

碳酸乙烯酯合成过程的反应吸收 多场协同分析及数值模拟

蒋雪冬, 邱鹏, 张海亮, 杨伯伦

(西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安)

摘要: 为提高尿素醇解法合成碳酸乙烯酯的收率, 通过在酯化反应进行的同时吸收副产物氨气来实现全过程的强化. 首先针对磷酸溶液中 NH_3 鼓泡吸收的具体过程进行了多场协同分析, 获得了反应吸收耦合过程强化的理论依据; 进而运用流体体积函数多相流模型对单个 NH_3 气泡的化学吸收过程进行了数值模拟. 结果表明: 受气膜传质控制的 NH_3 化学吸收, 实质上是气流速度场和压力梯度场共同作用的结果, 传质效率直接受两场协同度的影响, 该协同数不仅取决于两场标量值的大小, 也取决于它们的矢量夹角, 当夹角为 0° 时, 场协同数最大, 相应地对流传质系数就越大. 在鼓泡吸收过程中, 气液两相的流动促使 NH_3 气泡内部气流形成由中心向四周发散的微小涡流, 气液流场向着与相界面附近的压力梯度场达到最优协同度的方向发展, 最大化了场协同数, 有利于强化传质.

关键词: 化学吸收; 强化传质; 多场协同; 数值模拟

中图分类号: TQ021.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)12-0092-06

Multi-Field Synergy Analysis of Reaction-Absorption Coupling Process and Numerical Simulation for Ethylene Carbonate Synthesis

JIANG Xuedong, QIU Peng, ZHANG Hailiang, YANG Bolun

(School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the productivity of ethylene carbonate from the esterification of urea and ethylene glycol, the synthesis process is enhanced by removing by-product ammonia via bubbling in phosphoric acid solution. Multi-field synergy principle is employed to analyze the chemical absorption process, then numerical simulation is carried out for absorption of single ammonia bubble with the volume of fluid model. The results show that the chemical absorption of ammonia, which controlled by convective mass transfer, is essentially affected by the synergy of velocity and pressure gradient fields. The synergy is measured with mass transfer field synergy number, which is determined by scalar quantities of the two vector fields, and mostly, by their included angle. While the angle gets zero, the field synergy number reaches to the maximum, which leads to a larger mass transfer coefficient. During the bubbling absorption process, ammonia current inside the bubble facilitates forming tiny vortexes to give rise to the optimized ammonia velocity field and to optimize the synergy with pressure gradient field at gas-liquid interface, thus the field synergy number is maximized and the mass transfer efficiency of ammonia is consequently heightened.

Keywords: chemical absorption; mass transfer enhancement; field synergy; numerical simulation

收稿日期: 2012-05-04. 作者简介: 蒋雪冬(1986—), 男, 博士生; 杨伯伦(通信作者), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家“973计划”资助项目(2009CB219906); 国家自然科学基金资助项目(20976144); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110201130002).

网络出版时间: 2012-10-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121010.1707.003.html>

碳酸乙烯酯是一种非常重要的化工产品,广泛应用于石油化工、塑料、印染、医药等工业中. 在其众多的合成方法中,采用尿素和乙二醇为原料的尿素醇解法因具有间接利用二氧化碳、反应物无毒、副产物氨可循环利用、反应流程简单等诸多优点,被视为一种未来的主要合成工艺^[1-2]. 尿素醇解法反应属可逆反应,在合成碳酸乙烯酯的同时副产 NH₃,若将所生成的 NH₃ 通过磷酸化学吸收从反应体系中除去,将有助于碳酸乙烯酯收率的提高;同时,产物磷酸铵可以用作农田化肥,符合原子经济的要求. 前人对尿素醇解法的研究都集中于反应条件优化^[2]和催化剂筛选^[3-5]方面,但是对酯化反应同时导入吸收分离操作,并进一步研究其过程强化的理论与基本策略,目前还鲜有报道.

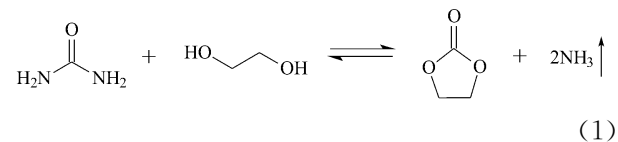
文献[6]在研究对流换热时,发现速度场和热流场之间若配合恰当,流动可以极大地强化传热,由此提出了研究传递过程强化的多场协同理论. 文献[7]将多场协同理论的研究从传热过程延伸至热量和质量同时传递的过程. 文献[8-9]则将多场协同理论用于无传热的对流传质过程中,指导通风设备和反应器的设计. 文献[10]将场协同理论扩展至传热、传质、化学反应三者的协同分析上,本实验室也曾将场协同理论用于反应精馏多单元耦合过程的^[11]. 这些研究极大地丰富了多场协同理论的应用.

本文首先应用多场协同理论,分析 NH₃ 在磷酸中鼓泡化学吸收过程的场协同原理. 然后根据 NH₃ 鼓泡吸收过程的气液两相流特征,在前人研究基础上^[12-19],运用计算流体力学(CFD)中的流体体积函数(VOF)多相流模型,对单个 NH₃ 气泡在磷酸中吸收变化的两相流过程进行数值模拟,从而直观形象地得到多个矢量场相互配合促进 NH₃ 吸收的机理,以期反应吸收多过程耦合的强化,提供新的分析策略和理论依据.

1 NH₃ 化学吸收的多场协同分析

1.1 反应过程

尿素醇解法合成碳酸乙烯酯工艺的实验室流程图如图 1 所示,其中反应釜内发生的化学反应为



该反应是一个可逆反应,以 NH₃ 的生成速率来表达的反应速率方程可设为

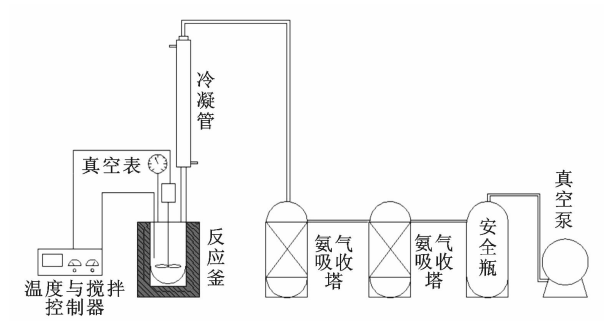


图 1 尿素醇解法合成碳酸乙烯酯工艺的流程示意图

$$r_{\text{NH}_3} = \frac{dn_{\text{NH}_3}}{Vdt} = k_1 c_{\text{urea}} c_{\text{EG}} - k_2 c_{\text{EC}} \frac{P_{\text{NH}_3}}{H}$$

(2)

式中: k_1 、 k_2 分别为正逆反应的速率常数; c_{urea} 、 c_{GB} 、 c_{EC} 分别为反应器中尿素、乙二醇以及碳酸乙烯酯的浓度; p_{NH_3} 为 NH₃ 的分压; H 为亨利系数. 由式(2)可见,在其他条件不变的情况下,减小 NH₃ 压力 P_{NH_3} 即可增大 r_{NH_3} ,即通过不断吸收除去反应体系中的 NH₃,可以提高化学反应速率,并推动化学平衡向右移动. NH₃ 吸收塔内装有远远过量的磷酸(质量分数为 85%),反应器产生的 NH₃ 自鼓泡塔底进入,发生反应



通过该反应来达到除去反应器中 NH₃ 的目的. 该吸收反应为不受反应动力学控制的飞速反应,属于气膜传质控制过程,反应面就在气液相分界面上,总反应速率取决于气膜中 NH₃ 的传质速率,因此应采取必要的手段提高 NH₃ 的对流传质系数 k .

1.2 场分析

对于 NH₃ 鼓泡吸收的传质,气液相界的浓度差是其主要推动力,故气液相界面附近必然存在 NH₃ 的浓度压力梯度场. 此外,由于有流体流动,所以气泡内必然存在 NH₃ 气流的速度场,即该对流传质区域内存在如下两个矢量场

速度场

$$U(x, y, z)$$

压力梯度场

$$P_{\text{NH}_3}(x, y, z)$$

NH₃ 的对流传质主要是以上两个矢量场协同作用的结果,其协同度好则传质效率高,反之则传质效率低. 强化 NH₃ 的传质(即强化其吸收),就是要探索能够提高速度场与压力梯度场的协同度的方法.

1.3 多场协同分析

根据多场协同理论,NH₃ 吸收过程涉及气流速度场、压力梯度场等的协同. 考虑气膜内的微元,用于描述对流传质过程的控制方程有(假定过程稳态,

NH_3 密度 ρ 为常数)^[8-9]连续性方程

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{U} = 0 \quad (4)$$

动量守恒方程

$$\rho \mathbf{U} \cdot \nabla \cdot \mathbf{U} = \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot \mathbf{U}) - \nabla P_{\text{NH}_3} + S_F \quad (5)$$

关键组分的物料守恒方程

$$\rho \mathbf{U} \cdot \nabla P_{\text{NH}_3} = \nabla \cdot (\rho D \nabla P_{\text{NH}_3}) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{U}$ 为气泡内 NH_3 气流的速度矢量; ∇P_{NH_3} 为气泡内 NH_3 的压力梯度; D 为 NH_3 的扩散系数. 对式(6)两边积分, 得

$$\int_0^{\delta_l} \mathbf{U} \cdot \nabla P_{\text{NH}_3} dz = -D \nabla P_{\text{NH}_3} \Big|_{\delta_l} \quad (7)$$

式(7)中引入下列无因次变量

$$\bar{\mathbf{U}} = \frac{\mathbf{U}}{U_0}, \quad \nabla \bar{P}_{\text{NH}_3} = \frac{\nabla P_{\text{NH}_3}}{(P_0 - P_s)/\delta_l}, \quad \bar{z} = \frac{z}{\delta_l}$$

则该方程可写为

$$\frac{\delta_l U_0}{D} \int_0^{\delta_l} \bar{\mathbf{U}} \cdot \nabla \bar{P}_{\text{NH}_3} d\bar{z} = -\nabla \bar{P}_{\text{NH}_3} \Big|_{\delta_l} \quad (8)$$

式中: δ_l 为气膜厚度; U_0 为 NH_3 的初始进气速度; P_0 为 NH_3 气泡内气相主体的压力; P_s 为气液相界面处 NH_3 的压力.

将式(8)进行整理, 可得无因次关系式

$$Sh = ReSc \int_0^1 \bar{\mathbf{U}} \cdot \nabla \bar{P}_{\text{NH}_3} d\bar{z} \quad (9)$$

式中: Sh 、 Re 、 Sc 分别为舍伍德数、雷诺数和施密特数, 它们的表达式为

$$Sh = \frac{k\delta_l}{D}; \quad Re = \frac{\rho U_0 \delta_l}{\mu}; \quad Sc = \frac{\mu}{\rho D}$$

舍伍德数 Sh 是包含对流传质系数 k 的无因次数群, $\bar{\mathbf{U}}$ 和 $\nabla \bar{P}_{\text{NH}_3}$ 分别代表气流速度场和压力梯度场的强度值. 由式(9)可见, 传质强度受 Re 、 Sc 以及速度场与压力梯度场协同作用的影响.

定义式(9)中积分部分为对流传质的场协同数

$$F_c = \int_0^1 \bar{\mathbf{U}} \cdot \nabla \bar{P}_{\text{NH}_3} d\bar{z} = \int_0^1 (|\bar{\mathbf{U}}| |\nabla \bar{P}_{\text{NH}_3}| \cos\beta) d\bar{z} \quad (10)$$

则有

$$Sh = ReScF_c \quad (11)$$

F_c 不仅取决于速度与压力梯度的标量大小, 而且取决于两场矢量夹角 β 的大小. 因 $-1 \leq \cos\beta \leq 1$, 故 $\cos\beta$ 越接近 1, 则 F_c 越大, 相应地传质系数 k 就越大. 当 β 为 0° (即两场的方向一致) 时, NH_3 速度场与压力梯度场的协同程度最好, 此时在流体流速和物性条件不变的情况下即可达到传质强度的最大值.

2 NH_3 鼓泡化学吸收的数值模拟及强化吸收的途径

2.1 数值模拟的物理模型

应用 CFD 商用软件 FLUENT6.3, 对单个 NH_3 气泡的吸收过程进行二维数值模拟. 将所用鼓泡吸收塔简化为 $200 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 的二维物理模型, 作为模拟计算区域. 初始半径为 5 mm 的 NH_3 气泡从距离吸收塔底部 70 mm 处进入, 上升过程中不断发生气相至气液相界面的传质. 模型上方出口设为压力出口边界条件, 其余为静止无滑移的壁面边界条件. 计算区域采用四边形非结构化网格进行划分, 网格间距为 1 mm , 共划分网格 $50\,489$ 个, 网格类型为 Pave 型. 为追踪鼓泡吸收过程中气液相界面的变化, 计算采用 VOF 多相流模型, 压力速度耦合方法选用压力隐式分裂算法. 气液界面追踪的计算原理, 就是 VOF 模型的体积分数方程.

传质的模拟通过编写 UDF (User Defined Function) 程序来实现. 编程思想是: 基于 NH_3 与磷酸的化学反应受传质控制这一结论, 以及两物质的实际化学反应速率, 设定一个 NH_3 气相向磷酸液相进行分配的气液质量分配系数, 其值等于上述的反应速率值; 然后利用该分配系数编写 NH_3 组分分别在气液两相中的传质源项, 以及气液两相流体区域中混合物质的动量源项, 得到传质 UDF 程序; 最后编译该 UDF, 并加载到 FLUENT 中进行计算, 实现对 NH_3 传质的模拟. 模拟所用磷酸和 NH_3 的初始物性参数如表 1 所示.

表 1 磷酸及 NH_3 的物性参数^[20]

$\rho_l/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\mu_l/\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\rho_g/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\mu_g/\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\sigma/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
1 690	0.003 71	0.689 4	1.015×10^{-5}	0.828

注: 磷酸质量分数为 85%; ρ_l 、 μ_l 分别为磷酸的密度、黏度系数; ρ_g 、 μ_g 分别为 NH_3 的密度、黏度系数; σ 为表面张力系数.

2.2 计算结果分析

模拟计算的时间步长取 0.1 ms , 单步迭代 10 次, 每隔 10 ms 保存一次计算结果, 每隔 40 ms 绘出一次气泡的形状与位置, 将这些结果顺次叠加在同一张图上, 得到图 2 所示的气泡运动轨迹.

图中深色椭圆区域为 NH_3 气相主体, 其余为 H_3PO_4 液相主体. 从图 2 中可以看出: ① 气泡运动并非沿直线竖直上升; ② 气泡上升过程中, 界面形状由最初的圆形逐渐变为扁平的帽子形或椭球形, 其

体积随着 NH_3 被吸收而不断减小直至最后消失.



图 2 NH_3 鼓泡吸收过程的气泡运动轨迹
(气泡初始半径为 5 mm)

图 3 反映的是气泡体积随时间变化的趋势,根据数值模拟的结果,可以认为在 $t=0.360\text{ s}$ 时刻气泡已经消失.

2.3 吸收过程强化的途径

对图 2 中不同时刻的气泡单独进行分析,考察对应时刻的气泡形状、气液两相流速度矢量分布以

及 NH_3 的体积分数分布,得到如图 4 所示的结果(为便于观察分析,对部分时刻的气泡做了适当的放大处理). 图中分别示出了 10、40、80、120、200 和 280 ms 时刻的气泡,其中环形区域为 NH_3 的体积分数等值线(也是气膜及气液界面所在的位置),由区域内部向外部的过渡表示体积分数由高到低的分布,内环以内为 1、外环以外为 0. 箭头区域为气液两相流的速度矢量分布图,相界面以内的箭头分布表示 NH_3 气相的速度场,其余为磷酸液相的速度场,箭头长度越长、颜色越深、分布越密,意味着该处流体的流动速度越大.

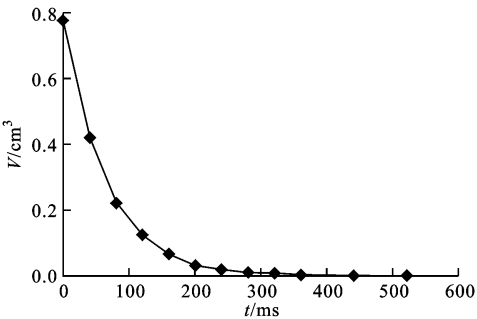


图 3 NH_3 鼓泡吸收时单个气泡的体积随时间的变化

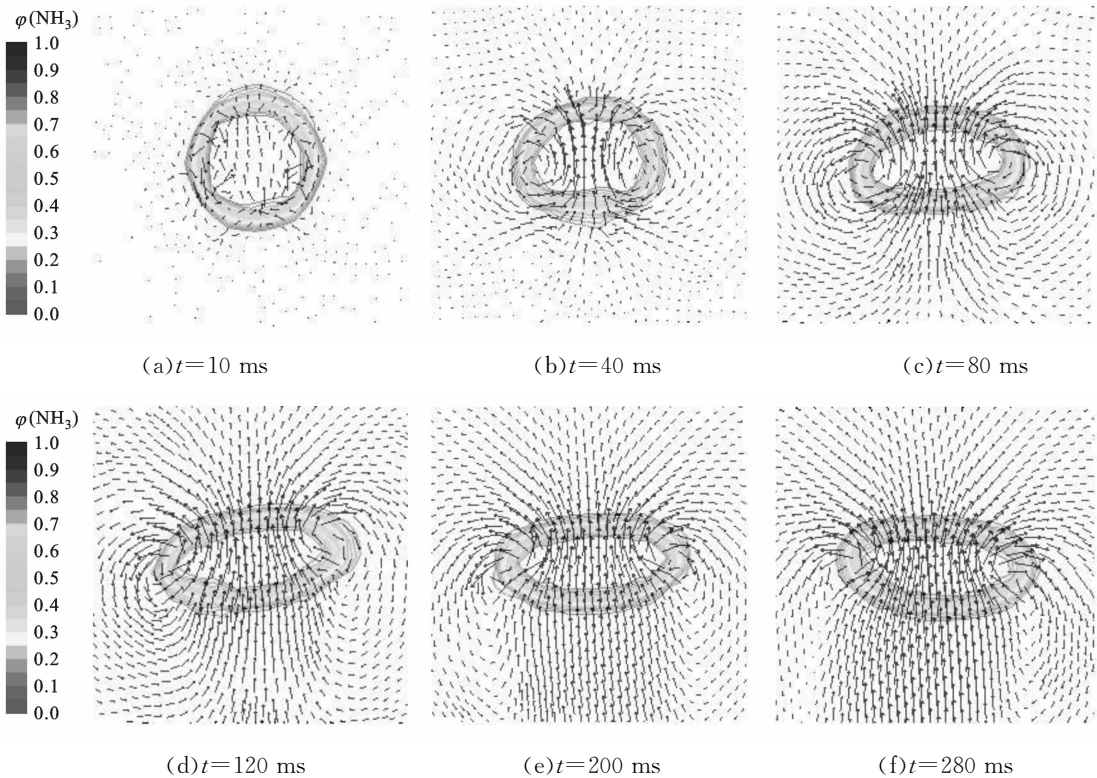


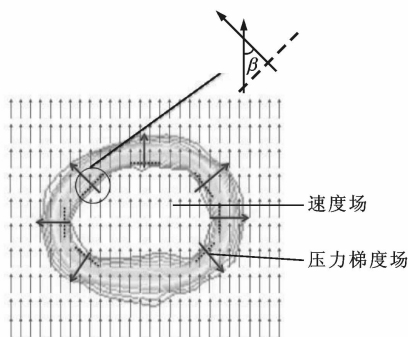
图 4 不同时刻 NH_3 气相的体积分数等值线、气泡形状以及气液两相流速度矢量图

可以认为,气泡的上升是磷酸液相浮力作用的结果. 气泡的变形是因为气泡底部的压力大于上表面的压力,此压力差与界面附近液相的流动共同诱导出一个位于气泡底部的自下而上的射流,推动气泡的中央部位向内突入,致使气泡形状由最初的圆形逐渐变为底部内凹的帽子形或椭球形^[14]. 在此过程中,气泡内部形成由中心向两侧运动的涡流.

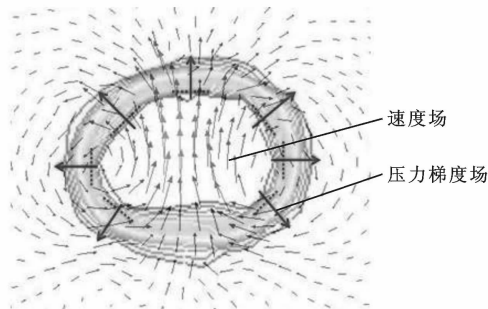
这些涡流的存在对于 NH_3 传质速率的影响非常显著,充分符合多场协同理论. 由

$$Sh = \frac{kd}{D} = ReScF_c = ReSc \int_0^1 \bar{U} \cdot \nabla \bar{P}_{\text{NH}_3} d\bar{z} = ReSc \int_0^1 (|\bar{U}| |\nabla \bar{P}_{\text{NH}_3}| \cos\beta) d\bar{z} \quad (12)$$

可知,在进气操作条件不变时, NH_3 的对流传质速率取决于气流速度场与压力梯度场的夹角 β , β 越接近 0° , 则对流传质系数 k 越大. 气液相界面附近的 NH_3 压力梯度场的方向始终是沿各点的径向发散的,即始终与图4中环形区域各点处的法向量方向一致,这样夹角 β 的大小就受控于气泡内部 NH_3 流动的速度场方向. 以 $t=40 \text{ ms}$ 时刻的气泡为例(图5b),假如气泡内部气流流向始终与气泡的宏观运动方向相同(图5a),那么除了中心区域的气流速度



(a) 假想速度场下的场协同示意图



(b) 实际速度场下的场协同示意图

图5 $t=40 \text{ ms}$ 时刻气泡所处的两相流速度场与压力梯度场的场协同示意图

场与压力梯度场的夹角在 0° 左右,其他区域(尤其是气泡两侧)两场的夹角都将偏离或远远偏离这个角度,这非常不利于 NH_3 气膜传质速率的提高. 实际的情形(图5b)是,气泡内部的 NH_3 气流并非单一地沿着某个流向运动,而是在两相流的作用下自发地由中心向四周发散而形成微小的涡流,气流流向着与压力梯度场的夹角 β 处达到 0° 的方向发展,两场的协同度得到优化,对流传质系数 k 增大,非常有利于 NH_3 传质速率的强化提高.

综上所述可知,气泡内部气流能够形成朝着有利于 NH_3 对流传质方向发展的最佳流场. 这样,只要通过一定手段增大气流流场的湍动强度和单位吸收体积的气液相界面积,即可实现对 NH_3 化学吸收过程的强化,进而提高尿素醇解合成碳酸乙烯酯的收率.

3 结 论

NH_3 对流传质速率与气流速度场、压力梯度场以及两场的协同程度密切相关. 给定进气速度时,气流速度场和压力梯度场在整个传质区域内的协同程度越好,则对流传质速率越大.

根据对流传质过程的控制方程,推导并定义了对流传质场协同数. 在进气操作条件不变的前提下,使速度场与压力梯度场的矢量方向尽可能一致,则可增大传质场协同数,提高场协同度,进而增大对流传质系数.

对 NH_3 鼓泡吸收过程所进行的模拟计算表明, NH_3 气泡的体积在很短时间内便消失殆尽,气液界面的形状不断发生由圆球状向扁平状的变化. 气液两相的流动促使气泡内的 NH_3 气流形成有利于其对流传质速率提高的最佳流场. 通过一定手段增大 NH_3 与磷酸两相流的湍动强度和单位吸收体积的相界面积,则可强化 NH_3 的化学吸收,进而实现对尿素醇解法全过程的强化.

参考文献:

- [1] 沈玉龙,魏利滨,曹文华,等. 绿色化学[M]. 北京:中国环境科学出版社,2009:1-7.
- [2] 张瑾. 尿素合成碳酸乙烯酯工艺的研究[D]. 天津:天津大学,2008.
- [3] LI Qibiao, ZHANG Wenyu, ZHAO Ning, et al. Synthesis of cyclic carbonates from urea and diols over metal oxides[J]. Catalysis Today, 2006, 115(1/2/3/4): 111-116.
- [4] QIU Peng, WANG Lu, JIANG Xuedong, et al. Syn-

- thesis of diethyl carbonate by combined process of transesterification with distillation[J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(2): 1254-1258.
- [5] QIU Peng, YANG Bolun, YI Chunhai, et al. Characterization of $\text{KF}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ catalyst for the synthesis of diethyl carbonate by transesterification of ethylene carbonate[J]. *Catalysis Letters*, 2010, 137(3/4): 232-238
- [6] 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, 45(19): 2118-2122.
GUO Zengyuan. Physical mechanism of convective heat transfer and its control: the synergy of velocity field and heat flow field[J]. *Science Bulletin*, 2000, 45(19): 2118-2122.
- [7] 吴良柏, 李震, 宋耀祖. 热质传递过程的场协同原理[J]. *科学通报*, 2009, 54(14): 2045-2050.
WU Liangbai, LI Zheng, SONG Yaozu. The field synergy principle of heat and mass transfer process[J]. *Science Bulletin*, 2009, 54(14): 2045-2050.
- [8] CHEN Qun, REN Jianxun, GUO Zengyuan. Field synergy analysis and optimization of decontamination ventilation designs[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(3/4): 873-881.
- [9] CHEN Qun, MENG Ji'an. Field synergy analysis and optimization of the convective mass transfer in photocatalytic oxidation reactors[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(11/12): 2863-2870.
- [10] YU Y S, LI Y, LU H F, et al. Multi-field synergy study of CO_2 capture process by chemical absorption[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(10): 3279-3292.
- [11] WANG Huajun, YANG Bolun, WU Jiang, et al. Multi-fields synergy in the process of reactive distillation coupled with membrane separation[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2005, 44(11): 1207-1215.
- [12] BRENNEN C E. *Fundamentals of multiphase flows* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005: 246-282.
- [13] JULIEN D, STEPHANE V, ARNAUD E, et al. Numerical investigations in rayleigh breakup of round liquid jets with VOF methods[J]. *Computers & Fluids*, 2011, 50(1): 10-23.
- [14] 倪明玖. 浮力作用下上升气泡的变形和驻涡形成机理研究[J]. *工程热物理学报*, 2009, 30(1): 76-80.
NI Mingjiu. Bubble rising driven by buoyancy with deformation and standing vortex[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(1): 76-80.
- [15] 张小斌, 项世军, 曹潇丽, 等. 用 VOF 方法数值计算液滴燃烧[J]. *化工学报*, 2011, 62(3): 692-698.
ZHANG Xiaobin, XIANG Shijun, CAO Xiaoli, et al. Numerical simulation for combustion of droplet with volume of fluid formulation[J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(3): 692-698.
- [16] LI Yong, ZHANG Jianping, FAN Liangshi. Discrete-phase simulation of single bubble rise behavior at elevated pressures in a bubble column[J]. *Chemical Engineering Science*, 2000, 55(20): 4597-4609.
- [17] LI Y, YANG G Q, ZHANG J P, et al. Numerical studies of bubble dynamics in gas-liquid-solid fluidization at high pressures [J]. *Power Technology*, 2001, 116(2): 246-260.
- [18] YANG G Q, DU Bing, FAN L S. Bubble formation and dynamics in gas-liquid-solid fluidization; a review [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(1): 2-27.
- [19] 过增元, 黄素逸. 场协同原理与强化传热新技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 6-15.
- [20] BERND R, GERD M. Solubility of ammonia in aqueous solutions of phosphoric acid; model development and application[J]. *Journal of Solution Chemistry*, 1994, 23(1): 37-51.

[本刊相关文献链接]

- 樊鹏飞, 张兄文, 李国君, 等. 板式固体氧化物燃料电池的热应力分析. 2012, 46(7): 75-81.
- 潘华, 宋华丰. Mn 改性 Fe/H-beta 催化剂的低温催化分解 NO_x 的研究. 2012, 46(1): 131-134.
- 王伟宗, 荣命哲, Anthony B. MURPHY, 等. 平衡态电弧等离子体统计热力学属性的计算. 2011, 45(4): 86-92.
- 邓承继, 周薇, 祝洪喜, 等. K_2O 对氧化物原料合成 $\text{Al}_3\text{B}_4\text{C}_7$ 的影响. 2011, 45(3): 112-116.
- 燕子鹏, 蔡舒, 武卫兵. 电化学法制备 p 型 Cu_2O 半导体薄膜及其性能表征. 2011, 45(3): 121-124.
- 杨靖, 陈杰蓉. 金属银负载型 SiO_2 杂化膜的制备与性能表征. 2010, 44(12): 87-92.
- 张英佳, 黄佐华, 王金华, 等. 利用激波管实验装置研究丙烯/氧气/氮气混合气着火滞燃期. 2010, 44(1): 9-12.
- 王保国, 李翔. 多工况下高超声速飞行器再入时流场的计算. 2010, 44(1): 71-76.
- 冉帆, 王锡斌, 朱瑞军, 等. 甲醇空气预混层流燃烧的简化化学反应动力学机理. 2009, 43(9): 27-31.

(编辑 杜秀杰)