

08Al 钢激光焊与 TIG 填丝焊接头电化学性能研究

张志敏, 张宏, 刘佳*

(长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 试验采用 TIG 填丝焊和 CO₂ 激光焊两种工艺方法对 08Al 钢进行对接焊, 通过电化学腐蚀试验研究两种焊接接头的母材、热影响区及焊缝区的耐蚀性能。结果表明, CO₂ 激光焊接头热影响区的耐蚀性优于母材, 母材的耐蚀性优于 TIG 填丝焊热影响区, TIG 填丝焊热影响区的耐蚀性优于 CO₂ 激光焊焊缝区, TIG 填丝焊焊缝区的耐蚀能力在所有测试区域中最差, 腐蚀表面点蚀坑最多。分析认为, 焊缝区和热影响区受热输入量的影响不同, 导致焊后晶粒尺寸、组织形态及分布不同是耐蚀性存在差异的主要原因, 焊缝合金元素含量和焊后残余应力对金属耐蚀能力的影响并不明显。

关键词 CO₂ 激光焊; TIG 填丝焊; 显微组织; 耐蚀性能

中图分类号: TG456

文献标识码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20173703.367

The Electrochemical Properties Study on 08Al Weld Joints of Laser Welding and TIG Welding with Wire

Zhang Zhimin, Zhang Hong, Liu Jia

(School of Electromechanical Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract The 08Al steel weld joints were obtained through the way of TIG welding with wire and CO₂ laser welding respectively. The corrosion resistance of the base material(BM), heat affect zone(HAZ) and fusion zone(FZ) were tested by electrochemical experiment. The results indicate that the heat affect zone corrosion resistance of CO₂ laser welding is superior to base material and the base material corrosion resistance is better than the heat affect zone of TIG welded joints with wire. The fusion zone corrosion resistance of CO₂ laser welding is inferior to the heat affect zone of TIG welding with wire. The fusion zone corrosion resistance of TIG welding with wire is worst in all of the test areas and its surface has many corrosion pits. The main reason is the different effect of heat input lead to the different grain size, microstructure and its distribution. In addition, the content of alloying elements in fusion zone and the inequable residual stress have little impacts on corrosion resistance.

Key words CO₂ laser welding; TIG welding with wire; microstructure; corrosion resistance

0 引言

08Al 钢为优质碳素结构钢, 广泛应用于制造 4 mm 以下的各种冷冲压件, 如车身、驾驶室、仪器仪表及机器外壳等, 随着 08Al 钢的大量应用, 其相应的薄板焊接变得尤为重要。TIG 焊对热输入的调节较容易, 可以进行薄板及各种姿态下的焊接, 以目前最为普遍的应用对象衡量。TIG 焊是所有焊接方法中应用最广的一种焊接方式^[1], 然而工业生产中发现 TIG 焊存在焊接熔深浅、工件

变形量大、焊接效率低等问题。与传统弧焊相比, 激光焊接作为一种高能束焊接方法具有如下优点^[2]: 激光束能量密度高, 焊接熔深大、速度快; 激光光斑直径小, 可形成深宽比较大的焊缝; 焊接热影响区窄, 晶粒粗大倾向小, 焊接接头质量高; 激光焊接自动化程度高、焊接结构变形小、可达性和柔性强^[3-4]。近年来酸雨问题已经成为全球性的环境问题, 酸雨对金属材料及其制品均有很强的腐蚀作用, 全球 80% 的金属构件在大气环境中使用,

收稿日期: 2016-12-05; 收到修改稿日期: 2017-02-10

作者简介: 张志敏, 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 激光焊接技术。

导师简介: 张宏, 男, 教授/博导, 主要研究方向: 激光加工技术。E-mail: h_zhang@cust.edu.cn

* 通信作者: 刘佳, 男, 副教授/博士, 主要研究方向: 激光焊接及其有限元分析、激光表面处理技术。E-mail: liujia@cust.edu.cn

铁路、桥梁、车辆、飞机、机械设备、武器装备及电子装备等多在酸性的大气环境下,使得这些材料饱受酸雨侵蚀的破坏。08Al 钢焊接件在服役过程中由于外层防护漆及保护层的磨损脱落,焊接接头位置可能直接裸露于大气环境中,为了分析接头位置的耐蚀性能,试验采用 0.5 mol/L H_2SO_4 溶液模拟酸雨环境,对 TIG 填丝焊和 CO_2 激光焊两种工艺下获得的接头热影响区和焊缝区分别进行动电位极化曲线测试,试验结果可为 08Al 钢焊

接方式的选择及接头腐蚀重点防护区域的确定提供一定的参考。

1 试验材料、设备及方法

1.1 试验材料

试验采用尺寸为 150 mm×60 mm×2 mm 的 08Al 钢薄板,焊接前对 08Al 钢用钢刷打磨去除表面氧化皮,用丙酮擦拭去除表面油污;08Al 钢 TIG 填丝焊填充材料选用 $\phi 1.2$ mm 的 ER50-6 焊丝,母材及焊丝的化学成分如表 1 所示。

表 1 母材及焊丝的化学成分(质量分数/%)

Tab. 1 Chemical composition of base metal and welding wire (mass fraction%)

	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Al	Fe
08Al 钢	≤0.11	≤0.03	0.25~0.65	≤0.10	≤0.30	≤0.035	≤0.035	≤0.07	REM
ER50-6	≤0.12	≤1.08	1.42~1.78	≤0.15	≤0.10	≤0.023	≤0.03	≤0.08	REM

1.2 试验设备及方法

TIG 填丝焊和 CO_2 激光焊分别采用 ZFJ1500A 型焊机和 Rofin DC050 型 CO_2 激光器。TIG 填丝焊工艺参数为焊接电流 $I=180\text{A}$,电弧电压 $U=20.6\text{V}$,焊接速度 $v=0.45\text{ m/min}$,保护气(Ar)流量 8~10 L/min; CO_2 激光焊工艺参数为激光功率 $P=2.0\text{ kW}$,焊接速度 $v=1.5\text{ m/min}$,离焦量 $\Delta f=5\text{ mm}$,保护气体为 Ar 与 He 的混合气体(比例 3:2),保护气流量 10~15 L/min。

制备 18 mm×8 mm×2 mm 的金相试样和直径为 $\phi 15\text{ mm}$ 的电化学试样,两种试样均通过研磨抛光,金相试样腐蚀采用 3% 硝酸酒精溶液,电化学试样通过三电极体系 CHI760D 电化学工作站进行 Tafel 曲线测试,对电极和参比电极分别为铂电极和硫酸亚汞电极,腐蚀介质为 0.5 mol/L H_2SO_4 溶液,试验装置如图 1。试样测试面积为 20 mm²,其余区域用密封胶涂封,电压测试范围 -1.0~0.2 V,扫描速度 1 mV/s,采用 DM2700M 金相显微镜和 JSM-5310 型扫描电镜对接头显微组织及电化学腐蚀形貌进行分析。

2 试验结果与分析

2.1 08Al 钢焊接接头显微组织分析

08Al 钢母材显微组织如图 2(a)左侧区域,采用扫描电镜发现其组织主要为铁素体,同时在铁素体表面存在颗粒状分布的渗碳体(Fe_3C)和少量含有 Si、Mn、Ca、Al 的夹杂物,由于这些夹杂物的存在导致母材断口韧窝中出现第二相质点。图 2(b)为 TIG 填丝焊接头热影响区组织形貌,靠近母材一侧的组织与母材基本一致,在靠近熔化区边界处出现少量板条状马氏体组织,观察发现热影响区从母材一侧向熔化区边界过渡时该区域内组织未发生转变;此外,TIG 填丝焊接热影响区在靠近母材一侧的晶粒尺寸要小于母材,向熔化区方向过渡时其晶粒尺寸逐渐增加,到达熔化区边界处时晶粒尺寸超过母材。

08Al 钢 CO_2 激光焊接头热影响区分为部分相变区和完全相变区两部分。部分相变区(N-FTZ)显微组织如图 3(b),组织主要为铁素体及在铁素体表面呈颗粒状分布的 Fe_3C 渗碳体和含有 Si、Mn、Ca、Al 的夹杂物;完全相变区(FTZ)显微组织如图 3(c),该区域受焊接过程中热输入量的影响较大,在靠近熔化区一侧同样发生马氏体转变,此外该区域的晶粒尺寸较母材和部分相变区相比得到了明显细化,而部分相变区与母材相比晶粒尺寸也有所变小。

TIG 填丝焊和 CO_2 激光焊接头熔化区(FZ)显微组织分别如图 2(d)和 3(d)。通过扫描电镜观察发现二者显微组织相近,主要为白色板条状马氏体(M)和少量灰色初生铁素体(F),马氏体为一束束

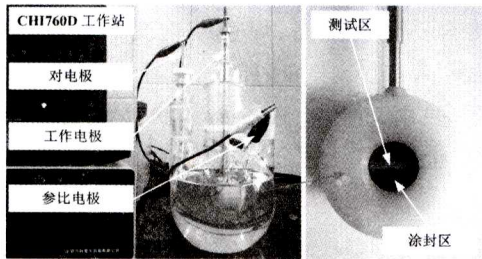
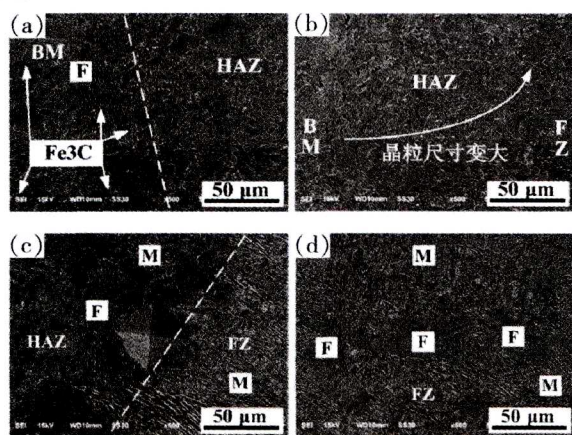


图 1 三电极体系电化学工作站 CHI760D 和测试样件
Fig. 1 Electrochemical workstation CHI760D and the samples

平行排列的细板条,内部还存在大量位错缠结的亚结构^[5],TIG 填丝焊熔化区的马氏体组织含量较多,且分布较为集中。两区域铁素体形态和分布存在不同:TIG 填丝焊熔化区铁素体为块状,尺寸相对较大,分布较为集中;CO₂激光焊熔化区铁素体多以块状或条状存在,尺寸较小,数量相对较多且分布较分散。分析认为熔化区出现该两类组织主要是由于 08Al 钢含碳量较低,部分铁素体在焊接高温时无法奥氏体化所导致的。同时,由于两热源热输入量的不同导致熔化区铁素体形态和分布存在差异,激光焊接线能量低,焊缝熔池小,冷却速度快,铁素体组织来不及聚集长大,因而尺寸较小,分布较为分散。



(BM:Base material;HAZ:Heat affect zone;FZ:Fusion zone)

图 2 08Al 钢 TIG 填丝焊接接头不同区域微观组织形貌

(a)母材与热影响区 (b)晶粒尺寸变化

(c)热影响区与焊缝 (d)焊缝区

Fig. 2 Microstructure of weld joint of TIG welding with wire

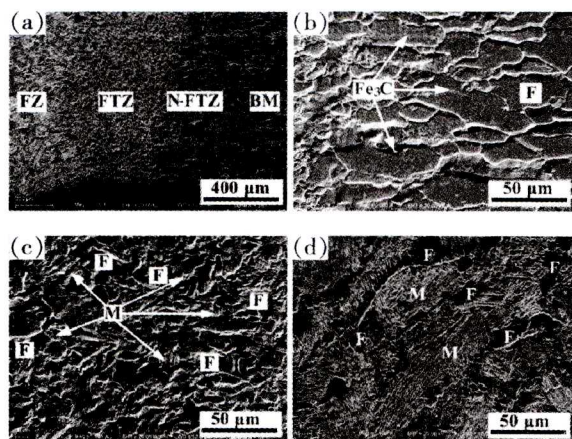


图 3 08Al 钢 CO₂激光焊接接头显微组织

(a)接头区域划分 (b)部分相变区 (c)完全相变区 (d)焊缝区

Fig. 3 Microstructure of 08Al steel joint of CO₂ laser welding

2.2 08Al 钢焊接接头 Tafel 曲线分析

试验对 08Al 钢母材、TIG 填丝焊和 CO₂激光焊接头的热影响区及焊缝区分别进行测试,图 4、图 5 为 08Al 钢母材及两种焊接接头热影响区和焊缝区在 0.5 mol/L H₂SO₄ 溶液中测得的 Tafel 曲线图。

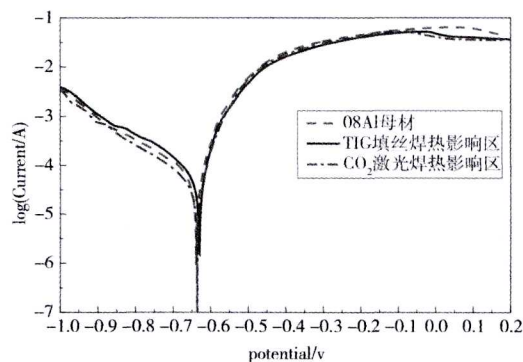


图 4 母材、TIG 填丝焊及 CO₂激光焊热影响区 Tafel 曲线图

Fig. 4 Tafel curves of BM and HAZ of TIG welding with wire and CO₂ laser welding

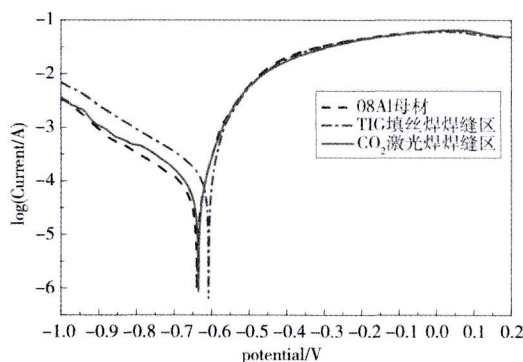


图 5 母材、TIG 填丝焊及 CO₂激光焊焊缝区 Tafel 曲线图

Fig. 5 Tafel curves of BM and HAZ of TIG welding with wire and CO₂ laser welding

由图 4 可以看出,随着外加电压的升高,TIG 填丝焊和 CO₂激光焊热影响区及 08Al 钢母材三者的阳极极化曲线开始阶段均处于活化状态,电流密度都随之增加,当外加电压上升到 -0.06 V 左右时,CO₂激光焊热影响区电流密度开始出现下降趋势,TIG 填丝焊热影响区和母材分别在外加电压为 -0.02 V 和 0.05 V 时电流密度开始降低。由图 5 可见,TIG 填丝焊焊缝区自腐蚀电位发生右移,且随着电压的增大,三者电流均增加,在电压达到 0.02 V 时 TIG 填丝焊焊缝区电流密度开始下降,CO₂激光焊焊缝区在 0.07 V 时电流密度开始减小。

表 2 为 08Al 钢母材、TIG 填丝焊及 CO₂激光焊热影响区和焊缝区的 Tafel 曲线测试结果。

表 2 母材、TIG 填丝焊及 CO₂激光焊热影响区和焊缝区测试结果

Tab. 2 The test results of BM,HAZ and FZ

测试区域	E_{corr}/V	$I_{corr}/(\mu A/cm^2)$	R_p/Ω
08Al 钢母材	-0.639	79.14	338.2
TIG 填丝焊热影响区	-0.631	84.64	313.4
CO ₂ 激光焊热影响区	-0.636	51.38	449.2
TIG 填丝焊焊缝区	-0.617	238.4	124.2
CO ₂ 激光焊焊缝区	-0.635	98.83	256.3

由表 2 可见,08Al 钢母材、TIG 填丝焊及 CO₂激光焊热影响区和焊缝区的自腐蚀电位 E_{corr} 相近,不同区域的自腐蚀电流密度 i_{corr} 和线性极化电阻 R_p 值却差别较大,由 Faraday 第二定律可得,自腐蚀电流密度 i_{corr} 与腐蚀速率 v 之间存在式(1)关系

$$v=\frac{3.27\times i_{corr}\times A}{n\times D}\tag{1}$$

式中, A 为原子量; n 为得失电子数; D 为金属材料密度(g/cm^3)。则自腐蚀电流密度越大,金属腐蚀速率越大^[6]。

此外,线性极化电阻 R_p 值的大小与金属腐蚀速率成反比,因此对比热影响区和母材可得 CO₂激光焊热影响区的自腐蚀电流密度最小、线性极化电阻最大,相应的其耐蚀性也最好,其次是 08Al 钢母材,三者中 TIG 填丝焊热影响区的耐蚀性最差,其 i_{corr} 、 R_p 值达到 84.64 $\mu A/cm^2$ 和 313.4 Ω ,近似比较 i_{corr} 这一物理量可得,TIG 填丝焊热影响区的平均耐蚀能力约为 CO₂激光焊热影响区的 60.69%。TIG 填丝焊焊缝区的 i_{corr} 、 R_p 值与 CO₂激光焊焊缝区相比存在较大差异,CO₂激光焊焊缝区的 i_{corr} 、 R_p 值分别为 98.83 $\mu A/cm^2$ 和 256.3 Ω ,而 TIG 填丝焊焊缝区的 i_{corr} 、 R_p 值为 238.4 $\mu A/cm^2$ 和 124.2 Ω ,TIG 填丝焊焊缝区的平均耐蚀能力约为 CO₂激光焊焊缝区的 41.46%。从总体来看,CO₂激光焊热影响区的耐蚀能力在所有接头测试区域中是最好的,而 TIG 填丝焊焊缝区的耐蚀性在所有测试区域中却是最差的。

2.3 08Al 钢焊接接头电化学腐蚀形貌

电化学试验结束后试样表面均覆盖一层腐蚀产物膜,清洗腐蚀产物后观察发现腐蚀表面呈现粗糙度不均的状态,表面整体颜色呈现浅灰色,局部出现棕红色点状区域,图 6 为 08Al 钢母材、CO₂激光焊及 TIG 填丝焊热影响区表面腐蚀形貌。由图可见,

08Al 钢母材和 TIG 填丝焊热影响区均存在数量较多的点蚀区,并且点蚀坑的尺寸相对较大,同时发现,TIG 填丝焊热影响区的部分点蚀坑底部边缘出现长条状的晶间腐蚀沟槽,如图 6(d)所示;CO₂激光焊热影响区的腐蚀表面相对于 08Al 钢母材和 TIG 填丝焊热影响区平整光滑,未发现较大尺寸的点蚀坑,如图 6(b),测试区域腐蚀形貌的差异与 Tafel 曲线的分析结果相一致。一般来讲,金属表面生成的钝化膜并不是均匀分布的,加之各种焊接因素的影响,金属表面某点处的钝化膜被破坏,使膜下的金属基体呈活化状态,而周边的膜仍处于钝化状态,由此便形成了活化—钝化腐蚀电池,钝化表面为阴极,破坏点成为阳极,阳极点的腐蚀速率明显大于钝化区,最终形成点蚀坑^[7]。点蚀的破坏性和隐患性很大,不但容易引起设备穿孔破坏,而且会使晶间腐蚀、剥蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳等易于发生,三者相比 TIG 填丝焊热影响区的钝化膜最薄弱,该区潜在破坏性是最大的。

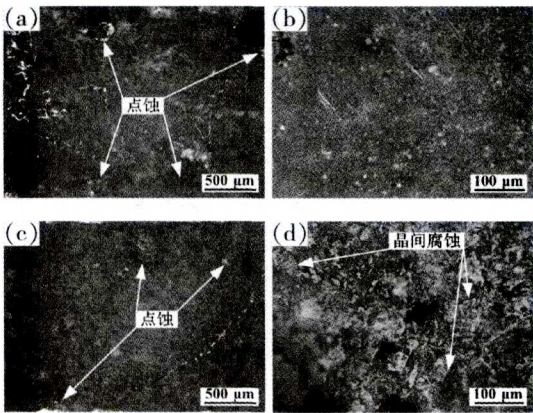


图 6 08Al 钢母材、CO₂激光焊及 TIG 填丝焊热影响区表面腐蚀形貌
(a)母材 (b)CO₂激光焊 (c)TIG 填丝焊 (d)晶间腐蚀
Fig. 6 Surface corrosion morphology of BM and HAZ

对比观察 08Al 钢 CO₂激光焊和 TIG 填丝焊焊缝区的表面腐蚀形貌可见(图 7),CO₂激光焊焊缝区的点蚀坑少,晶间腐蚀较少且不明显,腐蚀表面总体平整光滑;TIG 填丝焊焊缝区存在数量较多且尺寸较大的点蚀坑,局部附着一层难于清洗的棕红色腐蚀产物,同时发现大量点蚀坑底部出现明显的晶间腐蚀裂纹,如图 7(d)。对比所有的表面腐蚀形貌可见,TIG 填丝焊焊缝区的腐蚀最严重,CO₂激光焊热影响区的表面腐蚀形貌最好,这与极化曲线测试结果相符。

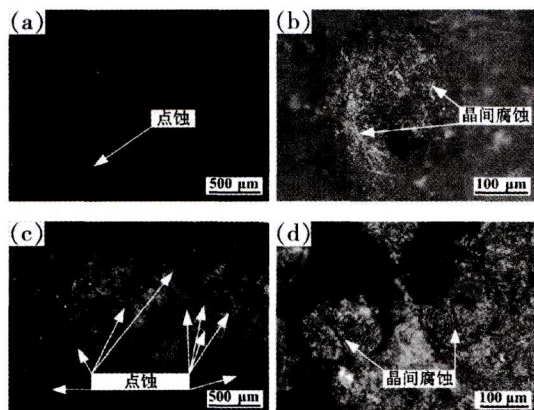


图7 08Al 钢 CO₂激光焊及 TIG 填丝焊焊缝区表面腐蚀形貌

(a)CO₂激光焊 (b)晶间腐蚀 (c)TIG 填丝焊 (d)晶间腐蚀
Fig. 7 Surface corrosion morphology of FZ

2.4 分析与讨论

焊接是一个涉及物理、化学、冶金等的复杂过程,焊接热过程对接头的组织类型、元素分布、力学性能有着直接关系,热源类型的不同,热输入量的多少都会影响焊接接头性能的好坏。TIG 电弧焊与 CO₂激光焊作为两种类型截然不同的热源,它们对接头所带来的影响存在较大差异,从组织方面分析,CO₂激光焊和 TIG 填丝焊的焊缝区均由含量不同的马氏体和少量铁素体构成,而马氏体组织和铁素体组织在电化学性能上存在较大不同,马氏体组织中碳过饱和导致晶格错位,位错密度大,增加了焊缝晶体缺陷的数量,使参与焊缝表面腐蚀反应的活性点数目增多,钝化膜破坏严重,从而导致 TIG 填丝焊焊缝区点蚀数量较多,CO₂激光焊的焊缝区点蚀相对较少,正如图 7 所示。分析认为,除了马氏体组织的影响外,晶粒尺寸不同及铁素体的形态、分布也给接头电化学性能的差异带来一定影响。

从元素含量及分布方面分析,合金元素的分布不均及焊接过程中合金元素的蒸发烧损,都会使得金属表面形成局部腐蚀原电池的倾向变大,从而降低金属耐蚀性,诱导更多点蚀坑的出现。图 8 为 TIG 填丝焊和 CO₂激光焊接接头 EDS 分析所选区域。

表 3 为不同区域 EDS 分析所得到的元素含量。在本试验参数下 TIG 填丝焊的线能量输入为 CO₂激光焊的 6.18 倍,同时 TIG 填丝焊焊丝 ER50-6 中的 Si 和 Mn 的含量明显高于 08Al 钢母材。由表 3 可知,B 区与 E 区的 Si 元素含量却差别不大,Mn 元素未检测到。分析认为:由于 TIG 填丝焊热输入量

较大,导致焊缝区合金元素蒸发烧损严重,同时导致组织形态恶化,因此该区合金元素与 CO₂激光焊焊缝区相比不存在显著优势,而两焊接接头其他区域元素含量的 EDS 分析结果未见明显差异。

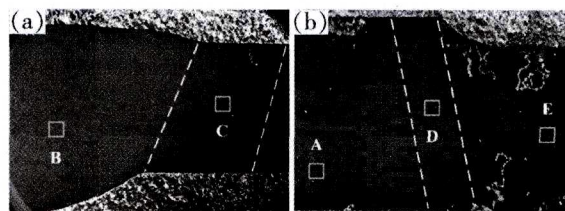


图8 TIG 填丝焊和 CO₂激光焊接头不同区域 EDS 分析
(a)TIG 填丝焊(B-FZ/C-HAZ)
(b)CO₂激光焊(A-BM/D-HAZ/E-FZ)

Fig. 8 EDS analysis of welded joints in different areas

表 3 TIG 填丝焊和 CO₂激光焊接头不同区域元素含量(原子分数/%)

Tab. 3 Elements content of weld joints in different areas(atom fraction%)

区域	Fe	Si	Mn
A	100	0	0
B	99.66	0.34	0
C	100	0	0
D	100	0	0
E	99.88	0.12	0

图 9 为通过 SYSWELD 仿真软件获得的 08Al 钢在 CO₂激光焊及 TIG 填丝焊焊后的 Von Mises 应力分布图(冷却至 $t=1\ 000\text{ s}$),为了便于计算,模型尺寸选择 $70\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 。由图 9(a)和 9(b)可见,CO₂激光焊焊缝区中心位置残余应力在 29.24~116.96 MPa 之间,热影响区残余应力在 409.37~438.62 MPa 范围内;TIG 填丝焊焊缝区残余应力在 135.56~162.67 MPa,热影响区残余应力在 352.34~406.68 MPa。对比发现,CO₂激光焊焊缝区残余应力平均值比 TIG 填丝焊焊缝区低,而 CO₂激光焊热影响区残余应力平均值比 TIG 填丝焊热影响区高,但二者的值相差不大。通常焊接残余应力越大金属腐蚀速率越快,依据此规律得到的热影响区耐蚀能力与实际的耐蚀能力测试结果及表面腐蚀形貌结论相反。由此可得,在焊接残余应力数值相差不大的前提下,残余应力对 CO₂激光焊和 TIG 填丝焊接头耐蚀能力的影响在所有影响因素中不是最重要的。

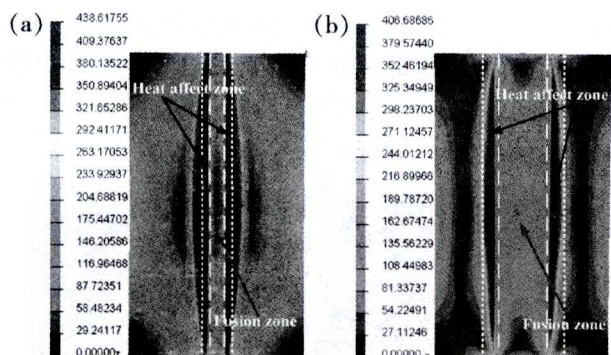


图9 08Al 钢 CO₂ 激光焊及 TIG 填丝焊
焊后 Mises 应力分布图(冷却至 $t=1\ 000\ \text{s}$)

(a)CO₂ 激光焊 (b)TIG 填丝焊

Fig. 9 Mises distribution of TIG welding with wire
and CO₂ laser welding(cooling to 1 000 seconds)

3 结论

(1)TIG 填丝焊接接头热影响区从母材到熔化区晶粒尺寸逐渐增加,在与熔化区交界处晶粒尺寸超过了 08Al 钢母材的尺寸;CO₂ 激光焊接头完全相变区的晶粒尺寸得到明显细化,二者熔化区的马氏体组织含量存在一定差异。

(2)CO₂ 激光焊与 TIG 填丝焊接头不同区域的耐蚀能力依次为 CO₂ 激光焊热影响区>08Al 钢母材>TIG 填丝焊热影响区>CO₂ 激光焊焊缝区>

TIG 填丝焊焊缝区。

(3)焊接接头不同区域的组织形态、含量及晶粒尺寸的大小对 CO₂ 激光焊和 TIG 填丝焊接头耐蚀性产生主要影响,焊缝合金元素含量和焊后残余应力对接头耐蚀能力的影响不明显。

(4)试验结果对 08Al 钢焊接方式的选择和确定接头重点防腐区提供一定的参考。

参考文献

- [1] 杨春利,林三宝.电弧焊基础[M]. 2 版. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2010.
- [2] 陈彦宾.现代激光焊接技术[M]. 1 版. 北京:科学出版社,2005.
- [3] SCHUMACHER J,ZERNER I,NEYE G,et al. Laser beam welding of aircraft fuselage panels[J]. Proc. of ICALEO ,2002(4):2567-2576.
- [4] 左铁钊,肖荣诗,陈铠,等.高强铝合金的激光加工[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [5] 朱张校,姚可夫.工程材料[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
- [6] 肖纪美,曹楚南.材料腐蚀学原理[M]. 北京:化学工业出版社,2002:29-30.
- [7] 王凤平,康万利.腐蚀电化学原理、方法及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2008.