

文章编号 1004-924X(2017)增-0135-09

## 激光焊接参数对 C-276/304 搭接焊缝组织及力学性能的影响

周思雨,马广义,柴东升,于京令,程 波,吴东江\*

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁 大连 116024)

**摘要:**为实现 CAP1400 核主泵屏蔽套端部的可靠密封,采用 Nd:YAG 脉冲激光对 C-276 哈氏合金与奥氏体不锈钢 304 进行异质材料的搭接焊接。采用光学显微镜及扫描电子显微镜观测焊缝形貌及微观组织,运用能谱仪检测焊缝内的元素成分,利用电子探针测量焊缝内的元素分布,通过机械撕裂实验评价焊接接头的力学性能。机械撕裂实验结果指出,不同脉冲能量下,断裂均发生于焊缝,且为拉伸断裂形式,当脉冲能量为 3~4 J 时,焊缝抗机械撕裂强度达到最大,约为 78 N/mm。优化的焊接参数范围为:脉冲能量 3~4 J、焊接速度 125~200 mm/min、脉冲频率 30 Hz、脉宽 6~8 ms、离焦距 -1~0 mm。结果表明,脉冲能量和脉冲频率对搭接焊缝结合宽度影响较大,但过大脉冲能量及脉冲频率、过小脉冲宽度会造成焊缝表面的塌陷及严重飞溅。随着脉冲能量的增大,304 母材未熔合区宽度下降,焊缝内析出相含量降低。在较高的脉冲能量下,焊缝内柱状晶及等轴晶组织粗化,由元素烧蚀导致的微孔数量及尺寸较大。随着 304 母材在焊缝内稀释率的提高,焊缝内的元素含量与 304 母材的差异缩小,焊缝内的元素分布均匀程度降低。

**关键词:**激光焊接;哈氏合金;异质焊接;微观组织;力学性能

**中图分类号:**TG456.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172513.0135

## Effect of laser welding parameters on microstructure and mechanical properties of C-276/304 overlapping weld

ZHOU Si-yu, MA Guang-yi, CHAI Dong-sheng, YU Jing-ling, CHENG Bo, WU Dong-jiang\*

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

\* Corresponding author, E-mail: djwudut@dlut.edu.cn

**Abstract:** In order to realize reliable seal welding at the end of CAP1400 nuclear reactor coolant pipe can, Nd:YAG pulsed laser was adopted to implement overlapping weld of dissimilar materials of Hastelloy C-276 and austenite stainless steel 304. Optical microscope and scanning electron microscope were adopted to observe morphology and microstructure of the weld metal. EDS was used to detect elementary composition in weld, electron probe was used to measure element distribution in weld and mechanical property of welded joint was evaluated by mechanical tearing experiment. Result of mechanical tearing experiment indicates that fracture occurs in weld under different plus energy, and it is tension fracture. When plus energy is 3-4 J, mechanical tearing resistance strength of weld reaches the maximum and is about 78 N/mm. Optimized weld parameter scopes are: pulse energy 3-4 J,

收稿日期:2017-05-27;修订日期:2017-06-29.

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(No. 2015CB057305);国家自然科学基金资助项目(No. 51402037)

welding speed 125—200 mm/min, pulse frequency 30 Hz, pulse width 6—8 ms, and defocusing amount  $-1-0$  mm. The result shows that the effect of pulse energy and pulse frequency on joint width of overlapping weld is relatively large, but excessively large pulse energy and pulse frequency and excessively small pulse width will cause collapse and serious spatter of weld surface. Along with increase of pulse energy, width of incomplete fusion zone in the side of 304 parent material decreases, content of precipitated phase in weld is reduced. Under relatively high pulse energy, columnar crystal and equiaxed structure in weld coarsen, quantity and size of micropore caused by element ablation is relatively large. Along with improvement of dilution rate of 304 parent material in weld, difference between element content and 304 parent material in weld is reduced, and uniformity of element distribution in weld decreases.

**Key words:** laser welding; Hastelloy C-276; dissimilar welding; microstructure; mechanical property

## 1 引 言

哈氏合金 C-276 为 Ni-Cr-Mo 基固溶强化合金,其兼具较强的力学性能及优异的耐腐蚀性,因此被广泛应用于核电及石化工业中<sup>[1]</sup>,例如,蒸汽发生器、转化炉及核主泵屏蔽套材料。304 不锈钢作为一种较为常用的奥氏体不锈钢,由于其相对较低的价格及较高的力学及耐腐蚀性能而被广泛应用于核电、石油化工及冶金工业中<sup>[2]</sup>。对于实际生产中的特定结构组件,如在第三代核电站 CAP1400 中核主泵定子屏蔽套(C-276 材料)与法兰盘(304 不锈钢)的端部密封中<sup>[3]</sup>,对于镍基合金及奥氏体不锈钢的异质焊接是必不可缺的。

目前,针对于镍基合金与奥氏体不锈钢的异质材料焊接主要采用传统的弧焊工艺<sup>[4-7]</sup>,但由于弧焊具有较大的热输入量,易导致焊缝微观组织粗大、热影响区较宽及脆性相析出严重等问题,使其无法保证焊缝在长期使用过程中的密封可靠性。相对于弧焊工艺,激光焊接具有较小热输入量及极快的冷却速率,使得焊接接头具有组织细密、热影响区窄、析出相少及变形小等优势,因此适用于镍基合金/奥氏体异质材料的密封焊接,已有少量针对两种材料通过激光焊接相结合的报道<sup>[8]</sup>。

目前,国内外针对 C-276/304 异质材料焊接的报道主要采用两种材料均为薄板的对接焊接形式。吴东江等<sup>[9]</sup>在 C-276/304 异质薄板材料的激光对接焊接中,分析了激光束中心与母材对接缝的偏移量对焊缝元素分布及接头力学性能的影响;

Zhou 等<sup>[10]</sup>在吴东江等的工作基础上,针对激光 C-276/304 异质薄板材料,建立了基于能量非对称分布的焊接接头组织、相结构、力学及耐腐蚀性能预测模型。但在核主泵屏蔽套的结构中,与薄板 C-276 (0.5 mm)屏蔽套端部密封焊接的 304 不锈钢端盖/法兰盘具有较大的厚度,且搭接焊接形式为二者密封焊接的重要形式,因此针对不等厚 C-276/304 异质材料的激光搭接焊接的研究至关重要。Zhou 等<sup>[11]</sup>虽然通过激光对 C-276/304 异质材料进行了搭接焊接实验,但其未研究焊接工艺参数的变化对焊缝组织及性能的影响。

本文通过 Nd:YAG 脉冲激光实现了 C-276/304 不等厚板材的搭接焊接,通过改变激光焊接参数,分析了激光焊接参数对焊缝形貌、组织、元素分布的影响,并以此为依据,揭示焊接参数对接头力学性能的影响机理。

## 2 实验材料与方法

### 2.1 实验材料

实验所用材料分别为 0.5 mm 固溶退火处理 Hastelloy C-276 精轧板材及 2.0 mm 厚 304 奥氏体不锈钢板材,两种母材的化学成分如表 1 所列。

图 1 为 C-276 及 304 母材的光学显微组织图像。由图 1 可知,两种母材均由奥氏体组织及退火孪晶组织组成,其中奥氏体晶粒尺寸约为 20~60  $\mu\text{m}$ ,且 304 母材晶粒尺寸略大于 C-276 母材,C-276 母材存在明显的轧制条纹。

表 1 C-276 和 304 母材的名义化学成分

Tab.1 Normal compositions of C-276 and 304

(wt. %)

Materials	Ni	Fe	Cr	Mo	W	Co	Mn	C	Si	P	S	V
304	8~10.5	Bal.	18~20	-	-	-	≤2	≤0.08	≤1.0	≤0.035	≤0.03	-
C-276	Bal.	4~7	14~16	15~17	3~4.5	≤2.5	≤1.0	≤0.01	≤0.08	≤0.04	≤0.03	≤0.035

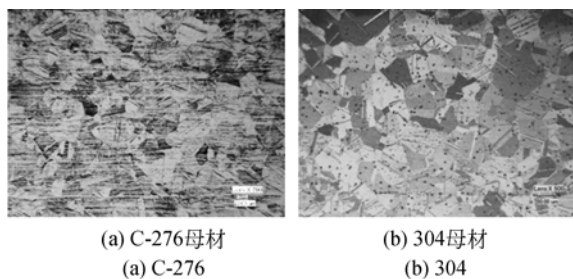


图 1 母材微观组织

Fig.1 Microstructure of base metals

## 2.2 实验设备及方法

实验所用设备为英国 GSI 公司生产的 JK701H 型号 Nd:YAG 固体毫秒脉冲激光器,激光波长为  $1.064 \mu\text{m}$ ,最大功率约为 500 W,焊接模式下,输出为高斯多模光束。准直光束直径约为 23.5 mm,经过焦距为 80 mm 的聚焦透镜聚焦后,光斑的束腰直径约为 0.6 mm,光束垂直于母材表面入射。焊接前,两母材均被裁剪为  $40 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  大小,并用酒精擦拭。异质材料的焊接形式为搭接焊接,将 C-276 薄板置于 304 母材上方,使用铜制夹具使得异质材料紧密接触。焊接过程中采用的工艺参数如表 2 所示。

表 2 激光焊接工艺参数

Tab.2 Variation range of laser welding parameters

焊接参数	参数值
焊接速度/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	100,125,150,175,200
脉冲频率/Hz	20,30,40,50
离焦量/mm	-2,-1,0,1,2
脉宽/ms	4,5,6,7,8
脉冲能量/J	2,3,4,5,6

焊接结束后,为方便金相观测,通过线切割截取试样截面,并通过 SiC 砂纸抛光、金刚石研磨膏研磨制样。选用王水试剂 (30 ml HCl+10 ml

$\text{HNO}_3$ )对 304 母材进行金相腐蚀,选用草酸溶液 (5 g 草酸+50 ml 去离子水)对 C-276 母材及焊缝组织进行金相腐蚀。通过光学显微镜 (OM)及扫描电子显微镜 (SEM)对焊缝形貌及微观组织进行观测;选用能谱仪 (EDS)及电子探针 (EP-MA)对焊缝内元素成分及分布进行测量;由于在核主泵端部密封焊接过程中,焊接接头在打压过程中的抗机械撕裂性能是重要关注指标。因此,需对搭接焊缝的抗机械撕裂性能进行评价,样件尺寸如图 2 所示,其宽度为 25 mm,拉伸速率为 5 mm/min。

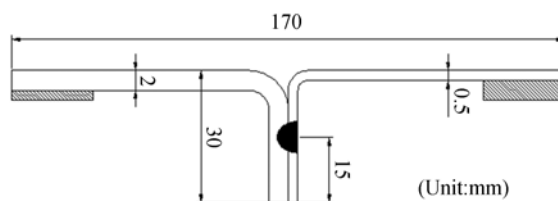


图 2 抗撕裂性能评价样件尺寸示意图

Fig.2 A schematic of anti-tearing test specimen

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 焊接参数对搭接焊缝形貌的影响

本文采用单因素法,分析焊接参数对焊缝形貌及尺寸的影响规律,主要分析的参数为异质材料的结合宽度  $W$ 、熔深  $H$ 、304 不锈钢的稀释率  $D$  (304 熔化面积/焊缝总熔化面积)及焊接形貌特征。

表 3 为脉冲能量为 4.0 J、脉冲频率为 30 Hz、脉宽为 6 ms、离焦量为 0 mm 的条件下,改变焊接速度对焊缝形貌的影响。从表 3 可以看出,当焊接速度为 100 mm/s 时,焊缝表面存在少量飞溅及较小塌陷,焊接速度高于 100 mm/s 时,焊接速度的变化对焊缝结合宽度、熔深及稀释率的影响不显著。

表 3 焊接速度对焊缝形貌的影响

Tab. 3 Effect of welding speed on welding morphology

焊接速度/ (mm · min <sup>-1</sup> )	W/mm	H/mm	D/%	形貌特征
100	0.68	0.80	30	少量飞溅,较小塌陷
125	0.61	0.74	22	无飞溅,表面平整
150	0.6	0.73	23	无飞溅,表面平整
175	0.58	0.78	22	无飞溅,表面平整
200	0.59	0.76	22	无飞溅,表面平整

表 4 为脉冲能量为 4.0 J、焊接速度为 150 mm/s、脉宽为 6 ms、离焦量为 0 mm 的条件下,改变脉冲频率对焊缝形貌的影响。由表 4 可知,由于熔池表面的内的马兰戈尼对流方向为由中心向两边流动<sup>[12]</sup>,当脉冲频率过低时(小于 20 Hz),液态金属凝固过快,焊缝内由表面张力梯度驱动的马兰戈尼对流无法迅速填补焊缝熔化边缘,从而形成咬边。但脉冲频率大于 20 Hz 时,焊缝结合宽度、熔深及稀释率随频率近线性增大,当频率过大时,表面易产生不平及飞溅。

表 4 脉冲频率对焊缝形貌的影响

Tab. 4 Effect of pulse frequency on welding morphology

脉冲频率/Hz	W/mm	H/mm	D/%	形貌特征
20	0.54	0.80	23	无飞溅,两侧咬边
30	0.60	0.81	22	无飞溅,表面平整
40	0.76	0.89	32	少量飞溅,表面不平
50	0.87	1.01	38	较多飞溅,表面不平

表 5 为脉冲能量为 4.0 J、焊接速度为 150 mm/s、脉冲频率为 30 Hz、离焦量为 0 mm 条件下,改变脉冲宽度对焊缝形貌的影响。当脉宽较小,为 4 ms 时,计算得到对应的峰值脉冲功率密度(脉冲能量/焦斑面积)为 3.54 W/cm<sup>2</sup>,大于形成匙孔所需的最小峰值功率密度<sup>[13]</sup>,光束辐照焊件使其熔化后会形成熔池和匙孔,峰值功率密度过大时,匙孔内充满的金属蒸汽及等离子体超过临界值,熔池底部金属在冲力作用下形成严重飞溅,并伴随着焊后的表面塌陷。匙孔形成有助于焊缝熔深提高,因此随着脉冲宽度的下降,焊缝熔深逐步提升,304 稀释率相应地增加。但由于总

的热输入量未随脉宽而改变,因此焊缝的结合宽度无显著变化。

表 5 脉冲宽度对焊缝形貌的影响

Tab. 5 Effect of pulse width on welding morphology

脉冲宽度/ms	W/mm	H/mm	D/%	形貌特征
4	0.57	0.86	42	飞溅严重、表面塌陷
5	0.59	0.83	27	少量飞溅,较小塌陷
6	0.60	0.79	24	无飞溅,表面平整
7	0.61	0.75	19	无飞溅,表面平整
8	0.60	0.72	18	无飞溅,表面平整

表 6 为脉冲能量为 4.0 J、焊接速度为 150 mm/s、脉冲频率为 30 Hz、脉宽为 6 ms 条件下,改变离焦量对焊缝形貌的影响。由表 6 可知,虽然相同的正负离焦量作用于 C-276 上表面的光斑直径相同,但正离焦情况下,沿着厚度方向,光斑直径逐渐增大,功率密度降低;而在负离焦情况下,光斑直径沿着厚度方向减小,功率密度增大,因此相同数值的负离焦参数下的焊缝熔化尺寸远大于正离焦。当离焦量为 0 mm 和 -1 mm 时,能够获得最大的焊缝尺寸。

表 6 离焦量对焊缝形貌的影响

Tab. 6 Effect of defocus distance on welding morphology

离焦量/mm	W/mm	H/mm	D/%	形貌特征
-2	0.50	0.64	5	熔深小、咬边
-1	0.63	0.80	23	无飞溅,表面平整
0	0.60	0.81	22	无飞溅,表面平整
1	0	0.50	0	异质母材未结合
2	0	0.50	0	异质母材未结合

表 7 为焊接速度为 150 mm/s、脉冲频率为 30 Hz、脉宽为 6 ms、离焦量为 0 mm 条件下,改变脉冲能量对焊缝形貌的影响。由表 7 可知,脉冲能量过小(小于 2 J)时,异质材料未形成有效搭接结合,当脉冲能量达到 6 J 时,过大峰值功率密度导致了焊接飞溅及表面塌陷的产生。在形成有效结合的条件下(脉冲能量大于 2 J),随着脉冲能量的增大,焊缝结合宽度、熔深及稀释率参数均呈显著的线性增大。

表 7 脉冲能量对焊缝形貌的影响

Tab. 7 Effect of pulse energy on welding morphology

脉冲能量/J	W/mm	H/mm	D/%	形貌特征
2	0	0.50	0	异质母材未有效结合
3	0.43	0.64	11	无飞溅,表明平整
4	0.59	0.78	23	无飞溅,表面平整
5	0.71	0.98	34	无飞溅,表面平整
6	0.91	1.09	52	飞溅严重,表面塌陷

综上所述,为得到表面平整、无明显飞溅的焊缝,取较优的焊接速度、脉冲频率、脉冲宽度及离焦量参数范围分别为 125~200 mm/min、30 Hz、6~8 ms 及 -1~0 mm。分析可知,脉冲能量为对焊缝尺寸、形貌及稀释率影响最显著的参数。因此,在后续研究中,在选用较优的其他参数条件下,主要讨论改变脉冲能量对焊缝组织及性能的影响规律。

### 3.2 焊接参数对搭接焊缝微观组织的影响

不同脉冲能量下,304 母材与焊缝交界处的微观组织如图 3 所示。分析图 3 中焊缝内微观组织形态可知,靠近 304 母材的熔合线边缘侧存在较窄的未熔合区,为焊接接头抗腐蚀性最薄弱的位置。未熔合区形成主要由焊缝与 304 母材的成分及熔点的较大差异导致<sup>[14]</sup>。因此,随着脉冲能量的增大,焊缝内元素含量与 304 母材的差别减小,未熔合区宽度下降。熔合线边缘靠近焊缝侧存在极窄的平面晶组织,随着向焊缝中心的延伸,其形态逐渐由胞状晶向柱状枝晶转变,其中柱状枝晶占据绝大多数,且其生长机制为由面心立方合金的外延生长方向及焊接温度梯度方向共同决定的竞争生长。成分过冷的大小直接决定了焊缝内的组织形态,由焊缝熔化边界到中心,成分过冷程度逐渐增大,导致了晶粒形态由平面晶向胞状晶再向柱状晶转变。脉冲激光焊接过程中,整个焊缝内的成分过冷均较大,因此焊缝边缘的晶粒主要以柱状枝晶形式生长,平面晶及胞状晶生长趋势被抑制。同时,多个脉冲对焊缝的作用导致了焊后轮廓线的产生,穿过轮廓线,有新的晶粒形成,并未出现柱状晶穿越轮廓线生长的现象。随着脉冲能量的增大,焊接的热输入量增大,焊缝内温度梯度减小,冷却速度  $G \times R$  减小,导致了组织的粗化<sup>[15]</sup>,如图 3 所示,随着脉冲能量的增大,柱

状枝晶一次枝晶臂间距及枝晶长度均有较大增加。

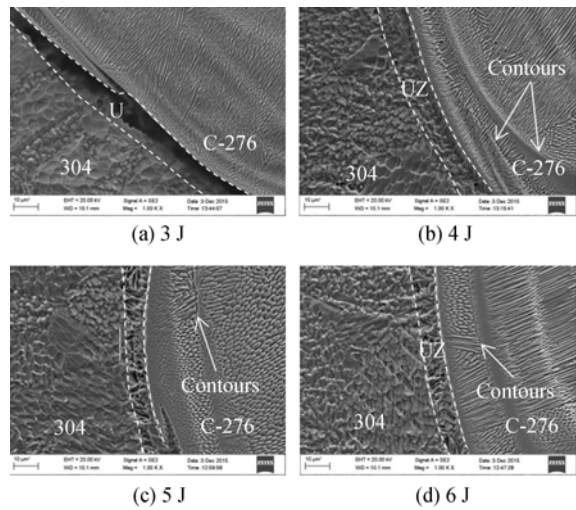


图 3 脉冲能量对焊缝边缘微观组织的影响  
Fig. 3 Effect of pulse energy on interfacial micro-structure

图 4 所示为脉冲能量对焊缝中心部位微观组织影响的 SEM 图像。从图 4 中可以看出,焊缝中心较大成分过冷使得该位置处晶粒形态呈等轴晶,且脉冲激光间断作用产生极大温度梯度  $G$  值,使得焊接过程的冷却速率  $G \times R$  较大,因此相比于母材,焊缝中心的等轴晶平均尺寸显著细化。随着脉冲能量的增大,焊缝内等轴晶粒尺寸同样

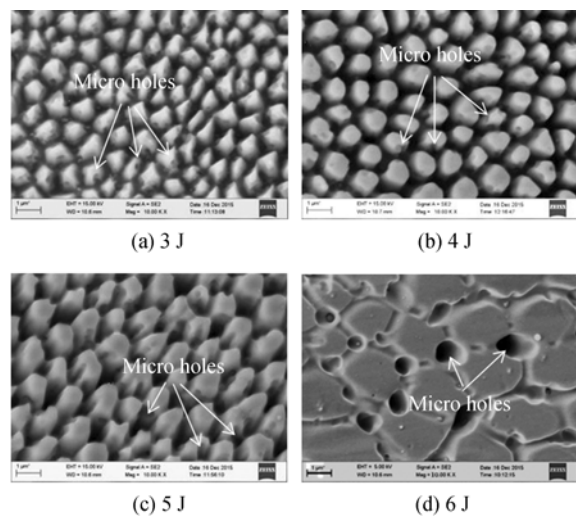


图 4 脉冲能量对焊缝中心微观组织的影响  
Fig. 4 Effect of pulse energy on microstructure of WM center

呈现增大趋势。在焊缝等轴晶晶间位置存在尺寸约为 200 nm 的二次相析出,通过 EDS 点分析可知,其 Mo、Ni、Fe、Cr、W 元素含量分别为:34.84 wt. %、21.75 wt. %、20.51 wt. %、17.49 wt. %、5.41 wt. %。其成分与镍基合金焊接中较为常见的  $p$  相一致<sup>[16]</sup>。由于脉冲激光焊接极快的冷却速率, $p$  相没有充分的时间析出及长大,因此,焊缝内析出相的数量较少、体积较小。随着脉冲能量的增大,焊缝内 304 的稀释率增大,焊缝内构成  $p$  相的主要元素 Mo 含量降低,因此,焊缝内的析出相含量随之下降。

### 3.3 焊接参数对焊缝元素分布的影响

不同脉冲能量下,焊缝横截面的 EPMA 线扫

结果如图 5 所示。分析图 5 可知,对于焊缝内五大组成元素,由于元素浓度的差异,Fe、Cr 元素由 304 母材向焊缝内扩散,Ni、Mo、W 元素由 C-276 母材向焊缝内扩散。随着脉冲能量的增大,由表 7 可知,304 母材在焊缝内的稀释率逐步提升,使得焊缝内 Ni、Mo、W 元素含量与 304 母材的差异增大。由于脉冲激光焊接过程极快的凝固速率,熔化的异质母材未有充分的时间进行对流混合,同时元素没有充分时间均匀扩散,因此,焊缝内元素的宏观偏析较严重,焊缝内的元素含量随位置的波动较大,在脉冲能量较高时,304 母材在焊缝内的稀释率更大,元素含量波动愈剧烈。

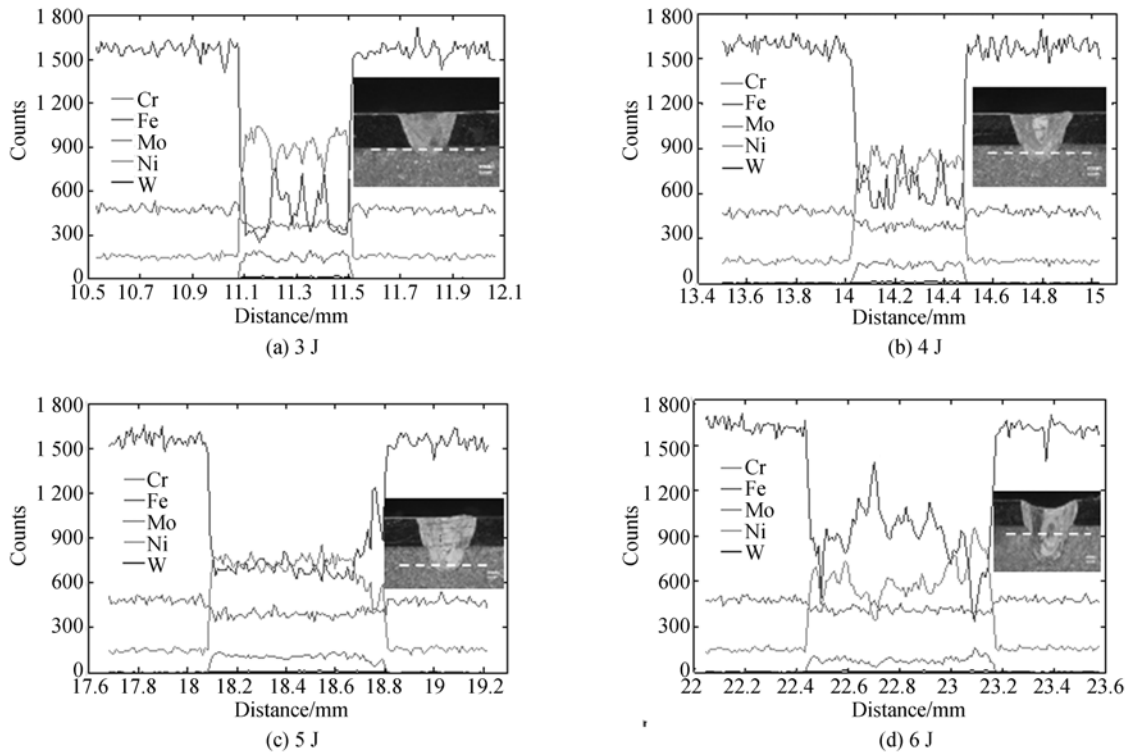


图 5 脉冲能量对焊缝中心微观组织的影响

Fig. 5 EPMA line scanning of weld at different pulse energy

对于异质材料搭接焊接接头,异质材料结合处的元素分布为关注的重点。不同脉冲能量下,焊缝横截面异质材料结合处的 EPMA 面扫结果如图 6 所示。由图 6 可知,当脉冲能量为 3 J 时,结合处熔池的对流方向为由下至上,由于熔池对流强度较弱,熔化的 304 母材未来得及与焊缝金属扩散混合,从而被保留下来,形成“半岛状”的未

熔合区,其中 Fe 元素含量较高,耐搭接间隙的缝隙腐蚀性能较弱,因此不利于核主泵保证长期密封可靠性;当脉冲能量大于 3 J 时,熔池的流动方向为由上至下,熔池对流方向的转变由较高脉冲能量下产生的较强湍流导致。同样,从元素面扫结果中可以发现,随着脉冲能量的增大,焊缝内元素分布均匀性减弱。

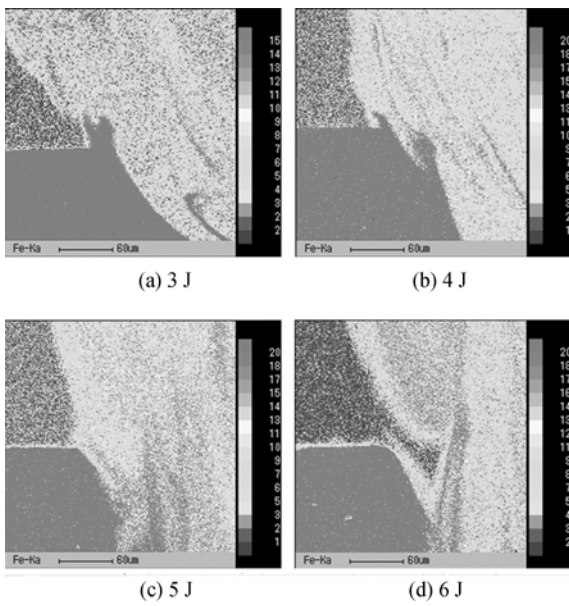


图 6 脉冲能量对结合位置元素面分布的影响

Fig. 6 EPMA map scanning of interface at different pulse energies

### 3.4 焊接参数对焊缝抗撕裂性能的影响

在核主泵屏蔽套端部密封焊接接头的打压检漏及实际使役过程中,其受力形式主要为机械撕裂力。因此,抗机械撕裂强度是评价端部焊接接头密封可靠性的关键指标。不同脉冲能量下,焊接样件在撕裂过程中的力-位移曲线如图 7 所示。在开始阶段,位移主要来自于 C-276 薄板的拉直过程,待 C-276 薄板拉直后,随着力的增大,焊接接头相继发生弹性及塑性变形,当应力超过焊缝的抗撕裂强度后,焊接接头发生断裂,且不同脉冲能量下,焊接接头断裂形式均为拉伸断裂,断裂位置均为焊缝处。

每组焊接参数重复 3 次实验,并对每组的单

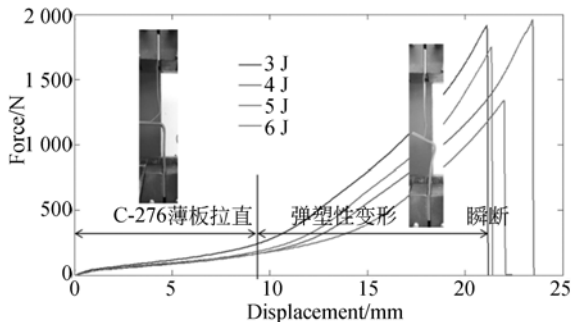


图 7 抗撕裂性能试验中力-位移曲线

Fig. 7 Force-displacement curves in peel tests

位长度极限载荷取平均值,结果如图 8 所示(彩图见期刊电子版)。由图 8 可知,随着脉冲能量的增大,焊缝的抗机械撕裂强度平均值减小,当脉冲能量为 3 J 和 4 J 时,焊缝的抗机械撕裂强度值近似相等,达到最大,约为 78 N/mm。根据表 7 可知,焊缝的结合宽度随脉冲能量的增大而提高,但由于焊缝的断裂形式为拉伸断裂,当结合宽度足够大时,其变化对焊缝抗机械撕裂性能的影响不大。焊缝抗机械撕裂性能随脉冲能量减小的原因主要与焊缝内的组织及元素分布有关。一方面,根据微观组织观测结果可知,脉冲的增大使得焊缝内的晶粒及烧蚀微孔的尺寸增大;另一方面,根据元素分布的分析结果可知,随着脉冲能量的增大,焊缝内 304 母材的稀释率增大,焊缝内具有较大原子半径的 Mo、W 等元素的含量降低,使得其对焊缝基体金属的固溶强化作用减弱,焊缝强度下降<sup>[17]</sup>。此外,脉冲能量为 6 J 时,焊缝表面呈现显著塌陷,减小了其有效承载面积,焊缝的抗机械撕裂强度显著下降。

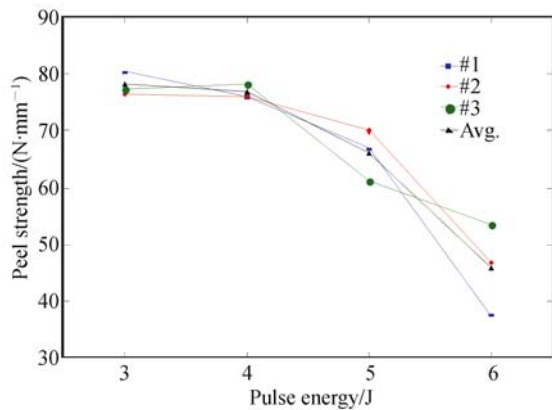


图 8 抗撕裂强度与脉冲能量之间的关系

Fig. 8 Relation of peel strength and pulse energy

不同脉冲能量下,焊缝的机械撕裂断口形貌如图 9 所示。由图 9 可知,焊缝内较多韧窝的存在表征了其断裂形式为韧性断裂,但不同于常见的拉伸断口中的典型等轴韧窝,撕裂时,由于受到撕裂力的作用,韧窝沿撕裂力方向被拉长<sup>[18]</sup>,断口韧窝主要呈抛物线状。随着脉冲能量的增大,由于焊缝内晶粒组织的粗大,断口内韧窝平均直径下降,且韧窝的深度逐渐降低,同时,当脉冲能量达到 5 J 时,焊缝内逐渐出现具有脆性断裂特征的解离平面,在脉冲能量为 6 J 时更为

严重。此断口特征表征焊缝韧性及强度随脉冲能量的增大而呈现下降趋势。

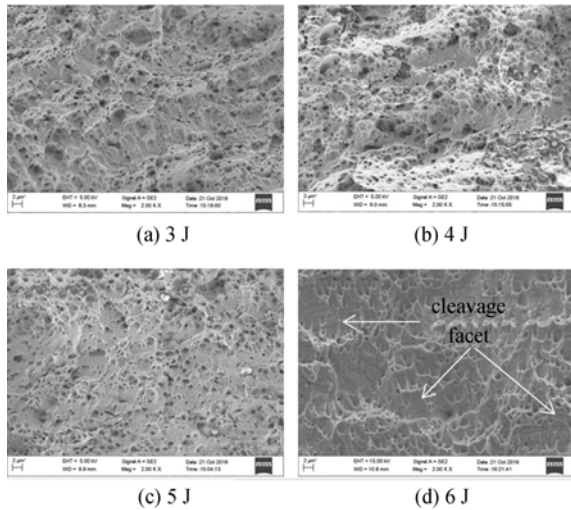


图 9 机械撕裂断口形貌

Fig. 9 SEM fractographs of peel tested specimens

## 4 结 论

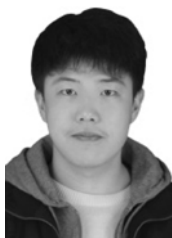
本文通过 Nd:YAG 脉冲激光,实现了 Hastelloy C-276 镍基合金与 304 奥氏体不锈钢的异质材料搭接焊,并分析了焊接参数对异质焊缝形貌、微观组织、元素分布及力学性能的影响规律。实验结果表明:显著影响搭接焊缝结合宽度的参数主要为脉冲能量和脉冲频率,过大的脉冲能量、脉冲频率及过小的脉冲宽度均会造成焊缝表面塌陷及严重飞溅。随着脉冲能量的增大,焊缝的晶粒平均尺寸增大,由元素烧损导致的微孔数量及尺寸增大,元素分布均匀度下降、焊缝结合位置对流方向发生转变。焊缝最大抗机械撕裂强度约为 78 N/mm。C-276/304 异质材料激光搭接焊参数的优化范围为:3~4 J 脉冲能量、125~200 mm/min 焊接速度、30 Hz 脉冲频率、6~8 ms 脉宽、-1~0 mm 离焦量。

## 参考文献:

- [1] 郭玉泉,吴东江,马广义,等. 夹具拘束距离对 Hastelloy C-276 薄板脉冲激光焊接变形的影响[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2465-2471.  
GUO Y Q, WU D J, Ma G Y, *et al.* Influence of fixture restrain distance on pulsed laser welding distortion of Hastelloy C-276 thin sheet [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2465-2471. (in Chinese)
- [2] 张克华,石栋,刘润之,等. 电化学机械复合抛光薄膜太阳能电池柔性不锈钢衬底[J]. 光学精密工程, 2016, 24(02): 343-349.  
ZHANG K H, SHI D, LIU R ZH, *et al.* Electrochemical mechanical polishing of thin film solar cell flexible stainless steel substrate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(02): 343-349. (in Chinese)
- [3] 吴东江,范聪,刘士博,等. 激光偏移量对 Hastelloy C-276/316L 焊缝腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(02): 498-502.  
WU D J, FAN C, LIU SH B, *et al.* Effects of Laser Offset on the Corrosion Performance of Hastelloy C-276/316L Weld. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(02): 498-502.
- [4] SHARMA S, TAIWADE R V, VASHISHTHA H. Effect of continuous and pulsed current gas tungsten arc welding on dissimilar weldments between hastelloy C-276/AISI 321 Austenitic stainless steel [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(3): 1146-1157.
- [5] WANG W, LU Y H, DING X F, *et al.* Microstructures and microhardness at fusion boundary of 316 stainless steel/Inconel 182 dissimilar welding [J]. *Materials Characterization*, 2015, 107: 255-261.
- [6] HOSSEINI H S, SHAMANIAN M, KERMANPUR A. Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds [J]. *Materials Characterization*, 2011, 62: 425-431.
- [7] NAFFAKH H, SHAMANIAN M, ASHRAFIZADEH F. Dissimilar welding of AISI 310 austenitic stainless steel to nickel-based alloy Inconel 657 [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(7): 3628-3639.
- [8] LI G, HUANG J, WU Y X. An investigation on microstructure and properties of dissimilar welded Inconel 625 and SUS 304 using high-power CO<sub>2</sub> laser [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76: 1203-1214.

- [9] 吴东江,董金飞,柴东升,等. 激光能量偏移对 304/C-276 异质焊缝元素分布和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015,25(01): 15-22.  
WU D J, DNG J F, CHAI D SH, *et al.*. Effects of laser energy offset on element distribution and mechanical properties of 304/C-276 dissimilar weld [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*. 2015, 25(01): 15-22.
- [10] ZHOU S Y, MA G Y, CHAI D SH, *et al.* Nickel-based alloy/austenitic stainless steel dissimilar weld properties prediction on asymmetric distribution of laser energy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 81:33-39.
- [11] ZHOU S Y, CHAI D S, YU J L, *et al.*. Microstructure characteristic and mechanical property of pulsed laser lap-welded nickel-based superalloy and stainless steel [J]. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017, 25: 220-226.
- [12] 吴东江,王占宏,马广义,等. 脉冲激光焊接 Hastelloy C-276 合金的熔池流动传热特性分析[J]. 光学精密工程, 2012,20(03): 534-540.  
WU D J, WANG ZH H, Ma G Y, *et al.*. Analysis of fluid flow and hear transfer in weld pool during pulsed laser welding Hastelloy C-276 [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012(03): 534-540. (in Chinese)
- [13] TORKAMANY M J, SABBAGHZADEH J, HAMEDI M J. Effect of laser welding mode on the microstructure and mechanical performance of dissimilar laser spot welds between low carbon and austenitic stainless steels[J]. *Materials & Design*, 2012, 34:666-672.
- [14] CUI Y, XU C L, HAN Q. Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 55:975-978.
- [15] WANG J F, YANG L J, SUN M SH, *et al.*. Effect of energy input on the microstructure and properties of butt joints in DP1000 steel laser welding [J]. *Materials & Design*, 2016, 90:642-649.
- [16] CIESLAK M J, HEADLEY T J, ROMIG A D. The welding metallurgy of HASTELLOY alloys C-4, C-22, and C-276 [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1986, 17(11):2035-2047.
- [17] LU Y L, PIKE L M, BROOKS C R, *et al.*. Strengthening domains in a Ni-21Cr-17Mo alloy [J]. *Scripta Materials*. 2007, 56: 121-124.
- [18] CHEN S C, HUANG J C. Lap shear and T peel strength of overlap joints of superplastic 8090 Al-Li sheets bonded by electron beam and laser beam welding [J]. *Materials Science and Technology*, 1997, 2(13):143-155.

#### 作者简介:



周思雨(1990—),男,辽宁鞍山人,博士研究生,2014年于大连理工大学获得硕士学位,主要从事激光精密制造方面的研究。E-mail: zhousiyu@mail.dlut.edu.cn

#### 导师简介:



吴东江(1964—),男,山东昌邑人,博士,教授,博士生导师,1987年于大连理工大学获得学士学位,2000年于中科院长春光学精密机械与物理所获博士学位,目前主要从事激光与材料相互作用机理及激光精密微细加工领域的研究。E-mail: djwudut@dlut.edu.cn