

2219 铝合金复合超音频脉冲 VPTIG 焊接工艺

Hybrid Ultrasonic Pulse VPTIG Welding Process for 2219 Aluminum Alloy

北京航空航天大学 从保强 齐铂金 李伟 杨明轩

[摘要] 分别采用常规 VPTIG 和超快变换复合超音频脉冲 VPTIG 焊接工艺对 2219-T87 高强铝合金进行焊接,通过 X 射线探伤、金相分析、接头力学性能测试等方法对焊接质量进行对比分析。结果表明,复合超音频脉冲 VPTIG 焊接工艺可有效减少甚至消除高强铝合金焊缝气孔缺陷,细化焊缝组织,显著改善和提高焊接接头性能。与常规 VPTIG 焊接工艺相比,在脉冲电流频率 40kHz、占空比 20%、脉冲电流幅值 100A 条件下,2219-T87 焊接接头抗拉强度和断后伸长率分别提高约 32% 和 138%。

关键词: 高强铝合金 超音频脉冲电流 变极性焊缝气孔 力学性能

[ABSTRACT] Microstructure and mechanical properties of 2219-T87 high-strength aluminum alloy weld joints are investigated based on the conventional VPTIG and ultrafast-convert hybrid ultrasonic pulse VPTIG (HPVP-TIG) welding technology. The results show that the number of gas pore in welds obtained by the HPVP-TIG welding process is predominantly reduced and eliminated indeed. The grain structure is refined and the mechanical properties of weld joint are significantly enhanced. Under the conditions of pulse frequency of 40 kHz, pulse duty of 20% and pulse current amplitude of 100 A, tensile strength and percentage elongation increase about 32% and 138%, respectively by compare it with the conventional VPTIG process.

Keywords: High-strength aluminum alloy Ultrasonic pulse current Variable polarity Weld porosity Mechanical property

2219 高强铝合金因其良好的性能而广泛应用于航空、航天、舰艇以及装甲车辆等诸多领域。研究表明,采用传统电弧焊接方法进行 2219 高强铝合金焊接加工时,焊缝气孔倾向性大,焊接接头软化严重,极大限制了其实际工程推广应用。积极开展适用于高强铝合金材料的新型先进电弧焊接技术研究是国防军事以及航空航天等诸多领域发展的必然要求^[1-3]。

变极性电弧焊是近年发展起来的一种新型焊接技术。研究表明,提高变极性电流的过零速度和电流沿变化速率有利于改善和提高铝合金的焊接质量^[4-5]。同时,在金属材料制备过程中,脉冲电流对铝合金液态金属凝固组织具有显著的细化作用,且脉冲电流特征参数对其凝固组织会产生重要影响^[6-8]。为此,在提高电流极性变换速率的同时加入超音频脉冲电流的复合作用,研究开发出了一种新型的超快变换复合超音频脉冲变极性电弧焊接工艺 (Hybrid Pulse Variable Polarity TIG, 以下简称 HPVP-TIG)^[9],将其应用于 2219 高强铝合金材料的电弧焊接过程,试验研究其对焊接质量的影响,将具有重要的工程应用价值和实际意义。

1 试验材料及方法

试验母材金属选择厚度为 4mm 的可热处理强化 Al-Cu 系 2219-T87 平板,焊接试件尺寸规格为 200mm × 100mm,对接焊缝长度为 200mm, I 形坡口,填充焊丝选用直径为 2.4mm 的 ER2319。2219-T87 铝合金母材及填充焊丝的主要化学成分见表 1。焊前先用丙酮有机溶剂擦拭去除焊接试件表面的油污,然后采用化学清理方法 (10%NaOH+15%HNO₃) 去除表面氧化膜。采用机械清理方法去除焊丝 ER2319 表面的氧化膜。

表1 2219母材及焊丝主要化学成分 w/%

成分	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
2219	0.2	0.3	5.8~6.8	0.2~0.4	0.02	余量
ER2319	0.2	0.3	6.3	0.3	0.02	余量

为保证焊缝熔透成形,经多次焊接试验后,焊接电流主要特征参数选取如表 2 所示。其他焊接工艺参数分别为:焊接速度 120mm/min;保护气体普通 Ar 气流量 15L/min;钨电极为直径 3.0mm 的 WC20,电弧长度约为 3mm;电流极性变换频率 100Hz,负极性电流 195A,正、负极性电流持续时间比 4:1。其中,工艺 1 为常规 VPTIG 焊接工艺,工艺 2 和 3 为 HPVP-TIG 焊接工艺。

焊态条件下,利用 X 射线探伤方法检测焊缝内部有无气孔等焊接缺陷;沿垂直于焊缝方向切割制备金相试

表2 HPVP-TIG主要焊接工艺参数

名称	正极性基值 电流 /A	正极性峰值 电流 /A	脉冲 频率 /kHz	脉冲电流 占空比 /%
工艺 1	—	160	—	—
工艺 2	80	180	20	50
工艺 3	100	200	40	20

样,采用 Keller 试剂 (HNO₃:2.5mL; HCl:1.5mL; HF:1mL; H₂O:95mL) 对抛光试样进行浸蚀,并利用 OLYMPUS 的 BX51M 型金相显微镜观察焊缝接头显微组织;采用线切割方法沿垂直于焊接方向制备焊接接头拉伸试样,每组工艺各取 3 个试样,在 DWD-50E 电子式万能拉伸试验机上进行拉伸性能测试,拉伸速度为 2mm/min;采用 CAMBRIDGE 的 S-360 型扫描电子显微镜观察拉伸试样断口形貌。

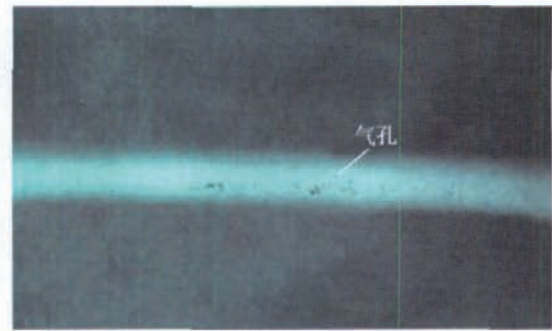
2 试验结果与分析

2.1 焊缝气孔缺陷检验

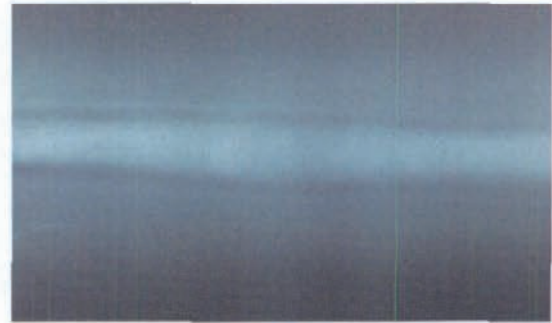
气孔是 2219-T87 铝合金电弧焊接工艺最常见 的焊接缺陷,有效减少甚至消除气孔是提高其焊接质量的关键。对采用常规 VPTIG(工艺 1)和 HPVP-TIG(工艺 2 和 3)2 种焊接工艺方法获得的 2219-T87 焊接接头分别进行 X 射线探伤检测,结果如图 1 所示。采用常规 VPTIG 焊接工艺获得的焊缝内部存在有大量明显的气孔缺陷,见图 1(a);与之相反,采用 HPVP-TIG 焊接工艺获得的焊缝中均未发现气孔,见图 1(b)。另外,在扫描电子显微镜下观察 2219-T87 焊接接头的拉伸试样断口,结果见图 2。可以明显看出,常规 VPTIG(工艺 1)焊缝内部的一部分球形气孔直径达几百 μm 以上,同时还存在大量直径约 50~100 μm 的小气孔^[10],如图 2(a)所示;而工艺 3 条件下焊缝的拉伸断口表面平整,断口处组织细密,不存在任何气孔缺陷,如图 2(b)所示。根据上述研究结果可以推断,采用新型超快变换 HPVP-TIG 焊接工艺可有效减少甚至消除焊缝气孔缺陷。

2.2 焊缝显微组织

工艺 1~3 条件下获得 2219-T87 高强铝合金焊缝中心区部位的显微组织见图 3。可以明显看出,采用常规 VPTIG 焊接工艺(工艺 1)时,焊缝区组织以粗大树枝晶为主,并且存在大量气孔缺陷。在采用 HPVP-TIG 焊接工艺条件下,复合超音频脉冲电流频率为 20kHz(工艺 2)时,焊缝中心部位为柱状树枝晶和等轴树枝晶的混合组织;而当脉冲电流频率达到 40kHz(工艺 3)时,焊缝中心区转化为以细小等轴晶组织为主,同时出现了一种呈

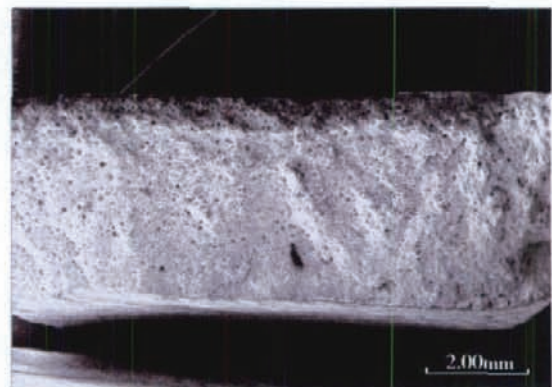


(a)工艺 1

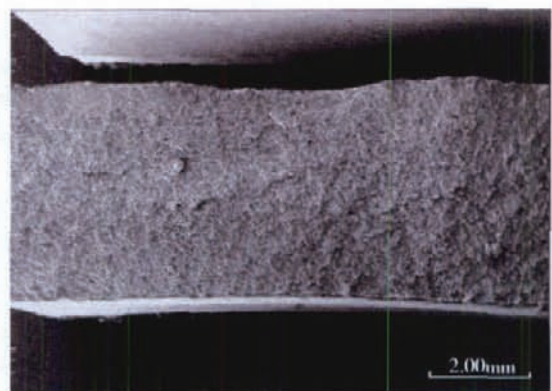


(b)工艺 3

图1 2219-T87焊缝X射线探伤
Fig.1 X-ray inspection of 2219-T87 welds



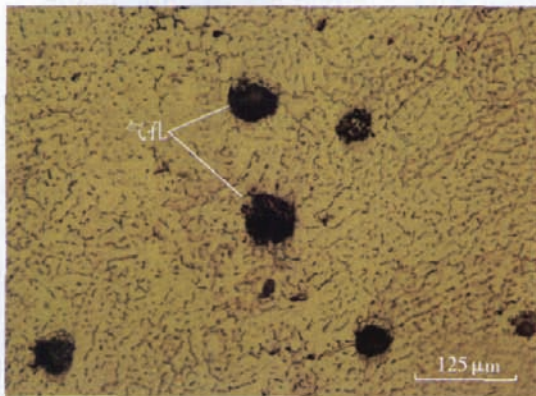
(a)工艺 1



(b)工艺 3

图2 2219-T87焊缝SEM图片
Fig.2 SEM images of 2219-T87 welds

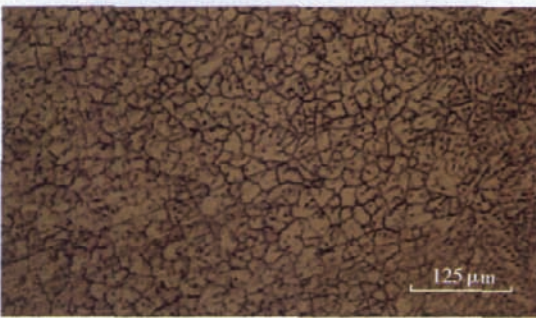
圆形或多边形的极细小等轴非枝晶组织,平均晶粒尺寸仅为十几 μm ,并与焊缝中部的等轴树枝晶组织交替分布。按照 Hall-Petch 公式,焊缝晶粒组织的细化将有助



(a) 工艺 1



(b) 工艺 2



(c) 工艺 3

图3 2219-T87焊缝中心区显微组织

Fig.3 Central zone microstructure of 2219-T87 welds

于改善和提高焊接接头的力学性能^[11]。

有关焊缝中部晶粒组织的细化机理,从金属凝固结晶热力学角度分析,可以认为,加入超音频脉冲方波电流后,在熔池内部可形成一定强度的脉动电磁场,熔池内液态金属粒子会受到频率达超音频段的脉动电磁力作用^[12],并呈复杂规律性的循环运动和涡旋运动,而熔池液态金属的复杂规律性流动有利于促进熔池液体金属温度的均匀性,可有效降低金属固-液相界面前沿的液相温度梯度,增大组分过冷范围,从而促进了焊缝结

晶组织由粗大树枝晶向细小等轴晶的转变,实现对焊缝金属结晶组织的明显细化^[13-14]。

2.3 接头力学性能

表3中所列为 2219-T87 母材金属和不同焊接工艺参数条件下接头的拉伸力学性能。可以看出,2种焊接工艺条件下,焊接接头的抗拉强度和断后伸长率均明显低于母材金属。

表3 母材及HPVP-TIG焊接接头拉伸性能

名称	抗拉强度 R_m/MPa	强度系数	断后伸长率 $A/\%$
母材	446	1.00	11.7
工艺 1	234	0.52	2.85
工艺 2	302	0.68	6.08
工艺 3	310	0.70	6.78

对比表3中工艺1~3条件下2219-T87高强铝合金焊接接头的拉伸力学性能数据,可以明显看出,在焊态条件下,与采用常规VPTIG焊接工艺(工艺1)相比,加入超音频脉冲方波电流作用(工艺2和3)后,2219-T87接头的抗拉强度和断后伸长率得到显著改善和提高,且脉冲电流特征参数对其力学性能也将产生比较明显的影响。其中,在工艺3条件下,接头抗拉强度为310MPa,断后伸长率为6.78%,分别达到母材金属的70%和58%。

3 结论

(1)采用超快变换复合超音频脉冲变极性方波TIG电弧焊接工艺方法(HPVP-TIG)进行2219-T87高强铝合金焊接,可获得满意的焊接质量,焊缝内部气孔显著减少,甚至消除。

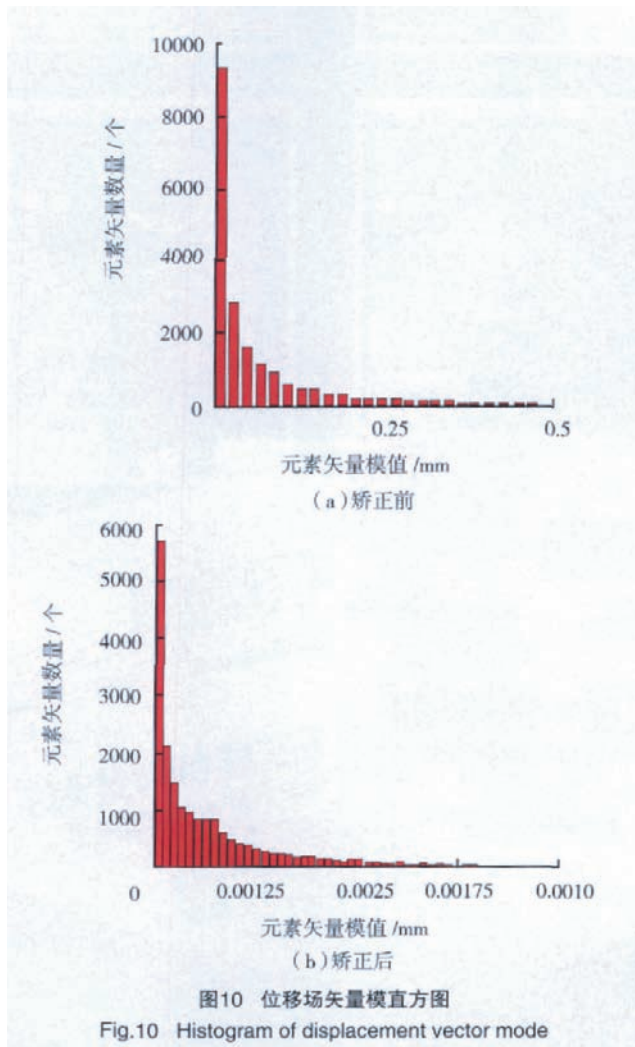
(2)在HPVP-TIG焊接过程中加入超音频脉冲方波电流的复合作用,有助于改善和提高2219-T87高强铝合金焊接接头的力学性能。与常规VPTIG焊接工艺相比,脉冲方波电流频率40kHz,占空比20%,脉冲电流幅值100A时,接头抗拉强度和断后伸长率分别增加约32%和138%。

参考文献

- [1] 姚君山,周万盛,王国庆,等.航空贮箱结构材料及其焊接技术的发展.航天制造技术,2002(5):17-22.
- [2] 王亚军,卢志军.焊接技术在航空航天工业中的应用和发展建议.航空制造技术,2008(16):26-31.
- [3] 姚君山,蔡益飞,李程刚.运载火箭箭体结构制造技术发展与应用.航空制造技术,2007(10):36-41.
- [4] Zeng X M, Lucas J, Ren Y Y, et al. Welding with high frequency

(下转第97页)

准 CAD 模型上搜索与该点集对应的数据点集 C , 建立位移场模型 $D=\{D_i=P_i-C_i|i=1,\dots,2000\}$ 。依据图 7 及图 6(c) 所示的叶片变形曲线对位移场模型 D 作弯扭变形矫正, 得到弯扭变形矫正后的位移场模型 D' 。图 10 给出了位移场模型 D 与矫正后的位移场模型 D' 的位移场矢量模的直方图(即位移场元素矢量的模值分布)。



基于仿真测量数据生成的位移场模型, 其中每一个元素矢量的模(即矢量长度)主要源于叶片的弯扭变形。从图 10(a) 可以看出, 位移场模型的 20000 个元素矢量中, 有 50% 以上的元素矢量模值大于 0.1mm。对位移场模型进行弯扭变形矫正后, 位移场元素矢量的模值均小于 0.0015mm, 见图 10(b)。可以认为此时铸件叶片模型和设计模型相比基本无变形误差, 说明位移场模型的弯扭变形分量被很好地分离。因此, 实际应用中, 弯扭变形分离后的位移场模型仅反映叶片的收缩变形误差。

6 结束语

本试验以叶片叶身段为典型结构对象分析研究了

叶片精铸位移场模型中弯扭变形的分离方法, 并提出了变形补偿的计算方法。试验结果表明, 通过对叶片精铸位移场模型分离出叶片的弯扭变形进行矫正, 可消除由于弯扭变形导致的收缩率计算不精确的问题, 有利于更准确地建立起结构相关的叶片精铸收缩率模型, 也为叶片精铸模具的结构反变形设计提供弯扭变形基础数据, 实现模具型腔的优化。

参考文献

- [1] 张丹, 张卫红. 基于位移场仿真与特征参数提取的精铸模具型面逆向设计方法. 航空学报, 2006(3): 1-6.
- [2] 李倩, 王松杰, 申长雨, 等. 模具设计中收缩率的预测. 电加工与模具, 2002(5): 53-54.
- [3] 航空制造工程手册总编委会. 航空制造工程手册. 北京: 航空工业出版社, 1997.
- [4] 田庆. 支持结构设计的叶片 CAD 造型方法研究与系统实现 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [5] 陈志强. 基于测量数据的叶片截面特征参数提取技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [6] 张力宁. 散乱点云逆向工程技术研究及其在叶片重建中的应用 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [7] Besl P J, MaKay N D. A method of registration of 3D shapes. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-255.
- [8] 刘晶. 叶片数字化检测中的模型配准技术及应用研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.

(责编 小城)

(上接第 93 页)

square wave AC arcs. IEE Proceedings A, 1990, 137(4): 193-198.

[5] 从保强, 齐铂金, 周兴国, 等. 5A06 铝合金超快变换极性 VPTIG 焊接工艺. 航空制造技术, 2009(5): 74-77.

[6] 廖希亮. 脉冲电流对金属凝固组织的影响 [D]. 上海: 上海大学, 2007.

[7] 班春燕. 电磁场作用下铝合金凝固理论基础研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2002.

[8] 丁雨田, 徐宏玉, 王纯宏, 等. 方波脉冲电流对 Al-Cu 合金凝固组织的影响. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(5): 335-338.

[9] 齐铂金, 从保强. 新型超快变换复合脉冲变极性弧焊电源开拓. 焊接学报, 2008, 29(11): 57-60.

[10] 从保强. 高强铝合金快速变换复合超音脉冲 VPTIG 焊接技术研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2009.

[11] 毛卫民, 朱景川, 酃剑, 等. 金属材料结构与性能. 北京: 清华大学出版社, 2008.

[12] 孙俊生, 武传松. 电磁力及其对 MIG 焊接熔池流场的影响. 物理学报, 2001, 50(2): 209-216.

[13] Dvornak M J, Olson D L, Frost R H. Influence of solidification kinetics on aluminium weld grain refinement. Welding Journal, 1991, 70(10): 271-276.

[14] Kou S, Le Y. Welding parameters and the grain structure of weld metal—a thermodynamic consideration. Metallurgical Transactions A, 1988, 19A: 1075-1082.

(责编 小城)