

Inconel-52M 焊丝高频脉冲 TIG 电弧及熔池流动行为研究

旷小聪^{1,2}, 齐铂金¹, 杨建平³, 鲁应焱⁴

(1. 北京航空航天大学, 北京, 100191; 2. 北京遥感设备研究所, 北京, 100854; 3. 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 德阳, 618000; 4. 杭氧集团股份有限公司, 杭州, 310000)

摘要: 基于高速摄像机和图像处理技术, 分析了脉冲频率 (0 ~ 60 kHz) 对焊接电弧和 Inconel-52M 镍合金焊丝熔池流动行为的影响及其作用规律。结果表明, 在常规低频脉冲电流上复合高频脉冲电流会使电弧形态显著收缩, 随着高频脉冲频率的增加, 电弧弧根尺寸逐渐减小。与常规低频脉冲焊相比, 高频脉冲电弧的整体面积减小, 核心区面积及其占比增加, 电弧能量集中度和温度 (能量) 得到提高。在高频脉电流的作用下, 电弧轴向压强和径向电磁力增大, 最大可分别提高 18.0% 和 8.1%。电弧轴向电磁压强增大导致熔池流动性增强, 使焊缝液态金属流动更充分, 从而易形成大焊缝宽度和低润湿角的焊缝形貌。

创新点: (1) 提出采用新型高效的超高频脉冲钨极氩弧焊 (ultra-high frequency pulsed gas tungsten arc welding, UFP-TIG) 技术用于 Inconel-52M 镍合金焊丝的电弧焊接。

(2) 基于图像处理技术和电磁学理论, 构建电弧的能量区域划分和电磁力模型, 揭示超高频脉冲电流频率对 TIG 电弧行为特征 (电弧形态、能量分布、电磁力) 的影响规律及作用机制, 并阐明超高频脉冲电弧行为与镍基合金熔池流动、焊缝成形的相互作用关系。

关键词: 高频脉冲电流; 电弧; 电磁力; 熔池流动

中图分类号: TG 403

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20230309005

0 序言

镍基 690 合金是 International 公司为弥补 600 合金易出现应力腐蚀断裂的问题而设计的, 将 Cr 元素由 14% ~ 17% 上调至 28% ~ 31%, 大大提高了 600 合金的抗晶间腐蚀性能。Inconel-52M 焊丝是镍基 690 合金应用最为成熟的一款焊丝, 广泛应用于核反应堆中的蒸汽发生器管、控制棒驱动机构喷嘴和增压机加热器套管等制造中^[1], 然而, 在实际的工程应用中发现 Inconel-52M 焊丝在堆焊过程容易出现高温失效性裂纹 (ductility dip cracking, DDC)^[2-3], 且焊接过程中形成元素偏析的显微组织也会增加合金应力腐蚀开裂的风险。关于高温失塑

性裂纹的失效机理主要有再结晶温度以下的晶界剪切^[4]、杂质元素的偏析^[5-7]、晶界的滑移^[8-9]、沉淀物诱导应力等理论^[10]。有研究表明, 细化晶粒有助于增加晶界的曲折度, 对减小晶界剪切应力阻碍晶界滑移有明显的效果^[11-12], 从而可以降低合金的高温失塑裂纹敏感性。

近年来, 高频脉冲电流被认为具有独特的优势, 可以单独使用或者叠加在低频脉冲电流上, 起到压缩电弧提高自由电弧的稳定性、方向性、挺度及能量集中度等方面的作用^[13-14], 进而增强电弧力搅拌熔池, 最终达到细化晶粒的效果^[15-16]。基于自主研发的超高频脉冲钨极氩弧焊机^[17]对 Inconel-52M 镍合金焊丝进行单道堆焊试验, 借助高速摄像机 (charge-coupled device, CCD) 对电弧及熔池流动行为进行实时监测, 建立电弧简化模型, 分析超高频脉冲电流频率对电弧形态、能量分布、电磁力的作用规律, 观察焊接实时的熔池流动过程, 再结合

焊缝形状参数演变规律, 研究 Inconel-52M 镍合金焊丝在高频脉冲电流作用下的熔池流动行为. 从电弧热源本质出发, 探索镍基合金堆焊过程中, 复合高频脉冲电流对其电弧特征和焊缝成形的作用机理, 这将为高频脉冲焊接技术在镍基合金中的应用提供理论基础, 对解决镍合金焊接接头高温失效裂纹 (DDC) 等缺陷具有重要意义.

1 试验方法

试验基板为 20 mm 厚的 Q345-b 低碳钢, 焊丝为 $\phi 1.2$ mm 的 Inconel-52M 镍合金, 焊接设备采用课题组自主研发的 UFP-TIG 焊机, 低碳钢基板和 Inconel-52M 镍合金焊丝成分分别见表 1 和表 2.

表 1 Q345-b 低碳钢化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of Q345-b

C	Si	Mn	V	Ti	Cr	Ni	Cu	Fe
0.16	0.30	1.35	0.15	0.20	0.30	0.40	0.30	余量

表 2 Inconel-52M 镍合金焊丝成分 (质量分数, %)

Table 2 Chemical compositions of Inconel-52M nickel alloy

Cr	Fe	Al	Mn	Ti	Nb	Si	Cu	Mo
28~31.5	7~11	1.1	1.0	1.0	0.5~1	0.5	0.3	≤ 0.5
Co	S	C	P	Zr	B	其他	Ni	
≤ 0.12	0.015	0.04	0.02	0.02	0.005	0.5	余量	

焊接前对基板进行机械打磨和酒精清洗, 电极采用 $\phi 3.2$ mm 的钨钨 (W-2Ce, 质量分数, %). 在保证钨极-基板高度和旁路送丝角度一致的情况下, 在常规脉冲电流模式复合不同脉冲频率 (0 ~ 60 kHz) 的高频脉冲电流进行 Inconel-52M 镍合金焊丝的单道堆焊试验, 电流的波形示意图如图 1 所示. 图中 I_b 和 I_p 为低频脉冲基值和峰值, t_b 和 t_p 为其对应的时间, δ_1 和 f_1 为相应的占空比和频率, I_{pp} 是高频脉冲的电流幅值, t_{pp} 和 t_{pb} 为其峰值和基值作用时间, δ_2 和 f_2 是高频脉冲电流的占空比和频率, 保证热输出一致, 具体参数见表 3. 保护气体为 99.9% 的 Ar, 焊接时流量设置为 15 L/min, 焊接速度为 100 mm/min, 送丝速度为 2 m/min.

焊接电弧形态和熔池流动过程的实时采集系统如图 2 所示, 主要包括焊接电源及装置、高速摄像机 (mega speed MS75K)、窄带滤光片 (narrow band filter, NB)、中性减光片 (neutral dimming film, ND)、紫外线滤光镜 (ultra violet, UV)、工控机和三脚架等. 电弧采集过程中, 焊枪和摄像机保持不动, 高速摄像机垂直于焊接运动方向, 并且轴线与电极中轴线对齐, 焊接工件 (母材) 固定在三坐标工作台上, 可进行单向自由运动.

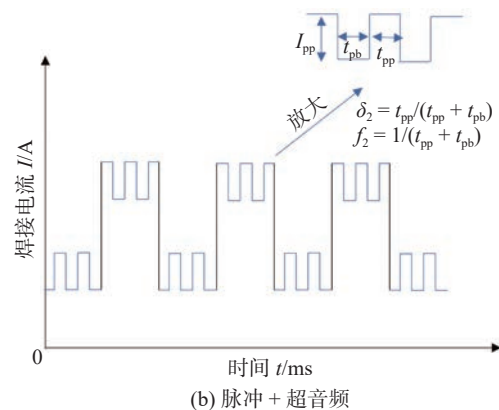
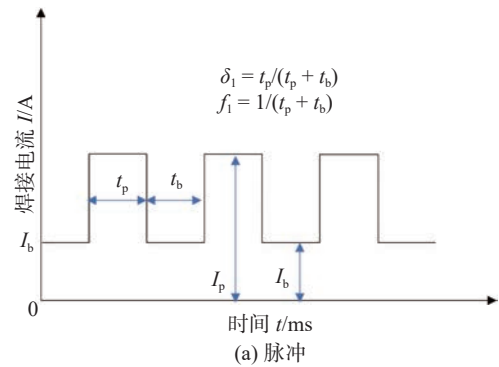


图 1 焊接电流波形示意图

Fig. 1 Diagram of welding current waveform. (a) conventional pulse current; (b) superimposing ultra-high-frequency pulse current on conventional pulse current

表 3 脉冲电流参数
Table 3 Parameters for pulse current

低频脉冲				高频脉冲		
基值电流 I_b/A	峰值电流 I_p/A	频率 f_1/Hz	占比 $\delta_1(\%)$	高频电流频率 f_2/kHz	高频电流幅值 I_{pp}/A	高频电流占比 $\delta_2(\%)$
190	310	20	50	0	0	0
170	290	20	50	10	40	50
170	290	20	50	20	40	50
170	290	20	50	30	40	50
170	290	20	50	40	40	50
170	290	20	50	50	40	50
170	290	20	50	60	40	50

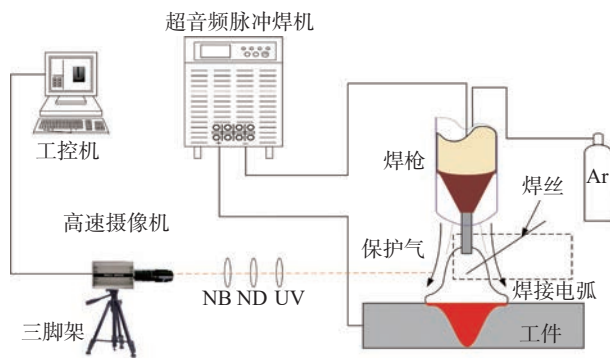


图 2 焊接过程视觉采集系统

Fig. 2 Vision acquisition system for welding process

2 电弧及熔池特性

2.1 电弧能量区域划分

电弧形态和光学特征是电弧等离子体粒子间相互作用力和温度(能量)的宏观体现,因此电弧形态及能量的区域划分对研究其物理行为至关重要^[18]。利用图像处理技术,可以用数字矩阵的方式来描述拍摄的电弧图像,首先将拍摄出的原始图像进行灰度处理,将电弧转化成区间为 $[0, 255]$ 的灰度图,由于拍摄过程无法避免环境噪声的干扰,因此为得到更真实的电弧信息需对电弧进行去噪处理,选用中值滤波(3×3 的矩形窗口)的算法对电弧灰度图进行两次降噪处理。图 3 分别为原始电弧图像经过灰度处理和一、二次中值滤波处理后的图像。

根据能量理论,普遍认为物质能量的 90%~100%可作为这个物质的核心能量区域,但由于拍摄的环境(空气、温度和湿度等)和相机参数的设置(比如光圈、曝光时间和采样时间等)不同,会对

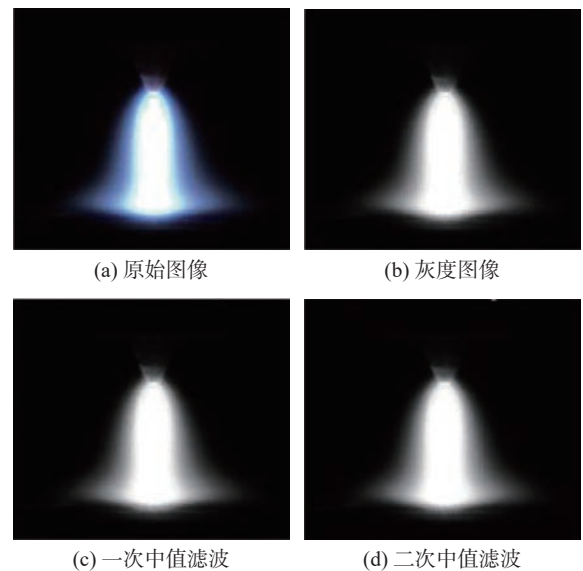


图 3 电弧图像处理

Fig. 3 Arc image processing. (a) original image; (b) gray-scale image; (c) median filtering once; (d) median filtering twice

电弧图像产生重要的影响,因此在电弧分区划分时,需要根据实际情况进行选取。根据灰度直方图分析,试验将 229.5 作为电弧核心区的灰度值,整体区域的边缘值定义为 30,通过多次试验验证,与实际电弧吻合度良好,如图 4 所示。此外,以灰度突变区间 50 对整个电弧进行区域划分,如图 5 所示,从图 5 可知,电弧的温度从内到外呈均匀趋势的降低,且两侧基本对称。

采用 HSI 色彩体系中 I 表示图像的灰度值,代表光源在给定方向单位面积的光通量。基于光学和图像处理理论,可知区域的灰度值与面积之积为该区域的光强度,即等离子体的能量密度,从上面可知,电弧的图像灰度值 I 在 $[0, 255]$ 区间,假定 E_1

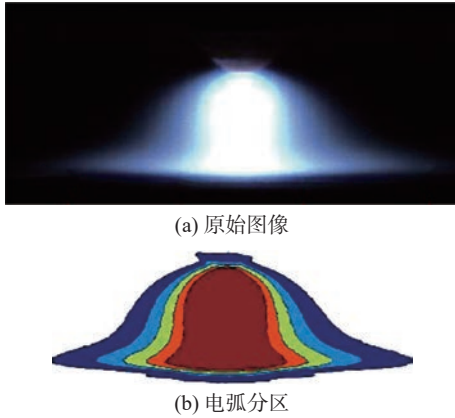


图 4 电弧分区的边缘选取

Fig. 4 Edge selection of arc partition. (a) original arc image; (b) arc regionalization

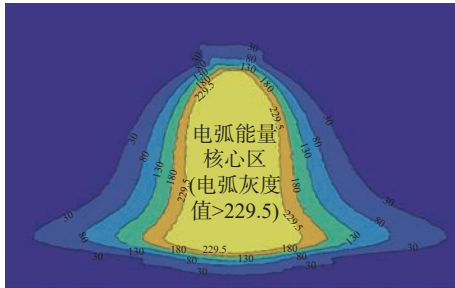


图 5 电弧分区灰度等值线

Fig. 5 Gray level contour map of arc

代表核心区域能量, E 代表电弧的总能量, 则电弧能量分布系数 P 可表达为

$$P = E_1 / E \quad (1)$$

而 E_1 等于电弧核心区域的光强 I_1 与核心区域面积 A_1 的乘积, 同样的, 整体电弧能量 $E = I_1 \cdot A_1 + I_2 \cdot A_2$, 其中 I_2 和 A_2 分别代表核心外圈的光强和面积, 将 $i = (I_1 \cdot A_1) / (I_2 \cdot A_2)$ 代入公式 (1) 中, 可将公式 (1) 简化为 $P = i / (i + 1)$, i 为光强。

2.2 电磁力模型

根据 CCD 拍摄出的电弧形态, 可知电弧尺寸由电极端部向工件逐渐增大, 截面形状近似一个等轴对称的梯形。对电弧的截面进行图像处理, 可以提取出灰度值为 30 的电弧轮廓图, 如图 6 所示。电弧底端是由工件中熔池反馈出来的形貌, 并不属于电弧本身, 因此, 可以进一步将电弧简化成一个梯形 (图 6(b) 中的白色虚线所示)。

图 7 为简化后的电磁力模型示意图。焊接过程中, 电弧内部充满着不同能量密度的等离子, 等离子在焊接电压的作用下进行固定方向的运动, 形成电流及产生电磁场。为简化电磁力计算, 需要假定

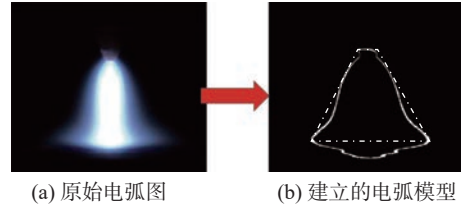


图 6 基于图像识别的电弧轮廓提取算法模型

Fig. 6 Sketch of arc model building. (a) original arc image; (b) establishment of arc mode

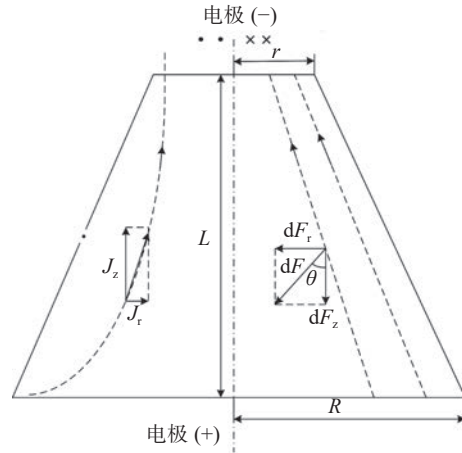


图 7 电磁力模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of electromagnetic force

电弧内部的电磁场是均匀的, 电弧等离子体中的电流元素受到电磁场的作用, 会分别形成沿径向的电磁力 dF_r 和沿轴向的电磁力 dF_z 。图中的 r, R, L 分别代表电极端部半径、电弧根部半径和电弧弧长; J 为截面内电流密度; J_z 为截面内轴向电流密度; J_r 为截面内径向电流密度; θ 是电弧边缘和熔池表面的夹角 (即润湿角)。像所有的载流体一样, 电弧等离子内部也会产生一个半径为 r_i 磁场, 即

$$B = \frac{ui}{2\pi r_i} \quad (2)$$

式中: B 为磁感应强度; u 为磁导率; i 为电弧等离子电流; r_i 为半径。

在磁场 B 中的轴向洛仑磁力为

$$dF_z = B didr = ui / (2\pi r_i) didr \quad (3)$$

对式 (3) 两侧积分, 可得轴向电磁力

$$F_z = \frac{u}{4\pi} \ln(R/r) i^2 \quad (4)$$

图 7 可知, R 为电弧在工件上的投影半径 (电弧弧根半径), 因此可以得出电弧等离子体的轴向电磁压强

$$P_z = F_z / \pi R^2 = (ui^2 / 4\pi^2 R^2) \ln(R/r) \quad (5)$$

同样的, 可以推导出电弧径向电磁力为

$$F_r = F_z \tan \theta = \frac{u}{4\pi} \ln(R/r) i^2 \frac{L}{R-r} \quad (6)$$

式中: 电磁力是与电弧尺寸 r, R 相关的函数, 且与电流的平方成正比, 径向电磁力也是与电流的平方成正比关系, 并且与电弧形态尺寸 r, R, L 相关. 通过图像处理技术, 可以识别灰度值为 30 的电弧外形轮廓, 将已知的钨极直径尺寸 3.2 mm 作为标尺, 可以得出一个像素点的实际尺寸, 从而可以高精度 (精确到像素点) 的计算出电弧的形态尺寸, 如图 8 所示.

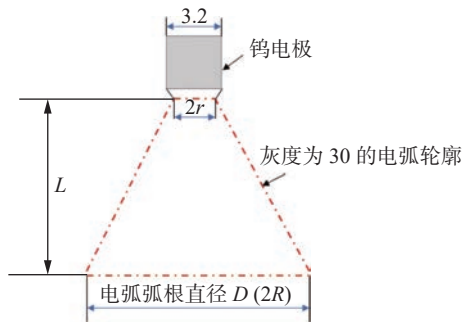


图 8 电弧形态尺寸测量示意图 (mm)

Fig. 8 Schematic diagram of arc shape and size measurement

2.3 焊缝形状参数

Inconel-52M 镍合金焊丝受电弧热源熔化后形成熔池, 在各种力 (重力、电弧力、表面张力等) 的作用下进行流动行为, 最后冷却凝固熔覆在工件上, 因此对焊缝成形形貌及横截面焊缝形状参数进行观察, 可以在一定程度上表征熔池的流动行为.

焊缝的外部形貌可以直接通过肉眼观察, 横截面的形貌需先截取垂直于焊接方向上的金相, 进行磨抛后腐蚀, 得到焊缝的横截面形貌, 焊缝横截面的参数定义如图 9 所示. 其中, H 为焊缝高度, W 为焊缝宽度, θ_1 和 θ_2 分别为焊缝两侧的润湿角, 需要说明的是, 焊缝两侧熔深 (L_1 和 L_3) 大于电弧正下

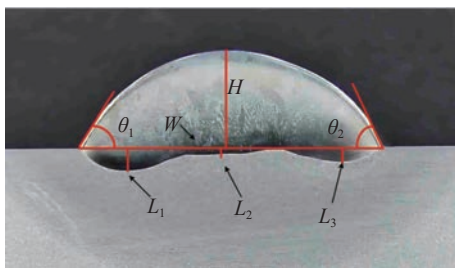


图 9 焊缝横截面形状参数示意图

Fig. 9 Weld cross section shape parameter diagram

方的熔深 L_2 的原因是由于电弧中下方的电弧热量主要用于焊丝的熔化. 假定电弧热源底面是均匀且完全对称的, 此时焊缝两侧的熔深 (L_1 和 L_3) 主要是由轴向电弧力 + 液态高温熔覆金属的流力造成的, 而电弧正下方的熔深 L_2 主要是受电弧的轴向压力所影响. 为方便对比, 定义平均值 $L_0 = (L_1 + L_2 + L_3)/2$ 表征焊缝平均熔深, 同样的, 采用平均润湿角 θ 来表示焊缝的润湿性能.

$$\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (7)$$

3 试验结果

3.1 电弧行为

3.1.1 电弧形态

图 10 为焊接过程中电弧弧长 L 和弧根直径 ($2R$) 随时间的动态变化过程, 从图中可见, 弧长和弧根直径随着脉冲周期进行有规律膨胀和收缩. 高速摄像机每隔 2 ms 拍摄一个图像, 电弧形态由基值阶段突变到峰值阶段大约需要 10 ms, 到达突变峰值后, 电弧形态进入峰值稳定区.

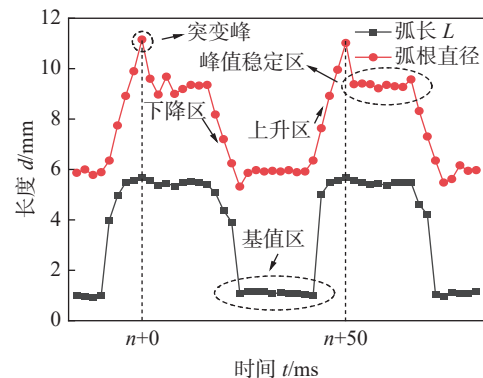


图 10 电弧尺寸动态演变过程 (30 kHz)

Fig. 10 Dynamic evolution of arc size (30 kHz)

脉冲焊接过程, 基值阶段主要起到维弧的作用, 峰值阶段是主要电源热输出和熔化焊丝形成熔池的过程, 因此, 选取峰值阶段的电弧形态进行能量和电磁力分析. 从图 10 中可知, 一个脉冲周期中峰值稳定区有 8 张图片, 采用批量处理的算法对拍摄的全部图片 (采集时长 1 min) 的峰值稳定区的图片信息进行提取并求平均值. 图 11 为不同高频脉冲频率下峰值稳定区的电弧形貌, 从图中可见, 在复合高频脉冲电流后电弧形态出现明显的收缩现象.

图 12 是通过批量处理算法得出的峰值阶段电

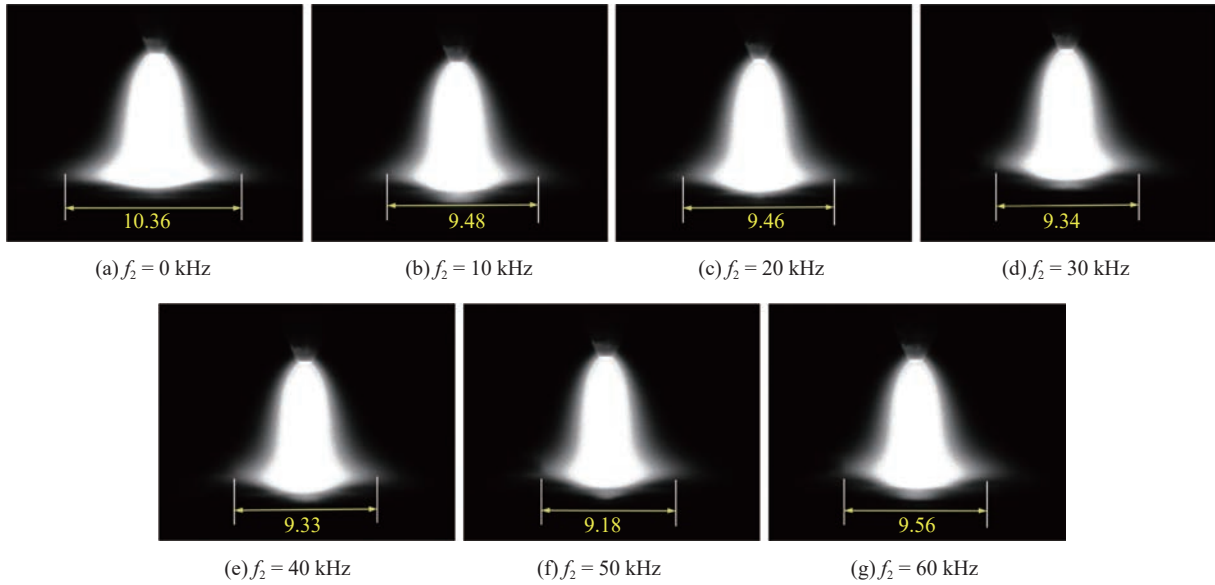


图 11 不同高频脉冲频率下的峰值电弧形态 (mm)

Fig. 11 The arc morphology of peak duration at different high-frequency pulse frequencies. (a) 0 kHz; (b) 10 kHz; (c) 20 kHz; (d) 30 kHz; (e) 40 kHz; (f) 50 kHz; (g) 60 kHz

弧弧根直径的平均值, 可见弧根直径随着高频脉冲频率增加逐渐减小, 并在 50 kHz 时达到最小值 9.18 mm, 整个电弧相比未复合高频脉冲 (0 kHz) 电弧收缩了 1.18 mm. 分析认为, 高频脉冲电流的复合会产生脉冲收缩效应, 随着频率的增加, 脉动效应更加剧烈, 同时收缩也更加明显, 但频率过大, 也会造成电弧中等离子体出现膨胀现象 (图 12 中的 60 kHz).

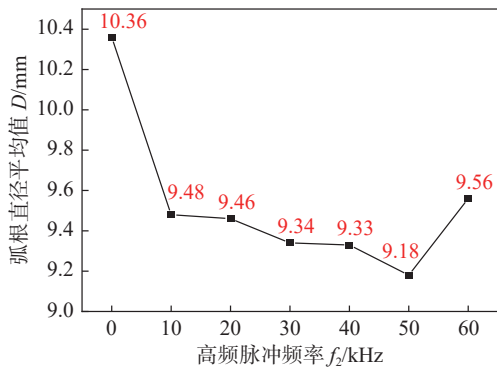


图 12 不同高频脉冲频率峰值的电弧弧根直径

Fig. 12 The diameter of arc root radius of peak duration at different high-frequency pulse frequencies

3.1.2 电弧能量分布

通过图像处理算法, 可以分别计算出不同脉冲频率下峰值电弧核心区和整体区的像素点和, 并以此来代表相对面积, 核心区的占比即为电弧的能量分布系数 P , 通过多组数据取平均值, 计算结果见表 4. 图 13 为峰值阶段电弧能量分布系数随脉冲

频率变化的规律, 结合表 4 和图 13 可知, 复合高频脉冲电流可以在电弧整体形貌收缩的情况下扩大

表 4 不同脉冲频率峰值的电弧能量分布系数

Table 4 Energy transfer efficiency of arc with different pulse frequency peaks

高频频率 f_2 /kHz	核心区	整体区	分布系数 P (%)
0	19633.5	54486.9	36.033
10	19348.6	49819.3	38.827
20	18942.3	49757.2	38.051
30	19270.2	49167.9	39.181
40	19181.4	49250.9	38.919
50	18992.6	49115.9	38.669
60	19078.7	50589.3	37.722

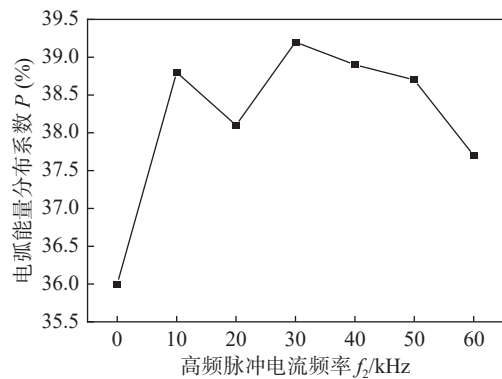


图 13 不同脉冲频率对峰值能量分布系数的影响

Fig. 13 Effect of different pulse frequencies on peak energy distribution coefficients

电弧核心区面积, 从而增加电弧能量分布系数. 核心区的面积增加, 表明电弧中具有更多高动能粒子, 电弧具有更高的能量. 电弧核心区占比由常规低频脉冲时的 36.0%, 最大增加到 39.2%(出现在 30 kHz).

灰度值在一定程度上可代表电弧的温度, 灰度值越高, 代表温度越高. 而温度是能量的体现方式, 因此代表着能量越高, 等离子密度越密集. 采用批量处理算法, 可以获得电弧整体区域的平均灰度值, 见表 5. 电弧的平均灰度值随高频脉冲频率变化规律与上述电弧能量分布系数的变化过程完全一致, 结果得到相互验证. 结果表明, 复合高频脉冲电流可以提高整体电弧内部的温度, 提高电弧的能量.

表 5 不同脉冲频率下电弧峰值整体的平均灰度
Table 5 Average gray level of peak duration of the whole arc at different pulse frequencies

高频频率 f_2 /kHz	整体区平均灰度值
0	159.7
10	161.6
20	160.1
30	162.2
40	161.9
50	159.9
60	159.8

3.1.3 电磁力分析

利用上述建立的电磁力模型和计算出的电弧尺寸, 可以对电弧等离子体的电磁力进行分析. 已知峰值阶段的平均电流 I 为 310 A, 从电弧图像中, 可测量出电极端部半径 r 为 1.1 mm. 经过式 (4)~式 (6) 计算可以得到不同高频脉冲频率下, 峰值阶段电弧等离子体的轴向电磁力 F_z 、轴向电磁压强 P_z 和径向电磁力 F_r , 见表 6.

图 14 为电弧轴向电磁压强和径向电磁力随高频脉冲电流频率变化的趋势图. 可知, 在常规脉冲电流波形上复合高频脉冲电流可以显著增加电弧轴向的电磁压强 P_z 和径向电磁收缩力 F_r , 并且随着脉冲频率的增加均表现出先增加后降低的趋势. 其中, 最大的轴向压强为 208.4 Pa(出现在 50 kHz), 最大径向电磁收缩力为 21.3 mN(出现在 30 kHz),

表 6 不同高频脉冲频率的电弧磁力

Table 6 Arc electromagnetic forces with different high frequency pulse frequencies

高频频率 f_2 /kHz	轴向电磁力 F_z /mN	轴向电磁压强 P_z /Pa	径向电磁力 F_r /mN
0	14.9	176.6	19.7
10	14.1	199.8	20.2
20	14.1	200.3	21.1
30	13.9	203.7	21.3
40	13.9	204.0	21.0
50	13.8	208.4	20.7
60	14.2	197.4	19.7

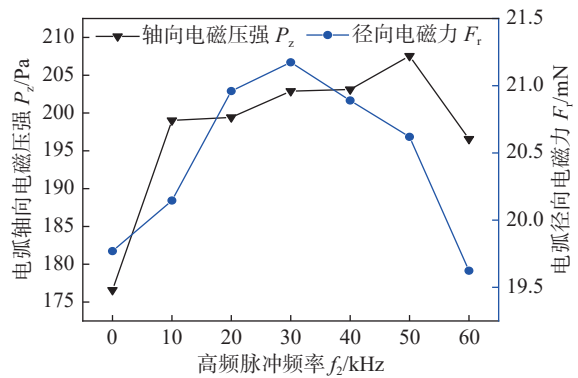


图 14 电磁力与高频脉冲频率的关系

Fig. 14 Relationship between electromagnetic force and high-frequency pulse frequency

分别比常规脉冲模式提高了 18.0% 和 8.1%.

3.2 熔池流动行为

焊接电弧热和力作用于熔池, 影响着熔池高温液态金属的流动过程, 从而影响焊缝的宏观形貌. 因此, 通过焊缝外观宏观形貌和横截面形状参数变化规律, 可以表征超音频脉冲电流作用下的镍基金属焊缝金属的熔池流动行为.

根据表 3 的焊接工艺, 可以获得常规低频脉冲 (0 kHz) 和复合不同频率脉冲电流的焊缝宏观形貌, 如图 15 所示. 从外部宏观形貌上看, 常规低频脉冲表面有轻微起伏 (不光滑)、不连续, 而高频脉冲的焊缝表面圆滑、连续. 这在一定程度上, 可以说明复合高频脉冲的焊接工艺可以使熔池流动更加充分.

根据图 9, 可以测量并计算出各焊缝横截面形状参数值, 结果见图 16. 由图可知, 复合高频脉冲电流后的焊缝熔宽增加, 润湿角减小, 熔深增加. 分析认为, 焊缝的成形主要受熔滴重力、表面张力和

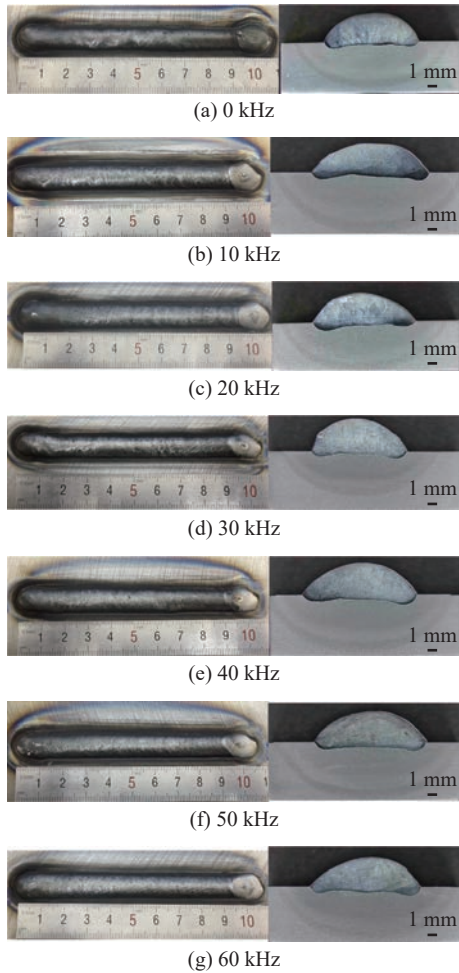
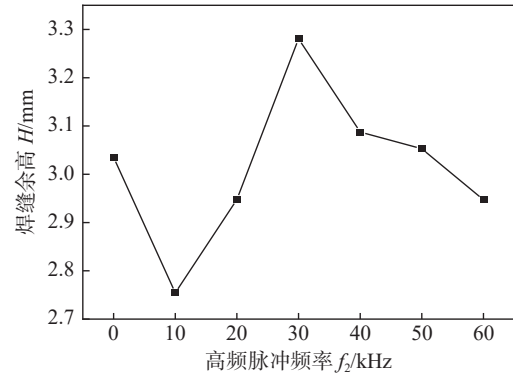


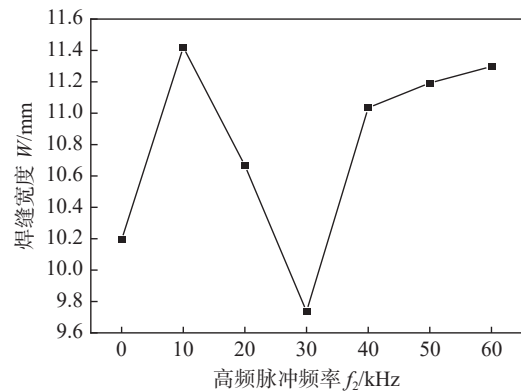
图 15 不同高频脉冲频率的焊缝形貌

Fig. 15 Weld morphology with different high-frequency pulse frequencies. (a) 0 kHz; (b) 10 kHz; (c) 20 kHz; (d) 30 kHz; (e) 40 kHz; (f) 50 kHz; (g) 60 kHz

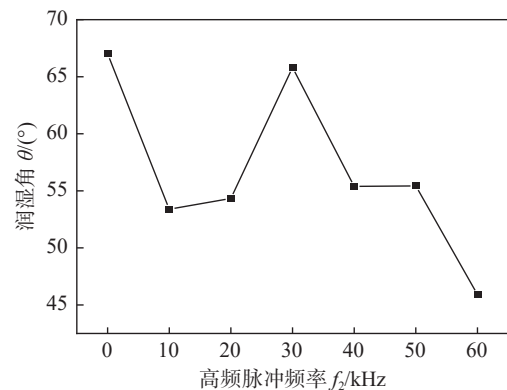
电弧力所影响. 电源热输出不变, 材料不变, 所以熔滴重力和表面张力为定值. 根据上述的能量和电弧磁力分析, 可知高频脉冲会使电弧压强增加, 这会使熔池液面受力下凹, 造成两侧的势能差, 从而增强熔池流动性. 液态金属随着 Marangoni 对流 (热毛细对流) 方向进行流动, 高温液态流动冲击力造成两侧工件底部的熔深增加, 同时, 高频脉冲电弧的核心能量更高和集中, 会使得电弧正下方的熔深也增大, 因此, 高频脉冲焊缝整体熔深增加, 更快的熔池流动, 使焊缝向两侧充分流动, 从而会导致更大的焊缝宽度和更低润湿角. 此外, 需要说明的是, 当高频脉冲频率为 30 kHz 时, 电弧具有相对较大的径向电磁收缩力, 从而降低了电弧轴向电磁压强的作用, 径向电磁力加剧液态金属向熔池中心流动和聚拢, 从而使得焊缝宽度大幅度降低, 焊缝余高增加.



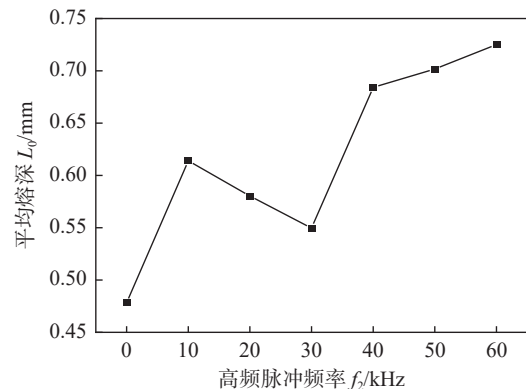
(a) 焊缝余高



(b) 焊缝宽度



(c) 润湿角



(d) 平均熔深

图 16 高频脉冲频率对焊缝形状参数的影响

Fig. 16 Effect of high-frequency pulse frequency on weld shape parameters. (a) weld reinforcement; (b) weld width; (c) wetting angle; (d) weld penetration

4 结论

(1) 高频脉冲电流使电弧形态显著收缩, 弧根直径随着脉冲频率增加逐渐减小。

(2) 与常规低频脉冲电流相比, 高频脉冲电流在整体电弧形态收缩的情况下, 可以增加核心区面积及其占比, 提高电弧能量分布系数和温度(能量)。

(3) 在高频脉冲电流的作用下, 电弧轴向压强和径向电磁力增大, 从而使熔池流动性增强, 易形成大焊缝宽度和低润湿角的焊缝形貌。

参考文献

- [1] 曹睿, 刘刚, 陈剑虹, 等. 镍基材料焊接中高温失塑裂纹 DDC 的生成机理及研究进展 [J]. 焊接, 2018(7): 7 - 11.
Cao Rui, Liu Gang, Chen Jianhong, *et al.* Formation mechanism and research progress of ductility dip cracking in welding of nickel-based materials[J]. *Welding & Joining*, 2018(7): 7 - 11.
- [2] 闫英杰, 张凯嘉, 王若蒙, 等. 稀释率对 ENiCrFe-7 焊材熔敷金属隔离层中凝固裂纹的影响机理 [J]. 焊接学报, 2020, 41(7): 13 - 17.
Yan Yingjie, Zhang Kaijia, Wang Ruomeng, *et al.* Effect mechanism of dilution on solidification crack in ENiCrFe-7 buffering layer of deposited metal[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(7): 13 - 17.
- [3] Rhines F N, Wray P J. Investigation of the intermediate temperature ductility minimum in metals[J]. *ASM Transactions Quarterly*, 1961, 54(2): 117 - 128.
- [4] Nishimoto K, Saida K, Okauchi H, *et al.* Microcracking susceptibility in reheated weld metal-Microcracking in multipass weld metal of alloy 690 Part 1[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, 11(4): 455 - 461.
- [5] Nishimoto K, Saida K, Okauchi H, *et al.* Microcracking in multipass weld metal of alloy 690 Part 2: Microcracking mechanism in reheated weld metal[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, 11(4): 462 - 470.
- [6] Nishimoto K, Saida K, Okauchi H, *et al.* Microcracking in multipass weld metal of alloy 690 part 3: Prevention of microcracking in reheat weld metal by addition of La to filler metal[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, 11(4): 471 - 479.
- [7] Ramirez A J, Lippold J C. High temperature behavior of Ni-base weld metal: Part I. ductility and microstructural characterization[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 380(1-2): 259 - 271.
- [8] Ramirez A J, Lippold J C. High temperature behavior of Ni-base weld metal: Part II - Insight into the mechanism for ductility dip cracking[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 380(1/2): 245 - 258.
- [9] Lim L C, Raj R. Effect of boundary structure on slip-induced cavitation in polycrystalline nickel[J]. *Acta Metallurgica*, 1984, 32(8): 1183 - 1190.
- [10] Young G A, Capobianco T E, Penik M A, *et al.* The mechanism of ductility dip cracking in nickel-chromium alloys[J]. *Welding Journal*, 2008, 87(2): 31S - 43S.
- [11] 崔巍. 镍基合金焊接接头高温失塑裂纹研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
Cui Wei. Investigation in ductility dip cracking of the Ni-based alloy welding joint[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [12] 张晓鸿, 马朋召, 张康, 等. 脉冲 TIG 焊接工艺参数对高温镍基合金焊缝组织的调控研究 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54(2): 93 - 101.
Zhang Xiaohong, Ma Pengzhao, Zhang Kang, *et al.* Study on controlling of welding seam microstructure about nickel-based high-temperature alloy by pulse TIG welding process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(2): 93 - 101.
- [13] Cook G E, Eassa E. The effect of high-frequency pulsing of a welding arc[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1985, IA-21(5): 1294 - 1299.
- [14] 赵家瑞, 李义丹. 高频脉冲 TIG 焊的电弧控制及高频效应 [J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 1989(3): 25 - 32.
Zhao Jiarui, Li Yidan. Control over arc of pulsed high frequency TIG welding and high frequency effect[J]. *Journal of Tianjin University: Natural Science and Engineering Technology Edition*, 1989(3): 25 - 32.
- [15] Yang Z, Qi B, Cong B, *et al.* Microstructure, tensile properties of Ti-6Al-4V by ultra high pulse frequency GTAW with low duty cycle[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 216: 37 - 47.
- [16] Chen C, Fan C, Cai X, *et al.* Microstructure and mechanical properties of Q235 steel welded joint in pulsed and un-pulsed ultrasonic assisted gas tungsten arc welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 275: 116335.
- [17] 齐铂金, 许海鹰, 张伟. 0Cr18Ni9Ti 超音频脉冲 TIG 焊接头组织与性能 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(2): 132 - 133.
Qi Bojin, Xu Haiying, Zhang Wei. Microstructure and property analysis of 0Cr18Ni9Ti joints welded by ultra-sonic pulse tungsten-inert-gas welding technology[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(2): 132 - 133.
- [18] 程世佳, 朱志明, 符平坡. 基于电弧图像的脉冲 TIG 焊电弧形态及特征温度演变规律 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2021, 61(9): 994 - 1001.
Cheng Shijia, Zhu Zhiming, Fu Pingpo. Arc shape variations and characteristic temperatures of pulsed TIG welding arcs based on observed arc images[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2021, 61(9): 994 - 1001.

第一作者: 旷小聪, 博士; 主要从事焊接工艺及 3D 打印结构设计方面的科研工作; Email: xiacongkuang@buaa.edu.cn.

通信作者: 齐铂金, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: qbj@buaa.edu.cn.

(编辑: 刘启明)

MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

Study on the behavior of high-frequency pulsed TIG arc and molten pool flow of Inconel-52M welding wire

KUANG Xiaocong^{1,2}, QI Bojin¹, YANG Jianping³, LU Yingyan⁴ (1. Department of Material Processing and Control Engineering, School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100191, China; 2. Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing, 100854, China; 3. State Key Laboratory of Clean and Efficient Turbomachinery Power Equipment, Dongfang Turbine Co., Ltd., Deyang, 618000, China; 4. Hangzhou Oxygen Plant Group Co., Ltd., Hangzhou, 310000, China). pp 1-9

Abstract: Based on high-speed camera and image processing technology, the influence of pulse frequency (0-60 kHz) on the behavior of welding arc and molten pool flow of Inconel-52M nickel alloy welding wire was analyzed, as well as their underlying mechanisms. The results indicated that the combination of high-frequency pulse current on conventional low-frequency pulse current could significantly shrink the arc shape, and the arc root size would gradually decrease with the increase of high-frequency pulse frequency. Compared to traditional low-frequency pulse welding, the overall area of the high-frequency pulsed arc decreased, while its core area and proportion increased, leading to improved arc energy concentration and temperature. Under the influence of high-frequency pulse current, both the axial pressure and radial electromagnetic force of the welding arc increased, with maximum increases of 18.0% and 8.1%, respectively. The rise in axial pressure promoted the fluidity of the weld pool, enabling more complete liquid metal flow during the welding process and resulting in a weld morphology characterized by large width and low wetting angle.

Highlights: (1) A novel and effective ultra-high frequency pulsed gas tungsten arc welding (UFP-TIG) technology was

proposed for the arc welding of the Inconel-52M nickel alloy welding wire.

(2) Based on image processing technology and electromagnetic theory, the arc energy region division and electromagnetic force model of the UFP-TIG welding arc were constructed, and the influence law and mechanism of UFP current frequency on TIG arc behavior characteristics (arc shape, energy distribution and electromagnetic force) were fully revealed. The interaction between UFP arc behavior, molten pool flow and weld formation of nickel-based alloys was also discussed.

Key words: high-frequency pulse current; welding arc; electromagnetic force; molten pool flow

Reliability prediction and design optimization of BGA solder joint based on multi-fidelity surrogate model

YU Jingdan¹, WANG Ru¹, WU Wenzhi², HU Zixiang², ZHANG Chulei¹, WANG Guoxin¹, YAN Yan¹ (1. Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China; 2. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei, 23008, China). pp 10-16

Abstract: At present, the reliability prediction of solder joints is mostly based on the combination of finite element simulation and single precision surrogate model, which has some problems such as long simulation time, low efficiency and poor accuracy. Therefore, a reliability prediction method for BGA (ball grid array) solder joints based on multi-fidelity model is proposed. Firstly, the convergence of different meshing schemes was verified, and then the high and low precision sample points were designed respectively for finite element analysis (FEA). Secondly, the reliability of solder joints was predicted based on the Co-Kriging model based on multi-fidelity FEA data. Finally, the prediction results were compared with the single precision surrogate model. Under the same cost constraints, the multi-fidelity model demonstrates significantly higher prediction accuracy. and NSGA(nondominated sorting genetic algorithm) was used to optimize the model to obtain the