

火灾时隧道衬砌结构内温度场分布规律试验

闫治国^{1,2}, 朱合华^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 借助火灾试验, 对衬砌结构内温度场随时间的变化规律、温度场沿厚度的分布规律以及不同边界条件对温度场的影响进行了研究. 试验中, 衬砌结构混凝土等级为 C50, 升温曲线采用 HC 曲线, 升温及恒温持续时间约 60 min. 试验结果表明衬砌结构内各点的升温曲线在 100~115 °C 附近会出现一个明显的恒温平台, 且距受火面越远, 温度平台出现的时间越晚, 持续的时间越长, 这反映了混凝土内水分的蒸发吸热过程. 在试验升温、恒温及降温全过程中, 衬砌结构内温度场沿厚度方向的分布满足指数衰减规律. 同时, 相对裸露于大气中的结构, 由于周围岩土体的吸热, 衬砌结构中各点的温度要偏低, 且越靠近边界, 偏低量越大.

关键词: 隧道; 火灾; 衬砌结构; 温度分布

中图分类号: U459.2

文献标识码: A

Experimental Study on Temperature Field Distribution of Tunnel Lining Structure in Fire Accidents

YAN Zhiguo^{1,2}, ZHU Hehua^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: An experimental study was made of the temperature field distributions of tunnel lining structure under high temperature. The content of research includes variation of temperature of lining structure with time, temperature field distribution along thickness of lining structure and effect of boundary condition on temperature field distribution. HC curve with about 60 min period of duration of heating and testing lining segments casted by C50 concrete are employed in the experiments. The results indicate that due to water evaporation of concrete, temperature of lining structure stops increasing when its temperature reaches to 100~115 °C.

With the increase of distance from the heating face of the lining structure, the phenomenon of stopping increasing temperature occurs later and the period of duration increases. Furthermore, the temperature field distribution along the thickness of lining structure can be described by exponential decay curve. Finally, due to heat absorption by surrounding soil the temperature of lining structure is lower than the ones exposed to atmosphere, and the closer to the boundary, the larger the difference.

Key words: tunnel; fire; lining structure; temperature distribution

土建交通隧道在穿越障碍、解决城市交通压力、节约城市用地、加强城市防护等方面发挥了重要的作用. 但是, 在给人们生产、生活带来便利, 并越来越多被使用的同时, 也成为主要灾害的火灾频繁发生之地. 典型的案例如 1999 年法国—意大利间的勃朗峰公路隧道火灾^[1], 1999 年奥地利托恩公路隧道火灾^[2]以及 2002 年中国猫狸岭公路隧道火灾等. 另据统计, 自 1991—2001 年, 上海延安东路隧道共发生火灾 4 起; 自 1977—2002 年, 上海打浦路隧道共发生火灾 18 起^[3]. 火灾除了对隧道内的人员、设备造成巨大损害外, 还对隧道衬砌结构产生了不同程度的损伤, 严重降低了衬砌结构的安全性. 如 1996 年英法海峡隧道火灾中, 隧道内约 46 m 范围的衬砌结构遭到完全破坏, 损害最严重的地方, 原有 45 cm 厚的衬砌管片, 只剩下了 4 cm 厚^[4-5], 幸亏火损部位处于完整和不透水的岩层中, 如处于软弱地层则后果不堪设想.

当隧道内发生火灾时, 由于空间的限制, 产生的热量不易散发^[6]. 大量的热量将通过热辐射及热对流的方式传递到衬砌结构上, 然后通过热传导的方

收稿日期: 2010-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(50808137); “十一五”国家科技支撑计划(2006BAJ27B05)

作者简介: 闫治国(1977—), 男, 讲师, 硕士生导师, 工学博士, 主要从事隧道及地下空间防灾研究. E-mail: yanzguo@tongji.edu.cn

通讯作者: 朱合华(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要从事隧道及地下空间理论与应用研究.

E-mail: zhuhehua@tongji.edu.cn

式在衬砌内传递,使得衬砌结构内的温度不断升高,材料力学性能不断劣化,进而降低隧道衬砌结构体系的承载力和可靠性。由于衬砌结构内的温度场分布决定了衬砌结构高温时以及高温后的力学行为和损伤程度,因此,分析火灾时隧道衬砌结构内的温度场分布是一项基础工作。此外,与其他建筑类型火灾相比,隧道火灾具有升温速度快(最高可达到 $250\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)、最高温度高(最高温度可达到 $1\ 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 甚至更高)^[7-8] 和持续时间长的特点以及隧道衬砌结构热边界的特殊性(单面受火,另一面与岩土体接触),因而,分析研究隧道衬砌结构内的温度场分布规律也是掌握衬砌结构高温力学行为与火灾损伤的基础和前提。

本文借助火灾试验,对衬砌结构内温度场的时空变化规律进行了研究。

1 试验概况

1.1 试件形式及尺寸

试验采用的衬砌管片参照目前地铁盾构隧道中常用的管片形式设计。尺寸上,依据试验升温设备的尺寸要求,试验衬砌管片选为实际管片的 $1/3$,宽 30 cm ,厚 12 cm ,外弧半径 105 cm 。细节构造上,试验衬砌管片设置了手孔、纵向及环向凸凹榫。衬砌管片形式及尺寸详见图 1 和图 2。

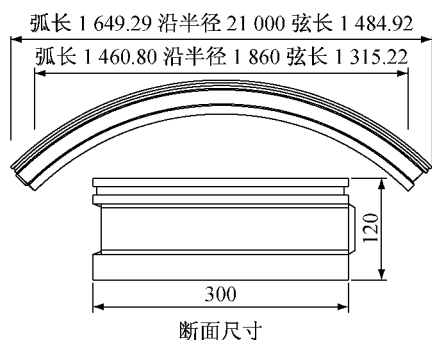


图 1 衬砌管片形式及尺寸(单位:mm)

Fig.1 Shape and dimension of the lining segment



图 2 浇筑养护完成后的衬砌管片

Fig.2 Lining segment after maintenance

衬砌管片采用与实际盾构隧道管片相同的混凝土浇筑。混凝土等级为 C50,抗渗等级 P10,塌落度 $50\pm 10\text{ cm}$ 。为保证试验衬砌管片的制作质量,钢模制作、混凝土配合比设计、混凝土搅拌、管片浇筑及养护均由专业盾构管片生产单位生产,同时,在生产中同批管片采用同批搅拌的混凝土、同样条件进行成型和养护。

1.2 测点布置

如图 3 所示,为了获得衬砌管片内温度场的时空变化规律,在衬砌管片内距受火面 20 mm 、 60 mm 及 110 mm 三个不同厚度位置布置了温度测点。其中,受火面处为了避免热辐射及测点处管片表面可能的混凝土爆裂、开裂等对测试结果准确性的影响,故将测点布置于管片内距受火面 20 mm 的位置。同时,为避免各测点间的相互影响,在管片宽度方向上,测点按 25 mm 的间距布置。此外,为了得到管片背火面侧管片—岩土体边界处的温度变化规律,在管片背火面边界处(距受火面 120 mm)布置了 1 个温度测点。管片内温度采用筒装 K 型热电偶测量。热电偶的安装方法为:升温前,在管片预定位置钻直径约 5 mm 的细孔(孔深根据测点布置位置确定);清孔后,在孔底注入少量导热性能良好的铝粉,以使热电偶端部与混凝土间具有良好的热接触;放入热电偶后在孔中填充水泥浆。

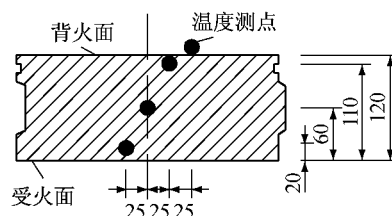


图 3 衬砌管片内温度测点布置(单位:mm)

Fig.3 Layout of temperature measuring points within lining segment

1.3 火灾工况及边界条件

本文的研究重点是火灾时衬砌管片内温度场的时空变化规律,为避免试验中衬砌管片因发生严重的爆裂、剥落、开裂等损伤而导致试验无法获得完整数据,在前期预试验的基础上,试验基准升温曲线采用 HC 曲线(恒温阶段最高温度为 $1\ 100\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[9-10],该曲线是国际上通用的标准升温曲线之一,可用于模拟一般的隧道火灾(火灾规模为 $5\sim 10\text{ MW}$,火灾持续时间为 $30\sim 60\text{ min}$)^[11]。试验中,升温方法为:依照 HC 升温曲线,炉内温度快速升高到 $1\ 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,并保持该温度直至距点火时刻总耗时达到约 60 min 。

之后,考虑到实际火灾存在降温阶段^[12],即停止对衬砌管片加热,并使其逐渐自然冷却降温,以研究降温阶段衬砌结构内温度场的变化规律.此外,为了对比,试验同时进行了恒温阶段最高温度为 650 °C 的工况:即炉内温度快速升高到 650 °C,之后恒温一段时间后停止加热,具体方法与前述恒温阶段最高温度为 1 100 °C 时相同.

试验升温设备采用同济大学自主研发的隧道衬砌构件高温力学性能试验系统(发明专利号:ZL2006 1 0030454. 9)见图 4. 该试验系统采用工业级燃烧器和程序自动控制升温,能够达到的最高温度为 1 200 °C,最大升温速度约为 250 °C · min⁻¹,同时,可以预设不同的温度-时间曲线,能够较好的模拟隧道火灾升温速度快、达到的最高温度高的特点^[13].

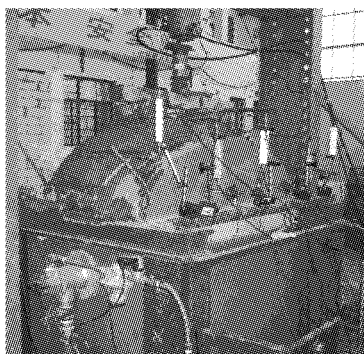


图4 隧道衬砌构件高温力学性能试验系统

Fig.4 Testing system of mechanical behaviors of segments under high temperature

考虑到隧道衬砌结构与地面建筑结构相比,显著特点是周围有岩土体包裹,且火灾时为单面受火.为模拟这种热边界条件,试验中对衬砌管片内侧采用单面均匀升温,同时在管片外侧施加了约 20 cm 厚的覆土以模拟管片和岩土介质间的热接触情况,土体采用上海地区典型饱和软粘土,如图 5 所示.

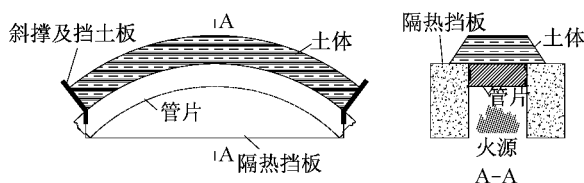


图5 衬砌管片边界条件

Fig.5 Thermal boundary condition of lining segment

2 试验结果与分析

2.1 衬砌内温度随时间的变化规律

如图 6 和图 7 所示,点火后炉内温度迅速升高,并在较短的时间内达到预定的最高温度,而衬砌管片内的温度升高滞后且低于炉内的温度(随着时间推移,两者温差逐渐减小).这是由于混凝土为热惰性材料,热容大、导热系数小,热量在混凝土内部的传导较为缓慢.如图 6 所示,炉内最高温度为 650 °C 的工况下,持续 45 min 后,管片内部距受火面 2 cm 处的混凝土最高温度仍只有 250 °C 左右.而炉内最高温度为 1 100 °C 的工况下,持续 60 min 后,管片内相同位置混凝土的最高温度只有 400 °C 左右.从这一点讲,混凝土结构是有利于耐火的.但是,正是这种不良的热传导性也加剧了衬砌结构截面上温度场分布的不均匀性,导致产生可观的不均匀温度应力,致使衬砌结构内力状态发生变化,并削弱结构自身及相邻衬砌管片的安全性.

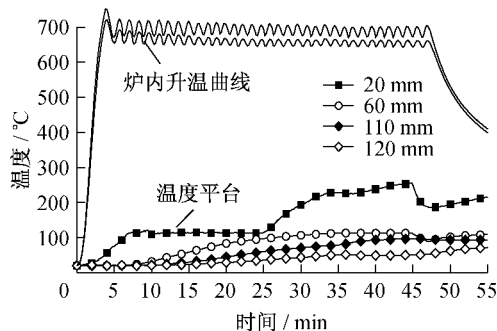


图6 衬砌管片内距受火面不同厚度处温度随时间的变化规律(炉内最高温度 650 °C)

Fig.6 Temperature-time curves of lining segment in different positions from heating surface (the maximum temperature within the furnace is 650 °C)

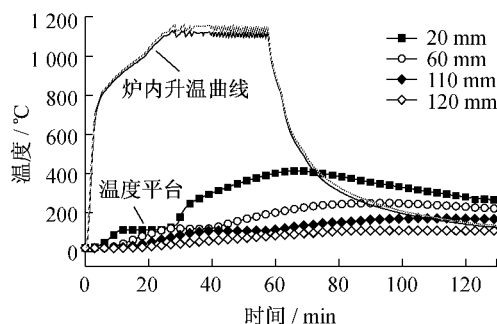


图7 衬砌管片内距受火面不同厚度处温度随时间的变化规律(炉内最高温度 1 100 °C)

Fig.7 Temperature-time curves of lining segment in different positions from heating surface (the maximum temperature within the furnace is 1 100 °C)

此外,炉内温度经历了快速升温、恒温及降温的

过程,对应的衬砌结构内各点也经历了升、降温过程,但是两者并不同步,且衬砌结构内的升降温速度要小于炉内的温度变化速度.值得注意的是,当停止加热(对应于图 6 和图 7 中炉内升温曲线发生陡降的位置),炉内温度开始逐渐降低时,衬砌结构内的温度并不同步降低,而是仍缓慢的增加,直到达到最高温度,然后才缓慢的下降.且离受火面的距离越远,达到最高温度的时间越晚,开始降温的时间也越晚.这是由于衬砌结构内温度分布不均匀,再加上混凝土为热惰性材料,当停止加热后,靠近受火面相对高温的混凝土仍会不断将热量传递给远离受火面的温度相对较低的混凝土,使得其温度不断升高,直到两者温差为零.

2.2 温度平台

如图 6 和图 7 所示,当衬砌结构内的温度达到 $100\sim 115\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,温度停止升高,温度—时间曲线上出现一个明显的平台,且距离受火面越远,温度平台出现的时间越晚,温度平台持续的时间越长.这主要是由于当衬砌结构内的温度达到 $100\sim 115\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,衬砌结构内的水分开始蒸发,由于水分蒸发吸收了外界传来的热量,使得温度停止升高,直到水分蒸发完毕时,吸收的热量才使得衬砌结构的温度继续升高.而之所以离受火面越远,温度平台越长,是由于当衬砌结构表面的温度首先升高到 $100\sim 115\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时后,衬砌结构表面附件的水分一部分以蒸汽的形式外逸,另一部分则向远离受火面的区域迁移,使得远离受火面区域内的水分增加,使得蒸发水分需要的时间相应增加^[14].

温度平台的存在,明显改变了衬砌结构内的温度分布模式,降低了衬砌结构内达到的最高温度,延缓了达到混凝土临界温度的时间.从这一点上讲,如果能够避免衬砌混凝土的爆裂(衬砌混凝土的高含水量虽能产生温度平台,却加剧了混凝土发生高温爆裂的可能性),则衬砌结构的耐火能力与上部结构相比,显得更为优越.

2.3 温度场沿衬砌管片厚度方向的分布规律

图 8 给出了升温、降温全过程中,温度场沿衬砌管片厚度方向的分布规律.可以看到,随着离受火面距离的增大,温度逐渐降低,且温度降低的梯度逐渐减小.在升温初期,衬砌结构温度影响范围小,受火面侧测点(距受火面 20 mm)与背火面侧测点(距受火面 110 mm)的温差较小,见图 9,之后,随着时间的推移,各点温度不断升高,温度的影响范围逐渐扩大,受火面侧与背火面侧的温差也逐渐增大,表明衬

砌结构内温度场的不均匀性趋向严重.

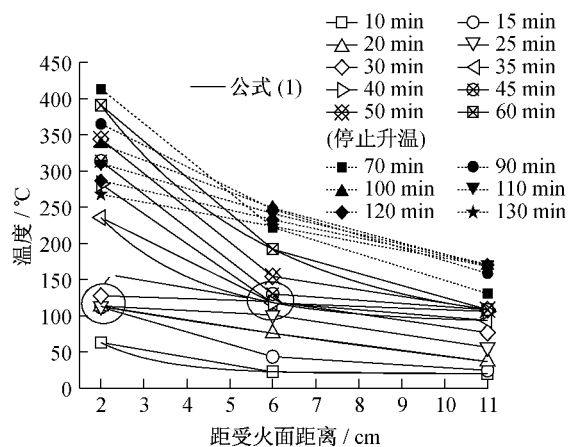


图 8 不同时刻沿衬砌管片厚度方向温度场的分布规律(炉内最高温度 $1\text{ }100\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 8 Temperature distribution along the thickness of lining segment at different times from ignition (the maximum temperature within the furnace is $1\text{ }100\text{ }^{\circ}\text{C}$)

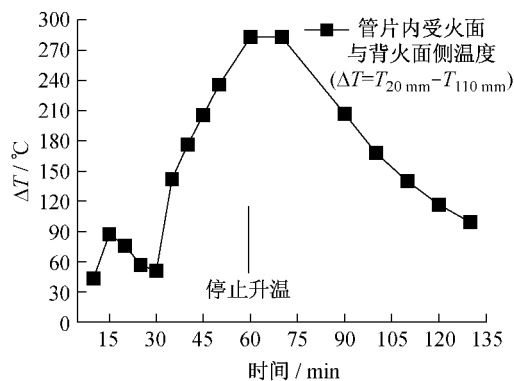


图 9 不同时刻衬砌管片内受火面与背火面侧温差的变化规律(以炉内最高温度 $1\text{ }100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例)

Fig. 9 Temperature difference between position near heating surface and position far away heating surface of lining segment at different times from ignition (the maximum temperature of the furnace is $1\text{ }100\text{ }^{\circ}\text{C}$)

同时,从温度场沿衬砌管片厚度方向的分布规律上也清楚的反映了温度平台的效应,如图 8 中圆圈处所示及图 9 中 $15\sim 30\text{ min}$ 时间段温差出现下降.

通过对试验中不同时刻衬砌结构截面上温度场沿厚度方向的分布曲线的实测值进行拟合,如图 8 所示,可以发现式(1)都能够较好地描述其分布规律.这样,对于任意火灾场景、任意厚度的衬砌结构,只要求得了系数 A_1 、 A_2 、 A_3 ,则可以利用式(1)来方

便地描述截面上连续的温度分布规律.

$$T(x) = A_1 e^{-\frac{x}{A_2}} + A_3$$

式中: x 为距受火面的距离, m; A_1 、 A_2 、 A_3 为与衬砌结构厚度、火灾时间相关的系数, 可通过试验或数值分析的方法确定.

2.4 边界条件对衬砌结构温度场分布的影响

为了探讨边界条件对衬砌结构内温度场分布规律的影响, 在前述试件的基础上, 采用厚 10 cm 的平板试件进行了两种边界条件(管片背火面侧和大气直接接触; 管片背火面侧施加一定厚度的覆土模拟管片和岩土介质的接触情况)下的温度场分布试验.

如图 10 所示, 在同样的升温曲线(HC 曲线)下, 背火面覆盖一定厚度的饱和泥土时, 衬砌管片内各点的温度都低于背火面裸露在空气中的衬砌管片, 且越靠近与岩土体(空气)接触的边界, 两者的差别越大, 如图 11 所示. 此外, 随着升温时间的推移, 两者在任意点的温度差值都有增大的趋势. 而产生这种差别的原因在于潮湿土体的热容量(其中 20 °C 时, 水的热容量为 $4.2 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \text{ K}^{-1}$)远大于空气的热容量(20 °C 时 $1\,000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), 使得衬砌管片由于接触潮湿的土体, 热量被传递吸收, 导致温度不易升高^[15].

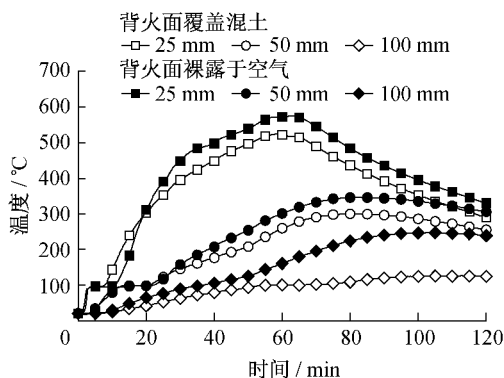


图 10 不同边界条件下衬砌管片内距受火面不同厚度处温度随时间的变化规律(炉内最高温度为 1 100 °C)

Fig. 10 Temperature-time curves of lining segment in different positions from heating surface under different boundary conditions (the maximum temperature within the furnace is 1 100 °C)

3 结论

借助火灾试验, 对火灾高温时隧道衬砌结构内温度场的时空变化规律进行了研究, 有以下主要结论:

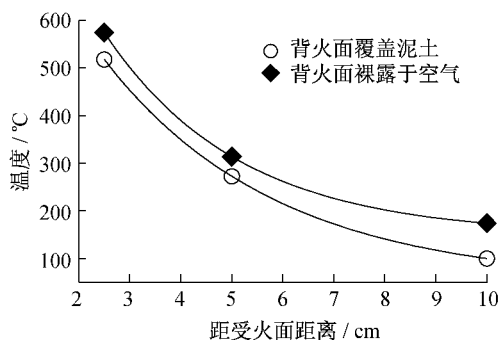


图 11 不同边界条件下沿衬砌管片厚度方向温度场分布规律的对比(炉内最高温度为 1 100 °C)

Fig. 11 Comparison of temperature distribution along the thickness of lining segment under different boundary conditions (the maximum temperature within the furnace is 1 100 °C)

(1) 在温度场随时间的变化规律上, 随着隧道火灾的快速升温、恒温并最终衰减, 衬砌结构内各点的温度也经历了同样的过程, 但两者并不同步, 衬砌结构的升温、降温速率小于前者. 此外, 由于混凝土内水分的蒸发吸热, 衬砌结构的升温曲线在 100 ~ 115 °C 附近会出现一个明显的恒温平台, 且距受火面越远, 温度平台出现的时间越晚, 持续的时间越长.

(2) 在温度场沿衬砌厚度的空间分布规律上, 随着火灾时间的持续, 温度的影响范围逐渐扩大, 受火面侧与背火面侧的温差也逐渐增大, 这表明衬砌结构内温度场的不均匀性在趋向严重. 同时, 在升温、恒温及降温阶段, 衬砌结构沿厚度方向的温度分布规律满足指数衰减规律, 可采用统一的表达式描述.

(3) 热边界条件对衬砌结构内温度场的分布规律具有显著影响. 同样火灾升温情况下, 包裹于岩土体中的衬砌结构各点的温度要低于裸露于空气中的结构, 且越靠近与岩土体(空气)接触的边界, 两者的温度差越大.

基于试验成果, 对于隧道衬砌结构防火设计有以下启示与建议:

(1) 具有特殊热边界(与岩土体及地下水接触)的隧道衬砌结构与常规上部建筑结构间的温度场分布规律是存在差异的, 在分析计算其温度场时, 需考虑周边岩土体的热特性, 特别是在地下水丰富的地区. 此外, 升温过程中“温度平台”现象也需考虑, 否则会导致计算结果偏大.

(2) 目前隧道衬砌结构防火设计的重点是考虑对结构进行隔热保护, 使得在设计耐火时间内, 衬砌

结构表面及钢筋处的温度不至于达到失效温度。然而,试验结果表明火灾时衬砌结构内存在较大的温差,这会导致显著的温度应力,进而对衬砌结构体系的安全性产生不利影响。因此,隧道衬砌结构的防火设计除了要考虑采取隔热措施避免混凝土爆裂和材料高温失效外,同时需要评估不均匀温度场对衬砌结构体系整体力学性能和承载力的影响。

(3) 隧道衬砌结构火灾时的安全性与衬砌结构自身的物理力学性能、初始受载状态、火灾规模大小及所处周围地层条件等因素相关,需综合考虑火灾时衬砌结构混凝土与钢筋的强度及弹性模量降低、爆裂导致的衬砌截面厚度减少以及不均匀温度场导致的衬砌结构体系内力状态的变化等来评估。若仅考虑混凝土和钢筋力学性能的劣化,可以混凝土表面温度不超过 380°C ,距混凝土底面 25 mm 处钢筋的温度不超过 250°C 为判别标准^[16],则在 HC 升温曲线下,试验衬砌管片约在 40 min 时达到失效温度。

值得说明的是,由于试验规模的限制,本文主要是基于小尺寸的衬砌管片试件开展研究,尽管在温度场分布的本质规律和现象上与实际衬砌管片没有差别,得出的温度场分布曲线表达式也可以推广到不同尺寸的实际衬砌结构,但由于小尺寸试件相对不容易发生爆裂,因此,试验中未探讨混凝土爆裂对衬砌管片温度场分布的影响。此外,由于实际隧道火灾是复杂多变的,其温升曲线也是多种多样,本文采用的 HC 标准温升曲线尽管体现了隧道火灾升温速度快、最高温度高的特点,但无法代表所有可能的火灾工况,在今后的研究中需进一步拓展模拟的火灾场景。

参考文献:

- [1] Vuilleumier F, Weatherill A, Crausaz B. Safety aspects of railway and road tunnel: example of the Lötschberg Railway Tunnel and Mont-Blanc Road Tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2002, 17: 153.
- [2] Leitner A. The fire catastrophe in the Tauern Tunnel: experience and conclusions for the Austrian guidelines[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16: 217.
- [3] 王振信. 公路隧道安全问题初探[J]. *地下工程与隧道*, 2003(1): 2.
WANG Zhenxin. Safety analysis of road tunnels[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 2003(1): 2.
- [4] Kirkland C J. The fire in the channel tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2002, 17(2): 129.
- [5] Khoury G A. Effect of fire on concrete and concrete structures[J]. *Progress of Structure Engineering Material*, 2000(2): 429.
- [6] Lönnermark A. On the characteristics of fires in tunnels[D]. Lund: Lund University, 2005.
- [7] Lönnermark A, Ingason H. Gas temperatures in heavy goods vehicle fires in tunnels[J]. *Fire Safety Journal*, 2005, 40: 506.
- [8] RWS/TNO. (GT-98036) Fire protection for tunnels[S]. [S. l.]: TNO, 1998.
- [9] PIARC. Fire and smoke control in road tunnels[R]. Paris: PIARC, 1999.
- [10] Olst D V, Bosch R V D. Behaviour of electrical cables during fire in tunnels[C]//*Proceedings of ITA World Tunnel Congress 2003*, Amsterdam: Balkema Press, 2003. 991-992.
- [11] Both C, Haar P W, Wolsink G M. Evaluation of passive fire protection measures for concrete tunnel linings[R]. Delft: TNO, 2003.
- [12] Wald F, Simoes da Silva L, Moore D B, et al. Experimental behaviour of a steel structure under natural fire[J]. *Fire Safety Journal*, 2006, 41: 509.
- [13] 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: 同济大学土木工程学院, 2007.
YAN Zhiguo. A study on mechanical behaviors and fireproof methods of tunnel lining structure during and after fire scenarios[D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2007.
- [14] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
WU Bo. Mechanical behaviors of reinforced concrete structure after high temperature[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [15] El-Arabi I A, Duddeck H, Ahrens H. Structural analysis for tunnels exposed to fire temperatures[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1992, 7(1): 19.
- [16] ITA. Guidelines for structural fire resistance for road tunnels[R]. [S. l.]: ITA, 2005.