

钛合金曲面焊缝 TIG 焊接工艺研究

郭 祥, 芦丽莉, 王 建, 于晓卫, 王 理

(中国核动力研究设计院 反应堆燃料及材料重点实验室, 四川 成都 610041)

摘 要:针对某钛合金曲面焊缝结构提出的高难度 TIG 焊接难题,分别开展了精确分区间、不同脉宽比、增设叠加脉冲电流等的对比焊接试验。采用尺寸检验、外观检验、金相检验等手段对曲面焊缝性能进行检验,最终确定了 TIG 焊接工艺。焊缝成形和熔合线长度均满足要求。该研究结果对高技术要求曲面焊接及其他特殊结构焊缝的焊接工艺研发具有重要的参考意义。

关键词:曲面焊缝;TIG;分区间;叠加脉冲电流

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.01.065

中图分类号: TG444.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2018)01-0249-04

Study on TIG Welding Process of Titanium Alloy Curved Surface Weld

GUO Xiang, LU Lili, WANG Jian, YU Xiaowei, WANG Li

(Key Laboratory of Reactor Fuel and Material, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: Aiming at the high-degree difficult TIG welding problem of a titanium alloy curved surface weld, a series of contrast experiments under accurate intervals, different duty cycles and addition of superimposed pulse current were carried out. The performance of the curved surface welds was tested by using dimensional inspection, visual inspection and metallographic examination, the TIG welding technology was finally determined, and the weld appearance and the length of weld fusion line meet the requirements. The result has good reference for welding technology research of curved surface weld with high technical requirement and other special welds.

Key words: curved surface weld; TIG; interval; superimposed pulse current

钛合金具有质轻、高强、耐蚀、耐热、无磁等一系列优良性能,被广泛应用于航空航天、冶金、化工、医疗器械等领域以及舰船的管系建造中,在国民经济发展和国防建设中占有重要的地位和作用^[1]。本文研究的曲面焊缝是一种由钛合金零部件插套形成的环形曲面焊缝。该焊缝长期承受高温高压,运行工况恶劣,对焊缝性能要求极高。由于焊缝处于立体斜切面上,母材壁厚不均,焊缝每个点的热扩散和金属流动情况都不同,工艺上难以保证一次性获得成型美观、尺寸均匀且具有一定强度的焊缝。

目前,国内对于钛合金曲面焊缝 TIG 焊接的研究甚少,关于在保证焊缝成形的前提下提高焊缝强度尚无支撑性文献和数据可供参考。本文分别从精确分区间、不同脉宽比、增设叠加脉冲电流等方面开展了曲面焊缝 TIG 焊接的对比试验研究,最终获得

了满足技术要求的曲面焊缝及焊接工艺。该研究结果对曲面焊缝焊接及其他特殊结构焊缝的焊接工艺研发具有重要的参考意义和实用价值。

1 试验材料及方法

本文研究的是由管材斜切面与插套端塞焊接形成的曲面焊缝,见图 1。管材试件采用钛合金管加工,规格为 $\phi 14\text{ mm} \times 1\text{ mm}$;端塞试件采用钛合金棒材加工。采用自动氩弧焊机进行三维曲面焊缝的焊接。焊接位置为平焊位置,即在焊接时采用焊枪不动、工件旋转并沿轴向前后移动的方式实现曲面焊缝的焊接^[2]。

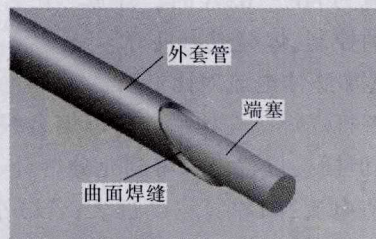


图 1 曲面焊缝

Fig.1 Curved surface weld

收稿日期:2017-02-14

作者简介:郭祥(1986-),四川成都人,助理研究员,硕士研究生,主要从事核级特种焊接方面的研究;电话:13678169172;

E-mail:gxstueducn@126.com

焊接过程中,从焊接起始位置开始,焊接设备通过精密的凸轮机构控制工件的往复运动和旋转,从而保证焊接轨迹与三维曲面焊缝轨迹完全重合,同时采用水冷和气冷对设备和工件进行保护。

焊接完成后,采用焊缝尺寸检验、外观检验、金相检验等检验手段对相应的三维曲面焊缝进行检验,由检验结果指导焊缝焊接工艺的改进方向。

2 试验结果

2.1 精确分区间焊接

在插接形式的曲面焊缝各区段,母材壁厚条件和热传导条件均存在较大差异,采用同一焊接参数或简单地每 30°进行焊接参数区间划分的工艺,远远不能满足曲面焊缝的焊接要求。因此,采用精确分区间的方法实现精密工艺参数的确定。

对曲面焊缝焊接总行程的各关键位置角度进行精确测定,对各特征区间(易未熔合段、易熔孔段、易焊宽不足段等)进行精确划分(精确到 1°),采用焊机编程方式针对性调整各角度区间的焊接参数,可有效控制因曲面焊缝的结构差异和钛合金良好的流动性对焊缝成形的负面影响^[3],有效控制局部区域焊接的热积累效应,提高焊接性能。焊接行程总体分为上坡段、上拐点段、下坡段、下拐点段,见图 2。通过对焊接角度进行多次测定,最终精确测定这 4 段焊缝特征点对应的焊接角度(见图 2)。

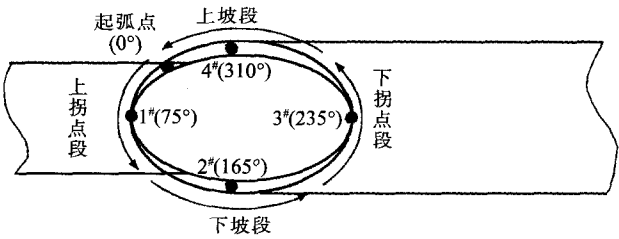


图 2 曲面焊缝特殊点及其焊接角度示意图
Fig.2 Schematic of special points and welding angles of the curved weld

在焊接参数设置时,在上述特征点设置单独区间,并针对一周焊接结束时的搭接段进行单独设置。考虑焊接热累积效应,焊接电流呈逐渐降低的趋势,且在特征位置所在区间调整局部电流以实现焊缝成形的控制。

2.2 不同脉宽对比试验

脉宽比指脉冲焊过程中峰值时间与基值时间的配比。脉宽比对曲面焊缝宽度、熔合线长度有重要影响。曲面焊缝的熔合线长度是影响焊缝强度的重要指标。在控制线能量的情况下,可通过调节脉冲电流提高焊缝熔合线长度。曲面焊缝采用脉冲电流方式进行焊接,采用不同的峰、基值时间并调整峰、基值电流,以控制热输入和焊缝宽度,在焊接完成后对焊缝宽度及熔合线长度进行测量。不同脉宽比的焊接试验参数及结果见表 1。由表 1 可以看出,焊接基值电流为 15 A、峰、基值时间分别为 0.03、0.12 s,各区

表 1 不同脉宽比的焊接试验参数及结果
Tab.1 Welding test parameters and the results under different duty cycles

试样序号	基值时间 /s	峰值时间 /s	基值电流 /A	峰值电流 /A	焊缝宽度 /mm	熔合线长度 /mm	试验现象
1 [#]	0.24	0.05	10	90~117	-	-	焊接过程中熄弧
2 [#]	0.24	0.05	15	90~117	4.3~4.7	1.35~2.55	局部未熔合
3 [#]	0.18	0.05	15	90~117	5.5~7.1	1.98~2.64	焊宽大、“鱼鳞纹”密集
4 [#]	0.18	0.05	15	74~96	4.3~4.5	1.72~2.24	“鱼鳞纹”密集
5 [#]	0.12	0.05	15	74~96	5.1~5.9	1.96~2.65	焊宽过大
6 [#]	0.12	0.03	15	74~96	4.2~4.6	1.71~2.34	焊缝成形良好
7 [#]	0.12	0.03	15	80~102	4.4~4.8	1.82~2.41	焊缝成形良好

间峰值电流为 80~102 A 时,焊宽和熔合线长度实现了较好的控制,焊缝成形良好。

2.3 增设叠加脉冲电流对比试验

在调整打底焊脉宽比后,焊缝熔合线长度有了明显改善,但插接位置仍未得到充分熔合。若通过继续增加峰值电流,则焊缝宽度过大;若减小脉宽比,两次峰值电流时间间隔较长,焊缝易出现未熔合和密集“鱼鳞纹”现象。为了继续增加熔合线长度,改善

焊缝的焊喉尺寸,可在脉冲峰值电流的基础上加上持续时间更短、能量密度更高的电流,即叠加脉冲电流^[4],见图 3。

脉冲 TIG 焊的线能量计算公式:

$$q=\xi \frac{U_{基} I_{基} t_{基}+U_{峰} I_{峰} t_{峰}}{V(t_{基}+t_{峰})} \tag{1}$$

引入叠加脉冲电流后,线能量公式:

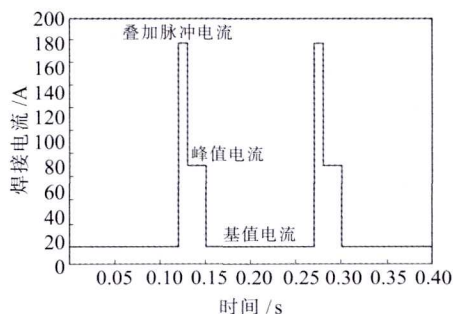


图3 叠加脉冲电流示意图

Fig.3 Schematic of superimposed pulse current

$$q = \xi \frac{U_{基} I_{基} t_{基} + U_{峰} I_{峰} t_{峰} + U_{脉冲} I_{脉冲} t_{脉冲}}{V(t_{基} + t_{峰})} \quad (2)$$

式中: q 为线能量; ξ 为常数; U 为焊接电压; I 为焊接电流; t 为焊接时间; V 为焊接速度。

施加叠加脉冲时,保持打底焊基值电流(15A)、峰值时间(0.03s)及基值时间(0.12s)不变,以避免出现突然熄弧、局部未熔合和密集“鱼鳞纹”现象,同时通过调整峰值电流、叠加脉冲电流及叠加脉冲时间来保持焊接线能量不变。焊后通过尺寸检测和金相检验对不同参数下焊缝宽度及熔合线长度进行对比。打底焊叠加脉冲电流焊接试验参数及结果见表2。由表可以看出,在线能量一定的情况下,施加叠加脉冲后打底焊缝熔合线长度有了明显改善。

表2 打底焊叠加脉冲电流焊接试验参数及结果

Tab.2 Test parameters and the results of back welding with different superimposed pulse currents

试样序号	峰值电流 /A	叠加脉冲电流 /A	叠加脉冲时间 /s	焊缝宽度 /mm	熔合线长度 /mm
1 [#]	80~102	0	0	4.4~4.8	1.82~2.41
2 [#]	58~73	40	0.02	6.5~7.8	1.98~2.62
3 [#]	46~60	60	0.02	5.2~6.3	2.05~2.60
4 [#]	35~46	80	0.02	4.3~4.9	2.02~2.92
5 [#]	58~73	80	0.01	4.0~4.5	2.20~3.18
6 [#]	54~66	100	0.01	4.1~4.6	2.50~3.45
7 [#]	46~60	120	0.01	4.2~4.7	2.44~3.52

3 分析与讨论

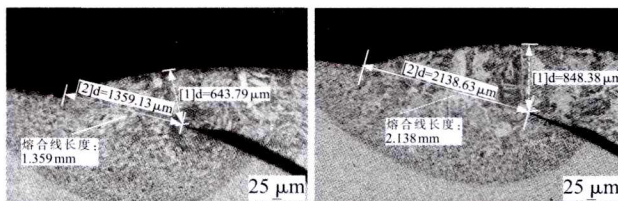
3.1 焊缝成形控制

曲面焊缝为插接形式,坡口区域结构复杂。在2[#]、4[#]区域(见图2)坡口两侧壁厚较薄,且距焊缝区域较近,在焊接过程中该区域热传导受阻,由于钛合金在高温状态下具有良好的流动性,故极易发生焊宽骤增现象,影响焊缝外观成形;在1[#]、3[#]位置(见图2)完成三维曲面焊缝上坡焊和下坡焊的过渡,在线

速度一定的情况下,该位置角速度较小,停留时间较长。由于焊接时存在热积累效应,若在上坡段或下坡段中采用同一参数进行焊接,将导致焊缝宽度逐渐增加,焊宽均匀性将不能满足要求。确定4个特征点角度,采用分区间设置焊接参数的方式进行焊接,可有效控制焊缝宽度的均匀性。

3.2 熔合线长度控制

采用脉冲电流方式进行焊接,需合理调整脉冲峰、基值时间以及峰、基值电流。其中,基值电流主要起稳定电弧的作用,基值电流较小时电弧不稳定。峰值电流对插套焊缝的熔合有更直接的作用^[5]。当基值时间较大时,由于两次峰值电流时间间隔较长,存在峰值电流影响的盲区,焊缝出现局部未熔合和表面“鱼鳞纹”现象的几率增加。基值时间减小,焊接线能量增加,熔合线长度增加(见图4)。可调整峰值电流使之与对应的脉宽相匹配,使焊缝宽度处于适当范围。



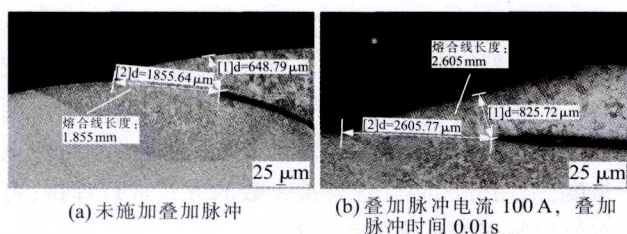
(a) 峰值电流 90~117A, 峰基值时间分别为 0.05、0.24s
(b) 峰值电流 80~102A, 峰基值时间分别为 0.03、0.12s

图4 不同峰值电流及脉宽比的焊缝显微组织

Fig.4 Microstructure of the welds with different peak currents and duty cycles

由图4可以看到,两组不同工艺参数获得的焊缝均冶金熔合良好,焊缝为马氏体组织(钛合金),熔合区中心组织相对粗大,热影响区边界清晰,无异常组织。需要关注的重点是熔合线长度,熔合线长度的增加与焊缝有效厚度的增加直接相关,焊缝有效厚度是影响焊缝承载能力的重要指标。

引入叠加脉冲电流是控制插套曲面焊缝熔合线长度的有效方法。在线能量一定的情况下,叠加脉冲电流的引入使瞬间电流(峰值电流加叠加脉冲电流)大幅加大,有利于增加曲面焊缝熔合线长度(图5),同时可通过较小叠加脉冲时间来控制整个焊接过程中的热输入,以达到控制焊缝宽度的目的。但是,叠加脉冲电流超过120A时,由于最大脉冲电流(叠加脉冲电流与峰值电流之和)与基值电流相差过大,钨极骤冷骤热现象加剧,导致钨极磨损加快。



(a) 未施加叠加脉冲

(b) 叠加脉冲电流 100 A, 叠加脉冲时间 0.01 s

图 5 叠加脉冲电流前后的焊缝显微组织

Fig.5 Microstructure of the welds before and after superimposing pulse current

4 结论

(1) 分区间设置焊接参数可有效控制钛合金曲面 TIG 焊接的焊缝成形。

(2) 脉冲电流及叠加脉冲电流的应用在控制焊

缝成形的情况下有效增加了焊缝的熔合线长度,提高焊缝的焊接性能。

参考文献:

- [1] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册第 2 卷, 材料的焊接 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [2] 张忠厚. 椭圆形接缝自动焊接系统的研制[J]. 电焊机, 1998 (2): 27-28.
- [3] 胡静, 杨屹, 陈德平, 等. 钛合金超塑性变形过程中的高斯回归预测[J]. 热加工工艺, 2011, 40(20): 34-35.
- [4] 谢小健, 罗怡, 朱洋. 脉冲参数对脉冲激光焊缝成形影响的析因试验研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(6): 254-255.
- [5] 付翀, 张敏, 周小华, 等. 熔合线含裂纹焊接接头复合角的研究[J]. 铸造技术, 2008(6): 98-99. [X]
- [6] 齐芳娟. 整卷巨型引水压力钢管焊接接头性能研究及安全评定[D]. 成都: 西南交通大学, 1996.
- [7] 张乐. 三氧化二砷-乳酸羟基乙酸共聚物纳米粒的制备及靶向性研究[D]. 重庆: 第三军医大学, 2006.
- [8] 王杰. 基于 PSO-SVR 模型的原煤生产成本预测研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.
- [9] Cong T D, WU Zhijian. Adaptive multi-layer particle swarm optimization with neighborhood search [J]. Chinese Journal of Electronics, 2016(6): 1079-1088.
- [10] 刘宝宁, 章卫国, 李广文, 等. 一种改进粒子群算法及其在飞控系统中的应用[J]. 飞行力学, 2011, 29(2): 89-92. [X]

(上接第 248 页)

- [4] 齐芳娟. 整卷巨型引水压力钢管焊接接头性能研究及安全评定[D]. 成都: 西南交通大学, 1996.
- [5] 张乐. 三氧化二砷-乳酸羟基乙酸共聚物纳米粒的制备及靶向性研究[D]. 重庆: 第三军医大学, 2006.
- [6] 周永召, 樊文欣, 赵俊生等. 基于均匀设计法的连杆衬套强力旋压工艺优化研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(3): 141-142.
- [7] 徐富强, 刘相国. 基于优化的 RBF 神经网络的变量筛选方法[J]. 计算机系统应用, 2012, 21(3): 206-208.

- [8] 王杰. 基于 PSO-SVR 模型的原煤生产成本预测研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.
- [9] Cong T D, WU Zhijian. Adaptive multi-layer particle swarm optimization with neighborhood search [J]. Chinese Journal of Electronics, 2016(6): 1079-1088.
- [10] 刘宝宁, 章卫国, 李广文, 等. 一种改进粒子群算法及其在飞控系统中的应用[J]. 飞行力学, 2011, 29(2): 89-92. [X]

《铸造》杂志征订启事

《铸造》杂志创刊于1952年10月1日, 国内外公开发行(国际标准刊号: ISSN 1001-4977, 国内统一刊号: CN 21-1188/TG, 邮发代号: 8-40)。现由沈阳铸造研究所、中国机械工程学会铸造分会主办, 铸造杂志社编辑出版。

本刊是以报道应用技术为主的综合性刊物, 坚持面向经济建设、面向生产实际, 致力于促进我国铸造科技的进步和生产的发展。

本刊内容涉及铸钢、铸铁、铸造有色合金和特种金属材料, 涵盖砂型铸造、压铸、熔模铸造、消失模铸造等整个铸造技术领域, 报道国内外铸造领域的先进科技成果和应用技术, 成功企业的生产及管理经验, 国内外铸造行业信息及活动等。刊登铸造国家标准和行业标准的解读文章, 介绍企业开展质量管理工作的先进经验。

栏目设置: 专题综述、新材料新工艺、压铸、消失模铸造、熔模铸造、计算机应用、铸造设备、生产技术、检测技术、经验交流、铸造论坛、标准化与质量、企业管理、专访、关注与争鸣、专题报道、铸造资讯(文献速报、专利摘要、行业动态)等。

《铸造》杂志为中文核心期刊、中国科技论文统计源期刊、中国科学引文数据库源期刊、美国化学文摘(CA)源期刊、中国科技文献数据库源期刊等, 被国内外 20 余种数据库收录。

《铸造》杂志曾荣获“第二届国家期刊奖提名奖”、“第三届国家期刊奖”、“第二届中国出版政府奖期刊奖提名奖”、“中国北方十佳期刊奖”等中国出版界重大奖项, 并入选 2012“中国国际影响力优秀科技期刊”、2013“中国百强科技期刊”、2015“中国百强科技期刊”。

本刊为月刊, 大 16 开本, 每期定价 12 元, 全年订价 144 元, 邮发代号: 8-40。

电子版《铸造》杂志与纸质印刷版同步发行, 每期定价 12 元, 全年订价 144 元(2018 年优惠价 96 元)。

地址: 沈阳市铁西区云峰南街 17 号 邮编: 110022

电话: 024-25611775(《铸造》)、024-25611880(《China Foundry》) 传真: 024-25611775

E-mail: ad@foundryworld.com(《铸造》) E-mail: zcy@foundryworld.com(《China Foundry》)

网址: www.foundryworld.com