

文章编号:1006-3080(2011)02-0254-07

半封闭冲击射流对移动平板流动特性的影响

叶纯杰, 潘红良

(华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘要:采用雷诺应力湍流模型和 SimPLIC 算法对半封闭湍流狭缝射流冲击移动平板进行了数值分析, 得到了不同射角和平板速度下的流场结构、湍流强度和平板面剪切应力分布曲线。结果表明, 减小射流倾角和提高平板速度都会导致流场结构和湍流强度相对射流中心线呈现非对称性, 且在流场一侧形成二次回流区。当平板速度提高到入口射流速度的 2 倍时, 平板近壁处的湍流强度和平板表面的剪切应力系数显著提高。

关键词:湍流强度; 射流; 移动平板; 数值模拟

中图分类号:TK124

文献标志码:A

Influences of Half Confined Jet on the Properties of a Moving Plate Flow

YE Chun-jie, PAN Hong-liang

(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology,
Shanghai 200237, China)

Abstract: A flow field from a half confined slot jet to a moving surface is simulated. The simulation is based on the Reynolds stress turbulence model which is solved sequentially by the SimPLIC method. The simulation tells relationships between flow properties (such as shape of the flow field, turbulence intensity and local skin friction coefficient at the surface of the plate) and control parameters (such as jet angle and plate velocity). Further analysis of the relationships reveals that both the shape of the flow field and the distribution of the turbulence intensity become asymmetric when the jet angle is decreased or when the plate velocity is increased; the decrease of the jet angle or the increase of the plate velocity brings a secondary recirculation zone at one side of the flow field; the turbulence intensity near the wall and the local skin friction coefficient at the plate surface increase significantly when the plate speed reaches the twice of the inlet speed of the flow.

Key words: turbulence intensity; impinging jet; moving plate; numerical simulation

在射流过程中, 当高速射流冲击固体表面时, 会在冲击区内产生很高的局部传热和传质效率, 因而被广泛用于纺织物、薄膜和纸张的干燥, 材料的热处

理, 工件表面的快速降温或加热, 燃气轮机叶片的冷却, 机翼除冰以及电子元件的冷却等方面^[1]。冲击射流主要分为半封闭和非封闭射流, 两者形成的流

收稿日期:2010-08-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875084)

作者简介:叶纯杰(1983-),男,上海人,博士生,从事冲击射流及紊流酸洗方面的研究。E-mail:cjye@mail.ecust.edu.cn

通讯联系人:潘红良,E-mail:hlpan@ecust.edu.cn

态结构差别较大^[2-3]。由于空间的限制或者冲击流体密闭的需要,越来越多的传热或冷却场合需要在封闭的条件下进行。Chiriac 和 Ortega^[4]对半封闭垂直射流状态下平板静止时平板的表面切应力系数、压力系数以及努赛尔数值的分布进行了数值研究。Gori 和 Bossi^[5]研究了半封闭空间内射流高度对平板表面传热系数的影响,得到最佳射流高度与射流入口直径之比为8:1。随着工业自动化的发展和对产品加工效率要求的提高,需对产品进行加工自动化和连续作业。目前国内外对半封闭冲击射流下移动平板表面流体流动特性的研究很少,Sharif 等^[6]用 RNG $k-\epsilon$ 模型模拟了半封闭垂直入射流在不同雷诺数、射流高度和平板运动速度下板面传热系数和切应力系数的分布。Senter 和 Solliec^[7]对垂直入射至移动平板的射流在不同入口雷诺数和不同平板速度与射流出口速度比下的湍动特性做了对比和分析,得出平板运动对平板表面的湍动能分布影响较大,但其研究的流体区域主要集中在射流中心线附近。

本文采用雷诺应力湍流模型(RSM),对二维半封闭狭缝射流冲击移动平板下的流场进行了计算,

研究了喷射角度和平板运动速度对流态结构、湍流强度和平板表面剪切应力系数分布的影响。

1 物理模型和湍流方程的建立

1.1 物理模型

物理模型如图1所示,射流经槽内顶部正中间狭缝喷嘴以一定的角度入射至平板表面,上侧面为封闭板,下侧面为移动平板。入射宽度 $D=10\text{ mm}$,计算区域长度 $L=1\ 000\text{ mm}$,按最佳入射高度设定 $H=80\text{ mm}$,入口雷诺数 $Re=10\ 960$,变量为入射角 θ 、平板运动速度与入口流速之比为 R 。

图2为计算网格分布示意图,本文分别对 160×40 , 180×50 , 200×60 , 220×70 , 240×80 , 260×90 的正四边形结构网格进行网格数目对计算结果影响的模拟。计算结果表明,当网格分布达到 260×90 时,平板运动方向上的局部努赛尔数分布基本上不再发生变化,本文以下的模拟均采用这种形式的网格。采用加强壁面函数法,对壁面处的网格进行加密以保证第1个计算节点在壁面率 $y^+<5$ 以内。

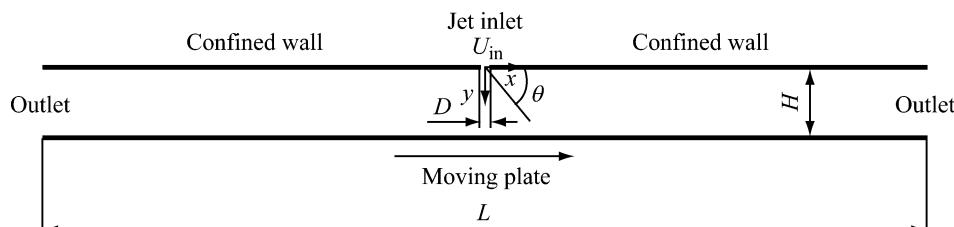


图1 二维射流模型图

Fig. 1 Schematic of two-dimensional jet structure



图2 二维模型的网格分布图

Fig. 2 Schematic of two-dimensional grid system

1.2 控制方程和湍流模型

对于射流流动和传热问题,其精确的数学描述方程是 Navier-Stokes 方程^[8]。系统控制方程如下:

连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \rho \left(\frac{\overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\overline{u'v'}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho \left(\frac{\overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\overline{v'^2}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

式中, u, v 分别表示直角坐标系下 x, y 方向上的平均速度; u', v' 为对应的脉动速度, p 表示平均压强; ρ, μ 则分别表示平均流体密度和气体动力黏度系数。

选用适当的湍流模型来封闭控制方程,主要有 $k-\epsilon$,RNG $k-\epsilon$,雷诺应力(RSM)等湍流模型。Craft 比较 $k-\epsilon$ 模型和雷诺应力方程对射流的模拟发

现,雷诺应力方程对壁面压力应变项的模拟精度更高^[9]。RSM在计算突扩流动分离区和计算湍流运输各向异性较强的流动时优于 $k-\epsilon$ 和RNG $k-\epsilon$ 模型,是一种非常有潜力的湍流模型。

2 边界条件和数值求解方法

本文以空气作为射流介质,其密度和黏度分别为 1.225 kg/m^3 和 $1.754 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。将图1所示的整个流场作为计算区域,采用有限容积法离散控制方程。其中,对流项采用延迟修正QUICK格式,扩散项采用中心差分格式,压力-速度耦合采用SIMPLIC算法。求解方程组需给定如下的边界条件:

(1) 采用均匀进口速度分布 $u_{in}=U_{in}\cos\theta, v_{in}=-U_{in}\sin\theta, k_{in}=0.01U_{in}^2, \epsilon_{in}=0.09k_{in}^{3/2}/(0.05D)$,其中, u_{in} 和 v_{in} 分别表示进口处射流在 x 和 y 方向的速度分量, k_{in} 和 ϵ_{in} 分别表示进口处的湍动能和湍动能耗散项。 θ 表示射流入口中心线与水平面的夹角, U_{in} 表示射流在入口的速度值。

(2) 将流场计算区域的出口放在足够远的下游处(取 $L=100D$),因此在出口选用局部单向化条件,即 $\frac{\partial u}{\partial x}=\frac{\partial v}{\partial x}=\frac{\partial k}{\partial x}=\frac{\partial \epsilon}{\partial x}=0$ 。

(3) 底部移动壁面内计算采用壁面函数法,顶部封闭板采用无滑移条件,即 $u_c=v_c=0$ 。而对于底部移动平板,条件为: $u_p=U_p, v_p=0$ 。其中, u_c 和 v_c 分别表示射流在封闭板处 x 和 y 方向的速度分量, u_p 和 v_p 则表示平板在 x 和 y 方向的速度分量, U_p 表示平板移动的速度值。

3 RSM模型实验验证

由于平板移动的斜射流方式缺少实验数据,无法直接比较数值模拟与实验数据间的吻合程度。但在半封闭垂直狭缝射流对移动平板流场分布的研究方面,Senter和Solliec^[7]已做了相关实验,得到了可靠的实验结果。Senter和Solliec研究了 $Re=10\,600$ 、入射高度 H 与入射宽度 D 之比为 $8:1$,移动板速与入口流速之比 R 分别为0和0.5时射流轴心线湍流强度的分布。本文采用RSM湍流模型对其进行模拟,得到无量纲化的射流轴心线速度(轴心线速度 w 与射流入口速度 U_{in} 之比)和湍流强度分布与实验值之间的对比,分别见图3和图4。其中, y/D 为入射深度;湍流强度(I)定义为:

$$I = \frac{\sqrt{w'^2}}{|\bar{w}|} \quad (4)$$

式中, w' 和 \bar{w} 分别表示射流轴心线上的湍流脉动速度与平均速度。从图3和图4可以看出,RSM模型对射流中心线的速度分布和湍流强度分布的模拟值与实验值具有很好的吻合性。因此,本文采用RSM模型对半封闭湍流狭缝射流冲击移动平板进行数值模拟。

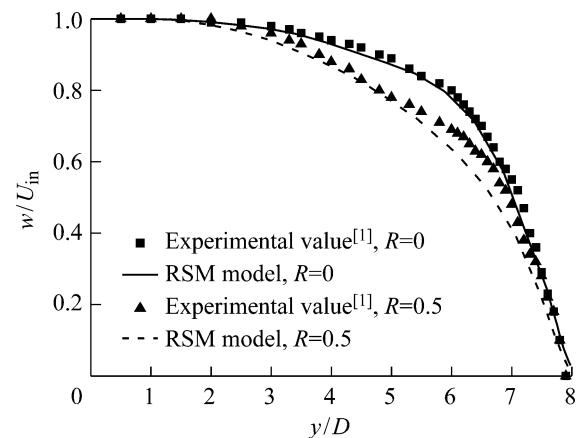


图3 射流口轴心线速度分布模拟值和实验值对比

Fig. 3 Comparison of the predicted axis velocity distribution along the jet centerline with the experimental data

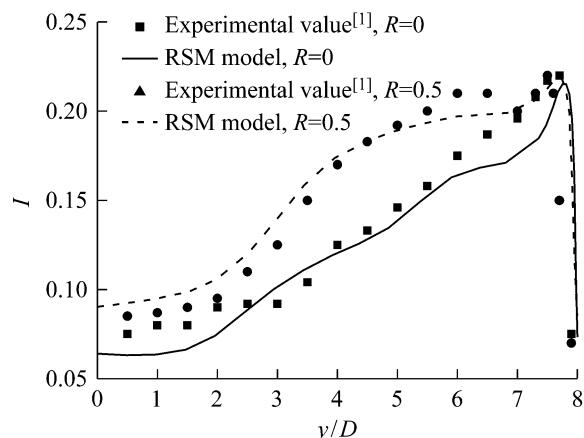


图4 射流口轴心线湍流强度分布的模拟值和实验值对比

Fig. 4 Comparison of the predicted axis turbulence intensity distribution along the jet centerline with the experimental data

4 计算结果与分析

4.1 射流角度和板速对计算区域流线分布的影响

半封闭淹没冲击射流的一个重要特征就是在射流到达壁面后会形成一个环形回流区,这是冲击板

与上封闭板共同作用的结果。对于半封闭空气斜射流,由于上封闭板的作用,在低入射角下射流的卷吸作用使得射流在未到达平板后就向一侧出口发展,因此把射入角大于 70° 的斜射流作为研究对象。

Fitzgerald^[10]对半封闭平板射流的研究发现,入口雷诺数的变化对流场结构和近壁处湍流分布影响较小,因此本文只对入口雷诺数 $Re=10\,960$ 下射流流场进行分析。图 5 为入口雷诺数 $Re=10\,960$ 的射流在不同 R 和不同射角 θ 下的流函数分布图。当射流垂直入射且平板静止时,形成的流线关于射流中心线对称,在流场的两侧形成对称的环形回流区;随着板速的增加,流场左右区域的流函数分布不对称性越发显著,左半回流区逐渐变小,右半回流区则逐渐拉长。当 $R=2.0$ 时,左侧出口处由于向右

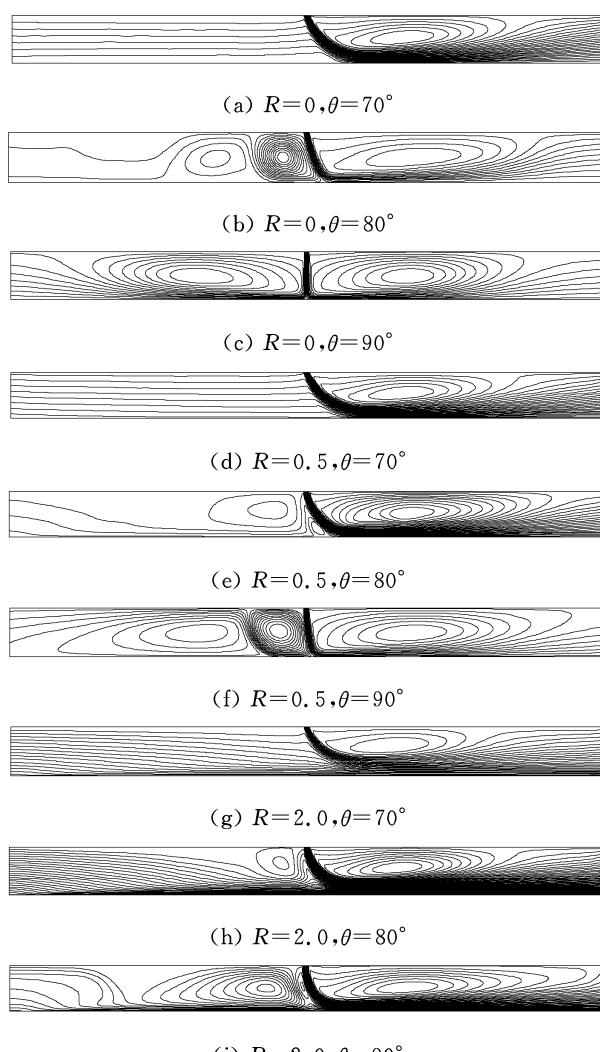


图 5 $Re=10\,960$ 下不同板速和射角下的流函数分布图
Fig. 5 Stream function distribution under different plate velocities and jet angles at $Re=10\,960$

运动的平板而产生了回流,卷入了外界气体。当射流角减小时,流场左右也出现了流函数不对称性,且随着射角的减小,呈现出越来越强的不对称性。与增加板速产生的效果类似,左半边的环形回流区随射角的减小而变小,右半回流区则拉长。当射角为 70° 时,流场左半边的回流区几乎消失,这是由于偏转的射流卷吸以及平板移动共同影响的结果,在左侧出口处卷入了外界气体。

4.2 射流角度和板速对流场内不同入射深度处湍流强度分布的影响

如图 6 所示,当平板静止且垂直入射时,沿平板长度方向上各截面处(x/D)的湍流强度分布相对射流中心线左右对称,射流中心线处的湍流强度随入射深度 y/D 的增大而增大,而在射流外围,由于卷吸作用产生了较强的湍动能,此处湍流强度峰值随 y/D 的增大而减小。Zhou 和 Lee^[11]对垂直入射的静止平板在不同截面处的湍流强度分布的试验研究也得到了相同的结论。由于环形回流区的影响,在回流区也会产生二次湍流强度峰值。当平板静止时,斜射流在流场右半区域产生的湍流强度值要大于垂直入射时的湍流强度值,而流场左半区域湍流强度值随射角的减小而显著降低。当 $\theta=80^\circ$ 时,流场左半区域伴随二次回流区的产生,在相应位置也出现了湍流强度峰值。 $y/D=7.98$ 处为平板壁面附近,由于黏性力的作用,壁面附近湍流强度值相对较低。

当平板开始运动时,射流向平板运动方向偏转,且越靠近壁面,不对称性就越强。板速的提高使右半区域在垂直入射下湍流强度值与斜射流下的值的差距开始缩小。当板速较低且 y/D 较小时,提高板速可使二次回流范围减小,导致左半区域湍流强度在离开射流中心区域后下降更快,而左半区域整体湍流强度分布随着板速的增大而有所提高。随着 y/D 的增大,射角引起湍流强度的差异逐渐减小,特别是当 $R=2.0$ 时,平板壁面处的湍流强度分布相近。越靠近平板壁面处,板速对湍动能影响越大,加大板速能提高近壁附近左右两侧区域湍流强度分布值。在近壁面处,射角越大,产生的湍流强度峰值越高。

为了确定射角和板速对近壁面湍流强度整体分布的影响,定义湍流强度值在平板长度方向上的积分,即 $\bar{I} = \int_{-50}^{50} I dx$ 为湍流强度平均分布值。图 7 为不同 y/D 处、不同射角下,沿平板方向的湍流强度的平均分布值随 R 的变化图。在相同的平板运动

速度即 R 和 y/D 下, 入射角的减小会降低湍流强度平均值。随着 y/D 的增大, 平板运动速度对湍流强度分布的影响逐渐增强。特别是在近壁处, 黏度导致湍动能较低, 板速的提高能显著提高近壁处的湍

流强度值。当板速大于入口射速的一半时, 近壁处湍流强度大幅提高, 使得射流与壁面处的传热传质效率也大幅提高。

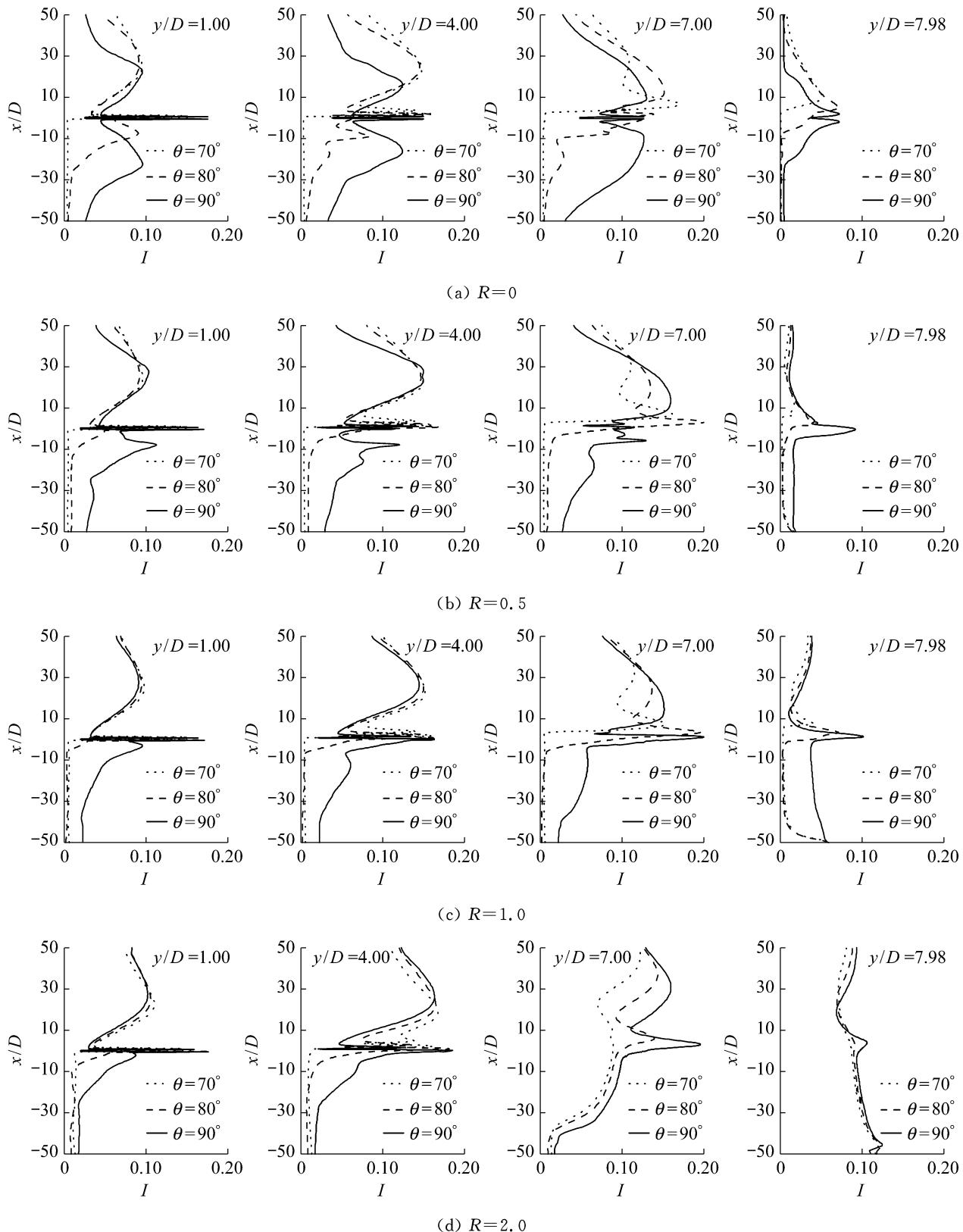


图 6 不同截面处湍流强度随 R 的变化

Fig. 6 Turbulence intensity distribution at different sections with R

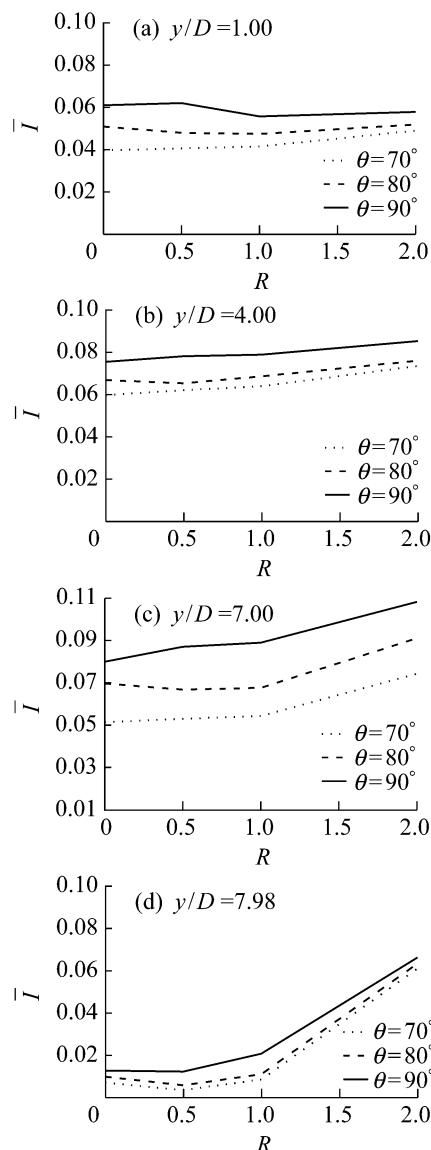
图 7 不同截面处湍流强度平均分布值随 R 的变化

Fig. 7 Average turbulence intensity distribution at different sections with R

4.3 射流角度和板速对平板表面剪切应力系数分布的影响

图 8 表示表面剪切应力系数 C_f 随板速和射角变化的分布。图中表面剪切应力系数定义为：

$$C_f = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=80} / \left(\frac{\rho U_{in}^2}{2} \right) \quad (5)$$

当平板静止时,由于射流的冲击作用,滞止点附近的速度边界层较薄,此处的速度梯度也最高,因此在射流滞止点附近出现了剪切应力系数峰值。当板速略有提高时,平板面 $\mu(\partial u / \partial y)_{y=80}$ 开始降低,峰值变小。随着板速的大幅升高,剪切应力系数曲线越发光滑且其值在整个平板表面有了显著的提高。当板速较低时,减小射流角度降低了滞止点附近的峰值分布,增强了曲线的不对称性,而不同射角下剪切

应力曲线在分布上的差异随着 R 值的增大而减小。

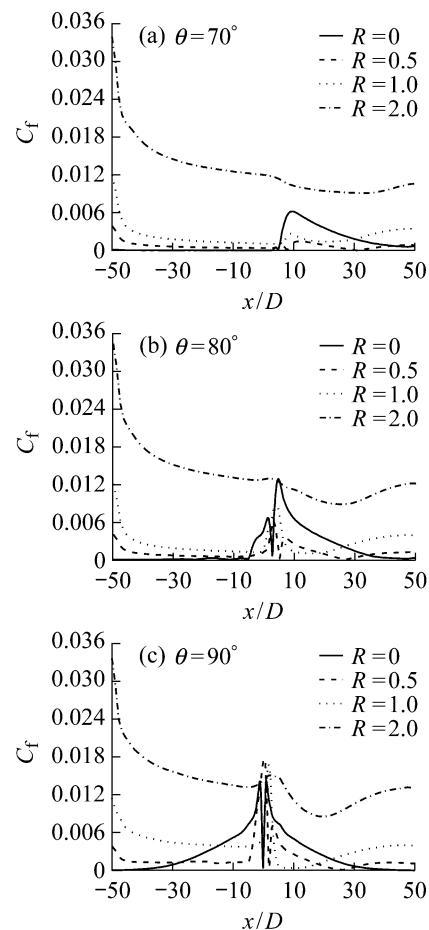


图 8 平板表面剪切应力系数随板速和射角的变化

Fig. 8 Skin friction coefficient distribution on the plate surface with different plate velocities and jet angles

5 结 论

(1) 射角的减小和板速的提高都能使流场结构呈现非对称性,并使流场右半部分的环形回流区范围增大,左半部分的回流区范围减小,且在流场左半部分产生了二次回流区。在较低射角或较高板速下,左侧口处有外界气体卷入流场。

(2) 当平板静止时,不同 y/D 下斜射流产生的湍流强度值在流场右半区域要大于垂直入射时的分布值,而随着板速的增加,角度的变化对右半区域的湍动能影响减小。当板速和 y/D 相同时,整体湍流强度平均分布值随着射角的减小而减小。

(3) 平板运动速度对湍流强度分布的影响随 y/D 的增加而逐渐增强。近壁处,射角的影响也随着板速的提高而减弱。当平板速度与入口射速之比 R 为 2.0 时,近壁面处的湍流强度增强约 5 倍。板速的提高能大大提高近壁面处的湍动能,因而可显

著增强与壁面间的传热传质效率。

(4) 垂直入射时,射流在滞止点附近产生的剪切应力最高。随着板速的增加,剪切应力系数在滞止点附近的分布值先减小后增大,分布曲线越发光滑。当板速大于2倍入口射流流速时,平板表面整体剪切应力系数大大提高。

参考文献:

- [1] 李东生,吴建国.平面射流的数值模拟研究[J].冶金能源,2001,20(6):42-45.
- [2] Choo K S, Kim S J. Comparison of thermal characteristics of confined and unconfined impinging jets [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(15): 3366-3371.
- [3] Baydar E, Ozmen Y. An experimental investigation on flow structures of confined and unconfined impinging air jets[J]. Heat Mass Transfer, 2006, 42(4): 338-346.
- [4] Chiriac V A, Ortega A. A numerical study of the unsteady flow and heat transfer in a transitional confined slot jet impinging on an isothermal surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(6): 1237-1248.
- [5] Gori F, Bossi L. Optimal slot height in the jet cooling of a circular cylinder[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(7): 859-870.
- [6] Sharif M A R, Banerjee A. Numerical analysis of heat transfer due to confined slot-jet impingement on a moving plate [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(2): 532-540.
- [7] Senter J, Solleic C. Flow field analysis of a turbulent slot air jet impinging on a moving flat surface[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, 28(4): 708-719.
- [8] 刘沛清.自由紊动射流理论[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [9] Craft T J, Graham L J W, Launder B E. Impinging jet studies for turbulence model assessment: II. An examination of the performance of four turbulence models[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1993, 36(10): 2685-2697.
- [10] Fitzgerald J A, Garimella S V. A study of the flow field of a confined and submerged impinging jet[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(8): 1025-1034.
- [11] Lee S J. Heat transfer enhancement of impinging jets using mesh screens[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(10): 2097-2108.

第13届亚洲化学大会论文摘要

Extraction of Thiophene from Model Gasoline with Brønsted Acidic Ionic Liquids

WANG X M¹, HAN M J², WAN H¹, GUANG F^{1*}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering; 2. College of Sciences,
Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: Brønsted acidic ionic liquids, $[\text{Hmim}] \text{HSO}_4$ and $[\text{HNMP}] \text{HSO}_4$, were synthesized and employed as extractant to extract thiophene from model gasoline. The effect of temperature, time, ratio of ionic liquids to model gasoline on desulfurization rate was discussed, respectively. Then, the optimal desulfurization conditions were obtained: ratio of ionic liquids to model gasoline is 1 : 1, extraction temperature is in the range of 50—60 °C and extraction time is 60 min. Under the optimal conditions, the desulfurization rate of $[\text{HNMP}] \text{HSO}_4$ for model gasoline is 62.8%, which is higher than that (55.5%) of $[\text{Hmim}] \text{HSO}_4$. Meanwhile, the total desulfurization rate of $[\text{HNMP}] \text{HSO}_4$ and $[\text{Hmim}] \text{HSO}_4$ reaches 96.4% and 95.9% by multistage extraction, respectively. Furthermore, the used ionic liquids can be reused by vacuum drying, and their desulfurization rates are not significantly decreased after recycling 7 times in single-stage desulfurization. And the extraction mechanism of thiophene with bronsted ionic liquids was investigated.