两相流气体种类灭 B 类火效果的实验

杨立军 赵建波 刘宇新

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 两相流灭火系统中,气相采用不同的气体,其灭火效果不同. 研究了采用空气、氮气、二氧化碳、氩气 4 种不同种类气体条件下,两相流细水雾灭火系统在 3.6 m×4.6 m×3.9 m 的空间内,灭 0.1 MW 及 0.61 MW 方油盘火的灭火特性及规律. 实验过程中采用热电偶树和西门子气体分析仪对火焰温度及火场氧体积分数进行了测量,得到了不同气体种类条件下的细水雾灭火特性包括火焰最高温度、温度下降速率、氧体积分数下降速率、灭火时间等参数的变化规律和灭火过程中火场温度场和氧体积分数值的变化规律.

关 键 词: 两相流; 细水雾; 灭火; 气体种类

中图分类号: TU 892

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)03-0357-06

Effect of gas species on fire extinguishment using two phase flow

Yang Lijun Zhao Jianbo Liu Yuxin

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In the fire extinguishment system by using two phase flow, when the gas phase uses different gas species, the fire fighting effects are different. Four gases were used as the gas phases like air, nitrogen, carbon dioxide and argon. The experiments were conducted in a room measured by 3.6 m×4.6 m×3.9 m and the fire sizes were 0.1 MW and 0.61 MW. The type K thermal-couple tree and Siemens oxygen analyzer Oxymat-61 were used to measure the fire temperature and oxygen concentration separately. The fire extinguishment characters using two phase flow water mist under different gas phase conditions were got. The mode of actions under different gas species on fire extinguishment was concluded and the reason that the difference takes place was analyzed. Compared with the single phase flow, it shows that the fire extinguishment efficiency by using two phase flow under low system pressure is equal to single phase flow under higher system pressure.

Key words: two phase flow; water mist; fire extinguishment; gas species

从所用雾化介质类型来分,细水雾发生方法分为单相流与两相流两种方法. 单相流细水雾发生方法仍属于抑制熄灭火灾的物理方法,因此灭火效能要低于哈龙及其他化学灭火剂,在某些特殊火灾场景下的应用存在局限性. 比如难以有效扑灭障碍火,通风效果对灭火性能的影响较大,以及灭木垛火等固体深位火较为困难并易发生复燃. 因此如何进一步提高细水雾的灭火性能,扩展其应用范围,备受全球各国的重视. 其中一种办法是使用两相流体细水雾发生方法[1-5],引入惰性灭火气体,利用气体良好的空间分散性与弥散性,一方面有利于雾滴在空间的均匀分布,另一方面可以增强细水雾的物理灭火作用,同时可解决单相流雾化方法在低压雾化质量差,高压又增加工程造价成本的问题.

两相流雾化方式可分为 2 种,一种是将水和气相雾化介质同时从喷口喷出,利用压缩气体对水的剪切作用形成细水雾,水雾可以通过一个或多个喷口喷出,这种方式可以有效的控制液滴尺寸分布、雾化锥角、雾动量和流量,在低压范围内

收稿日期: 2010-11-18; **网络出版时间**: 2012-03-28 15:12

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120328.1512.005.html

作者简介: 杨立军(1970 -),男,黑龙江大庆人,教授,yanglijun@buaa.edu.cn.

即可产生第 1 级细水雾. 但这种方式喷头结构较为复杂,需要 2 套管线,很难在实际中应用.

另一种方法是在管路出口处预设一雾化混合器,在雾化混合器中气体将水雾化,形成气液均相雾状流,进行同管输送. 这种方法不仅能达到使用两套管路所达到的低压即可雾化的要求,而且使管路简化成一套,亦使喷头结构大大简化.

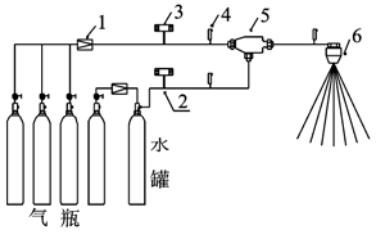
从以上分析来看,两相流细水雾灭火系统,特别是气液同管雾状流输送方法的两相流细水雾灭火技术的研究,具有广阔的发展与应用前景.

在两相流灭 B 类火系统中,气相采用不同的气体,对灭火效果的影响是不同的,在以往有关用两相流灭 B 类火灾的研究中,大多采用空气和氮气进行灭火[6-7],并得出在相同的情况下,氮气比空气更容易灭火的结论,而对其他气体的研究则较少. 本文针对这种现象,采用空气、氮气、二氧化碳、氩气 4 种气体进行灭火实验,具体研究 4 种气体在灭火时所表现出的差异.

1 两相流实验及测量系统

1.1 两相流灭火系统

图 1 为实验所采用的气液两相流灭火系统.



1—减压阀;2—LWGY 液体流量计;3—热式气体流量计;4—压力传感器;5—雾化混合器;6—喷头. 气与水在雾化混合器内部剪切雾化,形成雾状流, 从喷头处喷出实现灭火.

图 1 两相流灭火系统原理图

细水雾喷头由 7 个拉瓦尔喷嘴组合而成,喷嘴喉部直径为 1.2 mm. 此喷头的喷雾锥角为 90°.

此细水雾喷头不同压力下的流量如表 1 所示. 细水雾雾滴索泰尔平均直径 D_{32} 采用 DANTEC 相位多普勒粒子分析仪 PDA 进行测量,见表 1. 采用两相流细水雾在中压条件下即可形成粒径小于 100 μm 的细水雾,其雾化效果要好于高压单相流细水雾系统.

表 1 两相流细水雾特性测量结果

水压/MPa	气压/MPa	水流量/(kg·s^{-1})	气流量/(kg·s^{-1})	气液比/%	D_{32}/μm
2	1.6	2.49	0.228	9.16	52.7
3	2	3.76	0.238	6.33	43.4

细水雾雾通量采用集水盘在距离喷头 2.5 m 处测量,集水盘尺寸为 340 mm × 240 mm($L \times W$),集水盘布置如图 2 所示,共 5 行,每行 9 个集水盘. 测量时,开启两相流细水雾系统,喷雾 4 min,测量每个集水盘内的水量并转化为雾通量. 测量结果如图 3、图 4 所示.

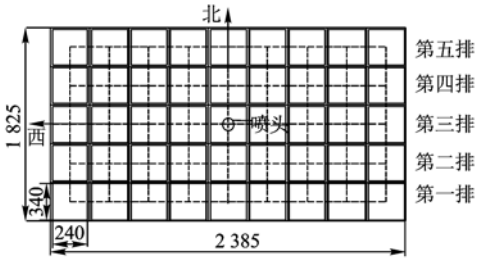


图 2 喷头集水盘布置方案

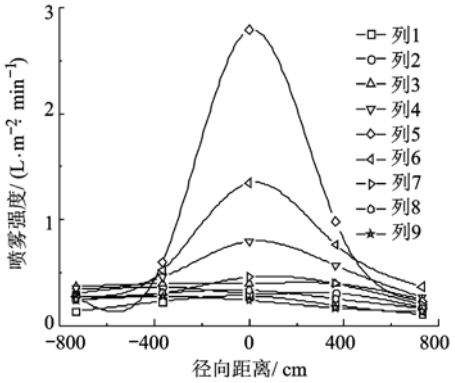


图 3 水压 2 MPa、气压 1.6 MPa 条件下雾通量分布

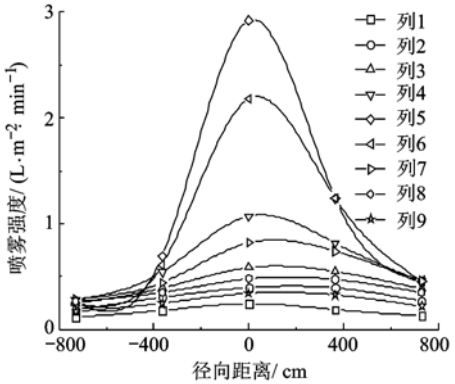


图 4 水压 3 MPa、气压 2 MPa 条件下雾通量分布

1.2 测量仪器

油盘火温度采用 K 型热电偶进行测量. 氧体积分数采用西门子 Oxymat61 氧气分析仪进行测量[8]. 氧体积分数测量采用在测量点处抽取气体,经过滤干燥后进入氧气分析仪. 测量仪器精度见表 2. 热电偶和氧气分析仪通过计算机数据采集系统进行处理. 气流通过采样管的时间为 10 s,因此氧体积分数值与温度测量值相比存在滞后误差 10 s[9].

表 2 测量仪参数

测量仪器	响应时间	测量范围	测量精度
热电偶	100 μs	0 ~ 1 100 ℃	±825 ℃
氧气分析仪	1s	0 ~ 25%	2×10^{-7}

1.3　实验过程

灭火空间尺寸为 3.6 m × 4.6 m × 3.9 m,见图 5. 单喷头被固定在吊顶正中央,喷头出口处距离油盘油面 2.5 m,方油盘被放置在单喷头的正下方.

油盘被放置在 250 mm 高的架子上,正庚烷液面距油盘口上边缘 50 mm. 油盘内下层为清水,量取纯度为 99.99% 的正庚烷 3L 加入到油盘中[10]. 实验采用两种热释放率方油盘,一种为 0.1 MW,一种为 0.61 MW,每种气体实验至少 3 次.

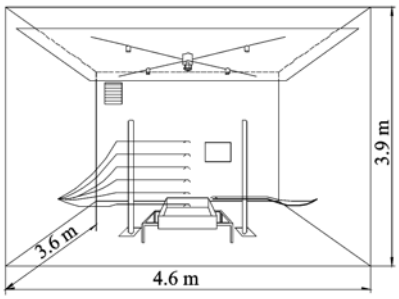


图 5　灭火空间布置图

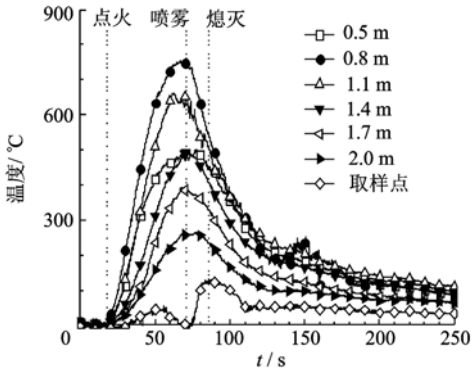


图 6　火焰温度曲线

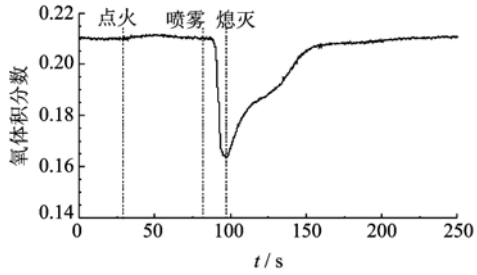


图 7　氧体积分数曲线

实验时,点燃油盘火,保持房间门开启并预燃一段时间. 之后先开启水路阀门,再开启气路阀门,当细水雾由喷头喷出后关闭房间门. 火焰被扑灭后打开房间门和风机进行通风,使房间内温度和湿度恢复到实验前状态. 再次点燃油盘内燃料,如果能成功点燃则表明灭火成功[11].

2　实验结果及分析

油盘功率对细水雾灭火效果影响很大. 当油盘功率较小时,火焰难以被扑灭,为检验两相流细水雾灭火效果及其有效性,采用两种功率油盘:①0.1 MW小功率方形油盘;②0.61 MW 中等功率尺度方形油盘.

实验采用两种方案. 第 1 种方案所用油盘功率为 0.61 MW、水压 2 MPa、气压 1.6 MPa、预燃 50 s;第 2 种方案所用油盘功率为 0.1 MW、水压 3 MPa、气压 2 MPa、预燃 35 s.

图 6、图 7 为气相采用空气时典型的灭火温度及氧体积分数曲线. 从图中可以看出,整个过程分为 3 段,从点火到喷雾为自由燃烧阶段,此段温度均匀升高,氧体积分数由于门处于打开状态,不断有氧气进行补充,所以氧体积分数保持不变;从细水雾作用到火焰熄灭为灭火阶段,此阶段火焰温度与氧体积分数均急速下降;火焰熄灭后为环境恢复阶段,由于门处于打开状态,此阶段温度逐渐降低到室温,氧体积分数也逐渐升高到环境氧体积分数.

将每次实验均按图 6、图 7 整理成温度和氧体积分数曲线图,从中提取数据点,将相同气体的实验数据取平均值. 图 8 为 0.61 MW 条件下不同气体种类下火焰最高温度,不同雾化气体最高温度相差 8%,并不明显. 这是因为最高温度主要和预燃时间有关,在相同的预燃时间条件下,火焰最高温度理论上应该相同,之所以存在微小差异是由于实验系统误差造成的. 从图 9、图 10 中可以看出,不同气体种类下灭火点温度变化不大;而灭火时间氮气最小,氩气最大,但之间相差仅有 9.2%,这说明无论是何种气体,在温度下降到一定值时火灾就熄灭. 图 11 为不同气体种类下温度下降速率,从图中可以看出,空气的温度下降速率最小,二氧化碳的温度下降速率最大. 这是因为空气含有氧气,在灭火时,一方面空气所携带的雾状流的水蒸发成水蒸汽,带走热量,使温度降低;另一方面,空气所携带的氧气加强了火焰的燃烧,使温度升高. 两方面相比较,虽然水蒸发吸热降温为主要作用,但是与惰性气体相比,其温度下降趋势必然减缓,导致其温度下降率较小. 而二氧化碳之所以温度下降率较大,这是因为二氧化碳的喷出温度很低,只有 −8 ℃左右,而其他气体的温度则为环境温度,所以二氧化碳对空间及火焰的冷却效果要好于其他气体,导致其温度下降率较大.

图 12 为 0.61 MW 条件下不同气体种类下灭火点氧体积分数,从中可以看出,灭火点氧体积分

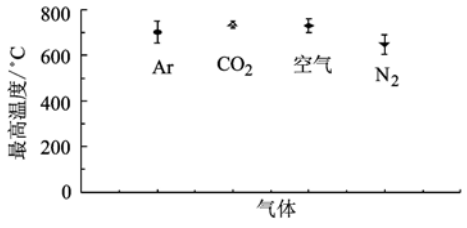


图 8 0.61 MW 火焰最高温度

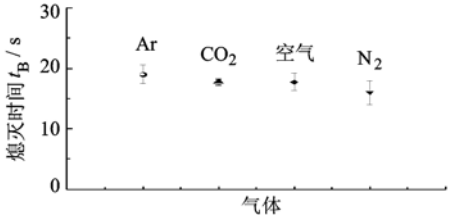


图 9 气体种类对灭火时间的影响

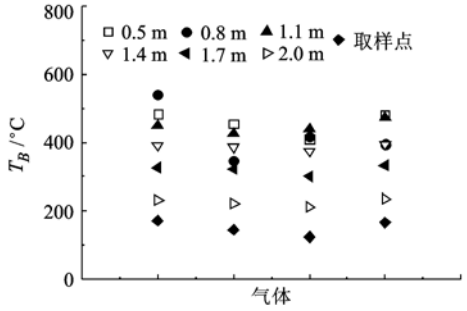


图 10 气体种类对不同位置火焰温度的影响

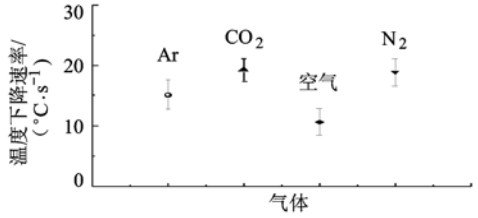


图 11 气体种类对温度下降速率的影响

数二氧化碳最低,最高的为氮气,这与文献[7]所述灭火时氮气氧体积分数低于二氧化碳有出入,文献[7]并没有就此现象做出解释,事实是在灭火过程中,二氧化碳由于其密度较大,又兼其在水中的溶解性较高,所以其喷射时,将水雾喷入火焰中的同时,其气体也在火焰周围沉淀,使得火焰不能顺利的从周围空气中卷吸新鲜氧气,导致其灭火时氧体积分数较低,氩气与二氧化碳的机理相同,也是一种密度大于空气的惰性气体,所以其灭火点氧体积分数与二氧化碳相差不大. 而氮气由于其密度比空气要轻,而本文氧体积分数测点偏下,氮气在灭火时被上升的热气流带入上空,使其不能顺利到达测氧点处,导致氮气的灭火点处其氧体积分数较高.

而从图 13 不同气体种类下氧体积分数下降速率图中可以看出,氮气的氧体积分数下降速率最小,二氧化碳的最大. 这仍然是因为二氧化碳的密度较大,隔氧效果最明显,在由于水蒸发所引起的氧体积分数下降相同的情况下,隔氧效果越明显,其氧体积分数下降速率越快. 图 13 与图 12 相对应,灭火时间相差不大情况下,氧体积分数值越高,则氧体积分数下降速率越低.

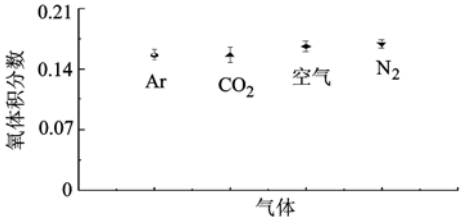


图 12 气体种类对氧体积分数的影响

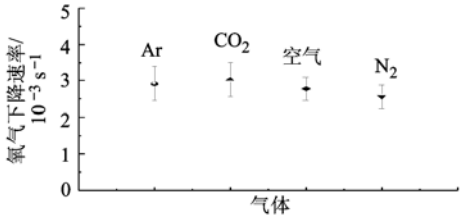


图 13 气体种类对氧气下降速率的影响

图 14 ~ 图 19 均是在 0.1 MW 油盘功率条件下进行灭火实验所得的数据,本文氮气数据为开门时测得的数据,关门时氮气三次均未灭火. 在此种情况下,不同气体种类下火焰最高温度、灭火点各测点温度值相差不大,其原因与 0.61 MW 条件下相同,本文不再赘述,如图 14、图 16 所示.

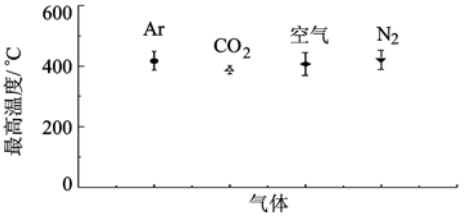


图 14 气体种类对火焰最高温度的影响

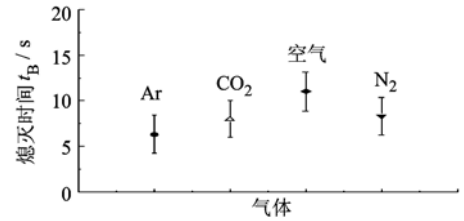


图 15 气体种类对灭火时间的影响

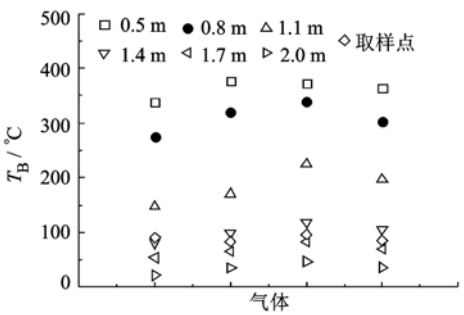


图 16 气体种类对不同位置温度的影响

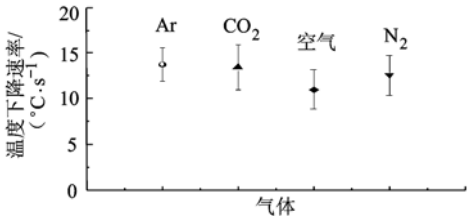


图 17　气体种类对温度下降速率的影响

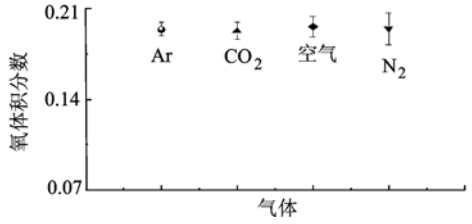


图 18　气体种类对氧体积分数的影响

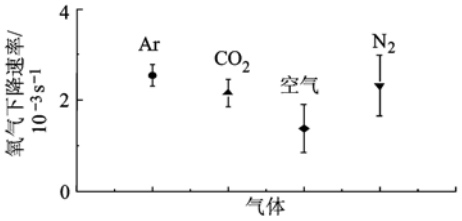


图 19　气体种类对氧体积分数下降速率的影响

从图 15 中可以看出,此时空气灭火时间最长,但是仍然可以熄灭. 从图 17 不同气体的温度下降速率可以看出,空气的温度下降速率最低,其次为氮气. 空气中含有氧气,细水雾和空气高速喷射至油盘处,因此其氧体积分数下降速率最低;氮气灭火条件为开门情况下强制通风,氧气的参与提高了火焰的温度,使得其温度下降速率较慢. 而从图 18 不同气体条件下,灭火点氧体积分数值可以看出,二氧化碳的最低,空气最高,差别已经很小,仅为 1%. 从图 19 中可以看出,氧体积分数下降速度空气仍然最小.

这些变化规律与 0.61 MW 的变化规律是一样的,本文关键点是在 0.1 MW 下氮气在密闭空间内并未发生灭火,而同等条件下,空气却能灭火,开门情况下氮气依然能灭火. 这几种情况的不同点在于:空气与开门情况下均给火焰中带来了氧气,强化了燃烧. 这表明两相流系统当采用氮气作为雾化气体时,如果开始不能一下把小油盘火吹灭,则只靠细水雾的冷却作用很难将火熄灭;而当有氧气通往时,增大了火焰燃烧温度和火焰面积,使得其细水雾蒸发更加充分,虽然火焰温度升高,但强化了蒸发,反倒可以灭火,而在同等条件下,氩气和二氧化碳均可以灭火,是因为他们的密度比空气要大,在灭火时覆盖在火焰周围,使得火焰燃烧减缓,既而发生灭火. 这种现象只是根据实验现象所进行的推测,其正确性还有待进一步验证.

3　与单相流灭火效果对比

文献[8]中利用单相流细水雾在不同油盘火功率条件下进行了多次灭火实验. 在单喷头灭火情况下,将 0.1 MW 和 0.61 MW 方油盘单相流灭火实验与两相流灭火实验进行对比.

图 20 为 0.1 MW 工况下单相流与不同气相两相流灭火点温度与氧体积分数关系,图 21 为 0.61 MW 工况下灭火点温度与氧体积分数关系,图 22 为 0.1 MW 和 0.61 MW 工况下单相流与不同气体种类条件下两相流灭火时间对比图.

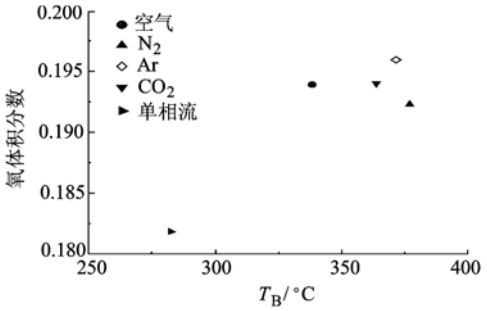


图 20　0.1 MW 灭火点温度跟氧体积分数关系

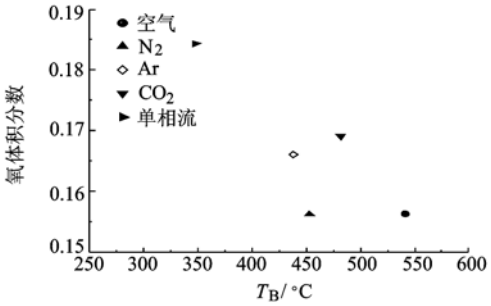


图 21　0.61 MW 灭火点温度跟氧体积分数关系

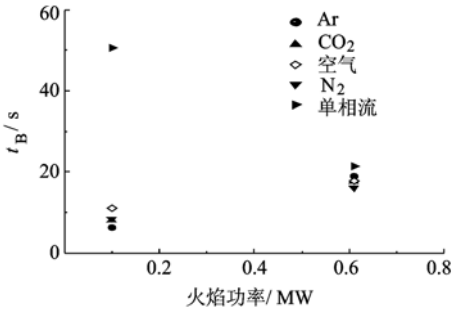


图 22　单相流与两相流灭火时间对比

从图 20 中可以看出,油盘功率为 0.1 MW 工况下,采用两相流灭火时,在灭火时刻火焰温度跟氧体积分数都处于比较高的水平下火焰即可熄灭. 这一点在火焰熄灭过程中比较有利. 在火焰温度跟氧体积分数下降速率基本相同的情况下,可大大缩短火焰熄灭时间,提高灭火效率. 从图 22 中火焰熄灭时间也可以看出,采用两相流时灭火时间约为 10 s,远远短于采用单相流灭火所需的 50 s. 因此采用两相流细水雾灭小功率油盘火时其

效率远高于单相流细水雾. 原因是采用两相流细水雾灭火时,虽然压力较低但是其雾化效果要好于高压单相流,雾滴直径更小因此其吸热效率高;同时两相流中的惰性气体也参与灭火,起到隔绝氧气和降低反应速率的作用. 在此两方面因素的共同作用下,火焰可在短时间内熄灭.

从图 21 中可以看出,油盘功率为 0.61 MW 工况下,采用两相流时火焰温度要高于单相流时火焰温度;而氧体积分数却低于单相流时的氧体积分数. 这是因为两相流采用惰性气体(不包括空气),除细水雾蒸发外惰性气体能更好的稀释氧体积分数. 细水雾灭火机理一是细水雾蒸发吸热,二是水蒸气稀释氧体积分数. 因此温度和氧体积分数为火焰的两个状态变量,当氧体积分数较低时火焰可在温度较高的情况下熄灭,或是火焰可在温度较低氧体积分数较高的条件下熄灭. 由此可见,火焰熄灭的主要机理仍然是吸热降温和稀释氧体积分数,在进行灭火系统设计时应以这两个方向为主要设计目标.

图 22 中,0.1 MW 条件下采用 2 MPa 两相流细水雾条件下其灭火效率为 4 MPa 高压单相流条件下灭火效率的 6 倍;0.61 MW 条件下采用 3 MPa 两相流细水雾时其灭火效率为 4 MPa 高压单相流条件下灭火效率的 1.21 倍. 结合细水雾雾滴直径的测量参数,采用两相流细水雾灭火时其在中压条件下便能达到高压(≥3.45 MPa)细水雾的雾化效果;其灭火效率高于单相流细水雾,尤其是火焰功率较小的条件下.

4 结 论

两相流灭火系统中,气相采用不同的气体种类,其灭火效果不同. 本文采用空气、氮气、氩气和二氧化碳在 0.1 MW 和 0.61 MW 火焰功率条件下进行了多次实验,利用灭火时间来判定各类气体的灭火效果,并分析了气体种类对灭火点氧体积分数、温度及各参数下降速率的影响. ①不同气体种类灭 0.61 MW 油盘火时灭火点温度差别不大,而灭火时间相差仅为 9.2%,这说明无论是采用何种气体,在火焰温度下降到一定值时火灾就熄灭. ②两相流系统灭小功率油盘火时,灭火效果为氩气 > 二氧化碳 > 氮气 > 空气,惰性气体也参与灭火. 当采用氮气作为雾化气体灭小功率油盘火时,如果开始不能把小油盘火吹灭,则只靠细水雾的冷却作用很难将火熄灭. ③两相流细水雾灭火系统其效率高于单相流细水雾,尤其在油盘功率较小的情况下. 其原因在于两相流细水雾灭火系统其雾化效果要好于单相流灭火系统,雾滴更小且其蒸发速率远高于单相流灭火系统. ④进行细水雾灭火系统设计时,应以稀释氧体积分数和吸热降温两个方面作为共同设计目标.

参考文献(References)

[1] Mohan B R, Jain R K, Meikap B C. Comprehensive analysis for prediction of dust removal efficiency using twin-fluid atomization in a spray scrubber[J]. Separation and Purification Technology, 2008, 63: 269 – 277

[2] Ferreira G, Garcia J A, Barreras F, et al. Design optimization of twin-fluid atomizers with an internal mixing chamber for heavy fuel oils[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90: 270 – 278

[3] Fattah A A. Numerical and experimental study of turbulent impinging twin-jet flow[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 31: 1061 – 1072

[4] Lecaros M, Elicer-Cortes J C, Fuentes A, et al. On the ability of twin jets air curtains to confine heat and mass inside tunnels [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, 37: 970 – 977

[5] Karnawat J, Kushari A. Controlled atomization using a twin-fluid swirl atomizer[J]. Experimental Fluids, 2006, 41: 649 – 663

[6] 余永刚,冯金莉. 细水雾与液体燃料火焰相互作用的小尺度实验研究及简化模型[J]. 热科学与技术, 2007, 6(1): 85 – 90
Yu Yonggang, Feng Jinli. Small-scale experiments and simplified model on water mist interaction with liquid pool fires[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2007, 6(1): 85 – 90(in Chinese)

[7] 黄鑫. 气泡雾化细水雾灭火有效性模拟研究[D]. 合肥:中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 2007
Huang Xin. Study on the fire extinguishing efficiency of water mist produced by effervescent atomizer[D]. Hefei: State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, 2007

[8] 杨立军,廖圣洁,富庆飞,等. 油盘火热释放率影响细水雾灭火特性实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(5): 537 – 540
Yang Lijun, Liao Shengjie, Fu Qingfei, et al. Experiment of heat release rate of pool fire effect on water mist fire suppression[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(5): 537 – 540(in Chinese)

[9] 杨立军,赵建波,刘宇新. 两相流细水雾灭 B 类火实验研究[J]. 消防科学与技术, 2011, 30(8): 671 – 675
Yang Lijun, Zhao Jianbo, Liu Yuxin. Experiments on two phase flow water mist extinguishing class B fire[J]. Fire Science and Technology, 2011, 30(8): 671 – 675(in Chinese)

[10] UL2167, Water mist nozzles for fire protection service[S]. North Carolina, USA: Underwriters Laboratories Inc, 2004

[11] 杨立军,王向东,廖圣洁,等. 油盘形状对细水雾灭火效果影响的研究[J]. 消防科学与技术, 2008, 27(1): 37 – 41
Yang Lijun, Wang Xiangdong, Liao Shengjie, et al. The effect of pool shape on water mist fire suppression[J]. Fire Science and Technology, 2008, 27(1): 37 – 41(in Chinese)

(编 辑:张 嵘)