

多孔介质中热质耦合传输规律及影响因素分析

许泽宇

西南交通大学, 四川 成都 611756

[摘要] 多孔介质中的热量与水分传输具有明显的相互作用特征。温度梯度能够引起液态水迁移、水蒸气扩散及相变, 含水状态变化又会改变有效导热系数、热容量和局部温度分布, 形成持续演化的热质耦合过程。基于经典热湿传输理论及土壤、多孔建筑材料试验结果, 分析液相迁移、气相扩散、潜热传递和非均匀湿度分布的作用规律, 讨论孔隙率、含水率、孔径结构、温度梯度及边界条件的影响。研究表明, 热质传输参数具有较强状态依赖性, 动态参数表征和多场联合测试是提高预测精度的重要途径。

[关键词] 多孔介质; 热质耦合; 水分迁移; 温度梯度; 孔隙结构

DOI: 10.64635/ja.2026.1469

中图分类号: TK124

文献标识码: A

Analysis of Heat and Mass Coupled Transfer Laws and Influencing Factors in Porous Media

Xu Zeyu

Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China

Abstract: Heat and moisture transfer in porous media exhibits obvious interactive characteristics. Temperature gradients can induce liquid water migration, water vapor diffusion, and phase change, while changes in moisture content can alter the effective thermal conductivity, heat capacity, and local temperature distribution, forming a continuously evolving heat and mass coupled transfer process. Based on classical heat and moisture transfer theories and experimental results on soil and porous building materials, this paper analyzes the action laws of liquid-phase migration, gas-phase diffusion, latent heat transfer, and non-uniform humidity distribution, and discusses the effects of porosity, moisture content, pore size structure, temperature gradient, and boundary conditions. The study shows that heat and mass transfer parameters have strong state dependence, and dynamic parameter characterization and multi-field joint testing are important approaches to improving prediction accuracy.

Keywords: porous media; heat and mass coupling; moisture migration; temperature gradient; pore structure

引言

多孔介质由连续或非连续的固体骨架以及分布于孔隙中的液体和气体组成, 土壤、岩石、混凝土、砖材、保温材料及多种生物质材料均具有典型的多孔结构。温度和湿度发生变化时, 热量不仅通过固体骨架和孔隙流体传导, 水分还会在毛细压力、浓度梯度、蒸气分压差和温度梯度共同作用下迁移。水分蒸发或凝结产生的潜热进一步参与能量传递, 因此热量传输与物质传输并非彼此独立。

早期研究建立了温度梯度作用下多孔材料水分迁移理论, 将液态水迁移和水蒸气扩散统一纳入热湿传输分析, 并指出温度梯度能够显著影响水分重新分布^[1]。随后, 相关研究从不可逆热力学角度建立毛细多孔体热质传输方程, 为温度场和含湿量场联合分析提供了理论基础^[2]。在此基础上, 体积平均方法进一步将多相介质中的热量、质量及动量传输联系起来, 形成适用于干燥与多相传质过程的理论框架^[3]。

随着地下储能、地源热泵、建筑节能及高温土壤储热等应用发展, 多孔介质所处环境逐渐表现出更高温度梯度和更复杂含湿状态。传统恒定导热系数和单一扩散系数模型难以完整描述实际传输过程, 有必要结合孔隙结构及材料状态重新认识热质耦合规律。

1 多孔介质热质耦合传输的物理基础

1.1 多相组成及传输驱动力

非饱和多孔介质一般包含固相、液相和气相。固体颗粒构成连续或半连续骨架, 液态水附着于颗粒表面或填充部分孔隙, 剩余孔隙由空气和水蒸气占据。三相比例随环境变化不断调整, 决定材料的热物性和传质能力。

热量传输主要包括固体及流体导热、流体对流以及水分相变形成的潜热迁移。多数细粒或中等渗透性材料中, 热传导占主导地位。当孔隙尺度较大、渗透率较高或者存在明显压力梯度时, 流体运动带来的对流作用开始增强。

水分迁移则具有更复杂的驱动力。液态水主要受毛细压力、基质吸力及重力影响，水蒸气主要沿蒸气分压梯度扩散。温度变化同时改变饱和蒸气压和液体黏度，使温度梯度能够直接参与水分传输。材料内部由此形成温度、含湿量和压力共同作用的多驱动力系统。

1.2 热量与水分迁移的耦合关系

热质耦合的核心在于热量传输能够改变水分状态，而水分迁移又改变局部热物性。湿润区域受热后，液态水蒸发进入气相，水蒸气向低温区域迁移并可能重新凝结。该过程同时输送显热和潜热，导致实际热流大于单纯依据固体导热计算的结果。

含水量变化还会改变有效导热系数。空气在常温下的导热能力明显低于液态水和多数矿物颗粒，孔隙中的空气被水逐步替代后，颗粒之间形成更多连续导热通道，有效导热系数通常增加。水分继续增加至接近饱和后，增长速度会受孔隙连通方式、材料密度和矿物组成影响。

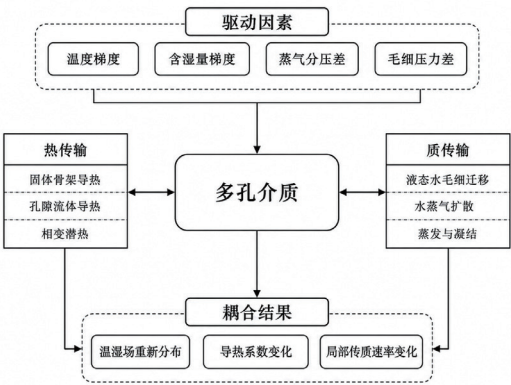


图 1 多孔介质热质耦合传输机制示意

图 1 表明，温度变化不是单向作用于水分，而是通过相变、导热系数变化和毛细压力调整形成闭环反馈。高温或强温差条件下，这种反馈更加明显。

2 温度场作用下的水分迁移规律

2.1 液态水迁移与毛细作用

液态水主要分布于连通孔隙、颗粒接触区域以及孔壁吸附层。非饱和条件下，弯液面形成毛细压力，含水量不同区域之间存在压力差，液态水沿压力势降低方向迁移。

含水率较高时，液体网络连续性较强，液态迁移通常占主导位置。随着材料逐渐干燥，较大孔隙首先排水，连续液相通道被切断，液态水传输能力迅速下降。此时虽然材料中仍含有一定水分，但水分可能主要以吸附态或孤立液体形式存在，其宏观迁移能力明

显降低。

温度还会改变液态水黏度、表面张力和毛细压力。温度升高后，流体性质改变，同时蒸发增强，因此单纯依据等温条件下的水力传导参数难以准确描述高温过程。

2.2 水蒸气扩散及相变传质

低含水率或较高温度条件下，水蒸气迁移的重要性明显增加。高温区域具有更高的饱和蒸气压，孔隙空气中的水蒸气向低温区域扩散。到达低温位置后，水蒸气可能发生凝结，使远离热源区域的含水量增加。

有研究对中粗粒土进行 40 ~ 90 °C 范围内的一维热湿耦合试验，采用的壤砂孔隙率为 0.40，初始体积分含水率为 0.26m³/m³，对应初始饱和度约 65%^[4]。试验发现，最大水分通量达到 0.003kg · s⁻¹ · m⁻²，并在试验约 30min 时出现。温度梯度达到 560 °C /m 时观察到明显水分迁移，高温条件下热致水蒸气扩散成为重要传质机制。

这一结果说明，在较强温度梯度下，水分迁移不能只按照液态水流动处理。相变及水蒸气扩散可能在较短时间内改变材料内部湿度分布。

2.3 温度梯度下水分重新分布

温度梯度持续存在时，多孔介质往往形成热端干燥、冷端增湿的空间分布。热端液态水不断蒸发，蒸气向低温区移动，在适宜条件下发生凝结。毛细压力梯度随后驱动部分液态水向干燥区域回流，形成气相和液相方向可能相反的循环传输。

该试验中，在局部温度约 51 °C、饱和度约 40% 的条件下，测得向下水分通量约 3g · s⁻¹ · m⁻²，研究认为此时热致蒸气扩散是主要传输机制^[4]。这类现象能够解释地下热源附近土壤干燥带形成以及高温储热过程中水分向外围迁移的问题。

3 含湿状态对传热过程的影响

3.1 含水率变化与有效导热系数

多孔介质的有效导热系数由固体骨架、液态水、空气以及孔隙结构共同决定。干燥条件下，大量孔隙被空气占据，颗粒之间有效热接触面积有限。水分增加后，孔隙中的水连接相邻颗粒，导热通路得到改善，有效导热系数通常上升。

这种关系并不是简单线性变化。在低含水率状态下，水主要吸附于颗粒表面，对整体导热网络改善有限。当含水率增加至一定水平后，液体桥逐渐形成并连通，导热系数增长加快。接近饱和时，多数孔隙已经被水

填充, 进一步提高含水率产生的影响逐渐减弱。

不同孔隙结构还会造成明显差异。相同总体含水率下, 如果水分集中形成连续液体区域, 其导热效果通常高于分散于大量孤立孔隙中的状态。因此, 有效导热系数不仅取决于“有多少水”, 还取决于“水分分布在哪里”。

3.2 非均匀湿度分布产生的传热差异

传统传热计算通常将材料视为湿度均匀的等效连续体, 而实际吸湿、干燥和温差驱动过程均会形成明显湿度梯度。

2026 年, 有研究针对蒸压加气混凝土、泡沫混凝土和再生砖开展一维润湿—干燥试验^[5]。三类材料在 25℃ 干燥状态下的稳态导热系数分别约为 0.1972、0.0984 和 0.804 W/(m·K)。湿润稳定后, 三种材料测得的导热系数均提高 100% 以上。

更值得关注的是, 在总体质量含水率相同的情况下, 润湿过程和干燥过程所得导热系数仍存在明显差别, 其最大差异分别达到 63.4%、53.3% 和 37.4%^[5]。水分侵入方向不同位置的导热系数即使在 5 h 后仍可出现超过 30% 的波动。

这些数据表明, 总体含水率不足以完整描述多孔材料热状态。水分空间分布及润湿历史会直接影响局部传热性能, 也是热质耦合模型需要考虑的重要状态变量。

4 热质耦合传输的主要影响因素

4.1 孔隙率与孔径结构

孔隙率决定固体、液体和气体的体积分配, 是影响热质传输的基础参数。孔隙率增加通常意味着固体导热路径减少, 干燥材料的有效导热系数下降, 同时流体存储和迁移空间增加。

单纯采用总孔隙率仍不能解释全部差异。相同孔隙率下, 孔径分布和连通性不同会形成明显不同的传输性能。大孔有利于蒸气和流体快速迁移, 小孔具有较强毛细吸力, 能够保持更多液态水。孔隙连通度较低时, 即使含水率较高, 也可能缺少连续液态迁移通道。

有研究针对细砂进行 20 组不同孔隙率和饱和度条件下的导热试验, 结果显示孔隙率与饱和度共同控制土体导热能力, 不同预测模型在干燥和高饱和状态下表现也存在明显差异。这说明孔隙参数与含湿状态需要联合考虑。

4.2 温度及温度梯度

平均温度影响材料热物性和水蒸气压力, 温度梯度决定热流和热致水分迁移驱动力。小温差条件下,

热传导通常占主要作用, 随着温度梯度增加, 水分蒸发、蒸气扩散和潜热迁移的贡献明显增强。

高温还会扩大干湿区域之间的物性差异。热端水分减少以后导热系数降低, 而冷端水分积聚后导热系数提高, 使原有温度场发生二次调整。局部温度梯度由此可能继续改变, 形成非线性反馈。

2019 年的高温土壤试验表明, 在湿土稳态条件下, 热流测试差异最高约 4.2%, 而干土条件下最高可达到 34%^[4]。湿度状态的改变明显影响热量传递及温度场稳定程度。

4.3 材料组成与边界环境

固相矿物组成决定骨架导热能力。石英含量较高的土体通常具有较高矿物导热率, 而有机质、低导热矿物或高孔隙材料表现出较低整体导热水平。

边界温度、环境相对湿度、通风条件及外部水分供应同样影响传输过程。封闭条件下, 水分主要在材料内部重新分配。开放边界允许水蒸气逸出, 材料总含水量随时间下降, 内部温湿场演化模式也会随之改变。

工程分析需要明确边界是恒温、恒热流、恒湿还是对流交换条件, 尤其在建筑围护结构和土壤储热问题中, 外部环境波动会持续改变内部耦合状态。

5 热质耦合传输分析的优化方向

5.1 参数动态表征与模型修正

热质耦合模型中的有效导热系数、水分扩散系数、渗透率和相变参数都不宜长期采用常数。实验结果已经表明, 含水率、温度、孔隙状态和湿润历史均会改变这些参数。

模型建立时可以将热物性写成温度和含水率的函数, 并进一步引入饱和度和孔隙率参数。对于具有明显滞回特征的材料, 还需要区分吸湿与脱湿路径。采用单一稳态参数预测快速加热或快速干燥过程, 容易低估局部温湿梯度。

参数识别也应由单点测试转向多状态测试。在不同温度和含湿范围内建立参数数据库, 能够降低模型外推产生的误差。

5.2 多场联合测试与工程应用

多孔介质热质传输具有显著空间非均匀性, 仅监测表面温度或总体质量变化难以识别内部迁移机制。实验测试应同步记录温度、局部含水率、热流和必要的孔隙压力参数。

核磁共振、X 射线成像、中子成像以及分层湿度传感技术能够进一步获得水分空间分布, 为验证耦合

模型提供更完整的数据。工程应用中则需要根据材料类型和环境温度确定合理的模型复杂度,避免在低耦合条件下引入过多难以标定的参数。

地下热储、地源热泵及高温电缆周围土体尤其需要关注长期水分迁移。持续加热可能形成干燥区域并降低土体导热能力,使原有传热设计条件发生变化。建筑多孔材料则应关注降雨吸湿、室内外温差和周期干燥形成的湿度非均匀性。将热湿参数的动态变化纳入工程计算,有利于提高热性能和耐久性预测的可靠程度。

6 结语

多孔介质中的热量和水分传输具有典型的双向耦合特征。温度梯度能够改变蒸气压、流体性质及相变速率,驱动液态水和水蒸气迁移;含水状态的变化又会调整有效导热系数、热容量和局部热流分布。孔隙率、孔径结构、含水率、温度梯度、材料组成及边界环境共同决定不同传输机制的相对作用。高温和非稳态条件下,水蒸气扩散和相变潜热的重要性明显增加,采用固定导热参数或均匀含水假设容易产生较大偏差。后续分析应强化温度场、湿度场和孔隙结构的联合表征,根据材料实际状态建立动态热湿参数,并借助多场同步测试识别水分迁移和热流变化。通过理

论模型、试验数据与工程边界条件的协调,可进一步提高多孔介质热质耦合过程的预测精度。

[参考文献]

- [1] Philip J R, De Vries D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1957, 38(2): 222-232.
- [2] Luikov A V. Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies[M]. Oxford: Pergamon Press, 1966.
- [3] Whitaker S. Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: A theory of drying[J]. Advances in Heat Transfer, 1977, 13: 119-203.
- [4] Hedayati-Dezfooli M, Leong W H. An experimental study of coupled heat and moisture transfer in soils at high temperature conditions for a medium coarse soil[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 137: 372-389.
- [5] Chen W, Jiang H, Wang Y, et al. Experimental study on the thermal conductivity of porous building materials under non-equilibrium moisture content: Effects of wetting and drying processes[J]. Building and Environment, 2026, 296: 114512.