

强化传递过程中场协同效应的机制及其控制*

魏耀东, 解新安, 华 贵
(华南理工大学化工学院, 广东 广州 510640)

摘 要: 根据线性非平衡态热力学理论把传递过程中的流和力扩展为传递过程空间的流场和力场, 通过各种场之间的恰当配合和相互作用强化传递过程定义为场协同。在线性非平衡热力学的流和力的唯象方程的基础上, 本文以热量和质量传递过程为例分析了传递过程中流场和力场之间的相互协同作用机制及其控制, 提出了描述场之间作用的场协同因子, 给出了传递过程强化的场协同分析的初步方法。

关键词: 线性非平衡热力学; 唯象方程; 强化传递过程; 场协同

中图分类号: O414.14; TQ02.37 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2003) S1-0245-03

强化传递过程提高传递过程的效率是传递过程研究的一项主要内容。从描述热量传递的傅立叶定律、质量传递的非克扩散方程和动量传递的牛顿粘性定律这些基本传递过程可归结出一个普遍化唯象方程:

$$\text{过程进行速率} = \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}} \quad (1)$$

强化传递过程有两个途径, 增大过程推动力或减少过程阻力。增大过程推动力要增加能耗, 而且还受到生产工艺、设备条件、环境条件以及经济性等方面的限制; 过程阻力的减小也有一定的限度。此时为了强化传递过程通常采用两种方式, 一种是在原传递过程附加另一种传递过程, 形成复合传递过程, 如动量传递与热量传递共同作用于同一目标过程; 另一种是在传递过程中施加内、外场(力)(磁场、超声波场、离心力等)来强化传递过程。已有大量的实验表明这些强化传递过程的方法是非常有效的^[1]。

依据非平衡态热力学理论^[2,3], 任何一个传递过程都是在一定空间条件下不可逆热力学流在体系内外各种不可逆热力学力作用下的传递, 这些流和力在传递空间构成了流场和力场。传递速率的大小是由体系内外各种场相互作用所决定, 通过场之间的协同作用可以使传递过程得到强化, 分析这种场协同作用机制可以揭示强化传递过程的所具有的一般性的或普遍性的规律。

1 传递过程的不可逆热力学力和流及力场和流场

根据线性非平衡热力学理论, 一个存在多种非平衡过程的体系, 如果体系中所有不可逆过程(非化学反应过程)接近于平衡态, 过程推动力足够小, 则不可逆热力学流 J_i 和不可逆热力学力 X_k 的线性唯象关系式是^[2,3]

$$J_i = \sum_k L_{ik} X_k \quad (i, k = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其中定义

$$L_{ik} = \left(\frac{\partial J_i}{\partial X_k} \right) \quad (3)$$

L_{ik} 是唯象系数。线性唯象关系不是热力学的基本假设, 但有许多实验, 特别是有关物质和能量输运过程的实验表明在某些条件下力和流之间确实满足这种线性关系。公式(2)唯象系数关联了热力学力和它对应的热力学共轭流, 而反映了各种不同的不可逆过程间的交叉耦合效应。

公式(2)表明传递过程是在不可逆热力学力推动下产生不可逆热力学流的结果, 即任何传递过程都表现为在强度量差的推动下广延量的流动。强度量差是热力学力, 热力学力大小反映了体系的强度量偏离平衡位置的程度。广延量反映了热力学流的传递速率, 增大所需的热力学流是传递过程强化的目标。

流有在系统内流动或运动的含义, 流的类型可以有热量流, 质量流等。流形成了传递过程的空间流

* 收稿日期: 2003-01-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(79931000); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G20000263)

作者简介: 魏耀东(1958年生), 男, 博士; E-mail: weiydmail@sina.com

场,用流场描述流可以更清晰。流场的存在对物质和热能有输运作用,也必然对系统中浓度场,温度场等热力学力在空间的分布产生影响。力是强度量的梯度,是传递过程的推动力。力的类型可以是力场,浓度场,温度场等;力的空间分布可以是一维的,二维的或多维的。像流构成流场一样,力的分布也需要有一定的空间,因此力在传递空间构成了力场。在力场的作用下导致系统的流场发生变化,产生物质的迁移,热量的迁移,电量的迁移等,即产生传递过程。流场和力场均为矢量场,若在一定的空间条件下场之间的组合发生相互协同作用使目的过程得到强化称为场协同强化传递过程,这是强化和发展新的传递的一个重要方法。

2 强化传递过程的场协同问题

公式(2)说明,体系中的一个热力学流 J_k 是热力学力 X_i 产生流分量的线性组合。一种传递过程并不仅仅是由系统中存在的与其对应的基本力场所引起的,也可以由其他力场作用产生。在传递过程中,当存在着多种力场作用于一个传递目标时,这种多场对传递过程的作用是同时发生和影响的,存在着多场作用下传递过程的耦合问题。要促进某种传递过程不仅仅是加强或减弱相应的基本力场,还要同时改变与之相联系的力场才能更好的达到目的,也就是通过空间条件和各个场的协同作用控制传递过程而达到强化传递过程的目的。

一个不考虑化学反应过程的二元组分非平衡热力学体系,依据式(2)式,热通量 J_q 和扩散通量 J_i ($i=1$) 与力的线性唯象关系^[2,3]:

$$J_q = L_{qq} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) + L_{q1} \left[- \nabla \left(\frac{\mu_1}{T} \right) + \frac{M_1 F_1}{T} \right] \quad (4)$$

$$J_1 = L_{1q} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) + L_{11} \left[- \nabla \left(\frac{\mu_1}{T} \right) + \frac{M_1 F_1}{T} \right] \quad (5)$$

式中, T 为温度, μ_1 为组合浓度, F_1 是外力, M_1 是摩尔质量。温度梯度不但能引起热量传递,也可以引起质量传递,这是 *Soret* 效应;同样,浓度梯度也可以引起热量传递,这是 *Dufour* 效应。外力对热量和质量的传递也有贡献。强化传递过程就是提高热通量 J_q 或扩散通量 J_i , 增大热力学流可以通过唯象系数或热力学力之间的组合作用来实现。

例如在旋风分离器内的高温气固两相分离过程中,依据式(5),在径向方向,固相颗粒同时受到温度梯度,浓度梯度的扩散,离心力场的作用。增加离心力场可以提高径向扩散通量,但气体旋转速

度的增加也使湍流强度增加,颗粒扩散加剧,同时浓度梯度分布均不利于气固分离。如何使三者之间的相互作用达到最大的径向扩散通量,需要进行这些力场之间的协同分析。

又如二维层流边界层的对流换热,涉及场和流之间的协同问题,将对流换热能量方程中的对流项比拟为内热源,在壁面 w 的边界层内,则有^[4]:

$$\int_0^\delta \rho c_p (\mathbf{V} \cdot \nabla T) dy = - k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_w \quad (6)$$

式中, c_p 是等压比热, ρ 是流体密度, k 是导热系数, δ 是热边界层厚度。上式表明速度矢量与温度梯度的矢量点积对对流换热的强度有重要影响,即热通量的大小与速度矢量场和热流矢量场的大小和方向夹角有关。它们之间的恰当配合(夹角),速度矢量场和热流矢量场产生协同可以强化热量传递,反之没有效果。控制速度场和热流场的协同就可以控制对流换热的强度^[4,5]。

3 强化传递过程中的场协同参数

依据传递过程的唯象方程(2)式,总的强化传递过程可以是复合传递过程,也可以是在基本传递过程中施加内、外力场来强化传递过程。由于传递过程的目的、对象不同,流场之间与力场之间的耦合结果是不同的,各分量部分的作用大小和传递效果也是不一样的。为分析场之间的耦合作用程度,把不可逆热力学力 X_k 用不可逆热力学流 J_i 表示

$$X_i = \sum_k K_{ik} J_k \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

其中定义

$$K_{ik} = \left(\frac{\partial X_i}{\partial J_k} \right) = L_{ik}^{-1} \quad (8)$$

L_{ki}^{-1} 是 L_{ki} 的逆矩阵。系数阵 K_{ik} 是单位流体的作用力,具有阻力系数的特性。依据(4,5)式,不考虑无外力场时,(7)式的展开为^[6]

$$- \nabla \ln T = K_{qq} J_q + K_{q1} J_1 \quad (9)$$

$$- \nabla \mu_1 = K_{1q} J_q + K_{11} J_1 \quad (10)$$

定义力率 $\lambda = \frac{\nabla \ln T}{\nabla \mu_1}$ 和流率 $\eta = \frac{J_q}{J_1}$ 。 λ 和 η 两者之间的关系由式(9,10)得

$$\lambda = \frac{(K_{qq}/K_{11})^{1/2} \eta + K_{1q}/(K_{qq}K_{11})^{1/2}}{K_{1q}/(K_{qq}K_{11})^{1/2} \eta + (K_{11}/K_{qq})^{1/2}} \quad (11)$$

等式(11)表明力率 λ 是流率 η 的函数,表明了力和流之间的耦合关系。当 $K_{1q}/(K_{qq}K_{11})^{1/2}$ 接近零时,力率 $\lambda \rightarrow \pm (K_{qq}/K_{11}) \eta$, 流是互相独立的,形成完全耦合。所以比值

$$r = - \frac{K_{1q}}{(K_{qq}K_{11})^{1/2}} \quad (12)$$

表明热量和质量传递过程的耦合程度, 可以作为存在有多种力时的比较基础, 这里定义为场协同因子。由于热流和质量流都是向量, r 的符号表明了力场的方向。如果 $K_{1q} < 0$, 则 $r > 0$, 两种流朝着同一方向流动, 强化传递过程; 如果 $K_{1q} > 0$, 则 $r < 0$, 两种流将流向相反的方向, 对传递过程有抑制作用。耗散函数^[2,3]限制了 r 一定在两个极值 +1 和 -1 之间。不完全的耦合使得 r 在两个极值之间取值, 取极值时是完全耦合。 r 的符号和大小表明了传递作用力协同的方向和大小, 可以通过人工的方式进行控制达到强化传递过程的目的。

4 结 论

本文应用线性非平衡态热力学理论, 在流和力的唯象方程的基础上, 分析传递过程中的流场和力场特点, 确定了力场和流场之间的相互作用关系。通过场与场之间的恰当配合和相互作用可以达到场协同强化传递过程的目的, 给出了场协同强化传递过程的初步分析方法。并且以热量和质量传递过程

的非平衡热力学体系为例给出了描述场协同参数的场协同因子, 场协同因子 r 表明力场之间协同关系。

参考文献:

- [1] 袁乃驹, 丁富新. 分离和反应工程的“场”“流”分析[M]. 北京: 中国石化出版社, 1996.
- [2] DEGROOT S R, MAZUR P. Non-equilibrium thermodynamics [M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1962.
- [3] 李如生. 非平衡态热力学和耗散结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.
- [4] 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, 19: 2118 - 2123.
- [5] TAO W Q, HE Y L, WANG Q W, et al. A unified analysis on enhancing single phase convective heat transfer with field synergy principle[J]. International J Heat and Mass Transfer, 2002, 45: 4871 - 4879.
- [6] DEMIREL Y, SANDLER S I. Linear-nonequilibrium thermodynamics theory for coupled heat and mass transport [J]. International J Heat and Mass Transfer, 2001, 44: 2439 - 2451.

Mechanism and Control of Field Synergy in the Enhancing Transfer Process

WEI Yao-dong, XIE Xin-an, HUA Ben

(Department of Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The paper discusses the characteristics of force field and flow field based on the line-nonequilibrium thermodynamics for enhancing transfer process. The field synergy can be obtained by coordinating fields and it is analyzed based on phenomenological equation of force and flow. The field synergy factor is derived according to force field and flow field in the transfer process. A further extension of field synergy principle to heat and mass transfer by examples shows that field synergy is a generalized principle for enhancing transfer processes.

Key words: line-nonequilibrium thermodynamics; phenomenological equation; enhancing transfer process; field synergy