

引用格式: 姚辉辉, 张光学, 吴林陶, 等. 耦合水雾的声团聚消除火灾烟雾的实验研究[J]. 声学技术, 2022, 41(1): 7-13. [YAO Huihui, ZHANG Guangxue, WU Lintao, et al. Experimental study on eliminating fire smoke by using acoustic agglomeration coupled with water mist[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(1): 7-13.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.01.002

耦合水雾的声团聚消除火灾烟雾的实验研究

姚辉辉, 张光学, 吴林陶, 陈子越, 庞颖钢, 林宸煜

(中国计量大学能源工程研究所, 浙江杭州 310018)

摘要: 对声波耦合水雾消除火灾烟雾的声团聚技术进行了实验研究, 并且深入探究了声团聚的作用机理及微观团聚体结构的样貌, 通过改变声波频率、声功率、水雾浓度和初始烟雾浓度等参数比较其对消烟效果的影响。结果表明, 声波耦合水雾技术提高了气溶胶分散性, 并且水雾产生的液桥力保证了团聚体结构的稳定性, 团聚效率得到提高。在初始烟雾浓度为 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、水雾浓度为 $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、声功率 10 W 和声波频率 1.5 kHz 的条件下, 烟雾颗粒数目减少了 80% 以上。添加水雾后颗粒间的相对挟带系数增大, 相对运动增强, 最佳团聚频率范围得到扩大, 透光率最高可达 95.1%。然而, 水雾浓度需进行一定控制, 过高的水雾浓度可能还会造成光线的阻挡。此外, 初始烟雾浓度越高, 颗粒间距越小, 团聚效果也就越明显, 该技术适合于烟雾浓度较大的场合。

关键词: 声波团聚; 水雾; 火灾烟雾; 能见度; 透光率; 团聚效率

中图分类号: O429

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-01-0007-07

Experimental study on eliminating fire smoke by using acoustic agglomeration coupled with water mist

YAO Huihui, ZHANG Guangxue, WU Lintao, CHEN Ziyue, PANG Yinggang, LIN Chengyu

(Institute of Energy Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China)

Abstract: In this paper, the elimination effect of the acoustic agglomeration technology by acoustic wave coupling water mist on carbon black aerosol is studied through experiments. The results show that the aerosol dispersion is improved by this technology, the liquid bridge force generated by the water mist ensures the stability of the agglomerate structure, and the number of smoke particles decreases by more than 80% at the frequency of 1.5 kHz , sound power of 10 W , initial carbon black aerosol concentration of $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ and water mist concentration of $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. The relative entrainment coefficient between particles increases and the relative motion enhances after adding water mist, meanwhile the best agglomeration frequency range is extended and the transmittance reaches up to 95.1%. However, the excessive concentration of water mist may block the light due to scattering and absorption. In addition, it is found that the agglomeration rate of thick aerosol is much higher than that of thin aerosol. This technology is more suitable for occasions with high aerosol concentration.

Key words: acoustic agglomeration; water mist; fire smoke; visibility; transmittance; agglomeration efficiency

0 引言

火灾烟雾是由可燃物燃烧或热解时产生的固体颗粒、液体液滴以及夹带的空气形成的复杂混合物^[1]。火灾烟雾由于其强烈的遮光性和毒性而成为火灾中最为致命的因素^[2]。当逃生通道内充满浓

度较高的火灾烟雾时, 被困人员对逃生路径的判断将会出现极大偏差, 这将导致人员火场滞留时间增加, 而吸入大量毒性的火灾烟雾将导致胸闷、心悸、心率加快、恶心以及视线模糊等不良反应, 甚至可能引起昏迷和抽搐^[3]。据统计, 近 10 年来, 我国共发生高层建筑火灾 3 万余起, 死亡人数 500 余人, 火灾造成的直接经济损失 15.6 亿元, 其中不乏特大火灾及重大火灾, 我国的建筑火灾预防和控制形势非常严峻^[4]。

建筑火灾初期阶段是人员逃生的关键时期, 有效的控烟手段可以大幅提高人员逃生成功率^[5]。现有的控烟手段包括围护结构挡烟、隔室控烟、机械加压送风排烟、自然排烟等^[6], 但仍存在不足之处。

收稿日期: 2020-11-23; 修回日期: 2020-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(51876197)、浙江省属高校基本科研业务费专项资金、浙江省新苗人才计划(2020R409045)、中国计量大学学生科技专项(2020YW44)资助项目。

作者简介: 姚辉辉(1995—), 男, 浙江湖州人, 硕士研究生, 研究方向为声波团聚, 细颗粒物排放控制。

通信作者: 张光学, E-mail: zhangguangxue@cjl.edu.cn

例如用于建筑物的防火和防烟隔层, 由于其在高度上有所限制, 并不能起到很好的烟雾防控作用, 甚至还可能阻碍消防人员的紧急救援^[7]。自然排烟的效果不够稳定, 排烟窗无法及时开启; 机械排烟的效果较好, 但存在引入新鲜空气助长火势的隐患^[8]。水雾作为一种广泛使用的灭火方法, 不仅能有效降低火焰热辐射, 同时还可快速抑制烟雾浓度的增长^[9-11]。然而, 也有部分学者指出, 在一些情况下, 水雾的散射和吸收可能导致能见度的降低^[12]。

声波团聚是一种气溶胶处理技术, 对气溶胶施加高强度声场使得颗粒之间发生相对运动, 碰撞并团聚成大颗粒, 从而降低气溶胶颗粒浓度^[13]。刘建忠等^[14]使用声压级为 147 dB、频率为 1.4 kHz 的低频声波对燃煤飞灰气溶胶进行团聚处理, 降低了 68.4% 的气溶胶数量浓度。陈厚涛等^[15]使用声波团聚技术对颗粒浓度峰值为 0.07 μm 的超细颗粒物进行清除, 160 dB 声压级时, $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒数量浓度减少了 58.9%。Volk 等^[16]将粒径范围为 0.1~1 μm 的炭黑固体颗粒作为测试气溶胶, 研究声压级、频率、颗粒浓度以及停留时间对声波团聚效果的影响, 发现其最佳频率为 3 kHz。声波团聚技术对液滴气溶胶同样有着不错的降低浓度的效果。在频率为 6 kHz、声压级为 148 dB 的声场中, 10 s 内液滴气溶胶透光率从 0 提高至 90%, 质量浓度减少了 99%^[17]。林宸煜^[18]等通过区别声波的频率和声压级发现存在声流与声涡现象, 而这两者随着频率与声压级的变化对颗粒物团聚的作用强弱也相应改变, 提供了宏观层面的声波团聚研究基础。

声波团聚技术在细颗粒物处理领域表现出了巨大潜力, 而火灾烟雾同样适用于该技术。张光学等^[19]以声压级为 141 dB、声频率为 1.5 kHz 的声波作用于充满聚苯乙烯材料燃烧烟雾的密闭团聚室。在 30 s 处理时间内, 透光率从 24% 提高到 75%, 达到了人员安全逃生的阈值。两分钟后, 团聚室内的火灾烟雾被完全消除。

然而, 现阶段关于声波团聚处理火灾烟雾的研究还十分匮乏。实验多以密闭的小容积团聚室为主, 声波能量较为集中, 可以取得较好的团聚效果, 而对于动态火灾烟雾声波处理的研究不够深入, 并且过高声压级的声波可能在人员逃生时造成进一步的恐慌, 甚至听觉受损。同时, 声波耦合其他方法处理火灾烟雾的效果也还有待实验探究。本文以炭黑颗粒作为研究对象, 利用声波团聚耦合水雾消除火灾烟雾, 并探究声波频率、声功率、水雾浓度、烟雾浓度、停留时间等因素对团聚效果的影响, 为今后的消防及实际工业应用提供实验依据和指导。

1 声波耦合水雾消烟机理

颗粒在声场中发生团聚的过程较为复杂, 而关于声波团聚的研究发展至今, 同向团聚机理是最为重要的颗粒团聚机理^[20]。同向团聚机理由 Mednikov^[21]首次提出, 它是声波团聚机理中最重要的机理之一。由于气体介质在声波的作用下会产生振荡, 而气体存在黏性, 振荡的同时挟带气溶胶颗粒一起运动。不同尺寸的颗粒所具有的惯性不同, 因此其被声波所挟带的程度也有差异, 这将导致它们之间产生相对运动并发生碰撞和粘附^[22]。

在声波团聚过程中, 颗粒振幅与气体介质振幅的比值称为挟带系数, 记作 μ , 表达式为^[19]

$$\mu = \frac{U_p}{U_g} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_p)^2}} \quad (1)$$

式中: U_p 为颗粒振动幅值, U_g 为气体介质的振动幅值, $\omega = 2\pi f$ 为角频率, f 为声波频率, τ_p 为粒子弛豫时间, 表达式为^[23]

$$\tau_p = \frac{\rho_p d^2}{18\mu_g} \quad (2)$$

式中: ρ_p 为颗粒密度, d 为颗粒直径, μ_g 为气体介质的动力黏度。

团聚效果取决于颗粒间的相对运动程度, 通常以相对挟带系数 μ_{ij} 来表示颗粒间的挟带系数差异, 计算公式为^[24]

$$\mu_{ij} = \left| \mu_i - \mu_j \right| = \frac{\omega |\tau_i - \tau_j|}{\sqrt{(1 + (\omega\tau_i)^2) \cdot (1 + (\omega\tau_j)^2)}} \quad (3)$$

式中: μ_{ij} 为颗粒 i 和颗粒 j 的相对挟带系数, μ_i 和 μ_j 分别为颗粒 i 和颗粒 j 的挟带系数, τ_i 和 τ_j 分别为颗粒 i 和颗粒 j 的粒子弛豫时间。

图 1 显示了声场中两个固体颗粒之间的相对挟带系数 $\mu_{p,p}$, 以及固体颗粒与液滴之间的相对挟带系数 $\mu_{p,d}$ 。以粒径 20 μm 的液滴和具有代表性的 2、5 μm 固体颗粒气溶胶进行计算, 其中液滴和固体颗粒密度分别为 1 000 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 2 500 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由图 1 可知, 在不添加液滴的情况下, 最佳团聚频率范围内固体颗粒之间的相对挟带系数一般不高于 0.6, 即固体颗粒间的相对运动较弱, 团聚效率也较为一般。添加水雾液滴后, 气溶胶分散性及相对挟带系数提高明显, 最佳团聚频率范围也相应拓宽^[25]。

声波团聚过程中, 颗粒之间碰撞导致团聚的概率称之为黏着系数, 范围为 0~1^[26-27]。颗粒间以范德华力粘附结块, 其黏着系数一般较低。有实验证

明, 在强声场中, 团聚体结构可能发生破裂而降低团聚效率^[28]。向固体颗粒气溶胶中加入液滴后, 强度更大的液桥力成为团聚体内颗粒间的主要作用力, 团聚体破碎概率降低, 团聚效率提高^[29-30]。

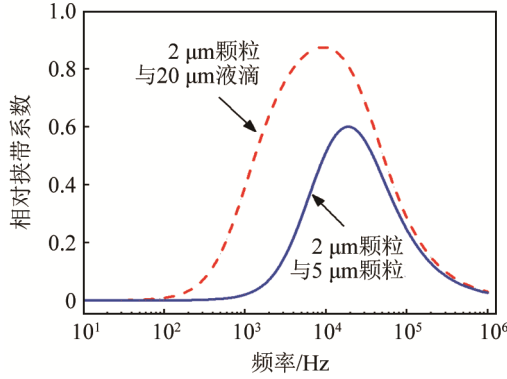


图1 频率与颗粒粒径间相对挟带系数关系图

Fig.1 Relationship of frequency with the relative entrainment coefficient between particles of different diameters

2 实验设备及方法

实验装置如图2所示, 以炭黑颗粒为原料模拟火灾烟雾, 由微量给料机(瑞士 LAMBDA 0-1L/M型)调节给料量, 炭黑颗粒在文丘里混合器中与送风均匀混合形成粒径分布在1~5 μm之间的烟雾气溶胶。声源系统由信号发生器(SFG-1013)、功率放大器(RMX 2450)、压缩式驱动器(SH7531-8Ω)组成。信号发生器产生正弦电信号, 该信号经功率放大器进行功率放大后由压缩式驱动器产生稳定的声波, 其声压级在115~130 dB之间。团聚室内径为10 cm、高度为1.5 m, 材质为亚克力有机玻璃, 便于观察团聚室内火灾烟雾流动情况。送风机空气流量控制为2.5 m³·h⁻¹, 烟雾在团聚室内停留时间约为

17 s, 即为声波对烟雾作用时长。能见度测量系统是由激光发射器及激光功率计(LP1)组成, 通过测得的透射光强值计算其烟雾能见度、透光率、团聚效率等参数。水雾发生装置产生粒径范围为5~20 μm的水雾气溶胶。

根据 Lambert-Beer 定律, 由于烟雾颗粒对光的散射和吸收, 穿过烟雾的激光强度会降低。透光率 T 的定义为^[17]

$$T = \frac{I_{\lambda}}{I_{\lambda 0}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: I_{λ} 为穿过烟雾的透射激光光强, $I_{\lambda 0}$ 为团聚室内无烟雾时透射激光光强, 团聚室壁面因素对透射光强的影响已经纳入计算。

烟雾体积分数、质量浓度与透光率之间的计算关系为^[31]

$$\frac{\ln(T_{\lambda})}{\ln(T_0)} = \frac{V_{\lambda}}{V_0} = \frac{M_{\lambda}}{M_0} \quad (5)$$

式中: T_{λ} 为实验条件下烟雾透光率, T_0 为烟雾初始透光率, V_{λ} 为实验条件下烟雾体积分数, V_0 为烟雾初始体积分数, M_{λ} 为实验条件下烟雾质量浓度, M_0 为烟雾初始质量浓度。

为了定量地比较团聚效果, 将实验条件下气溶胶质量浓度减少百分比定义为团聚效率 η , 公式为^[23]

$$\eta = (1 - \frac{M_{\lambda}}{M_0}) \times 100\% \quad (6)$$

烟雾对光的散射系数和吸收系数之和称之为消光系数, 记作 K , 该系数表征烟雾对光强的削减程度强弱, 公式为^[19]

$$K = -\frac{1}{L} \ln(T) \quad (7)$$

式中: L 为激光透过观察室的光路长度。

根据透光率计算得到的消光系数, 可以进一步计算得出更直观的烟雾气溶胶可见度参数, 该参数定义为观察者可识别物体相对于背景的距离, 计算公式为^[19]

$$S = \frac{C}{K} \quad (8)$$

式中: S 为团聚室内烟雾可见度, C 表示通过烟雾观察的物体类型恒定特征^[18]。

3 结果与讨论

3.1 烟雾粒径分布变化

在团聚室尾部使用撞击式气溶胶采样仪(FA-3)对火灾烟雾进行采样分析, 该仪器测量粒径范围为0.5~10 μm, 测量结果如图3所示。颗粒的粒径分布特点通常利用几何分布加以描述, 即 $dN/d(\lg d)$

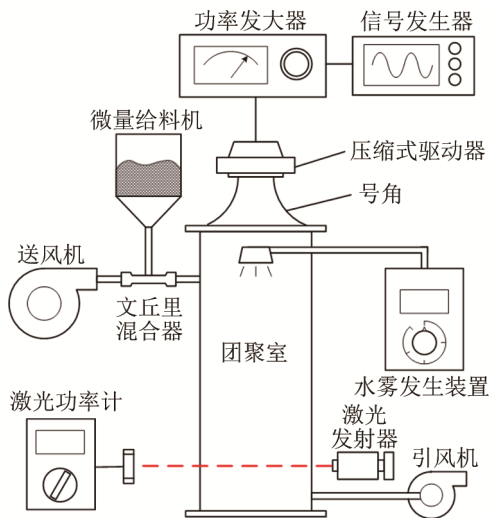


图2 系统装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the experimental facilities

随 $\lg d$ 的变化, 其中 d 是液滴颗粒的粒径; N 是颗粒数目浓度, dN 表示单位体积内尺寸为 $\lg d$ 到 $\lg d + d(\lg d)$ 之间的颗粒数目, 且由于颗粒粒径分布范围较广, 一般使用对数坐标。初始状态下, 烟雾浓度为 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 气溶胶颗粒数量浓度较大。施加频率为 1.5 kHz 、功率为 10 W 的声波, 各个粒径范围下的颗粒物浓度均出现一定程度下降, $0.9 \mu\text{m}$ 与 $2.7 \mu\text{m}$ 粒径的颗粒浓度降低明显, 而其他粒径的浓度降低幅度较小。声波团聚耦合水雾技术中水雾浓度为 $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 各个粒径范围颗粒物浓度均明显下降, 而相比较仅声波处理的效果, 声波耦合水雾处理条件下细颗粒数量减少了 80% 以上, 团聚效率大幅提高。

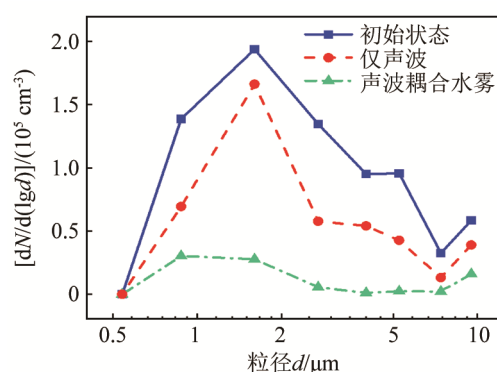


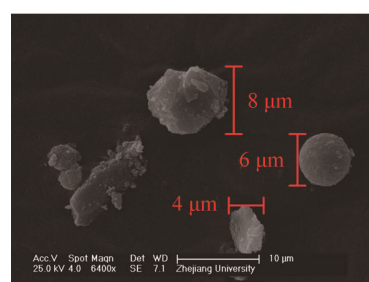
图3 声和水雾作用下的烟雾气溶胶的粒径分布

Fig.3 Particle size distributions of smoke aerosol under the action of sound and water mist

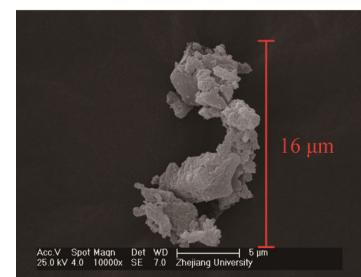
图4为场发射扫描电镜观测到的微观颗粒物样貌。原始条件下以图4(a)小颗粒或者小团聚体的形式存在, 这些颗粒的直径大多处于 $5 \mu\text{m}$ 以下, 符合上文的撞击器测量结果。施加频率为 1.5 kHz 的声波后, 团聚体体积明显增大, 且团聚体内颗粒数目显著增加, 存在大量如图4(b)所示的典型链状团聚体, 颗粒之间以范德华力为主要作用力相联结, 团聚体尺寸在 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间。图4(c)为仅加入水雾时呈现的小团聚体, 液桥力将细小颗粒收集进内部, 团聚体多呈球状, 尺寸在 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 间不等。声波团聚耦合水雾技术的团聚体微观样貌如图4(d)所示, 团聚效果非常明显, 团聚体尺寸也较大, 能够增加至 $100 \mu\text{m}$ 以上, 图中所示团聚体已远大于 $100 \mu\text{m}$, 呈球状结构并且内部颗粒紧密联结, 其周围分布着大量小型团聚体, 可在声波作用下进一步团聚。

单一声波条件下小颗粒团聚体内部的作用力主要为范德华力。该作用力强度较弱, 在声场强度达到一定阈值后继续增加声功率输入, 团聚效率会保持原有水平甚至可能减弱^[28]。向火灾烟雾中仅添加水雾作为团聚剂, 其效果也较为一般。仅由空气流

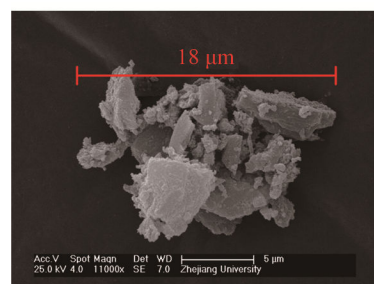
动造成的颗粒间碰撞概率较低, 团聚收集效果较差。另外, 水雾液滴间也存在团聚现象, 若没有团聚并沉降, 同样会对光线造成散射和吸收而影响能见度^[12]。向声场中添加水雾可以将两者的技术优势相结合, 水雾可以充当收集核并且为团聚体颗粒间提供液桥力, 使得团聚体结构紧密, 不易发生破碎; 而声波对颗粒有着良好的挟带作用, 不同惯性的颗粒间发生相对运动, 为团聚创造碰撞条件。声波团聚耦合水雾消除火灾烟雾技术产生的团聚体颗粒粒径普遍较大, 而当颗粒的质量达到一定程度后重力



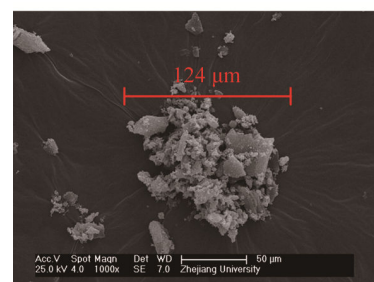
(a) 原始条件



(b) 仅声波



(c) 仅水雾



(d) 声波耦合水雾

图4 不同条件下炭黑烟雾颗粒微观样貌
Fig.4 Electron microscope images of smoke aerosol particles under different conditions

沉降因素也成为提高烟雾能见度的重要因素^[32]。

3.2 频率对透光率的影响

已有相关的研究表明, 声波团聚技术中频率是重要参数之一, 对于给定粒径分布的气溶胶存在某个最佳频率范围, 在该频率范围内声波团聚效率达到最佳, 而偏离该范围将会使得团聚效果不同程度减弱^[14,33]。

如图5所示, 火灾烟雾初始透光率仅为34.5%。向火灾烟雾中施加功率为10 W的声场后, 透光率得到了大幅提高。

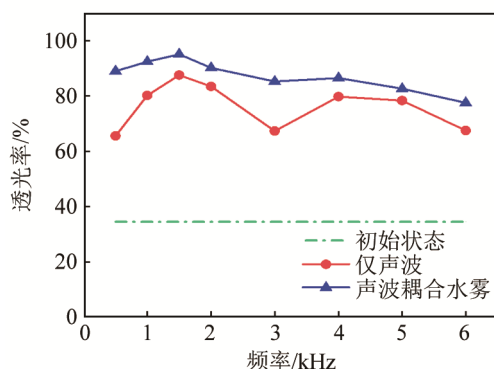


图5 不同条件下烟雾透光率对比
Fig.5 Transmittances of smoke aerosol under different conditions

由图5可知, 频率为1.5 kHz的声波效果较好, 达到了87.5%的透光率, 而频率为0.5 kHz声波效果较差, 也达到了65.6%。向声场中加入浓度为 $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的水雾, 频率1.5 kHz的声波的透光率提高至95.1%, 而效果一般的频率6 kHz的声波也达到了77.5%的透光率。

声波对火灾烟雾起到了较好的团聚作用, 透光率也有了较大幅度的提高, 但受频率影响较大, 最佳团聚频率的范围较窄。添加水雾液滴作为收集核, 气溶胶分散性提高。依据同向团聚机理, 粒径相差较大的颗粒间产生的相对挟带系数也越大, 相对运动剧烈, 颗粒间碰撞次数增多。最佳团聚频率范围扩大, 偏移该频率范围时, 团聚效率下降趋势较为平缓。水雾产生的液桥力使得烟雾颗粒碰撞后团聚有效性提高, 扩大了火灾烟雾中可适用的声波频率范围。由此可知, 声波团聚耦合水雾技术优于单一的声波团聚技术, 该技术可将团聚效率进一步提高, 并且扩大最佳团聚频率范围, 该技术更适合于消除火灾烟雾。

火灾中, 人员安全逃生的消光系数阈值为 1.2 m^{-1} ^[34], 结合式(8), 可得人员逃生能见度阈值为2.5 m。在大于该值的能见度情况下, 火场人员可有效识别逃生指示信号及逃生路径, 大大提高逃生成

功率。

如图6所示, 以本实验团聚室为实验空间, 监测火灾烟雾在不同处理条件下达到逃生能见度阈值所需声功率。仅声波作为处理条件时, 其声功率较大, 频率为1.5 kHz的声波需9.1 W功率输入, 而效果较差的频率为0.5 kHz和6 kHz的声波则分别需要13.2和13.6 W功率输入才能使得团聚室内火灾烟雾能见度提升至阈值。向火灾烟雾中加入浓度为 $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的水雾, 达到同样的能见度阈值所需功率明显下降。频率为6 kHz声波的声功率最高, 为8.7 W, 而频率为1.5 kHz声波所对应的声功率仅为5.0 W。

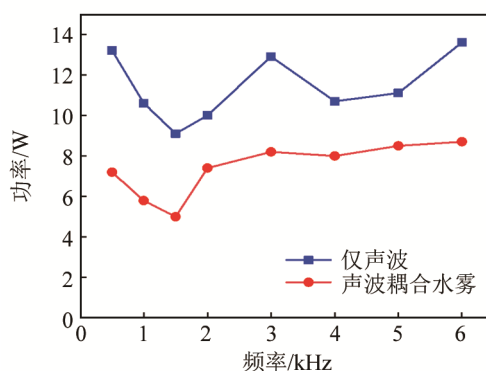


图6 有或无水雾情况下达到能见度阈值的声功率对比
Fig.6 Acoustic power consumption required to reach the visibility threshold with or without adding water mist

实验所用频率均在人耳的听觉范围内, 高功率的输入将会导致声音过大而损伤人耳。同样的团聚效果, 水雾的添加大幅降低了声功率, 如频率为1.5 kHz声波从9.1 W降至5.0 W, 声压级也从122 dB降至119 dB, 在快速有效地消除火灾烟雾的同时也有助于保护火场逃生人员的听觉健康。

3.3 水雾浓度的影响

水雾作为种子颗粒和收集核, 其浓度的大小将会影响声场中火灾烟雾的团聚效果。初始火灾烟雾浓度为 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 声功率为15 W, 分别施加10、20、30、40和 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 五种不同浓度的水雾于声场中, 实验结果如图7所示。 $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的水雾浓度条件达到了较好的能见度, 在1.5 kHz频率下能见度提升至8.0 m。 $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $40 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 水雾浓度下能见度略有降低。水雾浓度 $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 条件下, 能见度提升程度较小。而水雾浓度 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 条件下能见度比仅声波处理时更小, 光线同时受到了火灾烟雾和水雾的遮挡。

水雾浓度是影响声波耦合水雾团聚火灾烟雾的重要因素之一, 过低或过高的浓度都将导致能见度提升效果减弱, 过量的水雾甚至可能生成白雾蒸

汽对光线造成二次阻挡^[12]。因此,加入的水雾浓度需要加以控制以达到提升能见度的效果。

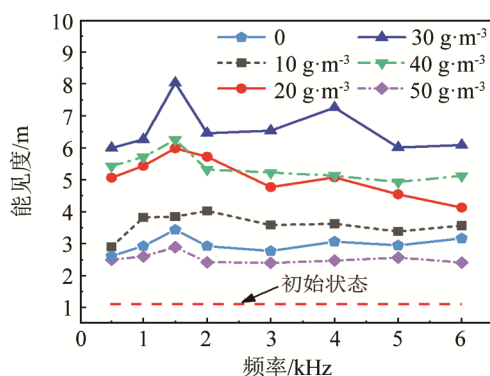


图7 水雾浓度对能见度的影响

Fig.7 Effect of water mist concentration on visibility

3.4 初始烟雾浓度的影响

理论上,气溶胶初始浓度的大小表示了颗粒间的间距,初始浓度越大则颗粒间距越小,其碰撞的概率越高,团聚效率也更高。图8为声波团聚耦合水雾技术在不同初始烟雾浓度下的团聚效率影响,声功率为15 W,水雾浓度为 $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由图8可知,初始烟雾浓度越高,团聚效率也越高。初始烟雾浓度达到 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的情况下,频率为1.5 kHz的声波耦合水雾团聚效率达到95.2%。当初始烟雾浓度降低时,团聚效率也开始下降,且初始浓度均匀递减的情况下,团聚效率降低幅值开始增大。

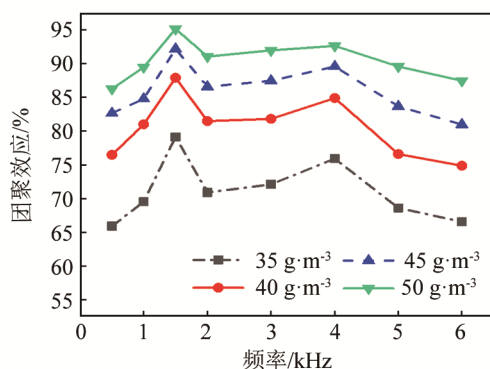


图8 初始烟雾浓度对团聚效率的影响

Fig.8 Effect of initial smoke aerosol concentration on agglomeration efficiency

由上述实验现象分析可知,声波团聚耦合水雾技术在较高的初始烟雾浓度条件下将会取得显著的效果,虽然该技术无法完全消除掉火灾烟雾,但在本实验条件下声波作用17 s内可快速提高火灾烟雾能见度,为火场逃生人员创造有利条件。

4 结 论

本文通过改变声波频率、声功率、水雾浓度和

初始烟雾浓度等参数研究了耦合水雾的声团聚消烟效果,得到如下结论:

(1) 水雾提供的液桥力保证了团聚体结构的稳定性以及更好的消烟效果。在初始烟雾浓度为 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、水雾浓度为 $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、声功率10 W和声波频率1.5 kHz条件下,火灾烟雾颗粒数目减少了80%以上。

(2) 添加水雾后颗粒间的相对挟带系数增大,相对运动增强,并且最佳团聚频率范围被扩大。在声波频率为1.5 kHz时,烟雾透光率可高达95.1%。

(3) 在耦合水雾的声团聚消烟技术中,水雾的浓度需要加以控制,避免造成光线的二次遮挡。

(4) 初始烟雾浓度越高,则颗粒间距越小,团聚效率也越高,将声波耦合水雾技术应用在烟雾较浓的通道顶部区域,可能取得更好的消烟效果。

参 考 文 献

- [1] STEFANIDOU M, ATHANASELIS S, SPILIOPOULOU C. Health impacts of fire smoke inhalation[J]. Inhalation Toxicology, 2008, 20(8): 761-766.
- [2] DINENNO P J. The SFPE handbook of fire protection engineering[M]. Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002: 42-53.
- [3] 杨立中, 方伟峰, 邓志华, 等. 火灾中的烟气毒性研究[J]. 火灾科学, 2001, 10(1): 29-33.
YANG Lizhong, DENG Zhihua, et al. Study on fire smoke toxicity[J]. Fire Safety Science, 2001, 10(1): 29-33.
- [4] 李曼. 高层建筑多因素作用下火灾发展机理和烟气控制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [5] YU L X, LIU F, LIU Y Q, et al. Experimental study on thermal and smoke control using transverse ventilation in a sloping urban traffic link tunnel fire[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 81-93.
- [6] 梁锋. 建筑火灾中烟雾的危害及控制[J]. 中国职业安全卫生管理体系认证, 2004(6): 10-12.
LIANG Feng. Smoke hazard and control in building fire[J]. China Occupational Safety and Health Management System Certification, 2004(6): 10-12.
- [7] HU L H, ZHOU J W, HUO R, et al. Confinement of fire-induced smoke and carbon monoxide transportation by air curtain in channels[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 156(1-3): 327-334.
- [8] 葛尹仲. 高层民用建筑排烟系统存在问题和对策[J]. 消防科学与技术, 2008, 27(11): 817-819.
GE Yinzhong. On the problems arising in smoke extraction system design of civil-high-layer buildings and countermeasures[J]. Fire Science and Technology, 2008, 27(11): 817-819.
- [9] WANG Z G, WANG X S, HUANG Y Q, et al. Experimental study on fire smoke control using water mist curtain in channel[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 342: 231-241.
- [10] PAN L W, S M LO, LIAO G X, et al. Experimental study of smoke control in subway station for tunnel area fire by water mist system[J]. Procedia Engineering, 2011, 11: 335-342.
- [11] RAY S K, SINGH R P. Effects of water mist on open fire - a model study[J]. Mining Technology, 2005, 114(1): 1-12.
- [12] MORLON R, BOULET P, PARENT G, et al. Study of

- de-stratification and optical effects observed during smoke/mist interactions[J]. *Fire Technology*, 2015, **51**(5): 1231-1248.
- [13] SHI Y, WEI J H, BAI W W, et al. Numerical investigations of acoustic agglomeration of liquid droplet using a coupled CFD-DEM model[J]. *Advanced Powder Technology*, 2020, **31**(6): 2394-2411.
- [14] LIU J Z, ZHANG G X, ZHOU J H, et al. Experimental study of acoustic agglomeration of coal-fired fly ash particles at low frequencies[J]. *Powder Technology*, 2009, **193**(1): 20-25.
- [15] 陈厚涛, 赵兵, 徐进, 等. 燃煤飞灰超细颗粒物声团聚清除的实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, **27**(35): 28-32.
CHEN Houtao, ZHAO Bing, XU Jin, et al. Experimental study on acoustic agglomeration of ultrafine fly ash particles[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, **27**(35): 28-32.
- [16] VOLK M, MOROZ W J. Sonic agglomeration of aerosol particles[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1976, **5**(3): 319-334.
- [17] 张光学, 马振方, 吴林陶, 等. 超细液滴气溶胶声团聚的实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, **40**(2): 608-615.
ZHANG Guangxue, MA Zhenfang, WU Lintao, et al. Experimental study on acoustic agglomeration of fine droplet aerosol[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, **40**(2): 608-615.
- [18] 林宸煜, 张光学, 马振方, 等. 细颗粒物声团聚的微观机理研究[J]. *声学技术*, 2021, **40**(5): 587-593.
LIN Chenyu, ZHANG Guangxue, MA Zhenfang, et al. Research on micro-mechanism of acoustic agglomeration of fine particles[J]. *Technical Acoustics*, 2021, **40**(5): 587-593.
- [19] ZHANG G X, MA Z F, SHEN J, et al. Experimental study on eliminating fire smokes using acoustic agglomeration technology[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **382**: 121089.
- [20] 张光学. 燃煤飞灰气溶胶声团聚的理论和实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [21] MEDNIKOV E P. Acoustic coagulation and precipitation of aerosols[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 1965, **34**(9): 1087-1103.
- [22] 赵兵, 姚刚, 沈湘林. 燃煤可吸入颗粒物在驻波声场中动力学特性的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, **27**(26): 13-17.
ZHAO Bing, YAO Gang, SHEN Xianglin. Study on the dynamical behavior of inhalable particle from coal combustion in a standing wave field[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, **27**(26): 13-17.
- [23] ZHANG G X, ZHANG L L, WANG J, et al. Improving acoustic agglomeration efficiency by addition of sprayed liquid droplets[J]. *Powder Technology*, 2017, **317**: 181-188.
- [24] ZHANG G X, WANG J Q, CHI Z H, et al. Acoustic agglomeration with addition of sprayed liquid droplets: three-dimensional discrete element modeling and experimental verification[J]. *Chemical Engineering Science*, 2018, **187**: 342-353.
- [25] 周栋, 骆仲泱, 鲁梦诗, 等. 单分散气溶胶的声波团聚实验[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2017, **51**(2): 358-362, 369.
ZHOU Dong, LUO Zhongyang, LU Mengshi, et al. Acoustic agglomeration experiments of monodispersed aerosol[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2017, **51**(2): 358-362, 369.
- [26] ELLASSON B, EGLI W, FERGUSON J R, et al. Coagulation of bipolarly charged aerosols in a stack coagulator[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1987, **18**(6): 869-872.
- [27] KAWASHIMA Y, HANDA T, TAKEUCHI H, et al. Computer simulation of agglomeration by a two-dimensional random addition model—agglomeration kinetics and micromeritic properties of agglomerate accompanied by compaction process[J]. *Powder Technology*, 1989, **57**(3): 157-163.
- [28] KNOOP C, TODOROVA Z, TOMAS J, et al. Agglomerate fragmentation in high-intensity acoustic standing wave fields[J]. *Powder Technology*, 2016, **291**: 214-222.
- [29] 杨振楠, 郭庆杰, 李金惠. 气氛与湿度对燃煤飞灰颗粒声团聚的影响[J]. *化工学报*, 2011, **62**(4): 1055-1061.
YANG Zhennan, GUO Qingjie, LI Jinhui. Effect of atmosphere and relative humidity on particle agglomeration of fly ash in acoustic wave[J]. *CIESC Journal*, 2011, **62**(4): 1055-1061.
- [30] KNOOP C, FRITSCHING U. Dynamic forces on agglomerated particles caused by high-intensity ultrasound[J]. *Ultrasonics*, 2014, **54**(3): 763-769.
- [31] MANOUCHERI M, EZEKOYE O A. Polystyrene soot agglomeration enhancement in an ultrasonic acoustic field[J]. *Hazardous Waste and Hazardous Materials*, 1996, **13**(1): 121-130.
- [32] HU X Q, JIA F C, WANG Z Z, et al. Grouping methods for MPS soot transport model and its application in large-scale enclosure fires[J]. *Fire Safety Journal*, 2017, **91**: 361-370.
- [33] 张光学, 刘建忠, 周俊虎, 等. 频率对燃煤飞灰声团聚影响的模型及实验验证[J]. *中国电机工程学报*, 2009, **29**(17): 97-102.
ZHANG Guangxue, LIU Jianzhong, ZHOU Junhu, et al. A theoretical model and experimental verification on the influence of frequency on acoustic agglomeration of coal-fired fly ash[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, **29**(17): 97-102.
- [34] GYPPAZ F. Smoke and safety in case of fire[M]. Lyon France: Nexans Research Center, 2015.