

文章编号:1671-6833(2020)06-0046-07

纵向通风对隧道火灾特性及竖井自然排烟效果的影响

钟 委¹, 刘 欣¹, 高子鹤²

(1.郑州大学 力学与安全工程学院,河南 郑州 450001;2.郑州大学 土木工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要:采用 1:10 小尺寸隧道模型,研究了采用竖井自然排烟的隧道内,纵向通风对隧道内火焰形态、质量损失速率及竖井内温度分布和排烟速度的影响。结果表明:随着竖井高度和纵向风速的改变,在纵向通风和烟囱效应诱发气流的耦合作用下,隧道内火焰向下游倾斜,造成燃料质量损失速率发生变化,进而影响隧道内的烟气输运规律,并最终影响竖井排烟的温度分布和排烟速度。当排烟口下方的烟气层发生吸穿时,竖井内部出现低温区,此时隧道下部的冷空气直接通过竖井排出,大大减弱了竖井的排烟效果,在对烟气层吸穿现象进行分析的基础上,对 Hinckley 提出的临界吸穿 Froude 数进行了修正,得到了用于判断纵向通风条件下竖井自然排烟吸穿的临界 Froude 数为 3.2,当 Froude 数介于 3.2~5.1 时,竖井排烟处于吸穿区,Froude 数介于 0.6~3.2 时,处于未吸穿区,且 Froude 数随着竖井的升高而逐渐增大。

关键词:隧道;纵向风;竖井;吸穿;Froude 数

中图分类号:U458.1 文献标志码:A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2020.06.004

0 引言

由于隧道狭长结构的特殊性,一旦发生火灾,高温有毒烟气容易在隧道内积聚并迅速沉降,极易造成大量的人员伤亡和隧道结构的严重损坏^[1-2]。例如 2015 年上海外环隧道轿车起火导致 2 人死亡,2019 年浙江的猫狸岭隧道车辆起火引发交通事故并造成 5 人死亡等。因此,隧道发生火灾后,如何及时有效地排出高温有害烟气十分重要。近年来,竖井自然排烟作为一种有效的排烟方式逐渐在城市隧道中得到了广泛的应用^[3-4],如郑州京广快速路下穿隧道,上海长江隧道等。但是,在竖井自然排烟的过程中,容易发生排烟口下方的烟气层吸穿现象^[4],极大地降低排烟效率,特别是隧道内一般存在一定的纵向通风气流。因此对纵向风条件下竖井吸穿临界条件进行研究,能为隧道火灾的研究和消防工作的开展提供指导^[3]。

目前已有部分国内外学者对烟气层吸穿进行了研究。对于中庭等具有稳定蓄烟空间的建筑,Hinckley^[5]提出了用于判断自然排烟吸穿的 Froude 数,当发生吸穿时临界 Froude 数为 1.5,其

定义如下:

$$F = \frac{v \cdot A}{(g\Delta T/T_0)^{1/2} \cdot d^{5/2}} \quad (1)$$

式中: d 表示无排烟时的烟气层厚度,其数值大小取决于竖井所在位置, m ; v 表示排烟口烟气流速, m/s ; ΔT 表示烟气层的平均温升, K ; A 表示排烟口面积, m^2 ; T_0 表示环境温度, K ; g 表示重力加速度, m/s^2 。

Lougheed 等^[6]和钟委等^[7]通过研究证实 Froude 数同样可以用于预测机械排烟时的吸穿现象。但是,由于 Hinckley 提出的临界 Froude 数针对具有稳定蓄烟空间的建筑结构,隧道内烟气无法稳定蓄积,且烟气存在一定的水平流速, Li 等^[8]通过数值模拟验证了该 Froude 数并不适用于隧道排烟的情况,并得到了隧道内机械排烟吸穿的临界 Froude 数为 2.1。

前人对于隧道竖井排烟吸穿的研究多是针对安置在顶部的机械风机排烟吸穿^[7-9]或竖井自然排烟吸穿^[4]。对于竖井和纵向风联合作用下的排烟来说,竖井内气流的大小取决于烟囱效应引发的隧道内补风气流与纵向通风的耦合作用。而

收稿日期:2020-08-03;修订日期:2020-10-20
基金项目:河南省省科技攻关重点资助项目(182102310007);国家留学基金委资助项目(201807045042);国家自然科学基金资助项目(51706219)
作者简介:钟委(1978—),男,重庆江津人,郑州大学副教授,博士,主要从事地下建筑火灾防治及化工安全技术研究,E-mail:zhongwei@zzu.edu.cn。

目前关于隧道内竖井机械排烟的研究多集中于机械排烟的临界风速和烟气流动控制。如 Krol 等^[10]通过全尺寸实验研究了机械排烟的临界风速的影响;Zhong 等^[11]通过小尺寸实验研究了纵向风对竖井排烟烟气流动控制的影响。但是前人在竖井排烟和纵向风耦合作用条件下对隧道竖井自然排烟吸穿的研究还比较少。

为此,本文基于弗劳德相似模型理论,采用相似比为 1:10 的小尺寸隧道内竖井纵向风排烟实验台开展了竖井高度和纵向风速条件改变对隧道内火焰形态、燃烧速率、竖井口风速和竖井吸穿的影响的研究。

1 实验模型

相比大规模、高成本和较危险的全尺寸实验,近年来小尺寸实验以其低成本、低投入和与全尺寸实验较好的吻合性,越来越被广泛使用^[3]。因此,在对大量国内外典型隧道调研基础上^[3-5],根据 Froude 准则,本文按照 1:10 的相似比设计搭建小尺寸隧道实验台,隧道长 8 m、宽 1 m、高 0.5 m。

根据 Froude 准则,为保证小尺寸实验结果可以推广到原型,需保持 Froude 数为定常值,小尺寸实验和全尺寸实验常涉及到重要的比例公式如下^[4,12]:

$$\frac{Q_m}{Q_f} = \left(\frac{L_m}{L_f}\right)^{5/2}; \tag{2}$$

$$T_m = T_f; \tag{3}$$

$$\frac{v_m}{v_f} = \left(\frac{L_m}{L_f}\right)^{1/2}。 \tag{4}$$

式中: Q 代表热释放速率,kW; L 代表隧道长度,m; T 代表温度,K; v 代表风速,m/s;下标 m 代表隧道模型;下标 f 代表全尺寸隧道。

竖井长和宽均为 0.3 m,位于隧道纵向中心

线上,竖井高度分别设置为 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 m;对应全尺寸实验的竖井高度分别为 0、1、2、3、4、5 m。同时开展无竖井排烟的工况作为对照实验。火源在竖井中心线右侧与竖井距离 1 m。本文采用正庚烷为燃料,设置油盘尺寸为 14 cm 的方形油盘,设置了 5 种纵向风速,纵向风速从小到大依次为 0、0.5、1.0、1.5、2.0 m/s,对应全尺寸实验的纵向风速分别为 0、1.6、3.2、4.7、6.3 m/s,具体实验工况如表 1 所示。实验过程中环境温度为 30 ℃。

表 1 实验的工况设置
Table 1 Experimental tests

工况	油盘 尺寸/cm	纵向风 速/(m·s ⁻¹)	竖井 高度/m
1~7	14×14	0	0~0.5
8~14	14×14	0.5	0~0.5
15~21	14×14	1.0	0~0.5
22~28	14×14	1.5	0~0.5
29~35	14×14	2.0	0~0.5

如图 1(a)所示,水平方向距左侧出口 1.5 m 处设置热电偶串 T1 至 T8,水平方向相邻热电偶串的间距为 0.5 m,共设置有 T1 至 T32,热电偶串的纵向间距均为 0.03 m;竖井中心距离隧道左侧出口 1.75 m;风速仪布置在隧道右侧入口中心线顶部下方 0.25 m 处和竖井出口处(见图 1(b))。

图 1(b)所示为竖井测量仪器布置情况,竖井底部隧道中心线方向上布置 3 个热电偶对竖井 4 等分,即靠近竖井边长和相邻的热电偶距离是 0.075 m,垂直方向上每间隔 0.05 m 布置一组热电偶;风速仪布置在竖井口中心,即距离最近的竖井边长的距离是 0.15 m;烟颗粒仪布置在竖井口,距竖井水平较近一侧 0.075 m,并且距另一侧边长 0.15 m 处的位置。

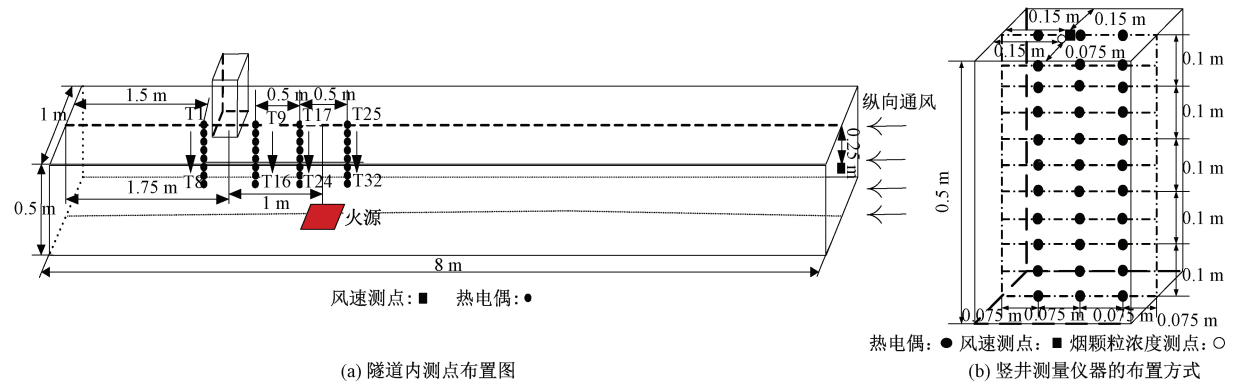


图 1 隧道和竖井测点布置图
Figure 1 Layout of measurement points in the tunnel and the shaft

2 结果与讨论

2.1 竖井和纵向风对火焰形态的影响

图 2 以纵向风速为 1.0 m/s 为例,展示了无竖井、竖井高度从 0 m 逐渐升高到 0.5 m 时的火焰形态变化。从图 2 中可以看出,由于竖井高度的增加,烟囱效应增强,竖井排烟引起的诱导风速增大,导致火焰向隧道下游的倾斜程度相应变大。即随着竖井高度的增加火焰的倾斜角度逐渐加

大,当竖井高度达到 0.5 m 时,烟囱效应最强,则火焰最贴近地面。

图 3 以竖井高度 0.3 m 为例,展示了隧道内纵向风速从 0 m/s 逐渐增大到 2.0 m/s 时的火焰形态变化。从图 3 中可以看出,当竖井高度一定时,由于纵向风速的增加同样导致火焰向隧道下游倾斜。随着纵向风速的增加火焰的倾斜角度逐渐增大,当纵向风速达到 2.0 m/s 时,火焰最贴近地面。

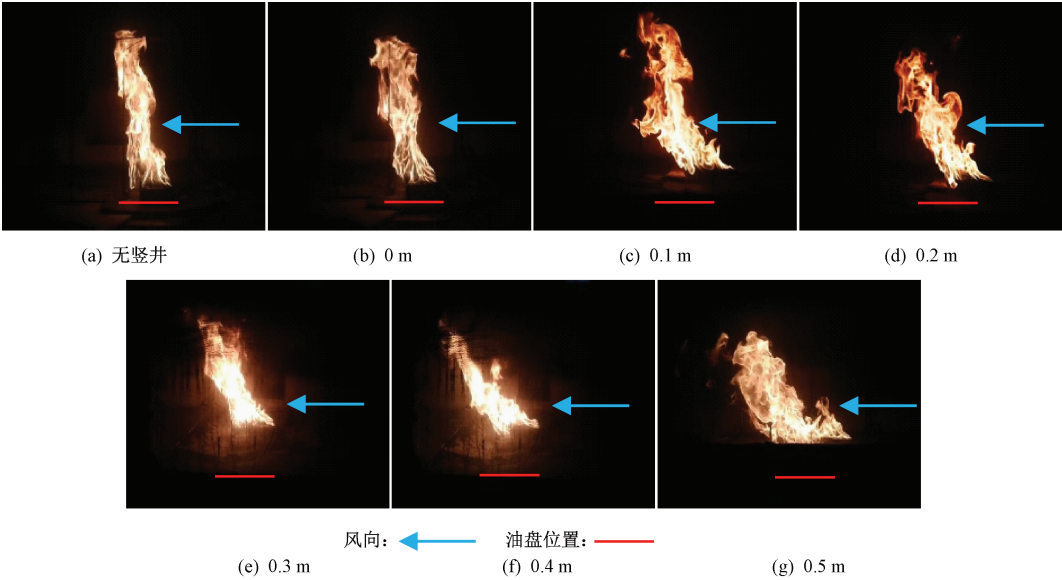


图 2 不同竖井高度下火焰形态变化
Figure 2 Flame shape in tunnel under different shaft heights

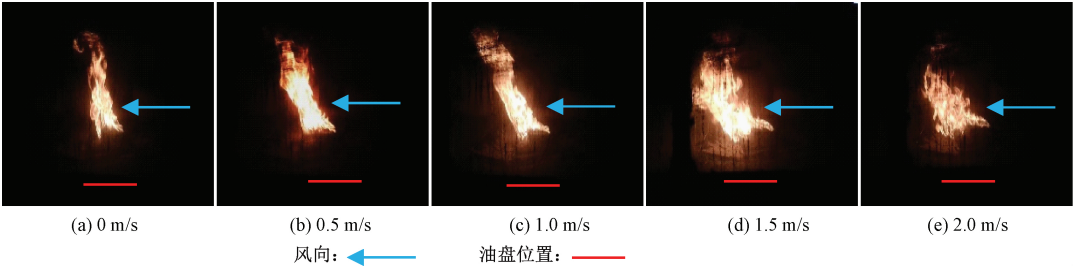


图 3 不同纵向风速下火焰状态变化
Figure 3 Flame shape in tunnel under different longitudinal velocities

从图 2 和图 3 中火焰形态随竖井高度和纵向风速的变化情况可以直观地看出,在竖井排烟烟囱效应引发的隧道内诱导补风和纵向通风的耦合作用下,火焰向下游倾斜,且竖井越高、纵向通风速度越大,火焰倾角越大。相比于无排烟的情况,在纵向风与竖井排烟作用下火焰倾斜将导致火焰远离顶棚,热羽流加速向下游流动,从而对隧道、竖井的温度分布及烟气输运规律造成影响。

2.2 竖井和纵向风对燃料质量损失的影响

通过对不同工况的火焰形态研究发现,竖井排烟和纵向风耦合作用引起的隧道内气流变化对

火焰的形态影响较大,从而进一步影响火源的燃烧强度。为了深入研究不同工况下火源燃烧强度的变化,本文对实验过程的燃料质量损失进行了分析。

池火的发展大致经过 3 个阶段,即生长期、稳定和衰减期^[13],本文研究火源达到稳定阶段的质量损失变化,并给出了纵向风和竖井高度改变引起的质量损失变化。图 4(a)和图 4(b)分别展示了无竖井和竖井高度为 0.5 m 时,不同纵向风速时燃料质量损失变化。从图 4 中可以看出,当竖井高度一定时,燃料的质量损失均随纵向风速的增

加而增加,说明在纵向风速范围内(0~2.0 m/s),纵向通风对火源燃料强度起促进作用。

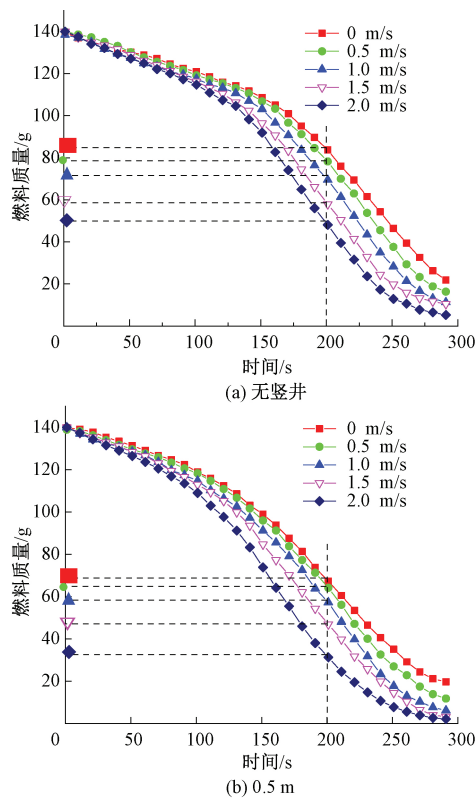


图 4 实验过程中燃料质量变化
Figure 4 Change of fuel mass over time

对比图 4(a) 和图 4(b),选取燃烧稳定阶段的 200 s 时为例,当纵向风速一定时,可以看出竖井高度为 0.5 m 时燃料质量明显较小,说明此时质量损失速率(燃烧速率)更大,即竖井烟囱效应同样对燃料的燃烧强度起促进作用。而纵向风和竖井高度对质量损失引起的变化最终将导致火源功率的变化,引起隧道内烟气输运与掺混行为的改变,进而影响到竖井内的温度和竖井排烟速度。

2.3 竖井内温度和流速变化

隧道内纵向风速以及竖井高度的改变将导致竖井排烟效果的变化,Ji 等^[4]指出,在一定的火源功率下,随着竖井高度的增大,竖井内将发生吸穿现象(见图 5(a)),即较强的烟囱效应导致排烟口下方烟气层厚度降为 0,烟气层凹陷区进入竖井,此时竖井内出现低温区,隧道内冷空气被直接吸入竖井,竖井排烟效果变差^[14]。

通过测量竖井内部的温度分布可以直接判断竖井内是否发生了吸穿现象。图 5(b)~5(f)以隧道内纵向风速为 1.0 m/s 为例,给出了竖井高度从 0.1~0.5 m 时的竖井内温度分布。从图中可以看出,在竖井高度从 0.1 m 逐渐增加到 0.3 m

时,随着竖井高度的增加,竖井底部的高温区域逐渐增大(见图 5(b)~5(d));随着竖井高度继续增大(0.4~0.5 m),竖井底部出现低温凹陷区,且低温区逐渐变大(见图 5(e)~5(f)),说明此时发生了烟气层吸穿现象,隧道中竖井底部的空气直接通过竖井排出,减弱了竖井的排烟效果。

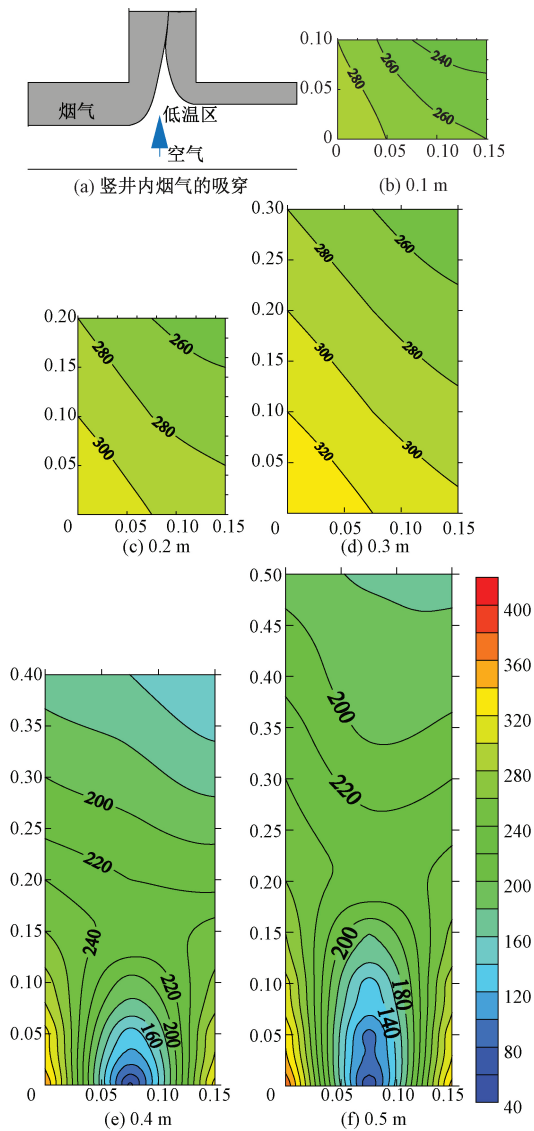


图 5 不同高度时竖井内的温度分布(K)
Figure 5 Temperature distribution in shaft for different shaft heights(K)

图 6 以竖井高度 0.3 m 为例,展示了纵向风速从 0 m/s 逐渐增加到 2.0 m/s 的竖井内部的温度分布情况。从图 6 中可以看出,纵向风速从 0 m/s 逐渐增加到 1.5 m/s,竖井内部的高温烟气区域逐渐增加,低温烟气区域减少,说明此时更多的烟气通过竖井排出;但是随着纵向风速继续增大至 2.0 m/s(图 6(e)),过大的纵向风导致烟气与空气掺混程度增强,虽然此时没有发生吸穿,但是竖井内部的整体温度有所下降;较大的纵向风

亦不利于隧道中烟气的排出,同样降低了竖井的排烟效率^[15]。

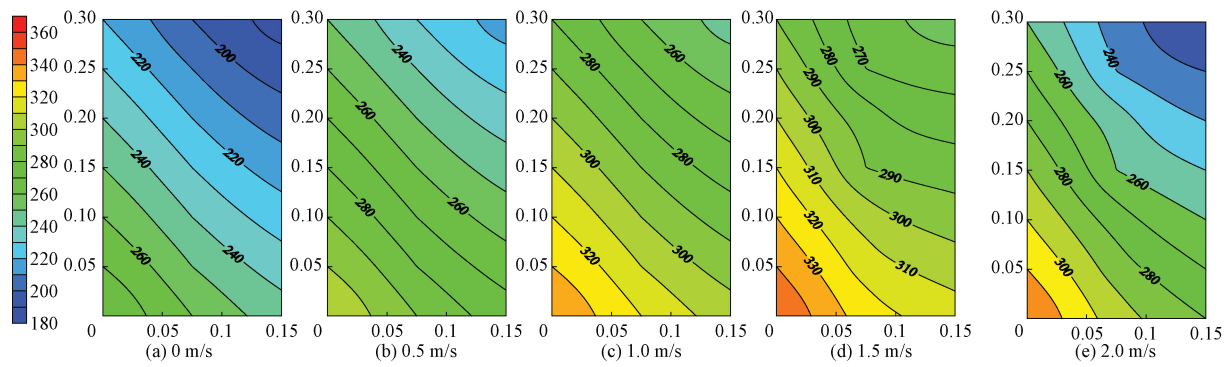


图 6 不同纵向风速时竖井内温度分布(K)

Figure 6 Temperature distribution in shaft for different longitudinal velocities(K)

图 7(a)以纵向风速 1.0 m/s 为例,展示了竖井高度从 0 m 逐渐增加到 0.5 m 竖井口风速情况。从图 7(a)中可以看出,随着竖井高度的增加,烟囱效应增强,导致竖井口风速增加。当竖井高度达到 0.5 m 时,竖井口风速达到最大。因此,竖井出口的烟气流速随着竖井高度的增加逐渐增大。此外,图 7(b)以竖井高度 0.3 m 为例,展示了纵向风从 0 m/s 逐渐增加到 2.0 m/s 时的竖井口风速情况。从图 7(b)中可以看出,当纵向风速

从 0 m/s 逐渐增加到 2.0 m/s 时,随着纵向风速的增加,竖井口风速逐渐加大,即纵向风速的增加同样导致竖井口排烟速度的增加。

表 2 给出了不同情况下竖井内是否发生吸穿现象的情况,从表 2 中可以看出,当竖井高度达到 0.4 m 时,竖井内均会发生吸穿现象。

表 2 不同竖井高度的吸穿现象发生情况

Table 2 The estimation of plug-holing

纵向风速/ (m·s ⁻¹)	0 m	0.1 m	0.2 m	0.3 m	0.4 m	0.5 m
0	否	否	否	否	是	是
0.5	否	否	否	否	是	是
1.0	否	否	否	否	是	是
1.5	否	否	否	否	是	是
2.0	否	否	否	否	是	是

2.4 竖井口烟颗粒体积浓度变化

通过对前文的分析可知,由于纵向通风和竖井的存在,隧道内纵向风速和竖井高度的变化将直接影响隧道内的火焰形态和燃烧强度,从而导致竖井口排烟速率的变化。因此,竖井的烟颗粒体积浓度大小是衡量竖井口排烟效率的重要指标。

图 8(a)以竖井高 0.3 m 为例,展示了纵向风速从 0 m/s 逐渐升高到 2.0 m/s 时的烟颗粒体积浓度变化。从图 8(a)中可以看出,纵向风速的增加,引起了烟颗粒体积浓度的变化。当纵向风速从 0 m/s 逐渐增加到 1.5 m/s 时,竖井口的烟颗粒体积浓度随纵向风速的增加而增加;当纵向风速达到 2 m/s 时,竖井出口的烟颗粒体积浓度反而有所下降。由图 6(e)可知,此时过大的纵向风速带来的更多的空气掺混,竖井内温度下降,同时烟颗粒体积浓度也相应下降,说明较大的纵向风不利于烟气的排出。

图 8(b)以纵向风速 1.0 m/s 为例,展示了竖

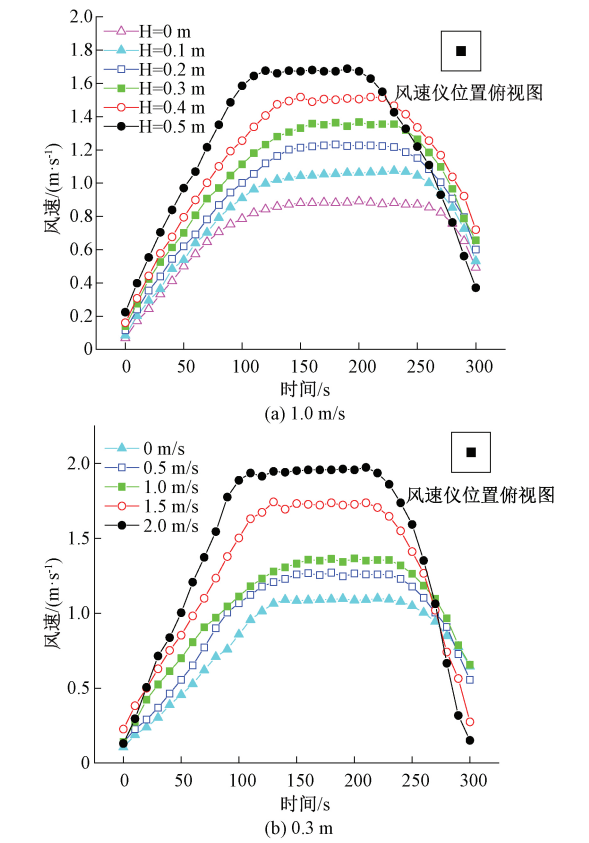


图 7 不同竖井高度和纵向风速竖井出口烟气风速
Figure 7 Smoke exhaust velocityat the shaft outlet for different shaft heights and longitudinal velocities

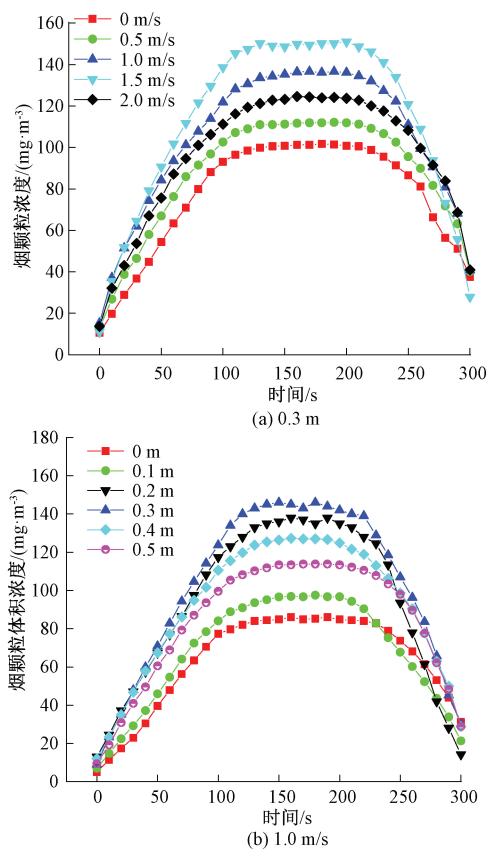


图 8 竖井口烟颗粒体积浓度变化

Figure 8 Variation of smoke particle concentration at the shaft outlet

井高度从 0 m 逐渐上升到 0.5 m 时的烟颗粒体积浓度变化。从图 8(b)可以看出,竖井高度的增加引起了烟颗粒体积浓度的变化。当竖井高度从 0 m 逐渐增加到 0.3 m 时,随着竖井高度的增加,烟颗粒体积浓度逐渐增大;当竖井高大于 0.3 m 时(0.4~0.5 m),由图 5 可知,此时竖井下方烟气层发生了吸穿,空气直接通过竖井排出,从而导致竖井出口的烟颗粒体积浓度急剧降低,而过高的竖井不利于排烟。

2.5 吸穿和 Froude 数之间的关系

Li 等^[8]利用数值模拟研究了隧道机械排烟对烟气层吸穿的影响,得出机械排烟条件下,发生烟气层吸穿的临界 Froude 数为 2.1。但是 Li 等^[8]得到的临界 Froude 数是在机械排烟条件下测得的,排烟量为固定值,且排烟量大小与隧道内的排烟情况无关。但是,对于竖井自然排烟来说,竖井烟囱效应强度(排烟)与火源燃烧情况及竖井的排烟状况直接相关,因此机械排烟情况下的临界 Froude 数不再适用,需要重新计算。由式(1)可知,隧道内竖井下方的烟气层厚度与火源和竖井的位置直接相关。图 9 给出了不同纵向风

速下 Froude 数和竖井高度之间的关系,其中实心对应于无吸穿的情况,空心对应于竖井排烟吸穿的情况。从图中可以看出,Froude 数随着竖井升高逐渐增大,当 Froude 数超过临界值时,竖井下方的烟气层发生吸穿,其临界 Froude 数是 3.2。根据自然排烟工况的 Froude 数大小,可以将竖井排烟分为吸穿区和未吸穿区,如图 9 所示。

因此,在纵向风作用下,对于隧道火灾竖井自然排烟,烟气层发生吸穿的临界 Froude 数为 3.2,大于 Li 等基于机械排烟得到的临界 Froude 数 2.1。根据本文的实验结果可知,当 Froude 数为 3.2~5.1 时,竖井排烟处于吸穿区,Froude 数为 0.6~3.2 时,处于未吸穿区,且 Froude 数随着竖井的升高而逐渐增大。竖井高度和纵向风速并非越高越好,一旦竖井下方的烟气层发生吸穿,空气直接通过竖井排出,将极大地削弱竖井的排烟效果。

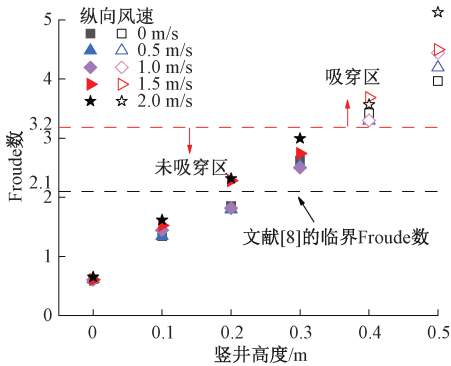


图 9 不同竖井高度及纵向风速条件下的 Froude 数

Figure 9 Change of Froude number with shaft height and longitudinal velocities

3 结论

通过小尺寸实验研究了纵向通风对隧道内火灾特性及竖井自然排烟效果的影响,综合考虑了竖井排烟诱发的补风气流与纵向通风的耦合作用,提出了用于判断竖井自然排烟烟气层吸穿现象的临界 Froude 数,主要结论如下:

(1)在纵向通风和烟囱效应诱发气流的耦合作用下,隧道内火焰向下游倾斜,造成燃料质量损失速率发生变化,且纵向风速越大、竖井越高,火焰倾角越大,质量损失速率也越大。当纵向风速一定时,随着竖井的增高,烟囱效应增强,导致竖井下方烟气层发生吸穿,大量空气通过竖井排出。竖井口排烟速率随竖井高度的增加而增加,结合竖井内温度分布和烟颗粒体积浓度变化,吸穿发生后竖井高度和纵向风速的增大反而导致排出气

体中的烟气体积浓度下降,即竖井并非越高越好。

(2)通过对竖井排烟过程中吸穿现象发生的原理分析,对纵向通风条件下竖井自然排烟的临界 Froude 数进行修正,得到了竖井吸穿的临界 Froude 数为 3.2。当 Froude 数为 3.2~5.1 时,竖井排烟处于吸穿区,Froude 数为 0.6~3.2 时,处于未吸穿区,且 Froude 数随着竖井的升高而逐渐增大。

参考文献:

[1] HU L,HUO R,PENG W,et al.On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires[J].Tunnelling and underground space technology, 2006, 21 (6):650-655.

[2] WANG Y F,LI Y L,YAN P N,et al.Maximum temperature of smoke beneath ceiling in tunnel fire with vertical shafts[J].Tunnelling and underground space technology, 2015, 50:189-198.

[3] INGASONH, LI Y Z, LÖNNERMARK A.Tunnel fire dynamics[M].New York: Springer, 2015.

[4] JI J,GAO Z,FAN C,et al.A study of the effect of plug-holing and boundary layer separation on natural ventilation with vertical shaft in urban road tunnel fires[J]. International journal of heat and mass transfer, 2012, 55(21):6032-6041.

[5] HINCKLEY P L. The flow of hot gases along an enclosed shopping mall a tentative theory[R].Watford: Fire Safety Science, 1970.

[6] LOUGHEED G D, HADJISOPHOCLEOUS G, MCCAR-TNEY C J, et al. Large-scale physical model studies for an atrium smoke exhaust system [J].

Ashraetransactions, 1999, 105(1):676-698.

[7] 钟委,纪杰,杨健鹏,等.地铁站内排烟口设置对排烟效果影响的实验和模拟研究[J]. 工程力学, 2010, 27(3):163-168.

[8] LI L,GAO Z,JI J, et al.Research on the phenomenon of plug-holing under mechanical smoke exhaust in tunnel fire [J]. Procedia engineering, 2013, 62: 1112 -1120.

[9] JI J, LI K Y, ZHONG W, et al. Experimental investigation on influence of smoke venting velocity and vent height on mechanical smoke exhaust efficiency [J]. Journal of hazardous materials, 2010, 177 (1/2/3):209-215.

[10] KROL M,KROL A,KOPER P, et al.Full scale measurements of the operation of fire ventilation in a road tunnel[J].Tunnelling and underground space technology, 2017, 70:204-213.

[11] ZHONG W, FAN C, JI J, et al. Influence of longitudinal wind on natural ventilation with vertical shaft in a road tunnel fire[J]. International journal of heat and mass transfer, 2013, 57(2):671-678.

[12] KURIOKA H, OKA Y, SATOH H, et al. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels[J]. Fire safety journal, 2003, 38(4):319-340.

[13] 李兆周. 烟囱效应作用下隧道火灾发展特性研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2015.

[14] 高子鹤. 隧道内受限火羽流行为特征及竖井自然排烟机理研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.

[15] 钟委. 地铁站火灾烟气流动特性及控制方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.

Experimental Investigation on the Influence of Longitudinal Ventilation on Tunnel Fire Characteristics and Natural Smoke Exhaust by Shaft

ZHONG Wei¹, LIU Xin¹, GAO Zihe²

(1.School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2.School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In this paper, a 1:10 scale tunnel was adopted to investigate the influence of longitudinal ventilation on the fire behavior in tunnel and the natural smoke exhaust by vertical shaft. Results showed that the flame inclination and the mass loss rate of fire changed with the ventilation velocity and shaft height, which further influenced the temperature distribution and smoke exhaust velocity through the shaft. Once plug-holing occurred, the fresh air in the lower of tunnel would be exhausted through the shaft directly, greatly reducing the smoke exhaust effect. On this basis, the critical Froude number proposed by Hinckley was improved, and the critical Froude number for natural exhaust by shaft under the longitudinal ventilation was determined as 3.2. For Froude number in the range of 3.2 to 5.1, plug-holing occurred, while for Froude number in the range of 0.6 to 3.2, there was no plug-holing.

Key words: tunnel; longitudinal ventilation; shaft; plug-holing; froude number