

DOI: 10.11779/CJGE20221067

高温作用下非饱和黄土水热迁移试验研究

赵再昆¹, 王铁行¹, 金鑫², 张亮¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安工业大学建筑工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 黄土的水敏性特点使其强度随含水率降低而大幅增加, 高温疏干方法进行黄土加固具有广阔应用前景, 研究高温作用下非饱和土水热迁移规律具有重要意义。通过自制高温水热迁移装置, 进行不同高温水平下不同初始含水率黄土的水热迁移试验。试验结果表明: 高温对水分具有显著驱动作用; 当热端温度超过 100℃时, 试验初期贴近热源土体的水分被快速驱离, 是气液相变导致的气态水迁移显著增加所致; 含水率分布由峰值曲线逐渐演变为含水率单向增大的缓变曲线; 热源温度越高, 水分迁移通量越大。建立了高温水热迁移模型, 并通过计算验证了模型的可靠性。以体积含水量表示计算所得水分场数据分析了高温和水分含量对水分迁移的综合影响机制, 根据黄土高温水分迁移特征在不同体积含水量阶段的差异化表现, 将高温水分迁移特征划分为 3 个区间。I 低体积含水量区间: 水分迁移通量随体积含水量变化曲线呈现峰值曲线, 水分主要迁移形式为气态水; II 中体积含水量区间: 随体积含水量增大, 气态水迁移通量减小的同时液态水迁移通量增大; III 高体积含水量区间: 温度作用对水分迁移进程不产生影响。

关键词: 高温; 非饱和黄土; 含水率; 水热迁移

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)01-0151-11

作者简介: 赵再昆(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事黄土、冻土工程方面的研究工作。E-mail: zhaozaikun@xauat.edu.cn。

Experimental study on water and heat migration of unsaturated loess under high temperatures

ZHAO Zaikun¹, WANG Tiehang¹, JIN Xin², ZHANG Liang¹

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Civil and

Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: The strength of loess increases greatly with the decrease of water content. The high-temperature drainage method has broad application prospects for loess reinforcement, so it is significant to study the water and heat transfer of unsaturated soils under high temperatures. A water and heat transfer device allowing the action of high temperatures is developed to test the water and temperature fields of loess with specific initial water content under the action of a high-temperature heat source. The test results show that the high temperature has a significant driving effect on water compared with the normal temperature heat source. When the hot-end temperature exceeds 100℃, the water of soils close to the hot source is rapidly driven away at the beginning of the tests, which is caused by the significant increase of gaseous water migration due to the gas-liquid phase change. The distribution curves of water content gradually evolve from a peak type to a unidirectional increase one of the water content. Water migration fluxes significantly increase with heating source temperature. A high-temperature water and heat transfer model is established, and its accuracy is verified through the trial calculation. The comprehensive influence mechanism of high temperature and water content on water migration is analyzed based on the calculated results. The high-temperature water migration characteristics are divided into three intervals: I (low water content interval), the water migration flux curve with water content shows a peak curve, and water migrates mainly in gaseous form. II (medium water content interval), as the water content increases, the migration flux of gaseous water decreases while the migration flux of liquid water increases. III (high water content interval), the temperature has a rare effect on the water migration. The findings may provide preliminary revelation on the water and heat migration characteristics of high-temperature unsaturated soils.

Key words: high temperature; unsaturated loess; water content; water and heat migration

0 引言

高温作用下非饱和土水分迁移非常显著^[1]。黄土

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究重点项目(2020ZJ-49); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JQ-644); 陕西省教育厅科研计划项目(21JK0672)

收稿日期: 2022-08-29

的水敏性概念揭示出黄土强度随含水率的变化非常显著^[2]，低含水率黄土的强度远大于高含水率黄土^[3]，高温作用下黄土含水率的大幅降低将显著提高黄土坑坡稳定性和无支护黄土基坑垂直开挖深度。采用降低土体含水率的高温疏干方法进行黄土基坑加固具有潜在的应用前景。合理评价高温作用下非饱和土水热变化规律及其背后水热迁移机理是当前亟待解决的问题。

非饱和土水热迁移问题是现阶段研究的热点问题，以往研究主要集中于常温环境，取得了较多成果。由于青藏公路、青藏铁路工程建设的巨大推动，众多学者通过试验和理论分析，在多年冻土水热迁移机理及理论模型等方面取得了诸多研究成果^[4]。近年来基于锅盖效应对高铁、机场道基病害问题，多位学者通过试验揭示出了非饱和土中气态水迁移现象^[5-6]。同时，为了解决广大的季节冻土地区的土体病害问题，对膨胀土、黄土、盐渍土等区域性土的水热问题开展了大量研究工作^[7-11]。已有研究表明：温度对水分迁移具有重要的驱动作用，同时含水率变化对水热迁移产生重要影响。常温范畴的研究成果为高温下水热迁移的研究提供了坚实的基础。

高温作用下非饱和土的水热迁移问题更加复杂，目前高温水热迁移方面国内外众多学者已有较多研究工作，揭示出高温作用下土体的水热运移参数发生显著改变^[12-15]。由于膨润土具有作为高放废物处置库的缓冲/回填材料的潜在应用价值，其高温水热迁移问题得到较为广泛的研究^[16]。在试验测试研究方面，秦冰等^[17]实测了高庙子膨润土在 20~100℃ 温度范围内的基质吸力；后勤兵工程院自主研发了高温高压土工三轴仪^[18]，陈皓等^[19]利用该仪器实测了 20~80℃ 温度范围内高庙子膨润土的强度；核工业北京地质研究院^[20]搭建了缓冲材料膨润土大型试验台架，该装置热源的运行温度为 90℃，可监测膨润土的温度、含水率、导热系数、应力、变形等参数。缓冲/回填材料的多场耦合模型亦有一些研究成果^[21-22]，其中秦冰等^[22]所建模型的未知变量较少，模型形式较为简明。综上可知，现有高温非饱和土的水热迁移研究取得较大进展，但主要考虑 100℃ 以下的高温环境。本文锚定热减湿加固工法的可行性的研究目标，以非饱和黄土为研究对象，将高温拓展至 150℃ 水平，开展水热迁移试验研究。

本文自制高温水热迁移装置，应用该装置实测不同高温水平、高温作用时间、水分初始含量下非饱和黄土高温水热迁移规律，建立高温水热迁移模型，分析高温和含水率对水热迁移的综合作用机制。

1 试样和装置

1.1 试样制备

试验所用土样取自西安空港新城，属于第四纪晚更新世（Q₃）黄土，在黄土区广泛分布，试验黄土的物理指标见表 1。

样品制备严格遵循土工试验标准。首先将采集的黄土风干、粉碎、筛分后制成标准干土，然后向干土中加入蒸馏水，配制具有特定含水率的湿土，并密封静置 72 h，期间每隔 24 h 翻动一次。最后，根据试样密度和试验矩形盒土样体积计算土样质量，称量此质量土样并装入制样盒，表面整平后使用压实板加压将其压实到土样高度（土样体积），再将矩形盒敞口侧密封。试样制备完成后再密封 24 h 以保证土体水分均匀。

1.2 试验装置

为实现高温条件下非饱和土水热迁移试验，自制了高温水热迁移装置，装置细节如图 1 所示。该装置共分 4 个系统：水热迁移发生系统，高温电加热系统，水浴恒温系统和温度监测系统。

水热迁移发生系统由特制矩形试样盒和温控装置组成，如图 1。矩形试样盒的材质为聚四氟乙烯（Teflon），该材料的最大耐受温度达 250℃，且表面张力较小，具有优异的耐热性和疏水性，满足试验要求。矩形试样盒的长×高×宽=500 mm×100 mm×100 mm。矩形管的顶面沿长度方向开有 9 个直径 0.3 cm 的圆孔，用于传感器导线的外引。保温层的材料为玻璃棉（厚度为 2.5 cm，密度为 24 kg/m³），具有良好的保温隔热性能。绝缘层表面装有水平仪，以检查试样的水平状态。

高温电加热系统由电加热板和带有温度控制器的电源组成，如图 1（a），（d）。电热板作为高温热源安装在水平矩形试样盒一端，加热板材料为铸铝，其表面负荷 3 W/cm²，工作温度最高 400℃，满足试验要求。温度控制器可根据预设温度，通过控制电源的启动或关闭，使电热板温度维持在试验温度。

表 1 试验材料物理指标

Table 1 Physical parameters of test material

试样孔隙比 n	试样干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 I_P	土颗粒密度 $r_s/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	含量/%		
						黏粒(<5 μm)	粉粒(5~50 μm)	砂粒(>50 μm)
0.936	1.4	19.1	31.6	12.5	2.71	22	66	12

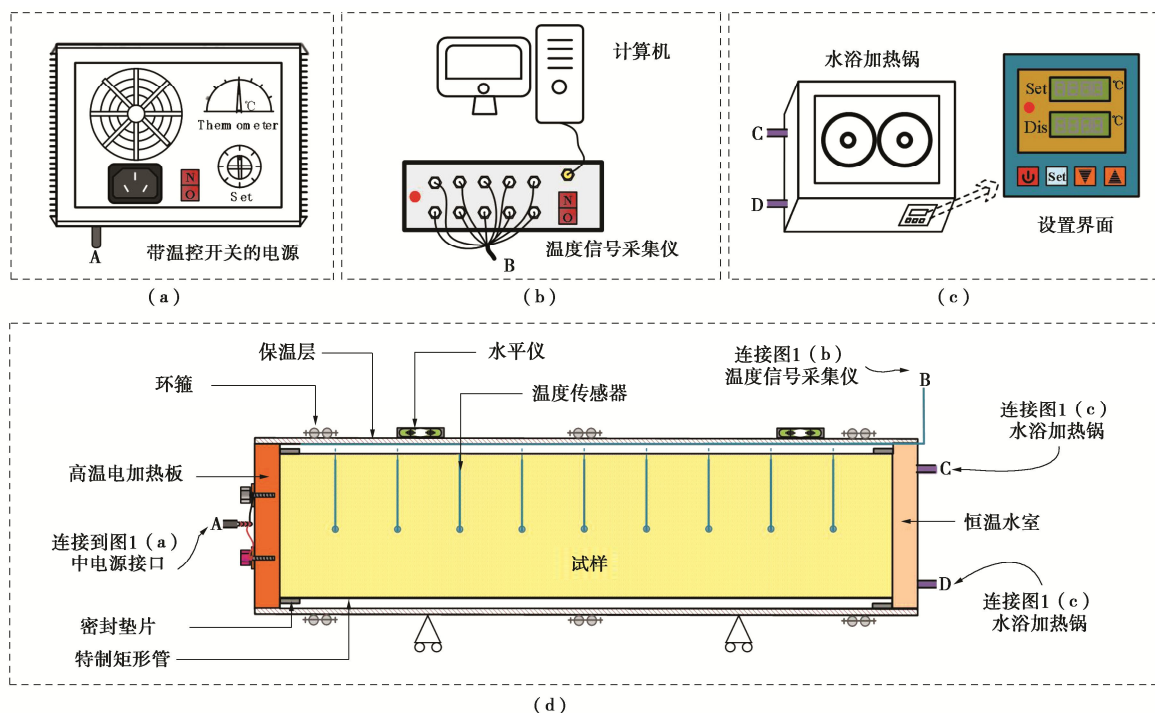


图 1 高温水热迁移装置

Fig. 1 Schematic diagram of high-temperature resistant water migration devices

温度监测系统包括温度传感器、数据采集仪器、用于数据存储和分析的计算机,如图 1(b),(d)所示。温度传感器为铅型铂热电阻 PT100 温度传感器(温度范围 $-50\sim 400^{\circ}\text{C}$,允许偏差 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$),满足试验精度要求。

水浴恒温系统包括水室、水浴锅、连接管,如图 1(c),(d)所示。水室设置在水平试样的另一端,作为试样的恒温源。水浴加热锅内水分温度恒定,水分在水室和水浴锅的循环过程使水室温度与水温保持一致。

1.3 试验流程及方案

试验开始前先将试样放入恒温箱静置 24 h,使试样温度均一化,恒温箱温度与试验时恒温水室的温度一致。由于电热板通电约 1 min 即可升至试验温度,且恒温水室的水分已提前保持试验温度,因此装置启动即认为试验开始,试验过程中保持热端和恒温端温度固定,监测温度场和水分场动态变化。

水分传感器的测量精度受温度影响较大,故本文采用试验结束后取样的方法测量含水率。将试样沿长度方向均匀切片,采用烘干法测量切片的含水率,以获得准连续的水分场数据。水分场数据可反算土样的水分总质量,对比试验前的水分总质量,即可校核所测水分场的准确度(防泄漏)。校核结果表明,取样测量含水率的方法具有较高精度。借鉴 Cleall 等控制土体水分散失的方法和标准^[23],试验过程中每隔 24 h 通过称重法进行试样质量平衡检测,若试样损失质量

超出总质量的 0.2%,重新进行该组试验。

对不同初始含水率 w_i 和高温热源 T_h 的试样进行不同持续时间 t 的水分迁移试验。土体初始温度和恒温端的温度统一设置为 30°C ,试验设置 6 个高温 T_h 水平: 50°C , 70°C , 90°C , 110°C , 130°C , 150°C ;同时参考自然状态下黄土的含水率变化区间^[2],设置 3 个初始含水率 w_i 水平: 16%, 19%, 22%;试验持续时间 t 分别设置为 1, 3, 5, 7, 9, 11, 14 d。

2 试验结果与分析

2.1 高温对热迁移的影响

图 2 为 $T_h=110^{\circ}\text{C}$ 和 $w_i=19\%$ 的非饱和黄土在不同 t 的温度场。由图 2 可知,热源施加 5 min 后,土体升温范围约为样本长度的 50%。可见,高温作用下,土体温度在短时间内迅速上升和热量快速传递。此现象与 Cleall 等^[23]的研究结论一致。分析原因:热源作用初期水分迁移不明显,热质迁移量亦较小,热量传递形式主要为热传导,而土体含水率尚未大幅降低,导热性能良好,热传导效率高。热源施加 24 h 后,温度场基本稳定,说明后期含水率变化引起的热参数变化并未明显改变温度分布,即认为土样温度场在 24 h 基本上达到稳态。

图 3 为不同热源温度下的稳态温度场。由图可知,温度梯度自热端向冷端递减,例如 $T_h=110^{\circ}\text{C}$ 施加 24 h 时,土体的温度梯度由靠近热端区域的 $2.2^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 变化

至靠近冷端区域的 $1.6^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 。热源 T_h 越高, 这种递减现象越明显, 靠近热端区域与靠近冷端区域的温度梯度差值越大。当热源 T_h 较小时, 靠近热端区域与靠近冷端区域的温度梯度差值较小, 甚至温度分布可以按线性分布考虑。这种温度梯度变化是水分迁移引起的导热性能变化所致。

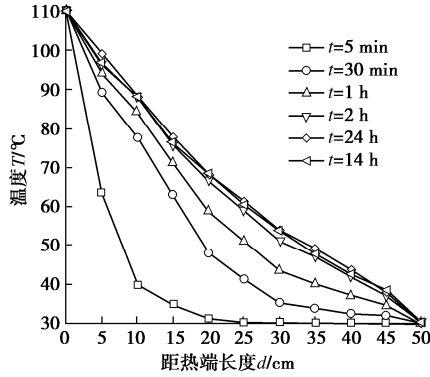


图2 $T_h=110^{\circ}\text{C}$ 作用下 $w_i=19\%$ 试样的温度场随时间变化
Fig. 2 Curves of temperature field with time at $T_h=110^{\circ}\text{C}$ and $w_i=19\%$

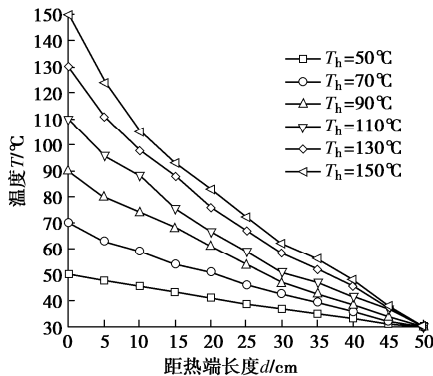


图3 $w_i=19\%$ 的试样在不同 T_h 作用 24 h 后的温度场
Fig. 3 Curves of temperature field with T_h at $t=24\text{ h}$ and $w_i=19\%$

王铁行等^[24]曾通过室内试验测量黄土热性质, 提出了非饱和黄土的导热系数 λ_{eff} 和比热容 C :

$$\lambda_{\text{eff}} = (4.17w^2 + 1504)10^{0.25\rho_d - 3.9}, \quad (1)$$

$$C = \rho_d(1.27 + 0.021w)10^3. \quad (2)$$

式中: λ_{eff} 为土体导热系数 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$); w 为质量含水率 (%); ρ_d 为干密度 ($1.4\text{ g}/\text{cm}^3$); C 为比热容 ($\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$)。

由式 (1), (2) 可知, 土体含水率降低引起导热性能 λ_{eff} 和比热容 C 降低。由于发生水分迁移, 靠近热端区域土体含水率降低, 导热系数降低使得其温度梯度较大; 靠近冷端区域土体含水率增大, 导热系数增大使得其温度梯度较小, 从而出现了从热端向冷端温度梯度递减的现象。当热端温度较高时, 因高温的强力驱动使得含水率梯度增大, 导致温度梯度出现明

显递减。当热端温度较小时, 土体含水率变化不大, 使得温度梯度变化不大。

2.2 高温对水分迁移的影响

(1) 高温作用下水分场随时间变化

图 4 为 $w_i=19\%$ 和 $T_h=110^{\circ}\text{C}$ 试样在不同时间 t 的水分场。图 4 可知, T_h 持续作用下土体发生了显著的水分迁移现象, 水分从高温区向低温区迁移, 高温区含水率增加, 低温区含水率减小, 温度梯度是水分迁移的驱动力。含水率分布随时间变化呈现比较复杂的进程, 初期贴近热源土体的水分被快速驱离, 驱离至距热端一定距离处来不及消散, 形成高含水率区域, 含水率分布呈现峰值曲线, 随着时间增加峰值逐渐向冷端推移且峰值变小, 逐渐演变为含水率单向增大的缓变曲线。当靠近冷端区域土体含水率达到准饱和时 (饱和度 89%), 由于含水率较大时渗透系数大, 靠近冷端区域水分迁移进程较快, 使得靠近冷端区域土体含水率分布变得平缓。

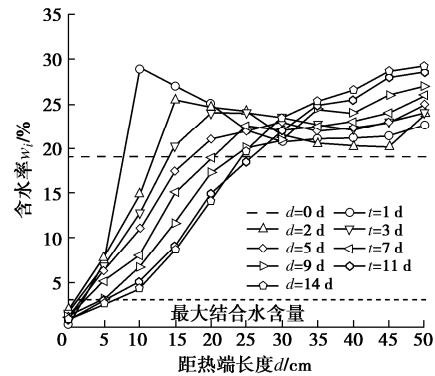


图4 $T_h=110^{\circ}\text{C}$ 作用不同时间 t 时 $w_i=19\%$ 试样的水分场
Fig. 4 Water fields of sample with $w_i=19\%$ at $T_h=110^{\circ}\text{C}$ for different time t

根据王铁行等^[25]的研究结果, 黄土结合水含量在 $2.0\%\sim 4.0\%$, 本文试验结合水含水率取值 3.0% , 将高温作用下低于此含水率的区域视作为干燥区, 即区域内不存在自由水。图 4 可见, 110°C 高温热源作用下靠近热端的土体迅速形成干燥区, 这显示出高温热源对土体的快速疏干作用。且随着温度作用时间延长, 干燥区的范围不断扩大, 如 $t=1\text{ d}$ 的干燥区长度为 2.1 cm , 而 $t=14\text{ d}$ 的干燥区长度增至 6.4 cm 。

T_h 作用 11 d 之后水分场变化缓慢, 历时 14 d 的水分场分布与历时 11 d 差别不大, 认为 $t=14\text{ d}$ 时形成了稳定的水分梯度, 含水率梯度产生的基质吸力差可以抵抗温度梯度作用 (包含气态水迁移), 水热运动达到动态平衡。

(2) 不同高温水平下的水分场

图 5 为 $w_i=19\%$ 的土样在不同 T_h 作用 24 h 后的水分场。整体来看, T_h 的升高提高了水分迁移速度。从

图5(a), (b), (c)可知, T_h 为 50, 70 和 90℃ 时试样含水率分布呈现含水率单向增大的缓变曲线, 没有出现峰值曲线, T_h 为 50℃ 试样的冷-热端含水率差为 4.9%; T_h 为 70℃ 和 90℃ 的试样的含水率差为 5.7% 和 10.2%, 相比 $T_h=50℃$ 试样冷-热端含水率差分别增加了 1.16 倍和 2.08 倍。由图5(d), (e), (f)可知, 热端 T_h 超过 100℃ 后, 含水率分布均呈现峰值曲线, 热端土体的含水率出现断崖式下降, 水分运动明显增强, 这与超过 100℃ 高温的水气相变及气态水运动密切相关。 $T_h=110℃$ 作用下土样热端出现约 2.8 cm 的干燥区, 且距热端 8.5 cm 处出现明显的含水率峰值。 $T_h=130℃$ 试样的干燥区长度为 4.2 cm, 在距热端 12 cm 处出现含水率峰值; $T_h=150℃$ 试样的干燥区长度为 6.0 cm, 含水率峰值推进至距热源 14 cm 处。

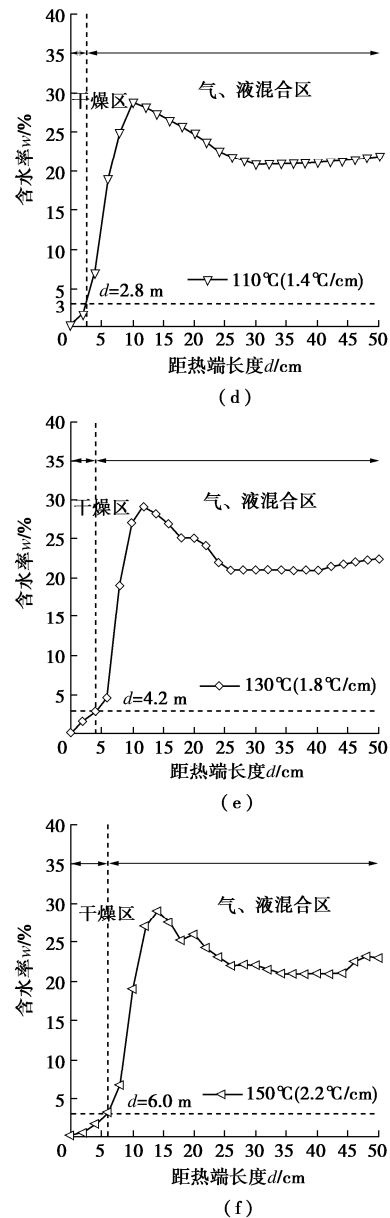
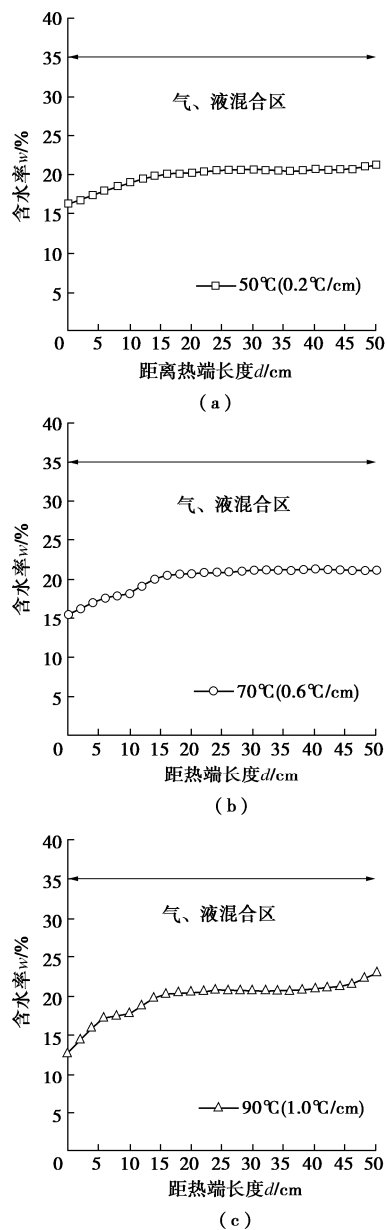


图5 $w_i=19\%$ 的试样在不同热源 T_h 作用 $t=24$ h 后的水分场

Fig. 5 Curves of water field with T_h at $t=24$ h, $w_i=19\%$

整体来说, 高温作用极大地强化了水分迁移行为。 T_h 从 90℃ 增加至 110℃, 含水率分布发生了最为明显的变化。 T_h 在 110℃~150℃, T_h 越大, 含水率峰值距热端的距离越大, 说明温度越高, 对水分迁移的驱动力越强。对比图3可以发现, 含水率峰值位置与温度 100℃ 位置基本一致, 靠近热端含水率出现断崖式下降区域的温度高于 100℃, 这是气液相变区域。这些都说明, 在高温作用下, 气液相变和气态水迁移对水分迁移有显著影响。

比较所有试样的温度场和水分场实测数据, 可以发现, 对于初始温度和含水率均匀分布的土样, 在热端施加高温后, 温度场和水分场均随时间发生变化, 但温度场达到稳态分布历时较短, 而水分场达到稳态

分布的时间远大于温度场,即水分场变化滞后于温度场。温度场达到稳态分布后,水分场的后期变化不足以引起温度场发生较大变化。

2.3 不同初始含水率下的水分场

(1) 不同初始含水率土样的水分场变化

图 6 为不同初始含水率 w_i 的土样在不同 T_h 作用 14 d 后的水分场变化。由图 6 可知,高温区含水率减小,低温区增加,变化量 Δw 均随 T_h 升高呈不断增大的规律,特别是 T_h 在 100°C 前后含水率变化显著增加。含水率变化与土样初始含水率 w_i 又有密切关系,对初始含水率处于 $16\% \sim 22\%$ 区间土样, T_h 在 $50^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 时, $w_i=22\%$ 试样的 Δw 均小于 $w_i=19\%$ 和 $w_i=16\%$ 的土样; T_h 在 $50^\circ\text{C} \sim 130^\circ\text{C}$ 时, $w_i=16\%$ 试样的 Δw 大于 $w_i=19\%$ 的试样; $T_h=150^\circ\text{C}$ 时, $w_i=19\%$ 试样的 Δw 大于 $w_i=16\%$ 的试样。高温作用下,土体含水率变化与其初始含水率水平和高温值均有密切关系。

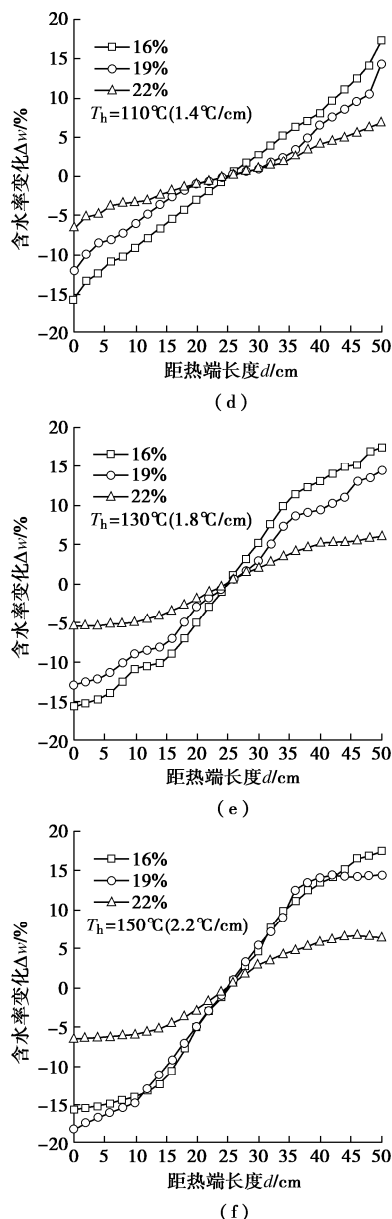
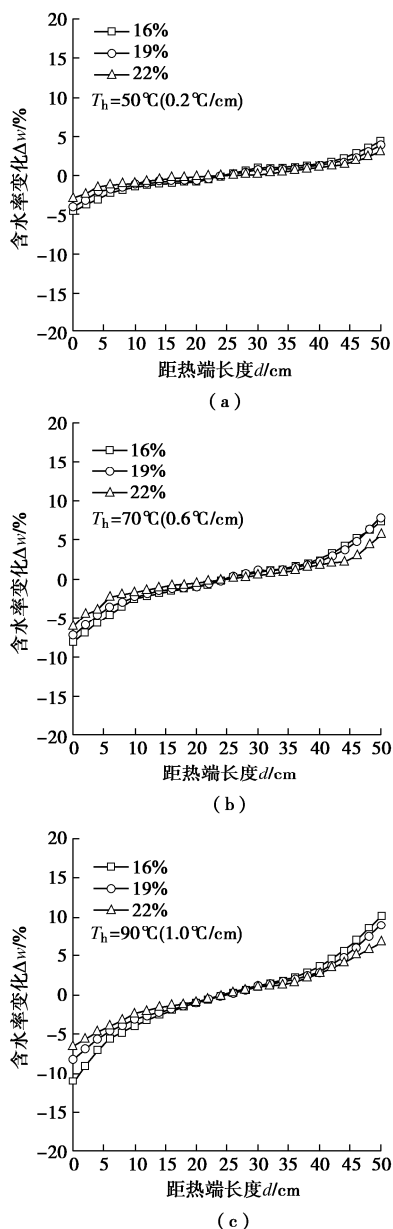


图 6 $w_i=16\%$, 19% 和 22% 的试样经不同热源 T_h 作用 $t=14\text{ d}$ 后的水分场

Fig. 6 Curves of water field with T_h and w_i at $t=14\text{ d}$

(2) 水分迁移通量

为更直观分析水分迁移总量与初始含水率和温度的关系,根据图 6 含水率变化计算得到水分迁移总量。图中含水率减小区域或含水率增大区域在试验前后的水量变化即为水分迁移总量。由于试验过程中每隔 24 通过称重进行质量平衡检测,保证试验过程中密封性良好,根据含水率减小区域 Δw 分布和含水率增大区域 Δw 分布计算得到的水分迁移总量一致。水分迁移总量除以试样截面积和迁移时间 t , 即可得到水分迁移通量 \bar{q}_m 。计算所得 \bar{q}_m 如图 7 所示。

由图 7 可知,水分迁移通量 \bar{q}_m 随热源温度升高而增大,但 \bar{q}_m 的温度敏感性受 w_i 影响。在 T_h 分别为 $50^\circ\text{C} \sim 130^\circ\text{C}$ 时, \bar{q}_m 均表现出随 w_i 减少而单调增加的规律,且随热源温度升高, \bar{q}_m 的增幅不断扩大。

Nassar 等^[26]进行的不同 w_i 盐渍土在常温热源作用下的水热迁移试验也揭示出相同规律, 其认为这主要是气态水迁移单位速率高于液态水迁移单位速率, 且具有较低含水率的土样中气态水占据更多迁移通道所致。

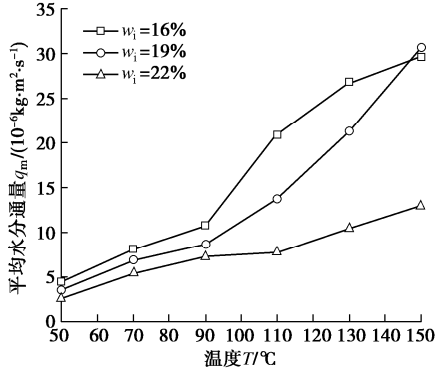


图 7 14 d 后不同 w_i 土样的水分通量 \bar{q}_m 与热源 T_h 的关系

Fig. 7 Relationship between mean water flux \bar{q}_m and T_h after 14 days at different w_i

然而 $T_h = 150^\circ\text{C}$ 作用下的 \bar{q}_m 和 w_i 不再符合线性关系, $w_i = 19\%$ 土样具有最高的 \bar{q}_m , $w_i = 16\%$ 土样的 \bar{q}_m 次之, $w_i = 22\%$ 土样的 \bar{q}_m 最小。可见, 随着热源温度继续增加, 水分迁移通量、热源温度、含水率三者之间相互关系更加复杂。

3 高温水热迁移计算模型

3.1 计算模型

高温作用下土中发生液态水、气态水的混合迁移, 高温作用引起的干空气密度的变化幅度远小于气态水密度, 且 Henry 系数 (反映液态水溶解干空气的能力) 随温度升高迅速减小, 故本研究不考虑干空气的迁移作用和液态水对干空气的溶解作用。

考虑高温作用的非饱和土水分迁移模型可以表示为^[27-29]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\theta_l + \frac{\rho_v}{\rho_l} \theta_v \right) = \frac{\partial q}{\partial x}, \quad (3)$$

$$q = q_l + q_v$$

$$= K_{lh} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + K_{lv} \frac{\partial T}{\partial x} + K_{vh} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{vv} \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (4)$$

式中: θ , ρ , q 分别为体积含水量 (%), 密度 (g/cm^3), 水分体积通量 (m/s), 下标 l 和 v 分别表示液态水分量和气态水分量; h 为基质吸力的水头形式 (m); T 为温度 (K); x 为空间水平向坐标, 向右为正 (m); 式 (4) 中等号右侧 4 项分别表示液态水等温渗流项、液态水非等温渗流项、水汽等温扩散项和水汽非等温扩散项, 其中 K_{lh} , K_{lv} , K_{vh} , K_{vv}

分别对应各迁移项的传导系数。

王铁行等^[30]曾开展干密度 $1.2 \sim 1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 范围内非饱和 Q_3 黄土基质吸力试验和水分扩散试验, 得到非饱和黄土等温渗透系数 $K(\theta, \rho_d)$, 表达式如下:

$$K(\theta, \rho_d) = C(\theta, \rho_d) \cdot D(\theta, \rho_d), \quad (5)$$

$$C(\theta, \rho_d) = \frac{d\theta(h)}{dh}$$

$$= (n-1)\alpha(\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) \left(\frac{\theta - \theta_{\text{res}}}{\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}} \right)^{\frac{1}{m}} \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_{\text{res}}}{\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^n, \quad (6)$$

$$D(\theta, \rho_d) = e^{a\theta^2 + b\theta + c}. \quad (7)$$

式中: θ , ρ_d , h 分别为体积含水量 (%), 干密度 (g/cm^3), 水头形式的基质吸力 (m); C 为非饱和黄土比水容 (cm^{-1}), 由基质吸力试验测得, 相关参数 (残余体积含水量 θ_{res} 、准饱和体积含水量 θ_{sat} 、 α 、 m) 取值见文献[30]; D 为非饱和黄土水扩散率 (cm^2/s), 由水分扩散试验测得, 参数 a , b , c 取值见文献[30]。

同时考虑黏滞系数随温度变化, 渗透系数 K_{lh} 表示为

$$K_{lh} = \frac{\mu_w}{\mu_{w0}} K(\theta). \quad (8)$$

式中, μ_w 为液态水的黏滞系数 ($10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$), 数学表达式见表 2; μ_{w0} 为标准温度下黏滞系数; K 为标准温度下非饱和土渗透系数 (m/s); θ 为体积含水量 (%).

考虑温度对基质吸力的影响, 液态水非等温渗透系数 K_{lv} 为^[27]

$$K_{lv} = K_{lh} \left(h G_{wT} \gamma_0^{-1} \frac{d\gamma}{dT} \right). \quad (9)$$

式中: G_{wT} 为基质吸力温度效应的放大系数, 通常取 7; h 为基质吸力的水头形式 (m); γ 为水的表面张力 (N/m); γ_0 为标准温度下表面张力; T 为温度 (K). 考虑高温作用的 γ 的数学表达式见表 2。

水蒸气浓度梯度驱动气态水迁移, 高温和基质吸力对蒸气浓度的影响可表示为

$$\rho_v = \rho_{vs}(T) H_r(h), \quad (10)$$

$$H_r = \exp \left(\frac{h M g}{R T} \right). \quad (11)$$

式中: ρ_v 和 ρ_{vs} 分别为气态水密度和水蒸气饱和密度 (kg/cm^3); H_r 为相对湿度; T 为温度 (K); h 为基质吸力的水头形式 (m); M 为水的摩尔质量; g 为重力加速度; R 为气体常数。

根据 Q_3 黄土基质吸力的实测数据^[30], 在 $25 \sim 300^\circ\text{C}$ 范围内, $1 - H_r$ 的计算值为 $0.42 \times 10^{-4} \sim 0.95 \times 10^{-6}$, 可见 H_r 十分接近于 1, 即基质吸力 h 对气态水

表 2 考虑高温影响的气、液态水运移参数表达式

Table 2 Transport parameters and change rates of vapor and liquid water at different temperatures

参数	表达式	来源
η	$\eta = 9.5 + 3 \cdot \theta / \theta_{\text{sat}} - 8.5 \cdot \exp \left\{ - \left[(1 + 2.6 / \sqrt{f_c}) \theta / \theta_{\text{sat}} \right]^4 \right\}$	Saito 等 ^[27]
$\gamma / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$\gamma = -16.14 \times 10^{-5} T^2 - 0.16 T + 76.16, R^2 = 0.958$	根据数据文献[31]拟合
$\mu_w / (\mu\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1})$	$\mu_w = \mu_{w0} \exp[\mu_l / (R \cdot (T - 139.85))]$	Philip 等 ^[28]
$\rho_{\text{vs}} / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho_{\text{vs}} = 10^{-3} T^{-1} \exp(31.3716 - 6014.79 T^{-1} - 7.92495 \times 10^{-3} T), 0^\circ\text{C} < T \leq 120^\circ\text{C}$ $\rho_{\text{vs}} = 1.3069 \times 10^{-7} \times T^{-1} \exp(25.66651 - 3429.31154 \times T^{-1} + 7.06 \times 10^{-3} T), R^2 = 0.968, 120^\circ\text{C} < T \leq 300^\circ\text{C}$	Saito 等 ^[27] 根据数据文献[31]拟合
$D_e / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$D_e = (\theta_v^{7/3} / \theta_{\text{sat}}^2) \theta_v \cdot 2.12 \times 10^{-5} (T / 273.15)^2$	Milly 等 ^[29]

注： T 在参数 γ 中为摄氏温度（ $^\circ\text{C}$ ），在 μ_w ， ρ_{vs} ， D_e 参数中为绝对温度（ K ）； f_c 为土中黏粒的质量分数； μ_{w0} 为水分在 25°C 时的黏滞系数； R 为摩尔气体常数。

迁移的影响较小，为便于计算，忽略水气等温扩散项，假定 $K_{\text{vh}}=0$ 。

水气非等温扩散项 K_{vT} 为^[27]

$$K_{\text{vT}} = \frac{D_e}{\rho_w} \eta H_r \frac{d\rho_{\text{vs}}}{dT} \quad (12)$$

式中： D_e 为水汽扩散度（ m^2/s ）； H_r 为相对湿度，假定为1； η 为温度梯度对局部水气扩散的放大系数； ρ_{vs} 为饱和水汽密度（ kg/cm^3 ）； ρ_w 为液态水密度（ kg/cm^3 ）。考虑高温作用的 D_e ， η ， ρ_{vs} 的相关数学表达式见表2。

非饱和土的热迁移行为综合考虑水分迁移过程中液态水、气态水、土颗粒的热量运移和物质之间热量传递，热传输方程参考文献[28]。

由表2可知，表面张力 γ 和水分动态黏度 μ_w 随 T 升高逐渐增加，水汽饱和密度 ρ_v 呈指数增大。通过试算可知，高温条件下 ρ_v 变化幅度远高于 T_s 和 μ_w ，甚至高达2个量级。可见，高温作用下气态水运移参数的温度敏感性远高于液态水。

3.2 数值验证与分析

应用上述水分迁移模型和热传输方程，利用有限元计算程序COMSOL Multiphysics 5.6进行高温边界条件下非饱和土的水热迁移计算。共设置两个算例：①热源温度 $T_h=70^\circ\text{C}$ ，初始含水率 $w_i=19\%$ ；②热源温度 $T_h=110^\circ\text{C}$ ，初始含水率 $w_i=19\%$ 。模型尺寸、其他初始条件和边界条件与本文试验组保持一致。计算时水分含量用体积含水量表示，将计算结果转化为含水率与试验实测数据对比。

将高温热源作用下水分场的计算值与试验实测值进行对比，水分场分布情况在图8展示。由图8可知，第一组的试算值与实测值相关系数 r 达0.993，第二组的计算精度有所下降，计算偏差主要在于对热源附近土体含水率的高估，但计算值与实测值的相关系数为0.987，拟合精度仍较高。

分析算例2热源附近土体水分计算偏差稍大的原

因，主要在于现有水热迁移理论假定水蒸气始终饱和，但土体水分的气-液状态的转化为非瞬时平衡相变，热端（疏水端）土体孔隙中的水蒸气实际处于非饱和状态，使汽压的温度敏感性更强，可能导致高温作用下的实际汽压梯度高于饱和汽压梯度。

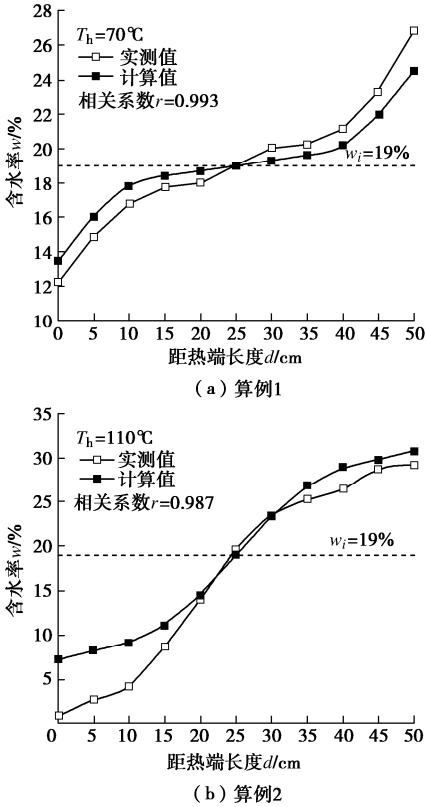


图 8 高温热源作用 14 d 后水分场的计算值与实测值

Fig. 8 Calculated and measured water fields after 14 days of high-temperature heat source

以上分析表明，模型计算所得水分场与实测结果大体一致，该模型可一定程度上反映试验所揭示的高温对水分的显著驱动作用。

4 高温作用下水分迁移机理探讨

采用前述高温水热迁移模型进行计算分析，为了

有针对性地讨论温度对水分迁移的作用, 避免土样水分梯度使问题讨论复杂化, 计算时假定土样水分沿热源方向均匀分布、温度梯度瞬时施加及土体温度由热端至冷端方向呈线性递减。土体水分含量用体积含水量表示, 热端温度分别取 70°C 和 110°C , 分别计算得到历时 1 s 不同体积含水量土样的总水分迁移通量、液态水迁移通量、气态水迁移通量, 该通量属于瞬时通量。

根据计算结果, 得到水分迁移通量和体积含水量的关系见图9。显示出了高温对水分迁移的强驱动作用。

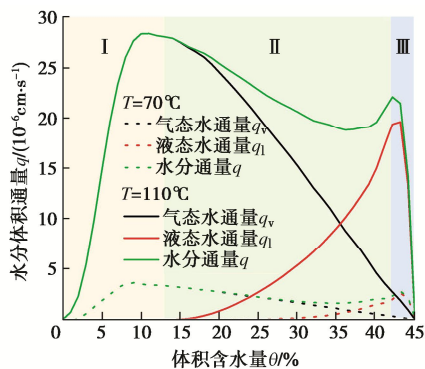


图9 不同高温水平下水分迁移通量与体积含水量的关系(I 低体积含水量阶段、II 中体积含水量阶段、III 高体积含水量阶段)

Fig. 9 Variation of vapor and liquid diffusivity with water content and temperature (I: low water content stage, II: medium water content stage, and III: high water content stage)

从图9可以看出, 总水分迁移通量、液态水迁移通量、气态水迁移通量均与土体体积含水量水平密切相关, 随着土体体积含水量的变化, 土体液态水迁移通量和气态水迁移通量及其二者的大小关系亦相应发生变化, 据此将高温作用下的水分迁移特征划分为图示3个区间: I 低体积含水量区间、II 中体积含水量区间、III 高体积含水量区间。

I 低体积含水量区间: 土体体积含水量处于较低水平, 高温作用下的水分迁移形式基本上是气态水迁移, 液态水迁移可以忽略不计。这一阶段气态水迁移通量等于总水分迁移通量。气态水迁移量与水源多少和迁移通道条件有关。当土体体积含水量很低时, 虽然良好的气联通条件有利于气态水迁移, 但蒸发水源较少难以形成饱和水蒸气, 水汽压力较小, 使得气态迁移通量较小。随着体积含水量增大, 虽然气态水迁移通道条件变差, 但水汽压力增大仍使得气态迁移通量增加。当体积含水量增大到一定值以后, 水汽压力已达到饱和蒸汽压, 此时气态水迁移通道条件直接影响气态迁移通量, 体积含水量继续增加使得通道条件变差, 则气态水迁移量反而减小。水分迁移通量随体积含水量变化曲线呈现峰值曲线。

II 中体积含水量区间: 土体体积含水量处于适中水平, 这一阶段, 在高温作用下, 随体积含水量增大, 气态水迁移通量减小的同时液态水迁移通量增大。随体积含水量升高, 土体气相孔隙逐步减小, 气态水迁移通道条件变差, 气态水迁移通量逐渐减小。由于体积含水量逐渐增大使得水联通条件变好, 渗透系数增大, 再叠加温度作用对基质吸力的影响, 液态水迁移通量逐渐增大。

III 高体积含水量区间: 土体处于饱和-准饱和状态。随着土体逐渐接近饱和, 气相不连通(主要为封闭气泡), 气态水迁移通量降低至零; 虽然水联通条件更好, 有利于液态水迁移, 但由于温度作用主要改变基质吸力从而影响水分迁移进程, 高饱和度土体的基质吸力近似为0, 温度作用对封闭气泡水气收缩膜表面张力的改变不能影响水分迁移进程。因此, 温度作用对高饱和土体的水分迁移进程不产生影响。

I 区间和II 区间的界限含水量为土体残余体积含水量, 即液态水迁移起始含水量, II 区间和III 区间的界限含水量主要与土体饱和度有关, 其界限含水量对应的饱和度约为87%。相比 70°C 高温下的气态水迁移通量 q_v 和液态水迁移通量 q_l , 110°C 作用下 q_v 和 q_l 的最大值分别升高了8.04和3.91倍, 说明升温使迁移通量显著提升, 其中水汽迁移通量的提升幅度最大。图9中 q_v 最大值出现在I 区间, 说明施加温度越高, 对低体积含水量土体水分的驱动力越强, 更高的温度可以驱使更低含水率土体发生水分迁移。

上述 q_v 和 q_l 在不同体积含水量水平的变化特征, 初步阐述了高温和水分含量对气-液态水迁移的综合影响机制, 揭示了高温作用下水分的迁移特征。

5 结 论

本文自制高温水热迁移装置, 进行了不同高温水平下不同初始含水率黄土的水热迁移试验。进一步建立了高温水热迁移模型, 并通过计算结果与试验结果的对比分析验证了模型的可靠性。进而基于计算结果, 分析了高温作用下总水分迁移通量、液态水迁移通量、气态水迁移通量与土体水分含量的关系。研究结论有利于合理评价高温作用下非饱和土水热变化规律, 初步阐述了高温和水分含量对水分迁移的综合作用机制。

(1) 高温对水分具有显著驱动作用。当热端温度超过 100°C 时, 初期贴近热源土体的水分被快速驱离, 含水率分布呈现峰值曲线, 随着时间增加峰值逐渐向冷端推移且峰值变小, 逐渐演变为含水率单向增大的缓变曲线, 热端区域含水率出现大幅下降, 是气液相变导致的气态水迁移显著增加所致。热源温度越高, 水分迁移通量越大。

(2) 模型的水分场计算值与实测值大体一致, 较

高温度下热端区域水分场的计算偏差可能与土体实际处于气-液非瞬时平衡相变有关,有待进一步研究。

(3)将高温作用下的水分迁移特征划分为3个区间: I 低体积含水量区间、II 中体积含水量区间、III 高体积含水量区间。I 区间水分迁移通量随体积含水量变化曲线呈现峰值曲线,高温作用下的水分迁移形式基本上是气态水迁移,液态水迁移可以忽略不计。II 区间随体积含水量增大,气态水迁移通量减小的同时液态水迁移通量增大。III 区间温度作用对高饱和和土体的水分迁移进程不产生影响。I 区间和II 区间的界限含水量为体积残余含水率,II 区间和III 区间的界限含水率主要与土体饱和度有关,其界限含水率对应的饱和度约为87%。

参考文献:

- [1] BAI B, XU T, NIE Q K, 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, **153**: 119573.
- [2] 李建东, 王旭, 张延杰, 等. 球形蒸汽源增湿非饱和黄土水热运移规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(4): 687-695. (LI Jiandong, WANG Xu, ZHANG Yanjie, et al. Experimental study on thermal moisture migration of unsaturated loess humidified by spherical steam source[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(4): 687-695. (in Chinese))
- [3] 蔡国庆, 张策, 黄哲文, 等. 含水率对砂质 Q3 黄土抗剪强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊 2): 32-36. (CAI Guoqing, ZHANG Ce, HUANG Zhewen, et al. Experimental study on influences of moisture content on shear strength of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S2): 32-36. (in Chinese))
- [4] 杨高升, 白冰, 姚晓亮, 等. 非饱和冻土水汽迁移与相变过程的光滑粒子法模拟[J]. 岩土力学, 2021, **42**(1): 291-300. (YANG Gaosheng, BAI Bing, YAO Xiaoliang, et al. Smoothed particle hydrodynamics for simulation of water vapor migration and phase change in unsaturated frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(1): 291-300. (in Chinese))
- [5] 姚仰平, 王琳. 影响锅盖效应因素的研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(8): 1373-1382. (YAO Yangping, WANG Lin. Influence factors for "pot-cover effect"[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(8): 1373-1382. (in Chinese))
- [6] 滕继东, 贺佐跃, 张升, 等. 非饱和土水气迁移与相变: 两类“锅盖效应”的发生机理及数值再现[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(10): 1813-1821. (TENG Jidong, HE Zuoyue, ZHANG Sheng, et al. Moisture transfer and phase change in unsaturated soils: physical mechanism and numerical model for two types of "canopy effect"[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(10): 1813-1821. (in Chinese))
- [7] TANG T X, SHEN Y P, LIU X, et al. The effect of horizontal freezing on the characteristics of water migration and matric suction in unsaturated silt[J]. Engineering Geology, 2021, **288**: 106166.
- [8] 张军, 吴涛, 芮大虎, 等. 基于重复分凝成冰作用提高季冻区重金属污染黏性土淋洗效率的研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(9): 1663-1670. (ZHANG Jun, WU Tao, RUI Dahu, et al. Improving washing efficiency of heavy metal-contaminated clayey soils based on repeated ice-segregation in seasonal frozen areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(9): 1663-1670. (in Chinese))
- [9] 雷华阳, 张文振, 冯双喜, 等. 水汽补给下砂土水分迁移规律及冻胀特性研究[J]. 岩土力学, 2022, **43**(1): 1-14. (LEI Huayang, ZHANG Wenzhen, FENG Shuangxi, et al. On water migration and frost heaving characteristics of sand under water vapor recharge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(1): 1-14. (in Chinese))
- [10] 肖泽岸, 朱霖泽, 侯振荣, 等. 水盐相变对硫酸盐渍土基质吸力影响规律研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(10): 1935-1941. (XIAO Zean, ZHU Linze, HOU Zhenrong, et al. Effects of water/salt phase transition on matric suction of sulfate saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(10): 1935-1941. (in Chinese))
- [11] ZHAO Z K, WANG T H, JIN X, et al. A new model of temperature-dependent permeability coefficient and simulating of pipe leakage produced immersion of loess foundation[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, **82**(1): 1-12.
- [12] 陈正发, 朱合华, 闫治国. 高温后上海软黏土的土-水特性及微观机理试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(10): 1914-1920. (CHEN Zhengfa, ZHU Hehua, YAN Zhiguo. Experimental study on soil-water characteristics and micromechanism of Shanghai soft clay after high temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(10): 1914-1920. (in Chinese))
- [13] 陈正发, 朱合华, 闫治国, 等. 高温后上海软黏土的物理性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(5): 924-931. (CHEN Zhengfa, ZHU Hehua, YAN Zhiguo, et al. Experimental study on physical properties of Shanghai soft clay under high temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(5): 924-931. (in Chinese))
- [14] 魏天宇, 胡大伟, 周辉, 等. 实时高温及加卸载作用下非饱和压实膨润土气渗与变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(3): 587-595. (WEI Tianyu, HU Dawei,

- ZHOU Hui, et al. Influences of real-time temperature and stress cycle on gas permeability and deformation characteristics of unsaturated compacted bentonite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, **41**(3): 587-595. (in Chinese))
- [15] BURGHIGNOLI A, DESIDERI A, MILIZIANO S. A laboratory study on the thermomechanical behaviour of clayey soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(4): 764-780.
- [16] 陈正汉, 秦冰. 缓冲/回填材料的热-水-力耦合特性及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017. (CHEN Zhenghan, QIN Bing. Thermal-Hydraulic-Mechanical Coupling Characteristics of Buffer/Backfill Materials and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese))
- [17] 秦冰, 陈正汉, 孙发鑫, 等. 高吸力下持水曲线的温度效应及其吸附热力学模型[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(10): 1877-1886. (QIN Bing, CHEN Zhenghan, SUN Faxin, et al. Temperature effect on water retention curve under high suction and its modeling based on thermodynamics of sorption[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(10): 1877-1886. (in Chinese))
- [18] 陈正汉, 郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学, 2019, **40**(1): 1-54. (CHEN Zhenghan, GUO Nan. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(1): 1-54. (in Chinese))
- [19] 陈皓, 吕海波, 陈正汉, 等. 考虑温度影响的高庙子膨润土强度与变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(8): 1962-1979. (CHEN Hao, LV Haibo, CHEN Zhenghan, et al. Strength and volume change of buffer material under high temperature and pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(8): 1962-1979. (in Chinese))
- [20] 刘月妙, 王驹, 曹胜飞, 等. 中国高放废物地质处置缓冲材料大型试验台架和热-水-力-化学耦合性能研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(10): 2756-2762, 2789. (LIU Yuemiao, WANG Ju, CAO Shengfei, et al. A large-scale THMC experiment of buffer material for geological disposal of high level radioactive waste in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(10): 2756-2762, 2789. (in Chinese))
- [21] CHEN Y F, ZHOU C B, JING L R. Modeling coupled THM processes of geological porous media with multiphase flow: theory and validation against laboratory and field scale experiments[J]. Computers and Geotechnics, 2009, **36**(8): 1308-1329.
- [22] 秦冰, 陈正汉, 方振东, 等. 基于混合物理论的非饱和土的热-水-力耦合分析模型 I [J]. 应用数学和力学, 2010, **31**(12): 1476-1488. (QIN Bing, CHEN Zhenghan, FANG Zhendong, et al. Analysis of coupled thermo-hydro-mechanical behavior of unsaturated soils based on theory of mixtures I [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, **31**(12): 1476-1488. (in Chinese))
- [23] CLEALL P J, SINGH R M, THOMAS H R. Vapour transfer in unsaturated compacted bentonite[J]. Géotechnique, 2013, **63**(11): 957-964.
- [24] 王铁行, 刘自成, 卢靖. 黄土导热系数和比热容的实验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(4): 655-658. (WANG Tiehang, LIU Zicheng, LU Jing. Experimental study on coefficient of thermal conductivity and specific volume heat of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(4): 655-658. (in Chinese))
- [25] 王铁行, 李彦龙, 苏立君. 黄土表面吸附结合水的类型和界限划分[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(5): 942-948. (WANG Tiehang, LI Yanlong, SU Lijun. Types and boundaries of bound water on loess particle surface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(5): 942-948. (in Chinese))
- [26] NASSAR I N, HORTON R. Water transport in unsaturated nonisothermal salty soil: I. experimental results[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, **53**(5): 1323-1329.
- [27] SAITO H, ŠIMŮNEK J, MOHANTY B P. Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadose zone[J]. Vadose Zone Journal, 2006, **5**(2): 784-800.
- [28] PHILIP J R, DE VRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1957, **38**(2): 222.
- [29] MILLY P C D, EAGLESON P S. The Coupled Transport of Water and Heat in A Vertical Soil Column under Atmospheric Excitation[R]. Cambridge: Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1980.
- [30] 王铁行, 卢靖, 张建锋. 考虑干密度影响的人工压实非饱和黄土渗透系数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(11): 2364-2368. (WANG Tiehang, LU Jing, ZHANG Jianfeng. Experimental study on permeability coefficient of artificially compacted unsaturated loess considering influence of density[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(11): 2364-2368. (in Chinese))
- [31] 严家騄, 余晓福, 王永青. 水和水蒸气热力性质图表[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2004. (YAN Jialu, YU Xiaofu, WANG Yongqing. Charts of Thermodynamic Properties of Water and Steam[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese))