

热幅射对抽吸或喷射三维 Couette 流 温度分布的影响*

B·K·夏玛, M·阿加威尔, R·C·乔德哈瑞

(拉贾斯坦大学 数学系, 斋浦尔-302004, 印度)

(周哲玮推荐)

摘要: 在固定的底板上有横向正弦射流, 而匀速运动的多孔介质顶板以常速率完全抽出的情况下, 理论分析了热幅射对三维 Couette 流动温度分布的影响. 在这种射流速度下, 流动呈现三维流动. 利用图形分析了 Prandtl 数、幅射参数和射流参数对传热速率的影响. Prandtl 数对温度分布的影响比射流参数或幅射参数大得多.

关键词: Couette 流动; 三维; 传热; 幅射; 不可压

中图分类号: O357.3;TK123 文献标识码: A

引 言

蒸发冷却对保护涡轮喷气发动机和火箭发动机中某些零件是十分有效的, 如像燃烧室壁、受热气作用的喷嘴或涡轮机叶片. Eckert^[1]得到了具有蒸发冷却的平面 Couette 流动的精确解. 层流控制问题是航空工程领域非常重要的问题. 它可以减低航空器的阻力, 从而增大航空器的实际动力. 促使层流边界层向湍流边界层转化的途径之一, 是通过壁上的孔隙或狭缝将流动介质抽吸掉. 各种理论和实验研究结果已发展了层流控制(LFC)系统, 其目的明显是通过合理设计抽吸孔隙或狭缝的位置和形状, 来减少航空器所需要的能量^[2]. 已经对各种尺度的孔隙和缝隙进行了广泛的实验. 在这些不同形状的孔隙和狭缝的吸入口间是不可渗透的, 这在理论上符合吸入口为连续变化吸入区域的假设. 一种可能的抽吸分布是横向正弦分布. Gersten 和 Gross^[3]研究了平面壁具有周期抽吸的流动和传热问题. Singh 等人^[4-5]和 Singh^[6-8]还研究了抽吸速度对沿平行和垂直多孔板的流动和传热的影响.

在许多工程应用中, 都是外部气体(即 H_2 、 O_2 和 CO_2 等)的喷入, 这会引起壁面剪应力和传热速率的减小. 而通常用蒸发材料涂在物体的壁面上, 当物体受热以及物体与通过的气流有混合作用时, 产生的蒸发气流起到喷射的作用. Chaudhary 和 Shama^[9]、Singh^[10]和 Sounda-gekar^[11]研究了喷射和抽吸对三维不稳定流动和传热的影响.

* 收稿日期: 2006-03-07; 修订日期: 2007-01-12

作者简介: B·K·夏玛(E-mail: bhupen1402@yahoo.com);

M·阿加威尔(E-mail: mamta008@rediffmail.com);

R·C·乔德哈瑞, 教授, 博士(联系人, E-mail: rcchaudhary@rediffmail.com).

本文原文为英文, 吴承平译, 林建忠校.

上述研究中,忽略了热幅射的作用. 由于此问题对航天器再入问题极其有用,幅射传热的研究具有新的拓展. 工程中的很多过程是在高温时发生的,因此,在相应设备的设计中,幅射传热变得非常重要. 核动力飞机、燃气轮机和航空器、导弹、人造卫星和航天器的各种推进器,就是实例. 在高运行温度下,幅射的作用非常显著(见 Hassan 的文献[12]、Ghaly 和 Elbarbary 的文献[13]、Raptis 和 Perdikis 的文献[14]). Seddeek^[15]研究了当流体流经带幅射的连续运动的多孔边界时,可变粘性对磁流体流动和传热的影响. Takhar 等人^[16]讨论了幅射对通过直立板流动的影响.

然而,据作者所知,目前文献中,尚无关于正弦喷射或抽吸速度下,幅射对温度分布影响的研究. 因此,本文研究通道内固定平板上有横向正弦喷入时,三维 Couette 流动中,热幅射对温度分布和蒸发冷却的影响.

1 理论分析及解

研究两平行多孔平板间,不可压缩粘性流体的 Couette 流动,见图 1. 选择坐标系,使板位于 $x^* - z^*$ 水平面上, y^* 轴垂直于板平面. 顶板以速度 U 匀速运动,常抽吸速度为 V_0 ; 底板向流场以横向正弦喷射,速度分布为

$$v^*(z^*) = V_0(1 + \epsilon \cos \pi z^*/d), \quad (1)$$

其中 ϵ 为正常数, d 为两板间距离. 设底板温度为 T_0 , 顶板温度为 T_1 , $T_1 > T_0$. 本问题为充分发展层流,所以所有物理量均与 x^* 无关,但是由喷射速度(1)式可知,流动仍然是三维的. 因此,按通常的 Boussinesq 假设,流动控制方程为:

连续性方程

$$v_y^* + w_z^* = 0, \quad (2)$$

动量方程

$$\rho^*(v^* u_y^* + w^* u_z^*) = \mu(u_y^{*2} + u_z^{*2}), \quad (3)$$

$$\rho^*(v^* v_y^* + w^* v_z^*) = -p_y^* + \mu(v_y^{*2} + v_z^{*2}), \quad (4)$$

$$\rho^*(v^* w_y^* + w^* w_z^*) = -p_z^* + \mu(w_y^{*2} + w_z^{*2}), \quad (5)$$

能量方程

$$\rho^* C_p (v^* T_y^* + w^* T_z^*) = k(T_y^{*2} + T_z^{*2}) - q_r^*, \quad (6)$$

边界条件

$$\begin{cases} y^* = 0; u^* = 0, v^* = V_0(1 + \epsilon \cos \pi z^*/d), w^* = 0, T^* = T_0, \\ y^* = d; u^* = U, v^* = V_0, w^* = 0, T^* = T_1, \end{cases} \quad (7)$$

引进以下无量纲化参数

$$y = y^*/d, z = z^*/d, u = u^*/U, v = v^*/V_0, w = w^*/V_0,$$

$$p = p^*/\rho V_0^2, \theta = (T^* - T_0)/(T_1 - T_0),$$

喷射参数 $\lambda = V_0 d / \nu$, Prandtl 数 $Pr = \nu / \alpha$, 幅射参数 $F = 4I^* d / (\rho C_p V_0)$. $\rho, \nu, \alpha, p, C_p$ 分别为密度、动力粘度、热扩散系数、压力、常压下比热容, q_r^* 为幅射热通量. 有“*”号的量,表示无量纲量.

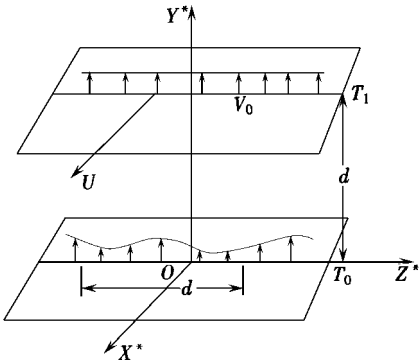


图 1 多孔板上周期喷射和常抽吸的 Couette 流动

对所有波长的辐射, 其单位体积辐射转换(包括各个方向辐射来的能量)的守恒方程为

$$\nabla \cdot q_r^* = \int_0^\infty K_\lambda(T^*) (4e_M(T^*) - G_\lambda) d\lambda$$

其中 e_M 为 Plank 函数, 射入的辐射 G_λ 定义为

$$G_\lambda = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega=4\pi} e_\lambda(\Omega) d\Omega,$$

其中 $\nabla \cdot q_r^*$ 为辐射通量的散度, Ω 为空间角. 当光学意义上的稀薄流体与温度为 T_0 的等温平板产生辐射交换时, 按上述辐射通量散度的定义和 Kirchhoffs 定律, 射入的辐射为 $G_\lambda = 4e_M(T_0)$, 则

$$\nabla \cdot q_r^* = 4 \int_0^\infty K_\lambda(T^*) (e_M(T^*) - e_M(T_0)) d\lambda$$

当 $T^* - T_0$ 很小, 将 $K_\lambda(T^*)$ 和 $e_M(T_0)$ 按 T_0 作 Taylor 级数展开, 则辐射通量的散度为

$$\nabla \cdot q_r^* = 4(T^* - T_0) \int_0^\infty K_{\lambda_0} \left[\frac{\partial e_M}{\partial T} \right]_0 d\lambda$$

其中 $K_{\lambda_0} = K_\lambda(T_0)$.

因此, 一种光学意义上的极稀薄流体, 在平衡点附近为非灰气体时, 如下关系式成立 $\nabla \cdot q_r^* = 4(T^* - T_0)I$.

则

$$q_{r_y}^* = 4(T^* - T_0)I, \quad (8)$$

其中 $I = \int_0^\infty K_{\lambda_0} \left[\frac{\partial e_M}{\partial T} \right]_0 d\lambda$.

记 x, y, z 方向的速度分量为 u, v, w , 温度为 θ , 无量纲流动控制方程为

$$v_y + w_z = 0, \quad (9)$$

$$vu_y + wu_z = (u_{yy} + u_{zz})/\lambda, \quad (10)$$

$$w_y + wv_z = -p_y + (v_{yy} + v_{zz})/\lambda, \quad (11)$$

$$uw_y + ww_z = -p_z + (w_{yy} + w_{zz})/\lambda, \quad (12)$$

$$v\theta_y + w\theta_z = (\theta_{yy} + \theta_{zz})/(NPr) - F\theta, \quad (13)$$

无量纲边界条件为

$$\begin{cases} y = 0: u = 0, v(z) = 1 + \epsilon \cos \pi z, w = 0, \theta = 0, \\ y = 1: u = 1, v = 1, w = 0, \theta = 1. \end{cases} \quad (14)$$

由于喷射速度的幅度 ($\epsilon \ll 1$) 非常小, 设其解为

$$f(y, z) = f_0(y) + \epsilon f_1(y, z) + \epsilon^2 f_2(y, z) + \dots \quad (15)$$

其中 f 代表 u, v, w, p 和 θ 中的任意一个. 当 $\epsilon = 0$, 问题退化为两板间常喷射、抽吸的二维流动问题. 此时的解为

$$u_0(y) = \frac{e^{\lambda y} - 1}{e^\lambda - 1}, v_0 = 1, w_0 = 0, p_0 = \text{const}, \theta_0(y) = \frac{e^{n_1 y} - e^{n_2 y}}{e^{n_1} - e^{n_2}}, \quad (16)$$

其中 $n_1 = \frac{NPr + \sqrt{\lambda^2 Pr^2 + 4NPrF}}{2}, n_2 = \frac{NPr - \sqrt{\lambda^2 Pr^2 + 4NPrF}}{2}$.

当 $\epsilon \neq 0$, 将方程(15)代入方程(9)到(13)式, 比较 ϵ 相同幂次项的系数, 略去 ϵ^2, ϵ^3 等项, 利用解(16)式得到如下 1 阶方程组:

$$v_1 y + w_1 z = 0, \quad (17)$$

$$v_1 u_{0y} + u_1 y = (u_{1yy} + u_{1zz})/\lambda, \quad (18)$$

$$v_{1y} = -p_{1y} + (v_{1yy} + v_{1zz})/\lambda \quad (19)$$

$$w_{1y} = -p_{1z} + (w_{1yy} + w_{1zz})/\lambda \quad (20)$$

$$v_1\theta_{0y} + \theta_{1y} = (\theta_{1yy} + \theta_{1zz})/(\lambda Pr) - F\theta_1. \quad (21)$$

对应的边界条件为

$$\begin{cases} y = 0: u_1 = 0, v_1 = \cos\pi z, w_1 = 0, \theta_1 = 0, \\ y = 1: u_1 = 0, v_1 = 0, w_1 = 0, \theta_1 = 0. \end{cases} \quad (22)$$

这就是描述三维 Couette 流动的线性偏微分方程组.

为求解这一方程组,我们先考虑(17)式、(19)式和(20)式,它们与主流速分量 u_1 和温度场 θ_1 无关. 设 v_1, w_1, p_1 为

$$v_1(y, z) = v_{11}(y)\cos\pi z, \quad (23)$$

$$w_1(y, z) = -(1/\pi)v'_{11}(y)\sin\pi z, \quad (24)$$

$$p_1(y, z) = p_{11}(y)\cos\pi z, \quad (25)$$

其中“ $'$ ”表示求 y 的导数. (23)式和(25)式满足连续性方程(17). 将(23)式至(25)式代入(19)式和(20)式,并利用相应的转换边界条件,得

$$v_1(y, z) = (1/A)(A_1e^{r_1y} + A_2e^{r_2y} - A_3e^{\pi y} - A_4e^{-\pi y})\cos\pi z, \quad (26)$$

$$w_1(y, z) = -(1/\pi A)(A_1r_1e^{r_1y} + A_2r_2e^{r_2y} - \pi A_3e^{\pi y} + \pi A_4e^{-\pi y})\sin\pi z, \quad (27)$$

$$p_1(y, z) = (1/A)(A_3e^{\pi y} + A_4e^{-\pi y})\cos\pi z. \quad (28)$$

设 u_1 和 θ_1 为

$$u_1(y, z) = u_{11}(y)\cos\pi z, \quad (29)$$

$$\theta_1(y, z) = \theta_{11}(y)\cos\pi z. \quad (30)$$

将(29)式、(30)式代入(18)式和(21)式,得

$$u''_{11} - \lambda u'_{11} - \pi^2 u_{11} = \lambda u_{11} u_0, \quad (31)$$

$$\theta''_{11} - \lambda Pr \theta'_{11} - (\pi^2 + F)\theta_{11} = \lambda Pr v_{11} \theta_0, \quad (32)$$

对应的边界条件为

$$\begin{cases} y = 0: u_{11} = 0, \theta_{11} = 0, \\ y = 1: u_{11} = 0, \theta_{11} = 0, \end{cases} \quad (33)$$

其中“ $'$ ”表示求 y 的导数. 在边界条件(33)式下,解(31)式和(32)式,得

$$u_1(y, z) = \left[R e^{r_1 y} + S e^{r_2 y} + \frac{\lambda}{A(e^\lambda - 1)} \left\{ \frac{A_1}{2r_1} e^{(\lambda + r_1)y} + \frac{A_2}{2r_2} e^{(\lambda + r_2)y} - \frac{A_3}{\pi} e^{(\lambda + \pi)y} + \frac{A_4}{\pi} e^{(\lambda - \pi)y} \right\} \right] \cos\pi z, \quad (34)$$

$$\theta_1(y) = [c_1 e^{(r_1 + n_1)y} - c_2 e^{(r_1 + n_2)y} + c_3 e^{(r_2 + n_1)y} - c_4 e^{(r_2 + n_2)y} - c_5 e^{(\pi + n_1)y} + c_6 e^{(\pi + n_2)y} - c_7 e^{(n_1 - \pi)y} + c_8 e^{(n_2 - \pi)y} + c_{11} e^{n_3 y} + c_{12} e^{n_4 y}] \cos\pi z, \quad (35)$$

其中

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{1}{2}(\lambda - \sqrt{\lambda^2 + 4\pi^2}), \quad r_2 = \frac{1}{2}(\lambda + \sqrt{\lambda^2 + 4\pi^2}), \\ A &= 2(r_2 - r_1) \left\{ 1 + e^{r_1 + r_2} \right\} - \left\{ (r_2 - r_1) + 2\pi \right\} \left\{ e^{r_1 + \pi} + e^{r_2 - \pi} \right\} - \\ &\quad \left\{ (r_2 - r_1) - 2\pi \right\} \left\{ e^{r_1 - \pi} + e^{r_2 + \pi} \right\}, \\ A_1 &= (\pi - r_2) e^{r_2 + \pi} - (\pi + r_2) e^{r_2 - \pi} + 2r_2, \\ A_2 &= (\pi + r_1) e^{r_1 - \pi} - (\pi - r_1) e^{r_1 + \pi} - 2r_1, \\ A_3 &= (r_1 - r_2) e^{r_1 + r_2} + (r_2 - \pi) e^{r_1 - \pi} - (r_1 - \pi) e^{r_2 - \pi}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_4 &= (r_1 - r_2)e^{r_1+r_2} + (r_2 + \pi)e^{r_1+\pi} - (r_1 + \pi)e^{r_2+\pi}, \\
 c_1 &= \mathcal{N}PrA_1n_1/[A(e^{n_1} - e^{n_2})\{(r_1 + n_1)^2 - \mathcal{N}Pr(r_1 + n_1) - (\pi^2 + F)\}], \\
 c_2 &= \mathcal{N}PrA_1n_2/[A(e^{n_1} - e^{n_2})\{(r_1 + n_2)^2 - \mathcal{N}Pr(r_1 + n_2) - (\pi^2 + F)\}], \\
 c_3 &= \mathcal{N}PrA_2n_1/[A(e^{n_1} - e^{n_2})\{(r_2 + n_1)^2 - \mathcal{N}Pr(r_2 + n_1) - (\pi^2 + F)\}], \\
 c_4 &= \mathcal{N}PrA_2n_2/[A(e^{n_1} - e^{n_2})\{(r_2 + n_2)^2 - \mathcal{N}Pr(r_2 + n_2) - (\pi^2 + F)\}], \\
 c_5 &= \mathcal{N}PrA_3n_1/[A(e^{n_1} - e^{n_2})\{(\pi + n_1)^2 - \mathcal{N}Pr(\pi + n_1) - (\pi^2 + F)\}], \\
 c_6 &= \mathcal{N}PrA_3n_2/[A(e^{n_1} - e^{n_2})\{(\pi + n_2)^2 - \mathcal{N}Pr(\pi + n_2) - (\pi^2 + F)\}], \\
 c_7 &= \mathcal{N}PrA_4n_1/[A(e^{n_1} - e^{n_2})\{(n_1 - \pi)^2 - \mathcal{N}Pr(n_1 - \pi) - (\pi^2 + F)\}], \\
 c_8 &= \mathcal{N}PrA_4n_2/[A(e^{n_1} - e^{n_2})\{(n_2 - \pi)^2 - \mathcal{N}Pr(n_2 - \pi) - (\pi^2 + F)\}], \\
 c_9 &= c_1 - c_2 + c_3 - c_4 - c_5 + c_6 - c_7 + c_8, \\
 c_{10} &= c_1e^{(r_1+n_1)} - c_2e^{(r_1+n_2)} + c_3e^{(r_2+n_1)} - c_4e^{(r_2+n_2)} - \\
 &\quad c_5e^{(\pi+n_1)} + c_6e^{(\pi+n_2)} - c_7e^{(n_1-\pi)} + c_8e^{(n_2-\pi)}, \\
 c_{11} &= \frac{c_9e^{n_4} - c_{10}}{e^{n_3} - e^{n_4}}, \quad c_{12} = \frac{c_{10} - c_9e^{n_3}}{e^{n_3} - e^{n_4}}, \\
 n_3 &= \frac{\mathcal{N}Pr + \sqrt{\lambda^2 Pr^2 + 4(\pi^2 + F)}}{2}, \quad n_4 = \frac{\mathcal{N}Pr - \sqrt{\lambda^2 Pr^2 + 4(\pi^2 + F)}}{2}, \\
 R &= \frac{\lambda}{A(e^\lambda - 1)(e^{r_1} - e^{r_2})} \left[\frac{A_1}{2r_1} \{e^{r_2} - e^{(\lambda+r_2)}\} + \frac{A_2}{2r_2} \{e^{r_2} - e^{(\lambda+r_2)}\} - \right. \\
 &\quad \left. \frac{A_3}{\pi} \{e^{r_2} - e^{(\lambda+\pi)}\} + \frac{A_4}{\pi} \{e^{r_2} - e^{(\lambda+\pi)}\} \right], \\
 S &= \frac{\lambda}{A(e^\lambda - 1)(e^{r_1} - e^{r_2})} \left[\frac{A_1}{2r_1} \{e^{(\lambda+r_1)} - e^{r_1}\} + \frac{A_2}{2r_2} \{e^{(\lambda+r_2)} - e^{r_1}\} - \right. \\
 &\quad \left. \frac{A_3}{\pi} \{e^{(\lambda+\pi)} - e^{r_1}\} + \frac{A_4}{\pi} \{e^{(\lambda+\pi)} - e^{r_1}\} \right].
 \end{aligned}$$

2 讨 论

为了了解问题的物理本质,我们给出了速度、温度、传热速率在不同参数时的数值结果.

在 1 个大气压下, 20℃ 时, 对空气和水, Prandtl 数分别取 $Pr = 0.71$ 和 $Pr = 7.0$. 辐射参数 $F = 1.0, F = 2.0, F = 3.0, F = 4.0$, 任取入射参数 $\lambda = 0.5, \lambda = 1.0$.

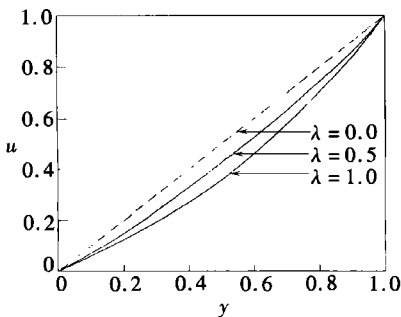


图 2 $z = 0, \epsilon = 0.2$ 时主流速度剖面

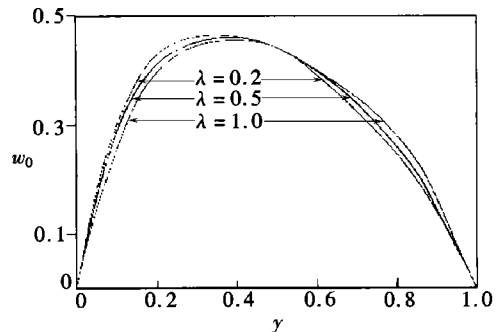


图 3 $z = 0.5$ 时横向流速

图 2 给出了 $z = 0$ 和 $\epsilon = 0.2$ 时的主流速度剖面. 在没有喷射和抽吸时, 虚线表示熟知的 Couette 流动解. 图 2 表明, 当有喷射时, 速度呈指数型减小. 高速喷射, 减小更甚. 速度的极

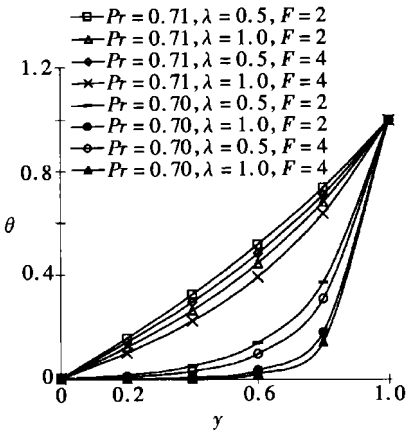


图4 z = 0, ε = 0.2时的温度分布

大值和极小值发生在板上, 它们等于板的速度. 在某些喷射参数下, 横向正弦喷射速度引起的二次流动速度分量 w_1 示于图3. 流体中速度的极大值, 产生在离固定板不远处. 有趣的是, 在下半平面, 横向流动速度分量 w_1 随喷射/抽吸参数 λ 的增大而减小; 而在上半平面, λ 对 w_1 的影响则相反. 这是由于在固定板上有射流, 在匀速运动板上有抽吸, 二者是正好相反的过程.

为了得出幅射对温度分布的影响(固定底板上有横向正弦喷射, 顶板有对应抽吸的三维 Couette 流动), 还须进行如下讨论. $z = 0$ 时温度剖面示于图4. 在板间区域, 流体将被加热到移动板温度以下, 板保持温度的极大值, 因此, 温度极大值发生在板上. 当喷射速率增大

时, 在幅射区域产生冷却. 我们发现, 空气的温度高于水, 这大概是由于热边界层厚度随 Prandtl 数的增大而减小. 当 $Pr = 7$ (水) 时, 温度由板保持的高温呈指数型减小. 对大的 λ 而言, 减小更甚. 温度的极大值和极小值分别出现在两板上. 有趣的是, 在相同的幅射参数下, 这一温度的衰减, 水($Pr = 7.0$) 大于空气($Pr = 0.71$). 进一步可以观察到, 温度随着两板间距的增加而增加; 对于空气和水, 温度随幅射参数增大而降低.

由温度场, 我们可以计算出无量纲传热速率

$$q = \frac{d \cdot q^*}{k(T_1 - T_0)} = \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)_{y=0} = \left(\frac{\partial \theta_0}{\partial y} \right)_{y=0} + \epsilon \left(\frac{\partial \theta_1}{\partial y} \right)_{y=0} \tag{36}$$

相对在幅射情况下的喷射参数 (λ), 空气和水的传热速率分别示于图5和图6. 当 $\lambda = 0.4$ 时, 传热速率保持为常数(~ 0), 此后随喷射参数增大而呈指数减小. 同时水比空气减小更大.

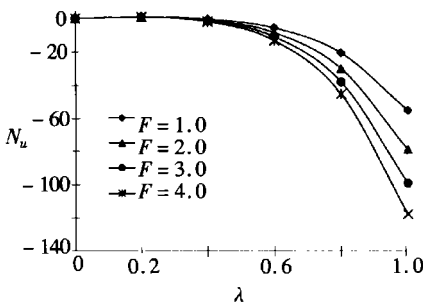


图5 z = 0, ε = 0.2, Pr = 0.71 时传热速率

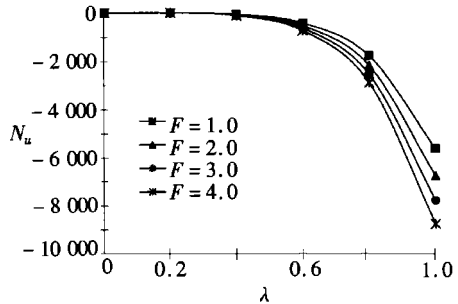


图6 z = 0, ε = 0.2, Pr = 7.0 时传热速率

感谢 作者感谢新德里 CSIR Senior/Junior 研究奖学金的资助.

[参 考 文 献]

[1] Eckert E R. Heat and Mass Transfer [M]. New York: McGraw Hill, 1958.
 [2] Lachmann G V. Boundary Layer and Flow Control. Its Principle and Applications, Vols I and II [M]. New York: Pergamon Press, 1961.
 [3] Gersten K, Gross J F. Flow and heat transfer along a plane wall with periodic suction[J]. ZAMP, 1974, 25(3): 399-408.
 [4] Singh P, Sharma V P, Misra U N. Three dimensional free convection flow and heat transfer along a

- porous vertical wall[J]. *Appl Sci Res*, 1978, **34**(1): 105-115.
- [5] Singh P, Sharma V P, Misra U N. Three dimensional fluctuating flow and heat transfer along a plate with suction[J]. *Internat J Heat Mass Transfer*, 1978, **21**: 1117-1123.
- [6] Singh K D. Hydromagnetic effects on the three-dimensional flow past a porous plate[J]. *Appl Math Phys (ZAMP)*, 1990, **41**(3): 441-446.
- [7] Singh K D. Three-dimensional viscous flow and heat transfer along a porous plate[J]. *J Appl Math Mech (ZAMM)*, 1993, **73**: 58-61.
- [8] Singh K D. Three dimensional couette flow with transpiration cooling[J]. *ZAMP*, 1999, **50**: 661-668.
- [9] Chaudhary R C, Sharma Bhupendra Kumar. Injection and suction effects of three dimensional unsteady flow and heat transfer between two parallel porous plates[J]. *Mathematicas*, 2003, **2**(1): 45.
- [10] Singh K D. Unsteady free convective flow past a hot vertical porous plate with variable temperature [J]. *Proc Indian Natn Sci Acad*, 1992, **58A**(6): 537.
- [11] Soundalgekar V M, Wavre P D. Unsteady free convection flow past an infinite vertical plate with constant suction and mass transfer[J]. *Internat J Heat Mass Transfer*, 1977, **20**(12): 1363-1373.
- [12] Hassan A M, El-Arabawy. Effect of suction/ injection on the flow of a micropolar fluid past a continuously moving plate in the presence of radiation[J]. *Internat J Heat Mass Transfer*, 2003, **46**(8): 1471-1477.
- [13] Ghaly A Y, Elbarbary E M E. Radiation effect on MHD free-convection flow of a gas at a stretching surface with a uniform free stream[J]. *J Appl Math*, 2002, **2**(2): 93-103.
- [14] Raptis A, Perdikis C. Viscoelastic flow by the presence of radiation[J]. *ZAMM*, 1998, **78**(4): 277-279.
- [15] Seddeek M A. The effect of variable viscosity on hydromagnetic flow and heat transfer past a continuously moving porous boundary with radiation[J]. *Internat Comm Heat Transfer*, 2000, **27**(7): 1037-1046.
- [16] Takhar H S, Gorla R S R, Soundalgekar V M. Short communication radiation effects on MHD free convection flow of a gas past a semi-infinite vertical plate[J]. *Internat J Num Methods for Heat and Fluid Flow*, 1996, **6**(2): 77.

Radiation Effect on Temperature Distribution in Three-Dimensional Couette Flow With Suction or Injection

Bhupendra Kumar Sharma, Manta Agarwal, R. C. Chaudhary
(Department of Mathematics, University of Rajasthan, Jaipur-302004, India)

Abstract: A theoretical analysis of three-dimensional Couette flow with radiation effect on temperature distribution has been analyzed, when the injection of the fluid at the lower stationary plate is transverse sinusoidal one and its corresponding removal by constant suction through the upper porous plate in uniform motion. Due to this type of injection velocity the flow becomes three-dimensional. The effect of Prandtl number, radiation parameter and injection parameter on rate of heat transfer were examined with the help of graphs. The Prandtl number has a much greater effect on the temperature distribution than the injection or radiation parameters.

Key words: Couette flow; three-dimensional; heat transfer; radiation; incompressible