

文章编号: 1674-5566(2009)03-0381-04

· 研究简报 ·

传热过程中的场协同作用应用分析

施 伟, 刘艳玲, 周继军, 谢 晶

(上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

摘 要: 简要介绍了传热过程中场协同作用的基本思想。分别从能量方程、图线、边界层理论和场协同原理的角度分析了流体流过恒温半无限大平板时壁面有喷吹或抽吸的现象和流体垂直流过两不等温的平行多孔平板的现象。讨论了冷却和加热壁面时流体速度的变化对壁面热流密度的影响。从不同角度分析所得结论是一致的, 从而表明了场协同原理从一个新的角度揭示了对流传热的物理机制, 其可以作为一种新的分析对流传热和各种传递现象的方法。

关键词: 场协同原理; 强化传热; 边界层

中图分类号: TK 124 **文献标识码:** A

Field synergy action and its applications in heat transfer process

SHI Wei, LIU Yan-ling, ZHOU Ji-jun, XIE Jing

(College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A brief review on the principle of field synergy in heat transfer process is presented. The flow along a constant temperature semi-infinite plate with injection or suction and the flow vertically across two different temperature parallel porous plates are analyzed with energy equation, diagram, boundary layer theory and field synergy principle severally. The influence of velocity on heat flux is discussed. The consistence of the results with different methods shows that the field synergy principle can be used to analyze convection and other transfer processes as a new method.

Key words: field synergy principle; heat transfer enhancement; boundary layer

传热强化是国内外传热学界重要的研究课题,几十年来,人们对其进行了大量的理论和实验研究^[1-3]。1998年我国学者过增元教授从对流换热的能量方程出发,重新审视了对流换热的物理机制,指出流场和温度场的协同作用(即速度场和温度梯度场的大小及两者的方向夹角)是影响对流换热强弱的重要因素^[1],从而揭示了对流换热和传热强化的物理本质,并发展出一系列控制对流换热强度的新方法。本文从不同的角度分析了流体流过恒温半无限大平板时壁面有喷吹或抽吸的现象和流体垂直流过两不等温的平行多孔平板的现象,所得结论是一致的,从而表明了场协同原理可以作为一种新的分析对流传热和各种传递现象的方法。

收稿日期: 2008-06-25

基金项目: 上海市教委重点课程建设项目(6700308)

作者简介: 施 伟(1972-),男,江苏海门人,硕士,讲师,主要从事相变传热和传热强化方面的研究。E-mail: wsh@shfu.edu.cn

1 场协同原理简介

以稳态不可压流体的二维层流边界层为例, 设来流速度为 u_∞ , 来流温度高于平板温度, 热边界层的厚度为 $\delta_t(x)$, 其能量方程为

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

其中 ρ 、 c_p 和 λ 分别为流体的密度、比热和导热系数, T 为温度, u 和 v 分别为 x 和 y 方向速度。对 (1) 式两边在热边界层内积分可得:

$$\int_0^{\delta_t(x)} \rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_w = q_w(x) \quad (2)$$

把 (2) 式改成矢量形式:

$$\int_0^{\delta_t(x)} \rho c_p \left(\vec{U} \cdot \nabla T \right) dy = \int_0^{\delta_t(x)} \rho c_p \left(|\vec{U}| \cdot |\nabla T| \cdot \cos \alpha \right) dy = q_w(x) \quad (3)$$

其中 \vec{U} 为速度矢量, α 为速度矢量与温度梯度矢量的夹角。式 (3) 表明, 对流换热的强弱不仅与流速、温差和流体物性有关, 也和速度矢量与温度梯度矢量的夹角有关。当速度矢量与温度梯度矢量的夹角减小时, 壁面上的热流密度就增大。当夹角为零, 壁面热流增至最大; 当夹角为 π , 壁面热流减至最小; 当夹角为 $\pi/2$ 时, 壁面热流为零, 即流动对换热的贡献为零, 与纯导热相同。

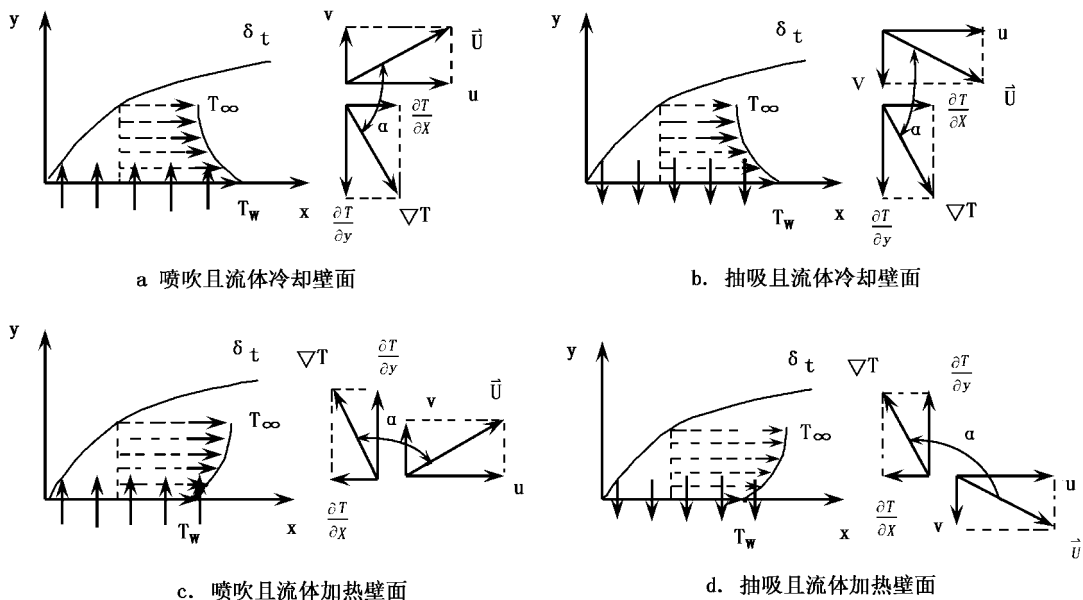


图 1 伴有喷吹或抽吸的流体加热或冷却壁面时边界层内速度和温度梯度的关系

Fig 1 Heating or Cooling Plate with injection or suction and the relation between \vec{U} and ∇T

2 流体流过平板时有喷吹和抽吸的现象

图 1 为流过平板的流体加热或冷却固壁时伴有喷吹或抽吸的现象, 边界层内的温度分布和速度矢量与温度梯度矢量的关系分别如各图所示。对边界层内能量方程积分可得 (2) 式, 其中 ∇T 对 q_w 的影响及式中各项的正负可见表 1。由表 1 可知, 无论是流体加热或冷却固壁, 喷吹相当于增厚边界层, 起到削弱换热的作用; 而抽吸相当于减薄边界层, 起到强化换热的作用。从速度场与温度梯度场协同的角度看, 壁面热流随速度矢量与温度梯度矢量的夹角增大而减小。上述分析表明, 由方程定性分析、示意图分析、边界层分析和场协同作用分析所得的结论是一致的。

在应用上, 流体喷吹可以采用为冷却暴露于极高温气体的表面, 如冷却火箭喷管或火箭体头锥的手段, 此时要求吹出的流体与自由流流体相同, 且吹出流体的温度为表面温度。当吹出量不断增大时, 努塞尔数最终会变为零, 这意味着边界层完全分离, 表面处流体的温度梯度会变为零。对抽吸的情况, 当吸入的流体与自由流流体相同, 且吸入流体的温度为表面温度时, 传热速率会增大。如吸入率无限增大, 传热速率最终会变为等于被吸入的流体的焓的变化, 这是由于流体在表面处马上变为表面温度的缘故^[5]。

表 1 式 (2) 中各项大小及 v (或 α) 对 q_w 的影响

Tab 1 Value of each item in formula (2) and the influence of v (or α) to q_w

	喷吹		抽吸	
	$T_w > T_\infty$	$T_w < T_\infty$	$T_w > T_\infty$	$T_w < T_\infty$
u	> 0	> 0	> 0	> 0
$\frac{\partial T}{\partial x}$	> 0	< 0	> 0	< 0
$\frac{\partial T}{\partial y}$	< 0	> 0	< 0	> 0
v	> 0	> 0	< 0	< 0
q_w	> 0	< 0	> 0	< 0
由式 (2) 分析	若 $v \uparrow$ 则 $q_w \downarrow$	若 $v \uparrow$ q_w 则 \uparrow	若 $v \downarrow$ 则 $q_w \uparrow$	若 $v \downarrow$ 则 $q_w \downarrow$
	若 $ v \uparrow$ 则 $ q_w \downarrow$		若 $ v \uparrow$ 则 $ q_w \downarrow$	
由图 1 分析	喷吹使温度分布曲线向上变直, 壁面的温度梯度减小, 换热减弱		抽吸使温度分布曲线向下变弯, 壁面的温度梯度增大, 换热增强	
边界层分析	增厚边界层, 削弱换热		减薄边界层, 强化换热	
场协同作用分析	$v \uparrow$ (即 $ v \uparrow$, $\alpha \uparrow$), 则 $q_w \downarrow$	$v \uparrow$ (即 $ v \uparrow$, $\alpha \downarrow$), 则 $q_w \uparrow$	$v \downarrow$ (即 $ v \uparrow$, $\alpha \downarrow$), 则 $q_w \uparrow$	$v \downarrow$ (即 $ v \uparrow$, $\alpha \uparrow$), 则 $q_w \downarrow$
	若 $\alpha \uparrow$ 则 $q_w \downarrow$, 若 $\alpha \downarrow$ 则 $q_w \uparrow$			

3 流体垂直穿过多孔平板传热的场协同分析

图 2 为间距为 L 的两平行恒温多孔平板, 上平板 1 的温度为 T_c , 下平板 2 的温度为 T_h , $T_h > T_c$, 流速为 v 温度为 T_c 的流体由下往上垂直缓慢穿过多孔平板, 由于换热充分, 流体在板处的温度与板温相同, 两板间流体的能量方程为

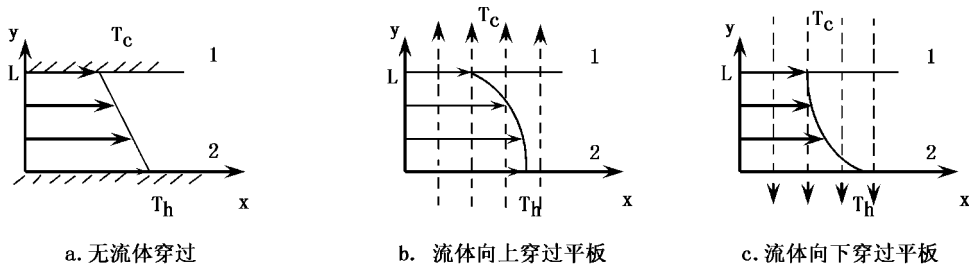


图 2 流体穿过平板时平板间的温度分布

Fig 2 Temperature distribution when fluid flows across plates

$$\begin{cases} \rho c_p v \frac{dT}{dy} = \lambda \frac{d^2 T}{dy^2} \\ T(0) = T_h \\ T(L) = T_c \end{cases}$$

$$\text{定义无量纲数 } \bar{T} = \frac{T - T_h}{T_c - T_h}, \quad \bar{y} = \frac{y}{L}$$

$$\begin{cases} \frac{d\bar{T}}{d\bar{y}} - Re^e \cdot Pr \frac{d\bar{T}}{d\bar{y}} = 0 \\ \bar{T}(0) = 0 \\ \bar{T}(1) = 1 \end{cases}$$

解得无量纲温度分布:

$$\bar{T}(\bar{y}) = \frac{\exp(Re^e \cdot Pr \bar{y}) - 1}{\exp(Re^e \cdot Pr) - 1}$$

$$Nu|_{\bar{y}=0} = \left. \frac{dT}{dy} \right|_{\bar{y}=0} = \frac{q(0)}{q} = \frac{Re^e \cdot Pr}{\exp(Re^e \cdot Pr) - 1}$$

其中 $q = \lambda \cdot \frac{T_h - T_c}{L}$, 为流体静止时的热流密度 (与纯导热相同), 而 $q(0) = -\lambda \left. \frac{dT}{dy} \right|_{\bar{y}=0}$ 为壁面处的热流密度。

由此可得: a) 当 γ 增大时, Re 数增大, 而 Nu 数将减小, 换热减弱; b) 温度分布曲线由图 2-a) 的直线变为图 2-b) 的曲线, 壁面的温度梯度减小, 换热减弱 (图 2-c) 为流体向下穿过平板, 壁面的温度梯度增大, 换热增强); c) 其对下平板而言, 相当于喷吹而增厚边界层, 减弱换热; d) 速度方向与温度梯度的夹角增至最大 π , 换热减弱。上述从不同角度分析而得的结论是一致的。

4 结论

对流体流过大平板时壁面有喷吹或抽吸的现象和流体垂直流过两不等温的平行多孔平板的现象, 分别从能量方程、图线、边界层理论和场协同作用的角度进行了分析, 所得结论是一致的, 从而表明场协同作用从一个新的角度揭示了传热过程的物理机制, 指出了强化传热的新途径: 通过减小速度矢量与温度梯度的夹角 (增大速度矢量与热流梯度的夹角) 可以强化表面的传热, 同时不增加阻力 (或功耗)。

广义上说, 自然界中存在各种场 (温度场、速度场、浓度场、重力场、电磁场、化学势场等) 的相互作用, 通过控制和调整一些场的关系, 可以强化或削弱表面传递的效果。场协同原理也可用于各种传递过程的优劣判断和改进提高, 为各种传递设备的设计、优化和运行提供了可靠的节能理论依据。

参考文献:

- [1] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1998, 41(14): 2221-2225.
- [2] 过增元. 对流换热的物理机制及其控制: 速度场与热流场的协同 [J]. 科学通报, 2000, 45(19): 2118-2122.
- [3] 程伟良, 韩晓娟, 孙宏玉. 质量传递过程的场协同作用 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 105-108.
- [4] 陶文铨, 何雅玲. 场协同原理在强化换热与脉管制冷机性能改进中的应用 (上) [J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(11): 1101-1105.
- [5] 凯斯 W M, 克拉福特 M E. 对流传热传质 [M]. 陈熙, 翟殿春, 译. 北京: 科学出版社, 1986: 166-167.