

考虑非定常效应的离心喷嘴初始雾化特征研究

王铮钧¹, 张 漫¹, 靳朝阳², 葛 冰²

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241; 2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要:为研究燃油流量瞬时变化时离心喷嘴的初始雾化特征,以高频激光和高速相机作为测试系统,以柱塞泵提供流量激励作为非定常输入进行了试验研究。研究表明:离心喷嘴初始雾化的初始液膜段流动稳定,基本无扰动;无流量激励下的液膜扰动段和初始雾化终点存在较明显的波动特征;在29.2%流量激励下的试验结果表明,流量激励不影响初始液膜的流动,但会导致初始雾化终点以1.8 mm的幅值和21 Hz的主频率呈周期性变化。

关 键 词:离心喷嘴;初始雾化;非定常;液膜;流量

中图分类号:V231.2 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.10.005

[引用本文格式]王铮钧,张 漫,靳朝阳,等.考虑非定常效应的离心喷嘴初始雾化特征研究[J].热能动力工程,2021,36(10):33-38. WANG Zheng-jun, ZHANG Man, JIN Chao-yang, et al. Study on the primary atomization characteristics of simplex swirl atomizer induced by unsteady mass-flow rate input[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10):33-38.

Study on the Primary Atomization Characteristics of Simplex Swirl Atomizer induced by Unsteady Mass-flow Rate Input

WANG Zheng-jun¹, ZHANG Man¹, JIN Chao-yang², GE Bing²

(1. AECC Commercial Aircraft Engine Co. Ltd, Shanghai, China, Post Code:200241; 2. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code:200240)

Abstract: In order to investigate the primary atomization characteristics of simplex swirl atomizer when the fuel flow changes instantaneously, taking high frequency laser and high-speed camera as the testing system, the simplex swirl atomizer induced by unsteady mass-flow rate input provided by a ram pump is studied experimentally. The research shows that the initial part of liquid sheet of the primary atomization of simple swirl atomizer flows steadily and no basically disturbance is observed. The more obvious fluctuation is observed in the middle part of liquid sheet and the destination of primary atomization without unsteady mass-flow rate input. The test results shows that the initial liquid sheet with 29.2% of unsteady mass-flow rate input is also steady, yet the end part of initial liquid sheet of the primary atomization is fluctuating periodically with the amplitude of 1.8 mm and the main frequency of 21 Hz.

Key words: simplex swirl atomizer, primary atomization, unsteady, liquid sheet, mass-flow rate

引 言

喷嘴是航空发动机燃烧室的基本组成部分,其

使燃料雾化的性能,对点火、稳定燃烧及燃烧效率等燃烧室性能有非常重要的影响^[1-2]。在当前航空发动机燃烧室中,喷嘴的主要类型包括离心喷嘴、气动喷嘴和蒸发喷嘴等。

收稿日期:2021-03-03; 修订日期:2021-04-12

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51776191,52076136);国家科技重大专项(J2019-III-0002-0045)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation General Project of China(51776191,52076136); National Science and Technology Major Project(J2019-III-0002-0045)

作者简介:王铮钧(1987-),男,浙江杭州人,中国航发商用航空发动机有限责任公司工程师。

通讯作者:张 漫(1983-),男,河南洛阳人,中国航发商用航空发动机有限责任公司研究员。

离心喷嘴一般由旋流槽或切向孔、旋流室和喷口组成。液体燃料在压力作用下沿旋流孔以一定切向方向进入旋流室高速旋转,从喷口喷出并受离心力作用发生初始雾化。具体的初始雾化过程包括初始液膜形成、液膜扰动、液膜破碎成液丝和液丝破碎成大液滴^[3]。在此过程中,液膜形成和液膜扰动对最终雾化性能的影响较大。

早期针对离心喷嘴的研究主要集中于喷嘴的流动分析与雾化性能研究^[4], Senecak 等人^[5]通过解析方法对离心喷嘴的喷雾穿透、雾化粒径分布进行了研究。随着计算机仿真技术和光学测量技术的发展,越来越多的研究者开始对离心喷嘴雾化过程中的非定常特征进行研究。在众多研究中,无论是模拟还是试验,均发现在离心喷嘴初始雾化过程中液膜破碎前会发生扰动,而该现象与燃烧室内部压力振荡之间存在一定的关联性^[6]。徐让书等人^[7]采用 VOF 与大涡模拟结合的方法,研究了离心喷嘴初始雾化液膜的不稳定波和液膜破碎现象。邵长孝等人^[8]采用 DNS 和 Level Set 方法研究了旋转射流的一次雾化过程,并追踪了气液交界面。为研究离心喷嘴雾化动态特征与燃烧室内部压力振荡的关联,杨立军等人^[9-10]通过光学拍摄研究了离心喷嘴初始雾化的表面波长、液膜破碎距离等动态特性,及结构参数对动态特性的影响。Taeock 等人^[11-12]专门设计了液体管路压力脉动装置,研究液体压力脉动对离心喷嘴雾化动态特性的影响。上述研究发现,离心喷嘴初始雾化的动态特性既有可能来源于上游管路的液体压力或流量不稳定,也可能来源于喷嘴出口段液膜流动不稳定^[13-14]。

为减弱液体流动的不稳定影响,一般将离心喷嘴旋流室和出口段加长从而起到阻尼作用。但在航空发动机燃烧室中,对喷嘴组件的几何尺寸有着较为严格的设计要求,因此航空发动机用的离心喷嘴尺寸较短,初始雾化形成时易伴随旋流室和出口段内形成的流动不稳定性,引发最终雾化的非定常效应,并导致燃料燃烧前油气混合物发生较强的非定常脉动,具有振荡燃烧的潜在风险^[6]。

本研究采用试验方法研究了一种典型离心喷嘴受激励下的初始雾化特征。首先,建立包含液体管路与光学测量系统的喷嘴流量激励试验系统;然后,

对喷嘴进行流量曲线测定,并分析无流量激励的稳态初始雾化特性;最后,进行流量激励条件下的脉动初始雾化特性分析。

1 试验系统和测量方法

为研究离心喷嘴初始雾化的非定常效应,一般有两种方法:一是在液体管路中布置专门设计的激励装置^[11-13];二是挑选可以产生自激振荡的喷嘴^[14]。在本研究中,通过采用改装柱塞泵的方式,在喷嘴液体管路中施加流量激励,经理论分析、文献调研与试验调试,这种流量激励方式可实现一定幅值的管路流量脉动。

1.1 试验系统

试验与测量系统如图 1 所示。液体管路系统由储液罐、离心泵、变频器、柱塞泵、截止阀、流量计、压力表和喷嘴组成;测量系统由高频激光器、高速相机和存储处理图像的计算机组成。当管路无流量激励时,由离心泵抽取储液罐内液体作为稳定流量来源,经流量计、压力表后输送至喷嘴;当施加流量激励时,由变频器控制的柱塞泵抽取储液罐内液体作为激励流量来源,通过截止阀、三通接口与离心泵产生的稳定流量汇合,形成含流量脉动的液体,经流量计、压力表输送至下游喷嘴形成脉动喷嘴。

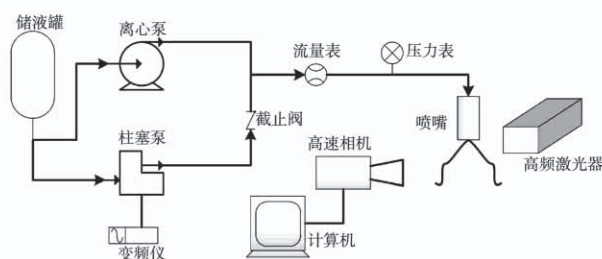


图 1 试验与测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

试验用喷嘴为单路离心喷嘴,如图 2 所示,以水为喷嘴工作介质。喷嘴出口直径为 D_0 ,该值为典型航空发动机离心喷嘴出口直径。旋流室含喷嘴出口段的总旋流长度为 L_0 ,旋流段/出口直径的长径比为 $L_0/D_0 = 3.5$ 。喷嘴旋流芯设有 4 道旋流槽,液体在上游压力作用下流经旋流槽,形成液体旋转流动的切向动量,液体离开喷嘴后形成空心喷雾。

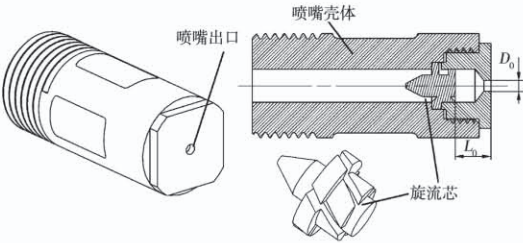


图 2 离心喷嘴结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of simplex swirl atomizer structure

试验前需测定喷嘴在本试验系统内的液体压力-流量曲线,测定过程如下:

- (1) 仅离心泵工作,形成喷嘴的稳定喷雾,依次测定液体压力从 0.1 增加至 0.9 MPa 的喷嘴流量;
- (2) 上述同等液体压力下用流量称重法进行测定,即对 60 s 内收集的喷嘴喷射液体进行称重,计算喷嘴流量,经测定,当液体压力为 0.3 MPa 以上时,流量计的表示流量值与称重法计算所得流量值偏差绝对值小于 3%,如图 3 所示。

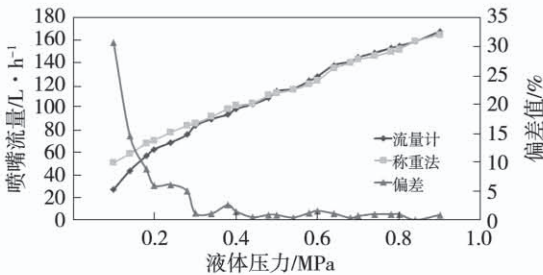


图 3 喷嘴液体压力-流量特性曲线

Fig.3 Characteristic curves of liquid pressure and flow rate

1.2 测量和分析方法

基于 15±5℃ 的室温常压环境,开展初始雾化研究。在稳态初始雾化试验中,液体压力和流量通过压力表和流量表直接读取;施加流量激励时,喷嘴流量存在较大幅值的脉动,导致流量计数据显示不稳定,将用称重法测量喷嘴流量,并通过测定的液体压力-流量曲线反算对应的平均液体压力。

喷嘴初始雾化液雾空间分布的测量,使用 Beamtech 527-30 激光器发射高频激光对喷雾场进行曝光,通过 PHANTOM 710 高速相机及其镜头拍摄喷嘴的出口及下游区域,如图 4 中的 A 框。沿喷

嘴轴线的角度,激光器与相机垂直布置。高速相机采样频率为 1 500 Hz(相邻两帧图像的时间间隔为 667 μs),曝光时间为 150 μs,拍摄图像为黑白图像,图像分辨率为 1 280 像素×800 像素。

初始雾化的动态特性通过统计分析喷雾图像的灰度值随时间变化来分析初始雾化过程的频率特征。为此,需要将图像进行裁剪,只保留初始雾化区域,即图 4 中的 B 框,并转化为灰度图像。对每一张图片的灰度累加值进行统计,得到灰度累加值随图像序列的变化曲线。对该变化曲线进行快速傅里叶变化(Fast Fourier Transform,FFT)分析,可以得到灰度累加值变化的频率特征^[14]。

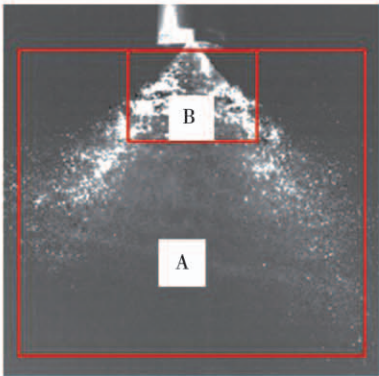


图 4 喷雾统计区域

Fig.4 Regions for atomization statistics

2 试验结果和分析

2.1 稳态初始雾化特征

使用单纯离心泵作为喷嘴液体压力来源,基于 0.33 MPa 液体压降、90 L/h 液体流量,进行无流量激励时稳态初始雾化测量,对连续 36 张瞬时图像轮廓进行叠加,如图 5 所示。

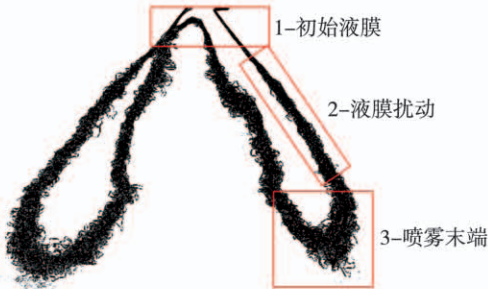


图 5 稳态初始雾化轮廓

Fig.5 Outlines of multi-images of steady primary spray

方框 1 所在区域为离心喷嘴初始雾化的初始液膜段,现有拍摄图像内未发现明显的扰动。该区域的轮廓基本重叠,说明该离心喷嘴初始雾化的初始液膜流动较稳定。方框 2 为离心喷嘴初始雾化的液膜扰动段轮廓,存在明显的扰动现象。方框 3 内为初始雾化浓相区的截止位置,即喷雾末端^[15],同样存在扰动现象,其中喷雾末端识别依据文献[13]中方法。

为分析图 5 中稳态初始雾化液膜扰动段和喷雾末端潜在的频率特征,对累计 3 000 张图像进行初始雾化区域灰度值的分析,分别对 0 ~ 800 Hz 宽频范围和 0 ~ 100 Hz 窄频范围内的灰度值进行检查,未发现此状态下的初始雾化存在明显的特征频率,如图 6 所示。文献[13 ~ 14]中相关研究通过 3 000 Hz 和 13 000 Hz 的拍摄频率均能捕捉到初始雾化的动态频率,分析未捕捉到稳态初始雾化动态频率的原因可能是 1 500 Hz 的拍摄频率偏低。

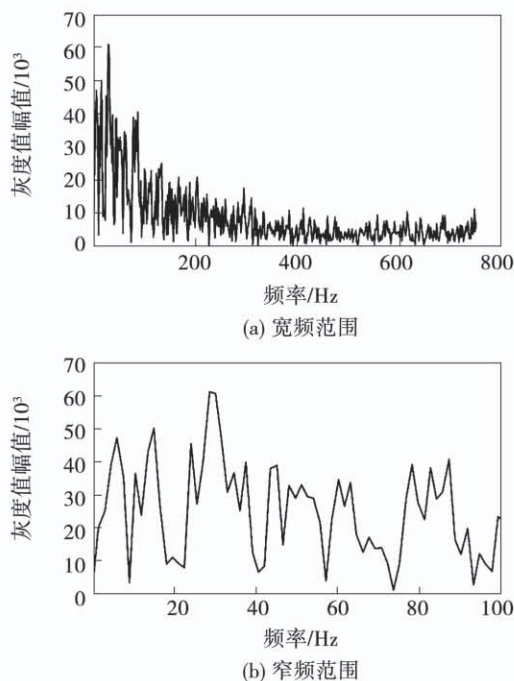


图 6 稳态初始雾化灰度值频率特性

Fig.6 Frequency characteristics of image gray value of steady primary spray

2.2 脉动初始雾化特征

进行带流量激励的脉动初始雾化测量时,离心泵供应 0.2 MPa 的液体压力,同时由变频器提供柱

塞泵的控制输入,产生约 20 Hz、时均约 0.07 MPa 液体压力的柱塞流量激励,通过称重法得到喷嘴时均流量为 89 L/h。依据喷嘴的液体压力 - 流量特性曲线,离心泵流量为 63 L/h,柱塞泵时均流量为 26 L/h,激励的时均流量占总时均流量的 29.2%,等效液体压力为 0.33 MPa。

同样对累计 3 000 张图像进行喷雾区域灰度值的分析,分别对 0 ~ 800 Hz 宽频范围和 0 ~ 100 Hz 窄频范围内的灰度值进行检查,在 0 ~ 100 Hz 范围内存在约 21 Hz 的主频率,如图 7 所示,该频率与柱塞泵的输入频率基本一致。

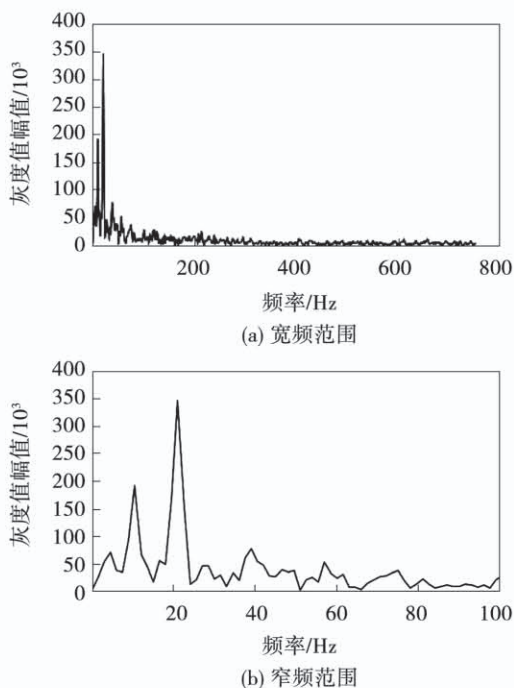


图 7 含流量脉动的初始雾化灰度值频率特性

Fig.7 Frequency characteristics of image gray value of primary spray with unsteady mass-flow rate input

基于上述约 21 Hz 的主频率,对所得初始雾化灰度图像进行相平均后,对一个周期范围内的 6 个相位的初始雾化图像(间隔 $\pi/2$)进行轮廓的叠加,如图 8 所示。方框 1 内离心喷嘴初始雾化初始液膜段的轮廓基本重叠,可以认为流量激励不会造成初始雾化中初始液膜的变化。方框 2 内为离心喷嘴初始雾化的液膜扰动段,轮廓扰动的幅值约为 1.2 mm。图 8 中方框 3 内初始雾化终点在 52.8 ~ 56.4 mm 之间变化,初始雾化终点振荡的幅值为

1.8 mm,初始雾化终点的平均值与文献[16]方法的计算值接近。

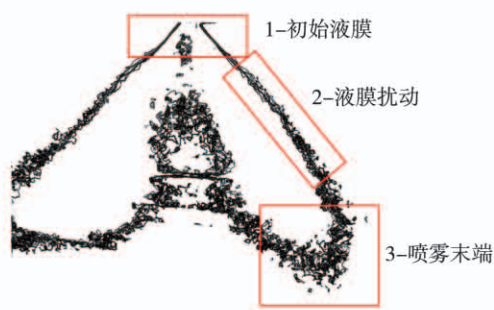


图 8 脉动初始雾化轮廓

Fig. 8 Outlines of multi-images of primary spray with unsteady mass-flow rate input

图 9 和图 10 分别展示了流量激励时,脉动初始雾化形态在主频振荡周期内的变化和初始雾化终点随时间的变化,其中,以喷嘴出口端面为 0 点,沿喷射方向为正向。基于流量激励条件和测量参数,所形成的脉动初始雾化动态特性主要体现在初始雾化终点的周期性变化。

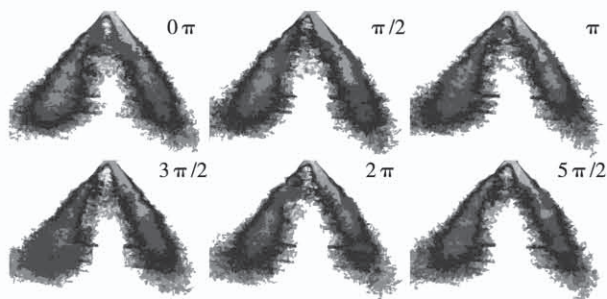


图 9 脉动初始雾化在一个周期内的振荡

Fig. 9 Primary spray oscillation with unsteady mass-flow rate input in one period

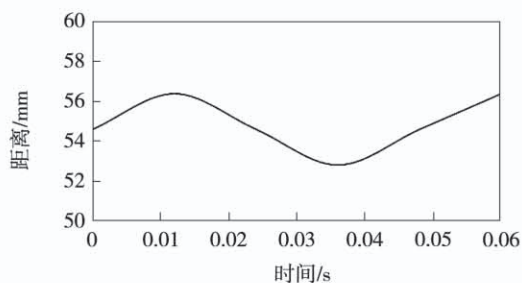


图 10 振荡周期内的振幅

Fig. 10 Amplitude of spray in oscillation period

3 结 论

(1) 离心喷嘴初始雾化的初始液膜段流动稳定,现有拍摄条件下未发现扰动现象;

(2) 无流量激励下,稳态初始雾化轮廓的液膜扰动段和初始雾化终点存在较明显的波动现象,但基于现有的拍摄参数,暂未发现该波动频率;

(3) 对于施加 29.2% 流量激励的脉动初始雾化,经图像灰度值分析,发现存在约 21 Hz 的振荡主频,该频率与流量激励频率基本一致;

(4) 流量激励不影响初始雾化初始液膜的流动,主要影响初始雾化终点发生周期性变化,初始雾化终点周期振荡的幅值为 1.8 mm。

(5) 后续将开展更宽范围的管路流量脉动工况下的初始雾化测量,以便进一步研究上游流量激励与初始雾化特性的关联。

参考文献:

- [1] 刘长福,邓 明. 航空发动机结构分析[M]. 西安:西北工业大学出版社,2006.
LIU Chang-fu, DENG Ming. Aeroengine structure analysis[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006.
- [2] LEFEBVRE A H, BALLAL D R. Gas turbine combustion[M]. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [3] BACHALO W D. Spray diagnostics for the twenty-first century[J]. Atomization and Sprays, 2000, 10(3): 439 - 474.
- [4] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
GAN Xiao-hua. Aero gas turbine engine fuel nozzle technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [5] SENECA P K, SCHMIDT D P, NOUAR I, et al. Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(6): 1073 - 1097.
- [6] BAZAROV V G, VIGOR Yang. Liquid propellant rocket engine [J]. Journal of Propulsion Power, 1998, 14(5): 797 - 806
- [7] 徐让书,年帅奇,牛 玲,等. 离心喷嘴内部流动与液膜初级破碎的耦合模拟[J]. 沈阳工业大学学报, 2011, 33(6): 661 - 666.
XU Rang-shu, NIAN Shuai-qi, NIU Ling, et al. Coupled simulation of internal flow and primary breakup for liquid sheet of pressure-swirl atomizer[J]. Journal of Shenyang University of Technology,

- 2011,33(6):661-666.
- [8] 邵长孝,罗 坤,樊建人. 旋转射流雾化的直接数值模拟研究[J]. 工程热物理学报,2017,V38(3):553-556.
- SHAO Chang-xiao,LUO Kun,FAN Jian-ren. Direct numerical simulation of swirling liquid atomization[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2017,V38(3):553-556.
- [9] 杨立军,葛明和,张向阳. 液体离心喷嘴喷雾场动态特性的初步研究[J]. 航空动力学报,2005(6):1083-1087.
- YANG Li-jun,GE Ming-he,ZHANG Xiang-yang. Preliminary investigation on dynamic characteristics of swirl injector[J]. Journal of Aerospace Power,2005,2005(6):1083-1087.
- [10] 杨立军,富庆飞,张向阳,等. 结构参数对敞口型离心喷嘴动态特性的影响[J]. 航空动力学报,2007(6):864-868.
- YANG Li-jun,Fu Qing-fei,ZHANG Xiang-yang. Study on influence of configuration parameter of open end swirl injector on its dynamics[J]. Journal of Aerospace Power,2007(6):864-868.
- [11] KHIL T,KIM S,CHO S,et al. Quantification of the transient mass flow rate in a simplex swirl injector[J]. Measurement Science and Technology,2009,20(7):075405.
- [12] KHIL T,CHUNG Y,BAZAROV V G,et al. Dynamic characteristics of simplex swirl injector in low frequency range[J]. Journal of Propulsion & Power,2012,28(2):323-333.
- [13] YANG A,YANG S,XU Y,et al. Periodic atomization characteristics of simplex swirl injector induced by klystron effect[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2018,31(5):1066-1074.
- [14] 薛帅杰,刘红军,洪 流,等. 厚液膜敞口型离心喷嘴自激振荡特性试验[J]. 航空学报,2018,39(9):77-86.
- XUE Shuai-jie,LIU Hong-jun,HONG Liu,et al. Test on self-excited oscillation characteristics of an open-end swirl injector with thick liquid film[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2018,39(9):77-86.
- [15] SCHMIDT D P,NOUAR I,SENECAL P K,et al. Pressure-swirl atomization in the near field [C]//Detroit: SAE International Congress & Exhibition,1999.
- [16] SENECA P K,SCHMIDT D P,NOUAR I,et al. Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization[J]. International Journal of Multiphase Flow,1999,25(6):1073-1097.

(姜雪梅 编辑)

(上接第 17 页)

- [3] HALE C A,PLESNIAK M W,RAMADHYANI S. Film cooling effectiveness for short film cooling holes fed by a narrow plenum[J]. Journal of Turbomachinery,2000,122(3):553-557.
- [4] 李威宏. 燃机透平薄壁叶片冷却结构的对流与耦合传热机制研究[D]. 北京:清华大学,2018.
- LI Wei-hong. Investigation on convective and conjugate heat transfer characteristics of cooling structures in gas turbine thin-wall blade[D]. Beijing:Tsinghua University,2018.
- [5] FLORSCHUETZ L W,METZGER D E,TRUMAN C R. Streamwise flow and heat transfer distributions for jet array impingement with crossflow[J]. Journal of Heat Transfer,1981,103(2):337-342.
- [6] LEE J,REN Z,LIGRANI P,et al. Crossflows from jet array impingement cooling: Hole spacing, target plate distance, Reynolds number effects [J]. International Journal of Thermal Sciences,2015,88:7-18.
- [7] CHAMBERS A C,GILLESPIE D,IRELAND P T,et al. Cooling performance of a narrow impingement channel including the introduction of cross flow upstream of the first hole[C]//Asme International Mechanical Engineering Congress & Exposition. Washington,DC,USA;November 15-21,2003. pp. 131-142. ASME.
- [8] STOAKES P,EKKAD S. Optimized impingement configurations for double wall cooling applications [C]//Asme Turbo Expo;Turbine Technical Conference & Exposition. Vancouver,British Columbia,Canada;June 6-10,2011. pp. 1535-1543. ASME.
- [9] 迟重然. 气冷涡轮叶片的传热设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- CHI Zhong-ran. Heat transferring design for air-cooled turbine blades[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2011.

(姜雪梅 编辑)