

DOI: 10.13289/j.issn.1009-6264.2017-0059

纯镍与 304 不锈钢激光异种焊接的工艺及其接头的组织性能

夏纯阳^{1,2}, 虞钢^{1,2}, 何秀丽¹, 李少霞¹, 宁伟健¹, 苗海宾^{1,2}

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 采用高密度 Nd:YAG 固态连续激光器对 N6 纯镍和 304 奥氏体不锈钢进行了焊接工艺实验, 探究了激光功率和离焦量对焊缝成形的影响。对接头进行了拉伸强度和硬度的测试, 并结合光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、能谱分析仪(EDS)等手段分析了接头的微观组织。结果表明: N6 纯镍一侧热影响区晶粒长大明显, 焊缝区靠近两侧熔合线附近为向焊缝中心区域生长的柱状晶, 焊缝中心区域存在细小的胞晶区域; N6 热影响区的显微硬度最低, 焊缝的显微硬度介于 N6 镍母材和 304 不锈钢母材之间; 接头拉伸断裂位置在焊缝区, 抗拉强度达到 N6 纯镍母材的 90% 以上, 可以满足实际情况下的使用要求。拉伸断口表现为准解理断裂。

关键词: 纯镍; 304 不锈钢; 激光异种焊接; 组织; 力学性能

中图分类号: TG456.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2017)07-0087-06

Laser dissimilar welding process of pure nickel and 304 stainless steel and microstructure and properties of welded joint

XIA Chun-yang^{1,2}, YU Gang^{1,2}, HE Xiu-li¹, LI Shao-xia¹, NING Wei-jian¹, MIAO Hai-bin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The welding experiment of N6 pure nickel and 304 austenitic stainless steel was carried out by using high density Nd:YAG solid-state laser, and effects of laser power and defocusing distance on the weld seam formation were investigated. The microstructure and fracture morphology of the welded joint were analyzed by means of OM, SEM and EDS analysis, and the microhardness and tensile strength of the welded joint were tested. The results show that the grain growth in the heat affect zone (HAZ) of nickel N6 side is obviously due to overheating. The microstructure in weld seam near fusion line is columnar crystal while in central area of the seam is cellular crystal. In addition, the minimum of Vickers-hardness is found in the HAZ of nickel N6. The tensile fracture position of the welded joint is in the weld zone, and the tensile strength of the welded joint is more than 90% that of the nickel N6 base metal. The fractographs of the welded joint show that the tensile fracture is quasi-cleavage fracture.

Keywords: pure nickel N6; 304 stainless steel; laser dissimilar welding; microstructure; mechanical property

工业纯镍具有优越的抗腐蚀性及耐热性, 其抗碱类腐蚀能力仅次于银, 在高温下仍具有较好的热强度和热稳定性。镍同时具有较好的延展性和美观的金属光泽, 适用于化学装置和高温设备^[1]。304 不锈钢是一种应用最为广泛的铬-镍-不锈钢, 具有良好的耐

热性、低温强度及机械特性, 冲压、弯曲等热加工性好^[2]。结合两者的特点, 纯镍和不锈钢的连接件在石油化工、军工制造、钢铁冶金和航空航天中具有广泛的应用, 因此镍及其合金与不锈钢的异种金属的焊接技术具有良好的发展及应用前景。

收稿日期: 2017-02-20; 修订日期: 2017-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(11272317, 11502269)

作者简介: 夏纯阳(1991—), 男, 从事激光制造工艺与过程监控的研究, E-mail: xiachunyang@imech.ac.cn。

通信作者: 虞钢(1958—), 男, 教授, 从事激光与材料相互作用和激光制造工艺力学方面的研究, 发表论文 150 余篇, 出版 4 部著作, E-mail: gyu@imech.ac.cn。

引用格式: 夏纯阳, 虞钢, 何秀丽, 等. 纯镍与 304 不锈钢激光异种焊接的工艺及其接头的组织性能[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(7): 87-92.
XIA Chun-yang, YU Gang, HE Xiu-li, et al. Laser dissimilar welding process of pure nickel and 304 stainless steel and microstructure and properties of welded joint[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(7): 87-92.

有研究表明,使用手工氩弧焊的方法焊接镍基合金与304不锈钢,可以获得在超临界水氧化温度范围内焊接性较好的接头^[3]。也有研究针对用激光实现镍基合金和不锈钢的异种金属焊接,发现了镍基合金中含有的合金元素会导致的中间相的生成和晶界处的元素富集,接头强度和硬度相比两侧母材均有下降^[4]。纯镍与镍基合金虽然在耐腐蚀性、耐热性等方面较为类似,但其在熔点、硬度和线膨胀系数等方面仍存在一定差异。在实际异种焊接工艺中所使用的参数范围、接头的特性以及力学性能均不同。然而现阶段研究主要集中于镍基合金的异种金属焊接^[5-7],对纯镍和不锈钢的异种金属焊接进行的研究还比较少,且使用的焊接方法较为传统^[8]。激光焊接具有热影响区小、熔深大、热输入小、加工精度高、便于实现自动化和快速加热快速冷却等优点^[9],成为异种金属焊接及高温金属焊接的首选。但目前国

内外对使用高密度激光实现纯镍和不锈钢异种金属焊接的研究还相对不足。纯镍和304不锈钢物理特性和高温力学性能存在差异,焊接过程易出现气孔、热裂及变形等,为了有效探索上述两种材料焊接的新途径,填补此研究方向的相对不足,本文进行了平板对接激光焊接实验,对激光焊接纯镍和不锈钢的工艺、接头微观组织、元素分布和力学性能进行了初步分析,为工程应用提供了理论及实践依据。

1 实验材料及方法

异种金属激光焊接实验所用材料为工业纯镍 N6 和 304 不锈钢板材,纯镍 N6 尺寸为 80 mm × 40 mm,厚度分为 1 mm 和 2 mm,304 不锈钢尺寸为 80 mm × 40 mm,厚度分为 0.9 mm 和 1.9 mm,材料的化学成分如表 1 所示。实验前,用丙酮清洗试样表面,清除油污等杂质。

表 1 母材的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base materials (mass fraction%)

Material	C	Si	P	S	Cr	Mn	Ti	Ni	Fe	Al
N6	0.081	0.073	-	0.015	-	-	0.056	99.7 ~ 99.8	0.062	Bal.
304	≤0.08	≤1.0	≤0.045	≤0.03	18 ~ 20	≤2.0	-	8 ~ 10.5	Bal.	-

实验使用 Nd:YAG 连续激光器,焊接接头形式为对接,正面采用 15 L/min 流量的氩气作为保护气。采用线切割沿垂直于焊接方向取样制备接头金相样品,并将所取试样用砂纸打磨并抛光。接头为异种材料接头,分别为纯镍 N6、焊缝和 304 不锈钢 3 个区域。304 不锈钢和焊缝区域使用王水($\text{HNO}_3:\text{HCl} = 1:3$)进行腐蚀,纯镍区域使用冰醋酸 CH_3COOH 进行腐蚀。采用 TR-MG 光学显微镜(OM)进行显微组织观察。使用日立 SU1510 扫描电镜进行接头元素扫描(EDS)和断面形貌观察。采用 MH-6 硬度仪对焊缝、热影响区及母材进行显微硬度测试。接头拉伸实验在 WDW-20 拉伸机上进行。

孔被激光束直接加热,形成了深熔焊的焊接模式^[11]。钉头上部分呈非对称形状,是由于镍和不锈钢的吸收率和热导率存在差异,同样的热输入下,不锈钢熔化量更大,造成的偏熔现象^[12]。

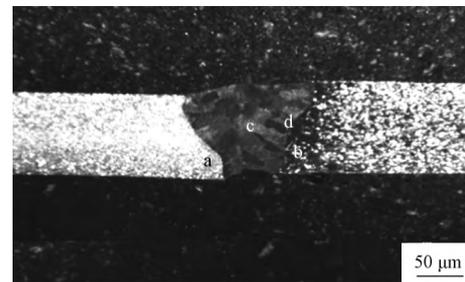


图 1 N6/304 异种金焊接接头低倍图

Fig. 1 OM image of N6/304 dissimilar metal welded joint

2 实验结果及讨论

2.1 焊接参数对焊缝形貌的影响

焊缝的整体形貌如图 1 所示,是 1 mm 厚纯镍板与 0.9 mm 厚 304 不锈钢板的对接焊缝,呈非对称的钉头状。当激光功率密度超过一定极限(10^6 W/cm^2)时^[10],金属材料开始蒸发,金属蒸汽的反作用力迅速增加。因为蒸汽压力,熔池表面的震荡和变形增大,因此在熔池中产生了钉头状的匙孔,金属材料通过匙

图 2 是激光焊接速度为 20 mm/s,离焦量为 -1.5 mm,保护气流量 15 L/min 时,不同激光功率对焊缝熔深和熔宽的影响。从图 2 可以看出,焊缝的熔深与熔宽均随激光功率的增大而增大。图 3 是焊缝深宽比与激光功率的关系,可以看出激光功率越大,焊缝的深宽比越大,焊缝形状越细长,焊接的匙孔效应越明显。

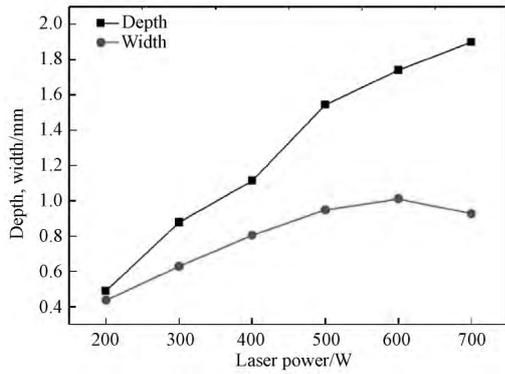


图 2 功率与焊缝熔深熔宽的关系

Fig. 2 Influence of laser power on weld depth and width

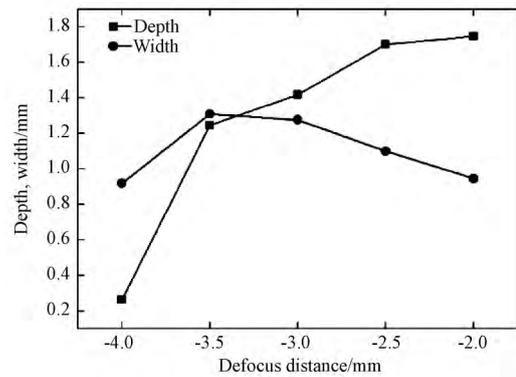


图 4 离焦量与焊缝熔深、熔宽的关系

Fig. 4 Influence of defocusing distance on weld depth and width

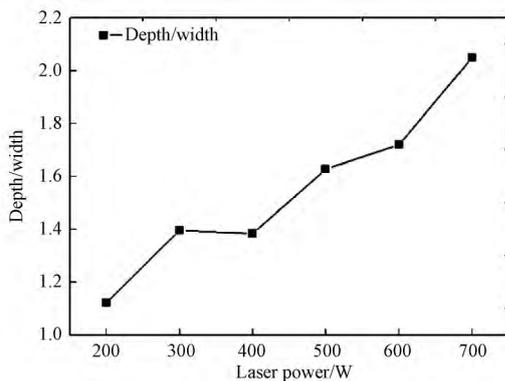


图 3 功率与焊缝深宽比的关系

Fig. 3 Influence of laser power on the rate of weld depth/width

作用在试样表面的激光功率密度取决于激光的功率和光斑的尺寸。为获得良好的深熔焊焊缝,并探究离焦量对焊缝成形的影响,保持激光功率为 700 W 和焊接速度 20 mm/s 不变,使用不同的离焦量值进行焊接实验。从图 4 可以看出随着离焦距离的减小,熔深增大。当离焦量由 -4 mm 变为 -3 mm 时,熔深的值发生突变,此时发生了由热导焊向深熔焊的转变。焊接模式转变为深熔焊之后,熔深值随着离焦距离的减小而大致成线性增加,熔宽的值随离焦距离的减小大致成线性下降。离焦量对熔深的影响是由激光束的传输特性决定的。

2.2 接头组织成分分析

母材 304 不锈钢和纯镍 N6 的熔合线附近区域为奥氏体组织,纯镍组织以 γ 相作为基体相^[13]。图 5 (a~d) 区域已在图 1 中标明,分别对应两侧热影响区、熔合线附近焊缝和焊缝中心。如图 5 (a) 所示,304 不锈钢一侧的热影响区并无明显的晶粒粗大。而在 N6 镍侧热影响区(如图 5b),可以看出镍侧母材热影响区组织为等轴平面晶,热影响区发生明显的

晶粒长大,并伴有孪晶产生。热影响区晶粒粗大是由于焊接过程热影响区温度过高导致部分晶粒二次再结晶,通过晶界迁移,周围的晶粒被吞并,形成粗大的晶粒^[14]。晶内的孪晶是在再结晶或晶粒长大过程中晶界迁移时形成的,通常是以 (1 1 1) 为孪晶面的共格孪晶界,这种孪晶界具有很低的界面能。形成孪晶将使系统的能量降低,因此,形成孪晶将成为再结晶过程的驱动力^[15]。

在焊缝区域,两侧熔合线附近为向焊缝中心区域生长的柱状晶,焊缝中心区域存在细小的胞晶区域。焊缝的基体组织为奥氏体。焊缝的结晶形态主要决定于合金中溶质的浓度、结晶速度(或晶粒长大速度)和液相温度梯度的综合作用。如图 5 (c) 所示,焊缝中心区域,因各方向温度梯度较为均匀,结晶时向四周均匀形核,生成胞状晶,这是由于激光焊接的快速凝固所致。在焊缝中靠近两侧熔合线附近区域,如图 5 (d) 所示,晶粒形核后,沿着散热方向垂直于熔合线向焊缝中心和顶部生长,形成柱状树枝晶。

焊缝中部分区域出现针状 σ 相,如图 6 所示。 σ 相为脆性相,多为 FeCr 型。有研究表明,即使微量的 σ 相,就会引起合金的脆化,影响材料的拉伸性能^[16]。

对接头进行 EDS 元素线扫描,如图 7 所示,可以看出焊缝中的元素主要由 Fe、Ni 和 Cr 组成,且 3 种元素的质量比约为 45:45:10。焊缝中水平方向上元素分布较均匀,无明显突变。在不锈钢与焊缝熔合线处,元素的分布呈现出陡峭的“斜坡”,元素变化存在过渡区域,如图 8 所示,在电镜下此区域可以明显得看到过渡层的出现。对焊缝进行面扫描,如图 9 所示,可以看出,整个焊缝中,各元素充分混合均匀且分布均匀。

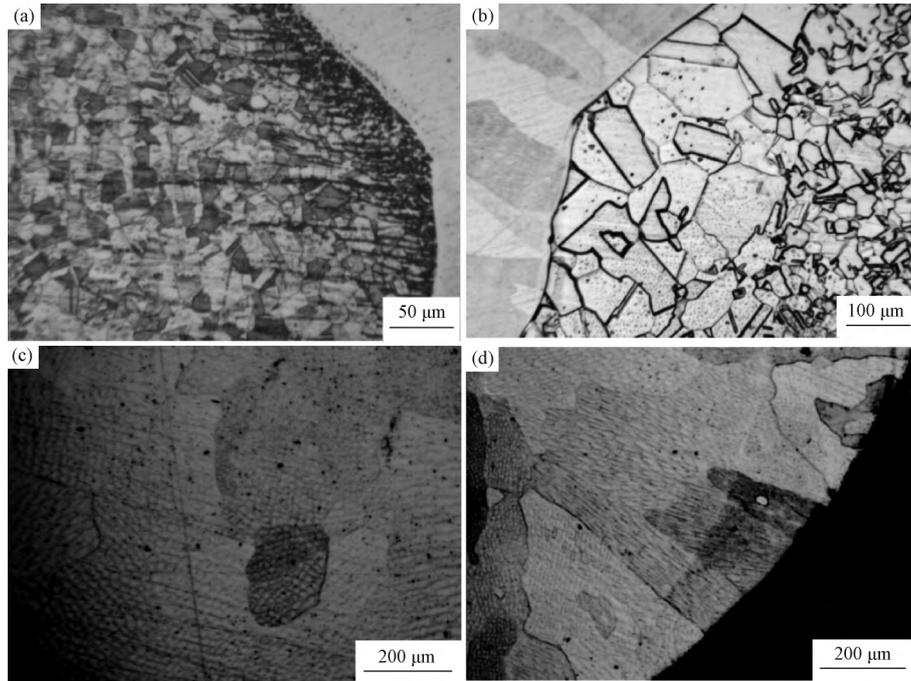


图5 接头显微组织 (a) 304 热影响区; (b) N6 热影响区; (c) 焊缝中心; (d) 焊缝边缘
 Fig.5 Microstructure of the welded joint (a) OM image of HAZ in 304 side; (b) HAZ in N6 side; (c) central fusion zone; (d) fusion zone near fusion line

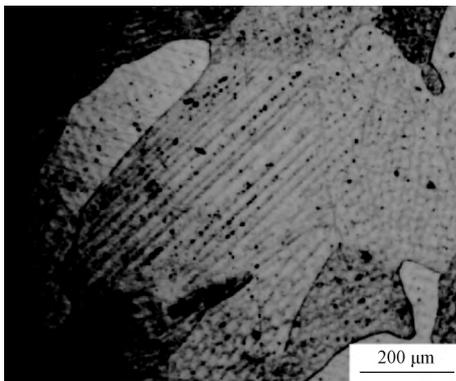


图6 焊缝微观组织图
 Fig.6 Microstructure of the weld seam

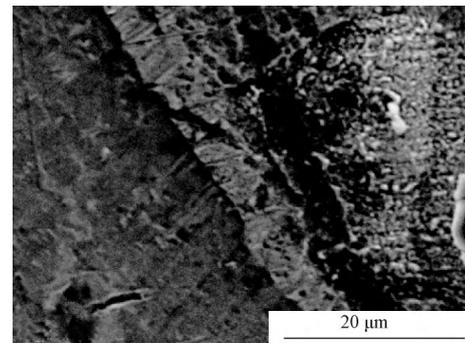


图8 304 侧熔合线电镜图
 Fig.8 SEM image of fusion line in 304 side

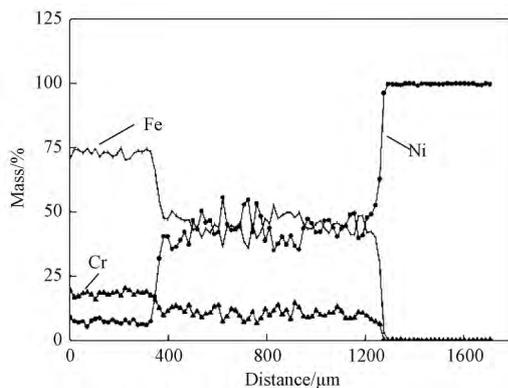


图7 接头线扫描结果
 Fig.7 The line scanning result of the welded joint

2.3 接头力学性能

对焊接接头进行显微硬度测定,载荷为 200 N, 加载时间为 10 s,每隔 0.1 mm 取一个点进行测试,结果如图 10 所示。可以看出焊缝的硬度介于母材 304 不锈钢和 N6 纯镍之间,镍侧热影响区硬度略低于母材,304 不锈钢侧热影响区出现硬化。根据 hall-petch 公式,镍侧热影响区硬度下降与此处晶粒粗大有关^[17]。304 不锈钢侧热影响区产生硬化是空冷下自淬火效应所致。

对焊接试样进行拉伸试验,拉伸的速度为 0.5 mm/min。为降低试验的误差,对同一个焊缝取两组试样进行拉伸试验,抗拉强度分别为 419 MPa

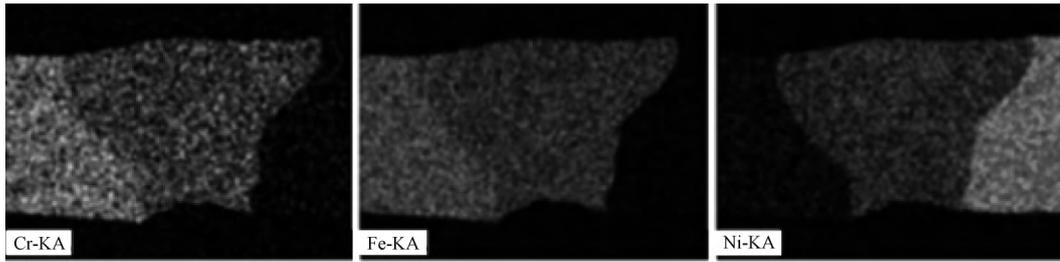


图 9 接头成分面扫描

Fig.9 EDS mapping scanning of the welded joint

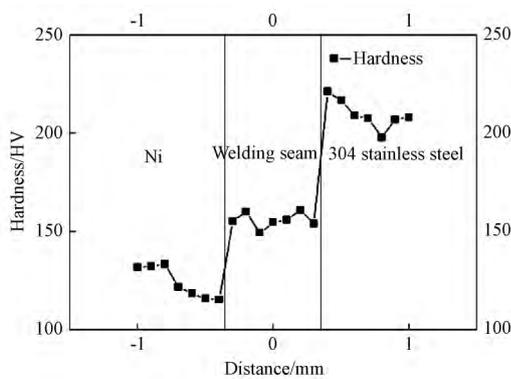


图 10 焊接接头显微硬度分布

Fig.10 Distributions of micro-hardness of the welded joint

和 423 MPa ,断裂部位均位于焊缝处(如图 11)。纯镍 N6 母材的抗拉强度为 446 MPa ,焊缝强度达到母材的 90% 以上。

如图 12 所示 ,断口形貌由具有脆性断裂特征的平面和具有韧性断裂特征的韧窝组成 ,断裂模式为准解理断裂 ,从断口形貌可以看出部分区域存在等轴



图 11 拉伸试样断裂位置

Fig.11 Tensile fracture position of the dissimilar welded joint

韧窝 ,部分韧窝有取向 ,为剪切韧窝。而又有部分区域存在平坦的“类解理”小平面、微孔及撕裂棱 ,为解理断裂特征。因此可以判断接头断裂的模式应为准解理断裂。准解理断裂在不同部位产生解理裂纹核 ,扩展成解理刻面 ,最后以塑性方式撕裂。从图 12(b) 可以看出 ,解理面小 ,且周围有较多的撕裂棱。这种混合断裂模式经常发生于具有较高强度和良好塑形的材料^[18]。

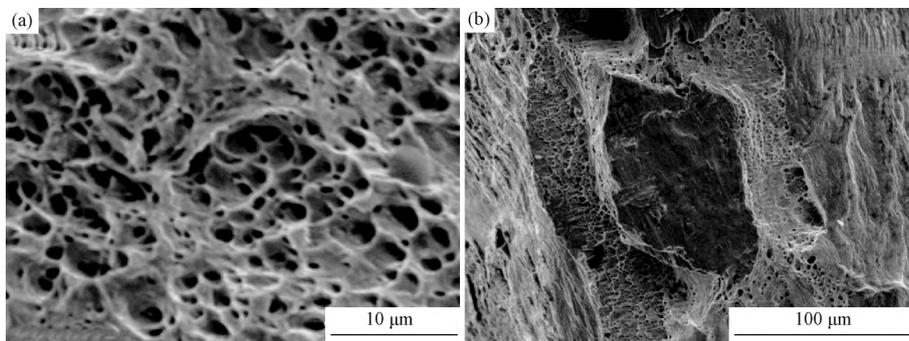


图 12 断口 SEM 扫描图

Fig.12 Fracture morphology of the tensile specimen (a) characteristic of dimples; (b) characteristic of brittle

3 结论

1) 采用激光对 N6 纯镍和 304 不锈钢进行异种金属焊接 ,获得了外观平整、热影响区较窄、质量良好的焊接接头;

2) 随着激光功率的增大 ,激光作用在焊缝处的能量升高 ,焊缝的熔深、熔宽以及深宽比均呈上升趋势。随着激光离焦距离的减小 ,焊缝熔深增大 ,并在热导向深熔焊转变时 ,熔深会发生突变;

3) N6 纯镍和 304 不锈钢母材均为奥氏体组织, 镍侧母材热影响区发生明显的晶粒长大, 并伴有孪晶产生。焊缝区域, 两侧熔合线附近为向焊缝中心区域生长的柱状晶, 焊缝中心区域存在细小的胞晶区域。焊缝主要组成元素为 Fe、Cr 和 Ni, 3 种元素分布均匀且混合充分, 在不锈钢与焊缝熔合线处, 有过渡层

出现;

4) 焊缝硬度介于 N6 纯镍和 304 不锈钢之间, 纯镍母材热影响区硬度略有下降, 304 不锈钢热影响区有淬硬倾向。拉伸实验断口位于焊缝处, 抗拉强度达到镍母材的 90% 以上, 接头的断裂机制为塑形和脆性断裂混合的准解理断裂机制。

参 考 文 献

- [1] Davis J R. Nickel, Cobalt and Their Alloys [M]. ASM International 2000.
- [2] Mishin O V, Gertsman V Y, Alexandrov I V, et al. Grain boundary character distributions and mechanical properties of 304 stainless steel 1 [J]. Materials Science & Engineering A, 1996, 212(2): 281-283.
- [3] 周峰, 赵霞, 查向东, 等. 一种新型镍基耐蚀合金与 304 奥氏体不锈钢异种金属焊接接头的组织和力学性能 [J]. 金属学报, 2014, 50(11): 1335-1342.
ZHOU Feng, ZHAO Xia, ZHA Xiang-dong, et al. Microstructure and mechanical properties of the welding joint of a new corrosion-resisting nickel-based alloy and 304 austenitic stainless steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(11): 1335-1342.
- [4] Li G, Huang J, Wu Y. An investigation on microstructure and properties of dissimilar welded Inconel 625 and SUS 304 using high-power CO₂ laser [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(5): 1203-1214.
- [5] Sireesha M, Shankar V, Albert S K, et al. Microstructural features of dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and alloy 800 [J]. Materials Science & Engineering A, 2000, 292(1): 74-82.
- [6] Zhao Y, Sato Y S, Kokawa H, et al. Microstructure and properties of friction stir welded high strength Fe-36 wt% Ni alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 528(25/26): 7768-7773.
- [7] Shakil M, Ahmad M, Tariq N H, et al. Microstructure and hardness studies of electron beam welded Inconel 625 and stainless steel 304L [J]. Vacuum, 2014, 110: 121-126.
- [8] 赵虎林, 王希靖, 沈亮, 等. 纯镍与 304 奥氏体不锈钢 TIG 焊接工艺及组织性能 [J]. 电焊机, 2014, 44(8): 55-58.
ZHAO Hu-lin, WANG Xi-jing, SHEN Liang, et al. Research on welding process and organization performance of pure nickel and 304 austenitic stainless steel TIG [J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(8): 55-58.
- [9] 刘秀波, 虞钢, 庞铭, 等. K418 合金和 42CrMo 钢激光焊焊缝的微观组织 [J]. 材料热处理学报, 2009, 30(6): 126-129.
LIU Xiu-bo, YU Gang, PANG Ming, et al. Microstructure of laser welded seam of cast Ni-base superalloy K418 and 42CrMo steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(6): 126-129.
- [10] 陈武柱. 激光焊接与切割质量控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
CHUN Wu-zhu. Quality control of laser welding and cutting [J]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [11] Sun Z, Jon J C. Laser welding of dissimilar metal combinations [J]. Journal of Materials Science, 1995, 30(17): 4205-4214.
- [12] 虞钢, 赵树森, 张永杰, 等. 异种金属激光焊接关键问题研究 [J]. 中国激光, 2009, 36(2): 261-268.
YU Gang, ZHAO Shu-sen, ZHANG Yong-jie, et al. Research on key issues of laser welding of dissimilar metal [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(2): 261-268.
- [13] 李永菊. 热处理对 Ni-18Fe-16Cr 合金组织和性能的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [14] Burke J E, Turnbull D. Recrystallization and grain growth [J]. Progress in Metal Physics, 1952, 3(3): 220-292.
- [15] 邱君芳. 镍的显微组织及金相腐蚀特性 [J]. 稀有金属材料与工程, 1992(2): 67.
QIU Jun-fang. Microstructure and metallographic corrosion characteristics of nickel [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1992(2): 67.
- [16] 陈国良, 谢锡善, 倪克铨, 等. 铁基高温合金中 μ 相和 σ 相引起的晶界脆化 [J]. 金属学报, 1981, 17(1): 1-9, 113-114.
CHEN Guo-liang, XIE Xi-shan, NI Ke-quan, et al. intergranular embrittlement caused by μ phase and σ phase in theiron-base superalloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1981, 17(1): 1-9, 113-114.
- [17] Lehto P, Remes H, Saukkonen T, et al. Influence of grain size distribution on the Hall-Petch relationship of welded structural steel [J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 592(3): 28-39.
- [18] 廖乾初, 孙福玉, 蓝芬兰. 准解理断裂的本质 [J]. 金属学报, 1979, 15(2): 259-313.
LIAO Qian-chu, SUN Fu-yu, LAN Fen-lan, et al. The innate character of quasi-cleavage fracture [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1979, 15(2): 259-313.