

列车活塞风影响下寒区隧道温度场的变化规律

高 焱¹, 朱永全², 赵东平³, 耿纪莹⁴

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043;
3. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031; 4. 中铁建安工程设计院有限公司, 河北 石家庄 050043)

摘要: 为了研究列车活塞风对洞内温度场的影响, 分别建立了二次衬砌、隔热层、一次衬砌及围岩的温度场计算模型, 采用叠加原理、分离变量法和贝塞尔特征函数求得了列车活塞风影响下寒区隧道温度场的解析解。将解析解与现场实测结果进行比较, 吻合较好。最后计算分析了不同行车速度和行车频率对洞内温度场及设防长度的影响。结果表明: 在列车活塞风影响下, 寒区隧道洞内温度变化明显, 洞内气温出现正负交替的变化规律, 不利于隧道内衬砌结构的防寒保温; 列车行车速度和行车频率与单侧设防长度呈线性关系, 该研究结论为寒区隧道的设计和防寒保温提供一定的理论支持。

关键词: 寒区隧道; 活塞风; 解析解; 温度场; 设防长度

中图分类号: U451+.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)01-0118-07

Varying rule of temperature field in the tunnel in cold region under the influence of the train piston wind

GAO Yan¹, ZHU Yongquan², ZHAO Dongping³, GENG Jiyong⁴

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Rail University, Shijiazhuang 050043, China;

3. China Railway Eryuan Engineering Group Co. LTD, Chengdu 610031, China;

4. China Railway Jian An Engineering Design Institute CO. LTD Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to study the influence of train piston wind on the temperature field of the tunnel in cold region, the calculation models of temperature field for secondary lining, thermal insulation layer, primary lining and surrounding rock are established respectively. Analytic solutions of temperature field for the tunnel in cold region under the influence of the train piston wind are derived by using the superposition principle, the method of separation of variables and Bessel's characteristic function. It can be found that the analytic solutions are in good agreement with the field measurement results. Finally, the impacts of different speed and frequency of train on the temperature field and the fortified length are analyzed. The results show that the temperature inside the tunnel varies obviously under the influence of train piston and is characterized by the alternatively positive and negative variations, which is not conducive to the cold insulation of the tunnel lining structure. The speed and frequency of train is linear with unilateral fortified length. This conclusion provides certain theoretical support for the design and cold insulation of tunnel in cold region.

Key words: tunnel in cold region; train piston wind; analytic solution; temperature field; fortified length

国内寒冷地区铁路和公路隧道的冻害现象十分普遍和严重。由相关报道可知^[1-3], 仅我国东北三省就有 33 座铁路隧道及多条公路隧道发生不同程度的冻害。

研究表明, 列车活塞风对隧道洞内温度影响较大, 是造成寒区隧道发生冻害的原因之一。列车活塞风对隧道洞内温度影响较大的原因: 一是列车运

行产生的“活塞效应”将隧道外部的冷空气带入隧道内部, 导致隧道内部温度降低; 二是随着隧道洞内风速的增大, 衬砌表面的热交换系数增大, 衬砌和围岩更容易被冷空气入侵。据兴安岭上、下行隧道的监测资料显示, 在列车活塞风影响下, 隧道中部出现负温分布, 这与传统观点认为只有隧道洞口段出现负温分布相悖。卢炜^[4]由哈大高铁隧道内部

收稿日期: 2016-05-24

修改稿日期: 2016-11-14

基金项目: 国家科技支撑计划基金资助项目(2012BAG05B00); 科技研究开发计划课题基金资助项目(2016G002-A); 河北省交通工程结构力学行为演变与控制重点实验室基金资助项目(201502)

作者简介: 高焱(1984—), 男, 博士生, 主要从事隧道及地下工程方向研究工作。E-mail: gao9941@163.com

气温监测结果发现:由于列车风的影响,隧道中部平均气温下降 3~5 °C,隧道内部出现了负温分布;列车运行速度越快,隧道内外温差越小。

国内外学者在寒区隧道温度场方面取得了很多研究成果. J. F. Kreider 和 M. Krarti^[5] 依据能量守恒原理得到了地下风洞内气体温度场的解析解; K. Takumi 等^[6] 采用叠加原理和能量守恒原理得到了寒区隧道洞内气体温度场的解析解; Yigit^[7] 采用摄动理论得到了液相变固相的二维热传导问题的解析解; C. Bonacina 等^[8] 计算得到了含相变一维非线性温度场的解析解; G. Comini 等^[9] 采用有限元法计算得到了含相变非线性热传导问题的解析解. 采用叠加原理、分离变量法和贝塞尔特征函数法求解寒区隧道衬砌和隔热层问题,与常用的格林函数法^[10]和积分变化法^[11]相比具有计算过程简单的特点. 张耀等^[12]运用微分方程法和贝塞尔特征函数的正交和展开定理,得到了含隔热层的圆形隧道热传导微分方程的解析解;赖远明等^[13]运用摄动技术得到了圆形隧道冻结过程的解析解;张国柱等^[14]运用叠加原理和贝塞尔特征函数法,得到了寒区隧道围岩径向温度场的解析解;何春雄等^[15]建立了隧道内空气与围岩对流换热及围岩传热模型,分析了围岩的冻结规律. 到目前为止,还没有得到列车活塞风影响下寒区隧道温度场变化规律的解析解。

1 数学模型

不考虑相变的影响,建立圆形隧道温度场模型,如图 1 所示. 其中, R_i ($i=1,2,3,4,5$) 分别表示二次衬砌内径、二次衬砌外径、保温层外径、一次衬砌外径和围岩半径。

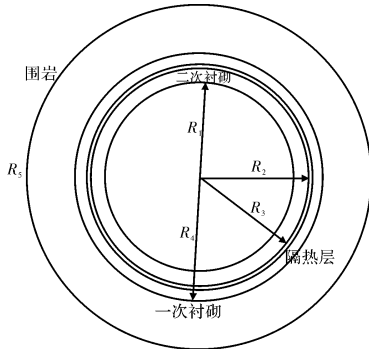


图 1 圆形隧道温度场模型

Fig. 1 Temperature field model of circular tunnel

该模型的热传导方程为

$$\frac{K_i}{c_i} \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) = \frac{\partial T_i}{\partial t}, R_i < r < R_{i+1}, i=1,2,3,4 \quad (1)$$

初始条件:

$$T_i = T_{0i}, R_i < r < R_{i+1}, t=1,2,3,4 \quad (2)$$

边界条件:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{\partial T_1}{\partial r} + h(T_1 - f(t)) = 0, R = R_1, t > 0 \\ K_1 = \frac{\partial T_1}{\partial r} = K_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, T_1 = T_2, r = R_2, t > 0 \\ K_2 = \frac{\partial T_2}{\partial r} = K_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}, T_2 = T_3, r = R_3, t > 0 \\ K_3 = \frac{\partial T_3}{\partial r} = K_4 \frac{\partial T_4}{\partial r}, T_3 = T_4, r = R_4, t > 0 \\ \rho c A \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 1 - hL(F(t) - T_1) \\ f(t) = T_m + T_n \sin(\omega t - \phi), \omega = 2\pi/\phi \end{cases} \quad (3)$$

满足叠加原理的通解:

$$T_i(r,t) = \begin{cases} \phi_i(r)F(t) + H_i(r)T_c + S_i(r,t) (\text{考虑列车风}) \\ \phi_i(r)f(t) + H_i(r)T_c + S_i(r,t) (\text{不考虑列车风}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_i ($i=1,2,3,4$) 分别为一次衬砌、隔热层、二次衬砌和围岩的温度, °C; λ_i, c_i 分别为一次衬砌、隔热层、二次衬砌和围岩的导热系数 ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$) 和体积比热 ($J \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1}$); h 为空气与围岩的对流换热系数 ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$); $f(t)$ 为列车未通过时隧道内空气温度, °C; $F(t)$ 为已知隧道内运营行车速度和行车频率引起的温度分布, °C; T_c 为围岩外径温度, °C; T_{0i} 为一次衬砌、隔热层、二次衬砌和围岩的初始温度, °C。

2 模型求解

2.1 函数 $\phi_i(r)$ 的求解

$$\frac{K_i}{c_i} \left(\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_i}{\partial r} \right) = 0, R_i < r < R_{i+1}, i=1,2,3,4 \quad (5)$$

边界条件:

$$\begin{cases} K_1 \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial r} + h(\phi_1 - 1) \right) = 0, r = R_1, t > 0 \\ K_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial r} = K_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial r}, \phi_1 = \phi_2, r = R_2, t > 0 \\ K_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial r} = K_3 \frac{\partial \phi_3}{\partial r}, \phi_2 = \phi_3, r = R_3, t > 0 \\ K_3 \frac{\partial \phi_3}{\partial r} = K_4 \frac{\partial \phi_4}{\partial r}, \phi_3 = \phi_4, r = R_4, t > 0 \\ \phi_4 = 0, r = R_5, t > 0 \end{cases} \quad (6)$$

通解形式:

$$\begin{cases} \phi_i = A_i \ln r + B_i \\ \phi'_i = \frac{A_i}{r} \ln r \end{cases} \quad (7)$$

代入边界条件,可得:

$$[D]^1 \times [A_1 \quad B_1 \quad A_2 \quad B_2 \quad A_3 \quad B_3 \quad A_4 \quad B_4]^T = [h \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (8)$$

其中,

$$D^1 = \begin{bmatrix} \frac{K_1}{R_1} \ln R_1 + h \ln R_1 & h & & & & & & \\ & \ln R_2 & 1 & -\ln R_2 & -1 & & & \\ & \frac{K_1}{R_2} & & \frac{K_2}{R_2} & & & & \\ & & \ln R_3 & 1 & -\ln R_3 & -1 & & \\ & & \frac{K_2}{R_3} & & \frac{K_3}{R_3} & & & \\ & & & \ln R_4 & 1 & -\ln R_4 & -1 & \\ & & & \frac{K_3}{R_4} & & \frac{K_4}{R_4} & & \\ & & & & & & \ln R_5 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由克莱姆法则,可得

$$\begin{cases} M_1 = \frac{D_{61}^3}{|D^3|}, N_1 = \frac{D_{62}^3}{|D^3|}, M_2 = \frac{D_{63}^3}{|D^3|}, N_2 = \frac{D_{64}^3}{|D^3|} \\ M_3 = \frac{D_{85}^3}{|D^3|}, N_3 = \frac{D_{86}^3}{|D^3|}, M_4 = \frac{D_{87}^3}{|D^3|}, N_4 = \frac{D_{88}^3}{|D^3|} \end{cases} \quad (10)$$

2.2 函数 $S_i(r, t)$ 的求解

$$\frac{K_i}{c_i} \left(\frac{\partial^2 H_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_i}{\partial r} \right) = 0, R_{i-1} < r < R_i, i=1, 2, 3, 4 \quad (11)$$

边界条件:

$$\begin{cases} K_1 \frac{\partial H_1}{\partial r} + h H_1 = 0, r = R_1, t > 0 \\ H_1 = H_2, K_1 \frac{\partial H_1}{\partial r} = K_2 \frac{\partial H_2}{\partial r}, r = R_2, t > 0 \\ H_2 = H_3, K_2 \frac{\partial H_2}{\partial r} = K_3 \frac{\partial H_3}{\partial r}, r = R_3, t > 0 \\ H_3 = H_4, K_3 \frac{\partial H_3}{\partial r} = K_4 \frac{\partial H_4}{\partial r}, r = R_4, t > 0 \\ H_4 = 1, r = R_5 \end{cases} \quad (12)$$

代入边界条件,可得:

$$[D]^3 \times [M_1 \quad N_1 \quad M_2 \quad N_2 \quad M_3 \quad N_3 \quad M_4 \quad N_4]^T = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T \quad (13)$$

其中,

$$D^3 = \begin{bmatrix} \frac{K_1}{R_1} \ln R_1 + h \ln R_1 & h & & & & & & \\ & \ln R_2 & 1 & -\ln R_2 & -1 & & & \\ & \frac{K_1}{R_2} & & \frac{K_2}{R_2} & & & & \\ & & \ln R_3 & 1 & -\ln R_3 & -1 & & \\ & & \frac{K_2}{R_3} & & \frac{K_3}{R_3} & & & \\ & & & \ln R_4 & 1 & -\ln R_4 & -1 & \\ & & & \frac{K_3}{R_4} & & \frac{K_4}{R_4} & & \\ & & & & & & \ln R_5 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

由克莱姆法则,可得

$$\begin{cases} M_1 = \frac{D_{81}^3}{|D^3|}, N_1 = \frac{D_{82}^3}{|D^3|}, M_2 = \frac{D_{83}^3}{|D^3|}, N_2 = \frac{D_{84}^3}{|D^3|} \\ M_3 = \frac{D_{85}^3}{|D^3|}, N_3 = \frac{D_{86}^3}{|D^3|}, M_4 = \frac{D_{87}^3}{|D^3|}, N_4 = \frac{D_{88}^3}{|D^3|} \end{cases} \quad (15)$$

2.3 函数 $S_i(r, t)$ 的求解:

由分离变量法,可得:

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} = \frac{k_i}{c_i} \left(\frac{\partial^2 S_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S_i}{\partial r} \right),$$

$$R_i < r < R_{i+1}, i=1, 2, 3, 4 \cdots, t > 0 \quad (16)$$

边界条件:

$$\begin{cases} K_1 \frac{\partial S_1(r, s)}{\partial r} + h S_1(r, s) = 0, r = R_1 \\ S_1(r, s) = S_2(r, s), r = R_2 \\ S_2(r, s) = S_3(r, s), r = R_3 \\ S_3(r, s) = S_4(r, s), r = R_4 \\ S_4(r, s) = 0, r = R_5 \end{cases} \quad (17)$$

初始条件:

$$S_i(r, t) = 1 - r^2, t = 0 \quad (18)$$

将 $S_i(r, t) = \Psi_i(r) \Gamma(t), i=1, 2, 3, 4$ 代入方

程,得:

$$S_i(r, t) = \Psi_i(r) \Gamma(t), i=1, 2, 3, 4$$

$$\frac{d\Gamma(t)}{dt} + \lambda \frac{k_i}{c_i} \Gamma(t) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{d\Psi_i^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\Psi_i}{dr} + \lambda \Psi_i = 0, R_i < r < R_{i+1}, i=1, 2, 3, 4 \quad (20)$$

当 $i=4$, 由物理意义可知, 在围岩层温度函数 $S_4(r, t)$ 满足条件 $|S_4| < +\infty$ 时, 函数 Ψ_4 满足自然边界条件.

$$\Psi_4(0) < +\infty \quad (21)$$

由 $S_4(r, s) = 0, r = R_5$, 可得

$$\Psi_4(R_5) = 0 \quad (22)$$

两个方程的通解分别为

$$\Gamma(t) = e^{-\lambda_m t} \quad (23)$$

$$\Psi_4(r) = \alpha_4 J_0(\sqrt{\lambda} r) + \zeta_4 Y_0(\sqrt{\lambda} r) \quad (24)$$

由 $\Psi_4(0) < +\infty$ 知 $\zeta_4 = 0$, 再由条件 $\Psi_4(R_5) = 0$ 得: $J_0(\sqrt{\lambda} R_5) = 0$, 即 $\sqrt{\lambda} R_5$ 是 $J_0(x)$ 的零点. 当 $\mu_{4m}^{(0)}$ 表示 $J_0(x)$ 的正零点时, $J_0(\mu_{4m}^{(0)}) = 0$, 固有函数为

$$\begin{cases} \lambda_{4m} = \frac{(\mu_{4m}^{(0)})^2}{R_5^2} \\ \Psi_{4m}(r) = J_0\left(\frac{\mu_{4m}^{(0)}}{R_5} r\right) \end{cases}, (m=1, 2, 3, \dots) \quad (25)$$

将 λ_m 代入方程得

$$\Gamma(t) = \alpha_{4m} e^{-\left(\frac{\mu_{4m}^{(0)}}{R_5} \sqrt{\frac{k_4}{c_4}}\right)^2 t} \quad (26)$$

解得

$$S_{4m}(r, t) = \alpha_{4m} e^{-\left(\frac{\mu_{4m}^{(0)}}{R_5} \sqrt{\frac{k_4}{c_4}}\right)^2 t} J_0\left(\frac{\mu_{4m}^{(0)}}{R_5} r\right) \quad (27)$$

根据叠加原理, 满足方程的解

$$S_4(r, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_{4m} e^{-\left(\frac{\mu_{4m}^{(0)}}{R_5} \sqrt{\frac{k_4}{c_4}}\right)^2 t} J_0\left(\frac{\mu_{4m}^{(0)}}{R_5} r\right) \quad (28)$$

其中,

$$\alpha_{4m} = \frac{\int_{R_3}^{R_4} r(1-r^2) J_0\left(\frac{\mu_{4m}^{(0)}}{R_5} r\right) dr}{\frac{1}{2} J_1^2\left(\mu_{4m}^{(0)}\right)} \quad (29)$$

带入边界条件, 可得 $\alpha_{1m}, \alpha_{2m}, \alpha_{3m}$. 最终解的形式为:

$$S_i(r, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_{im} e^{-\left(\frac{\mu_{im}^{(0)}}{R_{i+1}} \sqrt{\frac{k_i}{c_i}}\right)^2 t} J_0\left(\frac{\mu_{im}^{(0)}}{R_{i+1}} r\right) \quad (30)$$

3 实例验证

不考虑列车风的影响时, 以青藏铁路风火山隧道为背景, 采用不考虑列车活塞风时的解析式进行计算. 隧道计算内径为 3.5 m, 二次衬砌厚为 0.5 m, 隔热层厚为 0.05 m, 一次衬砌厚为 0.3 m, 导热

系数为 $0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 钢筋混凝土比热为 $0.072 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 隔热层为聚氨酯泡沫, 比热为 $0.072 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 导热系数为 $0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 空气与隧道的对流换热系数 $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

根据实测气温资料, 2004 年风火山隧道 DK1159+046 断面的气温见公式(31).

$$T(t) = -4.46 + 8.56 \sin\left(\frac{2\pi}{8760} t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (31)$$

式中: t 为时间, h.

2004 年风火山隧道二次衬砌、隔热层、一次衬砌、围岩的实测和计算温度场变化曲线分别如图 2^[12]、3 所示.

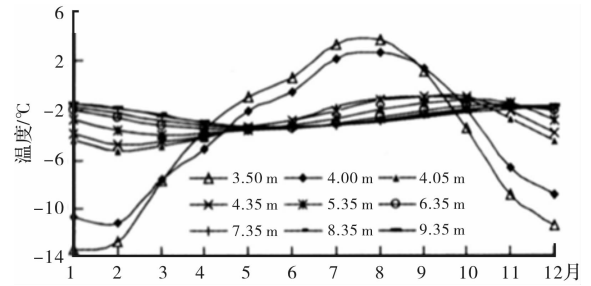


图 2 2004 年风火山隧道衬砌和围岩温度场实测分布曲线

Fig. 2 Field measured distribution curve of temperature field of fenghuoshan tunnel lining and surrounding rock in 2004

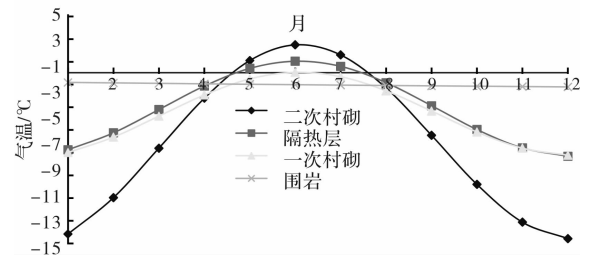


图 3 2004 年风火山隧道衬砌和围岩温度场计算分布曲线

Fig. 3 Calculated distribution curve of temperature field of the Fenghuoshan tunnel lining and surrounding rock in 2004

对比分析图 2 和图 3 可知, 计算和实测温度场的曲线分布规律基本一致.

考虑列车风的影响时, 以哈大高铁为背景. 哈大高铁隧道外界气温为 -15°C , 运行时速为 200 km/h . 洞内温度纵向分布实测值和计算值分别如图 4^[4]和图 5 所示.

由图 4 和图 5 知, 在列车活塞风影响下, 寒区隧道洞内温度变化明显, 洞内气温出现正负交替的变化规律, 不利于隧道内衬砌结构的防寒保温.

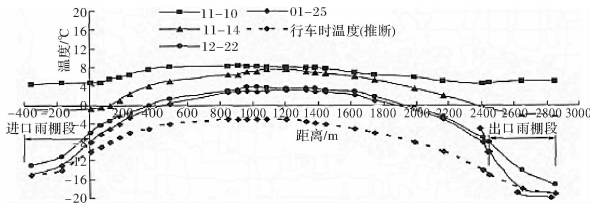


图 4 洞内温度纵向分布实测值

Fig. 4 Measured value of vertical temperature distribution

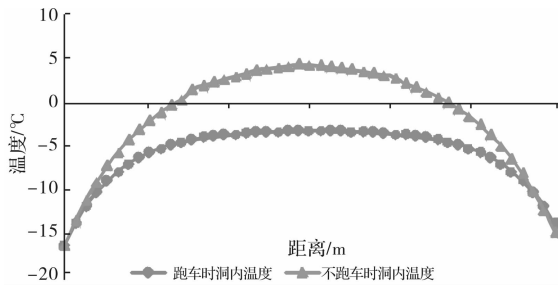


图 5 洞内温度纵向分布计算值

Fig. 5 Calculated value of vertical temperature distribution

4 不同行车速度和行车频率对设防长度的影响

采用考虑列车活塞风时的解析式进行计算. 考虑自然风的影响, 当不开启通风井时, 隧道的活塞风按以下式(32)计算:

$$\left\{ \begin{aligned} \nu_m &= \nu_T \frac{1 - \sqrt{\frac{\xi_m}{K_m} + \frac{\xi_n}{K_m} \left(\frac{\nu_n}{\nu_T} \right)^2 (1 - \frac{\xi_m}{K_m})}}{1 - \frac{\xi_m}{K_m}} \\ K_m &= \frac{N l_T}{(1 - \frac{f_T}{F})^2} \\ \xi_m &= 1.5 + \frac{\lambda (L_T - l_T)}{d} \\ \xi_n &= 1.5 + \frac{\lambda L_T}{d} \end{aligned} \right. \quad (32)$$

式中: l_T 为列车长度(m), 取 100 m; N 为列车平均断面面积, m^2 ; F 为隧道断面面积, m^2 ; V_l 为列车在隧道内行驶速度, m/s ; V_n 为自然风速, m/s ; λ 为隧道平均摩擦系数; D 为隧道当量直径, m ; L_T 为隧道长度 m .

取隧道计算长度为 10 000 m, 通过计算, 列车时速为 100、150、200、250、300、350 和 400 km/h 时, 寒区隧道洞内气温分布曲线如图 6 所示.

由图 4 可知, 随着列车时速的增大, 隧道洞内气温整体下降, 设防长度不断增大.

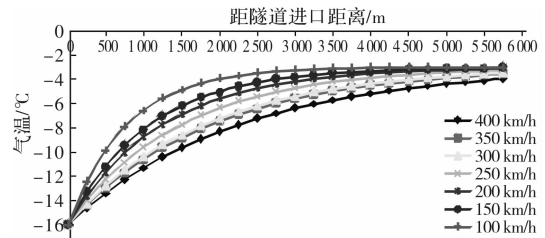


图 6 不同行车速度时寒区隧道洞内气温分布曲线

Fig. 6 Temperature distribution curve of tunnel in cold region at different speed

根据现行《铁路隧道设计规范》规定, -5°C 以上气温可不设保温水沟^[16], 由此可以确定一直跑车状态下, 不同行车速度时的单侧设防长度, 如表 1 所示.

表 1 不同行车速度时的单侧设防长度

Tab. 1 Unilateral fortification length at different speed of train

时速/ $\text{km} \cdot \text{h}$	100	150	200	250	300	350	400
设防长度/ km	1.5	1.9	2.3	2.7	3.2	3.5	4

对流换热系数的计算公式如下.

$$h = 0.023 \frac{\lambda}{d} \left(\frac{ud}{\nu} \right)^{0.8} Pr^{0.3} \quad (33)$$

式中: ν 为运动黏度, m^2/s ; Pr 为空气普朗特数; λ 为隧道内活塞风的导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

计算对流换热系数时, 采用平均活塞风进行计算. 平均活塞风约为最大活塞风的 $1/3$. 在列车活塞风影响下, 隧道洞内空气温度计算公式如下.

$$T(t) = \left(T_w + \frac{q}{hS} \right) - \left(T_w + \frac{q}{hS} - T_0 \right) \exp \left(- \frac{hS}{\rho c A} t \right) \quad (34)$$

式中: T_w 为列车壁面温度, $^{\circ}\text{C}$; q 为列车在单位时间单位长度上的散热量, $J \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}$; T_0 为隧道外空气温度, $^{\circ}\text{C}$; S 为隧道周长, m ; ρ 为空气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c 为空气比热, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; t 为时间, s .

假设列车运营图如图 7 所示. 采用如下方法计算不同行车速度和行车频率时的单侧设防长度.

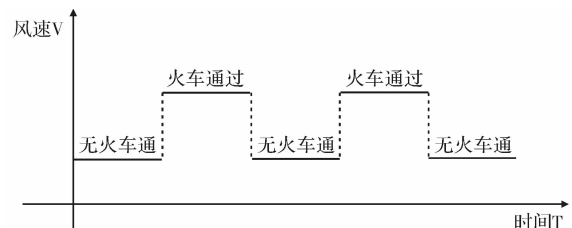


图 7 列车运营图

Fig. 7 Operation diagram of the train

假设隧道长度为 6 000 m,活塞风与自然风同向,隧道内平均自然风流速为 2 m/s. 取 1 h 作为一个计算区间,采用等效面积法,列车的设防长度计算公式为

$$L=\eta \cdot L_1$$
 (35)

式中: L 为不同行车速度和行车频率时的单侧设防长度,m; L_1 为隧道内列车以某一恒定时速连续运行时的单侧设防长度,m; η 为调整系数.

其中, η 的计算公式为

$$\eta=\frac{A}{A_1}$$
 (36)

式中: A 为实际活塞风与时间轴构成的封闭四边形的面积 m^2 ; A_1 为隧道内列车以某一恒定时速连续运行时活塞风与时间轴构成的封闭四边形的面

积 m^2 .

其中, A 和 A_1 计算公式为

$$\begin{cases} A=\bar{v}ft_1+(3\,600-ft_1)v_0 \\ A_1=3\,600\bar{v} \end{cases}$$
 (37)

式中: \bar{v} 为平均活塞风大小,m/s; $t_1=t_2+t_3$, t_2 为列车在隧道内行驶的时间, t_3 为活塞风在隧道内持续时间,一般 $t_3=180\text{ s}$; f 为列车运行频率.

采用上面的方法计算,得到不同行车速度和行车频率时的单侧设防长度,见表 2 所示.

由表 2 可以看出,随着行车速度和行车频率的增大,单侧设防长度不断增大.

列车行车速度、行车频率与单侧设防长度呈线性分布规律,如图 8 所示.

表 2 不同行车速度和行车频率时的单侧设防长度

Tab. 2 Unilateral fortification length at different speed and frequency of the train

时速/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	100	150	200	250	300	350	400
以恒定速度跑车 $L_1(\text{m})$	1 500	1 900	2 300	2 700	3 200	3 500	4 000
平均活塞风/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	6.28	9.42	12.57	15.71	18.86	22	25.15
列车通过隧道时间/s	216	144	108	86.4	72	86.4	54
A	8 029	8 217	8 407	8 595	8 784	9 154	9 162
A_1	14 736	18 504	22 284	26 052	29 832	33 600	37 380
η	0.545	0.444	0.377	0.330	0.294	0.272	0.245
频率为 1 次/h 时 $L(\text{m})$	818	844	867	891	942	952	980
频率为 2 次/h 时 $L(\text{m})$	902	948	992	1 035	1 112	1 157	1 190
频率为 3 次/h 时 $L(\text{m})$	986	1 053	1 117	1 180	1 282	1 360	1 400
频率为 4 次/h 时 $L(\text{m})$	1 070	1 157	1 241	1 325	1 452	1 564	1 610
频率为 5 次/h 时 $L(\text{m})$	1 155	1 262	1 366	1 469	1 622	1 767	1 820
频率为 6 次/h 时 $L(\text{m})$	1 239	1 366	1 490	1 613	1 792	1 971	2 029

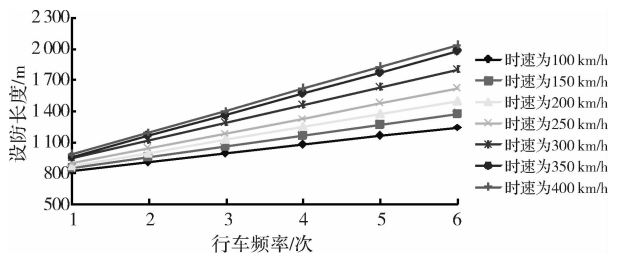


图 8 列车行车速度、行车频率与单侧设防长度的关系

Fig. 8 Relationship between speed, frequency and unilateral fortification length of the train

通过数据拟合分析知,列车时速分别为 100、150、200、250、300、350 和 400 km/h 时,行车频率与单侧设防长度的关系式分别如下:

$$\begin{cases} L=84.229x+733.53,R^2=1,v=100\text{ km/h} \\ L=104.46x+739.4,R^2=1,v=150\text{ km/h} \\ L=124.6x+742.73,R^2=1,v=200\text{ km/h} \\ L=144.49x+746.47,R^2=1,v=250\text{ km/h} \\ L=170x+772,R^2=1,v=300\text{ km/h} \\ L=203.69x+748.93,R^2=1,v=350\text{ km/h} \\ L=209.86x+770.33,R^2=1,v=400\text{ km/h} \end{cases}$$

式中: L 为单侧设防长度,m; x 为列车运行频率,次/h; R_2 为拟合相关度; v 为列车的运行速度,km/h.

5 结论

通过对列车活塞风影响下寒区隧道温度场变

化规律的研究,得到了以下几点结论及认识:

(1) 采用叠加原理、分离变量法和贝塞尔特征函数,获得了考虑活塞风和不考虑活塞风条件下的二次衬砌、隔热层、一次衬砌及围岩温度场解析解,为寒区隧道的设计和防寒保温提供一定的理论支持。

(2) 采用等效面积法得到了不同行车速度和行车频率时单侧设防长度的计算方法,经研究发现,列车行车速度、行车频率与单侧设防长度呈线性分布规律。

(3) 在列车活塞风影响下,寒区隧道洞内温度变化明显,洞内气温出现正负交替的变化规律,不利于隧道内衬砌结构的防寒保温。

参考文献 References

- [1] 赖远明,吴紫汪,朱远林. 寒区隧道温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 529-533.
LAI Yuanming, WU Ziwang, ZHU Yuanlin. Nonlinear analyses for the couple problem of temperature, seepage and stress field in cold region tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 529-533.
- [2] 程凡. 鲁霍一级公路阿拉坦隧道温度场特性研究[D]. 西安:长安大学, 2009.
CHENG Fan. Research on the temperature field of alatan tunnel in lu huo highway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [3] 霍润科,汤寅净,宁翠萍,等. 寒区公路隧道保温层设置的数值分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(2): 158-163.
HUO Runke, TANG Yinjing, NING Cuiping et al. Numerical analysis of insulating layer setting of highway tunnel in cold regions[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2013, 45(2): 158-163.
- [4] 卢伟. 寒冷地区高速铁路隧道内温度场变化特性及其影响[J]. 铁道建筑, 2014(9): 67-70.
LU Wei. Variation characteristics and influence of temperature field in high speed railway tunnel in cold region[J]. Railway Engineering, 2014(9): 67-70.
- [5] KRARTIM, KREIDER J F. Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel[J]. Energy Conversion and Management, 1995, 37(10): 1561-1574.
- [6] TAKUMI K, TAKASHI M, KOUICHI F. An estimation of inner temperatures at cold region tunnel for heat insulator design[C]// Proceedings of Structural Engineering Symposium. 2008: 32-38.
- [7] YIGIT F. Approximate analytical solution of a two-dimensional heat conduction problem with phase-change on a sinusoidal mold [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(10): 1-196-1205.
- [8] BONACINAC, COMINI G, FASANO A, et al. Numerical solution of phase change problems[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1973, 16(6): 1825-1832.
- [9] COMINI G, GUIDICE S D, LEWIS R W, et al. Finite element solution of nonlinear heat conduction problems with special reference to phase change[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1974, 8(3): 613-624.
- [10] SIEGEL R. Transient thermal analysis of paraslucent layers by using green's functions[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1999, 13(1): 10-17.
- [11] OZISIK M N. Heat conduction[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1980.
- [12] 张耀,何树生,李靖波. 寒区有隔热层的圆形隧道温度场解析解[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 114-118.
ZHANG Yao, HE Shusheng, LI Jingbo. Analytic solutions for temperature fields of a circular tunnel with insulation layer in cold region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(1): 114-118.
- [13] 赖远明,喻文兵,吴紫汪,等. 寒区圆形截面隧道温度场的解析解[J]. 冰川冻土, 2001, 23(2): 126-130.
LAI Yuanming, YU Wenbing, WU Ziwang, et al. Approximate analytical solution for temperature fields of a circular tunnel in cold regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(2): 126-130.
- [14] LAI Yuanming, LIU Songyu, WU Ziwang, et al. Approximate analytical solution for temperature fields in cold regions circular tunnels[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 34(1): 43-49.
- [15] 何春雄,吴紫汪,朱林楠. 祁连山区大坂山隧道围岩的冻融状况分析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 113-120.
HE Chunxiong, WU Ziwang, ZHU Linnan. Analysis of freeze thaw condition in the surrounding rock wall of the Dabanshan Tunnel in the Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(2): 113-120.
- [16] 张生. 高寒隧道保温设计研究及热工计算方法初探[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(3): 59-63.
ZHANG Sheng. Analytic solutions for the temperature fields of a circular tunnel with insulation layer in cold region[J]. Modern Tunneling Technology, 2011, 48(3): 59-63.

(编辑 吴海西)