

# 传热传质过程和设备的有限时间热力学优化

舒礼伟, 陈林根, 孙丰瑞

(海军工程大学 研究生院, 湖北 武汉 430033)

**摘 要:** 阐明了有限时间热力学优化对传热传质过程和设备的意义, 从物理学和工程学两个角度综述了传热传质过程和设备的有限时间热力学优化研究现状。从优化方法(数值优化和最优控制理论)、优化目标(最小熵产生、最小平均耗热(功)量、最大生产率、最大效率)、优化结果等几个方面重点介绍了蒸馏与分离过程理论循环和工程循环、化学反应器的性能优化问题, 探讨了传热传质过程和设备有限时间热力学优化的发展趋势, 指出了具有完全可控换热器、序接换热器以及综合了热机的换热器网络的非绝热蒸馏是近期非绝热蒸馏热力学优化研究的主要发展方向。

**关键词:** 有限时间热力学; 优化; 传热传质过程; 非绝热蒸馏; 化学反应器

中图分类号: O414.1

文献标识码: A

## 1 前言

能源的短缺与高效利用问题是当代世界各国面临的重大社会问题之一。随着世界人口和经济的迅速增长, 能源的消耗急剧地增加, 并导致能源的严重短缺。因此, 研究充分、高效利用现有能源的方式成为我们目前的重要任务。蒸馏作为全球范围内耗能量最大的工业, 引起了很多工程界

和物理界人士的注意。非绝热蒸馏能极大地提高蒸馏的能源利用效率和生产率<sup>[1]</sup>, 因此成为了工程界和物理界的一个新的研究热点。

20 世纪中后期, 工程界和物理界人士先后将传热损失引入到经典卡诺热机循环的性能分析中, 得出了新的更具实际指导意义的重要理论结果, 从而也派生出了有限时间热力学这一崭新的现代热力学学科分支。有限时间热力学系用热力学与传热学和流体力学相结合的方法, 分析热机、制冷机、热泵循环和类热机装置性能优化问题。研究方法以交叉、移植和类比为主, 侧重于发现新现象, 探索新规律, 建立新方法, 在深化物理学理论研究的同时, 注重于其工程应用研究, 在物理学与工程学之间架起桥梁。近 30 年来, 有限时间热力学已取得了长足的进展<sup>[2~6]</sup>。在这些工作中, 已有一些文献研究了蒸馏与分离过程和化学反应器等同时具有传热传质特征的过程和设备的热力学优化, 获得了一些比经典热力学理论对工程设计和优化更具有实际指导意义的新结论。本文将对该方向的研究现状做综述评估, 并指出了下一步发展方向。

## 2 蒸馏与分离过程的理论循环研究

Berry 等人应用最优控制理论对热驱动分离过程进行了分析<sup>[7]</sup>, 得到了恒温热源热驱动分离过程的最小平均耗热量的解析解。在零平均加料流的极限条件下得到了耗热量的经典平衡式。提出了计算变温热源热驱动分离过程的最小耗热量的数值计算方法, 并应用有限时间热力学的广义方法 (generalized formalism) 计算了具有分段变温、变化学势热源和分布式工质的不可逆循环分离过程的平均生产率和效率的上限值以及熵产的下限值。Tsirlin 等人引入了效率作为时间约束过程的判据<sup>[8]</sup>, 采用了与分析法相似的方法, 综合考虑了时间约束过程的有限时间和非零速率因素, 得到了化学反应系统和并联热机序列的最小熵产生。进一步的研究方向是优先考虑使用耗散系数(或熵产生), 因为它只依赖于系统自身的参数。而相比较之下, 依赖于环境的参数, 但环境的参数常常是未知的或远离平均值。尤其是对于浓度, 这个问题更加突出; Tsirlin 等人导出了不可逆分离过程性能的新的热力

收稿日期: 2005-06-13; 修订日期: 2005-09-06

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(NCEF-04-1006); 全国优秀博士学位论文作者专项基金资助项目(200136)

作者简介: 舒礼伟(1978-)男, 河南信阳人, 海军工程大学博士研究生

学极限,包括有限时间分离耗功、热驱动分离过程的最大生产率、不可逆蒸馏塔的最小耗损和理想操作线(未计入再沸器和冷凝器里换热的熵产生,只考虑不可逆二元蒸馏的传质损失,高、低温热源之间没有热漏);还考虑了由有限流率和传热传质系数所引起的不可逆性,应用有限时间热力学方法估算了具有给定生产率的机械分离过程的最小耗功和热驱动分离过程的最小耗热量。证明了热驱动分离过程的生产率是有限的,并估算了该极限生产率和分离过程的熵产生;应用开放系统最优控制法和平均问题非线性规划方法计算理想气体二元混合物在有限时间内分离的最优传质热力学。利用一个理想 Van't Hoff 腔作为理论模型来推导得到实际分离过程(如膜分离)的不可逆功的下限,得到了完全分离和不完全分离的最小耗功表达式,而且得到了理想气体模型分离过程的最优控制。经简单修改后,该算法可用于计算其它分离模型。

Berry 等人对分离过程和化学反应进行了热力学分析<sup>[9]</sup>,得到了气体混合物分离过程的最小不可逆性;吸收-解吸过程和吸附-解吸循环的极限效率和极限生产率;不可逆蒸馏的效率、熵产生和最优浓度构型;以及结晶过程的最优控制问题。毕月虹则将其应用于气体水合物结晶过程的性能优化问题<sup>[10]</sup>。

Salamon 等人把具有给定数量弛豫过程熵产的赛马理论(horse-carrot theorem)扩展到了定常流过程<sup>[11]</sup>。用热力长度代替几何张量,把赛马理论应用到了蒸馏过程,得到了等热力长度蒸馏的最小熵产生;将等热力长度(ETD)原则首次应用于化学系

统,通过使每层塔板都交换热量来提高蒸馏塔的热效率。给定了每一层塔板的最优温度和加热量及排热量构型,对离散系统的热力长度进行了优化。文中的方法不局限于蒸馏,可应用于多种分级过程。Goff 等人得到了有限时间焓效率和焓效率的表达式<sup>[12]</sup>,定义焓效率为变换中焓增与熵增的比值,是“熵”温度的函数。Muslim 等人研究了参考温度变化对一级和二级原油蒸馏装置的效率的影响<sup>[13]</sup>,结果表明升高参考温度将使一级和二级原油蒸馏装置的焓效率减小,并且使两个系统焓效率之间的差距增大。原油蒸馏系统的焓损失也因此增大。进一步的研究方向是研究馏出物的纯度对单级和两级原油蒸馏装置的影响,以及建造和维护取代一个大换热器的两个小换热器、取代一个大蒸馏塔的两个小蒸馏塔的经济影响,而且认识到联合应用焓分析与系统焓经济优化方法对蒸馏塔的运行维护成本进行分析的重要性。

### 3 蒸馏与分离过程的工程循环研究

在工程界,关于蒸馏与分离的研究方兴未艾,主要集中在蒸馏与分离过程性能改进与提高上。有些文献则引入了换热器或换热器网络,对蒸馏与分离过程进行了分析。

Bandyopadhyay 等人从多个方面研究了蒸馏塔的性能<sup>[14]</sup>。研究了实际近似最小热力学状态(PNMTCC)的蒸馏塔的温度-焓曲线和蒸馏塔总组合曲线(CGCC);提出了精确考虑加料级质量、能量平衡方程的加料级修正(FSC)法和回流调节指标;将导向方法应用于确定换热器网络在能量成本

和固定资产投资成本之间折中的多工质指标的最优负荷。基于新近发展起来的工质最便宜原则(CUP),指出在增加总工质时优先增加最便宜的工质的负荷,而保持相对昂贵的工质恒定,为换热网络工质和负荷的选择提出了一种最优投资指标方法。同时,还提出了在给定蒸馏问题情况下与蒸馏塔的加料点及回流独立的恒定精馏-提馏(IRS)曲线,研究了蒸馏过程能量分析、加料以及加料预处理对蒸馏塔性能的影响。蒸馏塔内的焓损失可通过在  $\epsilon - H$  (卡诺因子-焓)图上用 IRS 曲线来图形化表示,在蒸馏塔的 IRS 曲线与其焓损失之间建立了联系,因此 IRS 曲线可用于求解蒸馏塔的定量指标和其焓效率。

Mullins 等人分析了蒸馏过程<sup>[15]</sup>,提出了减小蒸馏熵产生的方法,给出了二元蒸馏完全或部分分离的简单模型的分析算例,找到了能减小蒸馏熵产生的中间换热器的最佳位置,并比较了能减小熵产生的中间换热器和多级蒸馏塔二元分离的功效。Cerci 等人建立了一个典型的理想蒸馏过程<sup>[16]</sup>,并应用热力学第一和第二定律对单个过程的最小需求功进行了分析。该蒸馏过程使用了换热器和卡诺机来实现蒸馏过程与环境之间的换热,并由其确定过程的最小需求功,同时得到了蒸馏过程的第二定律效率解析式。

Andresen 等人基于仿真研究了蒸馏塔内部换热器的位置和负荷的最优分配问题<sup>[17]</sup>。结果证明蒸馏塔内部的间隔换热器能显著减小蒸馏过程的熵产生;还提出了理论推导多换热器蒸馏塔设计的两种熵优化方法:等热力长度法(ETD)和等驱动力法(EOF)。把两种方法应用到二元蒸馏塔,

结果证明蒸馏塔的熵产生显著减小,并将结果与数值优化所得蒸馏塔性能进行了比较。文中的两种方法可从二元蒸馏系统拓展到多元蒸馏系统。Schaller 等人通过在所有塔板上都安装换热器来提高理想二元蒸馏塔的第二定律效率<sup>[18]</sup>。通过数值仿真,得到了蒸馏塔的第二定律效率最高的换热器负荷。数值最优化结果与应用不可逆热力学得到的计算结果相吻合;还把热流、质量流以及换热器的熵产生计算在内,研究了传热规律对非绝热蒸馏塔最优性能的影响,对具有共用外部热源的并联换热器组的非绝热蒸馏塔的总熵产生进行了最小化。结果证明,每级塔板的熵产生相等时蒸馏塔性能最优,而传热规律对换热器性能和蒸馏塔熵产率的影响很小。

Koeijer 等人应用一种完全数值多维最优化方法来确定蒸馏塔的最小熵产<sup>[19]</sup>。通过改变塔板数量和分离纯度比较了等热长度(ETD)方法与数值最优化方法的性能,根据 ETD 法得到的结果与数值最优化方法得到的结果惊人的一致。但是该方法只考虑了分离过程的熵产,未计入换热的影响;在不计入换热器的熵产生的情况下,对最小化非绝热蒸馏塔熵产率的两种解析方法和两种数值方法进行了比较。结论是数值法可应用于实际优化,但是解析法要满足实用尚需改进;改进了最小化非绝热蒸馏塔的熵产率模型,研究了传热面积的等驱动力、与蒸汽流量成线性关系、面积相等和熵产生相等共 4 个分配规律,对蒸馏塔的熵产率进行了最小化。结果表明,换热器对熵产率有显著影响,面积分配规律为等驱动力时蒸馏塔的熵产率最

小。

Rivero 于 1989 年开始研究非绝热蒸馏<sup>[20]</sup>,并建造了非绝热蒸馏塔实验装置。到 2001 年,其研究成果在原油精炼和石油化工工业领域内已达到工业应用水平。Rivero 对绝热蒸馏系统的绝热精馏塔和绝热提馏塔,以及非绝热蒸馏系统的非绝热精馏塔和非绝热提馏塔共 4 个部分进行了详细的焓分析,确定了塔内焓损失的分配和达到最小总焓损失的塔内最优热量分配;还讨论了对非绝热蒸馏塔进行改型,即应用序接换热器替代完全可控换热器的非绝热蒸馏塔模型。结果证明序接换热器能显著减小非绝热蒸馏的焓损失。舒礼伟等人改进了非绝热蒸馏塔模型<sup>[21]</sup>,对非绝热蒸馏塔中序接换热器热导率的最优分配问题进行了研究,得到了序接换热器热导率的最优分配和非绝热蒸馏塔的最优性能。

一些文献还讨论了二元蒸馏塔运行的其它问题和换热器网络的相关问题。Schon 等人研究了给定的二元蒸馏塔在几种不同的回流比(热流率)时是否能得到相同的纯度和馏出物数量的问题<sup>[22]</sup>。得到的结果是即使塔板效率与流率轻微变化,也存在几个使蒸馏塔能得到同样输出量的不同回流比。进一步的研究可考虑热漏或压降对蒸馏塔性能的影响。Nulton 等人利用内可逆热机<sup>[23]</sup>,讨论了导热率有限的高效换热网络的若干问题,计算了换热网络供热需求的最小焓成本,给出了把有效元件综合到换热网络里减小的焓损失的数量。Johannessen 等人对换热网络、化学反应器和非绝热蒸馏等最优控制系统进行了熵产生最小化研究<sup>[24]</sup>,得到了根据等熵产生原则

得到的性能优于根据等驱动力原则得到的性能,以及叉流换热器的熵产生最小的结论。

#### 4 化学反应器的相关研究

Johannessen 利用氨反应器开发了一种最小化放热反应器的熵产生的方法<sup>[24]</sup>,找到了氨反应的最小损失功或最小熵产生的运行条件。氨反应的熵产生和氨反应器的冷凝器换热管向冷却工质传热的熵产生用不可逆热力学表示。优化结果是最优进口条件和反应器里的温度、浓度构型。同时,也给出了反应速率,局部熵产生以及化学和热驱动力。最优化的最重要结果是冷却工质的温度,以及给定进口条件的相应温度和转化率构型。等驱动力原则下氨反应的熵产率最小;还对发生吸热反应的化学反应器(蒸汽重整炉)进行了熵产生最小化研究,并同时应用最优控制理论来最小化活塞流反应器的熵产率,给出了发生化学反应的活塞流反应器的一个通用公式,取加热(或冷却)工质的温度作为控制变量。最优控制问题的 Hamiltonian 函数是定常数,而且已知反应器内、外温度的关联方程。文中对 SO<sub>2</sub> 氧化反应进行求解,结果表明,可以显著减小活塞流反应器的熵产率;还对甲醇反应器里生产甲醇反应的熵产生进行了最小化。结果表明可以极大地减小反应器的熵产生。反应器的最优路径是化学反应的驱动力接近定常值。最后, Johannessen 等人通过改变 4 个催化床层的高度,经过 5 个中间换热器的温差和调整固定可用换热面积,最小化了一个通用的工业 SO<sub>2</sub> 转化器的熵产率。化学反应、压力降和换热都使 SO<sub>2</sub> 转化器的

熵产率。化学反应、压力降和换热都使 SO<sub>2</sub> 转化器的熵产率增大。与工业 SO<sub>2</sub> 转化器相比较, 给定约束下新的运行路径减少了 16.7% 的熵产率。减小的熵产可表现在提高输出热量的品位和降低输入热量的品位或减小总传热面积等方面。Mansson 等人以氨反应器的温度和氨转化率为目标函数<sup>[25]</sup>, 对氨反应器进行了最优化, 得到了氨反应器的最优温度构型、相应的氨反应放热率和当量以及氨浓度构型, 并将氨反应器的最优性能与常规氨反应器的性能做了比较。

### 5 结 语

从近年蒸馏与分离过程和化学反应器等同时具有传热传质特征的过程和设备的有限时间热力学研究发展概况来看, 研究主要集中在非绝热蒸馏领域。在综合考虑成本和运行之后, 具有完全可控换热器、序接换热器以及综合了热机的换热器网络的非绝热蒸馏对实际蒸馏装置的改进更有意义。因此, 具有完全可控换热器、序接换热器以及综合了热机的换热器网络的非绝热蒸馏应是近期非绝热蒸馏热力学优化研究的主要内容, 主要工作包括: 建立具有完全可控换热器的非绝热蒸馏模型、具有序接换热器的非绝热蒸馏模型、具有综合了热机的换热器网络的非绝热蒸馏模型; 研究传热规律对非绝热蒸馏性能的影响特点、优化准则对非绝热蒸馏性能的影响特点、非平衡热力学模型对非绝热蒸馏性能的影响特点和各种不可逆性对非绝热蒸馏性能的影响特点; 非绝热蒸馏模型与分析优化结果的实验验证。

### 参考文献:

[1] BANDYOPADHYAY S, MISHRA M, SHENOY U V. Energy-based targets for multiple-feed distillation columns [J]. *J AIChE*, 2004, **50**(8): 1837-1853.

[2] BEJAN A. Entropy generation minimization; the new thermodynamics of finite-size device and finite-time processes [J]. *J Appl Phys* 1996, **79**(3): 1191-1218.

[3] 陈林根, 孙丰瑞, Wu Chih. 有限时间热力学理论和应用的发展现状 [J]. *物理学进展*, 1998, **18**(4): 62-89.

[4] CHEN L, SUN F, WU C. Finite time thermodynamics optimization or entropy generation minimization of energy systems [J]. *J Non-Equilib Thermodyn*, 1999, **24**(3): 327-359.

[5] CHEN L, SUN F. Advances in finite time thermodynamics; analysis and optimization [M]. New York; Nova Science Publishers, 2004.

[6] 陈林根. 不可逆过程和循环的有限时间热力学分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.

[7] ORLOV V N, BERRY R S. Estimation of minimal meat consumption for heat-driven separation processes via methods of finite-time thermodynamics [J]. *J Phys Chem*, 1991, **95**(14): 5624-5628.

[8] MIRONOVA V A, TSIRLIN A M, KAZAKOV V A, et al. Finite-time thermodynamics exergy and optimization of time-constrained processes [J]. *J Appl Phys*, 1994, **76**(2): 629-636.

[9] BERRY RS, KAZAKOV V A, SIENIUTY-CZ S, et al. Thermodynamic optimization of finite-time processes [M]. Chichester; John Wiley & Sons Ltd, 2000.

[10] 毕月虹. 气体水合物蓄冷系统的热力学优化与实验研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.

[11] SALAMON P, NULTON J D. The geometry of separation processes; a horse-camot theorem for steady flow systems [J]. *Europhys Lett* 1998, **42**(5): 571-576.

[12] GOFF P L, CACHOT T, RENAUDIN V, et al. Finite time chemical thermodynamics [J]. *Entropy*, 2000, **36**(224/225): 26-31.

[13] MUSLM H A, DINCER I, ZUBAIR S M. Effect of reference state on exergy efficiencies of one and two-stage crude oil distillation plants [J]. *Int J Thermal Sciences*, 2005, **44**(1): 65-73.

[14] BANDYOPADHYAY S, MISHRA M, SHENOY U V. Energy-based targets for multiple-feed distillation columns [J]. *J AIChE*, 2004, **50**(8): 1837-1853.

[15] MULLINS O C, BERRY R S. Optimization of entropy production in distillation [J]. *J Phys Chem*, 1984, **88**(4): 723-728.

[16] CERCI Y. The minimum work requirement for distillation processes [J]. *Exergy The Int J*, 2002, **2**(1): 15-23.

[17] SAUAR E, SRAGUSA G, ANDRESSEN B. Equal thermodynamic distance and equipartition of forces principles applied to binary distillation [J]. *J Phys Chem*, 2001, **105**(11): 2312-2320.

[18] SCHALLER M, HOFFMANN K H, RIVERO R, et al. The influence of heat transfer irreversibilities on the optimal performance of diabatic distillation columns [J]. *J Non-Equilib Thermodyn*, 2002, **27**(3): 257-269.

[19] KOEIJER G D, ROSJORDE A, KJELSTRUP S. Distribution of heat exchange in optimum diabatic distillation columns [J]. *Energy The Int J*, 2004, **29**(12/15): 2425-2440.

[20] RIVERO R. Exergy simulation and optimization of adiabatic and diabatic binary distillation [J]. *Energy The Int J*, 2001, **26**(5): 561-593.

[21] 舒礼伟, 陈林根, 孙丰瑞. 非绝热蒸馏塔中序接换热器的热导率最优分配 [A]. 工程热力学与能源利用学术会议论文集 [C]. 北京: 中国工程热物理学会出版社, 2005. 856-861.

[22] SCHON J C, ANDRESEN B. Multiple modes for the operation of a binary distillation column [J]. *Ind Eng Chem Res*, 1996, **35**(7): 2327-2333.

[23] NULTON J D, SALAMON P. Finite-time thermodynamic analysis of controlled heat integration [R]. Proc ECOS1998, 1998.

[24] JOHANNESSEN E. The state of minimum entropy production in an optimally controlled system [D]. Norway; Norwegian University of Science and Technology, 2004.

[25] MANSSON B, ANDRESEN B. Optimal temperature profile for an ammonia reactor [J]. *Ind Eng Chem Process Desi Deve*, 1986, **25**(1): 59-65.

(何静芳 编辑)

传热传质过程和设备的有限时间热力学优化 = **Finite-time Thermodynamic Optimization of Heat and Mass Transfer Process and Relevant Equipment** [刊, 汉] / SHU Li-wei, CHEN Lin-gen, SUN Feng-rui (Postgraduate College under the Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 111 ~ 114

The important significance of finite-time thermodynamic optimization to a heat and mass transfer process and relevant equipment has been expounded. From the standpoint of physics and engineering a broad overview is given of the present status of research in the above-mentioned arena. With focused attention a description is given of the performance optimization of theoretical and engineering cycle concerning distillation and separation processes as well as the performance optimization of chemical reactors from the following aspects: optimization methods (numerical optimization and optimal control theory), optimization objectives (minimum entropy generation, minimum average heat (work) consumption, maximum productivity, maximum exergy efficiency) and optimization results. Also explored is the development trend of the thermodynamic optimization of the heat and mass transfer process and relevant equipment. It is noted that the major development direction of the current non-adiabatic distillation thermodynamic optimization consists in the non-adiabatic distillation equipped with completely controllable heat exchangers, sequential heat exchangers and heat exchanger network incorporating heat engines. **Key words:** finite-time thermodynamics, optimization, heat and mass transfer process, non-adiabatic distillation, chemical reactor

高温空气燃烧若干因素对  $\text{NO}_x$  生成量的影响 = **The Impact of Several Factors of High-temperature Air Combustion on  $\text{NO}_x$  Generation Quantity** [刊, 汉] / ZHANG Fu-bao, LUO Yong-hao, HU Li-yuan, et al (College of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 115 ~ 118

$\text{NO}_x$  produced in large quantities by industrial production processes is a kind of important substance, which can lead to the formation of photochemical smog and acid rain. In view of this the reduction of  $\text{NO}_x$  emissions is currently an important task facing us. One of the key techniques of high-temperature air combustion consists in the assurance of a low-oxygen environment to reduce  $\text{NO}_x$  generation amount. The authors in summing up a few key factors have come to the conclusion that a series of measures should be taken to achieve the aim of reducing  $\text{NO}_x$  emissions. These measures are: the adoption of diluents of a relatively high heat capacity, an increase in velocity of fuel and air jet flows, the use of a greater inclination angle for the fuel jet flow, an increase in the distance between fuel nozzle and air nozzle and the adoption of a higher fuel preheating temperature. Meanwhile, to achieve a complete combustion of the fuel, the air preheating temperature should be properly increased and the excess air factor also be slightly greater than 1. **Key words:**  $\text{NO}_x$ , environmental protection, combustion, high-temperature air combustion

MCFC-燃气轮机联合循环系统模拟与优化 = **Simulation and Optimization of a MCFC - Gas Turbine Combined Cycle System** [刊, 汉] / CHEN Yue-hua, CAO Guang-yi, WENG Yi-wu (Fuel Cell Research Institute under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 119 ~ 123

A molten carbonate fuel cell (MCFC) operates at a relatively high temperature. Its high-temperature exhaust gas can be