

扇形射流的空气动力学特性

王海军, 卜琳, 罗毓珊, 陈听宽

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 基于两种不同的射流孔宽度及宽广的射流参数范围, 对扇形射流垂直入射至主流时进行了空气动力学试验研究. 测量了不同射流参数下管内的轴向压力分布, 并且对不同结构的射流槽的试验结果进行了比较. 结果表明: 射流出口为锐边时, 压力峰值出现在射流下游的稀薄区域; 射流出口为圆边时, 压力峰值出现在射流入射区. 最后, 测量了垂直入射时的局部水力损失, 发现在高流速比下, 水力损失的试验结果明显低于理论计算值.

关键词: 扇形射流; 温度分布; 压力分布; 水力损失

中图分类号: V1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)03-0097-04

Aerodynamics of Injection of a Radial Slot Jet

WANG Haijun, PU Lin, LUO Yushan, CHEN Tingkuan

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Experiment was conducted on aerodynamics of radial slot jet normally injecting into ducted flow for two slots with different width. The distributions of the axial pressure in the tube under different injection parameters were measured. The experimental data of the different structure of the slots were also analyzed. The results show that the pressure peak was observed in the rarefaction zone when the injection outlet edge was sharp and also observed in the injection region when the injection outlet edge was round. In addition, local hydraulic losses of normal injection were measured and it is found that the hydraulic losses predicted were significantly higher than that measured at high flow velocity ratio.

Keywords: fan radial jet; temperature distribution; pressure distribution; hydraulic resistance

扇形槽射流强化混合过程广泛应用于航空器和火箭发动机领域. 在火箭发动机固体推进的设计中, 燃烧产物通过大量的径向窄槽通道以射流的形式注入到主流当中. 为了在复杂的条件下进一步发展相应的计算方法, 改进流动特性, 必须对有射流注入时管截面中的水力过程和全压损失进行深入研究. 考虑到以上因素, 对径向射流垂直入射到主流中时主射流的相互作用和混合过程进行研究具有重要的学术意义和应用价值.

迄今为止, 有关横向射流的动力学和传热研究已有很多^[1-5], 但绝大多数的研究对象都是矩形通道中的平面射流或者多组圆孔射流.

很明显, 与自由流体中的平面射流, 特别是通道尺寸狭窄而且射流槽的宽度 S 与通道直径 R_d 相当 ($S/R_d \rightarrow 1$) 时相比, 扇形射流有特殊的混合特性. 横向射流的流型相当复杂, 在高流量比 ($m = \rho_s w_s / \rho_1 w_1 > 1$, 其中 $\rho_s w_s$ 是射流的质量流速, $\rho_1 w_1$ 是主流的质量流速) 时, 射流会引起流动的分离并导致产生一个静压降低的回流区. 综上所述, 对于横向射流的精确数值分析, 特别是对于像阻力系数这样对于工程实际很重要的参数进行分析是很困难的. 因此, 试验是确定横向射流动力损失最合适的方法.

虽然对不同角度的 T 型三通横向射流阻力的研究已经很多^[6-9], 然而扇形射流中主射流的相互作

结果如表 1 所示.

表 1 科里奥利系数测量值			
m	N_1	N_2 (锐边)	N_2 (圆边)
0.00	0.993	1.11	1.100
1.00	0.993	1.09	1.089
2.50	0.993	1.07	1.060
3.86	0.993	0.96	1.060
5.02	0.993	1.06	1.070
7.04	0.993	1.07	1.060
9.10	0.993	1.03	1.055

对于本文所研究的问题,可以从理论上估算出由于射流入射引起旋转加速而造成的能量损失的最大值. 由 $N_1=N_2=1$ 时系统的质量和动量守恒方程可得

$$\rho_1 w_1 F_1 + \rho_s w_s F_s = \rho_2 w_2 F_2 \tag{2}$$

$$(P_1 + \rho_1 w_1^2) F_1 + \rho_s w_s^2 F_s \cos\alpha = (P_2 + \rho_2 w_2^2) F_2 \tag{3}$$

对于 $F_1=F_2$,可得

$$\xi = 1 - \frac{1 + (S/R_d) m^2 \cos\alpha}{(1 + 2(S/R_d) m)^2} \tag{4}$$

方程(4)中的系数 ξ 是在没有考虑真实流动中的摩擦和产生涡流的情况下得到的,为实际水力损失的下限值. 图 4 表示不同射流角度下 ξ 随 m 的变化关系. 从图中可以看出,射流倾角会显著地影响 ξ 的大小及其与 m 的变化关系. 在主射流反向($\alpha=180^\circ$)时, ξ 达到了最大值,而在同向流动($\alpha=0^\circ$)时, ξ 变为负值($\xi<0$),这说明由于射流的存在系统总的能量增加了. 在其他射流入射角度下,当射流的结构尺寸 S/R_d 和参数 m 一定时, ξ 会为 0.

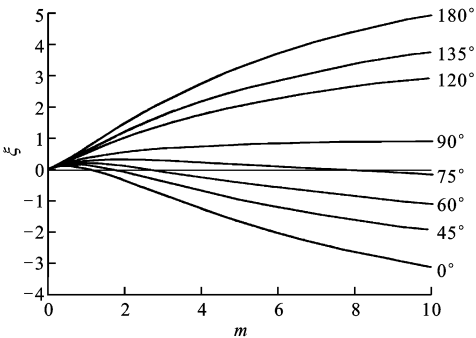


图 4 不同射流角度下 ξ 随 m 的变化

图 5 示出了水力损失试验结果与计算结果的对比. 由于在式(4)的理想混合模型中没有考虑涡流产

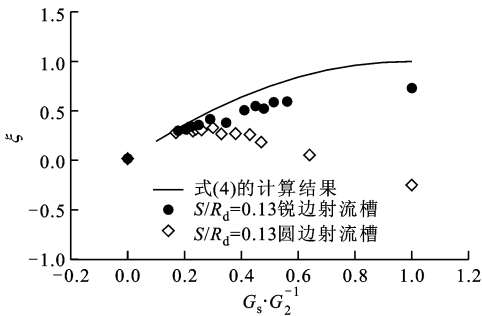


图 5 水力损失试验结果与计算结果对比

生、流动分离等其他因素引起的额外损失,因此锐边射流入射时的 ξ 试验值应该大于式(4)的计算值. 然而,由图 5 可见,在高的质量流速比($G_s/G_2>0.4$)下,试验结果明显低于理论值. 这可能是由于射流出口附近气体动力的不稳定性以及射流离开射流管后向主流方向偏斜造成的. 实际上,从图 4 可以明显看出,射流角度如果由垂直方向有少许减小,就会导致水力损失系数明显下降. 增大射流参数 m ,这个效应会更显著,直到水力损失系数变为负值. 因此,总体而言图 4 和图 5 中的数据与本文提出的扇形射流中水利损失减小的机理是不矛盾的. 圆边射流槽阻力系数的变化趋势也证明了这一点(见图 5). 在圆边射流槽中,射流进入主流后偏斜的角度要比其在锐边射流槽中的偏斜角度更大,从而导致水力损失系数 ξ 要比其在锐边时小得多.

3 结 论

- (1)射流出口为圆形槽时的压力分布与锐边射流孔的压力分布有明显不同. 射流出口为圆边时,压力峰值出现在射流下游的稀薄区域;射流出口为锐边时,压力峰值出现在射流入射区.
- (2)圆边射流槽的水力损失系数比锐边射流槽的小.
- (3)在高流速比下,水力损失的试验结果明显低于理论计算值.

参考文献:

[1] NG C L, SANKARAKRISHNAN R, SALLM K A. Bag breakup of nonturbulent liquid jets in crossflow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2008, 34(3): 241-259.

[2] BECKER J, HASSA C. Breakup and atomization of a kerosene jet in crossflow at elevated pressure[J]. Atomization Spray, 2002,12(1/3): 49-67.

[3] RAGUCCI R, BELLOFIORE A, CAVALIERE A.

- Trajectory and momentum coherence breakdown of a liquid jet in high-density air cross-flow[J]. *Atomization Spray*, 2007, 17(1): 47-70.
- [4] RUSCH D, BLUM L, MOSER A, et al. Turbulence model validation for fire simulation by CFD and experimental investigation of a hot jet in crossflow [J]. *Fire Safety Journal*, 2008, 43(6): 429-441.
- [5] ZUCKERMAN N, LIOR N. Radial slot jet impingement flow and heat transfer on a cylindrical target[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2007, 21(3): 548-561.
- [6] DONGHEE H, OROZCO V, MUNGAL M G. Gross-entrainment behavior of turbulent jets injected obliquely into a uniform crossflow[J]. *AIAA J*, 2000, 38(9): 643-649.
- [7] SANG W L, JOON S L, SUNG T R. Experimental study on the flow characteristics of streamwise inclined jets in crossflow on flat plate[J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1994, 116(1): 97-105.
- [8] 许都纯, 徐红洲, 刘松龄. 单孔射流与主流相互作用时的流动和传热的实验研究[J]. *西北工业大学学报*, 1997, 15(2): 165-172.
- XU Duchun, XU Hongzhou, LIU Songling. On mechanism of interaction between mainstream and jet around a single hole to help improve film cooling effectiveness [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 1997, 15(2): 165-172.
- [9] 郭婷婷, 徐忠, 李少华. 2种角度横向紊动射流的实验分析[J]. *西安交通大学学报*, 2002, 37(11): 1207-1210.
- GUO Tingting, XU Zhong, LI Shaohua. Experimental study on turbulent jets injected obliquely into a cross-flow[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2002, 37(11): 1207-1210.
- [10] KALININA S V, YARYGINA N I, MAR'YASH V I, et al. Hydraulic characteristics of axisymmetrical manifolds with radial lateral flow [J]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 1996, 30(3): 216-218.

(编辑 荆树蓉)