

火灾下盾构隧道衬砌管片结构变形理论分析*

韩兴博 柴伦磊 夏永旭

(长安大学 公路学院 西安 710064)

摘要: 火灾高温会使盾构隧道管片衬砌的力学性能产生劣化,其受力变形也较常态下更为复杂。考虑到火灾下衬砌截面温度场的真实分布情况以及管片材料高温下力学性能的非线性,建立了高温下圆形衬砌变形的理论计算模型;针对盾构隧道管片衬砌,基于自由变形理论,得到了其高温下变形的解析解;根据具体算例得到了发生火灾时管片变形规律,为管片火灾下的防火设计提供了理论依据,并将计算结果与设计规范相对比,对灾后隧道内人员财产救援进行的时机给出了建议。

关键词: 火灾;衬砌管片;变形;理论分析

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)02-0525-06

Theoretical Analysis of the Deformation of Shield Tunnel Segment under Fire Situation

Han Xingbo, Chai Lunlei, Xia Yongxu

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, P.R. China)

Abstract: High temperature of tunnel fire brings great damage to lining segment of a shield tunnel, for the mechanical property of segments wakes a lot under fire situation. It could influence the deformation and force of the segment. The complex mechanical property of lining material under high temperature makes deformation and force analysis more intricacy. Via the theoretical analysis, a calculate model of deformation for the segment was built considering high temperature. Considering the temperature distribution on the segment's section and nonlinear of the mechanical property of segment during fire, this paper built up a theoretical calculation model to calculate the deformation of a segment during fire. Based on the free deformation theory of lining, this paper brings people the analytical solution of the segment's deformation on fire situation. Besides, the paper analyzed a specific example of the real situation, according to the calculate results, it brings out the deformation regulation of the segment. This could bring theoretical conferences to the design of a fire resistant segment. At last, compared with the slandered, chance of time for rescue was recommended.

Keywords: fire; lining segment; deformation; theoretical analysis

0 引言

隧道火灾是一种不可避免的低概率事件^[1],但是一旦发生,其升温快、温度高、持续时间长对人员的生命健康产生威胁的同时对隧道结构本身也会带来巨大损坏。因此,隧道火灾对衬砌结构的影

响也得到了较为广泛的研究。近几年,隧道盾构工法以其极高的机械化程度以及极小的对环境的影响在国内发展极为迅速,尤其是在城市地铁建设中取得了广泛的应用。因此,隧道火灾对盾构隧道管片的影响得到广泛的重视。

在研究火灾对衬砌管片影响方面以试验和数

* 收稿日期: 2016-07-29(修改稿)

作者简介: 韩兴博(1991-),男,陕西岐山人,博士生,主要从事隧道防灾减灾相关科研工作。E-mail: hxbchd@163.com

值模拟居多。闫治国^[2]通过管片火灾试验研究了火灾下管片变形及损伤机理; 强健^[3]通过管片火灾试验和数值模拟研究了火灾下衬砌内的温度场分布规律; 郭信君^[4]通过管片火灾试验从材料、构件、结构 3 个层次研究了管片的抗火性能。相对试验和数值模拟, 隧道衬砌在高温下的变形的理论研究相对较少: Bradford 等^[5]通过理论分析研究了高温下非线性材料扁平拱的变形; 李忠友等^[6]通过理论推导得到了高温下衬砌变形的理论分析模型, 并对半圆形衬砌进行了分析计算, 其将衬砌简化成两端铰支的半圆形结构与隧道的真实情况有差异, 但是对于盾构管片火灾下变形的推导有借鉴意义。

盾构管片在不考虑接缝, 或者接缝考虑刚度系数折减情况下, 其结构为一圆环, 本文在文献[6]的基础上, 基于管片衬砌自由变形理论, 考虑衬砌管片实际的受力模式和约束形式, 并考虑混凝土截面温度场的非线性, 以及混凝土材料性能随温度的变化, 给出了火灾下盾构隧道管片的截面转角和径向变形解析解, 得到了火灾下管片变形规律。

以下对本文将出现的符号进行解释(单位均为国际制单位):

\bar{M}	管片截面弯矩
\bar{N}	管片截面轴力
M	考虑偏心管片截面弯矩
N	考虑偏心管片截面轴力
k	管片混凝土线膨胀系数
E_T	管片弹性模量
$T(y)$	衬砌内部温度分布函数
$\alpha_1 \cdots \alpha_4$	中间参变量
y_0	管片截面中性轴位置
\bar{y}	偏心距
h	管片厚度
T_t	管片背火面温度
T_b	管片受火面温度
R	管片半径
φ	任意管片截面角度
$\theta(\varphi)$	转角
$v(\varphi)$	径向位移
$u_x(\varphi)$	水平向位移
$u_y(\varphi)$	竖直向位移
P_i	管片水平向荷载
q_i	管片竖直向荷载
P_R	管片底部抗力

X_i	未知赘余力
δ_{ij}	柔度系数
Δ_{ij}	单位荷载位移
λ	侧向土压力系数
γ_i	第 i 层土容重

1 管片变形理论分析模型

由文献[2]、[3]可知, 衬砌管片火灾时其内部温度沿截面厚度方向的分布并不为直线分布, 其真实分布状况如图 1 所示。

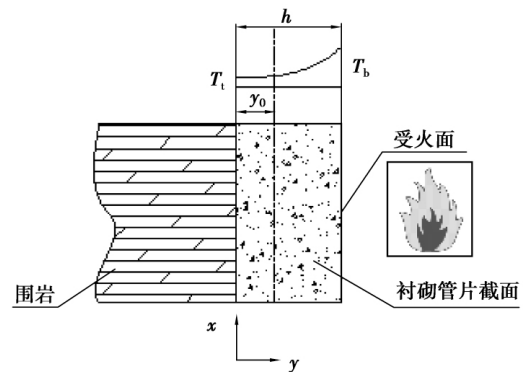


图 1 衬砌截面温度分布

Fig.1 Temperature distribution on lining section

为了方便计算特作如下假定: ①材料处在弹性变形范围; ②截面满足平截面假定。

由文献[6]可知, 拱形结构的截面转角可以用截面曲率近似表示, 简化后截面转角计算公式为:

$$\theta(s) = \int [\alpha_1 M - \alpha_2 N - (\alpha_3 - \alpha_4) k] ds \quad (1)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{\int_0^h E_T dy}{\int_0^h E_T dy \int_0^h E_T y^2 dy - (\int_0^h E_T y dy)^2} \\ \alpha_2 &= \frac{\int_0^h E_T y dy}{\int_0^h E_T dy \int_0^h E_T y^2 dy - (\int_0^h E_T y dy)^2} \\ \alpha_3 &= \frac{\int_0^h E_T y dy \int_0^h E_T T(y) dy}{\int_0^h E_T dy \int_0^h E_T y^2 dy - (\int_0^h E_T y dy)^2} \\ \alpha_4 &= \frac{\int_0^h E_T dy \int_0^h E_T T(y) y dy}{\int_0^h E_T dy \int_0^h E_T y^2 dy - (\int_0^h E_T y dy)^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对于圆形隧道管片,其截面转角可以进一步表达为:

$$\theta(\varphi) = \int [\alpha_1 M - \alpha_2 N - (\alpha_3 - \alpha_4) k] R d\varphi \quad (3)$$

根据管片的截面转角与径向变形之间的关系,可以得到衬砌结构径向变形表达式:

$$v(\varphi) = \int \theta(\varphi) R d\varphi \quad (4)$$

由式(4)可以进一步得到隧道衬砌结构的横向位移和竖向位移分别为:

$$\left. \begin{aligned} u_x(\varphi) &= v(\varphi) \cos(s/R) \\ u_y(\varphi) &= -v(\varphi) \sin(s/R) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

考虑到弹性模量随温度升高的劣化,轴力发生偏心作用,引起附加弯矩,因而有:

$$N = \bar{N}; M = \bar{M} + \bar{N}_y \quad (6)$$

式中:

$$\bar{y} = \frac{\int_0^h E_T y dy}{\int_0^h E_T dy} - \frac{h}{2} \quad (7)$$

文献[3]基于大量的试验成果,已经总结出火灾时衬砌内部温度分布函数 $T(y)$ 在 $T(y)$ 之上根据混凝土高温劣化规律可以得到随火灾发展而逐渐劣化的衬砌弹性模量函数 E_T 。因此,基于以上模型,可以对真实火灾场景下衬砌的变形位移进行求解。

2 隧道管片变形解析解

当管片处于较软砂性土或粘性土层时,地层不会对隧道衬砌径向变形产生很大的抗力,因此,可以

$$M_p = \begin{cases} q_1 R^2 \frac{\sin^2 \varphi}{2} + p_1 R^2 \frac{(1 - \cos \varphi)^2}{2} + p_2 R^2 \frac{(1 - \cos \varphi)^3}{12} & (0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2}) \\ -q_1 R^2 (\frac{1}{2} - \sin \varphi) + p_1 R^2 \frac{(1 - \cos \varphi)^2}{2} + p_2 R^2 \frac{(1 - \cos \varphi)^3}{12} + p_R R^2 \frac{(1 - \sin \varphi)^2}{2} & (\frac{\pi}{2} \leq \varphi < \pi) \end{cases} \quad (10)$$

$$N_p = \begin{cases} q_1 R \sin^2 \varphi - p_1 R (1 - \cos \varphi) \cos \varphi - p_2 R \frac{(1 - \cos \varphi)^2}{4} \cos \varphi & (0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2}) \\ q_1 R \sin \varphi - p_1 R (1 - \cos \varphi) \cos \varphi - p_2 R (1 - \cos \varphi) 2 \frac{\cos \varphi}{4} - p_R R (1 - \sin \varphi) \sin \varphi & (\frac{\pi}{2} \leq \varphi < \pi) \end{cases} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= -\frac{\Delta_{1P}}{\delta_{11}} = -\frac{1}{\pi} \int_0^\pi M_p d\varphi \\ X_2 &= -\frac{\Delta_{2P}}{\delta_{22}} = -\frac{2}{\pi R} \int_0^\pi M_p \cos \varphi d\varphi \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

把衬砌管片看作可自由变形的匀质圆环。按照文献[7]此时主要作用在管片上的荷载有:衬砌上方土层压力 q_1 ; 地层水平压力 p_1, p_2 ; 地层反力 p_R 。

将管片简化成一均质圆环,为一三次超静定结构。用力法求解其内力,由于结构及荷载均对称于竖轴,故沿对称面的剪力为零,因此,实际上仅有两个多余的未知力,基本结构计算图示如图2。由于对称轴上的衬砌截面仅竖向下沉,而无水平位移及转角,故可将圆环底截面视为固定段。图中未知力 X_1, X_2 已被移到衬砌环的弹性中心,因而其柔度系数 $\delta_{12} = 0$, 则有位移协调方程:

$$\left. \begin{aligned} X_1 \delta_{11} + \Delta_{1P} &= 0 \\ X_2 \delta_{22} + \Delta_{2P} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

根据自由变形法,解得衬砌中与竖轴成 φ 角任一截面的弯矩和轴力分别为:

$$\left. \begin{aligned} \bar{M} &= M_p + X_1 - X_2 R_h \cos \varphi \\ \bar{N} &= N_p + X_2 \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

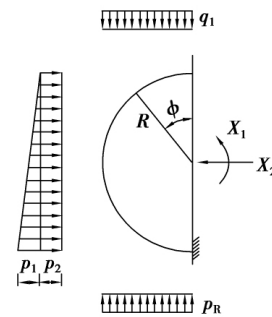


图2 管片结构荷载分布及计算图示

Fig.2 Load distribution on segment structure

由结构力学可得:

将式(10)、式(11)代入式(12)解得:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= q_1 R^2 \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{\pi} \right) - p_1 R^2 \frac{3}{4} - p_2 R^2 \frac{5}{24} - p_R R^2 \left(\frac{3}{8} - \frac{1}{\pi} \right) \\ X_2 &= -q_1 R \frac{1}{3\pi} + p_1 R + p_2 R \frac{5}{16} + p_R R \frac{1}{3\pi} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

将式(10)、式(11)、式(13)代入式(9)解得:

$$\bar{M} = \begin{cases} q_1 R^2 \frac{\sin^2 \varphi}{2} + p_1 R^2 \frac{(1 - \cos \varphi)^2}{2} + p_2 R^2 \frac{(1 - \cos \varphi)^3}{12} + q_1 R^2 \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{\pi} \right) - \frac{3}{4} p_1 R^2 - \frac{5}{24} p_2 R^2 - p_R R^2 \left(\frac{3}{8} - \frac{1}{\pi} \right) + \left(\frac{q_1}{3\pi} - p_1 - \frac{5}{16} p_2 - \frac{p_R}{3\pi} \right) R^2 \cos \varphi & (0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2}) \\ q_1 R^2 \left(\sin \varphi - \frac{1}{2} \right) + p_1 R^2 \frac{(1 - \cos \varphi)^2}{2} + p_2 R^2 \frac{(1 - \cos \varphi)^3}{12} + p_R R^2 \frac{(1 - \sin \varphi)^2}{2} + q_1 R^2 \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{\pi} \right) - \frac{3}{4} p_1 R^2 - \frac{5}{24} p_2 R^2 - p_R R^2 \left(\frac{3}{8} - \frac{1}{\pi} \right) + \left(\frac{q_1}{3\pi} - p_1 - \frac{5}{16} p_2 - \frac{p_R}{3\pi} \right) R^2 \cos \varphi & (\frac{\pi}{2} \leq \varphi < \pi) \end{cases} \quad (14)$$

$$\bar{N} = \begin{cases} q_1 R \sin^2 \varphi - p_1 R (1 - \cos \varphi) \cos \varphi - p_2 R \frac{(1 - \cos \varphi)^2}{4} \cos \varphi - \left(\frac{q_1}{3\pi} - p_1 - \frac{5}{16} p_2 - \frac{p_R}{3\pi} \right) R \cos \varphi & (0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2}) \\ q_1 R \sin \varphi + p_1 R (1 - \cos \varphi) \cos \varphi - p_2 R \frac{(1 - \cos \varphi)^2}{4} \cos \varphi - p_R R (1 - \sin \varphi) \sin \varphi - \left(\frac{q_1}{3\pi} - p_1 - \frac{5}{16} p_2 - \frac{p_R}{3\pi} \right) R \cos \varphi & (\frac{\pi}{2} \leq \varphi < \pi) \end{cases} \quad (15)$$

将式(14)、式(15)代入式(6)再代入式(3)得:

$$\theta(\varphi) = \alpha_1 R \left(\int \bar{M} d\varphi + \bar{y} \int \bar{N} d\varphi \right) - \alpha_2 R \int N d\varphi - (\alpha_3 - \alpha_4) k R \varphi + C_1 \quad (16)$$

将式(16)代入式(4)得:

$$v(\varphi) = \int \left\{ \begin{aligned} &\alpha_1 R \left(\int \bar{M} d\varphi + \bar{y} \int \bar{N} d\varphi \right) \\ &- \alpha_2 R \int N d\varphi \\ &- (\alpha_3 - \alpha_4) k R \varphi + C_1 \end{aligned} \right\} R d\varphi + C_2 \quad (17)$$

式中 C_1, C_2 由边界条件解出,函数较为复杂,可借用 MAT-LAB 等数学工具求解,求解时要注意 \bar{M}, \bar{N} 的分段性。

城市地铁区间隧道空间狭小,地铁车辆发生火灾时,可认为衬砌内表面温度为均匀分布,即沿着衬砌圆周温度都相同。强健^[3]根据试验和数值模

拟提出了衬砌截面的温度场函数:

$$T(y) = \alpha(T_{fmax}, t) e^{\beta \frac{h-y}{T_{fmax}}} + \gamma(T_{fmax}, t) \quad (18)$$

式中: $\alpha(T_{fmax}, t), \beta(T_{fmax}, t), \gamma(T_{fmax}, t)$ 是与火灾最高温度、火灾持续时间相关的参数,取值见文献[3]。

高温下混凝土性能会产生劣化,其弹性模量为温度的函数,过镇海和时旭东^[8]给出高温下管片混凝土的弹性模量如下:

$$E_T = [0.83 - 0.001 1T_{(y)}] E_0 \quad (19)$$

将式(18)、式(19)代入式(16)和式(17)可得 $\theta(s)$ 和 $v(s)$ 。 $\theta(\varphi)$ 和 $v(\varphi)$ 中的积分常数可以根据边界条件确定。

3 算例分析

西安地铁 2 号线张家堡至尤家庄段,隧道埋深约 30 m,衬砌管片厚度为 0.35 m,管片半径为 3 m,混凝土常温弹性模量为 29.5 GPa。文献[9]指出,隧道火灾时温度在 1 000~1 200 °C,最高也可达

1 800 °C ,本节假设火灾最高温度为 1 100 °C ,火灾持续 3 h。隧道所处层参数如表 1。

表 1 各土层参数

Table 1 Parameters of each soil layer

土层编号	土性	厚度/m	容重/(kN·m ⁻³)
1	杂填土	0.5	16
2	素填土	1.5	16.8
3	新黄土 2	6.3	16.5
4	新黄土 1	5.9	16.4
5	古土壤	3.6	17.5
6	粉质粘土	3	18.2
7	中砂层	7.3	18.6

计算得外部荷载如下:

$$q_1 = p_0 + \sum \gamma_i H_i + \sum \gamma_j H_j = 155.19 \text{ kN/m}^2$$

$$P_1 = \lambda (q + \gamma \times t/2) = 79.03 \text{ kN/m}^2$$

$$P_2 = \lambda [q + \gamma \times (2R_0 - t/2)] - P_1 = 95.53 \text{ kN/m}^2$$

$$P_R = q_1 = 155.19 \text{ kN/m}^2$$

按照前述方法计算结果如图 3~6 所示。

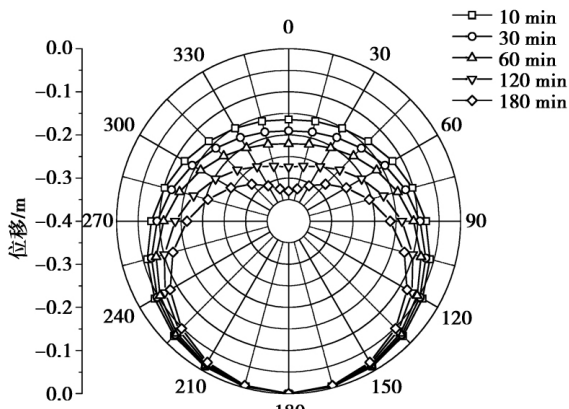


图 3 管片径向位移图

Fig.3 Radial displacement of segment

如图 3 所示,管片在火灾下由于性能劣化,整体断面呈收缩趋势,收缩趋势随时间而增大,且上半环的收缩幅度大于下半环。如图 4 所示,管片水平方向位移量较小,位移最大发生 $\pi/3$ 处,30 min 时为 0.14 mm,1 h 时为 0.15 mm,火灾持续 3 h 时位移达 0.23 mm。如图 5 所示,管片竖向变形较大,上半环位移明显大于下半环,位移最大处为拱顶。如图 6 所示,管片拱顶的变形在前 20 min 增长较快,随后基本呈线形增长,管片受火 10 min 时拱顶位移可达 17 cm,受火 30 min 时可达 19 cm。

由此可见,衬砌拱顶及拱顶向下两侧 60° 处应

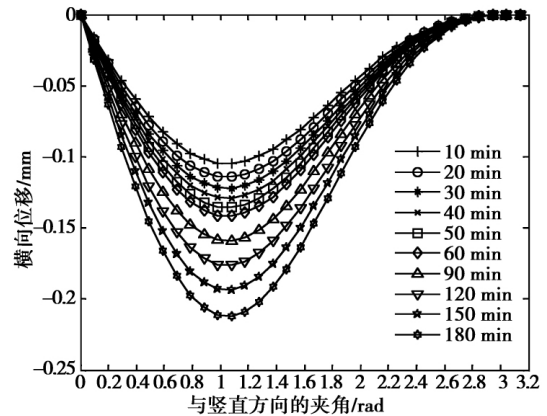


图 4 管片结构横向位移变化曲线

Fig.4 Horizontal displacement curve of segment

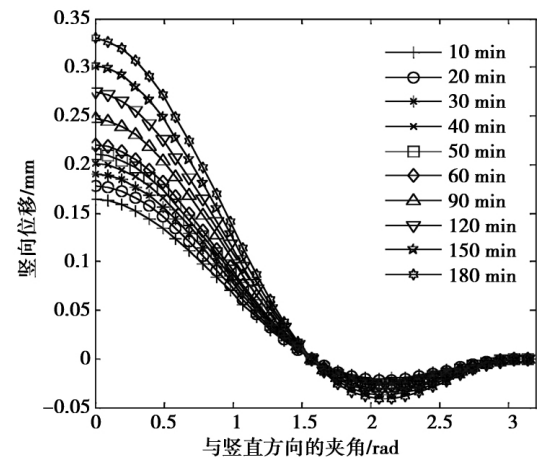


图 5 管片结构竖向位移变化曲线

Fig.5 Vertical displacement curve of segment

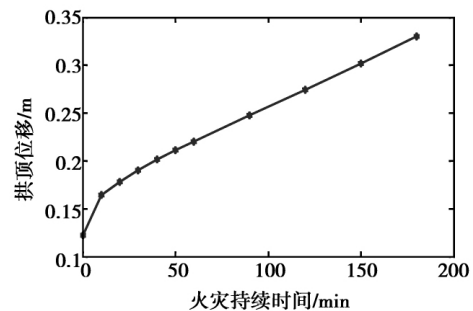


图 6 管片拱顶位移变化曲线

Fig.6 Displacement curve of segment top

作为防火设计重点考虑部位。

根据公路隧道设计规范,混凝土构件偏心受压应该满足下式^[10]:

$$KN \leq \alpha R_{aT} bh \quad (20)$$

$$R_{aT} = R_a \cdot (1 - 1.07 \times 10^{-3} T + 1.1 \times 10^{-7} T^2) \quad (21)$$

式中: K 为安全系数,取 2.4; α 为轴向力的偏心影响系数; R_{aT} 为混凝土高温下的抗压强度。

计算表明,衬砌轴力最大截面为 $\varphi = 80^\circ$ 截面,

将其带入式(20),计算结果如表2。

表2 截面计算结果

Table 2 Results of lining section

时间/ min	$\bar{y}/$ m	$Ra/$ MPa	$N/$ kN	$KN/$ kN	$\alpha R_{at}bh/$ kN
10	0.007	6.096 74	465.57	1 070.81	2 150.54
20	0.012	3.191 10	466.57	1 073.11	1 125.95
30	0.016	1.978 29	467.57	1 075.41	695.74
40	0.019	1.438 68	468.57	1 077.71	503.55
50	0.022	1.117 09	469.57	1 080.01	388.83
60	0.025	0.891 66	470.57	1 082.31	308.53
90	0.031	0.480 83	471.57	1 084.61	163.24
120	0.036	0.251 55	472.57	1 086.91	83.74
150	0.040	0.106 98	473.57	1 089.21	34.93
180	0.044	0.007 71	474.57	1 091.51	2.47

由表2可知,当火灾持续约20 min时,衬砌结构已不能满足规范^[10]要求;火灾持续40 min后,管片轴力最大截面所承荷载已大于其抗压强度,管片受火面表层部分材料将发生压碎破坏。建议火灾后的人员疏散以及防火救援应在隧道发生火灾后40 min内完成。

4 结论

(1) 考虑混凝土材料高温下力学性能随温度的变化,给出了火灾下圆形衬砌任意截面的转角以及径向位移的计算公式。

(2) 基于自由变形理论,考虑衬砌管片外部荷载,给出了高温下衬砌管片的任意截面的转角以及径向位移的计算公式。

(3) 根据工程实例计算结果,得到了火灾下衬砌变形规律,提出了衬砌防火应重点考虑部位。

(4) 根据规范验算,建议隧道灾后救援应在火灾发生后40 min内完成。

参考文献(References)

[1] 夏永旭,邓念兵,王永东.公路隧道火灾通风计算的改进[J].地下空间与工程学报,2014,10(4):937-942 (Xia Yongxu, Deng Nianbing, Wang Yongdong. Amelioration of calculation method for ventilation of highway tunnel during the fire [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(4): 937-942(in Chinese))

[2] 闫治国.隧道衬砌结构火灾高温力学行为及耐火方法研究[D].上海:同济大学,2007.(Yan Zhiguo. A study on mechanical behaviors and fireproof methods of tunnel lining structure during and after fire scenarios [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))

[3] 强健.地铁隧道衬砌结构火灾损伤与灾后评估方法研究[D].上海:同济大学,2007.(Qiang Jian. A study on fire damage to subway tunnel lining and evaluation method after fire scenarios [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))

[4] 郭信君.盾构隧道混凝土管片构件抗火性能试验及模拟分析研究[D].长沙:中南大学,2013.(Guo Xingjun. Experimental study and numerical simulation analysis of fire resistance performance of concrete segment component of shield tunnel [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese))

[5] Bradford M A. In-plane stability of pinned arches with elastic restraints under thermal loading[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2006, 6(2): 163-177.

[6] 李忠友,刘元雪,刘树林,等.火灾作用下隧道衬砌变形理论计算模型[J].岩土力学,2012,33(增2): 307-310.(Li Zhongyou, Liu Yuanxue, Liu Shulin, et al. Theoretical analysis model of deformation behavior of tunnel linings subjected to fire load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Supp.2): 307-310(in Chinese))

[7] Ita W G. Guidelines for the design of shield tunnel lining - Working Group No. 2, International Tunnelling Association. [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(3): 303-331.

[8] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土的高温性能及其计算[M].北京:清华大学出版,2003.(Guo Zhenghai, Shi Xudong. Behavior of reinforced concrete at elevated temperature and its calculation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese))

[9] 李忠友,刘元雪,陈小亮,等.隧道火灾研究现状与展望[J].地下空间与工程学报,2010,6(增2): 1755-1760.(Li Zhongyou, Liu Yuanxue, Cheng Xiaoliang, et al. Review of research on traffic tunnel fire safety [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(Supp.2): 1755-1760(in Chinese))

[10] 中华人民共和国交通部.公路隧道设计规范(JTG D70-2004) [S].北京:人民交通出版社,2004.(Ministry of Communications of the People's Republic of China. Code for design of road tunnel (JTG D70-2004) [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))