

DOI: 10.11779/CJGE20221097

# 考虑颗粒形貌的干砂热传导特性研究

张涛<sup>1</sup>, 杨玉玲<sup>\*1</sup>, 叶晓平<sup>2</sup>, 张宇欣<sup>3</sup>, 刘松玉<sup>4</sup>

(1. 南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京 210009; 2. 浙江华东建设工程有限公司, 浙江 杭州 310030; 3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 4. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 为揭示颗粒形貌对干砂热导率的影响规律, 通过砂颗粒形貌测量和室内热探针试验, 研究不同天然河砂的二维颗粒形貌统计分布特征以及颗粒形貌特征参数与热导率的相关关系, 同时从细观尺度探讨砂颗粒接触传热的内在机制。结果表明: 天然河砂颗粒圆度和球度值的统计分布具有正态分布特征, 期望值可作为定量表征颗粒形貌的参数; 干砂热导率随孔隙率增加而减小, 在半对数坐标中两者具有良好的线性关系, 直线斜率与“平均形貌因子” $A_m$ 呈线性减小关系; 相同孔隙率下, 浑圆颗粒的干砂热导率值较大, 不同干砂间热导率值的差异随孔隙率的增加而逐渐减小; 提出的热导率计算新模型综合考虑了颗粒形貌和矿物组分的影响, 相比于传统 Côté 和 Konrad 模型, 具有更好的适用性和先进性; 颗粒形貌对干燥状态下无黏性土热传导特性的作用受多因素综合影响, 与应力环境、颗粒刚度等密切相关。  
**关键词:** 天然砂; 热传导; 颗粒形貌; 统计分布; 接触性状

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)01-0182-08

**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。

## Thermal conduction behaviors of dry sands considering effects of particle shape

ZHANG Tao<sup>1</sup>, YANG Yuling<sup>1</sup>, YE Xiaoping<sup>2</sup>, ZHANG Yuxin<sup>3</sup>, LIU Songyu<sup>4</sup>

(1. College of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Zhejiang Huadong Construction Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310030, China 3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The aim of this study is to reveal the influences of particle shape of dry sands on their thermal conductivity. A series of particle shape determination and thermal probe experiments are conducted to investigate the statistical distribution characteristics of two-dimensional particle morphology for various natural river sands and the relationship between particle shape parameters and thermal conductivity. The internal mechanisms of contact thermal conduction among sand particles are also discussed in mesoscale. The results indicate that both the roundness and the sphericity of natural sand exhibit normal distribution features in statistics, and their expected values are the proper parameters for quantitatively characterizing the particle morphology. The thermal conductivity displays a linearly decreasing trend with an increasing porosity in the semi-logarithmic coordinates, with the slope of the line linearly decreasing with the increase of the average shape factor  $A_m$ . At a given porosity, round particles possess higher thermal conductivity, and the higher porosity leads to the less significant discrepancy in the thermal conductivity of different dry sands. The proposed model is excellent in applicability and advanced as compared to the Côté and Konrad model. The effects of particle shape on the thermal conductivity for dry and non-cohesive soils are comprehensively affected by multiple factors, which are dependent on the factors including stress condition and particle stiffness.

**Key words:** natural sand; thermal conduction; particle shape; statistical distribution; contact behavior

## 0 引言

在化石能源危机和全球气候问题大背景下, 开采地热能 and 建造热工构筑物, 如能源桩、地热泵、地下热交换系统等, 受到越来越多的关注<sup>[1]</sup>。这些地下结构和开采系统在运营过程中, 不可避免地与周围土体

进行热量交换。深入了解热量在土体中的传递特点以及正确估算土体的热物性参数, 对于优化结构设计、

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907248, 41807260)

收稿日期: 2022-09-03

\*通信作者(E-mail: yangyuling\_seu@163.com)

提高构筑物工作效率具有重要意义<sup>[2]</sup>。热量在任意介质中传递有热辐射、热对流和热传导 3 种方式, 高温 (约 1000 K) 环境下热辐射现象才会显著, 传递介质中流体活跃时热对流现象才需密切关注。一般情况下, 热量在土中传递以热传导为主, 只有发生在高渗透性土中 (如砾石、卵石等) 时, 热对流才有可能发挥主导作用。因此, 热传导是表征土体传热性能的最主要特征, 其中热导率是土体传热过程中影响温度场分布的关键参数<sup>[3]</sup>。

天然土体是包含气相、液相、固相的复杂三相介质体系, 其热传导路径主要包括固体颗粒、孔隙液体、孔隙气体和固体颗粒间的接触。固体颗粒、孔隙液体和孔隙气体的热传导性能取决于介质属性。固体颗粒间的接触传热路径与多种因素密切相关, 如颗粒形貌和刚度、颗粒间受力状态等, 难以定量刻画。砂土颗粒具有相对单一的矿物组分, 且刚度相对细粒土大, 常选作目标对象用于查明土体的热传导特性。砂土热导率与常见工程性质指标, 如含水率、干密度等之间的相关关系已有较为成熟的认识<sup>[4-6]</sup>。对于干燥砂土, 其传热路径主要是固体颗粒和颗粒间接触, 孔隙气体的导热贡献相对有限。颗粒形貌与颗粒间接触性态密切相关, 可改变颗粒配位数、接触面积等性质, 是砂土接触传热路径的重要影响因素。现有关于颗粒形貌对散粒材料导热性能影响的研究多集中于人造材料<sup>[7-8]</sup>, 如玻璃珠、人工砂等, 鲜有对天然砂颗粒形貌与热导率的内在联系进行研究。此外, 在多因素综合影响下, 关于砂颗粒形貌对热传导特性细观作用机制的探讨也非常少见。

本文以天然河砂的颗粒形貌特征和热传导特性为研究对象, 通过砂颗粒形貌测试和室内热探针试验研究不同赋存环境下砂颗粒形貌的统计分布特征、干砂热导率随孔隙率的演化规律以及颗粒形貌对热导率的作用规律, 提出了考虑颗粒形貌和矿物组分的干砂热导率计算模型, 并验证了模型的适用性和先进性, 此外, 在细观尺度上讨论了砂颗粒接触传热的内在机制。

## 1 干砂热导率

根据傅里叶定律, 自然介质在导热过程中, 单位时间内通过给定截面的热通量  $q$ , 正比于该截面上温度的变化率 (温度梯度)  $\nabla T$ , 两者的比例系数即为热导率  $k$  (导热系数):

$$k = -\frac{q}{\nabla T} \quad (1)$$

对于气体介质而言, 热导率表示热量在分子间随机碰撞传递的效率, 其热通量  $q$  与单位体积分子数  $n_m$ 、分子均方根速率  $v_m$ 、平均自由路径  $\lambda$ 、平均动能梯度  $\nabla \bar{e}$

相关<sup>[9]</sup>:

$$q = -\frac{1}{3} n_m v_m \lambda \nabla \bar{e} \quad (2)$$

式中, 一定温度下气体平均动能  $\bar{e}$  是定容比热容  $C_v$  和摩尔质量  $M$  的函数。因此, 气体热导率  $k_a$  的计算式为

$$k_a = -\frac{q}{\nabla T} = \frac{1}{3} \rho_m v_m C_v \lambda \quad (3)$$

式中,  $\rho_m$  为气体的密度。液体介质的热导率  $k_l$ , 主要分为水和其他非金属液体两大类, 水中的热量通过水分子形成的氢键簇不断的传播, 这是其他非金属液体不具有的特征<sup>[10]</sup>。因此, 水的热导率比其他非金属液体高数倍之多。与气体介质相似, 液体介质的热导率与温度、压力密切相关, 可借用式 (3) 进行计算。固体介质的热导率  $k_s$  取决于其分子键的类型, 例如金属导体中热量主要通过自由电子的运动传播、绝缘体借助于晶格的随机振动<sup>[11]</sup>。

Côté 等<sup>[12]</sup>收集了大量文献中的热导率测试数据, 发现干砂的热导率  $k_d$  随孔隙率  $n$  增大而降低, 在半对数坐标中两者具有良好的线性关系 (如图 1 所示), 相关数学表达式为

$$k_d = \chi \times 10^{-\eta n} \quad (4)$$

式中,  $\chi$  (W/m·K) 和  $\eta$  (量纲为 1) 均为材料参数, 与颗粒形貌相关。为了得到干燥建筑材料热导率和孔隙率之间更为直观的关系式, Côté 等<sup>[12]</sup>针对破碎岩石、天然土和泥炭 3 种类型, 给出了  $\chi$  和  $\eta$  的参考值以及热导率的范围, 其结果如图 2 所示。图 2 中天然干砂的  $\chi$  和  $\eta$  值分别为 0.75 和 1.2, 与部分天然细颗粒土相同。在相近孔隙率范围内, 人工破碎砂的  $\chi$  和  $\eta$  值分别为 1.70 和 1.80, 明显高于天然砂。由此可见, 砂颗粒形貌和矿物组分对干砂的导热能力有着重要影响。需要指出的是, 砂颗粒形貌各异, 不同来源砂土的矿物组分复杂多样, 采用相同的材料参数 ( $\chi$  和  $\eta$ ) 难以获得较高精度的计算结果。

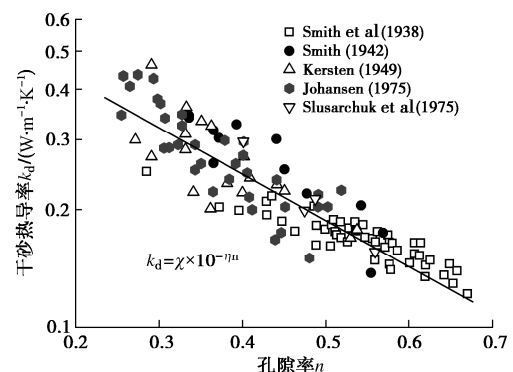


图 1 干砂热导率随孔隙率的变化规律<sup>[12]</sup>

Fig. 1 Variation of thermal conductivity with porosity for various dry sands and soils reported in literatures

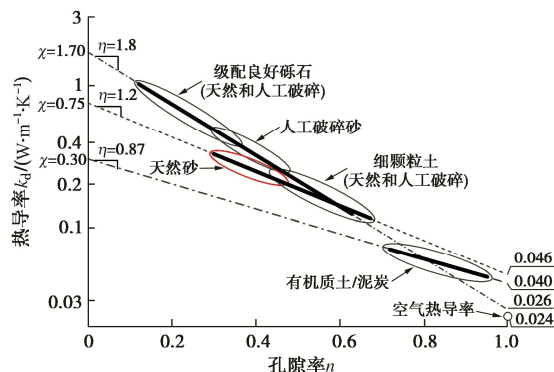
图2 不同类型干土热导率与孔隙率的相关关系<sup>[12]</sup>

Fig. 2 Relationships between thermal conductivity and porosity for dry soil

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

本文试验砂选用天然石英质河砂，分别取自长江中下游河道 5 个不同位置处，并将其中的杂质和大块颗粒剔除。砂粒相对质量密度  $G_s$  在 2.66~2.67，通过 X 射线荧光光谱分析得到 5 种河砂的二氧化硅 ( $\text{SiO}_2$ ) 含量在 96%~98%，其平均值为 97.34%。5 种河砂分别编号为：河砂 A、河砂 B、河砂 C、河砂 D、河砂 E。

### 2.2 试验方法

将 5 种河砂用自来水洗净、风干，要求风干后砂的含水率应低于 0.1%。为了避免颗粒粒径和级配对热导率试验结果的影响，本文对 5 种天然河砂的级配进行人工筛选，其操作方法简述如下：①选用河砂 A 为参照对象，对其按照《土工试验方法标准：GB/T 50123—2019》进行筛分试验，得到相应的颗粒级配累积曲线（如图 3 所示）；②以河砂 A 的级配曲线为依据，对其余 4 种河砂进行筛分试验，通过调整分析筛上砂粒的质量，获得与图 3 相同的颗粒级配曲线，最终得到颗粒级配基本相同的 5 种热导率试验干砂。由图 3 可见，河砂的粒径范围为 0.50~2.80 mm，不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  分别为 1.80 和 0.98，属于级配不良砂。

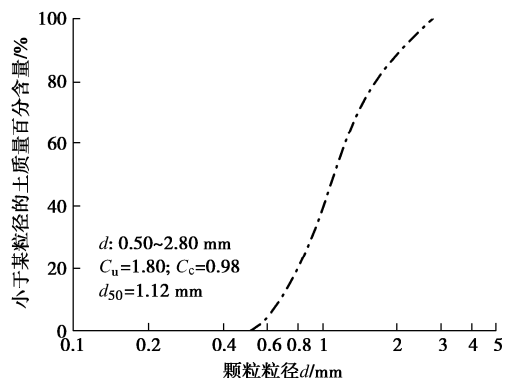


图3 试验干砂颗粒粒径分布曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curve of tested dry sands

河砂颗粒形貌通过如下测试方法获得：首先，将人工筛选后的干砂搅拌均匀，并从中随机抓取一定数量的砂颗粒进行颗粒形貌测试；其次，将随机抓取的每一颗砂粒从 10 cm 高度处自由落下，并借助放大镜观察落于试验台面上砂颗粒的二维形貌特征；最后，根据 Krumbein 等<sup>[13]</sup>提出的颗粒圆度 (RD) 和球度 (SP) 计算图（如图 4 所示），得到每一个砂颗粒的二维形貌特征值，即：RD 值和 SP 值，其计算方法分别为

$$RD = \frac{\sum r_i / N}{r_{\max}}, \quad (5)$$

$$SP = P_{eq} / P_r. \quad (6)$$

式中： $r_i$  和  $r_{\max}$  分别为颗粒投影的第  $i$  个和最大内接球半径； $N$  为内接球总数； $P_{eq}$  为颗粒投影的等效圆周长，其中等效圆的面积与投影面积相等； $P_r$  为投影圆周长。本文河砂 A、河砂 B、河砂 C、河砂 D 和河砂 E 颗粒形貌测试的数量分别为 981 颗、1062 颗、1003 颗、1056 颗和 1184 颗。

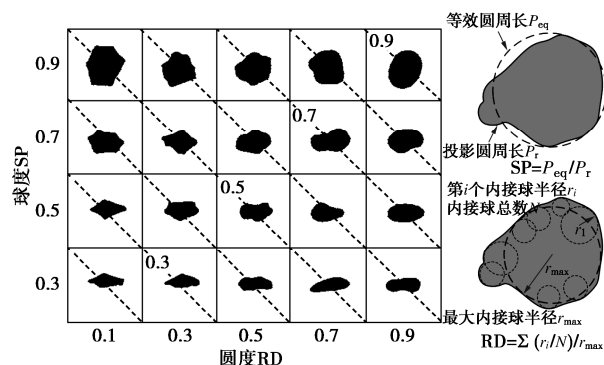
图4 颗粒圆度和球度计算图<sup>[13]</sup>

Fig. 4 Calculation chart of particle roundness and sphericity

热传导试验的试样制备参照 Ladd 等<sup>[14]</sup>提出的“欠压实”方法进行，将一定设计量的干砂分 6 层均匀填充至内径 50 mm，高度 150 mm 的圆柱形 PVC 模具中，其中上一层的压实干密度比相邻下一层高 2%。该制备方法可以有效减小颗粒偏析，增强试验结果的正确性与可靠性。试样孔隙率  $n$  分别设置为 0.34, 0.38, 0.42, 0.50, 0.54。热导率测试采用美国 METER Environment 公司生产的 TEMPOS 热传导分析仪，配备 TR-3 型探针。热探针的规格为：直径 2.4 mm，长度 100 mm，热导率测试上限值 4.0 W/K·m，测试精度  $\pm 10\%$ 。该热导率测试设备的原理为瞬态线热源法，通过对插入样品的热探针进行电压加热，内置的热电耦合传感器会记录测试过程中输入探针的能量和温度变化，进而计算得到测试目标的热导率。图 5 为干砂热导率测试照片。利用探针基座将 TR-3 热探针由试样中心缓慢、垂直插入，避免探针受力弯曲变形，确保砂样与探针接触紧密，测试过程分为探针加热和数据

计算两部分, 持续时间约为 5 min。干砂热导率测试在室温环境 ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) 下进行, 每个试样测试完成后, 应等待探针冷却恢复至室温后, 再进行下一个试样的测试, 具体测试过程参照美国 ASTM D5334<sup>[15]</sup> 规程进行。由于圆柱试样的直径大于 10 倍热探针直径, 探针尺寸效应以及插入过程对试样的挤压作用可忽略。相同制备条件下, 干砂试样一式 3 份, 要求热导率值之间偏差不得高于 2%, 并取其平均值作为测试结果。

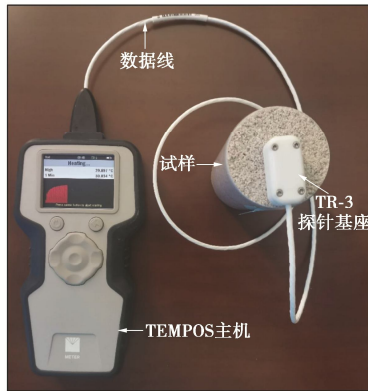


图 5 干砂热导率测试照片

Fig. 5 Photo of thermal conductivity measurement for dry sands

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 颗粒形貌特征

众所周知, 世界上没有形貌完全相同的两颗砂子。这不仅体现了砂颗粒形貌的多样性, 也反映了定量刻画砂颗粒形貌的复杂性。本文采用数学统计分析方法, 对 5 种石英质河砂颗粒的二维形貌特征, 即圆度 RD 和球度 SP, 进行定量评价。图 6 为 5 种河砂圆度 RD 和球度 SP 测试值的统计分布。图 6 中可以看出, RD 值和 SP 值的统计分布均具有正态分布特征, 棱角特别明显或特别圆润两种极端形貌特征的砂颗粒数量相对较少, 这主要是由河砂的天然赋存环境造成的。对 RD 值和 SP 值的统计分布进行高斯分布拟合, 拟合曲线如图 6 中实线所示。选取拟合正态分布的期望值作为该形貌变量的特征参数, 例如河砂 C 的 RD 拟合正态分布的期望值  $E(RD)$  为 0.563, 则认为河砂 C 中颗粒圆度 RD 的特征参数为 0.563。以此类推, 可以获得 5 种河砂 RD 和 SP 的期望值。

图 7 为河砂圆度期望值  $E(RD)$  和球度期望值  $E(SP)$  的分布。河砂 A 的  $E(RD)$  和  $E(SP)$  值均相对较小, 表明其中砂颗粒的棱角较为明显、浑圆度差; 河砂 D、E 的  $E(RD)$  和  $E(SP)$  值相对较大, 其中砂颗粒多为浑圆球体, 表面平滑且无尖锐棱角; 河砂 B、C 介于两种情况之间。对于干燥的散体材料, 在不考虑应力环境和颗粒本身形变的前提下, 其颗粒间的接触性状主要表现为: 颗粒配位数和接触面积。现有研究表明: 相同孔隙率下, 理想刚性球体相比于其他形状, 具有更

高的配位数和更大的接触面积<sup>[16]</sup>。

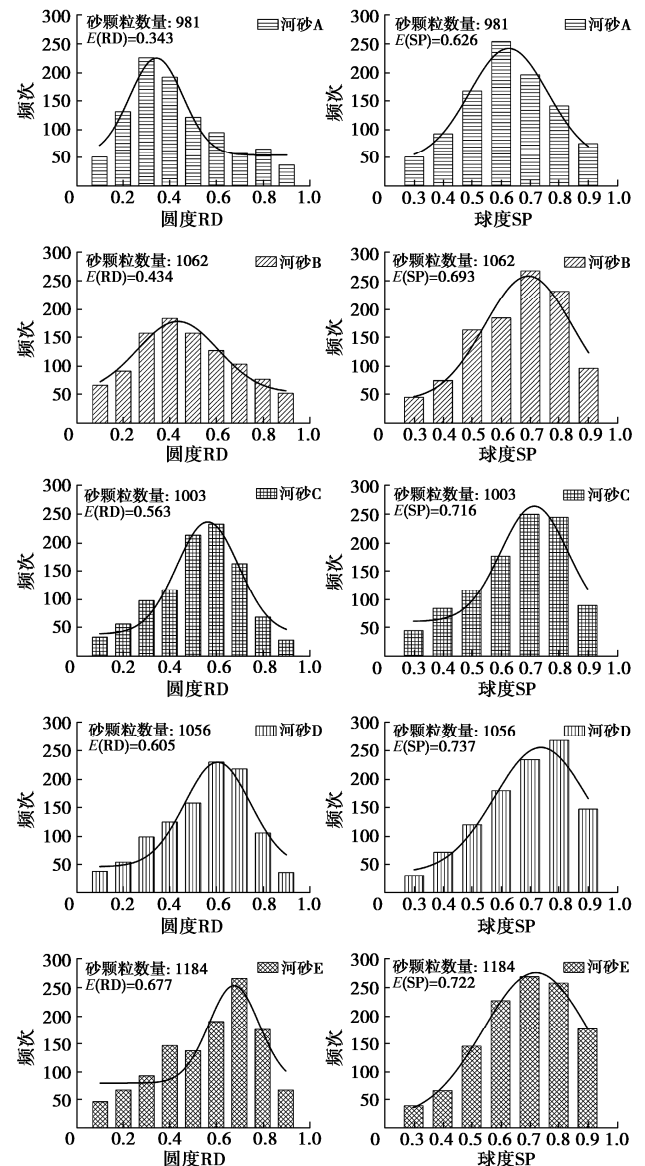


图 6 河砂颗粒圆度和球度的统计分布图

Fig. 6 Statistical distribution of roundness and sphericity for natural river sands

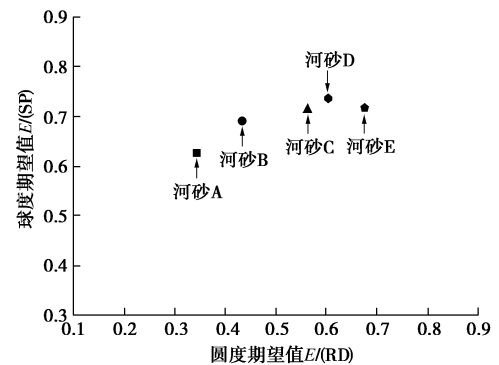


图 7 河砂圆度期望值和球度期望值

Fig. 7 Expected values of roundness and sphericity for river sands

#### 3.2 热导率变化规律

表 1 列出了 5 种干砂在不同孔隙率下热导率测试结果。相同孔隙率下, 不同颗粒形貌干砂的热导率值

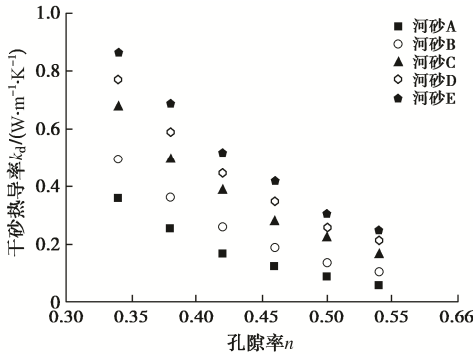


存在一定的差异。通过 Origin 软件对表中热导率值进行单因素方差分析,其结果显示:不同类型干砂热导率值存在显著差异,即颗粒形貌因素对目标热导率值的影响是显著存在的。为进一步查明热导率与孔隙率、颗粒形貌之间的相关关系,将表 1 中热导率数据绘制于常规坐标系中,如图 8 (a) 所示。可以看出:①热导率随孔隙率增加而降低。这与前人研究结果一致<sup>[12]</sup>,其主要原因是,孔隙率的增加削弱了砂颗粒之间的接触性状,同时单位体积内空气组分增加,也使得热量在干砂介质中的传递阻力提升,因为空气热导率(约 0.026 W/(m·K))显著低于砂土颗粒热导率(约 1.5~7.7 W/(m·K))<sup>[12, 17]</sup>。②相同孔隙率下,5 种干砂的热导率值各不相同。具体的,河砂 A 热导率值最小,河砂 E 最大。热导率值的大小顺序与其颗粒形貌特征值一致,即  $E(RD)$ 和  $E(SP)$ 值较大的干砂,热导率值高,反之,热导率值较低。该现象也验证了第 2 节中颗粒形貌对干砂热传导特性影响的推断。③孔隙率增加,热导率间的差值逐渐减小。当孔隙率较小时,砂颗粒间的接触较为紧密,热量传输路径对于颗粒接触性状的依赖较大;当孔隙率逐渐增大时,单位体积内砂颗粒数量减小,热量在干砂介质中的主要传输路径逐渐转向固体颗粒自身以及孔隙气体,颗粒间接触路径对热量传递的贡献逐渐减小。

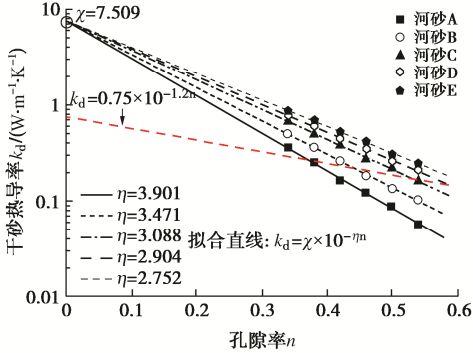
表 1 干砂热导率测试结果

Table 1 Thermal conductivity test results of dry sands		
干砂类型	孔隙率 $n$	热导率 $k_d/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
河砂 A $E(RD)=0.343$ $E(SP)=0.626$	0.34	0.358
	0.38	0.253
	0.42	0.165
	0.46	0.122
	0.50	0.087
	0.54	0.057
河砂 B $E(RD)=0.434$ $E(SP)=0.693$	0.34	0.495
	0.38	0.362
	0.42	0.260
	0.46	0.187
	0.50	0.135
	0.54	0.104
河砂 C $E(RD)=0.563$ $E(SP)=0.716$	0.34	0.676
	0.38	0.492
	0.42	0.381
	0.46	0.275
	0.50	0.221
	0.54	0.163
河砂 D $E(RD)=0.605$ $E(SP)=0.737$	0.34	0.769
	0.38	0.590
	0.42	0.447
	0.46	0.347
	0.50	0.258
	0.54	0.211
河砂 E $E(RD)=0.605$ $E(SP)=0.737$	0.34	0.864
	0.38	0.689
	0.42	0.519
	0.46	0.417
	0.50	0.306
	0.54	0.247

图 8 (b) 为半对数坐标系中热导率随孔隙率的变化关系。图中红色虚线是 Côté 等<sup>[12]</sup>提出的天然干砂热导率经验关系式(式(4),  $\chi=0.75$ ,  $\eta=1.2$ )。明显看出,半对数坐标系中,天然石英质河砂的热导率和孔隙率表现出良好的线性减小关系,这与前人的众多研究结果吻合<sup>[6-7, 12]</sup>,也间接反映了本文热导率测试结果的准确性和可靠性。值得注意的是,不同颗粒形貌河砂热导率随孔隙率减小而降低的速率不同,河砂 A 的变化速率最大、河砂 B 次之,依次类推,河砂 E 最小。此外,Côté 等<sup>[12]</sup>经验关系式难以准确描述本文数据点的变化趋势,需要对其进行修正。



(a) 常规坐标系中  $k$  与  $n$



(b) 半对数坐标系中  $k$  与  $n$

图 8 热导率随孔隙率的变化规律

Fig. 8 Evolution of thermal conductivity with porosity

根据式(4)可知,当孔隙率  $n=0$  时,干砂热导率  $k_d=\chi$ ,其值相当于砂颗粒热导率  $k_s$ 。本文采用 Johansen<sup>[18]</sup>提出的土固体颗粒热导率估算方法计算  $k_s$ :将砂颗粒中矿物组分划分为石英和其他矿物两类;根据石英含量  $q$  是否高于 20%选择相应的估算公式。5 种河砂的石英含量  $q$  在 96%~98%范围内且相互之间差异较小,此处采用石英含量均值  $q_{av}=0.9743$  估算  $k_s$ :

$$k_s = 2.0^{1-q} \times 7.7^q = 7.509 \text{ (W/m} \cdot \text{K)} \quad (7)$$

由此可知,Côté 等<sup>[12]</sup>提出的  $\chi=0.75 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  与试验河砂  $k_s$  值相差较大,这也是式(4)无法准确描述热导率测试结果的重要原因。将  $k_s=7.509 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  设置为拟合直线的截距  $\chi$ ,对数据点重新进行线性拟合,其结果如图 8 (b) 所示。明显看出,相比于式(4),新的

线性关系能更好地反映热导率和孔隙率的变化规律,拟合相关系数  $R^2=0.99$  较高。此外,拟合直线的斜率,即参数  $\eta$  各不相同,从河砂 A 至河砂 E,  $\eta$  值由 3.901 逐渐减小至 2.752。不同河砂之间参数  $\eta$  值的变化,恰恰反映了颗粒形貌对热导率存在重要影响。

### 3.3 颗粒形貌影响

图 9 为河砂颗粒圆度/球度期望值与参数  $\eta$  的相关关系。可以看出:整体而言,参数  $\eta$  随  $E(RD)/E(SP)$  值的增大而逐渐减小,其中  $\eta$  与  $E(RD)$  表现为较好的线性关系,而  $\eta$  与  $E(SP)$  的相关关系不显著。 $\eta$  值减小表示干砂热导率  $k_d$  对孔隙率  $n$  变化的敏感度降低,即相同  $n$  变化幅度下,具有浑圆颗粒形貌特征的干砂热导率变化幅度较棱角颗粒形貌特征的干砂小。对不同河砂而言,在矿物组分和孔隙率基本相同的情况下,其相互之间固体颗粒和孔隙气体导热性能大致相当。因此,造成干砂热导率值差异的主要原因是颗粒间接触性状的不同。浑圆颗粒特征的干砂具有较高热导率值、较低  $\eta$  值,说明其颗粒接触性状(配位数、颗粒接触面积)优于多棱角颗粒的干砂。在建筑材料种类限定的工程实际中,若要获得较高的导热性能,应尽可能选择颗粒浑圆的类型。然而,加工浑圆颗粒会增加材料成本,降低经济性,在满足设计要求的前提下,应努力寻求两者的最优平衡点。

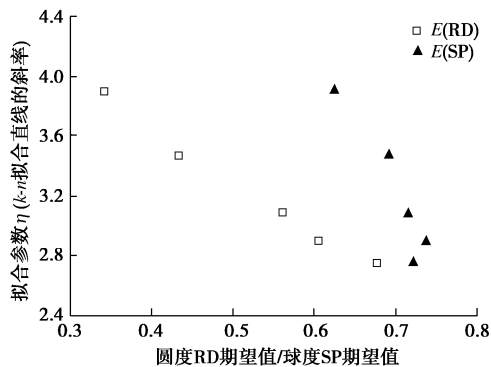


图 9 拟合参数  $\eta$  与圆度期望值/球度期望值的关系

Fig. 9 Relationships between fitting parameter  $\eta$  and expected value of roundness/sphericity

为了进一步定量描述颗粒形貌对干砂热导率  $k_d$  的影响,本文引入“平均形貌因子”  $A_m$  来建立其与  $k_d$  相互关系,  $A_m$  为颗粒圆度期望值  $E(RD)$  和球度期望值  $E(SP)$  的算术平均,即

$$A_m = \frac{E(RD) + E(SP)}{2} \quad (8)$$

图 10 为平均形貌因子  $A_m$  与参数  $\eta$  的相关关系。两参数间表现出良好的线性减小关系,拟合直线的表达式为 ( $R^2=0.99$ ):

$$\eta = 6.476 - 5.318 A_m \quad (9)$$

式 (9) 不仅解决了单一形貌特征参数圆度  $RD$ /球度

SP 与参数  $\eta$  或热导率  $k_d$  难以直接建立关系的局限,还将颗粒形貌对  $k_d$  的影响规律,直观、定量地表现出来。将式 (9) 代入式 (4),并联合式 (7) 可以得到新的干砂热导率  $k_d$  估算公式:

$$\left. \begin{aligned} k_d &= (2.0^{1-q} \times 7.7^q) \times 10^{-(\alpha-\beta A_m)n} \quad (q > 0.2), \\ k_d &= (3.0^{1-q} \times 7.7^q) \times 10^{-(\alpha-\beta A_m)n} \quad (q \leq 0.2) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中,  $\alpha$ ,  $\beta$  为与砂颗粒矿物组分相关的无量纲参数。相比于 Côté 等<sup>[12]</sup>提出的计算式(式(4)),计算式(10)将矿物组分和颗粒形貌对干砂热导率的影响考虑其中,这与实际情况更符合。

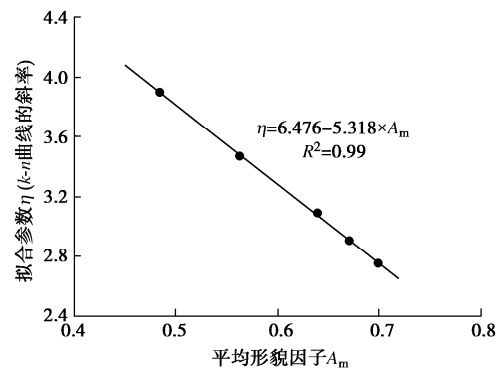


图 10 拟合参数  $\eta$  与平均形貌因子  $A_m$  的关系

Fig. 10 Relationship between fitting parameter  $\eta$  and average shape factor  $A_m$

为进一步验证本文所提干砂热导率计算模型的适用性,将模型计算结果和实测数据进行对比,结果如图 11 所示。在  $k_d$ - $A_m$ - $n$  三维坐标系中,干砂热导率  $k_d$  随平均形貌因子  $A_m$  增大、孔隙率  $n$  减小而逐渐增大,这与前述的试验结果完全一致。模型计算式(式(10),  $q>0.2$ )对应的曲面和实测数据点吻合良好(相关系数  $R^2=0.98$ ),较好地描述了热导率和颗粒形貌、矿物组分和孔隙率之间的相互关系。估算热导率与实测热导率之间的绝对百分比误差  $\delta$  低于 8%,均方根误差 RMSE 为 0.0066 W/m·K,满足工程设计要求。

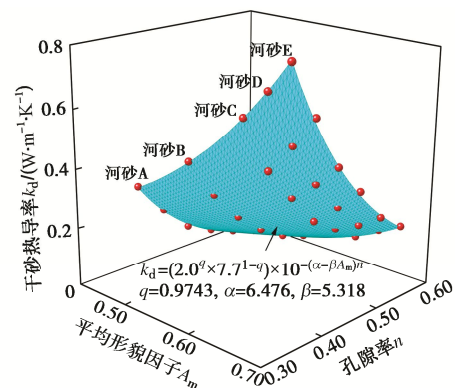


图 11 预测与实测干砂热导率对比

Fig. 11 Comparison between predicted and measured thermal conductivities for various dry sands

## 4 讨 论

为进一步明确颗粒形貌对无黏性土热传导特性的影响,本文从细观尺度对砂颗粒间的接触性状和传热机制进行讨论。图12为不同饱和状态下两个砂颗粒在接触面上的导热过程。可以看出,两个砂颗粒之间的接触是由众多凹凸不平的微接触面组成,不同微接触面之间具有一定的距离,并形成微孔隙。图中箭头表示通过颗粒微接触面、微孔隙气体和液体所传递的热量。对于干燥状态,热的砂颗粒将热量通过微接触面、气体传向冷的砂颗粒。气体的导热性能相对较差,热量主要通过微接触面在冷、热颗粒间单向传递(如图12(a)所示)。微接触面上的接触热阻主要来源于:颗粒表面凹凸不平产生的热流线收缩和声子边界散射(接触凸起的直径接近声子平均自由程长度)<sup>[19]</sup>。这从细观角度验证了干砂热导率与颗粒粒径、颗粒形貌密切相关。此外,砂颗粒间的微接触面积还与接触应力、颗粒刚度等因素相关<sup>[20]</sup>。对于湿润和饱和状态,微接触面和微孔隙逐渐被液体浸润和填充,同时气体排出,液体在砂颗粒表面形成水膜,对热量在冷、热颗粒间的传递发挥“桥接”重要作用,宏观上表现为砂土热导率随饱和度增加而迅速降低<sup>[2-3, 5]</sup>(如图12(b), (c)所示)。

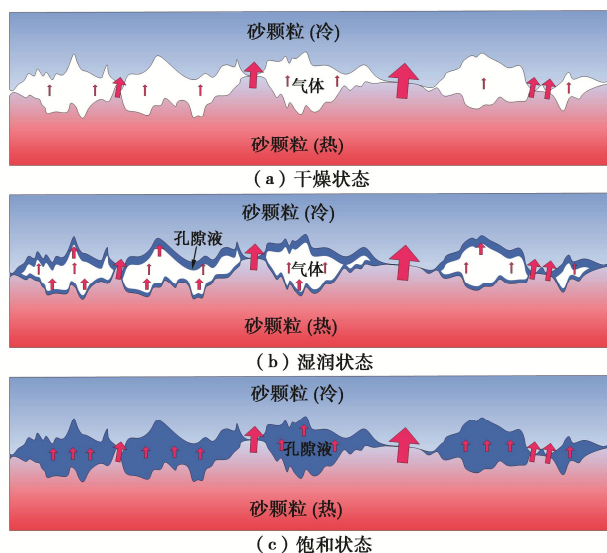


图12 不同饱和状态下砂颗粒接触导热示意图

Fig. 12 Schematic diagram of contact thermal conduction for two sand particles at different saturation states

需要指出的是,图6所示的5种河砂颗粒形貌测试结果都是二维尺度的,只能反映砂颗粒的平面形貌特征,表面粗糙度、体积、厚度等三维特征未能得到体现。颗粒的三维形貌特征可以借助于激光扫描仪等进行定量评价,探究砂颗粒三维形貌特征与砂土热导率的相互作用规律对于进一步揭示散粒岩土材料的传热机制具有重要意义。

关于颗粒形貌对散粒材料热传导特性影响的研究多集中于人工材料,具有可控的颗粒形貌和材料属性。图13(a)中将相似级配的规则和不规则形状玻璃珠混合,利用热探针设备测试不同相对密度 $I_D$ 下干燥混合物的热导率 $k$ 。结果显示,热导率 $k$ 随整体规则度OR增加而增加,其中OR为长宽比AR、凸度CX和球度SP的算数平均值<sup>[16]</sup>。这与图8, 10中热导率的变化规律相一致。然而,图13(b)所示的模拟结果显示:椭球颗粒(杨氏模量 $E=5.0 \times 10^9 \text{ kg}(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ ;泊松比 $\mu=0.3$ )集合体的热导率 $k$ 在 $AR=1.0$ 附近为最低,AR增大或减小都会引起 $k$ 增大<sup>[21]</sup>。换言之,颗粒形状越浑圆,其相应散粒材料的导热能力越差。造成该差异的主要原因是介质传热过程中的外部应力环境和颗粒形变的影响。此外,有研究指出,颗粒材料属性、颗粒级配也会对颗粒形貌与热导率间的相互关系产生影响<sup>[16,20]</sup>。

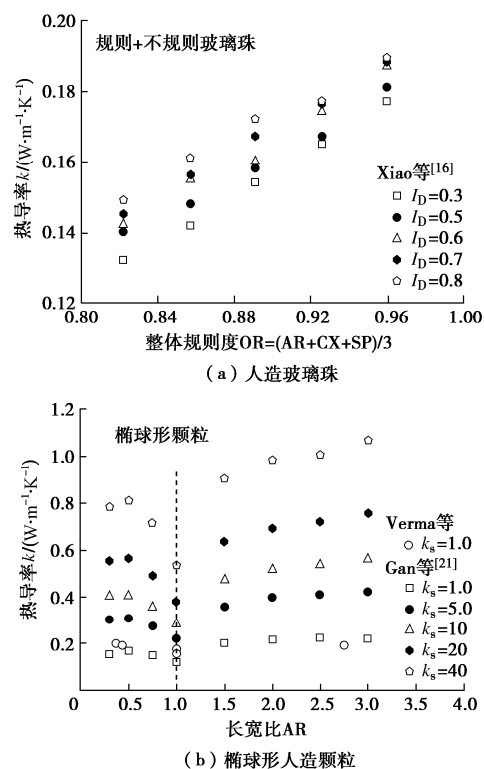


图13 人造颗粒材料热导率与颗粒形貌的关系

Fig. 13 Correlations of thermal conductivity with particle shape for various artificial granular materials

总之,颗粒形貌对无黏性土热导率的影响不是单一的,与矿物组分、颗粒级配、应力环境、形变等因素也密切相关,在其他影响因素干扰的背景下,颗粒形貌和热传导特性之间的相互关系会变得更加复杂。

## 5 结 论

本文研究了5种天然石英质河砂颗粒的二维形貌特征、干砂热导率演化特征和颗粒形貌对热导率的影响规律,并从细观尺度探讨了砂颗粒接触传热的机

制,得出以下4点结论。

(1) 天然河砂颗粒圆度和球度值的统计分布具有正态分布特征,不同赋存环境下的河砂颗粒形貌特征差异明显,统计分布的期望值可作为定量表征颗粒形貌特征的参数。

(2) 相同孔隙率下,干砂热导率值的大小顺序和颗粒圆度/球度期望值一致。随着孔隙率的增加,不同干砂之间热导率的差异减小,颗粒接触传热效率受颗粒形貌的影响减弱。

(3) 引入平均形貌因子  $A_m$  用以建立颗粒形貌与热导率的相互关系,提出了考虑颗粒形貌和矿物组分的干砂热导率计算新模型,该模型计算结果与实测数据吻合较好,具有良好的精确度和适用性。

(4) 颗粒形貌对干砂热导率的作用规律并非单一,砂颗粒间接触性状是细观尺度的三维立体问题,除颗粒形貌外,还与接触应力、颗粒粒径和刚度、孔隙液等密切相关,探究复杂应力环境下,三维形貌特征和颗粒形变、破碎对砂土热传导特性的影响规律,是进一步揭示无黏性岩土材料传热机制的重要内容。

#### 参考文献:

- [1] NOOROLLAHI Y, SAEIDI R, MOHAMMADI M, et al. The effects of ground heat exchanger parameters changes on geothermal heat pump performance-A review[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, **129**: 1645-1658.
- [2] 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.
- [3] 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))
- [4] 张涛, 蔡国军, 刘松玉. 南京地区典型土体热学特性与预测模型[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2014, **44**(3): 655-661. (ZHANG Tao, CAI Guojun, LIU Songyu. Thermal properties and prediction model of typical soils in Nanjing area[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2014, **44**(3): 655-661. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] HAIGH S K. Thermal conductivity of sands[J]. *Géotechnique*, 2012, **62**(7): 617-625.
- [7] NASIRIAN A, CORTES D D, DAI S. The physical nature of thermal conduction in dry granular media[J]. *Géotechnique Letters*, 2015, **5**(1): 1-5.
- [8] YUN T S, SANTAMARINA J C. Fundamental study of thermal conduction in dry soils[J]. *Granular Matter*, 2008, **10**(3): 197-207.
- [9] VINCENTI W G. *Introduction to Physical Gas Dynamics*[M]. Hoboken: Krieger Pub Co, 1975.
- [10] BRESME F, RÖMER F. Heat transport in liquid water at extreme pressures: a non equilibrium molecular dynamics study[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2013, **185**: 1-7.
- [11] ZOU J E, BALANDIN A. Phonon heat conduction in a semiconductor nanowire[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **89**(5): 2932-2938.
- [12] CÔTÉ J, KONRAD J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, **42**(2): 443-458.
- [13] KRUMBEIN W C, SLOSS L L. *Stratigraphy and Sedimentation*[M]. San Francisco: W H Freeman, 1951.
- [14] LADD R S. Preparing test specimens using undercompaction[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1978, **1**(1): 16.
- [15] ASTM. Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure[S]. ASTM standard D5334-14, 2014.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] JOHANSEN O. *Thermal Conductivity of Soils*[D]. Trondheim: University of Trondheim, 1975.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] GAN J Q, ZHOU Z Y, YU A B. Effect of particle shape and size on effective thermal conductivity of packed beds[J]. *Powder Technology*, 2017, **311**: 157-166.