

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2021.06.010

基于火积理论的级间导热二级相变蓄热装置优化

朱 晔¹, 朱梦冰², 汪 城³, 李进龙¹, 陶 磊³, 黄维秋³

(1. 常州大学 石油化工学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州大学 材料科学与工程学院, 江苏 常州 213164;
3. 常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要:相变蓄热是一种有效的热量储存方式, 二级相变蓄热装置性能优于单级装置。级间导热是蓄热装置性能的影响因素之一, 但在之前的研究中常被忽略。基于火积理论, 对考虑级间导热的二级相变蓄热装置进行了优化分析, 给出了蓄热材料的相变温度匹配准则式。和无级间导热的结果相比, 入口段的相变温度降低, 出口段提高。由于级间导热的存在, 二级相变蓄热装置相对于单级装置的性能优势被减弱。设备传热单元数 NTU 较小时, 相变温度匹配受到的影响较大。因此, 在设计二级相变蓄热装置时, 需考虑级间导热的影响, 优化选取相变材料。但无需过度强调级间隔热的设计需求, 尤其是在设备传热单元数 NTU 较少时。结果可用于对二级蓄热装置的合理设计和性能优化, 也为多级装置优化研究提供参考。

关键词:火积; 相变蓄热装置; 优化; 二级; 级间导热

中图分类号:TK 02

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2021)06-0062-08

Entransy Analysis on Double-Stage LHS Unit with the Consideration of Heat Leakage Between Portions

ZHU Ye¹, ZHU Mengbing², WANG Cheng³, LI Jinlong¹, TAO Lei³, HUANG Weiqiu³

(1. School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;
2. School of Materials Science & Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;
3. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Latent Heat Storage(LHS) is an effective way to store thermal energy, of which double-stage LHS unit is more beneficial than single-stage unit. Heat conduction between stages is one factor influencing on performance of LHS. However, it is always neglected or over-highlighted in references. Based on entransy theory, analysis on double-stage LHS unit is conducted, with the consideration of heat leakage between portions. The criterion formulas of optimum melting temperature match is de-

收稿日期:2021-06-01。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51306023)。

作者简介:朱晔(1984—), 女, 江苏靖江人, 硕士, 实验师。通信联系人: 汪城(1984—), E-mail: wangcheng3756@163.com

引用本文:朱晔, 朱梦冰, 汪城, 等. 基于火积理论的级间导热二级相变蓄热装置优化[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 62-69.

rived. It is concluded that melting temperature of Phase Change Materials(PCMs) in inlet portion increases, while that in outlet portion decreases, comparing with those in the case without consideration of heat leakage. The difference between two PCMs melting temperatures is narrowed, which implies that performance improvement by double-stage design may diminish, due to the existence of heat leakage. The effects of heat leakage on optimum melting temperature match is more significant, when number of transfer units(NTU) is at small value. However, it is also found that augment degree of entransy dissipation is not so much. Therefore, it is necessary to take into account the existence of heat leakage between portions in double-stage LHS unit, and respectively to re-construct with melting temperature match. However, it is not necessary to over-estimate the effect of heat leakage on performance deterioration, especially when NTU is at small value, because perfect heat insulation does not give much benefits on performance improvement. Results are helpful for reasonable design and performance optimization of double-stage LHS unit and are important reference to the optimization of multi-stage LHS unit under investigation.

Key words: entransy; latent heat storage(LHS) unit; optimization; double-stage; heat leakage

由于化石资源消耗的不可再生和环境污染等问题,开发清洁能源受到了越来越多的关注,如太阳能的利用和船舶发动机等动力设备的余热资源回收^[1-2]。但是,这些资源常具有季节性或间歇性特征,为保证用能场合的持续供给,需要对热量进行储存和管理。

相变储热(LHS)是一种有效的热量储存方式^[3-6]。利用介质在相变过程中的吸/放热特性,可以将热量储存在吸热相变过程中,而在放热相变过程中对用能场合供热^[7-9]。同时,由于相变过程有很好的恒温特性,类比于显热装置中的介质具有非常大的比热容,可以有效提高装置的储热密度。基于梯级利用和温差均匀性原则,采用多级(Multi-stage)或复叠(Cascaded)设计,可减小热量转移过程中的传热温差或增加传热量,改善相变蓄热装置性能^[10-12]。

二级 LHS 装置是最简单的一种多级设计。如图 1 所示,它是将单级 LHS 装置的换热面积沿换热流体(Heat Transfer Fluid,HTF)的流动方向等分为入口段和出口段两部分^[13],在两部分中填充相变材料(Phase Change Materials,PCMs)。若两种材料的相变温度相一致,二级 LHS 装置即转化为单级装置。

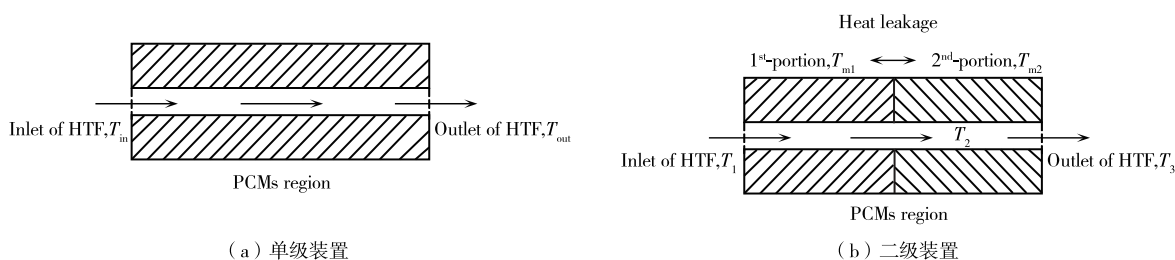


图 1 单级和二级 LHS 装置示意图

Fig.1 Depict of single- and double-stage LHS units

衡量 LHS 装置性能的指标有热量表征、火用或熵表征和火积表征^[14-17],其中热量表征仅描述能量的量值转移过程,忽略了能量品位的差别;火用或熵表征考虑了能量品位的差别,但该差别基于热功转化能力的评判;火积表征基于热量传递能力的评判,适用于无热功转化场合,因此,更适用于 LHS 装置的热力学评价和性能优化。

火积理论是 GUO 等^[17]基于热电比拟提出的一种传热过程优化的热力学方法。火积在热量传递过程中,始终处于耗散状态^[18-20]。在传热过程中,火积优化即意味着在一定的热量传递量条件下的传热温差降低,或一定传热温差条件下的传热量增大。基于火积分析,TAO 等^[21]分别对蓄热量限定和火积耗散限定条件下的二级相变蓄热装置进行了热力学优化,并给出了相应的相变温度匹配准则。XU 等^[10]和 WANG 等^[22]进一步对多级相变蓄热装置进行了火积分析,并导出了相应的相变温度匹配准则表达式。

但是,在文献中多假设相变装置的各级间有极好的热绝缘,即不存在级间导热,从而忽略级间导热的影响。然而,在实际设计和操作过程中,级间材料的导热系数不为零,因此在不同相变温度的相邻两级之间必然存在一定的导热,该级间导热将对装置的结构设计及性能优化产生影响。此外,针对具体的蓄热装置,进一步增加级间分隔材料的厚度或选用更低导热系数的分隔材料,对装置性能是否有所改善,在未考虑级间导热条件下的相变温度匹配优化准则中,无法给出解答。

本文针对二级相变蓄热(LHS)装置在蓄热过程中的火积耗散进行优化,考虑级间导热的影响,通过合理匹配相变温度,在换热流体(HTF)进出口温度、蓄热量一定的条件下,减小装置的火积耗散。

1 二级 LHS 装置的传热及火积耗散

如图 1 所示,在二级 LHS 装置的蓄热过程中,高温换热流体从装置一侧流入,首先和入口段的相变材料进行热量交换,然后和出口段的相变材料进行热量交换,最后从装置的另一侧流出。在该过程中,入口段和出口段的相变材料吸收热量,发生相变。由于换热流体在流动过程中,温度逐渐降低,因此 LHS 装置的入口段相变温度应高于出口段。

为简化问题研究,并给出相变温度匹配准则,做如下假设:①在蓄热过程中,相变材料维持相变温度不变;②换热流体的入口温度、质量流量恒定;③换热流体和相变材料的传热系数、换热流体的热物性参数取为常数;④忽略装置和环境之间的漏热。

1.1 热量传递

依据假设,二级 LHS 装置的热量传递即为两个恒温壁面的稳态对流传热过程的组合,具体为:

$$\begin{cases} Q = \sum_{i=1}^2 Q_i \\ Q_i = \frac{c-1}{c} \cdot m \cdot C_p \cdot (T_i - T_{mi}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} T_2 = \frac{T_1 + (c-1) \cdot T_{m1}}{c} \\ c = \exp\left(\frac{h \cdot A_i}{\dot{m} \cdot C_p}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_1 和 T_2 分别为入口段和出口段的 HTF 入流温度; c 为换热常数。

在相变蓄热装置由单级转变为二级设计时,维持总换热面积 A 恒定,入口段和出口段等分,由此为

$$c_0 = \exp\left(\frac{h \cdot A_0}{\dot{m} \cdot C_p}\right) = \exp\left[\frac{h \cdot \sum_{i=1}^2 A_i}{\dot{m} \cdot C_p}\right] = c^2 \quad (3)$$

在运行过程中,由于相变材料较多,级间导热不导致高温侧的凝结。此外,由式(1)可知,虽然入口段和出口段之间存在级间导热,但这属于装置内部的热量传递。因此,装置的总传热量并不受级间导热

的影响。同时,由于相变材料维持恒定温度,所以,级间导热的存在对于入口段和出口段的相变材料与换热流体之间的传热也不产生影响。

1.2 火积耗散

在换热流体流动通过蓄热装置的过程中,由于温差的存在导致热量传递,因此存在火积耗散。装置的总火积耗散为入口段和出口段的火积耗散之和,如下式

$$\begin{cases} \dot{\phi} = \sum_{i=1}^2 \dot{\phi}_i \\ \dot{\phi}_i = \frac{c^2 - 1}{c^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_i - T_{mi})^2 - k \cdot (T_{mi-1} - T_{mi}) \cdot T_{mi} + k \cdot (T_{mi} - T_{mi+1}) \cdot T_{mi} \end{cases} \quad (4)$$

式中 k 为级间导热常数,和级间分隔材料的导热系数、截面积及厚度相关,随导热系数和截面积的增大而增加,随厚度的增大而减小。

和热量传递所不同,装置的总火积耗散受到级间导热存在的影响。由式(4)可知,在相变温度匹配不变的条件下,总火积耗散随级间导热系数的增大而增加。

2 二级 LHS 装置的优化

为比较不同相变温度匹配条件下的火积耗散差异,限定蓄热装置的蓄热量 Q 恒定为 Θ 。二级 LHS 装置优化即在蓄热量确定的条件下,通过匹配相变温度,使装置的火积耗散最小。定义拉格朗日因子 λ ,装置优化转变为约束条件下的线性规划,即求解方程(5)的极值。

$$\begin{cases} F = \dot{\phi} + \lambda \cdot (Q - \Theta) \\ \frac{\partial F}{\partial T_{m1}} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial T_{m2}} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = Q - \Theta = 0 \end{cases} \quad (5)$$

3 结果与讨论

求解方程(5),即可获得最优二级 LHS 装置的最优相变温度匹配准则

$$\begin{cases} T_{m1} = T_1 - \left[\frac{c}{c-1} + \frac{\frac{k}{\dot{m} \cdot C_p}}{\frac{c+1}{c} \cdot \frac{k}{\dot{m} \cdot C_p} + \frac{c-1}{c}} \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Theta}{\dot{m} \cdot C_p} \\ T_{m2} = T_1 - \left[\frac{c}{c-1} + \frac{\frac{k}{\dot{m} \cdot C_p} + \frac{c-1}{c}}{\frac{c+1}{c} \cdot \frac{k}{\dot{m} \cdot C_p} + \frac{c-1}{c}} \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Theta}{\dot{m} \cdot C_p} \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4),二级 LHS 装置在限定蓄热量条件下的最小火积耗散为

$$\dot{\phi} = \left[\frac{c+1}{c-1} \cdot \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot C_p \cdot \left[\left(1 + \frac{\frac{k}{\dot{m} \cdot C_p}}{\frac{c+1}{c-1} \cdot \frac{k}{\dot{m} \cdot C_p} + 1} \right)^2 + \frac{1}{c^2} \cdot \left(1 + \frac{c-1 + \frac{k}{\dot{m} \cdot C_p}}{\frac{c+1}{c-1} \cdot \frac{k}{\dot{m} \cdot C_p} + 1} \right)^2 \right] + k \cdot \left(\frac{1}{\frac{c+1}{c-1} \cdot \frac{k}{\dot{m} \cdot C_p} + 1} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Theta}{\dot{m} \cdot C_p} \right)^2 \quad (7)$$

对上述最优二级 LHS 装置的相变温度匹配和火积耗散进行无量纲化处理:

$$\begin{cases} \bar{T}_{m1} = \frac{T_{m1}}{T_1} = 1 - \left[\frac{c}{c-1} + \frac{\frac{k}{\dot{m} \cdot C_p}}{\frac{c+1}{c} \cdot \frac{k}{\dot{m} \cdot C_p} + \frac{c-1}{c}} \right] \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Theta}{\dot{m} \cdot C_p \cdot T_1} \right) \\ \bar{T}_{m2} = \frac{T_{m2}}{T_1} = 1 - \left[\frac{c}{c-1} + \frac{\frac{k}{\dot{m} \cdot C_p} + \frac{c-1}{c}}{\frac{c+1}{c} \cdot \frac{k}{\dot{m} \cdot C_p} + \frac{c-1}{c}} \right] \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Theta}{\dot{m} \cdot C_p \cdot T_1} \right) \end{cases} \quad (8)$$

$$\bar{\phi} = \frac{\dot{\phi}}{\frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot C_p \cdot T_1^2} =$$

$$\left[\frac{c+1}{c-1} \cdot \left[\left(1 + \frac{\frac{k}{\dot{m} \cdot C_p}}{\frac{c+1}{c-1} \cdot \frac{k}{\dot{m} \cdot C_p} + 1} \right)^2 + \frac{1}{c^2} \cdot \left(1 + \frac{c-1 + \frac{k}{\dot{m} \cdot C_p}}{\frac{c+1}{c-1} \cdot \frac{k}{\dot{m} \cdot C_p} + 1} \right)^2 \right] + 2 \cdot \frac{k}{\dot{m} \cdot C_p} \cdot \left(\frac{1}{\frac{c+1}{c-1} \cdot \frac{k}{\dot{m} \cdot C_p} + 1} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Theta}{\dot{m} \cdot C_p \cdot T_1} \right)^2 \quad (9)$$

式中: $\frac{\Theta}{\dot{m} \cdot C_p \cdot T_1}$ 表示蓄热量 Θ 和换热流体入流内能 $\dot{m} \cdot C_p \cdot T_1$ 的比值; $\frac{k}{\dot{m} \cdot C_p}$ 表示级间导热常数 k 和换热流体热容 $\dot{m} \cdot C_p$ 的比值。

显然,若限定级间导热系数 k 为 0,最优相变温度匹配准则和文献中的结果相吻合,得

$$\begin{cases} \bar{T}_{m1} |_{k=0} = 1 - \left(\frac{c}{c-1} \right) \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Theta}{\dot{m} \cdot C_p \cdot T_1} \right) \\ \bar{T}_{m2} |_{k=0} = 1 - \left(\frac{2 \cdot c - 1}{c-1} \right) \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Theta}{\dot{m} \cdot C_p \cdot T_1} \right) \end{cases} \quad (10)$$

图 2 给出了不同相变温度匹配条件下的二级 LHS 装置的火积耗散。由图可知,二级 LHS 装置的火积耗散随相变温度呈 U 型变化。当 $\frac{k}{\dot{m} \cdot C_p}$ 取值 0.01,采用最优相变温度匹配,即归一化相变温度 \bar{T}_{m1} 和 \bar{T}_{m2} 分别取 0.924 和 0.875 时,归一化火积耗散 $\bar{\phi}$ 最小,为 0.01,这表明准则公式(6)和式(7)正确。和非最优相变温度匹配相比,如 \bar{T}_{m1} 和 \bar{T}_{m2} 分别取 0.97 和 0.86,最优匹配的装置火积耗散减少了约 27%。考虑到单级 LHS 装置的无量纲化火积耗散 $\bar{\phi}$ 约为 0.012 5,最优二级装置的火积耗散小于单级装置;而未优化相变温度匹配的二级装置则可能出现火积耗散大于单级装置的情况。

3.1 级间导热对相变温度匹配的影响

图3给出了 $c=4$ 时,级间导热对相变温度匹配的影响。由图可知,随着级间导热常数 k 的增大,入口段相变温度 T_{m1} 降低,出口段相变温度 T_{m2} 升高。入口段相变温度受到的影响比出口段显著。同时,随着蓄热量的增加,级间导热对相变温度匹配的影响更明显。这表明,蓄热量越大,级间导热增大时,最优二级LHS装置相较于单级的优势越弱,即越趋同于单级LHS装置。此外,图3所示的流体入口温度 T_1 取值673 K,若 T_1 取值更高,最优相变温度受级间导热的影响将变化更大。

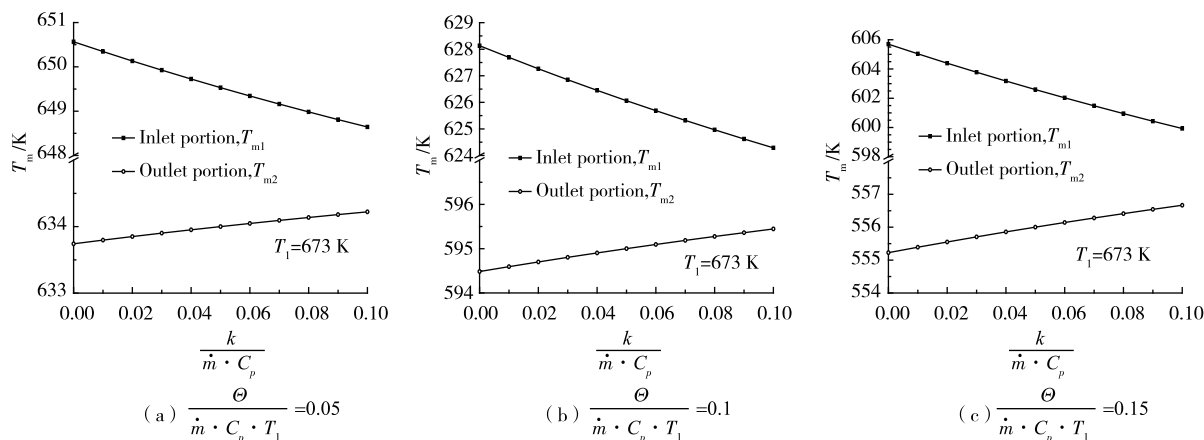


图3 级间导热对相变温度匹配的影响($c=4$)

Fig.3 Effects of heat leakage between portions on melting temperature match ($c=4$)

图4给出了不同 c 条件下,级间导热对相变温度匹配的影响。由图4可知,入口段和出口段的相变温度随 c 的增加而增大。两段相变温度的差值在 c 较小时,受级间导热的影响更显著。当 $\frac{k}{m \cdot C_p}$ 由0增大到0.1时, $c=2$ 的二级LHS装置两段相变温差将由33.7℃减少为约26℃;而 $c=6$ 的二级装置的温

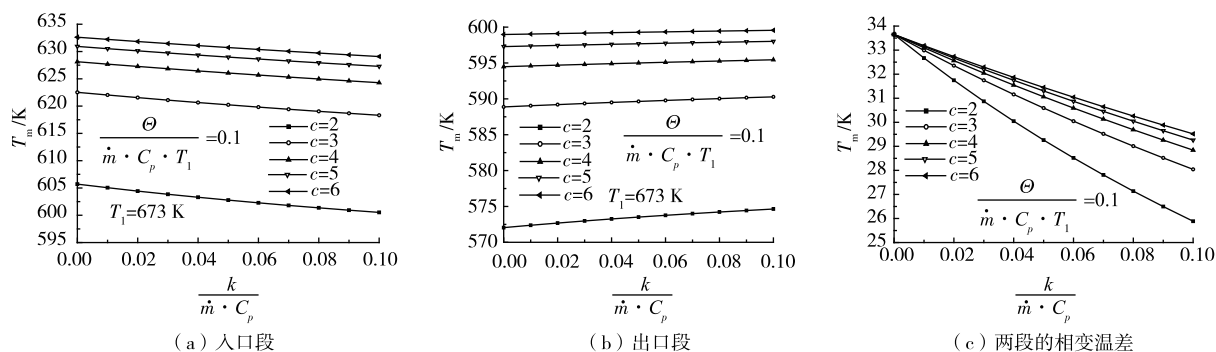


图4 不同 c 条件下的级间导热的影响

Fig.4 Effects of heat leakage between portions under different c values

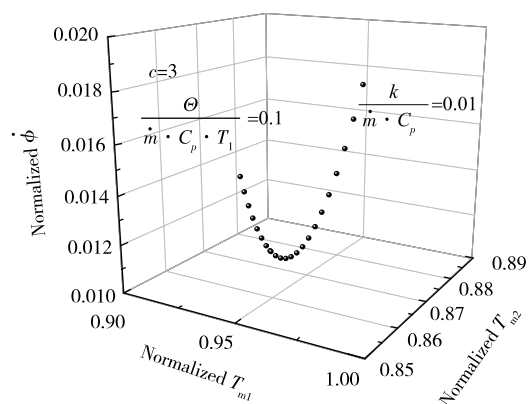


图2 不同相变温度匹配条件下的二级LHS装置火积耗散

Fig.2 Entransy dissipation of double-stage LHS unit with different melting temperature match

差则仅降至 29.5 °C。同时,由图 4(c)可知,随着 c 的增大,相变温差随级间导热的变化受 c 的影响减弱。

由式(6)可知,若 c 取值为无限大, $\frac{k}{\dot{m} \cdot C_p} = 0.1$ 时的两段相变温差为 30.6 °C,和 $c=6$ 时仅相差约 1 °C。

3.2 级间导热对火积耗散的影响

图 5 为二级 LHS 装置的最优火积耗散随级间导热的变化。由图 5(a)可知,伴随着级间导热常数的增加,最优相变温度匹配的二级 LHS 装置火积耗散增大。这表明需要考虑级间导热对二级 LHS 装置性能的影响。但是,从图 5(b)可以看出,级间导热存在对火积耗散相对变化量的影响,在 c 较小时较小,受 $\frac{k}{\dot{m} \cdot C_p}$ 影响的变化量也较小。和无级间导热的二级 LHS 装置相比,当 $\frac{k}{\dot{m} \cdot C_p}$ 取值 0.1 时, $c=2$ 的火积耗散仅增加约 2.5%, $c=6$ 的火积耗散增加约 6.5%。

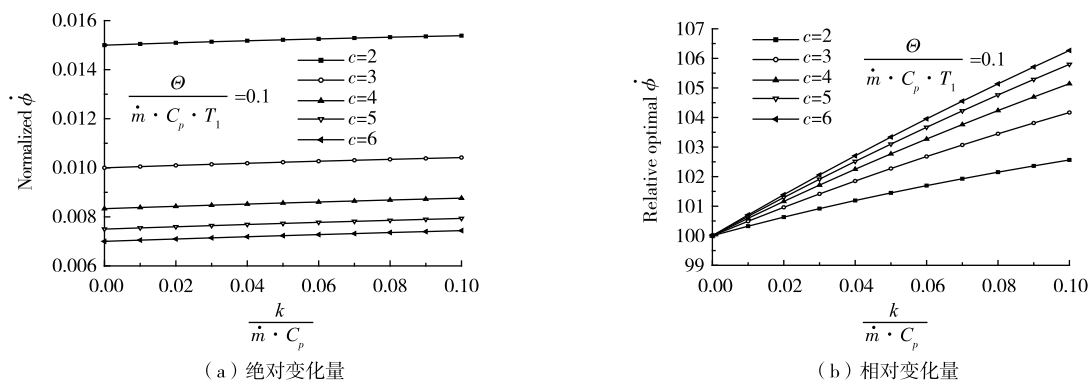


图 5 最优火积耗散随级间导热的变化

Fig.5 Variation of optimal entransy dissipation with heat leakage between portions

图 6 给出了二级 LHS 装置在考虑和不考虑级间导热两种相变温度匹配条件下的火积耗散。由图 6 可知,当级间导热存在时,若仍采用未考虑级间导热条件下的最优相变温度匹配准则,如式(10)所示,二级 LHS 装置的火积耗散将不是最优的。和考虑级间导热条件下的最优相变温度匹配准则,如式(6)所示,所对应的最优火积耗散相比,两者间的差别随 $\frac{k}{\dot{m} \cdot C_p}$ 的增大而增加。

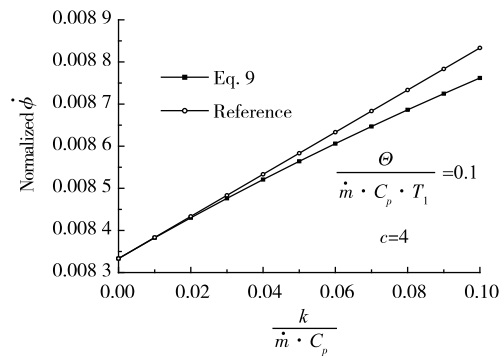


图 6 两种相变温度匹配条件下的二级 LHS 装置火积耗散

Fig.6 Entransy dissipation of double-stage LHS unit under two melting temperature match

4 结 论

基于火积理论,对考虑级间导热的二级相变蓄热装置进行了优化分析,给出了相变温度匹配准则公式。结果表明级间导热的存在,使最优相变温度匹配在入口段降低,出口段升高。装置较小时,相变温度匹配受级间导热的影响更显著。伴随级间导热的增大,最优装置的火积耗散增加。未优化的火积耗散可能大于单级。因此,需要进行相变温度优化匹配,并考虑级间导热带来的优化结果差异。

在所讨论参数范围内,级间导热对火积耗散优化的影响较小,约 5%~10%。因此,无需过度强调级间分隔材料的低导热系数,小截面积和大厚度,避免设计困难和成本增加。结果可用于二级蓄热装置的合理设计和性能优化,也为多级装置优化研究提供了参考。

参考文献:

- [1] LI T X, WANG R Z, KIPLAGAT J K, et al. Experimental study and comparison of thermochemical resorption refrigeration cycle and adsorption refrigeration cycle[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(14): 4222-4230.
- [2] WANG C, ZHANG P, WANG R Z. Performance of solid-gas reaction heat transformer system with gas valve control [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(10): 2910-2920.
- [3] AVCI M, YAZICI M Y. Experimental study of thermal energy storage characteristics of a paraffin in a horizontal tube-in-shell storage unit[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 73: 271-277.
- [4] REGIN A F, SOLANKI S C, SAINI J S. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review[J]. Renewable Sustainable Energy Review, 2008, 12(9): 2438-2458.
- [5] 章学来, 于树轩, 林原培, 等. 相变蓄热冷凝热回收实验研究[J]. 化工学报, 2010, 61(s2): 43-48.
- [6] 徐治国, 赵长颖, 纪育楠, 等. 中低温相变蓄热的研究进展[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(3): 179-190.
- [7] NOMURA T, ZHU C Y, SHENG N, et al. Shape-stabilized phase change composite by impregnation of octadecane into mesoporous SiO_2 [J]. Solar Energy Material and Solar Cells, 2015, 143: 424-429.
- [8] 康亚盟, 刁彦华, 赵耀华, 等. 纳米复合相变蓄热材料的制备与特性[J]. 化工学报, 2016, 67(s1): 372-378.
- [9] 吴志根, 赵长颖, 顾清之. 多孔介质在高温相变蓄热中的强化换热[J]. 化工学报, 2012, 63(s1): 119-122.
- [10] XU H J, ZHAO C Y. Thermodynamic analysis and optimization of cascaded latent heat storage system for energy efficient utilization[J]. Energy, 2015, 90: 1662-1673.
- [11] SEENIRAJ R V, NARASIMHAN N L. Performance enhancement of a solar dynamic LHTS module having both fins and multiple PCMs[J]. Solar Energy, 2008, 82(6): 535-542.
- [12] ZHANG Z G, SHAO G, FANG X M. Study on paraffin/expanded graphite composite phase change thermal energy storage material[J]. Taiyangneng Xuebao/Acta Energetica Solaris Sinica, 2005, 26(5): 698-702.
- [13] WANG C, ZHU Y. Optimization of double-stage latent heat storage unit in whole cycle with entransy analysis[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 114: 1013-1024.
- [14] LI G. Energy and exergy performance assessments for latent heat thermal energy storage system[J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2015, 51: 926-954.
- [15] ETGHANI M M, BABOLI S A H. Numerical investigation and optimization of heat transfer and exergy loss in shell and helical tube heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 121: 294-301.
- [16] BEJAN A. Entropy generation minimization[M]. Boca Raton: CRC, 1996.
- [17] GUO Z Y, ZHU H Y, LIANG X G. Entransy—a physical quantity describing heat transfer ability[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(13/14): 2545-2556.
- [18] CHEN Q, WU J, REN J X. Thermodynamic optimization and heat transfer optimization for convective heat transfer [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(2): 271-274.
- [19] 陶于冰, 何雅玲, 刘永坤. 火积耗散原理在相变储热过程优化中的应用[J]. 工程热物理学报, 2014, 5: 973-977.
- [20] FENG H J, CHEN L G, XIE Z H, et al. Constructal entransy dissipation rate minimization for triangular heat trees at micro and nanoscales[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 84: 848-855.
- [21] TAO Y B, HE Y L, LIU Y K, et al. Performance optimization of two-stage latent heat storage unit based on entransy theory[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 77: 695-703.
- [22] WANG C, ZHU Y. Entransy analysis on boiler air pre-heater with multi-stage LHS unit[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 1139-1146.

(责任编辑:殷丽莉)