

Research on TA2 Plasma Welding Process

Youxin Ye^{1,2}

1. Guangxi Bosco Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530007, China

2. Guangxi Kejia Equipment Technology Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530007, China

Abstract

TA2 (industrial pure titanium) is widely used in chemical, aerospace, marine engineering, and medical fields due to its light weight, high strength, and excellent corrosion resistance. Plasma welding, as a high-energy beam welding method, has advantages such as energy concentration, strong penetration, and small heat affected zone, and is suitable for welding TA2. Due to the high reactivity of TA2, strict requirements are placed on the welding environment, temperature control, shielding gas, process parameters, and other aspects when implementing TA2 plasma welding. This article systematically analyzes the advantages and disadvantages of TA2 plasma welding, explores the key control points, process control points, and quality control measures in the welding process, and provides reference for practical production.

Keywords

TA2 welding; Plasma welding; Welding temperature; Protective gas; Post weld inspection

TA2 等离子焊接工艺研究

叶又鑫^{1,2}

1. 广西博世科环保科技股份有限公司, 中国·广西 南宁 530007

2. 广西科佳装备科技有限公司, 中国·广西 南宁 530007

摘要

TA2 (工业纯钛) 因其比重轻、强度高、优异的耐腐蚀性能广泛应用于化工、航空航天、海洋工程及医疗领域。等离子焊接作为一种高能束焊接方法, 具有能量集中、穿透力强、热影响区小等优势, 适用于TA2的焊接。由于TA2的活泼性较强, 在实施TA2等离子焊接时, 对焊接环境、温度的控制、保护气体、工艺参数等方面要求严格, 本文将系统分析了TA2等离子焊接的优缺点, 探讨了焊接过程中的关键控制点、工艺控制要点及质量控制措施, 为实际生产提供参考。

关键词

TA2焊接; 等离子焊接; 焊接温度; 保护气体; 焊后检验

1 引言

1.1 研究背景与意义

TA2 作为重要的战略金属材料, 因其优异的综合性能, 在国防军工、航空航天、能源化工、造纸、海洋工程等领域占据不可替代的地位。TA2 属于工业纯钛, 其焊接性能良好, 具有适中的强度、良好的塑性和卓越的耐蚀性, 特别是在氯化物介质中的抗点蚀和应力腐蚀性能显著优于不锈钢, 使其成为化工装备、管路、海洋工程等腐蚀环境中的首选材料。随着我国航空航天、造纸、大型化工装备和清洁能源等领域的快速发展, TA2 需求爆发式增长, TA2 焊接质量至关重要, 关系到设备的稳定运行和性能。传统 TA2 焊接主要采用钨极氩弧焊 (TIG), 存在熔深浅、效率低、对作业人员技能

要求高、变形大、质量控制不稳定等问题。等离子弧焊 (PAW) 作为一种高能束焊接方法, 通过机械压缩、热压缩和电磁压缩三重效应将电弧约束为高能量密度的等离子弧, 温度可达 24000-50000K, 能量密度达 $10^5 - 10^6 \text{ W/cm}^2$, 具有超强的熔透能力。实际应用中 TA2 等离子焊 ($\delta < 12\text{mm}$), 在不开坡口的前提下, 可实现单面焊双面成形, 焊接速度可达 10-30cm/min, 效率较钨极氩弧焊提高 2-3 倍。同时, 等离子焊接参数窗口窄, 工艺控制不当易产生气孔、未熔合等缺陷。因此, 系统研究 TA2 等离子焊接工艺优化与质量控制具有重要的工程应用价值。

1.2 TA2 材料特性与焊接性分析

TA2 主要元素: 钛 (Ti) $\geq 99.2\%$, 其他元素: 铁 (Fe) $\leq 0.30\%$, 氧 (O) $\leq 0.25\%$, 氮 (N) $\leq 0.03\%$, 碳 (C) $\leq 0.1\%$, 氢 (H) $\leq 0.015\%$ 。其他特性: 密度 4.51g/cm^3 、熔点 1668°C 、热导率 $16.4\text{W/m}\cdot\text{K}$ 、线膨胀系数 $8.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 、弹性模量 106GPa 。与不锈钢相比, TA2 具有密度小、熔点高、热导率低、线膨胀系数小和弹性模量低等特点, 同时具有较

【作者简介】叶又鑫 (1990-), 男, 中国广西钦州人, 本科, 工程师, 从事钛焊接、不锈钢焊接、碳钢焊接、机械加工研究。

好的机械加工性能。这些特性决定了其独特的焊接行为：熔池金属高温停留时间长、粘度大、残余应力高、易变形，晶粒长大倾向明显；高温下（>300℃）对 O、N、H 等间隙元素吸收强烈^[1]。

2 TA2 等离子焊接的优缺点分析

2.1 等离子焊接优点

等离子焊接是用等离子弧作为热源来熔化两金属连接处的一种焊接法，等离子弧经过压缩的电弧，能量密度高，温度高，高能量输入使 TA2 焊接时能够形成稳定的熔池和小孔效应，特别适合于中厚板单面焊双面成形。具有优异的工艺稳定性和成形控制能力。等离子焊接主要优点如下：

①电弧能力密度高，等离子弧温度可达 20000 ~ 30000℃，熔透能力强，焊缝深宽比大（深宽比可达 3:1），截面积小，特别适合化工容器、压力管道等对焊缝全焊透要求严格的场合。

②焊接速度快，适用于自动化生产，热影响区小，薄板焊接变形小；高焊接速度结合较小的热输入（通常控制在 0.8-1.5kJ/mm）可有效抑制热影响区晶粒长大，减少高温停留时间，降低氧、氮等杂质元素的吸收量。测试数据显示，等离子焊接 TA2 接头的热影响区宽度约为 TIG 的 60%，高温（>800℃）区域面积减少 45%，有利于保持接头塑性和耐蚀性。

③电弧方向性强，挺度好，稳定性好，电弧容易控制。

④钨极内缩在喷嘴内部，不能与工件接触，可杜绝焊缝夹钨，焊缝质量高。

⑤高能量输入使得 TA2 焊接时能够形成稳定的熔池和小孔效应，通过小孔效应，可以正面焊接获得良好的单面焊双面成形效果，成形稳定，提升焊接效率和焊接品质。

⑥熔深大、成形好，气孔和裂纹倾向低，焊缝质量高。

2.2 等离子焊接缺点

等离子焊接除了诸多优点以外，相比其他焊接方式，等离子焊接也存在缺点，主要如下：

①焊接时同时需要保护气和等离子气两股气流，焊接过程控制难度较高，焊枪结构复杂。

②工艺复杂，需精确控制电流、气体流量等参数，装配精度要求高，错边量过大易导致未焊透或烧穿，对焊接操作人员的技术要求较高。

③等离子焊接系统由专用电源、等离子发生器、水冷系统、高精度送气装置和专用焊枪等组成，设备投资是常规 TIG 的 2-3 倍，价格昂贵，TA2 焊接必须使用高纯氦气（≥99.99%）进行保护，保护气成本高。

④参数窗口窄、工艺控制难度大。等离子焊接涉及离子气流量、保护气流量、电弧电流、电压、焊接速度等多参数协同控制，各因素间存在复杂耦合关系。研究表明，离

子气流量偏差超过 $\pm 0.2\text{L/min}$ 或焊接速度变化超过 $\pm 2\text{cm/min}$ ，都可能导致小孔不稳定甚至消失，影响熔透效果^[2]。

3、TA2 等离子焊接注意事项

3.1 施焊环境

施焊应在空气洁净、无尘、无烟环境下进行，且焊接场所应具有独立区域。焊接过程风速过大，容易造成保护气掺杂进其他气体造成焊接质量缺陷，相对湿度过大易造成焊接气孔、飞溅增大等问题，存在以下任一情况时应禁止施焊：

①风速 $\geq 1.5\text{m/s}$ 。

②相对湿度 $> 80\%$ 。

③焊件温度低于 5℃。

3.2 焊接前准备

①施焊人员应穿戴白细纱布手套和洁净的工作服，没有油污。

②焊缝两侧各 25mm 处用不锈钢刷去除表面氧化膜、杂质，刷至金属光亮，钢刷严禁采用碳钢等其它有污染的材质；机械清洁完成后用丙酮或者酒精进行脱脂处理，如清洗后 4h 未焊，需重新清洗。

③焊丝需脱脂处理，避免带入杂质。

④钛板对接边缘需平整，间隙均匀，避免装配不良导致焊接缺陷。

3.3 焊接保护及杂质气体影响

3.3.1 焊接气体保护

等离子焊接过程中，焊接接头由于高温，TA2 性能极为活泼，与氧、氢、氮快速反应，温度在 300℃以上时能快速吸氢、温度在 450℃以上时能快速吸氧、温度在 600℃以上时能快速吸氮。在焊接时，如果熔池中侵入氧、氮、氢、碳等有害气体，会导致焊接接头塑性、韧性改变，表面颜色发蓝发紫，机械性能显著下降，过热倾向增高。故施焊时对熔池、熔滴及高温区，正面、反面都应选用纯度 $\geq 99.99\%$ 的氦气和合适的保护拖罩进行气体保护，拖罩建议使用铜垫板、气孔通气，防止焊区周围的有害气体进入熔池，焊接停止后应继续通保护气，待焊缝和热影响区温度低于 250℃后方可停止气体保护。

3.3.2 杂质气体、元素的影响

TA2 焊接常见缺陷有气孔、裂纹、焊缝和热影响区氧化等。产生这些缺陷的原因主要有气体纯度不足、存在氢气、氮气、氧气等有害气体，焊件、焊丝表面污染、存在油污、水汽等。其中产生“气孔”的原因主要是由于焊件和焊丝上的油污及保护气体中的杂质，产生裂纹的原因主要是由于水分和油污的污染。焊缝和热影响区氧化主要由于保护气体不纯，保护拖罩问题、环境气流扰动造成保护气混入氧气、氮气等有害气体，导致焊缝和热影响区氧化，降低接头的强度、韧性。

4 TA2 等离子焊接工艺控制

4.1 焊接电流

焊接电流是根据板厚或熔透要求来选择，TA2 薄板（1 ~ 3mm）推荐电流 60 ~ 120A，中厚板（4 ~ 10mm）需 150~300A。焊接电流过小，难于形成小孔效应；焊接电流增大，等离子弧穿透能力增大，但电流过大会造成熔池金属因小孔直径过大而坠落，难以形成合格焊缝，甚至引起双弧，损伤喷嘴并破坏焊接过程的稳定性。因此，在喷嘴结构确定后，为了获得稳定的小孔焊接过程，焊接电流只能在某一个合适的范围内选择，而且这个范围与离子气的流量有关。

4.2 喷嘴与工件距离

喷嘴与工件距离一般控制在 3 ~ 5mm，喷嘴离工件的距离过大，熔透能力降低；距离过小易造成喷嘴被飞溅物堵塞，破坏喷嘴正常工作。

4.3 焊接速度

焊接速度推荐 5 ~ 20cm/min，需要根据不同板厚选择不同焊接速度，过快的焊接速度容易导致焊接未完全熔化等不良焊接，焊速过慢易导致过度热输入和焊缝的过多熔化。

4.4 焊接离子气流量

等离子气流量通常为 0.5 ~ 2.5L/min，离子气流量决定了等离子流力和熔透能力。等离子气的流量越大，熔透能力越大。但等离子气流量过大会使小孔直径过大而不能保证焊缝成形。因此，应根据喷嘴直径、等离子气的种类、焊接电流及焊接速度选择适当的离子气流量。利用熔入法焊接时，应当降低等离子气流量，以减小等离子流力。

4.5 熔池与焊缝成形控制

熔池应呈明亮、流动性适中的圆形，若发暗或者沸腾，需要调整参数。焊枪角度控制在（80° ~ 90°）、行走轨迹，避免咬边、驼峰、焊偏等缺陷。

4.6 层间清理

多层焊接时，层间温度需 ≤150℃，前道焊缝冷却至 70℃以下再焊下一层，每道焊完后需用不锈钢刷清理表面氧化色，避免夹渣。

4.7 华恒 iArc 5000-PAW 等离子焊接电源工艺参数控制

等离子自动焊接根据不同板厚选择工艺参数，母材采用无坡口对接，对接间隙 C=0mm；焊接完成后需检查焊缝两面是否存在焊瘤、气孔、焊偏等缺陷，对发现的缺陷需手工氩弧焊修补^[3]，3-10mm 厚板材焊接参数见表 1。

5 焊后检验

5.1 焊缝成形检验

焊缝盖面完成后对焊缝成形进行检验，对未融合、弧坑、

夹杂、气孔、裂纹等缺陷进行手工焊接修复，去除飞溅物。

5.2 钛焊缝及热影响区焊接完工表面颜色检验

钛焊缝及热影响区焊接完工对焊缝及热影响区表面原始颜色进行检验，按表 2 的规定判断是否合格与进行处理。

表 1

材质	板厚度 δ (mm)	工艺参数（调节范围 ± 5%）		
		电流 (A)	离子气 (L/min)	焊速 (mm/min)
TA2	3	130	3.2	290
	4	140	4.0	300
	5	250	4.4	250
	6	230	5.2	230
	8	210	6.0	210
	10	175	5.6	175

表 2

焊缝与热影响区表面颜色	氩气保护情况	合格判定	处理方法
银白色	良好	合格	不用其他处理
金黄色（致密）	尚好	合格	不用其他处理
蓝色	稍差	只可用于非重要部位	去除蓝色
紫色	较差	常压设备	去除紫色，去不掉处应返修
灰色	差	不合格	返修
黄色粉状物	很差	不合格	返修

6 焊后处理

焊接区域的表面颜色检验合格的可不做处理，对保护效果不理想的接头，应根据实际情况进行必要的质量处理，一般情况下，氧化效果较轻时可用不锈钢丝刷将氧化部位刷至金属光亮色（银白色）或进行酸洗处理，以保证内部金属不被继续氧化。对设备内、外部进行清洗，提升设备整体观感。

7 结语

TA2 等离子焊接具有能量集中、变形小、效率高等优势，但需严格控制工艺参数及保护措施。通过做好焊接区域表面清洁，使用高纯度氩气保护，将钛与氮、氢、氧等气体及铁、碳元素间的吸收和溶解降至最低，优化热输入及焊接速度，合理控制焊接温度的变化，从而获得高质量的焊接接头^[4]。

参考文献

[1] 中国机械工程学会焊接学会 编. 焊接手册（第3版修订本）.北京：机械工业出版社,2015.

[2] 国家标准 GB/T 3620.1—2016《钛及钛合金牌号和化学成分》

[3] JB / T 4745—2002钛制焊接容器

[4] 戚运莲,洪权,刘向,赵永庆.钛及钛合金的焊接技术[J]. 钛工业进展,2004.