

文章编号: 1000-8055(2007)09-1412-05

突片射流冲击冷却换热特性的实验

余业珍^{1,2}, 张靖周¹, 杨卫华¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 南京师范大学 动力工程学院, 南京 210016)

摘 要: 对涡激励突片的单排圆形射流冲击冷却特性进行了实验研究. 主要对突片堵塞比、突片形状和突片安装角度对冲击换热特性的影响进行了实验研究, 并揭示了其影响规律. 研究表明: 在研究的参数范围内, 突片的几何形状及安装角对射流冲击换热有较显著的影响, 并根据其影响规律, 对突片的结构设计提出了有价值的参考意见.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 射流冲击; 突片; 实验研究

中图分类号: O354

文献标识码: A

Experimental study of the effects of tabs on jet impingement heat transfer

YU Ye-zhen^{1,2}, ZHANG Jing-zhou¹, YANG Wei-hua¹

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210016, China)

Abstract: The impingement characteristics of a circular jet with vortex-generating tabs were investigated experimentally. This experiment was focused on the effects of blockage ratio, shape and installation angle of tabs on impingement heat transfer, revealing that the shapes and installation angle of tabs have great influence upon the convective heat transfer of impingement. According to the pattern of influence, beneficial reference opinions were raised on the structural designs of tabs.

Key words: aerospace propulsion system; jet impingement; tabs; experimental investigation

射流冲击是一种极其有效的强化局部传热或传质的方法. 湍流圆形射流广泛地应用于冷却和干燥. Webb 和 Ma^[1]系统总结了由这种射流引起的热和质量传递. 研究表明: 圆形射流冲击引起的热传递取决于许多参数, 包括射流雷诺数、射流孔到靶板的距离、受限平面的位置、以及周围空气相对于射流的温度等等, 射流孔的形状对冲击传热也有明显的影响. 尽管针对射流冲击冷却已经开

展了大量的研究, 但如何进一步提高射流的冷却效率仍然是需不断探索的研究课题. Colucci^[2]和 Lee^[3]等曾对射流喷口的形状进行过研究, 得到了在不同的射流雷诺数和冲击间距下射流喷口形状对驻点和局部换热特性的影响; Zumbrenen^[4]和李发军等^[5]对流体间断冲击靶面的脉冲射流冲击进行了实验研究, 获得了射流脉冲频率对射流冲击对流换热的影响效果; Liu^[6]等对激励圆形射流

收稿日期: 2006-12-26; 修订日期: 2007-03-12

作者简介: 余业珍(1970-), 女, 四川宜宾人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士, 南京师范大学动力工程学院讲师, 主要从事传热与燃烧的研究.

表 1 突片的几何形状和安装角度
Table 1 Shapes and installation angle of tabs

突片堵塞比				突片三角形形状				突片安装角度			
$\alpha=60^\circ$				堵塞比 15.7 %				堵塞比 15.7 %; $\alpha=60^\circ$			
堵塞比/ %	30.5	15.7	5.7	$\alpha (^\circ)$	104	60	37	$\theta (^\circ)$	45	90	135
m/ mm	1.4	1	0.7	m/ mm	0.7	1	1.3	m/ mm	1.4	1	1.4

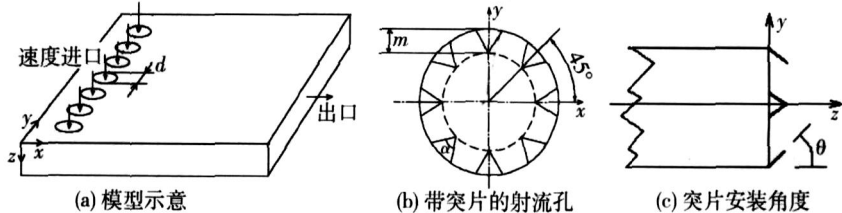


图 1 实验模型简图

Fig. 1 Schematic experiment model

的流动结构和换热特性进行了研究,陈玉阳等^[7]对喷嘴内置扭转带的旋转射流冲击靶面的对流换热特性进行了实验研究,发现与普通射流冲击相比,旋转射流换热在驻点区略低而在壁面射流区却略高. 本文从突片诱导涡激励措施在射流-横流混合中的作用机制中得到启发,试图利用突片诱导的流向涡改善射流的冲击冷却特性. 突片涡激励概念最初是由 Bradbury 和 Khadem^[8]于 1975 年提出的, Zhang 等^[9]通过细致的实验研究,揭示出在突片的下游产生一对旋转方向相反的涡对,依靠卷吸作用,加强边界层内的湍动,进而改变两股流体之间的混合流场. Wang 和 Chua^[10]等人用激光多普勒风速计研究了单孔方形射流上加装倾斜的三角形突片对流场速度的影响,对突片产生的流动机理进行了更深入的考察. 但目前尚未见对带突片射流冲击冷却特性研究的报道.

本文运用红外热像仪测试技术,针对半封闭通道中单排圆形射流,在射流孔边缘加装不同堵塞比、不同角度和不同安装角的三角形突片,通过实验研究其冲击换热特性.

1 实验件及实验系统

1.1 实验件

实验件如图 1 所示. 冲击孔板上设置单排射流冲击孔,射流孔的数目为 7,射流孔直径 d 为 6 mm,沿展向的孔间距与孔径之比 Y_n/d 为 2,孔的中心线距通道封闭一侧壁面的距离保持为 5 倍的射流孔直径. 8 个突片安装在射流孔出口边缘,沿周向均匀分布; θ 为突片沿流动方向的倾角,分别取为 45° 、 90° 和 135° ,其中 $\theta=90^\circ$ 的突片和流动方

向垂直,即为不倾斜的突片; m 为突片伸入主流中的长度, α 为突片角度,其取值见表 1.

1.2 实验系统及数据处理的方法

实验系统如图 2 所示. 空气经过压缩机压缩,利用除湿器分离出空气中的水分,以保证压缩空气的干度,分离后的空气经过流量计进入稳压箱,再进入集气室,在集气室内装有整流网,以使气体流动均匀;再经过冲击孔板而垂直冲击到换热靶板,最后经半封闭通道出口排入大气. 在单向出流的冲击通道中,冲击孔板上设置单排射流冲击孔,冲击靶板和冲击孔板之间的距离可以通过调整垫片厚度改变,冲击间距与孔径之比 Z_n/d 分别取为 1~3. 冲击靶面板用有机玻璃制成,内侧敷设康铜膜用于提供恒热流加热的边界条件,冲击靶板上的温度分布图像用红外热像仪拍摄,使用红外处理软件,对红外图像进行详细处理,得到需要的温度场^[11].

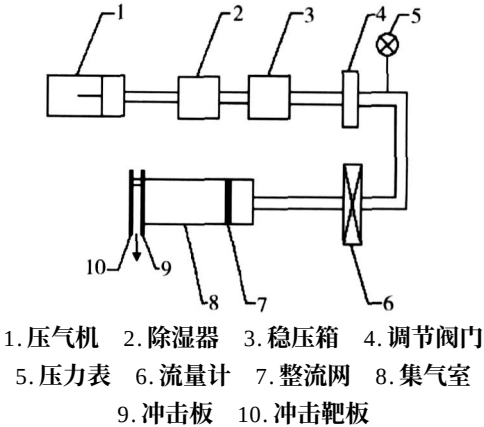


图 2 试验系统图
Fig. 2 Experimental system

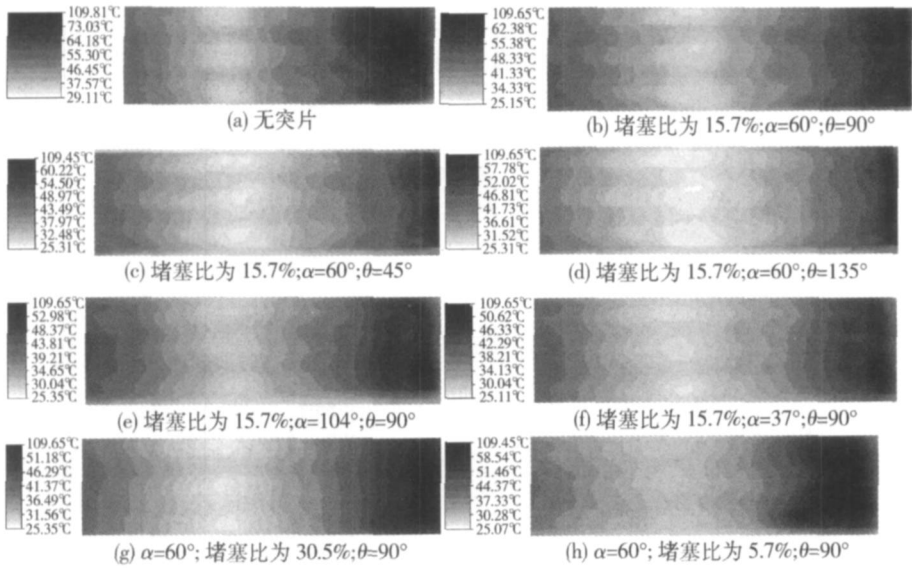


图 3 冲击靶板上的温度分布 ($Re = 20\ 000$, $Z_n/d = 2$)

Fig. 3 Temperature distributions on the target surface ($Re = 20\ 000$, $Z_n/d = 2$)

在本文的实验研究中,冲击射流雷诺数 Re_i 取为 $5\ 000 \sim 30\ 000$. 冲击靶面的对流换热系数和努塞尔数定义为

$$h = \frac{IV}{A(T_s - T_j)}; Nu = \frac{hd}{\lambda_f}$$

式中 IV 为电热膜的加热功率, A 为电热膜的面积, T_s 为冲击靶面的温度, T_j 为射流的温度.

2 实验结果及分析

2.1 靶板上的温度分布

图 3 所示为 $Re = 20\ 000$, $Z_n/d = 2$ 时,用红外热像仪拍摄到的不同堵塞比以及不同 α, θ 的突片在冲击靶板上的温度分布. 从图中可以看出,靶板在无突片射流冲击下,驻点区的低温分布比较集中,高温区的面积较大,温度较高;而有突片射流在驻点处的低温区呈现向周围扩散的趋势. 其中,在同样的堵塞比下,图 3(c)~(f) 相对于图 3(b) 的这种扩散趋势更加明显,低温区温度更低;而同样形状的突片($\alpha = 60^\circ$),图 3(g) 和 (h) 相对于图 3(b) 的突片低温区面积更大,数值也更低. 说明突片的形状、倾角以及堵塞比对冲击换热都有较大的影响. 通过比较各种突片射流在冲击靶板上孔间平均 Nu 数,能更详细地得出这种影响规律.

2.2 靶板上冲击孔间平均 Nu 数

2.2.1 堵塞比对冲击换热特性的影响

图 4 所示为 $Re = 20\ 000$ 时,堵塞比对冲击孔间平均 Nu 数的影响. 从图中可以看出:(1) 当冲击间距不大时($Z_n/d = 1 \sim 2$),堵塞比为 30.5% 的突片换热效果最好,堵塞比为 5.7% 的突片冷却

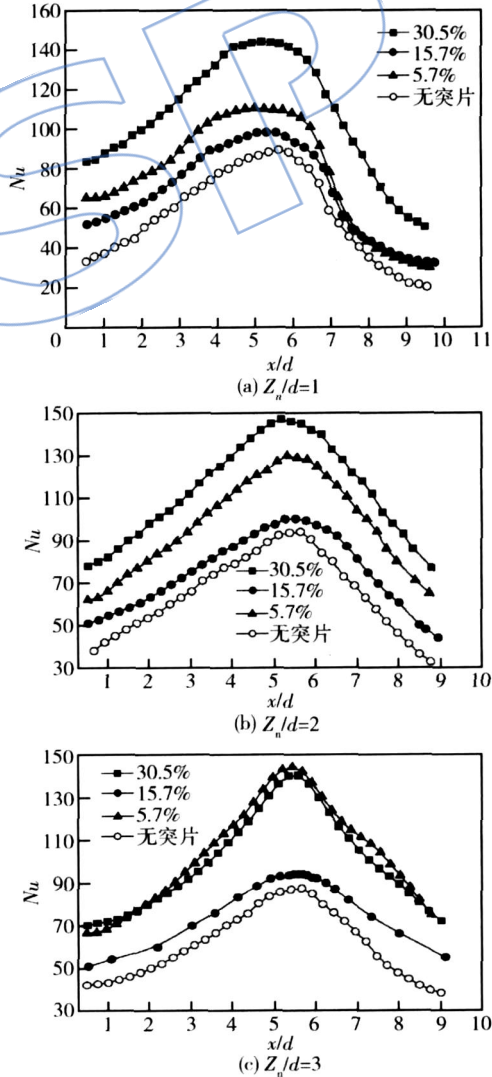


图 4 堵塞比对冲击孔间平均 Nu 数的影响 ($Re = 20\ 000$)

Fig. 4 Effects of the blockage ratio of tabs on the average Nu number between the impingement hole ($Re = 20\ 000$)

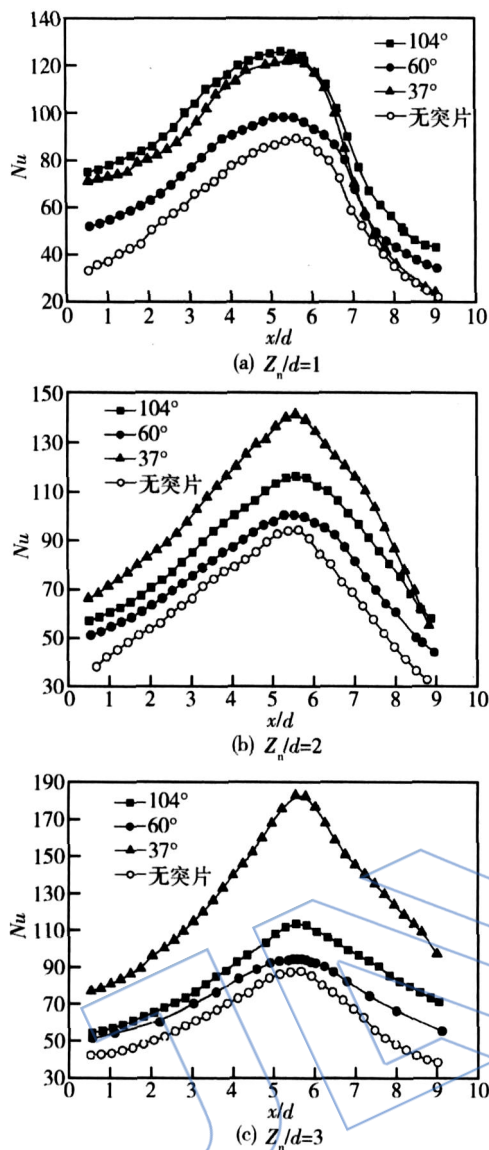


图 5 突片角度对冲击孔间平均 Nu 数的影响
($Re = 20\ 000$)

Fig. 5 Effects of the angles of tabs on the average Nu number between the impingement hole
($Re = 20\ 000$)

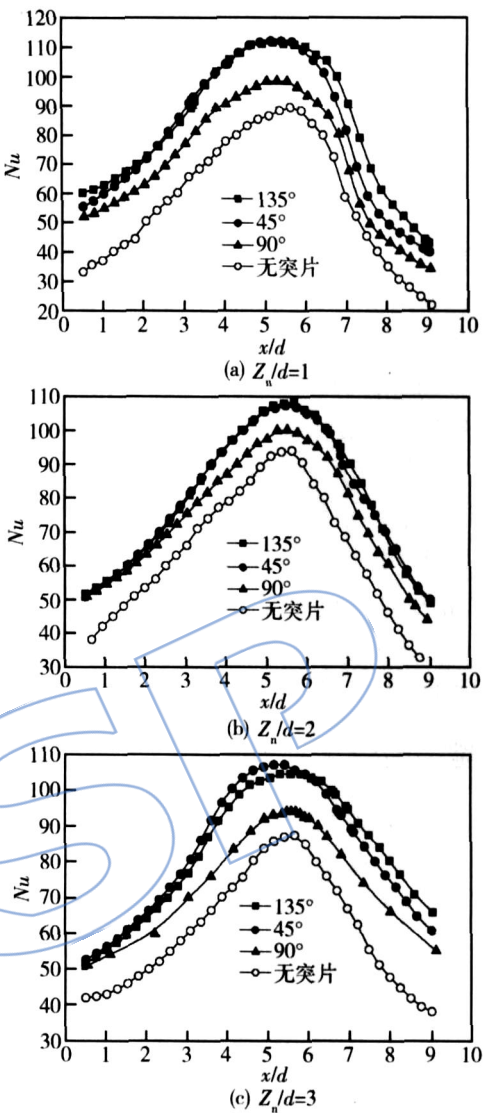


图 6 突片倾角对冲击孔间平均 Nu 数的影响
($Re = 20\ 000$)

Fig. 6 Effects of the installation angles of tabs on the average Nu number between the impingement hole ($Re = 20\ 000$)

效果次之,而堵塞比为 15.7% 的突片冷却效果相对较差;其中当冲击间距为 $Z_n/d = 1$ 时,堵塞比为 5.7% 的突片在驻点区的换热效果略好于堵塞比为 15.7% 的突片;当冲击间距为 $Z_n/d = 2$ 时,堵塞比为 5.7% 和 30.5% 的两种突片换热效果明显好于堵塞比为 15.7% 的突片. 此结论表明:突片伸入主流中的长度对射流的冲击冷却影响较大,在本文所选的参数范围内,突片的影响并没有完全随着突片长度的增加而增加,堵塞比为 5.7% 的突片较之堵塞比为 15.7% 的突片射流中心区的波动更大,促进了射流与周围流体的掺混,因而提高了换热效果. (2) 当冲击间距较大时 ($Z_n/d = 3$),堵塞比为 5.7% 和 30.5% 的两种突

片换热效果差别不大. (3) 射流孔上加装不同堵塞比突片后的换热效果均优于未加突片的射流.

2.2.2 突片角度对冲击换热特性的影响

图 5 所示为 $Re = 20\ 000$ 时,突片角度对冲击孔间平均 Nu 数的影响. 从图中可以看出: (1) 突片角度为 104° 和 37° 的突片换热效果优于角度为 60° 的突片. 说明突片角度的变化对冲击射流有明显的影响,角度为 104° 和 37° 的突片产生的流向涡强度比角度为 60° 的突片产生的流向涡更大,导致其冷却效果更明显. (2) 当冲击间距较大时 ($Z_n/d = 2 \sim 3$),角度为 37° 的突片换热效果优于角度为 104° 的突片,并且冲击间距越大,这种优

势越明显;而当冲击间距较小时($Z_n/d=1$),角度为 104° 的突片在驻点区前面的区域换热效果略优于角度为 37° 的突片。(3)射流孔上加装不同角度突片后的换热效果均优于未加突片的射流。

2.2.3 突片倾角对冲击换热特性的影响

图6所示为 $Re=20\ 000$ 时,突片倾角对冲击孔间平均 Nu 数的影响。从图中可以看出:(1)突片倾角为 135° 和 45° 的突片换热效果优于倾角为 90° (不倾斜)的突片,可见突片倾角能够改善射流冲击冷却的换热效果。突片相对主流的倾斜,显然有利于流向涡的生成,并增加了流向涡的强度,倾斜突片产生的大强度流向涡在向下游发展的过程中,不断与周围流体混合,使换热效果得到增强。

(2)倾角为 135° 和 45° 的突片换热效果并无明显区别。(3)射流孔上加装不同倾角突片后的换热效果均优于未加突片的射流。

3 结 论

本文运用红外热像仪测试技术,对安装了三角形突片的单排圆形射流,在不同堵塞比、不同的三角形形状和不同安装角度下的冲击换热特性进行了实验研究。实验结果表明:

(1)在常规冲击射流孔上加装突片结构后,由于突片的扰流作用,使得冲击冷却效果均好于未加突片的射流;

(2)当冲击间距不大时,突片堵塞比对冲击换热特性的影响比较大,其中堵塞比为 5.7% 和 30.5% 的两种突片换热效果好于堵塞比为 15.7% 的突片;

(3)当冲击间距较大时,三角形突片的突片角度对冲击换热特性的影响比较大,其中突片角度为 104° 和 37° 的突片换热效果优于角度为 60° 的突片;

(4)突片沿射流方向的倾角对改善冲击换热特性起到了较大的作用,有倾角的突片冷却效果优于无倾角的突片。

参考文献:

[1] Webb B W, Ma C F. Single-phase liquid jet impingement

heat transfer[R]. Advances in Heat Transfer, 26, Academic Press, San Diego:1995:105-217.

[2] Colucci D, Viskanta R. Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet[J]. Exp. Therm. Fluid Sci., 1996, 13:71-80.

[3] Lee J, Lee S J. The effect of nozzle configuration on stagnation region heat transfer enhancement of axisymmetric jet impingement[J]. Int. J. Heat Mass Trans, 2000, 43:3497-3509.

[4] Zumbren D A, Aziz M. Convective heat transfer enhancement due to intermittency in an impinging jet[J]. Journal of Heat Transfer, 1993, 115:91-98.

[5] 李发军,苑中显,马重芳,等.脉冲射流冲击冷却换热的液晶显示实验研究[J].工程热物理学报,2002,23(2):193-196.

LI Fajun, YUAN Zhongxian, MA Chongfang, et al. Experimental study of heat transfer of pulsing jet impingement with liquid crystal technique[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(2):193-196.

[6] Liu T, Sullivan J P. Heat transfer and flow structure in a excited circular impinging jet[J]. Int. J. Heat Mass Trans., 1996, 39(17):3695-3706.

[7] 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.

CHEN Yuyang, YUAN Zhongxian, MA Chongfang, 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.

[8] Bradbury L J, Khadem A H. The distortion of a jet by tabs[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 70(4):801-813.

[9] Zhang S C, Scheider S P. Molecular-mixing measurements and turbulent structure visualization in a round jet with tabs[R]. AIAA Paper 94-3082, 1994.

[10] Wang X K, Chua L P, Yu S C M. On the near-field of a square jet with vortex-generating tabs[J]. Fluid Dynamics Research, 2003, 32:99-117.

[11] 张泽远,张靖周,杨卫华.半封闭通道射流冲击冷却换热特性的实验[J].航空动力学报,2006,21(4):626-630.

ZHANG Zeyuan, ZHANG Jingzhou, YANG Weihua. Convective heat transfer of jet impingement inside semi-confined channel[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4):626-630.