

电弧辅助活性 TIG 焊焊缝组织及性能分析

樊 丁^{1,2}, 刘自刚^{1,3}, 黄 勇^{1,2}, 王新鑫¹

- (1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050;
2. 兰州理工大学 有色金属合金及加工教育部重点实验室, 兰州 730050;
3. 唐山开元焊接自动化技术研究所, 唐山 063020)

摘 要: 电弧辅助活性 TIG 焊(arc assisted activating TIG welding, AA-TIG 焊)是一种新型高效焊接方式,该方法可以分为分离电弧 AA-TIG 焊和耦合电弧 AA-TIG 焊两种方式。试验采用不锈钢为母材,通过改变辅助电弧中氧气引入量,分析焊缝组织及性能的变化规律。结果表明,焊缝组织以奥氏体为主,在奥氏体边界析出少量的铁素体,此时焊缝的抗拉强度变化不大,随着氧气引入量的增大,焊缝的低温冲击韧性有所下降;相对于分离电弧 AA-TIG 焊,耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝的冲击韧性下降较少。在氧气的引入量低于 2 L/min 时,耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝冲击韧性较好,甚至超过普通 TIG 焊焊缝。

关键词: 不锈钢; AA-TIG 焊; 氧气引入量; 组织及性能

中图分类号: TG 444 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2014)04-0001-05

0 序 言

为了克服钨极氩弧焊(tungsten inert gas welding, TIG 焊)存在的焊缝熔深浅、焊接效率低等问题,20 世纪 60 年代,乌克兰巴顿焊接研究所开发了活性 TIG 焊方法。该方法是在待焊焊道表面涂覆一层活性剂,然后进行 TIG 焊接。该方法可显著增加焊缝熔深,10 mm 的钢板在不开坡口的条件下可一次焊透,是普通 TIG 焊焊缝熔深的 2~3 倍^[1-3]。但是该方法需要一个涂覆活性剂的过程,很难实现焊接自动化。另外该方法需要针对不同母材研发活性剂且活性剂很难保证均匀涂覆^[4]。

针对该问题作者提出了电弧辅助活性 TIG 焊(AA-TIG 焊),该方法是通过辅助电弧引入活性元素,然后再进行普通 TIG 焊。该方法有两种实现方式,分别为分离电弧模式和耦合电弧模式。分离电弧 AA-TIG 焊是采用辅助电弧(以 Ar + O₂ 作为保护气体)在待焊焊道表面预熔一道氧化层,该氧化层可起到活性剂的作用。耦合电弧 AA-TIG 焊一前一后布置两把焊枪,辅助电弧在前,主弧在后,两个电弧实现良好耦合。该方法既可以增加焊缝熔深,同时还可以避免活性剂的涂覆过程,有利于实现焊接自动化,提高焊接效率^[5-8]。

试验通过改变辅助电弧中活性气体 O₂ 的引入量,分析了辅助电弧中活性气体 O₂ 对 AA-TIG 焊焊缝组织及性能的影响,这对于促进该方法的分析与应用具有重要意义。

1 试验方法

试验采用 SUS304 不锈钢板材,规格为 200 mm × 80 mm × 8 mm。焊前先用砂纸打磨表面,直到露出金属光泽,再用酒精擦拭,以去除表面的氧化膜和油污,然后分别进行分离电弧和耦合电弧 AA-TIG 焊。焊接时采用不开坡口平板熔焊的方法,8 mm 厚的钢板一次焊透。辅助电弧参数如表 1 所示。主弧焊接工艺参数为焊接电流 180 A,焊接速度 80 mm/min,氩气流量 15 L/min,弧长 3 mm。分离电弧和耦合电弧 AA-TIG 焊各选 4 组试样,辅助电弧保护

表 1 辅助电弧工艺参数

Table 1 Parameters of assisted arc

试样编号		焊接电流	焊接速度 v	氩气流量	氧气流量	弧长
分离电弧	耦合电弧	I/A	$(mm \cdot min^{-1})$	$q_1/(L \cdot min^{-1})$	$q_2/(L \cdot min^{-1})$	l/mm
A 组	E 组	70	80	14.0	1.0	3
B 组	F 组	70	80	13.0	2.0	3
C 组	G 组	70	80	12.0	3.0	3
D 组	H 组	70	80	11.5	3.5	3

收稿日期: 2012-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074084); 甘肃省自然科学基金资助项目(1010RJZA037)

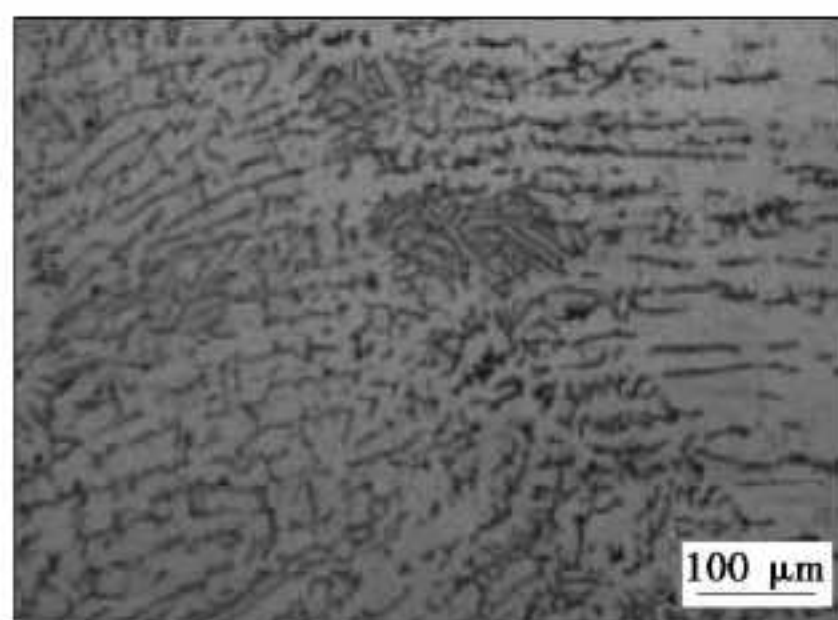
气体总流量保持 15 L/min, 氧气引入量分别为 1, 2, 3, 3.5 L/min.

焊缝金属试样沿垂直焊缝的方向截取, 然后研磨、抛光, 采用王水腐蚀, 观察金相, 同时进行 XRD 分析. 依据国家标准 GB/T228—2002《金属材料 室温拉伸试验方法》, 国家标准 GB/T229—1994《金属夏比缺口冲击试验方法》, 分别进行常温拉伸试验、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温冲击试验. 冲击试样的尺寸为 55 mm $\times$ 10 mm $\times$ 5 mm, 缺口开在焊缝横截面上. 然后对冲击断口进行扫描电镜分析, 并对焊缝中的氧、铬、镍、铁素体含量等进行了测试.

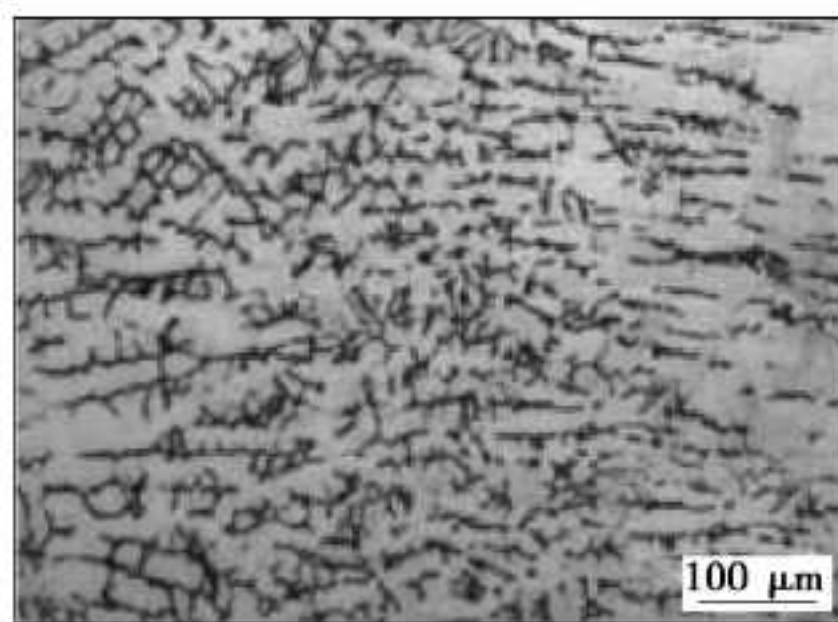
2 试验结果及分析

2.1 焊缝金相组织

焊缝的金相组织形貌如图 1 所示. 焊缝组织的基体为奥氏体, 在奥氏体间隙沿轧制方向分布着少量的铁素体. 熔合线的右侧为热影响区, 主要为奥氏体组织. 熔合线的左侧为粗大的柱状晶. 通过对比发现分离电弧 AA-TIG 焊的柱状晶组织粗大, 排列较为规则. 耦合电弧 AA-TIG 焊的柱状晶组织柱状特征不明显.



(a) 分离电弧 AA-TIG 焊



(b) 耦合电弧 AA-TIG

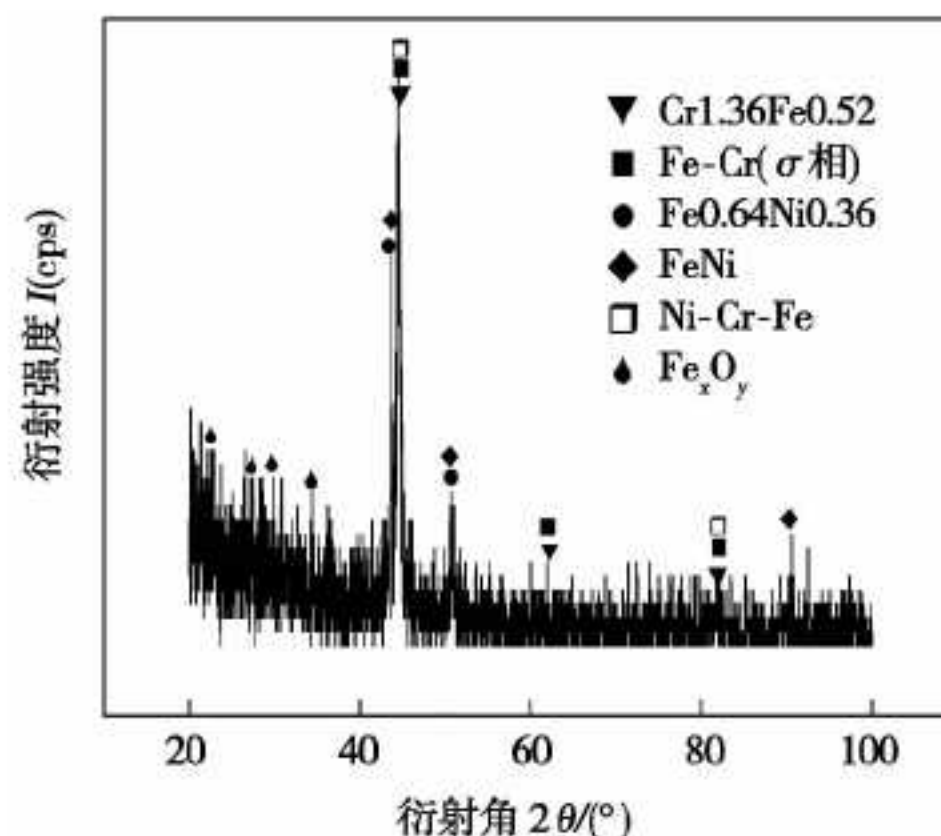
图 1 焊缝熔合区显微组织形貌

Fig. 1 Microstructure of weld fusion zone

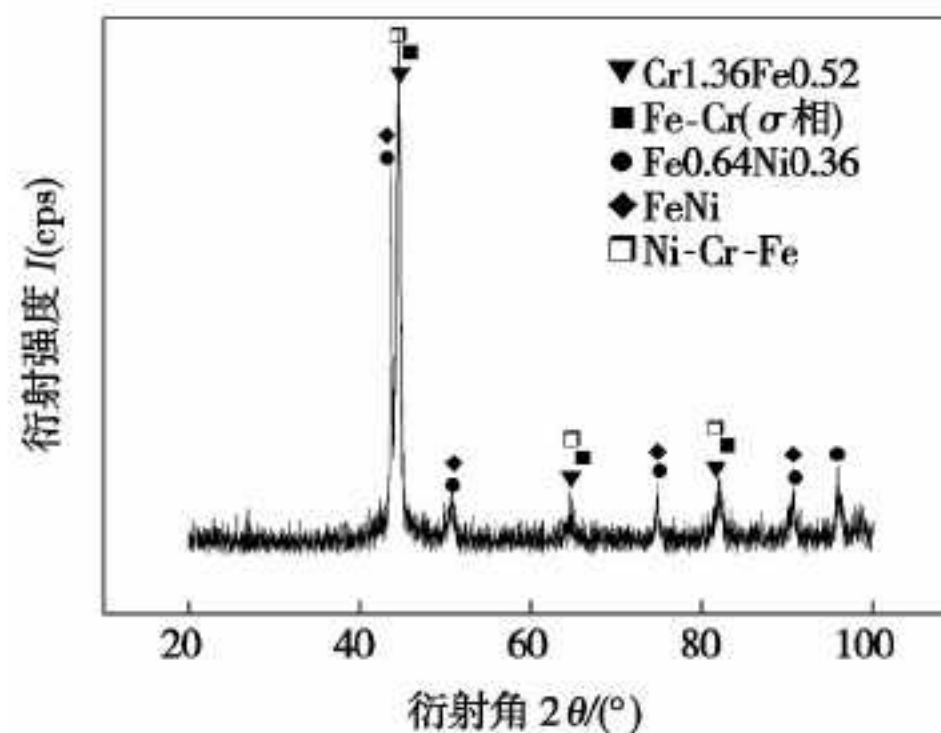
2.2 XRD 物相分析

相同的工艺参数条件下, 对两种焊接方式的焊

缝金属进行 XRD 物相分析, 结果如图 2 所示. 焊缝中的物相主要是由铁、铬、镍形成的化合物. 在分离电弧 AA-TIG 焊的焊缝中还有氧化物的存在, 但在耦合电弧 AA-TIG 焊的焊缝中没有观察到氧化物的存在.



(a) 分离电弧 AA-TIG 焊



(b) 耦合电弧 AA-TIG 焊

图 2 焊缝 X 射线衍射图谱

Fig. 2 X-ray diffraction of weld bead

2.3 焊缝拉伸试验

母材以及 AA-TIG 焊焊缝拉伸试验结果如图 3 所示. 焊缝拉伸试验断裂位置都在热影响区或柱状晶区. 从拉伸试验的结果可以看出, 焊缝的抗拉强度随着辅助电弧中氧气引入量的增加变化不大, 焊缝的抗拉强度和母材基本持平. 这说明辅助电弧中引入一定量的氧气对焊缝的抗拉强度影响不大.

2.4 焊缝低温冲击试验

AA-TIG 焊焊缝的 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击试验结果如图 4 所示. 在相同试验条件下, 母材和普通 TIG 焊缝的冲击吸收功分别为 88.3, 87.0 J. 从图 4 可以看出, 相对于母材和普通 TIG 焊缝, AA-TIG 焊缝的冲击性能随着辅助电弧中氧气引入量的增多而下降. 相对于分离电弧 AA-TIG 焊, 耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝的冲击性能下降较少. 耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝, 在氧

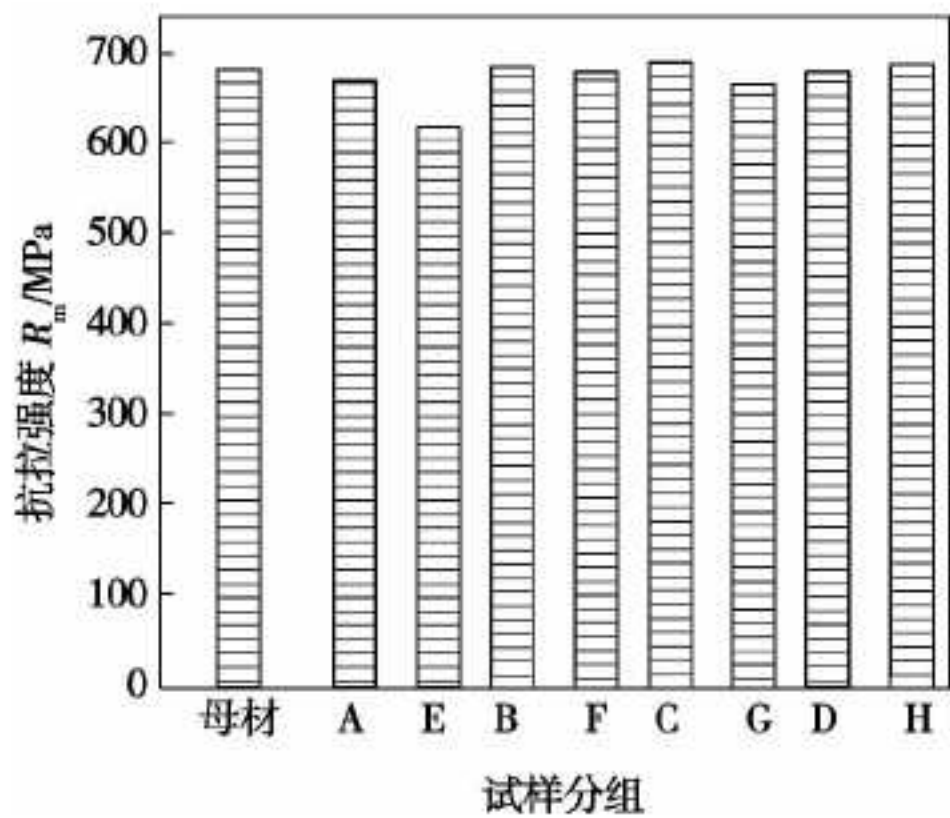


图 3 拉伸试验结果

Fig. 3 Results of tension test

气引入量低于 2 L/min 时具有较好的低温冲击韧性, 甚至超过了普通 TIG 焊焊缝的冲击性能。

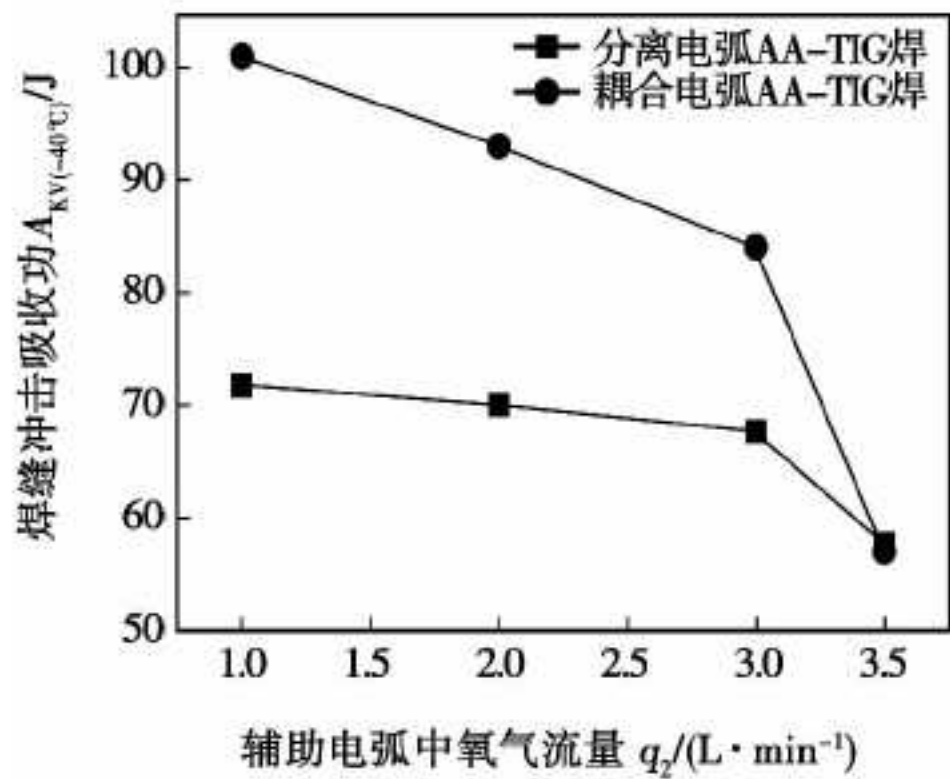


图 4 冲击试验结果

Fig. 4 Results of impact test

2.5 冲击断口电镜扫描分析

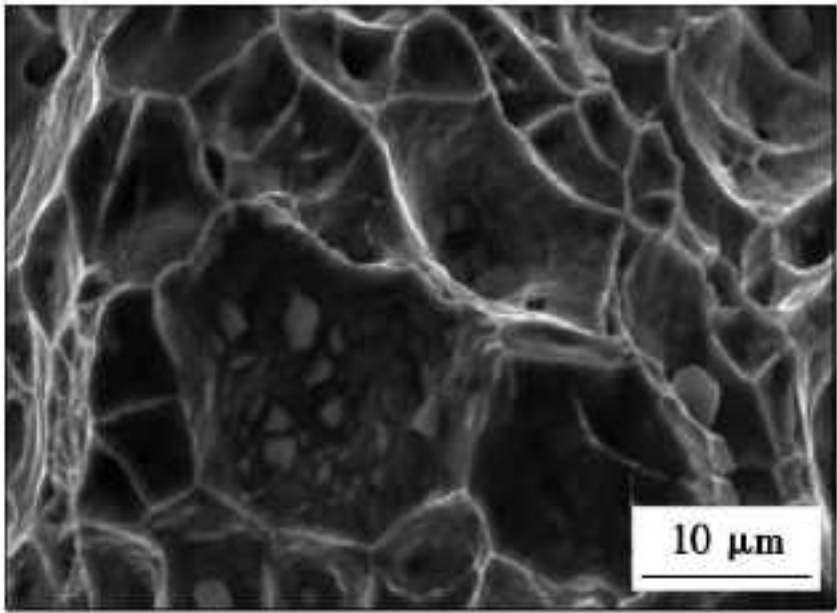
图 5 为焊缝的冲击断口 SEM 形貌。从图 5 可以看出试样的断口形貌以韧窝为主, 表现出韧性断裂的特征。在韧窝的底部还有析出的第二相粒子。相对于耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝, 分离电弧 AA-TIG 焊焊缝断口中的第二相粒子较多, 且体积较大。

2.6 焊缝中铬和镍及铁素体含量测试

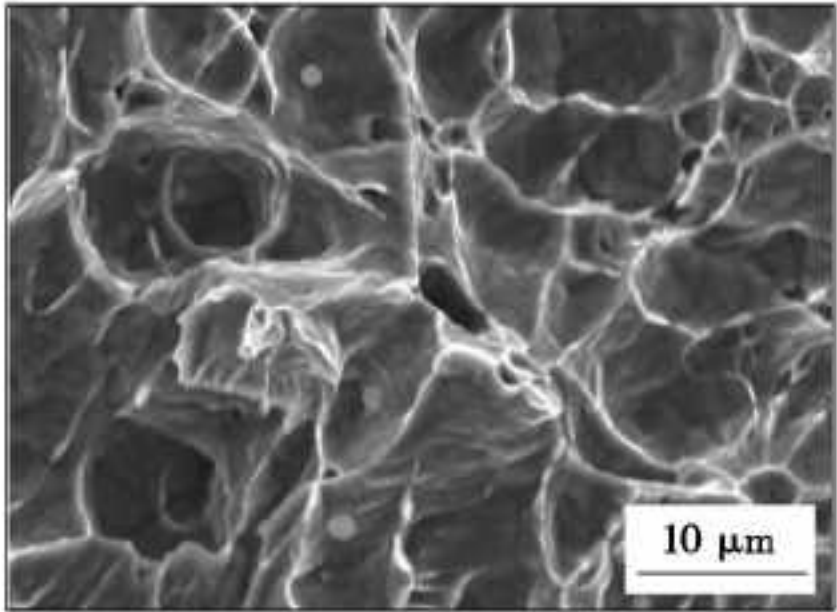
分别按照国家标准 GB/T223.11—2008《钢铁及合金 铬含量的测定 可视滴定或电位滴定法》, 国家标准 GB/T1954—2008《铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体测量方法》对焊缝中的铬、镍和铁素体 (F) 含量进行测试, 结果如表 2、表 3 所示。可以看出分离电弧 AA-TIG 焊焊缝中 Cr 元素含量随着辅助电弧中氧气引入量的增加而降低, 铁素体含量也降低, 而耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝中的铬、镍和铁素体含量变化不大。

2.7 焊缝中氧含量分析

按照国家标准 GB/T11261—2006《钢铁氧含量



(a) 分离电弧 AA-TIG 焊冲击断口形貌



(b) 耦合电弧 AA-TIG 焊冲击断口形貌

图 5 焊缝冲击断口形貌

Fig. 5 Micro appearance of impact fracture

表 2 分离电弧 AA-TIG 焊焊缝中铬和镍及铁素体含量 (质量分数, %)

Table 2 Contents of Cr, Ni and F in separated arc AA-TIG weld bead			
	Cr	Ni	铁素体
A 组	18.38	8.16	9.48
B 组	18.21	8.17	5.93
C 组	17.23	8.15	3.28
D 组	17.21	8.18	2.77

表 3 耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝中铬和镍及铁素体含量 (质量分数, %)

Table 3 Contents of Cr, Ni and F in coupling arc AA-TIG weld bread			
	Cr	Ni	铁素体
E 组	18.50	8.20	6.98
F 组	18.32	8.23	6.25
G 组	18.59	8.35	7.48
H 组	18.20	8.18	5.18

的测定 脉冲加热惰气熔融——红外线吸收法》对焊缝中的氧含量进行测试, 结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 随着辅助电弧中氧气引入量的增加, 焊缝中的氧含量增加。在辅助电弧中氧气引入量相同的条件下, 分离电弧 AA-TIG 焊焊缝中的氧含量要高于耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝中的氧含量。

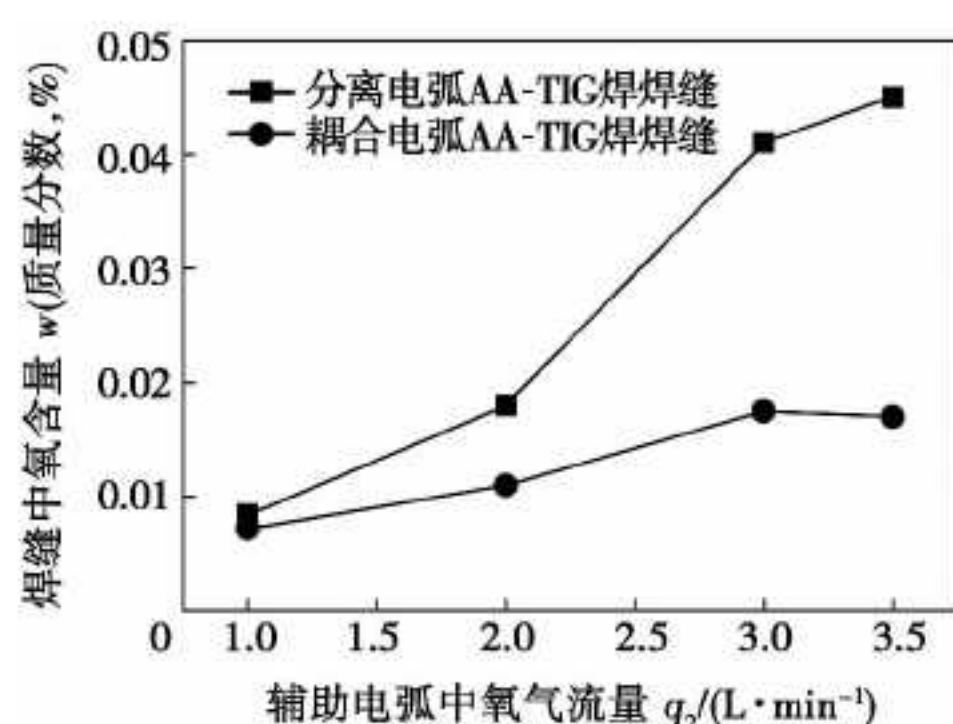


图6 焊缝中氧含量

Fig. 6 Oxygen content in weld bead

3 讨 论

焊缝的力学性能主要与焊缝金属的晶体结构、化学成分、显微组织等有关。由于电弧辅助活性 TIG 焊在焊接过程中引入了活性元素 O, 因此焊缝中的 O 元素含量将对焊缝的力学性能产生重要影响。焊缝中的氧含量既包括焊缝中溶解的氧, 也包括以化合物形式存在的 O 元素。在焊接过程中氧主要有原子和 FeO 两种存在形式, 它们均可以溶于液态金属。原子 O 在液态金属中的溶解度 ($[O]_{\max}$) 随温度升高而增大, 它与温度的关系为

$$\lg [O]_{\max} = -\frac{6320}{T} + 2.734 \quad (1)$$

式中: T 为液态金属的温度。从式 (1) 可以看出随着温度降低氧的溶解度降低。在室温下焊缝中几乎不溶解原子 O, 焊缝中的氧主要以氧化物形式存在。电弧辅助活性 TIG 焊过程中, 构成了一个由金属、金属氧化物和氧化性气体组成的系统。在这样一个系统中金属被氧化或者被还原是以金属氧化物的分解压 p_{O_2} 作为判据的^[9]。假设在金属—氧—金属氧化物系统中氧的实际分压为 $\{p_{O_2}\}$, 则当 $\{p_{O_2}\} > p_{O_2}$ 时金属被氧化, 当 $\{p_{O_2}\} = p_{O_2}$ 时处于平衡状态, 当 $\{p_{O_2}\} < p_{O_2}$ 时金属被还原。金属氧化物的分解压是温度的函数, 它随温度的升高而增加, 在不同温度下 FeO 的分解压为

$$\lg p_{O_2} = \frac{26730}{T} + 6.43 \quad (2)$$

分离电弧 AA-TIG 焊是两把焊枪分别作用, 而耦合电弧 AA-TIG 焊是两把焊枪同时作用, 形成耦合电弧。因此耦合电弧 AA-TIG 焊接时熔池的温度较高, 所以在进行耦合电弧 AA-TIG 焊时, 形成的金属氧化物在较高温度的条件下, 分解压较高, 金属被还原的可能性较大。而在分离电弧 AA-TIG 焊时金属被氧化的可能性较大。因此在耦合电弧 AA-TIG 焊时, 焊

缝中形成的金属氧化物相对较少, 进入熔池中的金属氧化物也较少。因此相对分离电弧 AA-TIG 焊焊缝熔池中氧含量较低。

从图 2a 的结果可以看出, 焊缝中只有铁的氧化物, 而没有观察到铬、锰、硅的氧化物, 这并不表明焊接中铬、锰、硅没有与氧发生反应。因为在电弧的高温作用下, 这些元素均可能与氧发生氧化反应, 生成 Cr_2O_3 、 SiO_2 、 MnO 、 FeO 等氧化物, 生成的 FeO 溶于液态金属并向熔池中扩散, 而生成的其它氧化物 (Cr 、 Mn 、 Si 3 种元素的氧化物及其复合氧化物) 不溶于液态金属且其密度较小而上浮到表面形成氧化层熔渣^[4]。所以在焊缝中未观察到 Cr 、 Mn 、 Si 3 种元素的氧化物及其复合氧化物。

从图 3、图 4 的结果可以看出, 氧对焊缝的强度影响不大。当焊缝中氧含量过高时, 焊缝的低温韧性明显下降。对照图 6 从总的变化趋势上可以看出, 相对于耦合电弧 AA-TIG 焊, 分离电弧 AA-TIG 焊焊缝的氧含量变化较大, 其冲击性能不如耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝变化显著。这是由于焊缝的力学性能不仅受氧含量的影响, 还受焊缝中铁素体含量的影响。氧在焊接过程中与金属反应生成的氧化物若滞留在焊缝中, 就可能形成氧化物夹渣。另外若溶于熔池中的氧气在熔池金属冷却过程中来不及溢出, 就会在焊缝中形成气孔。气孔和氧化物夹渣都会降低焊缝的低温韧性。从表 2、表 3 的结果可以看出, 分离电弧 AA-TIG 焊焊缝中的铁素体含量随辅助电弧中氧气引入量的增加而下降, 而耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝中的铁素体含量随辅助电弧中氧气引入量的增加变化不大。铁素体属于体心立方结构, 相对于面心立方结构的奥氏体其滑移系少、变化能力弱、塑韧性差。因此对于分离电弧 AA-TIG 焊, 随着焊缝中氧含量的增加, 焊缝中铁素体含量减少, 奥氏体含量增加, 奥氏体含量的增加就弱化了氧对焊缝冲击韧性的降低作用, 因此焊缝的冲击性能变化不大。耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝的力学性能主要受焊缝中氧含量的影响, 没有奥氏体增加的弱化作用, 故冲击韧性变化相对显著。从定量分析可看出, 当辅助电弧氧气引入量为 1 L/min 时, 分离电弧和耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝中氧含量相当, 但焊缝的冲击性能相差较大。这是由于分离电弧 AA-TIG 焊焊缝中形成了较多的铁素体, 铁素体降低了焊缝低温冲击韧性。当辅助电弧氧气引入量为 3.5 L/min 时, 分离电弧和耦合电弧 AA-TIG 焊焊缝中氧含量相差较大, 但焊缝的冲击性能相当。这是由于分离电弧 AA-TIG 焊焊缝中, 铁素体含量较低, 奥氏体含量较高, 强化了焊缝的低温冲击韧性。

焊缝中的第二相粒子也会对焊缝的力学性能产生影响,影响程度与第二相粒子的大小、形状、分布、第二相性质及其与基体的结合力等性质有关。从图2结果可以看出焊缝中析出了第二相粒子,第二相粒子是名义化学成分为 FeCr 的 σ 相,该第二相粒子硬而脆,当其体积含量高时会降低焊缝的冲击韧性。从图5结果可以看出分离电弧AA-TIG焊焊缝中的第二相粒子较大且数量较多,而耦合电弧AA-TIG焊焊缝中的第二相粒子较少,且体积较小。第二相粒子无论分布于晶界还是独立分布于基体中,当其体积增大、数量增多时都会使焊缝的冲击韧性下降。

焊缝的力学性能是晶体结构、化学成分、显微组织等因素共同作用的结果。由以上分析可以看出,在相同的工艺参数条件下,耦合电弧AA-TIG焊的焊缝低温冲击韧性相对分离电弧AA-TIG焊焊缝较好,这主要与焊缝中氧含量、铁素体含量、第二相粒子等因素有关。对于分离电弧AA-TIG焊需要限制辅助电弧中氧气引入量,才能获得较好的焊缝冲击韧性。

4 结 论

(1) SUS304 奥氏体不锈钢电弧辅助活性TIG焊焊缝组织以奥氏体为主,在奥氏体边界析出少量的铁素体。主要的物相是由铁、铬、镍组成的化合物。相同的工艺参数条件下,分离电弧AA-TIG焊比耦合电弧AA-TIG焊焊缝中的氧含量高。

(2) 随着辅助电弧中氧气引入量的增加焊缝的拉伸性能变化不大,而焊缝的低温冲击韧性有所下降。在相同的工艺参数条件下,相对于分离电弧AA-TIG焊,耦合电弧AA-TIG焊焊缝的低温冲击韧性下降较少。在氧气的引入量低于 2 L/min 时,耦合电弧AA-TIG焊焊缝冲击韧性较好,甚至超过普通TIG焊焊缝。

参考文献:

- [1] 刘凤尧,林三宝,杨春利,等. TIG焊活性剂对焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2002, 23(1): 1-4.
- Liu Fengyao, Lin Sanbao, Yang Chunli, et al. Effect of activa-

ting fluxes on weld form in TIG Welding of stainless steel and titanium alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(1): 1-4.

- [2] Zhang Ruihua, Fan Ding. Numerical simulation of effects of activating flux on flow patterns and weld penetration in A-TIG welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(1): 15-23.
- [3] Tanaka M, Shimizu L, Terasaki H, et al. Effect of activating flux on arc phenomena in gas tungsten arc welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2000, 5(6): 397-402.
- [4] 陆善平,董文超,李殿中,等. 不锈钢材料的高效率焊接新工艺[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1347-1364.
- Lu Shanping, Dong Wenchao, Li Dianzhong, et al. High efficiency welding process for stainless steel materials [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(11): 1347-1364.
- [5] 樊丁,林涛,黄勇,等. 电弧辅助活性TIG焊接法[J]. 焊接学报, 2008, 29(12): 1-4.
- Fan Ding, Lin Tao, Huang Yong, et al. Arc assisted activating TIG welding process [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(12): 1-4.
- [6] 黄勇,樊丁,林涛,等. 不锈钢电弧辅助活性TIG焊[J]. 焊接学报, 2009, 30(10): 1-4.
- Huang Yong, Fan Ding, Lin Tao, et al. Arc assisted activating TIG welding process for stainless steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(10): 1-4.
- [7] 黄勇,樊丁,林涛,等. 不锈钢AA-TIG焊接法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8): 68-72.
- Huang Yong, Fan Ding, Lin Tao, et al. Arc assisted activating TIG welding process for stainless steels [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(8): 68-72.
- [8] 杨磊,樊丁,黄勇,等. 耦合电弧AA-TIG高速焊工艺[J]. 电焊机, 2011, 41(5): 57-61.
- Yang Lei, Fan Ding, Huang Yong, et al. Research on coupling arc AA-TIG high-speed welding process [J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(5): 57-61.
- [9] 张文钺. 焊接冶金学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [10] 樊丁,康再祥,黄勇,等. AA-TIG焊表面氧化层成分及形成过程分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(6): 5-9.
- Fan Ding, Kang Zaixiang, Huang Yong, et al. Analysis of composition and formation of AA-TIG pre-melting oxide layer [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(6): 5-9.

作者简介: 樊丁,男,1961年出生,教授,博士研究生导师。主要从事焊接物理、焊接智能控制以及激光加工等方面的研究,发表论文200余篇。Email: fand@lut.cn

MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

Structure and properties of arc assisted activating TIG welding

FAN Ding^{1,2}, LIU Zigang^{1,3}, HUANG Yong^{1,2}, WANG Xinxin¹ (1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys (The Ministry of Education), Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Tangshan Kai Yuan Welding Automation Technology Institute, Tangshan 063020, China). pp 1–5

Abstract: Arc assisted Activating TIG welding is a new welding process with high efficiency, which includes separated arc AA-TIG and coupled arc AA-TIG. In this paper, with stainless steel as the base metal, the effect of quantity of O₂ in the assisting arc on the structure and properties of the weld was investigated. The experimental results show that the weld structure consisted of mainly austenite with a small amount of ferrite distributing in the austenite boundaries, and the tensile strength of the weld was consistent. With the increase of the introduced quantity of O₂, the low-temperature impact toughness of the weld slightly decreased. The impact toughness of the weld dropped less in coupled arc AA-TIG welding than in separated arc AA-TIG welding. When the introduced quantity of O₂ was less than 2 L/min, the impact toughness of weld in coupling arc AA-TIG weld was even better than that in traditional TIG welding.

Key words: stainless steel; arc assisted activating TIG welding; introduced quantity of O₂; structure and property

Modeling and analysis of underwater wet weld appearance based on response surface methodology

SHI Yonghua, LIN Shuiqiang, ZHENG Zepei (School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China). pp 6–10

Abstract: Weld geometry during underwater wet welding determines the mechanical properties of the resultant welded joints. Compared to those welded in an atmosphere environment, the factors that affect the weld geometry of the underwater wet weld are much more complicated. Underwater wet flux cored arc welding (FCAW) was conducted at different depths within a hyperbaric chamber. Mathematical models between underwater wet welding parameters and the weld width and reinforcement were established by response surface methodology (RSM). The effect of welding current, arc voltage, water depth and their interactions on the appearance of underwater wet weld was analyzed. The results show that the weld width increased with the increasing of underwater wet welding current and arc voltage, and the weld width decreased with the increasing of water depth. But as the water depth increased further, the effect of water depth on reducing weld width decreases. With increasing the welding current, the weld reinforcement increased and the effect of welding current on the reinforcement was stronger than arc voltage.

Key words: underwater welding; response surface methodology (RSM); weld appearance

A method to detect micro weld gap based on magneto-optical imaging

GAO Xiangdong¹, ZHEN Renhe^{1,2} (1. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. School of Automation, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510635, China). pp 11–14

Abstract: A new method was developed to detect the micro weld gap (0–0.1 mm) during laser welding, based on Faraday magneto-optical effect imaging. During laser butt-welding of carbon steel, a magnetic excitation device was used to magnetize the weldment. It was found that the magnetic field distribution in the weld zone was different from other zones. A magneto-optical sensor was placed upon the magnetized weldment to obtain the magneto-optical images of the weld. Different magnetic field intensities would lead to rotation of the polarized light of magneto-optical sensor in different directions, and the magneto-images consisting of the joint position feature could be captured. By using image-processing methods, such as median filtering, grayscale transform, threshold segmentation and morphology, the micro weld gap center could be extracted rapidly from a magneto-optical image. The experimental results show that the magneto-optical images could effectively and accurately reflect the position of micro weld gap. The proposed method provides a novel approach for automatic identification and tracking of the micro weld gap during laser welding.

Key words: magneto-optical imaging; micro weld gap; laser welding

Effect of natural aging on mechanical properties of 7050 aluminum alloy friction stir welding

DONG Chunlin¹, ZHANG Kun¹, LUAN Guohong¹, MENG Qiang¹, FU Ruidong² (1. China FSW Center, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China). pp 15–18

Abstract: Natural aging of 2.5 mm thick 7050-T7451 aluminum alloy friction stir welded joints was conducted for 72 h and 17 520 h, respectively. The tensile test, Vickers microhardness test and microstructure observation on the joints were carried out to investigate the effect of natural aging time on the mechanical properties, microhardness profile, microstructure and precipitation. The results show that the yield strength, tensile strength and elongation of the joint subjected to 17 520 h natural aging were about 20%, 12% and 25% higher than those of joint natural aged for 72 h. Moreover, the microhardness values were 60 MPa higher in the nugget zone and thermal-mechanical-affected zone in the joint natural aged for 17 520 h. More GP zone, η' and