

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0671

水蒸气增湿非饱和黄土热湿迁移规律研究

李建东^{1,2}, 王 旭^{1,2}, 张延杰¹, 蒋代军¹, 刘德仁¹, 李 盛¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 温度梯度、含水率梯度和压力梯度对非饱和土体中的水热迁移有重要影响。用非饱和黄土填筑室内模型, 通入 0.10 MPa 高温水蒸气, 研究蒸汽压梯度、温度梯度和含水率梯度耦合作用下的水热迁移规律。结果表明: 在水蒸气迁移范围之内, 土体的升温速率、增湿速率和增湿程度较大, 以蒸汽传热和压力梯度驱动的水蒸气增湿为主。而在水蒸气未到位置, 以温度梯度引起的热传导和含水率梯度与温度梯度耦合驱动的水热迁移为主; 水蒸气迁移时, 受土颗粒阻碍和蒸汽压消散的影响, 土体升温速率、增湿速率和温度传导速率均随径向距离的增大而减小, 且增湿速率小于升温速率; 水蒸气增湿土体的最大含水率接近最优含水率, 增湿效果较好, 可有效提高一定范围内土体的压实性能; 基于模型试验边界条件, 确定含湿毛细多孔介质中二维热湿迁移方程的一组代数显式特解, 并以 20 cm 测点为例, 将温度和含水率实测值和计算值进行对比分析。研究结果可为非饱和黄土水-汽-热耦合传输规律和水蒸气增湿新技术研究提供理论支持。

关 键 词: 非饱和黄土; 水-热耦合迁移; 增湿; 模型试验; 解析解

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 01-0186-07

Study of thermal moisture migration of unsaturated loess with water vapor

LI Jian-dong^{1,2}, WANG Xu¹, ZHANG Yan-jie¹, JIANG Dai-jun¹, LIU De-ren¹, LI Sheng¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Road & Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Temperature gradient, moisture gradient and pressure gradient significantly affect hydrothermal migration in unsaturated soils. The unsaturated loess sample under 0.10 MPa of high-temperature water vapor is tested to study the hydrothermal migration under the gradients of steam pressure, temperature and moisture. The results show that the high rate of temperature rise, and water vapor humidification observed within the range of water vapor migration and the steam humidification are mainly driven by steam heat transfer and pressure gradient. In the region beyond water vapor migration, the heat conduction caused by temperature gradient and water migration driven by moisture gradient coupled with temperature gradient are the main factors. Under the influence of soil particle obstruction and steam pressure dissipation, the rate of soil heating, humidification and temperature diffusion decrease with the increase of radial distance, and the rate of humidification is less than temperature diffusion. The maximum moisture content of water vapor humidified soil is close to the optimal moisture content, and the humidifying effect is good, which can effectively improve the compaction performance of soil within a certain range. Based on the boundary conditions of the model test, a set of algebraic explicit special solutions to the two-dimensional heat-wet migration equation in a moist porous medium is determined. The measured and calculated values of temperature and water content are compared and analyzed at 20 cm measurement points. The results can provide theoretical support for the research on the transmission of water-vapor-thermal in unsaturated loess and the new technology of water vapor humidification.

Keywords: unsaturated loess; moisture-heat coupling migration; humidification; model test; analytical solution

1 引 言

非饱和黄土是由固、液、气三相组成的典型多

孔介质, 其孔隙的弯曲性、不定向性和随机性, 导致其中的汽/液态水和热量迁移等宏观输运过程存在弥散效应, 并受到土体含湿率、流体输运特性、

收稿日期: 2020-05-22

修回日期: 2020-09-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2017YFB1201204)。

This work was supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB1201204).

第一作者简介: 李建东, 男, 1992 年生, 博士研究生, 主要从事黄土地区基础工程方面的学习与研究工作。E-mail: jdli620523@163.com

通讯作者: 王旭, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的研究与教学工作。E-mail: publicwang@163.com

微观结构参数等多因素的影响^[1-4]。其热质迁移过程广泛存在于工农业生产的多个领域^[3-4]，引起了工程技术人员普遍关注。

近几十年来，高精尖测试设备和计算机技术的发展，给多孔介质中输运特性研究注入了新的活力，研究人员通过试验测量、数值计算和解析分析三大途径，研究多孔介质中的热质输运规律。Philip^[5]、Wang^[6]等结合液相流体的黏性特性和蒸汽扩散理论，对土体中的蒸汽-热耦合迁移规律进行了试验研究，得出土体中温度梯度作用可增强水蒸气扩散势和水汽潜热效应。Thomas 等^[7-8]结合室内试验和数值计算，对非饱和土体中水分扩散系数和水力传导系数和热-水-气耦合迁移问题进行了研究。Collin 等^[9]基于热-水-力耦合方程，对非饱和土体中热能、液态水、气态水以及空气的耦合迁移过程进行了研究。

陈佩佩^[10]、白冰^[11]等基于光滑粒子流体动力学 (SPH) 理论、非饱和介质的水-热传输方程和 Fourier 热传导定律，对温度势、吸力势和重力势耦合影响下的非饱和土体中的非稳态水-热分布场随时间的迁移规律进行了数值分析。Zhang 等^[12]根据体积平均法，建立了多孔介质中的二维热非平衡数学模型，研究了填充床的吸附特性、体积流速、粒径、有效导热系数和吸附剂比热对产物浓度的影响。Bai 等^[13]结合理论计算与室内试验，验证了非饱和土壤中热循环引起的水分运移滞回效应，发现土体中的水分运移还包括液态水相变引起的汽态水迁移。Shang 等^[14]提出了一个基于多孔理论和土壤水分动力学的非饱和土三维模型，并通过试验和数值计算发现渗透因子和蒸发因子对浅层土壤温度影响较大，且这种影响随土体埋深的增加而衰减。

詹良通等^[15]为研究埋气在土质覆盖层中的运移规律及其影响因素，在黄土土柱底部通入混合气体，顶部施加 3 cm 常水头，以分析雨水入渗对黄土覆盖层中气压和气体组分分布的影响。研究表明雨水入渗过程降低了上层黄土的导气系数，使土柱中气压显著增加。呈现出先增大至“突破值”，然后减小至“稳定值”的变化规律，且气压“突破值”约等于上部土体进气值。尽管上述研究证明了非饱和土体中水-热-耦合运移模型的可行性，但大多模型假定空气自由出入地表界面，忽略了土体内部的压力变化^[16]。

王补宣^[17]、卢涛^[18]等建立了描述非饱和含湿多孔介质相变传热传质过程的数学模型。诚然，所有

研究都要结合具体的研究对象，寻求比较简单且更切合实际的数学模型和控制方程。鉴于此，本文在室内设置水蒸气增湿非饱和黄土模型试验，研究蒸汽压梯度、温度梯度和含水率梯度耦合影响下的热湿迁移特性。基于试验结果选取边界条件，求解含湿毛细多孔介质中热湿迁移方程的代数显式解析解，以期为非饱和黄土水-汽-热耦合传输规律和水蒸气增湿新技术研究提供理论支持。

2 模型试验概况

2.1 试验设备

试验仪器主要有电热蒸汽发生器（额定蒸发量为 8 kg/h）、水蒸气调压阀（量程为 0.25 MPa，精度为 10 kPa）、温湿度传感器（精度为 0.01%）、温度传感器（精度为 0.01 °C）、蒸汽扩散柱和模型试验钢桶。其中蒸汽扩散柱为长为 80 cm、直径为 4 cm 的两端封口钢管，沿柱身每隔 10 cm 四周对称开 4 个 2 mm 蒸汽扩散孔，见图 1。填筑土体时用粗布包裹，以防止土体进入蒸汽扩散孔。模型试验钢桶是直径为 2 m、高为 1.2 m 的敞口圆柱桶，见图 2。试验进行时室内温度为 21 °C，气压为标准大气压。



图1 蒸汽扩散柱

Fig.1 Vapor diffusion sphere



图2 钢桶

Fig.2 Steel drum

2.2 土样填筑

试验用土为兰州重塑黄土, 呈黄褐色~浅黄褐色。填筑时, 控制初始体积含水率为 10.07%, 干密度为 1.43 g/cm^3 , 基本物理指标见表 1。

表 1 土体基本物理指标

Table 1 Basic physical properties of soil

初始体积 含水率/%	最优体积 含水率/%	最大干密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限 /%	颗粒相 对密度	塑限 /%	塑性 指数
10.07	21.7	1.73	27.1	2.71	17.4	9.7

2.3 测试元件布置

图 3 为模型试验剖面图, 土体分 7 层填筑, 同时沿深度方向按间距 18 cm 布置 5 层温度传感器, 测试水蒸气增湿黄土时不同测点处温度随时间的变化规律。

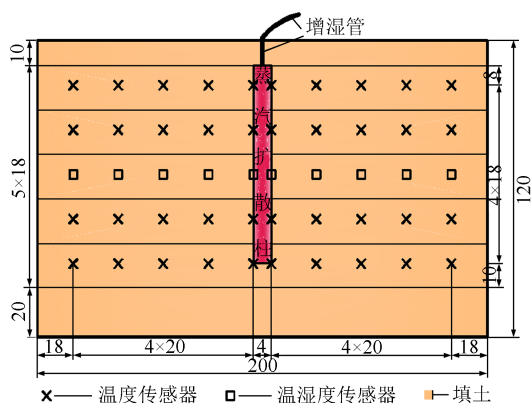


图 3 模型填筑及测试元件布置图 (单位: cm)

Fig.3 Layout chart of soil box filling and testing elements (unit: cm)

温度传感器平面布置情况如图 4 所示, 5 条半径将模型平面均分为 5 份, 每条半径上按间距为 20 cm 布置 4 个温度传感器, 中心点布置 1 个, 每层布置 21 个, 共布置 5 层。如图 5 所示, 在蒸汽扩散柱 1/2 h 处布置温湿度传感器, 实时监测增湿过程中径向各测点温度和含水率变化规律。

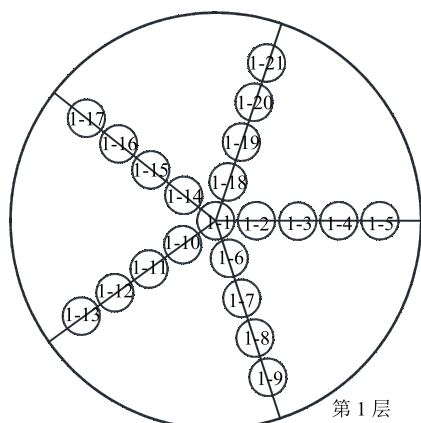


图 4 温度传感器平面布置图

Fig.4 Layout chart of temperature sensors



图 5 温湿度传感器平面布置图

Fig.5 Layout chart of temperature and humidity sensor

3 试验结果分析

3.1 水分场结果分析

蒸汽压为 0.10 MPa 时, 距蒸汽扩散柱不同径向距离处各测点体积含水率随时间变化曲线如图 6 所示。在增湿 0~165 min 时段内, 0 cm 测点的体积含水率以 0.113 %/min 的增湿速率快速增大。在 0~255 min 时段内, 20 cm 测点的体积含水率以 0.046 %/min 的增湿速率增大。其中 0 cm 和 20 cm 测点的体积含水率最大值分别为 28.7%、20.5%, 靠近土体最优体积含水率 (21.7%), 表明水蒸气的增湿效果较好, 可有效提高一定范围内土体的压实性能。

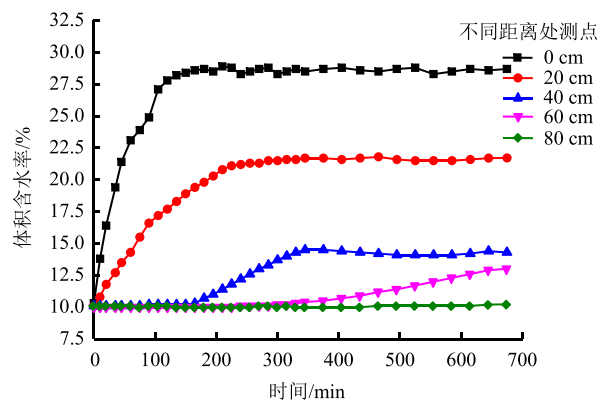


图 6 各测点含水率随时间变化曲线

Fig.6 Moisture content changes with time at each measuring point

同样增湿 180 min 后, 40 cm 测点的土体含水率以 0.027 %/min 的增速显著增大, 并在 345 min 后达到体积含水率最大值 14.5%。增湿 330 min 后, 60 cm 测点处的土体含水率开始以 0.009 %/min 的增速小幅增大。可知随径向距离增大, 土体增湿速率明显减小, 其原因是当水蒸气迁移路径增大时, 在土颗粒阻碍作用下, 压力梯度逐渐消散, 水蒸气运移速率减小, 逐渐被土颗粒吸附^[12, 18-19], 使得随

径向距离增大, 含水率梯度和温度梯度显著减小, 导致3种驱动力耦合作用下的土体增湿速率和增湿程度大幅减小。

3.2 温度场结果分析

蒸汽压为0.10 MPa时, 径向各测点土体温度随时间变化曲线如图7所示。增湿开始后, 距离蒸汽扩散柱0 cm测点的土体温度率先快速升高, 并在35 min时达到最大值为100.1 °C。增湿45、180、330 min后, 20、40、60 cm测点的土体温度显著增大。图7中温度随时间变化曲线的斜率, 表示对应测点的升温速率。计算得0、20、40、60 cm测点升温速率分别为2.86、0.50、0.08、0.029 °C/min。

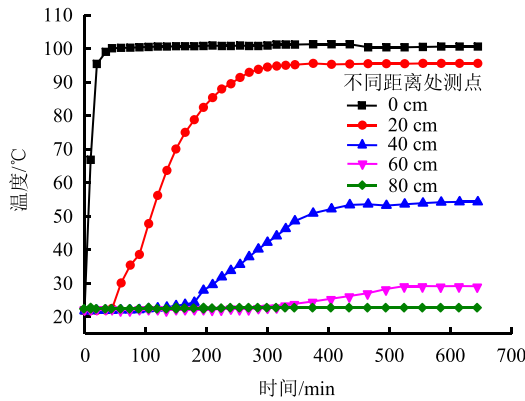


图7 各测点温度随时间变化曲线
Fig.7 Temperature changes with time at each measuring point

为了分析水蒸气增湿土体时温度沿径向的迁移规律, V 近似表征某范围内的土体温度传导速率, 其计算公式为

$$V = \frac{L_2 - L_1}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

式中: L_1 为某范围土体靠近增湿柱端径向距离; L_2 为某范围土体远离增湿柱端径向距离; T_1 为 L_1 处土体温度开始变化时间; T_2 为 L_2 处土体温度开始变化时间。

由式(1)计算得0~20、20~40、40~60 cm范围内的土体温度传导速率分别为0.33、0.15、0.13 cm/min。当水蒸气沿径向迁移时, 土体升温速率和温度传导速率大幅减小。其原因是水蒸气在非饱和黄土中的传热传质现象受到多重因素的影响。当水蒸气沿径向的迁移距离增大时, 受土颗粒对流阻力的制约, 蒸汽压快速消散, 蒸汽迁移速度的大小和方向不断发生变化^[2-3, 18], 迁移速率大幅减小, 逐渐被土颗粒吸收。使得水蒸气所携带的大部分热量被蒸汽扩散柱周围土体吸收, 致使土体升温速率

和温度传导速率随径向运移距离的增大而大幅减小。

结合图6、7可知, 0 cm测点土体温度在35 min时已达到最大值, 而此时的体积含水率为19.40%, 仅为最大值的67.60%, 说明在土体温度达到稳定值后体积含水率还将增大, 直至达到最大值。20、40、60 cm测点温度显著增大前, 其体积含水率分别增大了33.70%、5.94%、1.98%。同样在20、40、60 cm测点的体积含水率显著增大前, 其体积含水率已小幅增大, 分别比初始值的10.10%增大了16.80%、5.90%和2.97%。其原因是水蒸气增湿非饱和黄土时, 压力梯度驱动的水蒸气传热和汽/液态水迁移, 与温度梯度和含水率梯度引起的热传导和汽/液态水迁移耦合共存。在水蒸气迁移范围之内, 土体升温速率和增湿速率较大, 传热和增湿主要是由水蒸气迁移引起的。而在水蒸气未到达位置, 传热和增湿主要是由温度梯度和含水率梯度引起的水热迁移引起的。

对比土体增湿速率和升温速率可知, 水分迁移速率小于温度迁移速率, 且在20 cm处二者相差一个数量级^[19]。在整个增湿过程中, 80 cm处土体温度和含水率变化曲线接近水平, 仅发生微小变化, 说明没有水蒸气迁移到该范围内。综上分析可得, 当蒸汽压为0.10 MPa, 增湿时间小于10 h时, 温度和水分的运移范围为0~60 cm。

4 计算值与实测值对比分析

4.1 热湿耦合迁移方程的一组显式解析解

非饱和黄土作为一种典型的多孔介质, 假设其颗粒形状和孔隙分布均匀, 土颗粒吸湿后体积不变。水蒸气增湿土体时迁移方向是二维的, 且不考虑重力势。在常物性条件下, 根据参考文献[5,17], 得出含湿毛细多孔介质中二维热湿迁移控制方程:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D_m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + D_t \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha_e \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中: w 为土体含水率; t 为时间; D_m 为湿分迁移的质扩散系数; D_t 为湿分迁移的热质扩散系数; θ 为土体温度; α_e 为土体有效导热系数; x 、 y 为几何坐标。

对主控方程式(2)、(3)采用加法分离变量法, 找到其可能存在的所有解析解^[20]:

$$w = \left[\frac{C_1}{D_m} - \frac{C_2 D_t}{\alpha_e D_m} - C_8 \right] \frac{y^2}{2} + C_{10} y + C_3 + \frac{C_8 x^2}{2} + C_9 x + C_1 t \quad (4)$$

$$\theta = C_2 t + C_4 + \frac{C_5 x^2}{2\alpha_e} + C_6 x + \frac{(C_2 - C_5)y^2}{2\alpha_e} C_7 y \quad (5)$$

$$\alpha_e = \frac{\lambda_e}{\rho_0 c} \quad (6)$$

式中: λ_e 为土体的有效导热系数; ρ_0 为干骨架的密度; c 为单位质量干土含湿的比热容; $C_1 \sim C_{10}$ 为常数。

需要说明的是式 (4)、(5) 为主控方程 (2)、(3) 的一个通解, 且其体积含水率 w 和温度 θ 中不存在其他特殊函数, 均与时间和几何坐标分别成线性函数和二次多项式函数, 物性参数 D_m 、 D_t 和 α_e 仅对解析解的几何变化有影响。虽然该通解形式简单, 求解方法与常见的经典法不同, 但其在特定条件下作为显示标准解, 具有普遍物理意义, 可对非饱和黄土中的水热迁移研究提供参考^[20-21]。

4.2 初始条件和边界条件

对于初始体积含水率为 10% 的土体, 韩吉田等^[22]由恒流热法测得土体湿分迁移的质扩散系数 $D_m = 2.03 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 热质扩散系数 $D_t = 9.09 \times 10^{-9} \text{ m}^2/(\text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ 。有效导热系数 $\alpha_e = 3.352 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 单位质量干土含湿的比热容 $c = 1.664 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。根据模型试验选取边界条件如表 2 所示, 结合模型试验实测数据, 对解析解的精确性进行对比验证。

表 2 模型试验初始条件和边界条件

Table 2 Initial and boundary conditions for model tests

边界条件	时间	坐标 /m		体积含水率 /%	温度 /K
	/s	x	y		
初始时刻	0	0.000	0.000	10.1	295.05
	24 300	0.062	0.190	21.6	368.45
	24 300	0.124	0.380	14.4	325.35
结束时刻	24 300	0.186	0.570	10.7	298.55
	24 300	0.324	0.235	14.4	325.35
	24 300	0.162	0.117	21.6	368.45

将实际初始条件与边界条件代入式 (4)、(5) 解得

$$\text{Find}(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}) = \begin{Bmatrix} 9.14 \times 10^{-4} \\ 6.13 \times 10^{-4} \\ 10.1 \\ 295.05 \\ 0.0118 \\ -840.215 \\ 849.5285 \\ 89.23 \\ -38.7885 \\ -52.869 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\text{Find}(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10})$ 为常数。

得出满足本试验条件的特解, 该特解在对应条件下具有一定的准确性, 可较好地阐明物理模型。也可作为检验和研究相关数值解精确度、收敛性与稳定性的标准解。

4.3 计算结果分析

增湿过程中, 以 20 cm 测点处为例, 土体温度和体积含水率计算值与实测值随时间变化曲线如图 8 所示。土体温度与体积含水率实测值和计算值的变化趋势基本一致, 均随增湿时间的增大, 表现出先快速上升、后缓慢增大的变化趋势, 但土体的增湿速率小于升温速率。其中在 0~240 min 内, 温度计算值大于实测值, 在 0~300 min 时段内, 体积含水率实测值大于计算值, 且二者计算值与实测值差值随时间增大而减小, 直至基本一致。

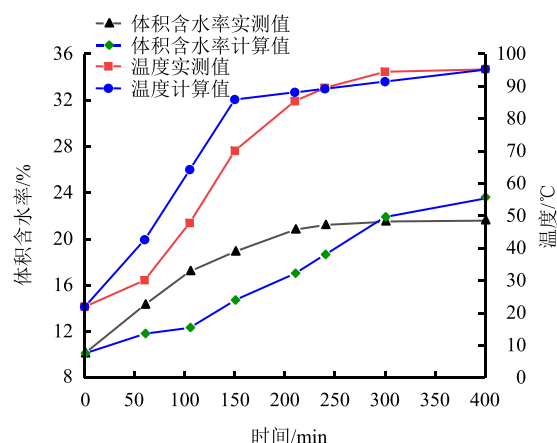


图 8 20 cm 测点土体温度和含水率实测值与计算值对比图
Fig.8 Comparison of measured and calculated soil temperature and moisture content of 20 cm

其原因是在解析解求解时, 通过边界条件将水蒸气传热传质效应, 分配给热质扩散系数 D_t 和质扩散系数 D_m 项的系数 C_1 、 C_2 。但在增湿初始段 (0~200 min), 水蒸气并未充分迁移到 20 cm 测点处, 致使温度计算值与实测值的差值较大。但当增湿时间增大, 水蒸气运移到该位置后, 二者数值基本接近。同样在土体含水率计算时, 解析解通过边界条件, 将压力梯度驱动的水蒸气传热和汽/液态水渗流迁移分配给时间和几何坐标变量, 没有完全真实反映蒸汽压的消散规律。而在蒸汽压作用下, 水蒸气快速迁移到距蒸汽扩散柱较近的 20 cm 测点, 使得在增湿初始时刻, 该测点的体积含水率实测值大于计算值。但随着增湿时间延长, 土体实际吸水量逐渐达到平衡, 计算含水率逐渐增大, 二者差值减小。

在整个迁移过程中,土体含水率和温度实测值与计算值的差值较小,说明该特解与试验条件的匹配性较好。

5 结 论

(1) 水蒸气增湿非饱和黄土时,蒸汽传热和温度梯度引起的热传导,与压力梯度、含水率梯度和温度梯度驱动的水蒸气和液态水迁移耦合共存。在水蒸气迁移范围之内,土体升温速率和增湿速率较大,以蒸汽传热和压力梯度驱动的水蒸气和液态水迁移为主。而在水蒸气未达位置,以温度梯度引起的热传导和含水率梯度、温度梯度驱动的水热迁移为主。当蒸汽压为 0.10 MPa,增湿时间小于 10 h 时,温度和水分的迁移范围为 0~60 cm。

(2) 水蒸气沿径向迁移时,受土颗粒对流阻力的制约,蒸汽压快速消散,蒸汽迁移速度的大小和方向不断发生变化。使得土体的升温速率、温度传导速率和增湿速率均随径向迁移距离的增大而大幅减小,导致不同测点处 3 种驱动力耦合作用下的土体增湿速率和增湿程度的差异较大。土体增湿速率远小于升温速率,在 20 cm 处二者相差一个数量级。

(3) 水蒸气增湿土体时,可克服传统浸水法增湿时间长、均匀性差等缺点。通气柱一定范围内的土体最大含水率接近最优含水率,增湿效果较好,可有效提高土体的压实性能。

(4) 根据模型试验边界条件,确定含湿毛细多孔介质中二维热湿迁移方程的一组代数显式特解,其可作为检验和研究相关数值解精确度、收敛性与稳定性的标准解。

参 考 文 献

- [1] 王铁行, 李宁, 谢定义. 土体水热力耦合问题研究意义、现状及建议[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 488-493.
WANG Tie-hang, LI Ning, XIE Ding-yi. Necessity and means in research on soil coupled heat-moisture-stress issues[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(3): 488-493.
- [2] 刘峰, 朱庆杰, 程雨, 等. 多孔介质热流固耦合问题及研究进展[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 254-256.
LIU Feng, ZHU Qing-jie, CHENG Yu, et al. Problems of fluid-solid-heat coupling for porous media and its research progress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Suppl. 2): 254-256.
- [3] ARSHA LEKSHMI K R, ARNEPALLI D N. A review on coupled heat and water vapour transport in unsaturated soils[C]//Geotechnical Frontiers. Orlando: [s. n.], 2017: 746-755.
- [4] 施明恒. 多孔介质传热传质研究的进展与展望[J]. 中国科学基金, 1995, 32(1): 33-36.
SHI Ming-heng. Recent development and prospect of heat and mass transfer in porous media[J]. **Bulletin of National Natural Science Foundation of China**, 1995, 32(1): 33-36.
- [5] PHILIP J R, DE VRIES D A. Water vapour movement in porous materials under temperature gradient[J]. **American Geophysical Union**, 1957, 38(2): 222-231.
- [6] WANG T, SU L. Experimental study on water vapour migration in unsaturated loess under effect of temperature[J]. **Cold Regions Engineering**, 2010, 24(3): 77-86.
- [7] THOMAS H R, KING S D. Coupled heat and mass transfer in unsaturated soil—a potential-based solution[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1992, 16(10): 757-773.
- [8] THOMAS H R, REES S W, SLOPER N J. Three-dimensional heat, moisture and air transfer in unsaturated soils[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1998, 22(2): 75-95.
- [9] COLLIN F, LI X L, RADU J P. Thermo-hydro-mechanical coupling in clay barriers[J]. **Engineering Geology**, 2002, 64(3): 179-193.
- [10] 陈佩佩, 白冰. 内含圆柱域热源的非饱和土介质水热耦合作用的 SPH 数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1025-1030.
CHEN Pei-pei, BAI Bing. Numerical simulation of moisture-heat coupling in porous media with circular heat source by SPH method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(6): 1025-1030.
- [11] 白冰, 刘大鹏. 非饱和介质中热能传输及水分迁移的数值积分解[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2085-2089.
BAI Bing, LIU Da-peng. Numerical integral solutions of heat transfer and moisture transport in unsaturated porous media[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(12): 2085-2089.

- [12] ZHANG X W, LIU W. Thermal non-equilibrium modeling of coupled heat and mass transfer in bulk adsorption system of porous media[J]. **Journal of Porous Media**, 2011, 14(6): 555-563.
- [13] BAI B, XU T, NIE Q, et al. Temperature-driven migration of heavy metal Pb^{2+} along with moisture movement in unsaturated soils[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [2020-03-09]. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119573>
- [14] SHANG Y, DONG M, LI S, et al. Analysis of a ground source heat pump system using an unsaturated 3-dimensional model[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2017, 112: 1083-1094.
- [15] 詹良通, 邱清文, 杨益彪, 等. 黄土覆盖层水-气耦合运移土柱试验及数值模拟[J]. **岩土工程学报**, 2017, 39(6): 969-977.
- ZHAN Liang-tong, QIU Qing-wen, YANG Yi-biao, et al. Soil column tests and numerical simulations of moisture-gas coupled flow in a loess cover[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(6): 969-977.
- [16] ZENG Y J, SU Z B, WAN L, et al. Numerical analysis of air-water-heat flow in unsaturated soil: is it necessary to consider airflow in land surface models?[J]. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 2011, 116: 1-18.
- [17] 王补宣. 多孔介质的传热传质[J]. **清华大学学报(自然科学版)**, 1992, 32(增刊 1): 5-12.
- WANG Bu-xuan. Heat and mass transfer in porous media[J]. **Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)**, 1992, 32(Suppl. 1): 5-12.
- [18] 卢涛, 沈胜强, 葛玉林. 含湿毛细多孔介质干燥过程相变传热传质分析[J]. **工程热物理学报**, 2003, 24(1): 100-102.
- LU Tao, SHEN Sheng-qiang, GE Yu-lin. A three-equation model for heat and mass transfer with phase change in wet region of capillary porous media during drying[J]. **Journal of Engineering Thermophysics**, 2003, 24(1): 100-102.
- [19] 王补宣. 多孔介质中的对流传热传质[J]. **西安交通大学学报**, 1994, 28(5): 51-57.
- WANG Bu-xuan. Convective heat and mass transfer in porous media[J]. **Journal of Xi'an Jiaotong University**, 1994, 28(5): 51-57.
- [20] 蔡睿贤, 张娜. 含湿毛细多孔介质传热与传质基本方程的一组代数显式解析解[J]. **机械工程学报**, 2003, 39(6): 1-3.
- CAI Rui-xian, ZHANG Na. Algebraically explicit analytical solutions for heat and mass transfer in wet porous media[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2003, 39(6): 1-3.
- [21] 蔡睿贤, 张娜. 多孔介质中自然对流 Brinkman 模型的解析解[J]. **中国科学(A 辑)**, 2002, 32(6): 566-573.
- CAI Rui-xian, ZHANG Na. Analytical solution of natural convection Brinkman model in porous media[J]. **Science in China (Series A)**, 2002, 32(6): 566-573.
- [22] 韩吉田, 归柯庭, 施明恒, 等. 恒热流法同时测定土壤热质扩散系数的研究[J]. **农业工程学报**, 1997(3): 252-253.
- HAN Ji-tian, GUI Ke-ting, SHI Ming-heng, et al. Problems of fluid-solid-heat coupling for porous media and its research progress[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 1997(3): 252-253.