

· 学科进展 ·

热质理论及其应用研究进展

纪军^{1*} 刘涛¹ 张兴² 过增元²

(1 国家自然科学基金委员会工程与材料学部, 北京 100085;

2 清华大学工程力学系, 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

[摘要] 本文基于国家自然科学基金资助的重点项目“热量的能、质二象性的理论与实验研究”和变革性重大项目“热质理论的关键科学问题”的研究, 从传热学学科的背景和现状、热质理论的学术体系、普适导热定律及其应用、焓理论及其应用等方面介绍了热质理论的研究进展, 并对其国际影响力、热质理论的研究现状和未来学术发展方向作了探讨和展望。

[关键词] 热质理论, 普适导热定律, 焓理论

热质理论是清华大学过增元院士学术团队近些年提出的理论体系, 它是研究热量的传递规律及传热优化的新理论。该理论的建立是从审视热量的本质出发的, 和历史上的“热质说”(认为热是没有质量的流体)和“热动说”(认为热是物质内部粒子的振动)不同, 该理论提出热的“能、质”二象性学说, 一方面认为传统热学中热具有能量的属性, 另一方面根据爱因斯坦质能关系式定义了“热质”, 即热的质量, 热量在传递时同时具有质量的属性, 因此, 可以采用力学分析方法(包括牛顿力学和分析力学)研究热量的传递规律。

国家自然科学基金委先后对热质理论的研究通过重点基金和变革性重大项目进行了资助。国家自然科学基金委员会近些年启动“变革性重大项目”资助机制鼓励由于创新性强而实现的难度大、风险性高的项目, “热质理论的关键科学问题”是基金委历史上资助的第3个变革性重大项目。近些年, “热质理论”的研究已在国际上形成很有特色的研究方向, 在取得丰硕研究成果的同时, 也带动了相关交叉研究领域的跟进和发展, 在传热学界引起了广泛关注和学术争论。

1 学科背景和现状

虽然热学是一门发展历史比较长的学科, 但是现有的热学仍面临以下三个方面的挑战:

第一, 世界性的能源短缺要求提高能效。能源是人类社会经济增长和可持续发展的动力, 目前, 能源短缺已经成为全球的共同难题, 而提高能源利用效率是各国面临的共同选择^[1-3]。在各种能量的利用中, 80%以上要经过热量的传递与交换, 因此提高热量传递的能力、减小传递过程的损失是提高能源利用效率的关键问题。但是, 现有的传热强化理论与技术难以适应提高能源利用效率的要求, 因为在现有的传热理论中, 只有热量传递“速率”的概念而没有热量传递“效率”的概念, 从而使得传热过程只有强化的概念而没有优化的概念^[4]。为了改进热量传递的性能, 所付出的往往是材料(高导性能)或能量(流体泵功或外加电磁场), 得到的回报是传递速率的提高, 通常情况下, 在传热强化的同时阻力和泵功增加得更多, 因此通常情况下传热强化并不节能。传热过程的优化应该是指在给定条件下(比如给定高导热材料数量、驱动流体运动的泵功或流量等), 最大程度地提高系统的热量传递能力。由于目前的传热学缺乏传热优化的理论和方法, 使得现有的传热强化技术不可避免地带有一定的试验性和盲目性, 研究结果也缺乏通用性, 更重要的是不利于提高能源利用效率。

为了解决热过程优化的问题, 近些年发展了非平衡热力学、最小熵产原理和构型理论等不同的学术分支。为了让热力学知识能够更好的用于工程实

* Email: jijun@mail.nsf.gov.cn

本文于2014年6月17日收到。

际问题,20世纪中后期,Berry等人提出了现代热力学的另一个分支——有限时间热力学^[5]。美国杜克大学学者 A. Bejan^[6]根据不可逆过程热力学,以熵产率来衡量传热过程的不可性,并提出以熵产最小原理来优化传热过程,被称为热力学优化。但是 Shah等^[7]分析了18种典型换热器的性能与有效度的关系,发现熵产最小原理并不适用于热交换过程分析。此外,Bejan^[8]还提出利用“构型”法来布置发热体积内的最优导热通道网络,也常被称为构型理论,导热通道结构也被用在对流散热通道网络的优化,其不足之处是构型要事先设定,而且需用一维导热的假定。

第二,高新技术领域中经典的傅里叶导热定律不再成立。傅里叶导热定律隐含着热量的传递方式为扩散的机制,而在超快激光加工技术中,激光脉冲宽度可达到飞秒(10^{-15} s)量级,这种超快速的瞬态加热过程使得傅里叶导热定律不再适用。这些挑战吸引了大量学者对非傅里叶现象进行研究,并建立了各种非傅里叶导热模型。目前已有的模型,如 C-V模型^[9,10]通过对傅里叶导热定律加入热流弛豫时间修正得到了热波方程,理论预测出了有限速度的热波传递,Qiu和 Tien^[11]结合双温度理论和热流弛豫时间模型提出了双曲两步模型应用于金属材料中的瞬态非傅里叶导热研究,Tzou^[12]则提出了考虑温度和热流两种弛豫时间的双相滞模型。然而,它们都只是对傅里叶定律的唯象修正,通过加入不同的弛豫时间项来描述热流同温度梯度之间的滞后来解释有限热扰动速度的热波现象。这些修正模型不仅无法解释稳态条件下的非傅里叶导热现象,还会带来负温度和负熵产等悖论^[13,14]。近年来还发现,在纳米材料的稳态导热过程中,如果热流密度足够高,对于碳纳米管和其它低维材料中的导热问题,傅里叶导热定律也不适用^[15-17]。

最近也有一些学者采用声子水动力学方法得到非傅里叶导热模型并用于纳米系统的导热分析^[18,19],即通过求解声子的 Boltzmann 输运方程得到声子输运的宏观控制方程,代表性工作如: Banach等^[20]和 Jiaung等^[21]采用 Chapmann-Enskog 分布函数展开式和 Guyer等^[22]和 Hardy等^[23]采用本征函数分析的方法,其模型既包含了热流对时间的偏导数(体现为时间滞后效应),也包含了热流对空间的偏导数(体现为非局域效应),结合边界条件可以较好地预测纳米系统的导热。目前,几种方法得到的导热模型不能统一,结果也不同,在物理内涵上尚

没有明确的解释。这导致微纳机电器件的热分析和热设计无法进行,迫切需要发展新的热量传递理论。

第三,热学与物理学其它分支学科缺乏共性的量和规律。热学作为物理学的一门分支学科,一方面,它缺乏与其他物理分支学科间的某些共性规律。正如导热理论的奠基人傅里叶早在1822年在其热学专著《热的解析理论》中指出的那样^[24]“……无论力学理论的研究范围如何,它们都不能应用于热效应,它们不能用运动和平衡的原理来解释。……自然哲学的这一部分不可能与动力学的理论有关,它有它本身特有的原理。”所以,热学中没有热量运动速度、加速度、动量等物理量,没有类似于牛顿定律那样描述物体运动的基本定律。这就使得热学中唯象的、实验性的和经验性的定律居多,与力学、电磁学、光学相比,其理论基础还很不完善。另一方面,热学中却有不少独特的物理量,如熵、可用能(焓)和不可用能(熵)等。鉴于物理学体系中有关统一性的信念源远流长^[25,26],而且随着物理学领域的不断扩大,统一性还在继续发展,因此,探索热学与物理学其它分支学科更多的共性规律也是热学学科发展的驱动力。

世界性的能源短缺要求提高能效和高新技术领域经典傅里叶导热定律不成立的挑战和热学学科发展的需求提出了3方面的问题促使人们思考,出现上述现象的原因是否是由于热学中的基本概念有不足之处,或是缺乏某些基本物理量,这就需要对热学中最基本的概念和规律进行讨论和研究。正是基于这方面的思考,清华大学过增元教授及其团队从重新审视热量的本质出发^[27],提出了热质理论的学术体系。

2 热质理论及其应用

2.1 热质理论的学术体系

处于静止状态的物体的热量是能量的一种形式,称之为热能,它实际上是组成物体的大量粒子无规运动机械能的总和。组成无宏观运动的物体的各粒子必然具有其静止质量和运动质量。根据爱因斯坦质能关系式,现在把所有粒子因热运动而增加的质量的总和称之为物体具有的热质量,即热质,它就是物体热能所当量的质量,其定义为^[28,29]

$$E_h = \frac{E_v}{c^2} = \frac{V\rho c_v T}{c^2} \quad (1)$$

其中, V 、 ρ 、 C_v 、 T 相应为物体的体积、密度、比热容和温度; E_h 是物体的热容量和(固体的热能), M_h 是

物体的热能所当量的质量,简称热质。

这里提出的热质概念与18世纪热质说的概念是不同的,这里指的是热能所当量的质量,具有真正意义上质量的量纲[kg]。我们说热量具有质量的特性,并不否定热量具有能量的特性,当讨论热量与其它形式能量转换时,它表现为能量特性,而当讨论热量运动时,它表现为质量特性,所以热量具有“能、质”二象性,就如光具有波粒二象性。

在热质概念的基础上还可进一步引入热质势、热质速度、热质能(焓)等热学新概念,一方面可用牛顿运动定律描述热量传递过程,从而建立普适导

热定律,它不仅适用于在空间和时间的微纳尺度极端条件下的传热过程,而且在常规条件下可退化为当前常用的傅里叶导热定律,即普适导热定律同样适用于常规条件下的传热过程。另一方面用归纳法和演绎法导得一个新的核心物理量——焓,它代表了物体向外传递热量的能力,在传递过程中焓会有耗散而不守恒,所以焓耗散能够度量传热过程的不可逆性,焓的耗散可用来定义传热效率,并用于传热优化来提高热设备和热系统的能源利用效率(图1)。

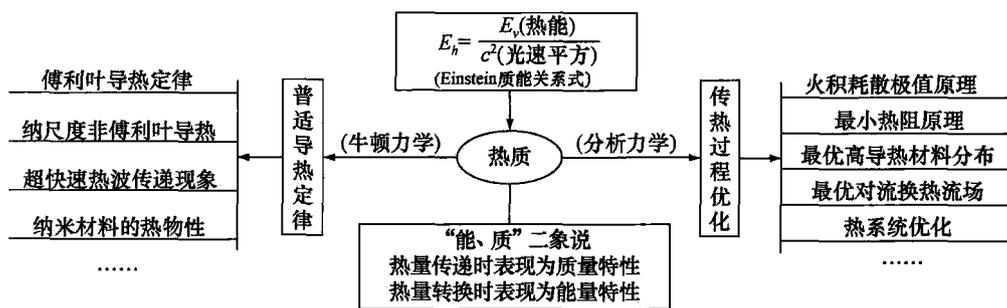


图1 热质理论的学术体系

2.2 普适导热定律及其应用

2.2.1 热质守恒方程

热质运动的守恒方程包括热质质量守恒方程与动量守恒方程。热质的质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho_h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_h \mathbf{u}_h) = 0, \quad (2)$$

它实际上就是传热过程中的能量守恒方程。热质的动量守恒方程为

$$\frac{\partial (\rho_h \mathbf{u}_h)}{\partial t} + \rho_h (\mathbf{u}_h \nabla) \cdot \mathbf{u}_h + \nabla p_h - f_h = 0, \quad (3)$$

与流体动力学中的 Navier-Stokes 方程具有类似的形式。该方程的左侧两项分别为热质运动的时间惯性力项与空间惯性力项,亦可以称为加速度项;右侧两项分别为热质运动的驱动力项与阻力项^[30-32]。热质在介质中的运动类似于多孔介质中的流体流动,所以热质阻力与热质流动速度成正比。在绝大部分工程实践中,热质的惯性力项非常小,热质的动量守恒方程即为驱动力与阻力的平衡,这时就得到了傅里叶导热定律,即 $\mathbf{q} = -\kappa_0 \nabla T$, 即热流 \mathbf{q} 正比于温度梯度 ∇T , 比例系数为导热系数 κ_0 。

热质理论所导出的普适导热定律与前人基于声子波尔兹曼方程求解出的导热方程具有类似的形式。声子波尔兹曼方程为

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v_g \nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_N + \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_R, \quad (4)$$

其中 f 为声子状态分布函数, v_g 为声子群速度, N 和 R 分别表示声子不同散射机制。热质理论所提出的基本概念,如热质迁移速度、热质压强等,都可以通过声子状态分布函数的积分得到。结合热质的概念,声子波尔兹曼方程可以用类似流体力学中导出 Navier-Stokes 方程的方法来得到。通过对声子状态分布函数作高阶展开,

$$f_D = f_E + \frac{\partial f_E}{\partial \omega} (\mathbf{k} \cdot \mathbf{u}) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f_E}{2\omega^2} (\mathbf{k} \cdot \mathbf{u})^2 + o((\Delta u)^2), \quad (5)$$

其中 \mathbf{k} 为声子波矢, \mathbf{u} 为声子气迁移速度,导出了热质理论中的空间惯性力项,从而阐明了热质理论所导出的普适导热定律可以从声子波尔兹曼方程的非线性解得到^[33]。另一方面,声子波尔兹曼方程的 Chapman-Enskog 展开可以得到热质理论中的粘性耗散项,预测了纳米系统中可能出现热导率随着系统直径或者厚度的改变而变化的现象,在研究当前热点的纳米热电材料方面具有重要应用^[34]。

2.2.2 普适导热定律

当热质的动量守恒方程中的惯性力项不能忽略时,如在快速瞬态激光加热、纳米尺度导热等情况下,傅里叶导热定律不足以描述真实导热过程。这时,从热质动量守恒方程中可以导出比傅里叶导热定律更为普适的导热定律,包含了热量运动的惯性

力项的影响,即

$$\tau_{TM} = \frac{\partial q}{\partial t} + 2l \frac{\partial q}{\partial x} - b\kappa \frac{\partial T}{\partial x} + \kappa \frac{\partial T}{\partial x} + q = 0, \quad (6)$$

其中

$$\tau_{TM} = \frac{\kappa}{2\gamma\rho C^2 T}, l = \frac{q\kappa}{2\gamma C(\rho C T)^2} = u_h \tau_{TM},$$

$$b = \frac{q^2}{2\gamma\rho^2 C^3 T^3} = Ma_h^2, \quad (7)$$

τ_{TM} 为延迟时间, l 为具有长度量纲的惯性系数, Ma_h 是热马赫数,它是声子气迁移速 u_h 与声子气声速 C_h 的比^[35,36]。

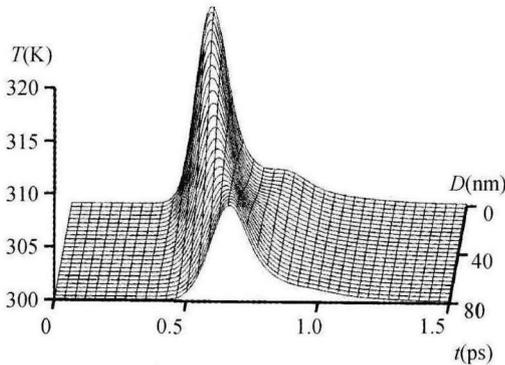


图 2 激光脉冲加热形成的热波与热波反射

普适导热定律预测了多种非傅里叶导热现象。例如,当热流的时间惯性力不能忽略时,普适导热定律预测了热量是以波动形式向前传递的,具有有限的传播速度(图 2)。这克服了传统傅里叶导热定律预测的热量传播速度无限大的悖论,在预测快速瞬态激光加热过程方面具有重要意义^[37-39]。又如,类似稀薄气体在微通道中的流动,热质在运动过程中由于密度降低会发生加速,这将导致傅里叶定律被改写成 $q = \kappa_0(1-b)\nabla T$,体现了热质流体的可压缩性。这样,普适导热定律可以预测碳纳米管或者石墨烯的等效热导率随着长度与温度的变化^[40-42]。

2.2.3 普适导热定律的应用

热质理论提出热量具有质量属性,并且利用牛顿力学的分析方法对热质流体的运动规律进行描述并获得普适导热方程,可以对超快速飞秒激光加热、稳态高热流密度导热引起的非傅里叶导热现象进行描述。在稳态条件下,由于热质流体的空间惯性力不可忽略,将导致材料中的导热过程偏离傅里叶导热的预测。普适导热方程指出稳态非傅里叶导热现象将随着温度的降低和热流密度的增加而越发明显^[35-39]。

碳纳米管的管径只有几个纳米到几十纳米,在真空环境中可以承受 3000 K 的高温,所以碳纳米管

中的热流密度可以超过 10^{12}Wm^{-2} ,可以产生明显的非傅里叶导热现象。声子是碳纳米管中热量的主要载体,声子的动量守恒方程就是普适导热方程,指出当碳纳米管中的热马赫数达到 1 时将出现热流壅塞现象,即碳纳米管端点处存在温度阶跃,并且会随着热流密度的增加而增加。这也是由热质理论首次预测的一种全新的非傅里叶导热现象^[40-42]。

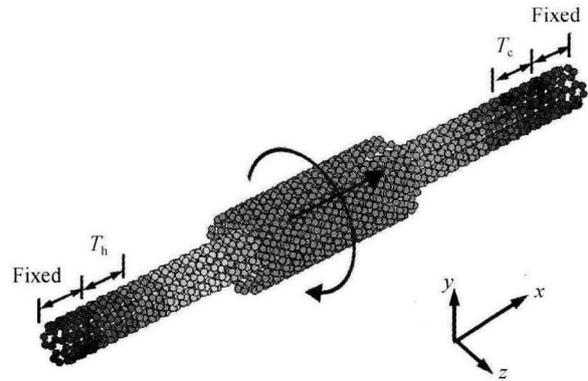


图 3 碳纳米管受热流的驱动而发生运动

基于热质理论发现温度梯度或热流可以驱动纳米颗粒的运动。当系统中存在热流时,系统中的热质进行定向运动。在热质运动的过程中,热质受到物体结构的阻碍作用,同时,热质也会对物体产生推动作用,这个力会驱动物体向热流方向运动。采用分子动力学模拟研究了双壁碳纳米管的热驱动现象,其中定子为内管,两端施加温度梯度,动子为外管,模拟得到的主要结论包括:动子做匀加速运动,只受热驱动力作用,阻力可以忽略;动子和定子手性组合的不同引起不同管间势能面形状分布,存在最小能量轨道限制动子运动,即沿轴向平动、转动或螺旋线型运动其中之一,当系统均温高于某一临界温度,动子可突破最小能量轨道间的势垒;热驱动力的大小与系统平均温度无关,而随温度梯度的增大线性递增;对于动子较大的系统,驱动力与系统的尺度无关,动子较小时,热驱动力随动子增大而增大^[43,44]。

基于热质理论和普适导热定律,提出了介电纳米结构中声子气的运动应该受到两种阻力的影响,其一为成正比于声子气运动速度的达西阻力,其二为成正比于声子气运动速度二阶导数的布林克曼项。对于宏观尺度材料,达西阻力项远大于布林克曼项,此时热导率不随材料尺度变化。对于纳米尺度材料,布林克曼项与达西阻力项大小在同一量级上,此时可以求解出纳米材料等效热导率与系统特征尺度的依赖关系。通过与实验数据的对比,发现硅纳米材

料中声子气的黏性与系统特征尺度成正比,从而得出了可以准确预测纳米线和纳米薄膜等效热导率的模型^[34]。

2.3 焨理论及其应用

2.3.1 焨的定义

根据导热、导电及流动过程之间的类比性,可以发现导热过程中,热量在温差作用下形成热流,热流大小由傅立叶定律决定;导电过程中,电量在电势差的作用下形成电流,电流与电势差的关系由欧姆定律确定;流动过程中,流体在重力势差的作用下形成流动,流量大小由牛顿粘性定律确定。并且,傅立叶定律、欧姆定律和牛顿粘性定律都是唯象的线性定律,其数学形式是一致的。因此,除了各个物理量所代表的意义不同外,几乎可以把导热过程、导电过程和流动过程完全对应起来。然而,在电学中存在电势能和电势能耗散的概念,在流体力学中存在机械能和机械能耗散的概念,而热学中却没有与之相对应的“热势能”和“热势能耗散”的概念。因此,过增元等提出了一个新物理量——焨, G , 来表征物体(系统)所含热量在其温度场中所具有的势能^[45-47]:

$$G = \frac{1}{2}UT = \frac{1}{2}Mc_v T^2, \quad (8)$$

式中, c_v 、 T 、 M 和 U 分别为定容比热、温度、质量和内能。

导电过程中,伴随着电量的输运,存在电能的输运;流动过程中,伴随着质量的输运,存在机械能的输运。与此相似,在导热、对流换热以及辐射换热过程中,伴随着热量的输运,也有焨的输运。并且,随着热量从高温传向低温,焨是非守恒量,存在耗散。因此,焨描述了物体在一段时间内对外传递热量的能力;利用焨可以定义不涉及热功转换的传热过程的效率;系统的输出焨与输入焨之比;焨对温度的导数能够反映热量传递的驱动力。同时,从焨的角度可以表明传热过程是一个不可逆过程,并且可以将焨耗散作为传热过程不可逆的一个新的量度,可以获得传热过程优化的一般性方法,达到提高传热过程性能的目的。

2.3.2 换热过程优化的最小焨耗散热阻原理

根据导热、对流换热以及辐射换热过程的焨平衡方程可以发现:传热量相同时,最小焨耗散对应了最小传热温差,即最优的换热性能(最小焨耗散原理);传热温差相同时,最大焨耗散意味着最大传热量,即最优的换热性能(最大焨耗散原理)。同时,类比于导电过程中电阻的定义式,基于焨耗散的概念

可以定义换热过程中的焨耗散热阻, R_h , 其表达式为:

$$R_h = \frac{\Phi_h}{Q} = \frac{(\Delta T)^2}{\Phi_h}. \quad (9)$$

式中, Q 为换热量, Φ_h 为换热过程的焨耗散。

根据焨耗散热阻,可以将不同边界条件下的最小焨耗散原理和最大焨耗散原理统称为最小焨耗散热阻原理,即当焨耗散热阻最小时,导热过程的性能最优。针对“体-点”(图4)^[48]和太阳能集热板^[49]等导热问题,应用最小焨耗散热阻原理导出了相应的优化设计准则,即温差均匀性准则;针对对流换热问题,应用最小焨耗散热阻原理导出了层流换热优化的场协同方程^[50]以及湍流换热优化的场协同方程^[51]。针对层流/湍流换热过程,求解场协同方程获得了换热性能最佳的速度场;纵向涡能够有效优化层流换热,而近壁小涡则有利于优化湍流换热。并且,上述场协同方程能够预测不同 Re 条件下,强化换热元件的最佳几何结构。在此基础上,提出了系列对流换热优化技术。

在此基础上,通过研究发现根据传热过程不同的应用场合,传热过程的目的可分为加热/冷却物体

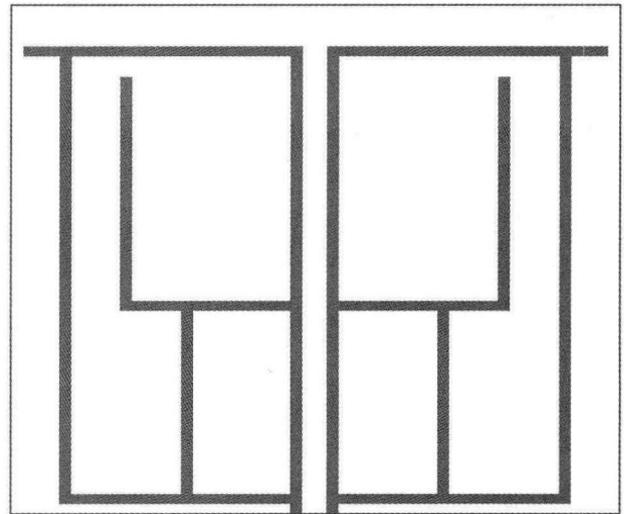


图4 基于焨理论优化体点导热问题的高导热材料分布

表1 焨理论与熵理论在换热过程优化中的区别

	焨理论	熵理论
传热目的	加热/冷却	热功转换
优化目标	换热系数最大化	热功转换效率最大化
优化原理	最小焨耗散热阻原理	最小熵产原理
优化准则	导热:温度梯度场均匀性; 对流换热:场协同方程; 辐射换热:辐射势差均匀性	无

和热功转换两类^[47](如表1所示),它们具有不同的优化目标:分别为换热系数最大化和热功转换效率最大化。对于前者应采用最小焓耗散热阻原理优化,而后者则采用最小熵产原理优化。同时,结合变分原理,最小焓耗散热阻原理对换热过程优化时,可以针对导热^[51,52]、对流^[53,54]和辐射^[55]三种换热过程获得相应的优化准则,即:温度梯度场均匀性准则,场协同方程以及辐射势差均匀性准则。

清华大学过增元教授团队采用场协同原理设计的多纵向涡流凸起管被日本大金公司在CO₂热水器上采用,可提高热效率4.59%,并节省Cu材8%,已批量化生产(见图5(a))。与国际铜业协会和万和热水器公司合作,开发了几种多纵向涡传热强化翅片技术,可提高燃气热水器热效率3%并节省Cu材10%(见图5(b))。与浙江某换热器厂家联合研发的新型壁挂炉用不锈钢主换热器,节省材料成本50%,目前已小批量试生产中(见图5(c))。研发的新型多纵向涡板式换热器的性能超过国外同类产品(见图5(d))。

2.3.3 换热器的焓耗散热阻

对流任意流动形式的间壁式两股流换热器内的对流换热过程,以换热器内的焓耗散率除以换热量平方定义了换热器的焓耗散热阻。并且,换热器的焓耗散热阻 R_h 与换热器性能(有效度 ϵ)、热容量流比 C 和较小热容量流 C_{\min} 的关系式为^[74]:

$$R_h = \frac{1}{C_{\min}} \left[\frac{1}{\epsilon} - \frac{C+1}{2} \right]. \quad (10)$$

上式与换热器的流型无关,且在变传热系数时也成立,因此适用于不同流型换热器的性能比较。根据换热器的焓耗散热阻与有效度之间单调关系,导出了换热器性能优化的最小焓耗散热阻原理,即换热器的焓耗散热阻越小,换热器的有效率越大,换热性能越优。根据最小焓耗散热阻原理进一步导出了换热器优化的温差场均匀性准则。

另一方面,基于换热器的焓耗散热阻,并根据换热器热导、换热器冷、热流体的流动形式(逆流、顺

流、叉流等)和流体热容量流这三类换热器性能的影响因素,导出了不同类型换热器的焓耗散热阻与换热器热导 UA 、流体流动方式 ξ 及热容量流之间 mcp 的统一数学关系式^[56,57]:

$$R_h = \frac{\xi}{2} \frac{\exp(UA\xi) + 1}{\exp(UA\xi) - 1}, \quad (11)$$

2.3.4 基于焓耗散热阻的换热系统全局优化方法

针对空调冷冻水系统^[58]、集中供暖系统^[59]和航天器热管理系统^[60]等不同类型的换热系统,以及包含在气体压缩制冷^[61]和蒸汽压缩制冷^[62]等循环中的换热子系统,根据换热器的焓耗散热阻以及换热器网络中泵和阀等部件的动力和阻力特性,建立了换热需求(温度、换热量等)与设计参数(换热面积、流体流量等)之间的函数关系。在此基础上,根据变分原理并结合换热器网络的几何结构,导出了系统性能最优(或重量最轻)时,各待设计参数的函数表达式,从而将全局优化设计问题从数学上转化为条件极值问题,并借助拉格朗日乘子法推导出优化方程组,联立求解上述优化方程组,直接获得了所有待设计参数的最优配置,最终提出了基于焓理论的换热器网络全局优化方法。该方法既可以用于换热器网络的设计(如分配各换热器的面积),也可以用于换热器网络的变工况优化运行(如换热器网络中工质流量的变工况实时优化调节),弥补了现有设计中只能依靠经验试凑的不足。

例如,清华大学开展了一系列关于数据中心和通信基站节能的相关研究,所研究的节能排热系统已经处于应用阶段。采用焓耗散理论对分离式热管的方案进行了优化,采用分级的方式降低换热温差,充分利用自然冷源,减少空调系统能耗(图6)。采用该方案,研发出热管型机房排热设备,在中国移动,以及政府机构机房得到应用;目前热管型排热方式已经在广州、河北、上海、山西、甘肃、贵州等省都有十分成功的应用,取得了很好的效果,节能率在50%—75%。

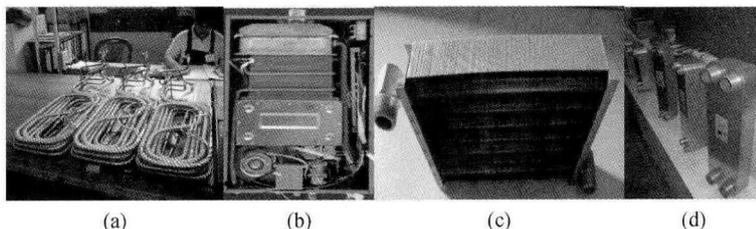


图5 基于场协同原理开发的应用技术

(a) 多纵向涡凸起管;(b) 高效燃气热水器;(c) 新型壁挂炉换热器;(d) 新型多纵向涡板式换热器

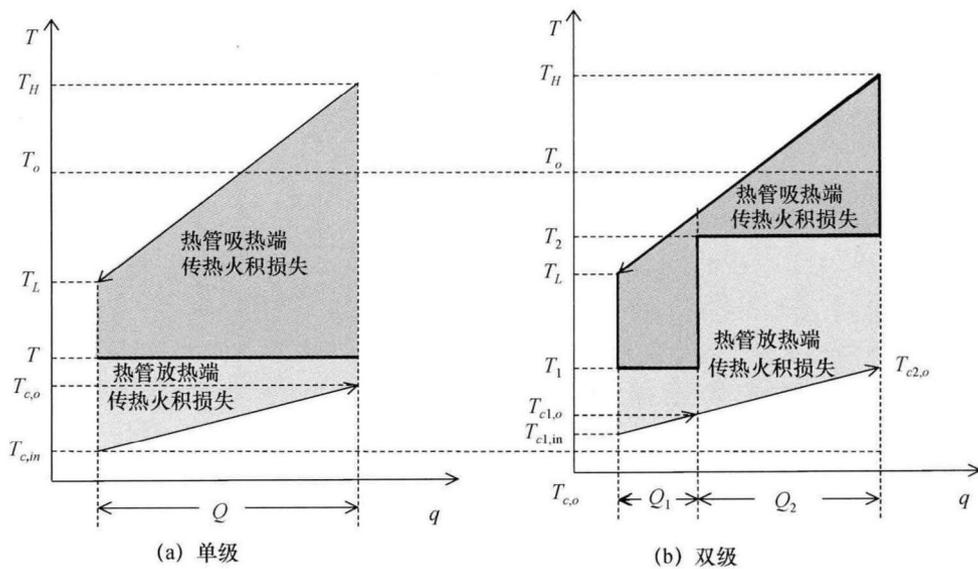


图6 数据中心排热系统的热管传热过程分级优化示意图

3 总结与展望

2010年3月中国科协举办了以“热学新理论及其应用”为主题的新观点新学说学术沙龙,来自传热、制冷、建筑、材料等和能源有关的国内外多位学者参加会议,对促进该领域研究的发展和合作进行了探讨。2011年12日,热科学前沿理论国际论坛(International Forum on Frontier Theories of Thermal Science)在北京召开,来自中国、美国、英国、西班牙、日本、新加坡以及中国大陆和香港地区的40多名知名学者参加了论坛,围绕热质理论、不可逆过程热力学、焓与熵、纳米系统与能源高效利用等主题展开深入讨论。2014年4月在武汉召开了变革性重大项目学术研讨会,自工程热物理学界的30余位专家学者参加会议,就热质理论的学术争论和未来发展进行了深入讨论。

热质理论在国际学术界获得认可并在应用领域转化为生产力,需要不断地获得学术界认可并进行推广,加强国内外交流与合作。在国内,热质理论已经得到初步认同,一些高校的学者开始开展相关的研究和合作,需要通过专门的学术会议或讲习班进一步深入。在国际上,已有美国、英国、西班牙、日本、新加坡等国家的少量学者关注并从事热质理论的研究工作,需要通过国际学术会议、研讨会或其它交流形式加强交流,开展实质性的研究工作。

热质理论近期的研究方向包括:(1)多学科交叉:热质理论的应用领域涉及能源、微纳电子、材料、化工、物理等诸多领域,其概念可以拓展到物理、力学、化工、材料等学科,因此,无论从热质理论自身的发展,还是从加强从理论到应用的转化方面,都应该从基础理论研究和技術应用的层面加强学科交叉,

推动热质理论及其应用研究的发展;(2)热质理论的应用:热质理论及其应用的研究还处在初步发展阶段,获得国际学术界的认同并增强热质理论的影响力,需要加强应用技术方面的研究,在设计微纳能源、微纳电子、功能材料等领域获得技术创新,形成系列新技术和器件,在微纳传热的分析和优化方面发展有一定影响力的软件;(3)热质理论的微观基础及其与宏观规律的统一:热质理论作为热学中的新理论体系,提出了诸多新的基本概念和原理,在强调其在热学领域的应用的同时,这些基本概念和原理还需要在物理和机理上获得进一步阐释,建立其微观理论基础,并实现微观和宏观理论统一。

热质理论是中国学者提出的热学新理论,自然质概念提出以来尚不到十年的时间,但对传热基础理论具有原创性的贡献。在热质理论研究领域,迄今国内外学者在该领域已发表学术论文近300篇,其中清华大学作为该理论的创立单位发表学术论文约150篇,约占发表论文的1/2。最近几年,关于热质理论的学术论文在SCI他引数迅速增长(图7),标志着热质理论引起了国际学术界的关注,部分研究内容也引起了国际学术界的广泛争论^[63-68]。En-

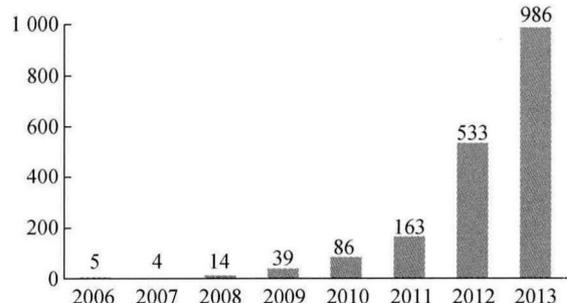


图7 清华大学发表的论文在SCI数据库中的他引统计

transy(焯)已被著名的 Web of Knowledge 的 ESI (基本科学指数) 数据库列为研究前沿 (Research Front)。

参 考 文 献

- [1] 张军, 李小春等, 国际能源战略与新能源技术进展. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 崔民选主编, 中国能源发展报告(2009). 北京: 社会科学文献出版社, 2009.
- [3] 国家自然科学基金委员会、中国科学院编, 能源科学. 北京: 科学出版社, 2012.
- [4] 李志信, 过增元. 对流传热优化的场协同理论. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] Wu C, Chen LG, Chen JC. Recent advances in finite-time thermodynamics. New York: Nova Publishers, 1999.
- [6] Bejan A, Lorente S. Design with Constructal Theory, New York: Wiley, 2008.
- [7] Shah RK, Skiepko T. Entropy generation extrema and their relationship with heat exchanger effectiveness-Number of transfer unit behavior for complex flow arrangements. Journal of Heat Transfer. 2004, 126(6): 994—1002.
- [8] Bejan A. Advanced Engineering Thermodynamics, 3rd ed., New York: Wiley, 2006.
- [9] Cattaneo C. A form of heat conduction equation which eliminates the paradox of instantaneous propagation. Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences. 1958, 247: 431—433.
- [10] Vernotte P. Les paradoxes de la theorie continue de l'equation de la chaleur. Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences. 1958, 246: 3154—3155.
- [11] Qiu TQ, Tien CL. A unified field approach for heat-conduction from macro-scales to micro-scales, Journal of Heat Transfer, 1995, 117: 8—16.
- [12] Tzou DY. A unified field approach for heat-conduction from macro-scales to micro-scales, Journal of Heat Transfer, 1995, 117: 8—16.
- [13] Korner C, Bergmann HW. The physical defects of the hyperbolic heat conduction equation. Applied Physics A. 1998, 67(4): 397—401.
- [14] Criado-Sancho M, Llebot JE. Behavior of entropy in hyperbolic heat conduction. Physical Review E. 1993, 47: 4104—4107.
- [15] Lepri S, Livi R, Politi A, Heat conduction in chains of nonlinear oscillators. Physical Review Letters, 1997, 78: 1896—1899
- [16] Livi R, Lepri S, Thermal physics - Heat in one dimension, Nature, 2003, 421: 327—327
- [17] Lepri S, Livi R, Politi A, Thermal conduction in classical low-dimensional lattices. Physical Reports, 2003, 377: 1—80.
- [18] Alvarez FX, Jou D, Sellitto A. Phonon hydrodynamics and phonon-boundary scattering in nanosystems. Journal of Applied Physics, 2009, 105: 014317.
- [19] Sellitto A, Alvarez FX, Jou D. Temperature dependence of boundary conditions in phonon hydrodynamics of smooth and rough nanowires. Journal of Applied Physics, 2010, 107: 114312.
- [20] Banach Z, Larecki W. Chapman-Enskog method for a phonon gas with finite heat flux. Journal of Physics A, 2008, 41: 375502.
- [21] Jiaung WS, Ho JR. Lattice-Boltzmann modeling of phonon hydrodynamics. Physical Review E, 2008, 77: 066710.
- [22] Guyer RA, Krumhansl JA. Solution of the linearized phonon Boltzmann equation. Physical Review, 1966, 148: 766—778.
- [23] Hardy RJ, Albers DL. Hydrodynamic approximation to the phonon boltzmann equation and second sound in solids. Physical Review B, 1974, 10: 3546—3551.
- [24] Fourier J. Analytical Theory of Heat (New York : Dover Publications) 1955
- [25] 约翰. C. 泰勒著, 暴永宁译, 自然规律中蕴蓄的统一性. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [26] 费曼著, 关洪译, 物理定律的本性. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2007.
- [27] 申先甲. 探索热的本质. 北京: 北京出版社, 1985.
- [28] 过增元. 热质的运动与传递——热质和热子气. 工程热物理学报, 2006, 27(4): 631—634.
- [29] 过增元. 热学中的新物理量. 工程热物理学报, 2008, 29(1): 112—114.
- [30] 过增元, 曹炳阳, 朱宏晔, 张清光. 声子气的状态方程和声子气运动的守恒方程. 物理学报, 2007, 56(6): 3306—3312.
- [31] Cao BY, Guo ZY, Equation of motion of a phonon gas and non-Fourier heat conduction, Journal of Applied Physics, 2007, 102: 053503.
- [32] 过增元, 曹炳阳. 基于热质运动概念的普适导热定律. 物理学报, 2008, 57(7): 4273—4281.
- [33] Dong Y, Cao BY, Guo ZY, Generalized heat conduction laws based on thermomass theory and phonon hydrodynamics. Journal of Applied Physics, 2011, 110: 063504.
- [34] Dong Y, Cao BY, Guo ZY, Size dependent thermal conductivity of Si nanosystems based on phonon gas dynamics. Physica E, 2014, 56: 256—262.
- [35] Wang H D, Cao B Y, Guo ZY, Heat flow choking in carbon nanotubes, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53: 1796—1800.
- [36] Guo ZY, Hou QW, Thermal wave based on the thermomass model. Journal of Heat Transfer, 2010, 132: 072403.
- [37] Zhang MK, Cao BY, Guo YC, Numerical studies on dispersion of thermal waves. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 67: 1072—1082.
- [38] Hu RF, Cao BY, Study on thermal wave based on the thermal mass theory. Science in China-Series E, 2009, 52: 1786—1792.
- [39] Dong Y, Cao BY, Guo ZY. Temperature in nonequilibrium states and non-Fourier heat conduction. Physical Review E, 2013, 87: 032150.
- [40] Wang HD, Cao BY, Guo ZY, Non-Fourier heat conduction in carbon nanotubes. Journal of Heat Transfer, 2012, 134: 051004.
- [41] Wang MR, Guo ZY. Understanding of temperature and size dependences of effective thermal conductivity of nanotubes. Physics Letters A, 2010, 374: 4312—4315.
- [42] Hu GJ, Cao BY, Thermal resistance between crossed carbon nanotubes; Molecular dynamics simulations and analytical modeling. Journal of Applied Physics, 2013, 114: 224308.
- [43] Hou QW, Cao BY, Guo ZY. Thermal gradient induced ac-tuation in double-walled carbon nanotubes. Nanotechnology, 2009, 20: 495503.

- [44] Guo ZY, Hou QW, Cao BY. A novel thermal driving force for nanodevices. *Journal of Heat Transfer*. 2012, 134; 051010.
- [45] 过增元, 梁新刚, 朱宏晔. 焔——描述物体传递热量能力的物理量. *自然科学进展*. 2006, 16(10): 1288—1296.
- [46] Guo ZY, Zhu HY, Liang XG. Entransy-A physical quantity describing heat transfer ability. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50: 2545—2556.
- [47] Chen Q, Liang XG, Guo ZY. Entransy theory for the optimization of heat transfer-A review and update. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013, 63: 65—81.
- [48] Chen LG, Wei SH, Sun FR, Constructal entransy dissipation rate minimization of a disc. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 54(1—3) (2011) 210—216.
- [49] Li QY, Chen Q, Application of entransy theory in the heat transfer optimization of flat-plate solar collectors, *Chin. Sci. Bull.*, 57(2—3) (2012) 299—306.
- [50] Meng JA, Liang XG, Li ZX, Field synergy optimization and enhanced heat transfer by multi-longitudinal vortexes flow in tube. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 48 (16) (2005) 3331—3337.
- [51] Chen Q, Ren JX, Meng JA, Field synergy equation for turbulent heat transfer and its application, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 50(25—26) (2007) 5334—5339.
- [52] Cheng X, Zhang Q, Liang X, Analyses of entransy dissipation, entropy generation and entransy-dissipation-based thermal resistance on heat exchanger optimization, *Appl. Therm. Eng.*, 38(0) (2012) 31—39.
- [53] Chen Q, Meng JA, Field synergy analysis and optimization of the convective mass transfer in photocatalytic oxidation reactors, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 51(11—12) (2008) 2863—2870.
- [54] Liu W, Liu ZC, Jia H, et al. Entransy expression of the second law of thermodynamics and its application to optimization in heat transfer process, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 54(13—14) (2011) 3049—3059.
- [55] Cheng XT, Xu XH, Liang XG, Radiative entransy flux in enclosures with non-isothermal or non-grey, opaque, diffuse surfaces and its application, *Sci. China-Technol. Sci.*, 54 (9) (2011) 2446—2456.
- [56] Guo Z, Liu X, Tao W, et al. Effectiveness-thermal resistance method for heat exchanger design and analysis, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 53(13—14) (2010) 2877—2884.
- [57] Chen Q, Entransy dissipation-based thermal resistance method for heat exchanger performance design and optimization, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 60 (2013) 156—162.
- [58] Chen Q, Xu YC, An entransy dissipation-based optimization principle for building central chilled water systems, *Energy*, 37(1) (2012) 571—579.
- [59] Xu YC, Chen Q, An entransy dissipation-based method for global optimization of district heating networks, *Energy Build.*, 48(1) (2012) 50—60.
- [60] Xu Y., Chen Q, Minimization of mass for heat exchanger networks in spacecrafts based on the entransy dissipation theory, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 55 (19—20) (2012) 5148—5156.
- [61] Chen Q, Xu YC, Hao JH, An optimization method for gas refrigeration cycle based on the combination of both thermodynamics and entransy theory, *Appl. Energy*, 113 (2014) 982—989.
- [62] Xu YC, Chen Q, A theoretical global optimization method for vapor-compression refrigeration systems based on entransy theory, *Energy*, 60 (2013) 464—473.
- [63] Herwig H, Do we really need “entransy”? A critical assessment of a new quantity in heat transfer analysis. *Journal of Heat Transfer*, 2014, 136(4) : 045501.
- [64] Guo ZY, Chen Q, Liang XG, Closure to “Discussion of ‘Do we really need “entransy”?’”. *Journal of Heat Transfer*, 2014, 136(4) : 046001.
- [65] Bejan A, “Entransy” and its lack of content in physics. *Journal of Heat Transfer*, 2014, 136(5) : 055501.
- [66] Guo ZY, Closure to “Discussion of “entransy” and its lack of content in physics ”. *Journal of Heat Transfer*, 2014, 136 (5) : 056001.
- [67] Awad MM, Entransy is now clear. *Journal of Heat Transfer*, 2014 (In Press).
- [68] Chen Q, Guo ZY, Liang XG, Closure to “Entransy is now clear”. *Journal of Heat Transfer*, 2014 (In Press).

Advancements of Thermomass Theory and its Applications

Ji Jun¹ Liu Tao¹ Zhang Xing² Guo Zengyuan²

(1 *Department of Engineering and Material Science, National Natural Foundation of China, Beijing 100085*; 2 *Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Abstract The present article reviews the recent advancements of the key project “Theoretical and Experimental Studies on Energy-Mass Duality of Heat” and the revolutionary major project “Key Scientific Points in Thermomass Theory” supported by the National Natural Science Foundation of China. It covers the background of heat transfer, the framework of thermomass theory, the general heat conduction law and its applications, and the entransy theory and its applications. We also discuss the current status and the future development directions of the thermomass theory.

Key words Thermomass theory; General heat conduction law; Entransy theory