

0Cr17Ni4Cu4Nb与3Cr19Ni9Mo2N不锈钢带 激光焊接接头组织及性能

郭晨亮 武婧亭 焦云雷 薛江红

(天津航天机电设备研究所, 天津 300301)

文 摘 针对0.40 mm厚度0Cr17Ni4Cu4Nb与0.26 mm厚度3Cr19Ni9Mo2N不锈钢搭接接头开展激光焊接工艺试验,研究焊接接头组织及性能。焊接试件结构为搭接焊接3条纵向焊缝,采用HKQW-300激光焊机在氩气保护氛围中焊接,对焊接接头的显微组织和测试力学性能进行分析。结果表明,当在激光功率为20 W,离焦量为+8 mm,速度为180 mm/min并氩气保护的工艺参数下焊接时,0Cr17Ni4Cu4Nb与3Cr19Ni9Mo2N材料激光焊接搭接接头的焊缝中组织为铁素体魏氏组织,焊缝熔宽为335.3~404.0 μm ,热影响区(HAZ)较窄;焊接接头的拉断力优于5.493 9 kN,优于3Cr19Ni9Mo2N母材强化后拉断力的73.7%,达到产品焊接性能要求指标。焊接接头性能良好,焊缝无虚焊、焊透等现象,此工艺方法在某卫星的太阳翼压紧释放机构压紧带研制中推广应用。

关键词 激光焊接,压紧带,0Cr17Ni4Cu4Nb,3Cr19Ni9Mo2N,显微组织,力学性能

中图分类号: TG456.7

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.06.011

Microstructure and Properties of 0Cr17Ni4Cu4Nb and 3Cr19Ni9Mo2N Stainless Steel Joint With Laser Welding

GUO Chenliang WU Jingting JIAO Yunlei XUE Jianghong

(Tianjin Aerospace Institute of Electrical and Mechanical Equipment, Tianjin 300301)

Abstract A laser welding process test was conducted on the lap joint of 0.40mm 0Cr17Ni4Cu4Nb and 0.26mm 3Cr19Ni9Mo2N stainless steel to investigate the microstructure and properties of the welded joint. The structure of the welded specimen was composed of three longitudinal welds created through lap welding. The HKQW-300 laser welding machine was utilized to perform welding joints in an argon atmosphere. The microstructure and mechanical properties of the welded joints were analyzed through tests. The results indicate that, when welding under the process parameters of a laser power of 20W, a defocusing amount of +8mm, a speed of 180mm/min, and argon protection, the weld of the 0Cr17Ni4Cu4Nb and 3Cr19Ni9Mo2N laser welded lap joint exhibits a ferritic weisman structure, with the weld width ranging from 335.3 to 404.0 μm . The heat affected zone (HAZ) is narrow. The tensile force of the welded joint exceeds 5.493 9kN, which is better than 73.7% of the tensile force after 3Cr19Ni9Mo2N base metal strengthening, and meets the welding performance requirements of the product. The welding joint demonstrates excellent performance, and the welding seam has no phenomena such as virtual welding and welding penetration. This process has been extensively applied in the development of the pressing belt of the solar wing pressing and releasing mechanism for a satellite.

Key words Laser welding, Compact belt, 0Cr17Ni4Cu4Nb, 3Cr19Ni9Mo2N, Microstructure, Mechanical properties

0 引言

带式压紧释放机构由于质量轻、承载高等特点被广泛应用于卫星天线压紧释放机构、火箭连接分

离机构、太阳翼压紧释放机构等,其原理是利用压紧带将压紧对象包裹,在动作元件工作时压紧带组件释放压紧对象,实现压紧释放功能。压紧带组件一

收稿日期:2022-12-27

第一作者简介:郭晨亮,1983年出生,高级工程师,研究方向为航天器机构制造技术。E-mail: liangg-1111@163.com

般由同种材料的压紧带与固定端组成,采用焊接方式连接。在某航天器的太阳翼带式压紧释放机构中,由于高弹性和高承载性能需求,压紧带组件采用马氏体组织 0Cr17Ni4Cu4Nb 与奥氏体组织 3Cr19Ni9Mo2N 不锈钢材料焊接连接,不锈钢具有耐腐蚀性优良、无磁性、具有韧性和塑性较高等典型优势,其在核工业制造、航空航天制造等领域均被大量应用^[1]。但不锈钢的热导率较低,线胀系数较大,焊接过程容易产生大的焊接变形,造成材料的烧穿与变形等缺陷。目前焊接能量集中的焊接方法有电子束焊、等离子焊、极惰性气体保护焊(TIG)、激光焊等。由于压紧带的材料厚度分别为 0.26、0.4 mm,产品对焊接强度、表面质量等高要求因素,防止产生焊穿、产生变形和表面飞溅等缺陷,故采用连续激光焊接工艺。

连续激光焊接属于高能量密度焊接技术,具有热输入量小、熔池深宽比大、热影响区小、工件收缩变形较小^[2]优点;同时,其焊道狭窄表面质量好,焊缝强度高,激光控制器比较灵活,焊接速度快,后续处理工序简单等优点,机构焊接比别的焊接方法更加适用薄板焊接^[3-5]。韩丽梅等^[6]针对 304 和 316 不锈钢结构进行了激光焊接研究,发现更高的能量下 304 不锈钢才能使抗拉强度最大和接合宽度最小。Q. Q. GUAN 等^[7]进一步发现焊接速度是影响接头机械强度的主要参数。F. Y. LIU 等^[8]则指出,不同的冷却速率导致焊接接头的微观组织不同,进而解释了接头机械性能的差异。陈英杰等^[9]则对 1.5 mm 厚 304 不锈钢板激光焊搭接接头组织与力学性能进行了分析,结果发现,细小的等轴晶在焊缝中心出现,柱状晶组织则在焊缝边缘出现,同时焊缝抗拉强度也随焊接激光功率增加而增加,且在 2.6 kW 时达到最大值。R. OYYARAVELU 等^[10]亦采用 2 kW 焊接功率,发现由于激光焊件的冷却速度更快,焊缝熔合区存在马氏体相。S. S. NAYAK 等^[11]进一步证实了热影响区微观组织受冷却速率影响明显。此外,在低碳钢焊接中,研究发现熔融区域凝固后的冷却循环中,米塞斯应力达到较高的值^[12]。吴勇华等^[13]研究了 0.5 mm 的 USU304 奥氏体不锈钢薄板激光拼接焊接工艺,试验结果表明,在适合的工艺参数下焊缝成形好、无氧化、无飞溅等缺陷,组织细小致密,抗拉强度与母材相当。龚五堂等^[14]研究则发现熔深对焊接接头强度有着最大的影响,而激光功率又是影响熔深的最主要工艺参数^[15]。陈银银^[16]对 0.05 mm 的 316 不锈钢激光焊接工艺进行了研究,试验结果表明,焊

缝抗拉强度最大可达 167 MPa,此时对应的焊接速度为 100 mm/s、离焦量为 0 mm 以及功率 70 W。此外,焊接面表面粗糙度水平对熔深具有较大影响^[17],而真空下的激光焊接显示出优异的焊接质量^[18-19],但接头焊接区域依旧是发生疲劳破坏的薄弱环节。然而,以上研究虽然对不锈钢结构激光焊接进行了较全面研究,但在工程实践中仍存在许多不足。典型的,某航天器的太阳翼压紧带组件采用马氏体组织 0Cr17Ni4Cu4Nb 与奥氏体组织 3Cr19Ni9Mo2N 不锈钢材料焊接连接,要求 3 条焊缝试片拉断力大于 4.6 kN,焊缝表面不允许有飞溅和裂纹,焊缝不允许有未焊透、未融合及气孔,整体质量符合《GB/T37778—2019 不锈钢激光焊接推荐工艺规范》B 级缺陷质量等级^[20]。其主要难点在于材料组织不同、最薄厚度 0.26 mm,焊缝尺寸小,3 条焊缝间距近,力学性能高。而异种组织材料且焊接厚度非常薄的焊接工艺研究很少,焊接工艺成为制造过程关键技术。本文研究了厚度 0.40 mm 厚的 0Cr17Ni4Cu4Nb 马氏体组织不锈钢与 0.26 mm 厚的 3Cr19Ni9Mo2N 奥氏体组织不锈钢激光焊接搭接接头的组织和力学性能,揭示焊接接头焊缝的显微组织和断裂失效形式,并评估焊接工艺参数的正确性及焊接接头拉伸性能,为其他航天器压紧释放机构应用提供有价值的参考。压紧带组件示意图如图 1 所示。

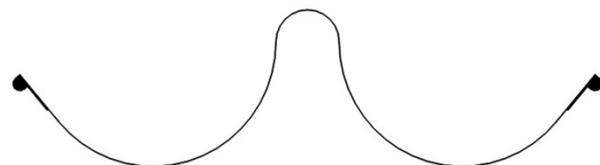


图 1 压紧带组件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of compression belt assembly

1 试验

1.1 材料

0Cr17Ni4Cu4Nb 为马氏体不锈钢,材料标准 GJB2294—1995,热轧固熔态,轧制为厚度 0.4 mm。焊接前对材料进行调质处理,抗拉强度 1.3 GPa 以上,如表 1 所示。3Cr19Ni9Mo2N 为奥氏体不锈钢,材料标准为协议,冷轧态,带材厚度为 0.26 mm。抗拉强度 1.9 GPa 以上,如表 2 所示。

表 1 0Cr17Ni4Cu4Nb 化学成分及强度
Tab. 1 Chemical composition and strength of 0Cr17Ni4Cu4Nb

成分/wt%							抗拉强度/GPa	
C	P	S	Cr	Ni	Cu	Nb	调质处理前	调质处理后
0.04	0.024	0.001	15.48	4.26	3.38	0.26	1.19	1.35

表2 3Cr19Ni9Mo2N化学成分及强度

Tab. 2 Chemical composition and strength of 3Cr19Ni9Mo2N

成分/wt%									拉强度/GPa	
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	固溶态抗	热处理后
0.27	1.6	2.1	0.022	0.001	19.09	9.64	1.74	0.23	0.784	1.91

1.2 试件

按标准《GB/T2651—2003 金属材料焊缝破坏性试验 横向拉伸试验》制作激光焊接搭接接头试片^[21]。焊接试件采用搭接焊接方式。设置3条纵向焊缝,焊缝上表面宽1 mm,长度8 mm,间隔距离4.5 mm,3条焊缝居中均匀分布,上下完全熔透。焊接接头结构及焊缝形式如图2所示。

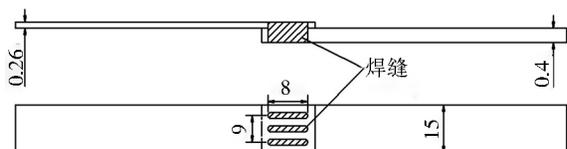


图2 3Cr19Ni9Mo2N和0Cr17Ni4Cu4Nb焊接试片示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 3Cr19Ni9Mo2N and 0Cr17Ni4Cu4Nb welding specimens

1.3 焊接设备

北京汇科恒源激光技术有限公司的型号HKQW-300激光焊接机,在脉冲模式下,最高峰值功率300 W。

1.4 焊接工艺与性能测试

焊接前清理焊接试件表面氧化层及灰尘、油污。试件与工装紧贴装配后固定在激光焊接机工作台上,确保焊接前试件相对位置不变和防止焊接后的不发生变形。为保证使两种材料贴合紧密和方便压紧固定位置,防止先焊接两侧使中间产生轻微变形,使间隙增大,影响焊接效果,采用先中间后两边焊接顺序。焊缝上表面和下表面采用99.999%的高纯Ar作为保护气^[22],并且保持流量值10 L/min。参考《GB/T37778—2019 不锈钢激光焊接推荐工艺规范》,基于多次焊接试验结果,焊接工艺参数如表3所示。焊接

装卡如图3所示。

按《GB/T13298—2015 金属显微组织检验方法》,在垂直于焊缝方向取样,采用蔡司AxioImager金相显微镜对焊接试件母材、焊缝、热影响区进行金相显微组织观察。按《GB/T4340.1—2009 金属材料维氏硬度试验第1部分:试验方法》,在垂直于焊缝方向取样,采用华银HV-1000A显微硬度计测试焊接接头母材、焊缝、热影响区的硬度值。《GB/T37778—2019 不锈钢激光焊接推荐工艺规范》中规定搭接接头试样的剪切拉伸强度评价方法,但产品焊缝为3条纵向焊缝结构,与标准中横向单条焊缝结构不同,故采用室温拉断力对试样力学性能评价。采用UTM5105X电子万能试验机,拉伸速率为5 mm/min。

表3 激光焊接工艺参数

Tab. 3 Laser welding process parameters

激光功率 P/W	焊接速度 $v/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	离焦量 f/mm	脉冲宽度 t_p/ms
20	180	+8	8

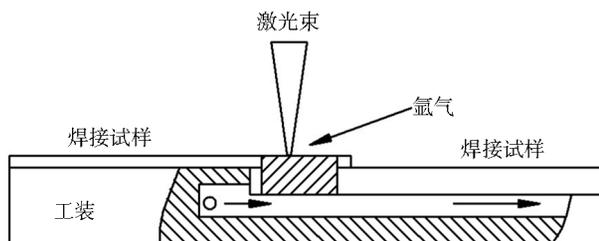


图3 激光焊接过程示意图

Fig. 3 Diagram of laser welding process

2 接头组织与性能分析

2.1 焊点外观分析

按照制定的工艺参数焊接3件试件,整体外观如图4(a)焊缝正面图和图4(b)焊缝背面图。



(a) 焊缝正面



(b) 焊缝背面

图4 激光焊接接头的焊缝

Fig. 4 Laser welding of joint welds

图5(a)S1试件的焊缝放大观察外观形貌,图5(b)为S1试件的1#焊缝正面和焊缝背面对应的接头宏观形貌。焊接试件结构为薄上厚下,正面和背面焊缝受到高纯度氩气的氛围保护,采用低功率、正离焦量、慢度焊接的工艺焊接后,试件焊缝无论正面和背面都表现出良好的成型效果,焊缝正面和背面整

体平整光滑呈典型的鱼鳞状,颜色呈金属本色稍有氧化色,无明显的焊瘤、气孔、飞溅、裂纹等质量缺陷。但在收弧点形成较浅弧坑。焊缝正面熔宽较宽,而焊缝背面熔宽较窄,焊缝整体呈梯形状,表明焊缝已焊透,焊缝连续,主板和搭板形成了良好的结合,表现最大的焊缝力学性能。

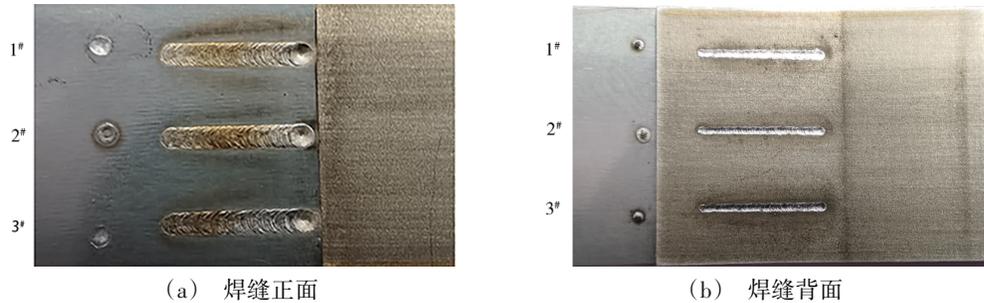


图5 S1接头焊缝外观图

Fig. 5 S1 Appearance of joint weld

2.2 焊缝微观组织分析

图6为两种母材合金的组织。图6(a)为3Cr19Ni9Mo2N的母材组织为球状珠光体,是由铁素体和渗碳体组成的机械混合物,渗碳体呈球粒状分布在铁素体基体上。进一步如图6(b)所示,

0Cr17Ni4Cu4Nb母材呈现出明显条状回火马氏体。同时能在马氏体上观察到弥散分布的点状析出物,同时局部少量的铁素体和残余奥氏体亦可见,金属间化合物和各种碳化物在晶内和晶界亦有析出。

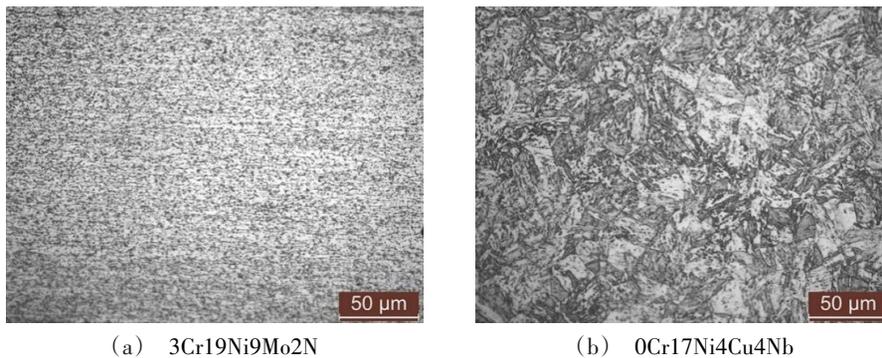


图6 两种母材合金的金相组织图 500×

Fig. 6 Metallographic structure diagram of two base metal alloys

图7(a)为S1试样1#焊缝焊核区的微观组织。焊缝区域组织中未观察到气孔和裂纹缺陷,焊缝熔合区微观组织主要为铁素体魏氏组织,焊缝熔宽为335.3~404.0 μm。如图7(b)所示,由于激光能量密度高,奥氏体晶粒在较快的冷却速度下形成许多平行的铁素体针片,近似平行呈羽毛状的向斜上方生长的柱状晶。在焊接过程中,在Ar3至Ar1冷却较快,会析出铁素体魏氏组织,导致焊缝力学性能将有所下降,尤其是断面收缩率将下降很多。

(HAZ)宽度为160.0~276.0 μm。如图7(c)和图7(d)所示,焊接过程中热影响区(HAZ)显微组织形成了明显的差异性,主要由于不同区域经历了不同的温度峰值。焊接过程中,峰值温度在Ac3以上,热影响区转化为完全奥氏体,随后冷却过程中进一步演变为各种尺寸及大小的淬火马氏体。然而,奥氏体组织长大和马氏体组织粗化则不明显,原因主要是焊接过程热输入不充分,焊缝在气体作用下发生快速冷却。此外,在峰值温度Ac1~Ac3之间时,热影响区(HAZ)则部分转变为奥氏体组织,最终获得混合组织,包括马氏体和残余奥氏体,并进一步导致强度和韧性降低。

热影响区(HAZ)与焊缝熔合区有明显的分界线。3Cr19Ni9Mo2N材料的热影响区(HAZ)宽度为15.0~22.0 μm。0Cr17Ni4Cu4Nb材料的热影响区

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第6期

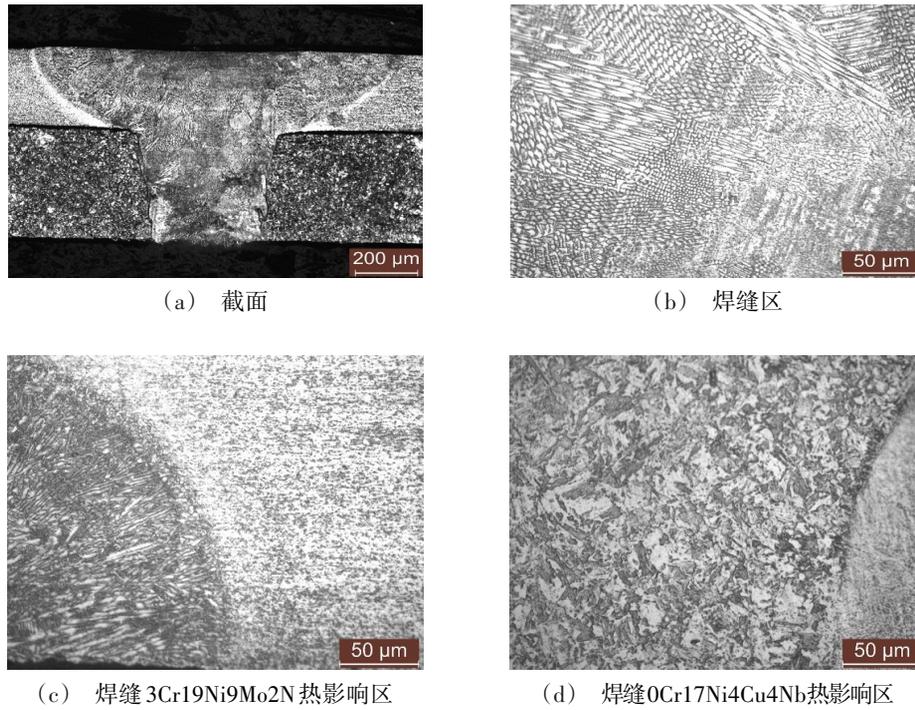


图7 S1试样1#焊缝焊核区金相组织图 500×

Fig. 7 Metallographic structure of core zone of S1 sample 1# weld

2.3 焊缝显微硬度分布

焊接接头S1试样1#焊缝及热影响区硬度测试位置分布见图8,硬度(HV)分布曲线见图9,焊接接头S1试样1#焊缝及热影响区硬度曲线沿焊缝中心呈中

心对称分布,且母材硬度值>热影响区硬度值>焊缝中心硬度值,焊缝中心硬度值为265.0~330.0HV。由于焊缝熔合区为铁素体魏氏组织,使力学性能降低,也是焊缝中心硬度值降低的原因。

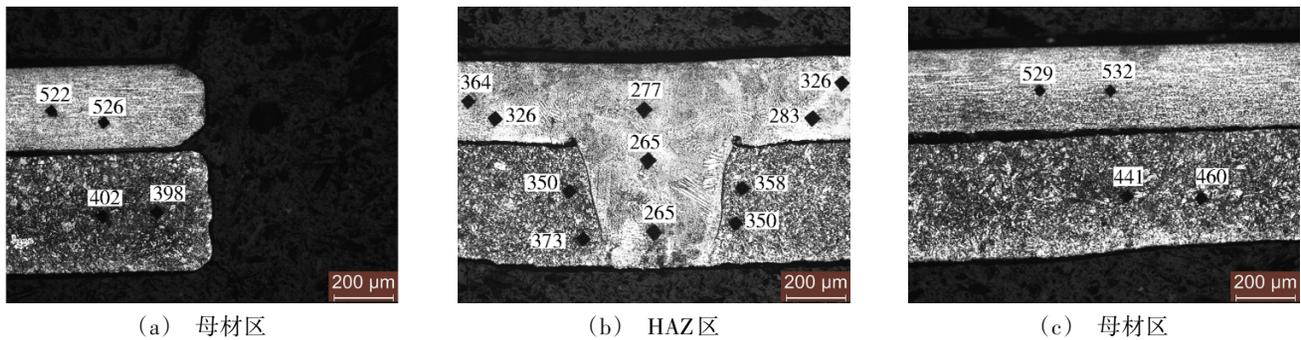


图8 S1试样的显微硬度(HV)位置分布图 100×

Fig. 8 Position distribution of microhardness (HV) of S1 sample

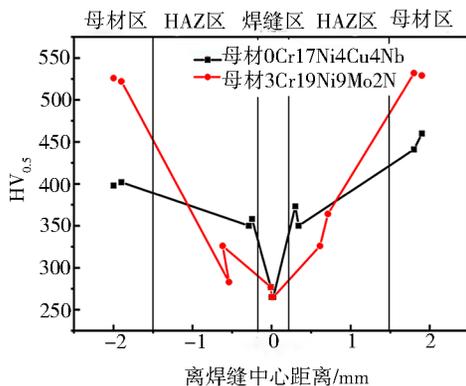


图9 S1试样1#的硬度(HV)分布曲线

Fig. 9 Hardness (HV) distribution curve of S1 sample 1#

2.4 接头力学性能分析

焊接试件S1、S2、S3的拉断力依次为5.594 4、5.549 9、5.493 9 kN。经过强化后的0.26 mm厚度3Cr19Ni9Mo2N抗拉强度值换算成拉断力7.449 5 kN。焊接试件拉断力与母材拉断力相比较,焊接试件拉断力达到母材的73.7%以上。室温下拉伸载荷-位移曲线如图10所示,激光焊接接头在室温下的载荷-位移曲线为连续过渡型,弹性变形较大,没有出现很明显的屈服阶段,属于典型的高强钢拉伸曲线,与材料特性相一致。

对焊接接头的断口进行扫描表征。拉伸断裂部位及断口形貌如图 11 所示,拉伸断裂位置均位于厚度 0.26 mm 的 3Cr19Ni9Mo2N 材料的焊缝起弧点。可以看出焊缝断口存在明显的韧窝,焊点可见树枝晶组织,扩展区断口大部分为等轴韧窝形貌,可判断为过载断裂。其原因是焊缝组织为铁素体魏氏组织,使材料脆性增加,韧性降低,在载荷作用下,出现无屈服断裂,与拉伸载荷-位移曲线表现一致。

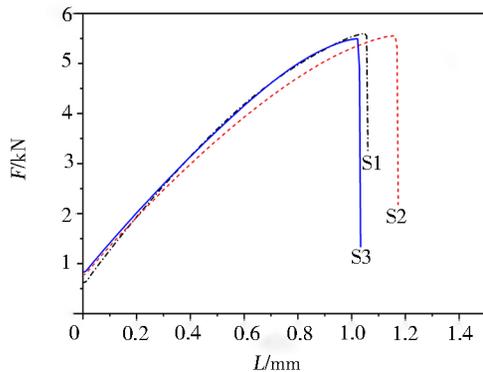
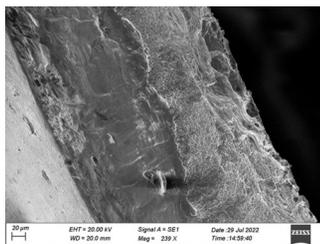
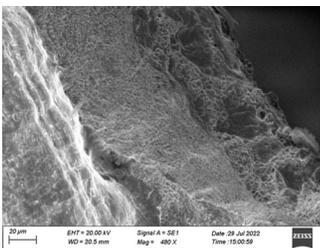


图 10 试件拉伸载荷-位移图

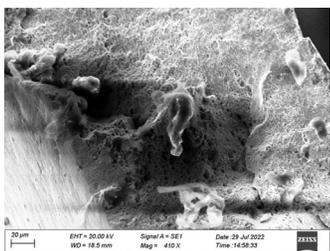
Fig. 10 Tensile load-displacement diagram of specimen



(a) 断口 239×



(b) 焊点断口 480×



(c) 断口扩展区 410×

图 11 S1 试样电子显微镜的断口形貌

Fig. 11 Fracture surface morphology of the S1 sample under SEM

3 结论

(1) 采用脉冲光纤激光焊接 0.40 mm 厚度 0Cr17Ni4Cu4Nb 与 0.26 mm 厚度 3Cr19Ni9Mo2N 不锈钢搭接接头时,小功率、低速度和正离焦的工艺参数选择方案较佳,其中功率 20 W、速度 180 mm/min 和离焦量为 +8 mm 时可获得较好的焊缝外观及物理表面形貌。

(2) 对焊缝进行金相检测,焊缝熔合区组织为魏氏体+铁素体,近似平行呈羽毛状的柱状晶。熔宽达到 335.3 ~ 404.0 μm,符合焊接标准要求。两种母材的热影响区(HAZ)宽度较窄。

(3) 激光焊接接头试件的最大室温拉断力为 5.594 4 kN,最小室温拉断力为 5.493 9 kN,与 0.26 mm 厚度 3Cr19Ni9Mo2N 材料室温拉断力相比较,达到母材的拉断力 73.7% 以上。焊接接头试件断口呈现等轴韧窝形貌,属于塑性过载断裂,呈现出较大的抗拉强度。

参考文献

- [1] 王浩军,张兵宪,李静,等. 激光焊接工艺对 304 不锈钢薄板搭接接头组织性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50 (01):30-34, 39.
- [2] WANG H J, ZHANG B X, LI J, et al. Effect of laser welding process on microstructure and properties of 304 stainless steel sheet lap joint [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (01):30-34, 39.
- [3] CHOON M L, WAN S W, JONG T B, et al. Laser and arc manufacturing processes: a review [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2016, 17, 973-985.
- [4] 刘其斌. 激光加工技术及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社, 2007.
- [5] LIU Q B. Laser processing technology and its application [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [6] 景财年,倪晓梅,范吉超,等. 激光焊接工艺对 TRIP590 钢焊接接头组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(S1):96-101.
- [7] JING C N, NI X M, FAN J C, et al. Effect of laser welding processes on microstructure and mechanical properties of TRIP590 steel welded joints [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(S1):96-101.
- [8] KANGDA H, GENG L, MING G, et al. Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of austenitic stainless steel [J]. Journal of Materials Processing Tech., 2015, 225.
- [9] 韩丽梅. 中厚板 304 不锈钢激光-MIG 复合焊工艺研究[D]. 沈阳工业大学, 2018.
- [10] HAN L M. Study on laser-MIG hybrid welding process for medium thickness plate of 304 stainless steel [D]. Shenyang University of Technology, 2018.

- [7] GUAN Qianqian, LONG Jiangqi, YU Ping, et al. Effect of steel to aluminum laser welding parameters on mechanical properties of weld beads [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 111: 387-394.
- [8] LIU Fuyun, TAN Caiwang, GONG Xiangtao, et al. A comparative study on microstructure and mechanical properties of HG785D steel joint produced by hybrid laser-MAG welding and laser welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 128: 106247.
- [9] 陈英杰,朱加雷,焦向东. 304 不锈钢激光搭接焊接头的组织及力学性能[J]. *电焊机*, 2017, 47(02):76-79.
- CHEN Y J, ZHU J L, JIAO X D. Microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel sheet laser welded lap joint[J]. *Electric Welding Machine*, 2017, 47(02):76-79.
- [10] OYYARAVELU R, KUPPAN P, ARIVAZHAGAN N. Metallurgical and mechanical properties of laser welded high strength low alloy steel[J]. *Journal of Advanced Research*, 2016, 7(3):463-472.
- [11] NAYAK S S, BIRO E, ZHOU Y. 5 - Laser welding of advanced high-strength steels [J]. *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)*, 2015, 71-92.
- [12] YILBAS B S, ARIF A F M, ALEEM B J A. Laser welding of low carbon steel and thermal stress analysis[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(5): 760-768.
- [13] 吴勇华,刘皓贤,钟永华,等. 不锈钢薄板激光焊接工艺分析[J]. *应用激光*, 2018, 38(05):765-772.
- WU Y H, LIU H X, ZHONG Y H, et al. Analysis of laser welding process of stainless steel sheet [J]. *Applied Laser*, 2018, 38(05):765-772.
- [14] 龚五堂,雷黎明. 0.2mm 不锈钢外观件激光精密焊接工艺研究[J]. *应用激光*, 2018, 38(04):597-600.
- GONG W T, LEI L M. Study on laser precision welding process of 0.2 mm stainless steel appearance parts[J]. *Applied Laser*, 2018, 38(04):597-600.
- [15] ATABAKI M M, YAZDIAN N, MA J, et al. High power laser welding of thick steel plates in a horizontal butt joint configuration[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 83: 1-12.
- [16] 陈银银. 厚度为 0.05mm 的 316 不锈钢激光焊接工艺[J]. *精密成形工程*, 2021, 13(05):187-192.
- CHEN Y Y. Study on laser welding process of 316 stainless steel with thickness of 0.05 mm [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2021, 13(05):187-192.
- [17] MIKHAIL Sokolov, ANTTI Salminen, VLADISLAV Somonov, et al. Laser welding of structural steels: Influence of the edge roughness level[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2064-2071.
- [18] MENG Jiang, WANG Tao, YANBIN Chen, et al. Comparison of processing window in full penetration laser welding of thick high-strength steel under atmosphere and sub-atmosphere [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 109: 449-455.
- [19] NARSIMHACHARY D, DUTTA K, SHARIFF S M, et al. Mechanical and microstructural characterization of laser weld-brazed AA6082-galvanized steel joint [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 263: 21-32.
- [20] GB/T 37778-2019, 不锈钢激光焊接推荐工艺规范[S].
- GB/T 37778-2019, Recommended process specification for laser welding of stainless steel[S].
- [21] GB/T 2651-2008, 焊接接头拉伸试验方法[S].
- GB/T 2651-2008, Tensile test method for welded joints[S].
- [22] 张义福,苏展展,张德勤,等. 氩气流量对 304 不锈钢激光焊接接头组织性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(05):33-36.
- ZHANG Y F, SU Z Z, ZHANG D Q, et al. Effect of argon flow rate on microstructure and properties of 304 stainless steel laser welded joint [J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(05): 33-36.