

【航空动力系统与控制】

基于 DPM 模型的尾气处理喷嘴喷雾数值模拟

赵 芳,任泽斌,王海锋,史 煜

(中国空气动力研究与发展中心 设备设计与测试技术研究所,四川 绵阳 621000)

摘 要:为了提高氢氧化钠、碳酸钠等碱液对氧碘激光器尾气中氯气、碘蒸气的吸收率,采用离散相模型(DPM)与湍流模型相结合的数值仿真方法,研究了喷嘴喷射方向、喷雾粒径大小及喷雾锥角等参数对系统总体喷雾效果的影响规律,并开展了部分试验验证。研究表明:以喷嘴下游某截面的喷雾颗粒分布效果为考核指标,在相同的工况条件下,喷嘴的喷雾锥角越大,喷雾粒径越小,下游的喷雾颗粒分布效果越好;喷嘴的喷射方向明显影响下游的喷雾颗粒分布,其中逆气流喷射效果最优。

关键词:氧碘激光器;碱液;离散相模型;喷嘴;喷雾颗粒

中图分类号: X 51; TQ 11 **文献标识码:** A DOI:10.13486/j.issn.2097-4973.2026.02.002

氧碘激光器凭借其波长短、效率高、光束质量好及传输性能等优点,受到各国学者专家的关注,在被广泛应用于工业、国防武器等的同时,其在航空航天领域也展现出重要的应用潜力^[1-4]。例如,在航天器的激光通信系统中,氧碘激光器可用于实现高精度、远距离的信息传输,为深空探测、卫星组网等任务提供关键技术支撑^[5]。氧碘激光器运转过程中会产生一定的有毒有害气体,包括氯气、碘蒸气等,如果直接排放到下游环境(包括配套的真空系统、大气环境等),势必会给下游的人与设备造成伤害。人短时间接触低浓度氯气会出现黏膜刺激症状,大量吸入高浓度氯光可发展为肺水肿、昏迷及休克^[6-8];碘蒸气易与真空泵润滑油混合形成油污,严重影响下游真空泵的使用寿命^[4];此外,碘蒸气对皮肤、黏膜具有比氯气更强的刺激性与腐蚀性,一旦被吸入,将损伤人体的呼吸道,导致支气管炎、肺炎甚至水肿^[9-10]。因此,开发高效、可靠的尾气处理技术是保障氧碘激光器安全稳定运行、推动其工程化应用的关键环节。

针对氧碘激光器尾气处理技术的公开研究报道相对匮乏,现有的研究未能提供一种能同步高效脱除氯气与碘蒸气的集成化方案。据文献^[11]报道,可采用活性炭吸附剂对碘蒸气进行捕获,该方法对碘具有一定的去除效果。然而,活性炭对氯气的吸附能力有限,且存在吸附饱和后需频繁更换或再生、可能形成二次固体废物等问题。在更广泛的工业废气处理领域,碱液化学吸收法(如采用氢氧化钠或碳酸钠溶液)是处理酸性气体(如氯气、二氧化硫等)的成熟技术^[12-13],其原理是气体污染物在气液界面发生溶解,并随后在液膜内与碱性物质发生快速不可逆化学反应,从而实现高效脱除。理论上,该方法同样适用于处理氯气和可与碱反应的碘蒸气。然而,将碱液吸收法直接应用于氧碘激光器高速流动的尾气环境中,其吸收效率强烈依赖于气液两相的传质过程,而传质效率又直接由吸收塔或管道内的流场结构、液滴雾化特性及两相混合程度所决定^[14]。数值模拟方法方面,特别是离散相模型(Discrete Phase Model, DPM),已成为研

收稿日期:2025-10-18

第一作者简介:赵 芳(1988—),男,湖南衡阳人,副研究员,硕士,主要从事风洞流动控制及武器发射动力学研究。

E-mail:zfcarde@163.com

通信作者简介:史 煜(1975—),男,北京人,高级工程师,主要从事化学化工应用研究。E-mail:sy403@sina.com

究喷雾、颗粒输运及气液反应过程的强大工具^[15-16]。通过DPM与湍流模型的结合,可以精确追踪液滴轨迹、模拟其破碎与碰撞聚并行为,并预测其在流场中的空间分布,从而在实验之前对系统性能进行优化,大幅降低研发成本与周期^[12]。近年来,该方法在废气洗涤塔、喷雾干燥器等设备的优化设计中已展现出显著优势^[12,14]。然而,将其应用于指导氧碘激光器尾气处理系统的设计,特别是系统性地探究喷嘴关键参数(如喷射方向、雾化粒径与喷雾锥角)对下游液滴分布及潜在吸收效率的影响,仍属探索前沿。

基于此,本文面向一种特定氧碘激光器的排气指标需求,提出了一种采用多喷嘴阵列喷射碱液以同步吸收尾气中氯气与碘蒸气的技术方案,并通过DPM与重整化群 $k-\epsilon$ (RNG $k-\epsilon$)湍流模型相结合的数值仿真方法,系统揭示喷嘴喷射方向、喷雾粒径及喷雾锥角等关键参数对下游流场中喷雾颗粒分布特性的影响规律,甄选出最优的参数配置。

1 数值模拟方法

1.1 物理模型

数值仿真模型如图1所示,采用轴向长度为6 m、直径为0.4 m的圆截面管道作为模拟尾气的排气通道,通道上游靠近入口处沿周向均布4个喷嘴(喷嘴未给出实际模型,仅以坐标给出具体位置,且喷嘴1、喷嘴2正好被对称面切割,喷嘴4位置在图中未显示,与喷嘴3对称),气流方向为 $X=1$ 方向, α 示意喷雾锥角。考虑到计算资源的限制,取实际模型的1/2作为计算域。为了验证网格无关性,

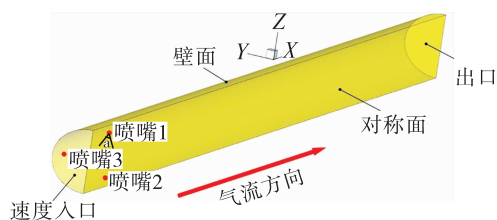


图1 数值仿真模型示意图

对计算域分别采用205万、380万、576万及750万4套网格开展数值计算,以通道下游某横截面的液滴SMD(索泰尔平均直径)分布变化作为判定依据。计算发现,当网格数达到576万时,通道下游某具体横截面的液滴SMD分布基本不再变化,与750万网格模型计算结果的最大偏差不到1%,如表1所示,表明网格无关性成立,因此各工况均按照576万网格计算。

表1 不同网格条件下 $X=3\ 000\text{ mm}$ 处的液滴SMD分布情况

喷雾粒径 / μm	喷雾粒径百分比/%				喷雾粒径 / μm	喷雾粒径百分比/%			
	205万	380万	576万	750万		205万	380万	576万	750万
40	42.5	43.0	45.0	45.5	250	2.0	2.0	1.0	1.0
60	25.5	27.0	30.0	29.5	280	1.0	0.0	1.0	1.0
100	9.5	9.5	9.0	9.0	300	0.5	1.0	0.0	0.0
130	7.5	7.0	5.5	5.5	330	1.5	1.0	1.0	1.0
160	2.0	2.0	2.0	2.0	360	1.0	0.5	0.0	0.0
200	4.0	4.0	3.5	3.5	400	1.0	1.0	0.0	0.0
220	2.0	2.0	2.0	2.0					

1.2 控制方程

质量守恒方程 $\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \Delta \cdot (\rho_g \vec{u}) = 0$,式中: ρ 、 $\vec{u}$ 分别是连续相的密度与速度。在此忽略了液滴的蒸发,因此源项为0。

动量守恒方程 $\frac{\partial (\rho_g \vec{u})}{\partial t} + \Delta \cdot (\rho_g \vec{u} \vec{u}) = \Delta \cdot (\mu \Delta \vec{u}) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_D$,式中: μ 、 p 及 S_D 分别是流体动力黏度、压力与动力源项。

离散型方程 $\frac{du_p}{dt} = F_D(u_g - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho_g)}{\rho_p} + F$, $F_D = \frac{18\mu C_D Re}{24\rho_p d_p^2}$ 。式中: $F_D(u_g - u_p)$ 指颗粒相单位质量曳力; u_p 、 ρ_p 、 ρ_g 及 F 分别是颗粒速度、颗粒密度、流体密度及作用在颗粒上的其他作用力; C_D 、 Re 及 d_p 分别是曳力系数、相对雷诺数及颗粒直径^[11-12]。

1.3 边界条件及数值格式

连续相边界条件设置: 来流设置为速度入口, 数值为 20 m/s; 壁面设置为无滑移壁面; 采用 RNG k -epsilon 湍流模型, 选择 SIMPLE 算法, 压力及动量采用二阶迎风格式。离散相边界条件设置: 喷射形式为实心锥方式, 粒子类型为惰性颗粒, 颗粒分布采用 R-R 分布模型; 破碎模型选取 Taylor-Analogy-Breakup(TAB)模型; 液滴轨迹采用随机漫步模型; 时间步长为 10^{-5} s^[17-21]。

2 模拟结果分析

为了与后续试验工况保持基本接近, 数值仿真采用了部分简化处理, 包括来流介质为均匀来流、介质为空气, 喷嘴喷射介质为浓度为 5% 的氢氧化钠溶液, 具体模拟工况如表 2 所示, 表中喷雾粒径括号内的三项分别表示最小粒径、最大粒径及平均粒径; 此外, 结合图 1 说明喷嘴喷射方向, 通过长度为 1 的向量表示, 其中 $X=1$ 指的是喷射方向沿 X 轴正方向、 $X=-1$ 为 X 轴负方向, $X=0.707$ 与 $Y=0.707$ 则表示 XY 正向夹角 45° 方向, 依次类推。

表 2 模拟工况列表

喷嘴 编号	参数名称	算例编号						
		1	2	3	4	5	6	7
1	喷射方向	$Z=-1$	$Z=-1$	$Z=-1$	$Z=-1$	$Z=-1$	$Z=-1$	$Z=-1$
	喷射速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	12	12	12	12	12	12	12
	喷雾锥角/($^\circ$)	40	40	40	70	70	40	70
	喷雾粒径/ μm	(40;60;50)	(40;60;50)	(40;60;50)	(40;60;50)	(20;30;25)	(20;30;25)	(20;30;25)
2	喷射方向	$Z=1$	$Z=1$	$Z=1$	$Z=1$	$Z=1$	$Z=1$	$Z=1$
	喷射速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	12	12	12	12	12	12	12
	喷雾锥角/($^\circ$)	40	40	40	70	70	40	70
	喷雾粒径/ μm	(40;60;50)	(40;60;50)	(40;60;50)	(40;60;50)	(20;30;25)	(20;30;25)	(20;30;25)
3	喷射方向	$X=0.707$ $Y=-0.707$	$X=-0.707$ $Y=-0.707$	$Y=-1$	$X=0.707$ $Y=-0.707$	$Y=-1$	$Y=-1$	$X=-1$
	喷射速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	12	12	12	12	12	12	12
	喷雾锥角/($^\circ$)	40	40	40	70	70	40	70
	喷雾粒径/ μm	(40;60;50)	(40;60;50)	(40;60;50)	(40;60;50)	(20;30;25)	(20;30;25)	(20;30;25)
4	喷射方向	$X=0.707$ $Y=0.707$	$X=-0.707$ $Y=0.707$	$Y=1$	$X=0.707$ $Y=0.707$	$Y=1$	$Y=1$	$X=-1$
	喷射速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	12	12	12	12	12	12	12
	喷雾锥角/($^\circ$)	40	40	40	70	70	40	70
	喷雾粒径/ μm	(40;60;50)	(40;60;50)	(40;60;50)	(40;60;50)	(20;30;25)	(20;30;25)	(20;30;25)

算例 1 工况下的流场中的颗粒分布如图 2 所示。可知, 喷嘴以设定的角度向管道中喷雾, 与来流的气流产生剪切, 造成出口处的液滴撞击汇聚形成大颗粒液滴; 此外, 喷雾液滴在气流的作用下向下游运动, 部分液滴在运动过程中发生沉降, 最终形成的核心流基本为小颗粒液滴, 近壁面处以大颗粒液滴为主。

为进一步研究液滴在下游某个横截面的颗粒大小分布,取距离入口 3 000 mm 的下游横截面为研究对象(即 $X=3\ 000\text{ mm}$ 截面,下文保持一致),液滴大小分布如图 3 所示。喷嘴初始设定的喷雾最大粒径为 $60\ \mu\text{m}$,而根据图 2 可知,计算得到的液滴大小最大可达 $318.72\ \mu\text{m}$,这是因为液滴在气流的作用下及运动过程中可能发生撞击、汇聚及沉降,造成液滴尺寸普遍变大;以算例 1 工况下的 $X=3\ 000\text{ mm}$ 截面为例,分析可知, $100\ \mu\text{m}$ 以上的液滴颗粒达到近 24%,最大颗粒超过 $300\ \mu\text{m}$ 。

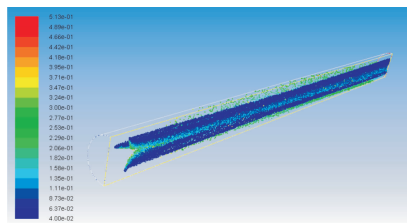


图2 算例1下获取的流场中的颗粒分布

2.1 喷嘴喷射方向影响分析

在相同的工作条件下,将喷嘴 3、喷嘴 4 的喷射方向由顺气流 45° 方向(算例 1)更换为垂直轴线喷射(即顺气流 90° 喷射,算例 3),保持喷嘴 1、喷嘴 2 的喷射方向不变,更换前后的对比仿真结果如图 4 所示。

根据对比结果分析可知,在相同的工作条件下,喷嘴方向均更换为垂直于轴向喷射时,通道下游同一截面的喷雾颗粒分布趋势为液滴粒径总体变小,大颗粒液滴占比变少,最大颗粒在 $240\ \mu\text{m}$ 左右。根据文献[21-22]可知,喷嘴喷雾粒径减小会提升化学反应速率,因此,单纯就液滴颗粒大小分布而言,更换后的喷嘴布局有利于尾气的吸收。

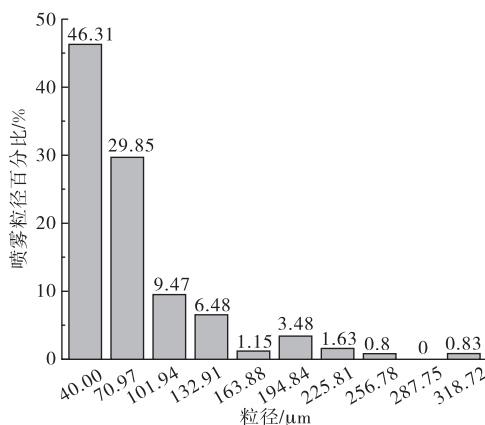


图3 算例1下获取的液滴分布

为进一步研究喷嘴喷射方向对液滴颗粒大小分布的影响,在相同的工作条件下,开展了垂直于轴线喷射(算例 5)及逆气流喷射工况下(即顺气流 180° ,算例 7)的对比数值仿真,相关结果如图 5 所示。可知,在相同的工作条件下,喷嘴喷射方向更换为逆气流喷射工况后,通道下游同一截面的喷雾颗粒分布趋势为液滴粒径总体变小,大颗粒液滴占比变少,最大颗粒在 $180\ \mu\text{m}$ 左右,总体趋势有利于尾气的吸收。此外,这进一步说明逆向喷射效果最佳。

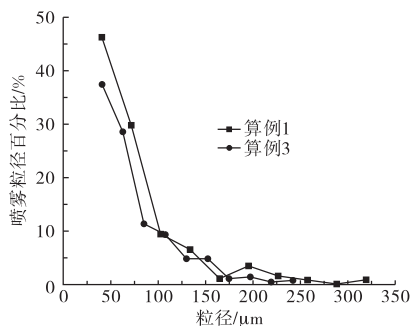


图4 算例1与算例3下液滴分布

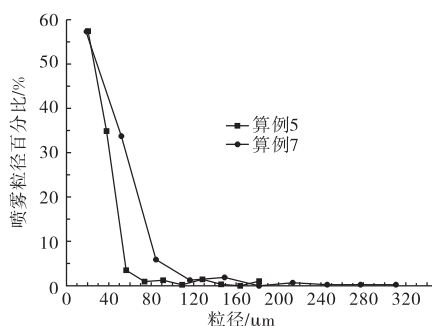


图5 算例5与算例7下液滴分布

综上可知,逆气流喷射效果最优,这是因为液滴与气流之间的相对速度最大,导致剪切作用增强,这既促进了液滴的二次破碎(使液滴更小),也增大了气液湍流混合强度,从而提升了传质效率。

2.2 喷嘴雾化粒径影响分析

在相同的工作条件下,将喷嘴雾化粒径减小一半,即对应的算例编号为算例 2 与算例 6,数值仿真的对比结果如图 6 所示。分析可知,在相同的工作条件下,减小喷嘴雾化粒径,通道下游同一截面的喷雾颗粒分布趋势为液滴粒径总体变小,大颗粒液滴占比变少,最大颗粒在 $200\ \mu\text{m}$ 左右,即喷嘴雾化粒径减小后有利于尾气的吸收。

通过喷嘴粒径影响研究可知,粒径越小,尾气吸收效果越好,这是因为粒径越小,比表面积越大,为气液传质提供了更多的接触面积。同时,小颗粒惯性小,更容易跟随气流运动,在流场中分布更均匀,避免了因惯性撞击壁面或彼此碰撞合并而形成大液滴。

2.3 喷嘴雾化锥角影响分析

在相同的工作条件下,将喷嘴雾化锥角由 40° 增加至 70° ,即对应的算例编号为算例 1 与算例 4,数值仿真的对比结果如图 7 所示。分析可知,在相同的工作条件下,增大喷嘴雾化锥角,通道下游同一截面的喷雾颗粒分布趋势为小颗粒液滴占比明显增大,这利于尾气的吸收;另外,由于喷嘴雾化锥角的增大,可能造成各喷嘴喷雾之间的干涉与撞击加剧,同时喷雾液滴打在壁面上的概率增加,综合造成算例 4 仿真结果增加了少量的大颗粒(最大约 $390\text{ }\mu\text{m}$)液滴。

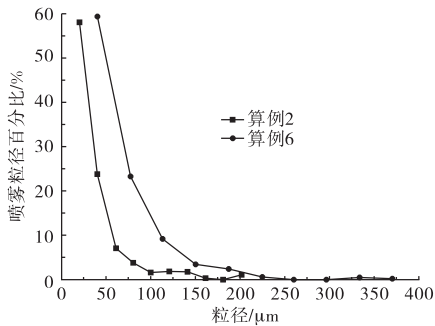


图 6 不同雾化粒径条件下液滴分布

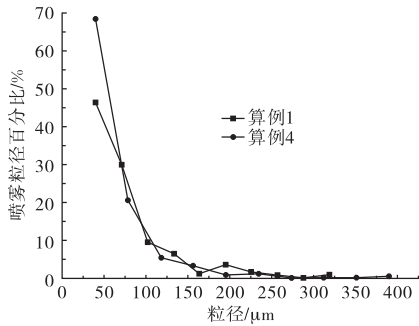


图 7 不同雾化锥角条件下液滴分布

3 试验研究

为验证数值计算的有效性,通过试验研究了喷嘴喷射方向对尾气吸收效率的影响。试验系统包含空气供应系统、氯气供应系统、碱液供给装置、碱液喷淋段(含喷嘴)、排气通道等,原理组成如图 8 所示。其中,空气由变频风机供应;碱液供给装置由碱液罐、电磁阀及供应管道等组成,供给的启停由电磁阀控制;排气通道出口配置氯气检测仪。

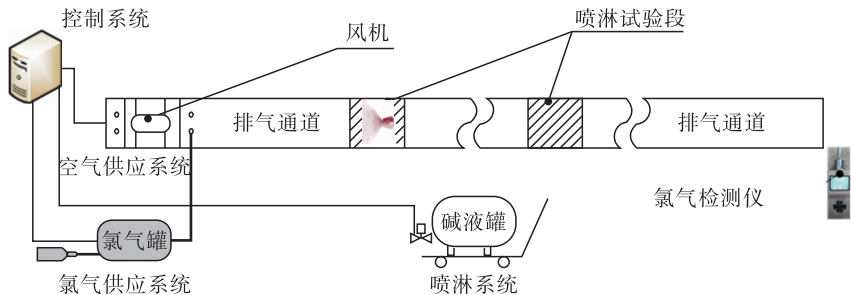


图 8 试验系统原理组成图

试验时,通过氯气检测仪在排气通道外 3 m、6 m 处检测尾气中氯气含量,相关结果如表 3 所示。

表 3 喷嘴喷射方向对比试验结果

喷嘴喷射方向	通道外 3 m		通道外 6 m	
	氯气含量/ 10^{-6}	吸收率/%	氯气含量/ 10^{-6}	吸收率/%
沿气流 45° 喷射	37.2	69	18.3	84
沿气流 90° 喷射	31.0	74	12.7	89
沿气流 180° 喷射	19.7	84	4.6	96

通过试验可知,在相同的工作条件下,喷嘴喷射方向对氯气的吸收效果影响较大,顺气流 180° 效果最

优,90°次之,45°最差,与数值仿真结果保持一致。

4 结论

基于DPM离散相模型,对喷嘴在模拟排气通道内的液滴破碎及雾化进行了数值模拟,获取了喷嘴雾化参数对液滴颗粒分布的影响规律。

(1) 喷嘴的喷射方向明显影响下游的喷雾颗粒分布,在相同的工况条件下,逆气流喷射效果最优,顺气流90°喷射次之,顺气流45°喷射最差。

(2) 在相同的工况条件下,喷雾粒径越小,下游的喷雾液滴颗粒分布效果越好。

(3) 在相同的工况条件下,增大喷雾锥角,在明显提高横截面上小颗粒液滴的占比的同时,由于液滴与液滴、液滴与壁面的撞击加剧,造成少量大颗粒液滴的产生。

本研究不仅填补了该特定应用场景下基础设计数据的空白,也将为后续构建高效、大尺寸的氧碘激光器尾气处理实验系统提供直接且可靠的理论依据与设计指导。

参考文献:

- [1] 石文波,李庆伟,耿自才,等.载气密闭循环碘化学激光技术模拟实验研究[J].强激光与粒子束,2017,29(12):1-5.
- [2] 任伟艳,孙艳宏,冯淑娟,等.氧碘化学激光器废气排放污染评价[J].强激光与粒子束,2016,28(7):1-5.
- [3] 秦致远,许晓军,廖为民,等.激光武器系统导论[M].北京:国防工业出版社,2014.
- [4] 徐万武.高性能、大压缩比化学激光器压力恢复系统研究[D].长沙:国防科学技术大学,2003.
- [5] KUTAEV Y F,MANKEVICH S K,NOSACH O Y,et al. Lidar,space communication,and the search for signals from extraterrestrial civilizations at the radiation wavelength of an iodine-photodissociation laser-1.315 μm [J]. Journal of optical technology,2011,78(2):93-101.
- [6] 张长斌.氯碱化工氯气废气处理系统安全环保[J].山西化工,2021(3):201-203.
- [7] 余青原.氯气事故应急处置措施研究[J].广东化工,2021,48(10):102-103.
- [8] 刘建群.氯碱化工氯气废气处理系统安全环保研究[J].资源与环境,2020,46(10):169-170.
- [9] 范志刚.含氟废气处理系统装置研究[D].长沙:国防科学技术大学,2006.
- [10] 周俊波,刘颜召,高丽萍.活性炭吸附分离尾气中气态碘研究[J].舰船科学技术,2008,30(4):104-106.
- [11] 周飞,陆效磊,金小贤,等.工业VOCs治理活性炭动态吸附容量实例研究[J].环境科技,2023,36(6):14-18.
- [12] 唐善鑫.联碱洗涤塔及其控制系统设计[D].淮安:淮安大学,2022.
- [13] 兰孝臣,王远.喷嘴在滤碱机洗水系统中的应用[J].纯碱工业,2005(2):33-35.
- [14] 刘宇阳.碱回收锅炉黑液雾化冷态数值模拟研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [15] 张慧芳,高晓雷,郭探,等.单质碘、碘酸根和碘离子的吸附研究进展[J].核化学与放射化学,2011,33(3):129-135.
- [16] 戴永阳,吴永杰,傅懋,等.一种均匀喷射碱液脱除烟气中三氧化硫的方法与装置:CN201610254686.6[P].2016-08-17.
- [17] 丁伟.ANSYS FLUENT 流体计算从入门到精通[M].北京:机械工业出版社,2020.
- [18] 周芳龄,唐勇,周晓泉.基于DPM模型的旋流式沉沙池悬沙数值模拟[J].水电能源科学,2020,38(10):91-94.

- [19] 王松岭,甄猛,吴正人. 压力对喷嘴雾化特性影响的数值模拟[J]. 机械设计与制造,2020(3):51-54.
- [20] 陈若冰,刘志鹏. 基于 DPM 的空气吹拂式除雨技术[J]. 机械设计与制造,2020(6):1147-1149.
- [21] 石仲璟,王学生,陈琴珠. 乙氧基化反应喷嘴雾化和反应性能[J]. 华东理工大学学报(自然科学版),2017,43(2):273-279.
- [22] MARSH B M,IYER K,COOKS R G. Reaction acceleration in electrospray droplets:size,distance,and surfactant effects[J]. Journal of the american society for mass spectrometry,2019,30(10):2022-2030.

Numerical simulation of exhaust gas treatment nozzle spray based on DPM model

ZHAO Fang, REN Zebin, WANG Haifeng, SHI Yu

(Facility Design and Instrumentation Institute,

China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: To enhance the absorption rate of chlorine gas and iodine vapor in the exhaust gas of oxygen-iodine laser by sodium hydroxide, sodium carbonate and other alkaline solutions, a numerical simulation method combining DPM(Discrete Phase Model) and turbulence models were adopted to investigate the influence of parameters such as the nozzle spray direction, spray droplet size and spray cone angle on the system performance, and partial experimental verification was carried out. The research shows that, taking the spray particle distribution effect at a certain cross-section downstream of the nozzle as the evaluation index, under the same working conditions, the larger the spray cone angle of the nozzle and the smaller the spray droplet size, the better the spray particle distribution effect downstream; the nozzle spray direction significantly affects the spray particle distribution downstream, among which the reverse gas flow spray has the best effect. The research results provide strong support for the design of subsequent experimental schemes for the exhaust gas treatment of oxygen-iodine lasers.

Keywords: oxygen-iodine laser; alkaline solution; Discrete Phase Model; nozzle; spray particle

(责任编辑:唐立平)

引用格式 赵芳,任泽斌,王海锋,等. 基于 DPM 模型的尾气处理喷嘴喷雾数值模拟[J]. 山东航空学院学报,2026,43(2):10-16.

ZHAO F,REN Z B,WANG H F,et al. Numerical simulation of exhaust gas treatment nozzle spray based on DPM model[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics,2026,43(2):10-16.