

高频热扰对地铁隧道土壤温度的影响

于连广^{1,2}, 吴喜平², 于赫男³

(1. 中国核电工程有限公司, 北京 100840; 2. 同济大学机械工程学院, 上海 200092;

3. 北京天润建设有限公司, 北京 100062)

摘要:在考虑地铁区间内空气与周围土壤耦合换热的基础上建立地铁土壤温度预测模型。利用有限差分法对该模型进行数值求解, 并将针对特定问题的求解结果与解析解进行了对比验证。将由列车运营带来的高频热扰简化成3种不同形式, 利用土壤温度预测模型求出相应的土壤温度响应。模拟的结果发现高频热扰对区间空气以及壁面会带来明显的温度波动, 但是对土壤内部的温度分布影响有限。

关键词:气固耦合传热; 数值传热; 地铁热环境; 土壤温度

中图分类号: TU96 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)05-0095-07

Effect of High-frequency Thermal Disturbance on Soil Temperature around the Metro Tunnels

YU Lian-guang, WU Xi-ping, YU He-nan

(1. China Nuclear Power Engineering Co. Ltd, Beijing 100840, P. R. China;

2. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China;

3. Beijing Tian Run Construction Co. Ltd, Beijing 100062, P. R. China)

Abstract: Soil temperature prediction model around the subway metro tunnels is constructed with the consideration of coupled heat transfer between range temperature and surrounding soil. Finite difference method is adopted for numerical solution of the model, and the solving results in certain conditions are compared to validate the analytical solution. The high-frequency thermal disturbance brought by train operation is simplified into three different forms, and the predictive model of soil temperature is used to calculate the corresponding soil temperature response. It is indicated that temperature fluctuations of range air and the wall are accompanied with high-frequency thermal disturbance, but the impact on soil temperature distribution inside is limited.

Key words: flow/structure coupled heat transfer; numerical heat transfer; metro thermal environment; soil temperature

地铁隧道周围的土壤温度对区间内热环境有直接的影响, 合理预测土壤温度变化是确定地铁环控系统热负荷的基础。H. Barrow 等人^[1]提出了一套对隧道土壤温度分布的分析方法, 研究了隧道内空气温度以正弦规律变化时对隧道岩土层温度分布的

影响, 但该方法仅考虑了径向温度分布。HU Zeng-hui^[2]利用 FLAC3D 软件对地铁周围土壤传热进行了数值模拟, 文中将隧道内部的温度设为常数, 对影响土壤热波动深度(隧道内表面到温度波动 5% 处的径向距离)的各种因素进行了较全面的研究, 但没

收稿日期: 2011-01-15

基金项目: 上海科委基金资助项目(07dz(2022))

作者简介: 于连广(1975-), 男, 博士生, 主要从事建筑节能研究, (E-mail) hiylg@sohu.com。

有给出土壤温度分布变化规律。F. Ampofo^[3]较详细的讨论了隧道中各产热项并建立车厢-隧道-土壤的能量平衡方程,利用 EES 语言编写计算程序。值得注意的是该模型中各产热项都归结成温度和活塞风速的简单函数且仅考虑稳态传热过程,没有考虑各因素之间复杂的耦合影响。YANG Geng-she 等人^[4]考虑了寒冷地区隧道周围冻土的影响,特别考虑了相变以及水热迁移对传热的影响。

在当前可见的各类文献中,多忽略气固耦合作用,并将各种热扰条件简化处理,比如将隧道中的温度看成均匀一致,正弦波等简单函数形式^[1-7]。由于数学模型的不完善,导致地铁热环境设计缺乏必要的工具支撑^[8-9]。比如《地铁设计规范》(GB 50157—2003)认为土壤有很大的蓄热能力必须在设计中加以考虑,但是并没有给出具体的计算公式。

地铁土壤温度预测难点有:1)土壤与空气间的耦合传热作用;2)复杂的热扰条件。受地铁运营调度的支配,列车规律性的进出会对隧道热环境造成周期性的热扰(比如活塞风速、列车散热等)。由于列车发车间隔相对温度预测时间非常短暂,因而这些热扰条件带有较强烈的高频特点。由于实际运营的复杂性,这些高频热扰在数学上很难完美表达,这给利用数学建模手段预测土壤温度带来诸多不便,势必需要给出合理的简化方法。首先在考虑气固耦合的基础上建立隧道土壤温度预测模型(Subway soil temperature prediction model,以下简称 SSTP-model),然后尝试对高频热扰提出不同的简化形式并带入模型中。通过数值模拟结果的对比,分析不同简化形式对温度预测结果的影响。

1 土壤与空气传热方程

图 1 是 SSTP-model 模型传热机理图。隧道内空气在列车行进作用下,由左向右流动。隧道内存在列车散热的移动热源,同时与隧道壁面发生耦合换热。而隧道周围土壤受空气波动的影响,温度也将发生波动。

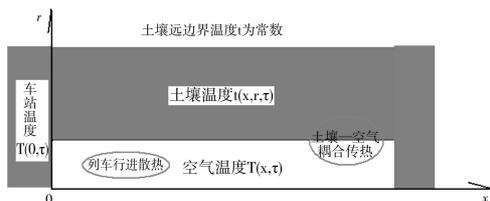


图 1 SSTP-model 模型传热示意图

上海地铁隧道施工采用圆形盾构机掘进而成,因此隧道断面一般为圆形。假设圆周上温度分布均

匀,同时将土壤视为各向同性均匀介质,因此可以忽略切向参数变化,土壤传热方程简化成圆柱坐标系下二维非稳态的形式:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial t}{\partial r} \right) \right] \quad (1)$$

式中: t 是土壤温度; ρ 是密度; c 是定压比热; k 是导热系数; τ 是时间; x 是隧道轴向坐标; r 是隧道圆截面径向坐标。

区间隧道内空气一般情况下属于湍流态,截面气流分布比较均匀,因此将隧道区间内的空气流动简化成一维管流。列车在运动过程中向区间隧道内散发大量热量,这部分热量是造成区间隧道内温升的主要因素^[10]。将列车移动散热简化成内热源的形式,且忽略轴向导热以及内摩擦产热。空气传热方程形式如下:

$$\rho_a c_a \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho_a c_a U \frac{\partial T}{\partial x} = q_1 + q_2 \quad (2)$$

上式右边第 1 项为土壤向隧道内传热;右边第 2 项为列车散热产生的热源。这里 U 表示隧道区间空气流动速度, T 是空气温度,下标 a 表示空气。

1.1 土壤初始温度以及边界条件

根据文献^[11],当土壤深度超过 10~20 m 时温度幅度变化很小,可以认为土壤温度以恒温分布,即以地面年平均温度作为初始时刻的温度。该文忽略了地铁施工过程的干扰选取土壤初始温度为 17 °C (以上海地区为参考)。

由于隧道远处土壤温度波动很小,可以取隧道周围有限筒状范围内土壤为计算域,比如将距隧道轴心 20 m 距离处温度设为 17 °C 恒温远边界。在靠近车站两侧,为第三类边界条件。由于车站内部气流较小且变化不大,可以取车站内部壁面对流换热系数为常数,选取 $h = 8.14$ ^[12]。隧道区间壁面温度边界同为第三类边界条件,一般认为管流壁面传热系数主要由雷诺数决定,利用 Sieder-Tate 公式 $h = 0.027 \frac{k_a}{d} \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{1/3}$ 。

1.2 隧道区间出入口空气温度

隧道区间入口温度以及回流温度为站台两端空气温度,车站内部温度受环控系统、地面大气温度、列车活塞风等复杂因素影响,空间上和时间上分别呈现出非均匀性以及非稳定性的特点。考虑到地铁车站空间深埋地下且安装环控系统,与外界仅靠车站出入口、风井等影响,本文假设温度为常数 27 °C。

1.3 隧道区间入口风速

将空气假设成不可压缩流体,隧道内除列车周围气流外可视为均匀管流,因此隧道区间入口风速

主要由列车驱动的活塞风速形成。活塞风与列车速度、隧道尺寸、粗糙度等因素有关。

1.4 隧道区间空气内热源

不考虑空气内摩擦,而将来自土壤传热以及列车传热都按内热源进行处理。其中来自土壤传热项在确定壁面传热系数后很容易表达成 $q_1 = h(t - T)$ 的形式。而列车在运动中的散热 q_2 可考虑成可简化成不同形式,在下文作进一步描述。

表 1 入口风速以及列车散热条件

	A 方案	B 方案	C 方案
区间出入口风速(平均活塞风流量相同)	3.7 m/s	$u = 3.7 + 2.7 \cos \frac{2\pi}{300}\tau$	周期性函数:在每个周期 0~90 s 风速 10 m/s; 在每个周期 90~300 s 风速 1 m/s
列车热源(列车投入总能量相同)	区间轴向均匀布置: $q_2 = 140.94 \text{ W/m}$	周期性函数(周期 300 s):轴向均匀分配 0~90s $q_2 = 469.8 \text{ W/m}$; 90~300 s $q_2 = 0 \text{ W/m}$	周期性函数(周期 300 s):0~90 s 有列车空间 $q_2 = 3308.5 \text{ W/m}$,热源速度 12.5 m/s。

2 控制方程的差分格式与网格划分

土壤计算域设为二维,半径方向厚度为 20 m,长度为 1 000 m。厚度方向设置 400 个网格单元;长度方向设置 10 000 个单元。采用全隐式格式,对应控制方程的差分格式为:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\alpha \Delta r \Delta x_j}{\Delta \tau} + 2 \frac{k \Delta r_j}{\Delta x} + 2 \frac{k \Delta x}{\Delta r} r_j \right) t_{i,j}^n = k \frac{\Delta r}{\Delta x} r_j t_{i-1,j}^n + \\ & k \frac{\Delta r}{\Delta x} r_j t_{i+1,j}^n + k \frac{\Delta x}{\Delta r} (r_j + \Delta r/2) t_{i,j+1}^n + k \frac{\Delta x}{\Delta r} (r_j - \Delta r/2) t_{i,j-1}^n + \\ & \frac{\alpha \Delta r \Delta x_j}{\Delta \tau} t_{i,j}^{n-1} \end{aligned} \quad (3)$$

当 $n = 0$, 初始时刻 $t_i^0 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

隧道区间计算域设为一维,长度为 1 000 m。长度方向设置 10 000 个单元,采用二阶迎风格式,对应控制方程的差分格式为:

$$\begin{aligned} & \rho_a c_a (T_i^n - T_i^{n-1}) \Delta x \frac{1}{4} \pi d^2 / \Delta \tau = q_{2i}^n + \rho_a c_a U^n \frac{\pi d^2}{8} \\ & (3T_i^n - 4T_{i-1}^n + T_{i-2}^n) + \frac{(t_{i,1}^n - T_i^n)}{1/h^n + \Delta r/2k} \pi d \Delta x \end{aligned} \quad (4)$$

当 $n \geq 1, i = 0$, 入口空气温度 $T_i^n = 27$ 。

当 $n = 0$, 初始时刻 $T_i^0 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

以上各式 $\Delta x = 100 \text{ cm}$, $\Delta r = 5 \text{ cm}$ 为网格步长; $\Delta \tau = 10 \text{ s}$ 为时间步长; i, j, n 为网格坐标节点以及时间节点; $d = 5.2 \text{ m}$ 为相隧道直径。 $r_j = 2.575 + \Delta r * j$ 为网格控制节点距轴心的径向距离。 $T_0^n = 27$ 是车站空气实时温度, T_i^n 隧道区间各节点温度, $t_{i,j}^n$ 是土壤各节点温度。

采用 ADI 格式中的 Peaceman-Rachford(P-R) 格式^[13] 求解土壤温度方程,该格式对二维热传导方程无条件收敛。对土壤-空气温度耦合采用迭代求解,收

上海地铁典型区间长度为 1 000 m,列车运行平均速度为 11 m/s,运行间隔为 5 min,其中在隧道中运行大约 90 s。通过实际测试,列车每次通过隧道平均大约会带来 23 560 m³ 的活塞风量,散发到隧道中的热量 42 282 kJ。入口风速条件简化遵循总活塞风量相等、散热条件简化遵循总散热量相等的原则,对每一种高频热扰表 1 各提出了 3 种简化方案。

敛条件是空气温度迭代残差小于 10^{-4} 。在计算过程中将网格尺寸以及时间步长调整到 $\Delta x = 80 \text{ cm}$, $\Delta r = 4 \text{ cm}$, $\Delta \tau = 5 \text{ s}$ 对比 3 600 s 后温度变化,发现调整前后结果相差很小可忽略,网格独立性通过了检验。

3 模型的验证

该文研究的课题属于气固耦合传热问题,一般情况下很难有解析解。为了验证 SSTP-model 程序,人为创造一种特殊的边界条件,在此特定条件下获得解析解,进而可以将 2 种方法获得的结果进行对比。假设气体以很高的风速在隧道中流动(10 m/s),在隧道口较近的距离处(5 m),由于气体与固体传热时间较短,可近似认为在该位置气体温度与进口温度相同。初始条件土壤温度均匀,在短时间内土壤轴向温度差不会很大,因此忽略土壤内轴向传热,以上假设问题可简化成半无限大固体导热问题,具体公式表达如下:

$$\alpha c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial t}{\partial r}), 2.6 < r < \infty, \tau > 0 \quad (5)$$

$$-k \frac{\partial t}{\partial r} = h(T - t), r = 2.6, \tau > 0$$

$$t = 0, 2.6 < r < \infty, \tau = 0$$

$$T = \sin(\frac{2\pi}{86400}\tau), \tau > 0$$

采用积分变换法^[14]可以得到以上问题的解析解。

$$t(r, \tau) = 2.6 \int_{\beta=0}^{\infty} \frac{\beta}{N(\beta)} R_0(\beta, r) \exp(-a\beta^2 \tau) d\beta$$

$$\int_{\tau'=0}^{\tau} [\exp(a\beta^2 \tau') R_0(\beta, 2.6) \sin(\frac{2\pi}{86400}\tau') h/\alpha c] d\tau'$$

函数, $R_0(\beta, r) = J_0(\beta r) [\beta Y_1(2.6\beta) +$

$$(h/k)Y_0(2.6\beta)] - Y_0(\beta r)[\beta J_1(2.6\beta) + (h/k)J_0(2.6\beta)]N(\beta) = [\beta J_1(2.6\beta) + (h/k)J_0(2.6\beta)]^2 + [\beta Y_1(2.6\beta) + (h/k)Y_0(2.6\beta)]^2$$

$J_0(x)$ 、 $J_1(x)$ 分别是第 1 类零阶和一阶贝塞尔(Bessel)函数, $Y_0(x)$ 、 $Y_1(x)$ 分别是第 2 类零阶和一阶贝塞尔函数。

图 2 是以上问题数值解与解析解结果的对比, 图中的曲线“wall、2.5 cm、air”分别代表壁面温度、距离壁面 2.5 cm 处土壤温度以及壁面附近空气温度, 而后缀“numeri、analy”分别代表 SSTP-model 数值解以及利用积分变换法得到的解析解。从图中可以看出, 当壁面处空气温度做正弦(周期 24 h)波动时, 壁面处以及土壤内部温度也做同周期的正弦波动。壁面温度数值解波幅比解析解稍小(大约相差 0.04℃), 2.5 cm 处土壤温度两条曲线几乎重合, 这说明所建立的 SSTP-model 模型可以很好的预测隧道土壤温度。

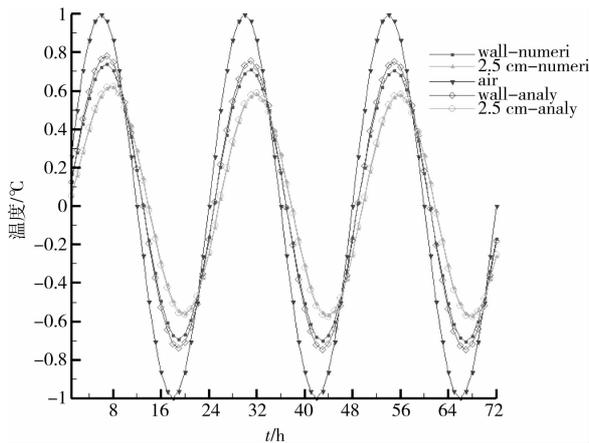


图 2 周期空气温度作用下土壤温度的 SSTP-model 数值解与解析解对比

4 不同高频热扰条件简化形式对结果的影响

将风速以及热源都设置成 A, 并将此条件组合设为标准条件。图 3 是标准条件下 365 d 后地铁隧道区间周围土壤温度分布二维等值线图。从图中可以看出紧贴计算域左右端各有很小范围的土壤温度较高, 这是受车站传热的结果。在大部分区域都是靠近隧道壁面的温度较高, 远离区间壁面温度较低, 特别是在距离隧道中轴线大约 $R=9$ m 以外的区域, 温度仍保持在初温 17℃。在远离车站区域, 距隧道中轴线相同的位置(纵轴坐标相同)温度随里程(横坐标)增加而略有升高, 温度等值线并不完全与中轴线平行。而距离隧道入口 500 m 处断面的温度

大致处于所有断面温度(除去受车站传热影响区域)的中间值, 因而可以用 500 m 处横截面温度作为土壤径向分布的代表。

改变风速或列车散热条件简化形式, 将模拟结果与标准结果对比。从结果的差异大小上分析土壤温度分布对该边界条件的敏感程度, 进而可以为实际工况边界条件的简化提供参考。

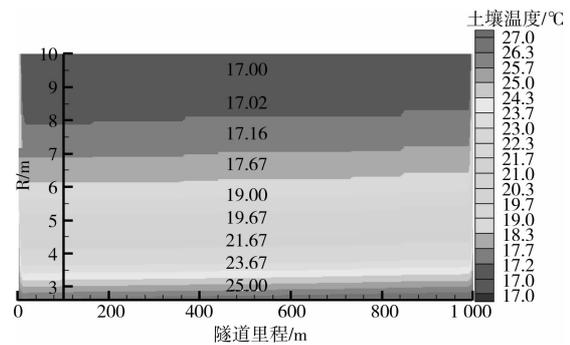


图 3 标准条件下隧道区间周围土壤温度分布(365 d)

4.1 改变入口风速条件对土壤温度分布的影响

假设列车前后班次间隔固定为 300 s, 风速变化周期为列车班次间隔时间。入口风速条件 B 将风速条件改变成正弦波的形式, 表达式为 $u = 3.7 + 2.7\cos\frac{2\pi}{300}\tau$ 。入口风速条件 C 将风速条件改变成矩形波的形式, 在每个周期 0~90 s 区间隧道有列车运行时风速为 10 m/s, 在每个周期 90~300 s 区间隧道没有列车运行时风速设为 1 m/s。条件 A、B、C 在每个周期(300 s)内通过的总风量相同, 条件 B、C 最小风速相同。

图 4 是 3 种风速条件下在 500 m 处横截面上土壤温度随时间变化趋势图。分别选取隧道壁面、距壁面 2.5 cm、1.225 m、2.475 m 4 个位置处的温度作为该截面的温度代表。图中括号内 A、B、C 分别代表风速条件为 A、B、C, 而列车散热条件为 A 方案。

从图 4 中可以看出温度趋势线在 3 种风速条件下形状基本相同但数值稍有差别, 说明不同的风速条件会对土壤温度分布产生一定的影响, 但并不影响总体趋势。同时不同位置的温度曲线数值以及形状差异很大。在数值上温度从隧道壁面到土壤深处逐渐降低, 在曲线形状上隧道壁面以及 2.5 cm 温度曲线在运营初期升高很快且随时间推移温升幅度变缓, 而 1.225 m、2.475 m 曲线温升有一个较明显的“滞后”过程, 即在运营初期温升不大, 推移到一定的时间后温度才开始显著升高。

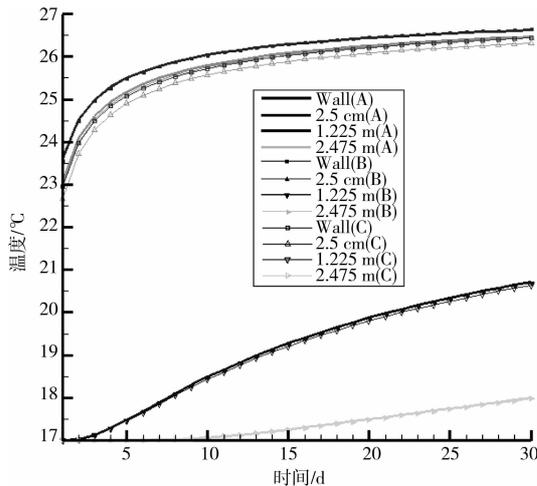


图 4 3 种风速条件下土壤温度随时间变化趋势图

由于图 4 横坐标最小分辨单位是天,在曲线绘制的时候将一天最后时刻的温度值作为温度代表值,因此并没有体现出土壤温度应有的周期性波动响应的特点。根据经典的固体传热方程,土壤温度波动周期应与外扰周期相同。为了确定土壤温度这种周期性响应特点,图 5 显示了第 31 d 第 1~900s 共计 3 个周期内土壤以及空气温度变化。从图中看出在风速 B、C 条件下,空气温度以及壁面温度都产生了明显的周期波动,但土壤内部距壁面 2.5 cm 处温度波动极小。说明风速相对预测时间做高频变化时,仅会对壁面温度造成明显波动。从图中还可看出当风速较高或者风速增加时(每个周期前 90 s),区间内空气温度与壁面温度变化与之相反呈下降趋势;当风速较低或者风速降低时,区间内空气温度与壁面温度呈上升趋势。这是因为风速变化引起了壁面传热系数变化,进而影响了对流换热效果的缘故。

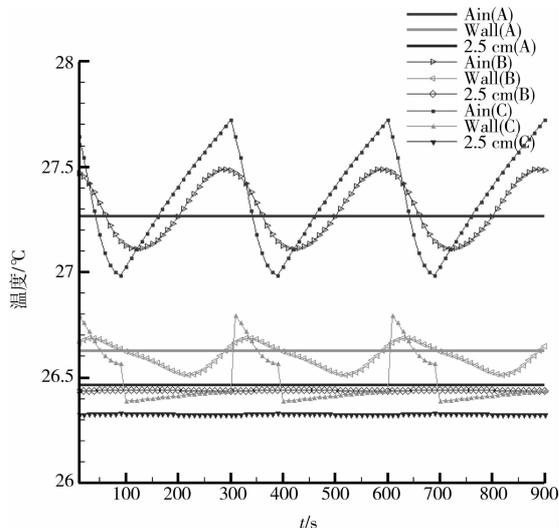


图 5 3 种风速条件下第 31 d 前 900 s 土壤及空气温度

时间变化趋势(这里壁面吸热量定义成每天最后 300 s 内整个隧道壁面吸收总热量在时间上的均值,下同)。从图 5 可以看出 3 种风速条件下吸热量都随时间而下降,但风速条件 C 曲线始终位于其他两条曲线之下,而风速条件 A 与风速条件 B 两条曲线相差较小。这意味着在风速条件 C 下壁面吸热量最小,风速条件 A 与风速条件 B 2 种情况壁面吸热量非常接近。同时随时间变化 3 条曲线趋向重合,意味着除运营初期外 3 种风速条件下吸热量相差不大。

通过 3 种风速条件的模拟结果对比可以得到的推论是,如果对实际风速的进行简化处理,在保证总风量相等的前提下仅会对壁面或壁面附近的土壤温度预测产生一定的误差,而对远距离的温度预测结果影响较小。不同的风速简化处理对运营初期吸热量预测会产生一定的误差,但对长期吸热量预测结果影响较小。

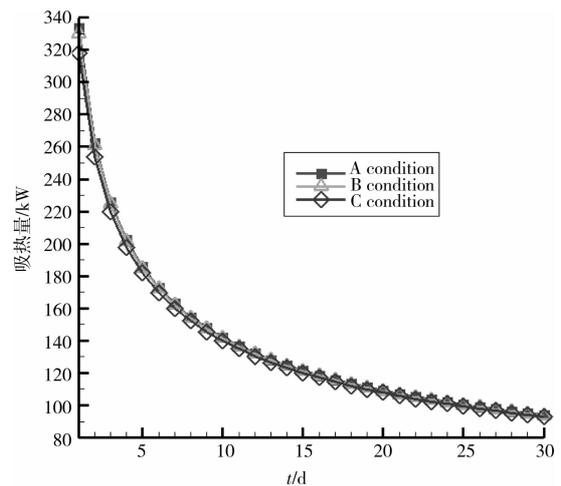


图 6 3 种风速条件下土壤吸热量随时间变化趋势图

4.2 不同列车热源条件简化形式对土壤温度分布的影响

列车运行中产生大量热量,列车产热是隧道区间最主要的热量来源。根据文献[3]的统计,列车产热占隧道区间热源的 98%。这些热量绝大部分是由列车动能转化而来,因此列车散热量与其运行速度有直接的关系。根据文献[15]的介绍,列车从一个车站启动到下一个车站停稳总散热量大致是其动能的 2 倍。假设隧道区间与车站分配的热量各占 50%,这样列车在隧道区间散热量恰好等于列车的动能。由于列车散热过程非常复杂,将列车散热简化成空气内热源的形式。热源条件 A 是将 1 次运营周期(300 s)内列车在隧道内总散热量在周期内取平均并沿隧道里程平均布置, $q_2 = 140.94 \text{ W/m}$ 。热源条件 B 与 A 区别在于将总散热量在有列车运

图 6 是 3 种风速条件下整个隧道壁面吸热量随

行的时间段内(90 s)取平均, $q_2 = 469.8 \text{ W/m}$, 在区间没有列车运行的时间段内(90~300 s)内热源为 0。热源条件 C 将列车发热看成移动的线内热源, 热源移动速度 12.5 m/s , 有列车占据的空间(列车长度 142 m)内 $q_2 = 3308.5 \text{ W/m}$, 没有列车占据的空间内热源为 0。热源条件 A、B、C 在每个周期(300 s)内总量相等。

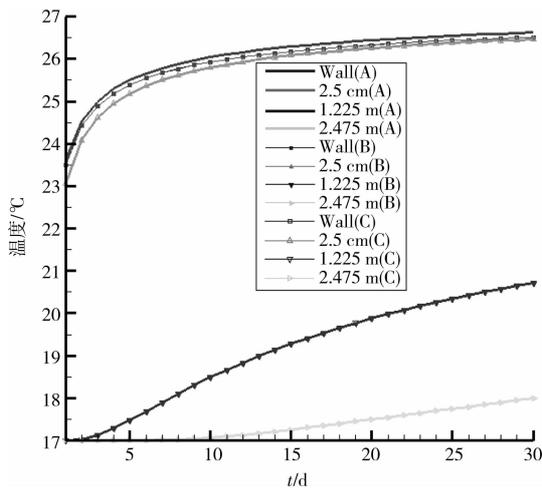


图 7 3 种列车散热模式下土壤温度随时间变化趋势图

图 7 是 3 种列车散热简化模式下在 500 m 处横截面上土壤温度随时间变化趋势图。截面代表温度选取与图 4 相同。图中括号内 A、B、C 分别代表空气内热源条件为 A、B、C, 而风速条件都选择为 A 方案。从图中我们可以看出在 3 种列车散热模式下, 土壤温度变化趋势差别不大, 温度分布特点与图 4 非常接近。

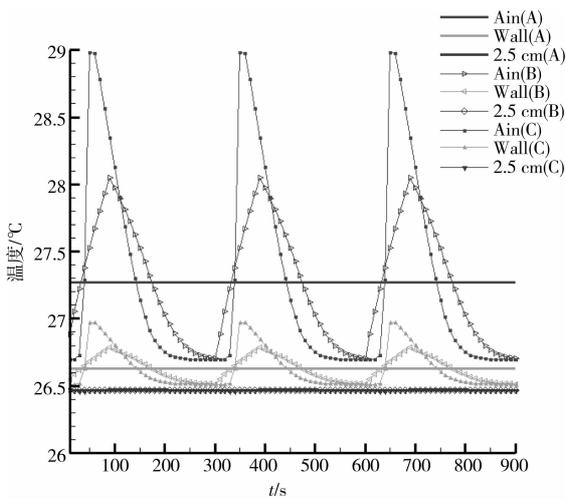


图 8 3 种列车散热条件下第 31 d 前 900 s 土壤以及空气温度变化

图 8 显示了第 31 d 第 1~900 s 共计 3 个周期内土壤以及空气温度变化。从图中可以看出不同的

散热条件简化模式对区间温度有着很大的影响, 散热条件周期性同样也造成了空气温度以及壁面温度的周期性波动。但相对空气温度波动幅度, 壁面温度波动幅度明显减小。而距离壁面 2.5 cm 处在不同的列车散热条件下没有明显变化, 且 3 条曲线基本重合。这说明散热条件不同的简化形式对土壤内部温度影响不大。

图 9 是 3 种列车散热条件下整个隧道壁面吸热量随时间变化趋势。从图上可以看出吸热量都随时间而下降, 且 3 条曲线几乎完全重合。

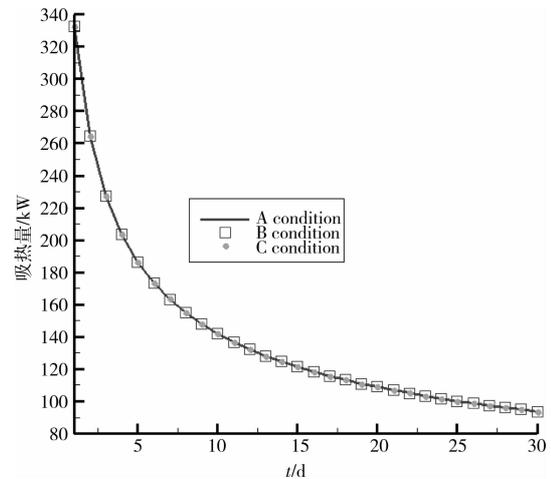


图 9 3 种列车散热模式下隧道壁面总吸热量随时间变化趋势图

从以上分析中可以得到的结论是如果将列车散热简化成均布空气内热源的形式, 那么在保证总散热量相同的前提下, 不同的简化形式对土壤温度以及壁面吸热量的远期预测结果影响不大。

5 结论

建立了考虑气固耦合影响的地铁隧道土壤温度预测模型, 对由列车运营引起的高频热扰提出几种简化方案, 就这些不同热扰条件下土壤温度响应进行了比较。得到的结论如下:

1) 建立的土壤温度模型可以很好的用来预测地铁土壤温度。

2) 列车运营过程中带来的高频热扰(活塞风以及列车散热)会对区间隧道空气以及壁面温度造成明显的同周期性波动。

3) 在一定的原则下(比如总风量或总散热量相同)不同的高频热扰简化形式对土壤内部温度较长时间变化预测结果影响不大, 对长时间土壤壁面吸热量预测结果影响不大。因此在预测土壤温度较长时间变化趋势时, 并不一定拘泥于这些复杂热扰条

件的完全“仿真”,重点应该是尽量保证这些热扰在一定时间内的平均值与实际吻合。

值得注意的是该文模拟的为夏季工况,隧道区间温度高于土壤温度,热流向土壤深度传递。而在冬季,隧道空气温度在部分时段可能低于土壤,这时是土壤向空气传热,因此该文所得到的温度、吸热量变化曲线也仅适用于夏季对应工况。同时,重点考察固定周期条件下不同高频热扰简化形式对 SSTP-model 模拟计算结果的影响,因此没有考虑车站空气温度、列车运营间隔等其他因素变化。

参考文献:

- [1] BARROW H, POPE C M. Theoretical global energy analysis for a railway tunnel and its environment with special reference to periodic temperature change[C]//7th Int Symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Brighton, 1991,267-280.
- [2] HU ZENG-HUI, LI XIAO-ZHAO. Numerical analysis of factors affecting the range of heat transfer in earth surrounding three subways[J]. J China Univ Mining & Technol,2008,18:67-71.
- [3] AMPOFO F, MAIDMENT G, MISSENDEN J. Underground railway environment in the UK Part 2: Investigation of heat load [J]. Applied Thermal Engineering,2004,24:633-645.
- [4] YANG GENG-SHE, ZHOU CHUN-HUA, et al. Numerical simulation and analysis of moisture-heat coupling of soft rock tunnels in the cold regions[J]. Journal of Coal Science & Engineering,2006,12:6-10.
- [5] YUAN FENG-DONG, YOU SHI-JUN. CFD simulation and optimization of the ventilation for subway side-platform [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007,22: 474-482.
- [6] 武伟. 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. Calculating methods of heat transfer quantity through surrounding rocks in metro design[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2008,4(1):89-93.
- [7] 韩星,张旭. 公路隧道稳态纵向温度升高研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006,2(4),591-595.
HAN XING, ZHANG XU. Theoretical study of longitudinal temperature distribution inside highway tunnel under steady state [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(4), 591-595.
- [8] THOMPSON J A, MAIDMENT G G, et al. Low energy cooling strategies on underground railways[C]//3rd Int Conf Heat Powered Cycles, Cyprus, 2004.
- [9] THOMPSON J A, MAIDMENT G G, et al. Modelling of low energy cooling strategies for underground railways [C]//18th Int Conf Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Norway, 2005.
- [10] THOMPSON J A, MAIDMENT G G, MISSENDEN J F. Modelling low-energy cooling strategies for underground railways[J]. Applied Energy, 2006, 83: 1152-1162.
- [11] SANTOS G H, MENDES N. Simultaneous heat and moisture transfer in soils combined with building simulation[J]. Energy and Buildings,2006,38(4):303-314.
- [12] 黄福其,张家猷,谢守穆. 地下工程热工计算方法[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1981.
- [13] STRIKWERSA J C. Finite difference schemes and partial differential equation[M]. New York:Chapman & Hall,1989.
- [14] 奥齐西克. 热传导[M]. 北京:高等教育出版社, 1983.
- [15] 钟星灿. 地铁空调负荷分析及估算[J]. 暖通空调, 2006,36(6):72-76.
ZHONG XING-CAN. Analysis and estimation of air conditioning loads in under ground railway [J]. HV&AC, 2006,36(6):72-76.

(编辑 胡玲)