

Ti-6Al-4V 超高频脉冲 GTAW 焊缝气孔分析

郑 浩， 杨明轩， 杨 舟， 齐铂金

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院材料加工系,北京 100191)

摘 要: 以 Ti-6Al-4V 钛合金为母材金属进行焊缝气孔研究,试验发现与常规电弧焊接 (conventional GTAW, C-GTAW) 相比,超高频脉冲 GTAW (ultra high frequency pulsed GTAW, UHFP-GTAW) 具有较好的焊缝气孔清理效果,可有效减少甚至清除气孔缺陷. 结合 UHFP-GTAW 电弧行为对焊缝气孔形成的气泡长大、脱离熔池壁面、上浮逸出等三个阶段分别进行分析. 结果表明,在高频脉冲电弧作用下,气泡受压,有利于气泡核长大;表面张力变大,有利于附着气泡脱离熔池壁面;Ti-6Al-4V 钛合金熔池粘度随温度升高而减小,气泡逸出速度随之增大,有利于降低焊缝气孔敏感性.

关键词: 钨极氩弧焊; 脉冲焊接; 焊缝气孔

中图分类号: TG 442 文献标识码: A doi:10.12073/j.hjxb.20151230001

0 序 言

钛合金具有塑韧性良好、强度高、密度小、比强度高、抗腐蚀及抗裂纹性能良好等优势,在航空航天、交通运输、石油化工等领域应用广泛^[1-3],其中 Ti-6Al-4V 钛合金使用量占 50% 以上^[4],钨极氩弧焊 (gas tungsten arc welding, GTAW) 是其常用焊接方法,但常规焊接 Ti-6Al-4V 气孔倾向性大^[5],严重影响 Ti-6Al-4V 钛合金典型结构件焊接质量及使用寿命. 随着脉冲电弧焊接技术的出现及发展,Ti-6Al-4V 钛合金焊缝气孔敏感性相应降低,焊接质量提高. 经典理论认为^[6],焊缝中气孔形成将经历气泡形核、长大、脱离熔池壁面、上浮逸出等四个阶段,控制焊缝气孔的关键在于气泡长大、脱离熔池壁面、上浮逸出等三个物理过程. 基于超高频脉冲 GTAW (ultra high frequency pulsed GTAW, UHFP-GTAW) 电弧行为的研究发现,其电弧行为将改变熔化金属流体压力、粘度、温度分布等关键物理量,受其影响,熔池气泡长大、脱离熔池壁面、上浮逸出等三个过程均会随之出现变化,其焊缝气孔可能进一步减少. 前期已在平面假设条件下采用试验、温度场模拟结合的方法对 Ti-6Al-4V 钛合金焊缝气孔形成各阶段进行了直接或间接的预先研究并做初步讨论^[7].

文中针对 Ti-6Al-4V 钛合金母材金属开展 UHFP-GTAW 焊接工艺试验,检测焊缝气孔敏感性,并

结合电弧行为、温度场监测等研究结果,分析高频脉冲焊接电弧热、力特性对熔池物理过程及熔化金属主要物理量的影响,讨论气泡形核、长大、脱离熔池壁面、上浮逸出等气孔形成四个阶段中各主要因素的变化,揭示 UHFP-GTAW 焊缝气孔清除机理,推进脉冲焊接熔池及熔化金属流动等方面的基础研究.

1 试验方法

1.1 试验设备

UHFP-GTAW 电源以高耐压 (1 200 V) 绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 为基础,通过桥式变换及脉冲切换电路实现 10 ~ 80 kHz 超高频脉冲电流输出,脉冲电流变化率达 50 A/μs,电流输出波形如图 1 所示.

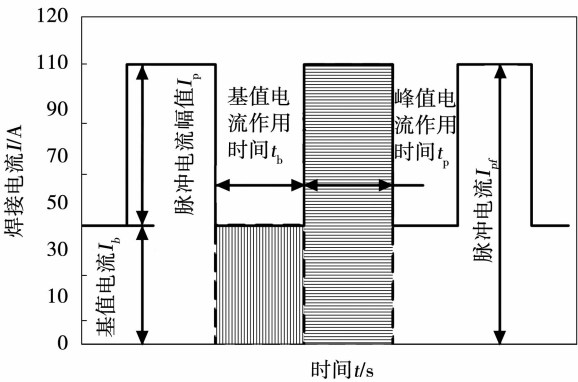


图 1 UHFP-GTAW 电流波形

Fig. 1 Current waveform of UHFP-GTAW

1.2 试验材料及参数

Ti-6Al-4V 钛合金平板尺寸为 100 mm × 60 mm × 1.5 mm, 平均晶粒尺寸 50 μm. 焊前经丙酮、无水乙醇清洗, 后经砂纸打磨, 体积分数 5% HF + 35% HNO₃ 酸洗, 清水洗净酸液后干燥保存待焊. 试验工艺参数见表 1, 平板对接试验沿轧制方向进行, 有效焊缝长度不少于 120 mm. 其它参数如下: 钨极(2% 铈)直径 2.4 mm, 弧长 3 mm, 保护气体为 99.99% 氩气, 焊枪-拖斗-背面保护气体流量(L/min) 分别为 15-20-3.

表 1 焊接工艺参数
Table 1 Welding parameters

序号	脉冲频率 <i>f</i> /kHz	占空比 <i>Σ</i> (%)	基值电流 <i>I_b</i> /A	脉冲电流 <i>I_{pt}</i> /A	焊接速度 <i>v</i> /(mm·min ⁻¹)
1	—	—	90	—	200
2	20	50	45	115	200
3	40	50	45	115	200

对比常规氩弧焊(C-GTAW)及UHFP-GTAW 焊缝气孔, 从力平衡、液体压强、熔池温度、流体粘度等角度分析熔池内部气泡形核、长大、脱离熔池壁面、上浮逸出等四个主要阶段, 如图 2 所示.

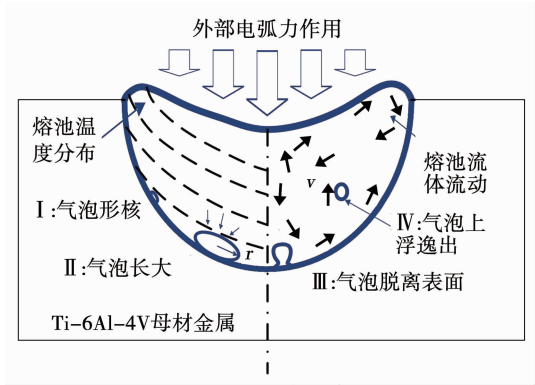


图 2 Ti-6Al-4V 焊接熔池气孔形成及逸出
Fig. 2 Gas pore process in molten pool of Ti-6Al-4V

2 试验结果与分析

经 X 射线检测发现, 常规电弧焊接所得 Ti-6Al-4V 钛合金焊缝在焊趾处出现较大的独立气孔或较小的连续分布气孔, 与之对比, UHFP-GTAW 所得焊件经检测对比分辨无气孔. 图 3 为接头力学性能检测后断面内气孔形貌, 检测分析发现, 断裂位置位于焊缝的 Ti-6Al-4V 钛合金接头试样大多在断面内存在气孔缺陷.

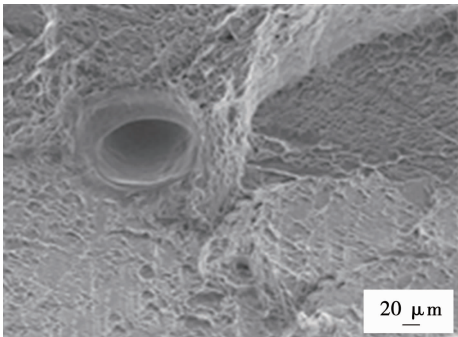


图 3 力学性能检测接头中的气孔(C-GTAW)
Fig. 3 Gas pore during mechanical test (C-GTAW)

3 焊缝气孔分析

3.1 气泡长大阶段

由文献[8]可知, 焊接熔池内部气泡形核至脱离熔池壁面前需达到一定几何尺寸, 即气泡长大, 分析过程以曲率半径衡量气泡几何尺寸. 前期电弧行为研究表明, UHFP-GTAW 电弧力增长显著, 熔池表面气液界面力平衡如图 4 所示. 选取界面下方液面微元 ΔE , 假设其底面积为 Δs , 高为 Δh , 其受力分析基于质心进行, 稳定焊接过程中处于力平衡状态, 由此可得液体内部压强 p 与其它外力的关系如式(1)所示.

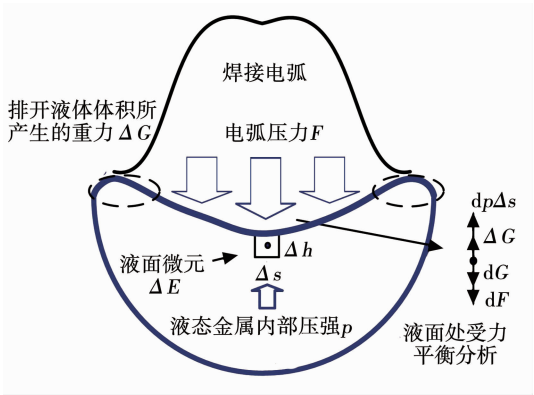


图 4 液态金属气液界面受力分析
Fig. 4 Force analysis at interfere of gas & liquid

$$dp = (df + dG - pg\Delta V) / \Delta s \tag{1}$$

式中: dG 为微元重力; p 为液态金属内部流体压强; F 为电弧压力; ρ 为流体密度; g 为重力加速度; ΔV 为电弧压力、表面张力、排开液体重力等合力作用在熔池表面形成的液面凹陷所排开液态金属体积. 气泡在压强作用下挤压变形, 呈现椭球形, 其曲率半径增加. 由于气泡长大过程气泡内部压力需满足式(2). 因此, 增大的液体压强将有利于焊接熔池

中气泡的长大,高频脉冲焊接过程中,金属与气体间表面张力 $\sigma_{2,g}$ 减小及其原因分析将在 3.2 节中论述,以上因素为其脱离熔池壁面提供了条件.

$$p_h > 1 + \frac{2\sigma_{2,g}}{r} \tag{2}$$

式中: p_h 为气泡内部压力; $\sigma_{2,g}$ 为金属与气体间的表面张力; r 为气泡曲率半径.

3.2 气泡脱离熔池壁面阶段

气泡脱离熔池壁面的能力由液态金属、气相及熔池壁面三者两两间的表面张力决定,图 5 所示为该过程的关键参数接触角 θ ,其大小由液态金属、气相及熔池壁面三者两两间表面张力决定,如式(3)所示. 当接触角过大时,气泡脱离后,壁面仍存在气泡残留,由于焊接加热、冷却过程时间较短,残留气泡再次脱离逸出的可能性较小;当接触角较小时,气泡长大脱离壁面后,无残留气泡存在,该条件下焊缝气孔敏感性将远低于前者. 综上可知,减小气泡与壁面间的接触角可有效降低气泡脱离后壁面气孔残留.

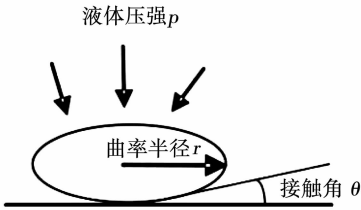


图 5 熔池内部气泡逸出接触角
Fig. 5 Infiltration angle of gas in molten pool

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{1,g} - \sigma_{1,2}}{\sigma_{2,g}} \tag{3}$$

式中: θ 为气泡与熔池壁面接触角; $\sigma_{1,g}$ 为熔池壁面与气泡间表面张力; $\sigma_{1,2}$ 为熔池壁面与熔池金属间表面张力.

由表面张力的定义可知,依附于壁面的气泡与壁面间的表面张力大小与二者的分界线成正比,如 3.1 节所述,高频脉冲焊接造成熔池流体压强增加,在挤压作用下,附着于熔池壁面的气泡曲率半径增加,与壁面的接触面随之增大,即二维图像中分界线增大,由此可知,壁面与气泡间表面张力 $\sigma_{1,g}$ 增加. 壁面与熔池金属间表面张力 $\sigma_{1,2}$ 、熔池金属与气泡间表面张力 $\sigma_{2,g}$ 均属熔池流体与其它介质间的表面张力,主要受温度及压力的影响. 本中分析过程采用经典假设,认为熔池内流体压力变化不会对表面张力产生影响. 前期基于红外热像仪 Ti400 进行了焊接过程温度场实时监测^[9],以 C-GTAW 及 40 kHz

为例,在平均电流 60 A、同等试验条件下,从定点引弧至稳定行走,熔池最高温度变化拟合曲线如图 6 所示. 分析可知,40 kHz 时熔池最高温度曲线整体处于较高水平,定点引弧-电弧运动过程中,与 C-GTAW 熔池最高温度相比,分别提升了约 75 K(起弧点),32 K(运动前最高值),大于 50 K(电弧运动初期). 故在 40 kHz 高频脉冲电弧作用下,Ti-6Al-4V 钛合金熔池最高温度增大. 一般地,流体表面张力随温度升高而减小,因此,在较高温度的熔池中,液态金属流体与其它介质间的表面张力 $\sigma_{1,2}$ 、 $\sigma_{2,g}$ 将会减小.

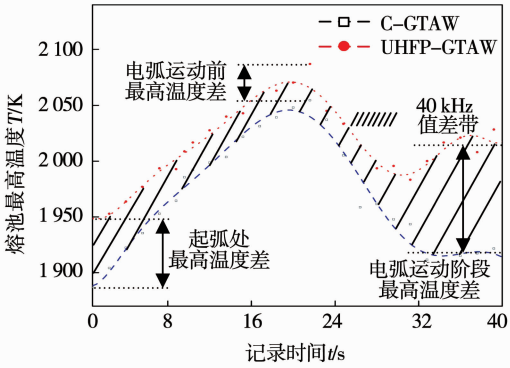


图 6 熔池最高温度变化曲线
Fig. 6 Top temperature in molten pool

与 C-GTAW 相比,高频脉冲电弧作用下,决定接触角 $\cos \theta$ 大小的三组表面张力 $\sigma_{1,g}$ 、 $\sigma_{1,2}$ 、 $\sigma_{2,g}$ 随接触面、熔池温度等因素的变化分别为增大、减小、减小,结合式(3)可知,分母减小,分子增加,故接触角 $\cos \theta$ 增大,即高频脉冲焊接时气泡脱离熔池壁面阶段的接触角减小,有利于减少气泡在壁面上的残留,从而清除焊缝气孔缺陷.

3.3 气泡上浮逸出阶段

熔池内部气泡脱离熔池壁面后进入上浮逸出阶段,在此过程中,若气泡逸出速度大于焊缝金属结晶速度则可大大降低 Ti-6Al-4V 钛合金焊缝气孔敏感性,因此,获得较大的气泡逸出速度是减少甚至清除焊缝气孔的关键,即

$$v = \frac{2}{9} \frac{(\rho_1 - \rho_2)gr^2}{\eta} \tag{4}$$

式中: v 为气泡浮出速度; ρ_1 为液体金属密度; ρ_2 为气体密度; η 为熔池流体金属粘度.

由式(4)可知,逸出速度 v 与熔池流体金属粘度密切相关,20 世纪中期,有学者先后进行了液态金属粘度与温度关系的试验、理论分析,证明了金属流体粘度随温度升高而减小^[10]. 结合第 3.2 节的前期

工作引述发现,UHFP-GTAW 熔池最高温度较之 C-GTAW 存在一定的增长,这可能导致高频脉冲电弧焊接时,熔池流体粘度的降低,与附着于熔池壁面的气泡曲率半径变化综合考虑,将获得较大的气泡逸出速度(图 7),从而有利于降低 Ti-6Al-4V 钛合金焊缝气孔敏感性。

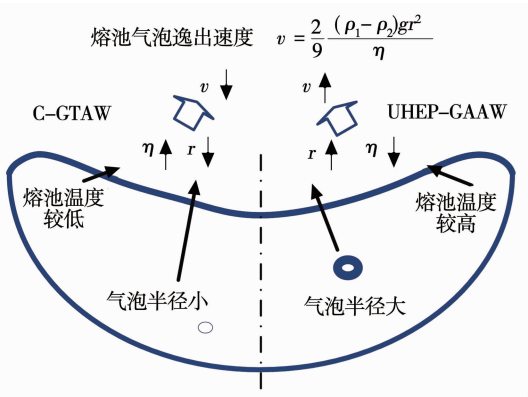


图 7 熔池气泡逸出

Fig. 7 Escape process of gas pore in molten pool

4 结 论

- (1) 在 Ti-6Al-4V 钛合金平板对接过程中,UHFP-GTAW 可有效减少甚至清除焊缝气孔,与之对比,C-GTAW 焊缝焊趾处有较大的独立气孔或连续分布的小气孔带。
- (2) 高频脉冲电弧作用下,熔池内部附着于壁面的气泡受挤压,曲率半径增加,与熔池壁面接触面积增大,为气泡长大提供了条件,同时二者间表面张力增大;气泡与壁面的接触角减小,有利于减少焊缝气孔。
- (3) UHFP-GTAW 条件下,Ti-6Al-4V 钛合金熔池粘度可能随温度升高而减小,气泡逸出速度随之增大,有利于降低焊缝气孔敏感性。

参考文献:

[1] Leyens C, Peters M. Titanium and titanium alloys[M]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.

[2] Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering A-Structure, 1996, 213: 103 - 114.

[3] Malinov S, Sha W. Application of artificial neural networks for modeling correlations in titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering A-Structure, 2004, 365: 202 - 211.

[4] 周水亮,陶 军,郭德伦. 细晶粒钛合金 GTAW 焊缝成形性能分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(7): 25 - 28.

Zhou Shuliang, Tao Jun, Guo Delun. Appearance of fine grain titanium alloy by tungsten iner-gas arc welding (GATW) [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(7): 25 - 28.

[5] 杨明轩,齐铂金,从保强,等. 钛合金超音频直流脉冲 GTAW 焊缝组织性能[J]. 焊接学报, 2012, 33(6): 39 - 42.

Yang Mingxuan, Qi Bojin, Cong Baoqiang, et al. Microstructure and properties of titanium alloys welds using ultrasonic frequency pulse GTAW[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(6): 39 - 42.

[6] 安藤弘平,长谷川光雄. 焊接电弧现象[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.

[7] Yang Mingxuan, Yang Zhou, Cong Baoqiang. How ultra high frequency of pulsed gas tungsten arc welding affects weld porosity of Ti-6Al-4V alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(6): 955 - 960.

[8] Bogdanovich M P, Baum B A. The temperature dependences of the viscosity of metals (FTD-HT-23-1099-71) [R]. US: Foreign Technology Division, 1968.

[9] 杨 舟,齐铂金,杨明轩. 超高频脉冲 GTAW 工艺特性分析[J]. 机械工程学报, 2015, 52(2): 26 - 32.

Yang Zhou, Qi Bojin, Yang Mingxuan. Analysis on characteristic of ultra high frequency pulsed gas tungsten arc welding process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 52(2): 26 - 32.

[10] Strauss Simon W. The temperature dependence of the viscosity of liquid metals[J]. Nuclear Science and Engineering, 1962, 12(3): 436 - 439.

作者简介: 郑 浩,男,1990 年出生,硕士研究生. 主要从事脉冲电弧物理及钛合金焊接加工工艺的研究. 已发表论文 10 余篇. Email: sy1507203@buaa.edu.cn

通讯作者: 杨明轩,男,博士,讲师. Email: yangmingxuan@buaa.edu.cn