



# 灭火剂流动与喷雾同步表征实验装置与 教学设计

倪小敏<sup>1</sup>, 郑 重<sup>2\*</sup>

(1. 中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026; 2. 中国科学技术大学 微电子学院, 合肥 230026)

**摘要:** 针对气体灭火剂肉眼不可见的特性, 设计了灭火剂流动与喷雾同步可视化表征实验装置并开展实验教学。通过电容层析成像和激光阴影成像方法, 直观显示灭火剂在管路内的流动形态及其在管路出口处的喷雾结构; 采用高频温度和压力传感器, 同步获取喷射系统内温度和压力的精细变化。基于该装置开展实验教学, 帮助学生完整了解气体灭火剂的释过程, 掌握相关特性参数的测试方法, 培养其学科交叉理念和协作创新精神。

**关键词:** 灭火剂; 流动; 喷雾; 可视化; 表征; 实验教学

中图分类号: O348.1

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230503

## An Experimental Apparatus for Simultaneous Characterization of the Flow and Spray of Fire Suppressants and Its Teaching Mode Design

NI Xiaomin<sup>1</sup>, ZHENG Zhong<sup>2\*</sup>

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

2. Microelectronic School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The design of an experimental apparatus and its teaching mode are proposed for simultaneously visualizing the flow and the spray of gaseous fire suppressants, whose flow is complex and invisible. With electrical capacitance tomography and laser shadowgraphy, the flow pattern in the pipe and the structure of the spray out of the nozzle is visualized. Meanwhile, the details of the temperature and pressure in the discharging system are acquired synchronously by the sensors with high sampling frequency. Conducting experimental teaching on this apparatus, students could observe directly the discharging process of fire suppressants, master the measurement methods of the related key parameters, and develop interdisciplinary concepts and innovative spirits.

**Key words:** fire suppressant; flow; spray; visualization; characterization; experimental teaching

气体灭火剂通常加压存储在储罐中, 使用时由高压驱动经管路释放到防护空间。灭火剂在管路内的流动行为及其出口喷雾特性直接影响其在空间的浓度分布, 进而影响其灭火效能。掌握灭火剂的管路流动及出口喷雾特性对于灭火系统的优化设计具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

在常见的气体灭火剂中, 除氮气等惰性气体外, 哈龙(Halon)、七氟丙烷(HFC-227ea)等在加压时都会被液化, 以液态的形式存于储罐当中。一旦阀门打开, 压力降低, 管路内的流体及出口

喷雾的相态、温度、压力、结构等都会迅速变化。由于气态灭火剂肉眼不可见且流动复杂<sup>[3-4]</sup>, 常规的表征手段无法直接捕捉到这些变化, 其特性参数也很难获取。

实验是开展火灾科学研究的重要手段, 实验教学在培养学生的动手能力和创新精神方面具有不可替代的重要作用<sup>[5]</sup>。灭火剂流动与喷雾是火灾安全专业研究生基础课程“灭火技术原理与应用”的重要组成部分, 同时也涉及该专业高年级本科生必修课“热安全工程实验技术”的教学内

收稿日期: 2023-10-25

基金项目: 安徽省质量工程项目(2022jyxm1830, 2022jyjxggyj021); 国家自然科学基金(U1933126); 中国科学技术大学教研项目(2021xkcszxm04)。

作者简介: 倪小敏, 博士, 高级工程师, 主要从事激光流场诊断与灭火技术方面的研究。E-mail: nxmin@ustc.edu.cn

\* 通信作者: 郑重, 硕士, 讲师, 主要从事微纳电子器件研究。E-mail: zozheng@ustc.edu.cn

容。但这些课程常偏重于课堂理论讲授, 实验教学较少, 学生因缺乏直观体验而难以深入理解枯燥抽象的理论, 学习的主动性和积极性不高。

针对现有课程教学中存在的问题, 同时为使课程内容紧跟研究前沿, 发挥科研装置对教学的促进作用, 研制了灭火剂流动与喷雾特性同步可视化表征实验装置。通过耦合多种先进的测试仪器, 设计了系列教学实验项目, 让学生直接观察灭火剂的释放过程, 体验前沿实验技术的应用, 以充分激发学生的学习兴趣, 培养他们学科交叉的理念, 弥补现有课程教学中的不足, 提升课程教学质量。

## 1 实验装置

### 1.1 装置结构

灭火剂流动与喷雾同步表征实验装置如图1所示, 主要包括灭火剂喷射系统、管路流动特性表征系统和出口喷雾特性表征系统3个部分<sup>[6]</sup>。

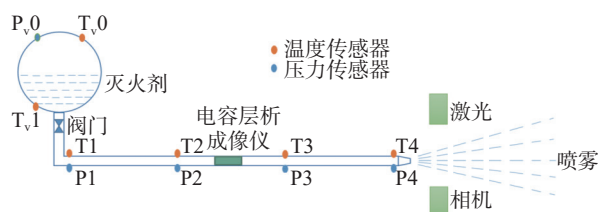


图1 灭火剂流动与喷雾特性同步表征实验装置结构示意图

灭火剂喷射系统由球形储罐、水平直管、喷嘴以及连接储罐和管路之间的瓶头阀构成, 整个喷射系统通过支架固定在离地面 60 cm 的高度。灭火剂从储罐流经管道直至出口喷雾是一个连续过程, 在对其管道流动行为测量的同时, 对出口喷雾特性进行表征, 管道内外的测试系统同步工作; 灭火剂管道流动特性表征由温度和压力同步采集系统及电容层析成像仪组成。储罐和管路内的温度变化采用快响应热电偶进行测量。储罐的上方和底部各设置一个温度测点( $T_{v0}$ ,  $T_{v1}$ ), 其余按灭火剂流动方向等距设置在管路上( $T1\sim T4$ )。采用压阻式单晶硅膜片压力传感器测量喷射系统内的压力, 测点分别设置在储罐上方( $P_{v0}$ )以及与温度测点对应的管路另一侧( $P1\sim P4$ )。温度和压力数据同步以 4096 Hz 的频率进行采集。电容层析成像仪(electrical capacitance tomography, ECT)用于表征灭火剂在管路内的流形, 图片采集频率为

120 f/s。出口喷雾特性表征系统为激光阴影成像仪(shadowgraphy), 重复频率为 10 Hz, 用于喷雾结构表征以及雾滴粒径与速度同步测量。所采用的灭火剂为 Halon1301(三氟一溴甲烷)和 Novec1230(全氟己酮)。各表征系统的实物如图2所示。

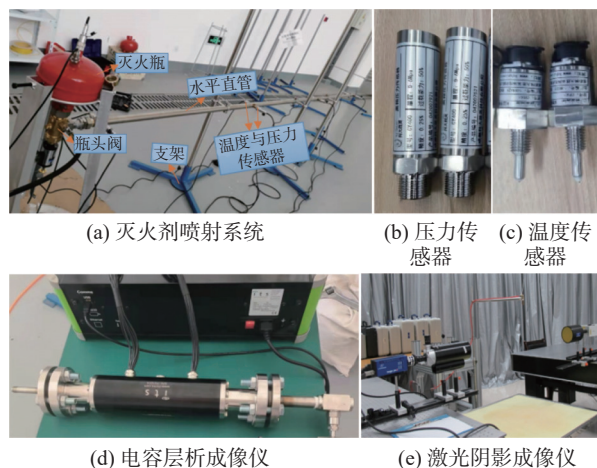


图2 表征系统实物图

### 1.2 实验步骤

实验步骤主要分为以下3步。

1) 装置搭建完成后, 首先进行气密性检查、测量系统预热、传感器标定等实验准备; 然后用真空泵将系统抽真空, 加入预设质量的灭火剂, 再用氮气加压至预定压力, 关闭阀门, 将灭火剂存储在储罐中。

2) 先开启各测量系统, 再启动电磁阀, 打开灭火剂喷射阀门, 灭火剂开始释放。

3) 待喷嘴处的喷雾消失, 储罐上的压力传感器显示瓶内压力为常压并稳定时, 表明灭火剂喷射结束, 停止数据采集, 保存测量数据。

## 2 实验教学项目设计

### 2.1 灭火剂管路流动特性表征

#### 2.1.1 温度与压力同步测量

系统中的高压是灭火剂喷射的动力源, 一旦阀门打开, 灭火剂快速释放, 整个喷射过程只有几秒的时间, 但其中却发生了复杂的传热、流动。只有采用快响应的温度和压力同步采集系统才能捕捉到细微的变化。

2.0 kg 的 Halon1301 灭火剂在 1.8 MPa 的起始压力下喷射时所记录到的温度和压力曲线如图3所示。

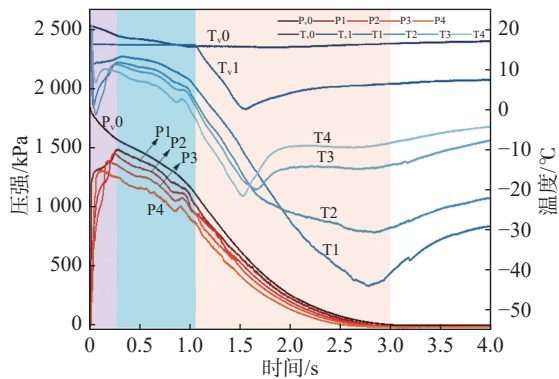


图3 Halon1301 灭火剂喷射时系统中的温度和压力变化曲线

从图中可以看出, 整个喷射时间约 3.0 s。虽然系统整体压力逐渐降低, 但储罐和管路中的压力变化趋势不同。储罐中的压力( $P_0$ )随着时间单调降低, 而管路中的压力( $P_1 \sim P_4$ )却经历了先急剧增加, 再缓慢波动性下降, 最终又持续下降的过程, 呈现山峰形的曲线。在 0.3~1.1 s 的中间阶段, 瓶中和管道中的压力曲线都出现了如蓝色区域所显示的下落速度明显减小的“缓坡”, 这是由于系统压力的降低, 液态的 Halon1301 不断气化, 部分抵消了系统内的压力下降, 也反映了此阶段管路中的灭火剂呈现气-液两相的流动状态<sup>[7-8]</sup>。随着液体不断气化, 最终液态消失, 灭火剂完全变为气态, 系统压力连续下降(黄色区域)。图中的蓝色曲线为与压力相对应的温度数据。管道中的温度曲线中有两个波谷, 第一次发生在起始约 30~40 ms 处, 这是因为储罐中高压的液态 Halon1301 刚进入处于常压的空管道中, 发生闪蒸而导致的温度下降; 第二次则是发生在喷射快结束时, 所有的液体都变为气体, 管路中呈

现单一的气相流动时, 气体膨胀做功导致的温度下降。在灭火剂喷射过程中, 同步实时显示的温度和压力曲线, 反映了系统内灭火剂从液态(粉色)到气液两相(蓝色)再到气相(黄色)的三阶段变化过程。在起始阶段的极短时间内, 所记录到的管路温度急剧下降和压力快速上升现象, 为相关数值模型的优化提供了重要的实验参数<sup>[6,9]</sup>。

### 2.1.2 流动形态的表征

通过温度压力曲线可以间接推断灭火剂在系统中的流动状态, 而电容层析成像仪则可以直观地给出灭火剂在管路中的两相流结构。电容层析成像是基于被测物质各相的介电常数差异, 当各相组分分布或浓度分布发生变化时, 将引起混合流体等价介电常数发生变化, 使测量电极对间的电容值发生变化; 通过测试管道横截面的电容或电阻, 重构被测物场的介电分布图, 输出实时图像, 可以得到两相或多相的占空比、均匀性、流动形态等信息<sup>[10]</sup>。

与温度压力曲线同步记录的 Halon1301 灭火剂在喷射过程中的典型 ECT 图片如图 4 所示。图标从蓝色到红色表示介电常数逐渐增大, 蓝色表示气体占位, 红色为液体占位。如图 4(b)和图 4(c)所示, 在喷射起始阶段, Halon1301 液体主要位于管道下方, 气体占据上方, 表现为层流; 随后 ECT 截面呈现内蓝外红的环形, 表明气液两相由层流转变为环流, 如图 4(d)和图 4(e)所示; 最后又变为单一气相流动如图 4(f)所示, 整体表现出水平管路中的气液两相流的典型特征<sup>[11]</sup>, 这也与由温度和压力曲线所推断的灭火剂管道流动变化过程相吻合。

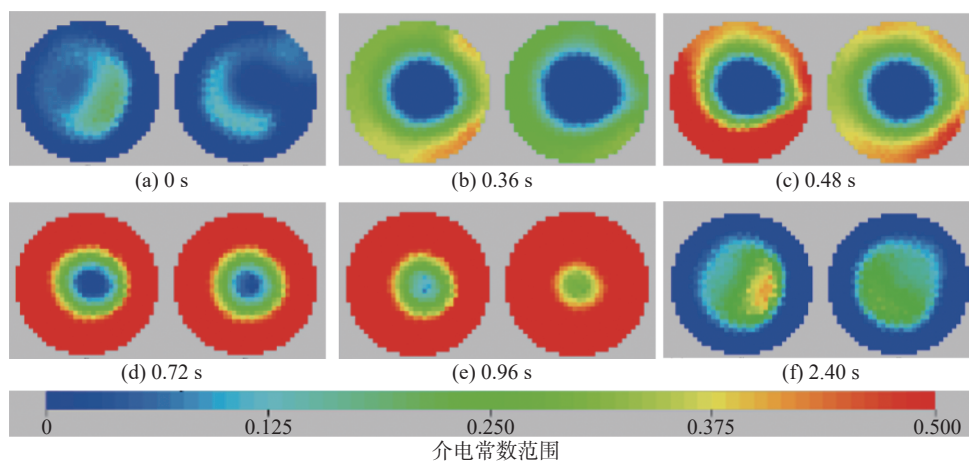


图4 Halon1301 灭火剂喷射过程中的典型 ECT 图片

## 2.2 出口喷雾特性表征

### 2.2.1 喷雾结构表征

采用脉冲激光照亮喷雾, 并通过相机同步拍摄喷雾阴影, 可以从二维平面上直观观察喷雾结构。不同时刻的 Halon1301 喷雾典型图片如图 5 所示。喷雾锥角随时间逐渐变小, 喷雾外围由于空气扰动和液滴的挥发, 呈现紊乱的状态。起始阶段的喷雾非常密集, 后逐渐稀薄并呈现出外围为液滴, 中心为气体的环状喷雾结构, 最后液滴消失, 喷出物全部是气体。这也与上述灭火剂的管路内流动行为相对应, 显示了喷雾与流动之间的内在联系。

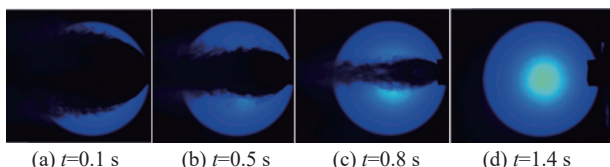


图 5 不同时刻被激光片光照亮的 Halon1301 喷雾效果图

### 2.2.2 雾滴粒径与速度同步测量

对于 Novec1230 等常温常压下为液体的高沸点气体灭火剂, 还可以采用阴影成像法表征喷雾粒子的粒径和速度<sup>[12]</sup>。阴影法主要基于背光成像技术, 用相机记录下被激光照亮粒子的背面阴影图像; 通过预先标定, 软件可以算出所识别的粒子的尺寸; 采用双脉冲激光, 则可以根据粒子追踪测速的方法测出粒子速度。采用激光阴影法得到的 Novec1230 雾滴的阴影图片及其粒径和速度如图 6 所示。

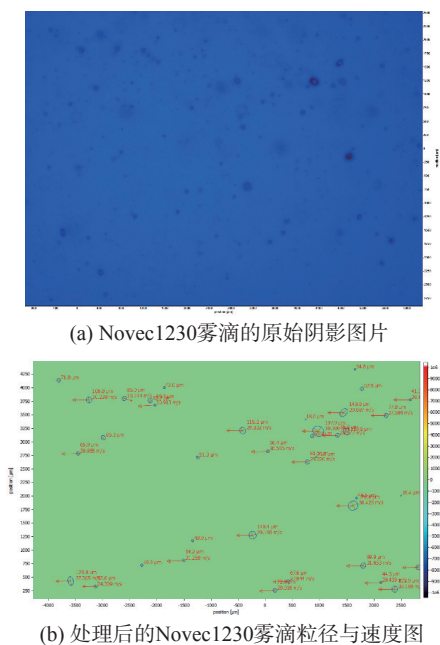


图 6 Novec1230 雾滴的阴影图

## 3 实验教学模式

### 3.1 实验教学流程

由于该装置属于大型实验装置, 价格昂贵且只有一套, 因此课堂教学需要以教师统一讲授, 学生分组轮流开展实验的模式进行。具体教学流程分为以下 3 个步骤。

#### 1) 课前预习

为提高课堂教学的效率, 教师预先将装置相关资料和仪器操作的视频发给学生, 让学生提前预习, 了解相关实验原理和操作方法, 做到胸中有数。

#### 2) 分组实验

在实验课堂上, 教师先示范演示, 再让学生分组轮流开展实验, 完整了解灭火剂输运和释放的全过程。各组实验并不是重复的, 而是基于同一装置分别设置不同的工况条件, 如改变灭火介质的种类、充装密度及充装压力等, 方便学生比较不同参数条件下各灭火介质流动和喷雾特性差别, 各组的实验数据上传到平台共享。作为课后作业, 学生在实验报告中需要对多组实验数据进行分析, 探究不同灭火介质在不同工况条件下的流动和释放规律和机理。

#### 3) 课后交流

实验结束以后, 安排课时进行交流讨论, 各组同学进行汇报交流, 总结实验得失, 并分享自己的感悟。学生在实验协作中培养了团队精神, 在相互讨论中拓展了思维方式, 学习兴趣显著提升, 教师也从中获得了改进实验教学模式的信息启发。

### 3.2 思政元素融入

在实验教学中, 通过精心设计, 自然融入思政元素, 使其与专业内容有机结合, 以实现对学生价值观的引领。以激光测量部分为例, 开展思政教学的具体做法包括以下 3 点。

1) 介绍我国激光领域老一辈科学家们筚路蓝缕, 开辟中国激光产业发展的生平事迹, 感染激励学生, 提升他们的学习动力。

2) 融入学科前沿动态, 以阿秒激光获得 2023 年度诺贝尔奖引申开, 介绍激光技术在现代尖端科技中的应用以及我国激光技术发展中的卡脖子问题, 增强学生的使命感与责任感, 激发他

们的创新思维。

3) 教师率先垂范, 严格遵守和执行激光器使用的各项规则, 向学生阐述激光器使用不当可能会造成的不可补救的危害, 帮助学生养成良好的实验习惯, 筑牢他们的安全意识。

#### 4 结束语

本文设计的灭火剂流动与喷雾特性一体化表征实验台, 采用模块化设计, 通过耦合先进的测量表征系统, 实现对多种气体灭火介质释放全过程的同步可视化表征。基于本实验装置可以开展内容丰富的实验教学并融入思政元素, 让学生通过动手实践, 加深对灭火剂流动与喷雾相关理论的理解, 同时掌握先进的测试方法, 建立学科交叉理念, 培养安全意识。该实验平台可以开放给学生开展自主探究, 满足学生创新训练的需要, 实现高校大型实验装置的高效利用, 提高人才培养的质量。

#### 参考文献

- [1] WOMELDORF B, MITCHELL M, GROSSHANDLER M. Selection of a simulant of cF3Br for use in engine nacelle certification tests[C]//Halon Options Technical Working Conference (HOTWC), Gaithersburg: Engineering, Materials Science, 1995: 197-210.
- [2] JIN J, PAN R, LI Q, et al. Effects of release pressure on the transportation characteristics in pipeline and the diffusion behaviors in enclosure space of typical gas extinguishing agent[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021, 70: 104441.
- [3] WILLIAMSON H V. Halon 1301 flow in pipelines[C]//79th Annual Meeting of the National Fire Protection Association, Chicago: Fire Technology, 1976: 18-32.
- [4] KIM J, BAEK B, LEE J, Numerical analysis of flow characteristics of fire extinguishing agents in aircraft fire extinguishing systems[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23: 1877-1884.
- [5] 周龙, 郑岳久, 刘建国, 等. 工程教育下机械创新实验教学研究与实践[J]. 实验科学与技术, 2020, 18(3): 89-94.
- [6] NI X M, CHEN Y, HUANG Q R, et al. An experimental study on the transportation characteristics of perfluoro-(2-methyl-3-pentanone) in a straight pipe[J]. Fire, 2023, 6(4): 156.
- [7] SINGH J, ZERNA L E, PARTINGTON B, et al. Effect of nozzle geometry on critical-subcritical flow transitions[J]. Heliyon, 2019, 5(2):e01273.
- [8] CHEN Y, ZHAO C X, HUANG Q R, et al. Impact of pipe diameter on the discharge process of Halon1301 in a fire extinguishing system with horizontal straight pipe[J]. Fire, 2023, 6(8): 287.
- [9] TUZLA K, PALMER T, CHEN J C, et al. Development of computer program for fire suppression fluid flow[M]. Bethlehem: Institute of Thermo-Fluid Engineering & Science, 2000.
- [10] 姚佳烽, 车权齐, 李志伟, 等. 电容层析成像技术研究进展[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(5): 1-7.
- [11] RAJA B, LAL D M, SARAVANAN R. Flow boiling heat transfer study of R-134a/R-290/R-600a mixture in 9.52 and 12.7 mm smooth horizontal tubes: Experimental investigation[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(3): 542-550.
- [12] BLACK D L, MCQUAY M Q, BONIN M P. Laser-based techniques for particle-size measurement: A review of sizing methods and their industrial applications[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1996, 22(3): 267-306.

编辑 钟晓