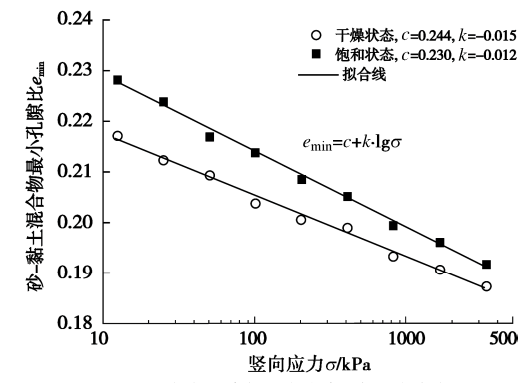


图 10 砂-黏土混合物孔隙比与黏土掺量关系

Fig. 10 Relationship between void ratio and clay content for sand-clay mixtures



(a) 黏土临界掺量与竖向应力



(b) 混合物最小孔隙比与竖向应力

图 11 砂-黏土混合物堆积参数与竖向应力关系

Fig. 11 Correlation of packing parameters with vertical stress for sand-clay mixtures

3.2 砂-黏土混合物热导率计算模型

现有关于岩土体热导率的理论、经验模型较多，这些计算模型在限定条件下具有较好的适用性和精确度，但鲜有考虑应力条件对热导率的影响^[25]。本文在二元介质堆积理论和前述热导率测试结果基础上，提出考虑应力条件和黏土（细粒土）掺量的砂-黏土混合物热导率计算模型，具体如下：

$$k = k_0 \left[1 + \varphi(f) \cdot \lg \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \right] \quad (7)$$

式中： f 为高岭土掺量； σ 和 σ_0 分别为竖向应力和参考竖向应力； k_0 为 σ_0 下混合物的热导率； $\varphi(f)$ 为关于变量 f 的函数。现选取 $\sigma_0=100$ kPa 为参考，通过回归分析得到 $\varphi(f)$ 值，结果如表 3 所示。图 12 为 $\varphi(f)$ 函数值与变量 f 的相关关系。图中两者之间的相互关系可以用两个折线段来描述，转折点发生在 $f=40\%$ ，这与热导率最大值位置一致。值得注意的是，干燥试样折线段的变化趋势与饱和试样恰好相反，间接表明了孔隙液对应力条件下砂-黏土混合物热导率的演化存在影响。 $\varphi(f)$ 函数的数学表达式为

$$\varphi(f) = \begin{cases} \alpha + \beta \cdot f & (f \leq 40\%) \\ \chi + \gamma \cdot f & (f > 40\%) \end{cases} \quad (8)$$

式中： α ， β ， χ ， γ 为经验参数（本文干燥试样： $\alpha=0.2868$ ， $\beta=-0.0039$ ， $\chi=0.0300$ ， $\gamma=0.0025$ ；饱和试样： $\alpha=0.0020$ ， $\beta=0.0961$ ， $\chi=0.2517$ ， $\gamma=-0.0019$ ）。

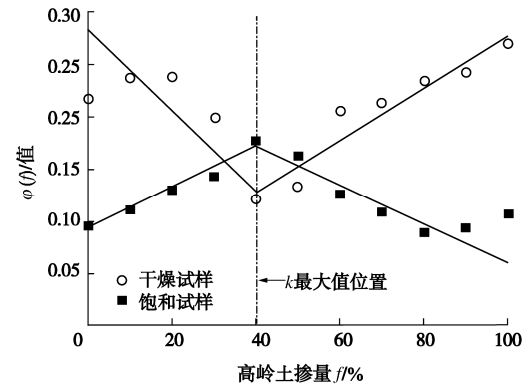


图 12 $\varphi(f)$ 函数值与变量 f 的关系

Fig. 12 Relationship between function value $\varphi(f)$ and variable f

表 3 热导率模型参数计算结果

Table 3 Calculated results of model parameters of thermal conductivity

高岭土掺量 $f/\%$	干燥试样		饱和试样	
	$k_{100}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\varphi(f)$	$k_{100}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\varphi(f)$
0	0.2166	0.2194	2.3077	0.0965
10	0.2350	0.2397	2.4776	0.1119
20	0.2787	0.2409	2.6414	0.1319
30	0.3541	0.2015	2.8280	0.1447
40	0.4745	0.1222	3.1547	0.1793
50	0.4148	0.1348	2.9953	0.1650
60	0.3067	0.2091	2.7010	0.1272
70	0.2986	0.2155	2.5451	0.1100
80	0.2706	0.2361	2.4277	0.0897
90	0.2407	0.2447	2.3348	0.0942
100	0.1872	0.2734	2.1369	0.1080

为进一步验证式（7）计算模型的有效性，将 198 个实测数据与计算结果对比，结果见图 13。虽然干燥试样与饱和试样的实测热导率值 k_M 差异较大，但计算值 k_C 均与其吻合良好，较好描述了砂-黏土混合物热导率与应力水平、黏土掺量之间的相互关系。 k_M 和 k_C 值的百分比误差 δ 和均方根误差 RMSE 分别控制在 $\pm 17\%$ 和 $0.052 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ，计算精度满足工程建设需求。

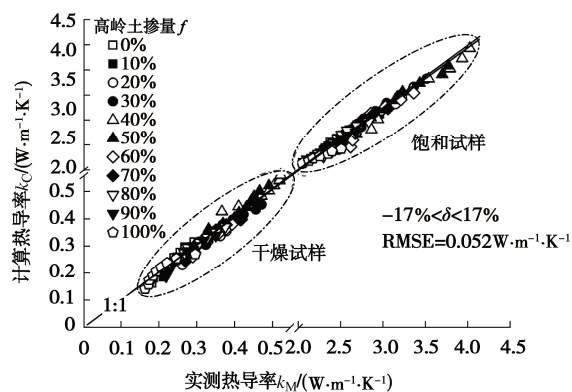


图 13 计算热导率与实测热导率比较

Fig. 13 Comparison between calculated and measured thermal conductivity values

4 讨 论

砂-黏土类多孔颗粒介质的传热性能取决于介质中发生的传热路径及其效率,这与颗粒的材料属性、接触特性以及颗粒间孔隙填充特征密切相关^[26]。对于干燥混合物而言,随着黏土掺量的增加,砂颗粒间孔隙逐渐被黏土填充,混合物密实度得到提升,且颗粒间的传热路径由单一的“砂-砂”模式转变为“砂-黏土-砂”模式,颗粒配位数增加,传热效率提升;当黏土掺量高于临界掺量 f^* 并持续增大时,混合物的密实度主要由黏土孔隙率控制,传热路径最终转变成“黏土-黏土”模式,传热效率降低^[27]。饱和混合物的孔隙被水分占据,颗粒表面形成水膜,并在颗粒之间发挥“桥接”作用,会显著提升热量的传导效率。此外,孔隙水的热导率也是空气的数十倍。理论上,砂-黏土混合物的密实度和传热性能随黏土掺量的演化规律应一致,但图 5, 7 的试验结果显示:热导率对黏土含量增加的响应较为“滞后”,且干密度在黏土掺量某一范围内呈最大值。这与图 10 二元颗粒介质堆积理论存在差异的原因主要是^[28-29]:①堆积理论假定土颗粒是大小均匀的球体;②孔隙液与混合物堆积特性基本无关,却与其传热性能密切相关。Park 等^[30]提出的修正粗-

细颗粒土混合物分类系统也指出:随着细颗粒土掺量增加,混合土结构由“粗粒土主导”类型逐渐进入“过渡”类型,最后成为“细粒土主导”类型;“过渡”类型结构对应的细颗粒土掺量是一个区间值,存在上、下临界值(图 14 所示)。这与图 7 的试验结果一致。关于砂-黏土混合物热导率最大值对应黏土掺量与计算临界掺量存在偏差的现象, Simpson 等^[31]也得到了相似的试验结果,并认为:土颗粒最近邻和次近邻热渗流会导致热导率响应迟缓,此外,制样方法和“毛细管桥”分别会对干燥和湿润试样热导率响应产生影响(图 15 所示)。

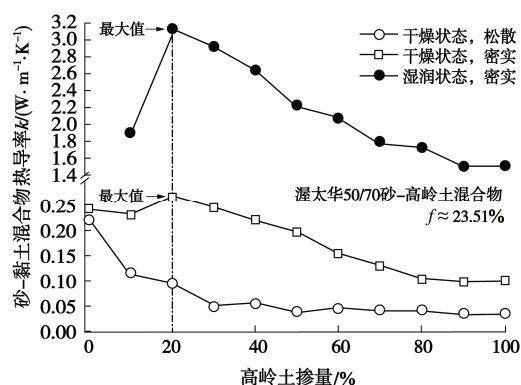
图 15 渥太华砂-高岭土热导率随高岭土掺量的变化^[31]

Fig. 15 Variation of thermal conductivity with kaolin content for Ottawa sand-kaolin clay mixtures

外部压缩应力作用下,砂-黏土颗粒间孔隙得到压缩,土颗粒的空间构型发生改变,导致热导率和干密度值增加(图 4, 6)。需要指出的是,混合物压缩过程中并未考虑土颗粒的变形、破碎,特别是在较高应力水平下^[32]。当粗-细颗粒混合物为“刚-柔”或“柔-柔”类型材料时,一定应力条件下,柔颗粒发生较大变形,颗粒间可能会发生扭曲、嵌套等现象,接触特性显著改变,传热路径和效率也随之变化^[33]。粗颗粒在高应力下的破碎会改变混合物结构,粗颗粒含量减小且可能会出现“过渡”颗粒,混合物的堆积特性和传热性能均发生变化。此外,温度在零度附近变

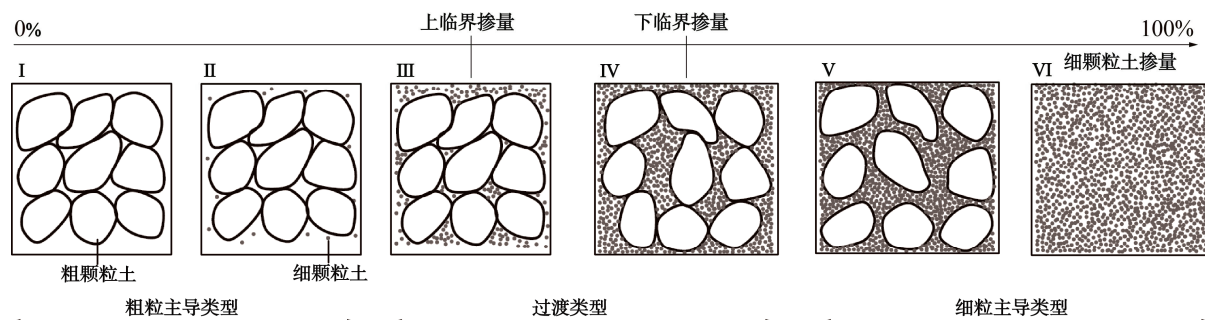
图 14 粗-细颗粒土混合物结构演化示意图^[30]

Fig. 14 Schematic diagram of microstructural evolution for coarse-fine granular soil mixtures

化时会引起孔隙液的相变和体积改变,混合物的导热性能随之变化。黏土矿物(如蒙脱石、伊利石等)遇水膨胀、失水收缩亦会对混合物的压实和热传导特性产生影响。这均是进一步完善本文和揭示应力条件下颗粒类二元或多元混合介质传热机制的重要研究方向。

5 结 论

本文通过一维压缩条件下砂-高岭土混合物干密度、热导率测试,研究了混合物堆积特性和传热性能的演化规律,分析了干密度、热导率与应力水平、黏土掺量的相互关系,建立了考虑应力、黏土含量影响的热导率模型,并结合二元颗粒介质堆积理论,探讨了混合物的微观传热机制,得到以下4点结论。

(1) 砂-黏土混合物热导率随黏土含量增加呈“先增大、后减小”特征,孔隙液能显著降低颗粒间的热阻,同时提高热导率对黏土含量和应力水平变化的敏感性,热导率最大值发生在40%黏土含量附近;相对于干燥状态,孔隙液提高了混合物的传热效率,降低了应力增加引起的热导率增量。

(2) 混合物干密度的变化趋势与热导率相近,黏土含量30%~40%范围内,干密度值最大;竖向应力增加使土颗粒间孔隙压缩、颗粒接触紧密,干燥和饱和状态下干密度的变化特征基本一致。

(3) 砂-黏土混合物的黏土临界掺量 f^* 、最小孔隙比 e_{\min} 与应力水平、孔隙液相关,饱和试样的 f^* 和 e_{\min} 值均高于干燥试样,孔隙液存在会增加外荷载压缩颗粒间孔隙的阻力;土颗粒形貌和孔隙液是试验测试与堆积理论存在差异的主要原因。

(4) 构建的考虑应力条件和黏土掺量的热导率计算模型与二元介质堆积理论一致,能较好描述混合物热导率的演化特征;复杂应力条件下,颗粒介质的刚度差异以及变形、破碎是进一步揭示多元颗粒混合物传热机制的重要内容。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 张涛、杨玉玲、周逸文参与实验设计;张涛、周逸文完成实验操作;张涛、蔡国军、杨玉玲、张家铭参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by ZHANG Tao, YANG Yuling and ZHOU Yiwen. The experimental operation was completed by ZHANG Tao and ZHOU Yiwen. The manuscript was drafted and revised by ZHANG Tao, CAI Guojun, YANG Yuling and ZHANG Jiaming. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

- [1] YANG Y L, ZHANG T, REDDY K R, et al. Thermal conductivity of scrap tire rubber-sand composite as insulating material: Experimental investigation and predictive modeling[J]. Construction and Building Materials, 2022, **332**: 127387.
- [2] ZHANG N, WANG Z Y. Review of soil thermal conductivity and predictive models[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, **117**: 172-183.
- [3] 张涛,王才进,刘松玉,等. 基于 ANN 的岩土体热阻系数预测模型研究[J]. 建筑材料学报, 2020, **23**(2): 381-391. (ZHANG Tao, WANG Caijin, LIU Songyu, et al. Prediction model of thermal resistivity of geomaterial based on artificial neural network[J]. Journal of Building Materials, 2020, **23**(2): 381-391. (in Chinese))
- [4] ZHANG T, CAI G J, LIU S Y, et al. Investigation on thermal characteristics and prediction models of soils[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, **106**: 1074-1086.
- [5] CAI G J, ZHANG T, PUPPALA A J, et al. Thermal characterization and prediction model of typical soils in Nanjing area of China[J]. Engineering Geology, 2015, **191**: 23-30.
- [6] CÔTÉ J, KONRAD J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(2): 443-458.
- [7] 张楠,夏胜全,侯新宇,等. 土热传导系数及模型的研究现状和展望[J]. 岩土力学, 2016, **37**(6): 1550-1562. (ZHANG Nan, XIA Shengquan, HOU Xinyu, et al. Review on soil thermal conductivity and prediction model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(6): 1550-1562. (in Chinese))
- [8] BARRY-MACAULAY D, BOUAZZA A, WANG B, et al. Evaluation of soil thermal conductivity models[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, **52**(11): 1892-1900.
- [9] XIAO Y, MA G L, NAN B W, et al. Thermal conductivity of granular soil mixtures with contrasting particle shapes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, **146**(5): 06020004.
- [10] BI J, ZHANG M Y, LAI Y M, et al. A generalized model for calculating the thermal conductivity of freezing soils based on soil components and frost heave[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, **150**: 119166.
- [11] 张涛,杨玉玲,叶晓平,等. 考虑颗粒形貌的干砂热传导特性研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(1): 182-189. (ZHANG Tao, YANG Yuling, YE Xiaoping, et al. Thermal

- conduction behaviors of dry sands considering effects of particle shape[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, **46**(1): 182-189. (in Chinese))
- [12] ABYZOV A M, GORYUNOV A V, SHAKHOV F M. Effective thermal conductivity of disperse materials II: Effect of external load[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, **70**: 1121-1136.
- [13] LADD R S. Preparing test specimens using undercompaction[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1978, **1**(1): 16-23.
- [14] JIANG M J, KONRAD J M, LEROUEIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. *Computers and Geotechnics*, 2003, **30**(7): 579-597.
- [15] CHOO J, KIM Y J, LEE J H, et al. Stress-induced evolution of anisotropic thermal conductivity of dry granular materials[J]. *Acta Geotechnica*, 2013, **8**(1): 91-106.
- [16] 张涛, 刘松玉, 张楠, 等. 土体热传导性能及其热导率模型研究[J]. *建筑材料学报*, 2019, **22**(1): 72-80. (ZHANG Tao, LIU Songyu, ZHANG Nan, et al. Research of soil thermal conduction properties and its thermal conductivity model[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, **22**(1): 72-80. (in Chinese))
- [17] 李珊珊, 李大勇, 高玉峰. 砂土最大最小孔隙比测定及其影响因素分析[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(3): 554-561. (LI Shanshan, LI Dayong, GAO Yufeng. Determination of maximum and minimum void ratios of sands and their influence factors[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(3): 554-561. (in Chinese))
- [18] GANGADHARA RAO M, SINGH D N. A generalized relationship to estimate thermal resistivity of soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, **36**(4): 767-773.
- [19] BARRY-MACAULAY D, BOUAZZA A, SINGH R M, et al. Thermal conductivity of soils and rocks from the Melbourne (Australia) region[J]. *Engineering Geology*, 2013, **164**: 131-138.
- [20] ZHANG R L, XUE X H. A new model for prediction of soil thermal conductivity[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, **129**: 105661.
- [21] ALRTIMI A, ROUAINIA M, HAIGH S. Thermal conductivity of a sandy soil[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, **106**: 551-560.
- [22] ZHANG W D, BAI R Q, XU X T, et al. An evaluation of soil thermal conductivity models based on the porosity and degree of saturation and a proposal of a new improved model[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, **129**: 105738.
- [23] LADE P V, LIGGIO C D Jr, YAMAMURO J A. Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1998, **21**(4): 336-347.
- [24] CHOO H, BURNS S E. Effect of overconsolidation ratio on dynamic properties of binary mixtures of silica particles[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, **60**: 44-50.
- [25] ROSHANKHAH S, GARCIA A V, CARLOS SANTAMARINA J. Thermal conductivity of sand-silt mixtures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, **147**(2): 06020031.
- [26] GARRETT D, BAN H. Compressive pressure dependent anisotropic effective thermal conductivity of granular beds[J]. *Granular Matter*, 2011, **13**(5): 685-696.
- [27] ROSHANKHAH S, SANTAMARINA J C. Engineered granular materials for heat conduction and load transfer in energy geotechnology[J]. *Géotechnique Letters*, 2014, **4**(2): 145-150.
- [28] YANG S, LACASSE S, SANDVEN R. Determination of the transitional fines content of mixtures of sand and non-plastic fines[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2006, **29**(2): 102-107.
- [29] PORCINO D D, DIANO V. The influence of non-plastic fines on pore water pressure generation and undrained shear strength of sand-silt mixtures[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, **101**: 311-321.
- [30] PARK J, SANTAMARINA J C. Revised soil classification system for coarse-fine mixtures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, **143**(8): 04017039.
- [31] SIMPSON D C, EVANS T M. Behavioral thresholds in mixtures of sand and kaolinite clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, **142**(2): 04015073.
- [32] FUKUMOTO T. Particle breakage characteristics of granular soils[J]. *Soils and Foundations*, 1992, **32**(1): 26-40.
- [33] 张涛, 杨玉玲, 张家铭, 等. 基于相似性原则的橡胶颗粒-砂混合物热导率理论模型[J]. *岩土工程学报*, 2024, **46**(2): 436-444. (ZHANG Tao, YANG Yuling, ZHANG Jiaming, et al. Theoretical model for thermal conductivity of rubber-sand mixtures based on similarity heat conduction principle[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, **46**(2): 436-444. (in Chinese))