

引用格式: You Tian. Study on the Thermodynamic Coupling in the Gas-liquid Phase Transition Process in Heat Exchanger[J]. Journal of Gansu Sciences, 2020, 32(5): 46-49. [尤田. 换热器中气液相变过程的热力学耦合研究[J]. 甘肃科学学报, 2020, 32(5): 46-49.]
doi: 10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2020.05.010.

换热器中气液相变过程的热力学耦合研究

尤 田

(兰州理工大学石油化工学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要 制冷系统的换热器中存在气液相变过程, 为了揭示气液相变过程中传热与传质过程之间的相互作用机制, 介绍了孤立系统中热力学耦合的3种情况, 运用孤立系统的热力学耦合对换热器中气液相变过程进行深入研究。研究结果发现, 气液相变换热过程中的热量传递过程和相变传质过程之间的相互作用机制符合能量转换的热力学耦合机制, 即熵产率大于零的自发过程可以驱动熵产率小于零的非自发过程。

关键词 气-液相变; 孤立系统; 熵增原理; 化学势; 热力学耦合

中图分类号: TK121

文献标志码: A

文章编号: 1004-0366(2020)05-0046-04

在制冷系统中, 换热器(蒸发器、冷凝器)存在气液相变过程, 而管内相变换热过程是保证换热器高效运行的关键因素^[1]。换热器作为制冷系统中最为重要的单元设备之一, 其性能的好坏将直接关乎整个制冷系统的能量转换效率。因此, 对换热器中气液相变过程进行深入全面的研究, 对改进换热器的性能与结构, 提高制冷系统的热能利用效率具有深远意义。

目前, 针对气液相变过程的研究中, 学者大都是从热力学或动力学等单一角度对其进行分析研究, 存在一定的局限性。Chomaz等^[2]、Xia等^[3]从热力学角度对相变传热过程进行了探讨, 阐述了相变时热量运输规律和传热模式; Delbaen等^[4]、Xu等^[5]从动力学角度对相变传热进行了研究, 得到了相变时动能波动形式和局部成分的迁移规律。研究将用热力学耦合对换热器中气液相变过程进行了全面分析, 揭示了换热器中气液相变过程所存在的传热过程与传质过程的相互作用机制。

1 孤立系统的热力学耦合

1.1 孤立系统

当系统与外界环境没有能量及物质交换, 或者

进入系统和离开系统的物质及能量相等, 我们称该系统为孤立系统。在实际环境中, 绝对的孤立系统并不存在, 我们把实际系统看作是孤立系统, 是一种理想的近似处理手段。文献[6-7]中表明, 自然界的任何自发过程都是不可逆的, 因此, 对于孤立系统有

$$\Delta S_{iso} \geq 0. \quad (1)$$

由于孤立系统与外界环境不存在任何形式的相互作用, 因此该系统中发生的所有变化都是自发的。式(1)表明, 孤立系统的熵永不减小, 该系统内的自发过程只能沿着熵增方向进行, 这就是热力学的熵增原理^[8]。

1.2 化学势差 $\Delta\mu$

化学势是一种强度量, 它表征了系统相与相之间的转移趋势。根据热力学理论, 实际的气液相变过程是一个非平衡态的非可逆过程, 它是在气、液两相间的化学势差 $\Delta\mu$ 驱动下完成的。在这一相变过程中, 物质只能从化学势高的一相向化学势低的一相转化, 而气、液两相间的化学势差 $\Delta\mu$ 则是气液相变过程中的一个重要的热力学力。因此, 气液相变过程包括化学势梯度驱动下的质量扩散和温度梯度驱动下的热量传递, 这是在化学势差 $\Delta\mu$ 和温度梯

收稿日期: 2019-04-03; 修回日期: 2019-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51566010)

作者简介: 尤田(1989-), 男, 江苏射阳人, 硕士研究生, 研究方向为传热传质过程及其强化。E-mail: 813289148@qq.com

度 ΔT 共同驱动下, 并根据流体的实际对流运动状态来实现的。

1.3 孤立系统的热力学耦合

现实生活中存在许多交叉耦合现象, 一种热力学过程会引起或伴随另一种热力学过程的发生, 这就是热交叉耦合现象。制冷系统换热器中的流动换热过程可以看作传热过程与流动传质过程之间的交叉耦合作用。卢小平等^[9]将“热力学耦合”概念拓展应用到孤立系统的热力学过程分析中, 表明在一个熵产大于零的体系内可以存在一个熵产小于零的热力学过程。

如果在一个孤立系统中只存在传热过程和传质过程, 且没有体积膨胀功, 那么其传热传质过程的相互作用机制符合热力学耦合的相位描述, 该系统的全相位熵产率方程^[10]为

$$\sigma = \sum_i J_i \cdot X_i = J_Q \cdot X_Q + J_m \cdot X_m, \quad (2)$$

其中: σ 为熵产率 ($\text{kJ}/(\text{K} \cdot \text{s})$); $J_Q \cdot X_Q$ 表示传热过程; $J_m \cdot X_m$ 表示传质过程; J_Q 表示传热过程的广义流 (kJ/s); X_Q 表示传热过程的广义力 (K^{-1}); J_m 表示传质过程的广义流 (kg/s); X_m 表示传质过程的广义力 ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)。

由孤立系统熵增原理可知, 当系统无耗散时, 系统熵产率 $\sigma = 0$; 当系统有耗散时, 系统熵产率 $\sigma > 0$ 。根据式(2)可得到 3 种情况:

① $J_Q \cdot X_Q > 0, J_m \cdot X_m > 0$, 即传热过程和传质过程均为熵产率大于零过程;

② $J_Q \cdot X_Q < 0, J_m \cdot X_m > 0$, 即传热过程为熵产率小于零过程, 传质过程为熵产率大于零过程;

③ $J_Q \cdot X_Q > 0, J_m \cdot X_m < 0$, 即传热过程为熵产率大于零过程, 传质过程为熵产率小于零过程。

第 1 种情况满足场协同理论, 当传热过程和传质过程的广义力与广义流均为同相位, 即传热和传质过程相互促进; 第 2 种和第 3 种情况满足热力学耦合理论, 当传热过程和传质过程中有一个过程的广义力与广义流为反相位, 即熵产率大于零的传热(传质)过程驱动熵产率小于零的传质(传热)过程。文献^[11]中表明, 在一个孤立系统中, 熵产率大于零的自发过程可以驱动熵产率小于零的非自发过程, 这就是孤立系统的热力学耦合。

2 换热器中相变过程的热力学耦合

工质在换热器(冷凝器、蒸发器)中发生气液相

变换热过程, 其中在冷凝器中发生气-液相变过程, 相变放出热量; 在蒸发器中发生液-气相变过程, 相变吸收热量, 两者互为逆过程。

冷凝器内制冷剂气体凝结成制冷剂液体放出热量, 蒸发器内液态制冷剂吸收热量变成气态制冷剂。冷凝器/蒸发器中的气液相变换热过程, 包含相变放出/吸收热量的传热过程和气、液两相间制冷剂流动的传质过程。

冷凝器/蒸发器的气液相变过程中, 传热过程是在温差梯度的驱动下发生的, 传质过程是在化学势梯度的驱动下发生的。设冷凝器/蒸发器为孤立系统, 则系统内的熵产率方程^[12]为

$$\sigma = J_Q \cdot \nabla\left(\frac{1}{T}\right) + J_m \cdot \nabla\left(-\frac{\mu}{T}\right) \geq 0, \quad (3)$$

其中: $J_Q \cdot \nabla\left(\frac{1}{T}\right)$ 表示传热过程; $J_m \cdot \nabla\left(-\frac{\mu}{T}\right)$ 表示传质过程; T 表示温度 (K); μ 表示化学势 (kJ/kg); $\nabla\left(\frac{1}{T}\right)$ 表示传热过程的广义力 (K^{-1}); $\nabla\left(-\frac{\mu}{T}\right)$ 表示传质过程的广义力 ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)。

2.1 冷凝器中气-液相变过程

冷凝器中气-液相变的传热过程和传质过程示意图如图 1 所示。在冷凝器中, 气态制冷剂发生气-液相变向冷却物质放出热量, 取气态制冷剂为高温热源, 冷却物质为低温热源。如图 1(a)所示, 传热过程的广义力与广义流为同相位, 可判断其为熵产大于零的自发过程。而对于传质过程, 即气态制冷剂变成液态制冷剂过程, 从图 1(b)中可以看出, 两相间存在化学势差(广义力), 但广义流与广义力为反相位, 故传质过程是一个熵产小于零的非自发过程。

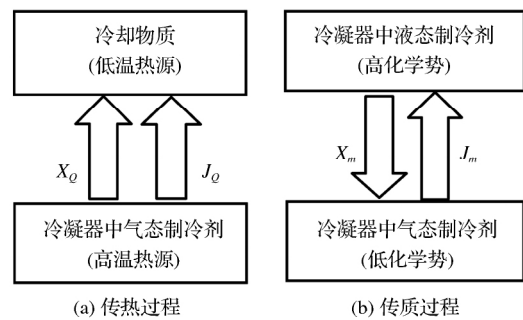


图 1 冷凝器中气-液相变的传热、传质过程

Fig.1 The heat transfer process and mass transfer process in gas-liquid phase transition in condenser

对只存在传热过程和传质过程的冷凝器系统, 2

个热力学过程的熵产率之和需大于零,即满足孤立系统熵增原理,故系统内可以存在熵产率小于零的传质过程。而熵产率小于零的过程为非自发过程,显然与之同时发生的还有一个自发过程,按照热力学耦合原理:自发传热过程可以驱动非自发传质过程的发生,即在气-液相变放出的热量向低温物质传热的过程中,驱动了气态制冷剂变成液态制冷剂的传质过程。

2.2 蒸发器中液-气相变过程

蒸发器中液-气相变的传热过程和传质过程示意图如图2所示。在蒸发器中,液态制冷剂发生液-气相变,它需要从低温环境中吸收热量,取液态制冷剂为高温热源,低温环境为低温热源,如图2(a)所示,传热过程的温差梯度方向与热流方向相反,即广义力与广义流为反相位,可判断传热过程为熵产小于零的非自发过程。而液态制冷剂变成气态制冷剂的传质过程中,从图2(b)中得到化学势差方向和质量流方向一致,即广义流与广义力同相,故传质过程是一个熵产大于零的自发过程。

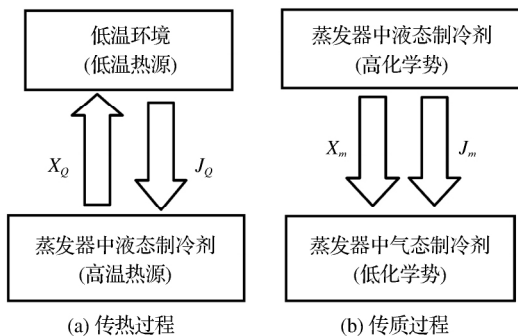


图2 蒸发器中液-气相变的传热、传质过程

Fig.2 The heat transfer process and mass transfer process in gas-liquid phase transition in evaporator

与冷凝器一样,蒸发器中传热过程和传质过程的熵产率之和大于零,即满足孤立系统熵增原理,从而熵产率小于零的传热过程可以发生。由于与非自发的传热过程同时发生的还有一个自发的传质过程,用热力学耦合解释为:自发传质过程可以驱动非自发传热过程的发生,即在气态制冷剂变成液态制冷剂的流动传质过程中,驱动了从低温环境中吸收热量的传热过程。

3 结论

(1) 换热器中气-液相变过程包括化学势梯度驱

动下的传质过程和温度梯度驱动下的传热过程,二者的相互作用机制符合能量转换的热力学耦合机制。

(2) 冷凝器中发生气-液相变过程,包含熵产率大于零的自发传热过程和熵产率小于零的非自发传质过程,熵产率大于零的相变放热过程驱动了熵产率小于零的制冷剂流动传质过程。

(3) 蒸发器中发生液-气相变过程,包含熵产率小于零的非自发传热过程和熵产率大于零的自发传质过程,熵产率大于零的制冷剂流动传质过程驱动了熵产率小于零的相变吸热过程。

参考文献:

- [1] 沈超,余鹏,张东伟,等.平行流热管换热器传热传质特性的数值模拟研究[J].工程热物理学报,2017,38(6):1309-1312.
- [2] Chomaz P, Duflot V, Gulminelli F. Caloric Curves and Energy Fluctuations in the Microcanonical Liquid-gas Phase Transition[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(17): 3587.
- [3] Xia G, Wang W, Cheng L, et al. Visualization Study on the Instabilities of Phase-change Heat Transfer in a Flat Two-phase Closed Thermosyphon [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116(Complete): 392-405.
- [4] Delbaen F, Schachermayer W. A General Version of the Fundamental Theorem of Asset Pricing [J]. Mathematische Annalen, 1994, 300(1): 463-520.
- [5] Xu X, Liu J, Cao L, et al. Local Composition Shift of Mixed Working Fluid in Gas-liquid Flow with Phase Transition [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 39(4): 179-187.
- [6] Levine I N. Physical Chemistry [M]. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [7] Mortimer R G. Physical Chemistry [M]. Boston: Elsevier Science, 2008.
- [8] Heer J D. Thermodynamics, an Advanced Treatment for Chemists and Physicists. Third edition (Guggenheim, E. A.) [M]. New York: Division of Chemical Education, 2009.
- [9] 卢小平,俞树荣,郭丹丹.从场协同到热力学耦合:流动换热强化的热力学机制[J].机械工程学报,2015,51(10):160-163, 171.
- [10] 卢小平,俞树荣,余建平.流动换热强化的能量传递转换机制及其最小熵产原理[J].化工学报,2014,65(增刊1):336-339.
- [11] 卢小平,郭丹丹,俞树荣.热力学耦合的相位描述及其最小耗散原理[J].甘肃科学学报,2015,27(1):15-17.
- [12] 卢小平,俞树荣,何爱玲,等.热传递及转换的热力学耦合模式及广义 Carnot 定理[C]//中国工程热物理学会-工程热力学与能源利用,2013.

Study on the Thermodynamic Coupling in the Gas-liquid Phase Transition Process in Heat Exchanger

You Tian

(College of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract There is a gas-liquid phase transition in the heat exchanger of refrigeration system. In order to detect the interaction mechanism between the heat transfer process and the mass transfer process in the process of gas-liquid phase transition, this paper introduced the three kinds of thermodynamic coupling in the isolated system, and further studied the gas-liquid transition process in heat exchanger by using the thermodynamic coupling in the isolation system. The results showed that the interaction mechanism between the heat transfer process and the mass transfer process in the process of gas-liquid phase transition conformed to the thermodynamics coupling mechanism of energy conversion, that is, the spontaneous process with entropy production rate greater than zero can drive the non-spontaneous process with entropy production rate less than zero.

Key words Gas-liquid phase transition; Isolated system; Principle of entropy increase; Chemical potency; Thermodynamic coupling

(本文责编:葛 文)

.....
(上接第 45 页)

symptoms were evaluated by quality of life rating scale (MENQOL) and self-rating anxiety scale (SAS), and clinical efficacy was evaluated by Kupperman score (KI score). The results show that after treatment, the level of FSH in the two groups was lower and E2 was higher, and the difference was statistically significant in the non-hormone group ($P < 0.05$). After treatment, there was no statistically significant difference in bone mineral density of lumbar spine (L2~L4) between the two groups and in femoral neck bone mineral density of the hormonal treatment group ($P > 0.05$), while the bone mineral density of femoral neck in the non-hormonal group was higher than that before treatment and of hormone group ($P < 0.05$). After treatment, KI score, SAS score and MENQOL score in the two groups all decreased, especially in the non-hormone group ($P < 0.05$). The total clinical effective rate of the non-hormonal group and the hormonal group was 94.0% and 70.0%, respectively, and the difference was statistically significant ($P < 0.05$). The incidence of adverse reactions in the non-hormonal group and the hormonal group was 10.0% and 12.0%, respectively, with no statistically significant difference ($P > 0.05$). Therefore the effect of kantai capsule on the improvement of perimenopausal symptoms and hormone levels caused by GnRH-a was better than that of tibolone.

Key words Kantai capsule; Tibolone; GnRH-a; Perimenopausal syndrome

(本文责编:冯 婷)