

# 3D打印与机械加工喷嘴的雾化特性对比研究

肖礼<sup>1,2</sup>, 白晓<sup>1,2</sup>, 李清廉<sup>1,2</sup>, 盛立勇<sup>1,2</sup>

(1. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**为清楚阐明3D打印技术是否可应用于加工火箭发动机的关键部件——喷嘴, 及加工方式会对推进剂的流动雾化产生何种影响, 对相同结构的机械加工喷嘴与3D打印喷嘴的喷雾特性进行了冷态试验对比研究。基于背景光成像技术采用高速相机获得瞬态的喷雾图像, 以及激光散射技术采用马尔文测量液滴粒径尺寸分布。研究发现: 机械加工喷嘴同轴度普遍较差, 喷嘴重复性较低, 喷雾存在偏斜、分散等喷雾空间分布不均问题; 3D打印喷嘴表面粗糙度较高, 使得喷嘴流量系数比设计值低3%左右; 在喷嘴同轴度较好的前提下, 加工方式对雾化锥角及雾化粒径影响较小。

**关键词:**3D打印; 机械加工; 三组元喷嘴; 喷雾特性

**中图分类号:**V435      **文献标识码:**A      **文章编号:**1672-9374(2020)01-0035-09

## Comparative study on atomization characteristics between 3D printing and machined injectors

XIAO Li<sup>1,2</sup>, BAI Xiao<sup>1,2</sup>, LI Qinglian<sup>1,2</sup>, SHENG Liyong<sup>1,2</sup>

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Science and Technology on Scramjet Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to clarify whether 3D printing technology can be applied to machine the injector which is a critical component of the rocket engine, and how the processing method affects the flow and atomization characteristics, the cold spray experiments were conducted using the 3D printing and machined injectors with the same structure. A back-lighting photography technique has been employed to capture the instantaneous spray images with a high speed camera. The droplet size distribution was measured using Malvern based on the laser scattering technique. The results show that the coaxiality and repeatability of the machined injectors is generally poor, and the spray has the problem of uneven spatial distribution such as deflection and dispersion. While for the 3D printing injectors, the discharge coefficient is lower

收稿日期:2019-01-04;修回日期:2019-04-09

基金项目:国家自然科学基金(11472303;11402298);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0156);国家基础研究重大专项(613239)

作者简介:肖礼(1990—),男,工程师,研究领域为液体火箭发动机

than the designed value by 3% due to its higher roughness. On the premise of the better injector coaxiality, the processing method has less influence on the spray angle and diameter.

**Keywords:** 3D printing; machining technology; tri-propellant injector; spray characteristics

## 0 引言

3D 打印技术是基于“离散/堆积成型”的成型思想,将已有的三维物理模型,用层层加工的方式将成型材料“堆积”而形成实体零件,最早诞生于 20 世纪 80 年代<sup>[1]</sup>。其核心工艺主要包括光固化成型技术(Stereo Lithography Appearance, SLA)、选择性烧结技术(Selective Laser Sintering, SLS)、熔融沉积快速成型技术(Fused Deposition Modeling, FDM)以及薄材叠层制造成型技术(Laminated Object Manufacturing, LOM)<sup>[2-4]</sup>。目前,3D 打印技术在工业制造、医疗、建筑、消费等领域应用广泛。

由于 3D 打印技术具有提高材料的利用率、降低制造成本、优化零件结构、增加使用寿命、缩短新型装备的研发周期等优点,最尖端的航空航天工业对这种技术颇为关注<sup>[5-6]</sup>。NASA 早于 2014 年使用 3D 打印技术制造出火箭发动机喷管并成功应用于 RS-25 发动机。2015 年 NASA 利用增材制造技术制造出首个全尺寸铜合金火箭发动机零件,标志着航空航天领域 3D 打印技术应用的新里程碑。2016 年,NASA 成功测试了一个以液态甲烷为燃料的 3D 打印火箭发动机涡轮泵。2017 年,Aerojet 公司成功点火测试了其采用 3D 打印技术制造的液体燃料火箭发动机 Bantam。Ariane 集团使用镍基合金 3D 打印技术使得新一代运载火箭 Ariane 6 的发动机喷嘴头组件数量从 248 骤降至 1。2018 年新西兰的 Rocket Lab 成功发射出的电动火箭 Electron,所用的 Rutherford 发动机的主要部件均采用 3D 打印技术制造,包括发动机燃烧室、电机泵、推进剂阀和喷注器等,大大降低制造成本及周期。此外,国内使用 3D 打印技术做了大量应用。中国航天科技集团公司利用激光同步送粉 3D 打印技术成功实现了长征五号火箭捆绑支座的研制。钛合金和 M100 钢的 3D 打印技术已被广泛应用于我国的歼-15 等的主承力部位。西北工业大学也研制出了 3D 打印的机翼等。

喷嘴在液体火箭发动机中连接着供应系统和

燃烧室,负责燃料的喷注、雾化,很大程度上决定了发动机的燃烧和稳定性能<sup>[7]</sup>。长期以来,喷嘴的加工制造一直使用传统的机械加工技术,而基于喷嘴三维模型,新兴的 3D 打印技术则可更快地加工。然而,加工方式的不同会对喷嘴流体的流动及雾化特性产生何种影响还不清楚,本文则基于同轴三组元喷嘴,对使用机械加工技术及 3D 打印技术加工出的喷嘴的流量系数、喷雾锥角及雾化粒径等喷雾特性进行对比分析,旨在阐明机械加工与 3D 打印技术应用于加工火箭发动机重要部件的优劣。

## 1 试验方法

### 1.1 研究对象

使用同轴直流式三组元喷嘴为研究对象,喷嘴工作时,从中心圆孔喷注的液体射流,在内外环缝高速气流的作用下发生一次破碎,逐渐失稳形成大液滴,进而在气流作用下发生二次雾化,生成许多细小液滴<sup>[8-9]</sup>。机械加工的喷嘴命名为 Ma-I (Machine-Injector),3D 打印的喷嘴命名为 3D-I (3D-Injector),3D-I 和 Ma-I 结构示意图如图 1 所示。

3D-I 是通过将已有的三维物理模型分区成逐层的切片进而指导打印机逐层打印,打印完成后进行喷嘴外表面喷砂处理,车床车螺纹并精车安装密封面,校准模型并用小孔机在喷嘴出口通过 3D 打印预留的导引孔打小孔进而完成整个加工。Ma-I 通过传统的机械加工方式生成,先用毛坯料加工导引小孔,在小孔基础上钻头扩孔,之后用铰刀铰孔进而精车外形,再将喷嘴放置加工中心铣定位肋条。内外喷嘴机械加工工艺基本相同,内外喷嘴加工完成后装配,并在入口处进行氩弧焊焊接,焊接成喷嘴组件,整个工艺流程复杂。深入分析两种加工方式特点,在喷嘴加工上机械加工与 3D 打印技术的优缺点对比如表 1 所示。在试验研究中,为对比分析加工方式的影响,分别使用机械加工技术和 3D 打印技术各加工 7 个相同结构尺寸的喷嘴。喷嘴特征尺寸参数如表 2 所示。

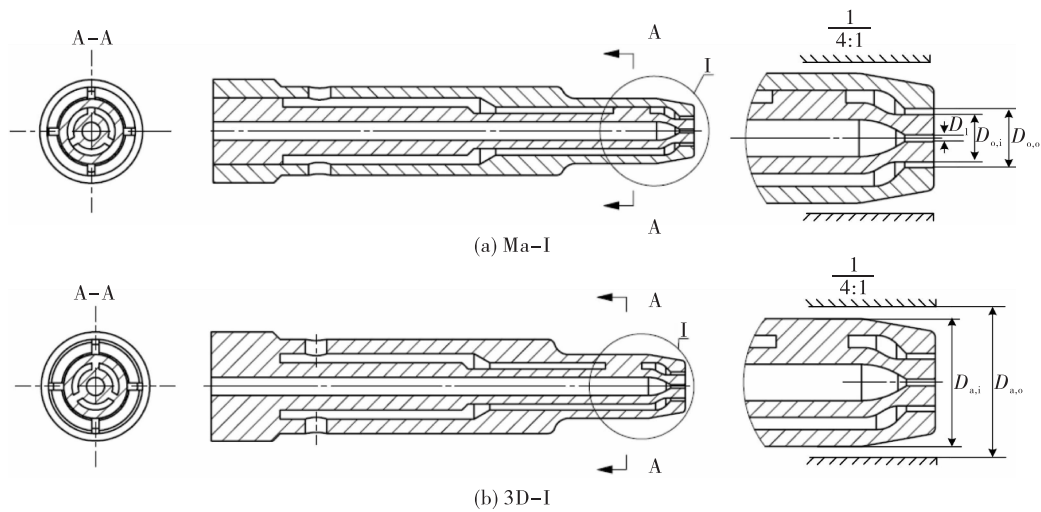


图 1 同轴三组元喷嘴内喷嘴示意图

Fig. 1 Schematic of the coaxial tri-propellant injector

表 1 机械加工与 3D 打印技术对比

Tab. 1 Comparison of 3D printing and machined technique

加工方式	优点	缺点
机械加工	1) 对一般喷嘴,直径方向尺寸可控制在 $\pm 0.01\text{ mm}$ ,加工精度高 2) 表面粗糙度良好,可做到 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 左右,流通通道表面粗糙度精度高	1) 内、外喷嘴需分体加工后再装配,会导致装配后同轴度较差,易出现偏心问题 2) 内、外喷嘴精加工后需用氩弧焊焊接,焊接产生的热变形,会加重喷嘴不同轴 3) 定位面精加工后铣肋条,会引起定位肋条发生偏差,且偏差重复性不能判断 4) 内喷嘴中心孔径小,加工难度大,且内、外喷嘴定位面精确加工耗工耗时,工艺过程复杂,喷嘴组件加工成本高
3D 打印	1) 内、外喷嘴组合打印,一体成型,整体结构性好 2) 环缝尺寸的可重复性较好,同轴度易保证 3) 加工周期短 4) 生产成本低于机械加工	1) 3D 打印用的不锈钢金属粉末粒径约 $50\text{ }\mu\text{m}$ ,金属颗粒熔融后界面累积导致表面不平整,所形成的零件表面粗糙度较差,约为 $13.5\text{ }\mu\text{m}$ 2) 内环缝尺寸可能存在偏差,无法精确测量,且因结构限制内流通通道无法做后处理

表 2 同轴三组元喷嘴主要结构尺寸

Tab. 2 Key geometrical parameters of the coaxial tri-propellant injector

参数	数值/mm
$D_1$	0.47
$D_{0,i}$	3.20
$D_{0,o}$	4.00
$D_{a,i}$	8.80
$D_{a,o}$	10.00

基于背景光成像技术借助高速摄影系统在常温常压环境下开展雾化试验研究,所使用的同轴直流三组元喷嘴冷试试验夹具如图 2 所示。内喷嘴为液体直流式喷嘴,中间喷嘴及外喷嘴为气体环缝直流式喷嘴。喷嘴在实际的燃气发生器中的工作介质是煤油、氧气和空气推进剂组合,为了便于开展雾化试验,采用水和空气作为模拟介质,即内喷嘴的模拟介质为水,中间喷嘴和外喷嘴的模拟介质均为空气。试验过程中采用压力传感器实时记录液体及各路气体的喷前压力。

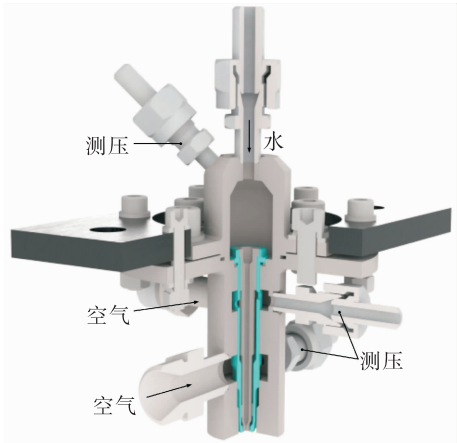


图 2 同轴三组元喷嘴冷试夹具示意图  
Fig. 2 Schematic of the coaxial tri-propellant injector with cold test fixture

1.2 试验系统

喷嘴雾化试验系统如图 3 所示,包括推进剂供应系统、同轴三组元喷嘴、喷雾收集器、高速相机和激光散射液滴粒径测量系统。

常压下的冷态非接触雾化试验以过滤水和干燥空气作为模拟介质,通过挤压式供应系统进行供应。采用压阻式压力传感器测量集液腔和集气腔压力,测量精度 0.5% F. S. ,量程 0 ~ 3 MPa。采用涡轮流量计测量管路体积流量,测量精度 0.5% F. S. 。液体按密度根据体积流量计算质量流量,气体则通过测量压力和温度获得密度进而计算质量流量。

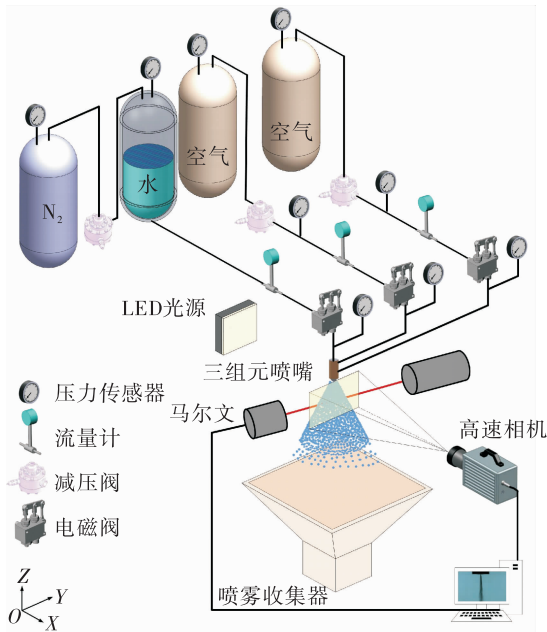


图 3 雾化试验系统示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of atomization test system

1.3 试验工况

同轴三组元喷嘴的煤油、氧气和空气推进剂的设计压降分别为 1.2 MPa, 1.0 MPa 和 0.8 MPa。冷试实验中使用过滤水代替煤油,干燥空气代替氧气。正负调整液体设计喷注压降的 20% 进行实验,保持中间喷嘴及外喷嘴的空气喷注压降不变,具体工况如表 3 所示。

表 3 试验工况

Tab. 3 Experimental conditions and parameters

单位:MPa				测量方法
试验编号	$\Delta p_l$	$\Delta p_o$	$\Delta p_a$	
T-1	0.96	1.0	0.8	高速摄影, 马尔文
T-2	1.20	1.0	0.8	
T-3	1.44	1.0	0.8	

1.4 试验数据测量及处理方法

高速摄像系统由高速摄像机 (Photron Fastcam SA-X2) 和矩形 LED 背景光源 (LUSTER Light Tech, 100 mm × 100 mm, 最大功率 4 W) 组成。试验采用背景光成像技术,采用面光源照亮喷雾,通过高速摄影捕捉喷雾的瞬态图像。为了捕捉喷雾精细的瞬态图像,高速摄影机帧频设定为 10 000 fps,曝光时间为 5  $\mu$ s,拍摄到的瞬态喷雾图像像素为 1 024 × 1 024。

本文基于激光散射技术<sup>[10]</sup>测量液滴粒径尺寸分布,如图 4 所示。为了获得瞬态的液滴粒径,设置 Malvern 测粒仪工作在 Flash 模式,采样频率为 2 000 Hz,测量粒径在 1  $\mu$ m 到 200  $\mu$ m 之间。激光光束位于喷嘴出口正下方 6 cm 位置处。基于 Malvern 测量原理,其测量的是整个激光束沿程所有粒径分布,因此其测量结果具有空间平均效应。对于该同轴三组元喷嘴,其喷雾具有圆周对称性,故测量的结果可表征该轴向位置上液滴粒径的平均结果。



图 4 Malvern 测量系统  
Fig. 4 Malvern measuring system

基于瞬态喷雾图像,喷雾锥角采用类似于 Davi-ault<sup>[11]</sup>和 Cheng<sup>[12]</sup>的方法获取。图像处理方法如图5所示。首先,减去瞬态喷雾图像的背景;其次,对图像进行裁剪,从喷嘴出口直至喷嘴出口下方1.5倍外喷嘴出口直径处;之后将选定的去向区域转换为灰度图并进一步基于 Otsu 方法<sup>[13]</sup>转换为二值图。第四步,提取喷雾的左右边界。最后,对左右边界进行线性拟合,瞬态的喷雾锥角可以通过拟合直线的斜率进行计算,即

$$2\theta = \pi - \arctan(k_r) + \arctan(k_l) \quad (1)$$

式中: $k_l$ 和 $k_r$ 分别为左右两侧拟合直线的斜率; $\theta$ 为喷雾半锥角。

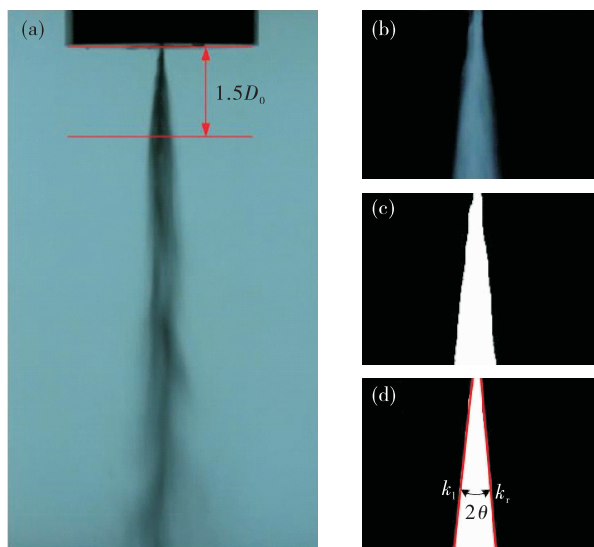


图5 喷雾锥角获取方法

Fig. 5 Image processing method for obtaining the spray angle

## 2 结果和讨论

### 2.1 加工同轴度

机械加工方式由于内、外喷嘴需分体加工后再装配且精加工后需用氩弧焊焊接会导致装配后喷嘴同轴度较差。首先,使用数码相机分别拍摄获得各个喷嘴出口处的图像(保证拍摄时焦距不变且均对准喷嘴中心位置)。其次,依次将图片导入 MATLAB 中,分别提取内喷嘴直径以及环缝外圆圆心与内圆圆心位置。两圆心距离除以内喷嘴直径,则可获得该喷嘴的无量纲同轴度 $\lambda$ 。由于 Ma-I 与 3D-I 的液体喷嘴均采用高精度小孔机加工,公差范围 0~0.02,精度较高,因此计算中忽略内喷嘴圆心与中间喷嘴内圆圆心距离。3D-I 和 Ma-I 的无量纲同轴度如图6所示。喷嘴出口实物图对比如图7所示。

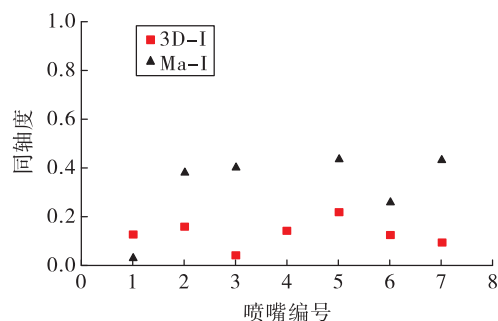


图6 Ma-I 和 3D-I 的同轴度对比

Fig. 6 Coaxiality comparison of Ma-I and 3D-I

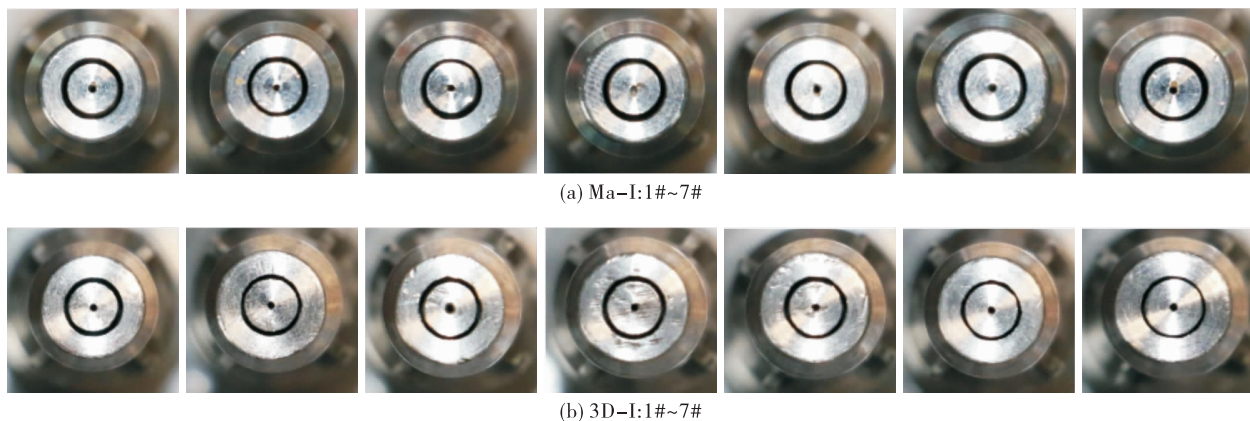


图7 喷嘴出口实物图

Fig. 7 Injectors outlet



对比发现,85.7%的3D-I喷嘴的无量纲同轴度小于0.2,仅5#喷嘴无量纲同轴度相对较差,为0.22。71.4%的Ma-I喷嘴的无量纲同轴度超过0.2,2#、3#、5#、7#喷嘴的无量纲同轴度为0.4左右。因此,3D打印技术可较好地保证喷嘴同轴度,使用该技术加工的喷嘴重复性较好。

2.2 流量系数

表示介质在特定工况下流经特定通道的能力的流量系数,可以作为介质在流通过程中流动损失的评价指标,其求解方法如下

$$C_d = \frac{\dot{m}_{exp}}{\dot{m}_{th}} \tag{2}$$

式中: $\dot{m}_{exp}$ 为流过喷嘴或通道的实际介质流量; $\dot{m}_{th}$ 为根据一维等熵流动理论分析得到的理想流量。

基于流体力学及气体动力学理论,液体和气体的流量系数为

$$C_{d1} = \frac{\dot{m}_1}{A_1 \sqrt{2\rho_1 \Delta p_1}} \tag{3}$$

$$C_{dg} = \begin{cases} \frac{\dot{m}_g}{A_g p_g^* \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_g} \left( \left( \frac{p_e}{p_g^*} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_e}{p_g^*} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)}} \\ \sigma_{cr} < \frac{p_e}{p_g^*} \leq 1 \\ \frac{\dot{m}_g}{A_g p_g^* \sqrt{\frac{k}{RT_g} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}} \\ \frac{p_e}{p_g^*} \leq \sigma_{cr} \\ \sigma_{cr} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \tag{4}$$

式中: $A_1$ 和 $A_g$ 分别为内喷嘴和气体环缝的节流面积; $\rho_1$ 和 $\rho_g$ 分别为液体和气体的密度; $\dot{m}_1$ 和 $\dot{m}_g$ 代表液

体和气体流量; $\Delta p_1$ 为液体的喷注压降; $p_e$ 为气体喷嘴出口压力; $p_g^*$ 为气体总压,取喷前压力; $T_g$ 为气体总温; $k$ 为比热比; $R$ 为气体常数。

Ma-I与3D-I不同流道内流量系数的变化关系如图8所示,两种喷嘴测得的流量系数平均值及标准差如表4所示。

本试验各参数具体数值如表5所示,喷前压力则由试验所得。

表4 Ma-I与3D-I试验所得流量系数对比

Tab.4 Comparison of the tested discharge coefficient for Ma-I and 3D-I

流道	设计值	Ma-I		3D-I	
		平均值	标准差	平均值	标准差
内喷嘴	0.72	0.69	0.018 5	0.75	0.029 3
中间环缝	0.70	0.77	0.015 5	0.68	0.060 8
外环缝	0.80	0.87	0.004 7	0.88	0.005 9

对比发现,两种喷嘴各流道测量的流量系数与设计值均有一定差别,但相差不大。机械加工喷嘴各通道流量系数标准差均在0.02以下,相同工况下流量系数基本一致,而3D打印所得喷嘴的内喷嘴及中间环缝的流量系数标准差较大,分别为0.029 3和0.060 8,不同喷嘴在同一工况下流量系数波动较大。因为使用机械加工方式加工喷嘴,其表面粗糙度良好,且流通通道表面粗糙度精度高,而3D打印技术是用熔融后的金属颗粒堆积成型,所形成的零件表面粗糙度较高且均一性较差,致使不同喷嘴流量系数存在一定偏差,且喷嘴流量系数比设计值低3%左右。使用3D打印技术加工出的喷嘴外表面会经过打磨处理,使得外表面与机械加工喷嘴外表面粗糙度一致,因此3D-I外环缝流量系数与Ma-I的相当。

表5 输入参数

Tab.5 Input parameters

参数	$A_1/\text{m}^2$	$A_{gm}/\text{m}^2$	$A_{ge}/\text{m}^2$	$\rho_l/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho_g/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$p_e/\text{Pa}$	$T_g/\text{K}$	$k$	$R$
数值	$1.7 \times 10^{-5}$	$4.52 \times 10^{-4}$	$1.77 \times 10^{-3}$	1 000	1.225	101 325	300	1.4	289

注: $A_{gm}$ 和 $A_{ge}$ 分别为中间环缝和外环缝节流面积。

对于气液同轴式喷嘴,喷嘴内部各个部分流体的非定常流动特性对外部液膜表面波的发展、雾化

混合效果以及燃烧性能都具有重要的影响。因此,对于冷态雾化实验,喷雾特性也是所要关心的重点。

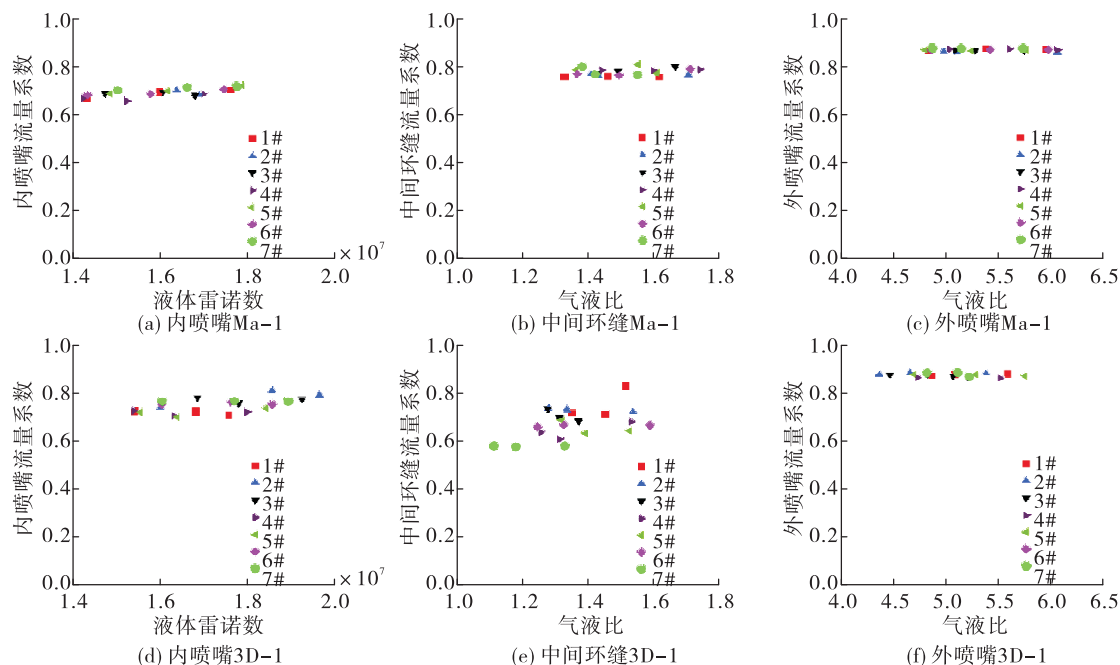


图8 Ma-I与3D-I流量系数随气液比的变化关系

Fig. 8 Discharge coefficient with respect to GLR for Ma-I and 3D-I

### 2.3 喷雾型态

Ma-I与3D-I同一工况下的瞬态喷雾如图9所示。对于气液同轴直流式三组元喷嘴,液体射流在周围高速气流的作用下发生破碎雾化,正常的喷雾呈对称的实心锥形,如3D-I的1#,2#及4#所示。对比发现,除正常的对称锥形喷雾外,还存在喷雾偏斜及分散现象,如3D-I的3#,5#及Ma-I的3#,5#及7#。喷雾锥之所以发生偏斜,是由于加工过程中中间环缝存在0.1 mm之大的偏心距离,使得中间环

缝气体从喷嘴喷出时气体分布明显不均,从而使得内喷嘴液体在雾化过程中受到不均匀的气体作用力所致。而当偏心距过大时,环缝较小侧的高度气流与液柱发生较强的相互作用,从而使得大量液滴剥离,进而使得喷雾较分散,喷雾锥角增大。相对来讲,3D打印喷嘴由于可较好地保证喷嘴同轴度,故喷雾形态呈较对称的锥形,进而有利于燃烧过程中释热区的分布平衡、提高燃烧效率甚至保证燃烧稳定性。

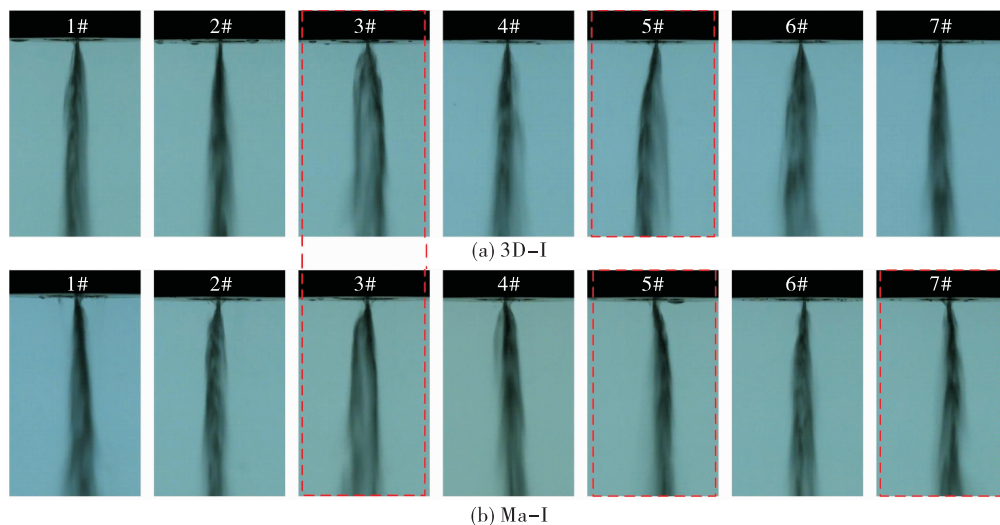
图9 Ma-I与3D-I的瞬态喷雾形态( $\Delta p_1 = 1.2 \text{ MPa}$ ,  $\Delta p_0 = 1 \text{ MPa}$ ,  $\Delta p_a = 0.8 \text{ MPa}$ )

Fig. 9 Instantaneous spray patterns of Ma-I and 3D-I

基于 Matlab 程序对高速摄影获得瞬态喷雾图像进行处理,所得的 Ma-I 与 3D-I 的喷雾锥角随液体雷诺数的变化关系如图 10 所示。Ma-I 的 3#喷嘴以及 3D-I 的 3#和 6#喷嘴喷雾锥角大于  $28^\circ$ ,而其他喷嘴喷雾锥角在  $13^\circ \sim 25^\circ$  之间。喷雾锥角偏大是由于喷嘴同轴度较低使得喷雾分散所致。对比发现,3D-I 的 7 个喷嘴喷雾锥角重合度较低,可能是因为使用 3D 打印技术在喷嘴加工过程中,喷嘴是由金属颗粒堆积成型,使得喷嘴出口表面粗糙度较高且均一性较差,进而对喷嘴喷出的环缝气流的流动速度及方向的细微影响传递至喷雾。

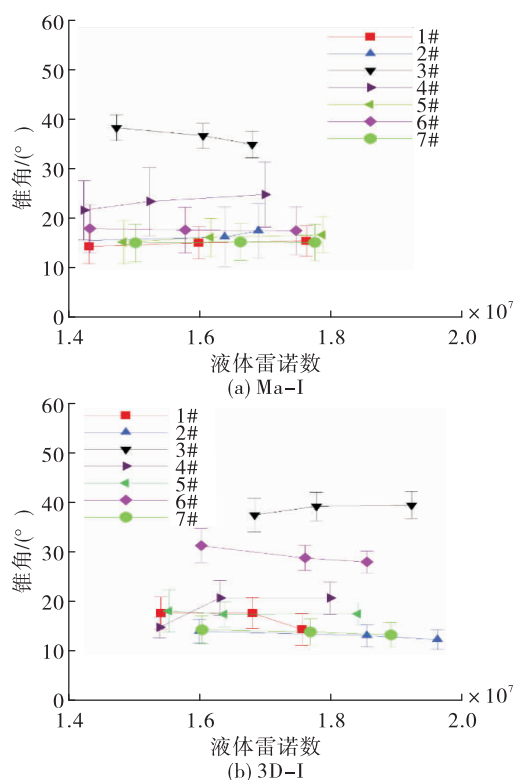


图 10 Ma-I 与 3D-I 的喷雾锥角随液体雷诺数的变化关系

Fig. 10 Spray angle with the liquid Reynolds number for Ma-I and 3D-I

## 2.4 雾化粒径

液滴的索泰尔平均直径 SMD 可以用来反映雾化性能的好坏<sup>[14]</sup>,Ma-I 与 3D-I 的 SMD 随液体雷诺数的变化关系如图 11 所示。Ma-I 和 3D-I 的 7 个喷嘴的 SMD 变化范围分别为  $46 \sim 88 \mu\text{m}$  以及  $50 \sim 70 \mu\text{m}$ 。Ma-I 不同喷嘴的雾化粒径分布相对分散是因为本研究测量的粒径是喷嘴出口正下方 6 cm 位置处整

个激光平面上的平均粒径,而 Ma-I 喷嘴由于加工同轴度较差,多个喷嘴喷雾发生偏斜,使得测量位置偏离了喷雾中心。对于气液同轴直流式喷嘴,典型的 SMD 呈由中心向两侧逐渐减小的“实心锥”形分布<sup>[15]</sup>。因为分布在喷雾中心的液滴是由射流一次破碎、二次雾化形成的,液滴粒径较大。而在喷雾外侧的液滴则主要归因于气液的相互作用,由于气液相互作用非常剧烈,因此喷雾两侧的液滴尺寸小于喷雾中心液滴。进而不同喷嘴所获得的 SMD 会不尽相同,发生喷雾偏斜的喷嘴测得的雾化粒径相对偏低。

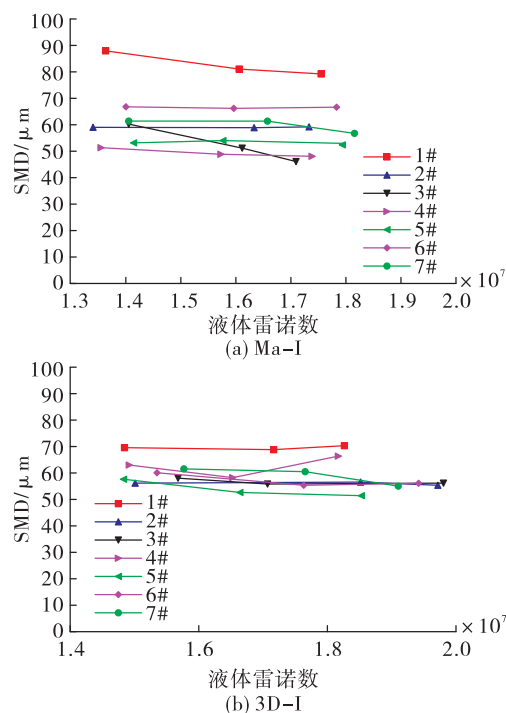


图 11 Ma-I 与 3D-I 的 SMD 随液体雷诺数的变化关系

Fig. 11 SMD with respect to the liquid Reynolds number for Ma-I and 3D-I

## 3 结论

本文分别采用高速摄影和马尔文对使用机械加工和 3D 打印技术获得的同轴三组元喷嘴的雾化特性进行了试验研究,对比分析了流量系数、喷雾型态、雾化锥角及 SMD 的变化关系,结论如下:

1) 3D 打印技术可较好地保证喷嘴同轴度,且重复性较好,机械加工喷嘴同轴度较差。

2) 机械加工技术由于喷嘴同轴度相对较差,进



而更容易引起喷雾发生偏斜、分散等喷雾空间分布不均问题。

3) 3D打印技术是用熔融后的金属颗粒堆积成型,所形成的零件表面粗糙度较大,使得喷嘴流量系数比设计值低3%左右。

4) 使用机械加工技术和3D打印技术加工喷嘴,在喷嘴同轴度较好的前提下,加工方式对雾化锥角及雾化粒径影响较小。

#### 参考文献:

- [1] 曹明元. 3D打印技术概论[M]. 北京:机械工业出版社, 2016.
- [2] 杨继全, 冯春梅. 3D打印:面向未来的制造技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2014.
- [3] 郎代兵. 3D打印:从技术到商业实现[M]. 北京:化学工业出版社, 2017.
- [4] 张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程, 2016, 44(2):122-128.
- [5] 谭立忠, 方芳. 3D打印技术及其在航空航天领域的应用[J]. 战术导弹技术, 2016(4):1-7.
- [6] 吕鉴涛. 3D打印原理、技术与应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2017.
- [7] 康忠涛. 气液同轴离心式喷嘴非定常雾化机理和燃烧特性研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2016.
- [8] 沈赤兵, 李清廉, 罗世彬, 等. 三组元火箭发动机推力室试验研究[J]. 火箭推进, 2006, 32(5):1-6.
- [9] SHEN C B, LI Q L, LUO S B, et al. Experimental research on the thrust chamber of tripropellant rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2006, 32(5):1-6.
- [9] 段增斌. 三组元喷嘴冷流试验研究[J]. 火箭推进, 2003, 29(4):18-23.
- [9] DUAN Z B. Experimental investigation of tripropellant injector[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2003, 29(4):18-23.
- [10] SIMMONS M J H, HANRATTY T J. Droplet size measurements in horizontal annular gas-liquid flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27(5):861-883.
- [11] DAVIAULT S G, RAMADAN O B, MATIDA E A, et al. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer[J]. Fuel, 2012, 98:183-193.
- [12] CHENG P, LI Q L, XU S, et al. On the prediction of spray angle of liquid-liquid pintle injectors[J]. Acta Astronautica, 2017, 138:145-151.
- [13] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1):62-66.
- [14] 王振国. 液体火箭发动机燃烧过程建模与数值仿真[M]. 北京:国防工业出版社, 2012.
- [15] HARDALUPAS Y, WHITELAW J H. Characteristics of sprays produced by coaxial airblast atomizers[J]. Journal of Propulsion and Power, 1994, 10(4):453-460.