

柴油在受限空间火灾轰燃实验中的引燃特性

张培红, 俞艳秋, 赵鹏程, 汤小英

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 以酒精作为主燃料, 改变酒精池火的直径和通风条件, 进行火灾轰燃实验. 通过对受限空间上部热烟气层平均温度、地面所接收到的热辐射通量和氧气体积分数的测试, 分析引燃柴油的临界条件. 结果表明, 当受限空间氧气体积分数为 20.4% 时, 若上部热烟气层平均温度高于 364 °C, 地面接收到的热辐射高于 4.38 kW/m², 可以引燃柴油. 当受限空间中氧气体积分数降低到 18.5% 时, 引燃柴油所需的上部热烟气层平均温度临界值为 390 °C, 地面接收到的热辐射临界值为 6.65 kW/m². 因此, 一定的受限空间中, 引燃柴油的氧含量、上部热烟气层平均温度和地面接收到的热辐射通量 3 个临界参数是互相制约的.

关键词: 通风; 热烟气层温度; 轰燃; 热辐射通量; 引燃

中图分类号: X 924.4; TK 121 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)01-0114-04

The Ignition Characteristics of Diesel in Fire Flashover Experiment in Confined Space

ZHANG Pei-hong, YU Yan-qiu, ZHAO Peng-cheng, TANG Xiao-ying

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Pei-hong, professor, E-mail: zhangpeihong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Fire flashover tests were conducted with different diameters of ethanol under different ventilation conditions by using ethanol as the main fuel and diesel as the second fuel. The average temperature in the upper layer of the hot smoke, the radiation heat flux at the floor and the oxygen concentration were measured to analyze the critical ignition conditions of the diesel. The results illustrated that the diesel can be ignited when the average temperature in the upper layer of the hot smoke is over 364 °C, the radiation heat flux at the floor is higher than 4.38 kW/m² and the oxygen concentration reaches 20.4% under the experiment state. If the oxygen concentration is reduced to 18.5%, the diesel can be ignited when the critical average temperature in the upper layer of the hot smoke is over 390 °C and the radiant heat flux at the floor is higher than 6.65 kW/m². It is concluded that in confined space, the critical parameters for the ignition of diesel, i. e. the oxygen concentration, the average temperature in the upper layer of the hot smoke and the radiant heat flux at the floor are mutually interinhibitive.

Key words: ventilation; hot smoke layer temperature; flashover; radiation heat flux; ignition

轰燃的发生是室内火灾进入充分发展阶段的标志. 一旦发生轰燃, 意味着室内所有的可燃物表面均可以被引燃^[1]. Drysdale, Peacock 等利用报纸、纸张、胶合板、塑料等不同类型可燃物进行不同尺度的轰燃实验, 分析引起轰燃的临界条件^[1-6]. 目前普遍接受的轰燃发生的临界条件有: ①受限空间上部热烟气层的平均温度达到

600 °C; ②地面接收的热辐射强度达到 20 kW/m²; ③通风口排出的烟气中有火焰窜出. Poulsen 等^[3]以常见装饰物为燃料开展了全尺寸轰燃实验, 发现轰燃的临界温度与壁面材料的热惯性以及可燃物在热反馈条件下不同的热物性密切相关. Beard^[7]分析了轰燃和受限空间围护结构热惯性的关系, 建立了轰燃模型. Francis^[8], 宗若雯^[9], 刘

斌^[10], 陈爱平^[11]等进一步通过实验和理论分析相结合的方法, 对室内火灾轰燃的判据和理论模型进行了分析和验证. Tsai 等^[12]利用汽油和异丙醇为燃料进行了一系列小尺度轰燃模型实验, 认为在受限空间内燃料的发烟特性与轰燃发生的相关性很小, 热不稳定性是导致轰燃发生的根本原因. 目前关于轰燃的研究大多是在近似正方体的室内受限空间内进行. 众所周知, 与建筑物室内固体可燃物火灾相比, 公路隧道、地下车库或者城镇地下油气管道发生的火灾爆炸事故中, 狭长受限空间内复杂通风条件下可燃液体引起的火灾轰燃的危险性更加严重. 本文以柴油作为研究对象, 实现受限空间火灾轰燃现象的重构, 分析在不同通风条件下, 当柴油被高温烟气层所造成的热辐射引燃的时刻, 受限空间的临界热环境参数.

1 实验设计

受限空间实验模型主体尺寸长宽高为 $3.6\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 0.6\text{ m}$, 模型的壁面和顶部、底部均采用“ 1 mm 厚镀锌钢板 + 30 mm 岩棉保温层 + 1 mm 厚镀锌钢板”的结构形式, 模型的两端设活动镀锌钢板, 以实现对于通风口面积的调整.

实验模型中部放置直径分别为 400 mm 或 500 mm 的铸铁燃烧盘作为主油盆 M, 内部添加 2 L 、纯度为 95% 的工业酒精作为主燃料. 辅油盆 S 直径为 200 mm , 内置 100 mL , 35 号柴油作为待引燃燃料, 辅油盆和主油盆中心距离为 400 mm , 如图 1 所示. 在辅油盆的两侧安置法国 Captec 公司生产的 TS-30B 型辐射热流计 R1 和 R2, 以测量轰燃实验中地面所接收的热辐射通量, 见图 1.

自受限空间顶部以下 50 mm 开始, 共布置了 5 个热电偶树 (1-T ~ 5-T). 热电偶均为直径 1 mm K 型铠装热电偶, 以测量火源表面、火焰以及上部热烟气层温度的演变. 自顶棚 50 mm 向下, 每个热电偶树上面第 1 ~ 第 3 个热电偶垂直间距为 50 mm , 第 3 ~ 第 5 个热电偶垂直间距为 150 mm ; 热电偶树 1-T 和 5-T 分别距受限空间两侧端面 100 mm , 其中热电偶树 3-T 位于主油盆正上方, 2-T, 4-T 和 3-T 的间距均为 800 mm , 如图 1 所示. 热电偶树 3-T 和实验模型上部三层热电偶的测量范围为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $1\text{ }300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 短期工作温度为 $1\text{ }200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 长期工作温度为 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其他热电偶测量范围为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, 误差一般在 $0.67\% t$ 至 $0.89\% \theta$ (θ 为热电偶的实测温度) 之间. 在距离实验模型底板垂直距离 150 mm 高度设置 C1, C2 两个烟气成分采样探头, 顶板下方 150 mm 处设置 C3 烟气成分采样探头, 利用 VARIO PLUS 增强型烟气分析仪进行烟气中 CO , CO_2 , O_2 和碳氢化合物成分的数据采集和分析. 热电偶、热辐射通量和烟气成分采样测点的布置见图 1.

开启受限空间两端下部两个通风口 A 和 B, 通风口尺寸均为 $1.5\text{ m} \times 0.2\text{ m}$, 见图 1. 开启排烟风机, 调整受限空间实验模型通风口 A, B 断面平均风速, 分别进行不同通风风速条件下的轰燃实验, 分析柴油在受限空间轰燃实验中能够被引燃的临界条件. 实验工况如表 1 所示. 实验中, 点燃主火源之后开始计时, 单次实验结束后, 进行通风冷却, 待受限空间室内平均温度下降到室温以后, 再进行下一组实验, 以保证实验条件的一致性.

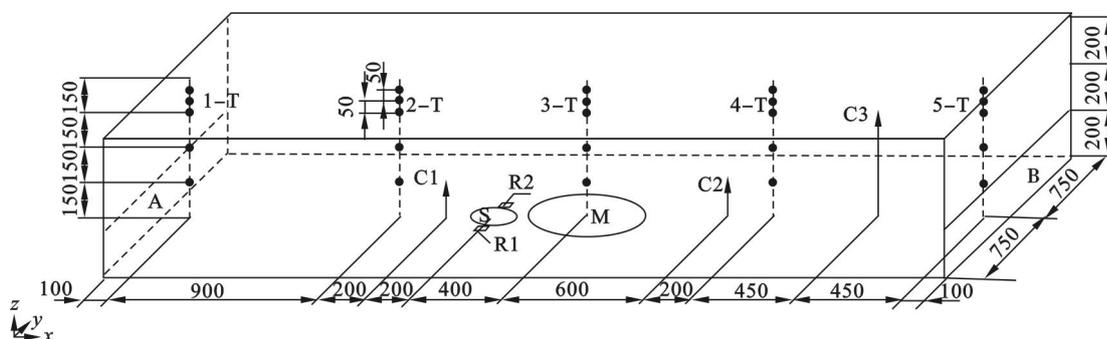


图 1 受限空间通风口设置和测点布置示意图 (单位: mm)

Fig. 1 Layout of the vents and the test points in the confined testing model

对受限空间上部 1 ~ 4 层热电偶测点的温度进行计算, 对上部热烟气层平均温度的演变规律进行分析, 见图 2. 对待引燃油盆附近地面接收到

的热辐射通量分析见图 3, 实验过程中柴油油盆附近氧气体积分数的演变如图 4 所示.

表 1 不同通风条件轰燃实验的工况表
Table 1 Testing cases of the flashover tests under different ventilation conditions

工况 序号	断面平 均风速 $m \cdot s^{-1}$	风机启 动时刻 s	主燃料 尺寸 mm	引燃 时刻 s	引燃时刻的临界参数		
					氧气体积分数 %	热辐射通量 $kW \cdot m^{-2}$	热烟气层平均温度 $^{\circ}C$
1	0	—	500	214	19.5	5.27	397
2	0.5	150	500	400	18.5	6.65	390
3	1	150	500	未引燃	—	—	—
4	0	—	400	370	20.4	4.38	364
5	0.5	150	400	未引燃	—	—	—

2 自然通风条件下引燃柴油的临界条件

从图 2 和图 3 可以看出:在一定的受限空间内,自然通风条件下,工况 1 直径为 500 mm 酒精池火实验中,受限空间上部热烟气层平均温度的温升速度以及地面所接收到的热辐射通量的增加速度远远大于工况 4 直径为 400 mm 油盆的工况. 500 mm 的油盘在点火后 214 s 即引燃了柴油,而 400 mm 的油盘引燃柴油的时刻为点火后 370 s. 如图 4 所示,工况 1 轰燃发生前氧气体积分数降低到了 18.5%,工况 4 轰燃前氧气体积分数始终在 19.8% 以上. 这是由于大尺寸火源燃烧导致空间氧气供应不足,工况 1 中 500 mm 油盆在 50 s 左右进入通风控制阶段,因此,500 mm 油盆引燃柴油时刻,上部热烟气层平均温度达到了 397 $^{\circ}C$,热辐射通量达到了 5.27 kW/m^2 (见图 3),而工况 4 临界时刻上部热烟气层平均温度为 364 $^{\circ}C$,热辐射通量为 4.38 kW/m^2 ,工况 1 比工况 4 中 400 mm 油盆引燃柴油所需的临界温度和热辐射通量各提高了约 9% 和 20%. 因此可以得

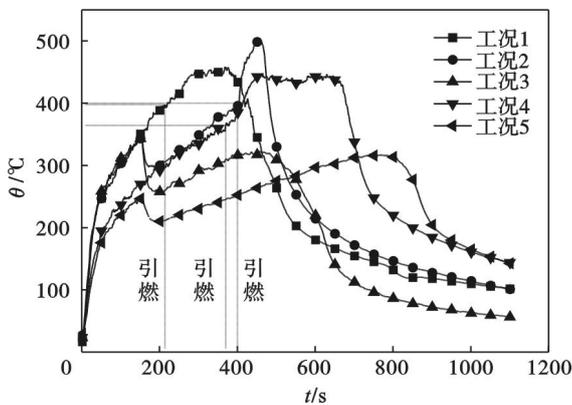


图 2 上部热烟气层平均温度
Fig. 2 The average temperature in the upper layer of the hot smoke

出:在一定的受限空间内,在能够保障燃料燃烧所需的基本氧气需要的前提下,随着主火源面积的增大,虽然引燃柴油所需时间缩短,但引燃发生时刻上部热烟气层的临界温度和地面所接收到的临界热辐射通量将随通风情况的不同而不同;对于处于通风控制阶段的受限空间而言,通风量不足,将导致引燃柴油所需热力学特性参数的临界值增大.

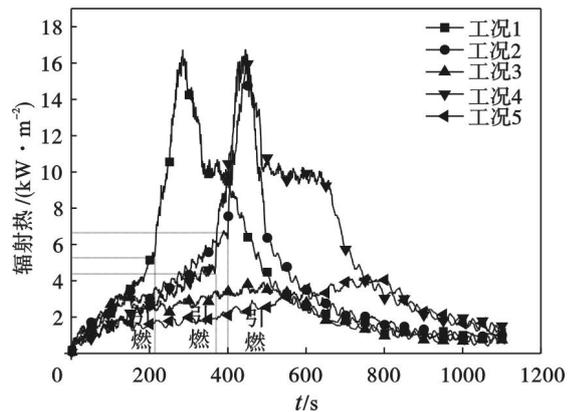


图 3 地面所接收到的热辐射通量
Fig. 3 The radiation heat flux at the floor

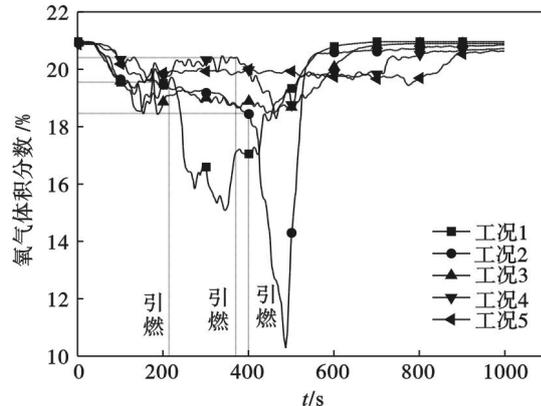


图 4 柴油燃料附近 O₂ 含量
Fig. 4 The oxygen concentration near the diesel

3 不同通风条件下引燃柴油的临界条件

改变主燃料酒精池火的直径,点火后 150 s

开启机械排烟风机,使通风口处分别保持 0.5 和 1 m/s 的平均风速,实验工况见表 1 工况 2,3 和 5. 实验结果表明,对于 500 mm 酒精主油盆而言,自然通风条件下,在 214 s 时引燃柴油;在断面平均风速为 0.5 m/s 的通风条件下,400 s 时引燃柴油;而当风速增大到 1 m/s 时,柴油未被引燃. 当酒精主火源直径减小为 400 mm 时,断面平均风速为 0.5 m/s 的通风条件下,不能引燃柴油.

对直径 500 mm 酒精主油盆在 3 种不同通风条件下引燃柴油的工况进行对比. 如图 2 和图 3 所示,启动通风以后至引燃柴油的时刻为止,受限空间上部热烟气层的平均温度以及地面所接收到的热辐射始终低于自然通风工况,风速越大,减小的幅度越大. 这是因为通风条件下新鲜空气的进入促进了燃料更加充分燃烧的同时,也增强了受限空间烟气层和火焰与外界的对流换热损失. 对于本文所建的实验模型而言,风速增加到 0.5 m/s 造成的对流换热损失已经超过了助燃的效应. 当风速继续增加到 1 m/s 时,对流换热损失远远超过了助燃的效应,上部热烟气层的平均温度已经降低到了 300 °C 以下,地面接收到的热辐射通量也小于 3.9 kW/m²,导致柴油未能被引燃. 对于工况 2 而言,150 s 开启机械通风以后,受限空间待引燃的柴油燃料附近氧气体积分数增加(见图 4):在 0.5 m/s 风速条件下,从开启通风的时刻开始至 350 s 期间内,柴油油盆附近氧气体积分数始终高于 18.7%;350 s 以后,一直到 400 s 引燃柴油时刻为止,燃料附近氧气体积分数降低到 18.5% 以下,低于自然通风情况下引燃柴油时刻的氧气体积分数,这是因为通风促进了充分燃烧造成的. 在柴油被引燃时刻,上部热烟气层平均温度达到了 390 °C,热辐射通量达到了 6.65 kW/m². 因此 0.5 m/s 通风条件下引燃柴油所需的上部热烟气层的平均温度和地面热辐射通量的指标均有所增加.

4 结 论

在一定的受限空间内,自然通风条件一定的情况下,随主火源面积的增大,柴油被引燃的时间提前;由于燃烧消耗了受限空间的氧气,引燃柴油所需的上部热烟气层温度以及地面接收到的热辐射的临界值增加. 在火源燃料量和火源直径一定

的条件下,一定范围内通风量的增加在促进燃烧的同时会造成燃料附近氧气体积分数的下降和对流换热损失增加,引燃柴油的时间和所需的热力学参数增大. 因此,一定的受限空间火灾轰燃实验中,引燃柴油所需的临界氧气体积分数、上部热烟气层平均温度和地面接收到的热辐射通量 3 个参数是互相制约的.

参考文献:

- [1] Drysdale D. An introduction to fire dynamics[M]. 3rd ed. West Sussex; John Wiley & Sons Ltd Publication, 2011.
- [2] Peacock R D, Reneke P A, Bukowski R W, et al. Defining flashover for hazard calculation [J]. *Fire Safety Journal*, 1999, 32(4): 331 - 345.
- [3] Poulsen A, Jomaas G, Bwalya A. Evaluation of the onset of flashover in room fire experiments [J]. *Fire Technology*, 2013, 49(4): 891 - 905.
- [4] Chow W K, Leung C W, Zou G W, et al. Flame spread over plastic materials in flashover room fires [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(4): 629 - 634.
- [5] Chow W K, Leung C W. Necessity of testing fire behaviour of plastic materials under flashover [J]. *Polymer Testing*, 2006, 25(6): 853 - 858.
- [6] Wang X G, Cheng X D, Li L M, et al. Effect of ignition condition on typical polymer's melt flow flammability [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 190(1): 766 - 771.
- [7] Beard A N. Flashover and boundary properties [J]. *Fire Safety Journal*, 2010, 45(2): 116 - 121.
- [8] Francis J, Chen A P. Observable characteristics of flashover [J]. *Fire Safety Journal*, 2012, 51(3): 42 - 52.
- [9] 宗若雯. 特殊受限空间火灾轰燃的重构研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2008.
(Zong Ruo-wen. Study on the re-construction of flashover fire in special limited space[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.)
- [10] 刘斌, 郑自武. 室内轰燃判据的研究[J]. *科学技术与工程*, 2009, 9(10): 2804 - 2807.
(Liu Bin, Zheng Zi-wu. Studies on predicting flashover in enclosures [J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(10): 2804 - 2807.)
- [11] 陈爱平, 宋飞. 基于混沌理论的室内轰燃判据[J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(6): 622 - 627.
(Chen Ai-ping, Song Fei. An enclosure flashover criterion based on chaos theory [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(6): 622 - 627.)
- [12] Tsai K C, Chung W T. Clarifying the mechanism of flashover from the view of unburned fuel volatiles and secondary fuels [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2649 - 2656.