

文章编号: 0253 - 987X(2002)11 - 1101 - 05

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)

陶文铨, 何雅玲

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 简要地介绍了场协同原理的基本思想, 综述了文献中应用数值分析方法讨论场协同原理在强化单相对流换热分析中的应用情况, 说明场协同原理可以将现有文献中关于强化单相对流换热的 3 种说法统一起来, 因而是强化单相对流换热的统一理论。

关键词: 强化换热; 场协同原理; 数值模拟

中图分类号: TK124; TB651 **文献标识码:** A

Field Synergy Principle and Its Applications in Enhancing Convective Heat Transfer and Improving Performance of Pulse Tube Refrigerator(1)

Tao Wenquan, He Yaling

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A comprehensive review on the applications of the field synergy principle to the analysis of convective heat transfer is conducted. The existing three explanations for enhancing convective heat transfer are summarized and the results of numerical analysis to reveal their common essence are provided. It is found that all the three explanations can be unified under the field synergy principle. So the conclusion indicates that the field synergy principle is a unified theory for enhancement of single phase heat transfer.

Keywords: enhancement of heat transfer; field synergy principle; numerical modeling

强化传热是国内外传热学界研究的热门课题。进入 20 世纪 90 年代以后, 强化传热的技术开始由第 2 代向第 3 代发展^[1~4], 并且取得了突出的成绩。但是, 强化传热的实质究竟是什么, 即使对于最简单的单相强制对流换热, 文献中也没有一个统一的解释。常见的强化单相对流换热的机理有 3 种, 即: 减薄热边界层; 增加流体中的扰动; 增加壁面附近的速度梯度。这些说法都可以解释一些强化换热

的技术, 但不能解释另一些强化传热的技术。1998 年我国学者过增元教授及其合作者对边界层型的流动进行了能量方程的分析, 通过将该方程在热边界层内的积分, 证明了减小速度矢量与温度梯度之间的夹角是强化对流换热的有效措施^[5~8]。随后, 文献[9~11]将这一分析推广到椭圆型的流动与换热, 证明了对于 Prandtl 数不是很小的流体, 减小其速度与温度梯度的夹角也是强化椭圆型对流换热的有效

收稿日期: 2002 - 03 - 07。 作者简介: 陶文铨(1939~), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展规划资助项目(G2000026303); 国家自然科学基金资助项目(50076034; 50276046)。

措施. 这一思想在文献中现称为场协同原理 (field synergy principle).

“协同”就意味着各种相互作用力之间的协调一致. 如果将场协同原理推而广之, 不难有这样的推测, 在更一般的热力、传热和流动相耦合的迁移、传递过程中, 如果过程中的一些相互作用能协调一致, 也一定能强化其迁移、传递效果. 为叙述的方便, 本文着重综述场协同原理在对流换热强化研究中的应用, 在下一篇论文中将以前述脉管制冷机为例综述对更一般的热力过程应用场协同原理的研究进展.

1 场协同原理简介

对于二维边界层类型的对流换热, 将能量方程沿边界层厚度作积分, 可得^[1~4]

$$c_p \int_0^i (\mathbf{U} \cdot \text{grad } T) = - \left[k \frac{\partial T}{\partial y} \right]_{y=0} = q_w \quad (1)$$

式中: q_w 是固体表面上流体与固体之间所交换的热量, 即对流换热量. 根据矢量运算规则, 有 $\mathbf{U} \cdot \text{grad } T = |\mathbf{U}| |\text{grad } T| \cos \theta$. 可见, 在一定的速度及温度梯度下, 减小两者间的夹角是强化传热的有效措施.

对于椭圆型的流动, 以图 1 所示流过后台阶的情形为例, 将能量方程

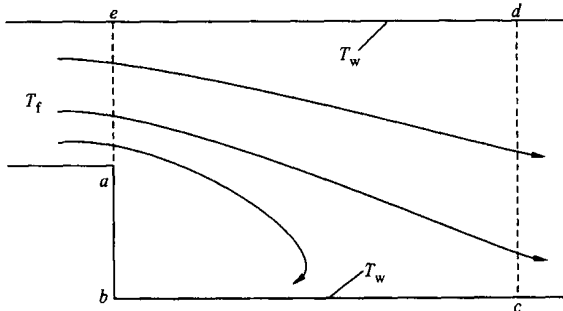


图 1 流过后台阶的流动与换热

$$c_p \left[\left(u \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \left(v \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2)$$

对计算区域 $abcdea$ 作积分, 可得与流体流动有关的部分

$$\iint_{abcdea} c_p (\mathbf{U} \cdot \nabla T) dx dy \quad (3)$$

及与导热有关的部分

$$\iint_{abcdea} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] dx dy \quad (4)$$

对式 (3) 应用高斯积分降维定律, 并将通过 cd 、 ea

部分的导热移到等号前面, 最后有

$$\iint_{abcdea} c_p (\mathbf{U} \cdot \nabla T) dx dy - \int_{cd} \mathbf{n} \cdot k \nabla T dS - \int_{ea} \mathbf{n} \cdot k \nabla T dS = \int_{abc} \mathbf{n} \cdot k \nabla T dS + \int_{de} \mathbf{n} \cdot k \nabla T dS \quad (5)$$

式中: \mathbf{n} 是计算区域边界的外法线; 等号前面的第 1 项是通过流体的流动所传递的热量, 第 2、3 项是通过流体的导热所传递的热量; 等号后是固体表面与流体间的换热量, 即对流换热. 根据传热学理论^[12], 当流体的 Prandtl 数不是很小时, 流体中的导热相对于流体运动所传递的热量可以略去不计, 因而减小 \mathbf{U} 与 ∇T 间的夹角仍然是强化对流换热的有效措施^[9~11].

2 强化单相对流换热的统一理论

文献[10, 11]中用 3 个层流流动与换热的例子说明场协同原理可以将 3 种解释统一起来. 这 3 个例子是: 边界层型的流动与换热; 有两个扰流子的平行板通道中的换热; 插入有同心圆棒的圆管内的流动与换热. 计算时设定在流体中, 无论扰流子或圆棒都只起到改变流场的作用而不参与换热. 采用有限容积法对上述 3 个例子进行了数值计算, 下面简述其计算结果.

图 2 给出了边界层流动的计算结果, l 代表流体流动部分的积分, h_x 是轴向位置 x 处的局部换热系数, θ_m 则是 x 截面上速度与温度梯度夹角的平均值. 由图 2 可见, 随着边界层的增厚, 局部换热系数下降, 而速度与温度梯度的截面平均夹角则增加, 所以减薄热边界层就相当于减小了速度与温度

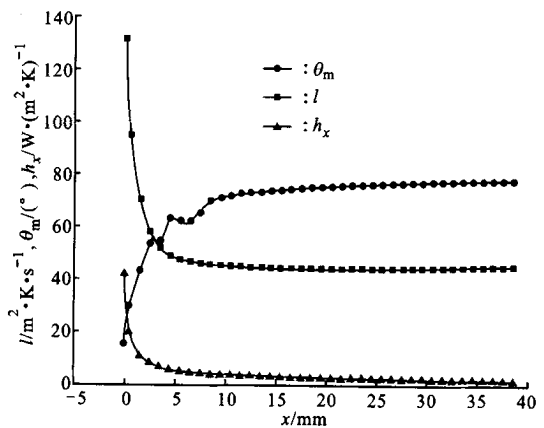


图 2 边界层流动中积分值、夹角及局部换热系数的沿程变化

梯度的夹角.

图 3 是带有两个扰流子的增强换热的平行板通道. 与没有扰流子的平行板通道的对比结果表明, 扰流子确实可以强化换热(见图 4、图 5), 而且积分随 Re 变化的趋向与平均 Nu 随 Re 变化的趋向完全相同, 但应指出, 平行板通道充分发展段的 Nu 与 Re 无关(见图 4), 而积分则随 Re 的减小而减小(见图 5). 这就是当 Re 减小, 也即 Pe (Pe 为 Re 与 Pr 的乘积) 减小时, 流体中的导热逐渐起作用的这一事实的表征. 特别值得指出的是, 图 6 所示的结果表明, 扰流子的存在使全场的速度与温度梯度的平均夹角明显地小于光滑平行板通道的情形, 这表明增加流体中的扰动实际上是要使速度与温度梯度协同得更好.

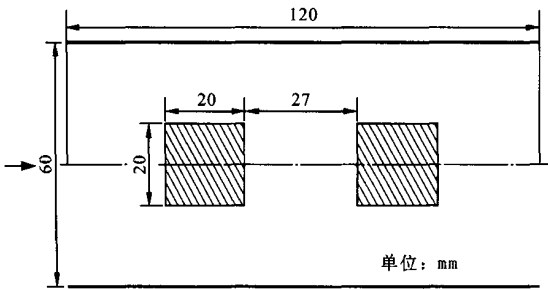


图 3 带有两个扰流子的平行板通道

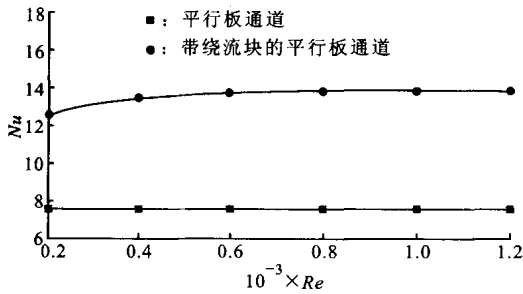


图 4 加扰流子与无扰流子的平行板通道内平均 Nu 随 Re 的变化

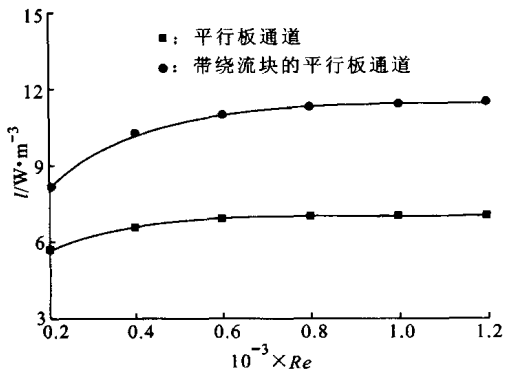


图 5 加扰流子与无扰流子的平行板通道的积分 I 随 Re 的变化

对于圆管中插入实心圆棒的情形(见图 7), 按入口段计算的结果(见图 8~图 10) 同样告诉我们: 增加壁面附近的速度梯度导致全场速度与温度梯度的协同变得更好.

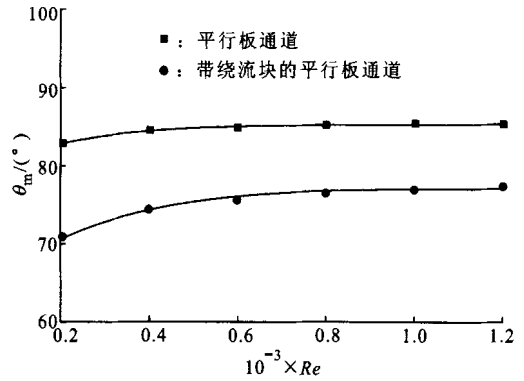


图 6 加扰流子与无扰流子的平行板通道的平均夹角随 Re 的变化

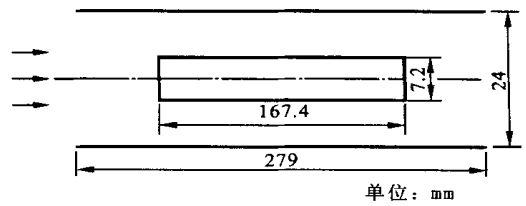


图 7 中心被堵的圆管

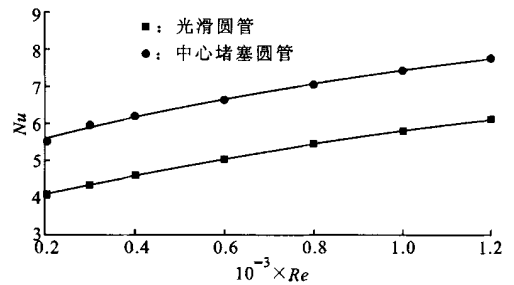


图 8 光滑圆管与中心被堵圆管的平均 Nu 随 Re 的变化

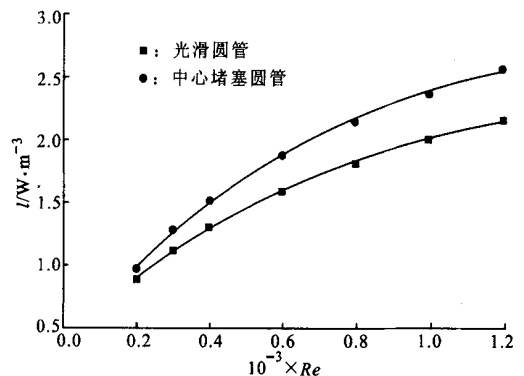


图 9 光滑圆管与中心被堵圆管的积分 I 随 Re 的变化

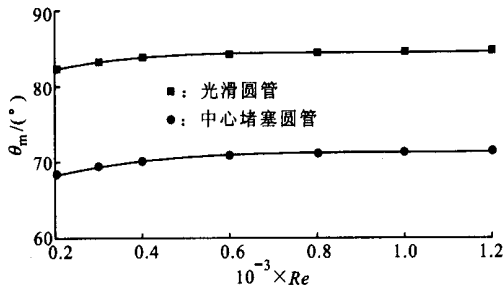


图10 光滑圆管与中心被堵圆管的平均夹角随 Re 的变化

3 应用场协同原理分析强化对流换热现象的举例

上述论证表明,场协同原理可以将现有的强化对流换热的几种说法统一起来,即要强化对流换热,就是要减小速度与温度梯度之间的夹角,或者说凡是能减小速度与温度梯度间夹角的措施必定可以强化对流换热(使夹角接近 180° 与接近 0° 属同一个效果,这里为简便起见,只提减小夹角).应用这一原理分析传热学中的许多现象,都可以得到合理的说明.文献[8,13]中举出了以下3个例子.射流冲击换热在滞止点处的换热特别强烈,就是因为滞止点处速度矢量与流体中的温度梯度同向(固体表面被冷却时,夹角为 0°)或者反向(夹角为 180°),即速度与温度梯度完全协同,使换热达到最强.圆管内层流充分发展对流换热等热流边界条件的努谢尔数 (Nu) 为 4.36,而等壁温时 Nu 为 3.66.数值计算表明,等热流情况下速度与温度梯度的夹角比等壁温时的大(均大于 90°),即协同程度比等壁温时的好,因而换热较强烈.有抽吸时的边界层对流换热比没有抽吸时的强烈,也是因为抽吸时,速度与温度梯度的协同程度比较好的缘故.

在文献[14~17]中分别对离心力作用下的多孔介质中强制对流换热、放置通道中的强制对流换热以及气体外掠翅片管及管束的对流换热进行了场协同原理适用情况及表现形式的研究.结果表明,对离心力作用下的多孔介质的对流换热,当流速较低时,其速度与热流矢量同向,这时实验与理论分析都得出 Nu 与 Pe 呈线性关系,实现了速度与温度梯度的完全协同^[14].文献[15]对于旋转通道的数值计算结果显示:凡是旋转通道能使速度与温度梯度夹角减小,传热就强化,反之则削弱.对于气体外掠单根翅

片管的研究表明,当流速较低时, Nu 与 Re 呈线性关系变化,但流速大于一定数值后,流速增加引起的传热增加程度就逐渐减弱,体现在特征数方程 $Nu = CRe^n$ 中的指数 n 就小于 1.因此,从文献[14,16]的研究结果可以看出,上述特征方程中指数 n 的大小是速度与温度梯度协同程度的反映.在文献[17]中,对翅片管束的 Re 、翅片间距以及管排数对管束平均换热特性的影响进行了研究,得到的结果均与场协同原理完全一致.

4 应用场协同原理改进强化换热表面结构的举例

对于图 11 所示空气横掠板束的换热,平板对来流的倾角是影响传热性能的主要因素,实验与数值计算的结果示于图 12 中.由图可见,倾角为 30° 时,平板的平均 Nu 最大,而数值计算同时也证明在该倾角下,全场的速度与温度梯度的平均夹角最小,如图 13 所示.因此,在开发新型的强化换热表面时,应当寻求能使速度与温度梯度夹角减小的几何结构,这对于发展强化换热技术具有指导意义.

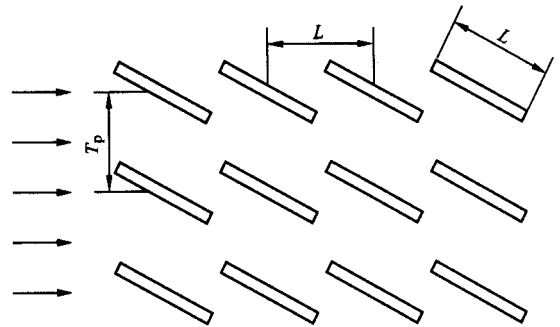


图 11 空气外掠板束的流动与换热

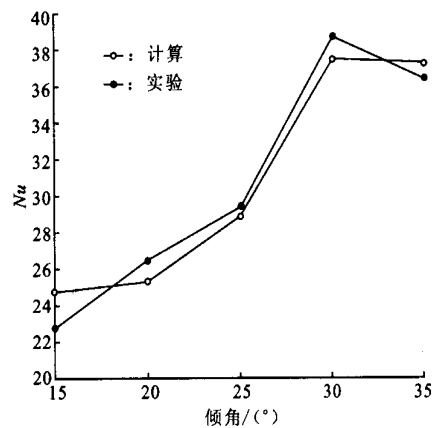
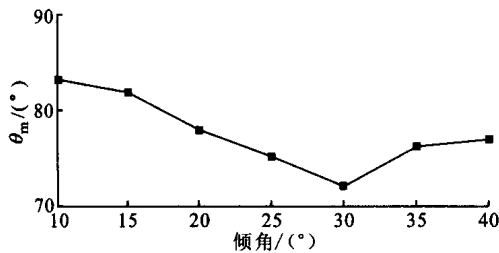


图 12 平板的平均 Nu 与平板倾角的关系

图 13 平板的倾角与 m 的关系

5 结 论

本文对近 4 年来由我国学者过增元教授提出,并在我国发展起来的强化迁移过程的场协同原理及其在强化对流换热方面研究工作的进展作了综述.研究表明,场协同原理也适用于椭圆型流动与换热,文献中现有的强化单相对流换热的 3 种机理都可以在场协同原理下统一起来,并且一些以前难以得到合理说明的传热现象都可以用这一原理得到说明.场协同原理为发展强化传热技术指出了方向.

参考文献:

- [1] Bergles A E. Heat transfer enhancement - the maturing of the second-generation heat transfer technology [J]. Heat Transfer Engineering, 1997, 18: 47 ~ 55.
- [2] Bergles A E. Heat transfer enhancement - the encouragement and accommodation of high heat flux [J]. ASME J Heat Transfer, 1997, 119: 8 ~ 19.
- [3] Bergles A E. Techniques to enhance heat transfer [A]. Rohsenow W M, Hartnett J P, Chi Y I. Handbook of Heat Transfer, Third Edition [C]. New York: McGraw Hill, 1985. 11.1 ~ 11.76.
- [4] Bergles A E. Enhanced heat transfer: endless frontier, or mature and routine? [J]. Enhanced Heat Transfer, 1999, 6: 79 ~ 88.
- [5] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement [J]. Int J Heat Transfer, 1998, 41: 221 ~ 225.
- [6] Wang S, Li Z X, Guo Z Y. Novel concept and device of heat transfer augmentation [A]. Proceedings of 11th International Conference of Heat Transfer [C]. Philadelphia: Taylor & Francis, 1998. 405 ~ 408.
- [7] Guo Z Y, Wang S. Novel concept and approaches of heat transfer enhancement [A]. Cheng P. Proceedings of Symposium on Energy Engineering in the 21st Century [C]. New York: Begell House, 2002.
- [8] 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.
- [9] 刘星, 王秋旺, 何雅玲, 等. 场协同原理在椭圆型流动中的推广及其应用[J]. 东北大学学报, 2001, 22(增刊 2): 34 ~ 37.
- [10] Tao W Q, He Y L, Liu X, et al. A unified theory for enhancing single phase transport phenomena [A]. Imaiishi N, ed. Proceedings of 2001 IAMS International Seminar on Material for Use In Lithium Batteries and Transport Phenomena in Materials Processing [C]. Kasuga: Kyushu University, 2001. 77 ~ 90.
- [11] Tao W Q, Guo Z Y, Wang B X. Field synergy principle for enhancing convective heat transfer - its extension and numerical verification [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2002, 45: 3849 ~ 3856.
- [12] Kays W M, Crawford, M E. Convective heat and mass transfer [M]. New York: McGraw-Hill Company, 1980. 107, 246.
- [13] 过增元, 李志新, 胡桅林. 传热强化新概念 [A]. 过增元, 等编. 面向 21 世纪热科学研究——庆贺王补选院士七十五寿辰论文集 [C]. 北京: 高等教育出版社, 1999. 173 ~ 178.
- [14] 施明恒, 王梅, 郝英立. 离心力场作用下多孔介质中强制对流换热的研究 [A]. 中国工程热物理学会第十届年会论文集: 传热传质学(上册) [C]. 青岛: 中国工程热物理学会, 2001. 439 ~ 443.
- [15] 李增耀. 旋转通道内的湍流流动与换热的研究 [D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2001.
- [16] 宋富强, 屈治国, 何雅玲, 等. 空气外掠翅片管换热特性的数值分析 [J]. 西安: 西安交通大学学报, 2002, 36(9): 899 ~ 902.
- [17] 宋富强. 翅片管换热表面流动与传热特性的三维数值模拟及场协同原理分析 [D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2002.

(编辑 王焕雪)