中国科学
1990 年 9 月　　A 辑　　第 9 期

热流体力学中的若干问题

过增元
(清华大学工程力学系,北京 100084)

摘　　要

本文初步建立了热流体力学这一新学科，系统地研究了热对流动规律的影响，提出了一些新的物理现象和原理；热加速动量变化导致通道压力降；竖通道可压缩流体自然对流中亦存在一个临界热流量;还提出了热绕流的概念、流体运动中的热斥冷吸原理和(热换器)温度场均匀性优化原理.

关键词：传热学,流体力学,热力学,热流体力学

一、引　　言

流体力学是对流换热的基础，这是因为在很多流动和热过程同时存在的问题中如不考虑物性随温度变化,则求解连续方程和动量方程就能获得流场,在此基础上求解能量方程最后求得温度场和传热关系式. 当流体物性随温度有明显变化时，通常采用的办法是对常物性结果进行一定的修正(例如参考温度法等),或直接求解变物性微分方程组. 然而,确实还存在着这样一类问题,即在流动和热过程的耦合问题中热现象起着主要的甚至是决定性的作用,这时即使采用修正的办法或直接求解变物性微分方程组都不能揭示现象的本质，更无法得到规律性的东西，甚至会导致对某些现象的忽视和误解. 过去很少有人做这方面的工作. 而热流体力学将系统地研究热现象、热过程对流体流动过程的影响和作用,并揭示这种作用的物理机制和内在规律.

在传统的流体力学或传热学学科中，热力学原理的应用通常仅表现在用热力学第一定律而得到能量守恒方程,以及热力学第二定律用于某些过程的定性分析,而在热流体力学中还将引入热力学第二定律的定量分析,它对流动和热设备的优化分析和设计,以及流动和热过程的稳定性分析有着重要的意义. 因此，热流体力学是涉及热力学、传热学和流体力学的交叉学科.

二、热阻力

1. 热阻力的物理机制及其对流动的影响

图 1 所示的流动系统中,有内热源的等截面通道与无穷大容器相连,容器中压力高于环境

本文 1989 3 月 6 日收到，1990 年 2 月 10 日收到修改稿.

压力,从而形成气体从容器经过通道而流向环境. 作者在文献 [1] 中,在无粘、一维稳态条件下建立了联系截面 1 和 2 处参数的守恒方程组,通过求解得到了以下关系式:

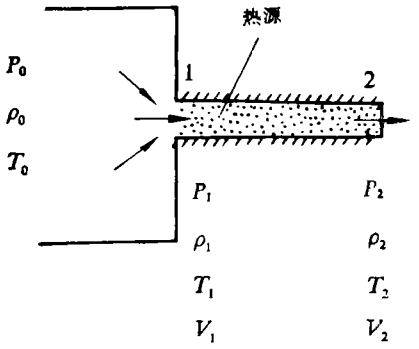

图 1 流动系统中热阻力示意图

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho_1 V_1 (V_2 - V_1), \tag{1}$$

$$\xi = \frac{\dot{m}_h}{\dot{m}_C} = \frac{1}{\sqrt{1 + H_e}}, \tag{2}$$

从 (1) 式可以看到,气流受热膨胀导致加速($V_2 > V_1$)从而形成压力降 ($\Delta P > 0$). 这意味着对于无粘流,加热也将形成通道压力降,我们把其称之为热阻力. (2) 式中 $\dot{m}_h$, $\dot{m}_C$ 分别代表等截面通道中加热后与加热前的质量速度, $H_e = S/(C_p T_0)$ 是无因次加热数, S 是单位质量流体所受的加热量. 容易看到, 加热必然使通道流量减小. 这种热阻塞现象对于热阻力的存在是一个明显的旁证. 需说明的是这种热阻塞现象与 Shapiro[2] 和其它气动力学著作中讨论的热壅塞现象是不同的, 后者是指只有当加热使通道出口 Mach 数等于 1 以后才能迫使通道流量减少.

作者[3]还讨论了等截面通道流受热后出口 Mach 数的变化. 分析结果表明, 加热将导致出口 Mach 数的降低. 这似乎与传统的结论相矛盾. 其实, 这种差异来自流动系统的给定条件的不同. 文献 [3] 还对这两种不同给定条件,加热对通道流的参数变化作了一系列的对比.

2. 热阻力系数

鉴于加热通道流能产生压力降,如流体力学中常用的阻力系数那样,可定义热阻力系数

$$C_t = (P_1 - P_2) \Big/ \left(\frac{1}{2} \rho_2 V_2^2\right). \tag{3}$$

求解守恒方程组可得到热阻力系数 C_t 的分析表达式, 它是加热数 H_e 和 Mach 数 M (或压力比 P_0/P_2) 的函数. 当 P_0/P_2 比临界压力比小得多时,可得以下简化式:

$$C_t = 2H_e/(1 + H_e), \tag{4}$$

从而提供了一个很简便的方法计算加热引起的压力降, 对工程设计和分析有重要实用价值.

布卫红等[4]讨论了通道粘性流中热阻力相对于粘性阻力的重要性. 从粘性可压缩、通道紊流微分方程组出发进行数值计算,把结果整理成粘性压降与热阻力的比值 $\Delta P_f/\Delta P_t$ 与加热数 H_e 的曲线关系. 结果表明,当通道长径比较小, $H_e > 2$ 时, 热阻力占统治地位, 甚至可忽略粘性引起的压降.

3. 自然对流中的热阻力

在竖通道自然对流中常采用 Boussinesq 近似,即除浮力项外其它各项中的物性都看作常数. 桂业伟1)系统地研究了物性变化对竖通道自然对流的影响. 从守恒方程组出发求得了充分发展通道流的关系式:

$$M_V = M_C/(H_V + 1)^3, \quad Q_V = Q_C/(H_V + 1)^3, \tag{5}$$

其中, M, Q 是无因次质量流量和换热量, 下标 V, C 相应代表变物性和常物性. (5) 式表

1) 桂业伟,清华大学博士论文, 1988 年.

明，考虑变物性影响时，其质量流量和换热量都将降低。等壁温通道中有因次流量随温度变化的曲线画于图 2。虚线是采用 Boussinesq 近似，即常物性近似的结果，通道流量随温差增加而上升，这与传统概念相符。实线是考虑变物性后的结果，当温差超过一定值以后，通道抽吸量随温差的增加反而下降了。桂业伟[1)]进一步的分析表明，这种现象的出现是由于热阻力的存在起着决定性的作用。当竖通道自然对流是以热流作为给定的边界条件时，热阻力的存在能使通道壁温产生飞升现象，这意味着通道单相气体自然对流换热与沸腾过程一样也存在着一个临界热流量，其定量关系式为

$$H_{V,Cr} = 0.237\sqrt{R_a}, \tag{6}$$

其中 H_V，R_a 分别为加热数和 Rayleigh 数。此临界现象的揭示，对电子器件的散热、散热器肋片的布置提供了新的分析和设计准则。

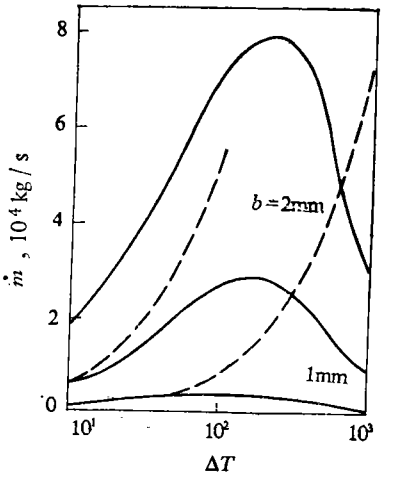

图 2　通道流量随温差的变化

($T_\infty = 300$K，$L = 0.1$ m.　---- 表示常物性结果，　——表示变物性结果)

4. 其它问题中的热阻力

热阻力是通道流受热时必然存在的基本现象，其应用方面必然是很广的。由于近年来才提出这个概念，很多应用领域还有待推广和开发，下面简单介绍部分应用实例：(1) 对流沸腾中的热阻力。两相流中的加速压降常被分解为气态密度、液态密度和干度变化的贡献，故不作近似很难得到分析表达式。吕东明[5]应用热阻力概念，在均相模型的条件下引进了压缩因子参数，最后求得了对流沸腾中热阻力系数的分析表达式。所计算的加速压降数据与其它方法和实验数据符合相当好。(2) 超音速通道流的加热。过增元等[6]采用分析和数值计算方法得到了超音速通道流加热时的流谱图。随着热阻力的增加，通道出口处的斜激波变为正激波，然后激波向上游推进直至在喷管喉部处消失。它表明在一定的加热条件下，即使压力比超过临界压力比，也得不到超音速流。(3) 高压气吹断路器。布卫红等[7]详细计算了瞬态加热对通道气流的影响，当加热强度足够大时，能出现倒流现象，它可被利用作为能量储存的手段以提高气吹断路器的性能。

三、热 绕 流

我们把均匀来流遇到一扰动源从而绕过此扰动源的流动称之为绕流，则绕流现象可以分为 3 类：(1) 实体绕流——无粘流绕过一个物体的流动；(2) 粘性绕流——粘流流经无限薄有限长零攻角平板时，因粘性滞止使前部流线抬高，在尾流区流线又逐渐恢复到原来水平位置；(3) 热绕流——来流遇到热区时，部分气流穿过热区，而相当部分则绕过热区而流动。前二类是大家熟知的，第三类是我们研究的对象。热绕流的物理机制为：气流通过热区时要承受热阻力，因此气流更容易从冷区通过，即热区前和通过热区的气流因受热膨胀的滞止作用而不断地被向外排挤而形成热绕流。

1) 见 984 页脚注。

1. 虚质量源与热偶极子

加热对流动的影响(如阻力和绕流现象)可以和质量注入对流动的影响相类比. 一定的加热强度可当量为对应的质量源强度,由于实际上不存在正真的质量源,所以把其称之为虚质量源. 图 3 为热边界层流动的比拟. 用流函数叠加原理可以求得流场. 如把零流线取在图3(a)中的 $\delta_e(x)$ 的轮廓线上,就可求得热边界层流动的等效虚质量线源强度为

$$v_\omega(x) = u_\infty d\delta_d(x)/dx. \tag{7}$$

设轴线上具有一个热源和一个热汇如图 4 所示.平行来流流经热源时流线被向外排挤,而当遇到热汇时流线必将下沉. 丁中涛等[1)]通过数值解得到了图 4 所示的流场. 在源区外的流场类似于圆柱绕流的流动,因此我们把其称之为热偶极子流动.

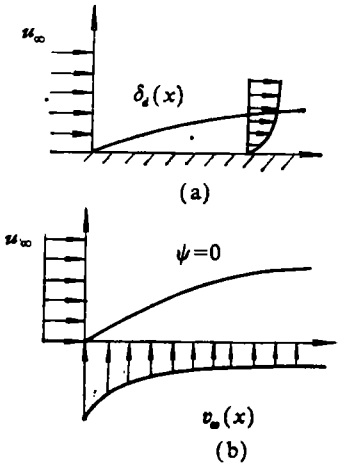

图 3 热边界层流动的等效虚质量线源
((a) 实际流体的排挤厚度轮廓线, (b) 平行来流和底边供气的无粘流)

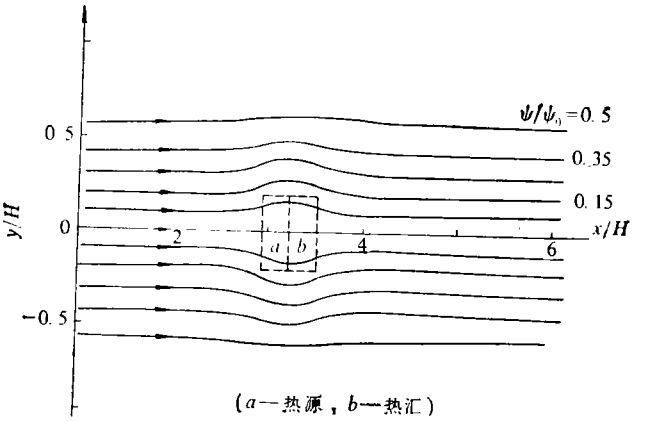

图 4 热偶极子流动

2. 通道中的热绕流

对于等截面充分发展的通道流,如截面上加热不均匀必将形成二维流动,即部分流体将绕热区而从相对较冷的区域通过. 文献 [3] 中在一定的简化条件下可得到通过冷区和热区的质量速度比值的近似分析关系式:

$$\dot{m}_{Ca}/\dot{m}_{ha} = \sqrt{T_{2,h}/T_{2,C}}, \tag{8}$$

其中 $\dot{m}_{Ca}$, $\dot{m}_{ha}$ 分别为冷区和热区的质量速度, $T_{2,h}$, $T_{2,C}$ 相应为热区和冷区气流出口温度. 当冷区温度为 300 K, 热区温度为 1500K 时, $\dot{m}_{Ca}/\dot{m}_{ha} = 2.2$, 即气流大部分是绕过热区而是从冷区通过的.

当气流中含有液滴或固体小颗粒时, 它们基本上跟随气流运动. 因此加热使气体绕流也必然使气流中的颗粒绕行. 当两相流(或气溶胶流)流经热壁时,颗粒将被排斥,甚至在热壁附近会出现一个粒子空区. 与此相反,当流过冷壁时会加速粒子在壁面上的沉降. 应该说明的是这里讨论的现象与气溶胶中讨论的"热泳"现象是完全不同的. 两相流中的热绕流现象可望

1) 丁中涛等,中国工程热物理学会传热质年会,武汉, 1989.

在热除尘、样品收集、热除垢和叶轮机械中得到应用.

3. 流体运动中的热斥冷吸原理

运动中的流体被加热时,就象受到一个排斥力(在外流中流线向外排挤，在内流中产生压力降而使流量减少),流体受冷却时,就象受到一个吸引力(在外流中流线向内收集，在内流中使压力升高而增加流量),因此,在此类现象基础上提出了"流体运动中的热斥冷吸原理".

气流运动中的热斥冷吸原理的应用是十分广泛的,它可以是外部流动中的热绕流、冷收集现象;内部流动中的热阻塞、冷畅通现象;气固两相流中热除尘(除垢)、冷收集现象；燃烧室中迴流区尺寸预测和反流现象等.

四、热驱动和热不稳定性

热驱动是指热或热过程是某种流动的起因. 它不仅发生在重力场的条件下（如自然对流),而且也可发生在其它体积力场中. 热不稳定性是指热过程是某种扰动不断增长的起因并最后使流动起始或流动类型突变的问题.

1. 重力场中的热驱动流

自然对流是重力场中热驱动流的最典型的例子. 图 5(a) 所示的系统中由于不存在重力与压力梯度间的平衡,因此一出现温差就必然引起流体的运动. 图 5(b) 为温度上低下高的水

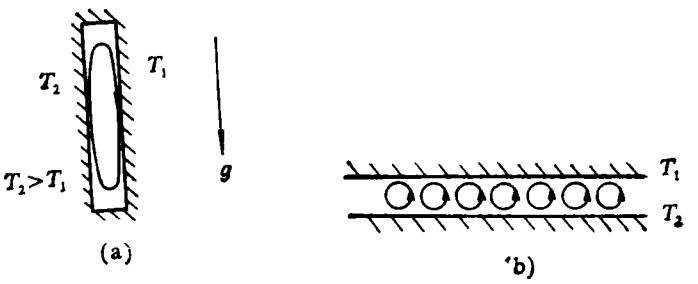

图 5 (a) 铅垂层中的自然对流，(b) 水平层中的 Benard 流

平层,虽然可以存在重力和压力梯度的平衡而保持静止状态,然而这是一种不稳定的平衡，其中因密度变化形成的浮升力是失稳因素,粘性和导热是致稳因素，当 Rayleigh 数超过其临界值时:

$$\mathrm{Ra} > \mathrm{Ra}_{,Cri} = 1700,\ \mathrm{Ra} = \frac{\beta g \Delta T d^3}{\nu K}, \tag{9}$$

运动就起始并形成如图 5(b) 所示的 Benard 涡胞. 这是最典型的热驱动和热不稳定性问题，常被称为 Benard 流.

在地球物理中,静止流体铅垂方向的压力变化不再能忽略，而导热和粘性则可不予考虑. 这样,大气层中的热不稳定性准则不再是 Rayleigh 数 Ra，而是所谓绝热梯度，当大气中的负温梯度(绝对值)大于绝热梯度时

$$-\partial T/\partial z > -(dT/dz)_a = \frac{\beta g T}{C_p} \tag{10}$$

就将产生对流。大气对流不仅对气候而且对环境污染有很大影响。如果形成接近地面的是不稳定层，而上面又是稳定层，这时烟囱排出的污染物将都返回至地面上，从而带来很大的危害。最严重的是 1948 年美国宾夕法尼亚州多诺拉、1952 年英国伦敦上空形成上层稳定（称逆温层）下层不稳定的大气对流，产生近地面污染而导致多人死亡事件。所以工厂位置、烟囱高度和城市规划都应考虑这方面的问题。

2. 非重力场中的热驱动

在旋转系统中的冷却通道中流体将受到离心力或科氏惯性力的作用。如果这些力的作用方向与流动方向相垂直，它必将引起通道中的二次流。其结果将使通道中的流场、温度场和换热特性发生变化。图 6[8]给出了热驱动二次流的流型以及对主流流场和温度场的影响。可以看到，二次流的出现使壁面温度梯度增加，即强化了通道的换热系数。

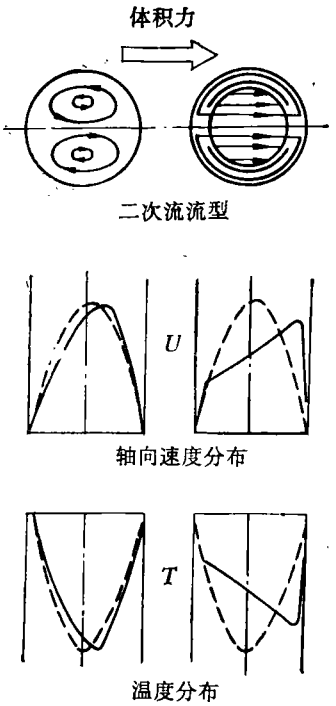

图 6 离心力场中的热驱动流

离心力场中的热驱动流不仅在旋转机械中能起强化换热的作用，而且在离心机中只需施加几度的温差就能大幅度地提高同位素分离效率。此外，在地转流动中它对气象有重要影响。

在表面张力场中，温度场的不均匀将导致流体的运动。焊接熔池中的金属液流、高纯单晶熔化悬浮区中的对流都是热驱动的典型实例。它们对工艺质量有着很大影响。例如，单晶生长过程中对流的出现将使单晶纯度降低，这是航天技术中无(微)重力场中材料制备的主要研究课题之一。

3. 热不稳定性

由热过程引起的流动和温度场的不稳定性可以分成 3 种类型：(1) 除了密度变化引起上述的 Benard 流和大气对流问题以外，还有热分层流的稳定性问题。它的特征参数为 Richardson 数。它代表了浮力与剪切力之比。分层流的稳定性问题不仅对湖泊水质热污染、电厂冷凝器效率，而且对气象问题(正的 Ri 数可以抑制大气紊流)有着重要意义。受热条件下气液两相流稳定性问题很多属于密度变化而引起的不稳定性。气液两相流不稳定性问题已有大量文献，这里不再叙述。值得提出的是张作义文[1)]运用非平衡非线性热力学原理，在两相流不稳定分析中引入了广义超熵产生判据，最后得到了密度波不稳定性的临界无因次准则；(2) 由于表面张力变化引起的不稳定性通常出现在具有自由表面的液体层中，作为温度分布的小扰动就可能破坏原来的力平衡。冰层融化和单晶制备过程中均会出现这种不稳定性；(3) 由于速度剖面变化引起的通常称为剪切流动不稳定性(大部分属于 Kelvin-Helmholtz 不稳定性)。热作用下气流的速度剖面有明显的变化，从而对稳定性有重大影响。加热减阻[9]、边界层控制和传热强化都是其应用实例。

1) 张作义，清华大学博士学位论文，1989 年。

五、热 优 化

自 70 年代末世界性能源危机以来，从能量的"质量"这个角度去讨论能量利用率显得愈来愈重要。这种利用率也称之为"可用能利用率"或"㶲效率"，即热力学第二定律效率。此方法不仅已用于能源规划与管理、动力、制冷和石油化工等领域中的分析和优化设计，而且它有可能成为流动、传热过程中的核心定律并形成自己的公理体系[12]。Bejan[11] 首先系统地讨论了流动和传热过程中的熵产生。使熵产生最小就成为热优化(或热力学优化)的设计基础。他求得了受迫管流的熵产表达式，它应是粘性和传热引起的熵产生之和。而管道的几何参数、流速对上述两项熵产的影响具有相反的方向，因此在某种条件下，必然存在着一个熵产极小值。图 7 给出了熵产率随 Re 数的变化。其中参数 ϕ 代表粘性和传热引起熵产之比。图 7 表明，与最佳 Re 数稍有偏离时，熵产就增加很多。可见采用优化设计是很重要的。Bejan 根据这个思想还对其它类型的热设备进行了优化分析。

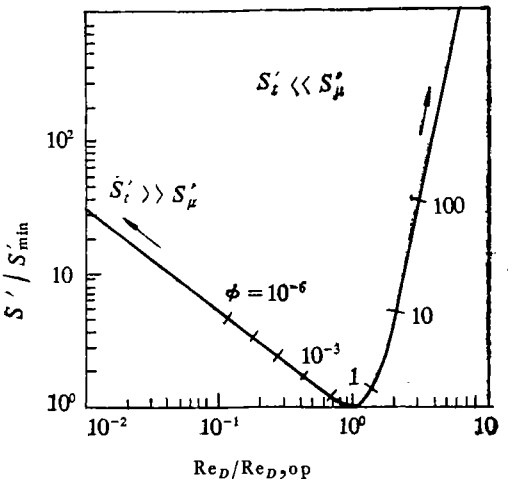

图 7　圆管流的熵产与 Re 数的关系曲线

众所周知，逆流换热器的热效率比顺流换热器高，而叉流换热器则介于它们之间，其原因是什么，过去都是以对数平均温差来解释，但不反映其物理机制。文献 [12] 则采用温差场的均匀性作为换热器有效度(热力学第一定律效率)的判据，即温差场愈均匀，其换热效率就愈高。更有意思的是此时熵产生也愈小。传统的看法认为传热量增大后熵产必然增加，即热力学第一定律和第二定律效率不能兼顾。然而，换热器内的"温差场均匀性"使得热力学第一、第二定律得到了一定的相关性。故我们提出了"温差场均匀性优化原理"——换热器内冷热流体温差场愈均匀、其换热效率就愈高，同时熵产生就愈小。其重要意义是显而易见的：(1) 提供了一个新的换热强化的方法；(2) 热力学第一定律和第二定律效率可以同时优化；(3) 可推广至其它热设备，甚至热系统的热优化设计。

参 考 文 献

[1] 过增元等，工程热物理学报，6(1985)，2：160—165.
[2] 夏皮罗 (Shapiro, A. H.)，可压缩流体的动力学和热力学，科学出版社，北京，1955，215—268.
[3] Guo, Z. Y. (过增元)，*Proceeding of the 8th Inter. Heat Transfer Conference*, San Fransisco, 1986, 59—68.
[4] 布卫红等，工程热物理学报，7(1986)，3：252—254.
[5] Lu, D. M. (吕东明)，*Proc. of the 2nd Inter Symposium on Heat Transfer*, Beijing, China, 1986, 164—170.
[6] Guo, Z. Y. (过增元) & Liu, Z. H. (刘志宏)，*Proceeding of the 4th Asian Congress of Fluid Mechanics*, Hong Kong, 1989.
[7] Bu, W. H. (布卫红)，*Proc. of the 9th Inter. Conference on Gas Disharge*, Italy, 1988, 107—110.
[8] Mori, Y., *Heat and Mass Transfer in Rotationary Machines*, 1984.
[9] Reshotko, E., *The 2nd Inter. Conference on Drag Reduction*, Cambrige, England, 1977, E11-E22.
[10] Bejan, A., *Mechanical Engineering*, 1988, 5: 58—65.
[11] Bejan, A., *Entropy Generation through Heat and Fluid Flow*, 1982.
[12] 过增元等，第二届高校工程热物理学术会议论文集，1986.