

在有一级化学反应时粘弹性流体流经无限 竖直多孔平板时的边界层流动*

R·A·丹赛, B·B·A·善纳可

(基地拜勒加应用大学 基地哈森学院 机械工程系,伊尔比德,约旦)

(周哲玮推荐)

摘要: 在有一级化学反应时,研究不可压缩的粘弹性流体,在竖直多孔连续运动平板上的不稳定自然对流.控制方程用隐式有限差分法进行数值求解.与解析解的结果比较,证明所选用的数值方法有效.详细图示了速度分布的数值结果.研究了粘弹性参数、无量纲化学反应参数和平板运动速度,对稳定的速度分布、与时间相关的摩擦因数、Nusselt 数和 Sherwood 数的影响.

关键词: 粘弹性; 多孔平板; 化学反应; 自然对流

中图分类号: O357.4 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2010.08.003

符 号 说 明

C	浓度	Nu	Nusselt 数
C_{∞}	环境浓度	Pr	Prandtl 数
C_w	壁面浓度	Sc	Schmidt 数
C_f	表面摩擦因数	Sh	Sherwood 数
c_p	流体比定压热容	t	时间
D	质量扩散系数	T	温度
E	粘弹性参数	T_{∞}	环境温度
g	重力加速度	T_w	壁面温度
Gr	Grashof 数	u	按体积平均的轴向速度
k	流体的热传导参数	v	按体积平均的横向速度
k_0^*	动粘性系数	x, y	分别为沿板和垂直板方向的坐标
希腊字母			
β_t	热膨胀体积系数	ν	流体的动粘度
β_c	浓度膨胀体积系数	ρ	流体密度
γ	化学反应参数	τ	无量纲时间
γ^*	无量纲化学反应参数	θ	无量纲温度函数

* 收稿日期: 2009-09-26; 修订日期: 2010-05-20

作者简介: Rebbi A. Damseh, 副教授, 博士(联系人. E-mail: rdamseh@yahoo.com).

本文原文为英文,黄雅意译,张禄坤校.

λ	吸入参数	φ	无量纲浓度函数
λ^*	蒸腾参数		
脚 标			
w	壁面条件	∞	边界层外的条件

引 言

关于匀速或变速运动表面引起的边界层流动和热传递的研究,是很多工业制造过程中的重要课题,例如沿物料输送时产生的边界层、塑料薄膜的挤出、无限金属平板的冷却等。运动表面将吸入流体,并将它抽向下游方向。表面剪应力和热传导率都得到了提高。Sakiadis^[1]研究了常速运动表面在流体环境中引起的流动。Crane^[2]研究了和 Sakiadis 同样的问题,但假定表面速度沿顺流方向呈线性变化。Carragher 和 Crane^[3]研究了线性伸展不可渗透等温表面上的热传递。

Beard 和 Walter^[4]介绍了理想粘弹性流体边界层的处理方法。对粘弹性非 Newton 流体自然对流热传递的研究,一直以来吸引了很多研究者的兴趣。近来,Rajagopal^[5]利用 Walter 模型,研究了粘弹性流体强迫对流中的热传递。Dandpath 和 Gupta^[6]就伸展薄板引起的不可压缩的二阶流体,研究了其流动和热传递,并讨论了粘弹性流体的热传递性能。Teipel^[7]研究了平板瞬时运动所引起的粘弹性流体的瞬态流动,Panda 和 Roy^[8]研究了粘弹性流体中作调和振动的平板。最近,Damseh 等^[9-10]和 Shawaqfah 等^[11],就粘弹性流体及二阶粘弹性流体,流经纯多孔介质中的竖直平面时,研究了粘弹性流体的自然、强迫和混合对流问题。定义并讨论了不同控制参数的影响。

鉴于不同的物理问题,运动流体中传热传质问题的研究是一个重要的课题,如流体经受放热和吸热的化学反应。在很多化工工程处理中,外来质量和伸展表面引起的运动工质间出现了化学反应。化学反应的级别由诸多因素决定,最简单的化学反应之一为一级反应,其反应率与物质浓度成正比。在有一级化学反应时,Chamkha^[12]就变速运动竖直表面上的导电流体,研究了其稳定流动的传热传质问题。Kandasamy 等^[13]在具有化学反应和热分层效应的竖直伸展表面上,对粘性不可压缩导电流体,非线性 MHD 的传质传热特点进行了研究。他们还在有物质浓度和质量扩散时,当楔形体壁面具有吸入/吹出功能时,发表了稳定层流边界层的数值解^[14]。其他有关化学反应的研究,可参考 Pradeep 等^[15]、Mitrovic 等^[16]、Chen 等^[17]、Muthukumaraswamy 和 Ganesan^[18-19]、Anjalidevi 和 Kandasamy^[20]等众多的研究。

本文的目的是,就竖直多孔平板的瞬时运动,使不可压缩的粘弹性流体产生的不稳定自然对流,研究一级化学反应对其流动的影响。

1 问题的公式

就粘弹性流体流经等温的竖直平板,考虑其层状自然对流边界层的流动。为了描述该问题,在平板上建立直角坐标系,沿平板表面取为 x -轴,垂直平板为 y -轴,如图 1 所示。假定当 $\bar{t} \leq 0$ 时,平板和粘弹性流体的温度都保持为常温 T_∞ ; 当 $\bar{t} > 0$ 时,平板的温度突然升高到常温 T_w ,使得 $T_w > T_\infty$ 。边界层的连续性方程、动量方程和能量方程,以及 Boussinesq 近似,可以按 Cor-tell^[21] 写为

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - k_o^* \left(\frac{\partial^3 u}{\partial t \partial y^2} + u \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} + v \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_\infty), \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (3)$$

在方程(2)的推导中,除边界层外,近似地假定正应力和剪应力的大小同阶.方程(3)为热边界层方程.

在有化学反应时,不可压缩粘弹性流体,流经无限等温竖直多孔板时,产生不稳定的自然对流边界层流动,同时考虑质量守恒,层流边界层控制方程(1)~(3)可写为

$$\frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \lambda \frac{\partial u}{\partial y} = g\beta_t(T - T_\infty) + g\beta_c(C - C_\infty) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - k_o^* \frac{\partial^3 u}{\partial y^2 \partial t}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \lambda \frac{\partial C}{\partial y} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \gamma C. \quad (7)$$

在方程(5)中,假定粘弹性流体的流动为 Maxwell 模型.当 Maxwell 模型推广应用到任意流动时,将该模型改用张量形式,并用上传(upper convective)时间导数代替时间偏导数,立即可以得到拟线性上传 Maxwell 模型,或 UCM 模型(参考 Kayvan 等的文献[22]).弛豫时间值表示该流体弹性成分的程度.随着弛豫时间的增加,该流体的弹性在增加.弛豫时间为 0,重新得到 Newton 本构方程.

假定该物理问题的边界条件如下:

$$\begin{cases} t \leq 0: u(y, t) = 0, T(y, t) = T_\infty, C(y, t) = C_\infty; \\ t > 0: u(0, t) = u_0 f(t), T(0, t) = T_w, C(0, t) = C_w; \\ t > 0: u(\infty, t) = 0, T(\infty, t) = T_\infty, C(\infty, t) = C_\infty. \end{cases} \quad (8)$$

为了将控制方程无量纲化,引入如下的无量纲参数:

$$U = \frac{u}{u_0}, Y = \frac{u_0}{\nu} y, \tau = \frac{u_0^2}{\nu} t, \theta = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty}, \varphi = \frac{C - C_\infty}{C_w - C_\infty}, \quad (9)$$

无量纲形式的控制方程及其边界条件可简化为

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} - \lambda^* \frac{\partial U}{\partial Y} = \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} - E \frac{\partial^3 U}{\partial Y^2 \partial \tau} + Gr_t \theta + Gr_c \varphi, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \lambda^* \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Pr} \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} - \lambda^* \frac{\partial \varphi}{\partial Y} = \frac{1}{Sc} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial Y^2} - \gamma^* (1 + \varphi_R) \varphi, \quad (12)$$

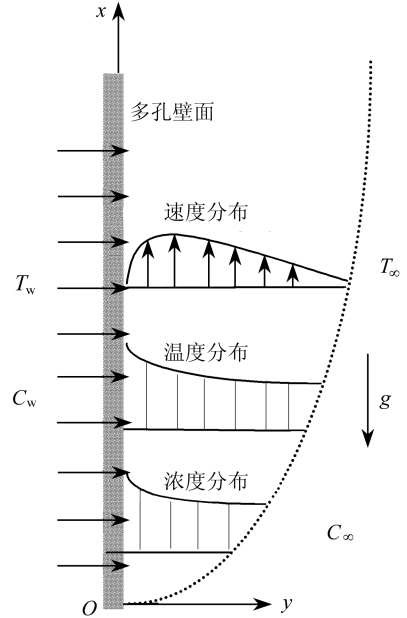


图1 沿竖直多孔平板的自然对流模型

$$\begin{cases} \tau \leq 0: U(Y, \tau) = 0, \theta(Y, \tau) = 0, \varphi(Y, \tau) = 0; \\ \tau > 0: U(0, \tau) = \tau^n, \theta(0, \tau) = 1, \varphi(0, \tau) = 1; \\ \tau > 0: U(\infty, \tau) = 0, \theta(\infty, \tau) = 0, \varphi(\infty, \tau) = 0, \end{cases} \quad (13)$$

其中 $\lambda^* = \lambda/u_0$, $E = k_0^* (u_0/\nu)^2$, $Gr_l = g\beta_l(T_w - T_\infty)x^3/\nu^2$, $Gr_c = g\beta_c(T_w - T_\infty)x^3/\nu^2$, $Sc = \nu/D$, $\gamma^* = \gamma\nu/u_0^2$, $\varphi_R = C_\infty/(C_w - C_\infty)$, $Pr = \mu c_p/k$, n 为指数。

物理上感兴趣的量为表面摩擦因数和热传导系数,它们可以表示如下:

$$C_f = \frac{\mu}{\rho u_0^2} \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{Y=0} = \frac{\partial U}{\partial Y} \Big|_{Y=0}, \quad (14)$$

$$Nu = \frac{-x}{T_w - T_\infty} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{Y=0} = - \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0}, \quad (15)$$

$$Sh = \frac{-x}{C_w - C_\infty} \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{Y=0} = - \frac{\partial \varphi}{\partial Y} \Big|_{Y=0}. \quad (16)$$

2 求解方法

能量方程(11)和质量方程(12)为线性方程,与动量方程并不耦合.这些方程有很多求解方法.由于惯性参数,又由于与能量方程和质量方程中的温度和质量相耦合,动量方程(10)呈非线性,该方程在相应的边界条件(13)下,可以用隐式有限差分法,类似 Crank-Nicolson 进行数值求解(见 Anderson 的文献[23]).对所有关于 τ 的一阶导数,可以用下面的形式代替:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{(C_j^{n+1} - C_j^n)}{\Delta \tau}. \quad (17)$$

所有关于 Y 的二阶导数,可以用下面的形式代替:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} = \frac{(1/2)(C_{j+1}^{n+1} - C_{j+1}^n) + (1/2)(-2C_j^{n+1} - 2C_j^n) + (1/2)(C_{j-1}^{n+1} + C_{j-1}^n)}{(\Delta Y)^2}. \quad (18)$$

一阶导数和二阶导数利用中心差分近似,将动量方程变换为有限差分方程.有限差分方程呈 3 条对角线形式,可以用三对角线解法进行求解.

计算域限于有限维.这里,边界层厚度 Y_{\max} 取为 6.作某些初步研究之后,将 Y 的最大值选为 6,边界条件(13)最后两式满足.弱弛豫迭代要求有可靠的收敛性.对速度场和温度场,弱弛豫因子的范围取为 0.1 ~ 0.6.收敛准则规定为

$$\frac{\phi_{\text{new}} - \phi_{\text{old}}}{\phi_{\text{new}}} \leq \psi, \quad (19)$$

其中 ϕ_{new} 和 ϕ_{old} 表示主要变量 U, θ 中的一个,下角“new”和“old”分别表示后一个迭代值和前一个迭代值. ψ 的容许值取为 10^{-6} .

分别用 45×45 、 69×69 、 83×83 网格尺寸进行计算.在可预测的传热和流动场中,密网格 83×83 并没有展现出明显的“优势”.因此,考虑到计算成本及准确性要求,本文采用 69×69 尺寸的网格.

进一步将数值法所得到的结果,与 Chamkha^[12] 的解析解相比较,验证了本文所提出的标准.表 1 给出了这样的比较,为了使当前的问题和 Chamkha 所讨论的问题之间有类似的公式表示,将 Chamkha 问题中出现的特异参数设置为 0.同时,表中假设的粘弹性参数值为 0 ($E = 0$),意味着所考虑的流体为 Newton 流体.

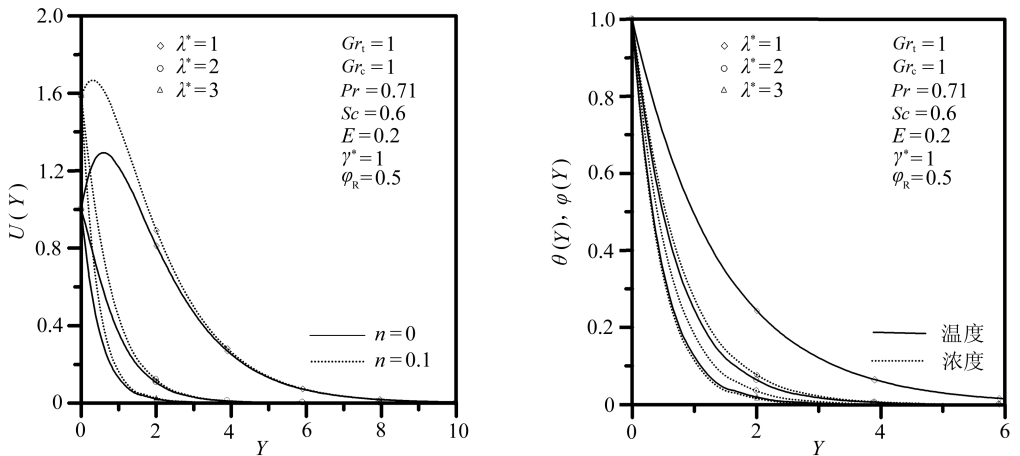
表 1

稳态条件下各种参数对 C_f, Nu, Sh 的影响
(方括号内的数值为 Chamkha^[12] 所得到的解析解)

Gr_t	Gr_c	Pr	Sc	λ^*	γ^*	E	n	C_f	Nu	Sh
1	1	0.71	0.6	1	0	0	0	2.078 2 [2.075 1]	0.715 0 [0.710 0]	0.601 2 [0.600 0]
1	1	7.0	0.6	1	0	0	0	0.810 6 [0.809 5]	7.016 3 [7.000 0]	0.601 2 [0.600 0]
1	1	0.71	2.0	1	2	0	0	0.712 8 [0.717 5]	0.715 0 [0.710 0]	3.228 5 [3.236 1]
1	1	0.71	0.6	1	2	0	0	1.110 2 [1.104 9]	0.715 0 [0.710 0]	1.440 3 [1.435 8]
1	1	0.71	0.6	1	3	0	0	1.005 962	0.715 0	1.669 7
1	1	0.71	0.6	1	4	0	0	0.941 067 5	0.715 0	1.870 45
3	1	0.71	0.6	1	0	0	0	4.900 2	0.715 0	0.601 2
4	1	0.71	0.6	1	0	0	0	6.310 7	0.715 0	0.601 2
1	3	0.71	0.6	1	0	0	0	5.412 4	0.715 0	0.601 2
1	4	0.71	0.6	1	0	0	0	7.079 0	0.715 0	0.601 2
1	1	0.71	0.6	1	0	0	0	2.078 2	0.715 0	0.601 2
1	1	0.71	0.6	1.2	0	0	0	1.368 9	0.850 8	0.719 2
1	1	0.71	0.6	1.5	0	0	0	0.558 2	1.062 8	0.898 6
1	1	0.71	0.6	1	0	0	0	0.666 1 ($\tau = 2.0$)	0.796 6 ($\tau = 2.0$)	0.690 6 ($\tau = 2.0$)
1	1	0.71	0.6	1	0	0.5	0	0.675 2 ($\tau = 2.0$)	0.796 6 ($\tau = 2.0$)	0.690 6 ($\tau = 2.0$)
1	1	0.71	0.6	1	0	1	0	1.376 0 ($\tau = 2.0$)	0.796 6 ($\tau = 2.0$)	0.690 6 ($\tau = 2.0$)
1	1	0.71	0.6	1	0	1	0.3	1.142 2 ($\tau = 2.0$)	0.796 6 ($\tau = 2.0$)	0.690 6 ($\tau = 2.0$)
1	1	0.71	0.6	1	0	1	0.4	1.069 5 ($\tau = 2.0$)	0.796 6 ($\tau = 2.0$)	0.690 6 ($\tau = 2.0$)

3 结果和讨论

利用本文的数值解,研究粘弹性参数 E 、化学反应参数 γ^* 和蒸腾参数 λ^* , 对速度、温度和浓度分布, 以及表面摩擦因数、Nusselt 数和 Sherwood 数的影响。



(a) 指数 $n = 0$ 和 $n = 0.1$ 时的速度分布

(b) 温度和浓度分布

图 2 蒸腾参数 λ^* 对速度、温度和浓度分布的影响

在不同的蒸腾参数 $\lambda^* = 1, 2, 3$ 下, 图 2(a) 给出了 $n = 0.0, 0.1$ 时, 轴向速度 $U(Y)$ 的分布, 图 2(b) 给出了温度、浓度随 Y 的变化。可以清楚地看到, 与时间相关的平板速度依赖于指数 n 的值, 随着指数的增加, 速度也增加; 而随着蒸腾参数 λ^* 的增加, 速度是下降的。从图 2

(b)可以看出,温度、浓度分布在远离平板处下降,在平板表面附近大得多.还可以看到,随着蒸腾参数的增加,温度、浓度分布下降.值得注意的是,由于存在化学反应,浓度分布曲线都在温度分布曲线的下方.表1突显了图2(a)、(b)中的结果,表面摩擦因数随着蒸腾参数的增加而减小.这是因为流动变缓后,导致 Nusselt 数和 Sherwood 数增加所引起的.

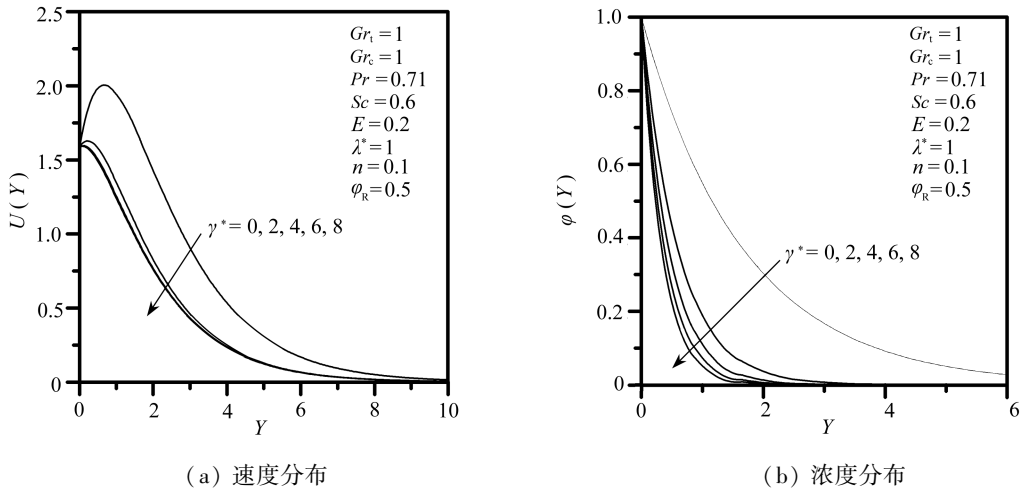


图3 化学反应参数 λ^* 对速度分布 $U(Y)$ 和浓度分布 $\varphi(Y)$ 的影响

图3(a)和图3(b)分别给出了化学反应参数 γ^* , 对速度分布和物质浓度分布的影响.正如所预料的, 化学反应的存在, 极大地影响了速度分布和浓度分布. 值得一提的是, 我们所研究的情况是破坏性化学反应 $\gamma^* > 0$. 事实上可以预计到, 随着 γ^* 的增加, 速度分布应该有明显地减小, 有峰值的出现, 速度的最大值出现在流体内部, 靠近平板表面, 但并不在平板表面上. 同时, 随着化学反应参数值的增加, 浓度值减小. 正如表1所表明的, 随着化学反应参数的增加, Sherwood 数是提高的, 表面摩擦因数是下降的.

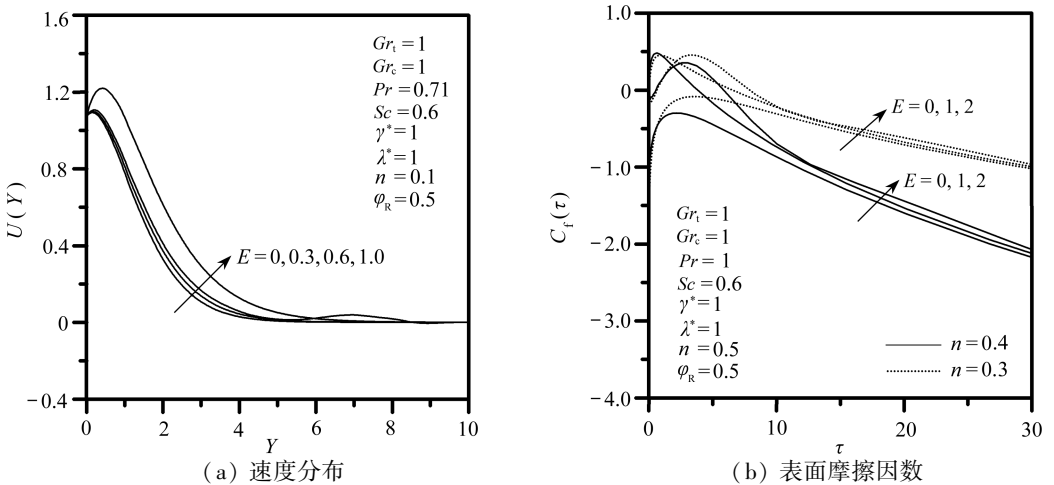


图4 粘弹性参数 E 对速度分布 $U(Y)$ 和表面摩擦因数 $C_f(\tau)$ 的影响

图4(a)给出了粘弹性参数对速度分布的影响. 显然, 在速度发展的早期, 粘弹性参数的增加, 速度分布出现细微的增加; 粘弹性参数的影响达到稳定后, 无法将弛豫时间(弹性流体)的值拉得更高, 原因是速度分布与时间的变化相关 ($\tau = 2$). 图4(b)给出了在不同的平板运动速度下, 当粘弹性参数 $E = 0, 1, 0, 2, 0$ 时, 摩擦因数随时间的变化. 可以看出, 与化学反应参数相

比较,粘弹性参数对摩擦因数的影响是细微的。图 4(b) 适用于整个时间域,直到稳态的条件,对与时间相关的粘弹性模型的影响,在边界层发展的早期,是显而易见的。表 1 清楚地表明,粘弹性参数的增加,导致摩擦因数的增加。最后还可以看到,平板运动速度的增加,出现摩擦因数下降的趋势。

4 结 论

在有一级化学反应的情况下,数值地研究了粘弹性流体,在流经无限伸展多孔平板时的自然对流流动。假定粘弹性流体的流动为 Maxwell 模型。对于各种参数条件,给出了速度分布、温度分布、物质浓度分布,连同摩擦因数一起的图形结果,并讨论了不同的参数条件。我们发现,化学反应参数、蒸腾参数、平板运动速度、Prandtl 数和 Schmidt 数,其中任何一个参数的下降,都将使摩擦因数减小,同时,粘弹性参数、热 Grashof 数、质量 Grashof 数,其中任何一个参数的增大,都将使摩擦因数增大。

参考文献:

- [1] Sakiadis B C. Boundary layer behavior on continuous solid surfaces—II : the boundary layer on a continuous flat surface[J]. *Amer Inst Chem Engrg J*, 1961, **7**(2): 221-225.
- [2] Crane L J. Flow past a stretching plate[J]. *Z Angew Math Phys*, 1970, **21**(4): 445-447.
- [3] Carragher P, Crane L J. Heat transfer on a continuously moving sheet[J]. *Z Angew Math Mech*, 1982, **62**(10): 564-565.
- [4] Beard D W, Walters K. Elastico-viscous boundary layer flow— I : two dimensional flow near a stagnation point [C]. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. Cambridge: Cambridge University Press, 1964, **60**: 667-674.
- [5] Rajagopal K R. On Stokes' problem for a non-Newtonian fluid[J]. *Acta Mechanica*, 1983, **48**(3/4): 233-239.
- [6] Dandpath B S, Gupta A S. Flow and heat transfer in a viscoelastic fluid over a stretching shell [J]. *Int J Non-Linear Mech*, 1989, **24**(3): 215-219.
- [7] Teipel I. The impulsive motion of a flat plate in a visco-elastic fluid[J]. *Acta Mechanica*, 1981, **39**(3/4): 277-279.
- [8] Panda J, Roy J S. Harmonically oscillating visco-elastic boundary layer flow[J]. *Acta Mechanica*, 1979, **31**(3/4): 213-220.
- [9] Damseh Rebhi A, Al-Azab Tariq A, Al-Odat M Q. Unsteady free convection flow of visco-elastic fluid on a stretched vertical plate embedded in a non-Darcian porous medium with constant heat flux[J]. *Journal of Porous Media*, 2008, **11**(1): 117-124.
- [10] Damseh Rebhi A, Shatanawi A S, Chamkha A J, Duwairi H M. Transient mixed convection flow of a second-grade visco-elastic fluid over a vertical surface[J]. *Nonlinear Analysis Modelling and Control*, 2008, **13**(2): 169-179.
- [11] Shawaqfeh M S, Damseh R A, Chamkha A J, Duwairi H M, Zgoul M H. Forced convection of blasius flow of "second-grade" visco-elastic fluid[J]. *International Journal of Heat & Technology*, 2007, **25**(1): 145-151.
- [12] Chamkha A J. MHD flow of a uniformly stretched vertical permeable surface in the presence of heat generation/absorption and a chemical reaction[J]. *Int Comm Heat and Mass Transfer*, 2003, **30**(3): 413-422.
- [13] Kandasamy R, Periasamy K, Prabhu K K Sivagnana. Chemical reaction, heat and mass transfer on MHD flow over a vertical stretching surface with heat source and thermal stratification

- effects[J]. *Int J of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**(21/22): 4557-4561.
- [14] Kandasamy R, Periasamy K, Prabhu K K Sivagnana. Effects of chemical reaction, heat and mass transfer along a wedge with heat source and concentration in the presence of suction or injection[J]. *Int J of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**(7): 1388-1394.
- [15] Siddheshwar Pradeep G, Manjunath S. Unsteady convective diffusion with heterogeneous chemical reaction in a plane-poiseuille flow of a micropolar fluid[J]. *Int J of Eng Science*, 2000, **38**(7): 765-783.
- [16] Mitrovic Bojan M, Papavassiliou Dimitrios V. Effects of a first-order chemical reaction on turbulent mass transfer[J]. *Int J of Heat and Mass Transfer*, 2004, **47**(1): 34-61.
- [17] CHEN Zheng, Arce Pedro. An integral-spectral approach for convective-diffusive mass transfer with chemical reaction in Couette flow mathematical formulation and numerical illustrations[J]. *Chemical Engineering Journal*, 1997, **68**(1): 11-27.
- [18] Muthukumaraswamy R, Ganesan P. Natural convection on a moving isothermal vertical plate with chemical reaction[J]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2002, **75**(1): 113-119.
- [19] Muthukumaraswamy R, Ganesan P. Effect of the chemical reaction and injection on flow characteristics in an unsteady upward motion of an isothermal plate[J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2001, **42**(4): 665-671.
- [20] Anjalidevi S P, Kandasamy R. Effects of chemical reaction, heat and mass transfer on laminar flow along a semi infinite horizontal plate[J]. *Heat and Mass Transfer*, 1999, **35**(6): 465-467.
- [21] Cortell Rafael. Similarity solutions for flow and heat transfer of a viscoelastic fluid over a stretching sheet[J]. *Int J Non-Linear Mech*, 1994, **29**(2): 155-161.
- [22] Kyvan S, Hadi H, Seyed T. Stagnation-point flow of upper-convected Maxwell fluids[J]. *Int J Non-Linear Mech*, 2006, **41**(10): 1242-1247.
- [23] Anderson J. *Computational Fluid Dynamics*[M]. Chap 9. New York: McGraw-Hill, 1995.

Visco-Elastic Fluid Flow Past an Infinite Vertical Porous Plate in the Presence of First Order Chemical Reaction

Rebhi A. Damseh, Ben Bella A. Shannak

(*Mechanical Engineering Department, Al-Huson University College,
Al-Balqa Applied University, P. O. Box 50, Irbid, Jordan*)

Abstract: An analysis was developed in order to study the unsteady free convection flow of an incompressible, visco-elastic fluid on a continuously moving vertical porous plate in the presence of a first-order chemical reaction. The governing equations were solved numerically using an implicit finite difference technique. The selected numerical method was validated by comparing the results with the analytical solutions. Numerical results for the details of the velocity profiles which were shown on graphs were presented. A parametric study was performed to illustrate the influence of the visco-elastic parameter, dimensionless chemical reaction parameter and plate moving velocity on the steady state velocity profiles, the time dependent friction coefficient, Nusselt number and Sherwood number.

Key words: visco-elastic; porous plate; chemical reaction; free convection