

炯传递方程及其应用

王松平^①, 陈清林^②, 张冰剑^②

① 青岛大学师范学院, 青岛 266071;

② 中山大学化学与化学工程学院, 广州 510275

E-mail: wangsongping@qdu.edu.cn

2008-12-13 收稿, 2009-05-05 接受

国家自然科学基金(批准号: 20376078)和国家重点基础研究发展计划前期研究专项基金(编号: 2004CCA03100)资助项目

摘要 炯是描述传热能力的物理量, 在热量传递过程中伴随炯的传递, 热量在传递过程中守恒, 炯并不守恒, 因而炯必定有其独特的传递规律. 基于炯定义及其传递的思想, 导出了描述多组分黏性流动体系(包含热传递、对流、质量传递和化学反应过程)的炯传递方程, 它描述了该体系传热过程中炯的传递规律. 给出了炯流及其炯耗散的表达式, 并分析了其物理机制. 进而讨论了炯传递方程在稳态对流传热过程中优化传热的理论和方法, 从不同侧面应用稳态过程炯传递方程得到了炯耗散极值原理和最小热阻原理, 给出了对单组分体系稳态对流传热和稳态导热过程应用的例证.

关键词

炯传递
炯耗散
对流传热

强化传热不仅能提高能源利用效率, 而且能使设备小型化. 随着科技发展和人们生活水平的提高, 世界能源的消耗量快速增长, 提高传热效率, 同时降低能耗显的尤为重要. 对于任何传热过程, 总是在一定的传热温差下进行的不可逆过程, 不可避免地产生传热能力和作功能力的损失, 因而人们不仅发展了多种强化传热技术以提高传热效率, 而且提出了一些降低由于强化传热而引起损耗的优化方法.

传热过程的不可逆性使得传热系统的作功能力(炯)耗散, 可以降低作功能力耗散为目标进行传热过程优化. 由此Bejan等人^[1,2]提出用熵产的概念来评价传热过程的性能, 以传热过程的总熵产最小为目标优化传热过程. 这种以减少作功能力耗散(炯耗散等于熵产与环境温度之积)为目标的传热过程优化称为热力学优化^[3]. 文献[4~9]分别针对不同的对流传热问题以熵产最小为目标进行了优化.

基于传热现象的本质及其导热过程与导电过程

的相似性, Guo 等人^[10]从传热学角度提出了一个描述传热能力的新物理量—炯: 在传热过程中虽然热量是守恒的, 但由于存在热阻, 炯并不守恒, 存在一定耗散. 炯耗散代表了传热过程中传热能力的损失及其传热的不可逆程度. 炯耗散取极值时, 传热过程达到最优. 即在给定约束条件下, 当炯耗散取极值时, 传热过程达到最优. 这种以降低传热能力耗散为目标, 亦即以最大的传热能力为优化目标的传热过程优化称为热优化. 过增元等人^[11]应用炯耗散极值原理(文献[11]中称之为热势容耗散极值原理)针对体点导热问题, 在高导热材料数量给定的条件下, 获得了整体导热能力最强时所需的高导热材料在导热区域中的分布. Meng等人^[12]和Chen等人^[13]分别针对层流和湍流传热过程, 在黏性耗散给定时, 获得了对流传热系数最大时所需的最优流体速度场. 为了更直观地分析与优化对流传热过程, 文献[3]通过引入了对流传热过程中的热流加权平均温度和广义热阻概

引用格式: 王松平, 陈清林, 张冰剑. 炯传递方程及其应用. 科学通报, 2009, 54: 2247~2251

Wang S P, Chen Q L, Zhang B J. An equation of entransy transfer and its application. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0488-5

念,说明了焓耗散极值原理等价于最小热阻原理.

熵和焓都是描述能量传递过程中重要的物理量,焓产(或焓损失)描述能量在传递过程中作功能力的损失,而焓耗散是描述能量传递过程中传热能力的损失.目前人们对熵和焓的传递过程及耗散机制已经有了清楚的认识^[14-16],但对焓的传递过程尚不完全清楚.在热量传递过程中伴随焓的传递,热量在传递过程中守恒,焓并不守恒,焓必定有其独特的传递规律,因此,研究焓的传递规律具有重要的理论意义和应用价值. Guo等人^[10]应用导热过程的能量方程推出了焓传递方程,并没有给出一般的流动过程焓传递规律. 本文将根据焓概念及其传递的思想,建立描述一般对流传热过程的焓传递方程,探究其传递规律及其应用的理论和方法,为焓传递的研究与应用提供理论基础.

1 焓传递方程

考虑质量为 M 、温度为 T 的体系,当体系热量变化 δQ 时,则体系的传热能力变化为 $dE_h = T\delta Q = McTdT$ ^[10,14];对单位质量的体系有 $de_h = T\delta q = cTdT$,其中 E_h 为体系的焓, c 为体系的比热, e_h 为单位质量体系的焓, q 为单位质量的体系的热量.取 $T=0$ 为参考态,则单位质量体系的焓可表为 $e_h = \int_0^T cTdT = \frac{1}{2}cT^2$ (假定比热为常数),它描述了温度为 T 的体系所具有的传热能力^[10,14].

考虑单位质量体系的焓随时间变化过程,有

$$\frac{de_h}{dt} = T \frac{\delta q}{dt} = T^2 \frac{ds}{dt}, \quad (1)$$

或者

$$\rho \frac{de_h}{dt} = \rho T^2 \frac{ds}{dt}, \quad (2)$$

其中, s 为单位质量体系的熵.考虑该体系由 K 个组分 R 个化学反应组成,其中包含有黏性摩擦、热传递(不考虑热辐射)、对流、质量传递及外势场力 $\mathbf{f}_k$ 作用,则体系的熵传递可以表达为^[15]

$$\begin{aligned} \rho \frac{ds}{dt} = & -\frac{\nabla \cdot \mathbf{j}_q}{T} - \frac{1}{T}(\mathbf{P} : \nabla \mathbf{V}) + \frac{1}{T} \sum_{k=1}^K \mu_k \nabla \cdot \mathbf{j}_k \\ & - \frac{1}{T} \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^K \mu_k \nu_{kj} J_j + \frac{1}{T} \sum_{m=1}^K \mathbf{j}_k \cdot \mathbf{f}_k, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{j}_q$ 为热流强度, $\mathbf{j}_k$ 为质量流强度, $\mathbf{P}$ 为应力张量, μ_k 为化学势, ν_{kj} 为化学计量系数, J_j 为化学反应率.将方程(3)代入方程(2),并进一步整理得到

$$\begin{aligned} \rho \frac{de_h}{dt} = & -T \nabla \cdot \mathbf{j}_q - T(\mathbf{P} : \nabla \mathbf{V}) + T \sum_{k=1}^K \mu_k \nabla \cdot \mathbf{j}_k \\ & - T \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^K \mu_k \nu_{kj} J_j + T \sum_{k=1}^K \mathbf{j}_k \cdot \mathbf{f}_k \\ = & -\nabla \cdot T \mathbf{j}_q + \mathbf{j}_q \cdot \nabla T - T(\mathbf{P} : \nabla \mathbf{V}) + T \sum_{k=1}^K \mu_k \nabla \cdot \mathbf{j}_k \\ & - T \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^K \mu_k \nu_{kj} J_j + T \sum_{k=1}^K \mathbf{j}_k \cdot \mathbf{f}_k. \end{aligned} \quad (4)$$

由于 $\mathbf{j}_q = \mathbf{j}'_q + \sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k$,其中 h_k 为偏比焓, $\sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k$ 为各组分分子在扩散过程中本身的热流, $\mathbf{j}'_q$ 代表了不仅由温度梯度引起的热传导,而且还包含其他场力引起的热效应(如浓度梯度引起的Dufour热效应),但与温度梯度引起的热传导比较可以忽略,因而 $\mathbf{j}'_q \approx -k \nabla T$;一并考虑 $\rho \frac{dc_k}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{j}_k + \sum_{j=1}^R \nu_{kj} J_j$,方程(4)可以简化为

$$\begin{aligned} \rho \frac{de_h}{dt} = & -\nabla \cdot (T \mathbf{j}'_q + T \sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k) - k |\nabla T|^2 - T(\mathbf{P} : \nabla \mathbf{V}) \\ & + \sum_{k=1}^K \mathbf{j}_k \cdot (\nabla T h_k + T \mathbf{f}_k) - \sum_{k=1}^K \rho T \mu_k \frac{dc_k}{dt}, \end{aligned} \quad (5)$$

或者以简洁的形式表示为

$$\rho \frac{de_h}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{j}_h - \varphi_h, \quad (6)$$

或者

$$\frac{\partial \rho e_h}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{j}_h + \rho e_h \mathbf{V}) - \varphi_h, \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} c \rho T^2 \right) = -\nabla \cdot \left(\mathbf{j}_h + \frac{1}{2} c \rho T^2 \mathbf{V} \right) - \varphi_h, \quad (8)$$

其中,

$$\mathbf{j}_h = T \mathbf{j}'_q + T \sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \varphi_h = & k |\nabla T|^2 + T(\mathbf{P} : \nabla \mathbf{V}) \\ & - \sum_{k=1}^K \mathbf{j}_k \cdot (\nabla T h_k + T \mathbf{f}_k) + \sum_{k=1}^K \rho T \mu_k \frac{dc_k}{dt}. \end{aligned} \quad (10)$$

方程(6), (7)或(8)称为焓传递方程, 它描述了焓传递过程中随时间变化的规律, 说明了传递过程中焓的传递及其积累与耗散的关系, 其中 $\mathbf{j}_h$ 为焓流强度, $T\mathbf{j}'_q$ 是导热引起的焓流, $T\sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k$ 是由扩散焓流引起的焓流, $c\rho T^2\mathbf{V}/2$ 是对流引起的焓传输. 方程(10)中 ϕ_h 是焓耗散, 即传热能力损失; 其中右端第一项 $k|\nabla T|^2$ 是由于热传导的不可逆性使得传热能力减弱而引起的焓耗散, 第二项 $T(P:\nabla\mathbf{V}) = -T\Phi_v$ (对不可压缩的牛顿流体)是由于外动力克服黏性摩擦产热使得传热能力增强而焓增加; 第三项 $-\sum_{k=1}^K \mathbf{j}_k \cdot (\nabla Th_k + T\mathbf{f}_k)$ 是由于扩散引起的焓耗散; 第四项 $\sum_{k=1}^K \rho T \mu_k \frac{dc_k}{dt}$ 是化学反应的不可逆性引起的焓耗散. 第三项包含两部分, 其中 $-\sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k \cdot \nabla T$ 是由于扩散焓流引起的焓耗散, 当扩散焓流与温度梯度反向时, 即向温度降低的方向扩散时产生焓耗散, 当扩散焓流与温度梯度同向时, 即向温度增加的方向扩散时使得传热能力增强而焓增加; $-\sum_{k=1}^K T\mathbf{j}_k \cdot \mathbf{f}_k$ 是由于外势力与扩散流相互作用引起的焓耗散, 当扩散流与外势力同向时, 外势力对扩散流作正功使得传热能力增强而焓增加, 当扩散流与外势力反向时, 外势力对扩散流作负功使得传热能力减弱而焓耗散.

2 焓传递方程的应用

焓传递方程描述的是焓随时间变化的规律, 结合能量传递方程、动量传递方程、质量传递方程及其具体问题的边界条件, 可以求得焓、焓流、焓耗散的变化规律. 但引入焓及其传递方程目的是为了研究工程应用上的传热问题, 在工程应用中大多涉及稳态过程, 因此下面主要讨论焓及其传递方程在稳态过程中的应用. 考虑某一区域 Ω , 在稳态条件下, 由(8)式得到

$$-\oint_S \left(T\mathbf{j}'_q + T\sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k + \frac{1}{2} c\rho T^2 \mathbf{V} \right) \cdot d\mathbf{S} = \phi_h, \quad (11)$$

其中,

$$\phi_h = \iiint_{\Omega} \phi_h d\Omega. \quad (12)$$

为所考虑区域 Ω 内的焓耗散. 对于多组分流体, $\mathbf{j}_k$ 代表了不仅由浓度梯度引起的扩散, 而且还包含其他场力引起的扩散效应(如温度梯度引起的 Soret 热扩散效应), 但与浓度梯度引起的扩散比较可以忽略, 因而 $\mathbf{j}_k \approx \sum_{j=1}^K \frac{\rho}{M_k} D_{kj} \nabla c_j$; 考虑不可压缩的流体, 此时(12)式可以写为

$$\begin{aligned} \phi_h = & \iiint_{\Omega} [k|\nabla T|^2 - T\Phi_v - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^K \frac{\rho}{M_k} D_{kj} \nabla c_j \cdot (\nabla Th_k + T\mathbf{f}_k) \\ & + \sum_{k=1}^K \rho T \mu_k \nabla c_k \cdot \mathbf{V}] d\Omega. \end{aligned} \quad (13)$$

(11)式说明净流入体系的焓等于体系内部焓耗散. 同时, (11)和(13)式说明了计算稳态流动体系焓耗散的两种方法: 对焓流的面积分和对焓耗散函数的体积分. 对焓耗散函数的体积分, 在体系内必须满足局域热力学平衡条件, 计算上比较复杂, 但它确定了焓耗散的分布和机理. 当局域热力学平衡条件在体系内不满足的情况下, 可以选择局域热力学平衡条件成立的边界应用对焓流的面积分计算焓耗散.

按照(11)式左端对焓流的面积分计算焓耗散, 得到

$$\begin{aligned} & - \left[\oint_S \left(\frac{1}{2} \rho c T^2 \mathbf{V} + T\mathbf{j}'_q + T\sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k \right) \cdot d\mathbf{S} \right] \\ & = \left[\iint_{S_{in}} \left(\frac{1}{2} \rho c T^2 \mathbf{V} + T\mathbf{j}'_q + T\sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k \right) \cdot d\mathbf{S} \right] \\ & \quad - \left[\iint_{S_{out}} \left(\frac{1}{2} \rho c T^2 \mathbf{V} + T\mathbf{j}'_q + T\sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k \right) \cdot d\mathbf{S} \right] \\ & = Q_{in} T_{M,in} - Q_{out} T_{M,out}, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $\iint_{S_{in}} \left(\frac{1}{2} \rho c T^2 \mathbf{V} + T\mathbf{j}'_q + T\sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k \right) \cdot d\mathbf{S}$ 是由于对流、导热和扩散焓流引起热传输通过界面流入体系的焓流, $\iint_{S_{out}} \left(\frac{1}{2} \rho c T^2 \mathbf{V} + T\mathbf{j}'_q + T\sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k \right) \cdot d\mathbf{S}$ 是由于对流、导热和扩散焓流引起热传输通过界面流出体系的焓流, T_M , $T_{M,in}$ 和 $T_{M,out}$ 按照文献[3]热流加权平均温度定义给出:

$$T_M = \iint_S T dQ / \iint_S dQ, \quad (15)$$

$$T_{M,out} = \frac{1}{Q_{out}} \left[\iint_{S_{out}} \frac{1}{2} \rho c T^2 \mathbf{V} \cdot d\mathbf{S} + \iint_{S_{out}} T \mathbf{j}'_q \cdot d\mathbf{S} + \iint_{S_{out}} T \sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k \cdot d\mathbf{S} \right], \quad (16)$$

$$T_{M,in} = \frac{1}{Q_{in}} \left[\iint_{S_{in}} \frac{1}{2} \rho c T^2 \mathbf{V} \cdot d\mathbf{S} + \iint_{S_{in}} T \mathbf{j}'_q \cdot d\mathbf{S} + \iint_{S_{in}} T \sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k \cdot d\mathbf{S} \right]. \quad (17)$$

对于稳定流动, $Q_{in} = Q_{out} = Q$. 按照广义热阻定义^[3], $R_{M,h} = (T_{M,in} - T_{M,out})/Q$, 并由式(14), 则

$$\begin{aligned} R_{M,h} &= \frac{T_{M,in} - T_{M,out}}{Q} = \frac{\Delta T_M}{Q} \\ &= \frac{1}{Q^2} \left[-\oint_S \left(\frac{1}{2} c \rho T^2 \mathbf{V} + T \mathbf{j}'_q + T \sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k \right) \cdot d\mathbf{S} \right] \\ &= (\Delta T_M)^2 / \left[-\oint_S \left(\frac{1}{2} c \rho T^2 \mathbf{V} + T \mathbf{j}'_q + T \sum_{k=1}^K h_k \mathbf{j}_k \right) \cdot d\mathbf{S} \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

由(18)式可见, 在给定的热流边界条件下, 当净流入体系的焓流最小时有广义热阻最小, 因而通过求最小焓流可以确定最小热阻; 在给定的温度边界条件下, 当净流入体系的焓流最大时有广义热阻最小, 因而通过求最大焓流可以确定最小热阻, 这就是文献[3]所提出的最小热阻原理. 求流入体系的焓流的极值可以通过(13)式转化为求焓耗散极值. 按照等(13)式右端对焓耗散函数体积分计算焓耗散, 取其极值即为焓耗散极值原理^[10,11], 即: 在给定的热流边界条件下, 焓耗散取极小值; 在给定的温度边界条件下, 焓耗散取极大值. 但传热都是在一定的约束条件下进行的, 在一定约束条件下(如能量守恒、质量守恒), 通过对(13)式变分可以求得焓耗散取极值时场的分布, 从而确定最优传热效率. 另外从式(13)可以看出, 焓耗散不仅对热传递的不可逆程度给以限制, 而且可以通过调整场力之间的协同关系来改变焓耗散.

实际上, 对一般体系的输运过程, 不是单一物理量的传递, 除了焓传递还包含其他物理量的传递, 因而应用变分原理求焓耗散极值时比较复杂, 这还需在今后研究中进一步探讨. 下面就单组分体系稳态对流传热和稳态导热情况给出讨论, 一方面说明特殊过程的焓传递方程、最小热阻原理和焓耗散极值原理是一般体系焓传递方程、最小热阻原理和焓耗散极

值原理的特例, 另一方面引用前人的研究工作作为应用的例证.

2.1 单组分体系稳态对流传热

对单组分体系稳态对流传热过程, (11), (13)和(18)式简化为

$$-\oint_S \left(T \mathbf{j}'_q + \frac{1}{2} c \rho T^2 \mathbf{V} \right) \cdot d\mathbf{S} = \iiint_{\Omega} k |\nabla T|^2 dV - \iiint_{\Omega} T \Phi_v d\Omega, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} R_{M,h} &= \frac{\Delta T_M}{Q} = \frac{1}{Q^2} \left[-\oint_S \left(\frac{1}{2} c \rho T^2 \mathbf{V} + T \mathbf{j}'_q \right) \cdot d\mathbf{S} \right] \\ &= (\Delta T_M)^2 / \left[-\oint_S \left(\frac{1}{2} c \rho T^2 \mathbf{V} + T \mathbf{j}'_q \right) \cdot d\mathbf{S} \right], \end{aligned} \quad (20)$$

$$\Phi_h = \iiint_{\Omega} [k |\nabla T|^2 - T \Phi_v] d\Omega. \quad (21)$$

按照(21)式右端对焓耗散求变分可以求得焓耗散取极值时温度场和速度场满足的条件. 但稳态对流传热过程必须满足约束条件

$$k \nabla^2 T - \rho c_p \nabla T \cdot \mathbf{V} + \Phi_v = 0, \quad (22)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0. \quad (23)$$

此时, 条件极值的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} J &= \iiint_{\Omega} \{ (k |\nabla T|^2 - T \Phi_v) + C_1 (k \nabla^2 T \\ &\quad - \rho c_p \nabla T \cdot \mathbf{V} + \Phi_v) + C_2 \nabla \cdot \mathbf{V} \} d\Omega, \end{aligned} \quad (24)$$

其中 C_1, C_2 为拉格朗日乘子, 是坐标位置的函数. 通过变分

$$\delta J = 0, \quad (25)$$

可以求得最优传热的温度场和速度场的分布. Meng等人^[12]和Chen等人^[13]利用(25)式分别针对层流和湍流传热过程, 在黏性耗散给定时, 获得了对流传热系数最大时所需的最优流体速度场.

2.2 稳态导热^[10]

在稳态导热的情况下, (19)~(21)式简化为

$$-\oint_S T \mathbf{j}'_q \cdot d\mathbf{S} = \iiint_{\Omega} k |\nabla T|^2 dV, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} R_{M,h} &= \frac{\Delta T_M}{Q} = \frac{1}{Q^2} \left[-\oint_S T \mathbf{j}'_q \cdot d\mathbf{S} \right] \\ &= (\Delta T_M)^2 / \left[-\oint_S T \mathbf{j}'_q \cdot d\mathbf{S} \right], \end{aligned} \quad (27)$$

$$\Phi_h = \iiint_{\Omega} k |\nabla T|^2 d\Omega. \quad (28)$$

若体系总导热能力一定, 即

$$\iiint_{\Omega} k(x, y, z) d\Omega = a(\text{常数}), \quad (29)$$

此时拉格朗日函数为

$$J = \left\{ \iiint_{\Omega} [k |\nabla T|^2 + Ck] d\Omega \right\}, \quad (30)$$

其中 C 为常数. 应用变分原理求焓耗散极值得到

$$|\nabla T| = \text{常数}. \quad (31)$$

(31)式表明, 在稳态导热条件下, 温度梯度均匀分布时导热效率最大. 应用(31)式, 文献[11]针对体点导热问题, 在高导热材料数量给定的条件下, 获得了整体导热能力最强时所需的高导热材料在导热区域中的分布.

3 结论

焓是传热过程中描述传热能力的物理量, 在热量

传递过程中伴随焓的传递. 应用焓概念及其传递的思想, 建立了描述多组分黏性流动体系(包含热传递、对流、质量传递和化学反应过程)的焓传递方程, 给出了焓流及其焓耗散的表达式, 并分析了其物理机制, 为焓传递的研究与应用提供了理论基础. 结合能量传递方程、动量传递方程、质量传递方程及其具体问题的边界条件, 可以求得焓、焓流、焓耗散的变化规律. 引入焓及其传递方程目的主要是为了研究工程应用上的优化传热问题, 在工程应用中大多涉及稳态过程, 因此主要讨论了焓传递方程在稳态对流传热过程中应用的理论和方法. 从不同侧面应用稳态过程焓传递方程得到了焓耗散极值原理和最小热阻原理, 并进一步讨论了对单组分体系稳态对流传热和稳态导热过程的应用. 对一般体系的输运过程, 不是单一物理量的传递, 应用最小热阻原理和焓耗散极值原理时比较复杂, 在今后研究中还需要进一步探讨.

致谢 审稿人对本文提出了细致的和建设性的意见, 在此致以诚挚的谢意.

参考文献

- 1 Bejan A. A Study of entropy generation in fundamental convective heat transfer. *J Heat Trans T ASME*, 1979, 101: 718—725[DOI]
- 2 Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. Thermal design and optimization. New York: John Wiley Sons Inc, 1996
- 3 陈群, 任建勋. 对流传热过程的广义热阻及其与焓耗散的关系. *科学通报*, 2008, 53: 1730—1736
- 4 Nag P K, Mukherjee P. Thermodynamic optimization of convective heat transfer through a duct with constant wall temperature. *Int J Heat Mass Tran*, 1987, 30: 401—405[DOI]
- 5 Ogulata R T, Doba F. Experiments and entropy generation minimization analysis of a cross-flow heat exchanger. *Int J Heat Mass Tran*, 1998, 41: 373—381[DOI]
- 6 Hesselgreaves J E. Rationalisation of second law analysis of heat exchangers. *Int J Heat Mass Tran*, 2000, 43: 4189—4204[DOI]
- 7 Saouli S, Aiboud-Saouli S. Second law analysis of laminar falling liquid film along an inclined heated plate. *Int Comm Heat Mass Tran*, 2004, 31: 879—886[DOI]
- 8 Ko T H. A numerical study on entropy generation and optimization for laminar forced convection in a rectangular curved duct with longitudinal ribs. *Int J Therm Sci*, 2006, 45: 1113—1125[DOI]
- 9 Ereke A, Dincer I. An approach to entropy analysis of a latent heat storage module. *Int J Therm Sci*, 2008, 47: 1077—1085[DOI]
- 10 Guo Z Y, Zhu H Y, Liang X G. Entropy—a physical quantity describing heat transfer ability. *Int J Heat Mass Tran*, 2007, 50: 2545—2556[DOI]
- 11 过增元, 程新广, 夏再忠. 最小热量传递势能耗散原理及其在导热优化中的应用. *科学通报*, 2003, 48: 21—25
- 12 Meng J A, Liang X G, Li Z X. Field synergy optimization and enhanced heat transfer by multi-longitudinal vortices flow in tube. *Int J Heat Mass Tran*, 2005, 48: 3331—3337[DOI]
- 13 Chen Q, Ren J X, Meng J. Field synergy equation for turbulent heat transfer and its application. *Int J Heat Mass Tran*, 2007, 50: 5334—5339[DOI]
- 14 韩光泽, 过增元. 导热能力损耗的机理及其数学表述. *中国机电工程学报*, 2007, 27: 98—102
- 15 Prigogine I. Introduction to Thermodynamics of irreversible processes. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons Inc. 1967
- 16 Gaggioli R A. The concept of thermodynamic friction, thermal available energy, chemical available energy and thermal energy. *Chem Engin Sci*, 1962, 17: 523—530[DOI]