

电渗流中传热传质过程与熵的分析*

赵晓玲, 杨大勇, 王 阳

(南昌大学 信息工程学院, 南昌 330031)

摘要: 在壁面存在恒定热通量条件下,分析微通道内电渗流中传热传质过程与熵的生成.建立数值计算模型,分别采用 Poisson-Boltzmann 方程、Navier-Stokes 方程、Nernst-Planck 方程和能量方程来描述微通道内双电层电势、流场、离子浓度和温度的分布情况.引入熵产生,进一步研究不同流动参数对流体传热过程的作用,讨论不同流动参数下各热效应的变化规律,并具体分析热效应参数对流体总熵增加及各部分热效应对总熵比重的影响.结果表明,动电参数与 Joule(焦耳)热系数的增大会使得传热性能减弱,动电参数对传热性能影响更为明显;流体的总熵为动电参数、传质系数和质量弥散系数的增函数.

关键词: 电渗流; 传热传质; 熵

中图分类号: O351

文献标志码: A

doi: 10.21656/1000-0887.370182

引 言

随着微机电系统的迅速发展,电子元器件的尺寸逐渐缩小形成微电子元件,较小的尺度使得单位区域内能量耗散较高,导致微电子元件产生较大的升温^[1-2].如何进行有效地散热是微电子原件设计、研发过程中的一个艰巨挑战,正逐渐成为一个研究热点.电渗驱动是微通道内流体流动的主要驱动方式,而流体流动、外加电场将带来黏性热耗散和 Joule 热效应,使流体升温而降低散热效率.因此需要研究各流动参数对黏性热耗散和 Joule 热效应的影响,尽量减小流体传热过程中的不可逆损失.

一般传热问题只分析流体与微通道壁面之间的对流传热以及 Joule 热与黏性热耗散对传热过程的影响,国外学者对这类问题的研究比较全面.Mala 等^[3]运用数值模拟方法研究平板微通道内双电层对微流体流动与固-液相传热过程的影响,认为动电参数较小时双电层对微流体流动的阻碍作用较为明显,而且流动电势是动电参数的增函数,是微通道壁面 Zeta 电势的减函数.由于双电层的存在,固-液相之间传热率相对减小.Xuan 等^[4]运用实验与数值模拟相结合的方法研究毛细管内电渗流的 Joule 热效应,认为 Joule 热效应可以扰动电渗流流型, Joule 热效应使得流体温度和体积流量同时上升.Maynes 等^[5]运用数值方法分析不同动电参数、速度比等流动参数对微通道内温度分布以及 Nusselt(努赛尔)数(Nu)的影响.结果表明 Nu 与相对半径、单位体积的内热源、速度比有关.总体上, Nu 随着动电参数的增大而降低,随着内热源

* 收稿日期: 2016-06-07; 修订日期: 2016-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(11302095)

作者简介: 赵晓玲(1992—),女,硕士生(E-mail: zhaoxiaoling@sina.com);

杨大勇(1978—),男,副教授,博士(通讯作者. E-mail: dayongyang@ncu.edu.cn).

的增加而升高.Tang 等^[6]运用有限体积法研究微通道内 Joule 热与黏性热耗散对电渗流及其传质过程的影响.结果表明,大尺寸微通道、高浓度溶液、高电场强度或者较低热导率壁面情况下 Joule 热效应相当显著.

微通道内流体流动的对流换热是不可逆传递过程,是有温差下的传热和有压损下的流体流动的综合过程,可能存在摩擦耗散、传热、传质、化学反应等原因,因此在整个传递过程中必然引起熵的产生.而近年来储能问题得到越来越多的关注,国内外许多研究开始以求取热能传递过程中熵产生的最小化为目标来达到微型器件技术设备的能量优化设计,熵产生最小化技术在热工程和工业中的作用日益增强.Bejan^[7]关于熵的综述性文献中系统地阐述了流体的熵是由传热传质过程热效应产生的,并分析各流动参数对系统熵值的影响.Shamshiri 等^[8]运用热力学第一、第二定律的相关原理研究微通道内电渗-压力混合驱动幂律流的传热过程,结果表明,在较小的黏性热耗散系数下, Nu 会出现奇点.在给定的幂律指数下,不同的速度比对总熵的影响是不一样的.流体的熵随着黏性热耗散与 Joule 热系数的增大而上升.Guo 等^[9]研究拱形微通道内层流流动中黏性热耗散对传热过程的影响,认为苯胺的总熵在加热过程中达到极值的时间要比冷却中的短.微通道的半径越小,流体的熵达到极值的时间越短.Ibáñez 等^[10]应用最小总熵原理优化平板微通道内共轭传热过程.结果表明速度滑移常数能增强流体与壁面之间的热交换过程.Matin 等^[11]运用熵增加原理研究电渗-压力混合驱动流内传热传质过程,分析了不同流动参数对各热效应的影响.

前人对流体传热传质过程分析主要集中于微通道内流体与壁面之间的一般传热与共轭传热,主要分析微通道内速度与温度等物理场的分布情况与流动参数之间的关系.本文基于熵产生原理研究微通道内电渗驱动流的传热过程,分别从对流传导热、Joule 热及黏性耗散热等各项热效应对流体传热传质过程的影响进行具体分析.

1 数学模型

图 1 为电渗流中传热传质过程系统简图,壁面存在恒定热通量与 ζ 电势,且双电层不重叠.微通道高度为 $2H$.假设除黏度与导电率之外,溶液其他物理性质不随温度而发生变化.对于蒸馏水或低浓度溶液,当温度从 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其电阻率增加了 150% ,黏度减小了 64% ;而其他参数,诸如导热率、相对介电常数和密度分别降低了 0.25% 、 24% 和 2% .因此,在平均温度下计算后 3 个参数时其变化率不超过 10% ,可认为是常数.此外,当溶液内温度梯度较小时 ($<10^{-2}\text{ K}\cdot\mu\text{m}^{-1}$),粒子分布不受温度的影响,仍然服从 Boltzmann 规律.

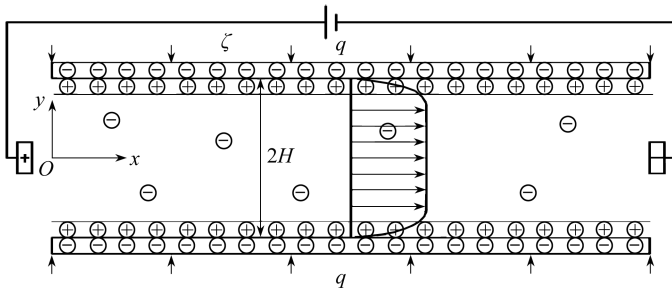


图 1 电渗流模型简图

Fig. 1 Schematic of the electroosmotic flow

1.1 控制方程

双电层电势分布服从 Poisson 方程,对于对称电解质溶液,双电层电位和离子分布满足 Boltzmann 分布规律^[12],得到 Poisson-Boltzmann(P-B)方程:

$$\frac{d^2\psi}{dy^2} = \frac{2zen_0}{\varepsilon} \sinh\left(\frac{ze\psi}{k_B T_{ave}}\right), \quad (1)$$

式中, ε 为溶液的介电常数, z 为离子化合价, e 为电子电荷数, n_0 为初始离子浓度, k_B 为 Boltzmann 常数, T_{ave} 为任意横截面内的平均温度.

引入无量纲参数 $y^* = y/H$, $\psi^* = ze\psi/(k_B T_{ave})$, 则式(1)表示的 Poisson-Boltzmann 方程可以表示为无量纲线性表达式

$$\frac{d^2\psi^*}{dy^{*2}} = K^2\psi^*, \quad (2)$$

式中, $K = \kappa H$ 为动电参数, $\kappa^2 = 2n_0e^2z^2/(\varepsilon k_B T_{ave})$ 为 Debye-Huckel 参数, κ^{-1} 通常表示双电层的特征厚度.无量纲化后的边界条件为

$$\psi^* \Big|_{y^*=1} = \zeta^*; \quad \frac{d\psi^*}{dy^*} \Big|_{y^*=0} = 0, \quad (3)$$

式中, ζ^* 为无量纲化的 Zeta 电势, $\zeta^* = ez\zeta/(k_B T_{ave})$.

对于不可压缩流体的层流流动,可用修正后的 Navier-Stokes(N-S)方程来描述该速度场^[12]:

$$\mu(T) \frac{d^2u}{dy^2} = \frac{dP}{dx} + \rho_e E_x, \quad (4)$$

式中, u 为速度标量, ρ_e 为净电荷密度, P 为压力, E_x 为外加电场强度.

考虑 Joule 热与黏性耗散,同时壁面存在热通量,则能量方程为^[13]

$$\rho c_p u \frac{dT}{dx} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + u(T) \left(\frac{du}{dy} \right)^2 + \frac{E_x^2}{\sigma(T)}, \quad (5)$$

式中, ρ 为溶液密度, c_p 为比定压热容, T 为局部温度, k 为热导率.式(5)等号右边 3 项依次为热传导、黏性热耗散和 Joule 热效应. $\mu(T)$, $\sigma(T)$ 与局部温度 T 的关系分别为^[13]

$$\mu(T) = \mu_w e^{-\gamma(T-T_w)}, \quad (6)$$

$$\sigma(T) = \frac{\sigma_w}{[1 + \beta(T - T_w)] \cosh\left(\frac{ze\psi}{k_B T_{ave}}\right)}, \quad (7)$$

式中, μ_w , σ_w 分别为壁面处溶液的黏度与电阻率, T_w 为壁面温度.

根据能量守恒定律,单位体积溶液的内能在数值上等于溶液与壁面之间传导的热量、黏性耗散产生的热量和 Joule 热效应产生的热量这三者之和,其计算公式如下^[13-14]:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{q + \int_0^H \mu(T) \left(\frac{du}{dy} \right)^2 dy + \int_0^H \frac{E_x^2}{\sigma(T)} \cosh\left(\frac{ze\psi}{k_B T_{ave}}\right) dy}{\rho c_p u_m H}, \quad (8)$$

式中, q 为壁面热通量, u_m 为溶液的平均速度.引入无量纲参数: $\theta = (T - T_m)/(Hq/\kappa)$, $u^* = u/u_{HS}$, 其中 u_{HS} 为 Helmholtz-Smoluchowski 速度,即参考速度.对定常热通量边界条件,在热充分发展条件下,有 $dT_m/dx = dT_w/dx = dT/\partial x$.考虑溶液的黏度、电阻率与局部温度 T 相关即方程

(6)、(7),通过引用的无量纲参数,方程(4)、(5)可无量纲化为

$$e^{-AK^2\theta/S} \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} - \frac{AK^2}{S} \frac{d\theta}{dy^*} \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right) = -\frac{K^2}{\zeta^*} \sinh \psi^*, \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^{*2}} = \left(1 + I_1 S + I_2 \frac{SS_v}{K^2} \right) \frac{u^*}{u_m^*} - \frac{SS_v}{K^2} e^{-AK^2\theta/S} \left(\frac{du^*}{dy^*} \right)^2 - S \left(1 + \frac{BK^2\theta}{S} \right) \cosh \psi^*. \quad (10)$$

无量纲化后的边界条件为

$$\frac{\partial u^*}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0} = 0, u \Big|_{y^*=1} = 0; \frac{\partial \theta}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0} = 0, \theta \Big|_{y^*=1} = 0. \quad (11)$$

微通道内离子浓度的控制方程为^[15]

$$u \frac{\partial C_w}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}, \quad (12)$$

式中, D 为离子扩散系数,引入无量纲参数 $\phi = (C - C_w)/(HM)$, 且 x 轴向离子浓度梯度为常数,即 $\partial C/\partial x = \partial C_w/\partial x = M$. 引入无量纲参数 Reynolds(雷诺)数 $Re = u_{HS}H/\mu$, Schmidt(斯密特)数 $Sc = \mu/D$, 则方程(12)可无量纲化为

$$\frac{d^2 \phi}{dy^{*2}} = Re \cdot Sc \cdot u^*. \quad (13)$$

无量纲化后的边界条件为

$$\frac{\partial \phi}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0} = 0; \phi \Big|_{y^*=1} = 0. \quad (14)$$

1.2 传热系数

通常用 Nu 反映微通道内对流换热能力的强弱,其定义如下^[13-14]:

$$Nu = \frac{hD_h}{k} = \frac{qD_h}{k(T_w - T_m)} = -\frac{4}{\theta_m}, \quad (15)$$

式中, h 为溶液对流传热系数, D_h 表示水力直径, θ_m 为无量纲平均温度,表达式为

$$\theta_m = \frac{\int_0^1 u^* \theta dy^*}{\int_0^1 u^* dy^*} = \frac{\int_0^1 u^* \theta dy^*}{u_m^*}. \quad (16)$$

1.3 熵的组成

由 San 等的研究成果和上述控制方程,可知溶液的熵是由热传导、传质及热-质作用、黏性耗散和 Joule 热这 5 个热效应产生的,其计算式如下^[16-17]:

$$S_{gen} = \frac{k}{T^2} \left[\left(\frac{dT}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dT}{dy} \right)^2 \right] + \frac{RD}{C} \left[\left(\frac{dC}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dC}{dy} \right)^2 \right] + \frac{RD}{T} \left(\frac{dT}{dx} \frac{dC}{dx} + \frac{dT}{dy} \frac{dC}{dy} \right) + \frac{\mu(T)}{T} \left(\frac{du}{dy} \right)^2 + \frac{E_x^2}{\sigma(T)}, \quad (17)$$

式中, R 为气体常数,引入以下无量纲参数:

$$M_d = \frac{MHRD}{k}, Pe = \frac{\rho c_p u_{HS} H}{k}, \Omega = \frac{C_w}{HM}, \Theta = \frac{\kappa T_w}{qH}, \quad (18)$$

则方程(17)无量纲化为

$$S_G = S_H + S_V + S_M + S_{HM} + S_J. \quad (19)$$

无量纲形式总熵的计算则是将局部熵权的产生和整个域的整体结合,即

$$S_T = \int_0^1 S_G dy^*, \quad (20)$$

各个部分对总熵的比重用下式表示:

$$N_i = \frac{\int_0^1 S_i dy^*}{S_T}, \quad (21)$$

式中, i 表示熵产生的来源即方程(19)中的各个项,依次分别为热传导、黏性耗散项、传质扩散、传质传热扩散耦合和 Joule 热(表达式见附录)。

2 结果与讨论

2.1 模型验证

为研究微通道中电渗流传热传质过程,本文使用 COMSOL Multiphysics 软件对无量纲控制方程及其边界条件进行直接耦合求解,图 2 为微通道内流体速度及无量纲温度的数值解及解析解^[18]对比图,由图可知,数值解及解析解求解结果基本重合,验证了有限元模型的正确性。

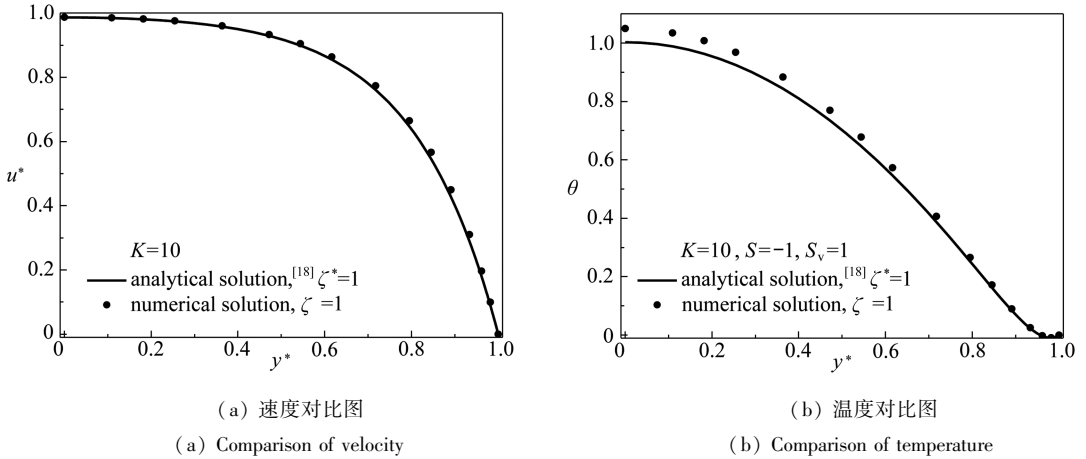


图 2 数值解与解析解对比图

Fig. 2 Comparison between the analytical solution and the numerical solution

2.2 流动参数对温度及传热的影响

图 3 给出了不同动电参数 K 值下的无量纲温度 θ 的分布曲线。这里, A 为 0 表示不考虑黏度与电阻率随温度变化, A 不为 0 则表示考虑黏度与电阻率随温度变化。随着动电参数 K 的增大,微通道内流体的无量纲温度 θ 是逐渐降低的。当动电参数取值 10^2 数量级时,是否考虑黏性变化的情况对微通道内平均速度的影响最大偏差不大于 0.03%,因此,在 K 值取值为 10^3 数量级时,考虑黏度与电阻率随温度的变化,才会对微通道内温度分布产生较为明显的影响。随着动电参数 K 的增大,壁面附近流体的速度及其变化梯度逐渐增大,使得流体与微通道壁面之间的传热效果逐步增强,流体温度 T 下降同时壁面温度 T_w 升高,使得无量纲温度 θ 逐渐降低,该过程持续到流体温度与壁面温度相等为止。当流体温度低于壁面温度,无量纲温度 θ 为负数。此时使用的 Joule 热系数 S 为负值,表明热通量由流体指向壁面(即散热),形成负的热通量,微通道任意截面上流体温度 T 要高于微通道壁面温度 T_w 。

图 4 为不同电黏性系数及 Joule 热系数时 Nu 随动电参数 K 的变化,在 $K < 10$ 时,随着 K 值

的增大, Nu 急剧减小, 此后, 随着 K 值的不断增大, Nu 的变化趋于平缓基本保持不变. 从图中可以看出在 K 值逐渐增大的过程中, 相对于 Joule 热系数, 电黏性系数的变化对 Nu 的影响更为明显, 但变化趋势相同. 在 K 值较小时, 由于 S_v 的增加, 通过减小壁面与流体的温差从而导致较大的 Nu ; 在较大的 K 值时, 双电层厚度极小, 减小了热效应较为明显的流体区域, 使得传热性能减弱, 因此 Nu 基本保持不变.

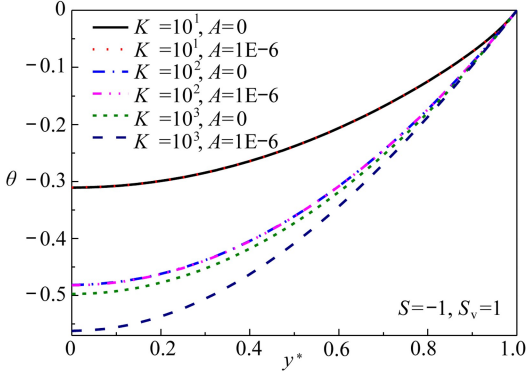


图3 不同 K, A 值时无量纲温度 θ 的分布

Fig. 3 The distribution of dimensionless θ temperature at different values of K and A

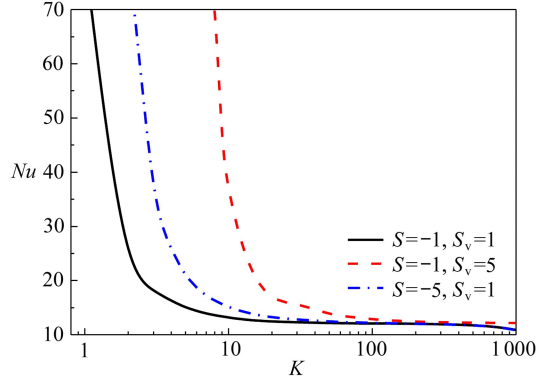


图4 不同 S, S_v 值 Nu 随 K 值的变化

Fig. 4 The variation of the Nu number with K at different S and S_v values

图5为不同 ζ^* 电势下 Nu 与动电参数 K 的关系. 当壁面存在负的热通量即 Joule 热系数为负值, 因而壁面温度低于流体温度, 热量由流体传递到微通道壁面, 此时 Nu 为负值. 随着 K 值的增加, 流体流动速度逐渐增大, 流体与壁面之间的传热过程相应地增强, 导致壁面与流体之间的温差在逐渐减小, 同时使得 Nu 持续减小, 该过程一直持续到壁面与流体具有相同的温度. 此时, 无法使用 Nu 来描述流体与微通道壁面之间的传热过程, 就产生了 Nu 的奇点. 随着动电参数 K 继续增大, 壁面与流体之间的热交换持续加强, 使得流体温度稍微低于壁面温度, Nu 由负数变为正数, 因此 Nu 的奇点只是基于其数学定义而产生的, 在实际流动传热过程中并不存在.

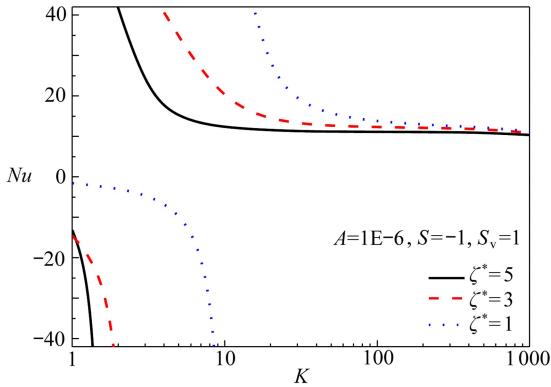


图5 不同 ζ^* 值 Nu 随 K 值的变化

Fig. 5 The variation of the Nu number with K at different ζ^* values

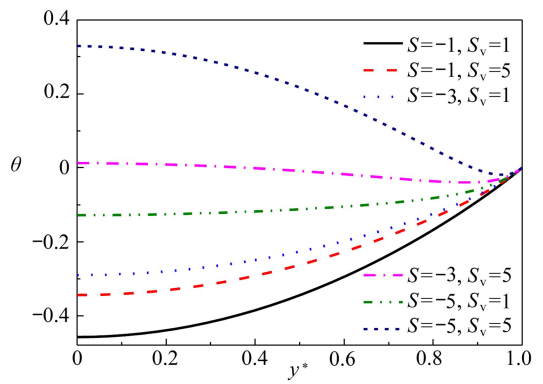


图6 不同 S, S_v 值时无量纲温度 θ 的分布

Fig. 6 The distribution of dimensionless θ temperature at different values of S and S_v

图6为不同的无量纲 Joule 热系数 $|S|$ 和黏性热耗散系数 S_v 对无量纲温度 θ 的影响. 随着

Joule 热系数 $|S|$ 的增大,无量纲温度 θ 逐步上升.在其他参数保持不变的情况下,Joule 热效应随着 $|S|$ 的增大而增强,只有少量的生成热通过壁面散发出去,大部分生成热通过流体间的热传导传给中心区域内的流体,同时使得流体平均温度和无量纲温度 θ 升高.同理,无量纲温度 θ 伴随着黏性热耗散系数 S_v 的增加而升高.无量纲 Joule 热系数 $|S|$ 和黏性热耗散系数 S_v 对流体流动速度无任何影响.由参数定义可知,黏性热耗散系数 S_v 只是流体物理性质的函数. Joule 热系数涉及了外加电场强度 E 和壁面恒定热通量 q ,其数值上的变化主要体现在热通量 q 的变化上.因此,Joule 热系数 $|S|$ 的变化使得温度 θ 能发生较大的变化.

2.3 流动参数对传质的影响

图 7 为不同传质系数 $ReSc$ 对无量纲离子浓度 ϕ 分布的影响.浓度 ϕ 为负数表明壁面处离子浓度高于其他区域内离子浓度,侧面反映了 Zeta 电势对离子浓度分布的影响.随着 $ReSc$ 的增大,微通道内无量纲离子浓度 ϕ 变得越来越小.对流-扩散方程中 $ReSc$ 和 Pe 具有相似的功能,而 Pe 表示对流传质与扩散传质之比. Pe 较高时,离子传输方式主要为对流传质,扩散传质可忽略; Pe 较小时,离子传输方式主要依靠扩散传质.因此, $ReSc$ 的增大抑制了离子扩散效应,导致微通道内任意位置与壁面之间的浓度差持续扩大.

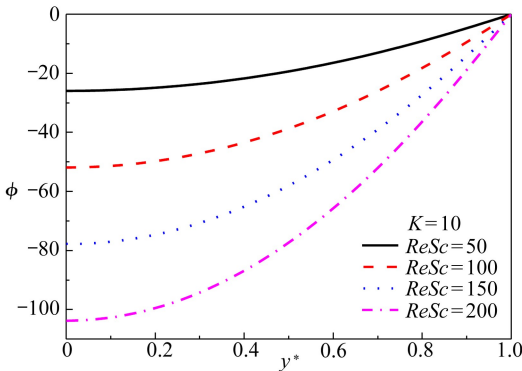


图 7 不同 $ReSc$ 值时无量纲浓度 ϕ 的分布

Fig. 7 The distribution of dimensionless concentration ϕ at different values of $ReSc$

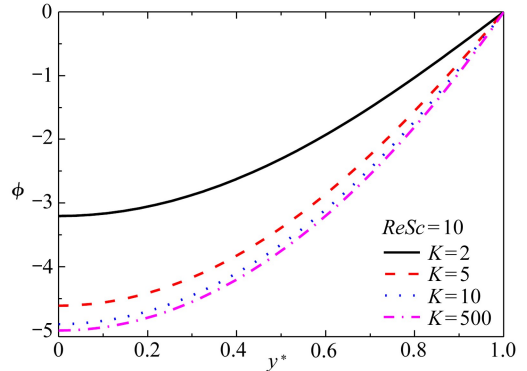


图 8 不同 K 值时无量纲离子浓度 ϕ 的分布

Fig. 8 The distribution of dimensionless concentration ϕ at different values of K

图 8 为动电参数 K 对无量纲离子浓度 ϕ 的影响.随着动电参数 K 增大,双电层厚度逐渐变薄,壁面附近流体离子浓度更大,在相同的外加电场作用下产生更大的体积力,使得双电层内速度梯度变得更大.较大的速度梯度使得流体的平均速度 u_m 增大,抑制离子的扩散传质效应,导致微通道内不同位置之间的浓度差逐步扩大.与动电参数 K 对离子浓度的作用类似,微通道内流体的流动速度对离子浓度分布影响较大即流体的平均速度 u_m 就越高,无量纲离子浓度 ϕ 越小.

2.4 流动参数对熵的影响

不同的 Joule 热系数 $|S|$ 和黏性热耗散系数 S_v 对熵增加过程的影响如图 9 所示.随着 Joule 热系数 $|S|$ 或者黏性热耗散系数 S_v 的增大,流体局部熵逐步上升.从图中流体熵变化曲线,可以发现 Joule 热系数 $|S|$ 对流体熵的影响更大.图 10 为不同传质系数 $ReSc$ 的情况下动电参数 K 对流体熵增加过程的影响.传质系数 $ReSc$ 越大,流体的总熵越大.在 $K < 5$ 的范围内,总熵随动电参数 K 的增大而迅速增加;对于 $K > 5$ 的情况,总熵几乎不随着动电参数发生变化.

图 11 为不同 Ω 值下无量纲质量弥散系数 M_d 对流体总熵 S_T 的影响.从图中可以看到,流体的总熵随着质量扩散系数 M_d 的增大而线性增大,而在 M_d 值较大时,参数 Ω 的变化对总熵的影响

更为显著.图 12 为给定 Joule 热系数 $|S|$ 下总熵 S_T 随黏性热耗散系数 S_v 的变化情况.若不考虑 $|S|$ 的作用,流体的总熵 S_T 为黏性热耗散系数 S_v 的增函数.Joule 热系数 $|S|$ 较小时,黏性热耗散系数 S_v 对总熵 S_T 的影响可忽略.对于较大的黏性热耗散系数 S_v ,系数 $|S|$ 对总熵 S_T 的作用比较小 S_v 的要明显.总体上流体的总熵 S_T 的变化率随着 Joule 热系数 $|S|$ 的增大而上升.

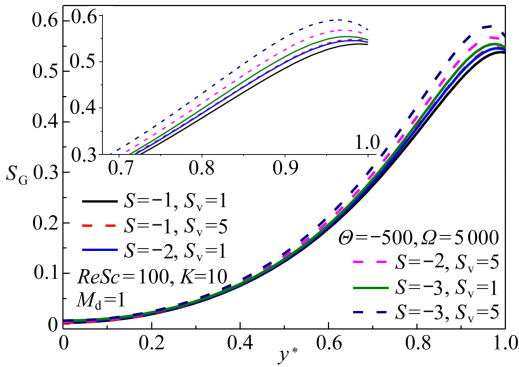


图 9 不同 S, S_v 值熵变化及局部放大

Fig. 9 The variation of the entropy with y^* at different S and S_v values and the partial enlargement

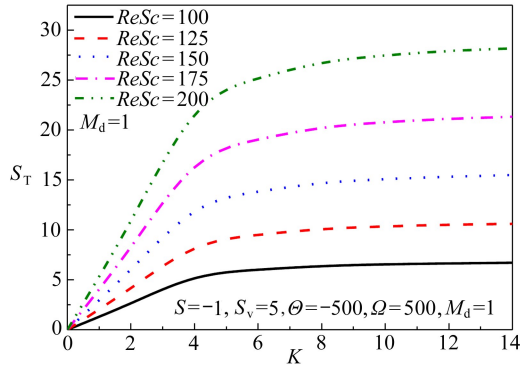


图 10 不同 $ReSc$ 值下总熵随 K 值的变化

Fig. 10 The variation of the total entropy with K at different $ReSc$ values

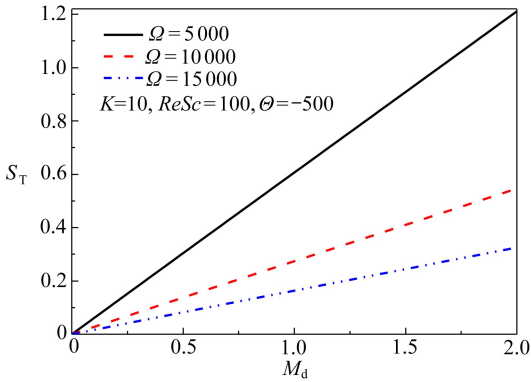


图 11 不同 Ω 值时总熵 S_T 随 M_d 的变化

Fig. 11 The variation of total entropy S_T with M_d at different Ω values

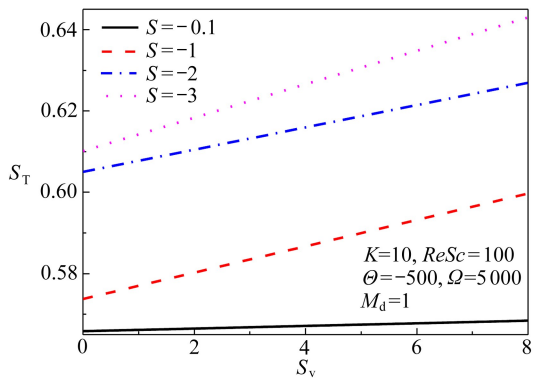


图 12 不同 S 值时总熵 S_T 随 S_v 的变化

Fig. 12 The variation of total entropy S_T with S_v at different S values

数值模拟时使用不同流动参数来分析各热效应对总熵 S_T 的影响.给定一组流动参数,使得流体的总熵 S_T 主要由对流传热或者传质热效应产生,即 Joule 热和黏性热耗散的生成热达到极小值,这一分析对实际应用具有很高的指导作用.分析不同流动参数下对流传热、传质热效应的生成热在流体总熵 S_T 变化过程中所占的比例,用 N_H 和 $N_M + N_{HM}$ 表示对流传热、传质热效应所占比例.图 13 为给定 $ReSc$ 下动电参数 K 对 N_H 和 $N_M + N_{HM}$ 的影响.扩散-传质效应和传热-传质耦合热效应 ($N_M + N_{HM}$) 在流体总熵 S_T 变化过程中起主导作用.此时,流体与壁面之间的对流传热 (N_H) 在流体总熵 S_T 变化过程中可忽略.总体上流体内扩散-传质热效应与传热-传质耦合热效应随着传质系数 $ReSc$ 的增大而逐渐增强,对流传热随之减弱.

图 14 为给定 Joule 热系数 $|S|$ 下质量弥散系数 M_d 对 N_H 和 $N_M + N_{HM}$ 的影响.在一定范围内,扩散-传质效应和传热-传质耦合热效应 ($N_M + N_{HM}$) 是质量弥散系数 M_d 的增函数;对流传热 (N_H) 是系数 M_d 的减函数.超出该范围 ($M_d \approx 0.2$), $N_M + N_{HM}$ 和 N_H 基本保持不变.总体上扩

散-传质效应和传热-传质耦合热效应 ($N_M + N_{HM}$) 在流体总熵变化过程中起主导作用。Joule 热系数 $|S|$ 的增大抑制了扩散-传质效应、传热-传质耦合热效应和对流传热在流体总熵 S_T 变化的作用。

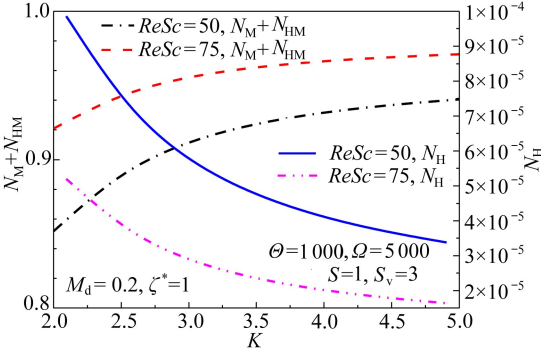


图 13 不同 $ReSc$ 下 N_H 和 $N_M + N_{HM}$ 随 K 值的变化

Fig. 13 The variations of N_H and $N_M + N_{HM}$ with K at different $ReSc$ values

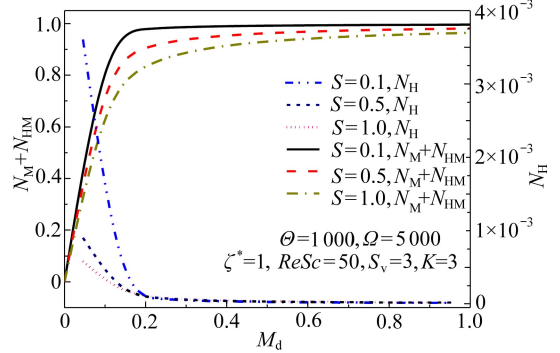


图 14 不同 S 数下 N_H 和 $N_M + N_{HM}$ 随 M_d 值的变化

Fig. 14 The variations of N_H and $N_M + N_{HM}$ with M_d at different S values

3 总 结

本文基于熵增加原理研究微通道内电渗驱动流内传热与传质过程,分析不同流动参数对传热、传质特性的影响,以及流动参数对传热传质过程中各热效应和流体总熵变化过程的作用。主要结论如下:

1) 流体无量纲温度 θ 随动电参数 K 的增大而减小,而 Joule 热系数 $|S|$ 及黏性热耗散系数 S_v 的增大会使得无量纲温度增大,且 Joule 热系数 $|S|$ 对温度 θ 的影响更大。

2) 无量纲离子浓度 ϕ 随着传质系数 $ReSc$ 、动电参数 K 的增大而减小。前者参数的改变主要影响通道内对流传质与扩散传质的比值,通过抑制离子扩散作用改变离子浓度;后者参数的变化改变了双电层厚度,通过改变流体速度来影响离子浓度。

3) 微通道中心区域内流体的熵最小,由中心指向壁面的过程熵逐渐增大。流体的总熵 S_T 为动电参数的 K 、 $ReSc$ 和质量弥散系数 M_d 的增函数。黏性热耗散系数 S_v 与 Joule 热系数 $|S|$ 发生变化时,对总熵影响较小,但总体表现为总熵随两参数的增大而增大。对于动电参数 K 、质量弥散系数 M_d 或者 $ReSc$ 中任意一个参数的增大,都可以使传质-扩散热效应在熵增加过程起主导作用。

附 录

$$A = \frac{\gamma\lambda_D^2 E_x^2}{\kappa\sigma_w}, B = \frac{\beta\lambda_D^2 E_x^2}{\kappa\sigma_w}, \quad (A1)$$

$$S_v = \frac{\mu_w \sigma_w u_{HS}^2}{\lambda_D^2 E_x^2}, S = \frac{E_x^2 H}{q\sigma_w}, \quad (A2)$$

$$I_1 = \int_0^1 \left(1 + \frac{BK^2\theta}{S}\right) \cosh \psi^* dy^*, I_2 = \int_0^1 e^{-AK^2\theta/S} \left(\frac{du^*}{dy^*}\right)^2 dy^*, I_3 = \frac{1}{u_m^*} \left(1 + \frac{SS_v}{K^2} I_2 + SI_2\right), \quad (A3)$$

$$S_G = \frac{S_{gen}}{\kappa/H^2}, S_H = \frac{1}{(\theta + \Theta)^2} \left[\left(\frac{I_3}{Pe}\right)^2 + \left(\frac{d\theta}{dy^*}\right)^2 \right], \quad (A4)$$

$$S_V = \frac{SS_V}{K^2(\theta + \Theta)} e^{-AK^2\theta/S} \left(\frac{du^*}{dy^*} \right)^2, S_M = \frac{M_d}{(\phi + \Omega)} \left[1 + \left(\frac{d\phi}{dy^*} \right)^2 \right], \quad (A5)$$

$$S_{HM} = \frac{M_d}{(\phi + \Omega)} \left[\frac{I_3}{Pe} + \left(\frac{d\theta}{dy^*} \right) \left(\frac{d\phi}{dy^*} \right) \right], S_J = \frac{S}{(\theta + \Theta)} \left(1 + \frac{BK^2\theta}{S} \right) \cosh \psi^*. \quad (A6)$$

参考文献 (References):

- [1] 林炳承, 秦建华. 微流控芯片实验室[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (LIN Bing-cheng, QIN Jian-hua. *Microfluidic Chip Laboratory*[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [2] 林炳承. 图解微流控芯片实验室[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (LIN Bing-cheng. *Graphic Microfluidic Chip Laboratory*[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))
- [3] Mala G M, Li D, Dale J D. Heat transfer and fluid flow in microchannels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, **40**(13): 3079-3088.
- [4] Xuan X, Xu B, Sinton D, et al. Electroosmotic flow with Joule heating effects[J]. *Lab on A Chip*, 2004, **4**(3): 230-236.
- [5] Maynes D, Webb B W. The effect of viscous dissipation in thermally fully-developed electroosmotic heat transfer in microchannels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, **47**(5): 987-999.
- [6] Tang G Y, Yang C, Chai C K, et al. Numerical analysis of the thermal effect on electroosmotic flow and electrokinetic mass transport in microchannels[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, **507**(1): 27-37.
- [7] Bejan A. The thermodynamic design of heat and mass transfer processes and devices[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1987, **8**(4): 258-276.
- [8] Shamshiri M, Khazaeli R, Ashrafizaadeh M, et al. Heat transfer and entropy generation analyses associated with mixed electrokinetically induced and pressure-driven power-law microflows[J]. *Energy*, 2012, **42**(1): 157-169.
- [9] Guo J, Xu M, Cai J, et al. Viscous dissipation effect on entropy generation in curved square microchannels[J]. *Energy*, 2011, **36**(8): 5416-5423.
- [10] Ibáñez G, López A, Pantoja J, et al. Optimum slip flow based on the minimization of entropy generation in parallel plate microchannels[J]. *Energy*, 2013, **50**(1): 1926-1937.
- [11] Matin M H, Khan W A. Entropy generation analysis of heat and mass transfer in mixed electrokinetically and pressure driven flow through a slit microchannel[J]. *Energy*, 2013, **56**(56): 207-217.
- [12] 李战华, 吴健康, 胡国庆, 等. 微流控芯片中的流体流动[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (LI Zhan-hua, WU Jian-kang, HU Guo-qing, et al. *Fluid Flow in Microfluidic Chip*[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [13] Sadeghi A, Saidi M H. Viscous dissipation effects on thermal transport characteristics of combined pressure and electroosmotically driven flow in microchannels[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2010, **53**(19/20): 3782-3791.
- [14] Sadeghi A, Yavari H, Saidi M H, et al. Mixed electroosmotically and pressure driven flow with temperature dependent properties[J]. *Journal of Thermophysics & Heat Transfer*, 2011, **25**(3): 432-442.
- [15] 杨大勇, 王阳. 微通道中电渗流及微混合的离子浓度效应[J]. 应用数学和力学, 2015, **36**(9): 981-989. (YANG Da-yong, WANG Yang. The effect of ion concentration on the electro osmotic flow and micro mixing in micro channel[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2015, **36**

- (9): 981-989.(in Chinese))
- [16] Bejan A. The thermodynamic design of heat and mass transfer processes and devices[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1987, **8**(4): 258-276.
- [17] San J Y, Worek W M, Lavan Z. Entropy generation in combined heat and mass transfer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1987, **30**(7): 1359-1369.
- [18] Yavari H, Sadeghi A, Saidi M H, et al. Combined influences of viscous dissipation, non-uniform Joule heating and variable thermophysical properties on convective heat transfer in microtubes[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2012, **55**(4): 762-772.

Analysis of the Heat and Mass Transfer Process and Entropy in Electroosmotic Flow

ZHAO Xiao-ling, YANG Da-yong, WANG Yang
(Information Engineering School, Nanchang University,
Nanchang 330031, P.R.China)

Abstract: The heat and mass transfer process in microchannels was analyzed with constant heat flux through the wall. In the numerical calculation model, the electric double layer potential, velocity, ion concentration and temperature distribution were characterized with the Poisson-Boltzmann equation, the Navier-Stokes equation, the Nernst-Planck equation and the energy equation, respectively. The effects of different flow parameters on each thermal index in the heat and mass transfer process were investigated by means of the entropy generation, and the influences of important flow parameters on the total entropy generation and the proportion of each thermal effect were discussed in detail. The results reveal that, the increases of the kinetic parameters and the Joule heating coefficient weaken the heat transfer performance, and the influence of the kinetic parameters is more evident. The total entropy of the flow is an increasing function of the kinetic parameters, the mass transfer coefficient and the mass dispersion coefficient.

Key words: electroosmotic flow; heat and mass transfer; entropy

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(11302095)

引用本文/Cite this paper:

赵晓玲, 杨大勇, 王阳. 电渗流中传热传质过程与熵的分析[J]. 应用数学和力学, 2017, **38**(3): 310-320.

ZHAO Xiao-ling, YANG Da-yong, WANG Yang. Analysis of the heat and mass transfer process and entropy in electroosmotic flow[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, **38**(3): 310-320.