

文章编号: 1671-6612 (2019) 03-319-04

地铁隧道火灾双点排烟烟气温度分布特性的试验研究

雷凯荣¹ 覃新² 赵鹏³ 高波³ 袁中原³

(1. 青岛地铁集团有限公司工程建设分公司 青岛 266000;

2. 中国中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610036;

3. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 基于 1:20 的模型试验,研究了火源热释放率、排烟量和风口长度对地铁隧道火灾双点排烟烟气温度分布特性的影响。结果表明:火源段烟气温度随着火源热释放率的增加而显著增加,在排烟作用下非火源段烟气温度急剧下降;排烟量和风口长度对火源段烟气温度几乎没有影响;排烟量对非火源段烟气温度影响较大,而风口长度对非火源段烟气温度影响不大。

【关键词】 地铁隧道火灾;双点排烟;模型试验;烟气温度分布

中图分类号 TU453.5 文献标识码 A

An Experimental Study on the Smoke Temperature Distribution in a Subway Tunnel Fire with Two-point Extraction Ventilation System

Lei Kairong¹ Qin Xin² Zhao Peng³ Gao Bo³ Yuan Zhongyuan³

(1. Qingdao Metro, Qingdao, 266000; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd, Chengdu, 610031;

3. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 This study investigated the effects of heat release rate, exhaust volumetric flow rate and extraction vent length on the smoke temperature distribution based on a series of 1/20 reduced-scale experiments. Experimental results show that the smoke temperature significantly increases with the heat release rate in the fire section while it sharply decreases in the non-fire section. Exhaust volumetric flow rate and extraction vent length have no effect on the smoke temperature distribution in the fire section. Exhaust volumetric flow rate has a significant influence on the smoke temperature distribution in the non-fire section. Meanwhile, the effect of extraction vent length on the smoke temperature distribution in the non-fire section is limited.

【Keywords】 subway tunnel fires; two-point extraction ventilation system; reduced-scale experiment; smoke temperature distribution

0 引言

近年来,随着城市轨道交通向城际轨道交通发展,地铁线路越来越长,许多超过 3 公里、甚至穿山、过河的地铁长区间隧道已经建成通车,例如南

京 2 号线、武汉 2 号线和 7 号线。由于地铁隧道是相对狭长和封闭的空间,一旦发生火灾,烟气会在隧道内传播和积聚,有统计结果表明,高温有毒的烟气是导致人员伤亡的主要因素^[1]。所以,合理设

作者简介:雷凯荣(1985.3-),男,本科,Email: rongkailei@163.com

通讯作者:袁中原(1983.8-),男,博士,Email: zhongyuan.yuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期:2019-04-08

置通风排烟系统并且掌握烟气温度分布的规律对确保人员安全逃生具有重要意义。

随着排烟技术的发展,出现了点式排烟系统^[2]。如图 1 所示,当隧道发生火灾时,火源附近的排烟风口自动打开,竖井内的排烟风机联动将烟气从排烟道排出隧道。点式排烟系统的优势在于:在合理设计排烟量的情况下,可以将烟气控制在一定的范围。与传统的纵向通风相比,可以避免对追踪列车的影响。除此之外,由于我国地铁隧道主要采用单洞双线盾构隧道,可以有效利用上部富余空间设置排烟道,不会大量增加土建投资。因此,点式排烟被认为是一种极具潜力的排烟方式。

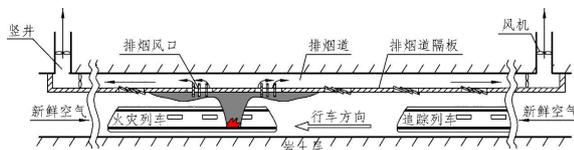


图 1 点式排烟原理图

Fig.1 A schematic layout of the point extraction ventilation system

Ingason 和 Li^[3]基于 1:23 的模型试验,证明了点式排烟在公路隧道较大规模火灾工况下的有效性,并给出了诱导风速的取值建议。高晓明等人^[4]以某地铁过江段为研究对象,数值模拟了排烟道风速对火灾烟气控制效果的影响,得到了隧道纵向风速为 1m/s 时的合理排烟道风速。卢艳艳等人^[5]依托实际工程项目,采用小尺寸燃烧试验和数值模拟的方法,对地铁隧道火灾半横向通风进行了系列研究,研究结果指出,最佳排烟风速与火源功率的 1/3 次方成线性关系,当火灾发生在排烟风口正下方时,不需要纵向送风,而当火灾发生在两排烟风口之间时,需要纵向送风且风速为临界风速。朱常琳等人^[6]基于数值模拟研究了排烟道高度、排烟风速、排烟风口开启个数对隧道烟气控制的影响,研究认为,排烟道高度宜设置为 1.6m,排烟风速控制为 10m/s,并且开启火源附近 2 个排烟口能获得较好的排烟效果;吴萍等人^[7]采用 FDS 研究了风口尺寸和排烟量对排烟效率的影响,研究发现风口越宽越有利于排烟;当排烟量增加到一定值以后,排烟效率趋于不变。

从以往的研究可以看出,数值模拟是研究地铁隧道火灾点式排烟的主要手段,试验研究很少;其次,前人的研究主要集中于点式排烟的烟气控制效

果,缺乏对烟气温度分布特性的研究,而这一问题关乎点式排烟系统在火灾发生时是否能够满足人员安全逃生的要求。所以,本文基于 1:20 的模型试验,研究了火源热释放率、排烟量和风口长度对顶壁烟气温度分布特性的影响,研究的结果希望为地铁隧道火灾点式排烟的工程设计和应用提供参考。

1 模型试验

基于 Froude 模型法的缩尺试验已经广泛被应用于隧道火灾的研究当中。根据 Froude 相似关系,缩尺试验和全尺寸试验的火源热释放率、烟气温度和体积流量之间的对应关系可以由下式计算^[8]:

$$\frac{Q_f}{Q_m} = \alpha^{5/2} \quad (1)$$

$$T_f = T_m \quad (2)$$

$$\frac{V_f}{V_m} = \alpha^{5/2} \quad (3)$$

式中, f 代表全尺寸试验; m 代表缩尺试验; α 为缩尺比,本试验缩尺比为 1:20。

模型试验主要由模型隧道、燃烧系统和测量系统三部分组成。下面进行简单的介绍。

1.1 模型隧道



图 2 模型隧道

Fig.2 Tunnel model

模型隧道由隧道和排烟道两部分组成。如图 2 所示,模型隧道的一侧采用 5mm 的防火玻璃制作,以便观察火焰的偏转情况,隧道的底面、侧面、顶壁以及排烟道均用 10 mm 的防火板制作。从图 3 可以看出,隧道长 14m,宽 0.25m、高 0.25m;排烟道位于隧道上方,与隧道宽度相同,高度为 0.12m。在排烟隔板上设置风口,为了更好地排烟,风口的宽度为 0.25m;风口的长度为 0.2m、0.15m、0.1m 和 0.05m,对应的实际隧道尺寸为 4m、3m、2m 和 1m;根据 NFPA130 的要求,需要确保距离

火源 30m 之外的烟气参数满足安全逃生的要求, 本试验中火源处在两风口的中心, 也就是隧道的中心, 所以风口距离火源的位置设置为 1.5m, 即风口间距为 3m。为了方便下文表述, 如图 3 所示, 定义了火源段和非火源段。

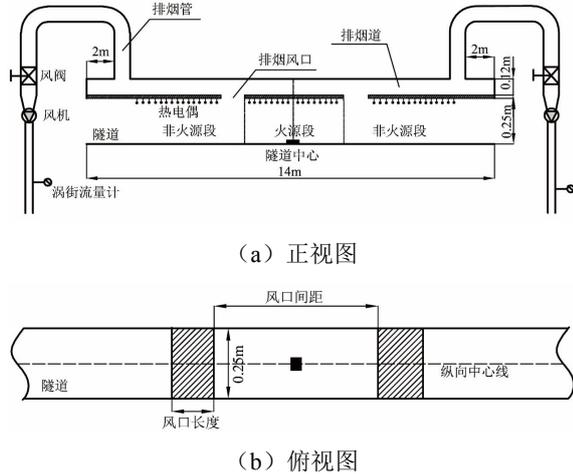


图 3 模型隧道示意图

Fig.3 A layout of tunnel model

1.2 燃烧系统

试验采用 2cm 高的正方形甲醇油池火模拟火源, 火源的热释放率可由下式计算^[9]:

$$Q = \chi m_f \Delta H \quad (4)$$

其中甲醇的燃烧效率 χ 可以认为是 1, 甲醇的燃烧热 ΔH 为 19.93kJ/g, 甲醇的质量损失率 m_f 利用电子天平称量得到。试验中火源热释放率的测量结果如表 1 所示。

表 1 火源热释放率

Table 1 Heat release rate (HRR)

序号	油盘边长 /m	质量损失率 $g/(s \cdot cm^2)$	缩尺模型 HRR /kW	全尺寸 HRR /MW
1	0.074	0.00136	1.48	2.6
2	0.094	0.00144	2.54	4.5
3	0.115	0.00134	3.52	6.3

1.3 测量系统

如图 3 所示, 烟气温度由直径 1mm、精度为 $\pm 2.5^\circ C$ 的 K 型热电偶测量。热电偶距离顶壁 1cm, 以隧道中心作为起点, 沿着隧道纵向中心线每隔 0.1m 布置一个热电偶, 两侧对称布置。采用安捷伦 34980A 采集烟气温度数据, 采样间隔为 5s。体

积流量由涡街流量计测量, 其精度为 1.5%。试验中两侧体积流量始终保持相等。

2 试验结果与讨论

图 4 表示试验中热电偶测得的温度变化情况。可以看出, 热电偶温度先逐渐上升, 然后在 400~655s 之间达到稳定, 最后温度小幅波动接着下降, 直至火焰熄灭。因此, 本文使用的温度数据均为 400~655s 之间的温度平均值。

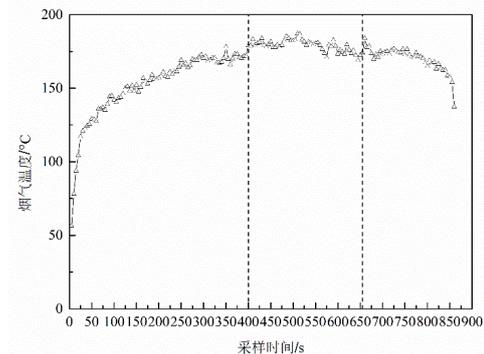


图 4 烟气温度

Fig.4 Smoke temperature

本系列试验火源位于隧道的中心, 且两侧的风量相等。因此, 理论上火源两侧温度分布是对称的, 这与图 5 在火源热释放率 1.48kW、风口长度 0.05m 和排烟量 17m³/h 的试验工况下测得的温度数据相吻合。所以, 下文仅对火源一侧的温度数据进行分析。

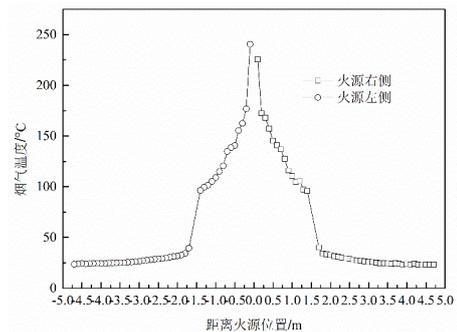


图 5 火源两侧烟气温度分布

Fig.5 Smoke temperature distribution on both sides of the fire source

2.1 火源热释放率的影响

图 6 比较了在不同火源热释放率下, 顶壁烟气温度分布的变化情况。从图中可以看出, 火源段烟气温度会随着火源热释放率的增加显著增加, 且烟气温度高, 对人员安全影响大; 而非火源段在排烟

作用下, 烟气温度的急剧下降, 这是因为大量的烟气被排出隧道, 所以非火源段烟气温度的低, 对人员安全影响小。

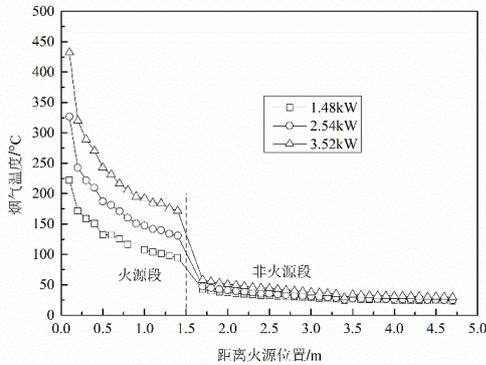


图 6 火源热释放率对烟气温度分布的影响

Fig.6 The effect of HRR on the smoke temperature distribution

2.2 排烟量的影响

以火源热释放率 2.54kW、风口长度 0.20m 的试验工况为例, 分析了排烟量对烟气温度分布的影响。从图 7 可以看出, 排烟量几乎不会影响火源段烟气温度的分布。但是随着排烟量的增加, 非火源段的烟气温度逐渐下降, 当排烟量达到 20m³/h 时, 非火源的烟气温度已经接近于环境温度, 此时说明烟气基本已由风口全部排出。NFPA130 要求距离火源 30m 外的逃生人员身体接触到的烟气温度不得高于 70°C, 这意味着如果排烟量设计合理, 点式排烟系统完全可以满足人员安全逃生的温度要求。

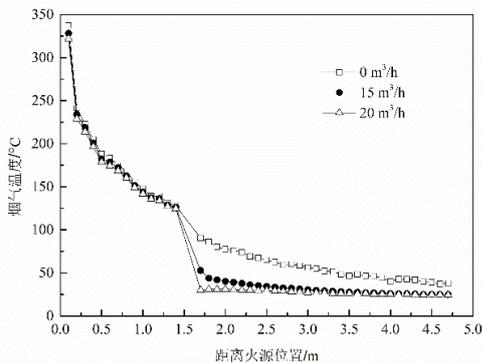


图 7 排烟量对烟气温度分布的影响

Fig.7 The effect of exhaust volumetric flow rate on the smoke temperature distribution

2.3 风口长度的影响

以火源热释放率 3.52kW, 排烟量为 20m³/h 的试验工况为例, 分析了风口长度对烟气温度分布的

影响。从图 8 可以看出, 风口长度的变化对于火源段烟气温度的几乎没有影响; 对于非火源段, 风口长度的增加会使非火源段烟气温度有所降低, 但是风口长度对非火源段烟气温度的影响有限。这主要是因为大量的烟气已经被排出隧道, 风口下游的烟气温度已经比较低了, 所以温度变化不大。

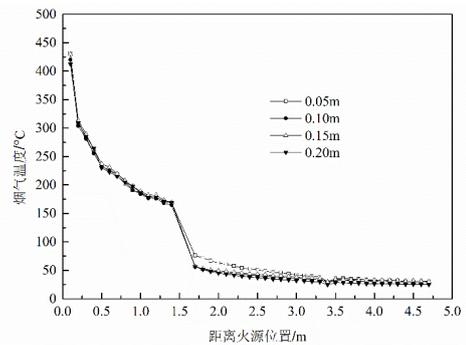


图 8 风口长度对烟气温度分布的影响

Fig.8 The effect of extraction vent length on the smoke temperature distribution

3 结论

本文通过一系列 1:20 的缩尺模型试验, 研究了火源热释放率、排烟量和风口长度对双点排烟烟气温度分布特性的影响, 得到了以下几点结论:

- (1) 火源段烟气温度随着火源热释放率的增加迅速增加, 但是由于排烟的作用, 非火源段的烟气温度会急剧下降。
- (2) 排烟量和风口长度对火源段烟气温度分布几乎没有影响。
- (3) 排烟量对非火源段烟气温度分布影响很大, 通过合理设计排烟量, 完全可以满足人员安全逃生的温度要求; 而风口长度对非火源段烟气温度影响有限。

参考文献:

[1] Beard, A N. Fire safety in tunnels[J]. Fire Safety Journal. 2009,44(2):276-278.

[2] Vauquelin O, Megret O. Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel[J]. Fire Safety Journal, 2002,37(5):525-533.

[3] Ingason H, LiY Z. Model Scale Tunnel Fire Tests-Point extraction ventilation[J]. Fire Protection Engineering,

(下转第 327 页)