

文章编号:1004-5309(2017)-0012-08

DOI:10.3969/j.issn.1004-5309.2017.01.02

纵向风速对隧道中细水雾灭火效果的影响研究

李 梦¹, 刘申友^{1*}, 姚 斌^{1*}, 石晓龙², 林 彬³

(1.中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室,合肥,230026;2.合肥科大立安安全技术股份有限公司,合肥,230088;
3.公安部上海消防研究所,上海,200000)

摘要:隧道作为交通的咽喉要道,一旦发生火灾,给人员逃生带来很大的困难。利用隧道火灾模拟平台,分别对车顶和车底两个位置进行了细水雾灭火的模拟实验,研究不同风速对隧道火灾的温度、气体组分浓度和热辐射等参量的影响,据此研究细水雾灭火系统在隧道火灾中抑制、扑灭火灾,降低火场温度、净化火源附近空气以及隔绝热辐射的能力。结果表明:当风速增大时,火场烟气平均温度逐渐减小,CO浓度的峰值显著降低,热辐射强度也有效降低。在实验条件下,隧道纵向通风作用有利于保障火场安全。

关键词:风速;隧道;细水雾灭火系统;油池火

中图分类号: TU998.1;X932

文献标识码: A

0 引言

隧道属于狭长型的交通联络通道,由于空间小、道路窄、通风条件差,一旦发生火灾,产生的浓烟将迅速扩散充满整个隧道并难以排出,对人员的生命造成威胁,同时也大大增加了施救工作的难度。隧道的消防安全近年来逐渐得到重视,传统的隧道灭火技术有消火栓、水基型灭火器、水喷淋灭火系统、水喷雾灭火系统^[1]。

近年来,细水雾灭火技术已引起了广泛的关注和重视,其在隧道中的应用也得到了关注。世界各国相继开展细水雾灭火系统在隧道内的应用实验,如法国 East Tunnel 隧道试验、法国 Mona-Lisa Tunnel 隧道试验、挪威和瑞典的海岸隧道试验、国内也进行了隧道内细水雾灭火相关试验。试验结果均表明,细水雾灭火系统能够迅速扑灭隧道火灾,与常规水喷淋相比具有用水量少的特点,并能迅速净化空气和保护环境^[2]。

国内多见隧道火灾时各种通风措施对隧道内烟

控效果的研究,而通风风速对隧道细水雾灭火效果的研究相对较少。本文利用隧道火灾模拟实验平台,分别对地铁列车车顶和车底两个位置进行了细水雾灭火的模拟实验,研究不同风速对隧道火灾的温度、气体浓度和热辐射等参量的影响,据此研究细水雾灭火系统在隧道火灾中抑制、扑灭火灾,降低火场温度、净化火源附近空气以及隔绝热辐射的能力。

1 实验方案设计

1.1 隧道及列车实验模型的建立

隧道模型示意图如图 1 所示。模拟隧道长 30.0 m、宽 7.6 m、高 7.8 m,隧道采用钢架结构,模拟隧道内壁采用防火板蒙上。其中 10 m 左右的燃烧、喷水、灭火试验段。此段模拟隧道主要模拟实际特长隧道救援站大断面情况下,火灾发生时各火灾参数特征及灭火系统的保护性能。

考虑到模拟隧道规模,试验设计的车体模型长 21.0 m、宽 2.96 m、高 2.26 m,车厢底部距离地面高度 0.7 m。实际的列车包括多节车厢,而本模型只

收稿日期:2016-04-05;修改日期:2016-06-02

作者简介:李梦,女,河南人,工学硕士研究生,主要从事建设工程消防安全方面的研究。

通讯作者:刘申友,E-mail:lshy@www.kdlian.com;姚斌,E-mail:binyao@ustc.edu.cn

建造一节,在试验研究中只考虑火灾在一节车厢内发展状况。

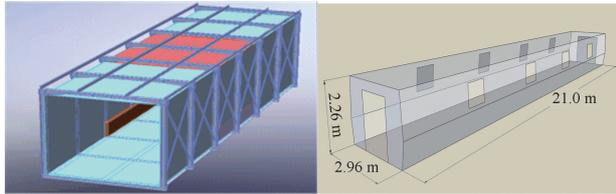


图 1 模拟隧道及车厢示意图

Fig.1 Simulation of tunnel and train carriages

1.2 数据测量系统布置方案

本实验的数据测量系统包括 K 型热电偶、气体浓度分析仪、辐射热流计和热线风速仪。热电偶具体安装方式如图 2 所示。本试验分别在隧道纵向和竖向两个方向选取典型点进行观测。在隧道纵向 5 m、10 m、15 m、20 m 和 25 m 处分别设置了五个竖直向下的热电偶串标号分别从 T01~T05,竖向热电偶间距为 1.2 m;同时在隧道顶棚下方 0.2 m 处沿隧道纵向设置了一条热电偶串,每个热电偶间距为 1.0 m。

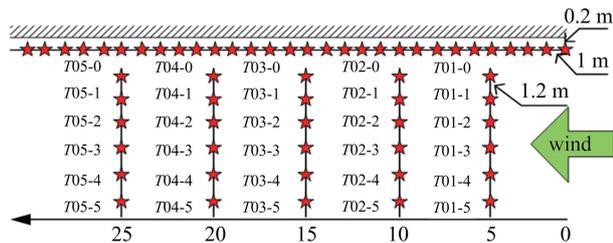


图 2 热电偶布置竖向示意图

Fig.2 Thermocouple layout diagram

烟气浓度分析仪和辐射热流计的布置方案如图 3 所示。在车厢中部和端部两个位置分别设置烟气浓度分析仪 A 和 B。其中 A 设置在离地面 4.14 m 处,B 设置在距离顶棚 0.5 m 处。

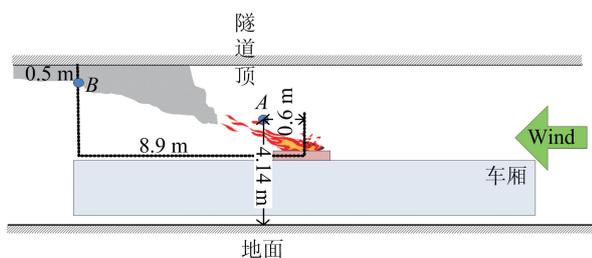


图 3 烟气浓度分析仪布置示意图

Fig.3 Concentration of flue gas analyzer layout diagram

如图 4 所示,辐射热流计也设置了两支,设置在距离车厢 4.4 m 处高 3 m 和高 4 m 的位置,分别记为探测点 C 和 D。

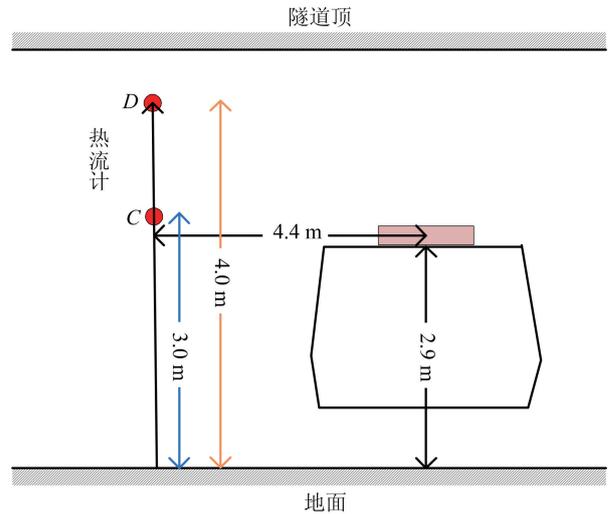


图 4 辐射热流计布置示意图

Fig.4 Radiative heat flow meter layout diagram

1.3 火源类型及实验工况设计

美国、澳大利亚和瑞士等国家的一些学者已对列车火灾功率开展了广泛的试验研究,试验得出一节车厢的最大热释放速率为 5 MW 左右^[3]。列车火灾通常是以燃油为代表的液体火灾和少量的以卧具、座椅、行李等为代表的固体火灾。因此本试验选取 90 #汽油作为燃料模拟列车火灾。

隧道内发生火灾时,敞开式货物车厢火源一般在车厢顶部,此外随火势发展,热羽流具有向上蔓延的特点,因此热对流可能引燃车厢顶部电缆等其他设备。列车车辆上的电器(如:主变阻器、电动机)多安装在列车车厢下部,当电器发生故障时,容易引起短路而造成火灾。调研国内外资料,电力机车底部着火从而导致列车火灾的案例占国内外火灾案例的一半以上^[4]。此外当列车车底着火时,火容易由底部向上燃烧吞没列车,造成严重的后果。考虑到车厢内部均配备消防安全装备,本文着重研究细水雾对车厢顶部和底部油池火的扑灭效果。

在本文实验中,考虑到细水雾灭火系统主要针对早期列车火灾扑救设计,因此选取 1 m×1 m 90 #汽油作为模拟火源,火灾功率为 1.8 MW 左右。隧道中的通风主要由列车运行通过隧道引起,因此考虑到列车运行的速率的不同设置 4 个不同的风速,分别为 0 m/s,1 m/s,3 m/s,6 m/s,风速测量点为火源附近。表 1 给出了本阶段设计的试验工况。

表 1 隧道细水雾灭火实验工况设计

Table 1 Designed conditions of tunnel water mist fire extinguishing experiment

工况号	火源位置	火源尺寸	风速/(m/s)
1	车顶	1 m×1 m 汽油火	0
2	车顶	1 m×1 m 汽油火	1
3	车顶	1 m×1 m 汽油火	3
4	车顶	1 m×1 m 汽油火	6
5	车底	1 m×1 m 汽油火	0
6	车底	1 m×1 m 汽油火	1
7	车底	1 m×1 m 汽油火	3
8	车底	1 m×1 m 汽油火	6

1.4 细水雾喷头布置方案

根据本实验研究对象的特殊性,同时在车辆上下两侧布置两层喷头,如图 5 所示,每层喷头分为左右两列。上层喷头每列布置 5 个并且呈 45°角倾斜向下喷射用于保护车顶火灾。下层喷头每列布置 4 个并且呈 45°角倾斜向下喷射用于保护车底火灾。

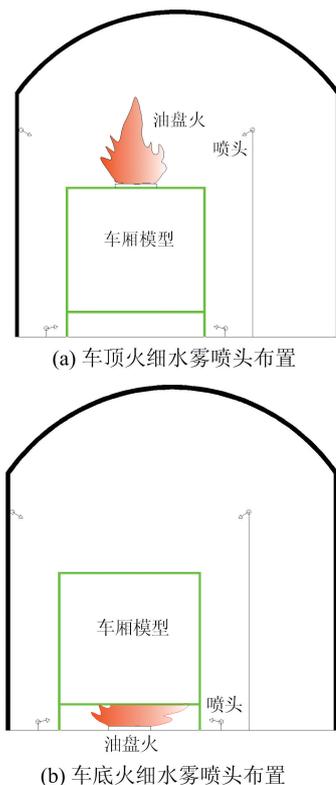


图 5 细水雾喷头布置示意图

Fig.5 Water mist nozzle layout diagram

考虑到两种灭火工况的相对独立性以及减小试验规模的需要,在设计试验方案时,车顶火灾试验和车底火灾试验将分别进行。车顶火灾试验中,油盘摆放于车顶中间位置,两侧 10 个细水雾喷头同时开启,底层细水雾喷头关闭。车底火灾试验时,油盘摆放于车厢底部中间位置,底层 8 个细水雾喷头同时开启,上层细水雾喷头仅在边缘处开启 2 个,其余细水雾喷头全部关闭。喷头启动时间为点火后 210 s。

2 实验结果与分析

2.1 隧道细水雾灭火实验过程及结果

在风速为 0 m/s 的条件下,细水雾施加前汽油静态燃烧,火羽流结构相对稳定,持续火焰区火羽流较高^[4]。当风速为 6 m/s 时,由于环境风速的增大,火羽流发生极大倾斜,被压低几乎贴近地面,但燃烧得更为剧烈。细水雾施加后,水雾呈圆锥形向下冲击火焰,细水雾的冲击扰动作用使得水雾与火焰间的相互接触面积变大,水雾吸收热量后起到加快火场冷却和降低燃烧强度的作用。

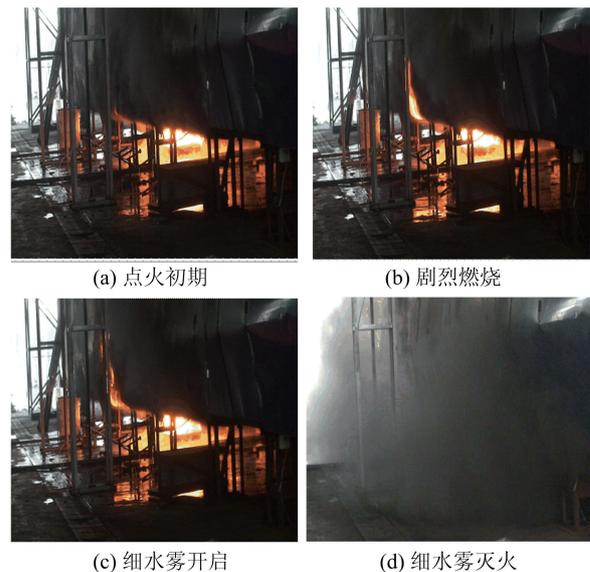


图 6 灭火实验过程

Fig.6 The process of fire suppression experiment

车顶火灾工况中灭火时间较长,这是因为列车顶部空间较大,隧道顶部未设置垂直向下的细水雾喷头。表 2 中灭火结果统计显示,风速较小时的灭火均较为迅速,风速越大灭火时间越久。这是因为受风速的影响水雾的形态产生变化,一方面细水雾雾滴整体运动偏向与火焰的另一侧,另一方面,气流

的运动作用带走了一部分水雾使得火源周围的水雾通量减小,因而使得灭火时间变长。

表 2 灭火实验统计

Table 2 Fire extinguishing time statistics

试验序号	火源位置	火源种类	风速/(m/s)	灭火时间
1	车顶	1 m×1 m 汽油火	0	140 s
2	车顶	1 m×1 m 汽油火	1	287 s
3	车顶	1 m×1 m 汽油火	3	245 s
4	车顶	1 m×1 m 汽油火	6	350 s
5	车底	1 m×1 m 汽油火	0	169 s
6	车底	1 m×1 m 汽油火	1	190 s
7	车底	1 m×1 m 汽油火	3	265 s
8	车底	1 m×1 m 汽油火	6	320 s

2.2 风速对细水雾抑制隧道火灾中各种数据参量影响的分析

2.2.1 风速对温度参数的影响

因为纵向 15 m 处热电偶串靠近火源,探测到的温度最高,因此我们对比 15 m 处热电偶串在不同风速情况下的温度变化情况。由图 7 可见,在 210 s 时施加细水雾之后,在不同风速条件下,烟气温度都能够迅速降低,并且靠近火源位置的热电偶温度下降速度快,靠近顶棚位置热电偶温度下降曲线较为平缓。细水雾作用后热电偶的变化过程可以分为两个部分,快速降温过程和缓慢降温过程^[5]。快速降温主要发生在细水雾灭火初期,这是因为细水雾作用初期火场温度较高,快速降温过程后,烟气层温度与细水雾间的温差较小,降温过程变得缓慢。

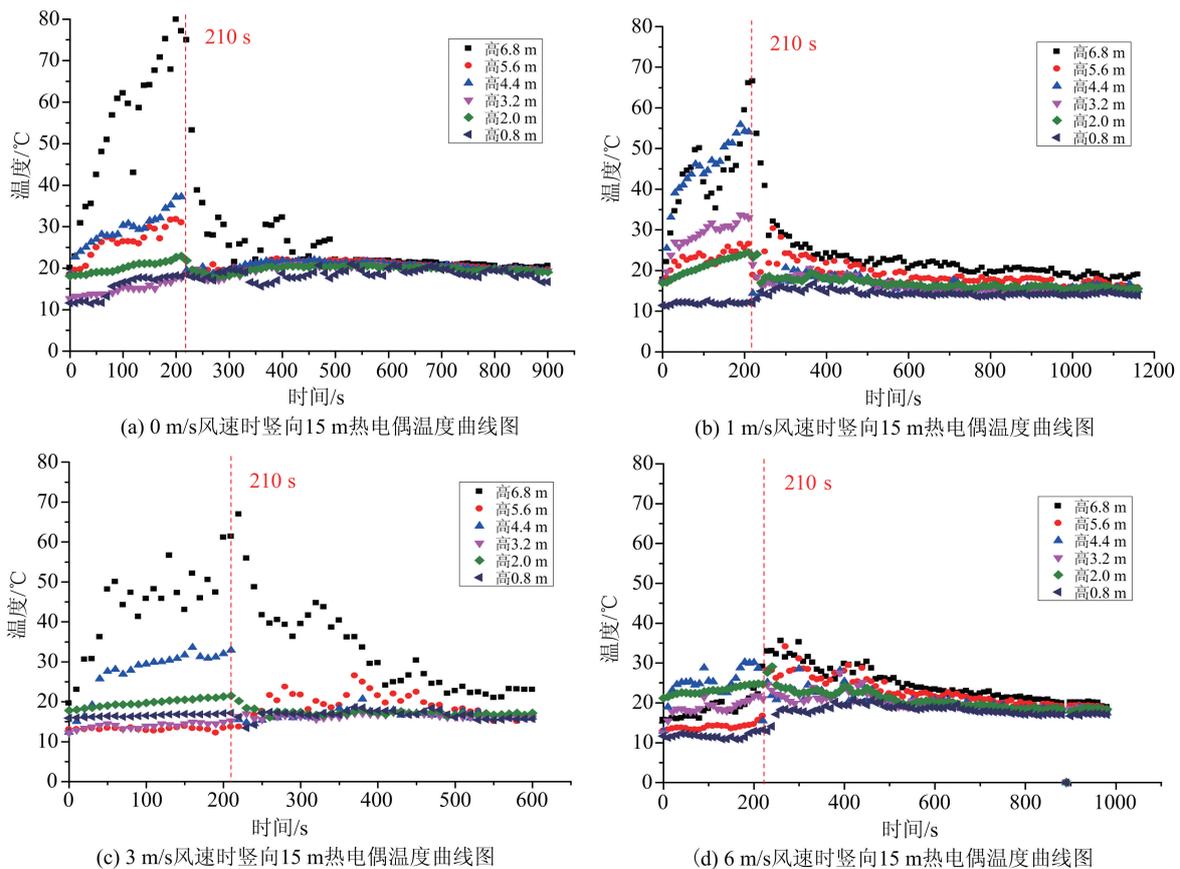


图 7 车顶工况竖向 15 m 处热电偶温度曲线图

Fig.7 15 m vertical thermocouple temperature curve

当风速逐渐增加时,15 m 处热电偶串测得的平均温度随着风速增大而降低。当风速增大到 3 m/s

和 6 m/时,烟气层温度在细水雾和通风的相互作用下快速降低接近环境温度后又有了一个的波动起伏

的过程,这是因为水雾微粒竖向的冲击作用和水平通风的作用方向相垂直,对周围烟气流场有一定的扰动作用。

2.2.2 风速对气体浓度参数的影响

隧道火灾中燃料受通风的影响,燃烧状况通常是非常不完全的,一般都会产生大量的浓烟,烟气中不仅含有大量没有完全燃烧的组分,还含有很多有毒、有害的组分,如 CO、HCN、SO₂ 等^[6]。

针对隧道内特殊的疏散情况,在隧道车厢附近和顶部烟气层内分别布置测点,并重点监测环境空气和烟气产物中氧气浓度和一氧化碳浓度,下面针对这两种气体成分进行分析。

1. 氧气浓度参数

图 8 给出了汽油火时,不同风速下火源附近和烟气层内氧气浓度变化。观察曲线可发现,细水雾施加前燃烧消耗 O₂ 使得 O₂ 浓度随时间下降,在风速为 0 m/s 时 O₂ 浓度下降过程最为明显,在细水雾开启 70 s 后下降到最低值 19.9%,细水雾施加一段时间后,由于水雾颗粒对燃烧的抑制作用减少了氧气的耗用量,使得车厢周围的 O₂ 浓度有开始回升,当风速增加时,燃烧过程中 O₂ 浓度下降幅度开始减小,氧气浓度更趋于平稳,燃烧和灭火过程中 O₂ 浓度变化不大,在风速为 3 m/s 和 6 m/s 时基本维持在 20.8% 左右。这是因为隧道中通风作用使得火源周围的氧气得到补充。在不明显影响细水雾抑制和扑灭火灾的情况下,有利于人员的疏散。

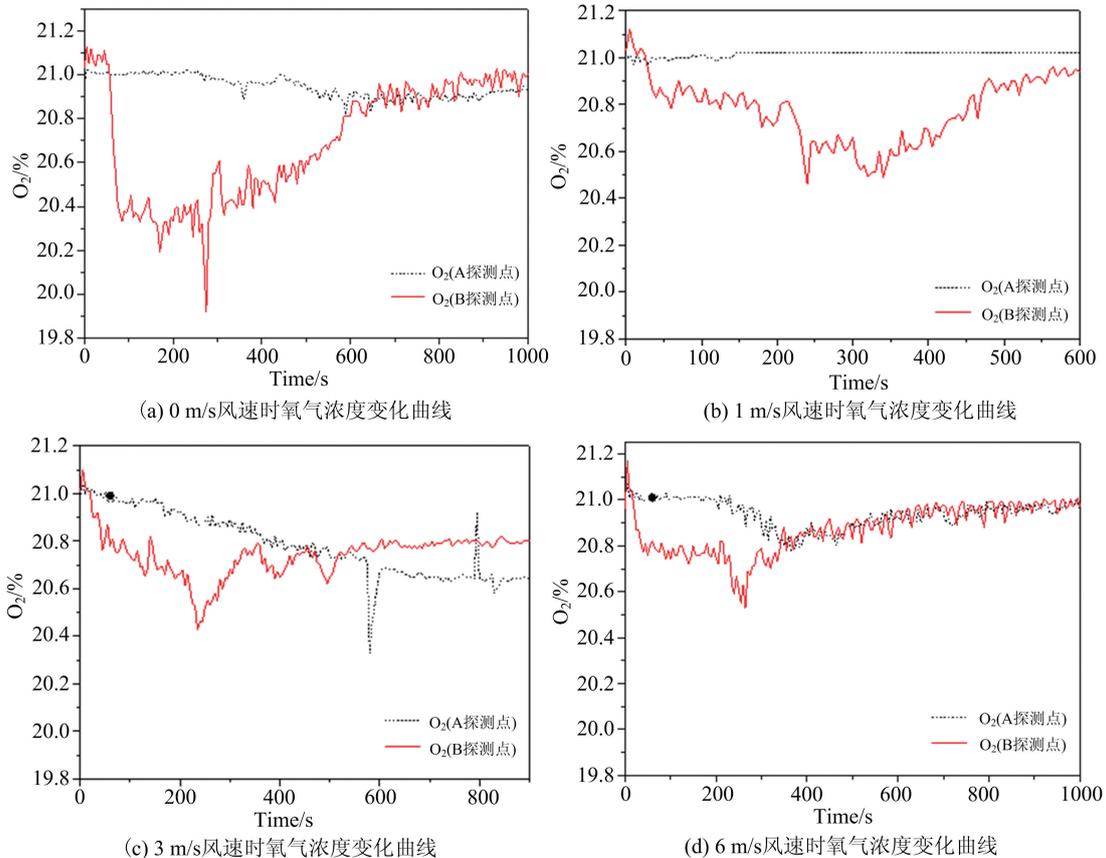


图 8 车顶工况氧气浓度变化曲线图

Fig.8 Oxygen concentration change curve

2. 一氧化碳浓度参数

图 9 表示了四种不同风速情况下,细水雾灭火前后的 CO 浓度变化曲线。观察曲线可以发现,火灾发生初期火源附近 CO 浓度几乎为 0 ppm。在不同风速情况下探测到 CO 的时间也不同。无风情

况下,烟气层内在汽油着火后 60 s 检测到 CO 气体,说明火灾产生的烟气在 60 s 后蔓延到检测点。有风情况下,检测点汽油着火后 30 s 均可检测到 CO 气体,这说明通风加速了烟气向下游运动。下面对细水雾施加后,不同风速情况下两个检测点的 CO

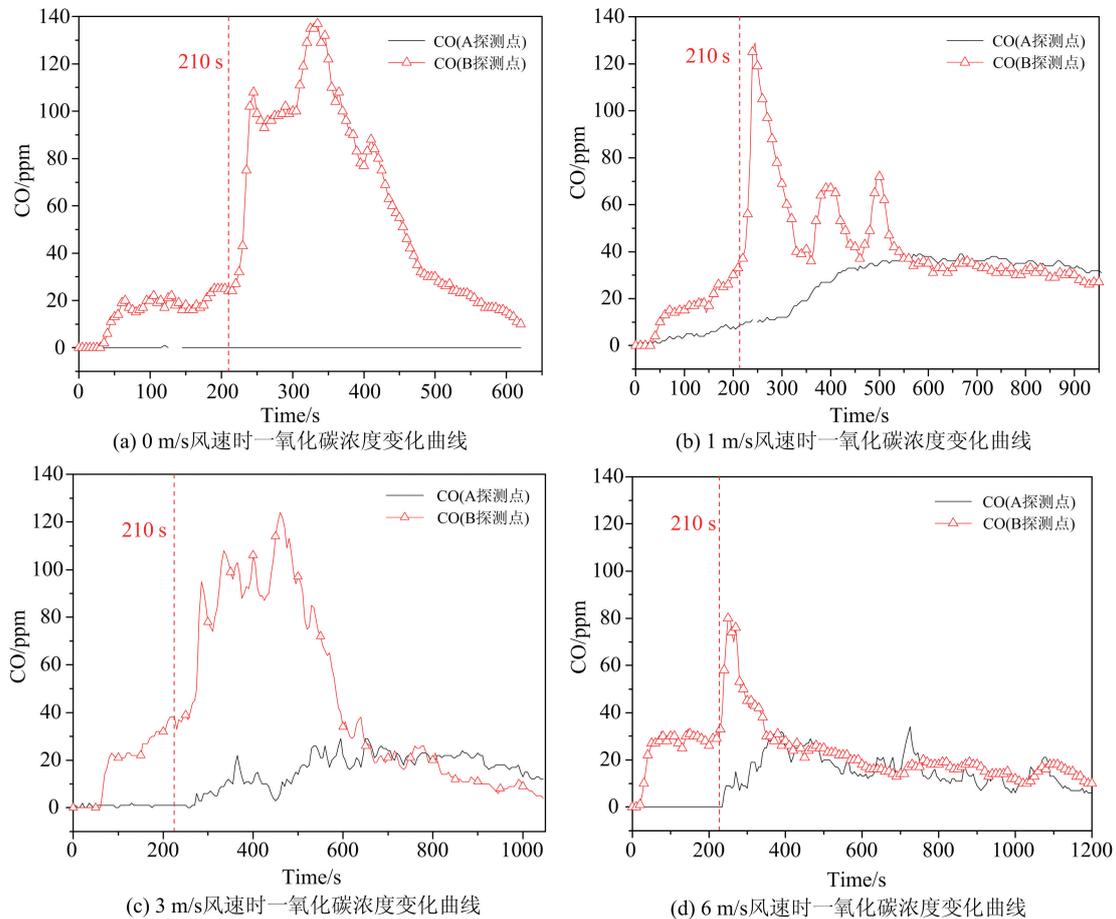


图9 车顶工况一氧化碳浓度变化曲线图

Fig.9 Carbon monoxide concentration change curve

浓度变化进行分析。

(1) 风速 0 m/s

从图 9(a)中可以看出,点火初期烟气层中 CO 浓度开始出现缓慢上升,在细水雾施加前上升到 40 ppm 左右,烟气层内 B 点的 CO 浓度在细水雾施加前后的一段时间明显高于火源附近 A 点的值。细水雾施加后,CO 浓度迅速上升,并在细水雾开启后 100 s 内达到最高点 140 ppm,这可能是因为细水雾作用初期火焰受到抑制,加之 O_2 浓度的降低使得燃料不能充分燃烧而产生大量的 CO。随着细水雾的持续作用,CO 浓度达到最高值后开始迅速降低,细水雾作用一段时间 CO 浓度降低速率有所减小,CO 浓度降低至稳定 20 ppm。

(2) 风速 1 m/s

当风速为 1 m/s 时,从图 9(b)中可观察到,烟气层内 B 点的 CO 浓度在细水雾施加后短时间内陡升至最大值 125 ppm,之后出现明显的下降,随后出现少许波动,接着又缓慢下降并接近稳定值 20 ppm

附近。细水雾施加后,随着时间的推移,火源附近 A 点的 CO 浓度也出现了缓慢上升的现象,这是因为环境风速作用使得火源周围的 CO 开始向下游运动。

(3) 风速 3 m/s

从图 9(c)中可以看出,烟气层内 B 点的 CO 浓度在细水雾开启后快速增大至 120 ppm,接着急剧下降至 20 ppm 以下。即随着时间的推移,呈现先上升后下降的趋势。而 A 点的 CO 浓度受环境风速的影响也出现了缓慢上升的现象。

(4) 风速 6 m/s

当风速为 6 m/s 时,烟气层内 B 点的 CO 浓度在细水雾施加后快速上升到最大值 80 ppm,之后一段时间出现较小的波动,随后趋于稳定值。火源附近 A 点的 CO 浓度在受 6 m/s 风速的影响,点火后呈缓慢上升趋势,达到最大值后趋于稳定。

在以上四种不同风速情况下,从火焰区的 CO 浓度变化情况中我们可以看出,在细水雾开启

前 CO 浓度上升不明显,这是因为油池火燃烧初期,隧道内氧气含量高使得汽油燃烧比较充分。细水雾作用初期烟气层内 B 点的 CO 浓度普遍出现明显上升,但当风速为 0 m/s 时的 CO 浓度的峰值为 140 ppm 而当风速为 6 m/s 时 CO 浓度峰值下降至 80 ppm,由此可以看出,随着风速的增大,CO 浓度峰值出现了显著降低。研究表明狭长空间内的 CO 浓度会受到机械通风系统的影响,风速越大 CO 浓度的峰值越低,同时 CO 的生成量也会显著降低,起到了消烟除尘的作用。因此,细水雾和通风系统共同配合作用,可以进一步为隧道中的人员安全提供保障。

2.2.3 风速对热辐射强度参数的影响

辐射是热量传播的重要方式之一。火灾发生后,热量向四周传递,如果邻近的可燃物获得的热量达到某一临界值,就可以点燃可燃物,引发火灾蔓

延^[7]。由于热烟气具有向上蔓延的特点,因热对流造成邻近可燃物起火的可能性较小,引起隧道火灾蔓延的主要途径是火灾产生的热辐射,同时热辐射对火灾现场人员和消防救护队员的安全也构成威胁^[8]。

图 10 给出了汽油着火时火源附近热辐射在细水雾施加前后的变化情况,可以看出汽油着火后,火源附近热辐射值迅速增大,大约在 200 s 达到最大值,之后趋于稳定。C 探测点出处的热辐射最大值在 $4 \text{ kW/m}^2 \sim 5.5 \text{ kW/m}^2$, D 探测点处的最大值在 $3.5 \text{ kW/m}^2 \sim 5 \text{ kW/m}^2$, C 点处的热辐射值比 D 点处的热辐射值大约高 0.5 kW/m^2 。细水雾施加后,火源附近两侧点热辐射通量迅速降低,在经历迅速下降后有一个明显的波动过程,这是因为水雾与热烟气接触带走了大量的热量,同时蒸发形成的蒸汽层对辐射具有衰减的作用^[9]。

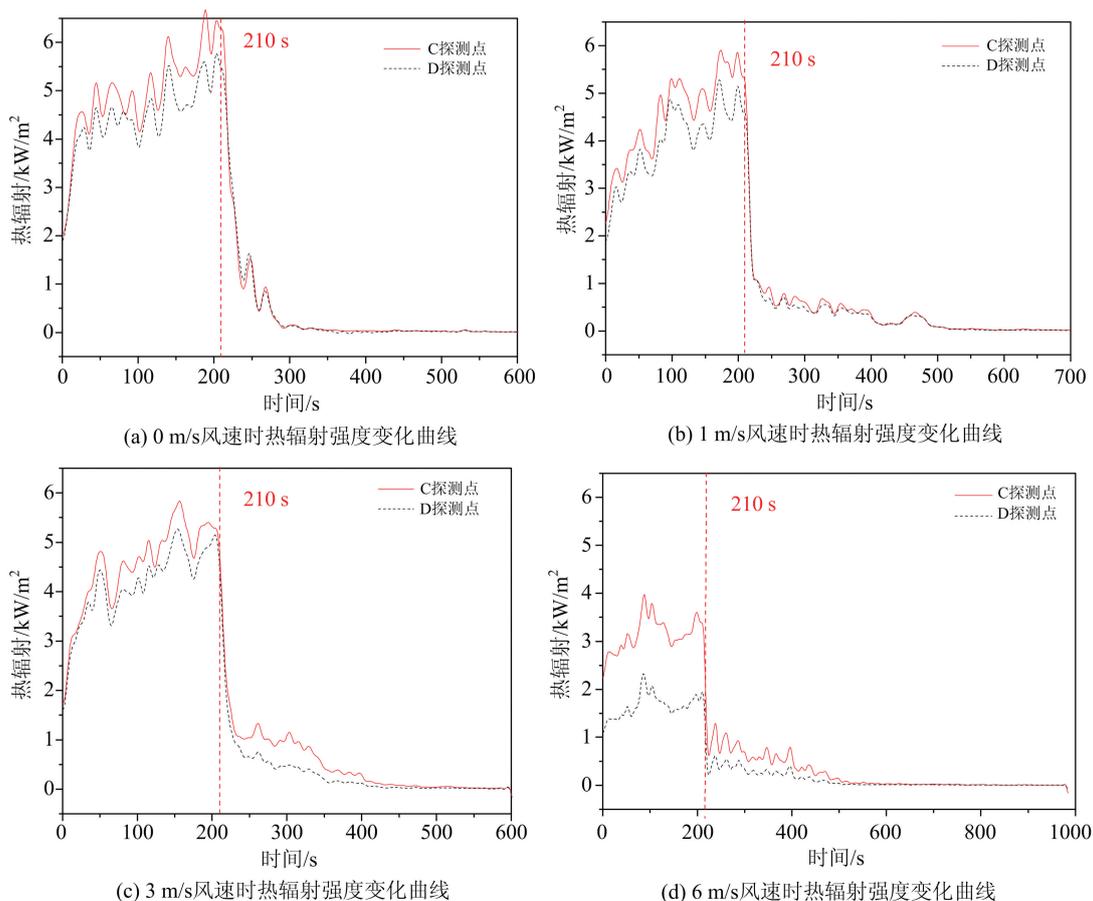


图 10 车顶工况热辐射强度变化曲线图

Fig.10 Thermal radiation intensity change curve

从图 10 中可以明显看出,在不同风速条件下,细水雾的作用均能有效抑制汽油火的燃烧放热,使

火场周围的热辐射强度迅速降低^[10]。随着风速的增大,热辐射强度峰值逐渐减小,说明通风作用加强

了细水雾对火场热辐射的屏蔽作用。这是因为机械通风作用把大量的高温气体带到下游,降低了火场周围的热辐射强度,同时周围空气的扰动作用充分混合了高温烟气和细水雾,使细水雾抑制火焰的热辐射作用增强^[11]。

3 结论

在本文实验条件下,通过对不同风速下细水雾灭火系统抑制隧道内车顶和车底火灾的八次模拟火灾实验研究,得出结论如下:

(1)细水雾施加后,烟气层的温度呈下降趋势,且火源上方区域温度变化最明显,随着风速的增大顶棚烟气平均温度逐渐降低。

(2)细水雾作用前,随着风速的增大, O_2 浓度下降速率降低,CO浓度变化不明显;细水雾作用后,随着风速的增大, O_2 浓度快速回升至环境值,CO浓度峰值和总生成量出现了显著降低。

(3)在不同风速条件下,细水雾的作用均能有效抑制汽油火的燃烧放热,使火场周围的热辐射强度迅速降低。随着风速的增大,热辐射强度峰值逐渐减小,说明通风作用加强了细水雾对火场热辐射的屏蔽作用。

(4)在本实验条件下,隧道中通风作用不显著影响细水雾控火效果,可有效降低火场温度、CO浓度和热辐射强度,更可以促进 O_2 浓度回升,有利于保障火场人员安全。

参考文献

- [1] GB50898-2013 细水雾灭火系统技术规范[S].北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国城乡建设部,2013.
- [2] 于爱滨.隧道通风系统与细水雾耦合作用的灭火研究[D].东北大学,2011.
- [3] 张笑男,等.不同排烟条件下细水雾扑灭油池火的实验研究[J].热科学与技术,2011,10(3):249-254.
- [4] 李权威.狭长空间纵向通风条件下细水雾抑制油池火的实验研究[D].中国科学技术大学,2010.
- [5] 倪佳迪.狭长空间内航空煤油池火燃烧特性及细水雾抑制效果研究[D].中国科学技术大学,2011.
- [6] 赵道亮,等.含F-500的低压细水雾抑制B类火灾的实验研究[J].中国安全生产科学技术,2010,6(4):9-14.
- [7] 游宇航,等.水喷淋与机械排烟作用下小室火灾特性的实验研究[J].火灾科学,2008,17(3):178-185.
- [8] 王庆生,等.铁路隧道救援站火灾模拟实验平台设计及细水雾系统抑制车厢火灾的模拟实验研究[J].火灾科学,2012,21(1):6-12.
- [9] 王琳,等.水雾与顶棚射流火焰相互作用的数值模拟分析[J].西安科技大学学报,2015(03):325-330.
- [10] 吴国华,等.高压细水雾消火栓灭火系统在铁路特长隧道消防中的应用[J].铁道标准设计,2009(9):85-87.
- [11] Hu LH, et al. Full-scale experimental studies on mechanical smoke exhaust efficiency in an underground corridor[J]. Building and Environment, 2006, 41(12): 1622-1630.

Application of water mist fire extinguishing system in highway tunnel

LI Meng¹, LIU Shenyou¹, YAO Bin¹, SHI Xiaolong², LIN Bin³

(1.State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2.Hefei kdlian Safety Technology Co. Ltd. Hefei 230088, China;

3. Shanghai Fire Research Institute of Ministry of Public Security, Shanghai 200000, China)

Abstract: Because of the relatively closed environment, highway tunnel as traffic choke points, in the event of fire, will bring people great difficulties in escape. So a tunnel fire simulation platform is presented of in this paper, so as to make water mist fire extinguishing experiments. Under the condition of different wind speed, the influence of fire temperature, gas concentration, thermal radiation and other parameters is investigated. And then the water mist fire extinguishing system in tunnel fire suppression is examined to evaluate its ability of putting out fire, reducing fire temperature, purifying fire near the air and isolating heat radiation.

Keywords: Tunnel; Water mist fire extinguishing system; Tunnel ventilation; Oil pool fire