

开式通道内液氮喷雾的降温特性

陈双涛¹, 王鑫², 曲林锋², 薛绒¹, 刘秀芳¹, 陈良¹, 侯予¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 沈阳飞机设计研究所, 110035, 沈阳)

摘要: 为了研究液氮喷雾参数对环境模拟空间温度分布的影响, 首先搭建了由液氮喷雾系统和低温测试系统构成的开式通道液氮喷雾冷却实验系统, 利用 CFD 软件针对开式空气回路系统中实验段建立了三维液氮喷雾数值模型, 采用欧拉-拉格朗日方法进行液氮喷雾模拟研究, 最后进行了实验验证, 分析了喷雾质量流量、粒径、喷嘴数量和气流速度对液氮喷雾蒸发和空间温度分布的影响。研究表明: 随着液氮喷雾液滴直径的减小, 液氮与环境气流的换热面积增加, 换热效率提高, 降温效果改善; 当液氮喷雾质量流量增加时, 单位时间内喷入空间的液氮量越多, 蒸发率越大, 冷却效果越好, 空间及出口截面的降温越大, 但降温速率的增加趋缓; 随着喷嘴数量的增加, 液氮蒸发量和蒸发率增加, 降温效果改善, 出口截面降温增加, 但出口截面温度分布均匀性会受到喷嘴布置位置的影响; 当喷嘴数量增加到一定程度时, 液氮的蒸发和降温几乎不受影响; 随气流速度增大, 液氮的蒸发量和蒸发率逐渐减小, 出口截面的平均温度较高。为了增强液氮的蒸发量并强化空间的降温效果, 可增加液氮喷雾流量、减小喷雾粒径和气流速度, 以及适当增加喷嘴数量, 同时需考虑多喷嘴的布置位置。

关键词: 液氮喷雾; 冷却性能; 温度分布; 数值模拟

中图分类号: TB69 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202010018 **文章编号:** 0253-987X(2020)10-0144-07



OSID 码

Cooling Performance of Liquid Nitrogen Spray in an Open Tunnel

CHEN Shuangtao¹, WANG Xin², QU Linfeng², XUE Rong¹,

LIU Xiufang¹, CHEN Liang¹, HOU Yu¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: A liquid nitrogen spray system is built in an open tunnel to study the influence of design parameters on cooling performance of an environmental imitation system. The experimental system is comprised of a liquid nitrogen spray system and a cryogenic measuring system. A 3D numerical model of the open tunnel with the liquid nitrogen spray cooling is established and validated by employing a Lagrangian-Eulerian approach. The effects of the mass flow rate, the droplet diameter, the nozzle number and the air velocity on the evaporation of liquid nitrogen and the temperature distribution are analyzed. Results show that the contact area between the droplets and air increases under a smaller droplet size, and the heat transfer efficiency and the cooling performance are improved. When the mass flow rate of liquid nitrogen spray increases, the more the liquid nitrogen that is sprayed into the tunnel per unit time, the greater the evaporation rate, the better the cooling performance, the greater the temperature drop

收稿日期: 2020-03-25。 作者简介: 陈双涛(1983—), 男, 副教授; 侯予(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51806162); 陕西高校青年创新团队资助项目。

网络出版时间: 2020-05-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200522.1048.002.html>

of space and outlet section, but the slower the cooling rate. When the nozzle number increases, the evaporation intensity and the evaporation rate are enhanced, the cooling performance is improved and the temperature drop at the outlet is increased, but the temperature uniformity at the outlet section is affected by the positions of the nozzles. When the number of nozzles increases to a certain extent, the evaporation and the temperature drop of liquid nitrogen are almost unaffected. A higher air velocity reduces the evaporation of liquid nitrogen and increases the average temperature of the outlet. It is concluded that increasing the mass flow rate and the number of the spray nozzles and reducing the droplet size and the air velocity can strengthen the evaporation and enhance the cooling performance. Meanwhile, the arrangement of multiple nozzles should be considered.

Keywords: liquid nitrogen spray; cooling performance; temperature distribution; numerical simulation

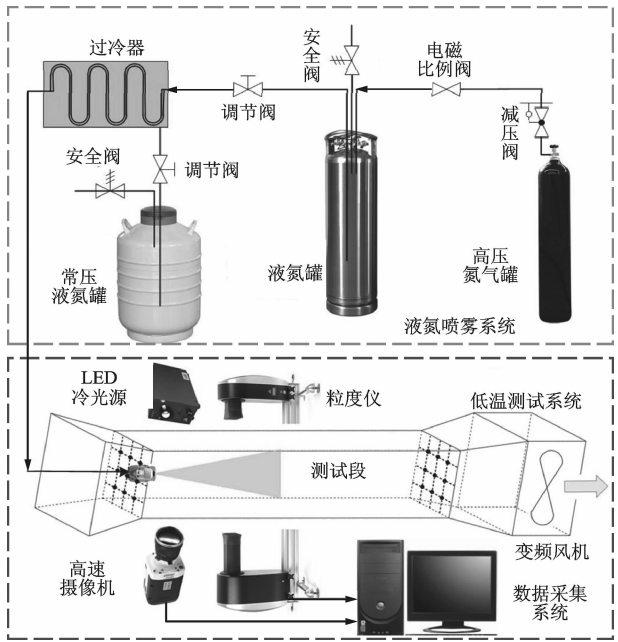
液氮喷雾冷却技术具有热流密度大、降温快、无污染等突出优势,广泛应用于食品冷冻、低温风洞等多个领域^[1-5],尤其在航空航天领域,液氮喷雾冷却技术是实现大空间环境模拟系统高效降温的最佳途径^[6-9]。研究液氮喷雾的目的就是掌握开放或封闭空间内的降温与温度场特性。由于研究的复杂性和低温实验条件所限,多数大空间喷雾降温特性的研究主要集中在水或一些常温制冷工质的喷雾实验和理论研究^[10-14]。加之应用场合的专业性,关于液氮喷雾特性的研究,极少见到国外公开的文献报道。国内,西安交通大学采用液氮喷雾技术研究了低温环路降温特性^[15],开展了大空间中不同结构喷嘴液氮喷雾和冷却性能的研究^[16-19],获得了不同工况下液氮喷雾特性和气流速度等参数对空间温度分布的影响规律。

本文通过流体计算软件 CFD 构建了三维非稳态液氮喷雾计算模型,用实验数据验证了模型的可靠性;通过改变液氮喷雾质量流量、粒径大小、喷嘴数量及气流速度,分析了这 4 个因素对空间液氮蒸发和温度分布的影响,获得了各因素对液氮喷雾冷却性能的影响特性。

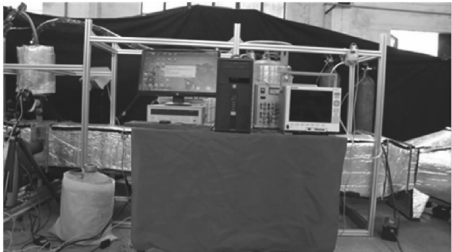
1 开式通道内液氮喷雾冷却实验系统

为了验证液氮喷雾的冷却特性,首先搭建了由液氮喷雾系统和低温测试系统构成的开式通道液氮喷雾冷却实验系统。液氮喷雾系统由高压氮气瓶、电磁比例阀、液氮罐、过冷器以及相关连接管路组成,通过调节电磁比例阀设定高压液氮的测试工况压力,高压两相液氮在高压氮气的压力下被送入过冷器中,流经内储液罐铜盘管,与过冷器外储液罐常压液氮进行换热,被冷却为过冷高压液氮后进入液

氮喷嘴。低温测试系统由液氮喷嘴、变频风机、喷雾段及测试段等组成,还包括科里奥利质量流量计、压力测量传感器、温度采集热电偶、实验光源、马尔文粒度仪、高速摄像机等设备。实验台流程图、实物图以及实验测得的雾场照片如图 1 所示。



(a) 实验流程图



(b) 实验台实物图



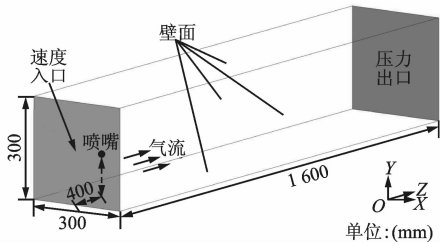
(c)雾场照片

图 1 液氮喷雾冷却实验台流程图和雾场照片

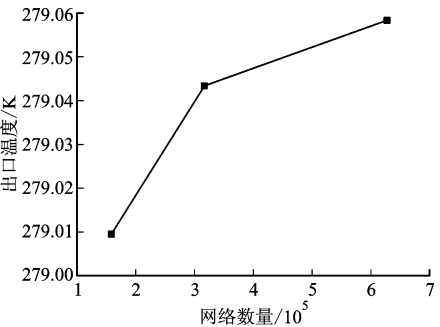
2 液氮喷雾的数值求解

采用欧拉-拉格朗日方法^[20]进行液氮喷雾模拟研究。喷雾的流体相在计算中被看作连续相,采用欧拉求解;通过追踪连续相中颗粒、液滴以及气泡计算离散相,在连续相计算间隔期间,采用拉格朗日法求解单个颗粒或者液滴。湍流模型选用标准 $k-\epsilon$ 双方程模型,在计算时考虑液滴颗粒的运动、碰撞、融合与破碎,同时考虑由喷雾液滴和气流之间的温差导致的喷雾液滴与环境气流间发生的热质交换。

在开式通道空气液氮实验的基础上,建立了尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 1\,600\text{ mm}$ 的三维计算模型,如图 2a 所示。喷嘴设置在 $Z=40\text{ mm}$ 的 XY 截面中心,喷射方向和气流方向平行。左端面的入口和右端面的出口分别设置为速度入口和压力出口,入口的平均速度和温度边界条件均设置为实验中测



(a)计算模型



(b)网格无关性验证

图 2 计算模型及网格无关性验证

量的定值。长方体其余的 4 个面设为壁面,其传热边界条件同时考虑对流换热和辐射换热,对流换热系数取 $5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,发射率取 0.2。进一步对所建立的计算模型进行结构化网格的划分,计算了 3 种网格密度(158 565、316 368、626 661)下出口截面的平均温度,网格无关性验证如图 2b 所示。综合考虑计算精度与时间,最终采用的网格数量为 316 368。

选取 3 组工况(质量流量分别为 0.005、0.006 1、0.007 1 kg/s),气流速度均为 1.34 m/s ,将温降的计算值与实验值进行对比,结果见表 1。可以看出,在质量流量为 0.007 1 kg/s 时,温降的实验值与计算值的相对误差最大,为 10.7%,可见本文建立的三维模型可对液氮喷雾冷却性能进行准确预测。

表 1 不同质量流量下温降的计算值与实验值

工况	质量流量/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	温降/K		实验值与计算值 的相对误差/%
		实验值	计算值	
1	0.005 0	10.6	11.612	9.55
2	0.006 1	12.4	13.432	8.32
3	0.007 1	13.6	15.060	10.70

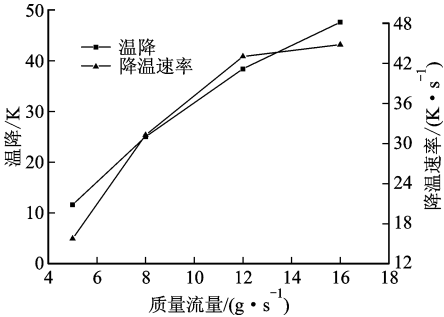
3 数值求解及分析

在液氮喷雾冷却技术应用的场合,影响空间温度分布的因素主要包括喷雾流量、粒径大小、喷嘴数量及气流速度。本文以气流速度为 1.34 m/s 的工况为基础,分别改变以上 4 个因素,通过数值计算研究其对液氮蒸发、计算区域出口截面温降及温度分布的影响规律。其中,出口截面温降表示出口截面平均温度与入口温度的差值,用来衡量基于液氮喷雾空间温度下降的幅度;降温速率为温降与喷雾开始降温至出口截面温度达到稳定所需时间的比,表示空间温度下降的快慢程度;液氮的蒸发速率为单位时间液氮的蒸发量;蒸发率是液氮的蒸发速率与喷雾的质量流量之比,表示蒸发的液氮量占喷入液氮量的百分比。

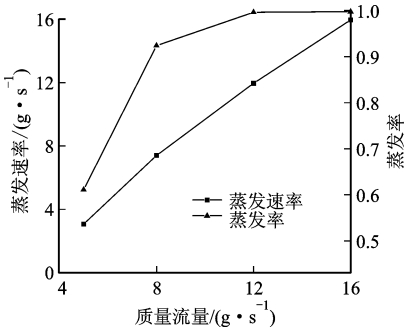
3.1 质量流量对液氮喷雾冷却效果的影响

分别将液氮质量流量设为 0.005、0.008、0.012、0.016 kg/s ,由质量流量、喷嘴出口流速及出口截面积的关系,得到不同质量流量下的喷雾速度。当其他计算条件不变时,质量流量对温降和降温速率的影响如图 3a 所示,可以看出,随着质量流量的增加,温降逐渐增大,且斜率逐渐减小;降温速率逐渐增大,增长的幅度逐渐减小,曲线趋于平缓。质量流量对蒸发速率和蒸发率的影响如图 3b 所示,蒸发速率

随着质量流量的增大几乎呈线性增加,而对于逐渐增大的蒸发率,其斜率呈逐渐减小的趋势;随着质量流量的增加,如从 0.012 kg/s 增加到 0.016 kg/s 时,降温速率和蒸发率几乎没有受到影响。



(a) 质量流量对温降和降温速率的影响

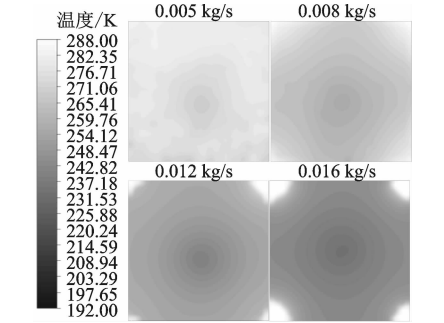


(b) 质量流量对蒸发速率和蒸发率的影响

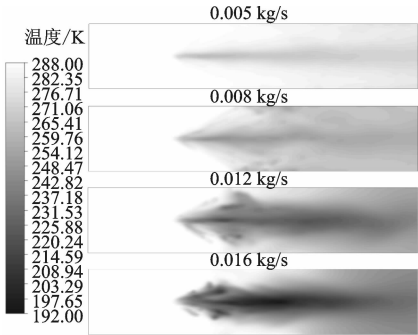
图 3 质量流量对温降和蒸发的影响

不同质量流量出口截面与中心轴截面温度分布云图如图 4 所示,随着质量流量的增大,喷雾雾场中心区域温度逐渐降低,雾场的覆盖区域越大,出口截面的降温区域面积逐渐增大;说明蒸发量逐渐增加,出口截面平均温度逐渐减小。

液氮喷雾质量流量越大,单位时间喷入空间的液氮越多,蒸发量就越大,单位时间内吸收的热量越多,冷却效果越好,空间及出口截面的温降越大。而质量流量越大,出口截面温度均匀性越差,特征温度达到稳定状态所需要的时间越长。因此,虽然降温速率呈增加趋势,但其斜率逐渐减小。另外,在气流速度较低时,随着喷雾质量流量的增加,喷雾液滴速度急剧增加,液滴与气流之间的速度差导致液滴更好地破碎,并强化了液滴与气流之间的换热及蒸发,使得液滴的蒸发更加完全;同时液氮液滴的径向分速度随之增加,在径向速度影响下雾场的覆盖区域越大,增加了液氮与气流的接触面积,因此总的蒸发速率和蒸发率增大。当质量流量增加到大于 0.012 kg/s 时,蒸发率已达到接近 1 的理想工况,可见在雾化效果良好及雾化粒径一致的情况下,选择合适



(a) 不同质量流量下出口截面温度分布云图



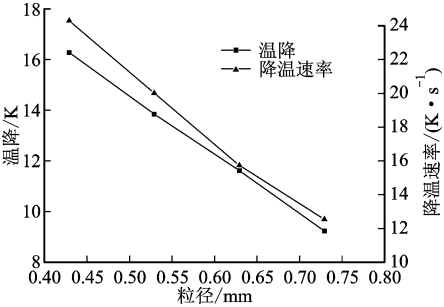
(b) 不同质量流量下中心轴截面温度分布云图

图 4 不同质量流量下的温度分布云图

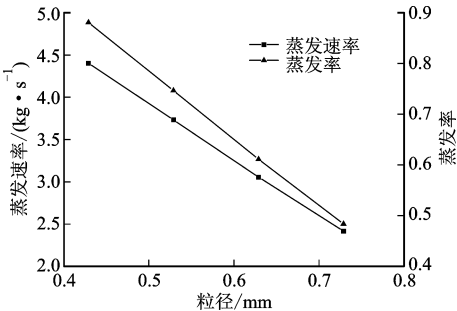
的质量流量将获得最佳的液氮蒸发冷却效果。

3.2 喷雾粒径对液氮喷雾冷却效果的影响

将喷雾粒径分别设为 0.429、0.529、0.629、0.729 mm,其他计算条件不变,不同喷雾粒径对温降和降温速率的影响如图 5a 所示,对蒸发速率和蒸



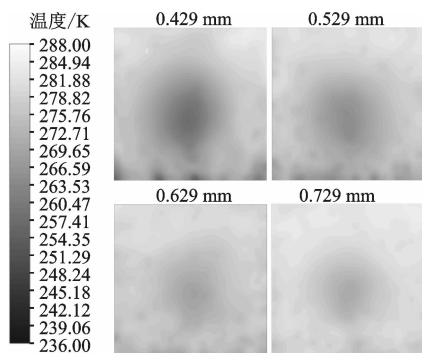
(a) 粒径对温降和降温速率的影响



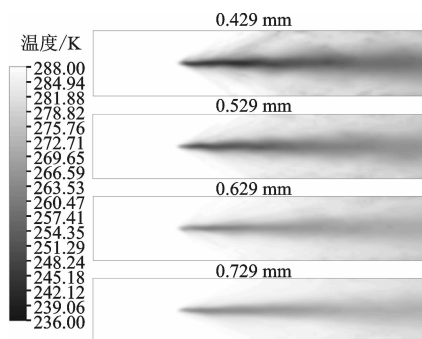
(b) 粒径对蒸发速率和蒸发率的影响

图 5 粒径对温降和蒸发的影响

发率的影响如图 5b 所示。从图中可以看出,喷雾粒径的改变对喷雾冷却效果有很大影响。随着喷雾粒径的增大,温降、降温速率、蒸发速率以及蒸发率均逐渐减小,且几乎呈线性变化。不同喷雾粒径下出口截面与中心轴截面温度分布云图如图 6 所示,喷雾粒径越小,喷雾中心的温度越低,出口截面的平均温度越低,降温区域面积越大。



(a) 不同粒径下出口截面温度分布云图



(b) 不同粒径下中心轴截面温度分布云图

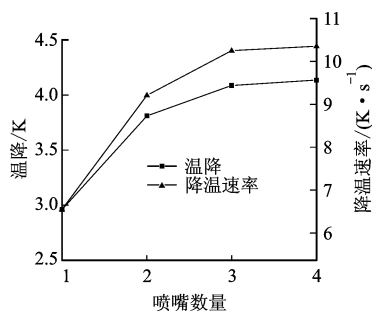
图 6 不同粒径下的温度分布云图

在质量流量相同的情况下,随着液氮液滴直径的减小,液滴的数量增多,增加了液氮与环境气流的换热面积,液氮蒸发速率以及蒸发率均逐渐增加,从而提高了换热效率,改善了降温效果,喷嘴出口截面温降的降温速率均增加。因此,选择高效的低温雾化喷嘴,获得良好的雾化效果对于液氮蒸发冷却降温特性、效率和经济性均至关重要。

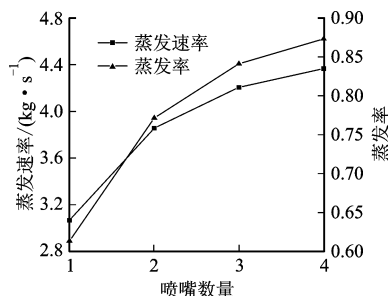
3.3 喷嘴数量对液氮喷雾冷却效果的影响

将喷嘴数量分别设为 1、2、3、4,保持总流量和其他条件相同,喷嘴数量对温降和降温速率的影响如图 7a 所示,对蒸发速率和蒸发率的影响如图 7b 所示。从图中可以看出,随着喷嘴数量的增多,温降、降温速率、蒸发速率和蒸发率逐渐增大,且变化幅度逐渐减小,曲线趋于平缓。

增加喷嘴数量是将一股液氮分为多股更小流量的喷雾,可将液氮均匀分配到整个大空间内,增大喷



(a) 喷嘴数量对温降和降温速率的影响



(b) 喷嘴数量对蒸发速率和蒸发率的影响

图 7 喷嘴数量对对温降和蒸发的影响

雾与气流的换热面积,从而强化换热,增加液氮蒸发量和蒸发率,改善降温效果,使得出口截面温降增加。但当喷嘴数量从 3 增加到 4 时,液氮的蒸发几乎不受影响,对降温效果几乎没有改善。喷嘴位置也会影响出口温度分布的均匀性。不同喷嘴数量下出口截面温度分布云图如图 8 所示,可以看出,温度最低点的数量与喷嘴数量对应;喷嘴数量为 3 和 4 时,喷嘴距离计算区域底面的距离越近,会导致更多的液氮液滴沉积到底面,从而底部壁面相应位置的温度最低,将影响出口截面温度分布均匀性。因此,需要根据测试段的要求选择合适的喷嘴数和布置的几何位置。

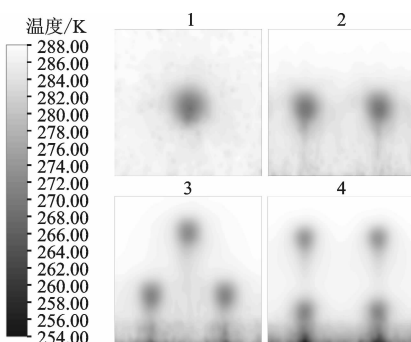
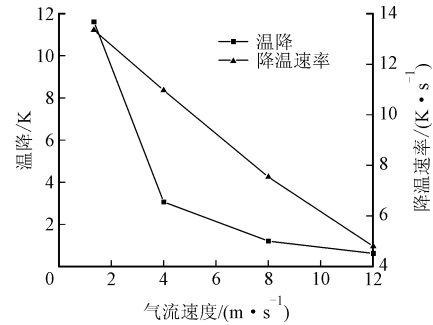


图 8 不同喷嘴数量下出口截面温度云图

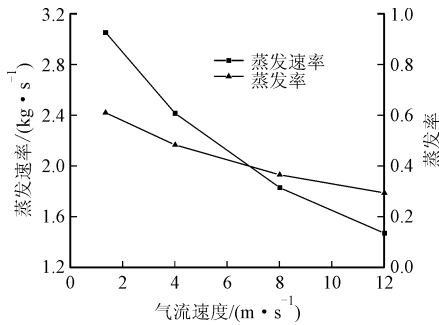
3.4 气流速度对液氮喷雾冷却效果的影响

将气流速度分别设为 1.34、4、8、12 m/s,其他条件保持不变,气流速度对温降和降温速率的影响

如图 9a 所示,可以看出,随着气流速度的增大,温降逐渐减小,且温降的变化幅度逐渐减小,曲线趋于平缓,说明气流速度增大到一定程度时,其进一步的增加对温降几乎没有影响;降温速率随气流速度的增大而逐渐减小,且基本呈线性变化。气流速度对蒸发速率和蒸发率的影响如图 9b 所示,随着气流速度的增大,蒸发速率和蒸发率逐渐减小,且它们的变化幅度逐渐减小,曲线趋于平缓。



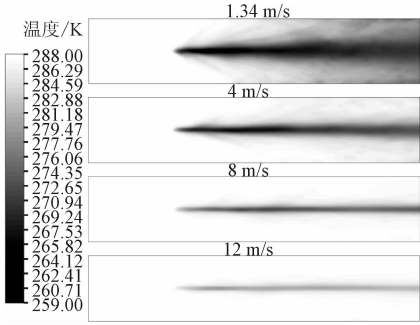
(a) 气流速度对温降和降温速率的影响



(b) 气流速度对蒸发速率和蒸发率的影响

图 9 气流速度对温降和蒸发的影响

不同气流速度下出口截面与中心轴截面温度分布云图如图 10 所示,从图中可以看出,随着气流速度逐渐增加,计算区域受喷雾雾场影响的范围减小,雾场中心区域温度逐渐增加,出口截面的降温区域面积逐渐减小,进一步证实了在气流速度较大的工况下,液氮的蒸发量和蒸发率较小,导致出口截面的



(b) 不同气流速度下中心轴截面温度分布云图

图 10 不同气流速度下的温度分布云图

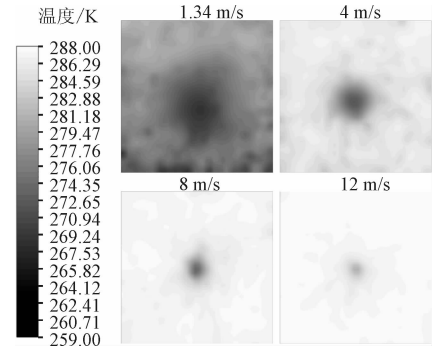
平均温度较高,温降减小。

在计算区域内,喷雾液滴需要经过复杂的吸热、蒸发、沸腾、破碎、碰撞以及融合等诸多过程才能达到最终的冷却目的。然而气流速度越大,液滴的轴向速度越大,在计算区域内停留的时间就越短,还未进行充分换热就飞出计算区域,液滴的蒸发量和蒸发率下降,单位时间内带走的热量减小,导致计算区域内较高的温度分布,出口截面的温降较小。

4 结 论

本文建立了开放通道内大空间液氮喷雾冷却数值模型,并通过实验数据与模拟结果的比较验证了模型的准确性。在此基础上,研究了喷雾质量流量、粒径、喷嘴数量和气流速度对液氮喷雾降温特性的影响,结论如下。

- (1)随着液氮喷雾质液滴直径的减小,液滴的数量增多,液氮与环境气流的换热面积增加,换热效率提高,降温效果改善。
 - (2)液氮喷雾质量流量越大,单位时间喷入空间的液氮量越多,蒸发率越大,冷却效果越好,空间及出口截面的温降越大,但降温速率的增加趋缓。
 - (3)随着喷嘴数量的增加,液氮蒸发量和蒸发率增加,降温效果改善,出口截面温降增加,但出口截面温度分布均匀性会受到喷嘴布置位置的影响。当喷嘴数量增加到一定程度时,液氮的蒸发和温降几乎不受影响。
 - (4)气流速度增大,液氮的蒸发量和蒸发率逐渐减小,雾场中心区域温度逐渐增加,出口截面的平均温度升高。
- 在液氮喷雾实际应用中,为了得到良好的降温效果、有效的降温速率、大的蒸发量和蒸发率,在一定气流速度下可以采用的方法是减小喷雾粒径以及适当增加喷嘴数量。同时需考虑喷嘴位置的布置,



(a) 不同气流速度下出口截面温度分布云图

以均衡降温效果和温度分布均匀性的要求。

参考文献:

- [1] TILTON D E, KEARNS D A, TILTON C L. Liquid nitrogen spray cooling of a simulated electronic chip [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1994: 1779-1780.
- [2] MERCER K L, TWADDELL W S, URADOMO L T, et al. Liquid nitrogen spray cryotherapy in Barrett's esophagus with high-grade dysplasia: long-term results [J]. *Gastrointestinal Endoscopy*, 2013, 78(2): 260-265.
- [3] FEY U, ENGLER R H, EGAMI Y, et al. Transition detection by temperature sensitive paint at cryogenic temperatures in the European transonic wind tunnel (ETW) [C]// *International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 77-88.
- [4] SEHMBEY M S, CHOW L C, HAHN O J, et al. Spray cooling of power electronics at cryogenic temperatures [J]. *Journal of Thermophysics & Heat Transfer*, 1995, 9(1): 123-128.
- [5] SEHMBEY M S, CHOW L C, HAHN O J, et al. Effect of spray characteristics on spray cooling with liquid nitrogen [J]. *Journal of Thermophysics & Heat Transfer*, 1995, 9(4): 757-765.
- [6] AHLEFELDT T, KOOP L. Microphone-array measurements in a cryogenic wind tunnel [J]. *AIAA Journal*, 2010, 48(7): 1470-1479.
- [7] 廖达雄, 刘晓波. 低温风洞新形式: 换热引射式低温风洞 [J]. *实验流体力学*, 2009, 23(3): 108-112.
LIAO Daxiong, LIU Xiaobo. A new type of cryogenic tunnel: injection cryogenic tunnel with heat exchanger [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2009, 23(3): 108-112.
- [8] 廖达雄, 黄知龙, 陈振华, 等. 大型低温高雷诺数风洞及其关键技术综述 [J]. *实验流体力学*, 2014, 28(2): 1-6.
LIAO Daxiong, HUANG Zhilong, CHEN Zhenhua, et al. Review on large-scale cryogenic wind tunnel and key technologies [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2014, 28(2): 1-6.
- [9] 赖欢, 陈振华, 高荣, 等. 大型高速低温风洞冷量回收的方法研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(6): 136-142.
LAI Huan, CHEN Zhenhua, GAO Rong, et al. Cold energy recycle from cryogenic wind tunnel exhaust system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(6): 136-142.
- [10] BARROW H, POPE C W. Droplet evaporation with reference to the effectiveness of water-mist cooling [J]. *Applied Energy*, 2007, 84(4): 404-412.
- [11] 王小芝. 崇明隧道运营累积温升及喷雾降温可行性研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007: 36-39.
- [12] HUANG C, YE D, ZHAO H, et al. The research and application of spray cooling technology in Shanghai Expo [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(17): 3726-3735.
- [13] 张军战. 火力发电厂空冷岛增加喷雾降温系统的分析 [J]. *中国电子商务*, 2010(7): 66-66.
- [14] ALKHEDHAIR A, GUAN Z, JAHN I, et al. Water spray for pre-cooling of inlet air for natural draft dry cooling towers: experimental study [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, 90(90): 70-78.
- [15] 张蓓乐, 陈小砖, 薛绒, 等. 采用液氮喷雾技术的低温环路结构模拟系统研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(5): 109-114.
ZHANG Beile, CHEN Xiaozhuan, XUE Rong, et al. Study on the low-temperature air loop simulation system based on liquid nitrogen spray technology [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(5): 109-114.
- [16] LIU Xiufang, XUE Rong, RUAN Yixiao, et al. Effects of injection pressure difference on droplet size distribution and spray cone angle in spray cooling of liquid nitrogen [J]. *Cryogenics*, 2017, 83: 57-63.
- [17] LIU Xiufang, XUE Rong, RUAN Yixiao, et al. Flow characteristics of liquid nitrogen through solid-cone pressure swirl nozzles [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 290-297.
- [18] XUE Rong, RUAN Yixiao, LIU Xiufang, et al. Experimental study of liquid nitrogen spray characteristics in atmospheric environment [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 142: 717-722.
- [19] XUE Rong, RUAN Yixiao, LIU Xiufang, et al. Numerical study of the effects of injection fluctuations on liquid nitrogen spray cooling [J]. *Processes*, 2019, 7: 564.
- [20] ANSYS Inc. ANSYS fluent theory guide [M]. Canonsburg, PA, USA: ANSYS Inc., 2015: 365-386.

(编辑 亢列梅)