

DOI: 10.7652/xjtuxb201709002

一种类螺纹孔结构的旋转射流换热特性数值模拟

徐亮, 兰进, 高建民, 李云龙

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了提高传统圆孔射流换热的均匀性,提出了一种新型的射流孔结构,即在普通圆孔周围设置螺旋槽,类似于内螺纹,并基于已有文献中的一种置入螺旋杆喷嘴的旋转射流实验数据,发展了一种采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型的旋转射流传热数值计算方法。采用该方法,研究了雷诺数(4 000~12 000)、冲击距离(1~8 倍当量直径)、螺旋角($0^\circ\sim 75^\circ$)等参数对所设计的螺纹孔旋转射流传热的影响。数值结果表明:提高雷诺数可以有效提高换热效率,并且能获得良好的换热均匀性;随着冲击距离的增大,旋转射流的局部努塞尔数先增大后减小,双峰值特性逐渐消失并转变为单峰值特性,在4 倍当量直径的冲击距离时,换热系数达到最大值;随着螺旋角增大,中心点的局部努塞尔数也随之增大,同时换热均匀性会变差。研究还发现,不同冲击距离下换热性能最佳时对应的螺旋角也不同。

关键词: 旋转冲击射流;冲击冷却;换热均匀性;螺纹孔

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)09-0011-08

Heat Transfer Characteristics Research of Screw Thread Swirling Impinging Jets Based on Numerical Simulation Method

XU Liang, LAN Jin, GAO Jianmin, LI Yunlong

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

Abstract: To improve the uniformity of traditional impinging jet heat transfer, a new type of jet structure with some circumferential spiral channels set inside the normal nozzle, like the internal thread, is proposed in this paper. First, several numerical methods are adopted to process the experimental data of the swirling impinging jet from a swirl generator, and the data are referenced from a published literature. Results show that the RNG $k-\epsilon$ turbulence model is more suitable for simulation of the swirling impingement jet. Then, the effects of such parameters as Reynolds number (4 000-12 000), impact distance (1-8 times of equivalent diameter) and helix angle ($0^\circ\sim 75^\circ$) on the heat transfer performance of such threaded hole are studied. The research is focused on the flow field and heat transfer characteristics. The experimental results indicate that the heat transfer rate and the uniformity of impinging target will increase with the Reynolds number, and the local Nusselt number will increase first and then decrease with the increasing impact distance. Meanwhile, the double-peak feature of the local Nusselt number will change to single-peak shape, and the maximum local Nusselt number can be obtained at the 4-fold equivalent diameter. The local Nusselt number at the center point will increase with the helix angle, but the heat

收稿日期: 2017-03-13。 作者简介: 徐亮(1980—),男,副教授。 基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2015JQ5126)。

网络出版时间: 2017-06-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170607.1131.006.html>

transfer uniformity will be worse. In addition, it is found that the helix angle corresponding to the best heat transfer performance also changes with different impact distances.

Keywords: swirling impinging jet; impingement cooling; heat transfer uniformity; threaded nozzle

在现有的传热强化技术中,冲击射流作为一种高效的换热手段,被应用于航空发动机热端部件的冷却,电子元器件的冷却,纺织品、木材的干燥,钢铁的冷却与加热,以及机加工中的换热过程等。普通光滑圆孔的冲击冷却或加热已有广泛的研究,有关的研究成果已有系统性报告^[1-3]。旋转射流除了具有冲击射流的一般特性之外,因含有切向速度分量、从射流喷嘴喷出的流体扩散率大、能量和动量耗散快、冲击冷却区域面积大,有助于提高冷却的均匀性,同时冲击旋流具有大尺度旋涡的高紊流度,靶面的换热系数也将得以增强。因此,就高效冷却时还要求良好的冷却均匀性来说,旋转冲击射流是一种最有效的实现手段之一。由于其流动现象的复杂性和广泛的应用领域,现已成为传热工作者所关注的热点问题之一^[4-6]。

在实验研究方面,Huang等通过在普通圆管内插入一个四周带有螺旋凹槽的圆柱,气流经过这些螺旋通道产生旋转后冲击到靶面,得出旋转射流不仅改善了径向传热的均匀性,同时也比普通射流具有更高的平均努塞尔数^[7]。Yang等研究了在环形喷管内置入螺旋导流叶片的旋转射流传热特性,结果表明在足够大的冲击距离下,该射流显示出类似于单个圆管冲击射流的特征^[8-9]。在中小冲击距离下,局部压力和传热系数在冲击靶板上的分布与传统环形冲击射流相比更不均匀,但总体传热性能更好。Ianiro等采用红外热像仪测温技术研究了一个内有十字交叉扭转带的圆管旋转射流,用换热系数和标准偏差的均匀化程度评价了靶面的换热效果,得出螺旋数为0.8时靶面上形成了独立的4个类停滞区,靶面换热均匀化程度最高^[10]。Nuntadusit等用热色液晶测温技术研究了插入扭转带的单个圆管旋转喷射和组合圆管群的旋转喷射。对于组合圆孔旋转喷射,靶面上的换热均匀化程度很高,同时比普通组合圆孔射流的换热系数高^[11-12]。陈玉阳等用热色液晶测温技术研究了一个插入扭转带圆管的以二氧化碳为工质的旋转喷射,结果表明低雷诺数下径向换热均匀化效果明显^[13]。

在数值模拟方面,Casanova采用SST湍流模型模拟了旋转射流冲击靶面为等温面时的换热特性,发现由数值模拟建立的拟合公式预测的靶面努塞尔

数和平均努塞尔数与实验值的偏差均在15%以内,此后又采用SST、 $k-\omega$ 、RNG $k-\epsilon$ 模型研究了表面曲率对换热的影响,得出SST、 $k-\omega$ 模型结果与以往实验数据更加吻合^[14-15]。Llqvist等用大涡模拟研究了雷诺数为20 000时小冲击距离($h/D=0.5\sim 2$)下不同旋转数的旋转射流流动及传热特性,认为大旋转数下即使存在强烈的紊流,但靶面的换热情况更差^[16]。Amini采用RNG $k-\epsilon$ 模型来模拟仿真内置扭转带的旋转射流,采用结构化网格研究了近壁面的热交换特性,认为RNG $k-\epsilon$ 模型下的计算结果与实验数据很契合^[17]。Salman使用分离求解算法,采用5种湍流模型研究了旋转射流的旋转强度对热传递特性的影响,认为 $k-\epsilon$ 模型计算值与实验数据更吻合,SST模型适合于模拟传统冲击射流, $k-\epsilon$ 模型则更适合模拟旋转冲击射流^[18]。

实验研究中关于旋转射流的旋流结构可以大致分为内置螺旋插件、内置扭转带和内置导流叶片3大类,目前鲜有涉及垂直轴向射流与旋流的复杂叠加性旋转射流。本文结合文献[7]的旋转射流实验数据,采用RNG $k-\epsilon$ 、SST、 $k-\omega$ 等3种湍流模型,验证了本文提出的适合计算旋转冲击射流的数值计算方法。采用该方法数值研究了类螺纹孔喷嘴的复杂叠加性射流换热,通过改变进口雷诺数、冲击距离、螺旋角等参数,计算分析了螺纹孔旋转射流的换热特性,研究不同结构参数对靶面传热系数的影响规律,并获得了靶面径向换热均匀化程度最高且换热系数最大的螺纹孔结构。

1 模型及数值计算方法的验证

1.1 湍流模型的验证

根据Huang等的实验对象^[7],建立相应的计算模型如图1所示。

本文数据处理方法如下。

局部传热系数定义为

$$c = q / (T_w - T_{aw}) \quad (1)$$

努塞尔数定义式为

$$Nu = cd_j / k \quad (2)$$

式中: d_j 为当量直径。

射流空气的热膨胀系数 k 与温度的关系式采用多项式插值得到

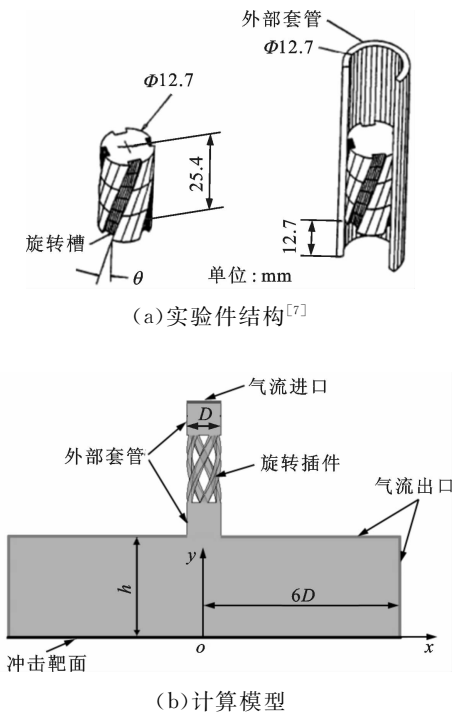


图 1 数值模型验证

$$k = -3 \times 10^{-8} ((T_w + T_{aw})/2 - 273.15)^2 + 8 \times 10^{-5} ((T_w + T_{aw})/2 - 273.15) + 0.00242 \quad (3)$$

式中: q 为靶面热流密度; T_w 为壁面温度, 参考温度为 $(T_w + T_{aw})/2$; T_{aw} 是绝热壁面温度, 取 $T_{aw} = T_j$, T_j 为喷嘴冷却空气温度。

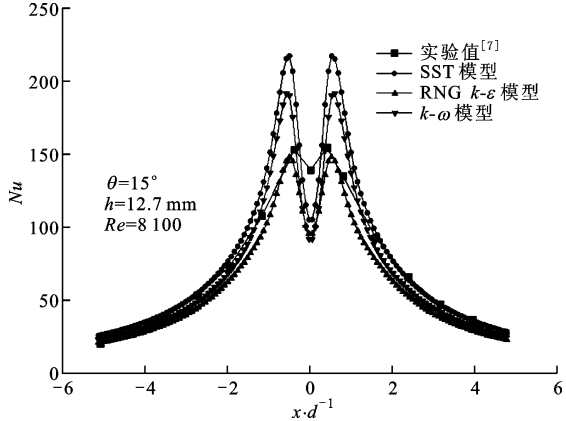
雷诺数为

$$Re = d_j \varphi \rho / \mu = 4\dot{m} / \pi d_j \mu \quad (4)$$

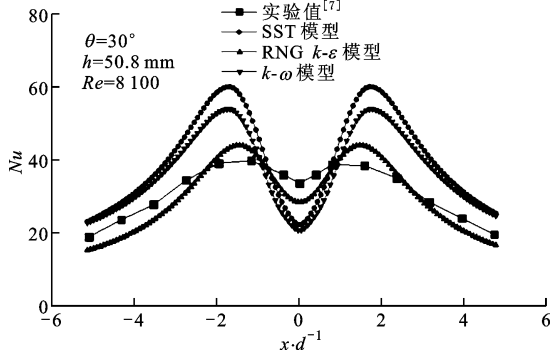
式中: $\dot{m}$ 为质量流量; μ 为空气动力黏度。参考温度取 T_j 。

为了确保所选湍流模型的一致性, 选取了文献[7]中两个不同的实验件进行了验证计算。图 2 给出了不同湍流模型下 Nu 的计算值, 3 种湍流模型的计算值分布趋势与实验结果基本一致, 在中心滞止点区 3 种湍流模型计算较为一致, 与实验数值偏差较大。推测其原因是滞止点区域气流流动缓慢, 在靶面附近为层流流动, 采用湍流模型去模拟层流, 势必都会出现较大的预测偏差。在峰值点预测方面, RNG $k-\epsilon$ 模型的计算结果和实验值吻合最好, 而 $k-\omega$ 、SST 模型在两个峰值处均比实验值要大, 且峰值位置沿径向向外偏移。另外, RNG $k-\epsilon$ 模型采用壁面函数拟合近壁面流动, 第一层网格节点落在紊流发展区, 近壁面网格不需要太密, 同一计算精度下 RNG $k-\epsilon$ 模型比其他两种模型所需的网格数要少。本文采用的网格都进行了大量的试算, 以靶面 Nu

变化在 2% 以内视为计算网格具有网格无关性, 如 $h = d_j$ 时计算域网格总数约为 220 万。综合考虑, RNG $k-\epsilon$ 模型对旋转冲击射流的传热计算有较好的精度和较高的效率, 本文研究均采用该湍流模型。



(a) 实验件 1



(b) 实验件 2

图 2 不同湍流模型下冲击靶面 Nu 分布

1.2 螺旋孔旋转射流喷嘴

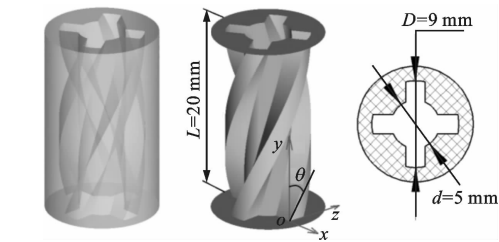
本文设计的旋转射流喷嘴类似内螺旋孔结构, 即在普通圆孔内壁设置 4 条螺旋槽, 几何结构如图 3a 所示, 喷嘴长度 $L = 20$ mm, 喷嘴中心孔内径 $d = 5$ mm, 中心孔外径 $D = 9$ mm, 槽道截面形状约为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的矩形, θ 为螺旋角。

喷嘴的当量直径取螺纹中径, 即

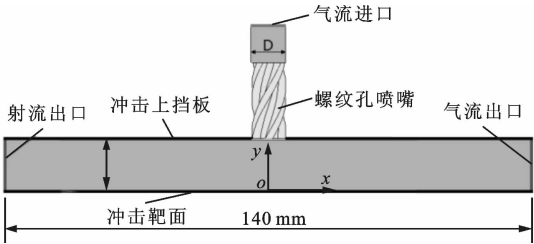
$$d_j = 0.5(D + d) = 7 \text{ mm} \quad (5)$$

计算模型(见图 3b)采用带有边界层的结构化网格, 网格总数约 220 万, 靶面近壁面第一层网格为 0.01 mm , 网格密度为 1.2。

边界条件设置如下: 喷管设置质量流量进口 ($\dot{m} = Re\pi d_j \mu / 4$), 进口总温为 300 K , 湍流度为 5%, 方向垂直于进口截面的 $-y$ 方向; 射流空间区域出口压力为大气压, 靶面为等热流密度, $q = 1 \text{ kW/m}^2$ 。本文研究的工况条件见表 1。



(a)喷嘴几何模型



(b)计算模型

图 3 旋转射流螺纹孔喷嘴几何结构与计算模型

表 1 本文研究的工况条件

参数	取值
Re	4 000, 5 000, 6 000, 7 000, 8 000, 12 000
$h \cdot d_j^{-1}$	1, 2, 3, 4, 6, 8
$\theta/(^\circ)$	0, 15, 30, 45, 60, 75

2 计算结果及分析

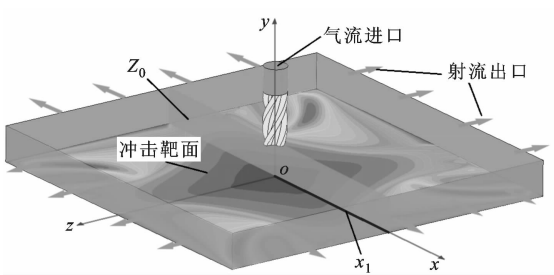
不同于普通光滑圆管射流,旋转射流冲击靶面的温度分布不具有严格的径向一致性,而是呈现出交叉形对称分布,如图 4 所示。为了数据的一致性,本文均选取了射流空间截面 Z_0 和该截面与靶面的交线 x_1 的数据进行分析。

靶面平均努塞尔数为

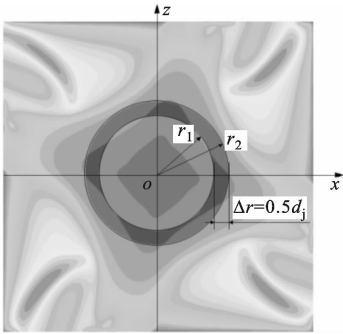
$$Nu_{ave} = \frac{2}{r_1^2 - r_2^2} \int_{r_1}^{r_2} Nu r dr \tag{6}$$

2.1 Re 对靶面换热效果的影响

图 5 给出了冲击距离 $h=3d_j$ 、 $\theta=15^\circ$ 时不同 Re 下直线 x_1 的右半支上局部 Nu 和 Nu_{ave} 沿径向的变化。由图可以看出,增大射流进口气流的 Re 能有效提高靶面的换热率,从而增大靶面换热系数,这与无旋流的传统光滑圆孔冲击射流是一致的。无旋流冲击射流的 Nu 在射流靶面的中心区(即射流正下方的“滞止区”)有最大值,沿径向呈钟形分布并逐渐衰减^[2]。本文提出的旋转射流喷嘴结构,既有中心孔区域的垂直射流,又有外围螺旋槽道的旋转态射流,因此靶面上局部 Nu 分布出现 W 型的双峰值,即在中心点处有一个峰值,第 2 个峰值在中心点外围。本文把中心点峰值大于外围峰值记作中心占

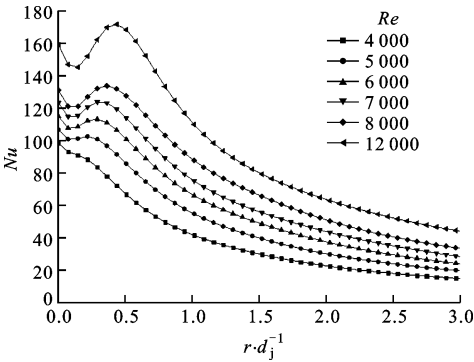


(a)平面 Z_0 与直线 x_1

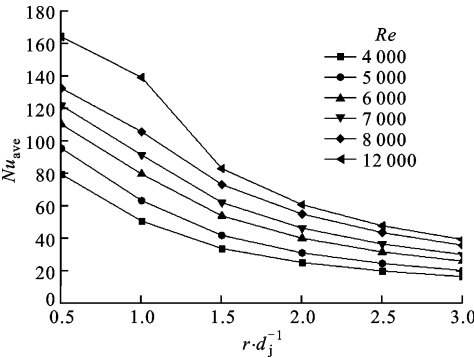


(b)靶面 Nu_{ave} 取值范围

图 4 计算数据选取区域示意图



(a) x_1 上局部 Nu 沿径向分布



(b)靶面 Nu_{ave} 沿径向分布

图 5 不同 Re 下 Nu 沿径向分布

优,将其小于外围峰值记作外围占优。

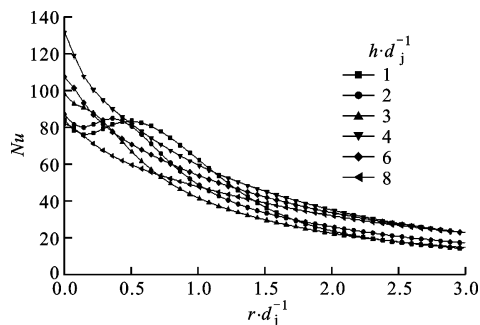
随着 Re 的增大,局部 Nu 外围占优趋势越明显,即外围峰值逐渐增大并超过滞止点峰值,同时该

峰值沿径向向外偏移。当 Re 提高 1 倍时,靶面中心点局部 Nu 提高了 33.18%,在距离中心点 1 倍、2 倍、3 倍当量直径的靶面圆内, Nu_{ave} 分别提高了 108.6%、119.11%、117.61%,说明提高 Re 可以使中心附近的大范围区域整体都具有较高的换热效果,即 Nu 分布更加均匀且值较大。提高 Re 增大了射流的切向速度,从而提高了滞止区近壁面附近区域的换热率,使得滞止区附近区域对流换热系数整体提高。

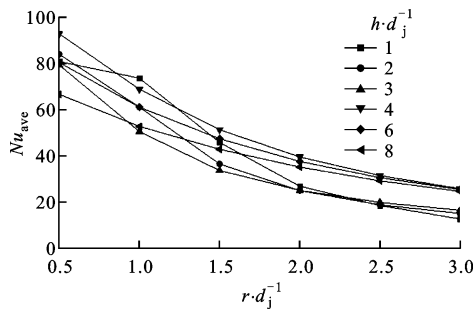
2.2 冲击距离对靶面换热效果的影响

图 6 给出了 $\theta=15^\circ$ 、 $Re=4\ 000$ 时不同冲击距离下靶面局部 Nu 和 Nu_{ave} 沿径向的分布。在 $h=d_j$ 、 $2d_j$ 时,靶面中心区域的局部 Nu 出现了 W 型的双峰值结构,随着冲击距离的增大,外围峰值逐渐消失,最终变成驻点有最大值并沿径向逐步衰减的单峰值分布,当冲击距离增大 1 倍、2 倍、3 倍、5 倍、7 倍当量直径时,滞止点 Nu 分别增大 3.62%、16.49%、55.44%、27.47%、-1.98%,说明随着 h 增大,滞止点 Nu 先增大后减小,在 $h=4d_j$ 时滞止点的 Nu 取得最大值。当冲击距离较小时,在滞止区受主流的核心势流冲击,其附近区域也易受到旋转气流横向扫掠,这样靶面容易出现两个换热高峰期,即出现局部 Nu 沿径向的双峰分布形态。当继续增大冲击距离时,较小射流量下旋转气流对靶面的横向扫掠作用逐渐变弱,乃至最后消失,这时旋转射流基本与传统圆孔射流一样,随着冲击距离的继续增大,滞止区的 Nu 出现先增大后减小的现象。

从图 6b 中可以看出, $h=d_j$ 时,在冲击区域 $r/d_j \leq 1$ 内 Nu_{ave} 沿径向衰减缓慢,且在 $r/d_j=1$ 处 Nu_{ave} 在所研究冲击距离下值最大。这说明当 Re 较低时,在较小冲击距离下的中心区域 $r/d_j \leq 1$ 内,换热最均匀,而在 $r/d_j > 1$ 的区域 Nu_{ave} 迅速衰减,在 $r/d_j > 2$ 的区域 Nu_{ave} 最小。这说明冷却的最均匀区域是 $r/d_j \leq 1$ 的中心区,从这个区域向外换热的均匀性最差,当 $h=4d_j$ 时,在冲击中心区域 $r/d_j \leq 1$ 内 Nu_{ave} 比其他冲击距离的值要大一些。继续增大冲击距离 ($4d_j \sim 8d_j$), Nu_{ave} 越来越小,且越靠近中心点衰减越快,在 $r/d_j=3$ 时 Nu_{ave} 趋近一致。对于 $\theta=15^\circ$ 的螺旋孔旋转射流,在 $Re=4\ 000$ 的条件下,就靶面整体换热效果来说,最佳冲击距离为 $h=4d_j$;就滞止区附近的换热均匀性来说,较低的冲击距离换热均匀性表现更好。实际燃机叶片为了保证机械结构强度,内部冷却空间均较小,特别是使用内置导向器的冲击冷却,冲击距离一般都在 1~3 倍当



(a) x_1 上局部 Nu 沿径向分布



(b) 靶面 Nu_{ave} 沿径向分布

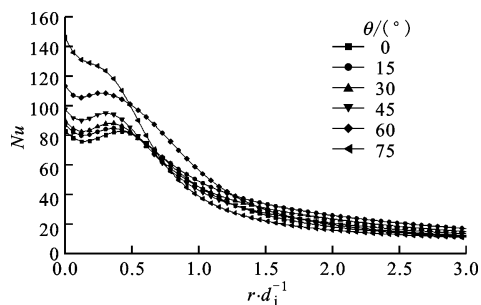
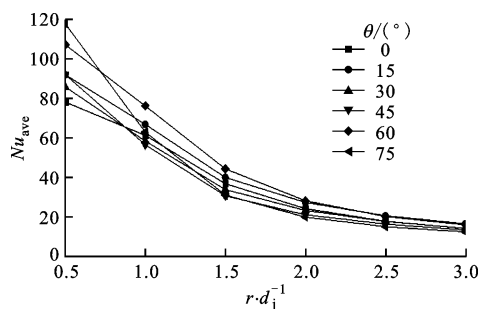
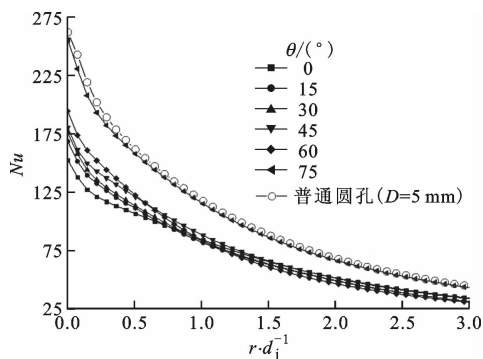
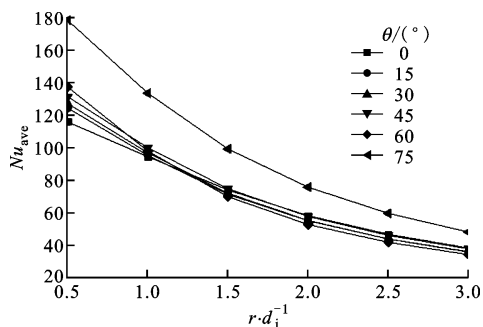
图 6 不同 h/d_j 对靶面换热的影响

量直径的较小距离下,在该距离下使用螺旋孔有望得到一个较均匀的换热效果。

2.3 螺旋角对换热效果的影响

为了研究螺旋槽道螺旋角 θ 对 Nu 的影响,特选取了两组工况条件:工况 1 是低雷诺数 $Re=4\ 000$,较小冲击距离 $h=2d_j$;工况 2 是较高雷诺数 $Re=6\ 000$,较高冲击距离 $h=4d_j$ 。从图 7a 可以看出在工况 1 条件下,随着螺旋角的增大,在射流冲击 $r/d_j \leq 1$ 的区域内,局部 Nu 明显增大,其中螺旋角依次从 0° 增大到 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° ,驻点处 Nu 分别增大 4.98%、8.14%、17.41%、36.5%、74.45%,同时射流出口最大流速分别增大 5.5%、8.08%、20.31%、40.46%、70.11%。速度增加率与驻点处 Nu 增加率趋于一致,说明气流流速对中心驻点的换热起主导作用;从图 7b 中可以看出, 0° 螺旋孔的换热均匀性最好但整体换热效率最低, 75° 螺旋孔均匀性最差,但在 $r/d_j \leq 0.5$ 的中心区域局部换热效率最高,就整体换热性能而言, 60° 螺旋孔的换热效果最优,在 $r/d_j \leq 3$ 的区域内,相比其他螺旋角 Nu_{ave} 整体保持较好的优势,既有较均匀的换热特性,同时也有较高的换热效率。另外,随螺旋角增大,局部 Nu 中心占优趋势越明显。

图 8 是工况 2 条件下不同螺旋角对换热的影响,当冲击距离增大到 $4d_j$ 、 Re 提高到 6 000 时,局

(a) x_1 上局部 Nu 沿径向分布(b) 靶面 Nu_{ave} 沿径向分布图7 工况1条件下螺旋角对 Nu 的影响(a) x_1 上局部 Nu 沿径向分布(b) 靶面 Nu_{ave} 沿径向分布图8 工况2条件下螺旋角对 Nu 的影响

部 Nu 的双峰值特性消失,呈现为中心驻点有最大值的单峰值。增大螺旋角可以提高局部换热效率,在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 螺旋角喷嘴中, 45° 螺纹孔的换热效果最优,在 $r/d_j \leq 3$ 的区域内,相比其他螺旋角, 45° 螺纹孔的 Nu_{ave} 整体保持较好的优势,既有较均匀的换热特性,整体也有较高的换热效率。从 $60^\circ \sim 75^\circ$, Nu 发生了跳跃性的增大,由此推断,当螺旋角增大到 75° 时,螺纹孔的螺旋槽道已经基本失去带动气流旋转的能力,或者说只有很少量的气流能够进入螺旋槽道,此时的螺纹孔的换热特性接近普通圆孔。从图 8a 中普通圆孔与 75° 螺纹孔的数值模拟计算结果的对比可以看出,除了中心区域 $r/d_j \leq 1$ 内 Nu 略有不同,其余区域的几乎重合,从而证实了这一推断。分析其原因是,随着螺旋角的进一步增大,螺旋槽截面积减小,气流流入螺旋槽道导程加长,流动阻力显著增大,更多的气流流入了阻力相对较小的中心孔,中心孔气流流速增大,螺旋槽道功能弱化,换热特性因此逐渐接近普通圆孔。

由以上两种工况的计算结果可以得出,在较小冲击距离 ($h=2d_j$)、较低雷诺数 ($Re=4\ 000$) 时,局部 Nu 均呈现双峰值特点,使用螺旋孔喷嘴可以增强冲击靶面的换热均匀性,此时 60° 螺纹孔换热特性最优。在较大冲击距离 ($h=4d_j$)、 $Re=6\ 000$ 时,局部 Nu 均为单峰值,此时 45° 螺纹孔换热特性最优, 75° 螺纹孔的换热特性则更接近普通圆孔。

2.4 靶面温度分布

图 9 为 $h=2d_j$ 、 $Re=6\ 000$ 时,不同螺旋角下的靶面温度云图,可以看出,带有螺旋槽道的旋转射流,冲击靶面的温度分布呈现出十字放射状 ($\theta=0^\circ$ 除外),随着螺旋角的增大,这种十字放射状特征会逐渐淡化,最终靶面温度分布趋近于单个圆孔射流。当使用螺旋孔喷嘴时,会在冲击靶面上形成 4 个温度梯度较平缓的通道 ($\theta=15^\circ$)。这是由于在限制空间内较小冲击距离下的螺纹孔旋转射流,其中心孔气流冲击壁面形成的二次流受到从螺旋槽道出来的旋转射流的裹挟,使原本沿壁面均匀的二次流变成了强弱间隔的壁面射流,这种回流与切向速度的混合作用,使得沿近壁面射流的冷却气流并没有表现出像普通圆孔一样均匀四散,而是在近壁面形成了 4 个较强射流的气流逃逸通道,该现象在低冲击距离 ($h=d_j$) 和低螺旋角 ($\theta=15^\circ$) 条件下更为明显 (如图 10 所示)。从图中可以看出,4 个气流逃逸通道方向的气流没有形成回流漩涡,该方向的温度梯度较平缓,相反在两逃逸通道之间,壁面射流在大约 $r/d_j=6$ 的位置处形成了较强的回流漩涡,所以从该漩涡分离边界位置向外的近壁面射流气流减少,外界的大量回流气流被轴向高速射流形成的负压卷吸,形成了较大的温度梯度,冷却效果变差。

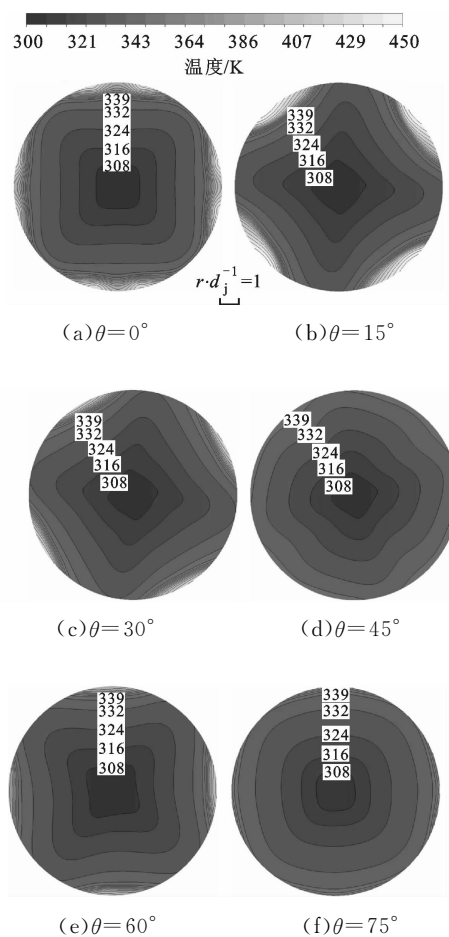


图 9 不同螺旋角的靶面温度云图

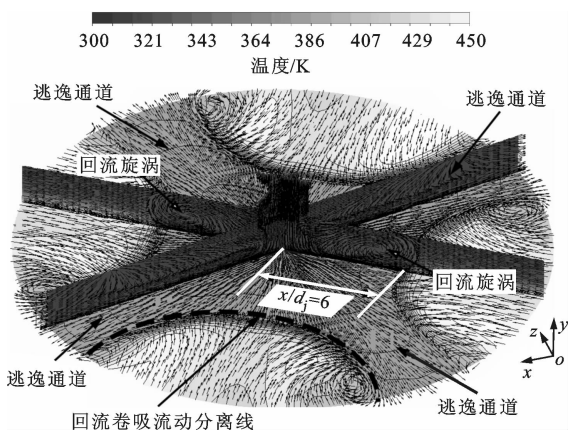


图 10 螺旋孔旋转射流速度矢量图

螺旋孔射流会使得靶面沿气流逃逸方向的冷却得到强化,相反其他区域的冷却效果则变差。产生这种温度分布主要受两个方面因素的影响,一个是冲击距离,另一个是螺旋角,冲击距离越大,旋转的切向速度衰减越快,螺旋角越大,螺旋槽道的功能会被弱化,整个射流会趋近于普通圆孔射流。在较小的冲击距离下,使用低螺旋角的螺旋孔喷嘴,可以使得靶面的冷却更加高效均匀,利用螺旋孔的这种特

性,通过调整结构使冲击靶面温度分布成类方形,有望在多孔阵列冷却中得到较好的组合冷却效果。

3 结 论

(1)通过与实验数据的对比,验证了 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型能较好地模拟旋转射流。数值模拟发现螺旋孔射流在较小冲击距离下, Nu 呈现出 W 形的双峰值,随着 Re 的增大, Nu 相应增大,呈现出中心峰值与外围峰值交替占优,且在较小冲击距离下适当提高雷诺数 ($Re \leq 8\,000$),可以整体提高靶面的换热效率,使换热更加均匀。

(2)在 $Re=4\,000$ 、 $\theta=15^\circ$ 的条件下,当 $h>2d_j$ 时双峰值消失, Nu 变成中心占优的单峰值分布,且在 $h=4d_j$ 时,整体 Nu 达到最大值。

(3)在较小冲击距离 ($h=2d_j$) 下,当雷诺数较低 ($Re=4\,000$) 时,局部 Nu 均呈现双峰值特性,且随着螺旋角的增大中心区域的局部 Nu 也随之增大,但换热均匀性变差,此时 60° 螺旋孔换热特性最优。在较大冲击距离 ($h=4d_j$) 下,当 $Re=6\,000$ 时局部 Nu 均为单峰值,此时 45° 螺旋孔的换热特性最优, 75° 螺旋孔的换热特性则更接近普通圆孔。

(4)在较小冲击距离与低螺旋角条件下,螺旋孔旋转射流的靶面温度呈现出类十字分布,靶面沿气流逃逸方向的冷却得到强化,相反其他区域的冷却效果则变差,这种分布的强弱主要受冲击距离与螺旋角的影响。

参考文献:

[1] 曹玉璋. 航空发动机传热学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 125-137.

[2] 韩介勤, 桑地普·杜达, 斯瑞纳斯·艾卡德. 燃气轮机传热和冷却技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005: 17-19.

[3] VISKANTA R. Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1993, 6: 111-134.

[4] AHMED Z U, AL-ABDELI Y M, MATTHEWS M T. The effect of inflow conditions on the development of non-swirling versus swirling impinging turbulent jets [J]. Computers & Fluids, 2015, 118: 255-273.

[5] 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.

[6] 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.
- [7] HUANG L, EL-GENK M S. Heat transfer and flow visualization experiments of swirling multi-channel and conventional impinging jets [J]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 1998, 41(3): 583-600.
- [8] YANG H Q, KIM T, LU T J, et al. Flow structure, wall pressure and heat transfer characteristics of impinging annular jet with/without steady swirling [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53: 4092-4100.
- [9] 杨会群, 金东范, 卢天健. 环形旋转冲击射流热流特性的实验研究 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41(5): 648-655.
- YANG Huiqun, JIN Dongfan, LU Tianjian. Experimental investigation on heat flow characteristics of horizontal rotating impact jet [J]. *Scientia Sinica: Technologica*, 2011, 41(5): 648-655.
- [10] IANIRO A, CARDONE G. Heat transfer rate and uniformity in multichannel swirling impinging jets [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 49: 89-98.
- [11] NUNTADUSIT C, WAE-HAYEE M, BUNYAJI-TRADULYA 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.
- [12] NUNTADUSIT C, WAE-HAYEE M, BUNYAJI-TRADULYA 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.
- [13] 陈玉阳, 苑中显, 马重芳, 等. 旋转射流冲击换热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.
- [14] CASANOVA J O. CFD and correlations of the heat transfer from a wall at constant temperature to an impinging swirling jet [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55: 5836-5845.
- [15] CASANOVA J O, ORTIZ F J. Numerical simulation of the heat transfer from a heated plate with surface variations to an impinging jet [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 76: 128-143.
- [16] LLQVIST T H, FUCHS L. Numerical study of swirling impinging jets with heat transfer [C] // *ASME 2004 Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference*. New York, USA: ASME, 2004: 965-975.
- [17] AMINI Y, MOKHTARI M, HAGHSHENASFARD M, et al. Heat transfer of swirling impinging jets ejected from Nozzles with twisted tapes utilizing CFD technique [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2015, 6: 104-115.
- [18] SALMAN S D, KADHUM A A H, TAKRIFF M S, et al. Experimental and numerical investigations of heat transfer characteristics for impinging swirl flow [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 6(2): 631081.

[本刊相关文献链接]

- 范小军, 杜长河, 李亮, 等. 4 种冷却结构对叶片前缘流动换热影响的比较研究. 2017, 51(7): 37-43. [doi: 10. 7652/xjtuxb201707006]
- 杜长河, 范小军, 李亮, 等. 旋转半径和叶片安装角对动叶旋流冷却流动和传热特性的影响. 2017, 51(5): 37-42. [doi: 10. 7652/xjtuxb201705006]
- 康蕊, 厉彦忠, 杨宇杰, 等. 轴向导热对板翅式换热器传热性能的影响. 2017, 51(2): 140-148. [doi: 10. 7652/xjtuxb201702022]
- 杜长河, 范小军, 李亮, 等. 抽吸孔对旋流和冲击冷却流动传热特性的影响. 2017, 51(1): 19-24. [doi: 10. 7652/xjtuxb201701004]
- 张峰, 王新军, 李军. 球凹平板冲击冷却性能的数值研究及结构改进. 2016, 50(1): 124-130. [doi: 10. 7652/xjtuxb201601019]
- 潘辉, 冯松, 刘朝晖, 等. 航空煤油 RP-3 热裂解结焦流动换热特性实验研究. 2016, 50(7): 7-12. [doi: 10. 7652/xjtuxb201607002]
- 陈宇佳, 杜长河, 李亮. 蒸汽冷却带肋矩形通道流动和换热特性数值研究. 2016, 50(3): 62-67. [doi: 10. 7652/xjtuxb201603010]
- 张峰, 王新军, 李军. 带肋 U 型通道中的汽雾/空气流动与换热数值研究. 2015, 49(9): 52-57. [doi: 10. 7652/xjtuxb201509010]
- 曾立飞, 刘观伟, 毛靖儒, 等. 调节阀内流型分布及利用声音突变判别流型转变的方法. 2015, 49(5): 116-121. [doi: 10. 7652/xjtuxb201505018]
- 梁卫颖, 朱惠人, 张丽, 等. 尾缘流量分配对涡轮叶片内冷通道换热影响的实验研究. 2015, 49(5): 24-29. [doi: 10. 7652/xjtuxb201505004]

(编辑 荆树蓉)