

表面粗糙度对印刷电路板式换热器扩散焊接的影响研究

赵婧婧¹, 李秋龙²

¹洛阳仁晟石化工程技术有限公司, 河南 洛阳

²洛阳船舶材料研究所, 河南 洛阳

收稿日期: 2022年5月12日; 录用日期: 2022年6月17日; 发布日期: 2022年6月28日

摘要

印刷电路板式换热器的换热芯体是通过换热板片堆叠后真空扩散焊接而成, 表面粗糙度是影响换热芯体扩散焊接性能的关键因素之一, 本文以316L材料为试验对象开展试验分析研究, 重点研究了板片表面粗糙度对换热器芯体扩散焊性能的影响规律, 从抗拉强度和接头金相组织两个方面阐述了316L板片表面粗糙度对扩散焊接的影响情况, 结果表明, 随着板片表面粗糙度的减小, 其扩散焊接性能逐渐提高, 只有当316L板片表面粗糙度小于0.1时, 其换热芯体的焊接性能方可满足印刷电路板式换热器的使用要求。

关键词

印刷电路板式换热器, 扩散焊接, 316L不锈钢, 粗糙度

Research on the Effect of Roughness on Diffusion Bonding of Printed Circuit Heat Exchanger

Jingjing Zhao¹, Qiulong Li²

¹Luoyang Rensheng Petrochemical Engineering Technology, Luoyang Henan

²Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang Henan

Received: May 12th, 2022; accepted: Jun. 17th, 2022; published: Jun. 28th, 2022

Abstract

The heat exchange core of the printed circuit heat exchanger (PCHE) is formed by vacuum dif-

fusion bonding after the heat exchange plates are stacked, and the surface roughness is one of the key factors that affect the diffusion bonding performance of the heat exchange core. In this paper, the 316L material is taken as the test object to carry out the experimental analysis and research, and the emphasis is put on the influence of the plate surface roughness on the diffusion bonding performance of the heat exchanger core. The influence of 316L plate surface roughness on diffusion bonding is described from the aspects of tensile strength and joint microstructure. The results show that the performance of diffusion bonding is improved gradually with the decrease of plate surface roughness. Only when the 316L plate surface roughness is less than 0.1, the performance of the heat exchange core can meet the requirements of the PCHE.

Keywords

PCHE, Diffusion Bonding, 316L Stainless Steel, Roughness

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

印刷电路板式换热器(简称 PCHE)是一种结构特殊的微通道换热器,它的换热元件是一种具有微通道结构的换热板片,板片上的微通道通过化学蚀刻的方法进行加工,通道一般为半圆形或者机翼型等结构 [1] [2] [3]。微通道的结构决定了其具有换热效率高、耐高压、单位体积换热面积大的特点,可应用于超临界二氧化碳布雷顿循环发电、FLNG、FSRU、海洋平台、第四代核电、氢能源等领域 [4] [5]。印刷电路板式换热器的换热板片只能通过扩散焊接的方式进行可靠连接,扩散焊接的工艺参数主要包括温度、压力、时间、真空度以及焊件表面处理和中间层材料的选择等,这些因素对扩散焊接过程和接头质量有着极其重要的影响。但国内外主要关注焊接温度、焊接压力、保温时间和真空度等因素,而忽略了表面质量的影响 [6] [7] [8] [9] [10]。

换热板片的表面粗糙度是影响其焊接质量的重要因素,关系到整个换热器的焊接性能,粗糙度过大,焊接焊缝结合度不好,设备承压能力达不到设计和使用要求,粗糙度过小,徒劳增加加工成本,导致整个设备的成本过高。因此,开展不同粗糙度对不锈钢扩散焊接质量的影响研究具有重要意义。通过研究不同粗糙度对不锈钢扩散焊接质量的影响,制定合适的焊接工艺,提升不锈钢扩散焊接质量,为印刷电路板式换热器的制造奠定基础 [11]-[20]。本文针对 316L 不锈钢材料,开展粗糙度对 316L 扩散焊接接头的性能影响研究,主要从扩散焊接接头力学性能和金相组织两个方面来表征粗糙度对扩散焊接接头的影响机理和规律。

2. 试验方案与分析方法

2.1. 试验材料

综合考虑试验取样和印刷电路板式换热器扩散焊接的结构特点,本文采用 316L 不锈钢 (022Cr17Ni12Mo2) 板材作为焊接试验材料,材料为国产材料,满足 GB/T 24511-2017 标准要求。试验板片的规格为 50 mm × 50 mm,厚度为 30 mm,任选一个 50 mm × 30 mm 的表面做为焊接面。本实验采用的 316L 不锈钢板材的化学成分和力学性能分别如表 1 和表 2 所示。

Table 1. Chemical composition of 316L stainless steel materials (mass fraction, %)**表 1.** 316L 不锈钢材料的化学成分(质量分数, %)

元素	C	Si	Mn	S	P	N	Cr	Ni	Mo
标准要求	0.030	0.75	2.00	0.020	0.035	0.10	16.00~18.00	10.0~14.00	2.00~3.00
材料实测	0.021	0.500	1.14	<0.0050	0.027	0.034	16.94	10.15	2.06

Table 2. Mechanical properties of 316L stainless alloy**表 2.** 316L 不锈钢材料的力学性能

力学性能	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A/%	硬度值 HBW
标准要求	≥ 210	≥ 490	≥ 40	≤ 217
数值	321.0	625	73.75	176.33

2.2. 试验过程及分析方法

为排除其他工艺条件影响扩散焊接试验的结果, 试验采用两张 316L 板片进行焊接试验, 将 316L 不锈钢板材经水切割加工成 $30\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的板片试样, 并将板片试样需要进行扩散焊接的一面进行不同程度的表面抛光处理, 焊接试样如图 1 所示, 抛光处理完成后测量板片表面的粗糙度, 测量并记录板片的粗糙度。

**Figure 1.** Diagrammatic of diffusion bonded samples**图 1.** 扩散焊接试样示意图

扩散焊一般要求对试件表面进行研磨和抛光处理。为了研究换热板片表面粗糙度对印刷电路板式换热器换热芯体扩散焊接的影响, 探索在不同表面质量的条件下, 板片表面粗糙度对 316L 材料印刷电路板式换热器扩散焊接性能的影响规律。本试验制备并测量了 5 组试样, 5 组试样的表面粗糙度值分别为: $0.7\sim 0.8\ \mu\text{m}$ (DB1)、 $0.5\sim 0.6\ \mu\text{m}$ (DB2)、 $0.3\sim 0.4\ \mu\text{m}$ (DB3)、 $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$ (DB4) 和 $0.1\ \mu\text{m}$ 以下 (DB5), 本实验只有焊接面粗糙度这一个变量, 其他的工艺参数和条件均相同, 焊接过程中为了有效去除 316L 不锈钢表面的污渍, 焊接前用丙酮擦洗试样的焊接表面, 并将抛光处理的两个表面面对面进行装配, 装配完成后在真空热压炉内进行真空压力扩散焊接试验, 焊接参数与以往试样焊接参数相同。所有试验的焊接压力均为 12 MPa, 焊接温度 1050°C , 焊接保温时间 2.5 h 后随炉冷却至室温。

试样焊接完成后, 在每组焊接试样上垂直于扩散焊接方向取试样进行力学分析, 加工三个标距尺寸为 $\varphi 5 \times 25\text{ mm}$ 的圆棒拉伸试样, 按照国家标准 GB/T228.1-2010《金属材料室温拉伸试验方法》, 将加工好的圆拉试样在 100 KN 万能材料试验机 (SINTECH20/G) 上进行室温 (25°C) 拉伸性能测试试验, 拉伸速率 0.03 mm/s 。同时在焊接后的试样上取样制备金相试样, 依次用 220#、600#、1000#、1500#、2000# 和 3000#

砂纸进行打磨, 然后使用颗粒度为 2.5 μm 的金刚石抛光剂进行机械抛光。将抛光好的金相样品浸泡在氢氟酸、硝酸和水的混合液中腐蚀 5 s, 利用 DMI 8 型光学显微镜观察扩散焊接接头附近的微观组织。

3. 实验结果及讨论

3.1. 表面粗糙度对扩散焊接力学性能的影响

通过室温拉伸试验检测出不同表面粗糙度下扩散焊接接头的连接质量, 同时为了将实验结果与母材性能进行对比, 将母材随炉进行热处理后进行力学实验, 得到力学性能作为空白对比试样, 不同表面粗糙度下扩散焊接接头(DB1-DB6)的各项力学数据和随炉母材(DB6)的力学性能数据如表 3 所示。

Table 3. Mechanical properties of 316L diffusion bonding joints at different roughness

表 3. 不同表面粗糙度下 316L 不锈钢扩散焊接接头的力学性能

试验编号	抗拉强度 MPa	屈服强度 MPa	伸长率%	收缩率%
DB1	134.2	42.1	6.5	11.0
DB2	291.6	97.3	13.6	21.4
DB3	319.4	136.7	28.7	34.6
DB4	468.0	188.5	42.9	52.7
DB5	509.5	218.5	62.5	67.0
DB6	568.0	278.0	67.2	84.5

对实验数据进行分析可知, 如图 2 所示, 随着板片表面粗糙度的减少, 扩散焊接接头的抗拉强度等力学性能逐渐提高, 图 3 显示了印刷电路板式换热器 316L 不锈钢扩散连接接头室温拉伸试样的断裂特征。由图可以看出, DB1-DB3 号试样呈现脆断, 只有 DB4 号和 DB5 号拉伸试样呈现出典型的塑性断裂特征, 断裂位置附近有明显“缩颈”, 说明只有 DB4 号和 DB5 号这两个试样在断裂前发生了显著塑性变形, 且拉伸试样断裂位置均位于试样中心附近。

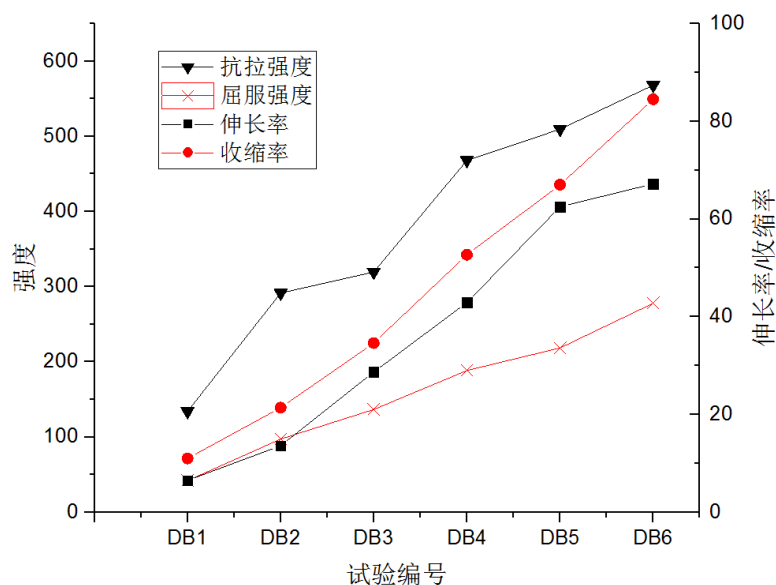


Figure 2. The effects of roughness on mechanical properties of the 316L joints

图 2. 粗糙度对 316L 不锈钢扩散焊接接头力学性能的影响规律

根据 316L 印刷电路板式换热器芯体扩散焊接强度要求, 垂直于扩散连接结合面拉伸试样的抗拉强度值不得低于母材标准下限值即 490 MPa, 表 3 中仅 DB5 号试样的抗拉强度高于 490 MPa, 试验结果满足扩散焊接质量要求。从表 2 和图 2 的数据来看, 板片表面粗糙度对 316L 不锈钢扩散焊接性能的影响显著, 表面粗糙度决定了换热芯体扩散焊接的质量, 只有当板片表面粗糙度小于 $0.1 \mu\text{m}$ 时, 芯体板片的扩散焊接性能方可满足印刷电路板式换热器的要求。

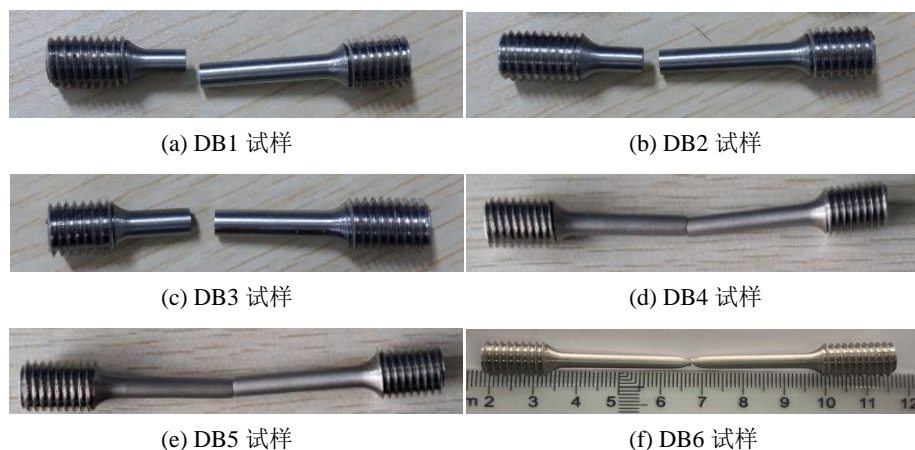


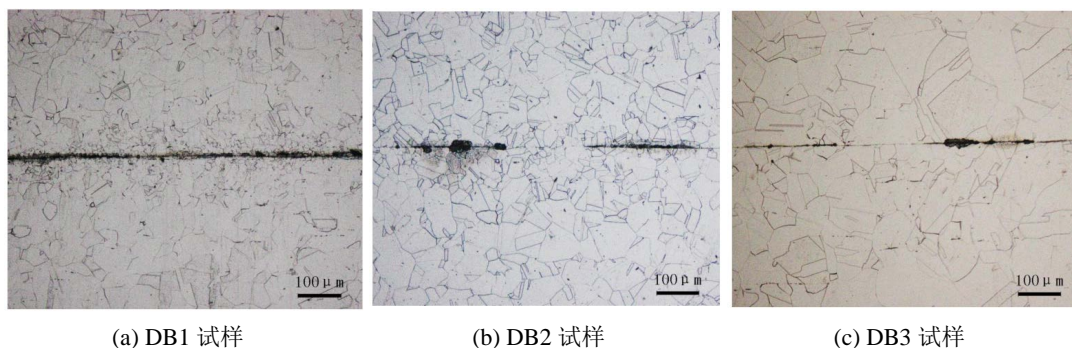
Figure 3. Fracture characteristics of 316L stainless steel specimen under tensile test at room temperature

图 3. 316L 不锈钢试样室温拉伸试样断裂特征

3.2. 表面粗糙度对扩散焊接接头界面组织的影响

印刷电路板式换热器对扩散焊接的要求不仅是力学性能达到指标要求, 同时也要求材料之间要完全焊合。因此检验扩散焊接接头性能是否合格的另一个指标主要是对接头的界面组织进行观察和分析, 接头的界面组织特征也将直接反映扩散连接的结合质量。

图 4 给出了 316L 不锈钢扩散焊接试样连接区域界面的晶粒结构, 材料连接界面位于金相试样正中心, 对比发现, 除 DB5 号试样外, 其余试样的晶粒结构均存在明显的未焊合缺陷, DB1-DB4 试样晶粒结构特征相似, 晶粒尺寸无明显差异, 但可看出随着板片表面粗糙度的减小, 扩散焊接试样中接头界面的缺陷宽度在不断减少, DB1 号试样的界面上完全未焊合, 而 DB2 到 DB4 试样上有部分区域已经完全焊合了, 综合分析试验的结果可知, 扩散焊接为加温和加压的过程, 部分区域如果能够完全贴合是可以实现焊合的, 但部分焊合是无法满足要求的, 需全部焊合方可满足使用要求。根据试验过程和结果分析, 当 316L 不锈钢表面粗糙度小于 $0.1 \mu\text{m}$ 时, 扩散焊接试样的界面组织可以完全焊合, 满足印刷电路板式换热器的要求。



(a) DB1 试样

(b) DB2 试样

(c) DB3 试样

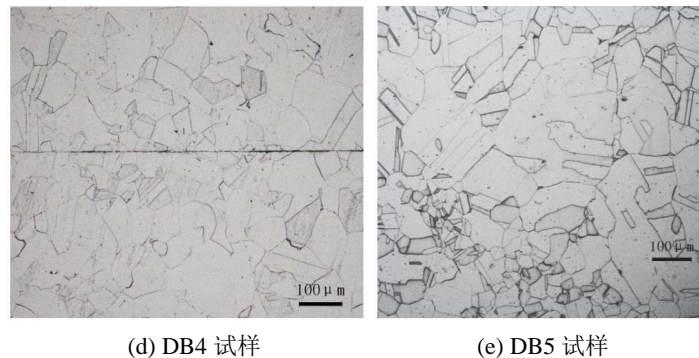
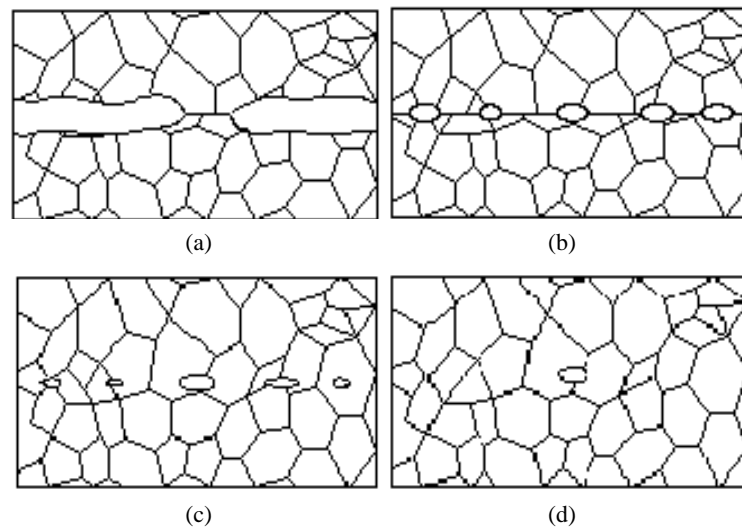


Figure 4. Grain structures in diffusion bonded of 316L stainless steel joint
图 4. 316L 不锈钢扩散焊接接头的组织界面

3.3. 表面粗糙度对扩散焊接接头影响的分析

扩散焊接是一种固相焊接方式, 实现材料扩散焊接的核心条件是焊接界面必须相互靠近达到原子间作用的距离, 但即使是表面粗糙度极低的板片从微观上看也是凹凸不平的, 扩散焊接过程主要分为 4 个阶段, 如图 5 所示, 在扩散连接初始阶段只能形成局部接触, 其他部位则会形成微小孔洞, 在高温和外加压力的作用下, 材料发生塑性变形并紧密接触, 当达到原子级别距离接触后, 将发生晶粒再结晶, 根据 Gibbs-Thomson 定理可知晶粒尺寸越大, 分摊到的界面能越少, 其化学势越低。基于此大晶粒将通过原子扩散逐渐合并小晶粒实现长大, 最终实现扩散连接。



(a) 凹凸不平的初始接触面; (b) 塑性变形使连接界面接触; (c) 蠕变、扩散和晶界迁移; (d) 界面和孔洞消失

Figure 5. Grain structures in diffusion bonded of 316L stainless steel joint
图 5. 扩散焊接的四个阶段

板片表面粗糙度反应的是焊接面的接触“距离”, 理论上不论板片表面的粗糙度如何, 只要焊接时的压力足够大, 均可实现两个焊接面的良好结合, 然而, 由于印刷电路板式换热器微通道结构的特殊性, 在实际产品焊接过程中, 对焊接压力有一定的限制要求, 因此只能通过提高板片表面质量来实现良好焊接。从不同表面粗糙度对扩散焊接接头力学性能和界面组织的试验结果可以明显看出, 当板片表面粗糙度较大时, 在焊接过程中, 由于板片表面凹凸不平, 在一定的焊接压力下, 焊接面难以近距离接触, 焊

界面附近原子无法实现有效扩散, 会产生未焊合焊接缺陷, 随着板片表面粗糙度的减少, 焊接面的距离逐渐减少, 原子扩散焊接进展显著增加, 未焊合缺陷消失, 实现焊接面的良好焊接。

4. 结论

综上所述, 本文通过试验的方法, 研究了 316L 不锈钢板片表面的粗糙度对印刷电路板式换热器扩散焊接性能的影响。在现有试验条件和测试数据下, 主要结论如下:

- 1) 在其他工艺参数均相同的条件下, 随着板片表面粗糙度的减少, 换热板片扩散焊接的性能不断提高, 板片表面粗糙度与芯体扩散焊接性能呈负相关;
- 2) 根据印刷电路板式换热器对扩散焊接接头抗拉强度的要求, 只有当 316L 不锈钢板片表面的粗糙度小于 $0.1 \mu\text{m}$ 时, 板片的表面质量方可满足产品使用要求;
- 3) 评价印刷电路板式换热器扩散焊接性能不能仅从焊接接头的抗拉强度来考虑, 需综合接头的力学性能和接头界面的微观组织。

参考文献

- [1] Aneesh, A.M., Sharma, A., Srivastava, A. and Chaudhury, P. (2018) Effects of Wavy Channel Configurations on Thermal-Hydraulic Characteristics of Printed Circuit Heat Exchanger (PCHE). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **118**, 304-315. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.111>
- [2] Cui, X.Y., Guo, J.F., Huai, X.L., Cheng, K., Zhang, H. and Xiang, M. (2018) Numerical Study on Novel Airfoil Fins for Printed Circuit Heat Exchanger Using Supercritical CO_2 . *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **121**, 354-366. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.015>
- [3] Ahn, Y., Bae, S.J., Kim, M., Cho, S.K., Baik, S., Lee, J.I., et al. (2015) Review of Supercritical CO_2 Power Cycle Technology and Current Status of Research and Development. *Nuclear Engineering and Technology*, **47**, 647-651. <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.06.009>
- [4] Chen, F., Zhang, L.S., Huai, X.L., Li, J., Zhang, H. and Liu, Z. (2017) Comprehensive Performance Comparison of Airfoil Fin PCHEs with NACA 00XX Series Airfoil. *Nuclear Engineering and Design*, **315**, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.02.014>
- [5] Halimi, B. and Suh, K.Y. (2012) Computational Analysis of Supercritical CO_2 Brayton Cycle Power Conversion System for Fusion Reactor. *Energy Conversion and Management*, **63**, 38-43. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.01.028>
- [6] Jeon, S., Baik, Y.J., Chan, B. and Kim, W. (2016) Thermal Performance of Heterogeneous PCHE for Supercritical CO_2 Energy Cycle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **102**, 867-876. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.091>
- [7] Kim, W., Baik, Y.J., Jeon, S., Jeon, D. and Byon, C. (2017) A Mathematical Correlation for Predicting the Thermal Performance of Cross, Parallel, and Counterflow PCHEs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **106**, 1294-1302. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.110>
- [8] Southall, D. and Dewson, S.J. (2010) Innovative Compact Heat Exchangers. 2010 *International Congress on Advances in Nuclear Power Plants*, San Diego, 13-17 June 2010, 218-224.
- [9] Figley, J., Sun, X.D., Mylavarapu, S.K. and Hajek, B. (2013) Numerical Study on Thermal Hydraulic Performance of a Printed Circuit Heat Exchanger. *Progress in Nuclear Energy*, **68**, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2013.05.003>
- [10] Xu, X.Y., Ma, T., Li, L., Zeng, M., Chen, Y., Huang, Y., et al. (2014) Optimization of Fin Arrangement and Channel Configuration in an Airfoil Fin PCHE for Supercritical CO_2 Cycle. *Applied Thermal Engineering*, **70**, 867-875. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.040>
- [11] Baek, S., Kim, J.H., Jeong, S. and Jung, J. (2012) Development of Highly Effective Cryogenic Printed Circuit Heat Exchanger (PCHE) with Low Axial Conduction. *Cryogenics*, **52**, 366-374. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2012.03.001>
- [12] Sung, J. and Lee, J.Y. (2017) Effect of Tangled Channels on the Heat Transfer in a Printed Circuit Heat Exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **115**, 647-656. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.091>
- [13] Mylavarapu, S.K., Sun, X., Glosup, R.E., Christensen, R.N. and Patterson, M.W. (2014) Thermal Hydraulic Performance Testing of Printed Circuit Heat Exchangers in a High-Temperature Helium Test Facility. *Applied Thermal En-*

-
- gineering*, **65**, 605-614. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.025>
- [14] 安子良, 轩福贞, 涂善东. 316L 不锈钢扩散焊接头的微观结构和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(10): 1765-1770.
- [15] 黄毓晖, 杨博, 轩福贞, 涂善东. 316L 不锈钢扩散焊接头在酸性氯化钠溶液中的应力腐蚀行为[J]. 焊接学报, 2011, 32(7): 67-70.
- [16] 李淑欣, 轩福贞, 涂善东, 俞树荣. 316L 不锈钢扩散连接接头界面疲劳裂纹扩展行为[J]. 材料科学与工艺, 2010, 18(1): 141-144.
- [17] 李振鸿, 沈书乾. 316L 不锈钢扩散焊接头的显微拉伸性能[J]. 石油和化工设备, 2008, 11(2): 10-11.
- [18] 安子良, 轩福贞, 涂善东. 316L 不锈钢扩散焊接头界面孔洞蠕变扩展研究[J]. 中国测试, 2014, 40(5): 21-24.
- [19] 彭成章, 陈安华, 王文明. 分层实体制造中金属层片连接的扩散焊接工艺[J]. 矿冶工程, 2005, 25(4): 86-88.
- [20] 李秋龙, 徐哲, 郭继冠, 刘向前, 李培跃, 郁炎. 板片表面缺陷尺度对印刷电路板式换热器扩散焊接的影响研究[J]. 材料开发与应用, 2021, 36(3): 74-78.