圆形浸没冲击射流速度与压力梯度的数值计算

周定伟
（西安交通大学能动学院，西安，710049）
马重芳 苑中显
（北京工业大学环境与能源工程学院，北京，100022）

摘 要 通过数值计算，系统地研究了圆形浸没液体冲击射流下速度与压力梯度沿轴向和径向的分布情况．考虑的因素包括射流工质、喷嘴直径、喷嘴至冲击面的距离和射流出口 *Re* 数．计算结果表明，压力梯度的径向分布决定了局部换热系数径向分布形状，计算值与实验结果吻合良好．

关键词 冲击射流，数值计算，压力梯度
分类号 TK 124

冲击射流换热是一种可提供高传热传质率的有效手段．它作为用来应付极高热负荷挑战的首选冷却方法而倍受关注，但是，由于冲击射流流场结构的复杂性，一些传热机理和现象仍未得到合理的解释．

国外一些学者分别通过利用多普勒激光技术[1,2]和热力风速计[3]测量冲击射流速度和湍流度、用红外射线探测仪[4,5]测定温度来研究其换热情况．限制于实验测量所带来的昂贵的设备与运行费用，数值计算方法因具有成本低及能模拟较复杂或较理想的工况而被成功的用于研究冲击射流换热[6~11]．本文通过计算冲击射流速度和压力梯度来解释流场结构与换热的关系．

1 数学模型及计算

圆形浸没冲击射流计算采用的物理模型和计算区域如图 1 所示．为了简化计算，作如下简化：①射流是层流、稳定和轴对称的；②忽略重力的影响；③射流工质物性恒定；④喷嘴出口速度均匀．

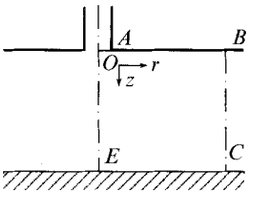


图1 圆型浸没射流冲击模型及计算区域

量纲为一方程如下：

连续性方程

$$\frac{\partial U}{\partial Z}+\frac{1}{R}\frac{\partial (RV)}{\partial R}=0 \qquad (1)$$

轴向动量方程

$$U\frac{\partial U}{\partial Z}+V\frac{\partial U}{\partial R}=-\frac{\partial P}{\partial Z}+\frac{1}{Re}\left[\frac{\partial^2 U}{\partial Z^2}+\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}\left(R\frac{\partial U}{\partial R}\right)\right] \qquad (2)$$

径向动量方程

$$U\frac{\partial V}{\partial Z}+V\frac{\partial V}{\partial R}=-\frac{\partial P}{\partial R}+\frac{1}{Re}\left[\frac{\partial^2 V}{\partial Z^2}+\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}\left(R\frac{\partial V}{\partial R}\right)\right]-\frac{2V}{ReR^2} \qquad (3)$$

边界条件 $OA: U=u_j, V=0: AB: U=V=0: BC: U=0, \partial(RV)/\partial R=0: CE: U=V=0: EO: \partial U/$

收稿日期：1999-04-06

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

$\partial R = 0, V = 0$.

控制方程(1)式～(3)式采用有限容积法来离散. 运用 SIMPLE 计算方法,动量方程中的对流和扩散项采用乘方格式离散. 计算中采用了 50×42和 42×40两种交错网格,其结果相同. 为了保证计算的收敛,采用了低的松驰因子. 计算中采用的收敛标准如下:对于速度 u 和 v 而言,迭代过程中连续两次之值的差的百分比小于 10^{-5}. 计算中改变的参数及调整水平见表1. 除非特别指出,文中工质一般均指变压器油的结果.

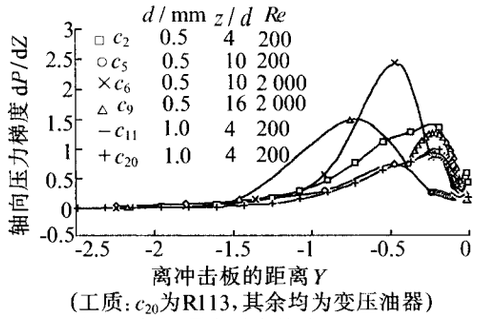
表1 计算中变化的参数及调整水平值

工质	d / mm	喷距 z/d	Re值
变压器油, R113	0.5, 1	4, 10, 16	20, 200, 2 000

2 计算结果及讨论

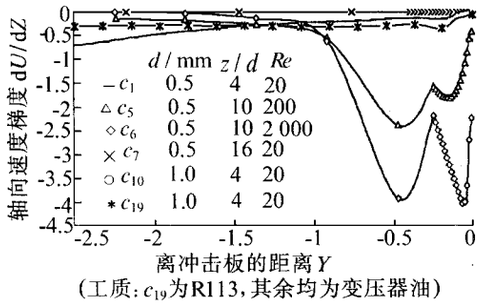
2.1 轴向压力、速度梯度与换热

图2、图3分别示出了压力、速度梯度沿轴向的分布. 从图中可看出,流体自喷嘴射出,压力梯度和速度梯度为零,在分别出现极大值和极小值后迅速降为零. 这与文献[11, 12]的计算值相符. 射流工质、喷嘴直径和 Re 数对极值点位置没有影响,其峰值随直径的减小和 Re 数的增加而增大. 增大喷距,峰值远离冲击面.



(工质: c_{20}为R113,其余均为变压油器)

图2 轴向压力梯度的分布



(工质: c_{19}为R113,其余均为变压器油)

图3 轴向速度梯度的分布

射流冲击到壁面后,速度将改变方向,轴向上的压力梯度和速度梯度是其径向的起始点. 而压力梯度是维持速度增加的动力[13],液层内轴向压力梯度增加,由于动量守恒,径向各点速度在轴向上的恢复加快. 减小喷嘴直径,轴向压力、速度梯度峰值增大,滞止点及径向局部换热系数提高[14];一般说来,Re 数增大,换热加强;在势流核(5～8 d)外,喷距增加,换热强度减弱.

2.2 径向压力、速度梯度与二次峰值的形成

2.2.1 局部换热系数的径向分布特点

对于圆形浸没冲击射流,其局部换热系数的径向分布可能出现双峰[15～17],其一是在 $r/d = 0.5$ 处,不论射流是层流还是湍流均可能出现,其可能的机理是该处的边界层最薄的缘故;径向局部换热系数第2峰值出现在 $r/d = 1.8$～2.0,其形成机理已取得了一致意见,均认为是工质在冲击板上从层流向湍流转变所致.

2.2.2 第1峰值形成的机理及影响因素

由伯努利方程可得

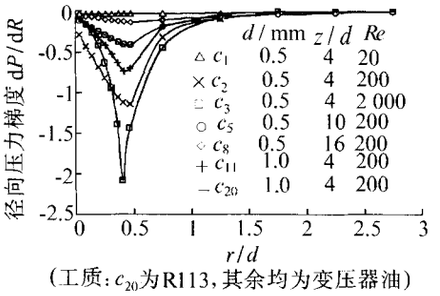
$$p(r) = p_j + \rho[u_j^2 - v^2(r)]/2 \tag{4}$$

(4)式对 r 求导,得

$$\frac{\partial p(r)}{\partial r} = \frac{\partial p_j}{\partial r} - \rho \frac{\partial v(r)}{\partial r} v(r) \tag{5}$$

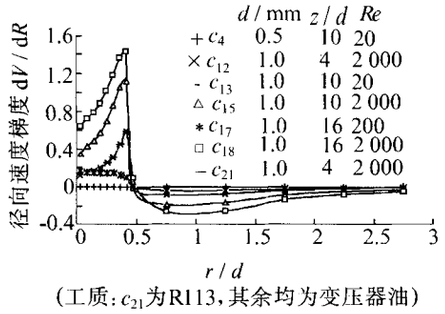
© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

压力、速度梯度的径向分布分别示于图4、图5. 由图4、图5及(5)式可得，径向负压力梯度在 $r/d=0.5$ 处出现极值. 极值点的位置不随工质. 喷嘴直径、喷距和 Re 数[4]的改变而发生变化，其峰值却随喷嘴直径的增大、喷距的减小和 Re 数的增大而增大，而与工质无关. 根据文献[15]分析的结果，此处的速度值应为一极值. 喷嘴直径减小，换热增强，因而图4中 c_2 的峰值比 c_{11} 的峰值大. 图6示出了靠近冲击板附近径向速度的分布. 由图6可得，在 $r/d=0.5$ 处，速度最大，这与文献[11]的结果一致.



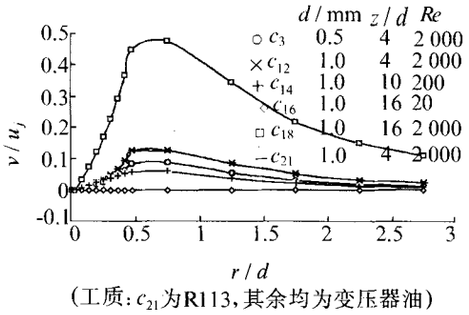
(工质：c_{20} 为R113，其余均为变压器油)

图4　压力梯度在径向上的分布



(工质：c_{21} 为R113，其余均为变压器油)

图5　速度梯度在径向上的分布



(工质：c_{21} 为R113，其余均为变压器油)

图6　靠近冲击面径向速度的分布

综上可看出，圆形浸没冲击射流局部换热系数径向分布第1峰值的出现是由于滞止点附近的压力梯度的存在，它促使速度加速，减小了边界层的厚度[13,16,17]，加之湍流度的存在[4,7,9]，从而换热得到显著加强.

2.2.3 第2峰值形成的机理及影响因素

由图4、5可以得到，在 $r/d=1.8\sim2.0$ 内，压力梯度值为零. 压力梯度一旦消失，层流就向湍流过渡[17~20]，此时速度达到最大值[21]. 湍流度测量结果表明，在 $r/d=2.0$ 处，其值最大[9]. 由于压力梯度极值点不随 Re 数改变，因此，第2峰值出现位置与 Re 数无关[9,22]. 但是，第2峰值却会因喷距的增加而远离滞止点[13,14,22]，这时，由于湍流度和速度的降低而使其消失[22].

3　结论

1) 计算值与实验结果和文献吻合良好；

2) 轴向压力、速度梯度对径向换热强弱有直接的影响；

3) 局部换热系数径向分布形状受压力梯度的径向分布控制，后者极值点位置随喷距增加而远离滞止点，与 Re 数无关.

4) 分析了圆形浸没冲击射流局部换热系数径向分布上两次峰值的形成机理和影响因素.

符号表

u	轴向速度 m / s	U	量纲为一的轴向速度 u/u_j
u_j	射流出口速度 m / s	d	喷嘴直径 mm

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

v	径向速度 m / s	V	量纲为一的径向速度 v / u_j
r	径向坐标 m	R	量纲为一的径向坐标 r / d
z	轴向坐标 m	Z	量纲为一的轴向坐标 z / d
p_j	射流出口压力 Pa	P	量纲为一的压力 $p / (\rho u_j^2)$
y	离冲击板的距离 m	Y	量纲为一的离冲击板的距离 y / d
ρ	流体密度 kg / m^3		

参 考 文 献

1 Stevens J, Webb B W. Measurements of the free surface flow structure under an impinging, free liquid jet. J Heat Transfer, 1992, 114(2): 79～82

2 Garrd A D, Patrick M A. The velocity field produced by a submerged jet directed upwards at a free surface. Int J Heat and Transfer, 1983, 26(4): 1029～1032

3 Wolf D H, Viskanta R, Incropera F P. Turbulence dissipation in a free-surface jet of water and its effect on local impingement heat transfer from a heated surface: Part 1-flow structure. J Heat Transfer, 1995, 117(8): 85～90

4 Stevens J, Pan Y, Webb B W. Effect of nozzle configuration on transport in the stagnation zone of axisymmetric, impinging free-surface liquid jets: Part 1-Turbulent flow structure. Heat Transfer, 1992, 114(6): 874～877

5 Pan Y, Stevens J, Webb B W. Effect of nozzle configuration on transport in the stagnation zone of axisymmetric, impinging free-surface liquid jets: Part 2-Local heat transfer. J Heat Transfer, 1992, 114(7): 880～887

6 Lee X C, Ma C F, Zheng Q, et al. Numerical study of recovery effect and impingement heat transfer with submerged circular jets of large Prandtl number liquid. Int J Heat and Mass Transfer, 1997, 40(9): 2647～2653

7 Li P W, Tao W Q. Numerical and experimental investigations on heat/mass transfer of slot-jet impingement in a rectangular cavity. Int J Heat and Fluid Flow, 1993, 14(8): 246～250

8 Li D Y, Guo Z Y, Ma C F. Relationship between the recovery factor and the viscous dissipation in a confined, impinging, circular jet of high-Prandtl number liquid. Int J Heat and Fluid Flow, 1997, 18(2): 585～590

9 Fitzgerald Janice A, Garimella Suresh V. A study of the field of a confined and submerged impinging jet. Int J Heat Mass Transfer, 1998, 41(3): 1025～1030

10 Behnia M, Parneix S. Prediction of heat transfer in an axisymmetric turbulent jet impinging on a flat plate. Int J Heat Mass Transfer, 1998, 41(8): 1845～1855

11 Liu Xin, Gabour L A, Lienhard V J H. Stagnation-point heat transfer during impingement of laminar liquid jets: Analysis including surface tension. J Heat Transfer, 1993, 115(8): 99～103

12 Webb B W, Ma C F. Single-phase liquid jet impingement heat transfer. Advances in heat transfer, 1995, 26(9): 105～130

13 Colucci D W, Viskanta R. Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet. Experimental Thermal and Fluid Science, 1986, 13(5): 71～80

14 Garimella S V, Rice R A. Confined and submerged liquid jet impingement heat transfer. J Heat Transfer, 1995, 117(9): 871～876

15 周定伟，马重芳，任玉涛．圆形浸没射流冲击下有关压力梯度的理论分析．西安交通大学学报，1999，33(7)：54～56，83

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

16 Gardon Robert, Akfirat J Cahit. Heat transfer characteristics of impinging two-dimensional air jets. J Heat Transfer, 1966, 106(6): 101～106

17 Gardon Robert, Akfirat J Cahit. The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of impinging jets. Int J Heat Mass Transfer, 1965, 8(3): 1261～1268

18 Lee D, Greif R, Lee S J, Lee J H. Heat transfer from a flat plate to a fully developed axisymmetric impinging jet. J Heat Transfer, 1995, 117(2): 772～773

19 Huang Lianmin, Mohamed S. Heat transfer of an impinging jet on a flat surface. Int J Heat Mass Transfer, 1994, 37(13): 1915～1919

20 秦曼，郑青，马重芳，等. FC-72圆形射流冲击模拟电子芯片单相局部对流传热的实验研究. 工程热物理学报，1996，17(5)：70～73

21 Steven J, Webb B W. Measurements of flow structure in the radial layer of impinging free-surface liquid jets. Int J Heat Mass Transfer, 1993, 36(15): 3751～3759

22 Lytle D, Webb B W. Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacings. Int J Heat Mass Transfer, 1994, 37(9): 1687～1693

Numerical Calculation of the Gradient of Velocity/ Pressure Under Impinging Submerged Circular Jets

Zhou Dingwei

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

Ma Chongfang　Yuan Zhongxian

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing, 100022)

Abstract　A numerical calculation was conducted to determine the axial and radial gradient of velocity/ pressure with impinging submerged circular jets perpendicularly. The effects of the factors were investigated, which include working fluid、nozzle-to-plate spacing、nozzle diameter and Reynolds number. The numerical results show that the radial distribution of local heat transfer coefficients are controlled by that of pressure gradient, and that the results are in good accordance with the experimental results.

Keywords　jet impingement, numerical calculation, pressure gradient

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.