

DOI: 10.3901/JME.2013.08.165

移动蓄热系统蓄热器的加肋强化换热试验研究^{*}

李 汛 杨 波 赵 军 郭少朋

(天津大学中低温热能高效利用教育部重点实验室 天津 300072)

摘要: 为解决工业废热与分布用户的地域差异,设计以赤藻糖醇为相变材料的移动蓄热系统,所用双直肋式翅片管不仅增大换热面积,并且在蓄热熔化和放热凝固过程中加大自然对流扰动区域,起到了强化换热作用。通过试验研究其充放热特点和效率,并分析传热介质流量对充放热过程的影响。试验结果表明,蓄热相变过程,材料温度变化不大;释热过程,蓄热器具有一定的冷却速度,使得赤藻糖醇凝固过程表现出过冷现象;传热介质流量对充放热过程影响不明显。在所设定试验工况下充热需 210 min,放热需 120 min,在用户侧能将 0.115 m^3 的水从 10°C 加热到 55°C ,热回收效率达 84%。直肋翅片管相变蓄热装置具有良好的蓄、放热性能,为移动蓄热车在工业废热利用等领域的工程应用提供了可能。

关键词: 相变材料 直肋片 蓄热 释热

中图分类号: TK2

Experimental Study on Heat Transfer Enhancement of Heat Exchanger in Indirect Mobilized Thermal Energy Storage System with Fins

LI Xun YANG Bo ZHAO Jun GUO Shaopeng

(Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy of Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: To recover waste heat for the distributed users, an indirect mobilized thermal energy storage(M-TES) system is designed incorporating a medium temperature phase change material(PCM) erythritol. Because the low thermal conductivity of the PCM, the copper tube that with double straight fins is chosen to help enhance the heat exchange. The thermal characteristics in the system are analyzed using temperature time curves. The investigation shows that the temperature of the PCM rises rapidly in the solid sensible heat stage in the heat storage process, but there is almost no temperature change in the latent heat stage. The natural convection can make the PCM melt faster. The melt process of the PCM takes 210 min. The temperature of the heat source has influence on the charging time and the temperature gradient of the PCM. In the heat release process, the PCM shows sub-cooling phenomenon. The investigation also shows that 16 790 kJ of heat is released in the initial 120 min of discharging process that accounts for 84 % of heat capacity of the M-TES container, which can heats 0.115 m^3 of water from 10°C up to 55°C . The system shows a good performance in energy storage process. It makes the mobile energy storage car can be truly used for recover industrial waste heat.

Key words: Phase change material Straight fins Heat storage Heat release

0 前言

能源问题以及所引起的环境问题成为人类生存的一个重大挑战。在中国,工业炉热效率比较低,有 40%~60%的热量被高温烟气、高温炉渣等带走^[1],回收废热降低能耗对我国实现节能减排、环

保发展战略具有重要的现实意义。但废热的回收与其利用之间存在时间和地域性的差异,移动式蓄热技术是有效解决这些问题的技术途径,它是缓解能量供求双方在时间、强度及地点上不匹配的有效方式,是合理利用能源及减轻环境污染的有效途径。

潜热蓄热技术^[2-4]利用材料在相变过程中吸热和放热来储存和释放能量,储能密度高,所用装置简单,体积小,而且相变过程是一个近似恒温过程。把相变材料应用到移动式蓄热车上是一项很有发展

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50906041)。20120712 收到初稿,20130105 收到修改稿

前途的技术。WANG 等^[5-7]对移动蓄热车的经济性和可用性做了分析。

赤藻糖醇^[8-9]作为一种相变材料,具有相变潜热高、几乎没有过冷现象、熔化时压力低、化学稳定性好没有相分离和腐蚀性等优点,可作为移动蓄热车的蓄热材料,但其同其他相变蓄热材料一样导热系数比较低,严重影响蓄热器的蓄热性能。许多学者对此问题做了大量研究,文献[10]设计了水平同心圆管换热器,并对比了光管、长直肋管、环肋管对蓄热的影响,发现长直肋管的效果最好。文献[11]提到用带长直肋的同心圆管蓄热器驱动 LiBr/H₂O 吸收式制冷系统,试验得到了最佳传热介质流量及温度并对蓄热器内部温度场作了分析。文献[12]设计了柱形蓄热器,并对单管及四根圆管对蓄热影响做了对比。文献[13-14]对针翅管方形蓄热器的传热特性做了试验研究。文献[9-15]均提到了蓄热材料熔化过程中会有自然对流现象出现,由于对流比纯导热换热作用强,使得充放热效率提高。

目前应用于移动蓄热车的蓄热器蓄热效率比较低,充放热时间很长,影响了其工程可应用性。本文从以上学者研究基础上,并结合移动蓄热车的应用性特点,设计了方形蓄热器,便于装卸和运输,采用安装多组双直肋铜翅片管,并在箱体底部做了加密布置,目的是在增大换热面积的同时增加垂直方向上的温度梯度,进而增加熔化过程中自然对流的扰动区域,使得蓄热车的蓄热特性得到优化,并试验研究了其充放热特性。

1 试验装置和过程

间接式移动蓄热试验系统主要由余热源、蓄热装置和用户端三部分构成,如图 1 所示。其中余热源部分由恒温油箱构成,在试验过程中来提供 140 °C 的导热油;蓄热装置为长×宽×高为 600 mm×280 mm×300 mm 的长方体,水平放置,箱体内设计了 33 根直径为 12 mm、壁厚为 1 mm、肋高为 30 mm、厚度为 0.1 mm 的双肋铜翅片管,其布置方式如图 2 所示。

在距离箱体入油口 100 mm 的纵截面 A,箱体中间纵截面 B 以及距出油口 100 mm 处的纵截面 C 三个截面处分别布置了热电偶(K 型)(图 3),其布置位置如图 2 中 T₁~T₆ 点所示;用户端部分由一个板式换热器和一个水箱组成。

为了便于观测相变材料的在试验过程中的熔化和凝固情况,在箱体顶部设置了 120 mm×200 mm

的可视化窗口。

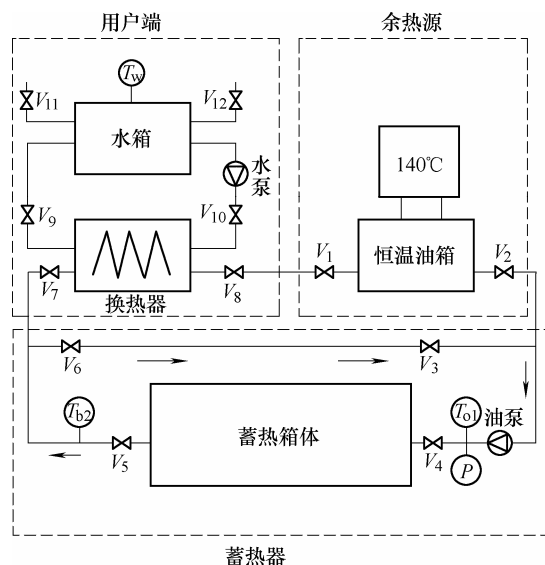


图 1 试验系统图

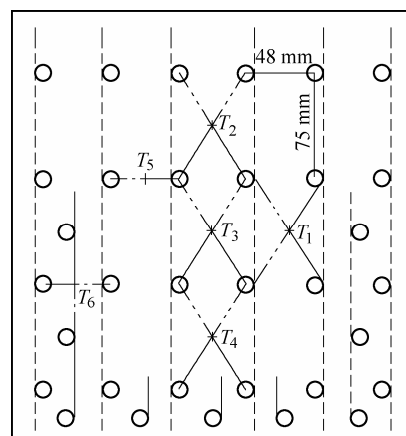


图 2 蓄热箱体内直肋翅片管以及热电偶布置示意图

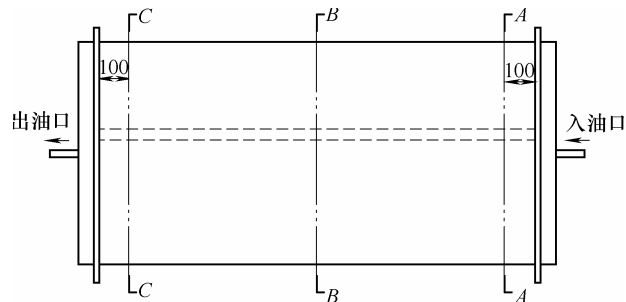


图 3 蓄热箱体示意图

1.1 相变蓄热材料的选取

试验中选用 60 kg 的赤藻糖醇(滨州三元生物科技有限公司,纯度大于 95%)作为相变蓄热材料。赤藻糖醇的热物性参数见下表。

从表中看出,赤藻糖醇作为一种相变蓄热材料相比于常见的石蜡(相变温度 16.7~58.8 °C,潜热值 172~256 kJ/kg),它的相变温度更高,相对来说能提供品质更高的热能,且它的潜热值要比石蜡大,储能密度大,是一种热性能更为优越的相变蓄热

材料。

表 赤藻糖醇的热物性表

性 质	赤藻糖醇
相变点/ $^{\circ}\text{C}$	117.7
相变潜热/(kJ/kg)	339.8
比热容/($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)	2.76(液态) 1.38(固态)
导热系数/($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	0.326 (140 $^{\circ}\text{C}$)(液态) 0.733 (20 $^{\circ}\text{C}$)(固态)
密度/(kg/m^3)	1 300 (140 $^{\circ}\text{C}$)(液态) 1 480 (20 $^{\circ}\text{C}$)(固态)

1.2 操作步骤

试验过程: 充热试验中, 阀门 v_1 、 v_2 、 v_4 、 v_5 、 v_6 打开, 导热流体从热源恒温油箱经油泵输送到蓄热箱体进行换热后回到油箱; 释热试验中, 阀门 v_3 、 v_4 、 v_5 、 v_7 、 v_8 、 v_9 、 v_{10} 打开, 有两个循环过程同时进行: 导热油流经油泵、蓄热箱体换热器的闭路循环; 水路循环为水流水箱、水泵在换热器与导热油发生热交换后回到水箱。

2 试验结果与分析

2.1 蓄热箱体不同位置的充放热规律

充热试验中, 恒温油箱可连续提供 140 $^{\circ}\text{C}$ 导热油, 在其流量 2.5 m^3/h 的工况下进行充热试验; 放热试验导热油流量为 2.5 m^3/h , 水箱装有 0.115 m^3 初始温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 的水, 水的流量 0.8 m^3/h , 分析蓄热箱体纵截面 B 的温度变化规律。

图 4 是箱体内 B 截面监测点的温度变化曲线, 从图 4 中可得到如下结论。

(1) 充热过程。从开始到充热过程进行 60 min 左右, 为固态显热蓄热段, 蓄热材料温度变化较大, 从初始温度很快升至相变温度。

(2) 潜热蓄热阶段。随着充热的进行, 蓄热材料开始进入熔化阶段, 相变材料在熔化过程中吸收大量的热量并以潜热的形式储存, 这一阶段各点温度几乎不变。赤藻糖醇完全熔化后, 继续加热, 这时液态的赤藻糖醇吸收热量温度很快升高到接近加热介质温度, 蓄热形式主要以显热蓄热为主。其中测温点 6 在两翅片中间位置, 而且左右距离两根铜管较近, 这个区域热流密度较大, 最早熔化, 温度上升很快, 其他点熔化及温度上升依次推迟。

(3) 释热阶段。释热的初期, B 截面上 T_{1B} 、 T_{2B} 、 T_{5B} 、 T_{6B} 所在区域降温曲线斜率非常大, 这是因为

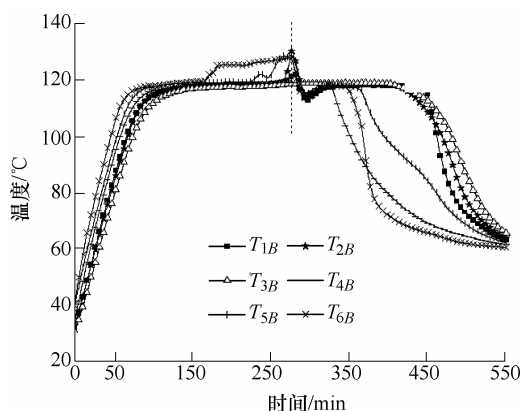


图 4 充放热过程中 B 截面 6 个测试点温度变化曲线

放热过程赤藻糖醇与导热油之温差很大, 高于相变点的液态赤藻糖醇释放液态显热。另外这几点温度首先降至 113 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 然后又回升至相变温度 117.8 $^{\circ}\text{C}$, 这表明赤藻糖醇表现出了一定过冷现象, 但过冷度不大, 约为 5 $^{\circ}\text{C}$; 而 T_{3B} 、 T_{4B} 所在区域蓄热材料蓄热过程中温度基本在相变点温度, 这些区域在释热过程中温度变化不大, 未表现出明显过冷现象。可见充热过程中相变材料储存了液态显热, 温度高于相变点的部分在放热中越易发生过冷现象。

在实际工程应用中, 移动蓄热车则主要靠相变材料的相变潜热来蓄热。从图 4 中可看出, 本蓄热器充放热时间较短, 蓄热熔化过程中蓄热器内赤藻糖醇从充热开始至完全熔化所需时间约为 210 min; 释热凝固过程中至相变材料完全凝固约需 120 min, 表明所设计的车载蓄热器具有良好的蓄热性能。蓄热材料完全凝固所需的时间比充热过程材料熔化所需时间短, 这是因为放热过程导热油与材料的温差比蓄热过程要大。

2.2 蓄热箱体内垂直方向上熔化与凝固过程分析

图 5 所示为箱体 B 截面垂直方向熔化凝固规律, T_{4B} 点在最底部, 箱体底部加密了管的布置, 其附近铜管较多, 热流密度大, 最先熔化, T_{2B} 点在最上方, 赤藻糖醇熔化过程中体积会发生膨胀, 并由于温差导致密度差会有自然对流现象的发生, 温度较高的熔化的赤藻糖醇会向顶部流动, 可使得赤藻糖醇的熔化加速。放热凝固过程中, 由于导热流体与蓄热材料间温差较大, 赤藻糖醇在铜翅片管周围会迅速凝固, 距离铜管较近的 T_{4B} 会最先凝固, 随着放热进行, 自然对流作用逐渐减弱, 主要靠导热传递热量, 由于赤藻糖醇导热系数较低, 所以距离铜管较远的 T_{2B} 、 T_{3B} 区域凝固所需时间较长。

2.3 蓄热箱体内轴向位置熔化对比

从图 6 中可以看出, 充放热过程中同一水平线三个点的温度变化曲线, T_{3A} 点(距入油口 100 mm

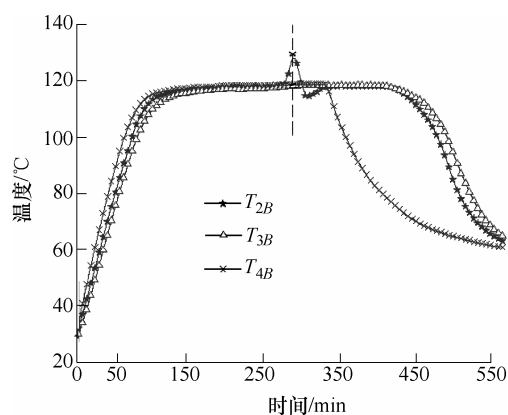


图5 充放热过程中垂直方向三个监测点温度变化曲线

的 A 截面)靠近导热流体入口侧, T_{3C} 点(距出油口 100 mm 的 C 截面)靠近出口侧, 赤藻糖醇热导率低, 热流体经过蓄热器后温度下降较小(固态显热阶段, 导热油进出口温差约 2.3 °C, 液态显热阶段, 导热油进出口温差 1.5 °C), 蓄热熔化过程中, 这两点所在区域受到铜翅片管和分油箱壁的综合加热作用, 其熔化较快, 其中距入油口进的 T_{3A} 区域最先熔化, 距出油口近的 T_{3C} 稍慢, 中间区域 T_{3B} 所需时间最长。同理, 释热凝固过程中, T_{3B} 所在的箱体中间区域凝固所需时间也最长, 因此对于移动蓄热车的相变蓄热及释热过程, 可监测蓄热箱体中间 B 区域 T_{3B} 点的温度来了解相变材料的熔化凝固状态。

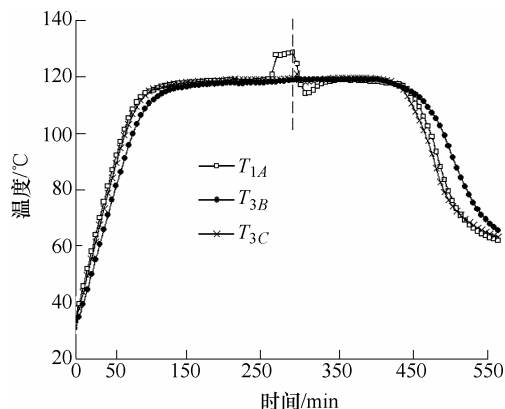


图6 充放热过程轴向三个监测点温度变化曲线

2.4 不同导热油流量对充、放热过程影响

图7是在热源温度 140 °C, 导热油流量分别为 1.5 m³/h、2.5 m³/h、3.5 m³/h 的工况下进行充热试验, 蓄热箱体内赤藻糖醇平均温度随时间变化的曲线, 图8是在水箱里水的体积和初始温度一定, 导热油流量分别为 1.5 m³/h、2.5 m³/h、3.5 m³/h 的工况下进行放热试验, 赤藻糖醇平均温度随时间变化的曲线。从图7中可以看出, 在试验所设定的工况下, 导热油流量对充、放热过程中蓄热材料的温度变化的影响不太明显, 因为试验所取工况导热油流量小, 管路导热油流速低, 处于层流区, 管路传热系数变

化不大, 且赤藻糖醇热导率很低, 主要热阻在赤藻糖醇一侧, 故宜采用小流量以减少泵功。

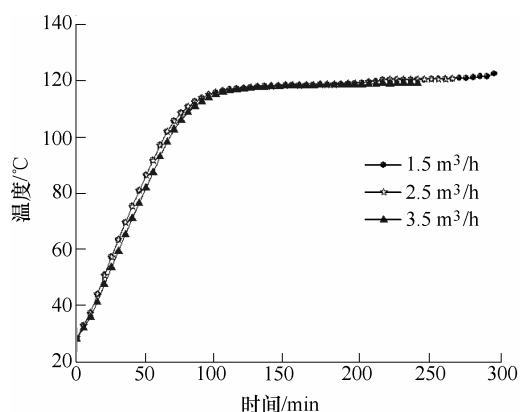


图7 充热过程不同导热油流量下赤藻糖醇温度随时间变化

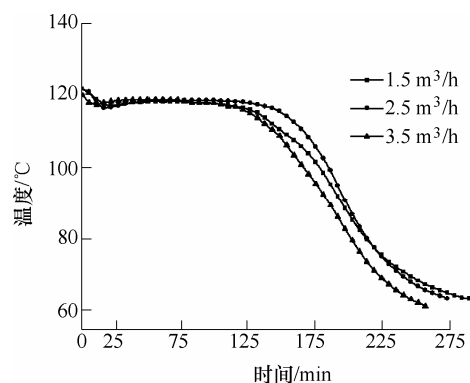


图8 放热过程不同导热油流量下赤藻糖醇温度随时间变化

2.5 放热过程中水与导热油进出口温度变化规律

图9所示为放热过程中蓄热箱体进出口处导热油和水的温度变化趋势。从图9中可以看出, 在放热阶段的前 120 min, 导热油进出口温差逐渐减小, 水温升速度也由快逐渐减慢, 水箱内 0.118 m³ 体积的水从 10 °C 升至 55 °C; 120 min 后, 导热油进出口温差降至 1 °C 以内, 蓄热材料释能速度减慢。

蓄热车蓄热量

$$Q = Q_x + Q_j = mc_{p,s}\Delta T_s + mq_{pcm} + mc_{p,l}\Delta T_l = 60 \text{ kg} \times 1.38 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \times (117.8 - 60) + 60 \text{ kg} \times 339.8 \text{ kJ/kg} + 60 \text{ kg} \times 2.76 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \times (121 - 117.8) \text{ °C} = 25700 \text{ kJ}$$

用户可回收的热量(0.115 m³ 的水从 10 °C 到 55 °C)约为

$$Q_{\text{water}} = m_w c_{p,w} \Delta T_w = 21588 \text{ kJ}$$

热回收率

$$\eta = \frac{Q_{\text{water}} - Q_{\text{oil}}}{Q} \times 100\% = 84\%$$

式中, Q_{oil} 为管路一小部分导热油的显热, 可以忽略, 认为 $Q_{\text{oil}} \approx 0$ 。

蓄热车在用户端放热时间应控制在 120 min 左右, 用户端可以回收的热量约为 21 588 kJ, 约占蓄热车蓄热量的 84%, 可见蓄热车有较高的热回收率。

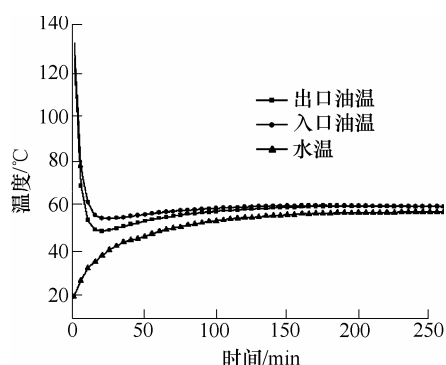


图9 放热过程中水与导热油温度变化曲线

3 结论

(1) 直肋式翅片管不仅增大了换热面积, 而且在蓄热熔化和放热凝固过程中加大了自然对流扰动区域, 对换热也起到了加强作用, 使得蓄热器表现出了良好的充放热性能, 在所设定工况下充热约需 210 min, 放热只需 120 min, 为移动蓄热车在太阳能利用、工业废热利用等领域的工程应用提供了可能。

(2) 释热过程中, 多组式直肋管蓄热器具有较快冷却速度, 使得赤藻糖醇凝固过程发生过冷现象, 过冷度约 5 °C。

(3) 导热油流量对充、放热过程蓄热材料温度变化影响不大, 宜采用小流量而减小泵功消耗。

(4) 本相变蓄热器在用户侧表现出良好的热回收特性, 热回收效率可达 84%。

参 考 文 献

- [1] 赵钦新, 王宇峰, 王学斌, 等. 我国余热利用现状与技术进展[J]. 工业锅炉, 2009(5): 8-15.
ZHAO Qinxin, WANG Yufeng, WANG Xuebin, et al. Technical, advances & status of China's waste heat utilization[J]. Industrial Boilers, 2009(5): 8-15.
- [2] MOHAMMED M F, AMAR M K, SIDDIQUE A K R, et al. A review on phase change energy storage: materials and applications[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(9-10): 1597-1615.
- [3] 韩瑞端, 王沅浩, 郝吉波. 高温蓄热技术的研究现状及展望[J]. 建筑节能, 2011, 39(247): 32-38.
HAN Ruiduan, WANG Fenghao, HAO Jibo. Research status and prospect of high temperature heat storage technology[J]. Building Energy Efficiency, 2011, 39(247): 32-38.
- [4] 居冰峰, 傅建中, 陈子辰. 复合恒温构件热变形控制技术[J]. 机械工程学报, 2000, 30(6): 59-62.
JU Bingfeng, FU Jianzhong, CHEN Zichen. Composite thermostatic member thermal deformation control technology research[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 30(6): 59-62.
- [5] WANG Weilong, HU Yukun, YAN Jinyue, et al. Combined heat and power plant integrated with mobilized thermal energy storage (M-TES) system[J]. Frontiers of Energy and Power Engineering in China, 2010, 4(4): 469-474.
- [6] WANG Weilong, YAN Jinyue, DAHLQUIST E, et al. Thermal behavior and performance of lab-scale mobilized thermal energy storage system[C] // International Conference on Applied Energy. Perugia, Italy, 2011: 2969-2980.
- [7] AHMET K, HAKAN F O, TANSEL K. Energy and exergy analysis of a latent heat storage system with phase change material for a solar collector[J]. Renewable Energy, 2008, 33: 567-574.
- [8] GUO Shaopeng, ZHAO Jun, LI Xun, et al. Experimental study on waste heat recovery with an indirect mobilized thermal energy storage system[C] // International Conference on Applied Energy. Perugia, Italy, 2011: 3035-3046.
- [9] SHARMA A, TYAGI V V, CHEN C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13: 318-345.
- [10] FRANCIS A, PHILIP E, MERVYN S. A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins[J]. Solar Energy, 2009, 83: 1509-1520.
- [11] FRANCIS A, PHILIP E, MERVYN S. Experimental study on the melting and solidification behaviour of a medium temperature phase change storage material (Erythritol) system augmented with fins to power a LiBr/H₂O absorption cooling system[J]. Renewable Energy, 2011, 36: 108-117.
- [12] FRANCIS A, PHILIP E, MERVYN S. Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array[J]. Renewable Energy, 2010, 35: 198-207.

- [13] 唐刚志, 李隆健, 崔文智, 等. 针翅管式相变蓄热器传热特性的实验研究[J]. 郑州大学学报, 2008, 29(3): 69-72.
- TANG Gangzhi, LI Longjian, CUI Wenzhi, et al. Experimental research on heat transfer characteristics of fined pipe heat exchanger with latent heat storage[J]. Journal of Zhengzhou University, 2008, 29(3): 69-72.
- [14] 唐刚志. 整体针翅管式相变蓄热换热器性能实验[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- TANG Gangzhi. Experimental research on heat transfer characteristics of integreted pin fined tube heat exchanger with latent heat storage[D]. Chongqing: Chongqing

University, 2009.

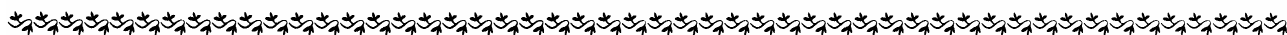
- [15] ZHANG Dong, SHENG Litian, DE Yanxiao. Experimental study on the phase change behavior of phase change material confined in pores[J]. Solar Energy 2007, 81: 653-660.

作者简介: 李汛, 男, 1954 年出生, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为传热与传质。

E-mail: xli@tju.edu.cn

赵军(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士研究生。主要研究方向为太阳能、地热能等可再生新能源利用、地源热泵等节能技术和能源有效利用与转换表面改性。

E-mail: zhaojun@tju.edu.cn



第 2 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

5A06 铝合金 MIG 焊接接头深冷强化机理研究

作者: 高珊

毕业学校: 太原科技大学

指导教师: 吴志生

铝合金焊接技术是节能环保型铝合金材料能否广泛应用的关键技术之一。但铝合金焊接存在焊接接头的软化问题, 因此限制了铝合金焊接结构件的广泛使用。铝合金焊接接头软化问题, 无论从焊接工艺方面采取措施还是在焊后采取热处理措施, 解决效果皆存在一定的局限性。本文提出了改善铝合金 MIG 焊接接头组织和力学性能的深冷处理方法, 通过试验的方法系统研究了深冷处理参数对 5A06 铝合金 MIG 焊接接头组织和性能的影响, 并从微观层次探讨了深冷处理提高 5A06 铝合金 MIG 焊接接头的性能的机理, 探索了改善铝合金焊接接头软化的新途径。根据确定的研究路线, 本文主要研究结果如下。

深冷处理可以改善 5A06 铝合金 MIG 焊接接头组织的力学性能, 研究发现, $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、保温 10 h 时的深冷处理提高焊接接头强度 6.64%; 延伸率提高 1.95 倍。深冷处理参数为 $-155\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温 4 h 时 5A06 铝合金 MIG 焊接接头的强化效果最好。5A06 铝合金 MIG 焊接接头抗拉强度、延伸率随着保温时间的延长和深冷处理温度的降低而增大。深冷处理后, 接头焊缝中心区硬度变化不大, 热影响区硬度小幅提高。

文中利用高景深显微镜、X 射线分析(XRD)、透射电子显微镜(TEM)、能谱分析(EDS)、扫描电镜(SEM)及定量金相分析研究深冷处理对 5A06 铝合金 MIG 焊接接头合金微观组织结构的影响。深冷处理使得 5A06 铝合金 MIG 焊接接头组织中形成亚晶结构, 第二相 Mg_2Al_3 颗粒弥散析出, 提高了基体的连续性, 且第二相颗粒数量明显增加, 使得 5A06 铝合金焊接接头的基体组织细化, 从而强化基体组织。XRD 分析表明, 深冷处理后焊接接头组织中的某些晶粒的晶面取向发生了变化, 产生了晶粒转动。

利用透射电子显微镜观察深冷处理前后的 5A06 铝合金焊接接头的组织结构, 发现深冷处理可以促使 5A06 铝合金 MIG 焊接接头合金组织中的位错转化为位错环、使接头合金组织产生孪晶, 分别通过奥万罗(Orowan)位错机制及极轴机制解释了位错环和孪晶的形成机制。正电子湮没实验研究发现深冷处理后, 5A06 铝合金 MIG 焊接接头组织中空位浓度呈降低趋势。

利用扫描电镜(SEM)、背散射(BSE)等对接头拉伸断口进行了分析后, 结合 5A06 铝合金 MIG 焊接接头组织结构的变化, 基于奥万罗位错强化机制对 5A06 铝合金焊接接头合金的强化机理进行分析认为: 第一, 5A06 铝合金 MIG 焊接接头合金深冷处理强化的主要原因是接头组织中显微孔洞数量的减少、第二相颗粒的细化、弥散析出、晶粒转动、位错环及孪晶的产生。第二, 连续分布的 α 相及细小弥散分布的第二相 $\beta(\text{Mg}_2\text{Al}_3)$ 使其对 5A06 铝合金焊接接头塑韧性的不利影响大为减弱, 焊接接头的强韧性大幅提高, 第三由于铝合金基体本身硬度通过深冷处理不能大幅度提高, 深冷处理后 5A06 铝合金 MIG 焊接接头焊缝中心区的硬度提高的幅度不大。

采用了 BP 神经网络对深冷处理的 5A06 铝合金 MIG 焊接接头的抗拉强度进行了模拟和预测, 比较合理的深冷处理参数: 温度为 $-155\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温时间为 150 min 以上。BP 神经网络焊接接头的抗拉强度预测结果与深冷处理焊接接头实际测试的结果比较一致。