

文章编号:0253-4339(2020)04-0127-09
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.04.127

地铁隧道长周期演化土体蓄放热潜力影响因素分析

王丽慧¹ 张继华¹ 杜志萍² 郑懿³ 宋洁³ 邹学成³

(1 上海理工大学环境与建筑学院 上海 200093; 2 上海东方延华节能技术服务有限公司 上海 200060;
3 上海申通地铁集团有限公司技术中心 上海 201103)

摘要 本文搭建了隧道围岩土体蓄放热特性缩尺模型实验台,在实验台验证模拟准确性的基础上,用 CHAMPS-BES 软件建立与实验台等比例(1:1)的物理模型并进行模拟,研究隧道空气温度、围岩盾构、土壤温度对土壤蓄放热的影响规律。结果表明:隧道空气温度越高,土体年净蓄热量越大,同时土体的蓄热能力随土体温度升高而逐渐减弱,土体的蓄热能力在 15 年内的衰减由前期的每年净蓄热量衰减 24% 逐渐降至 4%;不同区间盾构边界条件下模拟的年净蓄热量差异在 5% 以内,因此可以忽略区间盾构厚度和盾构导热系数对土体蓄放热的影响;土体初始温度越低,蓄热能力越大。初始温度为 9 °C 的土体蓄热量约为初始温度为 22 °C 的土体蓄热量的 5 倍。

关键词 地铁隧道;围岩土体;蓄放热;空气温度;土体参数

中图分类号:TB61⁺1;U231

文献标识码:A

Analysis of Influencing Factors on Soil Heat Storage and Release Potential in Long Period Evolution of Subway Tunnel

Wang Lihui¹ Zhang Jihua¹ Du Zhiping² Zheng Yi³ Song Jie³ Zou Xuecheng³

(1.School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2.Shanghai DFYH Tech Services Co., Ltd., Shanghai, 200060, China; 3.Shanghai Shentong Metro Co., Ltd., Shanghai, 201103, China)

Abstract In this study, a scale model of experiment platform was built for soil heat storage and release characteristics of a tunnel surrounding rocks, and a physical model (1:1) was built and simulated using CHAMPS-BES software. Comparing the simulation results with the experimental results of the temperature field, heat storage, and heat release of the tunnel surrounding the rock mass, it is found that for a higher air temperature of the tunnel, the annual net heat storage of the soil is greater, and the heat storage capacity of the soil gradually decreases with an increase in the soil temperature. The heat storage capacity of the soil is attenuated within 15 years and annual net heat storage gradually decreases from 24% to 4%. The difference in annual net heat storage simulated under different shield boundary conditions is less than 5%, hence the influence of the interval shield thickness and shield thermal conductivity on the soil heat storage and discharge can be neglected. In the initial condition, for a lower temperature, the heat storage capacity of the soil is greater. The stored heat in the soil at an initial temperature of 9 °C is approximately 5 times of that at an initial temperature of 22 °C.

Keywords subway tunnel; surrounding rock; heat storage and release; air temperature; soil parameters

随着地铁运营年限的增长和列车产热量的不断升高,区间隧道空气温度逐年升高,夏季地铁隧道内的空气温度已经超过 37 °C^[1],一方面增大了地铁正常运行环控系统的能耗^[2];另一方面造成部分空调设备故障,影响地铁设备正常运行且加大了空调系统设计及改进难度^[3-4]。隧道区间内围岩土体温度逐年升高,与隧道内的空气换热能力减小,围岩土体蓄放热能力随运行年限的演化是导致区间温升逐年变

化的根本原因。因此,研究区间隧道围岩土体蓄放热的影响因素,是分析区间隧道温升规律的基础。

目前关于该方面研究主要通过理论分析、现场实测、数值模拟方法研究区间隧道围岩温度场和传热量。冯炼^[5]采用一维非稳态的对流扩散模型,建立了一维非稳态传热模型并对隧道围岩的传热进行描述,计算和预测了隧道围岩的传热量,为研究地铁隧道空气和围岩传热的数值解的发展奠定了基础。刘

基金项目:国家自然科学基金(51878408)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51878408).)

收稿日期:2019-05-15;修回日期:2019-09-29

晶^[6]利用谐波法将隧道内的各种扰量当作周期性变化处理,分析了地铁隧道内空气温度的变化和地铁围岩壁面的温度变化特性。王丽慧等^[7]通过搭建缩尺模型实验台分析了空气侧温度周期动态变化下,地铁隧道从新建到远期 17 年的隧道围岩土体热库变化规律。李晓昭等^[8]研究了隧道围岩传热问题,通过现场实测发现隧道围岩壁面热流受到列车以及室外气温影响。胡增辉^[9]研究了地铁系统的围岩传热机理,通过对南京地区地铁围岩现场实测与数值模拟的方法研究了围岩传热范围的变化特性,推导并实验验证了传热范围的理论公式,同时对比分析了不同类型围岩的传热特点。胡增辉等^[10]最后通过统计回归分析法得到了变温层传热范围的经验公式,编写了 FLAC3D 程序,模拟计算了围岩的传热能力及围岩温度场的演化规律,得到地铁围岩的传热稳定时间、传热量的大小、热库厚度等变化规律。王伟等^[11]在无限长隧道模型的基础上,对地铁围岩传热量的计算公式进行了推导,发现地铁围岩吸热量在空调负荷中占有一定比例,有一定的节能潜力。乔恒君^[12]通过现场监测和对列车运行发热量的估算,建立物理模型,利用实测数据作为模型的边界条件,初步估算到围岩吸热量占总热量的 26.4%。GB 50157—2003《地铁设计规范》^[13]中围岩吸热量占总热量的范围为 25%~40%。谢晓娜等^[14]在现有的稳态分地带计算地面传热的基础上,将室外全年气温作为其年平均值和全年周期正弦波相叠加来考虑土壤层的蓄热能力,利用三维动态有限差分法建立计算模型进行分析计算,得到了不同土壤层导热系数和热扩散率下的地面土壤传热系数范围及热流振幅和相位。朱新荣等^[15]采用

热流量计算地面的当量传热系数,给土体蓄放热量的理论计算提供依据。

由上述研究可知,目前学者主要关注区间隧道围岩土体温度场分布和围岩传热量,对影响区间隧道围岩土体温度场和长周期蓄放热的影响因素的分析较少。本文通过 CHAMPS-BES 软件,在既有研究的基础上对影响隧道围岩土体蓄放热量的因素进行了研究,重点分析隧道空气温度、盾构参数和土壤初始温度对区间隧道周围土体蓄放热潜力的影响,为改善地铁区间隧道热环境提供参考依据。

1 CHAMPS-BES 数值模拟研究方法介绍

针对地铁隧道内空气和土壤热湿耦合传递模型,采用多孔介质热湿传递模拟软件—CHAMPS-BES 进行模拟。CHAMPS-BES 是实现一维、二维及旋转对称的三维模型的模拟软件。

1.1 实验装置与实验方案

本文首先通过搭建地铁隧道缩尺实验台以还原真实地铁隧道围岩土壤热传递过程,然后用 CHAMPS-BES 软件建立与缩尺实验台等比例(1:1)的物理模型;最后通过实验结果与模拟结果对比,验证模拟物理模型的准确性。

实验装置主要由 3 部分组成,分别为:空气加热及送风装置(A)、土体及温湿度和热流密度采集装置(B)、实验台支撑框架(C),缩尺模型实验台原理如图 1 所示。本文主要以数值模拟为主,实验台的搭建及实验方案参考王丽慧等^[7]提出的方法。

在搭建实验台时,以尺寸相似、时间相似、材料相似原理作为模型实验的理论基础,且土壤传热过程遵

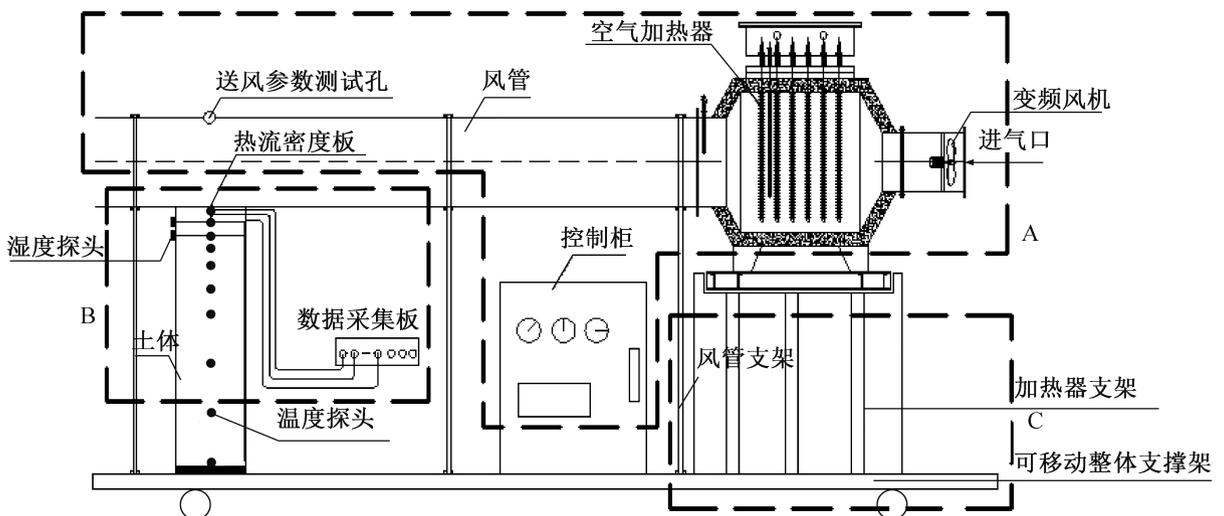


图 1 土体深度方向土体蓄放热缩尺模型实验台原理

Fig.1 Principle of the scale model experiment platform for the heat storage and heat release of soil

循傅里叶准则。根据相似准则计算得出实验隧道围岩与实际的隧道围岩几何相似比为 1:20, 时间相似比为 1:400, 选用实际隧道土体, 材料相似比为 1:1, 研究地铁隧道从新建到远期运营后围岩土壤深度方向热库和蓄放热的变化规律。实验中空气温度赋值根据上海地铁区间隧道实测结果, 以实测值作为实验台的空气温度边界条件, 空气边界条件与图 2 相同, 得到实际地铁隧道围岩土体热库的逐年演化规律及热量传递过程。

1.2 物理模型的建立与边界条件的确定

使用 CHAMPS-BES 软件建立与缩尺实验台等比例(1:1)的物理模型, 并进行如下假设: 1) 假设隧道处于恒温层, 不受外界空气温度年变化对隧道周围土壤的温度的影响; 2) 不考虑地下水渗流的作用; 3) 围岩土壤温度沿 x 轴方向均匀分布; 4) 整个土壤层初始温度相同。

基础工况的数值模拟空气侧边界条件采用上海某地铁隧道空气温度实测数据, 研究土体蓄放热的长周期演化, 故采用隧道空气温度月平均值。图 2 所示为地铁运营新建期、中期和远期的区间温度波的边界条件, 其中新建期(1~5 作用周期)和远期(11~15 作用周期)的逐月平均值来自上海地铁某隧道的实测数据; 中期(6~10 作用周期)的数据是通过气象数据和隧道累积温升数学模型^[16]估算得到; 又因工程实际中地铁运营时会根据实际客流情况调整运输能力造成隧道内热源变化, 所以不能准确计算得到逐年的隧道空气温度波。因此该研究将空气温度边界条件简化与理想化处理, 仅给出隧道初中远期不同运营阶段的典型空气温度波, 研究初中远期空气温度大小变化对隧道土壤蓄放热的影响。软件每隔 1.8 h (根据傅里叶相似准则计算得出, 相当于实际 1 个月时间) 设定一个温度值, 21.6 h 为 1 个作用周期(相当于实际 1 年时间), 连续作用 20 个周期, 模拟地铁从新建到远期运营土体蓄放热的整个变化过程。空气的相对湿度设定为恒定值 60%。风速取定值 1 m/s (根据典型气象年湿度、风速参数求均值)。空气与围岩壁面的换热为第三类边界条件, 对流换热表面传热系数为 $8.38 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$, 空气中的水蒸气扩散系数采用软件提供的经验值, 为 $3e^{-8} \text{ s}/\text{m}$ 。

为保证实验结果与模拟软件的准确性, 使实验所用土质材料相似比为 1:1, 选用上海地铁 9 号线三期东延伸工程的第 11 标段, 浦东新区金海路金钻路新建地铁地下 16 m 的四号淤泥质粘土, 根据上海地质勘查研究结果^[17]可知该深度土壤处于恒温层, 土壤温度为 14~15 °C; 根据取土现场实测结果, 确定隧道

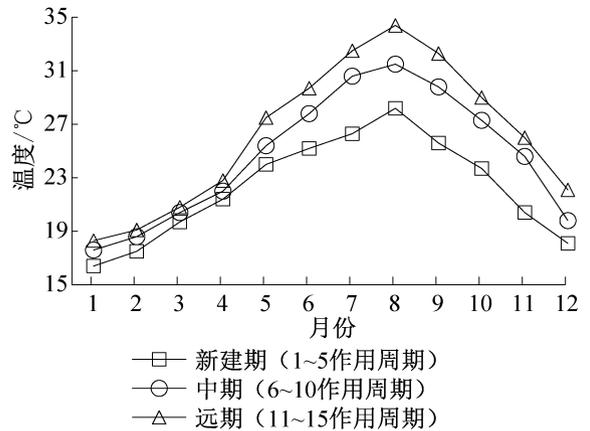


图 2 数值模拟空气侧逐月温度边界条件
Fig.2 Numerical simulation of air temperature boundary conditions

初始温度为 14.3 °C。在模拟软件中设定与实验台相同的初始土壤热物性参数: 根据对现场土壤各参数的实测结果, 初始土壤容积含水率为 42.6%, 密度为 $1782 \text{ kg}/\text{m}^3$, 导热系数为 $1.02 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{C})$, 比热为 $1940 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{C})$ 。

1.3 实验结果与模拟结果的对比较证

为了验证 CHAMPS-BES 软件模拟的可靠性和物理模型的准确性, 取区间隧道土体第 5 周期末和第 15 周期末的实验结果与模拟结果进行对比, 实验与模拟对比结果如图 3 所示。可见, 实验结果与模拟结果温度分布曲线吻合度高, 温度场分布规律一致, 热库峰值位置和峰值大小偏差较小。实验结果与模拟结果的误差小于 3%。经对比分析可知, 软件模拟中物理模型土壤传热特性可靠, 可用于后续的变因素模拟分析。

2 土体蓄放热影响因素分析

本文分别研究隧道空气温度动态变化、围岩盾构和土壤初始温度对区间隧道围岩土体蓄放热的影响规律。

2.1 空气温度动态变化特性的影响

区间隧道内空气温度的动态变化是隧道土体蓄放热的主要动因, 分别研究空气温度波典型年限跃升、空气温度波的相位和振幅对围岩土体蓄放热的影响。

2.1.1 空气温度变化的影响

该研究将空气温度边界条件简化与理想化, 仅给出隧道初中远期不同运营阶段的典型空气温度波, 研究初中远期空气温度变化对隧道土壤蓄放热的影响, 如图 2 所示。利用 CHAMPS-BES 模拟区间隧

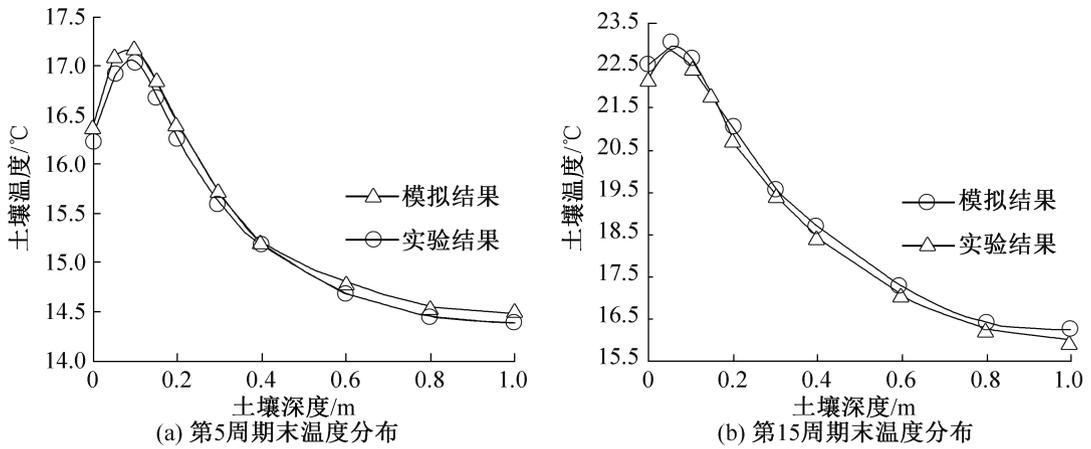


图 3 典型周期末实验与模拟土壤温度分布

Fig.3 Typical experiment and simulated soil temperature distribution

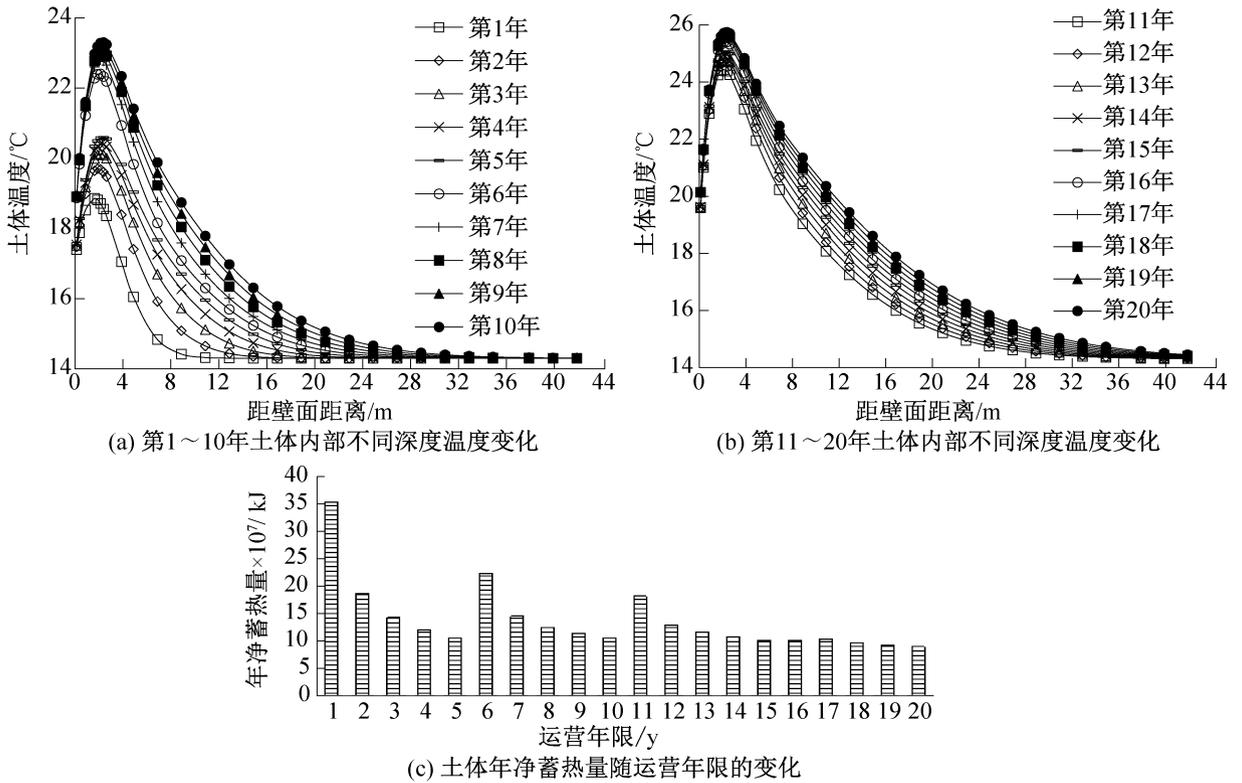


图 4 随空气温度升高土体温度场与蓄热量变化

Fig.4 Soil temperature distribution and heat storage change with increasing air temperature

道围岩连续 20 年传热后,每年末围岩土体温度场分布及其年净蓄热量逐年变化情况,如图 4 所示。图 4(a)和图 4(b)为模拟隧道土体经过 20 年后的每年末温度分布变化。由图可知,围岩土体温度逐年上升,每一年末热库峰值逐渐升高,由 20.6 °C 升至 25.7 °C;热库峰值位置逐年加深,由 2.1 m 移动至 2.33 m;热库厚度也逐渐加深并趋于稳定,由 6.8 m 延伸至 33.6 m。整体而言,在距离壁面 0~25 m 处的土体温度变化显著,25 m 后温度变化较

小;热库位置变化较小,约为 2 m;土体温度在 1~10 年变化明显,在 10 年后温度场变化较小;在第 6 年和第 11 年时,隧道内空气温度升高,对应的该年限内土体温度升高明显。

由图 4(c)可知,隧道空气温度波跃升对土体蓄热量影响较大,在第 1 年时,土体与空气温差较大,土体吸热量大,在第 1 年末土体净蓄热量达 35×10^7 kJ,随着土体温度整体升高,其与空气温度的温差减小,土体的净蓄热量也相应减少,第 2 年的净蓄热量约为

第 1 年的 50%; 在第 6 年、第 11 年空气温度升高, 空气温度与土体的温差增大, 土体的净蓄热量出现突增的现象, 说明土体的蓄热量与围岩土体和隧道内空气温度的温差有关, 若通过降低土体温度提高土体与空气的温差, 可以增强土体的蓄热能力, 使土体净蓄热量增大, 实现降低空气温度。随着土体温度的升高, 土体净蓄热量逐渐较少, 在第 20 年末, 土体净蓄热量降为 8.9×10^7 kJ, 土体的蓄热衰减能力由前期的每年净蓄热量衰减 24% 逐渐降至 4%, 可见土体的蓄热能力随土体温度升高逐渐减弱。

2.1.2 空气温度波相位的影响

空气温度相位是指全年最高空气温度出现的时间, 结合我国不同纬度典型城市气候特征, 以上海、北京、哈尔滨 3 个城市气候为代表, 可知隧道内空气温度的最大值主要出现在 7 月中旬至 8 月中旬之间。本文主要讨论隧道空气最高温度出现在 7 月中旬、8 月初、8 月中旬且其余月份空气温度变化数值相同时, 空气温度相位对土体温度场和蓄热量的影响, 具体空气温度值如图 5 所示。

空气温度相位对土体温度分布及年净蓄热量影响的模拟结果如图 6 所示。因为不同空气温度特性

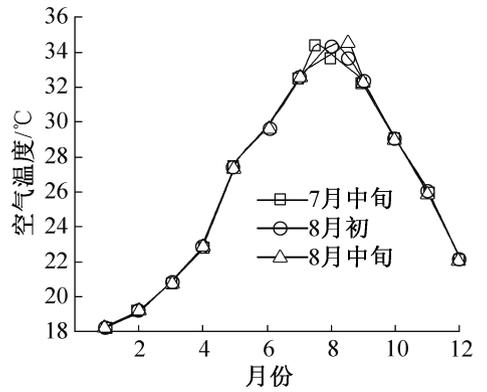


图 5 不同相位下空气温度变化值

Fig.5 Air temperature change values at different phases

对土体影响逐年累积且在第 10 年时累积差异最大, 因此下文均选取第 10 年土体温度场进行分析, 由图 6(a) 可知, 空气温度相位对土体温度分布几乎无影响。由图 6(b) 可知, 在 3 种不同的空气相位下, 土体年净蓄热量变化趋势相同, 同一空气温度相位下, 土体年净蓄热量随运营年限的增加逐渐减少, 且在 10 年后趋于稳定; 在相同的隧道运营时期内, 3 种工况下土体蓄热量差值较小, 不同空气温度波的相位对土体蓄热量没有影响。

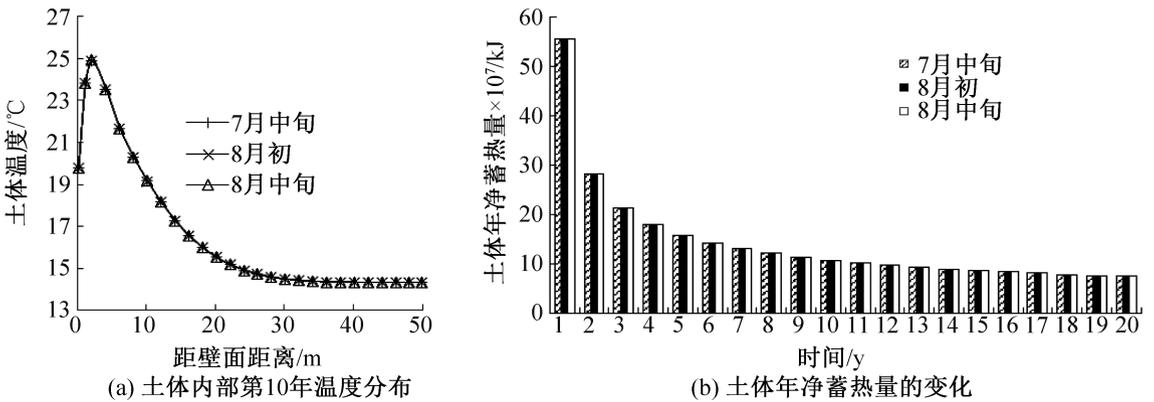


图 6 不同空气温度相位下土体温度分布与蓄热量变化

Fig.6 Temperature distribution and heat storage change of soil under different air temperature phases

2.1.3 空气温度波振幅的影响

全国不同空气振幅区域主要包括以上海、北京、哈尔滨 3 个城市分别代表的夏热冬冷地区、寒冷地区和严寒地区, 结合其室外气象参数与当地隧道土体温度, 本文主要研究上述 3 区域 3 种温度振幅下 (振幅 A: $12.4 \sim 30.9$ °C, $\Delta t_A = 18.5$ °C; 振幅 B: $18.3 \sim 34.4$ °C, $\Delta t_B = 16.1$ °C; 振幅 C: $21.1 \sim 35.3$ °C, $\Delta t_C = 14.2$ °C) 土体净蓄热量的变化, 3 个地区隧道空气温度振幅如图 7 所示。

不同地区隧道空气温度振幅对土体温度分布及年净蓄热量影响模拟结果如图 8 所示。由图 8 可知,

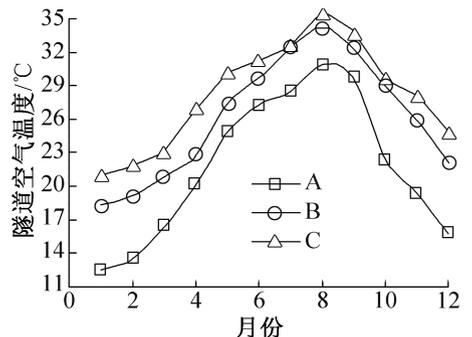


图 7 不同空气温度振幅下空气温度变化

Fig.7 Air temperature changes at different air temperature amplitudes

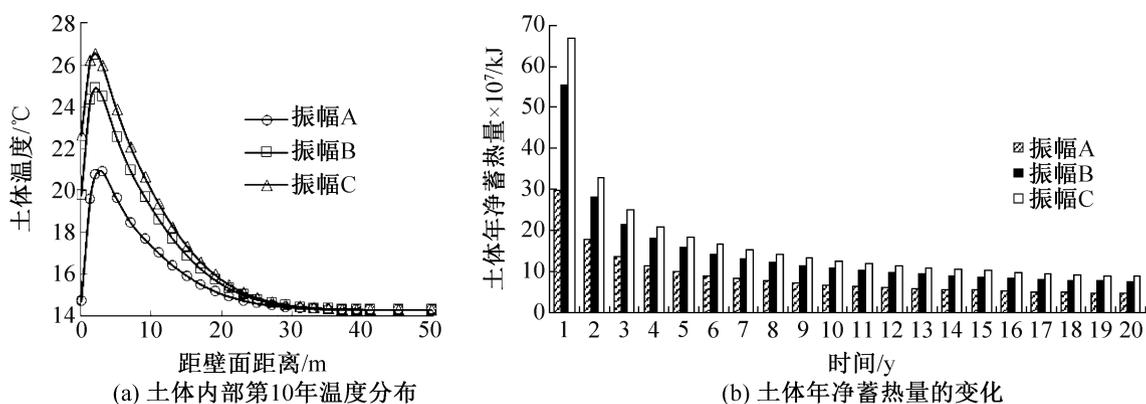


图 8 不同空气温度振幅下土体温度分布与蓄热量变化

Fig.8 Temperature distribution and heat storage change of soil under different air temperature amplitudes

空气温度振幅对温度分布影响较大,空气温度振幅越大,围岩土体温度越低。空气温度振幅对土体年净蓄热量影响较大,整体而言,土体年净蓄热量随时间的增加而逐渐减少,在第 10 年后土体年净蓄热量趋于稳定。在同一年份内土体年净蓄热量随振幅的增大而减少,即土体年净蓄热量:振幅 C>振幅 B>振幅 A,由振幅 A 减小至振幅 B 时,土体年净蓄热量增加 58%,由振幅 B 减小至振幅 C 时,土体年净蓄热量增加 16.8%。不同振幅下,土体年净蓄热量的差值随时间的增加而逐渐减少,振幅 C 与振幅 A 的年净蓄热量差值由第 1 年的 37×10^7 kJ 逐年降至第 20 年末的 4×10^7 kJ,可见空气温度振幅对土体年净蓄热量的影响较大。

2.2 区间盾构的影响

地铁区间隧道大多建在地下约 15 m 处,在开挖后通常用钢筋混凝土在其内表面做衬砌,周围土体与衬砌构成地铁隧道的围护结构,此处称衬砌为“围岩盾构”,本文研究隧道围岩盾构的厚度、盾构蓄热系数两方面对围岩土体蓄热量演化特性的影响。

2.2.1 不同围岩盾构厚度的影响

在保证围岩盾构热物性不变的情况下,围岩盾构厚度分别取 0、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 m,以研究盾构厚度对围岩土体温度场和蓄热量随年限演化特性的影响。不同盾构厚度下土体温度分布及年净蓄热量影响模拟结果如图 9 所示。由图 9(a)可知,从长期来看,区间盾构厚度对土体温度场分布影响较小,盾构厚度仅在前 2 年对土体年净蓄热量有一定的影响。由图 9(b)可知,在第 1 年末,盾构厚度越大,土体年净蓄热量越大。而在第 2 年,土体年净蓄热量随着盾构厚度的增加而减少,这是因为盾构厚度大的土体在第 1 年蓄热量大,土体温度就高,而第 2 年空气温度相同,使得盾构厚度大的土体温度与空气温度温差

小,土体净蓄热量减少,所以盾构厚度大的土体蓄热量较小。从第 3 年开始,盾构厚度对土体年净蓄热量影响可以忽略;整体上看,不同盾构厚度的土体前 2 年蓄热量有 5% 以内的差异,3 年后不同盾构土体蓄热量差异可忽略;土体年净蓄热量逐年减小,土体蓄放热趋于饱和。因此,在研究隧道围岩土体年净蓄热量的长期变化规律时,可以忽略区间盾构厚度对土体年净蓄热量的影响。

2.2.2 区间盾构蓄热系数的影响

区间盾构蓄热系数^[18]表示为:

$$s = \sqrt{\frac{2\pi\rho c\lambda}{T}} \quad (1)$$

式中: s 为围岩的蓄热系数,表示围岩壁面温度波振幅为 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 时,导入物体的热流密度, W/m^2 ; ρ 为围岩盾构密度, kg/m^3 ; c 为围岩盾构的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; λ 为围岩盾构的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$; T 为隧道空气温度波动周期, s 。

由式(1)可知盾构导热系数 λ 与盾构蓄热系数 s 成正相关,本文主要通过改变区间盾构的导热系数 λ ,保持其他参数不变进行模拟分析。研究不同盾构蓄热系数对半无限大围岩土体蓄热量的影响。

不同区间盾构导热系数下半无限大围岩土体温度分布及年净蓄热量的变化如图 10 所示。由图 10(a)可知,不同盾构导热系数对半无限大围岩土体温度场分布影响较小。由图 10(b)可知,在前两年,半无限大围岩土体年净蓄热量受导热系数的影响较大,导热系数越大土体蓄热量越大,第 2 年后,不同导热系数的土体年净蓄热量差异在 5% 以内,表明不同导热系数对土体年净蓄热量几乎无影响,整体来看,土体的年净蓄热量随着时间的增大逐渐减小。因此,在研究土体年净蓄热量的长期变化规律时,可以忽略区间盾构导热系数对半无限大围岩土体年净蓄热量的

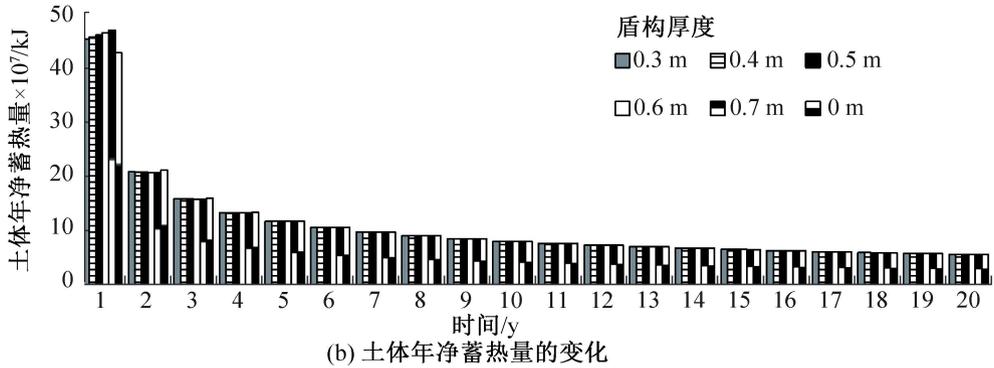
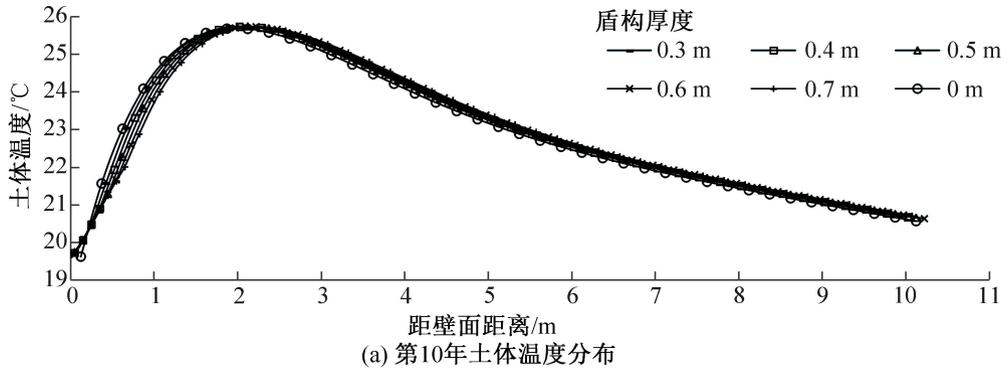


图 9 不同区间盾构厚度下土体温度分布与蓄热量变化

Fig. 9 Temperature distribution and heat storage of soil under different shield thicknesses

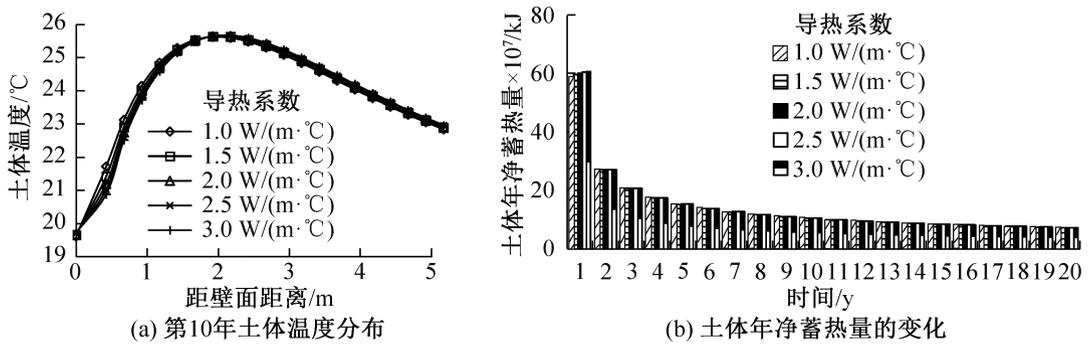


图 10 不同导热系数的区间土体温度分布与蓄热量变化

Fig.10 Temperature distribution and heat storage of soil under different thermal conductivity

影响。

2.3 土壤初始温度的影响

由于受地理位置等因素的影响,不同城市的气候特征不同,所以土壤的初始温度不同,本文选取了上海、北京、西安、哈尔滨 4 个典型的城市土壤初始温度(初始温度分别为:22、17、12、9 °C),作为边界条件,研究不同土壤初始温度对围岩土体蓄热量随年限演化特性的影响,如图 11 所示。

在图 11(a)所示的相同周期性空气温度作用下,不同土壤初始温度下土体温度分布及蓄热量随年限变化的结果如图 11(b)所示。由图 11(a)可知,在同一传热时间内,在热库峰值位置前,土壤初始温度对内部温度影响较小,峰值位置之后,土壤初始温度

对内部温度影响较大。由图 11(b)可知,在同一初始温度下,土体年净蓄热量随时间的增加而逐渐降低,在前 10 年土体年净蓄热量变化较大,而 10 年后土体年净蓄热量变化较小,说明土体蓄热能力接近饱和状态,土体年净蓄热量趋于稳定;在相同时间内,土体年净蓄热量随初始温度的升高而降低,初始温度为 22 °C 的土体年净蓄热量远小于初始温度为 9 °C 的土体年净蓄热量,约为初始温度为 9 °C 的土体蓄热量的 20%,初始温度为 22 °C 的土体比 9 °C 的土体在第 1 年、第 10 年和第 20 年末的年净蓄热量少 81.1%、78.9%、77.9%,差值绝对值分别为 69.5×10^7 、 11.84×10^7 、 8.26×10^7 kJ,说明空气与土体温差越大,土体年净蓄热量越大。

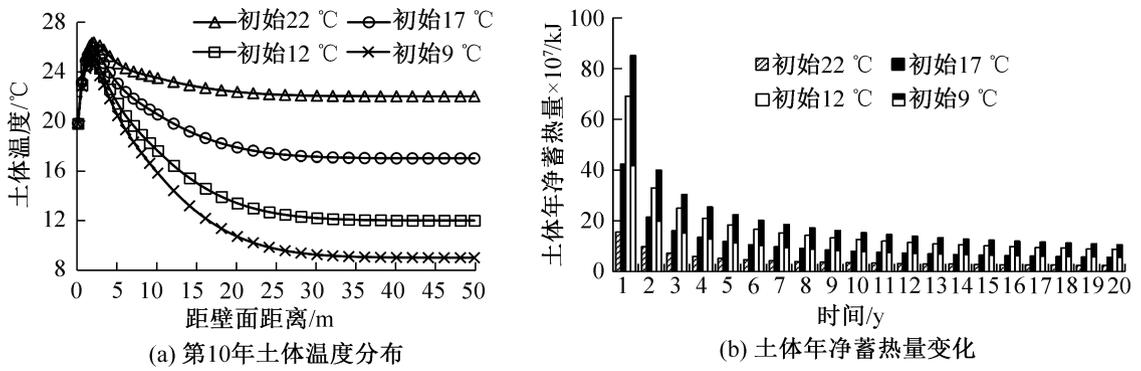


图 11 不同初始土壤温度下土体温度分布与净蓄热量变化

Fig.11 Soil temperature distribution and net heat storage change at different initial soil temperatures

3 结论

本研究利用地铁隧道缩尺模型实验验证 CHAMPS-BES 软件模拟模型的准确性;并通过设定不同的隧道空气温度、隧道盾构、隧道围岩土壤的相关边界条件进行数值模拟,以从隧道空气温度、隧道盾构、围岩土壤三方面来研究隧道围岩土壤的蓄放热长期演化规律,得到结论如下:

1) 从不同隧道空气温度为边界条件模拟结果可知,在相同地区隧道,隧道空气温度对土体蓄热量影响较大,当隧道空气温度阶段性升高时,围岩土体蓄热量会增大,实质是增大了隧道空气温度与围岩土体的温差,但每次升温后土体年净蓄热量增量逐渐减少,土体第一次升温后蓄热量增加 112% 逐渐降至第三次升温后增加 22%;当空气温度不变时,土体的蓄热能力在 15 年内逐年下降,土体的蓄热能力在 15 年内衰减由前期的每年净蓄热量衰减 24% 逐渐降至 4%。隧道空气温度相位的改变对土体年净蓄热量几乎无影响。在同一年份内,不同地区的隧道空气温度振幅对土体年净蓄热量影响较大,隧道空气温度振幅越小,土体年净蓄热量越少。

2) 从不同盾构厚度与导热系数为边界条件的模拟结果可知,在研究围岩土体蓄放热长期的演化特性时,可以忽略区间盾构厚度和盾构导热系数对土体蓄放热的影响。在前 2 年,区间盾构厚度和盾构导热系数对土体年净蓄热量有一定的影响,不同区间盾构边界条件的年净蓄热量差异在 5% 以内;从第 3 年开始,围岩盾构厚度和盾构导热系数对土体年净蓄热量影响较小。

3) 从不同土壤初始温度为边界条件模拟结果可知,土体初始温度对土体蓄热量影响较大,相同时间内,土体初始温度越低,其蓄热量越大,初始温度为 22 °C 的土体蓄热量约为初始温度为 9 °C 的土体蓄热

量的 20%,初始温度为 22 °C 的土体比 9 °C 的土体在第 1 年、第 10 年和第 20 年末的年净蓄热量分别少 81.1%、78.9%、77.9%,差值绝对值分别为 69.5×10^7 、 11.84×10^7 、 8.26×10^7 kJ;同一土体初始温度下,土体年净蓄热量逐年降低,在前 10 年土体年净蓄热量衰减较大,而 10 年后土体年净蓄热量变化较小。

参考文献

[1] 龚莫杰.地铁区间隧道温度特性及其对站台环境的影响 [D].重庆:重庆大学,2014.(GONG Mingjie. Temperature characteristics of subway tunnels and their impact on platform environment [D].Chongqing: Chongqing University, 2014.)

[2] 刘磅.基于热舒适性的地铁 AHU 节能控制[J].机电工程技术,2011,40(12):10-14.(LIU Bang. Energy saving control of subway AHU based on thermal comfort[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2011, 40 (12):10-14.)

[3] 刘国芬.北京地铁通风系统的现状分析和改进意见[J].铁道建筑,1995(3):15-18.(LIU Guofen. Analysis and improvement suggestions on ventilation system of Beijing subway[J]. Railway Construction,1995(3):15-18.)

[4] AMPOFO F, MAIDMENT G, MISSENDEN J. Underground railway environment in the UK part 2: investigation of heat load [J]. Applied Thermal Engineering,2004, 24 (5/6):633-645.

[5] 冯炼.地铁环境控制系统的应用及其数值模拟软件[J].城市轨道交通研究,1999(2):37-39.(FENG Lian. Application of subway environmental control system and its numerical simulation software[J]. Urban Mass Transit Research,1999(2):37-39.)

[6] 刘晶.地铁热环境影响因素研究[D].天津:天津大学,2003.(LIU Jing. Research on the factors affecting the thermal environment of subway[D]. Tianjin:Tianjin University, 2003.)

[7] 王丽慧,邹学成,陶辉,等.地铁隧道围岩热库逐年演

- 化特性的实验研究[J]. 暖通空调, 2017, 47(5): 53-57. (WANG Lihui, ZOU Xuecheng, TAO Hui, et al. Experimental study on the annual evolution characteristics of surrounding rock thermal pool in subway tunnels[J]. Journal of HV & AC, 2017, 47(5): 53-57.)
- [8] 李晓昭,熊志勇,乔恒君,等.地铁围岩传热规律的监测分析[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(1):105-110. (LI Xiaozhao, XIONG Zhiyong, QIAO Hengjun, et al. Monitoring and analysis of heat transfer law of subway surrounding rock[J]. Chinese Journal of Underground Space, 2012,8(1):105-110.)
- [9] 胡增辉.地铁围岩传热机理及其温度场演化规律研究[D].南京:南京大学,2008.(HU Zenghui. Research on heat transfer mechanism and temperature field evolution of subway surrounding rock[D].Nanjing:Nanjing University, 2008.)
- [10] 胡增辉,李晓昭,赵晓豹,等.隧道围岩温度场分布的数值分析及预测[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(5):867-872.(HU Zenghui, LI Xiaozhao, ZHAO Xiaobao, et al. Numerical analysis and prediction of temperature field distribution of tunnel surrounding rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009,5(5):867-872.)
- [11] 武伟,李晓昭,胡增辉,等.地铁工程设计中围岩传热量的计算方法[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(1):89-93.(WU Wei, LI Xiaozhao, HU Zenghui, et al. Calculation method of heat transfer of surrounding rock in subway engineering design[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(1): 89-93.)
- [12] 乔恒君. 地铁隧道围岩传热机制研究[D].南京:南京大学,2011.(QIAO Hengjun. Research on heat transfer mechanism of surrounding rock in subway tunnel[D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.)
- [13] 中华人民共和国建设部.地铁设计规范:GB 50157—2003[S].北京:中国计划出版社,2003.(Ministry of Construction of the People's Republic of China. Metro design specification:GB 50157—2003[S]. Beijing: China Planning Press, 2003.)
- [14] 谢晓娜,刁乃仁.考虑气温年变化的地面传热计算方法[J]. 暖通空调, 2013, 43(3): 78-82. (XIE Xiaona, DIAO Nairen. Calculation method of ground heat transfer considering annual change of temperature[J]. Journal of HV & AC, 2013, 43(3): 78-82.)
- [15] 朱新荣,刘加平.关于底层地面传热系数的探讨[J]. 暖通空调, 2008, 38(5): 105-108. (ZHU Xinrong, LIU Jiaping. Discussion on the heat transfer coefficient of ground floor[J]. Journal of HV & AC, 2008, 38(5): 105-108.)
- [16] 王小芝. 崇明隧道运营累积温升及喷雾降温可行性研究[D].上海:同济大学,2007.(WANG Xiaozhi. Feasibility study on cumulative temperature rise and spray cooling of Chongming tunnel operation[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.)
- [17] 杨树彪.上海地区松散地层温度垂向分布特征分析[J]. 地质学刊,2015,39(4):678-685.(YANG Shubiao. Analysis of vertical distribution characteristics of loose stratum temperature in Shanghai[J]. 地质地质学报, 2015, 39(4): 678-685.)
- [18] 章熙民,任泽霈,梅飞鸣.传热学[M].北京:中国建筑工业出版社,2006:75-81.(ZHANG Ximin, REN Zepai, MEI Feiming. Heat transfer theory [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2006:75-81.)
- 通信作者简介**
王丽慧,女,沪江学者,博士,上海理工大学建筑与环境学院,13816498129,E-mail:66amy99@126.com。研究方向:地铁等地下空间室内热环境及节能研究。
- About the corresponding author**
Wang Lihui, female, Hujiang Scholar, Ph. D., School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, + 86 13816498129, E-mail: 66amy99@ 126.com. Research fields: subway and other underground space indoor thermal environment and energy-saving.
- (上接第 102 页)
- [16] 张传杰,孙纪宁,谭屏.横流对冲击射流换热特性影响机理的数值研究[J].航空动力学报,2011,26(1):65-71.(ZHANG Chuanjie, SUN Jining, TAN Ping. Numerical investigation on heat transfer mechanism of impingement jet with cross-flow[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(1): 65-71.)
- [17] FROSELL T, FRIPP M, GUTMARK E. Dynamics of the impingement region of a circular turbulent jet[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 91: 399-409.
- [18] SI Z, SHIMASAKI N, NISHIDA K, et al. Experimental study on impingement spray and near-field spray characteristics under high-pressure cross-flow conditions[J]. Fuel, 2018, 218: 12-22.
- 通信作者简介**
谢晶,女,博士,教授,上海海洋大学食品学院,(021)61900351,E-mail:jxie@shou.edu.cn。研究方向:制冷工程。
- About the corresponding author**
Xie Jing, female, Ph. D., professor, College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, + 86 21-61900351, E-mail:jxie@shou.edu.cn. Research fields: food preservation, storage and transportation.