

铝合金超音频双脉冲调制VPTIG 深熔焊接技术*

从保强^{1,2}, 王义朋^{1,2}, 齐铂金^{1,2}, 钟豪^{1,2}, 胡鑫³

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 航空高端装备智能制造工信部重点实验室, 北京 100191;

3. 四川明日宇航工业有限责任公司, 什邡 618400)

[摘要] 变极性钨极氩弧焊(VPTIG)因其低成本高质量的焊接工艺效果,广泛应用于铝及铝合金材料的焊接。为进一步提升VPTIG电弧热源的能量密度和穿透能力,基于自主研制的焊接电源系统,提出一种“超音频方波脉冲+低频脉冲”的双脉冲调制VPTIG电弧深熔焊接新方法,将其用于7~12mm Al-Cu和Al-Mg系列铝合金平板的焊接。初步试验结果表明,采用该方法进行铝合金中厚板焊接时,焊接过程稳定且可获得良好的焊接质量,通过调节电流波形参数可实现对焊缝熔深的准确控制。针对该电弧焊接新方法进一步开展工艺适用性及其相关理论基础研究将具有重要的理论和应用价值。

关键词: 铝合金中厚板; 超音频双脉冲调制; 电流波形参数; 深熔; 变极性钨极氩弧焊

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.08.038



从保强

工学博士, 副教授, 从事新型高效脉冲电弧焊接工艺装备、高效电弧填丝增材制造等方面的研究工作。

* 基金项目: 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题(AWJ-17M-01); 研究生创新实践基金项目(YCSJ-03-2015-03); 北京市自然科学基金项目(3182020)。

作为铝合金材料电弧熔焊方法的典型代表,变极性钨极氩弧焊(Variable Polarity Tungsten Inert Gas, VPTIG)焊接过程稳定,通过适当调控正负极性电流大小及其持续时间,在有效降低钨极烧损的同时具有良好的氧化膜清理作用,可保证获得满意的铝合金焊缝成形外观。但VPTIG电弧仍然是自由发散形态,其能量密度较低,使得焊缝熔深浅、焊接速度小、生产效率低,一般只适于较薄铝合金材料的焊接加工^[1-6]。随着我国航空航天等高端装备制造制造业的发展,铝合金中厚板焊接结构应用越来越广泛,对电弧穿透能力、焊接效率、焊接质量等方面均提出了更高要求。常规VPTIG焊接方法很难满足铝合金中厚板产品的实际焊接生产需求,如何有效提升VPTIG电弧

热源的能量密度和穿透能力,是进一步提升VPTIG电弧焊接工艺适用性的关键^[7-8]。国内有学者在变极性电流波形基础上进行高低频脉冲调制(低频0.1~10Hz,高频100~500Hz),并用于6mm LD10铝合金焊接,结果表明高低频双脉冲调制的变极性工作模式实现了对VPTIG电弧力、工作形态以及焊接热输入的有效控制,可获得满意的焊接质量^[9]。近年来国内焊接学者针对铝合金高频脉冲VPTIG电弧焊接技术开展了较多的研究^[10-12],北京航空航天大学齐铂金教授研究团队成功研发了一种超音频方波脉冲VPTIG焊接方法,并针对超音频方波脉冲焊接电弧及熔池流动行为等方面开展了深入研究,已有结果表明,焊接过程中超音频方波脉冲电流的加入使得TIG电弧压力显

著提高,熔池内部形成显著的双环流模式,使得焊接电弧的熔透能力显著提升;同时,通过对超声频方波脉冲电流波形参数的精确调控可实现对电弧工作形态及电弧压力的准确控制^[13-14]。在已取得上述研究成果基础上,为进一步提升VPTIG电弧的熔透能力及适用范围,齐铂金教授研究团队提出开展适于铝合金中厚板的超声频双脉冲调制VPTIG小孔深熔焊接(Ultrasonic double-pulsed keyhole deep penetration VPTIG welding, UDP-VPTIG)新方法研究,旨在开发出一种电弧深熔焊接新工艺,实现铝合金中厚板高效率、低成本、高质量的电弧焊接制造。该方法在我国航空航天、轨道交通等高端装备制造领域铝合金关键结构的焊接加工中将具有重要的工程应用价值和推广应用前景。

超声频双脉冲调制 VPTIG 深熔焊

本研究团队提出的UDP-VPTIG双脉冲调制,是在过零无死区且具有快速电流沿变化速率($di/dt \geq 50A/\mu s$)的变极性电流波形基础上进行“超声频方波脉冲(20~80kHz)+低频脉冲(0.1~10Hz)”的双重脉冲调制,其电流波形及其主要参数如图1(a)所示(I_{bp} 为低频基值电流, I_{pp} 为低频峰值电流,低频脉冲频率= $1/T_L$,低频占空比= t_p/T_L ,变极性频率= $1/T_H$, $DCEN=t_{Hp}/T_H$; I_{HP} 为高频脉冲电流幅值),一方面正极性期间超声频方波脉冲电流的加入可显著增强VPTIG焊接电弧的热力作用,使电弧热源更趋于集中,电弧力作用增强;另一方面通过对双脉冲调制变极性电流工作波形的精确调控,可实现对VPTIG电弧热力特性及其能量分布的准确控制,以保证焊接电弧燃烧稳定可靠且

具有足够强的穿透能力^[15]。在铝合金UDP-VPTIG焊接过程中,当电弧压力、液态金属表面张力、液态金属内部压力以及小孔侧壁金属蒸发形成的蒸汽反作用力等相互作用处于动态平衡状态,熔池内的深熔小孔就会稳定存在^[16],随着UDP-VPTIG电弧电流低频脉动的周期性往复作用以及电弧沿焊接方向的移动(分别如图1(b)和图1(c)所示),熔池内小孔周边金属不断“熔化—流动—封闭—凝固”而形成连续焊缝,进而实现铝合金中厚板稳定的深熔焊接。

基于上述有关铝合金中厚板深熔焊接的原理性介绍,本文构建了由大功率超声频方波脉冲VPTIG焊接电源、松下WP-27A TIG水冷焊枪、MS75K高速摄像采集分析系统、三

坐标TIG自动焊接工作台等组成的铝合金中厚板UDP-VPTIG焊接试验平台,可进行平焊位置的焊接试验,同时还可以对焊接过程中的电弧工作形态和熔池状态进行实时观测和采集分析。图2所示是12mm 2A12-H112铝合金平板UDP-VPTIG焊接的部分试验结果,其采用的主要电流波形参数如表1所示,焊接速度200mm/min,保护氩气(99.99%)流量20L/min,电弧长度约4mm。可以看出,在UDP-VPTIG焊接过程中,随着电流波形的周期性变化,脉冲电流基值和峰值期间的电弧工作形态及其对应的熔池状态亦随之发生规律性改变,并且在脉冲峰值期间可清晰观测到熔池液态金属内存在的深熔小孔,在获得良好焊缝成形的同时焊缝熔

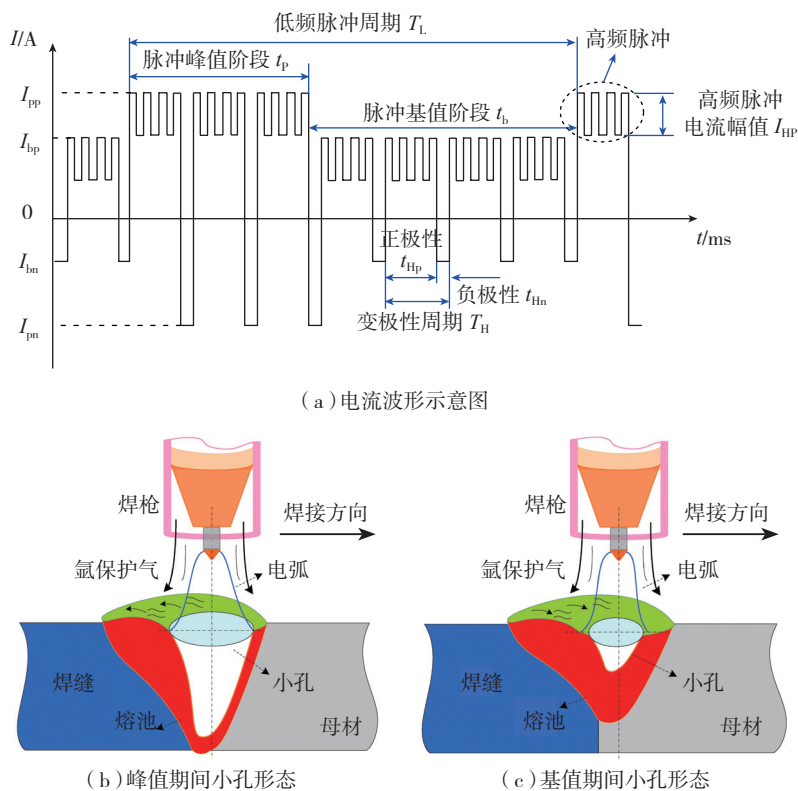


图1 超声频方波双脉冲调制电流波形及小孔形态示意图

Fig.1 Schematic diagrams of UDP-VPTIG current waveform and keyhole dynamic

表1 UDP-VPTIG主要电流波形参数

材料	变极性频率/Hz	DCEN/%	低频基值电流/A	低频峰值电流/A	低频脉冲频率/Hz	低频占空比/%	高频脉冲频率/kHz	高频占空比/%	高频脉冲电流幅值/A
2A12-H112	100	65	280	510	0.9	30	20	50	80

深明显增加。

铝合金 UDP-VPTIG 焊接工艺适用性

本研究团队提出的 UDP-VPTIG 焊接新方法旨在实现航空航天关键结构铝合金中厚板的焊接加工,因此选择当前我国航空航天产品关键结构生产常用的 Al-Cu 系 2A12-H112、2219-T87 和 Al-Mg 系 5A06-O 共 3 种铝合金平板作为试验对象,针对铝合金中厚板 UDP-VPTIG 焊缝熔深的控制及其焊接质量等方面开展了初步研究分析,可为评价 UDP-VPTIG 焊接工艺的适用性提供数据支撑。

1 铝合金 UDP-VPTIG 焊缝熔深控制

根据上文对铝合金中厚板 UDP-VPTIG 焊接工作原理的描述及其焊接过程中的实际观测结果可以推断,通过调节主要电流波形参数将可能实现对铝合金焊缝熔池深熔小孔的有效控制,进而可能实现对铝合金中厚板焊缝熔深的准确调控。本研究团队分别以 Al-Cu 系 12mm 2A12-H112 和 7mm 2219-T87 为对象开展了有关焊缝熔深的初步试验研究,具体细节描述如下。

由图 1 (a) 可知,UDP-VPTIG 电流波形参数较多,且前期已开展的实际焊接试验证明各电流参数均会对焊接过程及结果产生一定的影响,因此本文在采用 UDP-VPTIG 方法进行铝合金中厚板熔深试验时,采用的主要电流波形参数如表 2 所示。焊接 12mm 2A12-H112 铝合金平板时,保持其他参数不变,仅调节低频脉冲峰值电流大小(峰值电流由 300A 增至 525A);焊接 7mm 2219-T87 铝合

金平板时,低频脉冲峰值电流调节范围为 210~360A,低频占空比变化范围为 10%~40%,旨在考察低频峰值电流和低频占空比两个特征参数对焊缝熔深的影响。其他焊接过程参数为:焊接速度 170mm/min,保护氩气(99.99%)流量分别为 20L/min(2A12-H112)和 15L/min(2219-T87),电弧长度约 4mm。

图 3 所示为不同低频脉冲峰值电流条件下获得的 2A12-H112 焊缝横

截面,可以明显看出,随着低频脉冲峰值电流的提高,对应的焊缝熔深也随之增加(熔深由 300A 时的 2.60mm 增至 525A 时的 9.25mm),特别当低频脉冲峰值电流增大至 500A 以上时,焊缝熔深显著增加,由 6.35mm(500A)增加至 9.25mm(525A)。

不同低频脉冲峰值电流(210~360A)和低频脉冲占空比(10%~40%)条件下得到的 7mm 2219-T87 铝合金焊缝成形特征尺寸

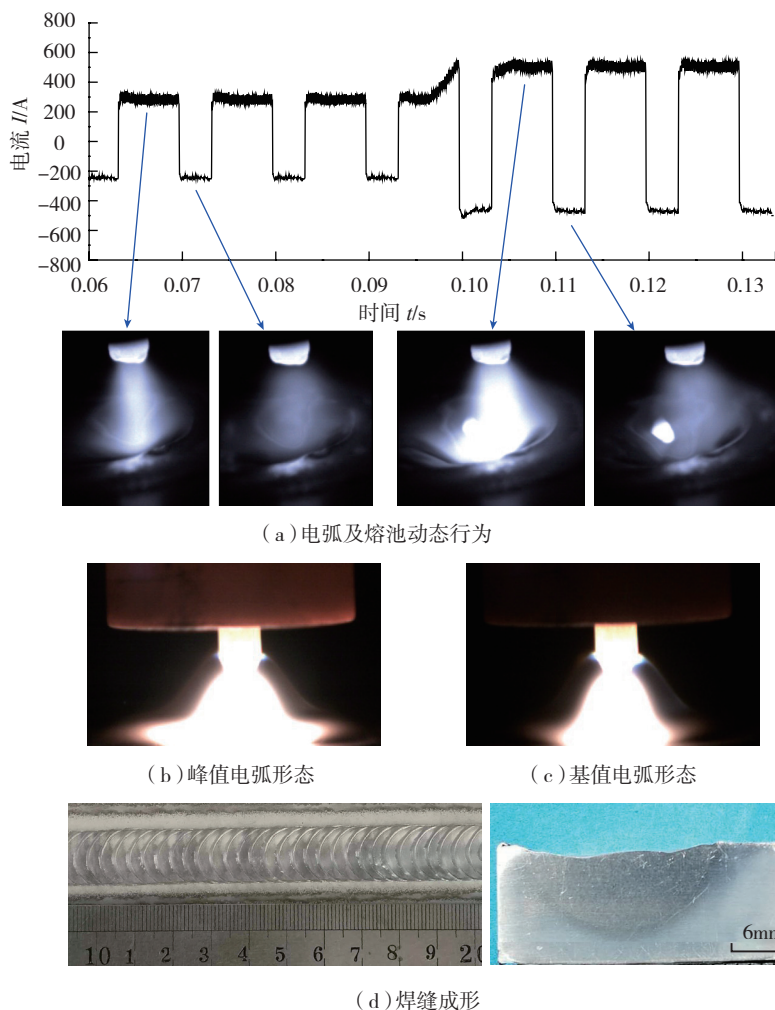


图2 UDP-VPTIG电弧与熔池动态以及焊缝成形

Fig.2 Dynamic behavior for DP-VPTIG arc and molten pool and weld appearance

表2 熔深控制试验UDP-VPTIG主要电流波形参数

材料	变极性频率 /Hz	DCEN/%	低频基值电流 /A	低频峰值电流 /A	低频脉冲频率 /Hz	低频占空比 /%	高频脉冲频率 /kHz	高频占空比 /%	高频脉冲电流幅值 /A
2A12-H112	100	80	250	300~525	2	50	20	50	50
2219-T87	100	80	120	210~360	2	40	20	50	80
2219-T87	100	80	120	360	2	10~40	20	50	80

(以熔深、熔宽和深宽比 3 个参数来表征)及对应的焊缝横截面照片如图 4 所示,可以明显看出,通过调节 UDP-VPTIG 焊接电流波形参数可以实现对 2219-T87 铝合金焊缝成形的灵活控制。

分析 12mm 2A12-H112 和 7mm 2219-T87 焊缝熔深的试验结果可知:在采用 VPTIG 焊接铝合金时,尽

管增大焊接电流使热输入水平提高,可以带来焊缝熔深增加的效果,但在 UDP-VPTIG 焊接过程中,电弧压力对焊缝熔深将具有关键作用^[15],通过精确调节 UDP-VPTIG 电流波形参数可以实现对电弧压力的准确控制,进而实现对铝合金中厚板焊缝熔深的控制,从而可满足对不同厚度铝合金中厚板材料的焊接加工需求。

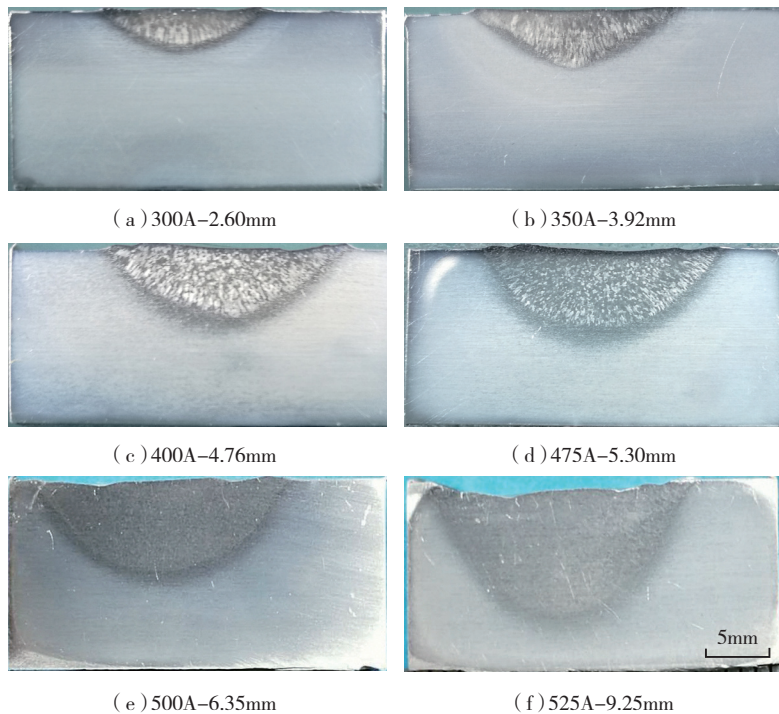


图3 12mm 2A12-H112平焊位置UDP-VPTIG焊缝横截面
Fig.3 UDP-VPTIG weld penetration for 2A12-H112

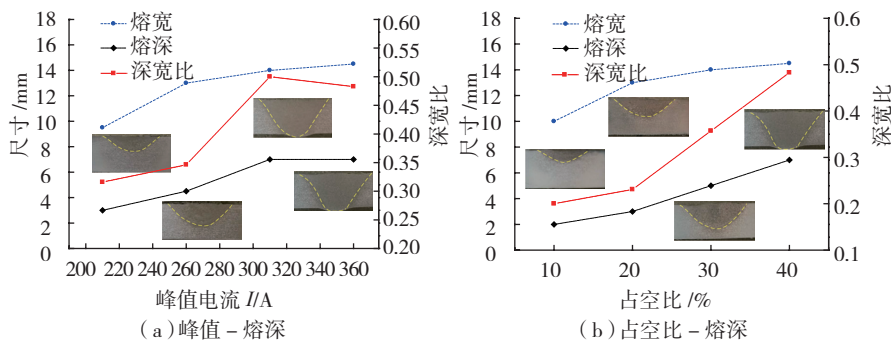


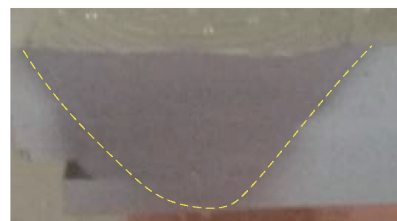
图4 不同电流参数条件下的2219-T87焊缝熔深
Fig.4 2219-T87 weld penetration for different current parameters

2 5A06-O铝合金UDP-VPTIG 焊接质量

实际获得的焊接接头质量优劣是决定一种电弧熔焊新方法是否具有工程应用价值的关键。为此,本研究团队对铝合金 UDP-VPTIG 焊接接头的质量进行了初步考察。以 7mm 5A06-O 铝合金平板为试验对象,采用 UDP-VPTIG 平焊方法进行平板对接不加填充焊丝的焊接加工,通过焊缝成形外观检查、X 射线探伤、拉伸性能测试和扫描电子显微镜断口观测等方式来考察 UDP-VPTIG 的焊接质量。7mm 5A06-O 平板对接采用的主要焊接电流参数如表 3 所示,其他过程参数为:焊接速度 170mm/min,保护氩气(99.99%)流量 20L/min,电弧长度约 4mm。图 5 所示为焊缝成形外观及其焊缝横截面,通过目测检查焊缝成形良好且没有发现明显缺陷;X 射线检测结果表明在焊缝内部未发现气孔等缺陷;光镜下观测焊缝横截面可以看出对接平板熔合良好且



(a) 焊缝外观



(b) 焊缝横截面

图5 5A06-O铝合金UDP-VPTIG焊缝外观及焊缝横截面

Fig.5 Weld appearance for 5A06-O UDP-VPTIG welds

表3 5A06-O铝合金UDP-VPTIG主要焊接电流参数

材料	变极性频率 /Hz	DCEN/%	低频基值电流 /A	低频峰值电流 /A	低频脉冲频率 /Hz	低频占空比 /%	高频脉冲频率 /kHz	高频占空比 /%	高频脉冲电流幅值 /A
5A06-O	100	80	120	310	2	40	20	50	50

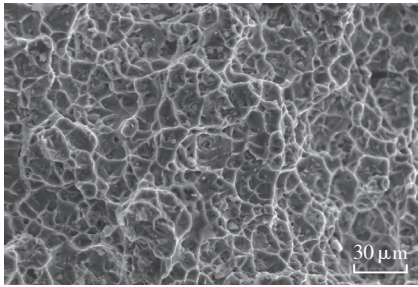


图6 5A06-O铝合金UDP-VPTIG焊缝拉伸断口形貌
Fig.6 Tensile fracture for 5A06-O UDP-VPTIG welds

熔深控制恰当。按照相关国家标准对5A06-O焊缝进行常温拉伸性能测试,5A06-O铝合金UDP-VPTIG焊缝抗拉强度320MPa,屈服强度154MPa,断后伸长率12.9%;同时焊缝拉伸断口表现出显著的韧性断裂特征(如图6所示)。上述实际焊缝检测结果表明,采用UDP-VPTIG方法进行5A06-O铝合金平板的焊接可获得接头性能良好的对接焊缝。

结论

综合上述试验研究结果,本研究团队提出的超音频方波双脉冲调制VPTIG小孔深熔焊接方法可以有效提升VPTIG焊接电弧的熔透能力和焊接工艺效果,通过合理调节UDP-VPTIG电流波形参数可实现对不同规格铝合金中厚板焊缝熔深的准确控制,从而可满足对不同厚度铝合金中厚板材料的焊接加工需求。然而,有关铝合金中厚板UDP-VPTIG焊接新方法的研究尚处于起步阶段,本研究团队将会进一步深入开展有关UDP-VPTIG焊接新工艺的设计优化及其相关基础理论方面的研究工作,为尽早实现本项电弧熔焊新方法的实际工程应用提供技术支撑和理论基础。

参考文献

[1] 耿正,张广军,邓元召,等. 铝合金变极性TIG焊工艺特点[J]. 焊接学报, 1997, 18(4): 232-237.

GENG Zheng, ZHANG Guangjun, DENG Yuanzhao, et al. Processing property of variable polarity power in TIG arc welding of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institute, 1997, 18(4): 232-237.

[2] 从保强,齐铂金,周兴国,等. 铝合金超快变换复合脉冲方波VPTIG焊接技术[J]. 焊接学报, 2009, 30(2): 25-29.

CONG Baoqiang, QI Bojin, ZHOU Xingguo, et al. Ultrafast-convert complex ultrasonic pulse square wave VPTIG arc welding technology of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institute, 2009, 30(2): 25-29.

[3] 柏久阳,林三宝,杨春利,等. 铝合金TIG焊变极性参数对阴极清理及钨极烧损的影响[J]. 焊接, 2015(5): 9-12, 68.

BAI Jiuyang, LIN Sanbao, YANG Chunli, et al. Effects of variable polarity parameters on cathode cleaning and deterioration of tungsten in TIG welding of aluminum alloy[J]. Welding & Joining, 2015(5): 9-12, 68.

[4] 韩永全,张世全,庞世刚,等. 铝合金变极性TIG焊接电弧行为[J]. 焊接学报, 2015, 36(9): 51-59.

HAN Yongquan, ZHANG Shiquan, PANG Shigang, et al. Arc behavior during variable polarity TIG welding of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institute, 2015, 36(9): 51-59.

[5] JUNGHO C, JUNG-JAE L, SEUNG-HWAN B. Heat input analysis of variable polarity arc welding of aluminum[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(5-8): 1273-1280.

[6] 王娟,刘静,李文珍,等. 铝合金推进剂箱体焊接技术及展望[J]. 电焊机, 2016, 46(7): 37-40.

WANG Juan, LIU Jing, LI Wenzhen, et al. Welding technology and development tendency analysis of Al alloy tank[J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(7): 37-40.

[7] 宋永伦. 高性能焊接电弧的研究与应用[J]. 电焊机, 2013, 43(3): 1-5.

SONG Yonglun. Research and development of high performance welding arc[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(3): 1-5.

[8] 武传松,王林,陈姬,等. 电弧焊接工艺高效化改型的研发进展[J]. 焊接, 2013(8): 1-10.

WU Chuansong, WANG Lin, CHEN Ji, et al. Research and development of high efficiency arc welding technology[J]. Welding and Joining, 2013(8): 1-10.

[9] 陈树君,张宝良,殷树言,等. 双脉

冲变极性波形对铝合金TIG焊焊接质量的影响[J]. 电焊机, 2006, 36(2): 7-9.

CHEN Shujun, ZHANG Baoliang, YIN Shuyan, et al. Effect on aluminum alloy TIG welding quality of double pulse modulated variable polarity waveform[J]. Electric Welding Machine, 2006, 36(2): 7-9.

[10] 从保强,苏勇,齐铂金,等. 铝合金脉冲电弧焊接技术进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(11): 40-45.

CONG Baoqiang, SU Yong, QI Bojin, et al. Development of pulsed arc welding technology for aluminum alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(11): 40-45.

[11] 邱灵,范成磊,林三宝,等. 高频脉冲变极性焊接电源及电弧压力分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(11): 81-84.

QIU Ling, FAN Chenglei, LIN Sanbao, et al. High-frequency pulse modulated variable polarity welding power and its arc pressure[J]. Transactions of the China Welding Institute, 2007, 28(11): 81-84.

[12] 李显,宋永伦,卢振洋,等. 2219铝合金高频耦合脉冲TIG焊接工艺[J]. 焊接学报, 2015, 36(5): 17-20.

LI Xian, SONG Yonglun, LU Zhenyang, et al. High frequency energy coupling pulsed TIG welding process on 2219 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institute, 2015, 36(5): 17-20.

[13] CONG B Q, YANG M X, QI B J, et al. Effects of pulse parameters on arc characteristics and weld penetration in hybrid pulse VP-GTAW of aluminum alloy[J]. China Welding, 2010, 19(4): 68-73.

[14] YANG M X, YANG Z, CONG B Q, et al. A study on the surface depression of the molten pool with pulsed welding[J]. Welding Journal, 2014, 93(8): s312-s319.

[15] WANG Y P, QI B J, CONG B Q, et al. Arc characteristics in double-pulsed VP-GTAW for aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249: 89-95.

[16] 武传松,刘祖明,陈姬. 受控脉冲穿孔等离子弧焊接小孔动态行为的检测[J]. 机械工程学报, 2013, 49(18): 114-118.

WU Chuansong, LIU Zuming, CHEN Ji. Measurement of dynamic keyhole behaviors in controlled-pulse plasma arc welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(18): 114-118.

通讯作者: 从保强, E-mail: cong bq@buaa.edu.cn.

(下转第47页)

do?_type=conference&id=6064748.

MAO Wei, LI Xiaohong, CHENG Yaoyong, et al. Study on brazing technology of directionally solidified superalloy DZ125[C]//Proceedings of 2004 International Forum on Aerospace Welding. Beijing, 2004. http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?_type=conference&id=6064748.

[10] 毛唯, 李晓红, 程耀永. DZ125

高温合金的真空钎焊[C]//第九次全国焊接会议论文集. 天津, 1999. http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?_type=conference&id=71149.

MAO Wei, LI Xiaohong, CHENG Yaoyong. Vacuum brazing of DZ125 superalloy[C]//Proceedings of 9th National Welding Conference. Tianjin, 1999. http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?_type=conference&id=71149.

details/detail.do?_type=conference&id=71149.

[11] BI G J, GASSER A. Restoration of nickel-base turbine blade knife-edges with controlled laser aided additive manufacturing[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 402-409.

通讯作者: 曲仲, E-mail: qushen927@vip.sina.com。

TIG Repairing on Directionally Solidified Superalloy DZ125

QU Shen¹, LIU Jide², SONG Wenqing¹, LI Ying¹, SUN Yuan², LI Bo², HOU Xingyu², ZHOU Guannan¹

(1. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Corporation Ltd., Shenyang 110043, China;

2. Superalloys Division, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

[ABSTRACT] Because of excellent creep resistances and fatigue properties both in medium and high temperature, the directionally solidified superalloy DZ125 alloy has been widely used as turbine blades and guide vanes in engineering. In this paper, the repairing process of DZ125 alloy was discussed. The results showed that there were many HAZ cracks formed by using common welding materials. Then a kind of new welding alloy was developed and after proper welding and heat treatments no cracks were found in the joints. The microstructures of the joints were also homogeneous and the tensile strengths of the joints were 90% of that of DZ125 alloy.

Keywords: DZ125; Superalloy; TIG welding; HAZ crack; Heat treatment

(责编 逸飞)

(上接第42页)

Ultrasonic Double-Pulsed Deep Penetration VPTIG Welding for Aluminum Alloys

CONG Baoqiang^{1,2}, WANG Yipeng^{1,2}, QI Bojin^{1,2}, ZHONG Hao^{1,2}, HU Xin³

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. MIIT Key Laboratory of Aeronautics Intelligent Manufacturing, Beijing 100191, China;

3. Sichuan Future Aerospace Industry LLC, Shifang 618400, China)

[ABSTRACT] Variable polarity tungsten inert gas arc welding (VPTIG) is widely used in the welding of aluminum and aluminum alloys, due to its low cost and high weld quality. In order to enhance the arc energy density and its penetration ability, a novel ultrasonic double-pulsed deep penetration VPTIG (DP-VPTIG) process was proposed in this paper. Al-Cu and Al-Mg series aluminum alloy plates were employed as base materials. The preliminary experimental results show that the stable process and good welding quality can be obtained when DP-VPTIG is employed to weld aluminum alloy plates, and also the precise control of weld penetration can be achieved by adjusting the pulsed current characteristic parameters. It is very significant and valuable to carry out the applicability and related theoretical study for the novel DP-VPTIG process, which can be employed in the welding fabrication of aluminum alloy plates and show a good application prospect.

Keywords: Aluminum alloy plate; Ultrasonic double-pulsed current; Current parameter; Deep penetration; VPTIG arc welding

(责编 逸飞)