

工业纯钛 TA2 双钨极氩弧焊焊接接头耐腐蚀性能研究

周洋¹, 孔凉^{1,2}, 王敏^{1,2}, 华学明^{1,2}

(1. 上海市激光制造及材料表面改性重点实验室 (上海交通大学), 上海, 200240)

摘要: 钛及钛合金凭借其比强度高、密度小和良好的耐腐蚀性能, 广泛应用于汽车、生物医疗、航空航天、石油化工、海洋工程等领域。双钨极氩弧焊相比较传统的钨极氩弧焊可以抑制焊接缺陷, 提高焊接速度。本文研究了工业纯钛 TA2 双钨极氩弧焊焊接接头的耐腐蚀性能, 研究表明, 双钨极氩弧焊提高了工业纯钛的耐腐蚀性能, 扩大了其在恶劣环境下的使用范围。

关键词: 工业纯钛; 双钨极氩弧焊; 耐腐蚀性能

0 引言

钛及钛合金导热率低、比强度高、耐腐蚀, 是非常优异的结构材料, 在航空航天、石油化工和海水淡化等行业发挥着巨大的作用[错误!未定义书签。]。

钛及钛合金应用最多的焊接方法是钨极氩弧焊 (TIG 焊), 其他焊接方法如激光焊、电子束焊、爆炸焊等在焊接钛及钛合金中也获得了应用。许多学者研究发现钛及钛合金在焊接后, 其焊接接头的耐腐蚀性能与母材相当或有一定的提高[2]。

M.Balasubramanian 等人[3]研究脉冲 TIG 焊接工艺参数对钛合金 Ti-6Al-4V 耐腐蚀性能影响, 通过动电位极化曲线, 研究发现, 峰值电流和脉冲频率对耐腐蚀性能有较大的影响, 并且细化晶粒能够提高腐蚀电阻, 从而提高其耐腐蚀性能。

Z. Sun 等人[4]通过动电位极化曲线和电化学极抗谱图发现, 工业纯钛在激光重熔 (Nd:YAG 激光焊机) 后, 在 3%NaCl 溶液中腐蚀电流下降, 极化阻抗增加, 耐腐蚀性能得到提高。并且通过金相显微镜和扫描电镜 (SEM) 观察发现, 使用小热输入参数的激光重熔后, 高的冷却速度使得重熔区显微组织发生改变, 从 α 相转变为针状的马氏体组织, 可能是提高耐腐蚀性能的因素。

文献中关于工业纯钛焊接接头耐腐蚀性能研究较少, 尤其是双钨极氩弧焊焊接接头, 本文将

着重研究双钨极氩弧焊焊接接头耐腐蚀性能。

1 材料和方法

试验材料为 1.24mm×60mm×400mm 工业纯钛 TA2 薄板, 其化学成分如表 1 所示。焊前需清理钛板表面氧化膜, 并用丙酮擦洗。

表 1: 工业纯钛 TA2 化学成分

Fe	C	O	N	H	Alt
0.30	0.10	0.20	0.05	0.015	

采用双枪 TIG 焊对纯钛 TA2 薄板进行焊接, 焊枪 L 和焊枪 T 呈大致对称倾斜分布, 主电极电流 $I_L=240A$, 辅电极电流 $I_T=175A$, 焊接速度 3m/min, 改变电极间距和焊枪角度进行双钨极氩弧堆焊, 并且研究电极间距和焊枪角度对焊接接头耐腐蚀性能的影响。具体焊接示意图如下图 1 所示, 焊接参数如下表 2 所示。

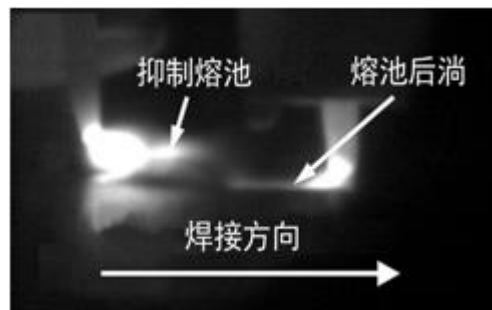


图 1: 双钨极氩弧焊焊接示意图

表 2：双枪 TIG 焊焊接工艺参数

	电极间距 (mm)	因素		序号
		焊枪 L 倾角 (°) 和焊枪 T 倾角 (°)		
A(电极间距改 变)	7	80° 和 80°		A-1
	11	80° 和 80°		A-2
	15	80° 和 80°		A-3
B(焊枪角度改 变)	15	80° 和 80°		B-1
	15	80° 和 90°		B-2
	15	90° 和 80°		B-3

分别选取母材和表 2 中不同焊接接头的焊缝和热影响区作为工作电极，在试样背面固定铜丝导线，保持工作电极的表面积为 0.5cm^2 ，除工作电极外，其余部分采用环氧树脂进行固态封样。然后对工作表面打磨到 800 目，并用无水乙醇进行清洗。使用 ZENNIUM 电化学综合测试仪对试样进行电化学腐蚀测试，并且采用三电极电解池测试的实验方法，辅助电极为铂片电极，参比电极为饱和甘汞电极，电解液为 3.5%NaCl 溶液，实验在室温下进行。首先进行电化学阻抗谱(EIS)的测量，测试前，先测量 5 个小时的开路电位，使得整个体系稳定，然后施加交流正弦激励信号，幅值 10mV，频率扫描范围为 $10^5 \sim 10^{-3}\text{Hz}$ ，记录实验数据，对测定结果进行数据处理得到反映阻抗信息的 Nyquist 图和 Bode 图。然后进行动电位极化曲线的测试，同样的测试前，先测量 5 个小时的开路电位，使得整个体系稳定。然后从 -0.3V (相比于开路电位) 测试到 2V (相比于开路电位)，测试扫描速率为 $0.001\text{V} / \text{s}$ 。

2 结果与分析

双钨极氩弧焊的金相组织如图 2 所示，靠近母材热影响区包含呈细条状的柱状晶组织，可清晰看到一条几乎垂直的线将母材和热影响区组织分开，靠近焊缝的热影响区组织较粗大，可以看到分布均匀的等轴晶，焊缝中心主要是粗大等轴晶和大量细小的枝晶。放大倍数，焊缝中心细小的枝晶几乎占据了整个焊缝界面的 50%，靠近焊缝的热影响区为均匀分布的等轴晶。进一步放大倍数，观察靠近母材的热影响区组织，可以发现，这一部分组织的柱状晶晶界处分布着较多的细小的 α 相，还有少部分条状晶和锯齿状晶。

分析认为，两个电弧作用下的共熔池区域，后淌熔池受抑制，熔池内部液态金属相互碰撞，搅碎枝晶，由于焊接速度快，晶粒来不及长大，最终形成细小的枝晶，而未被搅拌的那部分熔池凝固时晶粒继续长大，形成了较为粗大的等轴晶，以熔合线处的组织较为明显。

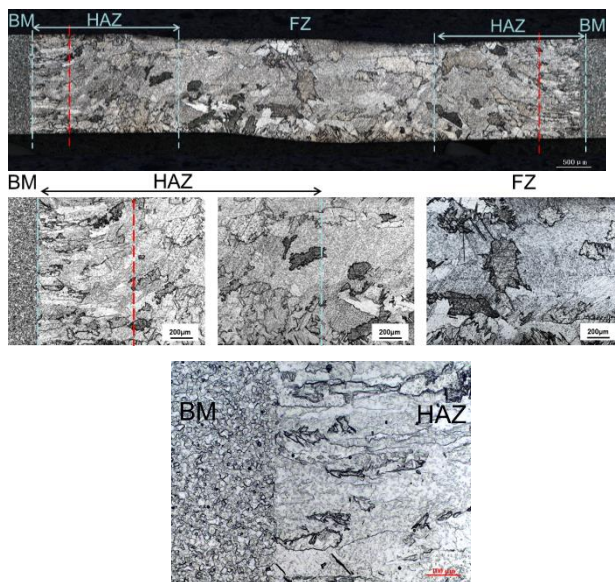


图 2：双钨极氩弧焊金相组织

双枪 TIG 焊焊接接头电化学阻抗谱图如图 3 所示，这些电化学阻抗谱可以拟合成相对应的等效电路如图 4 所示，其中 R_s 是溶液的阻抗， R_p 是试样的极化阻抗，CPE 是常相位角元件。实验曲线和拟合的等效电路的曲线误差很小，如图 5 所示。 R_s 、 R_p 和 CPE 的值如表 3 所示。

从图 3 中可以看出，母材和双枪 TIG 焊焊接接头的焊缝和热影响区的容抗弧大小有一定差别，其中焊缝和热影响区的容抗弧直径较大，而母材的容抗弧直径相对较小，由此说明，焊缝和热影响区表面的钝化膜要比母材稳定。

同样的从表 3 中也发现了同样的结果，焊缝和热影响区的极化阻抗要高于母材，说明焊缝和热影响区的耐腐蚀性能要略好于母材。考虑到不同焊接工艺参数的焊缝和热影响区的极化阻抗的值有较高的分散性，认为这些试样的耐腐蚀性能相当，即不同焊接工艺参数下，焊缝和热影响区耐腐蚀性能相当。

图 3: 母材、HAZ 和 FZ 在 3.5%NaCl 溶液中的 Nyquist 图

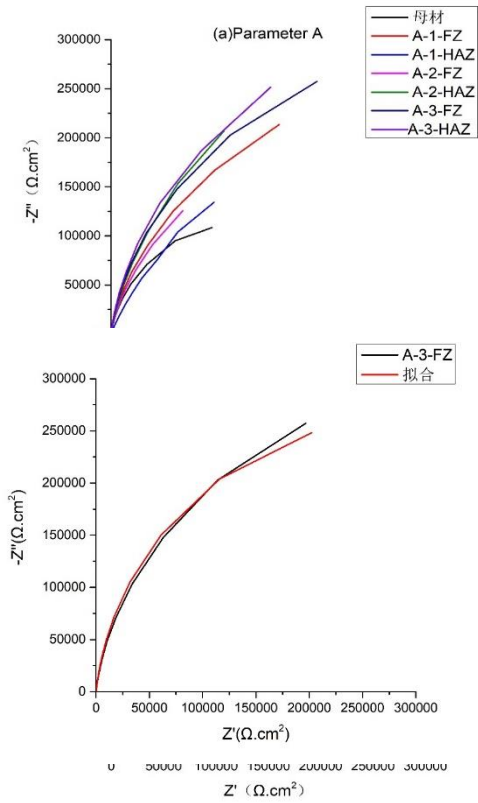


图 4: 电化学阻抗谱拟合的等效电路图

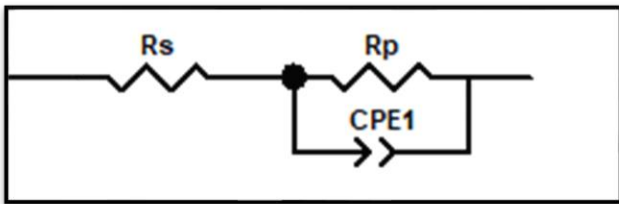


图 5: 实验和等效电路电化学阻抗谱图

表 3: 拟合电化学阻抗谱所获得的等效电路的参数

试样	Rs (Ω·cm²)	Rp(M*cm²)	CPE(*10 ⁻⁵ , Ω ⁻¹ S ⁿ cm²)	n
母材	4.33	2.49	6.19	0.92
A-1-焊缝	7.04	4.73	3.42	0.92
A-1-HAZ	7.15	2.94	3.98	0.83
A-2-焊缝	4.70	3.72	4.76	0.91
A-2-HAZ	6.30	5.74	3.00	0.93
A-3-焊缝	5.63	5.82	3.22	0.93
A-3-HAZ	6.94	6.29	2.43	0.94
B-2-焊缝	8.51	3.04	3.67	0.93
B-2-HAZ	6.10	2.91	2.95	0.94
B-3-焊缝	2.23	2.17	3.53	0.91
B-3-HAZ	5.70	2.52	2.48	0.92

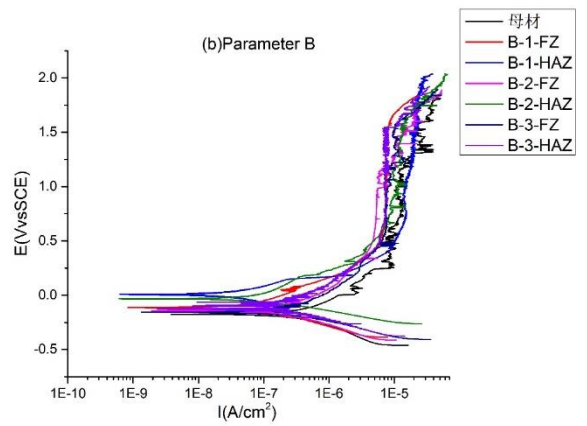
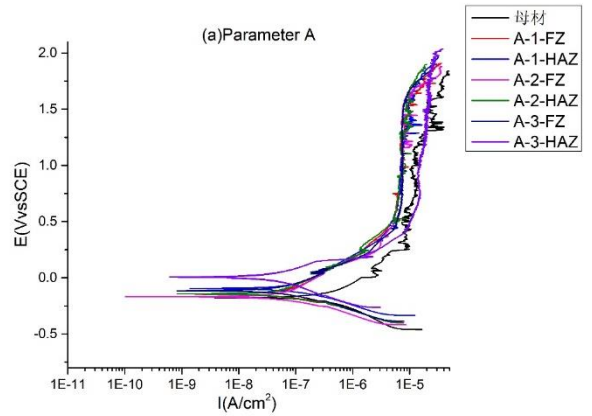


图 6: 母材和不同焊接工艺参数动电位极化曲线

表 4: 母材、热影响区、焊缝的动电位极化曲线参数

试样	自腐蚀电位 E _{corr} (V)	维钝电流密度 I _{pass} (A/cm²)	击穿电位 E _b (V)
母材	-0.160	1.8E-05	1.31
A-1-FZ	-0.090	9.0E-06	1.53
A-1-HAZ	-0.048	9.5E-06	1.53
A-2-FZ	-0.125	8.5E-06	1.60
A-2-HAZ	-0.100	9.0E-06	1.62
A-3-FZ	-0.088	7.5E-06	1.55
A-3-HAZ	-0.120	1.5E-05	1.35
B-2-FZ	-0.100	9.5E-06	1.40
B-2-HAZ	-0.020	1.1E-05	1.40
B-3-FZ	-0.105	9.0E-05	1.58
B-3-HAZ	-0.110	1.0E-05	1.58

母材和不同焊接工艺参数的焊缝、热影响区的动电位极化曲线如图 6 所示。这些曲线的阳极极化

曲线都有明显的钝化区，表现出较好的耐腐蚀性能。表 4 则是从曲线中所获得三个电化学参数：自腐蚀电位 E_{corr} 、维钝电流密度 I_{pass} 、和击破电位 E_b 。自腐蚀电位体现的是热力学概念，可以表征腐蚀发生的难易程度。从表 4 中可以得知，母材的自腐蚀电位最负，相比于焊缝和热影响区，最容易发生腐蚀。维钝电流和击破电位是动力学概念，可以表征腐蚀速率。维钝电流是在形成钝化膜后，在一段电位变化区域内流经金属表面的电流密度基本不发生变化，表征其长期的抗腐蚀能力，其值越小表明金属越容易回归钝化状态。从表 4 中发现，母材的维钝电流密度要略高于焊缝和热影响区，说明，焊缝和热影响区耐腐蚀性能较好。击破电位是钝化膜发生破坏的电位，其值越大表明钝化膜越稳定。从表 4 中可以得知，母材的击破电位最小，说明母材钝化膜的稳定性要略低于焊缝和热影响区。

对于不同的焊接工艺参数，焊缝和热影响区的动电位极化曲线以及自腐蚀电位 E_{corr} 、维钝电流密度 I_{pass} 、和击破电位 E_b ，并没有明显的区别。说明其耐腐蚀性能相当。

4 结论

(1) 双钨极氩弧焊焊缝中心细小的枝晶几乎占据了整个焊缝界面的 50%，靠近焊缝的热影响区为均匀分布的等轴晶。

(2) 通过电化学阻抗谱和动电位极化曲线分析得出，母材、焊缝和热影响区在 3.5%NaCl 溶液中拥有较好的耐腐蚀性能。

(3) 两种电化学试验表明，焊缝和热影响区的极化阻抗 R_p 、自腐蚀电位 E_{corr} 、维钝电流密度 I_{pass} 、和击破电位 E_b 都优于母材，表明焊缝和热影响区的耐腐蚀性能要好于母材，

(4) 同时，两种电化学试验显示，不同焊接工艺参数的焊缝和热影响区的耐腐蚀性能没有明显的区别。

5 致谢

衷心感谢来自国家重点研发专项 (No. 2016 YFB0301205)，上海市科委标准项目 (No. 17DZ2202000) 的资助

参考文献： [1]李明利, 舒滢, 冯毅江, 等. 我国钛及钛合金板带材应用现状分析[J]. 业进展, 2011, 28(06): 18-21.

[2]周洋, 孔谅, 王敏, 华学明, 牟刚. 钛及钛合金焊接接头腐蚀性能研究现状[J]. 电焊机, 2018, 48(07): 46-50+75.

[3]Z. Sun, I. Annergren, D. Pan, T. A. Mai, et al. Effect of laser surface remelting on the corrosion behavior of commercially pure titanium sheet[J]. Mater. Sci. Eng. A 345(1-2) (2003) 293-300.

[4]M. Balasubramanian, V. Jayabalan, V. Balasubramanian. Effect of pulsed gas tungsten arc welding on corrosion behavior of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Materials & Design, 2008, Pages 1359-1363.

作者简介： 周洋, 男, 1995 年出生, 硕士研究生; Email: 672595290@qq.com .

通讯作者： 孔谅, 男, 1966 年出生, 副研究员, 主要从事电阻点焊和激光焊技术研究, Email: ingerkongliang@sjtu.edu.cn

