

气氮调温器 Y 型喷嘴实验及数值研究

王 泽, 邢玉明, 刘 鑫, 赵 亮

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 基于 FLUENT 软件离散相模型及气体助力雾化模型, 采用欧拉-拉格朗日方法研究通过 Y 型喷嘴雾化液氮的雾化特性. 由于液氮液滴的蒸发相变, 与水相比喷雾锥角更清晰且明显减小, 约为 10° , 喷雾距离缩短. 分析喷嘴气液工作压力对液氮雾化索太尔平均直径(SMD)、液滴体积分数和数量分数的影响. 结果表明: SMD 沿喷射方向变化幅度极小; SMD 主要受气相速度及气液比影响, 气压低时气相速度影响较大, 气压高时气液比影响较大; 由于相变作用, 液氮雾化粒径分布更为集中. 数值研究 Y 型喷嘴用于不同流量需求的气氮调温器的调温效果, 出口温度低于 98 K, 进出口温差达到 12 K, 且整个出口温差在 ± 1 K 以内, 能够实现精确控温要求.

关 键 词: Y 型喷嘴; 雾化; 液氮; 低温环境模拟; 气氮调温器

中图分类号: V416.5

文献标志码: A

Experimental and numerical study of Y-jet nozzle of LN₂-spray temperature-adjusting system

WANG Ze, XING Yu-ming, LIU Xin, ZHAO Liang

(School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on Euler-Lagrange method, the characteristic of LN₂ (liquid nitrogen) atomized by the Y-jet nozzle was studied by discrete phase model and air blast atomizer model of software FLUENT. Because of the evaporation effect of LN₂ droplets, the spray angle was about 10° , significant smaller than the spray angle of water, and the spray distance was shortened. The effect of operating pressure on the Sauter mean diameter (SMD) and the distribution of volume fraction and quantity percentage was analyzed. The results indicate that the SMD along the spray direction is essentially unchanged. The SMD is controlled by gas velocity and gas-liquid ratio, and gas velocity is the major factor in the low pressure conditions while gas-liquid ratio is the major factor in the high pressure conditions. The distribution of LN₂ droplets diameter is more concentrated than in the cases using water, due to the evaporation of droplets. The effect of temperature control of LN₂-spray temperature-adjusting system using Y-jet nozzles with different flow rate demands was also investigated. The temperature of outlet was lower than 98 K with temperature difference of 12 K between inlet and outlet, and the temperature difference of outlet was within ± 1 K, which could satisfy the temperature control requirements.

Key words: Y-jet nozzle; atomization; liquid nitrogen;
low temperature environment simulation;
LN₂-spray temperature-adjusting system

航空航天领域空间深冷环境模拟是预报、检验与证明各种飞行器使用性能与可靠性的有效手段^[1]。以液氮作为冷却介质可以获得较高的降温速率,并留有扩大低温极值的发展余地,因此被广泛应用于深冷环境的模拟中。目前航空航天领域空间深冷环境模拟中调温的主要方式是采用液氮盘管加换热器。但是,当卫星外部的环境温度随时间有明显变化时,就要作动态轨道热环境模拟。此时,为改变热沉温度(动态热环境实验)就需要有可调温度的气氮系统^[2]。液体雾化传热传质方式是利用喷嘴将液体工质雾化成细小液滴,液体的总表面积因连续液体破碎成大量离散液滴而明显增大,与环境接触面积显著提高,传热传质效果及效率因此大幅提升,从而减少工质的消耗量,被广泛应用于燃烧等领域^[3-7]。

气氮调温器中利用液氮喷淋与循环待冷氮气直接接触换热,利用液氮的潜热实现冷却,通过调节氮气和液氮的供给压力改变液氮流量,实现出口氮气温度的动态精确调节,可使热沉进口温度控制在 $\pm 1\text{ K}$ ^[2],其关键是液氮雾化喷嘴。目前液氮雾化主要应用于食品储存及运输^[8-9]、机械制造^[10-11]及生物医疗^[12-13]等领域。

美国 PDM(Pittsburgh-Des Moines)公司生产的真空热实验设备^[14],其配置的气氮调温热沉采用电加热器及液氮喷淋器调节热沉温度。该设备可以满足热沉温度 $117\sim 394\text{ K}$ 范围内连续可调,实现 1.1 K/min 的升降温速率,系统热负荷可达到 50 kW 。印度 ISRO(Indian Space Research Organisation)卫星中心^[15]采用的真空热实验设备直接将液氮雾化,喷入热沉进行降温,热沉温度范围为 $100\sim 300\text{ K}$,热沉温度均匀度范围为 $\pm 2\text{ K}$,控温精度范围为 $\pm 1\text{ K}$ 。

Y 型喷嘴是一种半内混式双流体高压气流雾化喷嘴,其具有结构简单、压力损失小、出力大、雾化质量好、调节范围大及单变量自动调节等特点^[16-17],适用于气氮调温器,实现液氮的雾化及调节。

本文基于商用流体计算软件 FLUENT,采用欧拉-拉格朗日方法研究 Y 型喷嘴雾化特性,实验验证数值方法可行性,分析 Y 型喷嘴以常温氮气雾化液氮的雾化过程及雾化特点,并研究 Y 型喷嘴用于气氮调温器的传热效果及特点,为气氮调温器的设计研制提供参考。

1 数值方法

Y 型喷嘴属于半内混式气体助力雾化喷嘴,

气液工质经各自通道进入喷嘴混合段,在气流作用下,在混合段形成环状流^[18],由喷嘴出口喷出,环状液膜破碎雾化为细小液滴,见图 1。

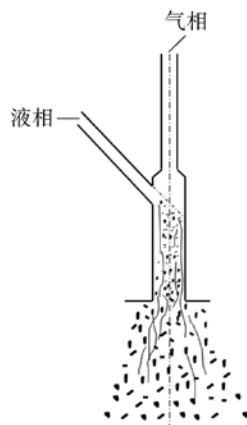


图 1 Y 型喷嘴雾化示意图

Fig. 1 Schematic of atomization of Y-jet nozzle

1.1 计算模型

Y 型喷嘴雾化计算模型涵括 Y 型喷嘴与雾化场,雾化场直径为 103.1 mm ,长为 200 mm ,并与 Y 型喷嘴同轴。计算域网格见图 2。对喷嘴及喷嘴和雾化场接口处等区域进行加密,见图 3。工作介质



图 2 计算域网格

Fig. 2 Mesh of computational domain

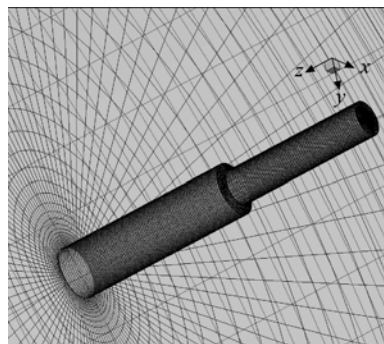


图 3 Y 型喷嘴局部网格

Fig. 3 Local mesh of Y-jet nozzle

分别选择空气和水(用于模型验证)、氮气和液氮。

1.2 数值模型

基于 FLUENT 软件,采用欧拉-拉格朗日方法,使用离散相模型(discrete phase model)及雾化模型模拟 Y 型喷嘴雾化过程,分析不同工况下的雾化特性。通过雾化模型保证初始液滴速度及方向的随机性,由于 Y 型喷嘴为气体助力雾化喷嘴,选用气体助力雾化模型(air blast atomizer model)。液滴破碎模型选择 wave 模型;湍流计算模型选择 realizable $k-\epsilon$ 两方程湍流模型,该模型能较精确地预测平面和圆形射流扩散作用。模拟中考虑液滴曳力,传热传质及液滴与连续相间耦合作用。采用 SIMPLEC(semi-implicit method for pressure-linked equations consistent)进行计算。

2 实验验证

为验证数值方法的可靠性,数值模拟 Y 型喷

嘴以空气和水作为工质雾化的过程,并将数值计算结果同实验结果相对比。

2.1 实验系统

Y 型喷嘴雾化特性实验系统见图 4。系统主要包括供液系统、供气系统、Y 型喷嘴、雾化腔、雾化粒径测定系统及数据采集系统等。储水罐中的水利用气压加压的方式压入 Y 型喷嘴,与空气相混合后在雾化腔内喷出雾化,通过马尔文粒度仪测定液滴雾化粒径及分布,该技术是基于大量运动粒子对单色平行光的多源弗琅荷费衍射原理,具有测试可靠、精度高、重复性好、快速实时等优点,实验中测定距离喷嘴出口 150 mm 处的雾化特性。喷嘴实物见图 5。

实验过程中,调节气路及液路压力调节阀,使 Y 型喷嘴工作压力由低到高依次稳定到所需实验测试压力。工作压力调节时,先调节气路压力至实验压力,然后调节液路压力。

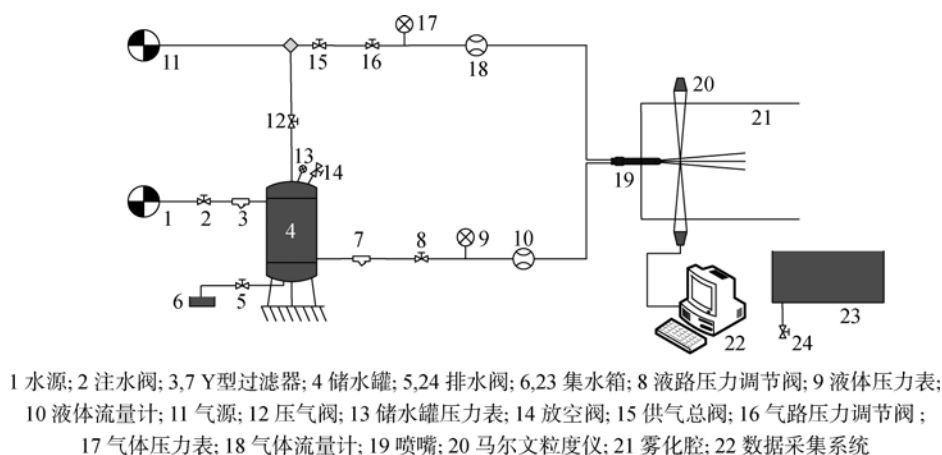


图 4 Y 型喷嘴雾化特性实验系统

Fig. 4 Experiment system of atomization characteristic for Y-jet nozzle

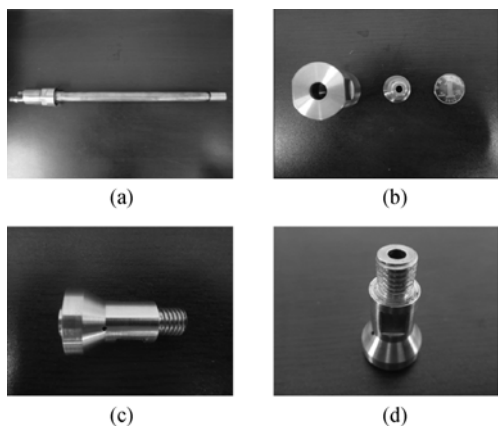


图 5 喷嘴实物图

Fig. 5 Y-jet nozzle pictures

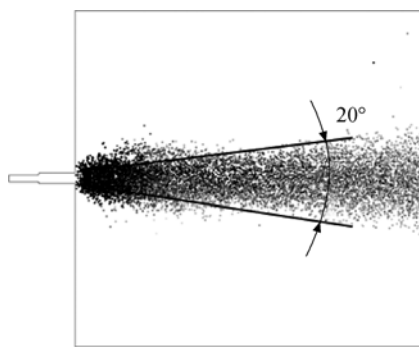
2.2 模型验证

为方便分析叙述,后文中采用统一的工况命名方法:气压-液压。例如 0.3 MPa 气压,0.2 MPa 液压的雾化工况命名为 0.3-0.2。

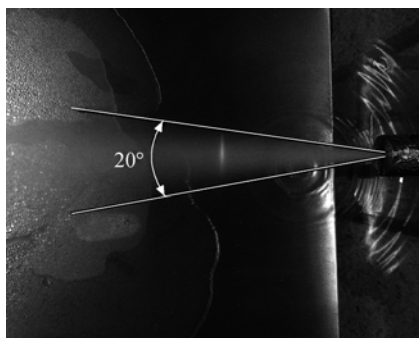
2.2.1 雾化锥角对比

雾化锥角为液体雾化形成雾化区的边缘夹角。图 6 中可以看出,数值计算结果与实验结果相近,雾化锥角均为 20° 左右。数值结果中喷嘴出口处,液滴分布范围较宽,这主要是因为此处液滴稠密,中心高速射流受阻,径向分速度加大,致使少量细小液滴四散,同时部分细小液滴随流场中心射流形成的回流区返回。随着气压及液体流量的增高,喷嘴出口处液滴散开范围加大,因此锥角从

整个雾化区边缘角度考虑进行划定. 实验图中虽未见该现象, 但实验过程中发现, 喷嘴外表面原本的干燥状态被打湿, 说明同样存在细小液滴四散及返回的现象.



(a) 数值计算



(b) 实验

图 6 实验及数值计算所得的水滴雾化锥角对比

(0.3-0.2)

Fig. 6 Comparison of water droplet spray angle between experimental and numerical calculated results (0.3-0.2)

液体工质与雾化气体在混合段混合, 形成环形液膜, 于出口处被中心高速气流雾化, 液滴质量通量呈环状分布, 主要分布在雾化场外环, 中心液体质量通量极小, 说明中心区域液滴粒径极小, 见图 7.

2.2.2 雾化粒径对比

图 8 为距离喷嘴出口 150 mm 处实验测定结果与数值计算结果所得索太尔平均直径(SMD, 记为 D_{12})间的对比. 从图中可以看出, 数值计算结果与实验测量结果十分相近, 数值计算 SMD 略大于实验测定 SMD, 相对误差范围为 2%~6%.

为了更为清晰地对比数值计算结果与实验结果, 对比雾化液滴不同粒径的体积分数分布, 见图 9. 图中可以看出, 数值与实验的水滴体积分数分布曲线总体符合性较好, 特别是工作压力较低的工况, 数值计算体积分数分布曲线基本与实验曲线重合. 但是数值计算的峰值粒径同实验获得峰

值粒径相比存在不同程度的左移, 而且峰的范围相对较宽, 特别是工作压力较高的工况, 说明数值计算结果中大粒径液滴的质量权重高于实验结果, 同时液滴体积分布更为分散, 所以液滴平均粒

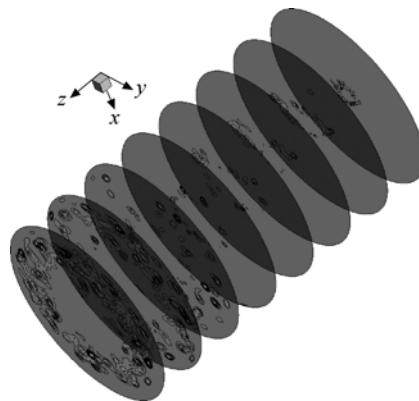


图 7 各截面水滴质量通量分布

Fig. 7 Mass flux distribution of water droplets on the different cross-sections

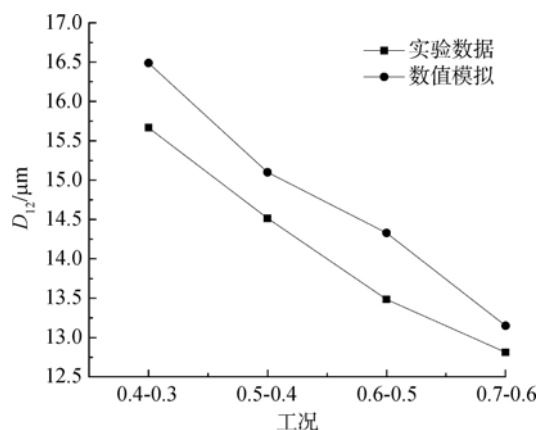
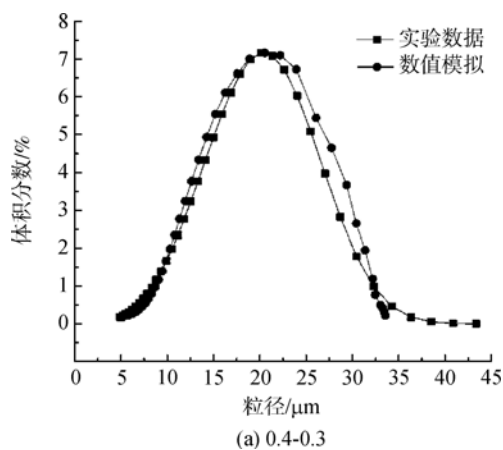


图 8 实验及数值计算水滴 SMD 对比

Fig. 8 Comparison of water droplet SMD between experimental and numerical calculated results



(a) 0.4-0.3

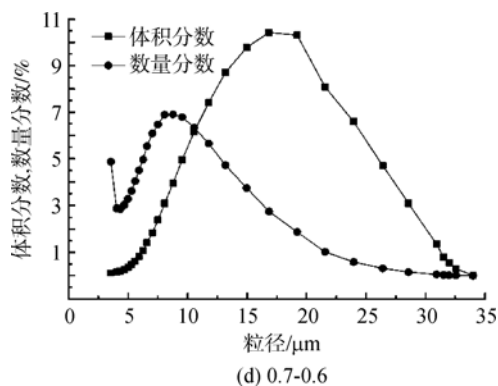
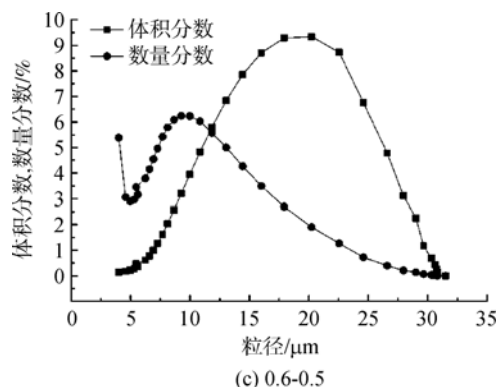
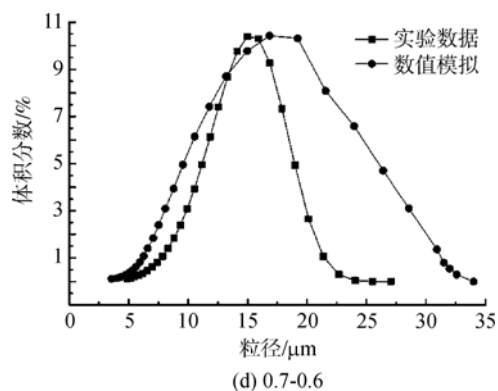
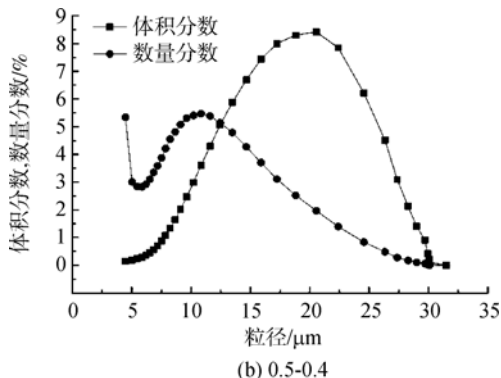
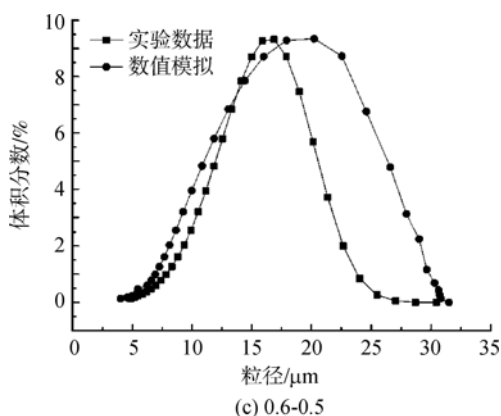
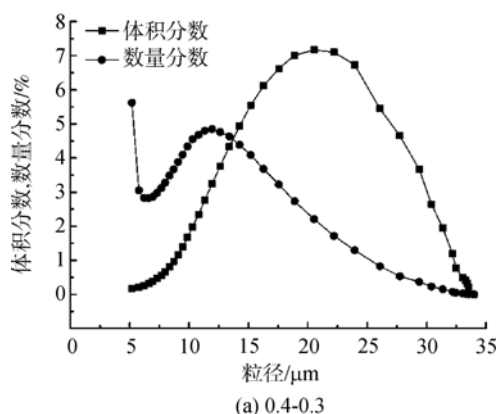
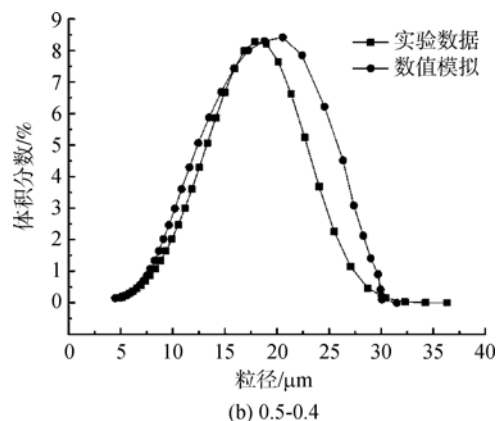


图9 实验及数值计算水滴体积分数分布对比

Fig. 9 Comparison of water droplet volume fraction distribution between experimental data and numerical calculated results

径大于实验平均粒径,与 SMD 结果相一致.

这主要是因为数值计算的液滴分布中存在少量大粒径液滴,这些大液滴占有较大体积比重,液滴数量与体积在不同粒径区间的百分比分布见图 10. 图中可以清晰地看出,数量分数曲线存在两个峰值,数量主要集中在小粒径液滴. 虽然小粒径的数量极多,但其体积比重很小,而大粒径的液滴以很少的数量占有很大的体积比重,致使液滴 SMD 的偏大,且液滴整体体积分布更为分散.

通过以上实验及数值间的对比可以得出采用

图10 水滴数量分数分布及体积分分数分布曲线

Fig. 10 Distribution of quantity percentage and volume fraction of water droplets

该数值计算方法可以较好地预测 Y 型喷嘴的雾化锥角、雾化平均粒径及雾化粒径体积分数和数

量分数分布,可用于气氮调温器 Y 型喷嘴利用氮气雾化液氮特性的研究。

3 液氮雾化

气氮调温器中通过喷嘴以常温氮气雾化液氮进行控温,数值模拟该过程,分析液氮雾化结果及特点。

3.1 雾化形貌

各工况下液氮雾化形貌见图 11。由于雾化气液比不同,所以液氮液滴相变蒸发比例不同,造成液滴径向分布范围及喷雾距离的改变。较大气液比时,雾化锥角较小,喷雾距离较短。由于外层存在的细小液滴蒸发相变,所以液氮喷雾边缘相较水雾化时清晰,雾化锥角小于以空气和水为工质的雾化锥角,在 10° 左右。

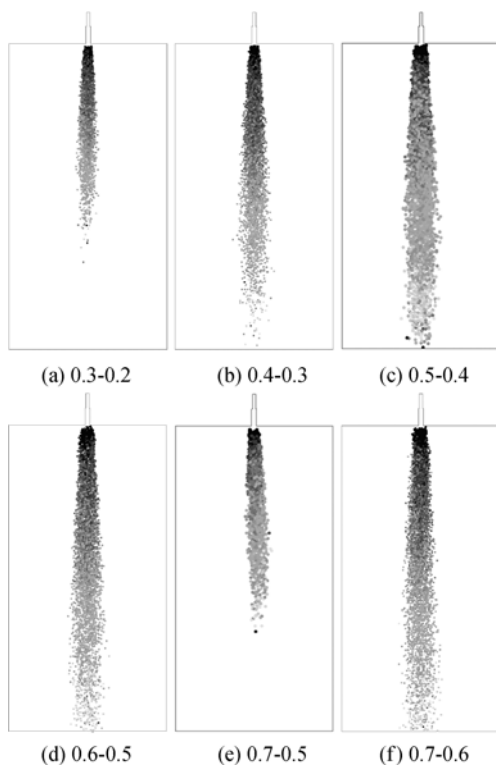


图 11 各工况液氮雾化形貌

Fig. 11 Spray morphology of LN_2 under different cases

以氮气及液氮为工质,各截面液滴质量通量分布与水类似,以 0.7-0.6 工况为例,见图 12,主要分布在外环,但不同于水的是因为液氮液滴的大量蒸发,所以液滴质量通量分布相对均匀并且集中在雾化场中心区域,该结果与喷雾形貌相一致。

3.2 雾化场温度分布

由于以常温氮气进行雾化,液氮发生相变,过程中传热传质强烈。靠近流场中心区域存在大量

细小液滴,并与常温氮气相接触,蒸发效率高,所以温度较低。随着径向距离的加大,液滴数量分布密度下降,分布范围增大,温度相对于中心区域上升但范围扩张,见图 13。温度场分布同样说明了雾化过程中,中心及外围液滴发生相变,与形貌分布相一致。

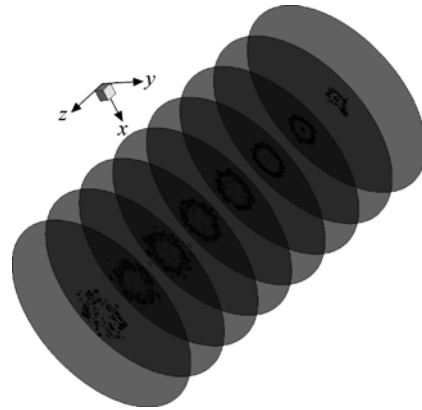


图 12 各截面液氮液滴质量通量分布(0.7-0.6)

Fig. 12 Mass flux distribution of LN_2 droplets on the different cross-sections (0.7-0.6)

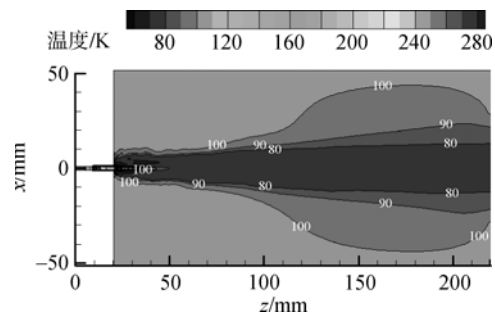


图 13 $y=0\text{ mm}$ 截面温度分布(0.7-0.6)

Fig. 13 Temperature distribution of $y=0\text{ mm}$ the cross-section (0.7-0.6)

3.3 雾化粒径

由图 14 中可以看出,由于利用常温氮气雾化,蒸发作用剧烈,各工况的液滴 SMD 远小于水,粒径基本小于 $1\text{ }\mu\text{m}$,最大仅为 $1.177\text{ }\mu\text{m}$ 。SMD 沿喷射方向变化幅度极小,不足 $0.5\text{ }\mu\text{m}$,特别是雾化后段,粒径基本不变。

SMD 主要受气相速度及气液比影响,粒径随气相速度和气液比的增大而减小。气压低时,气相速度影响较大,此时提高气压对粒径减小比较有效。当到达一定气相速度后,气压再升高,此时液滴粒径变化不大,如 0.7-0.6 与 0.6-0.5 的 SMD 基本相同。此时,提高气液比对减小粒径比较有

效,即加大气液压差,如 0.7-0.5 粒径小于 0.7-0.6 及 0.6-0.5,这主要是因为高气液比下,雾化质量提升,而且高气液比意味着常温氮气量相对增大,液氮液滴蒸发相变作用加剧,所以 0.7-0.5 的喷雾距离明显短于 0.7-0.6 及 0.6-0.5。

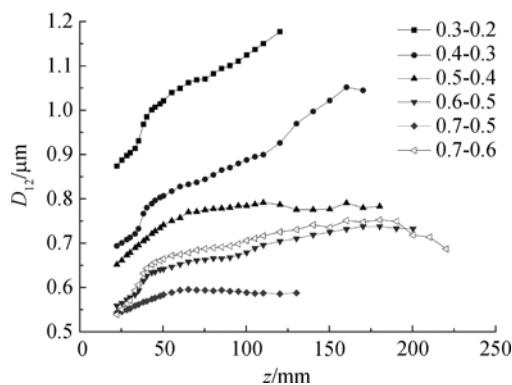
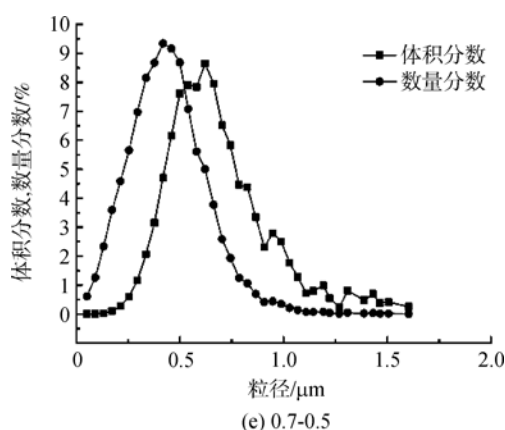
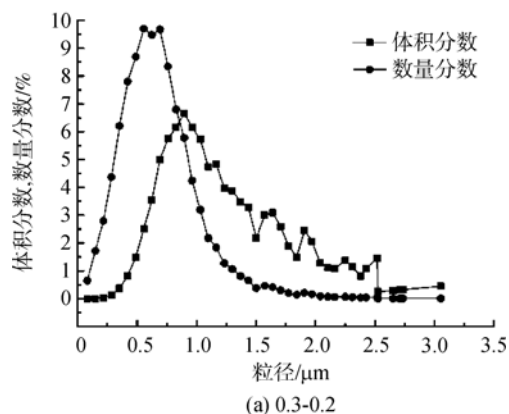
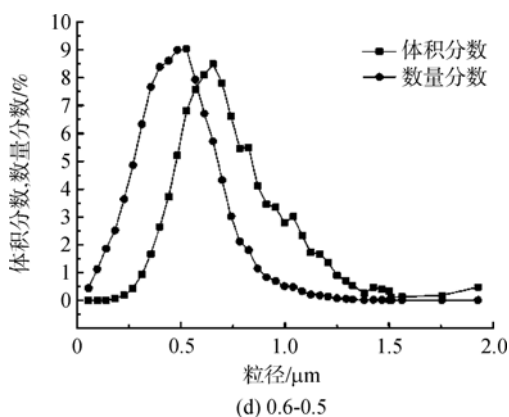
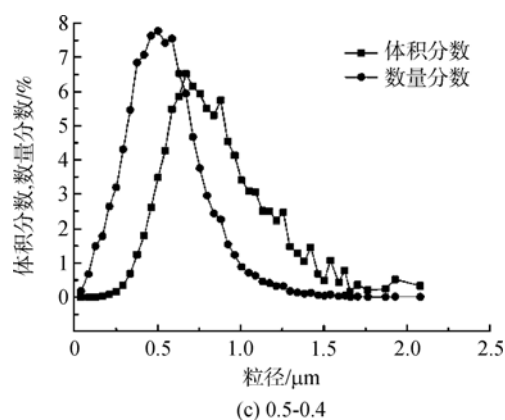
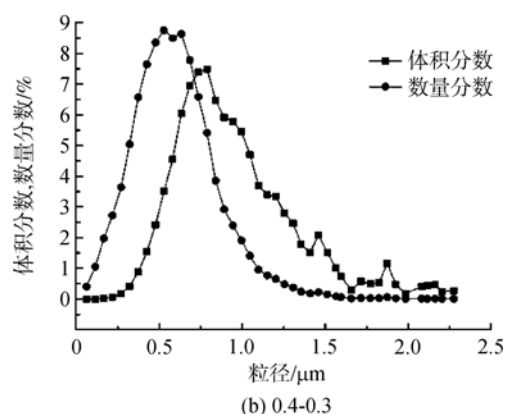


图 14 各工况各截面液氮液滴 SMD 对比

Fig. 14 Comparison of SMD of LN_2 droplets on the different cross-section under different cases

3.4 粒径分布

选取距喷嘴出口 30 mm ($z=50.3$ mm) 截面处的液滴参数,分析液滴的体积分数及数量分数在不同粒径区间的分布,见图 15. 曲线基本趋势与以空气和水为工质时类似,峰值在 $0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 之间,但由于粒径极小的液滴大量蒸发,液氮的数量分数曲线并没有水的数量分数曲线中的双峰结构,粒径分布范围较水更为集中. 同样,数量主要集中在小粒径液滴,但液氮液滴群中存在少量大液滴,其数量分数几近于零,但占有较大体积比重,其对 SMD 的影响较大,体积分数分布曲线相对数量分数曲线右移. 工作压力提高,大粒径液滴减少,体积分布曲线左移.



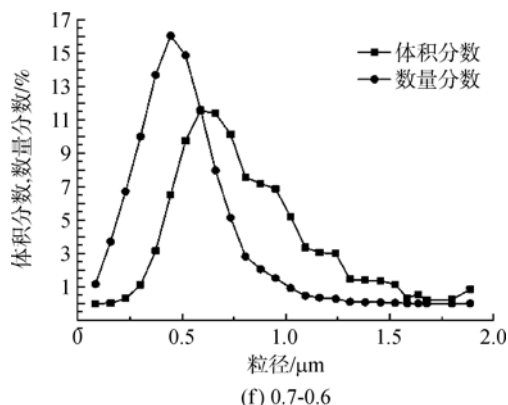


图 15 $z=50.3$ mm 截面液氮液滴数量分数及体积分数
Fig. 15 Distribution of quantity percentage and volume fraction of LN_2 droplets on $z=50.3$ mm cross-section

4 气氮调温器

数值模拟 Y 型喷嘴用于气氮调温器温控效果. 气氮调温器结构自下而上包括稳压段 (body-bottom)、丝网段 (body-net) 及换热段 (body-top), 见图 16. 待冷却循环氮气由入口进入稳压段, 经丝网段整流稳压后进入换热段与气氮调温器上端喷嘴喷入的雾化氮气及液氮雾化液滴以逆流的形式换热后, 经出口流出. 计算中待冷却循环氮气温度为 113 K, 流量分别设定为 20, 30, 40, 50 及 60 m^3/min (标准状态), 根据流量大小需要喷嘴数量为 2~6 个. 为防止液滴随气流经出口提前脱离, 喷嘴深入气氮调温器内部, 并且尽量远离气氮调温器出口.



图 16 气氮调温器结构
Fig. 16 Structure of the LN_2 -spray temperature-adjusting system

喷嘴出口附近由于常温雾化氮气温度较高, 温度梯度集中在喷嘴附近, 其他区域温度较均匀, 说明此时循环氮气冷却过程基本结束. 随着距喷嘴的距离加大, 液氮逐渐蒸发相变, 形成低温区, 此时液滴逐渐散开, 低温区范围扩大, 与气氮调温器中心温度相对较高的氮气换热. 此时距离再加大, 循环氮气未被冷却, 仍保持入口温度. 具体分布及数值见图 17, 截面温度分布受出口位置影响, $-x$ 方向 (出口位置) 气体停留时间相对较短, 所以温度较高.

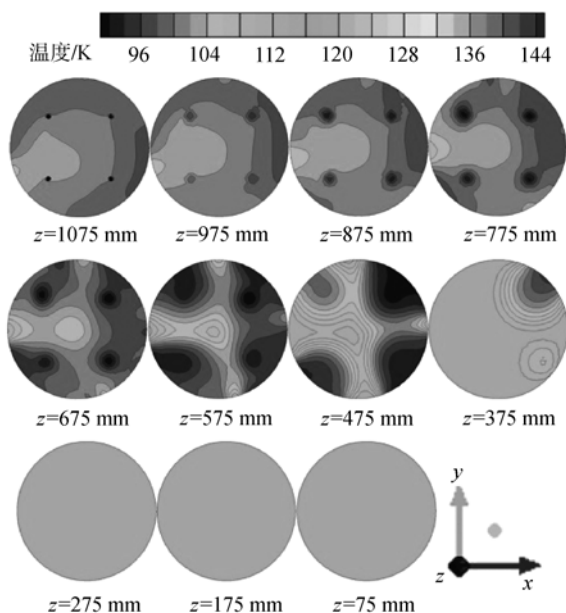


图 17 z 向各截面温度分布
Fig. 17 Temperature distribution on the different cross-sections along z direction

气氮调温器作为温度控制设备, 出口温度及温度均匀性至关重要. 出口温度为 101 K 左右, 见图 18, 高于 98 K, 进出口温差达到 12 K, 且整个出

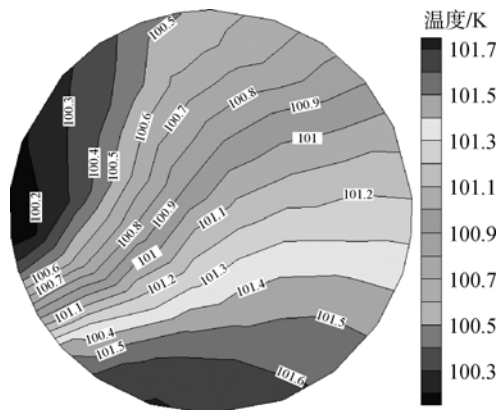


图 18 出口温度分布
Fig. 18 Temperature distribution on the outlet

口温度分布均匀,温差在 $\pm 1\text{ K}$ 以内,能够实现精确控温要求.通过调节液氮喷淋量可实现出口温度的调节.

5 结 论

1) 提出基于 FLUENT 软件的 Y 型喷嘴雾化计算数值方法,实验验证该方法能够较好地预测 Y 型喷嘴雾化锥角、雾化 SMD 及粒径体积分数分布.

2) 分析 Y 型喷嘴以常温氮气雾化液氮的雾化特性.由于液氮液滴的蒸发作用,SMD 极小,雾化粒径分布更为集中,且沿喷雾方向变化不大,同时雾化锥角清晰,在 10° 左右.喷雾距离受气液比影响较大.

3) SMD 主要受气相速度及气液比影响,气压低时气相速度影响较大,气压高时气液比影响较大.

4) 研究 Y 型喷嘴用于不同流量需求的气氮调温器的调温效果,出口温度低于 98 K ,进出口温差达到 12 K ,且整个出口温度分布均匀,温差在 $\pm 1\text{ K}$ 以内,能够实现精确控温要求.

参考文献:

- [1] 张磊,刘敏,王紫娟,等.国外调温热沉研究现状及技术发展[J].航天器环境工程,2012,29(2):179-184.
ZHANG Lei, LIU Min, WANG Zijuan, et al. A review of technologies of temperature-adjustable heat sink[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(2): 179-184. (in Chinese)
- [2] 柯守全.卫星环境工程和模拟试验:上[M].北京:中国宇航出版社,2009.
- [3] 曾青华,孔文俊,艾育华,等.贫油直喷三喷嘴模型燃烧室燃烧性能[J].航空动力学报,2014,29(6):1295-1300.
ZENG Qinghua, KONG Wenjun, AI Yuhua, et al. Combustion performances of lean direct injection model combustor with three injectors[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(6): 1295-1300. (in Chinese)
- [4] 张荣春,樊未军,宋双文.驻涡燃烧室蒸发管供油装置的雾化蒸发性能试验[J].航空动力学报,2011,26(11):2495-2502.
ZHANG Rongchun, FAN Weijun, SONG Shuangwen. Atomization and evaporation performance experiment of evaporating tube for trapped vortex combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(11): 2495-2502. (in Chinese)
- [5] 王辽,章成亮,韦宝禧,等.应用气泡雾化喷嘴的煤油超声速燃烧试验[J].航空动力学报,2009,24(2):353-359.
WANG Liao, ZHANG Chengliang, WEI Baoxi, et al. Experimental investigation of kerosene supersonic combustion test using aerated-liquid injectors[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(2): 353-359. (in Chinese)
- [6] 霍伟业,林宇震,张弛,等.正癸烷作为航空煤油雾化过程代理燃料的研究[J].航空动力学报,2016,31(1):188-195.
HUO Weiye, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Research on *n*-decane as surrogate fuel of aviation kerosene in atomization process[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(1): 188-195. (in Chinese)
- [7] 周兵,吉洪湖,张宝诚.旋流空气对双油路离心喷嘴雾化特性影响的实验[J].航空动力学报,2013,28(9):1933-1941.
ZHOU Bing, JI Honghu, ZHANG Baocheng. Experiment of swirled air effect on spray characteristic of double-line pressure-swirl atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(9): 1933-1941. (in Chinese)
- [8] 徐振立,陶乐仁,郑志皋.西兰花液氮流态化速冻的实验研究及理论分析[J].工程热物理学报,2007,28(增刊2):49-51.
XU Zhenli, TAO Leren, ZHENG Zhigao. Experiment research and theoretical analysis about L-N₂ spraying fluidized quick freezing of broccoli[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(Suppl. 2): 49-51. (in Chinese)
- [9] 郭旭峰,陶乐仁.液氮喷淋流态化速冻系统及冷冻性能研究[J].工程热物理学报,2003,24(3):475-477.
GUO Xufeng, TAO Leren. Investigation on freezing characteristic of L-N₂-spraying fluidized cooling system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(3): 475-477. (in Chinese)
- [10] 苏宇.新型低温MQL装置的研制与难加工材料低温高速切削机理研究[D].南京:南京航空航天大学,2007.
SU Yu. Development of new cryogenic MQL equipment and research on the cryogenic high speed cutting of difficult-to-machine materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [11] 于畅.船舶尾管轴承冷套技术研究[D].上海:上海交通大学,2006.
YU Yang. Technology research of stern tube bearing cold-installation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006. (in Chinese)
- [12] Sonnex T S, Dawber R P R. Rhinophyma-treatment by liquid nitrogen spray cryosurgery[J]. Clinical and Experimental Dermatology, 1986, 11(3): 284-288.
- [13] Greenwald B D, Dumot J A, Horwhat J D. Safety, tolerability, and efficacy of endoscopic low-pressure liquid nitrogen spray cryotherapy in the esophagus[J]. Diseases of the Esophagus, 2010, 23(1): 13-19.
- [14] Watson R N, Proulx G F. A new thermal vacuum facility for Hughes space and communications at El Segundo California[C]//Proceedings of 20th Space Simulation Conference the Changing Testing Paradigm. [S. l.]: NASA, 1998: 113-130.
- [15] Govindan P, Satyanarayana M, Deviprasad K, et al. Design and performance of $\phi 0.6\text{ m}$ thermal vacuum chamber[C]//Proceedings of the 18th International Cryogenic Engineering Conference. New Delhi: Narosa Publishing House, 2000: 679-682.
- [16] ZHOU Yuegui, ZHANG Mingchuan, YU Juan, et al. Experimental investigation and model improvement on the atomization performance of single-hole Y-jet nozzle with high liquid flow rate[J]. Powder Technology, 2010, 199(3): 248-255.
- [17] 曹建明.喷雾学[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [18] Mullinger P J, Chigier N A. The design and performance of internal mixing multijet twin fluid atomizers[J]. Journal of the Institute of Fuel, 1974, 47(11): 251-261.

(编辑:陈越)