

不同形状喷嘴的旋流冲击射流 压力损失和传热特性实验

徐 亮, 任德祖, 马永浩, 兰 进, 高建民

(西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 提出了一种旋流喷嘴,即圆孔内径设有四条螺旋槽道的类螺纹孔喷嘴。实验对比研究了同一螺旋角下三类旋流喷嘴(插件、内置扭转带、导叶片)与螺纹孔喷嘴在雷诺数为 6 000、12 000 下靶面传热特性。分析了各喷嘴对应的气源室压力与流量系数。实验结果表明,螺纹孔喷嘴在靶面的中心区保持了高的传热效率,驻点努塞尔数比其他三种喷嘴高出 29.7%~43.3%,当射流空间受限时(半封闭空间)所有喷嘴的努塞尔数下降了 40%~60%,内置插件喷嘴下降幅度最大;另外,四种旋流喷嘴中,内置插件喷嘴的气源腔室压力最大,比最小的螺纹孔喷嘴高出一个数量级还多,压力损失系数的分析表明螺纹孔喷嘴的压力损失系数最小,仅是内置插件喷嘴的 1/4 左右,且雷诺数增大一倍,内置插件喷嘴的压力损失系数平均下降 14%,下降幅度最大。

关 键 词: 旋流冲击射流; 旋流实验装置; 旋流结构; 螺纹孔喷嘴; 换热; 压力损失系数

中图分类号: TK124

文献标志码: A

Pressure loss and heat transfer characteristics experiment of swirling impinging jet with different shape nozzles

XU Liang, REN Dezu, MA Yonghao, LAN Jin, GAO Jianmin

(State Key Laboratory of Mechanical Manufacturing Systems Engineering,
Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A type of swirl nozzle, i. e., a threaded hole nozzle with four spiral grooves on the diameter of the hole was proposed. The heat transfer characteristics of the three kinds of swirl nozzles (insert, built-in torsion belt and guide vane) with the helical hole nozzle at the same helix angle when the Reynolds numbers were 6 000, 12 000 were investigated. The pressure and flow coefficient of the air supply chamber corresponding to each nozzle were analyzed. The experimental results showed that the spiral hole nozzle had a high heat transfer efficiency in the central area of the target surface, and the stagnation Nusselt number was 29.7%—43.3% higher than the other three nozzles. When the jet space was limited (semi-enclosed space), the Nusselt number of dropped down by 40% to 60%, and the built-in plug nozzles had the largest drop. In addition, the four kinds of swirl nozzles had the largest air supply chamber pressure of the built-in plug nozzle, one order of magnitude higher than the smallest screw hole nozzle. The analysis of the pressure loss coefficient showed that the pressure loss coefficient of the nozzle hole was the smallest, only about 1/4 of the built-in

收稿日期:2017-07-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1106405); 陕西省自然科学基金(2015JQ5126);
中央高校基本科研业务专项基金(xjj2018044)

作者简介:徐亮(1980—),男,副教授,博士,主要从事叶轮机械气动热力学研究。

引用格式:徐亮,任德祖,马永浩,等.不同形状喷嘴的旋流冲击射流压力损失和传热特性实验[J].航空动力学报,2018,33(11):2678-2686. XU Liang, REN Dezu, MA Yonghao, et al. Pressure loss and heat transfer characteristics experiment of swirling impinging jet with different shape nozzles[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(11): 2678-2686.

plug nozzle, the Reynolds number was doubled, and the pressure loss coefficient of the built-in plug nozzle dropped by 14% on average.

Key words: swirling impinging jet; swirl jet experimental device; swirl structure; screw hole nozzle; heat transfer; pressure loss coefficient

随着科技的进步,具有较高表面传热系数及良好换热均匀性的高品质冷却技术愈发引起关注。在高端复杂设备的冷却系统中,由于换热区域的均匀性有利于减小热设备残余应力和形变,因此传统冲击冷却在保持冲击中心区高效换热

的同时,如何增强其换热的均匀性已成为新的研究焦点。旋流冲击冷却是实现传热系数高且局部换热均匀的最有前途的一种冷却方式。旋流具有的切向速度加速了射流的扩散及其对周围气流的夹带。此外,旋流的加入还增强了射流湍流强度。因此,靶面换热均匀性得到了提升。当前,旋流冲击射流流动现象的复杂性及其广泛的应用领域成

为传热工作者所关注的热点问题之一^[1-5]。目前在旋流冲击射流换热特性研究方面,旋流产生装置主要是在喷嘴内部插入螺旋杆、导叶轮、扭转带三大类,如图 1 所示。Huang 等^[6]研究了一个内置螺旋杆的圆管旋流冲击射流,实验测量了 4 个不同螺旋角度($\theta=0^{\circ},15^{\circ},30^{\circ},45^{\circ}$)下的流动及换热情况。与传统单个圆孔射流和无旋多槽道冲击射流相比,旋转射流在 $r/d=2$ 附近产生了努塞尔数(Nu)的马鞍形分布,可以大大增强靶面的表面传热系数,且换热的径向均匀性得到改善。Bakirci 等^[7]研究了与 Huang 研究的等尺度圆管,试验了四个不同螺旋角度($\theta=0^{\circ},22.5^{\circ},$

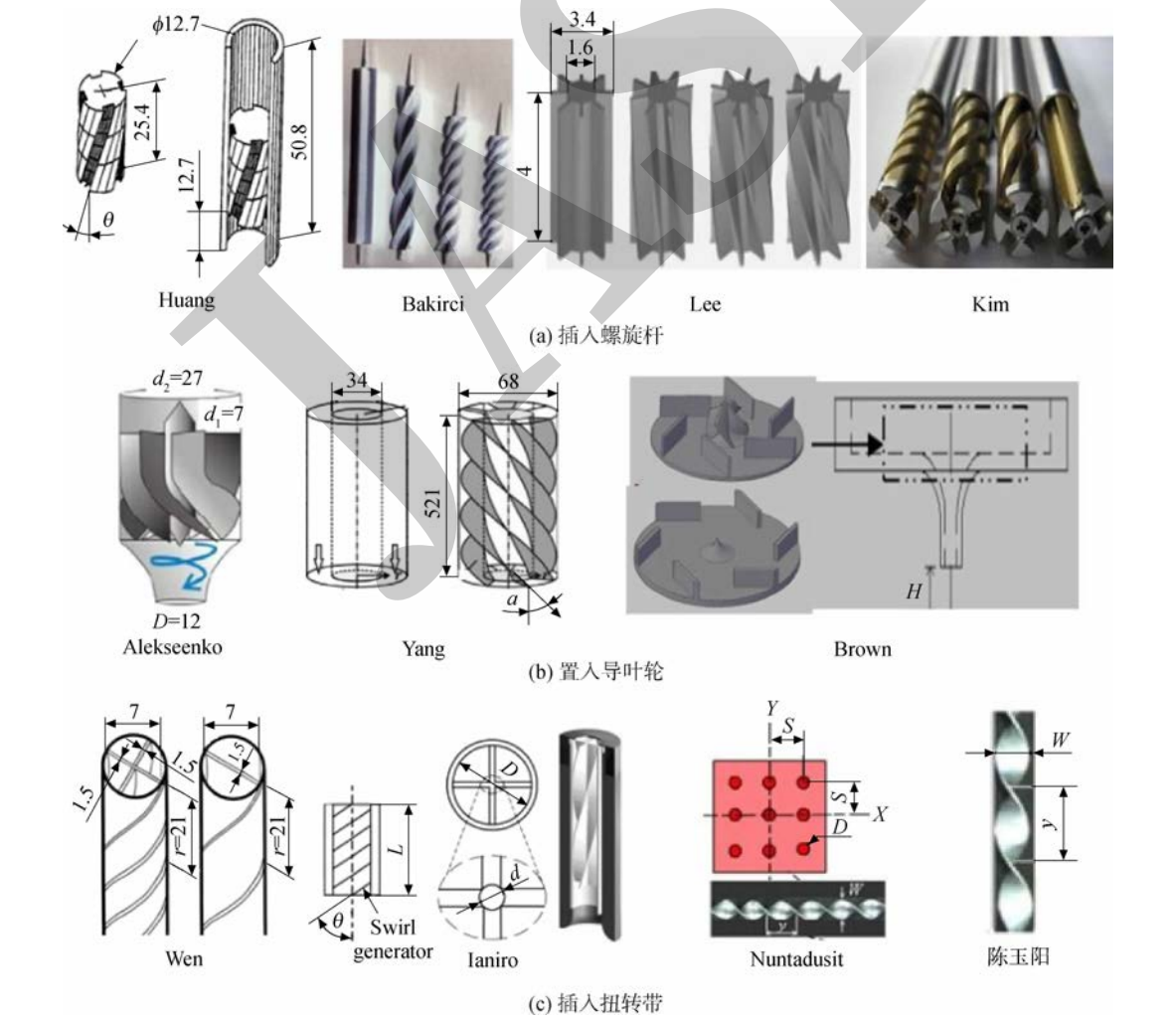


图 1 旋转射流的喷嘴结构形式
Fig. 1 Nozzle structure of the swirling jet

41°,50°)。得出径向均匀性传热最佳的结构螺旋角为 50°,喷管距靶面高度 $H/D=14$ 。Lee 等^[8]研究旋转射流内置螺旋杆外壁有 8 个螺旋翅片,与内壁形成 8 个螺旋流,指出最大表面传热系数的位置也随旋数的增大向外移动,靶面的温度分布更加均匀。Kim 等^[9]在一个直径为 5 mm 的圆管内插入一个类似 Huang 的螺旋杆,4 条螺旋凹槽横截面成梯形,研究了四个不同螺旋角度($\theta=0^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$)下的流动及换热情况。认为在 $\theta=30^\circ$ 下,当螺旋杆长度 $L_c=6D$ 时,冲击靶面表面换热均匀性最好。在置入导叶轮方面,Alekseenko 等^[10]通过三维粒子示踪图像测速(3D-PIV)方法和二维 PIV 技术研究了不同旋转数下旋转射流的流动情况,发现旋转射流垂直射流速度比普通射流具有更大的扩散率和更快的耗散率。Brown 等^[11]用热膜成像技术比较研究了两种不同导叶产生的旋转射流流动及传热特性,并研究了旋转射流靶面热流量的脉动效应。在置入扭转带方面,Wen 等^[12]实验研究了普通光管、一条扭转带、两条十字交叉扭转带的圆管旋转冲击喷射,指出置入两条扭转带的旋转射流滞止区的最大努塞尔数比普通圆管射流高 4%~5%,同时平均努塞尔数要高 14%左右。Ianiro 等^[13]研究了一个内有十字交叉扭转带的圆管旋转冲击射流。在整个实验中,只有在 $y/W=6$ 下,旋转冲击射流的平均 Nu 才高于圆孔射流下的 Nu 。Nuntadusit 等^[14-15]研究了插入扭转带的单个圆管旋转喷射和圆管群的阵列旋转喷射。对于单个圆管旋转喷射,旋转数为 0.4,扭转带宽度与节距之比 $y/W=3.4$ 的换热性能最佳。对于圆孔群的阵列旋转喷射,靶面上的换热均匀化程度很高,同时比普通光滑圆孔群阵列射流的表面传热系数高。陈玉阳等^[16]研究了单根圆管内插入一个扭转带的旋转射流。圆管内径为 3 mm,扭转条与圆管等径,节距为 15 mm,结果表明低雷诺数下径向换热均匀化效果明显。本课题组徐亮等^[17]提出了一种类螺纹孔喷嘴结构,并在此前已经对该结构进行了数值模拟及实验研究。

从上述的文献可知,就喷嘴的形状来说,产生的旋流方式很多,这样也导致靶面传热特性的巨大差异。由于研究的应用背景差异,采用的喷嘴管径及运行工况也相差很大,从而使得应用旋流冲击射流的已有成果变得相对困难。同时,在实际应用时,压力损失是一个非常重要的评价性能指标,压力损失越大意味着泵功损失越大,但上述

文献均没有报道冲击射流运行工况下的压力损失情况。针对内部插入螺旋杆、导叶轮、扭转带等不同结构形状的喷嘴,并结合本文提出的一种垂直轴向射流与旋流的复杂叠加性旋流冲击射流新型喷嘴,即类螺纹孔结构的喷嘴,采用 3D 打印技术,制作了相应的不同旋流结构的实验件。为了开展研究,设计搭建了冲击射流的流动及传热特性的实验测试系统,并结合现有文献中单个圆孔射流冲击冷却数据,验证了本实验系统测试数据的可靠性。利用该实验系统,研究了多种不同形状喷嘴下旋流冲击射流的压力损失和传热特性。

1 实验系统及数据处理方法

1.1 设计搭建的实验系统

设计搭建的旋流冲击射流冲击冷却传热实验系统如图 2 所示。主要有气源压缩机、储气罐、干燥除湿系统、稳流段、集气室、实验支撑台架、射流喷嘴、金属靶面的短路加热器、测量仪器系统、隔热保温系统和数据采集系统等组成。该装置通过变换不同几何结构的喷嘴和调整靶面高度及放置方式,可以进行不同角度、冲击距离下的无旋/旋流冲击射流的单孔/孔群阵列传热特性测量实验。考虑到实际应用场合,冷却部位一般为具有一定厚度的金属。本研究的靶面,选择了厚度为 1 mm 的 320 mm×320 mm 正方形不锈钢板,靶面采用短路加热器(电压 U 为 0~10 V,电流 I 为 0~4000 A)加热。本实验所加载的功率为 140~280 W,对应的不锈钢靶面具有的恒定热流密度为 2000~4000 W/m²。为了尽量减小靶面的热量损失,靶面底部设有 10 mm 厚的碳纤维硬塑板,并放入垫有石棉的木箱中。实验工质为环境空气,通过流量计来测定射流气流流量,并在带有栅格整流的集气室四周设有引压孔和热电偶,分别测试集气室内的气流压力和温度。靶面的温度,由焊接在不锈钢底部的密集热电偶群来测量。热电偶测点群共有 41 个温度测点,布置为“十字”型(如图 3(a)所示),中心滞止点布置有一根热电偶,周围四个坐标方向上分别布置有 10 根测量热电偶,间距为 5 mm,由此热电偶在冲击靶面上构成了一个直径为 100 mm 的靶面温度测量区。为了防止焊接的热电偶脱落,采用了四排夹紧片,将每个方向上的热电偶并排夹紧(如图 3(b)所示),并用耐高温胶将焊接点根部进行加固,避免热电偶在测量过程的脱落和松动。每次测试前,通过万用表测试热电偶连接间的阻值,检测出脱落的热电偶。

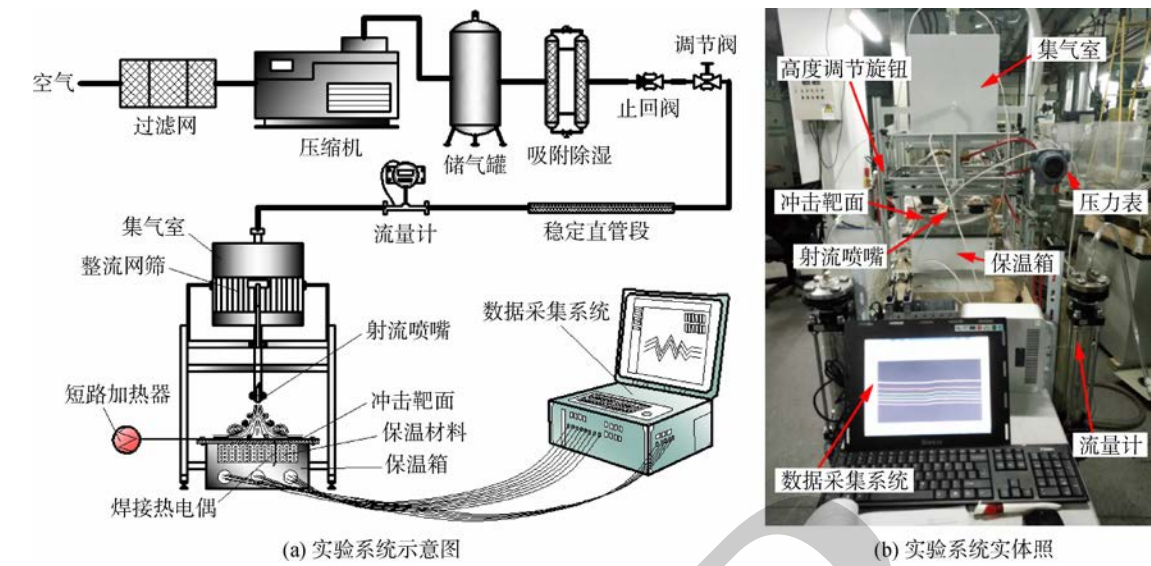


图 2 冲击射流流动及传热测试系统

Fig. 2 Impinging jet flow and heat transfer test system

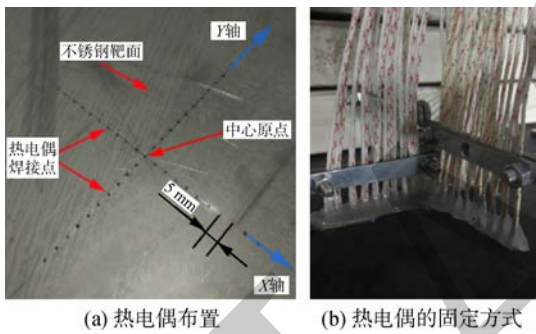


图 3 靶面测温热电偶

Fig. 3 Target temperature thermocouple

1.2 旋流喷嘴模型与制作

射流喷嘴实验件采用自组装 3D 打印机制作,材料为 PLA 树脂,打印精度 $\pm 0.2\text{ mm}$,最大表面粗糙度 $R_a=200\text{ }\mu\text{m}$,为了分析三种不同旋流结构喷嘴(内置插件、内置扭转带、内置导叶片)与本文设计的类螺纹孔喷嘴的换热特点,针对三种不同结构的旋流喷嘴的特点,在统一几何尺度下进行了建模,如图 4 所示。螺纹孔喷嘴取外圆管内径 $D=9\text{ mm}$,内孔直径 $d=5\text{ mm}$ 喷嘴高度 $L=30\text{ mm}$,其他类型喷嘴几何参数如下, $\delta_1=2.5\text{ mm}$, $\delta_2=1\text{ mm}$, $\delta_3=0.5\text{ mm}$, $d'_1=5\text{ mm}$, $d'_2=0.7\text{ mm}$, $d'_3=4.5\text{ mm}$,统一螺旋角 $\theta=30^\circ$,通过 3D 打印完成实验件制作,实物样件如图 5 所示。

为了与传统单一圆孔冲击射流的靶面传热性进行比较,还加工了一个直径为 7 mm 的普通光滑圆孔(简称为 CIJ),由此本研究具有 5 种不同结构的射流喷嘴。这些测试喷嘴都是垂直安装

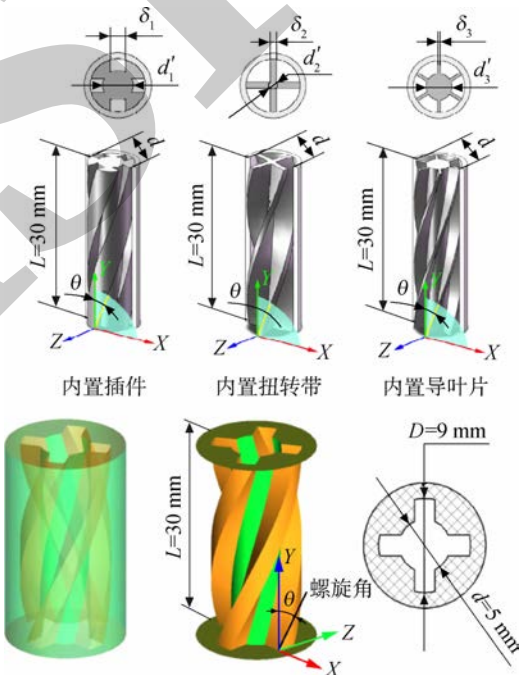


图 4 旋流喷嘴模型

Fig. 4 Swirl nozzle geometric model

在射流空间上部,因此射流方向为单纯的垂直入射。此外,考虑到在叶片冲击冷却的实际应用中,叶片内部冲击冷却大都是封闭式空间,为了接近这种封闭式条件,本节对射流空间进行了干预,即在射流喷嘴下沿平齐的位置设置了一个长宽为 $250\text{ mm}\times 250\text{ mm}$,厚度为 8 mm 的限制性挡板,上档板的材料为透明的亚克力有机玻璃,挡板中间有夹紧圈,通过紧固螺栓套在射流喷嘴的卡具上,可以上下调整,保证喷嘴下端与挡板下底面平齐,



图 5 3D 打印的旋流喷嘴实物
Fig. 5 Swirl nozzle by 3D print

这样设置的目的是,为了限制冲击射流从顶部卷吸周围环境气流,另外一方面是将气流的出流口限制在上挡板与靶面之间的侧面方向。

1.3 数据处理方式

实验雷诺数 Re 定义为

$$Re = d_j v \rho / \mu = 4 Q \rho / \pi d_j \mu \tag{1}$$

式中 Q 为体积流量(m^3/s); d_j 为当量直径(m); ρ 为进口空气密度(kg/m^3 ,参考温度取喷嘴出口气流温度 T_j); μ 为进口空气的动力黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$,参考温度取喷嘴出口气流温度 T_j)。

则 Re 不确定度绝对值为

$$\omega_{Re} = \left[\left(\frac{\partial Re}{\partial Q} \omega_Q \right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial \rho} \omega_\rho \right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial d_j} \omega_{d_j} \right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial \mu} \omega_\mu \right)^2 \right]^{1/2} \tag{2}$$

冲击靶面总的输入功率为 P_0 (UI),整个靶面的热损失主要包含两部分:靶面向周围环境的辐射传热 P_{rad} ,靶面隔热层的热传导损失 P_{cv} 。则靶面的热通量为

$$q = (P_0 - P_{\text{rad}} - P_{\text{cv}}) / A_{\text{tar}} \tag{3}$$

经评估,本实验研究工况下测试系统的辐射和热传导的损失热量不超过加载热量的 5%。

靶面的对流传热系数为

$$h = q / (T_w - T_{\text{ad}}) \tag{4}$$

表征靶面换热能力的靶面换热 Nu 为

$$Nu = h d_j / \kappa \tag{5}$$

上述式中 d_j 为当量直径,计算为 7 mm; h 为靶面的传热系数。因为本实验件采用的内部槽道为对称分布,计算的靶面温度 T_w 为距离滞止点同一径向位置的靶面热电偶测试温度的平均值。 A_{tar} 为靶面面积。 T_{ad} 为绝热状态下靶面温度,本研究取为射流集气室温度; κ 为空气导热系数。

则 Nu 的标准不确定度为

$$\omega_{Nu} = \left[\left(\frac{\partial Nu}{\partial q_{\text{tar}}} \omega_{\text{tar}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial d_j} \omega_{d_j} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial \kappa} \omega_\kappa \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial \Delta T} \omega_{\Delta T} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{6}$$

式中 $\Delta T = T_w - T_{\text{ad}}$ 。
表 1 为本研究采用的测量仪器及其精度。

表 1 各测量工具/仪器精度
Table 1 Accuracy of each measuring instrument/tool

实验测量项	测量工具/仪器	精度
温度	E 型热电偶	1%
流量	流量计	2.5%
几何参数	电子卡尺	0.01 mm
加热电压	交流电压表	0.2%
加热电流	短路加热器	0.2%

基于表 1 的数据,根据实验测试数据不确定计算方法,本研究中 Re 和 Nu 的不确定度最大分别为 2.56% 和 2.1%。

针对单一圆孔射流,图 6 给出了相同工况下本研究的实验结果与公开文献的实验结果。经过比较可以看出,就选取的实验工况,本研究的圆孔冲击射流的靶面表面传热系数与公开文献[9,14-15]的测试数据基本吻合,这表明本测试系统的测量数据具有较高的可靠性。

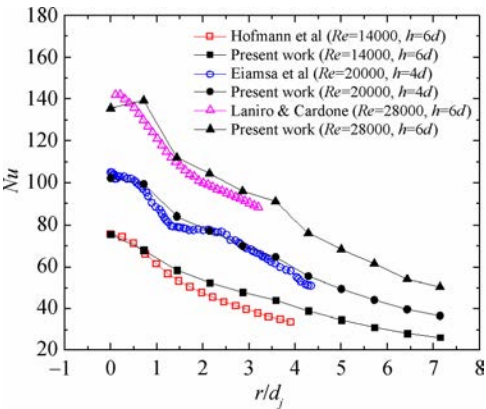


图 6 本文实验结果与公开文献实验结果比较
Fig. 6 Experimental results of this paper are compared with those of the published literature

2 实验测试结果及其分析

2.1 不同旋流结构的传热特性

从图 7 可以看出,自由空间下,在 $Re = 6\,000$ 时,螺纹孔喷嘴在中心区域($r/d_j < 1$)范围内冷却

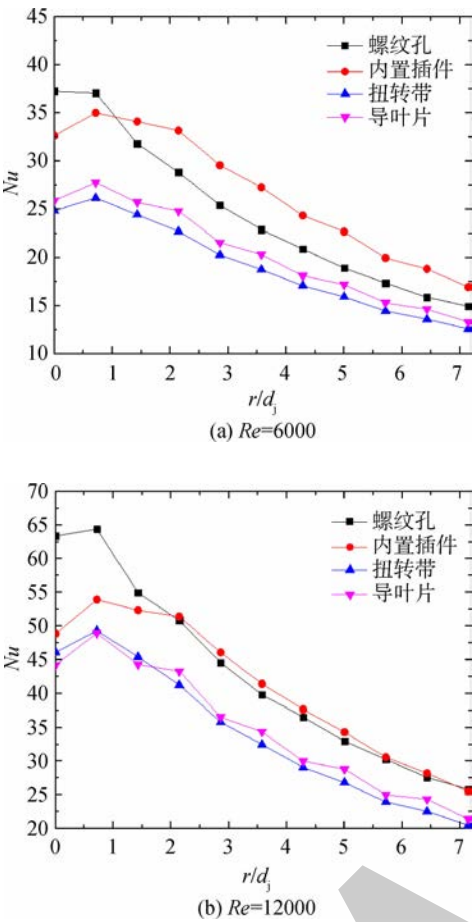


图 7 自由射流空间下靶面 $Nu(\theta=30^\circ, h=3d_j)$
Fig. 7 Nusselt number of target under free jet space
($\theta=30^\circ, h=3d_j$)

效果最好,内置插件的旋转射流喷嘴除了在中心区域($r/d_j<1$)范围内低于螺纹孔喷嘴,整体表面传热系数均高于其他旋流喷嘴,当 Re 增大一倍时,螺纹孔喷嘴扩大了中心区域的高传热特性,在 $Re=6000$ 时,螺纹孔的驻点 Nu 比其他喷嘴高出 14.2%~50.1%,在 $Re=12000$ 时,螺纹孔的驻点 Nu 比其他喷嘴高出 29.7%~43.3%,两种 Re 下,扭转带喷嘴的传热效果最差,导叶片喷嘴次之,从冷却的均匀性来看,螺纹孔喷嘴相比其他结构旋流喷嘴由于保持了中心区域的高传热效率,因而冷却均匀性变差,而内置插件喷嘴则保持较高的传热效率和较好的换热均匀性。

图 8 是在半封闭射流空间条件下,不同结构的旋转射流的靶面 Nu 分布,从图中可以看出,相对于完全自由射流,在半封闭的受限空间下,所有喷嘴的射流传热效率均大幅降低,另外,在半封闭射流空间中,螺纹孔喷嘴整体上表现出较高的传热效率,靶面的高效换热区扩大,在 $Re=6000$ 时,螺纹孔喷嘴的驻点 Nu 比其他喷嘴高出

38.3%~61%,在 $Re=12000$ 时,螺纹孔喷嘴的驻点 Nu 比其他喷嘴高出 23.9%~61.3%,这种高传热率在较低 Re 时尤为明显,且范围进一步扩大,在三倍当量直径内,螺纹孔喷嘴均保持较高的传热效率。

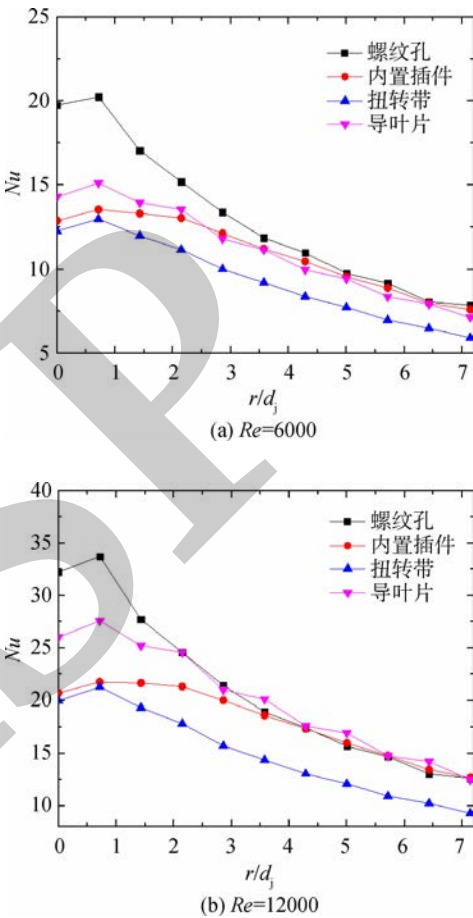


图 8 半封闭空间下靶面 $Nu(\theta=30^\circ, h=3d_j)$
Fig. 8 Nusselt number of target under semi-closed space ($\theta=30^\circ, h=3d_j$)

图 9 可以看出,设置上挡板后,四种螺旋喷嘴的靶面 Nu 均下降,下降幅度在 40%~60%,其中,内置插件喷嘴的靶面 Nu 的下降幅度最大。

分析原因,冲击上挡板的设置,大幅度限制了射流从周围环境夹带与卷吸气流的能力,从喷嘴射出的高速气流只能夹带已经参与过靶面传热的较高温度的气流,而温度较低的环境气流,则被阻挡在射流空间外围,因此,靶面传热效率较大幅度降低。内置插件喷嘴射流速度高,气流从喷嘴射出后,在射流中心区形成的负压较高,夹带的卷吸能力强,限制性挡板的设置,该喷嘴卷吸环境气流的优势被阻止,因此,靶面换热效率下降幅度最大。

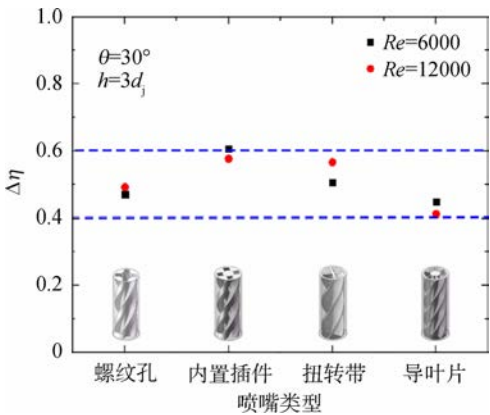


图 9 驻点 Nu 衰减幅度

Fig. 9 Rate of attenuation of stagnation Nusselt number

2.2 气源腔室压力分析

气源腔室压力分析,定义各旋流喷嘴外圆管截面积为

$$A_0 = \pi D^2 / 4 \tag{7}$$

定义流通面积比为

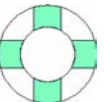
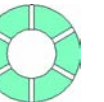
$$\sigma = A^* / A_0 \tag{8}$$

式中 A^* 为冷却气流流通截面积(m^2 , 见表 2); A_0 为外圆管截面积(m^2)。

如表 2 所示,在四种旋转射流喷嘴模型中,内置插件射流喷嘴其流通面积最小,内置扭转带喷嘴的流通面积比 σ 是内置插件的 2.28 倍,显然,在总进气口流量 Q 不变的情况下,流通面积比 σ 越小,射流速度就越大,冲击靶面后的壁面射流越强,一定程度上能够提高传热效率,但是,流通面积越小,必然会导致气源腔室压力增大。

表 2 各旋流喷嘴流通面积比

Table 2 Flow ratio of each swirl nozzle

	螺纹孔	内置插件	扭转带	导叶片
 : 气流通道				
A^* / mm^2	35.88	20.50	46.65	40.96
σ	0.56	0.32	0.73	0.64

实验中集气室的表压测量结果如图 10 所示,自由空间与半封闭空间下,在统一给定的体积流量下,每种喷嘴的集气室压力几乎不变,说明限制性上挡板的设置不会对气源腔室压力产生影响,两射流空间下,内置插件的旋流喷嘴集气室压力最大,比螺纹孔喷嘴高出近一个数量级,这是因为,螺纹孔喷嘴是在中心孔外围设置螺旋槽道,在

降低气流摩阻的同时,有效的保证了射流中心区域的高传热性。另外,高的运行压力将对实际应用时设备的结构强度与安全产生影响,同时也带来了较大的泵功损失。综合考虑,螺纹孔旋转射流能够在较小的压比条件下,实现较高的冷却效率,特别在中心区域靶面 Nu 均优于其他三种旋流结构的喷嘴。

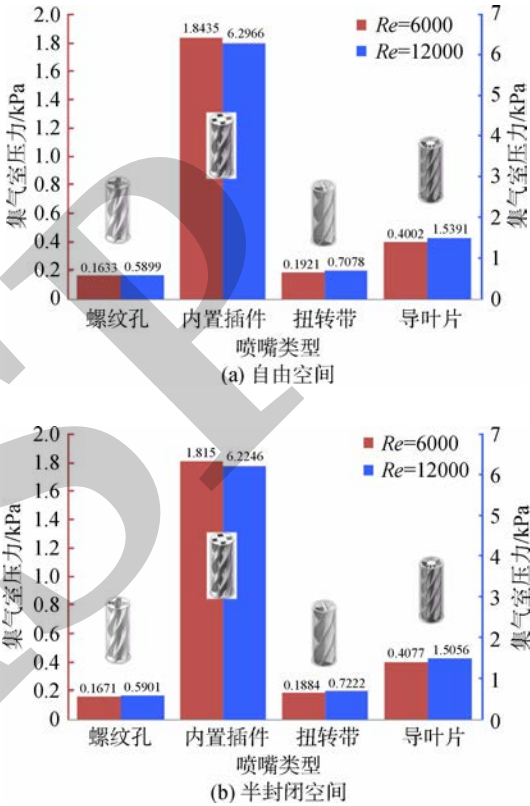


图 10 集气室表压

Fig. 10 Gas chamber gauge pressure

压力损失系数分析,射流喷嘴的压力损失系数 $K^{[18]}$ 通过下式得到:

$$K = \Delta p / 0.5 \rho \bar{V}^2 \tag{9}$$

式中 Δp 为集气室表压(Pa); ρ 为射流空气密度(kg/m^3); $\bar{V}$ 为喷嘴出口平均速度(m/s)。

图 11 给出了两种不同射流空间下各喷嘴的压力损失系数值,从图中可以看出,内置插件喷嘴的压力损失系数最大,导叶片喷嘴的压力损失系数仅次于内置插件喷嘴,螺纹孔喷嘴的压力损失系数最小,仅是内置插件喷嘴的 1/4 左右,说明中心通孔的旋流喷嘴能很大程度上降低喷嘴的压力损失系数,另外,当 Re 提高一倍时,所有喷嘴的压力损失系数都得以降低,其中内置插件喷嘴的降低幅度最大,两种射流空间下,压力损失系数平均下降了 14%。说明该喷嘴在高 Re 工况有相对

较好的通流能力。

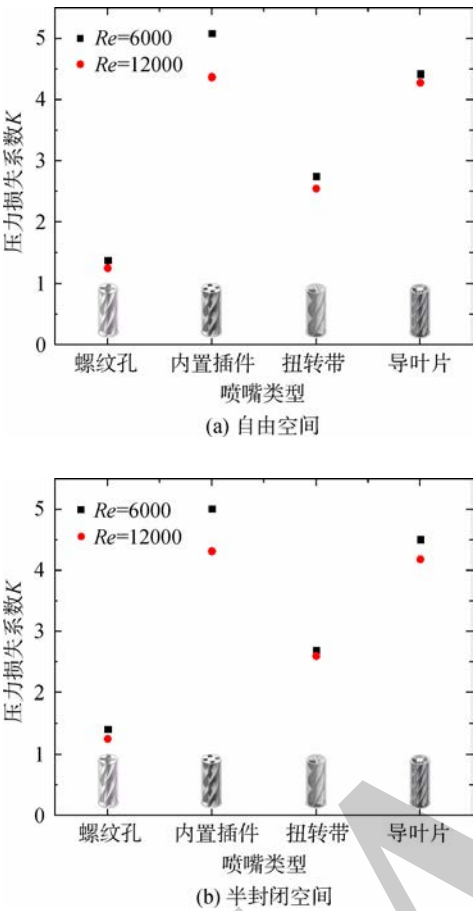


图 11 压力损失系数
Fig. 11 Pressure loss factor

3 结 论

本文设计了一种能产生旋流冲击射流的类螺线孔喷嘴,对比实验研究了同一螺旋角($\theta=30^\circ$)下,三种不同旋流喷嘴(内置插件、内置扭转带,内置导叶片)在自由和半封闭空间下通流特性和靶面的传热特性,主要结论如下:

- 1) 在自由空间下,螺线孔射流喷嘴,在靶面中心区域($r/d\leq 1$)保持了良好传热特性,驻点 Nu 比其他三种旋流喷嘴高出 29.7%~43.3%。且该区域在高 Re 下会扩大。
- 2) 相比于自由射流空间,在半封闭空间下低 Re 时螺线孔射流的换热高效区分布在靶面三倍当量直径范围内区域,驻点 Nu 比其他三种旋流喷嘴高出 38.3%~61%。且四种螺旋喷嘴的靶面 Nu 均下降了 40%~60%,其中内置插件喷嘴下降幅度最大。
- 3) 在同一进口流量条件下分析气源腔室压

力特性,就其压力大小而言,螺线孔喷嘴最小,而内置插件喷嘴最大,两者相差一个数量级以上。就压力损失系数而言,数值最小的螺线孔喷嘴仅是内置插件喷嘴的 1/4 左右,且 Re 增大一倍,内置插件喷嘴的压力损失系数平均下降 14%,降幅最大。

参考文献:

[1] SHARIF M A R. Numerical investigation of round turbulent swirling jet impingement heat transfer from a hot surface[J]. Computational Thermal Sciences, 2016, 8(6): 489-507.

[2] YANG W P, ZHANG J. Simulation of methane partially premixed turbulent swirling jet flame[J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2016, 69(10): 1136-1149.

[3] KUMAR S S, HINDASAGERI V, PRABHU S V. Local heat transfer distribution on a flat plate impinged by a swirling jet generated by a twisted tape[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 111: 351-368.

[4] 朱兴丹, 张靖周, 谭晓茗, 等. 涡轮转子叶片异型气膜孔冷却数值研究[J]. 航空动力学报, 2016, 31(9): 2065-2072. ZHU Xindan, ZHANG Jinzhou, TAN Xiaoming, et al. Numerical investigation of shaped-hole film cooling on turbine rotor blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(9): 2065-2072. (in Chinese)

[5] 毛军逵, 白云峰, 常海萍, 等. 旋转半受限单孔冲击局部换热特性实验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(10): 1593-1597. MAO Junkui, BAI Yunfeng, CHANG Haipin, et al. Experimental investigations on the local heat transfer coefficient of rotating single circular impingement in a half-limited space[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(10): 1593-1597. (in Chinese)

[6] HUANG L M, EL-GENK M S. Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(3): 583-600.

[7] BAKIRCI K, BILEN K. Visualization of heat transfer for impinging swirl flow[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 32(1): 182-191.

[8] LEE D H, WON S Y, KIM Y T, et al. Turbulent heat transfer from a flat surface to a swirling round impinging jet[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(1): 223-227.

[9] KIM T H, DO K H, OH D W, et al. Comparison of heat transfer characteristics of water impinging flow with a single circular nozzle and an insert type swirling nozzle[C]// Proceedings of the ASME 2013 Heat Transfer Summer Conference, Minnesota, USA: ASME, 2013: 177-185.

[10] ALEKSEENKO S V, BILSKY A V, DULIN V M, et al. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, 28(6): 1340-1359.

[11] BROWN K J,PRESOONS T,MURRAY D B. Heat transfer characteristics of swirling impinging jets[C]//Proceedings of the 2009 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition. Florida, USA: ASME, 2010: 1879-1889.

[12] WEN M Y,JANG K J. An impingement cooling on a flat surface by using circular jet with longitudinal swirling strips[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2003,46(24):4657-4667.

[13] IANIRO A,CARDONE G. Heat transfer rate and uniformity in multichannel swirling impinging jets[J]. Applied Thermal Engineering,2012,49(1):89-98.

[14] NUNTADUSIT C,WAE M,BUNYAJITRADULYA A, et al. Visualization of flow and heat transfer characteristics for swirling impinging jet[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2012,39(5):640-648.

[15] NUNTADUSIT C,WAE M,BUNYAJITRADULYA A, et al. Heat transfer enhancement by multiple swirling impinging jets with twisted-tape swirl generators[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012,39(1):102-107.

[16] 陈玉阳,苑中显,马重芳,等. 旋转射流冲击换热液晶显示实验研究[J]. 工程热物理学报,2003,24(4):646-648.

CHENG Yuyang, YUAN Zhongxian, MA Zhongfang, et al. Experimental study of heat transfer of swirling jet impingement with liquid crystal technique[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2003,24(4):646-648. (in Chinese)

[17] XU L,LAN J,MA Y,et al. Numerical study on heat transfer by swirling impinging jets issuing from a screw-thread nozzle[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2017,115:232-237.

[18] GULATI P,KATTI V,PRABHU S V. Influence of the shape of the nozzle on local heat transfer distribution between smooth flat surface and impinging air jet[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(3): 602-617.

(编辑:李岩梅)