

DOI: 10.11779/CJGE20230900

# 岩土热导率预测正三棱柱-准内切球单元结构模型

褚召祥<sup>1,2</sup>, 王一鸣<sup>1</sup>, 李晓昭<sup>2,3</sup>, 董凯军<sup>4</sup>, 顾晓滨<sup>4</sup>, 贾国圣<sup>5</sup>

(1. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 深地科学与工程云龙湖实验室, 江苏 徐州 221116; 4. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640; 5. 西安交通大学人居学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 借鉴细观力学均质化思想, 采用热电类比-集总参数法, 在细观尺度建立了固流两相(干燥或饱和)岩土热导率预测正三棱柱-准内切球单元结构(Unit cell)模型, 并基于34组文献试验数据和238组模型预测数据进行了对比分析。研究表明: ①正三棱柱-准内切球单元结构在克服球、圆柱单元结构固有的空间修正缺陷同时, 相对立方体-准内切球单元结构(孔隙率0.035~0.473)孔隙率适用范围扩展至0~0.6, 可覆盖大部分天然岩土介质孔隙率范围; ②MATLAB数据可视化显示正三棱柱-准内切球单元结构模型预测热导率随孔隙率增大呈凹形降低, 低孔隙率(<0.2)岩土热导率预测结果偏低且趋向串联模型下限, 高孔隙率(0.4~0.6)岩土热导率预测结果与试验测试值吻合度较高; ③两相干燥状态下本模型相对其他单元结构模型预测效果更好, 均方根误差RMSE和归一化均方根误差NRMSE最小, 分别为0.89 W/m·K和31%; ④考虑岩土孔隙水形态和含量, 提出的正三棱柱-准内切球单元结构可扩展应用于固液气三相非饱和状态, 并基于孔隙颗粒结构、孔隙水形态提出进化视角下固液气多相组分和多孔颗粒结构主导的岩土热导率预测关联式单元结构模型研究的新思路。

**关键词:** 岩土介质; 表观热导率; 孔隙率; 关联式; 演化

**中图分类号:** TU432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2024)12-2580-11

**作者简介:** 褚召祥(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土传热传质方面的研究工作。E-mail: chulongxiang@cumt.edu.cn。

## Regular triangular prism-quasi-inscribed sphere unit cell model for predicting thermal conductivity of geomaterials

CHU Zhaoxiang<sup>1,2</sup>, WANG Yiming<sup>1</sup>, LI Xiaozhao<sup>2,3</sup>, DONG Kaijun<sup>4</sup>, GU Xiaobin<sup>4</sup>, JIA Guosheng<sup>5</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, Xuzhou 221116, China; 3. Yun Long Lake Laboratory, Xuzhou 221116, China; 4. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China; 5. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Inspired by the homogenization theory in the field of micromechanics, a regular triangular prism-quasi-inscribed sphere unit cell model at the meso-scale for predicting the thermal conductivity of two-phase (dry or water-saturated) geomaterials is proposed by using the lumped parameter thermo-electric analogy method. The performance of the established model is evaluated with 34 sets of thermal conductivity experimental data and 238 sets of thermal conductivity predictions. The results indicated that: (1) The regular triangular prism-quasi-inscribed sphere unit cell is a real representative elementary volume that can characterize the macroscopic continuum geomaterials and overcome the inherent spatial correction defects of the sphere and cylinder unit cell structures. Besides, this model can be used for soil-rocks with the porosity of 0~0.6, covering most porosity range of the natural geomaterials. (2) The MATLAB data visualization illustrate that the proposed model gives thermal conductivities concavely decreasing with porosity, and the model performance is better at relative high porosity (0.3~0.6) than those at low void ratio (<0.25). (3) Taking the

typical geomaterials under two-phase condition as an example, this model has better predictive performance than other unit cell theoretical models, especially under dry condition (the RMSE and NRMSE are, respectively, 0.89W/(mK) and 31%). (4)

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(42107156, 42230704); 111 创新引智计划(B23003); 江苏省自然科学基金项目(BK20231501); 徐州市科技计划(KC23383); 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室开放基金项目(E039kf0501)

**收稿日期:** 2023-09-15

Finally, the unit cell model proposed herein can be extended to three-phase unsaturated state (general solid-liquid-gas), and a promising initiative, i.e., to study the effects of component and structure on the effective thermal conductivity of porous-granular geomaterials from an evolutionary perspective, is conjectured based on pore/particle structure and pore water morphology, aiming to provide a new way for further investigating the macroscopic thermo-mechanical behavior of tanglesome geomaterials.

**Key words:** geomaterial; effective thermal conductivity; porosity; correlation; evolution

## 0 引言

岩土热导率作为表征岩土介质热传导能力的重要热物性参数,特别是近年来随着中国双碳目标提出以及能源结构调整(地热、天然气水合物等地质能源开发比重增加),其研究日益受到国内外学者的关注<sup>[1]</sup>。但是,由于部分岩土试样获取困难,热导率直接测试所需设备和环境复杂,导致原位/室内试验测试周期与成本较高。因此,大量学者转而尝试分析岩土热导率的影响因素,开展岩土热导率预测模型的研究工作。然而与能源、化工、材料等领域传统多孔/颗粒介质如燃料电池、流化床和泡沫金属不同,岩土介质组分多样,结构随机,统计不确定性更强,特殊组构导致的传热复杂性使得完全反映真实状况的岩土热导率预测关联式模型建立十分困难,亟需深入研究。

作为典型的多相组分-多孔颗粒介质,可基于微细观力学领域均质化思想建立岩土介质热导率预测周期性单元结构模型<sup>[2]</sup>。该类研究可追溯到 20 世纪 40、50 年代<sup>[3]</sup>。1950 年, Gemant<sup>[4]</sup>提出了采用热电类比方法分析土颗粒为球体单元结构的热导率,是该类研究的雏形。以该研究为基础, De<sup>[5]</sup>提出了类似的理想化单元结构模型,并引起 De Vries 和 Makowski 等的关注与在 Nature 的后续讨论与评论<sup>[3]</sup>。1979 年, Zehner 等建立了内部分别为球和圆柱的 1/8 圆柱单元结构模型,并由 Hsu 等<sup>[6]</sup>进行了修正。1983 年, Gori<sup>[7]</sup>提出了平行热流线假设下的一维稳态非饱和冻土热导率预测模型,随后于 2002 年<sup>[8]</sup>对原模型进行改进使其适用于非饱和融土、模拟火壤等。Hsu 等<sup>[9]</sup>在 1995 年提出了周期性分布多孔介质有效热导率预测的集总参数模型(lumped parameter model),考虑接触热阻对多种几何单元结构进行 2D 和 3D 理论分析。该方法假定研究对象单元结构内部温度场均匀且仅为一维热传导,将单元结构分为不同平行层,通过串并联方式计算得到总热阻。上述研究多聚焦岩土等多孔介质单元结构的特定几何特征,受其限制未涉及天然岩土介质孔隙率适用范围分析。

近年来,学者们进一步开展了岩土热导率预测单元结构模型的研究工作。Chen<sup>[10]</sup>在总结以往学者研究的基础上建立了内部颗粒为球的砂土热导率预测圆柱

单元结构模型,但受其几何形状限制,该模型孔隙率适用范围仅为[0.33, 1]。Gori 等、Corasaniti 等<sup>[12]</sup>提出了土热导率预测的准球形土颗粒立方体和球形土颗粒四棱柱单元结构模型,以 0.4764 为分界点覆盖[0.0349, 1]孔隙率范围,但在高饱和度时,上述理论模型失效。受其启发,Chu 等<sup>[13]</sup>针对 Haigh 模型在孔隙率方面的局限性进行了补充,可填补[0, 0.33]这一低孔隙率范围岩土热导率的预测需求。类似地, Jia 等<sup>[14]</sup>等通过特定几何单元结构假设,以 0.2146, 0.4764 为分界点将[0, 1]孔隙率范围分三区间建立了岩土热导率预测方柱单元结构模型<sup>[15]</sup>。对比分析后发现该类模型需要特别关注颗粒接触、模型修正、孔隙水分布形式假设以及孔隙率/比的适用范围(对应假设结构几何特征)。已有大量该类问题的研究工作,但受制于岩土颗粒及单元结构几何形状的高度理想化假设,部分该类模型需进行空间修正,且同样缺乏对大部分天然岩土介质孔隙率范围(0~0.6, 孔隙比 0~1.5)的关注。

基于上述文献分析,笔者针对岩土多孔介质热导率预测单元结构模型研究的历史发展脉络进行了梳理分析,认为该类问题的关键是如何采用相关数学物理理论与方法建立岩土多孔介质特征单元结构热导率与相关参数(如固体基质(骨架)、孔隙内流体水或空气热导率,孔隙率(比),饱和度以及单元结构几何特征参数)之间的关系。因此,在前人已有研究的基础上采用热电类比-集总参数法建立了一种新的岩土热导率预测正三棱柱-准内切球单元结构模型。该模型可以克服球、圆柱单元结构需要空间修正的弊端,同时基本满足天然岩土的自然孔隙率全范围(0~0.6)。由于理论计算的复杂性,本文首先开展两相(干燥/饱和)状态分析,为后续拓展至三相非饱和状态奠定基础。

## 1 理论模型

### 1.1 几何假设

宏观连续岩土体在微细观力学均质化思想的指导下可简化为两相或三相周期性三维几何单元结构。本模型考虑岩土干燥和饱和两相状态,在笛卡尔坐标系下进行几何建模与分析。在单元结构模型中,岩土固流两相被约束在单个正三棱柱单元结构中,固体颗粒以准球体形式与正三棱柱单元结构共享质心,正三棱

柱棱高与准球体直径始终保持相等。定义临界状态如图 1 (d) 所示, 此时岩土颗粒为球形, 与正三棱柱单元结构五内表面均相切, 两相状态下自由流体填充于空隙。通过改变正三棱柱上下底面正三角形的边长来控制孔隙率大小 (棱高始终保持不变)。当边长在指定范围内变动时, 单元结构孔隙率  $\Phi$  也随之在  $[0, 0.597]$  范围内变动, 该范围基本囊括了天然岩土材料孔隙率全范围。上述假设条件下, 正三棱柱单元结构边长收缩调整过程中固相颗粒始终会超出单元结构三侧边界面, 参考学者 Gemant<sup>[4]</sup>和 Gori 等<sup>[11]</sup>的处理方法对单元结构局部进行切分, 不考虑超出正三棱柱单元结构侧面的球冠, 以此保证孔隙率的变化范围和增减形式与假设一致。同时, 由于低孔隙率时被切球冠会产生交错进而导致不同组分体积计算与高孔隙率下不同, 故在建立热导率计算模型时以 0.144 为界分两孔隙率区间计算, 见图 1 (a), (c)。此外, 在具体的几何参数中, 正三棱柱单元结构内的固体球颗粒半径根据实际岩土材料平均粒径尺寸确定, 半径设为  $R_1$ 。根据几何假设, 单元结构棱高相应为  $2R_1$ , 上下底面正三角形边长设为  $L$ , 水与空气的热导率分别为  $\lambda_w$ ,  $\lambda_a$ , 统一为流体热导率, 用  $\lambda_f$  表示,  $\lambda_s$  为固相颗粒热导率。引入无量纲几何特征因子  $\alpha$ , 表征单元结构底面正三角形边长与准球形颗粒半径的比值, 即  $\alpha = L / R_1$ 。 $\alpha$  与  $L$  之间正相关, 当  $\alpha$  即  $L$  改变时, 模型对应的孔隙率也随之发生改变。进一步引入  $r_0 = \sqrt{3}L / 6$ ,  $r_1 = \sqrt{3}L / 3$  两个参数对后续计算过程进行分类简化。数学意义上,  $r_0$  与  $r_1$  分别代表正三角形内切圆和外接圆的半径。进一步引入无量纲热导率差异化因子  $\xi = 1 - \lambda_f / \lambda_s$  简化计算过程。当流体热导率越接近固体

热导率时,  $\xi$  越接近 0, 表征两相组分热导率差异性越小。

## 1.2 物理假设

岩土复杂的组分和结构使其传热过程很难用严格的理论模型进行精确表征。为了能够兼顾模型结构的鲜明性和计算的合理性, 对传热物理过程假设如下:

(1) 模型只考虑干燥和饱和两相状态, 忽略传热过程中流体迁移可能导致的重分布和结构变化。

(2) 孔隙/颗粒细观尺度忽略对流传热, 室温且常温温度梯度下不考虑热辐射, 即本模型在两相状态只考虑导热这一主要传热方式, 且无化学反应和内热源。

(3) 常温常压下, 不考虑热导率的温变性, 同时两相间的接触视为理想接触, 不考虑接触热阻。

(4) 基于热电类比-集总参数法的思想, 认为热流方向平行  $Z$  轴, 一维热传导下对单元结构内部穿过不同相态时的热流路径进行平行热流线简化假设。

## 1.3 有效热导率的计算

本模型在进行热导率计算时, 采用热电类比-集总参数法<sup>[9]</sup>对单元结构整体热阻分段进行计算。如几何假设中所述, 整体孔隙率范围内需要分高孔隙率 ( $L > \sqrt{3}R_1$ ) 和低孔隙率 ( $L < \sqrt{3}R_1$ ) 两种情况进行计算。

(1) 高孔隙率 ( $0.144 < \Phi < 0.597$ )

高孔隙率下, 几何特征因子  $\alpha \in (\sqrt{3}, 2\sqrt{3})$ , 对应孔隙率范围为  $(0.144, 0.597)$ 。如图 2 (a) 所示, 此时传热路径有两种: ①流体-固体-流体; ②纯流体相。在两种热流路径分区的基础上, 根据热阻分析法分为 3 个计算区域, 其热阻分别命名为  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , 总热阻命名为  $R_t$ , 如图 2 (b) 所示。

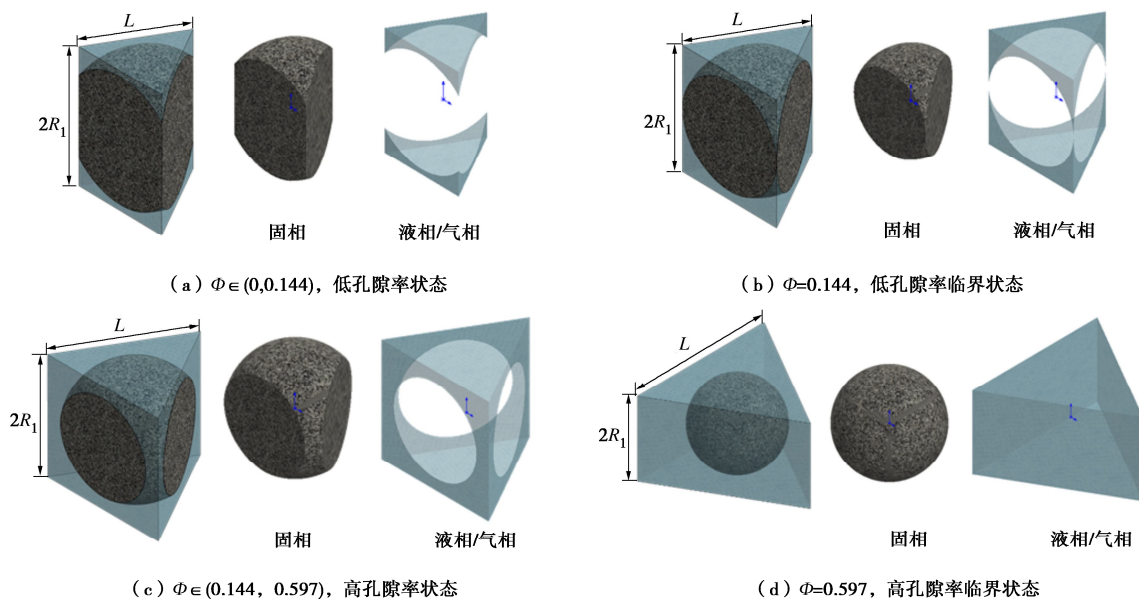


图 1 本模型在高低孔隙率状态下的 3D 示意图

Fig. 1 3D schematic diagram of model under high and low porosities

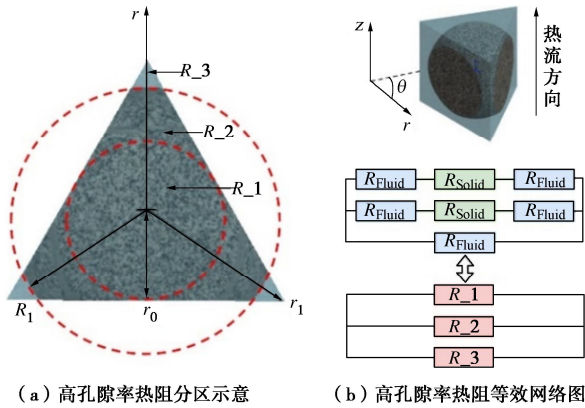


图 2 高孔隙率热阻分区及等效网络示意图

Fig. 2 Schematic diagram of equivalent thermal resistance partition and network under high porosity

根据定义, 单元结构孔隙率  $\Phi$  可表示为

$$\Phi = \frac{V_{\text{void}}}{V_{\text{total}}} = \frac{V_{\text{total}} - V_{\text{solid}}}{V_{\text{total}}} = \frac{V_t - V_s}{V_t} \quad (1)$$

式中:  $V_{\text{solid}}$  为固相体积, 简写为  $V_s$ ;  $V_{\text{void}}$  为孔隙体积, 简写为  $V_v$ ;  $V_{\text{total}}$  为单元体总体积, 简写为  $V_t$ 。

正三棱柱单元结构总体积  $V_t$  为

$$V_t = \frac{\sqrt{3}}{2} R_1^2 L \quad (2)$$

考虑固体球颗粒被正三棱柱三侧面剖切的球冠, 固相体积  $V_s$  的计算式如下:

$$V_s = V_{\text{球}} - 3V_{\text{球冠}} = -\frac{\sqrt{3}}{72} \pi L^3 + \frac{\sqrt{3}}{2} \pi R_1^2 L - \frac{2}{3} \pi R_1^3 \quad (3)$$

将式 (2), (3) 代入式 (1) 中, 可以得到孔隙率与正三棱柱单元结构上下面正三角形边长的关系式:

$$\Phi = \frac{\frac{\pi}{36} \left(\frac{L}{R_1}\right)^3 + \left(\frac{L}{R_1}\right)^2 - \pi \left(\frac{L}{R_1}\right) + \frac{4\sqrt{3}}{9} \pi}{(L/R_1)^2} = \frac{\frac{\pi}{36} \alpha^3 + \alpha^2 - \pi \alpha + \frac{4\sqrt{3}}{9} \pi}{\alpha^2} \quad (4)$$

针对岩土材料或其他多孔介质, 一般均默认其孔隙率为已知 (可测/可算) 参数。对于给定孔隙率为  $\Phi$  的岩土材料, 需要反向确定引入参数  $\alpha$  用于后续计算。

欲求  $\alpha$ , 相当于求下面一元三次方程的根:

$$f(\alpha) = \frac{\pi}{36} \alpha^3 + (1 - \Phi) \alpha^2 - \pi \alpha + \frac{4\sqrt{3}}{9} \pi = 0 \quad (5)$$

进行求解, 得到

$$\alpha = -\frac{b'}{3a'} + 2\sqrt{\frac{p}{3}} \cos \left( \frac{1}{3} \arccos \frac{3\sqrt{3}q}{2p\sqrt{p}} \right) \quad (6)$$

$$\text{式中: } a' = \frac{\pi}{36}; \quad b' = 1 - \Phi; \quad p = \frac{432(1 - \Phi)^2 + \pi^2}{\pi^2}; \quad q = \frac{-108\pi(1 - \Phi) - 864(1 - \Phi)^3 - 4\sqrt{3}\pi^3}{9\pi}.$$

此时, 在高孔隙率情况下, 不同孔隙率都有唯一的  $\alpha$  可以通过式 (6) 来确定, 以此为基础进而分区计算高孔隙率下单元结构的等效热阻。

a) 假设正三棱柱内有一同轴等高圆柱, 其半径为  $r$ 。则当  $0 < r < r_0$  时, 作为第一热阻区域  $R_1$  进行计算。该区域热流穿过的横截面积为

$$S_1 = \pi r_0^2 \quad (7)$$

根据该区域的等效热阻结构, 取圆筒形热阻微元体, 在热流方向上可视为固流两相热阻串联<sup>[10, 13-15]</sup>, 其热阻可以表示为

$$dR_1 = 2\sqrt{R_1^2 - r^2} / (\lambda_s ds) + 2 \left( R_1 - \sqrt{R_1^2 - r^2} \right) / (\lambda_f ds) \quad (8)$$

式中: 微元体的热流截面面积  $ds = 2\pi r dr$ 。在  $r$  方向  $R_1$  可视为无数固流两相微元热阻并联<sup>[10, 13-15]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_1} &= \int_0^{r_0} \frac{1}{2 \left( R_1 - \sqrt{R_1^2 - r^2} \right) \lambda_f + 2\sqrt{R_1^2 - r^2} \lambda_s} \cdot 2\pi r dr \\ &= \int_0^{r_0} \frac{\lambda_s \lambda_f \pi r dr}{\lambda_s \left( R_1 - \sqrt{R_1^2 - r^2} \right) + \lambda_f \sqrt{R_1^2 - r^2}} \quad (9) \end{aligned}$$

引入  $\xi = 1 - \lambda_f / \lambda_s$  简化并进行积分后得到:

$$R_1 = -\xi^2 / \left\{ \lambda_f \pi R_1 [\ln(1 - \xi) + \xi - \ln \left( 1 - \xi \sqrt{1 - \frac{1}{12} \alpha^2} \right) - \xi \sqrt{1 - \frac{1}{12} \alpha^2}] \right\} \quad (10)$$

b) 当  $r_0 < r < R_1$  时, 为计算区域二, 对应热阻为  $R_2$ 。该区域热流穿过的总横截面积为

$$\begin{aligned} S_2 &= S_{R_1} - S_{r_0} - 3S_{\text{球冠投影}} \\ &= \pi R_1^2 - \pi r_0^2 - 3 \left[ 2 \arccos \frac{r_0}{R_1} / (2\pi) \cdot \pi R_1^2 - 2 \times \frac{1}{2} r_0 \sqrt{R_1^2 - r_0^2} \right] \\ &= \left[ \pi - 3 \arccos \frac{r_0}{R_1} \right] R_1^2 - \pi r_0^2 + 3 r_0 \sqrt{R_1^2 - r_0^2} \quad (11) \end{aligned}$$

取准圆筒形热阻微元体, 其热阻可由下式求得:

$$dR_2 = 2 \left( R_1 - \sqrt{R_1^2 - r^2} \right) / (\lambda_f ds) + 2 \sqrt{R_1^2 - r^2} / (\lambda_s ds) \quad (12)$$

式中:  $ds$  为准圆筒形微元体的热流截面面积,

$$ds = 2[\pi - 3 \arccos(r_0/r)] r dr \quad (13)$$

与  $R_1$  计算类似,  $R_2$  亦可以通过微元体的并联组合得到整体热阻:



$$\frac{1}{R_{-2}} = \int_{r_0}^{R_1} \frac{1}{2(R_1 - \sqrt{R_1^2 - r^2})} + \frac{2\sqrt{R_1^2 - r^2}}{\lambda_f \cdot 2rdr \left( \pi - 3\arccos \frac{r_0}{r} \right) + \lambda_s \cdot 2rdr \left( \pi - 3\arccos \frac{r_0}{r} \right)} dr$$

$$= \int_{r_0}^{R_1} \frac{\lambda_f \lambda_s \left( \pi - 3\arccos \frac{r_0}{r} \right) r dr}{\lambda_s \left( R_1 - \sqrt{R_1^2 - r^2} \right) + \lambda_f \sqrt{R_1^2 - r^2}}, \quad (14)$$

$$\rightarrow R_{-2} = 1 / \lambda_f \int_{r_0}^{R_1} \frac{\left( \pi - 3\arccos \frac{r_0}{r} \right) r dr}{R_1 - \xi \sqrt{R_1^2 - r^2}}. \quad (15)$$

c) 当  $R_1 < r < r_1$  时, 作为区域三进行计算, 该区域包含纯流体相态。该区域对应的热流截面面积为

$$S_3 = S_{\text{三角形}} - S_1 - S_2$$

$$= \sqrt{3}L^2/4 - \pi r_0^2 - \left[ \left( \pi - 3\arccos(r_0/R_1) \right) R_1^2 - \pi r_0^2 + 3r_0 \sqrt{R_1^2 - r_0^2} \right]$$

$$= \sqrt{3}L^2/4 - \left[ \pi - 3\arccos(r_0/R_1) \right] R_1^2 - 3r_0 \sqrt{R_1^2 - r_0^2}. \quad (16)$$

根据热阻的定义可以得出  $R_{-3}$  计算式为

$$R_{-3} = \frac{2R_1}{\lambda_f S_3}$$

$$= \frac{2R_1}{\sqrt{3}\lambda_f L^2/4 - \left[ \pi - 3\arccos(r_0/R_1) \right] R_1^2 - 3r_0 \sqrt{R_1^2 - r_0^2}}. \quad (17)$$

综上所述, 高孔隙率下两相状态三区域热阻均已得出, 正三棱柱单元体热流总横截面面积即边长为  $L$  正三角形面积为

$$S = \sqrt{3}L^2/4. \quad (18)$$

正三棱柱单元结构的热阻可视为上述 3 部分热阻的并联, 即

$$R_t = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{-i}} = 1 / \left( \frac{1}{R_{-1}} + \frac{1}{R_{-2}} + \frac{1}{R_{-3}} \right). \quad (19)$$

根据热阻的定义可以得到高孔隙率下正三棱柱单元结构的有效热导率  $\lambda_e$  可以表示为

$$\lambda_e = \frac{8R_1}{\sqrt{3}L^2 R_t}. \quad (20)$$

## (2) 低孔隙率 ( $0 < \Phi < 0.144$ )

当模型中几何特征因子  $\alpha < \sqrt{3}$  时, 固相球颗粒被三棱柱三侧面切除的球冠部分开始相互影响, 相较于高孔隙率的情况, 仅有流体-固体-流体一种热流路径。此时热阻分区仅为两个区域, 仍以  $R_1$ ,  $R_2$  来代表,  $R_t$  为代表单元结构整体等效热阻, 如图 3 所示。

与高孔隙率类似, 后续计算需要确定  $\Phi$  与  $\alpha$  的关系。此时, 单元结构内固体颗粒体积可由半径为  $R_1$  球体体积减去被正三棱柱三个侧面所切除的球冠体积得到:

$$V_s = V_{\text{球}} - 3(V_{\text{球冠}} - V_{\text{类纺锤体}}). \quad (21)$$

式中:  $V_{\text{球}} = \frac{4}{3}\pi R_1^3$ 。球冠体积计算式为

$$V_{\text{球冠}} = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\sqrt{R_1^2 - r_0^2}} \left( \sqrt{R_1^2 - r^2} - r_0 \right) r dr$$

$$= \pi \left( \frac{1}{3} r_0^3 - R_1^2 r_0 + \frac{2}{3} R_1^3 \right). \quad (22)$$

低孔隙率时, 固相球颗粒被正三棱柱相邻两侧面剖切部分相互重叠影响, 形成类纺锤体结构, 这种情况下必须考虑交错区域的体积计算, 如图 4 所示。

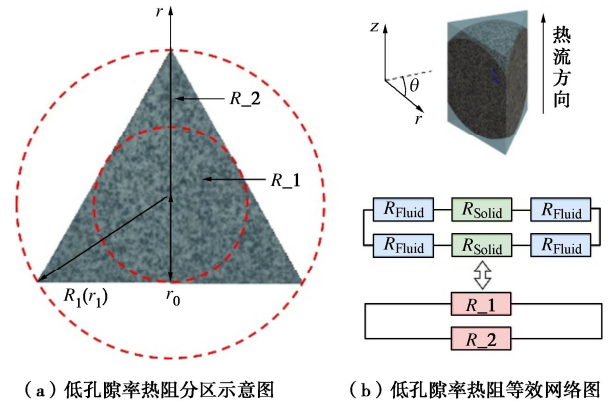


图 3 低孔隙率热阻分区及等效网络示意图

Fig. 3 Schematic diagram of equivalent thermal resistance partition and network under low porosity

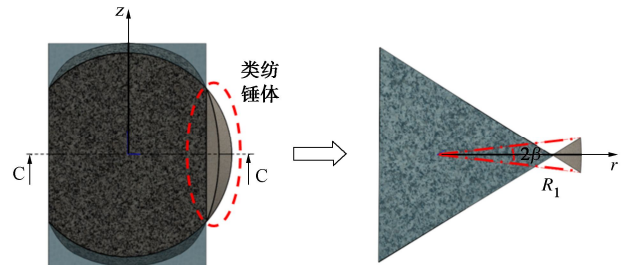


图 4 类纺锤体示意图 (柱坐标系)

Fig. 4 Spindle in a cylindrical coordinate

柱坐标系下该纺锤体体积可由下式计算:

$$V_{\text{类纺锤体}} = 4 \int_0^{\sqrt{R_1^2 - r_0^2}} dz \int_0^\beta d\theta \int_{r(\theta)}^{R_1} r dr$$

$$= \frac{4}{3} \int_0^{\arcsin \frac{\sqrt{R_1^2 - r_0^2} - \frac{1}{2}L}{2R_1}} \left( R_1^2 - L^2/12 \sin^2 \left( \frac{\pi}{6} - \theta \right) \right)^{\frac{3}{2}} d\theta. \quad (23)$$

$$\text{式中: } \beta = \arcsin \frac{\sqrt{R_1^2 - r_0^2} - \frac{1}{2}L}{2R_1}; \quad r(\theta) = \frac{\sqrt{3}}{6}L / \sin \left( \frac{\pi}{6} - \theta \right).$$

整合式(1), (2), (21)~(23)和关系式  $\alpha = L/R_1$ ,

$r_0 = \sqrt{3}L/6$  得到此情况下孔隙率  $\Phi$  与无量纲几何特征因子  $\alpha$  的关系:

$$\Phi = \frac{V_t - [V_{\text{球}} - 3(V_{\text{球冠}} - V_{\text{类纺锤体}})]}{V_t}$$

$$= \frac{V_t - [V_{\text{球}} - 3V_{\text{球冠}} + 3V_{\text{类纺锤体}}]}{V_t}$$

$$= \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} R_1 L^2 - \left[ \frac{4}{3} \pi R_1^3 - 3 \left( \frac{1}{3} r_0^3 - R_1^2 r_0 + \frac{2}{3} R_1^3 \right) \pi + 3 \cdot \right. \right.$$

$$\left. \frac{4}{3} \int_0^{\arcsin(\sqrt{R_1^2 - r_0^2} - \frac{1}{2} L) / (2 R_1)} \left( R_1^2 - \frac{L^2}{12 \sin^2(\frac{\pi}{6} - \theta)} \right)^{3/2} d\theta \right] \Bigg/$$

$$\frac{\sqrt{3}}{2} R_1 L^2 \Bigg\} = \left\{ \frac{1}{36} \pi \alpha^3 + \alpha^2 - \pi \alpha + \frac{4\sqrt{3}}{9} \pi - \frac{8\sqrt{3}}{3} \cdot \right.$$

$$\left. \int_0^{\arcsin(\frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{1}{12} \alpha^2} - \frac{1}{4})} \left( 1 - \frac{\alpha^2}{12 \sin^2(\frac{\pi}{6} - \theta)} \right)^{3/2} d\theta \right\} / \alpha^2. \quad (24)$$

与高孔隙率状态下已知  $\Phi$ , 通过理论求解一元三次方程获得  $\alpha$  不同, 低孔隙率下的式 (24) 很难解析求解。参考文献处理方法<sup>[14]</sup>, 根据  $\Phi$  与  $\alpha$  间正相关特点, 可采用二分法进行数值求解, 这里不再赘述。

低孔隙率下的热阻分两部分计算:

(1) 当  $0 < r < r_0$  时, 与高孔隙率时一致, 该区域热流穿过的横截面积可以仍用式 (7) 表示。该区域的热阻表示形式同样与高孔隙率时一致, 即式 (10)。

(2) 当  $r_0 < r < r_1$  时, 该区域作为热阻计算的第二分区, 计算方法与高孔隙率第二分区相同, 仅在积分域上有所差别, 其热阻可由以下积分求得:

$$R_2 = 1 / \left[ \lambda_r \int_{r_0}^{r_1} \frac{\left( \pi - 3 \arccos \frac{r_0}{r} \right) r dr}{R_1 - \xi \sqrt{R_1^2 - r^2}} \right]. \quad (25)$$

类似地, 结合式 (18) ~ (20), 低孔隙率下单元结构的有效热导率也能随之确定, 组成 (0, 0.597) 全范围。

## 2 模型验证与对比分析

### 2.1 参数选择与计算流程

为了验证本文模型的合理性, 以文献为参考设定固流相热导率, 如表 1 所示。基于本文模型的方程体系, 通过 MATLAB 软件编程计算高低不同孔隙率时

干燥/饱和固流两相状态典型多孔/颗粒岩土介质如砂土、砂岩的表观热导率。具体计算流程如图 5 所示。

表 1 固流相热导率参考值

Table 1 Thermal conductivity of solid-fluid pse		
相态(1 bar, 300K)	热导率(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	参考文献
固相 (石英)	7.69*	[10, 13]
液相 (水)	0.6096	
气相 (空气)	0.02619	

\*后续定量分析时, 黏土  $\lambda_s = 2 \text{ W/(m·K)}$ <sup>[16]</sup>。

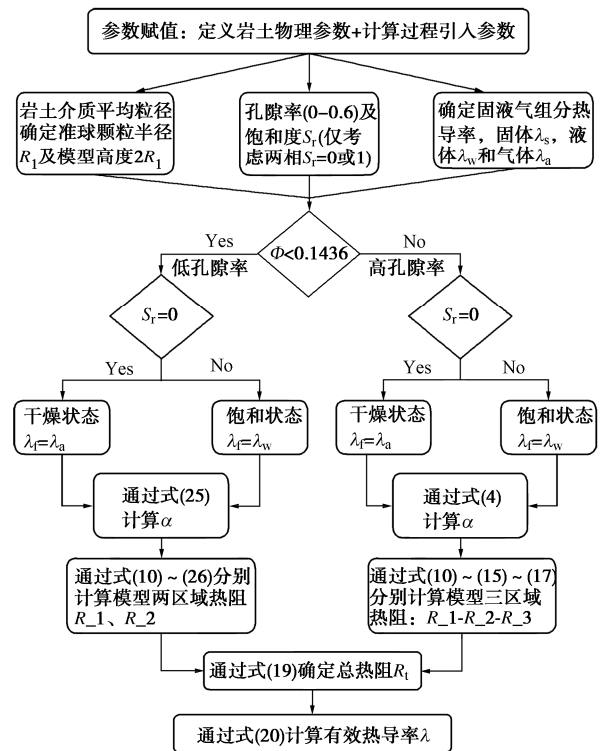


图 5 计算流程图

Fig. 5 Flow chart of calculation

### 2.2 模型对比分析

图 6 给出了本模型孔隙率  $\Phi$  随几何特征因子  $\alpha$  的变化曲线, 图 7 对比显示了本模型与其它模型在两相状态下 (干燥和饱和)、天然岩土孔隙率范围 (0~0.6) 内热导率预测结果的不同表现。

从图 6 中可以看出孔隙率  $\Phi$  与  $\alpha$  正相关, 随  $\alpha$  增加而增大, 且以  $\alpha = 1.732$  为分界点, 高低孔隙区可以实现无缝衔接。孔隙率  $\Phi$  与引入几何特征因子  $\alpha$  的关系十分重要, 影响表观热导率的计算。本文模型所提供的岩土孔隙率  $\Phi$  与引入几何特征因子  $\alpha$  的关系虽然复杂, 但可通过编制相关应用程序实现快速求解。已有研究表明<sup>[17]</sup>, 经典的岩土多孔-复合材料有效热导率计算混合理论模型中, Wiener 并串联模型可以确定热导率预测结果的上下限。图 7 显示结果表明, 本文模型的预测值均严格位于 Wiener 上下边界内, 说明

了其预测结果整体范围的合理性。同时,由于岩土多孔介质固流相组分热导率的差异性 ( $\lambda_s > \lambda_f$ ), 模型预测值随孔隙率的增加而减小, 整体变化规律与其他模型一致, 但在变化速率上相互间存在较为明显的差异。

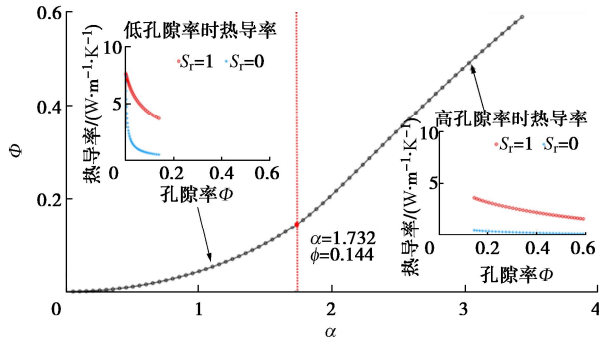


图6 孔隙率  $\phi$  随几何特征因子  $\alpha$  的变化曲线

Fig. 6 Variation of porosity  $\phi$  with  $\alpha$

除 Wiener 并串联模型外, 对图 7 所包含模型曲线解释说明如下。Chen<sup>[10]</sup>圆柱单元结构模型孔隙率适用范围为[0.33, 1], 不能包含[0, 0.6]这一天然岩土介质孔隙率主范围, 因此, 在[0, 0.33]孔隙率范围内以 Chu 等<sup>[13]</sup>模型作为补充。Jia 等<sup>[14-15]</sup>模型可将[0, 0.6]孔隙率分为高中低 3 种情况, 故分成 3 段进行绘制。Gori 等<sup>[11-12]</sup>建立的立方体和四棱柱单元结构模型可组成连续的[0.0349, 0.6]孔隙率范围, 但由于存在一定的问题未参与对比分析。Chen<sup>[18]</sup>基于不同孔隙率砂土热导率探针测试数据集中于[0.3, 0.5]孔隙率区间, 极低与较高孔隙率时需对曲线进行延伸分析。

以图 8 为例, 结合图 7 分析不同模型预测热导率随孔隙率的变化细节。在[0, 0.6]孔隙率范围内, 本文正三棱柱单元结构模型预测热导率随孔隙率增加呈凹形降低,  $d\lambda/d\phi < 0$  且  $d^2\lambda/d\phi^2 < 0$ , 尤其在低孔隙率阶段更为明显, 整体趋向于串联模型下限。

与此相反的则是低孔隙率下的 Jia 等<sup>[14-15]</sup>方柱单元结构模型, 预测热导率随孔隙率增加呈凸形降低,  $d^2\lambda/d\phi^2 > 0$ , 低孔隙率时趋向于并联模型上限。但是, Jia 等<sup>[14-15]</sup>模型在中高孔隙率时发生反转, 热导率随孔隙率增加由凸形降低转变为凹形降低, 即曲线整体呈 S 形, 存在反曲点  $d^2\lambda/d\phi^2 = 0$ 。Chen<sup>[10]</sup>和 Chu 等<sup>[13]</sup>圆柱单元结构模型则与 Jia 等<sup>[14-15]</sup>模型类似, 呈准 S 形曲线变化。

图 7 中还给出了本文后续用于模型验证的 34 组岩土热导率试验测试数据, 包括低孔隙率砂岩、黏土和标准砂, 可用于对比分析实际岩土介质热导率随孔隙率的变化。

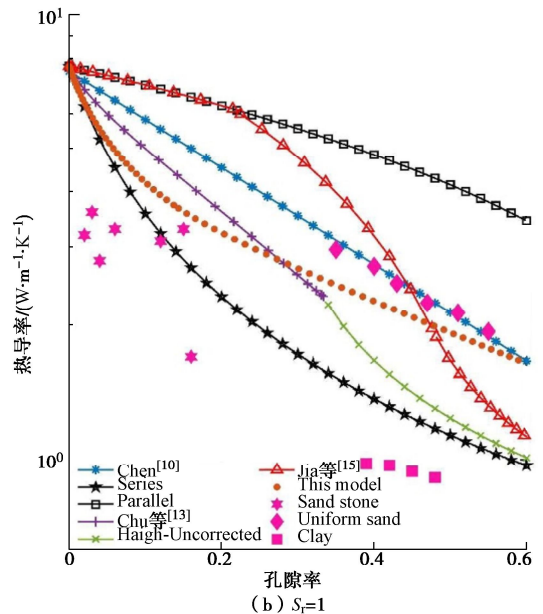
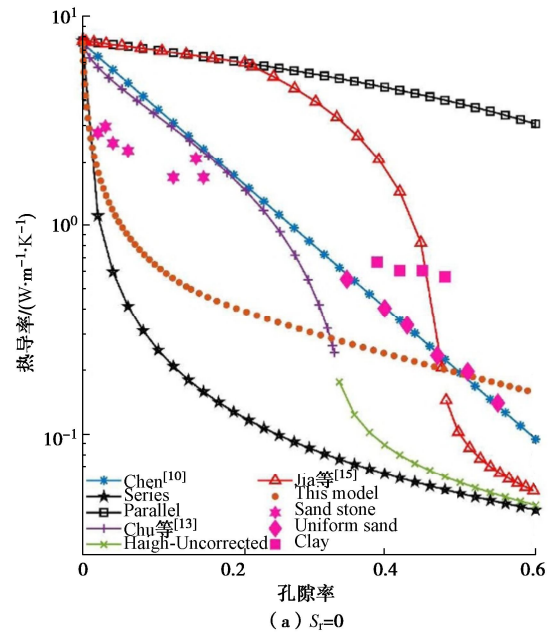


图7 不同模型两相(干燥/饱和)状态下热导率预测对比

Fig. 7 Predictions of effective thermal conductivity of different models under dry or saturated conditions

可以发现低孔隙率砂岩热导率随孔隙率增加可认为呈凹形降低; 黏土热导率试验测试值干燥时趋向于并联模型, 饱和时趋向于串联模型下限; 标准砂不论干燥和饱和热导率均随孔隙率增加线性降低。本文模型虽然能够在孔隙率范围上覆盖大部分天然岩土介质, 但对低孔隙率岩石、水土作用更为复杂的黏土适用性相对较差。高度理想化岩土单元结构强假设是出现上述偏差的原因之一, 固流组分热导率数量级差异则是另一原因。针对上述问题, 众多学者已聚焦文献[5]开展了大量的评论<sup>[3]</sup>, 此处不再赘述。

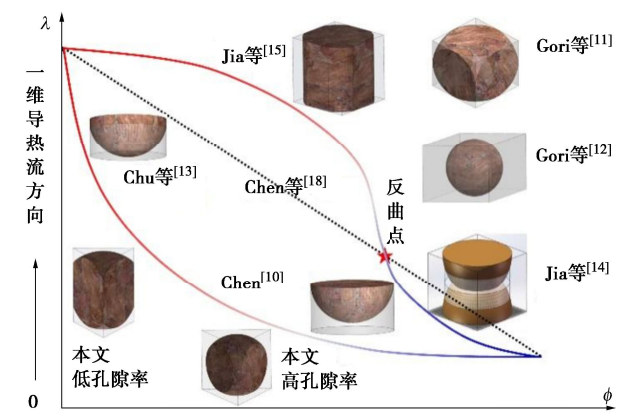


图 8 不同模型随孔隙率变化速率对比

Fig. 8 Comparison among various models

2.3 试验定量验证

为了进一步检验模型预测结果的准确性, 本文结合已有文献的岩土热导率试验测试数据, 对各理论模型和试验拟合的经验模型进行定量对比分析和验证, 符合模型对比和验证要求的相关数据列于表 2 中。

表 2 热导率试验测试结果

Table 2 Experimental data of thermal conductivity

岩土试样	孔隙率 $\phi$	饱和度 $S_r$	热导率/ ( $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ )
砂岩 <sup>[19]</sup>	0.02	0/1	2.8/3.2
	0.03	0/1	3/3.6
	0.04	0/1	2.5/2.8
	0.06	0/1	2.3/3.3
	0.12	0/1	1.7/3.1
	0.15	0/1	2.1/3.3
	0.16	0/1	1.7/3.0
标准砂 <sup>[13, 18, 20]</sup>	0.354	0/1	0.555/2.968
	0.396	0/1	0.402/2.72
	0.434	0/1	0.333/2.49
	0.472	0/1	0.237/2.25
	0.509	0/1	0.199/2.134
	0.547	0/1	0.141/1.937
黏土 <sup>[21]</sup>	0.385	0/1	0.67/0.98
	0.418	0/1	0.61/0.97
	0.451	0/1	0.61/0.94
	0.475	0/1	0.57/0.91

注: 除黏土外,  $\lambda_s$  均采用 Haigh 文献中的  $7.69 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

以上述试验数据为基准, 对各理论模型和经验拟合模型不同孔隙率时干燥和饱和状态下的热导率进行计算, 采用两种常见的性能指标: RMSE-均方根平均误差和 NRMSE-归一化均方根平均误差开展误差评估。

各模型的误差评估结果如表 3 所示,  $\phi \in (0, 0.6)$ ,  $S_r=0/1$ 。干燥和饱和状态下, 本模型与试验数据的均方根误差(正规化均方根误差)分别为  $0.889 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  (31.1%) 和  $1.004 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  (37.3%), 均优于根据试

验拟合的 Chen<sup>[18]</sup>模型和其它理论模型, 也可以定量验证图 7 显示结果。基于试验数据, 图 9 给出了包含 Wiener 串并联模型的各模型预测结果分布。从中可以发现, 与试验值相比, 本模型热导率预测值相对偏低, 总体趋向串联模型。进一步结合图 7 可以发现, 低孔隙率时相对误差较大, 而随着孔隙率的增加, 本模型热导率预测值与试验值吻合度逐渐提高。当孔隙率介于  $0\sim0.476$  时, 干燥状态下本模型预测精度与 Jia 等模型<sup>[14-15]</sup>接近, 偏离程度要大于 Chu 等<sup>[13]</sup>模型; 饱和状态下本模型预测精度要略强于 Jia 等<sup>[14-15]</sup>模型, 偏离程度相较于 Chu 等<sup>[13]</sup>模型也未有明显差距。当孔隙率大于  $0.476$ , 处于较高孔隙率时, 本模型在干燥/饱和状态下的预测精度均优于其他理论模型, 特别是在孔隙率接近  $0.5$  时, 预测值几乎与 Chen 试验测试结果保持一致。而针对未修正时的 Haigh<sup>[10]</sup>模型, 在  $0.33\sim0.6$  孔隙率范围区间热导率预测值相对 Chen<sup>[18]</sup>模型均偏低, 因此 Haigh 尝试采用  $k_{\text{bulk}} \approx 2.2k_{\text{cell}}$  进行空间线性修正。考虑该修正的原因在于圆柱单元结构本身几何形状的固有缺陷。相比之下, 本文正三棱柱模型在保证预测精度的同时克服了圆柱单元结构固有的空间修正缺陷, 是其优势之一。

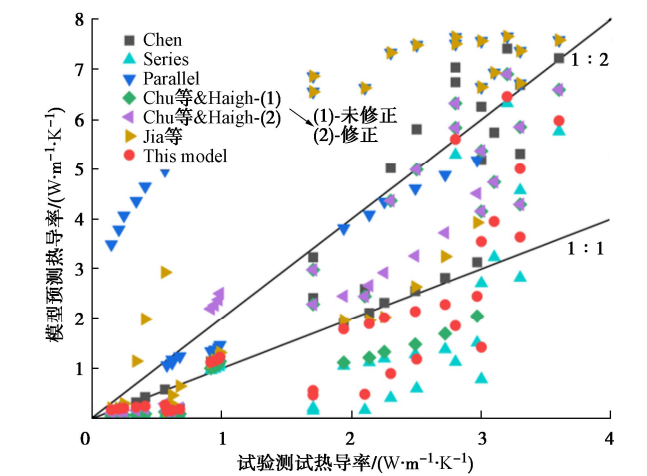


图 9 不同模型预测结果可视化对比

Fig. 9 Comparison of visualization among various models

3 讨论: 进化视角下组构主导的岩土热导率预测单元结构模型研究新思路

提及进化/演化, 人们一直以来都坚信达尔文在 19 世纪就提出的“物竞天择”进化原则, 用自然选择的概念对生物物种的构造和多样性进行了解释。但是, 部分持反对观点的学者认为达尔文的进化论并没有能够从物理学的角度对这种选择的标准作出定义<sup>[22]</sup>。Bejan<sup>[23]</sup>基于热力学物理定律对能量和物质流动的表



表 3 岩土热导率预测模型对比(RMSE/NRMSE)

Table 3 Comparison of prediction models for thermal conductivity of geomaterials							单位: W/(m·K)
模型	Chen <sup>[10]</sup>	Series	Parallel	Chu 等 <sup>[13]</sup> (Uncorrected)	Chu 等 <sup>[13]</sup> (Corrected)	Jia 等 <sup>[14]</sup>	本文模型
干燥状态	1.690/0.591	1.211/.424	3.905/1.366	1.309/0.458	1.295/0.453	3.204/1.121	0.889/0.311
饱和状态	2.122/0.789	1.351/0.502	2.880/1.071	1.750/0.651	1.872/0.696	2.611/0.970	1.004/0.373

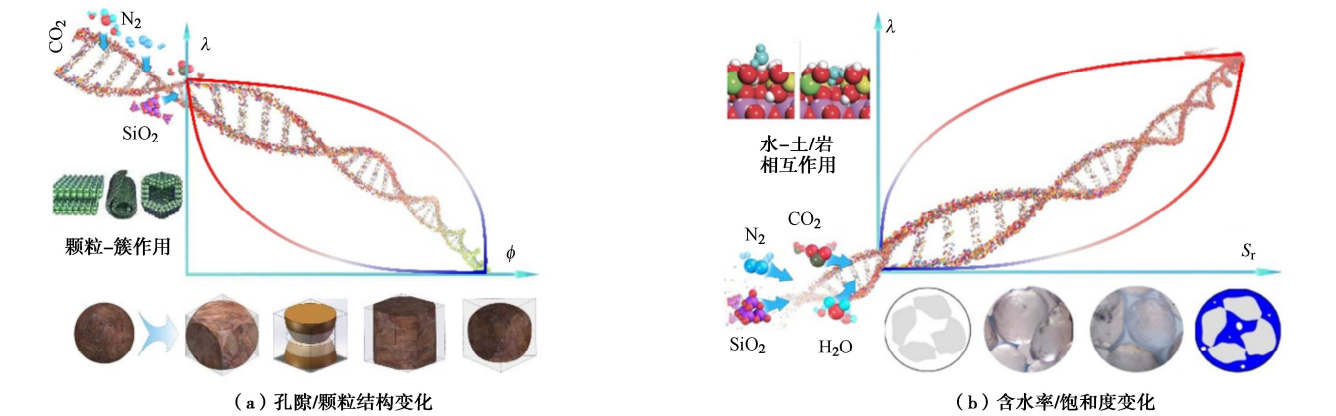


图 10 进化视角下组构主导的岩土热导率研究

Fig. 10 Composition-structure dominated ETC of geomaterials from an evolutionary perspective

述提出了构形理论(constructual law)。陈林根<sup>[24]</sup>对 Bejan 提出的构形理论及研究进展进行了阐述,认为从进化论的观点出发组织结构是经过长时间演化而成,应该是某种最优或接近最优的结构,可精简表述为事物结构源自于性能达到最优。

基于上述思想开展类比分析,提出进化视角下组分和结构主导的岩土热导率预测关联式单元结构模型研究的新思路,主要体现在 3 方面。

(1) 岩土介质是典型的固液气多相组分-多孔/颗粒材料,细观组分和结构与其宏观热力特性如热导率紧密相关。在以组分(固液气)为基础、结构(多孔/颗粒)是关键这一前提下开展的岩土介质热导率研究中,组分与结构二者在影响其热导率变化过程中的继承(相对稳定地)与选择(具有调控性)作用类似于生物进化过程中的 DNA 双螺旋结构中的基因组件遗传与配对组合变异(图 10)。

(2) 在聚焦岩土细观孔隙/颗粒及单元结构方面,如图 10(a)所示从基本的(准)球、圆柱、立方体至四棱柱、三棱柱,再到遗传算法异形几何结构优化表征体现了趋向岩土相对真实结构的进化思想。这一由简至繁人们尝试逐步接近岩土真实结构的需求与生物进化过程中自然环境的选择类似,均提供了系统变化的驱动力。再结合基于均质化思想的不同单元结构周期性分布假设可以实现岩土介质从细观向宏观的跨尺度升级,表征宏观连续岩土介质、覆盖天然岩土介质孔隙率范围,分析热导率随孔隙率的不同变化(图 10(a))。

(3) 本文模型及思想可扩展应用于更为复杂的岩土固液气三相非饱和状态,其物理基础为含湿多孔/颗粒介质中液态水分布特征。现代物理学认为<sup>[25]</sup>,多孔/颗粒介质中液态水的分布在[0, 1]的饱和度全范围可以分为水合、钟摆、索道、毛细和悬浮等多种状态,如图 10(b)所示。不同含水率时孔隙水形态及展布特征的演化过程体现了对环境的适应性,可以进一步分析热导率随含水率/饱和度的变化。以土科学为例,部分学者已针对该问题开展了大量的研究工作<sup>[26-27]</sup>,通过土水特征曲线类比分析土-水-热导率关系,建立岩土介质持水与导热行为间的关联,从水气-土水势等物质运移和能量转换角度分析岩土热力学行为,同样体现了构形理论的适应性演化/进化思想。

需要说明的是,本文研究的单元结构模型仅限定在岩土孔隙/颗粒细观尺度。在微纳尺度,作为无机非金属固体的岩土材料中低温时主要通过晶格振动形成声子热传导,已经脱离了连续介质的假定范畴,不符合经典傅里叶热传导定律,不能通过分/原子尺度的相互作用计算得到宏观岩土介质的热导率,因而这种不符合尺度对称性规律的跨尺度热力参数计算与外推不成立<sup>[28]</sup>。而本文研究的细观至宏观工程应用尺度仍处在连续介质假定成立的条件下<sup>[29]</sup>,传热的尺度效应可能是由于尺度的减小使得传热介质的体积面积比减小,改变了不同作用力或/因素在传热中的相对重要性,可以通过假定单元结构进行量化分析。因此本文基于均质化思想的岩土多孔/颗粒介质热导率预测单元结构模型可以实现细观至宏观的跨尺度分析。

## 4 结 论

(1) 本文建立了一个以正三棱柱为表征单元体, 准球体为固相颗粒的满足大部分天然岩土孔隙率范围且无需考虑空间修正的岩土热导率预测单元结构模型。结合热电类比-集总参数法, 对该细观单元结构模型热导率进行理论推导, 最终得到干燥/饱和两相态岩土多孔/颗粒介质热导率预测的影响因素关联式。

(2) 理论分析与文献试验验证结果表明: 正三棱柱-准内切球单元结构模型预测岩土热导率随孔隙率整体呈凹形降低变化趋势, 低孔隙率(小于0.2)时预测结果偏低且趋向串联模型下限, 误差较大; 高孔隙率(0.4~0.6)时理论预测结果与试验测试值吻合度较高; 相对其他单元结构理论模型预测效果更好, 尤其在干燥状态时均方根误差RMSE和归一化均方根误差NRMSE最小, 分别为0.89W/(m·K)和31%。

(3) 引入选择进化、构形优化思想, 基于孔隙-颗粒和单元结构几何特征、孔隙水形态概念性类比提出了进化视角下固液气组分和多孔/颗粒结构主导的岩土热导率预测关联式单元结构模型研究的新思路。

### 参考文献:

- [1] 徐云山, 肖子龙, 孙德安, 等. 土体导热系数温度效应及其预测模型[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(6): 1180-1189. (XU Yunshan, XIAO Zilong, SUN Dean, et al. Temperature effects and prediction model of thermal conductivity of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(6): 1180-1189. (in Chinese))
- [2] CHENG P, HSU C T. The effective stagnant thermal conductivity of porous media with periodic structures[J]. Journal of Porous Media, 1999, 2(1): 19-38.
- [3] CHU Z X. 1D monodirectional or 2D quasi-uniaxial parallel heat fluxes: a discussion on 'Soil thermal conductivity estimated using a semi-analytical approach'[J]. Geothermics, 2022, 99: 102301.
- [4] GEMANT A. The thermal conductivity of soils[J]. Journal of Applied Physics, 1950, 21(8): 750-752.
- [5] DE VRIES D A. Thermal conductivity of soil[J]. Nature, 1956, 178: 1074.
- [6] HSU C T, CHENG P, WONG K W. Modified Zehner-Schlunder models for stagnant thermal conductivity of porous media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37(17): 2751-2759.
- [7] GORI F. A theoretical model for predicting the effective thermal conductivity of unsaturated frozen soils[C]// Proceedings of the fourth international conference on Permafrost, Fairbanks (Alaska). Washington D C: National Academy Press, 1983.
- [8] GORI F, CORASANITI S. Theoretical prediction of the soil thermal conductivity at moderately high temperatures[J]. Journal of Heat Transfer, 2002, 124(6): 1001-1008.
- [9] HSU C T, CHENG P, WONG K W. A lumped-parameter model for stagnant thermal conductivity of spatially periodic porous media[J]. Journal of Heat Transfer, 1995, 117(2): 264-269.
- [10] CHEN S X. Thermal conductivity of sands[J]. Heat and Mass Transfer, 2008, 44(10): 1241-1246.
- [11] GORI F, CORASANITI S. New model to evaluate the effective thermal conductivity of three-phase soils[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013, 47: 1-6.
- [12] CORASANITI S, GORI F. Heat conduction in two and three-phase media with solid spherical particles of the same diameter[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 112: 460-469.
- [13] CHU Z X, ZHOU G Q, WANG Y J, et al. A nalytical model for the stagnant effective thermal conductivity of low porosity granular geomaterials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 133: 994-1007.
- [14] JIA G, MA Z, CAO Y, et al. A new packed-sphere model for geological materials thermal conductivity prediction at moderate porosity range for geothermal utilization[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 44: 9479 - 9493.
- [15] JIA G, MA Z, ZHANG Y P, et al. Series-parallel resistance method based thermal conductivity model for rock-soil with low or high porosity[J]. Geothermics, 2020, 84: 101742.
- [16] 曾召田, 吕海波, 赵艳林, 等. 广西红黏土热导率测试及理论预测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊 1): 3525-3534. (ZENG Zhaotian, LÜ Haibo, ZHAO Yanlin, et al. Study on thermal conductivity test and theoretical prediction model of Guangxi red clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3525-3534. (in Chinese))
- [17] DONG Y, MCCARTNEY J S, LU N. Critical review of thermal conductivity models for unsaturated soils[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, 33(2): 207-221.

- [18] CHEN S X. Thermal conductivity of sands[J]. Heat and Mass Transfer, 2008, **44**(10): 1241-1246.
- [19] ALBERT K, SCHULZE M, FRANZ C, et al. Thermal conductivity estimation model considering the effect of water saturation explaining the heterogeneity of rock thermal conductivity[J]. Geothermics, 2017, **66**: 1-12.
- [20] LU S, REN T S, GONG Y S, et al. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, **71**(1): 8.
- [21] 肖琳, 李晓昭, 赵晓豹, 等. 含水率与孔隙率对土体热导率影响的室内实验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2008, **9**(3): 241-247. (XIAO Lin, LI Xiaozhao, ZHAO Xiaobao, et al. Laboratory on influences of moisture content and porosity on thermal conductivity of soils[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, **9**(3): 241-247. (in Chinese))
- [22] WHITFIELD J. Survival of the likeliest ?[J]. Plos Biology, 2007, **5** (5): 962-965.
- [23] BEJAN A. Shape and Structure, from Engineering to Nature[M]. Cambridge: Cambridge University, 2000.
- [24] 陈林根. 构形理论及其应用的研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, **42**(5): 505-524. (CHEN Lin'gen. Research progress of configuration theory and its application[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2012, **42**(5): 505-524. (in Chinese))
- [25] MITARAI N, NORI F. Wet granular materials[J]. Advances in Physics, 2006, **55**(1/2): 1-45.
- [26] LU N, DONG Y. Closed-form equation for thermal conductivity of unsaturated soils at room temperature[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, **141**(6): 04015016.
- [27] LU S, LU Y L, PENG W, et al. A generalized relationship between thermal conductivity and matric suction of soils[J]. Geoderma, 2019, **337**: 491-497.
- [28] 赵阳升. 岩体力学发展的一些回顾与若干未解之百年问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(7): 1297-1336. (ZHAO Yangsheng. Retrospection on the development of rock mass mechanics and the summary of some unsolved centennial problems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(7): 1297-1336. (in Chinese))
- [29] 何雅玲. 前言: 祝贺过增元院士 85 华诞专辑[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, **51**(10): 1135-1136, 1132. (HE Yaling. Preface: congratulations on the 85th birthday of academician GUO Zeng Yuan[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2021, **51**(10): 1135-1136, 1132. (in Chinese))

## 第九届全国水工岩石力学大会 (1 号通知)

第九届全国水工岩石力学大会拟定于 2025 年 5 月 9 日—11 日在成都召开, 会议由中国岩石力学与工程学会岩体物理数学模拟专业委员会、四川大学和清华大学主办。

**会议主题:** 重大水利水电工程中的岩石力学研究进展与实践。

**会议议题:** ①重大水电工程中的岩石力学问题; ②长距离引调水工程中的岩石力学问题; ③抽水蓄能工程中的岩石力学问题; ④水利水电工程防灾减灾中的岩石力学问题; ⑤高坝坝基岩石力学与工程; ⑥高边坡岩石力学与工程; ⑦超大/超长/深埋地下洞室(群)岩石力学与工程; ⑧数字孪生水工岩石力学; ⑨人工智能、大数据等在水工岩石力学中的应用; ⑩水工岩石力学新方法、新技术、新材料、新装备; ⑪水工岩石力学

人才培养与教育教学改革; ⑫其他。

**主办单位:** 中国岩石力学与工程学会岩体物理数学模拟专业委员会; 四川大学; 清华大学。

**论文征集与出版:** 本次会议以期刊专刊、专栏/专题的形式发表论文, 诚邀水工岩石力学相关领域从事科研、勘察、设计、施工和运维的科技工作者及研究生踊跃投稿。论文格式见相关期刊投稿要求, 首轮投稿截止日期为 2024 年 12 月 31 日, 最终投稿截止日期为 2025 年 5 月 31 日。

**联系方式:** 肖明砾(xiaomingli@scu.edu.cn, 13880653644); 李海波(hbli@scu.edu.cn, 13679034245); 章治海(会务事宜, 18200364687); 大会网址 www.hrnc2025.com; 会议邮箱 hrnc2025@163.com。