

火灾下隧道管片爆裂温度及温度场的研究^{*}

嵇振礼 韩兴博

(长安大学, 陕西 西安 710064)

摘 要: 爆裂是火灾高温下隧道衬砌劣化的常见现象, 爆裂的发生对衬砌管片内部温度场重分布有较大影响。选定爆裂温度为 400℃、500℃、600℃、700℃ 以及不考虑爆裂五种工况进行模拟, 对比管片火灾试验结果, 得到了隧道火灾下衬砌管片爆裂的具体温度。并以具体工程为例, 考虑爆裂计算了火灾下衬砌管片的内部温度场, 分析得到了管片不同位置内部温度随时间变化规律, 以及温度梯度在管片内部的分布规律, 指出了管片防火的重点区域, 对以后的隧道衬砌防火设计提供理论依据。

关键词: 隧道火灾; 管片; 爆裂温度; 温度场

DOI: 10.3969/j.issn.1672-9846.2015.04.020

中图分类号: U45

文献标志码: A

文章编号: 1672-9846(2015)04-0077-04

0 引言

隧道火灾不但发生频率很高, 而且危害极大, 一旦发生, 除了对人员生命财产造成重大损失, 其对隧道结构也产生了巨大的损害。

高温下衬砌管片的内部温度场及爆裂研究方面, 国内外学者的主要手段为数值模拟和模型试验: 傅宇方^[1] 研究指出管片受火时发生爆裂对管片的温度场有很大的影响; Khoury^[2] 通过试验研究发现混凝土发生爆裂的温度大致在 250—420℃ 之间; 选择不同的混凝土材料, 段雄伟^[3] 研究表明, 在高温作用下 C25 混凝土发生爆裂的临界温度范围为 500—600℃; Khoury^[2] 和 Russell H^[4] 研究认为, 影响混凝土爆裂的主要因素有升温速率、混凝土的密实性、混凝土的湿度、外加荷载大小等。

火灾下衬砌管片内部温度场研究方面: 同济大学闫治国^[5] 通过管片火灾试验研究了火灾下管片内部温度分布规律; 中南大学郭信君^[6] 也通过火灾试验得到了衬砌内部温度分布的详尽数据; 中南大学徐志胜^[7], 中南大学廖仕超^[8], 同济大学

强健^[9], 武汉理工大学赵志斌^[10] 等通过数值模拟研究了管片内部温度分布, 取得了大量研究成果。但是在这些实验和数值模拟中, 学者们均没有考虑混凝土爆裂对管片内温度场重分布带来的影响。

本文基于火灾下管片衬砌材料热力学性能的非线性, 并考虑爆裂对衬砌管片的温度场的影响进行了有限元模拟, 对比管片火灾试验得到了具体的管片材料的爆裂温度, 并基于爆裂研究了火灾下衬砌管片的内部温度场规律。

1 爆裂温度计算模拟

中南大学郭信君^[6] 通过衬砌管片火灾试验得到衬砌管片内部火灾下的温度场分布。本节根据其试验中的模型建立数值模拟的模型, 模型采用混凝土材料, 构件内直径 13.3m, 外直径 14.5m, 角度为 38°34′17.14″, 径向厚度 0.6m, 纵向厚度 0.5m, 混凝土强度等级为 C60, 实测强度 62.8MPa。管片火灾试验中的模型如图 1 所示, 图 2 为数值模拟所建立的有限元模型。

*收稿日期: 2015-08-22

作者简介: 嵇振礼(1991—), 男, 山东潍坊人, 长安大学桥梁与隧道工程专业硕士研究生, 主要从事桥梁与隧道工程研究。

韩兴博(1991—), 男, 陕西宝鸡人, 长安大学桥梁与隧道工程专业硕士研究生, 主要从事桥梁与隧道工程研究。

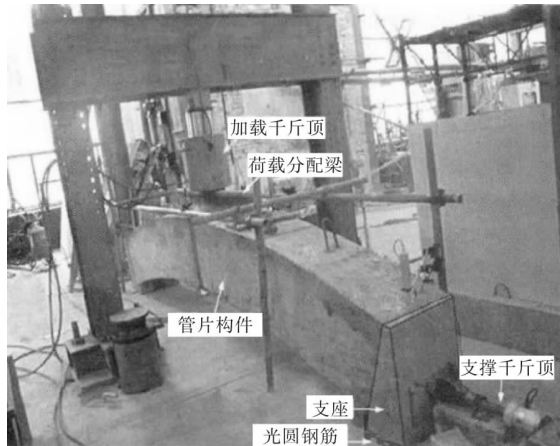


图1 管片火灾试验设备



图2 数值模拟模型示意图

使用有限元方法, 考虑高温爆裂对衬砌管片温度场进行模拟。火灾场景选用 HC 曲线来模拟

火灾时隧道内烟气温, 火灾时间持续 2h。其温度随时间变化如下式:

$$T = T_0 + 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) \quad (1)$$

式(1)中: T_0 为起始温度, t 为时间, 单位以 min 计。

高温下混凝土材料的热力学性能会表现出典型的非线性, 在常规的数值模拟中学者们一般都采用固定值, 这样数值模拟结果的可信度会大大降低。根据清华大学过镇海, 时旭东^[11] 等研究, 本节数值模拟具体参数如下表 1, 郭信君火灾试验测得各测点的温度以及数值模拟的各爆裂温度下计算得的温度如下表 2:

表1 计算参数取值表

砼热工参数	取值
密度 (Kg/m ³)	2300
比热 (J/Kg/K)	$C = 900 + 80 \times T/120 - 4 \times (T/120)^2$
导热系数 (W/m · K)	$\lambda_c = 2 - 0.24 \times T/120 + 0.012 \times (T/120)^2$
对流系数 (W/m ² · K)	$h = 1.05097e^{t/372.55195} + 0.84148$
弹性模量 E (GPa)	31

表2 数值模拟结果统计表

测点距受火面 距离 (cm)	试验测点温度 (°C)	不考虑爆裂 测点温度 (°C)	各爆裂温度下各测点温度 (°C)			
			400	500	600	700
5	431.35	449.65	577.18	519.22	475.51	468.26
10	202.32	215.08	272.65	241.75	226.12	221.02
15	112.11	108.45	130.01	120.47	112.79	110.21
20	68.44	60.782	68.681	67.026	62.314	61.256
25	53.43	40.989	43.697	44.342	41.467	41.103
30	43.16	33.552	34.397	35.255	33.683	33.576
35	34.33	31.042	31.281	31.83	31.074	31.047
40	31.59	30.279	30.341	30.61	30.286	30.28
45	30.32	30.069	30.083	30.196	30.07	30.069

由于试验的误差以及数值模拟参数取值的准确性, 数值模拟不能与试验结果精确一致。另外, 试验中距受火面 5cm 和 10cm 处的测点在受火过程中早于 2h 发生爆裂, 而试验中得到的 5cm 和 10cm 测点的结果记录时间早于 2h, 因此试验温度会低于理论计算温度。此处不予考虑这两组数据, 分析其余数据, 各爆裂温度下计算的各测点温度与试验所测得的温度的差值如下图 3。不考虑爆裂计算的结果普遍较试验结果低。

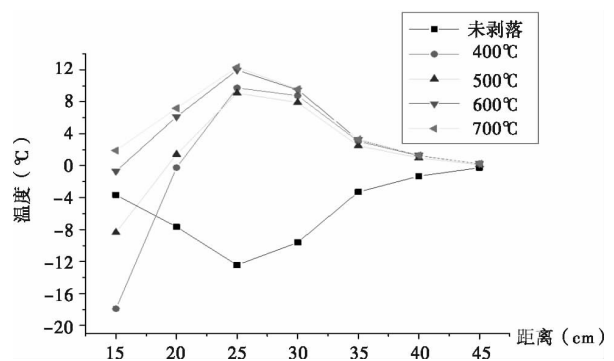


图3 各爆裂温度下计算结果与试验差值折线图

按式: $S^2 = (T_{\text{试验}} - T_{\text{数值计算}})^2$ 计算得到的各温度下试验数据与数值模拟数据方差如下:

$$S^2_{\text{不考虑爆裂}} = 331.73, S^2_{400} = 503.90, S^2_{500} = 224.19, S^2_{600} = 283.28, S^2_{700} = 311.59$$

S^2_{500} 最小, 因此, 考虑爆裂温度为 500°C 时, 数值模拟结果与试验真实结果拟合度最高, 因此推荐 500°C 为此类材料衬砌管片的爆裂温度。另外根据傅宇方^[1]研究其指出混凝土材料的爆裂温度大致在 $400^\circ\text{C} - 500^\circ\text{C}$ 之间。因此选用 500°C 为管片的爆裂温度来计算后续整环管片的温度场时与实际最接近的。

2 基于爆裂的衬砌管片内部温度场

本节以西安地铁交通二号线张家堡——尤家庄区间隧道为例, 管片内径 600cm , 厚度 35cm , 火灾曲线选择 HC 曲线, 根据同济大学闫治国^[12]研究, 火灾时沿管片高度方向的温度分布线形递增, 如图 4 所示, 考虑到隧道内路面的高度及火源高度, 使温度主要集中在隧道路面以上衬砌之上, 计算公式如下:

$$\begin{cases} T_y = T_R + \frac{y}{H}(T_H - T_R) \\ T_R = 0.2T_H \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: H ——隧道断面高度, m ; y ——断面任意一点与路面高差, m ; T_y ——断面上离路面距离为 y 处的温度, $^\circ\text{C}$; T_R ——路面附近的温度, $^\circ\text{C}$; T_H ——断面拱顶温度, $^\circ\text{C}$ 。

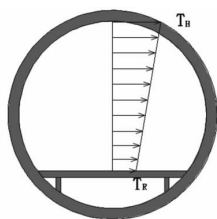


图 4 温度在隧道断面的分布形式

2.1 不同时刻管片温度分布规律

管片中选择的测点如图 5 所示, 不同测点随时间的温度变化如图 6—8 所示。

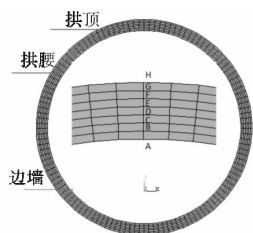


图 5 测点位置示意图

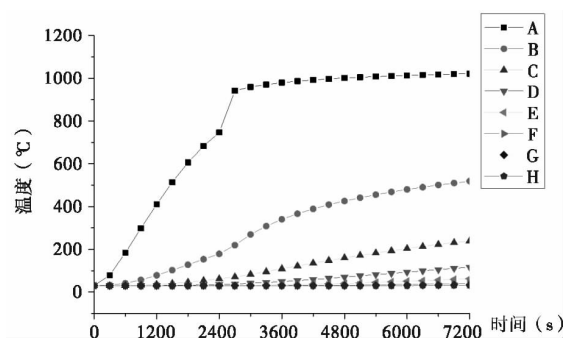


图 6 拱顶各测点温度时间曲线

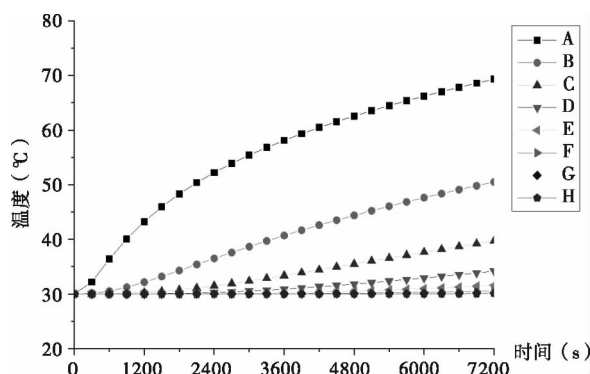


图 7 拱腰各测点温度时间曲线

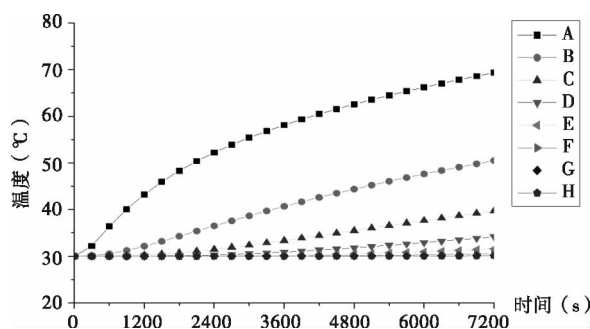


图 8 边墙各测点温度时间曲线

由图 5—8 可以看出, 火灾发生后拱顶和拱腰位置受火面上测点的温度增长趋势和 HC 曲线极为相似。随着距受火面的距离的加远以及测点远离拱顶靠近边墙, 温度随时间的增长近似于线性变化。同时距受火面距离的加远, 管片内部温度大幅减小。

此外, 拱顶表层最高温度约为 1100°C , 拱腰处约为 970°C , 边墙处约为 70°C , 随着拱顶靠近边墙温度明显降低。拱顶附近的温度明显高于其他部位, 且沿厚度方向受高温影响范围更深。随受火时间增长, 管片受高温影响范围从拱顶沿环向向两侧逐渐扩大, 沿厚度方向深度也在加深。但是整体来说温度在混凝土中的传递范围非常有

限,火灾发生 2h 时,衬砌受高温影响的范围不到混凝土厚的 1/3,混凝土为较为优良的热惰性材料。

2.2 沿衬砌厚度温度分布规律

为了研究衬砌沿厚度方向温度规律,将管片不同位置各测点温度随测点距受火面距离的变化曲线绘制如图 9—11。

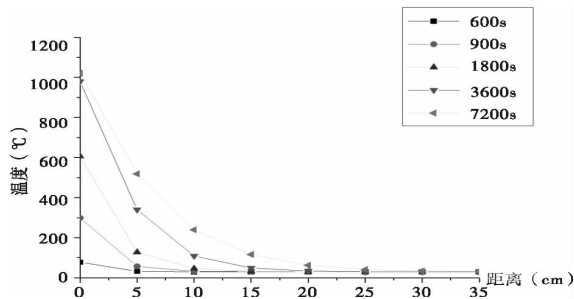


图 9 拱顶距受火面不同距离各测点温度曲线

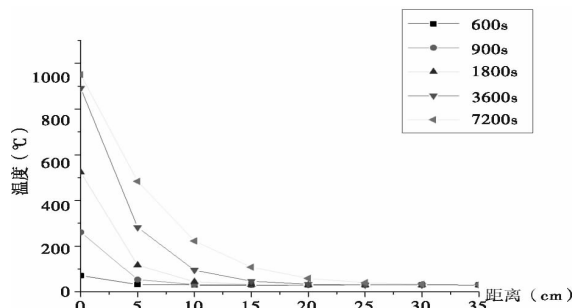


图 10 拱腰距受火面不同距离各测点温度曲线

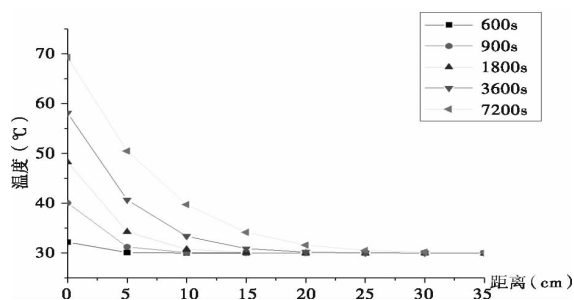


图 11 边墙距受火面不同距离各测点温度曲线

由图 9—11 可以发现,发生火灾时,不论是拱顶、拱腰还是边墙,管片沿厚度方向的一定区域内存在较大的温度梯度,在这一区域中温度梯度非常明显。这一区域大致分布在衬砌内表面至厚度 5cm 的区域内。较大的温度梯度会造成混凝土内部的温度应力,引发混凝土性能的劣化和爆裂。这一区域也大致为钢筋混凝土的保护层,保护层的爆裂会导致钢筋直接暴露在火焰下,导致钢筋性能的极速劣化,继而导致混凝土整体的性能劣

化,发生破坏。因此这一区域应该列为衬砌防火的重点区域。

3 结论

(1)爆裂的发生对衬砌管片内部温度场重分布有较大影响,数值模拟时可以选定 500℃ 为混凝土开始发生爆裂的温度,可计算得到更准确的管片内部温度场;

(2)衬砌管片内部随厚度加深,以及随管片远离拱顶,温度随时间的增加更近似于线性;

(3)衬砌管片拱顶为火灾时受高温影响最大的部位,并且管片受火面表层 0—5cm 范围里的温度梯度较大,此范围混凝土性能受高温劣化最严重,因此拱顶表层为管片防火的重点区域;

(4)本文考虑的爆裂温度的间隔为 100℃,应该缩小步距进行模拟计算,取得更精确爆裂温度;管片衬砌温度场模拟分析时应建立三维有限元模型,并考虑隧道沿行车方向的温度分布。

参考文献:

- [1]傅宇方,唐春安.水泥基复合材料高温劣化与损伤[M].北京:科学出版社,2012:109—111.
- [2]Khoury Progress G A. Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures [J]. Progress of Structure Engineering Material, 2000, (2): 429—447.
- [3]段雄伟.公路隧道火灾衬砌混凝土试件损伤试验研究[D].中南大学,2010.
- [4]Russell H. Guidelines For Fire Resistance In Road Tunnels [J]. Tunnels & Tunnelling International, 2005, (7): 20—21.
- [5]闫治国,杨其新.秦岭特长公路隧道火灾温度场分布试验研究[J].地下空间,2003, (2): 191—195.
- [6]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].中南大学,2013.
- [7]徐志胜,万俊,王薇.火灾下盾构隧道管片衬砌热力耦合数值分析[J].中国安全科学学报,2009, (10): 49—51.
- [8]廖仕超.火灾下衬砌结构承载力研究[D].中南大学,2011.
- [9]强健.地铁隧道衬砌结构火灾损伤与灾后评估方法研究[D].同济大学,2007.
- [10]赵志斌.火灾作用下长江隧道衬砌结构温度场和温度应力研究[D].武汉理工大学,2006.
- [11]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,2003:18—81.
- [12]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].同济大学,2007.