2015年1月 January 2015

文章编号: 1004-0609(2015)-01-0015-08

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



吴东江,董金飞,柴东升,马广义

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024)

摘 要:采用脉冲激光实现 304 不锈钢与 C-276 合金异种材料的焊接成形,利用几何方法计算不同激光能量偏移 量条件下 C-276 在焊缝中的熔化比例,借助电子探针对焊缝主要元素进行宏观分析,获得 C-276 熔化比例与焊缝 Fe、Ni 两大元素在焊缝处的分布关系,并检测不同激光能量偏移条件下焊缝的力学性能。结果表明: 304/C-276 各异质焊缝化学元素分布均匀,且过渡区较窄,激光能量偏移量对异质焊缝元素含量影响较为显著,随着激光能 量偏移量的增加,焊缝中 Ni、Mo 和 W 元素逐渐增多,Fe 元素逐渐减少,Cr 元素变化不大; C-276 熔化比例与 焊缝中 Fe 和 Ni 元素分布满足杠杆原理: 304/C-276 各异质焊缝的抗拉极限强度均低于 304 和 C-276 母材的,当 激光能量偏向 C-276 母材+0.2~+0.3 mm 时,焊缝抗拉极限强度达到最佳状态。

关键词: 激光异质焊接: 能量偏移; 元素分布; 抗拉强度 中图分类号: TG456.7 文献标志码: A

Effects of laser energy offset on element distribution and mechanical properties of 304/C-276 dissimilar weld

WU Dong-jiang, DONG Jin-fei, CHAI Dong-sheng, MA Guang-vi

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

Abstract: The technology of welding 304 stainless steel to C-276 alloy with Nd:YAG pulsed laser was carried out. The fusion ratio of C-276 in the weld joint was achieved with geometric method under the condition of different laser energy offsets. Macroscopic analysis of the main elements distribution in the weld joint was deeply studied by electron probe. The relationship between C-276 confuse ratio and compositions of Fe and Ni in the weld joint was achieved. Then, tensile test was carried out to detect the mechanical properties of the weld joint. The results indicate that, under the condition of different laser energy offsets, the main elements in dissimilar weld joint distribute uniformly. Laser energy offsets affect the elements composition significantly. With the increase of the laser energy offsets, Ni, Mo and W elements increase gradually, Fe element gradually reduces and Cr element changes little. The relationship between C-276 confuse ratio and compositions of Fe and Ni meets the leverage principle. Under the condition of different laser energy offsets, the ultimate tensile strength of weld joint is lower than those of 304 and C-276 base metal. As the laser energy moves to C-276 for about +0.2-+0.30 mm, the ultimate tensile strength of weld joint reaches the best.

Key words: laser dissimilar welding; energy offset; element distribution; tensile strength

Hastelloy C-276(简称 C-276)作为一种 Ni-Cr-Mo 304 不锈钢(简称 304)由于价格低廉、耐腐蚀性能优良, 耐腐蚀合金广泛应用于石油、化工、核能领域[1-2],而

已在核能和海洋领域应用广泛[3]。在第 3 代核电站

收稿日期: 2014-05-25; 修订日期: 2014-08-29

通信作者: 吴东江,教授,博士; 电话: 0411-84707625; E-mail: djwudut@dlut.edu.cn

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB057305);国家自然科学基金资助项目(51175061);中国博士后科学基金资助项目 (2014M551072)

AP1000 主泵制造过程中,需要对核主泵端盖(304 材料)和屏蔽套(C-276 材料)进行密封焊接,但目前采用 美国引进的氩弧焊接工艺时,焊接过程不稳定,焊接 接头组织粗大、残余应力及变形较大、抗核辐射能力 较弱,难以满足使用要求,而激光焊接能够细化焊缝 晶粒,减少焊缝脆性相,有利于提高焊缝性能,保证 焊接质量^[4-7]。

国内外研究表明: 304 属于 Fe 基奥氏体不锈钢, 在焊接过程中容易产生碳化物颗粒及晶格缺陷,从而 降低焊缝的力学性能^[8]; C-276 属于 Ni 基奥氏体超级 合金,在焊接过程中焊缝元素偏析严重,导致焊缝中 形成大量脆性相,从而影响焊缝耐腐蚀性能和力学性 能^[9-10]。两种材料化学成分的差异使得各元素在异质 焊缝内部重新分布,而元素的分布对焊缝中元素偏析 和二次相颗粒的生成影响显著,进而直接影响异质焊 接接头质量[11-13]。目前,国内外学者针对铁基和镍基 异种不锈钢异质焊接进行了相关研究, BANOVIC 等 [14]通过研究超级不锈钢和镍基合金异质焊接,发现焊 缝中 Fe 元素过多,易导致 Mo 和 Nb 元素偏析严重, 进而使得熔池凝固过程中容易形成热裂纹; LUNDIN^[15]发现异质焊接中 Ni 元素增加会改变熔池 中碳元素的溶解度,导致碳化物颗粒的稳定性下降, 可有效抑制碳元素迁移,改善焊缝的焊接性能。因此, 通过调整能量偏移改变异质焊缝各化学元素流动及分 布特征,可改善异质焊缝焊接质量。LIN 等^[16]通过改 变电子束能量偏移调整 304L/690 合金异质焊缝各化 学元素组成比例,得到力学性能良好、腐蚀性能较为 优异的异质焊缝; 宋志华等[17]研究表明, 通过调整光 束偏移量可改变异质焊缝中金属间化合物分布状态, 进而可优化焊缝焊接质量。但由于 304/C-276 异种合 金焊接结构使用领域特殊,国内外直接针对 304/C-276 异种合金焊接试验研究还鲜见报道。因此,研究不同 激光能量偏移条件下 304/C-276 异质焊缝元素分布规 律及其对力学性能的影响,对明确 304/C-276 异种合 金激光焊接过程和提高焊接质量具有指导意义。

在此,本文作者通过改变激光能量偏移量对 304/C-276进行焊接实验,利用几何方法计算不同激光 能量偏移条件下 C-276 在焊缝中的熔化比例,借助电 子探针对焊缝主要元素进行宏观分析,建立 C-276 熔 化比例和焊缝 Fe、Ni 元素分布的关系式,并检测不同 激光能量偏移条件下焊缝的力学性能。

1 实验

实验所用材料为 0.5 mm 厚 304 不锈钢和 C-276 合金薄板,材料化学成分如表 1 所列。焊接方式为平 板对焊,焊前用去离子水、无水乙醇清洗母材表面, 并用砂纸打磨对接接口,选用 99.99%氩气作为保护气 体。通过正交实验获取激光焊接优化工艺参数:单脉 冲能量 1.5 J、脉冲频率 40 Hz、脉宽 6 ms、焊接速度 150 mm/min。由于作用在工件表面激光光斑直径约为 0.6 mm,因此,在异质焊接过程中,激光束在母材对 接接头中心分别向 304 和 C-276 母材偏移 0.1、0.2 和 0.3 mm,设定激光束偏向 304 为负(用-0.1、-0.2 和-0.3 mm 表示),偏向 C-276 为正(用+0.1、+0.2 和+0.3 mm 表示)。

304/C-276 异质焊缝中各母材混合的程度用C-276 熔化面积占焊缝总面积比例(简称 C-276 熔化比例)表示。沿着焊缝纵向,两端各留 4 mm 对接接口,利用 光学显微镜观察焊缝上表面形貌,并通过 Imag Pro Plus 软件测量 C-276 和 304 母材在焊缝中熔化面积, 根据式(1)可得 C-276 熔化比例:

 $D_{\text{C-276}} = A_{\text{C-276}} / (A_{304} + A_{\text{C-276}}) \tag{1}$

式中: *D*_{C-276} 代表 C-276 在焊缝中的熔化比例; *A*₃₀₄ 和 *A*_{C-276} 分别表示 304 和 C-276 母材在焊缝中熔化 面积。

借助电子探针(EPMA)在板厚1/2处垂直于焊接方向分别对304 母材、焊缝、C-276 母材主要元素进行检测。通过拉伸实验分析各个焊缝的力学性能,并利用扫描电子显微镜(SEM)观察焊缝拉伸断口形貌,焊接接头拉伸试样几何尺寸按照国标 GB/T 2651-2008设计,如图1所示。

 Table 1
 Chemical compositions of 304 and C-276 base metal

Material		Mass fraction/%										
	Ni	Fe	Cr	Мо	W	Co	Mn	С	Si	Р	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 焊接示意图及接头拉伸试样几何尺寸

Fig. 1 Welding schematic illustration and dimensions of weld tensile sample (Unit: mm)

2 结果与分析

2.1 焊缝 C-276 熔化比例和元素分布

2.1.1 C-276 熔化比例变化规律

图 2 所示为 304/C-276 异质焊接接头照片。由图 2 可以看到激光焊接过程较为稳定。多次重复实验表明, 当激光能量偏移-0.3 mm时,焊缝未形成良好的冶金 结合,故仅研究激光能量偏移-0.2、-0.1、0、+0.1、 +0.2 和+0.3 mm时,焊缝中 C-276 熔化比例。图 3(a)~(f) 所示分别为不同激光能量偏移条件下异质焊缝上表面 熔化区域形貌图(位置见图 2 方框所示)。图 3(a)和(b) 显示,当激光能量偏移-0.2和-0.1mm时,作用于304 表面的激光能量较多,异质焊缝熔化区 C-276 熔化比 例较小,分别为 32.5%和 46.3%;随着激光能量偏移 量的增加,作用于 C-276 表面激光能量逐渐增多,焊 缝中 C-276 熔化比例逐渐增加,分别为 57%、75.2%、 83.3%和96%,如图3(c)~(f)所示。当激光能量偏移+0.3 mm 时, C-276 在焊缝中熔化比例达 95%以上, 但仍 然可使焊缝上下表面实现良好的冶金结合,如图4所 示。可见, C-276 熔化比例并不随着激光能量偏移呈 正比例变化。经过分析发现,激光能量对金属熔化量 的影响与金属比热容和热传导系数有关, 熔化相同体 积的金属,比热容越大,所需要的激光能量越多,金 属热传导系数越大,热量扩散越快,越不利于稳定熔 池的形成。对于 304/C-276 异质焊缝, 由于 304 的比 热容和热传导系数较 C-276 的大, C-276 侧激光能量 更不容易散失,更有利于熔池的形成,相同的激光能 量作用到 304 和 C-276 母材表面时, 使得异质焊缝中



图 2 304/C-276 异质焊接接头照片 Fig. 2 Photo of 304/C-276 dissimilar weld joint



图 3 不同激光能量偏移条件下异质焊缝上表面熔化区域形貌

Fig. 3 Top surface morphologies of 304/C-276 dissimilar weld at different laser energy offsets (Left 304, right C-276): (a) -0.2 mm; (b) -0.1 mm; (c) 0 mm; (d) +0.1 mm; (e) +0.2 mm; (f) +0.3 mm



图 4 304/C-276 异质焊接接头横截面形貌

Fig. 4 Cross section morphology of 304/C-276 dissimilar weld joint

C-276 母材的熔化量大于 304 的。基于上述分析认为, 304 和 C-276 异质合金热物性参数的差异导致 C-276 熔化比例不随激光能量偏移量的增加呈正比例变化。 2.1.2 元素分布特征

根据图4所示焊缝横截面,沿着焊缝中心横向路 径,得到不同激光能量偏移条件下各焊缝主要元素 (Fe、Ni、Cr、Mo和W)宏观分布特征,如图5所示。 各元素分布为明显阶梯状,可分为5个区域:304母 材-过渡区-焊缝中心-过渡区-C-276母材,焊缝中心 区元素均匀分布,元素过渡区很窄。当激光能量偏向 304 时,焊缝中 Fe 元素所占的比例较大,如图 5(a)和 (b)所示;随着激光能量偏向 C-276,焊缝中 Ni、Mo、 W 元素含量明显上升,但 Cr 元素基本没有变化,焊 缝元素分布逐渐趋近于 C-276 母材,如图 5(c)、(d)和 (e)所示; 当激光能量偏移+0.3 mm 时, C-276 熔化比 例在 95%以上,因此,在靠近 C-276 母材焊缝边缘各 元素含量没有明显的过渡,如图 5(f)所示。分析认为, 焊缝中各元素分布主要是由焊缝内部熔池流动造成 的,304/C-276 异质焊缝在激光作用下迅速熔化为液 态,但熔池中心温度高于熔池边界的,导致熔池中心 表面张力和溶液密度较小,促使熔池内部形成玛尔戈 尼对流及浮力效应,并且流动速度较大[18],有利于异 质材料在焊缝处均匀混合;而对于激光焊接,焊缝熔 化凝固迅速, 使得焊缝热影响区极小, 导致在焊缝边 界处形成明显固液界面,在熔池内部强对流作用机制 下,焊缝固液界面处会产生很高的元素浓度差异,显 著减小了焊缝元素过渡区。因此,不同激光能量偏移 条件下,各异质焊缝内部主要化学元素均匀分布,并 且元素过渡区很窄。

2.1.3 熔化比例与元素分布的关系

异质焊缝是由 304 和 C-276 两种材料熔化连接而

成,而根据焊缝元素分布可直接对焊缝焊接质量进行分析,为直接通过 C-276 熔化比例评估焊缝焊接质量, 需建立 C-276 熔化比例与焊缝元素分布的关系。分析 发现,焊缝主要元素含量 c_{ele/weld} 与 C-276 熔化比例可 根据杠杆原理用式(2)表示:

 $c_{\text{ele/C-276}}D_{\text{C-276}} + c_{\text{ele/304}}(1 - D_{\text{C-276}}) = c_{\text{ele/weld}}$ (2)

式中: *c*_{ele/304}、*c*_{ele/C-276}和 *c*_{ele/weld}分别代表主要元素在 304、C-276 母材和焊缝中的质量分数。

通过 C-276 熔化比例,根据式(2)可以对异质焊缝 处 Fe 和 Ni 元素含量进行计算(Fe 在 304 和 C-276 母 材中的含量分别为 72.33%和 5.82%(质量分数),Ni 在 304 和 C-276 母材中的含量分别为 7.71%和 56.73%), 并对计算值的准确性进行验证,将计算值分别与实际 测量值比较,获得的计算值和测量值相对误差很小, 如表 2 所列。因此,根据 C-276 熔化比例可直接确定 出各异质焊缝化学元素含量,实现对焊缝焊接质量进 行准确评估。

2.2 焊缝力学性能

2.2.1 拉伸实验

表3所列为不同激光能量偏移条件下异质焊缝屈 服强度(o_b)和抗拉极限强度(o_s)。拉伸实验结果表明焊 接接头均在焊缝处断裂,可以发现,随着激光能量偏 向 C-276, 异质焊缝抗拉极限强度逐渐增大。304 和 C-276 母材屈服强度分别为 303 和 456 MPa, 抗拉极 限强度分别为 927 和 864 MPa(3 组拉伸结果的平均 值),可见C-276 抗拉极限强度低于 304 的,因此,选 用 C-276 母材作为标准来衡量各焊缝焊接效率^[19](焊 缝极限抗拉强度与母材极限抗拉强度之比),焊缝焊接 效率越高,其力学性能越好,各组焊接效率分别为 72.1%、74.9%、81.9%、92.2%、97.1%和 96.9%。可 见,当激光能量偏移+0.2~+0.3 mm时,焊缝抗拉极限 强度与 C-276 母材的相差不大,焊缝拉伸性能达到最 佳状态。图 6 所示为不同激光能量偏移作用下 304/C-276 焊接接头和母材工程应力-应变曲线,可以 发现,拉伸试样都呈现出均匀塑性变形过程,焊缝断 口处并没有出现明显缩颈特征。

2.2.2 拉伸结果分析

图 7 所示为焊缝拉伸断面显微形貌特征,可以发现,焊缝断裂主要为塑性断裂,在断口表面存在细密等轴韧窝,周围分布着许多韧性撕裂棱,并未发现解 理滑移断口特征以及裂纹气孔现象。随着激光能量偏 移量的不同,断口形貌呈现一定的区别:激光能量偏 向 304 和对中焊接处,焊缝断口韧窝不均匀,韧窝底



图 5 不同激光能量偏移条件下焊缝横截面主要元素宏观分布

Fig. 5 Macro distributions of main elements along weld cross-section at different laser energy offsets: (a) -0.2 mm; (b) -0.1 mm; (c) 0 mm; (d) +0.1 mm; (e) +0.2 mm; (f) +0.3 mm

Table 2	Calculation and	I EPMA	values	of Fe a	nd Ni	elements	in	weld at	different	energy	offsets
---------	-----------------	--------	--------	---------	-------	----------	----	---------	-----------	--------	---------

Floment	Method	Mass fraction/%						
Liement	Method	-0.2 mm	-0.1 mm	0 mm	+0.1 mm	+0.2 mm	+0.3 mm	
Fe	Calculation	50.71	41.54	34.42	22.31	16.93	8.48	
	EPMA	54.30	40.25	28.73	21.52	16.97	7.19	
Ni	Calculation	23.64	30.41	35.65	44.57	48.54	54.77	
	EPMA	21.27	30.98	39.26	44.70	48.66	55.92	

表 3	激光能量偏移量对焊缝力学性能的影响

Table 3	Effect of laser	energy offset of	on weld join	t mechanical
property				

Laser energy offset/mm	Sample No.	<i>σ</i> _b ∕MPa	$\sigma_{\rm s}/{ m MPa}$	Fracture position	
	1	289	610		
-0.2	2	293	657	Weld joint	
	3	271	603		
	4	289	632		
-0.1	5	298	661	Weld joint	
	6	282	647		
	7	290	676		
0	8	288	692	Weld joint	
	9	290	726		
	10	296	782		
+0.1	11	287	814	Weld joint	
	12	301	796		
	13	298	835		
+0.2	14	301	848	Weld joint	
	15	305	833		
	16	300	833		
+0.3	17	295	879	Weld joint	
	18	290	798		



图 6 304/C-276 异质焊接接头工程应力-应变曲线

Fig. 6 Engineering stress-strain curves of 304/C-276 dissimilar weld joint

部出现较大的析出相颗粒,局部呈现出显著深坑(见图 7(a)、(b)和(c));随着激光能量偏向 C-276,断裂表面 形态发生变化,呈现出均匀的等轴韧窝(见图 7(d)、(e) 和(f))。

异质焊缝抗拉极限强度均低于 304 和 C-276 母材 的,主要原因一方面是由于激光能量密度高,导致焊 缝熔化凝固速度极快,增加了焊缝内部位错密度;同 时,由于焊接热循环作用的存在,焊缝中存在许多第 二相颗粒以及晶格缺陷,导致焊缝内部形成较大的应



图 7 不同激光能量偏移条件下 304/C-276 焊接接头断口微观结构

Fig. 7 SEM fractographs microstructures of 304/C-276 dissimilar weld joint at different laser energy offsets: (a) -0.2 mm; (b) -0.1 mm; (c) 0 mm; (d) +0.1 mm; (e) +0.2 mm; (f) +0.3 mm

第25卷第1期

力集中,这种焊接缺陷为拉伸过程中焊缝裂纹萌生和 扩展创造了条件^[20-21],弱化了焊缝焊接质量,因此, 异质焊缝拉伸性能较 304 和 C-276 母材的低。当激光 能量偏向 304 时,焊缝断口韧窝底部存在许多较大析 出相颗粒,在拉应力作用下容易产生较大应力集中, 促使焊缝内部形成裂纹源,进而使得焊缝的拉伸性能 较偏向 C-276 时的拉伸性能低;另一方面,随着激光 能量偏向 C-276, C-276 在焊缝中的熔化比例增大,焊 缝中 Ni、Mo 和 W 元素含量明显高于激光能量偏向 304 时的,由于 Mo 和 W 元素原子半径大于基体 Fe 和 Ni 元素的原子半径,导致 y 相产生晶格畸变^[22],从 而增加对位错运动的阻力,使得焊缝拉伸性能升高。 因此,当激光能量偏向 C-276 时,焊缝拉伸性能较好。

3 结论

1) 脉冲激光焊接 304/C-276 各异质焊缝化学元素 分布较为均匀,且元素过渡区很窄,激光能量偏移通 过改变各母材熔化比例,影响焊缝化学元素含量。随 着激光能量偏向 C-276,焊缝中 Ni、Mo 和 W 元素逐 渐增多,Fe 元素逐渐减少,但 Cr 元素在焊缝中的变 化不明显。

2) 通过几何方法可以测量出不同激光能量偏移 条件下异质焊缝 C-276 熔化比例,分析发现,C-276 熔化比例和主要元素分布之间满足杠杆原理。根据 C-276 熔化比例可直接计算焊缝主要元素含量,且计 算值和测量值相对误差很小。

3) 304/C-276 异质焊接接头抗拉强度较 304 和 C-276 母材的均有所下降,焊缝断裂方式为塑性断裂, 断裂表面存在许多细密等轴韧窝。激光能量偏向 304 时,抗拉强度较低,焊缝断口局部存在显著深坑;随 着激光能量偏向 C-276,焊缝抗拉强度逐渐增加,当 激光能量偏向 C-276 母材+0.2~+0.3 mm 时,焊缝抗拉 强度达到最佳状态,断裂表面呈现出较为均匀的等轴 韧窝。

REFERENCES

- ZHANG Qiang, TANG Rui, YIN Kai-ju, LUO Xin, ZHANG Le-fu. Corrosion behavior of Hastelloy C-276 in supercritical water[J]. Corrosion Science, 2009, 51(9): 2092–2097.
- [2] 马广义,吴东江,郭玉泉,高忠民,郭东明. 超薄 Hastelloy
 C-276 脉冲激光焊接接头的拉伸性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(6): 1241-1245.

MA Guang-yi, WU Dong-jiang, GUO Yu-quan, GAO Zhong-min, GUO Dong-ming. Tensile properties of weld joint on thin Hastelloy C-276 sheet of pulsed laser welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(6): 1241–1245.

- [3] 张真源, 王 弘. 304 不锈钢的超高周疲劳性能[J]. 机械工程 材料, 2008, 32(1): 79-83.
 ZHANG Zhen-yuan, WANG Hong. Fatigue life in very high cycle range of 304 stainless steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008, 32(1): 79-83.
- [4] 吴世凯,肖荣诗,陈 铠. 大厚度不锈钢板的激光焊接[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2422-2425.
 WU Shi-kai, XIAO Rong-shi, CHEN Kai. Laser welding of heavy section stainless steel plants[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2422-2425.
- [5] 张丽娟,周惦武,刘金水,徐少华,乔小杰,李 升. 钢/铝异种金属添加粉末的激光焊接[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(12): 3401-3409.
 ZHANG Li-juan, ZHOU Dian-wu, LIU Jin-shui, XU Shao-hua, QIAO Xiao-jie, LI Sheng. Laser welding of steel/aluminum dissimilar metal with powder addition[J]. The Chinese Journal of
- [6] YAN Jun, GAO Ming, ZENG Xiao-yan. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(4): 512–517.

Nonferrous Metals, 2013, 23(12): 3401-3409.

- [7] MA Guang-yi, WU Dong-jiang, GUO Dong-ming. Segregation characteristics of pulsed laser butt welding of Hastelloy C-276[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(13): 3853–3857.
- [8] 李新梅. Super 304H 奥氏体钢焊接接头组织与性能研究[D].
 济南:山东大学, 2010.
 LI Xin-mei. Study on microstructure and Properties of the welded joint for Super 304H austenitic steel[D]. Ji'nan: Shandong University, 2010.
- [9] 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.
- [10] OGBORN J S, OLSON D L, CIESLAK M J. Influence of solidification on the microstructural evolution of nickel base weld metal[J]. Materials Science and Engineering A, 1995, 203(1): 134–139.
- [11] 倪加明,李俐群,陈彦宾,封小松. 铝/钛异种合金激光熔钎 焊接头特性[J]. 中国有色金属学报,2007,17(4):617-622. NI Jia-ming, LI Li-qun, CHEN Yan-bin, FENG Xiao-song. Characteristics of laser welding-brazing joint of Al/Ti dissimilar alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(4): 617-622.
- [12] 朱东晖,陈江华,刘春辉,黄昌军,王时豪,陈 敬,顾 媛. Al-Mg-Si 与 Al-Zn-Mg 合金异质焊接接头力学性能和微观结构的关系[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(2): 293-301.

ZHU Dong-hui, CHEN Jiang-hua, LIU Chun-hui, HUANG Chang-jun, WANG Shi-hao, CHEN Jing, GU Yuan. Relationship between mechanical properties and microstructure of Al-Mg-Si and Al-Zn-Mg dissimilar welded joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(2): 293–301.

- [13] MAI T A, SPOWAGE A C. Characterization of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminium[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 374(1): 224–233.
- [14] BANOVIC S W, DUPONT J N, MARDER A R. Dilution and microsegregation in dissimilar metal welds between super austenitic stainless steel and nickel base alloys[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2002, 7(6): 374–383.
- [15] LUNDIN C D. Dissimilar metal welds-transition joints literature review[J]. Welding Journal, 1982, 61(2): 58–63.
- [16] LIN Yong-ding, LEE Hwa-teng, KUO Tsung-yuan, JENG Sheng-long, WU Jia-lin. Effects of beam offset on mechanical properties and corrosion resistance of Alloy 690-SUS 304L EBW joints for nuclear power plant[J]. Journal of Nuclear Materials, 2010, 401(1): 78–85.
- [17] 宋志华,吴爱萍,姚 为,邹贵生,任家烈,汪永阳.光束偏 移量对钛/铝异种合金激光焊接接头组织和性能的影响[J]. 焊 接学报, 2013, 34(1): 105-109.

SONG Zhi-hua, WU Ai-ping, YAO Wei, ZOU Gui-sheng, REN Jia-lie, WANG Yong-yang. Influence of laser offset on microstructure and mechanical properties of Ti/Al dissimilar joint by laser welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(1): 105-109.

- [18] HE X, FUERSCHBACH P W, DEBROY T. Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(12): 1388-1398.
- [19] KUMAR S, SHAHI A S. Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints[J]. Materials and Design, 2011, 32(6): 3617–3623.
- [20] 张 祺, 王家庆, 陈国宏, 刘俊建, 化 建, 余新海, 张 涛, 张建华, 汤文明. T92/Super304H 异种钢焊接接头的组织结 构和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(2): 396-402.
 ZHANG Qi, WANG Jia-qing, CHEN Guo-hong, LIU Jun-jian, HUA Jian, YU Xin-hai, ZHANG Tao, ZHANG Jian-hua, TANG Wen-ming. Microstructures and mechanical properties of T92/Super304H dissimilar steel weld joints[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(2): 396-402.
- [21] 崔 巍,陈静青,陆 皓,陈俊梅. 晶界滑移对镍基合金失延 开裂的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(5): 1269-1274.
 CUI Wei, CHEN Jing-qing, LU Hao, CHEN Jun-mei. Influence of grain boundary sliding on ductility-dip cracking of Ni-based alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(5): 1269-1274.
- [22] LU Y L, PIKE L M, BROOKS C R, LIAW P K, KLARSTROM D L. Strengthening domains in a Ni-21Cr-17Mo alloy[J]. Scripta Materialia, 2007, 56(2): 121-124.

(编辑 龙怀中)