

基于多因素耦合的细水雾灭火性能分析

王景鑫

浙江安防职业技术学院

摘要: 随着现代火灾对灭火技术的更高需求, 细水雾灭火技术逐渐被关注。本文围绕细水雾的特性及其灭火机制进行深入探讨, 并特别关注多因素如喷雾压力、燃料种类和管道尺寸对灭火性能的影响。通过采用大涡模拟、部分预混燃烧模型以及DPM模型, 进行了细致的数值模拟, 并与实验结果进行对比验证。研究结果显示, 各影响因素与细水雾灭火性能间存在明确的关联, 为提高灭火效果提供了重要的理论支持。

关键词: 细水雾; 灭火性能; 多因素耦合

【DOI】 10. 12252/j. issn. 2096-6288. 2022. 05. 196

引言

近年来, 随着技术的进步和对环境的日益关注, 传统的灭火方法逐渐遭到挑战。细水雾灭火技术, 以其高效、环保的特点, 成为现代灭火研究的热点。然而, 灭火效果并不仅仅由水雾的粒径决定, 而是由多个因素共同作用的结果。如何有效地结合这些因素, 优化灭火效果, 是目前面临的关键问题。

一、细水雾的特性与灭火机制

(一) 细水雾的生成与分布特性

细水雾是由大量微米级小液滴组成的水雾系统。这种细水雾的生成涉及特殊的喷嘴设计和喷射技术, 以确保生成的水雾粒径均匀并处于微米级大小。微米级的液滴尺寸赋予了细水雾极高的表面积与体积比, 这使得它在与火焰接触时具有极快的蒸发速度。此外, 细水雾的分布特性也受到其喷射动力、外部气流条件、障碍物布局以及其他环境参数的影响, 这些因素共同决定了细水雾在空间中的扩散、输送以及与火焰的相互作用过程。

(二) 细水雾灭火的基本原理

细水雾灭火的核心原理基于其细微液滴的快速蒸发能力和对火焰传热和扩散的干扰。当这些微米级的液滴被喷射到火焰区域时, 它们迅速吸收火焰的热量并转化为蒸汽。这一过程不仅降低了火焰的温度, 从而抑制了燃烧过程, 而且生成的蒸汽也稀释了火焰区的可燃物, 进一步阻止了火焰的蔓延^[1]。此外, 细水雾的高速运动与火焰中的热气流相互作用, 进一步扰乱了火焰的稳定性并促使其熄灭。

二、多因素耦合的影响

(一) 喷雾压力与细水雾粒径关系

喷雾压力与细水雾的粒径之间存在着密切的关联。一般来说, 当喷雾压力增加时, 由于流体的动能增强, 导致液滴破裂的力度增大, 从而生成的细水雾粒径相对较小。反之, 较低的喷雾压力可能会导致较大的液滴尺寸。这种关系在液滴的形成、碰撞、合并以及进一步的雾化过程中都得到了体现。对于火灾防护应用而言, 精确控制喷雾压力以获得期望的细水雾粒径范围是至关重要的, 因为液滴的尺寸直接影响到灭火效果和灭火速度。

(二) 燃料种类与细水雾灭火效果

燃料的种类对细水雾的灭火效果产生显著影响。不同的燃料, 由于其热值、蒸气压和化学性质的差异, 会展现出不同的燃烧特性和火焰形态。例如, 液态燃料通常形成大面积的火焰, 而气态燃料火焰则更为集中。这些特性决定了细水雾灭火时的水雾分布需求、蒸发速度和火焰隔离效果。某些燃料可能需要更高密度的细水雾来确保快速灭火, 而其他燃料可能受益于细水雾的快速冷却和稀释效果。

(三) 管道尺寸、形状与细水雾分布特性

管道的尺寸和形状对细水雾在其中的分布特性产生显著影响。在较窄的管道或具有复杂形态的空间内, 细水雾的流动和分布可能会受到局部气流模式、涡流生成和壁面效应的影响。较大的管道可能导致细水雾分布更为均匀, 但也可能需要更大的喷射量以确保充分覆盖。与此同时, 管道的形状, 如是否存在弯曲、收缩或扩张

区域,也会影响细水雾的输送和沉积特性^[2]。

三、数值模拟方法

(一) 大涡模拟与细水雾交互

大涡模拟(LES)是一种高精度的湍流模拟方法,它直接模拟大尺度的湍动涡旋,同时通过子网格尺度模型(SGS)来参数化较小的涡旋。在火灾爆炸相关的模拟中,LES能够捕获火焰与细水雾之间复杂的相互作用和瞬态现象。具体到细水雾的模拟,LES能够详细揭示细水雾液滴在湍流流场中的运动、蒸发、与火焰的相互作用以及其灭火效果。

(二) 部分预混燃烧模型的选择与应用

部分预混燃烧模型适用于预混和扩散燃烧之间的场景,特别是燃料和氧化剂混合不均的情况。在细水雾对火焰的应用中,因液滴蒸发和与火焰交互,传统预混模型可能不够精确。部分预混模型考虑了燃料与氧化剂的混合度,能模拟液滴蒸发、燃料扩散与火焰的互动,并捕捉由细水雾影响的化学反应变化^[3]。

(三) DPM模型在模拟超细水雾液滴中的应用

离散相模型(DPM)是一种专门模拟流体中悬浮粒子或液滴行为的数值模型,对于模拟如超细水雾这类微米级液滴特别适用。由于这些液滴的尺寸小,它们迅速响应流场并与周围环境进行积极的热量和质量交换。DPM模型可以精确捕获液滴在复杂流场中的轨迹和与气体的互动。在火灾模拟中,它能揭示液滴如何抑制火焰扩散,通过热量和质量转移实现灭火。

四、多因素耦合下的实验设计与验证

(一) 实验设备与方法

为确证数值模拟准确性及细水雾灭火效果,本研究采用了专门的实验设备。如图1所示,该设备模拟了一个密闭管道,长3000mm,截面20mm×20mm,与之前的模型相匹配。利用细水雾发生器产生微米液滴,均匀分散于管道内,模拟实际火灾环境。确保与数值模拟条件一致,实验初,管道内预填20%氮气,初始温度设为300K,压力为101.325KPa。细水雾在变化的喷雾量下进入管道。此设计确保了实验与模拟的一致性,为后续验证提供了基础,并为探究细水雾在多种条件下的灭火效

果设定了实验平台。



图1 实验环境模型

(二) 实验条件的设置

为确保实验科学、可重复性及与数值模拟的匹配度,本文设定了以下实验条件。管道的几何模型,长3000mm且宽高均为20mm,旨在仿真真实应用环境,为后续验证和应用奠定基础。考虑到真实火灾场景,我们选择20%的氮气作为初始填充介质,以达到与实际火灾背景的高度匹配。同时,严格设定了温度和压力至常规实验室条件,分别为300K和101.325KPa,确保实验起始于一个标准且可控的状态。关于细水雾的灭火效果实验,将不同喷雾量将其喷入管道,因为喷雾量的变化可以决定细水雾的分布和密度,进而测量其灭火效果^[4]。

(三) 实验数据与数值模拟结果的比对

在面临复杂的数值模拟挑战时,保证模型预测结果与实验数据的一致性显得尤为重要。本研究的重点在于比较甲烷爆炸过程的数值模拟结果与实验测量值。首先,针对爆炸压力 P_{max} 和爆炸压力上升速率 $(dp/dt)_{max}$ 这两个关键指标,实验结果如图2和表1所示,数值模拟与实验数据展现了高度的一致性。特别是在使用不同网格密度进行模拟时, P_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 的数值与实验数据相差仅为0.13%至1.2%,强烈证明了所选网格密度的合适性和准确性。

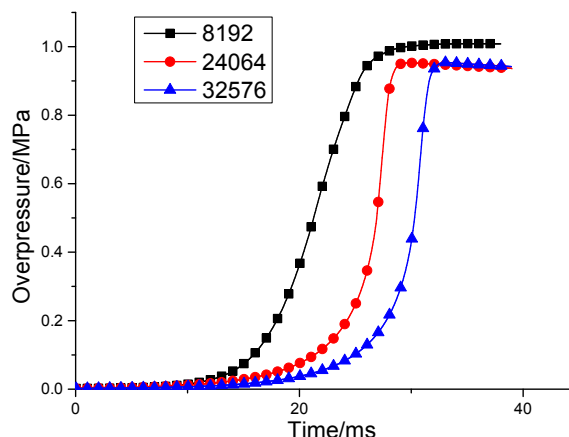


图2 不同网格模型下爆炸超压曲线

表1 不同网格类型数值模拟结果

	超疏网格	疏网格	密网格
P_{max}/MPa	1.01	0.9526	0.9538
$(dp/dt)_{max}/(\text{MPa}\cdot\text{m/s})$	0.1237	0.3757	0.3829

再观察液雾的索特平均直径的变化，可以确认数值模拟方法的精准性。实验数据如图3所示，在喷雾压力从低到高的变化中，液雾的索特直径从大到小逐渐减小，与模拟结果高度一致。此外，在整个模拟时间段，从液滴的快速破碎到后续的稳定阶段，模拟与实验数据都保持了这种一致性。

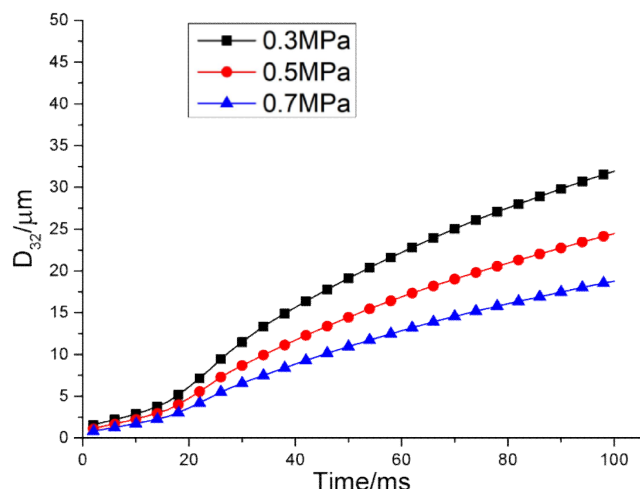


图3 不同喷雾压力下液雾索特直径随时间的变化曲线

考虑到边界和初始条件的设定，模拟中的细水雾在管道内的形成和分布过程也得到了验证。实验数据揭示，在喷雾初期，细水雾在管道内的浓度主要集中在上部，浓度达到 $80\text{g}/\text{m}^3$ 。当喷雾完成后，细水雾的分布呈现出均匀状态，与模拟结果无异。因此，以确定本文中所采用的数值模拟方法具有高度的可靠性和准确性，为火灾爆炸领域相关的进一步研究铺设了坚实基础。

五、多因素下细水雾灭火性能的分析

细水雾灭火技术在实际应用中，很大程度上取决于多种因素，其中，喷雾压力、管道设计和燃料种类都起到了决定性作用。首先，喷雾压力直接关联水雾的粒径和分布，高压喷雾能产生超细的液滴，迅速穿透火焰并冷却燃烧区域，尤其在快速传播的火焰中表现卓越。其次，管道的尺寸和形状则决定了细水雾如何分布与火焰交互。合理的管道设计能确保细水雾均匀分布，同时降低系统压力和能耗。但值得注意的是，不同的管道形态可能导致液滴的不均匀分布，因此选择合适的管道形状

和尺寸是关键。再者，不同燃料的燃烧特性对灭火策略产生了显著影响。例如，甲烷需要快速的冷却，而庚烷需要细水雾的细致分布。某些燃料，如金属粉末，与水接触还可能产生有害气体。因此，综合考虑这些因素并为特定的火灾情境制定策略是提高细水雾灭火效率和安全性的关键。

结语

本文通过深入分析细水雾的灭火性能及其与多种因素的耦合关系，为细水雾灭火技术的发展提供了重要的理论依据和实践指导。细水雾灭火机制中，不仅涉及水雾的生成与分布特性，还与火焰的交互作用机制紧密相关。同时，喷雾压力、燃料种类、管道尺寸和形状等多种因素均会对细水雾的灭火效果产生影响。

参考文献

- [1] 朱林超, 高建丰, 顾佳鹏. 细水雾灭火性能及其在油库的应用前景探析[J]. 化工管理, 2019, (9): 99-100.
- [2] 戴经天. 低压环境细水雾灭火有效性实验研究[D]. 四川: 中国民用航空飞行学院, 2019, 1-3.
- [3] 刘全义, 伊笑莹, 吕志豪等. 细水雾灭火有效性研究进展[J]. 科学技术与工程, 2019, (22): 11-19.
- [4] Ingram J M, Averill A F, Battersby P, et al. Suppression of hydrogen/oxygen/nitrogen explosions by Fine water mist containing sodium hydroxide additive[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38 (19): 8002-8010.
- [5] 廖光焯, 丛北华, 况凯骞. 铁基添加剂增强细水雾灭火性能的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26 (增刊1): 273-276
- [6] 刘江虹, 金翔, 廖光焯. 新型细水雾添加剂的制备及其灭火性能评价[J]. 中国工程科学, 2010, 12 (9): 58-62

基金项目：“浙江省教育厅一般科研项目课题《多因素耦合作用下细水雾灭火特性研究》（课题立项编号：Y202045270）”