

焓的宏观物理意义及其应用*

赵甜 陈群†

(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)

(2013年8月1日收到; 2013年8月28日收到修改稿)

提高传热过程的性能是解决能源问题的重要途径之一. 本文通过与力学中相关概念进行对比, 分析了传热过程性能优化的新物理量——焓的宏观物理意义. 通过焓与物体对外传热能力、焓定义的传热过程效率以及焓与热量传递驱动力的关系三方面分析, 发现焓具有的宏观物理意义是物体包含的热量在温度场中所具有的势能. 并且, 通过对流换热的焓理论优化介绍了焓理论在工程实际中的应用.

关键词: 焓, 宏观物理意义, 势能, 对流换热

PACS: 44.10.+i, 05.70.Ln, 44.05.+e, 45.10.Db

DOI: 10.7498/aps.62.234401

1 引言

世界能源问题现状越发严峻, 提高能源利用效率是解决能源问题的重要途径之一^[1]. 我国现阶段能源的主要利用形式是热能, 而热能利用过程中80%需要通过热量传递获得, 因而设法提高传热过程的效率十分重要. 近年来在技术研究方面, 研究人员先后提出了扩展表面、螺旋管、表面涂层等无源技术^[2,3]以及机械搅拌、流体振动、射流冲击等有源技术^[4]来强化各种不同类型的传热过程, 并取得了一定的强化换热效果^[4]. 然而, 它们也存在着共同的问题, 如1) 强化换热的同时流动阻力常常会增加, 这并不总是有利于节约能源; 2) 这些研究往往针对于各个不同的应用场合提出具体的强化技术, 缺少统一性的解决方法. 另一方面, 在理论研究中, 过增元等提出了换热器温差场均匀性原则^[5], 以此指导换热器性能的优化^[6]; 继而着眼于温度场和速度场的协同, 提出了对流换热强化的场协同原理^[7,8], 为理论研究对流换热的优化提供了新的思路. 但这一理论仍有一些不足, 如1) 只能定性指出对流换热的优化方向, 难以明确给出优化目标(场协同数适用于已知温度梯度、速度场时评价两矢量场的协同程度, 在未知两矢量场时无法给出具

体表达式, 不适合作为优化目标); 2) 作为后验性理论适合评价现有的方案而不适合指导设计新方案; 3) 没有与传热过程的不可逆性建立联系, 不能揭示优化原理的物理本质等. Bejan^[9]则提出以熵产作为对流换热的性能优劣标准, 以换热过程总熵产最小为优化目标来优化对流换热过程, 称之为热力学优化. 但是, 热力学优化在实际应用中出现了所谓“熵产悖论”^[10], 说明这一优化准则并不能完全解决传热优化问题. 综上所述, 对流换热强化/优化领域研究还不完善, 需要进一步的研究.

过增元等为了解决这一问题, 通过导电与导热过程的比拟, 引入了“焓”这一新的优化理论^[11,12]. 近年来这一理论已逐渐应用于工程实际中, 如应用焓理论对体点导热过程进行优化^[13-16], 结合焓理论与构型理论对导热问题进行构型优化^[17,18], 对管内/通道内等层流/湍流换热过程进行了优化^[19-24]. 以及针对换热器设计, 文献^[25]应用焓和焓耗散概念对肋板对流换热进行了优化, 得到肋板导热性能与流场焓耗散间的对应关系, 以此指导换热器肋板部分的优化设计. 文献^[26-29]则利用焓定义了换热器的当量热阻, 得到了换热器的有效度-热阻关系以评价换热器的性能, 同时也解决了热力学优化中出现的“熵产悖论”现象. 并且, 在换热网络优化研究中^[30-33]应用焓理论优

* 国家自然科学基金(批准号: 51006060)和全国优秀博士学位论文作者专项基金(批准号: 201150)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: chenqun@tsinghua.edu.cn

化能够从理论上导出优化目标与各设计参数的直接数学关系, 得到全局的优化控制方程, 从而方便系统的优化设计. 这些研究成果表明 焓 理论能够解决很多工程问题.

注意到物理学各分支学科间存在着内在相似性, 但热学与其他分支学科之间的差异却相对较大. 傅里叶曾明确指出了力学与热力学的差异^[34]: “无论力学理论的研究范围如何, 它们都不能应用于热效应, 这些热效应构成一个特殊的现象类, 它们不能用运动和平衡的原理来解释”, “它们并不由机械力产生, 而仅仅只是由热的存在和积累而引起, 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.” 力学与热学这样的差异具体地反映在很多方面, 例如在力学中有两条平行的研究路径: 牛顿力学和分析力学; 而传热学中则只有与牛顿力学类似的方法, 缺少类似于分析力学的研究方法. 由此可见, 焓 概念的提出不仅来源于工程需求也有物理学内在的驱动力. 发展 焓 理论不仅对工程应用有重要意义, 也可能有助于补充对应于分析力学的传热学研究方法, 完整热力学的理论. 因此, 有必要深入发掘火积概念的物理内涵.

本文首先简要回顾力学中的势能概念及它对力学发展的推动作用, 在分析势能概念具有的特点的基础上讨论 焓 概念的特点, 并与势能的特点比较阐述 焓 的宏观物理意义, 最后以实例说明 焓 在对流换热过程优化中的应用.

2 力学中的势能及其应用

牛顿力学解决问题的一般方法是从牛顿定律得到系统运动微分方程, 求解得到系统的运动规律等详细信息, 但这种方法在实际应用中遇到了困难: 1) 大多数系统微分方程无法求得解析解; 2) 没有通用的方法得到系统的微分方程, 需要借助各种技巧和试凑. 因此, 牛顿力学在实际工程中的应用由于这些困难受到了很大限制.

1853 年, 朗肯引入了“势能”的概念^[35], 一定程度上解决了上述困难, 使力学研究获得了巨大进步. 借助势能概念, 很多系统可以用代数方程求解, 其难度远低于求解微分方程组; 同时也启发了分析力学理论的发展, 促使其从接近纯数学的理论转向了实际应用, 解决了近代机械工业发展中的众多复杂问题, 成为科学、工业进步巨大的动力.

从物理学发展的角度看, 引入势能的概念亦是研究能量守恒定律的必然结果, 它的提出完善了物

理学理论, 也为物理学研究带来了许多方便之处. 引入势能概念之后, 可以得到机械能守恒定律清晰的表述, 为最终得到能量守恒定律打下了基础.

3 火积的宏观物理意义

经典传热学理论与牛顿力学体系是相似的, 能够很好地处理简单的传热问题. 但对于具有较为复杂的形状、边界条件等的传热学问题, 经典传热学理论无法给出理论解. 对于复杂的换热过程及其系统, 经典传热学理论也难以给出通用的优化设计方法. 这样的困难与牛顿力学在处理复杂约束、多质点体系等问题时遇到的问题是类似的. 为了解决这样的困难, 力学中引入了势能的概念. 注意到在热学中引入 焓 概念后能够解决力学遇到的相似困难, 自然地可以设想引入 焓 概念与引入势能的目的是是一致的, 它们应当具有类似的物理意义. 因此, 下文将 焓 与势能进行比较, 通过 焓 的三方面特点说明它的宏观物理意义.

3.1 物体的火积可以描述它对外传热的能力

力学中, 物体具有势能的多少可以描述它对外做功的能力. 例如被压缩的弹簧可以释放弹性势能推动物体运动. 弹簧的压缩量越大, 则弹性势能越大, 对外做功的能力也越强. 接下来考虑传热的例子.

1) 环境温度恒定为 T_0 时, 考察如图 1 所示的初始温度为 T_1 、热导为 K 、热容为 C 的物体 A.

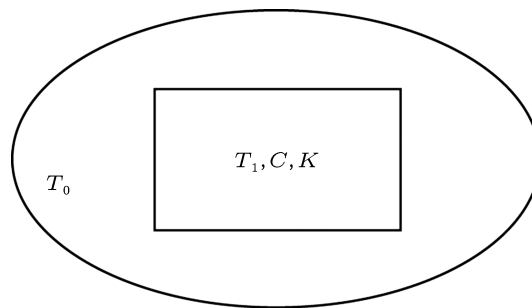


图 1 物体与恒温环境传热示意图

在 $t = 0$ 时刻, 物体 A 开始向环境传热, 其控制方程为

$$C \frac{dT_t}{dt} = -K(T_t - T_0). \quad (1)$$

物体 A 的温度从初始温度 T_1 下降到 T_1' 所用的时间为

$$\tau = \frac{C}{K} \ln \frac{T_1 - T_0}{T_1' - T_0}. \quad (2)$$

以环境温度为参考状态, 在温度为 T_1 时, 物体的焓为 $E_{h0} = C(T_1 - T_0)^2/2$, 温度为 T_1' 时, 物体的焓为 $E_{h1} = C(T_1' - T_0)^2/2$, 与 (1) 式比较得

$$\tau = \frac{2C}{K} \ln \frac{E_{h0}}{E_{h1}}. \quad (3)$$

(3) 式表明, 物体对环境放热过程中, 温度降低到某一数值所用时间正比于其初末状态焓之比的自然对数, 这一时间越长代表物体对恒温环境的传热能力越强, 因此物体的焓可以表征物体在一定时间内对恒温环境传热的能力.

2) 考虑如图 2 所示的两个初始温度为 T_{A0} , T_{B0} ($T_{A0} > T_{B0}$) 的物体 A, B, 其热容 $C_A = C_B = C$. 两物体间的热导为 K 且均与环境绝热.

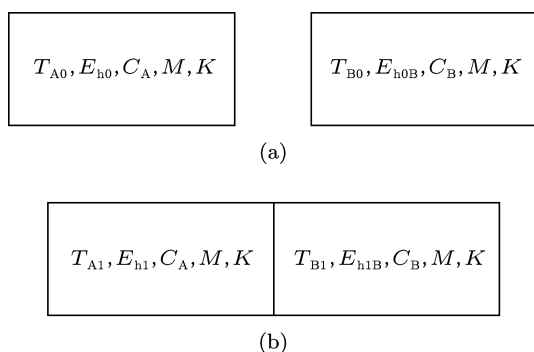


图 2 两物体接触导热示意图 (a) 初始状态; (b) 相互接触状态

当两物体接触时, 导热控制方程为

$$C \frac{dT_A}{dt} = -K(T_A - T_B), \quad (4)$$

$$C \frac{dT_B}{dt} = K(T_A - T_B). \quad (5)$$

由 (4) 和 (5) 式可解得物体 B 的温度从 T_{B0} 升高到 T_{B1} 所需时间为

$$\tau = \frac{C}{2K} \ln \frac{T_{A0} - T_{B0}}{T_{A1} - T_{B1}}. \quad (6)$$

以物体 B 的温度为参考状态, 温度为 T_{A0} 时物体 A 的焓为 $E_{h0} = C(T_{A0} - T_{B0})^2/2$, 温度为 T_{A1} 时 A 的焓为 $E_{h1} = C(T_{A1} - T_{B1})^2/2$, 代入 (6) 式可得

$$\tau = \frac{C}{K} \ln \frac{E_{h0}}{E_{h1}}. \quad (7)$$

由 (7) 式可见, 两个温度不同, 热容相同的物体之间接触传热, 将温度较低的物体加热到一定温度所需

的时间与高温物体在其初、末态焓之比的对数成正比, 而这一时间同时也反映了高温物体对低温物体传热的能力大小, 因此高温物体的焓可以表示它对低温物体的传热能力.

3) 当物体 A 和 B 的热容不相同, 即 $C_A \neq C_B$ 时, 两物体接触的导热控制方程为

$$C_A \frac{dT_A}{dt} = -K(T_A - T_B), \quad (8)$$

$$C_B \frac{dT_B}{dt} = K(T_A - T_B). \quad (9)$$

由 (8) 和 (9) 式可得物体 B 的温度从 T_{B0} 升高到 T_{B1} 到所需时间为

$$\tau = \frac{C_A C_B}{(C_A + C_B) K} \ln \frac{T_{A0} - T_{B0}}{T_{A1} - T_{B1}}. \quad (10)$$

以物体 B 的温度为参考状态, 温度为 T_{A0} 时物体 A 的焓为 $E_{h0} = C_A(T_{A0} - T_{B0})^2/2$, 温度为 T_{A1} 时 A 的焓为 $E_{h1} = C_A(T_{A1} - T_{B1})^2/2$, 代入 (10) 式可得

$$\tau = \frac{C_A C_B}{(C_A + C_B) K} \ln \frac{E_{h0}}{E_{h1}}. \quad (11)$$

由 (11) 式可见, 两个温度不同, 热容也不同的物体接触传热, 将温度较低的物体加热到一定温度所需的时间与高温物体在初、末态焓之比的对数成正比. 同样地, 这一时间反映了高温物体在一定时间内对低温物体传热的能力. 因此, 物体的焓可以表示它对低温物体传热的能力.

综上所述, 焓可以描述物体在一定时间内的对外传热能力.

3.2 火积可以描述热量传递过程的效率

先考察一个力学例子. 考虑两个形状完全一致的水箱. 其底面积为 S , 水的密度为 ρ , 重力加速度为 g . 两侧液面高度分别为 H_1, H_2 , 且 $H_1 > H_2$. 两箱以一根足够细的管道从底部连接, 如图 3 所示.

初始时阀门关闭, 系统初始的重力势能为

$$E_h = \frac{1}{2} \rho S (H_1^2 + H_2^2). \quad (12)$$

由于管道足够细, 打开阀门后液体从左侧流至右侧直至两侧压力平衡为止. 忽略管道中液体体积, 平衡状态时液面高度为 $H' = (H_1 + H_2)/2$, 系统的重力势能为

$$E_{h2} = \frac{1}{4} \rho S (H_1 + H_2)^2. \quad (13)$$

这一过程中两水箱系统内流体的质量是不变的, 因此不能用质量定义过程的效率. 但注意到

$E_{h2} < E_{h1}$, 这说明由于存在流动阻力, 流动过程中有能量损失, 一部分势能转化为内能, 故而这一过程传递能量的效率可以用终态及初态液体含有的重力势能之比定义

$$\eta = \frac{E_{h2}}{E_{h1}} = \frac{(H_1 + H_2)^2}{2(H_1^2 + H_2^2)}. \quad (14)$$

η 越大则说明流动中损失的势能越少, 效率越高.

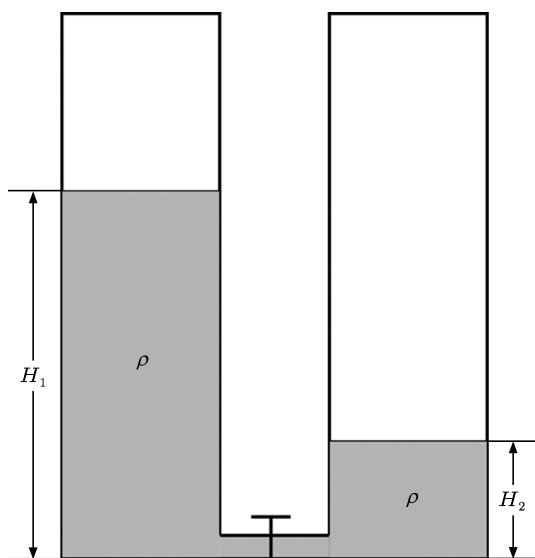


图3 两水箱系统示意图

接下来考察如图2所示的两物体间的不可逆导热过程, 在该过程中热量守恒, 与水箱系统中质量相似, 故不能用热量来定义传热过程的效率. 转而考察系统的熵, 两物体接触前的熵分别为

$$E_{h1} = \frac{1}{2}CT_1^2, \quad (15)$$

$$E_{h2} = \frac{1}{2}CT_2^2. \quad (16)$$

当时间足够长达到热平衡时, 两物体的温度均为 $T_3 = (T_1 + T_2)/2$. 此时两物体的熵分别为

$$E'_{h1} = E'_{h2} = \frac{1}{2}CT_3^2. \quad (17)$$

注意到 $E'_{h1} + E'_{h2} < E_{h1} + E_{h2}$, 说明在传热过程中熵存在耗散, 因而可以定义传热过程的效率为系统末态熵与系统初始熵之比

$$\eta_h = \frac{E_{h,end}}{E_{h,ini}} = \frac{(T_1 + T_2)^2}{2(T_1^2 + T_2^2)}. \quad (18)$$

从(18)式可以看到, 如此定义的熵传递效率与物体的导热系数无关, 只与两物体的初始温度有关. 这一传热过程中两物体初始温差越大, 传递过程中的熵耗散越多, 效率越低.

3.3 火积对温度的梯度可以表示传热的驱动力

先考察一个力学问题. 考虑如图4所示的两质点系统. 质点A受到质点间引力作用开始运动, 同时受到介质提供的阻力而保持匀速运动, 其运动速率为 v , 由于质点B质量远大于A, 可以认为B保持静止.

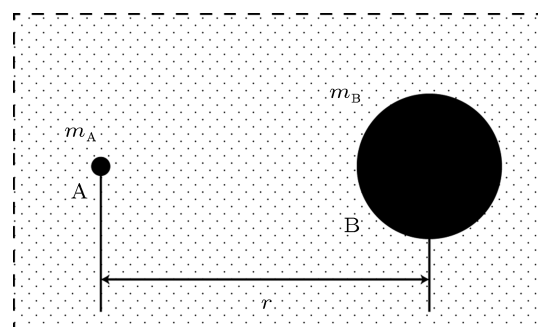


图4 全空间介质中的两体系统

由于两质点之间的引力是保守力, 故可以取无穷远处为引力势能零点, 则引力势能为

$$E_h = G \frac{m_A m_B}{r}. \quad (19)$$

系统动能为

$$E_k = \frac{1}{2}m_A v^2. \quad (20)$$

系统的机械能为这两部分之和, 即

$$E = E_h + E_k = G \frac{m_A m_B}{r} + \frac{1}{2}m_A v^2. \quad (21)$$

由引力势能的定义可以得到引力为

$$F = -\nabla E_h = -G \frac{m_A m_B}{r^3} r. \quad (22)$$

由于质点运动克服阻力做功, 机械能耗散的速率即为阻力的功率, 由此可求得阻力的大小

$$\frac{\partial E}{\partial t} = G m_A m_B \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{r} \right). \quad (23)$$

又因 $r = r_0 - vt$, 得

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -G \frac{m_A m_B}{r^2} v. \quad (24)$$

由功率表达式 $\partial E / \partial t = f \cdot v$ 可得到阻力为

$$f = G \frac{m_A m_B}{r^3} r. \quad (25)$$

由(22)及(25)式可见, 阻力与引力大小相等方向相反, 使得A处于平衡状态, 维持匀速运动.

再分析传热的例子. 仍然考察图2所示的系统, 由2.1中分析可得物体A的温度函数为

$T_t = (T_1 - T_0) \exp(-Kt/C) + T_0$. 取环境温度为参考温度, 系统的焓为

$$E_h = \frac{1}{2} C(T_t - T_0)^2 = \frac{1}{2} C(T_1 - T_0)^2 e^{-\frac{2K}{C}t}. \quad (26)$$

由上文可知焓在传热过程中会发生耗散. 求焓对时间的偏导数, 即焓的耗散速率

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_h}{\partial t} &= \frac{1}{2} C(T_1 - T_0)^2 (-2K/C) e^{-\frac{2K}{C}t} \\ &= -K(T_1 - T_0)^2 e^{-\frac{2K}{C}t} = -K(T_t - T_0)^2. \end{aligned} \quad (27)$$

同时由于焓是温度的函数, 对焓求负梯度可得

$$-\nabla E_h = -C(T_t - T_0). \quad (28)$$

注意到从牛顿冷却定律可知传热速率 $q = K(T_t - T_0)$, 可得

$$\frac{\partial E_h}{\partial t} = -\nabla E_h \cdot \frac{1}{C} q. \quad (29)$$

对比 (24) 式与 (29) 式可以看到, (29) 式中 $-\nabla E_h$ 的意义与 (25) 式中的阻力意义相同, 代表热量传输中受到的阻力, 由于通常的传热过程中阻力与驱动力是平衡的, 得到热量受到的驱动力大小亦为 $-\nabla E_h$, 即说明焓对温度的梯度可表示热量受到的驱动力.

通过以上分析可以看出, 焓概念与力学中的势能概念具有类似性, 这说明焓的宏观物理意义是物体包含的热量所具有的势能.

综上所述, 焓的引入加强了热学与其他物理学分支间的联系, 建立了传热过程的效率, 并提出相应的传热优化理论.

4 焓概念在工程实际问题中的应用

传统传热学理论对复杂实际问题难以给出精确解, 较为依赖数值方法, 同时传热过程强化/优化设计, 及换热系统优化设计等问题一般需要通过试凑法或进行单参数优化分析, 难于得到全局的最优解, 这样的困难与牛顿力学在解决多质点系及复杂约束系统时遇到的问题类似. 参照力学中的解决方法并考虑到焓具有势能的含义, 可以通过类似分析力学的方法来对复杂换热过程/系统进行全局优化.

对于层流对流换热强化, 与以往的试凑法不同, 文献 [25] 应用焓耗散极值原理, 定义层流对流换热过程的优化目标为: 在黏性耗散一定的条件下

寻找最佳流体速度场, 使焓耗散取极值, 其数学表达为 [25]

$$\delta J_\Psi = \delta \left(\int_{\Omega} k(\nabla T)^2 dV \right) = 0. \quad (30)$$

提出优化目标之后, 利用拉格朗日乘子法加入了约束条件, 构造了 Lagrange 泛函 [25]

$$\begin{aligned} J^* &= \int_{\Omega} \{ \lambda(\nabla T)^2 + C_0 \Phi + A(\lambda \nabla^2 T - \rho c_p U \cdot \nabla T) \\ &\quad + C_1 \nabla \cdot U \} d\Omega. \end{aligned} \quad (31)$$

接下来通过变分方法得到了控制流体流动的欧拉方程, 表达式为 [25]

$$\begin{aligned} \rho U \cdot \nabla U &= -\nabla P + \mu \nabla^2 U \\ &\quad + \left(\frac{\rho c_p}{2C_0} A \nabla T + \rho U \cdot \nabla U \right). \end{aligned} \quad (32)$$

数值求解优化控制方程得到层流对流换热最优化流场的特征是纵向涡结构, 以这一特征结构为指导目标, 设计了交叉缩放椭圆换热管及不连续双斜内肋管等新型换热管, 其换热能力与圆管相比有明显提升 [36].

同样, 对于湍流对流换热的强化问题, 文献 [24] 应用了焓耗散极值原理, 定义湍流对流换热过程的优化目标为: 在粘性耗散一定的条件下寻找最佳流体速度场, 使流场时均焓耗散取极值, 提出优化目标之后, 利用拉格朗日乘子法加入了约束条件, 构造了 Lagrange 泛函. 通过变分方法可以得到控制流体流动的欧拉方程, 即湍流对流换热优化问题的控制方程. 数值模拟优化后的平行平板湍流泊肃叶流动可以得到最优化流场的特征是近壁面小涡, 这一优化结果可以解释螺旋微肋管能够大幅强化湍流换热的机理 [36].

通过这两个例子可总结出焓理论应用于工程实际中优化问题的一般方法, 即先基于焓及焓耗散等概念寻找优化问题的优化目标, 建立对应的优化准则, 再通过变分等数学方法得到优化的控制方程, 求解控制方程获得最优流场, 最终达到优化工程问题的目的.

5 结论

本文通过与力学中势能概念进行比较, 讨论了焓的宏观物理意义并举例说明了焓理论在工程实际问题中的应用.

1. 焓的宏观物理意义是物体包含热量在温度场中所具有的势能, 主要体现在三个方面: 焓可以

用于描述物体在一段时间内对外传递热量的能力; 利用 焓 可以定义传热过程的 焓 效率: 传热过程的效率为系统输出 焓 与输入 焓 之比; 焓 对温度的梯度能够表示热量传递受到的驱动力.

2. 引入 焓 概念后可以获得换热过程优化的一般性方法, 即基于 焓 及 焓 耗散等概念寻找优化目标, 利用变分法寻求优化控制方程, 求解控制方程获得最优流场, 最终达到优化工程问题的目的.

- [1] Xiao L 2008 *China-US Energy Cooperation Prospects and Strategies: Improve energy security and environmental protection* (Beijing: World Knowledge Press) p16 (in Chinese) [肖炼 2008 中美能源合作前景及对策: 改善能源安全和环境保护 (北京: 世界知识出版社) 第 16 页]
- [2] Bergles A E 1988 *J. Heat Transf.-Trans. ASME.* **110** 1082
- [3] Webb R L, Bergles A E 1983 *Mech. Eng.* **115** 60
- [4] Webb R L 1994 *Principles of Enhanced Heat Transfer* (New York: John Wiley & Sons) pp12-30
- [5] Guo Z Y, Li Z X, Zhou S Q, Xiong D X 1996 *Sci. China-Technol. Sci.* **39** 68
- [6] Zhou S Q 1995 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [周森泉 1995 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [7] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X 1998 *Int. J. Heat Mass Transf.* **41** 2221
- [8] Guo Z Y 2001 *Chin. Sci Bull.* **46** 596
- [9] Bejan A 1979 *J. Heat Transf. Trans. ASME.* **101** 718
- [10] Shah R K, Skiepko K 2004 *J. Heat Transf. Trans. ASME.* **126** 994
- [11] Guo Z Y, Zhu H Y, Liang X G 2007 *Int. J. Heat Mass Transf.* **50** 2545
- [12] Guo Z Y, Liang X G, Zhu H Y 2006 *Prog. Nat. Sci.* **16** 1288 (in Chinese) [过增元, 梁新刚, 朱宏晔 2006 自然科学进展 **16** 1288]
- [13] Chen Q, Zhu H Y, Pan N, Guo Z Y 2011 *Proc. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.* **467** 1012
- [14] Li Q Y, Chen Q 2011 *Chin. Sci. Bull.* **56** 2819 (in Chinese) [李秦宜, 陈群 2011 科学通报 **56** 2819]
- [15] Chen Q, Wang M R, Pan N, Guo Z Y 2009 *Int. J. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* **10** 57
- [16] Chen X G 2004 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [程新广 2004 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [17] Feng H J, Chen L G, Xie Z H, Sun F R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 134703 (in Chinese) [冯辉君, 陈林根, 谢志辉, 孙丰瑞 2013 物理学报 **62** 134703]
- [18] Chen L G, Feng H J, Xie Z H, Sun F R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 134401 (in Chinese) [陈林根, 冯辉君, 谢志辉, 孙丰瑞 2013 物理学报 **62** 134401]
- [19] Yuan F, Chen Q 2011 *Energy* **36** 5476
- [20] Chen Q, Wang M R, Pan N, Guo Z Y 2009 *Energy* **34** 1199
- [21] Chen Q, Ren J X 2008 *Chin. Sci. Bull.* **53** 3753
- [22] Chen Q 2008 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [陈群 2008 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [23] Cheng X T, Zhang Q Z, Xu X H, Liang X G 2013 *Chin. Phys. B* **22** 020503
- [24] Chen Q, Ren J X, Meng J A 2007 *Int. J. Heat Mass Transf.* **50** 5334
- [25] Meng J A, Liang X G, Li Z X 2005 *Int. J. Heat Mass Transf.* **48** 3331
- [26] Li X F, Guo J F, Xu M T, Cheng L 2011 *Chin. Sci. Bull.* **56** 2174
- [27] Chen Q, Wu J, Wang M R, Pan N, Guo Z Y 2011 *Chin. Sci. Bull.* **56** 79 (in Chinese) [陈群, 吴晶, 王沫然, 潘宁, 过增元 2011 科学通报 **56** 79]
- [28] Liu X B 2009 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [柳雄斌 2009 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [29] Liu X B, Guo Z Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4766 (in Chinese) [柳雄斌, 过增元 2009 物理学报 **58** 4766]
- [30] Xu Y C, Chen Q 2012 *Energy Build.* **48** 50
- [31] Chen Q, Xu Y C 2012 *Energy* **37** 571
- [32] Chen Q, Xu Y C 2012 *Int. J. Heat Mass Transf.* **55** 5148
- [33] Liu X B, Wang M R, Meng J A, Guo Z Y 2010 *Int. J. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* **11** 113
- [34] Fourier J 1955 *The Analytical Theory of Heat* (New York: Courier Dover Publications) p2, 23
- [35] Rankine W 1853 *Philosophical Magazine* **5** 106
- [36] Li Z X, Guo Z Y 2010 *Field Synergy Theory of Convective Heat Transfer* (Beijing: Science Press) pp98-127 (in Chinese) [李志信, 过增元 2010 对流传热优化的场协同理论 (北京: 科学出版社) 第 98-127 页]

Macroscopic physical meaning of entransy and its application*

Zhao Tian Chen Qun[†]

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 1 August 2013; revised manuscript received 28 August 2013)

Abstract

It is an important approach to solve energy problem by improving performance of heat transfer process. The macro physical meaning of new physical quantity for heat transfer process optimization “entransy” is analyzed by comparing it with interrelated concepts in mechanics. From three aspects: the connection of entransy and the external heat transfer ability, efficiency of heat transfer process defined by entransy, and the relation of heat transfer driving force with entransy, the macro physical meaning of entransy is derived, which is the potential energy of heat in the temperature field. Moreover, the application of entransy theory in engineering is introduced through entransy theory optimization in convective heat transfer.

Keywords: entransy, macroscopic physical meaning, potential energy, convective heat transfer

PACS: 44.10.+i, 05.70.Ln, 44.05.+e, 45.10.Db

DOI: 10.7498/aps.62.234401

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51006060), the Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of China (FANEDD) (Grant No. 201150).

[†] Corresponding author. E-mail: chenqun@tsinghua.edu.cn