

DOI: 10.11949/0438-1157.

液氮阵列喷嘴冷却的喷雾干涉仿真研究

张思博¹, 刘崇², 陈建业¹, 管王锋¹, 宫子乔¹, 谢军龙¹(¹ 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074; ² 民政部一零一研究所, 北京 100070)

摘要: 为揭示多喷嘴液氮冷却交汇区的喷雾干涉机制, 基于 Eulerian-Lagrangian 框架建立了 8 喷嘴阵列的全尺寸数值模型, 引入局部动量通量比作为量化指标, 对比分析了顺排与叉排两种拓扑在 35~80mm 喷射高度下的流场特征与传热性能。结果表明: 在低高度 ($H \leq 50\text{mm}$) 时, 两种排布均能维持良好均匀性; 当高度增至 65mm 时, 顺排阵列交汇区动量通量比增至 0.5 附近, 相邻横流正面碰撞从而诱发向上反流阻断液滴穿透路径, 表面温度非均匀度恶化至 0.52K; 而叉排阵列凭借错位排布构建斜向泄流通道, 将动量通量比峰值抑制在 0.4 以下, 表面温度非均匀度降至 0.40K。继续升高至 80mm 时, 叉排阵列表面温度非均匀度进一步降至 0.20K, 传热系数较顺排高出约 28%。研究证实, 封闭排布会引发动量堆积与排气受限, 引入局部动量通量比可有效量化干涉强度, 为阵列拓扑优化提供直接判据。

关键词: 液氮; 喷雾冷却; 多喷嘴阵列; 动量通量比; 喷雾干涉; 表面温度非均匀度

中图分类号: TK124

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-10

Simulation study of spray interference in liquid nitrogen array nozzle cooling

ZHANG Sibo¹, LIU Chong², CHEN Jianye¹, GUAN Wangfeng¹, GONG Ziqiao¹, XIE Junlong¹(¹ School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; ²

101 Institute, Ministry of Civil Affairs of the People's Republic of China, Beijing 100070, China)

Abstract: To elucidate the spray interference mechanisms within the impingement zones of multi-nozzle liquid nitrogen spray cooling, a full-scale numerical model of an 8-nozzle array was established under the Eulerian-Lagrangian framework. The local momentum flux ratio was introduced as a quantitative metric to characterize the interference intensity. Flow field characteristics and heat transfer performance of both in-line and staggered configurations were compared at nozzle-to-surface distances ranging from 35 to 80 mm. Results indicate that at lower heights ($H \leq 50\text{ mm}$), both configurations maintain satisfactory temperature uniformity. As the height increases to 65 mm, the in-line array experiences a sharp rise in momentum flux ratio within the impingement zone, reaching peak values near 0.5. The head-on collision of adjacent crossflows generates a stagnation point and induces upward counterflow, which impedes droplet penetration and elevates the surface temperature non-uniformity to 0.52 K. In contrast, the staggered configuration creates oblique venting channels due to its offset arrangement, suppressing the peak momentum flux ratio below 0.4 and reducing surface temperature non-uniformity to 0.40 K. At a height of 80 mm, the staggered array further lowers surface temperature non-uniformity to 0.20 K while achieving a heat transfer coefficient approximately 28% higher than that of the in-line array. The findings demonstrate that the performance

收稿日期: 2026-05-13 修回日期: 2026-08-08

通信作者: 刘崇(1984—), 男, 博士, 副研究员, liuchong_101s@163.com

第一作者: 张思博(2001—), 男, 硕士研究生, m202471396@hust.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3321802)

引用本文: 张思博, 刘崇, 陈建业, 管王锋, 宫子乔, 谢军龙. 液氮阵列喷嘴冷却的喷雾干涉仿真研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1-10

Citation: ZHANG Sibo, LIU Chong, CHEN Jianye, GUAN Wangfeng, GONG Ziqiao, XIE Junlong. Simulation study of spray interference in liquid nitrogen array nozzle cooling[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1-10

reversal in impingement zones originates from momentum accumulation and restricted venting inherent to closed packing patterns. The introduced momentum flux ratio provides an effective quantitative descriptor of interference intensity, offering a direct criterion for array topology optimization.

Keywords: liquid nitrogen; spray cooling; multi-nozzle array; momentum flux ratio; spray interference; surface temperature non-uniformity

引 言

大面积高热通量器件,如大功率电子元器件、航空航天热防护系统及超导设备的冷却技术是当前热物理与热管理领域面临的重大挑战^[1-3]。传统的液氮池沸腾冷却受限于膜态沸腾极限,蒸汽膜的阻滞会导致表面产生巨大的温度梯度并引发严重的局部过热甚至材料失效^[4-5]。近年来,液氮闪蒸喷雾冷却因其能够依靠液滴的高速冲击有效穿透蒸汽层,提供极高的局部传热系数、超高的冷却速率以及良好的均温能力,成为解决大面积散热瓶颈的极具潜力的前沿方案^[6-9]。

为了满足大面积发热表面的全覆盖均匀冷却,单喷嘴系统受限于有限的喷雾锥角,其需要改进为多喷嘴阵列^[10-13]。然而,阵列喷雾的流场不是单个独立喷雾的简单线性叠加,而是随着空间紧凑度的提升,相邻喷雾锥之间会产生极其复杂的气液两相干涉现象。在近壁面区域,高速相变产生的液氮蒸汽被迫沿冷却面横向扩散,形成贴壁横流。Martin^[14]和 Al-Sanea^[15]在早期的冲击射流研究中明确指出,横向排气通道的受限会严重削弱交汇区的对流换热强度;Dano 等^[16]进一步证实,阵列的拓扑排布对交汇区流场的干涉特征具有较大影响。在相变极其剧烈的液氮阵列喷雾冷却中,由于低温蒸汽体积的膨胀,这种阵列干涉效应会变得更加明显。

目前关于液氮喷雾冷却的研究主要聚焦于单喷嘴的雾化特性、液滴粒径分布以及表面传热经验关联式的拟合^[17-18]。对于单喷嘴的研究,目前主要聚焦于雾化特性与基础传热规律,例如 Liu 等^[19]采用 DPM 模型成功预测了单喷嘴的传热特性,指出喷射高度对表面温度非均匀性具有决定性影响。在双喷嘴或少量喷嘴组合的初步研究中,有研究开始关注到干涉现象对喷雾场的影响。Chen 等人^[20]通过对比单、双、三喷嘴布局,证实了适度的干涉区域可使冷却效率大幅提升,并发现三喷嘴交错排布优于顺排布局。这一阶段的研究虽然识别了阵列排布对传热的影响,但仍局限于几何拓扑的宏观定性对

比,未能深入剖析交汇区内部流场演化。针对大面积冷却的密集多喷嘴阵列,Hou 等^[21]探究了8喷嘴水喷雾阵列下不同表面微结构的传热强化,并提出了宏观无量纲数 DM 以表征强化效果。然而,对于深冷液氮阵列而言,相变产生的蒸汽体积膨胀极其剧烈,受限空间内的气液两相干涉远比常温水喷雾复杂。当前研究多停留在干涉导致传热恶化/增强的表象描述,而缺乏能够定量表征空间气液干涉强度的物理指标。

针对上述研究,本文基于 Eulerian-Lagrangian 多相流计算框架,面向大面积散热需求,构建了包含8个喷嘴的液氮阵列喷雾全尺寸数值模型。本文在液氮阵列冷却中引入局部动量通量比(MFR)^[22]作为核心空间量化指标,系统评估了顺排与叉排排布结构在不同喷射高度下的干涉规律。通过研究交汇区气膜横流的形成机制及其对离散相液滴轨迹的拦截效应,阐明阵列排布导致冷却面均匀性变化的气液干涉现象,从而为大面积、高热通量装备的冷却系统提供严谨的几何设计与优化准则。

1 喷雾冷却数值方法与物理模型

1.1 数值模型

采用基于欧拉-拉格朗日框架的数值方法,对阵列式液氮喷雾过程进行模拟。其中,连续的气相(氮气蒸汽)被处理为欧拉场,而离散的液相(液滴群)则被处理为拉格朗日粒子,通过在连续相流场中追踪大量粒子轨迹来研究喷雾的输运与干涉机制^[23-24]。

1) 连续相控制方程

连续气相(氮气)流动、传热以及与离散液相的相互作用,通过求解三维可压缩的纳维-斯托克斯守恒方程组来描述^[25]。连续相的质量、动量与能量守恒方程分别如下:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (\vec{k}_{eff} \nabla T) + S_h \quad (3)$$

式中: ρ 为连续相流体密度, kg/m^3 ; $\vec{u}$ 为连续相速度矢量, m/s ; S_m 为离散相的质量源项, 源于液滴的蒸发, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; p 为静压, Pa ; $\vec{\tau}$ 为应力张量, Pa ; $\vec{g}$ 为重力加速度矢量, m/s^2 ; $\vec{F}$ 为离散相对连续相施加的动量体积力矢量, N/m^3 ; E 为单位质量流体的总能量, J/kg ; $\vec{k}_{eff}$ 为有效热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; S_h 为对流换热和相变潜热的能量源项, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

2) 离散相控制方程

离散相通过积分拉格朗日坐标系下的作用力平衡方程来追踪每个液滴的轨迹:

液滴运动方程(力平衡):

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_D + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (4)$$

$$\vec{F}_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (5)$$

式中: $\vec{u}_p$ 为液滴速度, m/s ; $\vec{u}$ 为连续相速度, m/s ; ρ_p 为液滴密度, kg/m^3 ; $\vec{F}_D$ 为单位质量曳力, m/s^2 ; $\vec{F}$ 为单位质量的其他作用力, m/s^2 ; μ 为气相动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; d_p 为液滴直径, m ; C_D 为曳力系数; Re 为基于液滴与气体相对速度的 Reynolds 数。

为使方程在宽 Reynolds 数 Re 范围内闭合, 曳力系数 C_D 采用经典的球形液滴阻力法则进行动态计算。同时, 采用随机轨道模型与液滴碰撞/聚合模型以捕获干涉区内液滴的湍流扩散与粒径再分配效应。

3) 液滴传热与相变模型

液滴的传热和蒸发(沸腾)过程同时考虑对流换热与相变潜热:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \quad (6)$$

式中: m_p 为液滴质量, kg ; c_p 为液滴比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_p 为液滴温度, K ; h 为对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A_p 为液滴表面积, m^2 ; T_∞ 为液滴所在位置的局部连续相温度, K ; h_{fg} 为汽化潜热, J/kg 。

对流传热系数 h 通过 Ranz-Marshall 经验关联式闭合求解^[26]:

$$Nu = \frac{h d_p}{k_\infty} = 2.0 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (7)$$

式中: Nu 为 Nusselt 数, k_∞ 为连续相的热导率, Pr 为 Prandtl 数。

当液滴温度达到液氮在当地环境压力下的饱和温度 T_{sat} 时, 沸腾蒸发过程被全面激活。此时液滴吸收的热量全部用于相变, 其质量蒸发率由气液界面间的热量传递强度决定:

$$\frac{dm_p}{dt} = -\frac{h A_p (T_\infty - T_{sat})}{h_{fg}} \quad (8)$$

4) 液滴碰撞与聚合模型

本文选用 O'Rourke 碰撞模型来追踪喷雾干涉区内离散相液滴的相互作用。在该模型中, 判定两个液滴发生反弹或聚合的核心判定参数为临界碰撞参数, 其大小直接依赖于两个液滴的相对速度与碰撞韦伯数。为确保碰撞动力学方程的准确闭合, 本模型中输入了液氮在 77.3 K 下的表面张力系数 ($\sigma = 0.0088 \text{ N/m}$), 以此作为计算、量化液滴表面能抗力以及界定聚合边界的关键物性参数。

1.2 计算条件

在阵列规模的选取上, 计算模型选为 8 阵列喷嘴模型, 喷雾场能够覆盖 200 mm × 100 mm 冷却区, 在空间尺度上, 冷却区面积契合当前大功率 IGBT 模块、高能激光器阵列以及典型超导磁体端部的标准散热面尺寸^[27-29]。其次, 相较于 2 喷嘴与 4 喷嘴模型, 8 喷嘴阵列能够真实复现大面积冷却中的中心区域蒸汽堆积效应; 同时相较于更大规模的阵列, 8 喷嘴在捕捉核心气液动量耦合机制的前提下, 能较为减少 Eulerian-Lagrangian 多相流相变计算的算力开销。因此, 该 8 喷嘴模型可视为大面积液氮冷却系统设计中的代表性体积单元, 其得出的干涉规律可为大规模冷却系统的模块化扩展提供理论支撑。

计算区域分为两部分: 流体域与固体域。流体域设为长 300 mm, 宽 200 mm, 高 180 mm 的六面体腔体。为精确模拟开放环境下的喷雾状态, 腔体上表面设置为压力入口, 下表面及四周侧壁设置为压力出口, 两者的表压均设定为 0 Pa, 即系统绝对工作压力维持在 101.325 kPa。同时, 环境回流温度与初始流场温度均统一设定为 300 K。

固体域为长 200 mm, 宽 100 mm, 高 60 mm 的六面体, 其四周侧壁设为绝热壁面。上表面设置为与流体域相互作用的流固耦合传热壁面, 下表面采用恒定给定的 10000 W/m² 均匀热流边界, 用以等效模拟大功率电子器件的稳定发热负荷。此外, 离散相在固体壁面上的边界条件设置为反射, 以捕捉高过热度下的膜态沸腾极限干涉工况。

参考 Yang 等的实验测定结果^[30], Rosin-

Rammler模型特征参数具体设定为:最小粒径 $5.4\text{ }\mu\text{m}$,最大粒径 $218.1\text{ }\mu\text{m}$,平均粒径 $54.07\text{ }\mu\text{m}$,分布指数设为3.5,直径数量设为10,以真实还原高压实心锥喷嘴的雾化多分散特征。

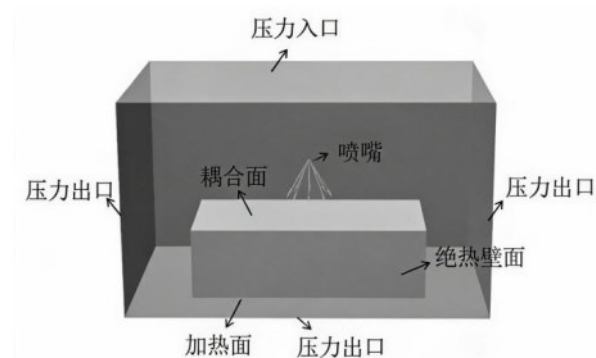


图1 边界条件

Fig.1 Boundary conditions

1.3 模型验证

计算域采用六面体结构化网格进行划分,为了精准捕捉近壁面剧烈相变与贴壁横流特性,对流区域与固体域交界面施加了边界层网格加密。以中等密度网格为例,其全局基础网格尺寸设定为 1 mm ,边界层第一层高度控制为 0.1 mm 。

为了排除空间离散尺寸对数值计算结果的影响,基于相同的网格结构生成了三种不同密度的网格模型开展网格无关性验证:粗网格(全局尺寸 1.3 mm ,总网格数162.67万)、中等网格(全局尺寸 1.0 mm ,总网格数389.04万)、细网格(全局尺寸 0.8 mm ,总网格数676.32万)。

以单喷嘴液氮喷雾冷却工况下的固体域耦合面温度分布作为监测指标,计算结果如图2显示,中等密度网格与细网格的计算结果中沿 z 轴方向温度分布最大偏差为 2.2 K ,表明当网格数量达到389.04万时,离散误差已被有效控制,进一步加密网格对计算结果的影响已不显著。综合考虑到计算精度与计算资源的消耗,选取中等密度的网格方案进行后续的数值模拟计算。

在进行液氮喷雾冷却特性计算之前,为了验证本文数值计算方法的可靠性,选取了液氮喷雾冷却实验作为基准工况进行复现^[30]。建立与其实验设置一致的几何模型与边界条件。仿真与实验对比结果如图3,可以看出模拟得到的冷却表面温度分布与文献实验数据趋势呈现出较好的一致性。在局部区域存在最大约6%的相对偏差,该偏差主要来

源于数值模拟中对复杂湍流与相变过程的简化假设、实验测量本身存在的不确定度以及网格离散化引入的微小差异。考虑到液氮喷雾两相流场的复杂性,6%的偏差处于工程可接受的误差范围内,所建立的单喷嘴数值模型具有较好的准确性与可靠性,可用于后续多喷嘴阵列的仿真研究。

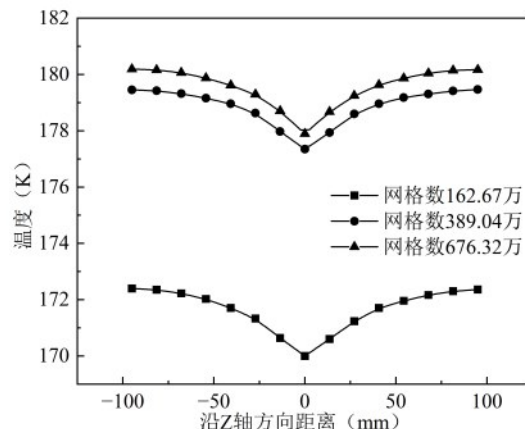


图2 网格无关性验证

Fig.2 Verification of grid independence

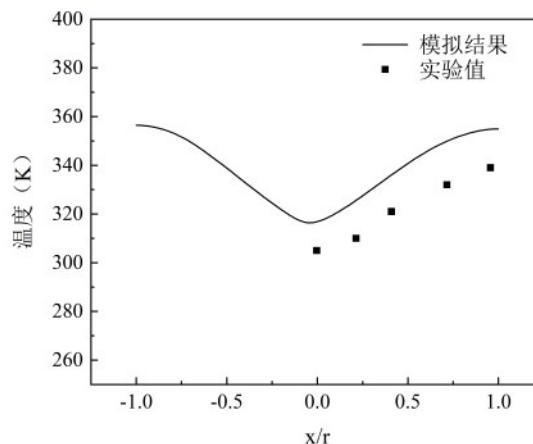


图3 模拟与实验^[30]对比

Fig.3 Comparison of Simulation and Experiment^[30] Results

1.4 阵列排布设计与均匀度评估准则

为探究阵列排布及高度等参数对横流干涉的影响,在保证喷雾重叠率与喷嘴密度一致的前提下,设计了顺排与叉排阵列进行对比分析,图5为两种喷嘴布局。 H 为喷嘴阵列高度, D 为喷嘴间距,为了可以单一、准确地探究排列方式(顺排与叉排)和喷射高度这两个变量对气流排泄与流场干涉的具体影响并且保证覆盖率并控制干扰,设定喷嘴间距为 50 mm 。

设置每个喷嘴都有相同的雾化参数,具体条件

如表1所示。

表1 喷雾参数
Table 1 Spray Parameters

喷雾参量	参数值
介质	液氮
流量/kg/s	0.02
喷嘴类型	实心锥喷嘴
喷嘴内径/mm	2
喷射半锥角/°	30
喷射速度/m/s	20
喷射高度/mm	35, 50, 65, 80

同时为了严格遵循控制变量原则,在探究不同喷射高度(35 mm、50 mm、65 mm、80 mm)对干涉特性的影响时,所有工况下喷嘴出口的初始雾化状态(流量、速度、半锥角、液滴粒径分布)以及耦合面的边界条件均保持绝对一致,仅改变喷嘴出口中心至冷却面的垂直距离 H 。

为定量评估宏观冷却均匀性,引入表面温度非均匀度($STNU$)作为考核指标:

$$STNU = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - T_{avg})^2} \quad (9)$$

由于固体域四周的绝热侧壁会导致热量堆积,为精准捕捉阵列内部不同排布的干涉规律,在提取 $STNU$ 及温度场分布时,去除距离耦合面边缘5 mm的受干扰网格区域,仅对中心190×90 mm²的有效冷却干涉区进行统计分析。

除了宏观的表面温度均匀性,从动力学角度定量分析相邻喷雾锥在交汇区的相互作用,引入无量纲数局部动量通量比作为微观气液干涉强度的评估指标。

在多喷嘴受限空间内,相变产生的膨胀蒸汽会形成贴壁横流。当该横流动量提高到能够影响下落液滴的法向动量时,便会诱发液滴轨迹的偏转,进而影响冷却效果。将 MFR 定义为局部近壁面处气相横流(连续相)的切向动量通量与液滴(离散相)初始法向动量通量的比值:

$$MFR = \frac{\rho_g u_c^2}{\rho_p v_p^2} \quad (10)$$

式中: ρ_g 为局部氮气蒸汽密度,kg/m³; u_c 为气相在平行于靶面方向的局部横流合成速度($u_c = \sqrt{u_x^2 + u_z^2}$),m/s; ρ_p 为液氮液滴密度,kg/m³; v_p 为液氮液滴的初始喷射速度,m/s。建立穿过喷嘴中心的特征交汇线,通过提取不同阵列在特征交汇线上

各节点的动量通量比来量化蒸汽膜对液滴的阻碍能力,判定流场的动量干涉程度。

2 结果与讨论

2.1 喷雾宏观冷却性能分析

液氮喷雾阵列的宏观换热性能不仅取决于平均传热系数,更取决于其表面温度分布的均匀性。图5展示了不同喷射高度下两种阵列排布的传热系数 h 与表面温度非均匀度 $STNU$ 的演化规律,当喷射高度 H 增加时,冷却面的表面温度非均匀度的变化并不是直线的,顺排和叉排阵列的性能在这个过程中会出现明显的交叉现象。在较低的喷射高度(35 mm和50 mm)下,顺排阵列的 $STNU$ 值比叉排阵列低,这是因为在低高度时,喷雾锥还没有完全散开,相邻喷雾锥之间的干涉区域较小,这时冷却面的温度均匀性主要由喷雾的几何覆盖面积决定。顺排阵列的规整排布使得相邻喷嘴的撞击点间距更均匀,冷却盲区更小,因此表现出更好的宏观均匀性。

当高度升到65 mm时,喷嘴之间的干涉作用变得更强。此时顺排阵列的冷却面的表面温度非均匀度变差, $STNU$ 上升到了0.52 K。相反叉排阵列的 $STNU$ 降到了0.40 K。这种反转现象说明流场的主要影响因素改变了,从几何覆盖逐渐转变成气流和液滴的干涉。在65 mm这个高度时喷雾之间的干涉区域变大,叉排阵列因为排气更顺畅,表现出了更好的温度均匀性。

当高度进一步升到80 mm时,两种阵列的 $STNU$ 都明显下降,冷却面温度分布都变得更均匀,其中叉排的 $STNU$ 降到了最低的0.20 K。同时顺排阵列的传热系数在80 mm时大幅下降,降低到了557.78 W/(m²·K)。而叉排阵列的传热系数依然保持在714.52 W/(m²·K)。

图6展示了冷却面在不同工况下的温度波动云图,在喷射高度为50 mm时图6(a)和(b)显示出相似的特征,顺排和叉排阵列都呈现出规则的交替色斑,此时的温度波动幅度小。顺排阵列的色斑排列则更为规整,喷雾干涉区的温度梯度较小;而叉排阵列由于撞击点错位,局部存在轻微的温度波峰。当高度升至65 mm时,两种阵列的表现发生了变化。如图6(c)所示,顺排阵列的冷却面上出现了大面积的热斑。这些热斑主要分布于相邻喷嘴的对称轴交汇区,即喷雾干涉最严重的区域。提取该核心交

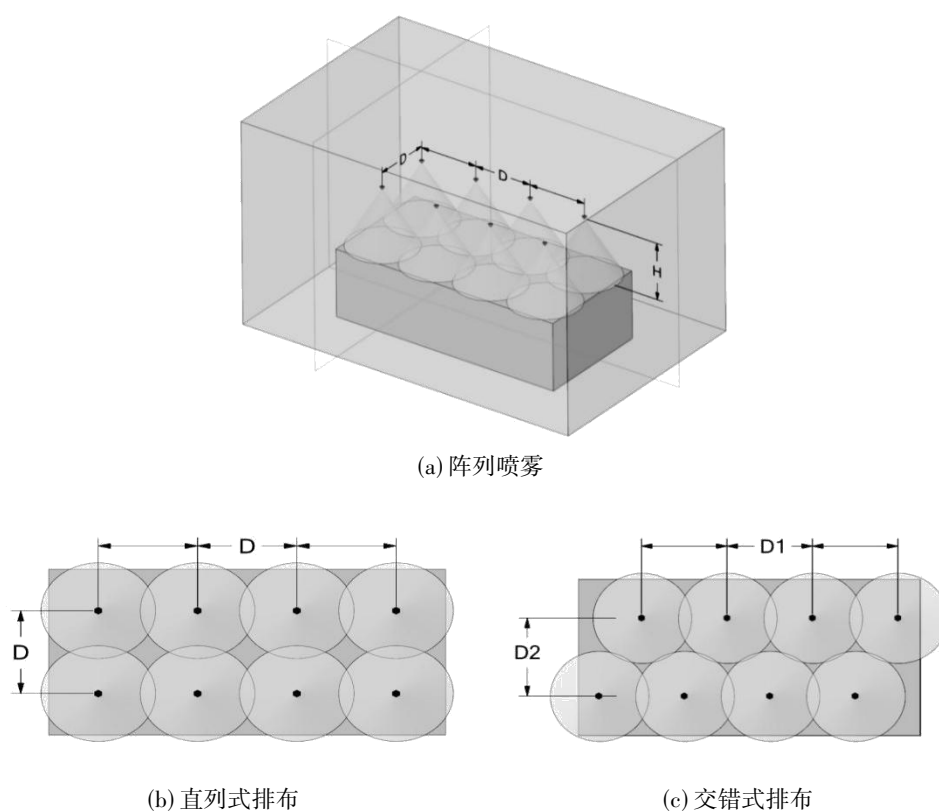


图4 多喷嘴阵列排布

Fig.4 Multi-nozzle array configuration

汇区的局部温度波动极值 $\Delta T(T-T_{avg})$ 发现,顺排(最大值0.75 K,最小值-0.99 K)与叉排(最大值0.80 K,最小值-1.00 K)在极值跨度上虽相近,但其热斑的空间分布面积差异显著。顺排阵列的高温波动区在交汇区形成了大面积的连续连片分布,致使全局表面温度非均匀度恶化至0.52 K;相比之下,叉排阵列有效地将温度极值点压缩在较小的空间范围内,使得绝大部分区域温度贴近均值,STNU降至0.40 K。即使在重叠严重的工况下,叉排阵列依然能保持较为均匀的温度分布。说明相邻喷头的干涉导致了顺排喷雾的局部冷却性能降低。相比之下,叉排阵列的热斑被有效地切割和分散,温度云图呈现出低幅度的波动特征,证明了错位排布能够缓解喷雾干涉。图6(d)展示了叉排阵列的优势,冷却面上原本的热斑被削减,证明了叉排阵列能有效缓解喷雾干涉。即使在重叠严重的工况下,叉排阵列依然能保持较为均匀的温度分布。

2.2 喷雾阵列动量干涉分析

为了探究顺排阵列65 mm高度下均匀性变差的原因,引入局部动量通量比 MFR 来量化气液两相的

干涉。这个指标能直接反映横向气流对下落液滴的阻碍程度。图7展示了特征交汇线上的 MFR 空间分布。可以看到在较低的50 mm高度下顺排和叉排阵列的 MFR 峰值都相对较低。然而,当高度增加到65 mm时,在顺排阵列的强干涉区,红色的 MFR 曲线出现了尖峰,最大值接近0.5。这是由于顺排阵列的拓扑结构比较封闭。相变产生的液氮蒸汽被困在相邻喷头之间,形成了一个高压区域。这些气流无法及时向四周排泄,导致局部动量迅速堆积。

结合喷雾锥展开程度与气液两相场特征进行剖析,随着喷射高度的增加,单个喷嘴的喷雾锥在到达壁面时的覆盖半径呈线性扩大,导致相邻喷嘴间的重叠面积急剧增加。在低高度工况下,喷雾锥展开程度有限,交汇区重叠面积较小,相变产生的蒸汽相体积分数在空间上能够迅速向四周耗散,未能形成明显的局部聚集。此时,液滴的运动轨迹基本保持由初始动量主导的垂直下落状态,系统的传热瓶颈主要受限于几何覆盖盲区。

然而,当高度增至65 mm及以上时,喷雾锥的高度展开导致相邻射流发生深度重叠。交汇区内单

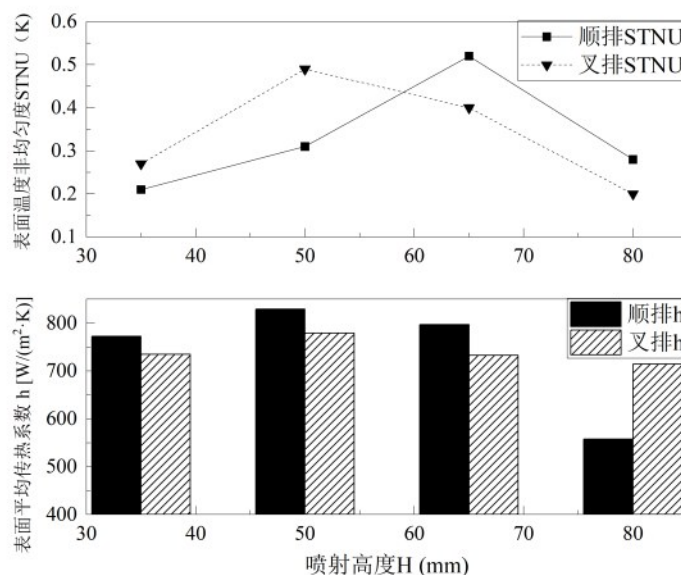
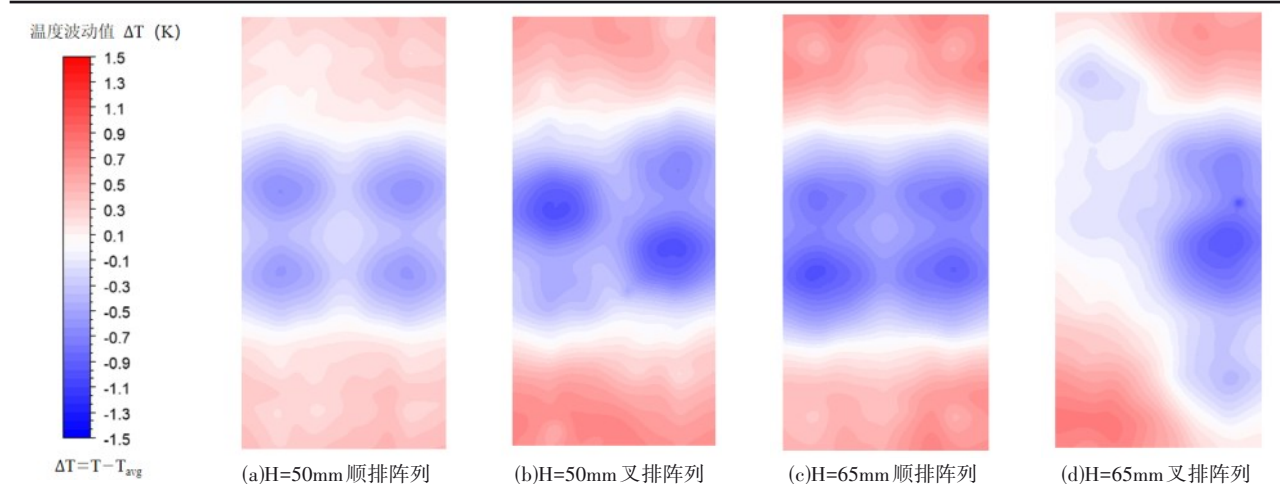


图5 宏观换热非均匀度评估

Fig.5 Assessment of Macro-Scale Heat Transfer Non-Uniformity

图6 冷却面温度波动云图

Fig.6 Cloud Map of Cooling Surface Temperature Fluctuations



位容积的液氮蒸发量激增,相变生成的海量蒸汽受限于顺排阵列的封闭拓扑,无法及时排泄,导致交汇区底部的蒸汽相体积分数急剧攀升,形成了一层高压蒸汽垫。结合液滴运动轨迹如图8所示,当后续液滴进入该高体积分数蒸汽区时,其携带的法向动能被剧烈的向上气流电力快速耗散,液滴轨迹在近壁面发生横向偏转甚至被反向裹挟向上逃逸。这种由大重叠面积引发的高蒸汽体积分数聚集,最终转化为对液滴轨迹的气动拦截,这正是动量干涉强度随高度突增并取代几何覆盖成为主导因素的内在物理机制。

相比之下,叉排阵列的表现要更加优越。图7的曲线显示,叉排阵列的MFR峰值要低于顺排阵

列。这是由于叉排阵列采用了错位的排布方式。这种排布结构为蒸汽提供了更多的开放通道。气流可以顺着对角线方向快速流出,从而避免了在局部的正面碰撞。图9的矢量图证实了这一点。叉排阵列能够形成沿交汇区对角线的通道来卸载交汇区的气相横流动量。

这也说明了80 mm高度下的叉排STNU进一步降至0.20 K,传热系数较顺排高出约28%的原因,这表明在较高的高度下,叉排阵列在传热和均匀性上都超过了顺排阵列,此时喷雾锥充分展开,重叠率提高,此时阵列排布对于冷却性能的影响要更大。

通过这些分析,可以得出顺排阵列在高度较高,重叠严重时,无法解决内部的气流挤压问题。

而叉排阵列凭借开放的排布结构,成功压制了 MFR 的激增。这保证了液滴在喷雾干涉下依然能顺利到达冷却面。因此,在处理大面积、高重叠率的冷

却工况时,对喷嘴阵列排布进行调整可以较好的提升冷却性能。

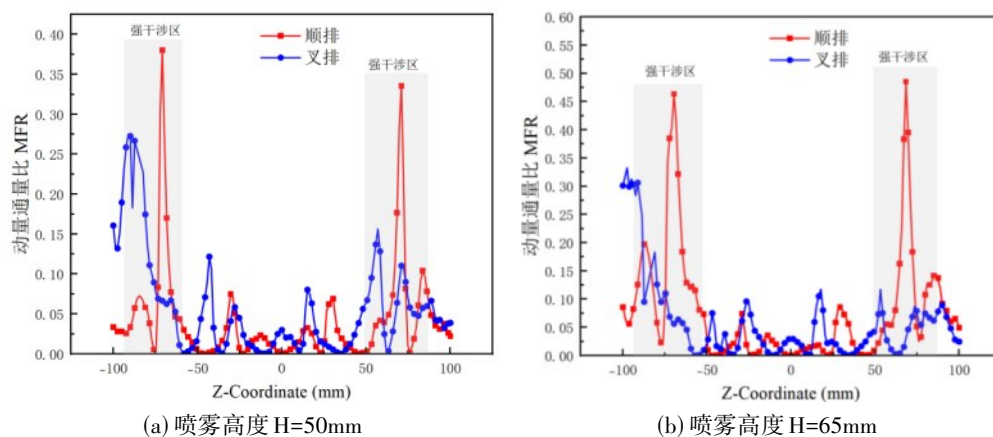


图7 近壁面动量通量比空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the wall-normal momentum flux ratio

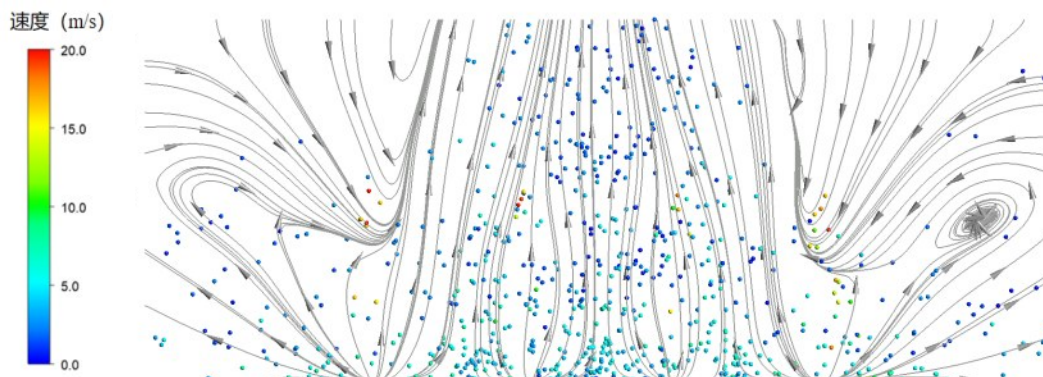
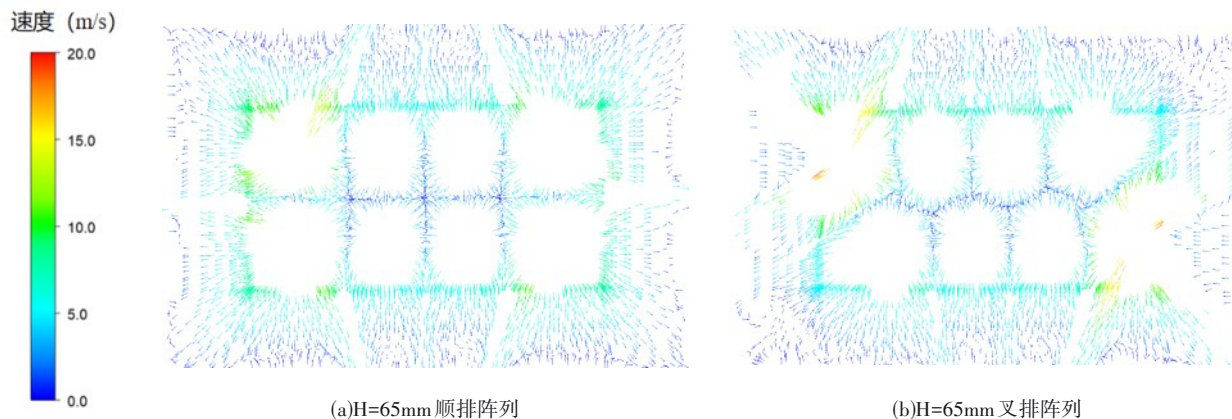


图8 交汇区气相流线及离散相液滴速度分布(顺排, $H=65\text{mm}$)

Fig.8 Velocity distribution of gas phase streamlines and discrete phase droplets in the interface region (in-flow configuration, $H=65\text{mm}$)

图9 近壁面横流速度矢量

Fig.9 Vector distribution of near-wall cross-flow velocity



(a) $H=65\text{mm}$ 顺排阵列

(b) $H=65\text{mm}$ 叉排阵列

为进一步量化上述动量干涉机制,揭示顺排阵列出现大面积连片热斑的原因,本文提取了高度为65 mm工况下核心交汇区的气相最大法向反流速度与壁面液滴质量浓度,并绘制了如图10所示的定量对比图。

在气相速度场方面,由于顺排阵列封闭拓扑导致交汇区驻点上方形成了较强的向上反流,其法向最大反流速度达到了6.5 m/s;而叉排阵列凭借斜向泄流通道,将最大反流速度削减至3.8 m/s。这种气动曳力的差异决定了液滴对冷却面的有效穿透与润湿。定量提取交汇区底面的离散相质量浓度数据表明,顺排阵列在强烈反流的托举下,大量液滴被拦截滞留于空间,导致近壁面处的液滴质量浓度降至 3.4 kg/m^3 ,而叉排阵列在该区域的液滴质量浓度维持在 4.2 kg/m^3 。这种由于气相反流拦截导致局部液滴浓度降低的物理机制,正是前文中顺排阵列局部热斑面积扩张、STNU恶化的根本原因。

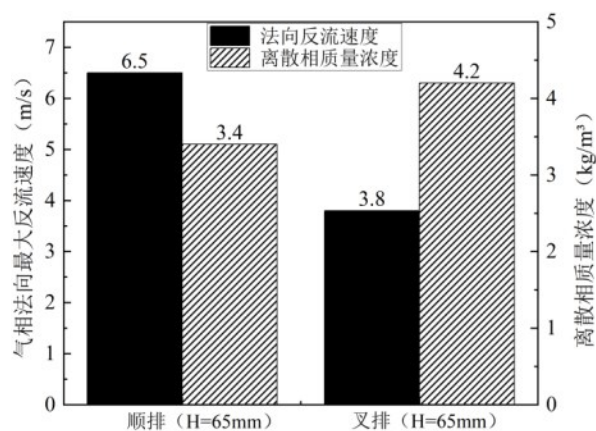


图10 交汇区反流速度与离散相质量通量定量对比

Fig.10 Comparison of Backflow Velocity and Discrete-Phase Mass Flow Rate in the Convergence Zone

3 结论

(1)阵列喷雾冷却的均温主导机制随喷嘴重叠度增大发生本质转折,深度重叠工况下叉排拓扑展现出较强的冷却强化优势。这是由于这时叉排阵列能够通过其独特的对角线泄流通道削弱了气相反流拦截,在维持液滴有效覆盖率的同时,提高了底层的相变换热强度。表明高重叠率下气液干涉取代几何覆盖成为控制均匀性的主导因素。

(2)MFR可作为定量评估气液干涉强度的有效指标,顺排阵列在高重叠率下性能恶化的根源在于封闭排布引起的动量堆积,相邻横流对撞形成驻点

并诱发向上反流,阻断液滴向壁面输运,导致传热恶化。

(3)叉排阵列通过错位排布构建斜向泄流通道,能有效降低由封闭排布引起的动量堆积,保障了高重叠率下液滴对冷却面的有效穿透,在受限空间高覆盖需求下更具优势。

参考文献

- [1] 薛绒, 阮一道, 赖欢, 等. 低温风洞大空间液氮喷雾冷却数值模拟分析[J]. 低温工程, 2019(1): 35-40.
Xue R, Ruan Y X, Lai H, et al. Numerical simulation of liquid nitrogen spray cooling in cryogenic wind tunnel[J]. Cryogenics, 2019(1): 35-40.
- [2] 刘秀芳, 钟昕, 李梦京, 等. 大流量相变喷雾冷却的实验研究[J]. 低温与超导, 2012, 40(1): 47-52.
Liu X F, Zhong X, Li M J, et al. Experimental study on large cooling load phase change spray cooling[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2012, 40(1): 47-52.
- [3] 黄翔, 李潼, 褚俊杰. 算力时代数据中心液冷与蒸发冷的融合发展[J]. 制冷与空调, 2026, 26(3): 23-32.
Huang X, Li T, Chu J J. The integration development of evaporative cooling and liquid cooling in the era of computing power[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2026, 26(3): 23-32.
- [4] Kim J. Spray cooling heat transfer: The state of the art[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, 28(4): 753-767.
- [5] 付鑫, 任小军, 张鹏, 等. 多孔表面的液氮池沸腾实验研究[J]. 低温与超导, 2014, 42(8): 21-25.
Fu X, Ren X J, Zhang P, et al. Experimental research on pool boiling of liquid nitrogen on porous surfaces[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2014, 42(8): 21-25.
- [6] 冯彪. 基于液氮冷却的无人机燃油-环控系统热量管理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
Feng B. Research on heat management of UAV fuel environment control system based on liquid nitrogen cooling[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [7] Sehmby M S, Chow L C, Hahn O J, et al. Spray cooling of power electronics at cryogenic temperatures[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1995, 9(1): 123-128.
- [8] Xie J L, Tan Y B, Wong T N, et al. Multi-nozzle array spray cooling for large area high power devices in a closed loop system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 78: 1177-1186.
- [9] 刘先龙, 张建军, 陈雪晴, 等. 飞行器低气压环境对液氮喷雾冷却性能的影响机制[J]. 装备环境工程, 2025, 22(6): 37-43.
Liu X L, Zhang J J, Chen X Q, et al. Effect mechanism of low pressure environment on the cooling performance of liquid nitrogen spray in the aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(6): 37-43.
- [10] 赵庆凯, 陈峙, 马占江, 等. 液氮喷雾冷却过程中的传热规律及试验分析[J]. 热能动力工程, 2026, 41(3): 95-103.
Zhao Q K, Chen Z, Ma Z J, et al. Heat transfer mechanisms and experimental analysis in liquid nitrogen spray cooling process[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2026, 41

- (3): 95–103.
- [11] 李晓阳, 李东, 陶明磊, 等. 多喷嘴喷雾冷却表面传热特性实验研究[J]. 化工学报, 2024, **75**(1): 231–241.
Li X Y, Li D, Tao M L, et al. Experimental study on heat transfer characteristics of multi nozzle spray cooling surface[J]. CIESC Journal, 2024, **75**(1): 231–241.
- [12] 薛绒, 曹锋, 刘灵辉, 等. 多喷嘴阵列喷雾冷却技术的研究进展[J]. 制冷与空调, 2015, **15**(1): 13–17.
Xue R, Cao F, Liu J H, et al. Research progress of multiple-nozzle arrays spray cooling technology[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2015, **15**(1): 13–17.
- [13] Pautsch A G, Shedd T A. Spray impingement cooling with single- and multiple-nozzle arrays. Part I: Heat transfer data using FC-72 [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, **48**(15): 3167–3175.
- [14] Martin H. Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces[J]. Advances in Heat Transfer, 1977, **13**: 1–60.
- [15] Al-Sanea S. A numerical study of the flow and heattransfer characteristics of an impinging laminar slot-jet including crossflow effects[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992, **35**(10): 2501–2513.
- [16] Dano B P, Liburdy J A, Kanokjaruvijit K. Flow characteristics and heat transfer performances of a semi-confined impinging array of jets: Effect of nozzle geometry[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, **48**(3–4): 691–701.
- [17] She Y, Jiang Y, Zhou N, et al. Experimental study on heat transfer characteristics of spray cooling of liquid nitrogen[J]. Heat Transfer Research, 2021, **52**(5): 27–44.
- [18] Silk E A, Kim J, Kiger K. Spray cooling of enhanced surfaces: Impact of structured surface geometry and spray axis inclination [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, **49**(25–26): 4910–4920.
- [19] Liu X L, Du C H, Zhu J W, et al. Numerical investigation of liquid nitrogen spray cooling under low ambient pressure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, **233**: 126048.
- [20] Chen Q S, Zhang Q R, Wang C, et al. Numerical study of spray cooling: The effect of nozzle arrangement on heat transfer performance[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2026, **196**: 105561.
- [21] Hou Y, Tao Y J, Huai X L. The effects of micro-structured surfaces on multi-nozzle spray cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, **62**(2): 613–621.
- [22] Broumand M, Birouk M. Liquid jet in a subsonic gaseous crossflow: Recent progress and remaining challenges[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2016, **57**: 1–29.
- [23] 王为术, 任坤朋, 牛靖尊, 等. 阵列喷嘴干冰喷雾冷却特性数值研究[J]. 低温与超导, 2022, **50**(4): 58–64, 94.
Wang W S, Ren K P, Niu J Z, et al. Numerical study on characteristics of dry ice sublimation spray with array nozzles[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2022, **50**(4): 58–64, 94.
- [24] 胡白梅, 左建国. 液氮喷雾超快速冷却的数值模拟研究[J]. 节能, 2022, **41**(6): 40–43.
Hu B M, Zuo J G. Numerical simulation study on ultra-fast cooling of liquid nitrogen spray[J]. Energy Conservation, 2022, **41**(6): 40–43.
- [25] Mundo C H R, Tropea C, Sommerfeld M. Numerical and experimental investigation of spray characteristics in the vicinity of a rigid Wall[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1997, **15**(3): 228–237.
- [26] Cai C, Liu H, Jia M, et al. Numerical investigation on heat transfer of water spray cooling from single-phase to nucleate boiling region [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, **151**: 106258.
- [27] 唐川林, 刁柯盈, 李豪志. IGBT 散热模块流道与翅针结构的优化设计[J]. 轻工机械, 2026, **44**(1): 44–51, 59.
Tang C L, Diao K Y, Li H Z. Optimization design of flow channel and pin-fin structures in IGBT heat dissipation module[J]. Light Industry Machinery, 2026, **44**(1): 44–51, 59.
- [28] 李青松, 高亦飞, 汪立军, 等. 大能量窄脉宽风冷 MOPA 激光器研究[J]. 激光与红外, 2024, **54**(7): 1022–1027.
Li Q S, Gao Y F, Wang L J, et al. Research on high energy narrow pulse width air-cooled MOPA laser[J]. Laser & Infrared, 2024, **54**(7): 1022–1027.
- [29] 张华辉, 杜双松, 丁开忠, 等. 高温超导聚变装置氦气循环冷却系统设计与研究[J]. 低温与超导, 2026, **54**(1): 76–81.
Zhang H H, Du S S, Ding K Z, et al. Design and research of helium circulation cooling system for HTS fusion device[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2026, **54**(1): 76–81.
- [30] Yang X S, Zhao W, Zhao Q J, et al. Numerical and experimental study on heat transfer performance and surface temperature nonuniformity improvement in liquid nitrogen spray cooling[J]. ASME Journal of Heat and Mass Transfer, 2026, **148**: 012301.