

超大直径盾构衬砌及止水带防火特性研究

拓勇飞¹, 舒 恒¹, 郭小红¹, 张亚果², 丁文其³

(1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 中交南京纬三路过江通道工程建设指挥部, 江苏 南京 211800;
3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 南京纬三路过江隧道处于高水压、软弱地层等情况下, 火灾可能导致隧道衬砌及密封防水失效, 使得隧道发生渗漏、涌水, 对隧道造成毁灭性的灾害。采用有限元数值方法, 对施工条件下、正常运营条件下无防护措施和有防护措施 3 种情况的衬砌管片进行火灾数值模拟。分析结果表明: 施工状态下, 止水带附近的温度在 60℃ 以下, 止水带处于安全状态; 运营条件下, 当无防火措施发生 2 h 火灾时, 内侧止水带附近的最高温度接近 300℃, 止水带会被烧焦破坏; 当有 30 mm 防火板保护发生 2 h 火灾时, 止水带的最高温度保持在 100℃ 之内, 止水带安全。计算结果还表明, 20 mm 厚的防火板材在 1 h 的较大火灾的情况下能够保证结构的安全和止水带的安全, 而 30 mm 厚的防火板能够在 2 h 的较大火情下保证结构的安全和止水带的安全。

关键词: 防火特性; 盾构隧道; 衬砌; 止水带

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2013)S1 - 0269 - 06

作者简介: 拓勇飞(1976 -), 男, 陕西子洲人, 高级工程师, 主要从事隧道与地下工程等方面的设计与研究工作。E-mail: tuoyongfei@163.com。

Fireproof characteristics of lining and waterproof of shield tunnel with super-large diameter

TUO Yong-fei¹, SHU Heng¹, GUO Xiao-hong¹, ZHANG Ya-guo², DING Wen-qi³

(1. CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430056, China; 2. CCCC Nanjing Weisan Rd. River-crossing Tunnel

Construction Headquarters, Nanjing 211800, China; 3. Geotechnical Engineering Department, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The Weisan Road Yangtze River tunnel of Nanjing is under high water pressure and passes through weak stratum. Fire may cause the failure of lining and the waterproof, resulting in tunnel leakage and water gushing, and it may cause destructive disasters of the tunnel. Based on the FEM analysis, segments under fire and different conditions are simulated, including construction stage, normal operation condition without protective measures and normal operation conditions with protective measures. The analysis shows that, at construction stage, the temperature near the waterproof is below 60 °C, and the waterproof is in a safe state. Under operating conditions without fire prevention measures, after fire of 2 h, the maximum temperature near the internal waterproof is close to 300 °C, and the waterproof will be burned. Under the protection of 30 mm-fireproof board, after fire of 2 h, the maximum temperature of the waterproof can be controlled below 100 °C, ensuring the safety of the waterproof. The 20 mm-fireproof board can ensure the structural safety and the waterproof safety for 1 h under larger fire case, and 30 mm-fireproof board can ensure the safety for 2 h.

Key words: fireproof characteristic; shield tunnel; lining; waterproof

0 引 言

随着国民经济的迅速发展, 各地区联系更加紧密, 对交通通行能力的要求不断提高, 越来越多的隧道工程建成投入使用, 其中包括大量的水下隧道。由于隧道结构空间狭小封闭, 一旦发生火灾, 不但会造成大量的人员伤亡, 还会导致巨大的社会影响和经济损失。水下隧道具有地下空间的特殊性^[1], 与外界连接通道少, 灾突发生时浓烟聚集不散, 安全疏散困难, 其潜

在的危险远高于一般地下隧道, 火灾造成的损失也将大大地高于一般地下隧道。

隧道在施工过程中和运营期间均有发生火灾的可能性。隧道在施工中, 由于施工不当造成的火灾事故时有发生, 如 2005 年上海市地铁某标段盾构隧道在施工时由于工人操作失误引起火灾, 火灾持续了约 10

min, 火源起向下风侧约 260 m, 向上风侧约 170 m 隧道衬砌管片表面被熏黑, 造成约 15 m 范围内混凝土管片受到轻度到中度损伤, 损伤层厚度最大达 25 mm。从世界范围内来看, 隧道在运营时火灾事故也时有发生, 例如 1999 年法国—意大利间勃郎峰公路隧道火灾持续了 53 h, 大火导致 39 人死亡, 13 辆汽车烧毁, 造成了巨大的经济损失和社会影响。

火灾会对衬砌结构造成损伤, 降低衬砌结构承载力, 威胁隧道的安全运营, 甚至会因爆裂引起衬砌截面厚度减少而造成隧道垮塌^[2]。对于处于高水压、软弱地层等情况下的盾构隧道, 火灾还可能导致隧道密封及防水失效, 使得隧道发生渗漏、涌水, 对隧道造成毁灭性的灾害^[3]。南京市纬三路过江通道是南京城市快速路系统跨江成网的最重要通道之一。隧道穿越的地层主要为第四系冲淤积松散粉细砂、粉砂以及风化粉砂岩(破碎), 局部为黏土、淤泥质黏土地层。隧道最大覆土厚度约 51 m, 江中段隧道拱顶以上最大水深约 58 m, 最大水压达到 0.72 MPa, 为国内承受水压力最大的盾构隧道^[4]。因此, 研究盾构衬砌及防水密封垫在火灾高温下的力学特性对于深刻认识高水压下大直径盾构隧道衬砌的耐火安全性并提高其防火能力具有重要的意义。

1 隧道火灾场景

火灾场景与隧道内的温度分布是对应的, 不同的火灾场景对应不同的温度分布形式^[5], 选择合适的火灾场景对隧道防火研究至关重要。南京纬三路隧道项目为装配式盾构过江隧道, 火灾场景的确定与隧道的实际工况有着直接的联系, 隧道结构的状态以及火灾火源形式的不同造成的火灾情况及隧道的损害情况都有很大的不同, 在纬三路项目中, 可将隧道的火灾情况分为施工过程中起火和运营过程中起火两种情况。

(1) 施工中火灾场景

纬三路过江隧道外半径为 7.25 m, 内半径为 6.65 m, 管片厚度为 0.6 m, 属于大直径装配式盾构隧道, 隧道的接缝较多^[4]。在隧道施工期间引起的火灾事故, 大多由电器设备故障引起, 与交通事故等引起的火灾相比, 火源温度较低, 火情较小, 波及的范围较小。由于隧道处于施工状态, 隧道防火板等防火措施未能安装就绪, 隧道接缝、连接螺栓等薄弱环节裸露在高温环境下, 因此, 施工期间的火灾可能对隧道衬砌结构造成相当严重的损伤。

本文拟定施工期间的火灾场景为, 隧道的管片拼装完成, 螺栓安装就位, 内部结构和设施尚未开始安

装施工, 施工时由于电器故障导致施工隧道内起火, 引起火灾事故。火源点位于隧道截面中部, 引起的隧道表面最高温度为 700℃, 火灾的持续时间为 30 min。

(2) 隧道正常运营时的火灾情况

对世界范围内的隧道火灾事故统计发现, 严重的火灾事故基本上都是由大型货车的燃烧引起, 大量的货物燃烧使得隧道内的温度瞬间升高, 由于阻塞可能引起连串的交通事故, 引起其他车辆的起火燃烧, 不仅使得隧道内的温度骤然增高, 还使得火灾的扑救工作异常艰难, 使火灾在隧道内的持续时间较长。

本文拟定隧道运营时的火灾场景为, 火灾由重型货车的交通事故引起, 车辆和货物同时起火, 火势迅速蔓延, 隧道内温度在 5 min 内升高到 1200℃, 火灾的最高温度在 1200℃左右, 持续时间为 2 h。

2 计算参数的选取

目前关于隧道火情的模拟方法主要有两种, 热释放率描述方法和温升曲线描述方法。热释放率的描述方法主要的计算手段为计算流体力学, 分析的主要问题为结构内部的烟气流动规律和隧道内部的温度分布情况等; 对于衬砌结构内部的温度场分布计算, 主要通过温升曲线的描述方法来进行模拟, 温升曲线的方法通过设定其表面的温度随时间的变化规律曲线来进行模拟分析。

图 1 中给出了目前应用较多的标准火灾曲线, 其中一些曲线已经在一些国家和地区作为标准应用。

标准火灾曲线存在着很多的不足, 比如火灾持续时间固定, 火灾温度固定, 对于规模较小的火灾没有相应的曲线进行描述等等。为了克服标准升温曲线的不足, 提出了基准火灾曲线的概念^[5], 并给出了相应的公式:

$$T_{st} = T_0 + A(1 - 0.325e^{-\alpha t} - 0.675e^{-\beta t}) \quad (1)$$

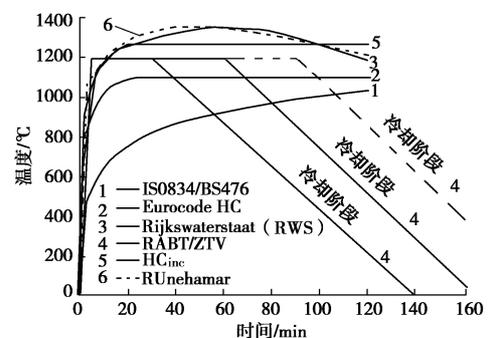


图 1 隧道火灾标准升温曲线

Fig. 1 Standard curves of fire in tunnel

衬砌混凝土的导热系数很低, 隧道衬砌结构导热性能差, 温度传递慢, 因此对于衬砌结构来说, 影响其

温度场分布规律的主要因素为火灾的最高温度和最高温度的持续时间。

根据前面设定的火灾场景和工况, 不同的火灾工况下需要用到的火灾曲线如下。

(1) 施工阶段起火

施工阶段起火, 火灾的持续时间设定为 30 min, 火灾的最高温度设定为 700°C, 因此相应的隧道火灾基准曲线如图 2 所示。

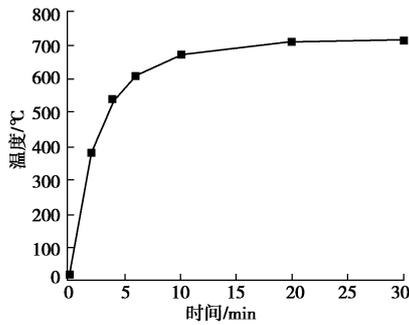


图 2 施工阶段火灾升温曲线

Fig. 2 Temperature curve in construction stage

(2) 运营阶段起火

运营阶段的火灾情况可以利用已经有的火灾曲线进行描述, 采用两种世界上应用较多的火灾曲线进行分析:

a) HC 曲线起初用于石化工程和海洋工程, 后被应用到隧道工程中。HC 曲线用来描述发生小型石油火灾 (如汽油箱, 汽油罐以及某些化学品运输罐) 的燃烧特征。HC_{inc} 曲线用于模拟比较严重的火灾情况, 在 HC 曲线的基础上, 乘以系数 (1300/1100) 得到。HC 曲线的表达式为:

$$T=20+1080(1-0.325e^{-0.167t}-0.675e^{-2.5t}) \quad (2)$$

b) RABT 曲线模拟一场简单的卡车火灾升温状况, 但针对一些特殊的火灾类型, 最高温度的持续时间也可延长到 60 min 或更长, 然后冷却 110 min。

c) RWS 曲线主要用于模拟油罐车在隧道中燃烧的情况, 油罐车火灾具有热释放率大, 升温速度快的特点, 该曲线可以较好地模拟油罐车火灾的这些特点, 同时曲线还考虑了当油料减少最高温度逐渐下降的降温过程。

(3) 计算用火灾曲线

计算中针对 3 种不同的工况所采用的曲线如图 3 所示。

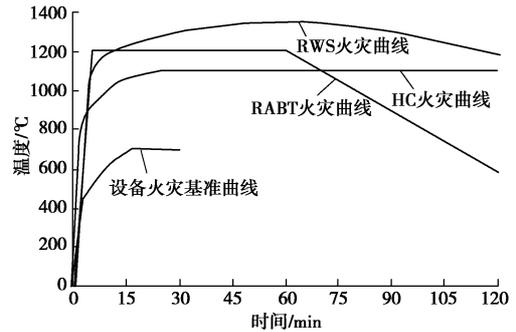


图 3 计算分析所采用升温曲线

Fig. 3 Temperature curves adopted in analysis

衬砌混凝土的比热容:

$$C_c = 900 + 80\left(\frac{T}{120}\right) - 4\left(\frac{T}{120}\right)^2 \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad (4)$$

丁晴橡胶密封条的导热系数为 0.256 W/(m·K), 比热为 1700 J/(kg·K), 密度为 1240 kg/m³。

石纤维棉防火板的导热系数 1000°C 为 0.226 W/(m·K), 1300°C 为 0.336 W/(m·K), 比热为 1240 J/(kg·K), 密度为 100 kg/m³。

隧道地层热物理参数如表 1 所示。

表 1 地层热物理参数

Table 1 Thermal parameters of soils

土(岩)层	名称	传热系数 (W·m ⁻² ·K ⁻¹)	比热容 (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度 (kg·m ⁻³)	泊松比
② ₂	淤泥质粉质黏土	1.41	1840	1820	0.30
② ₃	粉砂	1.41	1840	1920	0.30
③ ₁	粉质黏土夹粉砂	1.03	1760	1840	0.25
④ ₁	粉细砂	0.59	1510	1930	0.25

3.2 衬砌及地层力学参数

衬砌管片混凝土等级为 C60, 重度取为 25 kN/m³, 泊松比取 0.167, 常温下弹性模量 E=3.6×10⁷ kPa。火灾高温下弹性模量和热膨胀系数的劣化规律根据下式确定:

弹性模量

$$\begin{cases} E(T)/E = 0.83 - 1.1 \times 10^{-3} T & (60^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C}) \\ E(T)/E = 0.06 & (700^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}); \end{cases} \quad (5)$$

热膨胀系数

$$\alpha_c = 6^{-6} + 4.92 \cdot 9 T \quad (6)$$

隧道地层工程地质参数如表 2 所示。

3 材料参数

3.1 衬砌及地层热物理参数

衬砌混凝土的传热系数:

$$\lambda_c = 1.16(1.4 - 1.5 \times 10^{-3} T + 6 \times 10^{-7} T^2) \quad (3)$$

4 计算模型

4.1 瞬态热传导边界条件

瞬态传热的边界条件包括衬砌内表面的对流换热边界条件和初始温度边界条件。火灾热烟气与衬砌混

凝土间的对流换热系数按照下式计算：

$$h_r = 7.051 \times e^{(T/372.56)} + 0.842 \quad (7)$$

表2 地层工程地质参数

Table 2 Mechanical parameters of soils

土(岩)层	名称	c	φ	弹模 /MPa	重度 /(kN·m ⁻³)	泊松比
② ₂	淤泥质粉质黏土	19.1	2.62	12	18.2	0.30
② ₃	粉砂	—	—	36	19.2	0.30
③ ₁	粉质黏土夹粉砂	25.5	4.65	30	18.4	0.25
④ ₁	粉细砂	21.0	4.72	30	19.3	0.25

4.2 衬砌结构温度边界条件及计算模型

纬三路隧道为上下双层隧道，上层隧道发生火灾时，受高温影响最为严重的区域为衬砌环顶部，下层隧道发生火灾时候，由于四周都有保护，对衬砌环造成的影响较小，因此在分析的时候，温度场的加载范围只针对上层隧道顶部区域。

温度场计算的有限元模型如图4所示，由于温度在衬砌中只是沿着径向传递，向衬砌环两边传递较少，且温度计算与隧道的内部情况无关，因此将温度场计算模型进行简化，得到了如图4所示的衬砌结构温度场计算模型。

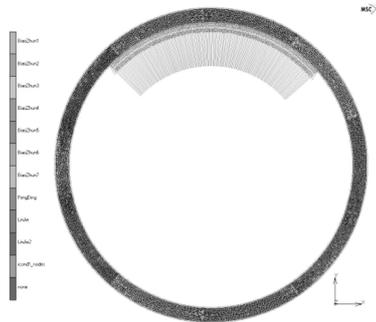


图4 有限元计算模型

Fig. 4 FEM model

为了分析衬砌结构在不同情况下的火灾安全，将衬砌结构的有限元计算分为3种情况展开。分析衬砌结构内侧止水带的安全所用到的计算工况如表3所示。

表3 计算工况表

Table 3 FEM analysis cases

工况	曲线	持续时间	防火措施
1 施工时	火灾基准曲线	无	无防火措施
2 运营时防火失效	HC, RABT	120 min	有防火措施(防火措施失效)
3 运营时防火有效	HC, RABT	120 min	有防火措施(防火措施有效)

考虑衬砌结构自身的安全以及所用得到防火材料安全等因素，采用HC曲线2h的工况进行计算，选取无保护状态，20mm厚度防火板，30mm厚度防火板进行分析计算。

隧道各部分的材料都有一定的使用温度限制，常见的隧道材料的极限使用温度如表4所示。

表4 隧道材料的极限使用温度

Table 4 Ultimate temperature of tunnel materials

材料类型	使用部位	极限温度/°C
混凝土	衬砌主体、接头部位	250~380
钢材	衬砌主体、接头部位	250~350
橡胶	接头部位	70~100

5 计算结果分析

5.1 止水带附近的温度

对于火灾情况下温度场的分布主要针对隧道管片接头，过高的温度会将止水带烧坏失效，因此对接头部分的温度场分布分析为温度场分析的主要方向。温度场的分布计算分为无防火措施条件下失火情况和有防火措施条件失火情况。3种不同工况下的止水带附近的温度分布情况如图5所示。

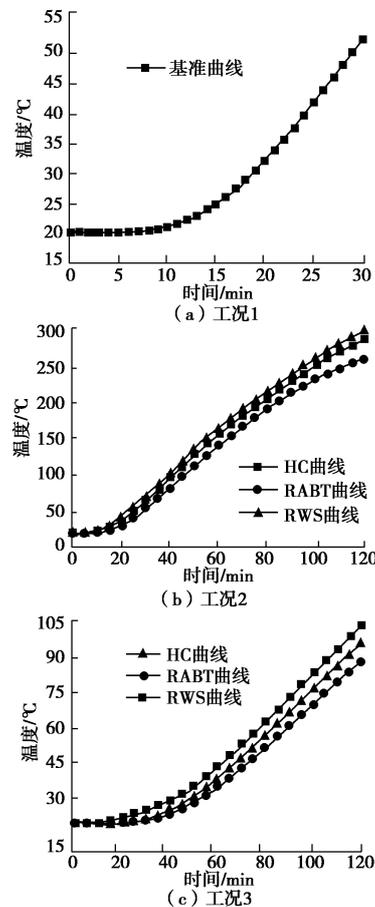


图5 温度随时间变化情况

Fig. 5 Variation of temperature with time

从图 5 中可以看出, 施工状态的火灾场景比较简单, 火灾场景为设备火灾, 且在很短的时间内火情能够得到控制, 设定的最高温度只有 700℃, 且火灾的持续时间比较短。在这种情况下, 止水带附近的温度在 60℃ 以下, 在 30 min 的最终状态下内侧止水带的温度始终保持在安全范围之内。

运营期间, 当无防火措施时, 2 h 的火灾情况下, 内侧止水带附近的最高温度接近 300℃ (图 5 (b)), 远高于止水带橡胶材料的极限使用温度, 止水带会烧焦破坏。3 种不同的温度曲线计算结果相近, 表明了止水带若无防护, 则会在高温下破坏。

工况 3 假设采用 30 mm 厚的防火板, 止水带的最高温度能够在 2 h 的火灾下保持在 100℃ 之内 (图 5 (c)), 能够保证止水带的安全。

5.2 温度场沿衬砌截面的分布

主要分析了在运营条件下, 无防火措施或者防火措施失效的情况下发生火灾的情况和有防火措施的情况下发生火灾的情况。无防火板等防火措施或者防火措施失效的情况下, 接缝处沿管片厚度方向的温度分布曲线如图 6 所示。

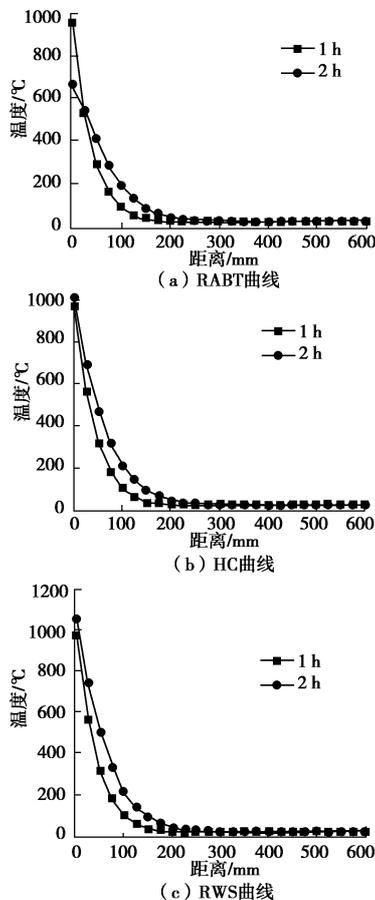


图 6 温度沿衬砌截面分布 (工况 2)

Fig. 6 Distribution of temperature along thickness (Case 2)

从图 6 可以看出, 当无防火保护时, 衬砌结构表面的温度达到 1000℃ 左右, 远高于衬砌混凝土的正常使用温度, 衬砌混凝土会发生爆裂, 造成衬砌结构的损伤破坏, 进而使内侧的止水带距离火源点更近, 造成防水结构破坏。

有防火措施条件下失火, 计算得到最终状态 (即火灾持续 2 h 时刻) 时接缝处沿管片厚度方向的温度分布曲线如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 防火板附近的温度达到 1000℃ 左右, 经过了防火板的防护隔热, 板后面的混凝土衬砌温度得到了有效的降低, 与防火板接触的混凝土温度约 350℃, 管片内温度分布沿着厚度方向衰减很快, 在距离衬砌表面 100 mm 处温度已经衰减到低于 100℃, 混凝土保持在使用极限温度范围之内。

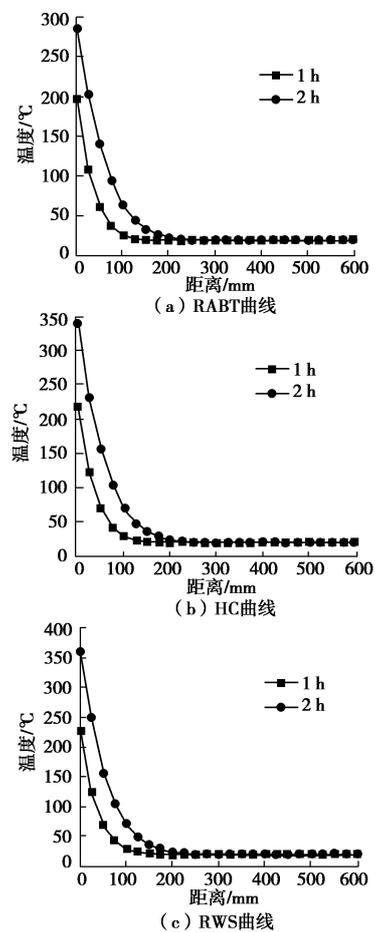


图 7 温度沿衬砌截面分布 (工况 3)

Fig. 7 Distribution of temperature along thickness (Case 3)

5.3 不同厚度保护措施的温度分布

考虑三种不同的防火措施来对衬砌结构的温度场分布进行分析, 即考虑无防火措施、有 20 mm 厚防火板和有 30 mm 厚防火板 3 种工况。计算采用 HC 升温曲线, 计算时间为 2 h, 计算结果如图 8 所示。

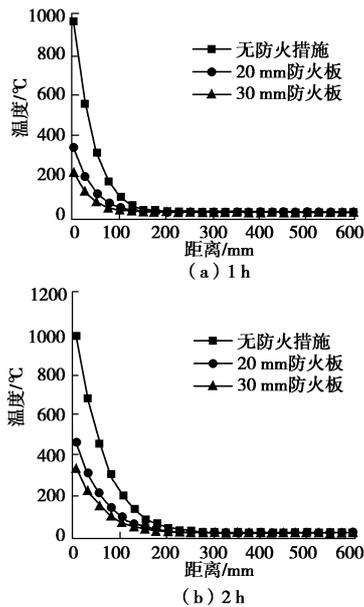


图8 不同时刻温度沿衬砌截面分布

Fig. 8 Distribution of temperature along thickness at different time

从图8可以看出,采用了防火板防火措施后的温度分布和不采用任何防火措施的温度分布有着很大的差异。安装有防火板等防火材料能够使得衬砌表面的温度显著降低,且温度随着防火板材的厚度增大而减小。计算中采用了20 mm和30 mm厚的防火板,从计算结果来看,20 mm厚的防火板材在1 h的较大火灾的情况下能够保证结构的安全和止水带的安全,30 mm厚的防火板能够在2 h的较大火情下保证结构的安全和止水带的安全。

6 结 语

通过有限元数值模拟,对施工条件下,正常运营条件下无防护措施和有防护措施3种情况下盾构衬砌管片进行了火灾模拟。分析结果表明,施工状态下火灾的持续时间比较短,止水带附近的温度在60°C以下,内侧止水带的温度始终保持在安全范围之内。运营条件下,当无防火措施时,2 h的火灾情况下,内侧止水带附近的最高温度接近300°C,远高于止水带橡

胶材料的极限使用温度,止水带会烧焦破坏。在30 mm的防火板保护下,止水带的最高温度能够在2 h的火灾下保持在100°C之内,能够保证止水带的安全。计算结果表明,20 mm厚的防火板材在1 h的较大火灾的情况下能够保证结构的安全和止水带的安全,30 mm厚的防火板能够在2 h的较大火情下保证结构的安全和止水带的安全。

参考文献:

- [1] 王松林, 王 婷. 广深港高速铁路狮子洋隧道消防设计[J]. 铁道标准设计, 2012(11): 79 - 84. (WANG Song-lin, WANG Ting. Fire protection design of Shiziyang Tunnel of Guangzhou-Shenzhen-Hongkong High-speed Railway[J]. Railway Standard Design, 2012(11): 79 - 84. (in Chinese))
- [2] 朱合华, 沈 奕, 闫治国. 火灾下大直径盾构隧道结构力学特性有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(增刊1): 1609 - 1614. (ZHU He-hua, SHEN Yi, YAN Zhi-guo. Finite element analysis on mechanical properties of linings of large diameter shield tunnels under fire cases[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(S1): 1609 - 1614. (in Chinese))
- [3] LÖNNERMARK A, INGASON H. Gas temperature in heavy goods vehicle fires in tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2005, 40: 506 - 527.
- [4] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 管片接缝防水可靠性试验及数值分析研究[R]. 武汉, 2012. (CCCC Second Highway Consultants Co Ltd. Test and numerical study on waterproof reliability of shield segments[R]. Wuhan, 2012. (in Chinese))
- [5] 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 Zhi-guo. A study on mechanical behaviors and fireproof methods of tunnel lining structure during and after fire scenarios[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))

(本文责编 明经平)