

相变吊顶与隧道空气耦合传热模拟分析

于连广, 吴喜平, 张君瑛

(同济大学 机械工程学院, 上海 201804)

摘要: 在地铁隧道区间构建了相变吊顶, 相变材料选择水合盐晶体 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. 将列车在运行中的散热简化成移动发热物体等热流散热过程, 建立列车在区间内运动三维物理模型, 模拟了短时间内构建相变吊顶区间温度场变化. 建立了相变材料与区间空气温度耦合传热模型, 并求解. 其求解结果与三维模型模拟结果对比, 验证了耦合模型有效性. 采用耦合模型对长时间作用下相变材料吸热量以及隧道区间温度进行预测, 结果显示, 在模拟工况条件下相变吊顶可吸收 56.9% 列车散发的热量.

关键词: 相变材料; 地铁; 隧道; 热环境

中图分类号: TU 96

文献标识码: A

Analysis on Coupled Heat Transfer of Phase Change Material Ceiling and Air in Tunnel

YU Lianguang, WU Xiping, ZHANG Junying

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Phase change material (PCM) ceiling is constructed by hydrated salt $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ in the underground railway tunnel. The heat dissipation of moving train is simplified as a moving heat source which generates equivalent heat. The 3D model of moving train is established to simulate numerically the dynamic range of the tunnel of the non-steady-state thermal environment in short time. Coupled heat transfer model (CHT model) of PCM and air in the tunnel is established, in addition, solution is given and compared with that of the 3D model, which validates the CHT-model. The CHT-model is used to simulate the heat absorption of PCM and tunnel temperature in the long time, and the results show that the PCM ceiling can absorb 56.9% of the heat emitted by train under the simulated operating condition.

Key words: phase change material (PCM); underground railway; tunnel; thermal environment

随着世界主要城市人口的急剧增加, 城市交通日益拥挤. 为了提供更大的运力, 地铁发车密度不断加大、车速也不断提高, 这使大量的热量被投放到相对狭窄的地下空间, 单纯常规通风手段已经不能满足地铁内环境的要求. 在炎热的夏季, 由于担心外界温度较高空气的侵入, 地铁空间采用闭式运行模式, 地下空间热环境完全采用空调冷却手段进行控制. 虽然当前常规地铁环控系统能够在一定程度上满足乘客热舒适以及空气品质的要求, 但以消耗巨大能量为代价. 前瞻性的研究是从自然界提取能量来解决上述问题^[1]. 国外有人设想在隧道壁安装热管改变土壤的传热系数^[1], 从而增强热量向更远的距离传播的能力. Maidment G G, Missenden J F^[2] 提出用地下水为英国的伦敦和默西塞德郡地铁提供冷量. 国内刘乃玲、张旭等^[3] 提出利用细水雾为狭长空间降温.

文献[1]中构想在地铁隧道区间构建 PCM (phase change material) 蓄能吊顶衬砌层, 用以解决可再生能源(大气冷量)供应时刻(夜间)无法与冷量需求时刻(地铁营运时间)在时间上不并行的问题. 基于这个构想, 笔者着重研究构建相变材料吊顶后对隧道区间温度场的影响, 并建立相变材料与隧道空气之间耦合传热模型.

1 列车运行作用下隧道区间温度场三维模拟

1.1 相变材料吊顶构建以及计算模型的简化

对相变材料的选择需要考虑相变温度、稳定性、可逆性、可靠性、经济型等诸多因素^[4]. 对相变材料相变温度的选择基于 3 点考虑: 第一是可以尽可能

收稿日期: 2009-09-21

基金项目: 上海科委基金(07dz12022)

第一作者: 于连广(1975—), 男, 博士生, 主要研究方向为地铁节能. E-mail: hiylg@sohu.com

通讯作者: 吴喜平(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为地铁节能以及冰蓄冷. E-mail: wuxiping@tongji.edu.cn

地利用夜间地面较低空气温度进行释热,相变温度应高于夜间空气温度;其次由于白天需要利用相变材料的吸热特性,这使得相变温度要低于区间温度;再次要考虑相变吊顶的结露问题,相变温度不至于过低. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 相变材料相变温度为 $29.0\text{ }^\circ\text{C}$, 无论从区间隧道的吸热和利用夜间冷风放热都有较好的温度差.

水合盐晶体 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 是常用的相变材料^[5],它的蓄热密度高、导热系数高、价格相对便宜,适合工程上大量使用. 实验研究^[6]发现当水溶液中

$\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的质量分数为 2% 时可以将 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的过冷度减小至 $0\text{ }^\circ\text{C}$, 而水溶液中 NaCl 的质量分数为 1% 时可使 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的相变稳定性大幅增强,系统有保持其反复相变能力.

基于上述考虑,选用 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 作为隧道区间吊顶相变材料,其热物性参数见表 1. 表中, λ 为相变潜热, c 为比热容, k 为导热系数, ρ 为密度, t_{mlt} 为相变温度, 下标 l, s, m 代表分别代表液相、固相以及混合相.

表 1 相变材料热物性参数
Tab.1 Thermal properties parameter of phase change material

$\lambda /$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$c_s /$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$c_l /$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$k_s /$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$k_l /$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$\rho_s /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\rho_l /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$t_{\text{mlt}} / ^\circ\text{C}$
188 340	1 430.5	2 312.6	1.09	0.54	1 710	1 500	29.0

模拟的区间隧道长度为 $1\,000.0\text{ m}$, 其内径为 5.2 m , 路基距内径底部抬高 0.5 m . 在隧道顶部布置相变吊顶, 其高度受到 GB50157—2003《地铁设计规范》中关于输电线布置高度约束, 位置于距内径顶部 0.5 m 处. PCM 吊顶厚度为 1.0 cm , 宽度为 3.1 m , 用导热性能良好的凹凸麻面钢板密封. PCM 吊顶将隧道分割成上下 2 部分, 上部空间做成通风排烟风道, 列车在下部区间隧道内运行. 将列车简化成 142.0 m 矩形块体. 隧道采用圆形截面, 但上下部分均被削平, 分别构建成相变吊顶和路基. 具体的布置示意图 1, 简化几何尺寸见表 2.

1.2 控制方程

当地铁列车在隧道中运行时, 由于受空间限制, 列车所排开的空气不能全部绕流到列车后方, 必然有部分空气顺着列车前进方向流动. 受壁面粘性力作用, 紧贴列车壁面和隧道壁的空气保持相对静止的状态, 其他部分的空气以不同的流态运动. 为了便于计算, 作如下假设: ①将隧道区间空气视为不可压缩流体; ②站台内无自然风, 所有风机关闭, 空气流动仅由列车运动驱动; ③空气物性参数为常数, 忽略温度变化产生的浮力影响, 也不考虑内摩擦产热项.

引入 Boussinesq 粘性系数模型, 将雷诺应力表达成紊流粘性系数函数的形式. 笔者所考虑的长隧道活塞风流动与常见的管流有些类似, 根据相关文献的评述, 决定采用标准 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型改进的重整化群 (renormalization-group, RNG) $k-\epsilon$ 模型. 标准 $k-\epsilon$ 模型是一种高雷诺数的模型, RNG 理论提供了一个考虑低雷诺数流动的解析公式, 提高

了近壁区域模拟的准确性^[7].

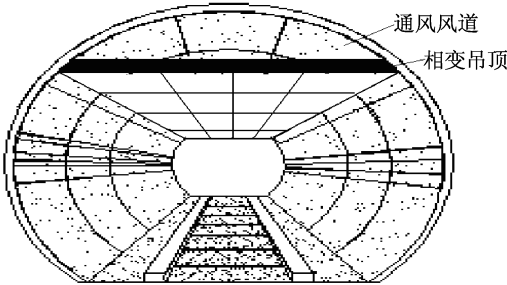


图 1 相变吊顶在地铁隧道区间内的布置
Fig.1 Phase change material ceiling in the subway tunnel

表 2 隧道与列车尺寸
Tab.2 Size of the tunnel and train

隧道截面 积/ m^2	隧道长 度/ m	列车截面 积/ $(\text{m} \cdot \text{m})$	列车长 度/ m	相变吊顶 尺寸/ $(\text{m} \cdot \text{m})$
19.15	1 000.0	3.0×3.8	142.0	$3.1 \times 1\,000.0$

对隧道区间的输运方程可写成通用的三维非稳态方程形式

$$\frac{\partial(\rho_a \phi)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_a u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

式中: ρ_a 为空气密度; ϕ 为通用因变量, 可以分别代表速度、温度、湍动能及其耗散率; τ 为时间; x_i 为坐标, $i=1, 2, 3$ 代表 3 个坐标方向; u_i 为空气速度; Γ_ϕ 为扩散系数.

1.3 边界条件

1.3.1 出入口条件以及初始时刻条件

计算域包括 2 个车站间的整个隧道区间,由于两端车站空间相对较大并且与地面联通,因此隧道的出入口设为大气压力,进出口温度以及隧道空间初始温度设为 $32.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.2 壁面条件

上海 1 号线运营时间已达 14 年,课题组曾对黄陂南路站至陕西南路站上行隧道区间壁面温度进行 2 次实际测量.从测试结果来看,2 次测试对应的室外大气环境温度虽然不同,但是实测的壁面温度与当地空气温度的差值仍很小,壁面温度基本等于当地当时的空气温度,因此将区间岩土壁面的温度定义为绝热壁面。

忽略密封钢板的热阻,将相变吊顶壁面定义为恒壁温.当顶部壁面改设为绝热壁面时即可模拟没有构建相变吊顶的情况。

所有壁面上的流动符合无滑移假设,在隧道壁面空气速度为零;在列车壁面空气速度与列车相同。

列车运行中会产生大量热量,根据文献[8]的调查,这些热量绝大部分是由列车动能转化而来.根据文献[9]的介绍,列车从上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.将列车看成移动发热物体,其表面的散热量简化地取该列车在运行过程中的平均散热量,这样列车壁面定义成第二类热边界条件,吸热量 $q = 312.12\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

1.4 网格的划分

除列车周围有较剧烈的速度变化外,笔者模拟的气流大部分区域可视为均匀管流.因此在列车附近网格划分较密集,在远离列车的区域网格可以疏一些.根据文献[10]隧道通风数值模拟的经验,0.4 m 的网格距离是考虑准确性与计算时间之间 2 个因素的折衷选择.另外,采用滑移网格技术解决列车运动问题,将整个计算域划分成 3 个区域,包括 1 个静止网格区和 2 个滑移网格区.静止网格区域是紧贴隧道上壁面的一个纵长方体,网格采用结构六面体,网格间隔尺寸采用 0.2 m.滑移网格区包括列车附近区域以及远离列车区域.列车附近区域包括列车前后各 10.0 m 的非规格几何区域,这个区域空气参数变化比较剧烈,网格间隔尺寸同样采用 0.2 m,网格采用非结构四面体;而远离列车区域空气流动变化很小,一般可视为均匀管流,因此网格间距采用 0.4 m,采用结构六面体.将对应的网格间距缩小 1/2,通过模拟对比发现两者模拟结果相差不大(列车运行 5

s 时刻的速度与温度场),网格经过独立性检验.由于计算域太长,图 2 中仅给出列车前端附近的网格划分情况。

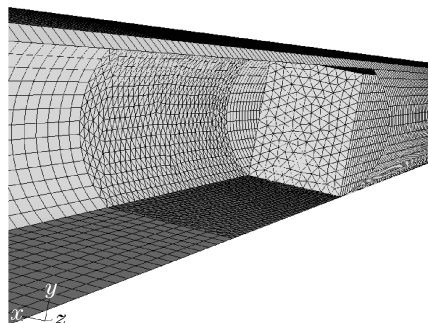


图 2 列车前端附近网格划分

Fig.2 Mash near the train nose

1.5 模拟结果及讨论

1.5.1 模拟结果与实测对比

课题组在 2008 年 11 月对上海地铁 4 号线东安站隧道区间活塞风进行了详细测试.上海地铁 4 号线是环线地铁,在内环方向,大木桥站距东安路站区间距离是 954.0 m.在东安区间隧洞口设置活塞风速度测点,记录列车从大木桥站启动到东安路站停稳整个过程的活塞风变化情况,并由车控调度系统记录列车运行时间.测试进行 3 次,3 次运行时间大致相等,列车平均时速为 $12.5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.因此,实际工况与模拟工况非常接近.图 3 是活塞风测试结果取平均后与模拟结果的对比。

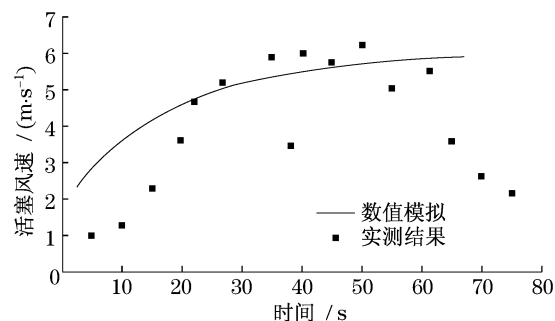


图 3 活塞风数值模拟与实测结果对比

Fig.3 Comparison of pistons wind simulation results and the measured data

从图 3 可以看出,在列车平稳运行段,活塞风的模拟结果与实测结果比较接近,但在列车进出隧道的加速与减速段误差比较大.这是因为模拟仅仅限于在隧道内且列车为匀速行驶的工况,与实际运行相差较大.考虑到实际工况各种复杂因素的干扰(车站出入口、通风竖井、其他区间运行列车等),数值模

拟预测结果还是令人满意的.

1.5.2 构建相变材料吊顶对隧道温升的影响

图4表示列车运行在 $t = 60$ s 时刻构建与未构建相变材料吊顶的隧道区间温度分布. 从模拟的2种工况条件下区间温度变化来看, 其温度场分布呈如下特点:

(1) 在车尾后一段距离以及列车与隧道壁面形成的环状空间内出现明显的温升, 而车前的隧道区间温升不明显. 这是由于列车速度大于活塞风速, 因而对流作用无法影响列车前方的温度.

(2) 在车尾端附近温升达到最高值.

(3) 在其他条件相同的前提下, 由于相变吊顶的吸热作用, 构建相变吊顶后隧道整个区间的温度比未构建吊顶的情况低.

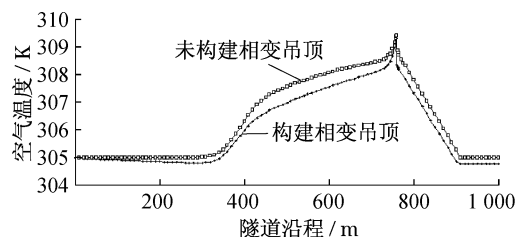


图4 $t = 60$ s 时构建与未构建相变吊顶隧道区间温度分布

Fig.4 Air temperature distribution in the tunnel with or without phase change material ceiling, $t = 60$ s

2 相变材料与隧道空气之间耦合传热模型

第1节仅对一次列车通过短暂时间内区间温度场作出了模拟, 本节将建立相变材料与隧道空气之间耦合传热模型, 以期得到较长时间(1个运营工作日)内区间空气温度以及相变材料温度、液相率等参数波动.

2.1 相变材料传热方程

对于相变材料与空气之间换热的耦合作用, 建立理论模型困难在于相变材料的导热机制的复杂性. 具体来说解决相变问题(或移动边界问题)有2个难点: 固液边界面的非线性关系以及移动边界的未知位置^[11]. 为解决上述问题, 需要在建立模型前作出一定假设, 对相变材料中的传热过程假设如下:

(1) 对于单纯的液相或固相, 热力学性质假设成常物性; 对于混合区, 热力学性质仅随液相率发生变化.

(2) 将液相对流传热归结到导热传热中, 引出一个等效导热系数, 即将 PCM 材料传热方程简化成导热微分方程的形式.

(3) 相变温度设为一个固定值, 而不存在过冷现象.

(4) 运用焓值法^[12], PCM 材料的焓值包含显热和潜热, 其中显热仅是温度的函数, 潜热仅是液相率的函数.

基于上面的假设, 忽略切向参数变化, 根据文献[12]给出的直角坐标系下相变材料导热方程, 通过坐标变换可以得到圆柱坐标系下相变材料二维传热方程

$$\rho \left(c \frac{\partial t}{\partial \tau} + \lambda \frac{\partial \chi}{\partial \tau} \right) = \left[\frac{\partial}{\partial \chi} \left(k \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial t}{\partial r} \right) \right] \quad (2)$$

式中: t 为相变材料温度; χ 为相变材料的液相率; x 为轴向坐标; r 为径向坐标.

当相变材料温度高于临界温度或者低于临界温度时, 液相率 χ 都不发生变化; 当相变材料温度等于临界温度, 随着吸热或放热的不同, 液相率 χ 上升或减小. 因此式(2)可以改写成更简化的形式.

当 $t < t_{mlt}$ 时,

$$\rho_s c_s \frac{\partial t}{\partial \tau} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_s r \frac{\partial t}{\partial r} \right) \right],$$

$$\chi = 0$$

当 $t = t_{mlt}$ 时,

$$\rho_m \lambda \frac{\partial \chi}{\partial \tau} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_m \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_m r \frac{\partial t}{\partial r} \right) \right]$$

当 $t > t_{mlt}$ 时,

$$\rho_l c_l \frac{\partial t}{\partial \tau} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_l \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_l r \frac{\partial t}{\partial r} \right) \right],$$

$$\chi = 1 \quad (3)$$

其中固相与液相的热物性保持常数, 而混合相物性参数由以下公式求得: $\rho_m = (1 - \chi) \rho_s + \chi \rho_l$, $k_m = (1 - \chi) k_s + \chi k_l$.

2.2 隧道空气传热方程

由于在2个车站间的地铁隧道较长且截面沿轴向一般不发生变化, 因此将隧道区间内的空气流动简化成一维管流, 列车移动散热简化成移动的内热源, 且忽略轴向导热以及内摩擦产热, 空气传热方程简化形式如下:

$$\rho_a c_a \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho_a c_a U \frac{\partial T}{\partial x} = q_1 + q_2 \quad (4)$$

式中: c_a 为空气比热容; T 为空气温度; U 为隧道区间空气流动速度; q_1 为衬砌相变层向隧道内传热量; q_2 为列车行进过程中散热量.

2.3 边界、初始条件以及相变材料的物性参数

对于区间空气, 初始温度与进口温度设为 $32.0\text{ }^\circ\text{C}$, 进口风速设为周期性条件, 在每个周期 ($0\sim 69\text{ s}$) 区间内有列车运行时, 进口风速为上节活塞风速模拟结果的拟合公式 (见图 3); 在每个周期 ($69\sim 249\text{ s}$) 区间没有列车时, 进口风速设为背景风速 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 除相变吊顶外, 其他壁面设为绝热壁面. 移动的内热源分 2 种情形, 当空间有列车时 $q_1 = 3\,308.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ (列车总散量与三维模拟相同); 当区间内没有列车时 $q_2 = 0\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$, 热源移动速度与列车速度相同为 $12.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 热源长度与列车相等为 142.0 m .

对于相变材料, 初始温度设为相变临界温度 $29.0\text{ }^\circ\text{C}$, 液相率设为零. 除与区间空气相邻的耦合传热壁面外, 其他壁面一律设为绝热壁面.

对于相变吊顶耦合壁面, 传热折算成一维传热 $q_1 = h(t - T)$, 这里壁面对流换热系数 h 采用 Sieder-Tate 公式, $h = 0.027 \frac{k_a}{d} R_e^{0.8} P_r^{1/3}$, k_a 为空气导热系数, d 为隧道截面当量水力直径, R_e 为隧道当量直径的雷诺数, P_r 为空气普朗特数.

2.4 模拟结果及讨论

利用方程 (3)~(4) 以及所给出的边界条件建立非稳态隐式格式的差分方程组, 求解采用交替方式隐式方法 (alternating direction implicit, ADI) 中的 Peaceman-Rachford 格式, 利用 FORTRAN 语言编写计算程序.

2.4.1 耦合传热模型的验证

为了验证耦合传热模型, 利用耦合传热模型求解 60 s 时刻隧道区间温度分布, 然后与三维模拟结果进行比较 (如图 5). 其中三维模拟曲线与图 4 中相应曲线相同.

从图 5 中可以看出, 在温度不受列车干扰段, 2 条曲线高度吻合. 而在温度明显受列车热源影响的区段, 2 条曲线变化趋势基本一致, 仅在列车尾部附近存在较大误差. 值得注意的是, 对于隧道温度场来说, 耦合传热模拟相当于一维模型, 因此并没有考虑列车本身占用的空间. 尽管耦合模型采用了较大的空间步长与时间步长, 但 2 条温度曲线仍比较接近, 从而证明了程序以及模型的有效性.

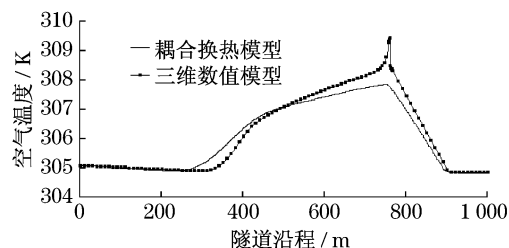


图 5 $t = 60\text{ s}$ 时构建相变材料吊顶耦合传热模型与三维数值模型对隧道区间温度预测结果的比较

Fig. 5 Results comparison of air temperature in tunnel with phase change material ceiling by the coupled heat transfer model and by three-dimensional model, $t = 60\text{ s}$

2.4.2 长时间作用下相变材料吸热量以及隧道区间温度预测

为了评价隧道区间构建相变吊顶后节能效果以及该方案的可行性, 必然需要对长时间作用下相变材料吸热量以及隧道区间温度作出预测. 对地铁的运营状况作出简化, 即每次班车都以相同的速度以及发热量运行、两列列车中间发车间隔为 180 s .

图 6 是在 $3\,600\text{ s}$ 内区间平均空气温度随时间变化曲线. 从图中可以看出, 由于列车行驶以及进口风速周期变化, 造成区间内空气温度也呈周期变化. 从第 3 个周期开始进入正规期, 温度大致在 $32.2\sim 33.0\text{ }^\circ\text{C}$ 之间波动且波形相同.

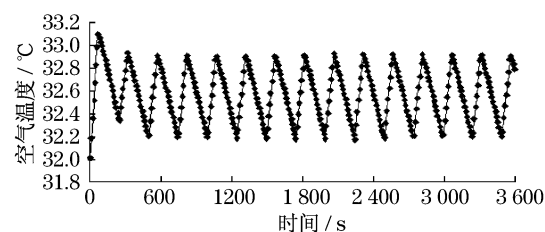


图 6 利用耦合传热模型对隧道区间内平均空气温度预测
Fig. 6 Results of average air temperature in tunnel with the coupled heat transfer model

图 7 是在给定的条件下, 相变材料平均液相率随时间变化曲线. 从图中可以看出, 虽然热扰 (列车散热、进口风速) 呈周期性变化, 但是由于变化周期相对于考察的时间太小, 因此液相率在长时间作用下可以近似认为是直线变化.

吸热量是相变材料末态显热与潜热之和减去初态显热与潜热之和, 即 $\int (\rho c t + \rho \chi \lambda) dv - Q_0$, 其中 v 为体积, Q_0 为初态热量. 由于相变材料初始温度处

于相变熔点且液相率为零,因此 Q_0 仅包含显热成分.模拟过程中温度处于定值为 $29.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,根据图7液相率的变化即可求出吸热量随时间的变化.整个模拟时间是 $62\ 250\text{ s}$,相变材料吸热量为 $4\ 613\ 457.9\text{ kJ}$,列车通过 250 个班次总散热量为 $8\ 104\ 170.8\text{ kJ}$.因此在模拟工况条件下相变吊顶可吸收 56.9% 列车散发的热量.

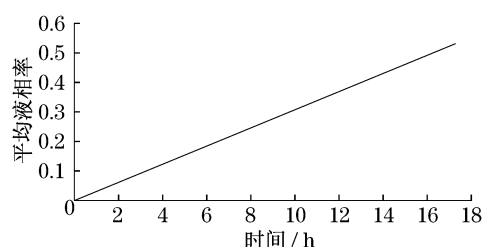


图7 模拟工况条件下相变材料平均液相率预测

Fig.7 Results of the average liquid fraction of the phase change material ceiling with the coupled heat transfer model

3 结论

研究构建相变材料吊顶对地铁隧道区间空气温度的影响.在对实际条件作一些假设和简化基础上,利用三维流体软件和编写应用程序模拟了相变材料对区间温度控制效果.得到结论如下:

(1) 利用三维流体软件对列车行进过程产生的隧道活塞风以及温度变化进行三维数值模拟,数值模拟结果与实测数据大体一致.

(2) 为了预测长时间作用下相变材料与隧道区间温度变化,笔者编写了相变材料与隧道区间温度耦合程序.在模拟中发现该程序对区间温度变化预测结果与三维模拟结果非常接近,能够满足工程的要求.

(3) 利用编写的温度耦合程序模拟了相变材料与隧道区间的参数变化,发现在给定的周期热扰条件下,相变吊顶可吸收 56.9% 列车散发的热量.

参考文献:

- [1] Thompson J A, Maidment G G, Missenden J F. Modelling low-energy cooling strategies for underground railways[J]. Applied Energy, 2006, 83(10): 1152.
- [2] Maidment G G, Missenden J F. Evaluation of an underground railway carriage operating with a sustainable groundwater cooling system [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(5): 569.
- [3] 刘乃玲, 张旭, 韩星. 细水雾在狭长空间降温效果的数值模拟[J]. 建筑科学, 2007, 23(6): 32.
LIU Nailing, ZHANG Xu, HAN Xing. Numerical simulation on the cooling effect by fine mist in long and narrow space[J]. Building Science, 2007, 23(6): 32.
- [4] Ghoneim A A. Analysis of collector-storage building walls using phase change materials[J]. Solar Energy, 1991, 47(3): 237.
- [5] 齐琦, 姜益强, 马最良. 相变蓄热材料及其在暖通空调领域中的应用[J]. 建筑热能通风空调, 2006, 25(3): 17.
QI Qi, JIANG Yiqiang, MA Zuiliang. Phase change energy storage materials and their applications in HVAC[J]. Building Energy & Environment, 2006, 25(3): 17.
- [6] 张君瑛. 周期性空气强制流动下相变储能系统的特性研究[D]. 上海: 同济大学机械工程学院, 2009.
ZHANG Junying. Study on the character of thermal storage system under forced periodical air flow[D]. Shanghai: Tongji University. College of Mechanical Engineering, 2009.
- [7] Mulvany N J, Chen L, TU J Y, et al. Steady-state evaluation of 'two-equation' RANS (Reynolds-averaged navier-stokes) turbulence models for high-Reynolds number hydrodynamic flow simulations [M/CD]. Victoria: DSTO Platform Sciences Laboratory, 2004.
- [8] Ampofo F, Maidment G, Missenden J. Underground railway environment in the UK Part 3: methods of delivering cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(5): 647.
- [9] 钟星灿. 地铁空调负荷分析及估算[J]. 暖通空调, 2006, 36(6): 72.
ZHONG Xingcan. Analysis and estimation of air conditioning loads in under ground railway[J]. HV & AC, 2006, 36(6): 72.
- [10] Vittorio Betta, Furio Cascetta, Marilena Musto, et al. Numerical study of the optimization of the pitch angle of an alternative jet fan in a longitudinal tunnel ventilation system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(2): 164.
- [11] Kim C, Kaviani M. A numerical method for phase change problems[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1990, 33(12): 2721.
- [12] Voller V R. Fast implicit finite difference method for the analysis of phase change problems [J]. Numerical Heat Transfer, Part B, 1990, 17(2): 155.