

射流撞壁形成液膜的形态和厚度试验

袁韦韦^{1,2,3}, 黄勇^{1,2,3}, 章宏宙^{1,2,3}, 黎露^{1,2,3}

- (1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;
3. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 为了研究射流撞壁形成液膜的主要特征, 采用基于紫外线发光二极管灯-诱导荧光法(UVLED-induced fluorescence, LEDIF)和高速相机的测试方法对液膜形状和厚度进行了实验研究。结果表明, 曲面和平液膜长度和宽度均随射流速度增加而增加。随着气流速度增加, 平面和曲面液膜均长度增加, 宽度都减小。随着壁面曲率半径的增加, 液膜宽度稍有增加, 而液膜长度增加较为明显。随着射流速度的增加, 平面和曲面液膜厚度整体上都逐渐减小。而当射流速度进一步增加时, 转捩现象开始出现, 此时液膜厚度均会迅速增加。曲面液膜的转捩临界速度为19.10~25.08 m/s, 而平面液膜转捩速度约为25.08~35.92 m/s。随着气流速度的增加, 平面液膜厚度逐渐减小, 而曲面液膜厚度在 $x=0\sim 55$ mm时随气流速度增加而增加, 在 $x>55$ mm时随气流速度增加而减小。对不同的曲率半径, 液膜厚度沿 φ_1 圆周方向呈“W”形, 而随着曲率半径的增加, “W”逐渐变得扁平, 但是位于中间($\varphi_1=0^\circ$)的厚度基本不变。

关 键 词: 射流撞击; 液膜; 液膜形状; 液膜厚度; 曲面壁

中图分类号: V434^{+.3}

文献标志码: A

Experiment on shape and thickness of liquid film formed by impinging jets on solid walls

YUAN Weiwei^{1,2,3}, HUANG Yong^{1,2,3}, ZHANG Hongzhou^{1,2,3}, LI Lu^{1,2,3}

- (1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to investigate the main characteristics of the liquid film formed by impinging jets on solid walls, the shape and thickness of the liquid film were investigated experimentally based on ultraviolet light emitting diode induced fluorescence (LEDIF) and a high-speed camera. The experiment results showed that the length and width of the liquid films on the curved wall and flat wall increased as the jet velocity increased. As the airflow velocity increased, the lengths of the liquid films on both the flat and curved walls increased, while the widths decreased. The width of the liquid film increased slightly, but the length of the liquid film increased obviously as the radius of curvature increased. The thickness of the liquid film on the flat and curved walls decreased gradually as the jet velocity increased. The transition occurred when the jet velocity reached the critical value, and the thickness of the liquid film increased rapidly. The critical velocity of the liquid film on the curved wall was 19.10—25.08 m/s, while that of the liquid film on the flat wall was 25.08—35.92 m/s, approximately. As the airflow velocity increased, the

收稿日期: 2022-04-22

作者简介: 袁韦韦(1992-), 男, 博士生, 主要从事液膜流动及其稳定性研究。E-mail: BY1904059@buaa.edu.cn

通信作者: 黄勇(1964-), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事燃油雾化及燃烧室点火熄火机理研究。E-mail: yhuang@buaa.edu.cn

引用格式: 袁韦韦, 黄勇, 章宏宙, 等. 射流撞壁形成液膜的形态和厚度试验[J]. 航空动力学报, 2022, 37(11): 2524-2533. YUAN Weiwei, HUANG Yong, ZHANG Hongzhou, et al. Experiment on shape and thickness of liquid film formed by impinging jets on solid walls[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(11): 2524-2533.

thickness of the liquid film on the flat wall decreased gradually, while the thickness of the liquid film on the curved wall increased when $x=0\sim 55$ mm, and decreased when $x>55$ mm. For the different radius of curvature, the liquid film thickness had a shape of “W” along the circumferential direction Ψ_1 . And the “W” was flattened gradually as the radius of curvature increased, but the thickness in the middle ($\Psi_1=0^\circ$) was kept unchanged.

Keywords: jets impingement; liquid film; liquid film shape; liquid film thickness; curved wall

斜射流撞壁所形成的液膜被广泛地应用于工业设备和化工制造中,例如液体推进火箭中的燃料油膜^[1]、航空燃气轮机中的主燃级油膜^[2]、火花点火直射式内燃机内部喷油撞壁^[3]、降膜冷却器中的液膜^[4-5]和二维薄膜材料制造^[6]等等。一方面在于发动机中液体燃料所形成薄膜的形状和尺寸会直接影响到燃油的雾化质量^[7],而雾化能够增强燃料的质量和热量传递;另一方面,在制药和造纸等生产上,液膜的形状和尺寸都必须被严格控制以保证低次品率,热轧过程中钢的淬火^[8]和清洗^[9]等。在这些过程中,液膜的厚度和形状具有重要影响。因此,对于液膜在各种不同工况下的形状、厚度分布等的研究具有十分重要的现实意义。

液膜的概念由 Fraser^[10] 正式提出和研究,通过试验罗列出了产生液膜的方式。主流的产生液膜的方法有三种:扇形喷嘴成膜、射流斜撞壁成膜和双射流撞击在空中成膜。最为普遍使用的是射流斜撞壁和双射流撞击两种方法。而航空航天里多数是射流斜撞壁形成液膜进而雾化。目前,发动机燃油的雾化在很大程度上取决于液膜的形状和尺寸^[7]。因此对于该类型的液膜的形状和尺寸预测十分有必要。国内的林庆国等^[11]从试验上研究了射流角度、射流速度和曲率半径等对液膜形态的影响,同时用探针法测量了液膜厚度分布情况。结果表明,射流角度对液膜形态的影响较为显著。唐亮等^[12]从试验方面研究了孔径、射流速度、射流倾角等对液膜形态的影响。随后,唐亮等^[13]又从理论方面建立了基于孔径、射流速度、射流倾角的液膜厚度分布、基本形态及边界模型。结果表明,在固定射流倾角时,液膜流量沿不同方位角的分布对液膜的厚度分布有重要影响。Good 等^[14]也从试验上研究了射流撞壁后的液膜形态。Wang 等^[2]建立了半经验的模型来预测射流速度、射流倾角等因素对液膜形态的影响。结果表明,射流速度越大,液膜铺展的面积越大,射流角度越大,液膜长度逐渐减小。Wilson 等^[15]

建立了一套能够预测液膜径向半径的模型,从而可以预测液膜的形态。Wang 等^[16]在 Wilson 等^[15]和 Kate 等^[17]研究的基础上拓展研究了射流撞击垂直壁面形成液膜径向流区极限的水跃区的宽度和高度模型。结果表明,射流角度和射流流量对液膜形态有重要影响。Taylor^[18]对双射流对撞成膜进行了形状建模,得到的结果与试验值进行了对比。结果表明,对撞角度对液膜形状有重要影响。然而,这些文献都没有考虑气流速度对液膜形态的影响。

在液膜厚度分布方面,Ranz^[19]在 1959 年提出了两股相同射流对撞形成液膜的厚度模型。该模型仅考虑射流对撞情况,且射流角度需要大于 60° 。随后,Watson^[20]系统地推导了液膜厚度分布模型,同时考虑了层流、湍流的情况。该模型考虑了雷诺数的影响,同时模型按照边界层发展程度分成边界层生长区和完全边界层区两部分。Inoue 等^[7]也推导了双射流对撞成膜的厚度模型,导出的理论能够预测两股射流冲击形成的液膜的形状和厚度,与低韦伯数破碎区的试验结果吻合较好,文章考虑了射流角度的影响。Choo 等^[21]利用入射角与折射角的关系改进了 Taylor 的液膜厚度分布模型,理论模型预测的趋势与试验结果相同,但在低方位角时,厚度值会被高估。研究还发现,黏性较强的液体会产生较厚的液膜。Inamura 等^[22]在层流情况下对斜射流撞壁液膜的厚度进行了建模,与试验对比符合较好。随后他们将平面模型推广到了曲面情况,同时也考虑了与 Watson 相似的液膜分区厚度分布^[23]。上述文献考虑湍流情况的较少,因此有必要对液膜在不同流态时的厚度进行研究。

早期的研究结果也表明,曲率的引入会影响液膜的稳定性,从而影响雾化效果^[24]。然而目前对曲面撞击射流的液膜厚度、形状的研究依然较少,对曲率半径的研究更少。因此对曲面液膜的研究很有必要。为深入研究液膜在各种不同工况下的形状和厚度分布,本文主要采用基于

LEDIF(light emitting diode-induced fluorescence)和高速相机的测量方法对斜射流撞壁形成的液膜开展了试验研究,分析了液膜的主要特征,并研究了气流速度、射流速度、曲率半径等影响因素对液膜形态和厚度分布特性的影响,得到关键影响参数的定性和定量的影响规律,从而为后续的液膜破碎^[25]的研究奠定基础。

1 试验装置与测量方法

1.1 试验装置

本文试验根据需要,分为平面和曲面壁部分,

其中曲面壁部分含有三组曲率半径,分别是 $R=20, 30, 40\text{ mm}$ 。图 1 为本研究中建立的试验装置示意图,分为液膜发生系统、试验测试系统、进气系统、排气系统等。试验工质为自来水,其中添加质量浓度为 0.04 g/L 的罗丹明-B 荧光染料。高速相机为 Photron FASTCAM NOVA S12,拍摄频率最大为 $12\ 800\text{ 帧/s}$,分辨率为 $1\ 024\text{ 像素}\times 1\ 024\text{ 像素}$ 。相机镜头上安装有滤光片(590 nm 高通滤光片)。各装置之间有信号线连接,用于采集信息。角度调节器调节范围为 $\alpha=0^\circ\sim 90^\circ$ 。平面壁板和曲面壁板根据需要换装即可。

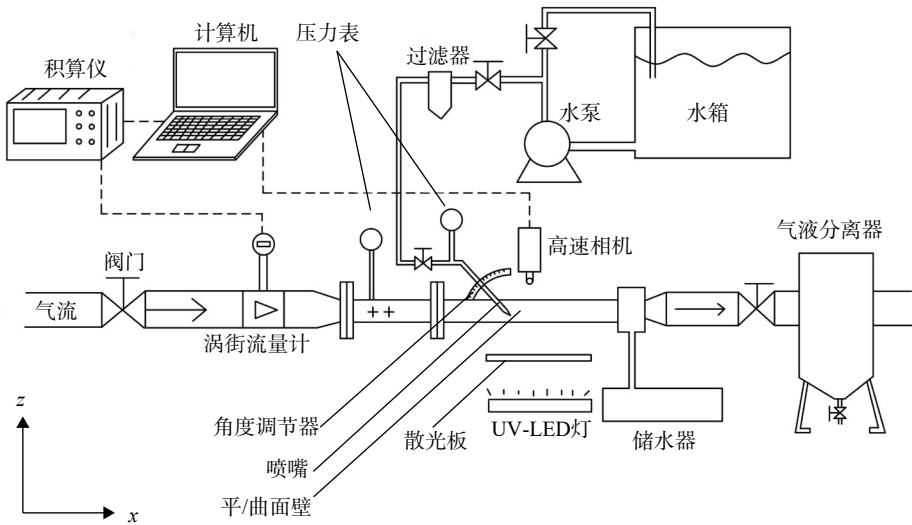


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device

试验段(曲面壁和平面壁)和涡街流量计之间有一段整流段,用于均匀来流空气。本文使用的喷嘴为有机玻璃管,内径 $d_0=1.08\text{ mm}$,喷嘴出口距壁面垂直高度为 1 cm 。液体射流速度 $U_0=9.6\sim 35.92\text{ m/s}$,为连续的射流,气流速度为 $U_{\text{air}}=0\sim 50\text{ m/s}$ 。由有机玻璃制成的平/曲面壁水平放置在高速相机和散光板(厚度为 1 mm 的磨砂亚克力板,用于均匀光源发出的光)之间,高速相机固定在曲面壁正上方(其方位和高度由位移机构控制),并且散光板和紫外线发光二极管灯(UV-LED 灯,功率为 275 W)处于曲面壁正下方。高速摄像机收集的所有数据都直接连接到计算机。环境和测试液体的温度均为室温, $25\text{ }^\circ\text{C}$,测试液体的表面张力和黏度分别为 $0.072\ 88\text{ N/m}$ 和 $0.94\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。具体的试验工况参数如表 1 所示。文中的液体射流角度(射流液柱与壁面的夹角)均

为 $\alpha=30^\circ$ 。

表 1 试验参数及工况表

Table 1 Experimental parameters and test conditions

序号	$U_{\text{air}}/(\text{m/s})$	$U_0/(\text{m/s})$	R/mm
1	0	9.6	$30, \infty$
2	0	13.2	$30, \infty$
3	0	19.1	$30, \infty$
4	0	25.08	$30, \infty$
5	0	35.92	$30, \infty$
6	10	13.2	$30, \infty$
7	20	13.2	$30, \infty$
8	30	13.2	$30, \infty$
9	40	13.2	$30, \infty$
10	50	13.2	$30, \infty$
11	0	13.2	20
12	0	13.2	40

1.2 测量方法

试验测试原理示意图如图 2 所示, 以平面壁为例。当放置曲面壁(半圆长管)时, 其长度方向与液体流向相同, 曲面壁的横截面呈半圆形。试验时, 液体由泵从水箱中泵出, 并且经过过滤器过滤杂质, 通过调节阀门, 来调整射流压力, 射流压力由精密压力表测量, 误差为示值的 $\pm 0.4\%$ 。气源由北京航空航天大学的压气站提供, 流量由涡街流量计测量, 误差为示值的 $\pm 1\%$ 。喷嘴固定在角度调节器上, 调好所需角度后, 液体从喷嘴喷出, 撞击到平面/曲面壁上, 形成液膜。下方的

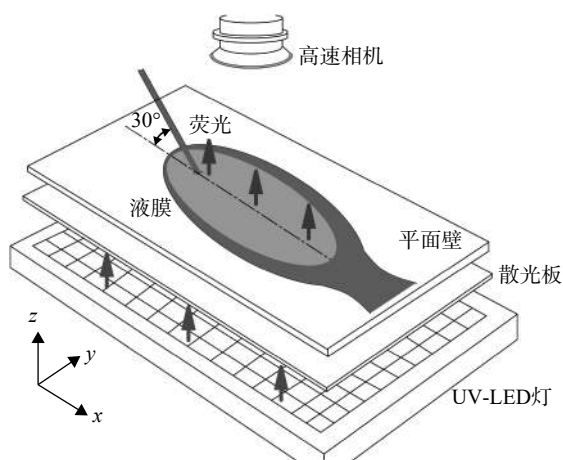


图 2 试验测试方法原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of the test method

UV-LED 灯产生的紫光打到所形成的液膜上, 此时液膜吸收紫光(波长为 395 nm), 发出波长为 590 nm 的荧光。经过镜头上的滤光片后, 低于 590 nm 的光被过滤, 只有荧光可以通过。最后相机捕捉到荧光, 拍摄到试验照片。

然后, 在试验液膜相同的空间位置搭建平膜和斜坡液膜(使用的液体与试验液体一致)来确定光强与液膜厚度的关系, 如图 3 所示, 测试方法处理流程见图 4。图中 h_1 为玻璃盖板厚度, h_2 为垫板厚度, h_3 为标定液膜厚度, l 为斜坡液膜长度。首先分别记录 N 张斜坡液膜(图 3(a))及试验背

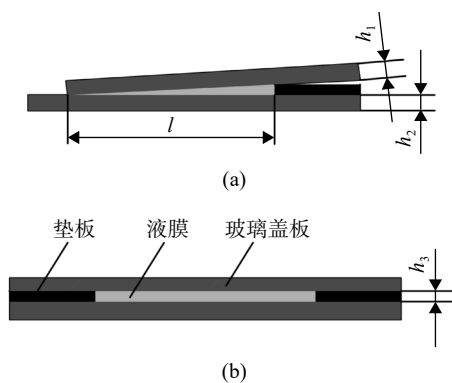


图 3 光强-厚度标定示意图

Fig. 3 Schematic diagram of light intensity-thickness calibration

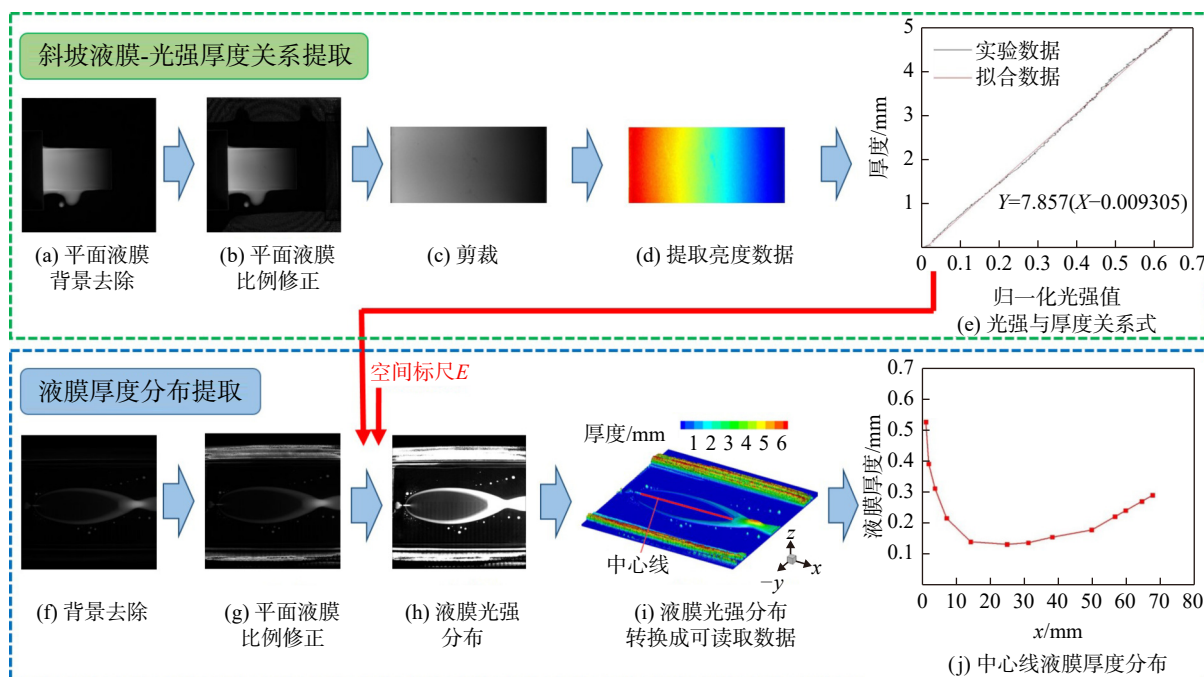


图 4 测试方法处理流程

Fig. 4 Process of the measurement method

景图像的光强图像,并分别求平均值。将斜坡液膜平均强度图像减去背景平均图像,得到实际斜坡液膜光强分布 I_1 ,如图 4(a)所示。同理,可以得到平面液膜(图 3(b))的光强分布 I_2 。假设平面液膜的每幅图像有 $m \times n$ 个像素点,则 I_1 所有像素的平均值可以作为光强-厚度关系式的参考值 I_c 。此时,有

$$I_c = \left(\sum_{i,j=1}^{m,n} I_1 \right) / (m \times n) \quad (1)$$

将得到的平面液膜图像与斜坡液膜图像每个对应像素点相除,然后乘以平面液膜的参考值 I_c ,到斜坡液膜的修正图像 I_{cor} ,如图 4(b)所示。则修正图像 I_{cor} 可以表示为

$$I_{cor}(i,j) = \frac{I_2}{I_1} I_c \quad (2)$$

其中 (i,j) 为 $m \times n$ 个像素点中任意一点。

对修正后斜坡液膜进行剪裁,计算该区域平均值,可得到一条连续的光强-厚度的曲线,拟合后可以得到厚度-光强的拟合函数 $f[I_{cor}(i,j)]$,主要流程如图 4(c)~图 4(e)所示。

用同样的拍摄和处理方法,可以得到测量液膜的光强分布 I ,再根据平面液膜(如图 3(b)所示)进行光强分布修正,最后通过前一步拟合得到的厚度-光强函数 $f[I_{cor}(i,j)]$ 和空间标尺 E (即单位像素点的长度,在拍摄液膜前进行的空间尺寸标定试验所得)将测量液膜的光强图像转换为厚度图像,即 $h(x,y)$ 。提取中心线处(图 4(i))的厚度数据即可得到下文中用到的厚度分布曲线。整个流程如图 4(f)~图 4(j)所示。此处的液膜厚度 $h(x,y)$ 可以表示为

$$h(x,y) = f \left[\frac{I(i,j)}{I_1(i,j)} I_c \right] \times E \quad (3)$$

这种基于 UV-LED 灯和荧光的测量方法称为 LED 诱导荧光法,简称为 LEDIF 法。对液膜厚度的实际值和测量值之间存在一定的误差,经过对该方法的标定试验计算分析,LEDIF 法测量液膜厚度的不确定度为 1.5%,在试验允许的误差范围内。

2 试验结果与分析

2.1 液膜形态

典型的液膜形态如图 5 所示。液膜可以主要分为薄膜区、水跃区和汇聚区三部分。

斜射流液柱在撞击壁面后,在滞止点 S (也作

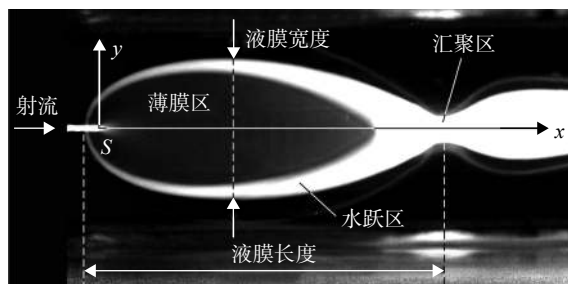


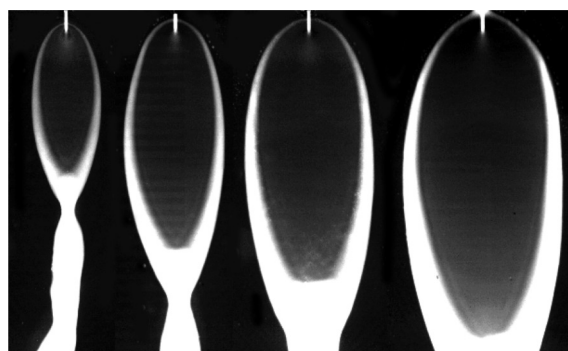
图 5 典型斜射流撞壁液膜图像

Fig. 5 Typical image of the liquid film formed by oblique jets impinging on a wall

为坐标原点)处开始沿径向向四周散开。由于液膜沿径向的速度分布不同,导致液膜形态呈“叶状”,薄膜区的液体在壁面摩擦、黏性力等作用下,速度降为零,形成水跃区。随后,水跃区的液体在表面张力的作用下向中间汇聚,形成汇聚区。试验结果表明,射流撞击平面壁形成液膜和撞击曲面壁形成液膜在结构上保持一致,即均可分为薄膜区、水跃区和汇聚区。定义液膜宽度为液膜在 y 方向的最大值,液膜长度为水跃区最左端外边界到汇聚区中间的长度。

2.1.1 射流速度对液膜形态的影响

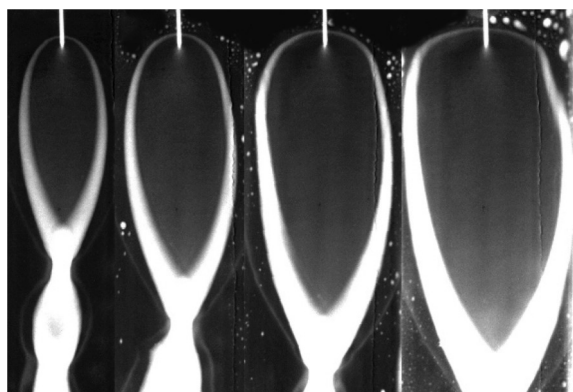
平面液膜在不同射流速度 U_0 下的时均液膜形态如图 6 所示,射流角度 $\alpha=30^\circ$ 。从图中可以发现,平面液膜长度和最大宽度均随射流速度增加而增加。同样地,曲面液膜在不同射流速度下的时均液膜形态如图 7 所示,射流角度 $\alpha=30^\circ$,曲率半径 $R=30$ mm。对比图 6 和图 7 可以发现,平面液膜与曲面液膜在射流速度影响下的规律相同。但是平面液膜的最大宽度在较大速度(如射流速度 $U_0>13.2$ m/s)时比曲面情况下的最大宽度更大,这是因为壁面曲率的存在,使得曲面液膜在射流



(a) $U_0=9.6$ m/s (b) $U_0=13.2$ m/s (c) $U_0=19.1$ m/s (d) $U_0=25.08$ m/s

图 6 射流速度对平面液膜形态的影响

Fig. 6 Effect of the jet velocity on the shape of the flat wall liquid film



(a) $U_0=9.6$ m/s (b) $U_0=13.2$ m/s (c) $U_0=19.1$ m/s (d) $U_0=25.08$ m/s

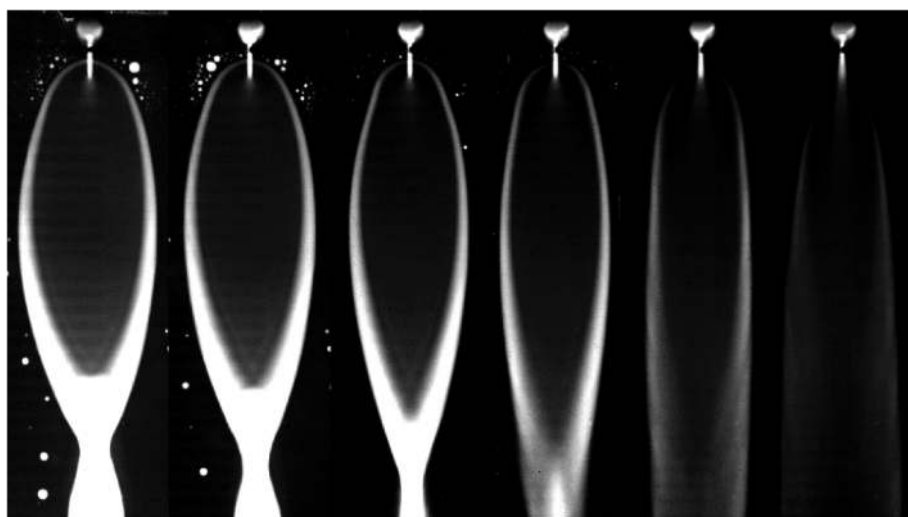
图 7 射流速度对曲面液膜形态的影响($R=30$ mm)

Fig. 7 Effect of the jet velocity on the shape of the curved wall liquid film ($R=30$ mm)

速度较大时,液膜宽度难以继续沿 y 方向增大,而是沿曲面壁逐渐向上方运动,各 x 值位置处的液膜宽度越偏离 x 轴,照片上的宽度压缩得越多,因此在射流撞击初段部分曲面液膜的宽度变得更宽。而在小的射流速度下(如速度 $U_0 \leq 13.2$ m/s)时,平面液膜和曲面液膜的宽度差距较小。

2.1.2 气流速度对液膜形态的影响

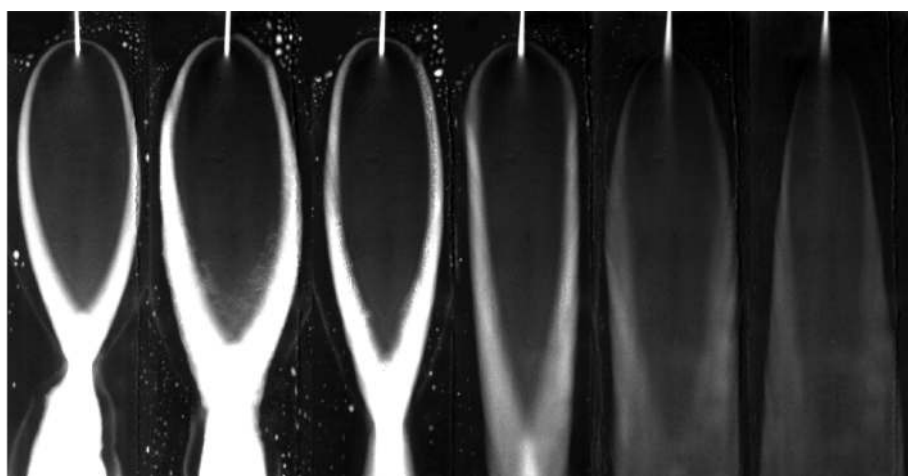
气流速度对平面和曲面时均液膜形态的影响如图 8 和图 9 所示, $\alpha=30^\circ$, $U_0=13.2$ m/s。从图中可以发现,随着气流速度的增加,平面液膜和曲面液膜的长度都增加,即液膜变得细长。平面和曲面液膜的最大宽度均先减小,后又有所增大。平面液膜的最大宽度在气流速度为 40 m/s 时达



(a) $U_{\text{air}}=0$ m/s (b) $U_{\text{air}}=10$ m/s (c) $U_{\text{air}}=20$ m/s (d) $U_{\text{air}}=30$ m/s (e) $U_{\text{air}}=40$ m/s (f) $U_{\text{air}}=50$ m/s

图 8 横向气流速度对平面液膜形态的影响 ($U_0=13.2$ m/s)

Fig. 8 Effect of the airflow velocity on the shape of the flat wall liquid film ($U_0=13.2$ m/s)



(a) $U_{\text{air}}=0$ m/s (b) $U_{\text{air}}=10$ m/s (c) $U_{\text{air}}=20$ m/s (d) $U_{\text{air}}=30$ m/s (e) $U_{\text{air}}=40$ m/s (f) $U_{\text{air}}=50$ m/s

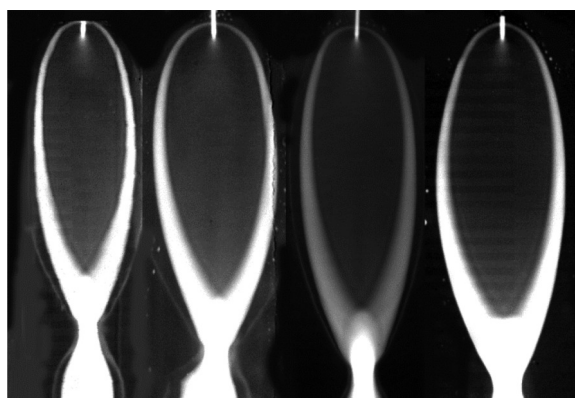
图 9 横向气流速度对曲面液膜形态的影响 ($U_0=13.2$ m/s, $R=30$ mm)

Fig. 9 Effect of the airflow velocity on the shape of the curved wall liquid film ($U_0=13.2$ m/s, $R=30$ mm)

到最小,而曲面液膜最大宽度最小时对应的气流速度为 30 m/s。气流速度对平面、曲面时均液膜形态影响的差异主要是壁面曲率的存在使得液膜更容易向曲面壁中间汇聚。此外,汇聚区一般厚度较大,对应的迎风面积也更大,所受到的气动力也更强,液膜在气动力的作用下速度会显著增大,液膜变得更加平缓,汇聚效应受到气流的抑制,因此水跃区高度随气流速度增加而逐渐减小(被气流吹散)。

2.1.3 壁面曲率半径对液膜形态的影响

不同壁面曲率半径对时均液膜形态的影响如图 10 所示,射流角度 $\alpha=30^\circ$,射流速度 $U_0=13.2$ m/s。由图可知,当 $U_0=13.2$ m/s 时,随着曲率半径的增加,液膜宽度稍有增加,这是因为宽度在曲率半径较小时,壁面限制了液膜向宽度方向流动,其宽度转变成了沿壁面方向的高度。液膜的长度主要受液膜流动速度、液体表面张力影响。在曲率半径较小时,液膜宽度方向(y 方向)的速度分量会使液膜沿曲面壁向壁面高处流动,速度减为零后在重力作用下向反方向流动。然后在表面张力作用下形成汇聚区。故曲率半径越小,液膜到达液膜中心线处的 y 方向的分速度越大,对应的水跃区形成的时间越短,从而汇聚区越靠近滞止点 S 。由此可知,液膜长度随着曲率半径的增加而增加。



(a) $R=20$ mm (b) $R=30$ mm (c) $R=40$ mm (d) 平面壁

图 10 曲率半径对曲面液膜形态的影响 ($U_0=13.2$ m/s)

Fig. 10 Effect of the radius of curvature on the shape of the curved wall liquid film ($U_0=13.2$ m/s)

2.2 液膜厚度分布

沿薄膜区中心线(图 5 中 x 轴所在位置)提取液膜厚度数据,数据范围为从滞止点 S 到薄膜区与汇聚区交界处。

2.2.1 射流速度对液膜厚度的影响

图 11 显示了射流速度对平面液膜时均厚度

(h) 的影响,射流角度 $\alpha=30^\circ$ 。从图中可知,当射流速度小于 35.92 m/s 时,随着射流速度的增加,平面液膜厚度逐渐减小。然而当速度增加到 35.92 m/s 时,液膜厚度开始迅速增加,且比 25.08 m/s 时的液膜厚度要大。因此,这一现象说明当射流速度处于 25.08~35.92 m/s 时,液膜流动发生了转捩。液膜在流动时,会受到环境气体的剪切作用,液膜表面形成表面波,表面波进一步发展成液膜的失稳。此外,液体在边上流动时,壁面也会对液膜的稳定性产生影响。在较低的射流速度下($U_0 \leq 25.08$ m/s),液膜的流动状态未发展到湍流情况就已经到达水跃区,液膜的进一步发展受到终止。而在高的射流速度下,才会继续形成湍流。因此,在射流速度增加到 25.08 m/s 后,液膜流动逐渐失稳,逐渐从层流向湍流发展。Azuma 等人^[26]也发现液膜在大速度下的厚度比小速度下的更大,增加的速度也更快,并解释是液膜流动发生了转捩。

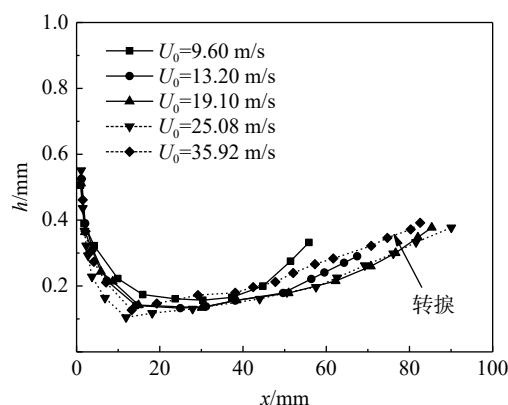
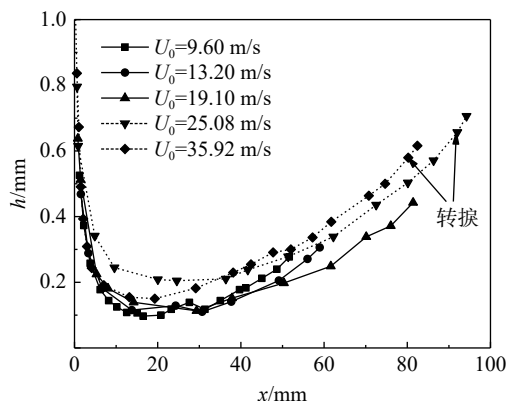


图 11 射流速度对平面液膜厚度的影响($\alpha=30^\circ$)

Fig. 11 Effect of the jet velocity on the thickness of the flat wall liquid film ($\alpha=30^\circ$)

图 12 显示了射流速度对曲面液膜时均厚度的影响,射流角度 $\alpha=30^\circ$ 。与平面液膜类似,当射流速度小于 25.08 m/s 时,随着气流速度的增加,曲面液膜的厚度呈逐渐减小的趋势。当射流速度从 19.10 m/s 增加到 25.08 m/s 时,液膜厚度不再减小,而是快速增大。这一现象证明了液膜流态发生了转捩,曲面壁与平面壁转捩的机制是相同的。与平面液膜不同点在于,曲面液膜发生转捩的射流速度更小,为 19.10~25.08 m/s,说明曲率的存在增强了液膜流动的不稳定性,减小了液膜转捩所需的最低速度。曲面液膜转捩时的液膜厚度增加速度要比平面液膜转捩时的更快,液膜的厚度也更大。

图 12 射流速度对曲面液膜厚度的影响($R=30$ mm)Fig. 12 Effect of the jet velocity on the thickness of the curved wall liquid film ($R=30$ mm)

2.2.2 气流速度对液膜厚度的影响

气流速度对平面液膜时均厚度的影响如图 13 所示, $U_0=13.2$ m/s, $\alpha=30^\circ$ 。从图中可知, 随着气流速度的增加, 平面液膜的厚度逐渐减小。在环境气流静止时, 气液之间存在速度差, 因此会形成剪切力。剪切力作用于液膜表面, 在液体黏性的共同作用下导致液膜的厚度减小。当气流速度小于 30 m/s 时, 平面液膜在下游($x>55$ mm)存在明显的上升现象, 此处为汇聚区所在位置。当速度进一步增加后, 液膜厚度在下游趋于平缓, 汇聚区消失。因此, 平面液膜汇聚区存在的临界气流速度约为 30 m/s。

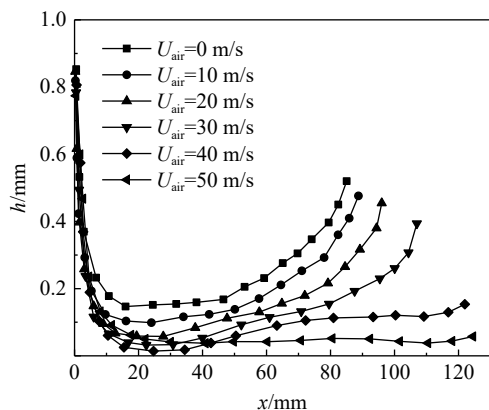
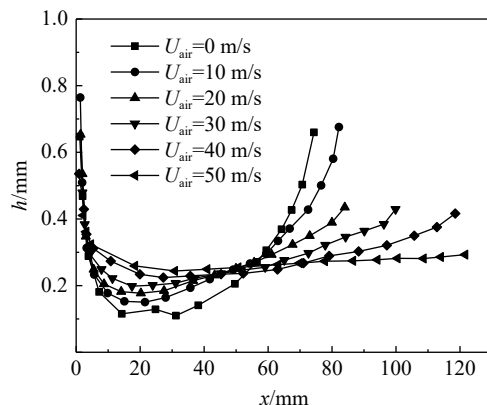


图 13 气流速度对平面液膜厚度的影响

Fig. 13 Effect of the airflow velocity on the thickness of the flat wall liquid film

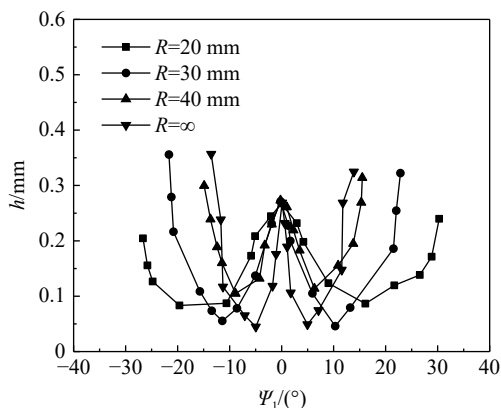
气流速度对曲面液膜时均厚度的影响如图 14 所示, $U_0=13.2$ m/s, $\alpha=30^\circ$ 。曲面液膜厚度在 $x<55$ mm 时, 随气流速度增加而增加; $x>55$ mm 时, 曲面液膜厚度随气流速度的增加而减小。根据图 13 和图 14 可知, 平面液膜和曲面液膜的厚度在 $x>55$ mm

图 14 气流速度对曲面液膜厚度的影响($R=30$ mm)Fig. 14 Effect of the airflow velocity on the thickness of the curved wall liquid film ($R=30$ mm)

时都随气流速度的增加而呈减小的趋势。平面液膜与曲面液膜厚度在 $x=0\sim 55$ mm 出现差异原因主要是曲面液膜在气流和壁面曲率的作用下液体在滞止点 S 下游更容易聚集, 导致厚度更大。与平面液膜类似, 在气流速度小于 40 m/s 时, 曲面液膜在下游存在明显的上升现象, 但是当速度进一步增加后, 汇聚区消失。因此, 曲面液膜汇聚区存在的临界气流速度大约为 40 m/s。

2.2.3 曲率半径对液膜厚度的影响

曲率半径对液膜时均厚度的影响如图 15 所示, $U_0=13.2$ m/s, $\alpha=30^\circ$ 。曲率半径分别是 $R=20$, 30, 40 mm 和平面 ($R=\infty$)。截取数据的位置为距离为 $x=3$ mm (离滞止点 S 的距离, x 方向), 不同的曲率半径壁面上液膜宽度对应的圆周角 Ψ_1 上的厚度数据。其中, 平面壁液膜厚度数据是根据液膜中心线上方 50 mm 处位置为圆心所形成的圆心角换算得到。从图中可知, 液膜厚度沿 Ψ_1 方向呈现出“W”形, 而随着曲率半径 R 的增加, “W”

图 15 曲率半径对曲面液膜厚度的影响($U_0=13.2$ m/s)Fig. 15 Effect of the radius of curvature on the thickness of the curved wall liquid film ($U_0=13.2$ m/s)

逐渐变得扁平,但是位于中间($\varphi_1=0^\circ$)的厚度值保持不变。位于两侧的液膜厚度最小的位置随曲率半径的增加逐渐向中间靠拢,“W”形的宽度随曲率半径的增加而逐渐减小。

3 结 论

本文采用 LEDIF 法和高速相机对斜射流撞壁液膜在不同的工况下的液膜时均形态和厚度分布进行了试验研究,考虑了射流速度、气流速度和曲率半径等因素。本文的主要结论如下:

1) 射流速度对曲面和平面液膜长度和宽度影响明显,均随射流速度增加而增大。气流速度对平面液膜和曲面液膜的影响与射流速度不同,液膜长度随气流速度增加而增加,宽度则相反。壁面曲率半径对液膜宽度影响较小,随着曲率半径增加,液膜宽度稍有增加,而液膜长度增加较为明显。

2) 射流速度的增加会使得平面液膜和曲面厚度逐渐减小。当射流速度进一步增加时,转捩现象开始出现,此时液膜厚度均会迅速增加。曲面液膜(曲率半径为 30 mm)的转捩临界速度为 19.10~25.08 m/s,平面液膜转捩临界速度为 25.08~35.92 m/s。

3) 气流速度的增加会使得平面液膜厚度逐渐减小,而曲面液膜厚度在液膜上游($x=0\sim 55$ mm)部分随气流速度增加而增加,在液膜下游($x>55$ mm)部分随气流速度增加而减小。当气流速度大于 50 m/s 时,平面液膜和曲面液膜的厚度在液膜下游($x>55$ mm)部分增加速度明显减弱。当射流速度为 13.2 m/s 时,平面液膜汇聚区存在的临界气流速度约为 30 m/s,曲面液膜汇聚区存在的临界气流速度约为 40 m/s。

4) 对不同的曲率半径,液膜厚度沿圆周角 φ_1 方向均呈现出“W”形。曲率半径的增加会使得“W”逐渐变得扁平,但位于中间($\varphi_1=0^\circ$)的厚度值保持不变,位于两侧的液膜厚度最小值的位置随曲率半径的增加逐渐向中间靠拢。

参考文献:

- [1] MITRA S K, LI X, RENKSIZBULUT M. On the breakup of viscous liquid sheets by dual-mode linear analysis[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(3): 728-735.
- [2] WANG Ruixiang, HUANG Yong, FENG Xiang, et al. Semi-empirical model for the engine liquid fuel sheet formed by the oblique jet impinging onto a plate[J]. *Fuel*, 2018, 233: 84-93.
- [3] SI Z, SHIMASAKI N, NISHIDA K, et al. Experimental study on impingement spray and near-field spray characteristics under high-pressure cross-flow conditions[J]. *Fuel*, 2018, 218: 12-22.
- [4] PETRUCHIK A I, SOLODUKHIN A D, FISENKO S P. Simulation of cooling of water droplet and film flows in large natural wet cooling towers[J]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2001, 74(1): 62-68.
- [5] 王慧洁, 许坤梅. 液体火箭发动机燃烧室壁液膜冷却的数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(11): 2660-2668. WANG Huijie, XU Kunmei. Numerical simulation of liquid film cooling for combustion chamber wall of liquid rocket engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(11): 2660-2668. (in Chinese)
- [6] KUCERA J T, RUBIN L M, UWAI K, et al. Fabrication of nanometer smooth $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ films by reactive cosputtering from elemental targets with pure ozone[J]. *Physica C Superconductivity*, 1992, 192(1/2): 23-30.
- [7] INOUE C, WATANABE T, HIMENO T. Study on atomization process of liquid sheet formed by impinging jets[R]. AIAA-2008-4847, 2008.
- [8] GRADECK M, KOUACHI A, LEBOUCHÉ M, et al. Boiling curves in relation to quenching of a high temperature moving surface with liquid jet impingement[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(5/6): 1094-1104.
- [9] GUHA A, BARRON R M, BALACHANDAR R. An experimental and numerical study of water jet cleaning process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(4): 610-618.
- [10] FRASER N. A photographic investigation into the disintegration of liquid sheets[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1954, 247(924): 101-130.
- [11] 林庆国, 杨成虎, 刘森. 射流角度和壁面曲率对撞壁液膜的影响[J]. *国防科技大学学报*, 2013, 35(2): 17-21. LIN Qingguo, YANG Chenghu, LIU Ben. Effect of impingement angle and wall curvature on liquid film[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2013, 35(2): 17-21. (in Chinese)
- [12] 唐亮, 胡锦涛, 刘计武, 等. 倾斜射流撞壁实验研究及液膜几何参数建模[J]. *航空学报*, 2020, 41(12): 1-10. TANG Liang, HU Jinhua, LIU Jiwu, et al. Experimental study on oblique jet wall impingement and geometrical parameter modeling of liquid film[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(12): 1-10. (in Chinese)
- [13] 唐亮, 李平, 周立新, 等. 倾斜射流撞壁形成的液膜外形的理论建模[J]. *推进技术*, 2021, 42(2): 327-334. TANG Liang, LI Ping, ZHOU Lixin, et al. Theoretical modeling of liquid sheet shape formed by oblique jet impinging onto wall[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(2): 327-334. (in Chinese)
- [14] GOOD R, NOLLET B. Fluid film distribution investigation for liquid film cooling application[C]// 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Atlanta, US: AIAA, 2017: 1-6.
- [15] WILSON D I, LE B L, DAO H, et al. Surface flow and drainage films created by horizontal impinging liquid jets[J]. *Chemical Engineering Science*, 2012, 68(1): 449-460.
- [16] WANG T, FARIA D, STEVENS L J, et al. Flow patterns and draining films created by horizontal and inclined co-herent water jets impinging on vertical walls[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 102(1): 585-601.
- [17] KATE R P, DAS P K, CHAKRABORTY S. Hydraulic jumps due to oblique impingement of circular liquid jets on a flat horizontal surface[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 573: 247-263.
- [18] TAYLOR G. Formation of thin flat sheets of water[J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1960, 259(1296): 1-17.

- [19] RANZ W E. Some experiments on the dynamics of liquid films[J]. *Journal of Applied Physics*, 1959, 30(12): 1950-1955.
- [20] WATSON E J. The radial spread of a liquid jet over a horizontal plane[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 20(3): 481-499.
- [21] CHOO Y J, KANG B S. Parametric study on impinging-jet liquid sheet thickness distribution using an interfero-metric method[J]. *Experiments in Fluids*, 2001, 31(1): 56-62.
- [22] INAMURA T, YANAOKA H, TOMODA T. Prediction of mean droplet size of sprays issued from wall impingement injector[J]. *AIAA Journal*, 2004, 38(3): 614-621.
- [23] INAMURA T, AMAGASAKI S, YANAOKA H. Thickness of liquid film formed by impinging jets on a concave wall[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(3): 612-617.
- [24] GOREN S L. The instability of an annular thread of fluid[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1962, 12(2): 309-319.
- [25] 何昌升, 刘云鹏, 韩宗英, 等. 平板式预膜喷嘴初次雾化特性试验[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(3): 482-492.
- HE Changsheng, LIU Yunpeng, HAN Zongying, et al. Experiment on primary atomization characteristics of planar prefilming nozzle[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(3): 482-492. (in Chinese)
- [26] AZUMA T, HOSHINO T. The radial flow of a thin liquid film: 2nd report, liquid film thickness[J]. *Bulletin of JSME*, 1984, 27(234): 2763-2770.

(编辑: 陈 越)