

Al-Mg 合金超高频脉冲 VP-GTAW 电流参数优化

王义朋, 齐铂金, 从保强, 王 强, 周 阳

(北京航空航天大学 航空高端装备智能制造工信部重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 以铝镁系 5A06 铝合金为对象, 开展了复合超高频脉冲变极性钨极气体保护电弧焊 (Hybrid Ultrasonic Frequency Pulsed Variable Polarity Gas Tungsten Arc Welding, HPVP-GTAW) 焊接电流参数优化研究。利用正交试验方法设计了焊接实验, 以接头薄弱区的显微硬度为评价指标, 以 HPVP-GTAW 焊接电流特征参数为影响因素, 分别采用极差分析法和回归分析法对实验结果进行分析与讨论。结果表明, 变极性电流频率 f_L 、高频脉冲频率 f_H 和脉冲电流比例系数 ψ (定义为高频脉冲基值电流 I_b 、高频脉冲峰值电流 I_p 和脉冲占空比 δ 的综合作用) 的最优参数匹配依次为 1 kHz、20 kHz 和 0.6 (I_b 为 75 A, I_p 为 180 A, δ 为 0.2)。 f_L 对显微硬度影响最为显著, f_H 影响作用次之, ψ 对显微硬度影响最弱。最优参数匹配的条件下, 接头的显微硬度、抗拉强度、延伸率和断面延伸率分别达到母材性能的 84.7%、94.3%、80% 和 93.4%。

关键词: 5A06 铝合金; 超高频脉冲; VP-GTAW; 显微硬度; 参数优化

中图分类号: TG457.14

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)11-3522-06

Al-Mg 合金以其优良的物理性能和加工性能, 被广泛应用于航空、航天等领域, 变极性钨极气体保护电弧焊 (Variable Polarity Gas Tungsten Arc Welding, VP-GTAW) 是铝合金焊接的主要工艺方法之一^[1-4]。Al-Mg 合金在焊接过程中存在合金元素蒸发散失, 气孔倾向性高和接头强度低等问题, 严重影响了其接头质量。研究表明, 将高频脉冲电流 (脉冲频率通常高于 20 kHz) 引入 VP-GTAW 焊接过程 (称为 HPVP-GTAW), 会产生“高频效应”, 有助于提高电弧挺度和能量密度^[5-8], 增强熔池流动性, 减小气孔敏感性, 细化焊缝晶粒组织^[9-11], 并提高接头力学性能^[12-15]。而针对 Al-Mg 合金 HPVP-GTAW 焊接过程中电流参数间的最优匹配, 以及各参数对接头性能影响的主次顺序, 相关研究尚不足。

显微硬度是金属材料在承受外力时, 抵抗弹性变形、塑性变形和断裂的能力, 是表征焊接接头综合性能的 1 个重要指标^[16,17]。众所周知, 熔合区和热影响区 (Heat Affected Zone, HAZ) 是焊接接头的薄弱区^[18,19], 该区域也是 Al-Mg 合金显微硬度的薄弱环节^[20]。因此, 本研究以熔合区和 HAZ 的显微硬度为研究指标, 开展了 Al-Mg 合金 HPVP-GTAW 焊接电流参数优化研究, 旨在通过优化参数匹配, 提高焊缝显微硬度, 并进一步增强接头力学性能。利用正交试验方法设计了焊接实

验, 通过极差分析法和回归分析法对实验结果进行分析^[21-24], 得到了特征参数间的优化匹配关系及其对接头性能影响的主次顺序, 其结果对 HPVP-GTAW 焊接技术的推广应用具有重要意义。

1 实 验

试验选取 Al-Mg 系典型的 5A06 铝合金 (处理状态为冷作半硬化 HX4 态, 抗拉强度极限为 O 与 HX8 状态的中间值) 为焊接试件, 其化学成分 (质量分数) 为 Mg 5.8%、Si 0.4%、Mn 0.6%、Zn 0.2%、Cu 0.1% 和 Al 余量, 尺寸规格为 200 mm×100 mm×3 mm。填充焊丝选用直径为 2.4 mm 的 ER5356, 保护气体为 99.99% 的纯氩气。前期研究表明, HPVP-GTAW 焊接的电流特征参数主要包括 T_L 为变极性电流周期, T_H 为高频脉冲周期, 变极性电流频率 $f_L=1/T_L$ (0.1~1 kHz), 高频脉冲频率 $f_H=1/T_H$ (5~40 kHz), 高频脉冲基值电流 I_b , 高频脉冲峰值电流 I_p 和脉冲电流占空比 $\delta=t_{pp}/T_H$ (0%~100%), 波形示意图如图 1 所示。

为保证焊接热输入基本一致, 避免因热输入的差异对实验结果造成影响, 需要对高频脉冲电流参数 I_b 、 I_p 和 δ 进行同步匹配, 把输入电流有效值和平均值偏差控制在 ± 5 A 之内, 并定义无量纲参数 ψ 表征其综合作用效果:

收稿日期: 2017-11-24

基金项目: 国家自然科学基金 (51675031, 50975015, 51005011)

作者简介: 王义朋, 男, 1987 年生, 博士, 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191, E-mail: wyp092@buaa.edu.cn

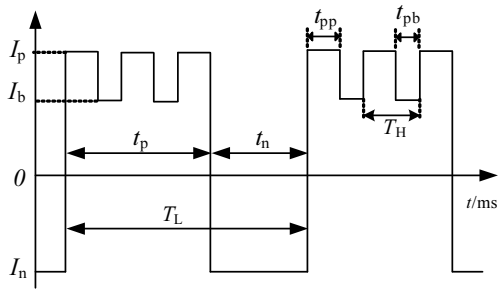


图 1 HPVP-GTAW 电流波形示意图

Fig.1 Schematic of welding current with HPVP-GTAW

$$\psi = I_p \delta / [I_b (1 - \delta)] \quad (1)$$

通过大量实验, 以获得全熔透焊缝为指标, 分别得到 3 组理想的 f_L 、 f_H 和 ψ 的参数水平, 如表 1 所示。

焊接过程采用直径为 3.0 mm 的钨钨极, 电极距离工件 3 mm, 保护气体流量为 15 L·min⁻¹, 焊接速度为 150 mm·min⁻¹, 焊丝送进速度为 150 mm·min⁻¹, 正负极性持续时间比为 8:2, 负极性电流为 120 A, 采用平板对接连续焊接 200 mm。

本实验研究的是三因素三水平实验参数, 因此选择 L₉(3⁴) 正交试验表, 实验内容如表 2 所示。

截取焊缝中间部位, 利用标准的金相制备工艺制备 9 组试件的金相试样, 并进行机械磨光、抛光, 通过比例为 2.5:1.5:1:95 的 HNO₃、HCL、HF 和 H₂O 试液进行腐蚀处理。采用 DHV-1000 型数字维氏 (HV)

表 1 三因素三水平表

Table 1 Table of three factors with three levels

No.	f_L /kHz	f_H /kHz	ψ
1	0.1	5	0.60 ($I_b=75$ A, $I_{pp}=180$ A, $\delta=0.2$)
2	0.5	20	2.17 ($I_b=60$ A, $I_{pp}=130$ A, $\delta=0.5$)
3	1	40	7.33 ($I_b=60$ A, $I_{pp}=110$ A, $\delta=0.8$)

表 2 L₉(3⁴) 正交试验表

Table 2 L₉(3⁴) orthogonal experimental array

No.	A: f_L /kHz	B: f_H /kHz	C: ψ	Null
1	1(0.1)	1(5)	1(0.6)	1
2	1(0.1)	2(20)	2(2.17)	2
3	1(0.1)	3(40)	3(7.33)	3
4	2(0.5)	1(5)	2(2.17)	3
5	2(0.5)	2(20)	3(7.33)	1
6	2(0.5)	3(40)	1(0.6)	2
7	3(1)	1(5)	3(7.33)	2
8	3(1)	2(20)	1(0.6)	3
9	3(1)	3(40)	2(2.17)	1

硬度计对已浸蚀的金相试样进行显微硬度测试, 采用多点测量取平均值的方法, 测试点位置选取接头薄弱环节中熔合线两侧的熔合区和 HAZ, 纵向相邻两测试点距离 0.3 mm, 横向相邻两测试点距离 0.5 mm, 如图 2 所示。测试过程中, 加载 1.96 N, 保持时间为 15 s。9 组实验测得的显微硬度值如图 3 所示。

2 正交试验的极差分析

以显微硬度为性能指标, f_L 、 f_H 和 ψ 为影响因素, 采用极差分析方法对正交试验结果进行了分析, 分析结果如表 3 所示。其中, K_{ij} 为每个因素在同一水平下实验结果之和, K_{1j} 、 K_{2j} 和 K_{3j} 的大小反映了相同因素下不同水平对性能指标的影响程度, 其取值越大表示该水平对指标影响越显著, 选择比较 K_{1j} 、 K_{2j} 和 K_{3j} 中的最大值, 即可获得该因素下的最优水平。 R_j 为 K_{1j} 、 K_{2j} 和 K_{3j} 中最大值与最小值之差, R_j 越大表示该因素的变化对性能指标的影响越显著, 通过对比 3 个因素的 R 值, 即可获得 3 个因素对实验指标影响的主次顺序。

从表中可以看出, $K_3A > K_2A > K_1A$, $K_2B > K_1B > K_3B$, $K_1C > K_2C > K_3C$, 意味着 f_L 、 f_H 和 ψ 的最优水平分别为 1 kHz, 20 kHz 和 0.6。极差值 $R_1 > R_2 > R_3$, 即实验因素对性能指标影响的主从顺序为 $f_L > f_H > \psi$ 。因此, 由极差

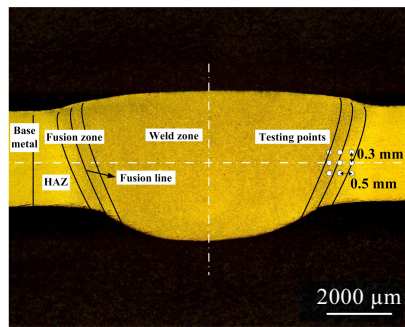


图 2 显微硬度测试点位置示意图

Fig.2 Schematic of test points location of microhardness

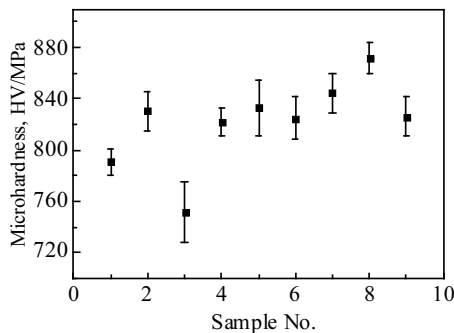


图 3 9 组实验的显微硬度值

Fig.3 Microhardness values of 9 groups of experiments

表 3 极差分析结果

Table 3 Range analyses

No.	A: f_L /kHz	B: f_H /Hz	C: ψ	Microhardness, HV/MPa
1	1(0.1)	1(5)	1(0.6)	791
2	1(0.1)	2(20)	2(2.17)	830.8
3	1(0.1)	3(40)	3(7.33)	752
4	2(0.5)	1(5)	2(2.17)	821.9
5	2(0.5)	2(20)	3(7.33)	833.1
6	2(0.5)	3(40)	1(0.6)	825
7	3(1)	1(5)	3(7.33)	844.4
8	3(1)	2(20)	1(0.6)	871.9
9	3(1)	3(40)	2(2.17)	826.4
K_{1j}	2373.8	2457.3	2487.9	
K_{2j}	2480	2535.8	2479.1	
K_{3j}	2542.7	2403.4	2429.5	
R_j	188.9	132.4	58.4	

分析对正交试验结果进行分析, 获得的最优参数匹配为 $f_L=1$ kHz, $f_H=20$ kHz, $\psi=0.6$ 。其中, f_L 对性能指标影响最显著, f_H 的作用效果次之, ψ 对性能指标影响最弱。

3 正交试验的回归分析

3.1 建立回归模型

以 f_L 、 f_H 和 ψ 为自变量, 显微硬度值为因变量, 建立正交试验性能指标和因素的函数关系:

$$y = f(f_L, f_H, \psi) \quad (2)$$

考虑各个因素及其平方, 以及高频电流参数 f_H 和 ψ 的交互作用, 采用回归分析方法, 建立回归模型:

$$MD = \beta_0 + \beta_1(f_L) + \beta_2(f_H) + \beta_3(\psi) + \beta_4(f_L^2) + \beta_5(f_H^2) + \beta_6(\psi^2) + \beta_7(\psi f_H) \quad (3)$$

式中, MD 代表显微硬度, β_0 为与因变量同量纲的回归常数, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_7$ 为回归系数, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_7$ 均为与自变量无关的未知参数, 回归分析过程即为求解上述参数的过程。

3.2 确定回归系数

采用最小二乘估计的方法对回归模型中的回归系数进行估计确认, 根据最小二乘法的思想, 选取使函数的偏差平方和最小的参数值作为回归系数的估计, 即存在参数估计 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_p$, 使得偏差平方和达到最小, 其表达式为:

$$Q(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p) = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_{i1} - \dots - \beta_p x_{ip})^2 \quad (4)$$

$$Q(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_p) = \min \{Q(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p)\} \quad (5)$$

式中, Q 为函数的偏差平方和, p 为自变量的数量, n

为正交试验的组数。求偏差平方和 Q 对回归系数 β 的偏导数, 令偏导数等于零, 解该方程即可获得使 Q 为最小的参数值, 即回归系数的参数估计, 其表达式如下:

$$\frac{\partial Q(\beta)}{\partial \beta} = 0 \quad (6)$$

在置信水平 $\alpha=0.05$ 的条件下解式(6), 并将求得的回归系数估计值代入回归模型, 得到以显微硬度为因变量, f_L 、 f_H 和 ψ 为自变量的回归方程:

$$MD = 75.8561 + 8.7933 f_L + 0.3932 f_H + 1.4516 \psi - 9.0142 f_L^2 - 0.0034 f_H^2 - 0.0199 \psi^2 - 0.0731 \psi f_H \quad (7)$$

3.3 回归效果的有效性检验

回归方程确定后, 需要进一步对回归效果的显著性进行检验。利用数理统计学中回归方程的 F 值检验法对回归效果进行检验, 检验原则为: 对回归方程的 F 值与相同置信水平下查表获得的 $F_{1-\alpha}(p, n-p-1)$ 进行比较, 当 $F > F_{1-\alpha}(p, n-p-1)$ 时, 表明回归效果显著, 且两者的差值越大, 代表回归效果的显著程度越高; 否则相反。计算获得的 F 值为 1179, 查表获得的 $F_{1-\alpha}(p, n-p-1)$ 为 237, $F > F_{1-\alpha}(p, n-p-1)$, 且二者的差值很大, 意味着所建立的回归方程效果高度显著。

利用所建立的回归方程对实验结果进行预测, 并绘制预测结果与实验结果的对比图, 如图 4 所示。可以看出, 回归方程所预测的结果与实验结果拟合度很高, 验证了回归效果高度显著。

4 分析与讨论

4.1 单因素对显微硬度的影响

利用建立的回归模型, 分别绘制了 f_L 、 f_H 和 ψ 3 个因素在其参数取值范围内对显微硬度的作用曲线 (另外 2 个因素设为常数), 如图 5a~5c 所示。从图 5a 可以看出, f_L 在 0.1~1 kHz 的变化过程中, 显微硬度随 f_L 的增大而增大, 当 f_L 为 1 kHz 时显微硬度达到

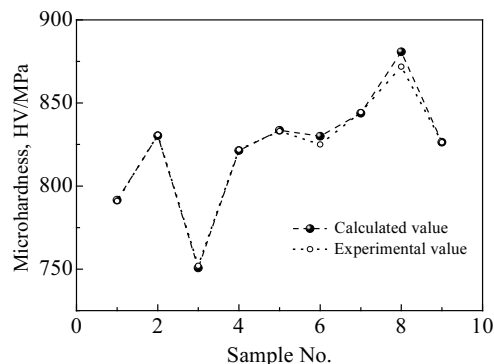


图 4 实验值与预测值分布

Fig.4 Distribution of experimental and prediction values

最大值, 即 1 kHz 为 f_L 的最优参数。分析图 5b 中 f_H 对显微硬度的影响规律可以看出, 在 f_H 的变化范围内, 当 f_H 小于 20 kHz, 显微硬度随 f_H 的增大而增大; 当 f_H 大于 20 kHz 时, 显微硬度开始单调减小, f_H 在 20 kHz 时显微硬度最大, 所以 f_H 的最优参数是 20 kHz。图 5c 显示了脉冲电流比例系数 ψ 对显微硬度的影响规律, ψ 在参数范围内增大的过程中, 显微硬度单调递减, 故 0.6 为 ψ 的最优参数。因此, 单因素分析得到的最优参数匹配为 $f_L=1$ kHz, $f_H=20$ kHz, $\psi=0.6$ (即 $I_b=75$ A, $I_p=180$ A, $\delta=0.2$)。

4.2 因素间交互作用对显微硬度的影响

在单因素曲线的基础上, 绘制了双因素交互作用对显微硬度的影响曲线, 如图 6a~6c 所示。可以看出, 双因素交互作用对显微硬度的影响规律与单因素分析结果基本一致。所不同的是, 在图 6c 中 f_H 与 ψ 交互作用的过程中, 当 f_H 小于 12 kHz 时, 显微硬度随 ψ 的增大而增大, 呈现为单调递增特征; 当 f_H 在 12~14 kHz 之间时, 在 ψ 增大过程中, 显微硬度先增大, 后减小; 当 f_H 大于 14 kHz, ψ 对显微硬度的影响规律与单因素分析一致, 即显微硬度随 ψ 单调递减。当 f_H 取最优值 20 kHz 时, ψ 的最优参数依然是 0.6, 即双因

素分析结果中, 最优参数依然是 $f_L=1$ kHz, $f_H=20$ kHz, $\psi=0.6$ 。另外, 从交互作用曲线可以看出, f_L 对显微硬度影响最显著, f_H 相对较弱, ψ 对显微硬度影响最小。

同时, 绘制了三因素交互作用对显微硬度的影响曲面, 如图 7a 所示。从图中可以看出, 不管 f_H 与 ψ 取何值, 显微硬度值均随 f_L 的增大而增大, 因此 1 kHz 是 f_L 的最优参数。图 7b 为 f_L 在 1 kHz 时曲面向底面的投影, 即 f_H 与 ψ 交互作用对显微硬度的影响。很明显, f_H 与 ψ 的最优参数和前述结果一致, 即 $f_H=20$ kHz, $\psi=0.6$ 。

通过回归分析得到的各因素最优参数为 $f_L=1$ kHz, $f_H=20$ kHz, $\psi=0.6$ (即 $I_b=75$ A, $I_p=180$ A, $\delta=0.2$), 其中, f_L 对显微硬度影响最显著, f_H 的影响作用次之, ψ 对显微硬度影响最弱, 这与极差分析所得到的分析结果一致。利用此参数组合, 在相同的实验条件下进行验证实验, 测试焊接接头的显微硬度和拉伸性能。获得的实验结果为: 显微硬度(HV)为 872.1 MPa、抗拉强度为 358 MPa、延伸率为 9.7%、断面延伸率为 12.8%, 各项性能分别达到母材的 84.7%、94.3%、80% 和 93.4%。拉伸断口形貌如图 8 所示。可以看出断口密集地分布了大小均匀的韧窝, 表现为典型的韧性断裂特征。

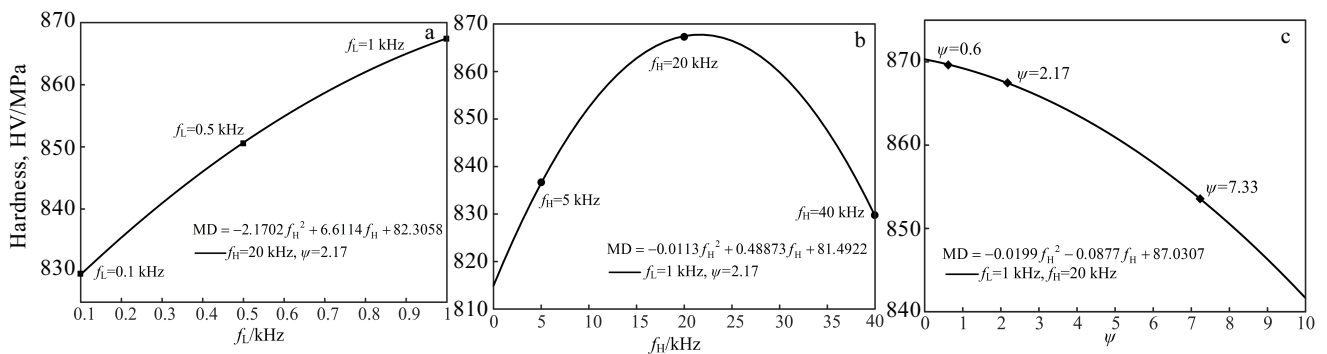


图 5 单因素对显微硬度的影响曲线

Fig.5 Curves of influence of individual factor on microhardness: (a) f_L , (b) f_H , and (c) ψ

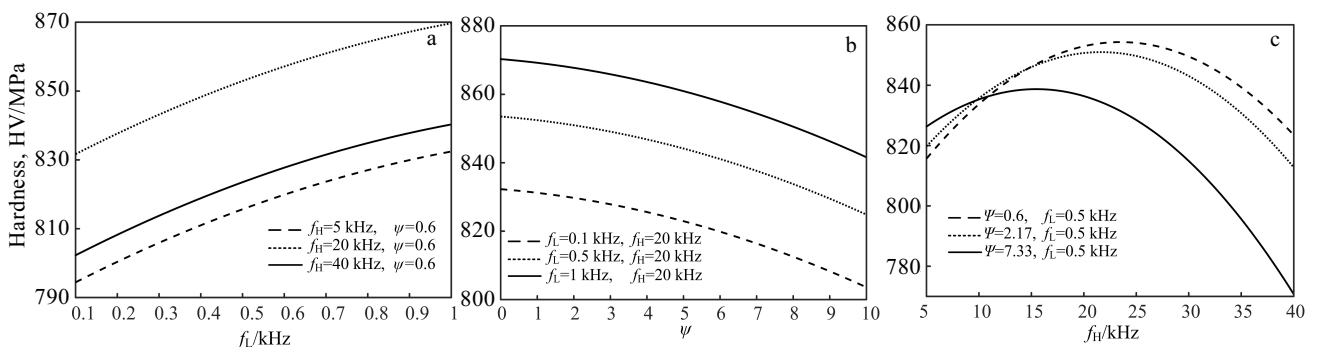


图 6 双因素交互作用对显微硬度的影响

Fig.6 Influence of interaction of two factors on microhardness: (a) f_L and f_H ; (b) ψ and f_L ; (c) f_H and ψ

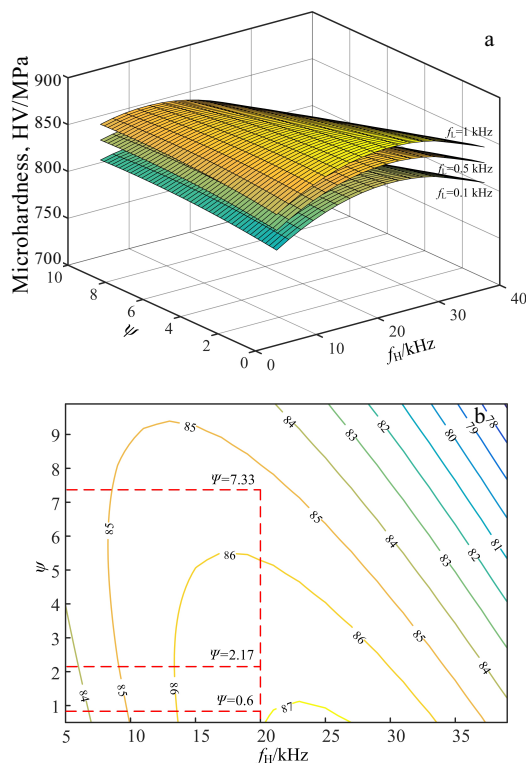


图 7 三因素交互作用对显微硬度的影响

Fig.7 Influence interaction of three factors on microhardness: (a) surface of interaction of three factors and (b) contour of surface $f_L=1$ kHz

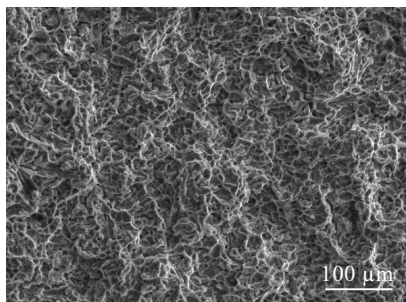


图 8 最优参数下拉伸断口形貌

Fig.8 Tensile fracture morphology with optimal parameters

5 结 论

1) 采用正交试验的极差分析法, 优化了 5A06 铝合金 HPVP-GTAW 焊接电流特征参数, 即变极性电流频率 f_L 的最优参数为 1 kHz, 高频脉冲频率 f_H 为 20 kHz, 脉冲电流比例系数 ψ 为 0.6 ($I_b=75$ A, $I_p=180$ A, $\delta=0.2$)。 f_L 对显微硬度影响最显著, f_H 次之, ψ 对显微硬度影响最弱。

2) 建立了以显微硬度为响应, 以 f_L 、 f_H 和 ψ 为自

变量的回归模型, 回归方程的 F 值检验法和实验结果验证了其有效性。

3) 利用所建立的回归方程分析预测得到的 5A06 铝合金 HPVP-GTAW 焊接电流特征参数的最优匹配, 以及各因素对显微硬度值影响的主次顺序与极差分析结果一致。

参考文献 References

- [1] Kummur A, Sundararajan S. *Material and Design*[J], 2009, 30(3): 1288
- [2] Mabuchi M, Iwasaki H, Higashi K. *Nanostructured Materials*[J], 1997, 8(8): 1105
- [3] Li Wei(李 微), Zhao Junwen(赵君文), Luo Qinglai(罗庆来) et al. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2016, 45(10): 2587
- [4] Cong Baoqiang(从保强), Qi Bojin(齐铂金), Zhou Xingguo(周兴国) et al. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2009, 45(9): 1057
- [5] Qiu Ling(邱 灵), Yang Chunli(杨春利), Lin Sanbao(林三宝) et al. *China Welding*(焊 接)[J], 2007, 40(5): 35
- [6] Qiu Ling(邱 灵), Fan Chenglei(范成磊), Lin Sanbao(林三宝) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2007, 28(11): 81
- [7] Yang M X, Zheng H, Qi B J et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2017, 243: 9
- [8] Yang M X, Zheng H, Li L. *Applied Sciences*[J], 2017, 7(1): 45
- [9] Zhao Jiarui(赵家瑞), Li Yidan(李义丹). *Journal of Tianjin University*(天津大学学报)[J], 1989, 4(3): 25
- [10] Qi B J, Yang M X, Cong B Q. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2013, 66(12): 1545
- [11] Cook G E, Eassa E H. *IEEE Transactions on Industry Applications*[J], 1985, 21(5): 1294
- [12] Yang M X, Zhou Y, Qi B J. *Weld World*[J], 2015, 59(6): 875
- [13] Li Yulong(李 玉龙), Cong Baoqiang(从保强), Yang Mingxuan(杨明轩) et al. *Journal of Beihang University*(北京航空航天大学学报) [J], 2014, 40(5): 72
- [14] Chen Ying(陈 影), Shen Changbin(沈长斌), Ge Jiping(葛继平) et al. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(S2): 109
- [15] Stoeckinger G R. *Welding Journal* [J], 1973, 53(12): 558
- [16] Liao X L, Zhai Q J, Luo J et al. *Acta Materialia*[J], 2007, 55(9): 3103
- [17] Li J, Ma J H, Gao Y L et al. *Material Science and Engineering A*[J], 2008, 490: 452
- [18] Furukawa M, Horita Z, Nemoto M et al. *Acta Materialia*[J],

- 1996, 44(1): 4619
- [19] Ion J C, Easterling K E, Ashby M F. *Acta Metallurgica*[J], 1984, 32(11): 1955
- [20] Sato Y S, Urata M, Kokawa H. *Metallurgical and Materials Transactions*[J], 2002, 33(3): 625
- [21] Ross P J. *Taguchi Techniques for Quality Engineering*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1997: 395
- [22] Zhou Guanghong(周广宏), Ding Hongyan(丁红燕), Zhu Yufu(朱雨富) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(5): 1117
- [23] Arora J S. *Introduction to Optimum Design*[M]. New York: Wiley, 2005: 75
- [24] Wang Y P, Qi B J, Cong B Q *et al. Applied Sciences*[J], 2017, 7(5): 485

Optimization of Ultrahigh Frequency Pulsed VP-GTAW Welding Parameters for Aluminum-Magnesium Alloy

Wang Yipeng, Qi Bojin, Cong Baoqiang, Wang Qiang, Zhou Yang

(MIT Key Laboratory of Aeronautics Intelligent Manufacturing, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Optimization of ultrahigh-frequency pulsed VP-GTAW (HPVP-GTAW) welding parameters for 5A06 aluminum alloy was carried out. Taguchi method was employed to design the experiment. The microhardness of the fusion zone and heat affected zone (HAZ) was taken as an indicator, and the characteristic welding current parameters of HPVP-GTAW were taken as factors. The experimental results were analyzed by both the range analysis method and the regression analysis method. Results show that the optimal parameters of variable polarity current frequency f_L , pulse frequency f_H and pulsed current proportional coefficient ψ are 1 kHz, 20 kHz and 0.6 (high-frequency background current 75 A, high-frequency peak current 180 A, duty cycle of high-frequency pulse 0.2), respectively. Meanwhile, f_L influences microhardness most significantly, followed by f_H , and the impact extent of ψ on the microhardness is the least. The confirmatory experiment shows that the microhardness, tensile strength, elongation and ratio of reduction with the obtained optimal parameters are 84.7%, 94.3%, 80% and 93.4% of those of the base metal, respectively.

Key words: 5A06 aluminum alloy; ultrahigh-frequency pulse; VP-GTAW; microhardness; optimization

Corresponding author: Cong Baoqiang, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, P. R. China, Tel: 0086-10-82339661, E-mail: congbq@buaa.edu.cn