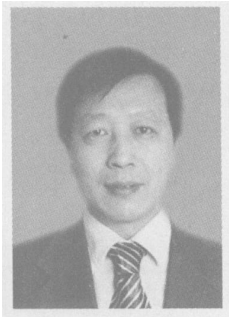


真空扩散焊热循环对 2A14 铝合金
接头界面演变的影响

李 京 龙, 熊 江 涛, 张 赋 升
(西北工业大学 摩擦焊接陕西省重点实验室, 西安 710072)



李 京 龙

摘 要: 分别选取 500, 530, 560 ℃焊接温度, 进行 2A14 铝合金真空扩散焊, 保温时间为 60 min, 焊接压力为 4 MPa, 真空压力低于 3.4×10^{-3} Pa。焊后用扫描电镜(SEM)观察接头的焊合率、界面和母材组织形貌。结果表明, 在 500 ℃固溶线以下温度进行 2A14 铝合金扩散焊时, 主要是界面微区塑性变形破碎氧化膜, 实现局部微量的金属之间连接, 焊合率很低。温度继续升高到 530 ℃, 超过固溶线温度, 但小于 Al—Cu 共晶温度时, 增加了界面 CuAl₂ 相结合机理, 焊合率有明显提高。焊接温度在 Al—Cu 共晶温度以上, 达到 560 ℃时, CuAl₂ 相完全溶解并在晶界生成共晶液相。该液相挤压、破碎界面氧化膜, 并填充界面微孔, 焊接接头界面呈正弦波状界面形貌, 因而焊合率显著提高。根据这一分析结果, 建立了晶界液相生成与界面氧化膜的破碎模型。
关键词: 扩散焊; 2A14; 共晶温度; 焊合率; 铝合金
中图分类号: TG457.14 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)03-041-04

0 序 言

Al—Cu—Mg—Si 系可热处理强化铝合金, 被广泛用于航空、航天复杂构件的制造^[1], 扩散焊是这类复杂结构连接的重要连接方法。铝合金的固相扩散焊一般通过界面微区塑性变形使氧化膜破碎, 露出新鲜金属表面, 但能够实现金属之间的连接面积仍较小, 因而结合强度不高^[2]。在焊接升温过程中施加瞬间大压力, 可以促进界面氧化膜破碎, 从而明显地提高焊合率^[3]。事实上, 相对材料的熔点, 铝合金的扩散焊温度往往选取得较高, 达到了 0.9 T_m 以上 (T_m 为材料的熔点), 如在铝合金 LD10(即 2A14)的固相线附近进行真空扩散焊时, 可以有效地提高焊合率^[4]; 而在固—液两相区对 2017 铝合金进行扩散焊, 可以进一步得到了接近焊后母材强度的接头^[5]。但不同温度下的焊接热循环对铝合金接头组织和界面形貌产生怎样的影响, 其接头形成机理有何差异, 尚缺乏报道。

作者利用真空扩散焊方法, 选取三种特征温度, 即 500 ℃(略低于 Cu 元素在 α -Al 中的固溶线温度

503 ℃, Al—4%Cu 成分时), 530 ℃(低于 Al—Cu 共晶温度 548 ℃)和 560 ℃(高于 Al—Cu 共晶温度), 分别连接 Al—Cu—Mg—Si 系 2A14 铝合金, 分析了不同焊接热循环下, 铝合金真空扩散焊接头界面的形貌演变与接头形成机理, 并建立了晶界液相生成与界面氧化膜的破碎模型。

1 试验方案

扩散焊设备为 FJK—2 型辐射加热真空扩散焊机(自行研制)。试件为 2A14 棒材, 经热轧、淬火和人工时效后得到。试样成分如表 1 所示(GB/T3190—1996)。试样精车成 $\phi 30\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的圆柱体, 具体试样的焊前制备和装卡方法同文献[4]。

表 1 2A14 铝合金的名义成分(质量分数, %)

Table 1 Nominal composition of 2A14 aluminum alloy

Cu	Mg	Si	Mn	Fe	Ti	Ni	Al
3.9~4.8	0.4~0.8	0.6~1.2	0.4~1.0	0.7	0.15	0.1	余量

扩散焊时, 以 3 ℃/min 的速率加热到焊接温度。分别采用 500, 530 和 560 ℃三个不同的焊接保温温度, 保温时间均为 60 min。当温度升到保温温

收稿日期: 2006-05-12
基金项目: 国家自然科学基金委员会—中国工程物理研究院联合基金资助项目(10676027)

度时,施加 4 MPa 焊接压力。保温结束后,以 3 °C/min 的速率冷却至室温后,去掉焊接压力。母材试样和焊后试样经剖切、抛光、Keller 试剂腐蚀后,使用扫描电镜(SEM, JSM - 5410LV)进行观察分析。

2 结果与分析

试样焊前的组织形貌如图 1 所示,图中暗色区域为 α 晶粒,白色块状为沉积强化相 CuAl_2 。由于 Keller 试剂易与 Mg_2Si 反应,次强化相 Mg_2Si 为点状蚀坑,两者均以轴向条纹形式分布,大小为 1~5 μm 。 α 相基体中晶粒尺寸均匀性较差,一般为 4~10 μm 。所有晶粒均被沿轴向拉长,呈典型的轧制状态。

扩散焊后,试件均未产生明显的宏观变形。图 2 分别给出了 500, 530, 560 °C 三种不同保温温度

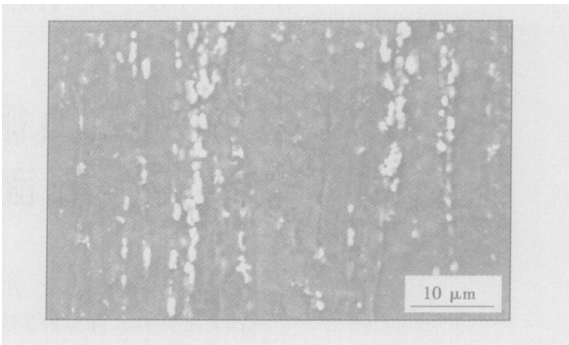


图 1 2A14 母材焊前组织形貌

Fig. 1 Microstructure of base metal 2A14 prior to welding

下,接头界面区域的组织形貌和焊合情况,箭头所指位置为接头界面,其中图 2b, d, e 分别是图 2a, c, e 中心区域的局部放大图。

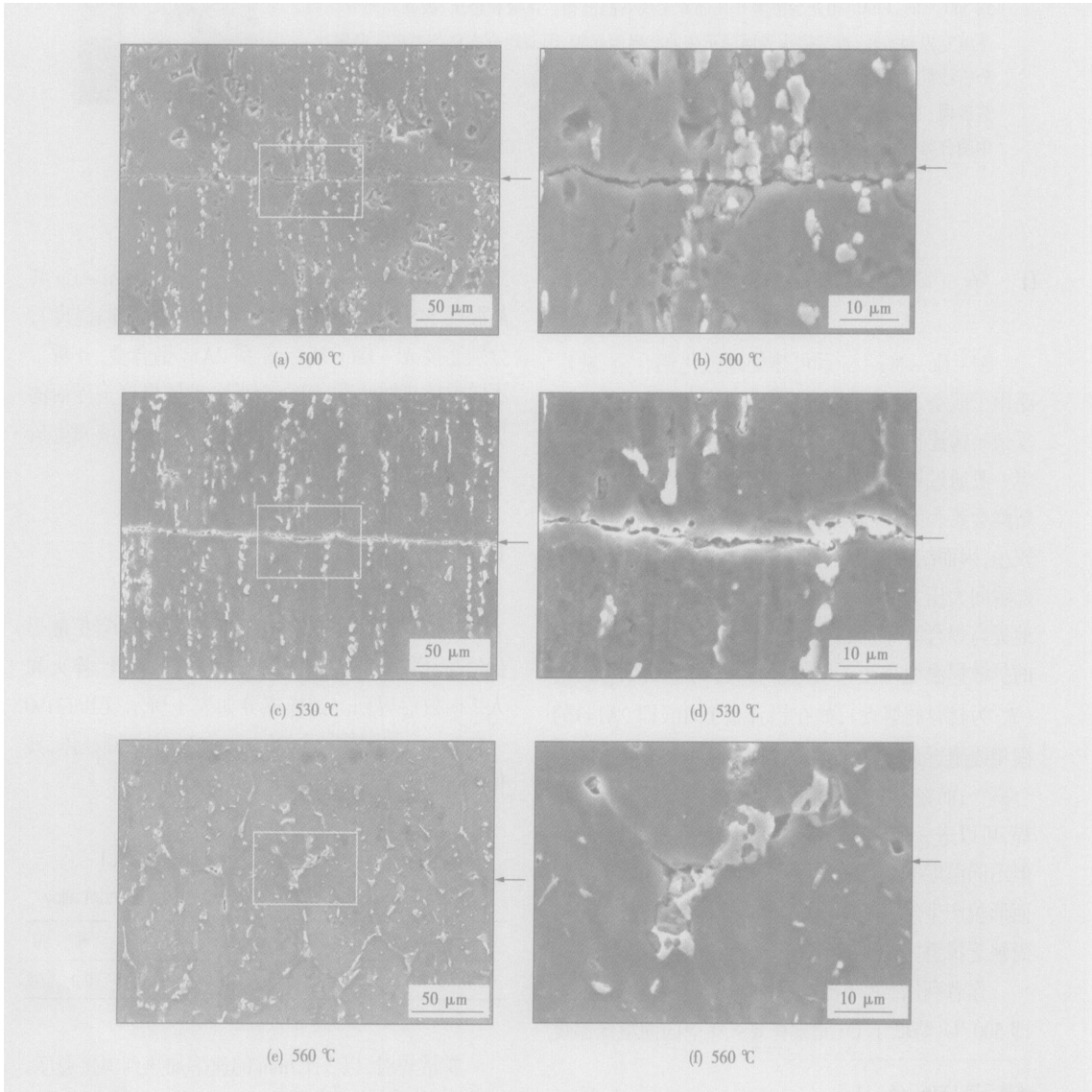


图 2 不同焊接温度下接头界面区域微观形貌

Fig. 2 Microstructures of bonded interfaces in different bonding temperatures

2.1 基体组织形貌

由图 3 可知, 在平衡状态下, Al - Cu 共晶温度为 548 ℃^[9]。所以 500 ℃与 530 ℃的保温温度在共晶温度以下, 而 560 ℃的保温温度则在共晶温度以上。

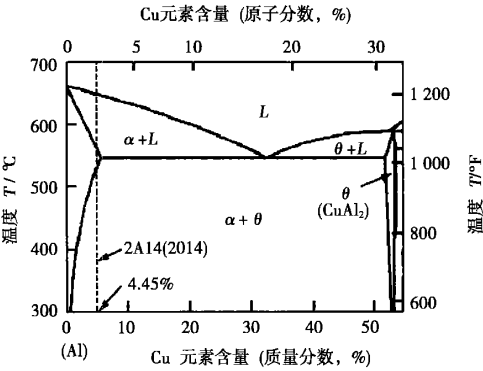


图 3 Al - Cu 二元相图
Fig 3 Al - Cu binary phase diagram (Al-rich)

对比图 2a, b, 图 2c, d 和图 1 可以看出, 500 ℃与 530 ℃时的基体组织及接头界面形貌与焊前区别不大, 尤其是 CuAl₂ 等强化相仍沿轴向排布。但是, 560 ℃时的基体组织和接头界面发生了明显的变化, 趋于圆润化的粗大 α 相等轴晶 (尺寸约为 15 ~ 40 μm) 取代了焊前沿轴向拉长的晶粒形状, 如图 2e, f 所示。强化相 CuAl₂ 白色晶粒也由原来的带状分布, 向晶界或三晶夹角处聚集。组织形貌产生如此明显的变化, 与 560 ℃保温的扩散焊热循环有直接关系, 即出现了晶界液化和再结晶。

2.2 接头焊合率

在图 2a ~ 图 2d 中, 接头界面明显, 且基本平直, 表明保温温度在共晶温度以下的 500, 530 ℃时, 焊后接头界面基本保留了焊前的平直形貌, 焊合率较低, 分别仅为 14% 和 35%。随着保温温度的继续升高, 接头界面的孔隙密度减小, 当保温温度升至 560 ℃, 高于共晶温度 (548 ℃) 时, 如图 2e, f 所示。接头界面也由平直形貌变成正弦波形貌, 并且界面孔隙含量明显降低, 焊合率显著增加, 接近 100%。值得注意的是, 这一正弦波形界面形貌对提高接头的力学性能是有利的, 因为这种波浪式界面结构, 能够分隔界面微孔等缺陷, 使缺陷不能平直分布。此时, 如果有裂纹在界面微孔处形核, 则必须穿过或绕过正弦波界面凸峰才能扩展, 这显然需要更多的能量。

2.3 接头界面形貌的演变

焊接保温温度与 Al - Cu 共晶温度的关系对接头界面产生上述显著的影响, 可以通过图 4 所示的

模型得到解释。图 4 描述了在保温温度为 560 ℃, 高于共晶温度条件下, 扩散焊热循环对接头界面形貌演变的影响。为了描述方便, 图 4 中用空白长方形代表沿轴向拉长的 α 相晶粒, 含波纹的区域代表接头原始界面, 含斜线的椭圆形代表 CuAl₂ (θ 相), 含点区域代表液相, 深色长方形代表富含 Cu 元素的 α 相。

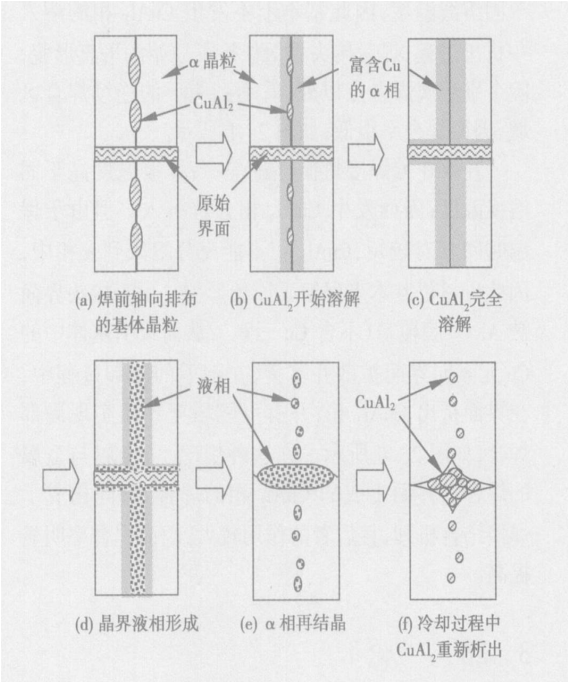


图 4 560 ℃保温时晶界液相生成与界面氧化膜的破碎模型
Fig 4 Model of liquid phase formation at crystal boundary and oxidation film crash at faying surface at 560 ℃ holding temperature

焊前母材是织构组织, 呈典型的轧制状态, CuAl₂ 相主要分布在沿轴向拉长的 α 相晶间, 如图 4a 所示。在 560 ℃保温焊接时, 首先, 由于焊接温度高于固溶线温度, 则晶界的 CuAl₂ (θ 相) 逐步分解并溶入 α 相, 使 α 相晶界上 Cu 元素含量逐渐增加, 如图 4b 所示; 其次, 由于焊接温度高达接近固相线温度, 可以保证短时间内 CuAl₂ 相的充分溶解, 如图 4c 所示; 第三, 由于焊接温度超过了 Al - Cu 共晶温度, 经 CuAl₂ 相溶入后的富含 Cu 元素的 α 晶界会液化生成共晶液相。在随后的保温过程中, 液相区逐步加宽, 直到将晶界近表面富余的 Cu 元素消耗完毕, 如图 4d 所示。另一方面, 原来母材织构态的 α 晶粒, 在 560 ℃高温下发生再结晶而圆润化。再结晶过程中晶粒的变形抗力很小, 此时在焊接压力的作用下, 晶界液相受到 α 晶粒生长和变形的挤压, 而发生流动, 并以一定压力挤入接头界面, 从而破碎界面

氧化膜,同时填充接头界面,如图 4e 所示。这是 560℃保温时,界面能够接近完全焊合的根本原因。

再结晶使得原来的接头界面被晶界所代替(尚有点许界面微孔存在),即形成了正弦波形接头界面;同时,在晶内,尤其是晶界和三晶夹角区域析出较大的 CuAl₂ 相(θ 相),如图 2f 和图 4f 所示。

在 500℃焊接热循环过程中,由于焊接温度低于固溶线温度,因此基本上不发生 CuAl₂ 相的溶入—析出过程,焊后接头界面保持了原始的平直形貌,除个别金属焊合点以外,看不到明显的连续焊合区域,因而焊合率很低,如图 2a, b 所示。

在 530℃焊接热循环过程中,焊接温度高于固溶线温度,因而发生 CuAl₂ 相分解溶入。但由于保温时间相对较短, CuAl₂ 相不能充分溶入到 α 相中,因此母材仍基本上保留了原始形貌。由于接头界面被 Al₂O₃ 膜覆盖(不含 Cu 元素),从而吸引基体中的 Cu 元素向界面扩散并富集,在随后的冷却过程中,在界面析出 CuAl₂ 相,并有可能填充界面实现局部焊合,如图 2c, d 所示。在这种情况下,金属与金属的焊合及界面生成的 CuAl₂ 相的焊合,共同构成了焊接结合机理,且后者的作用较大,因而焊合率明显提高。

3 结 论

(1) 在固溶线以下温度进行 2A 14 铝合金扩散焊时,其结合机理主要是界面微区塑性变形破碎氧化膜,只有局部微量的金属之间连接,焊合率很低,焊后接头界面基本上保留了原始的平直形貌。

(2) 焊接温度升高,但不超过 Al—Cu 共晶温度

时,增加了界面 CuAl₂ 相结合机理,焊合率有明显提高。焊后接头界面仍很大程度上保留了原始的平直形貌。

(3) 焊接温度继续升高至 Al—Cu 共晶温度以上时,发生 CuAl₂ 相的完全溶解并在晶界生成共晶液相。该液相挤压、破碎界面氧化膜,并填充界面微孔。焊接接头界面呈正弦波状界面形貌,因而焊合率显著提高。根据这一分析结果,建立了晶界液相生成与界面氧化膜的破碎模型。

参考文献:

[1] 刘静安, 谢水生. 铝合金材料的应用与技术开发[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.

[2] 邹家生. 材料连接原理与工艺[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.

[3] 熊江涛, 张赋升, 李京龙. 减小表面氧化膜对 LD2 扩散焊接头不利影响的工艺[J]. 焊接, 2004, (6): 22—24.

[4] 熊江涛, 张赋升, 李京龙 等. 铝合金 ID 10 固—液相小变形精密扩散焊研究[J]. 机械科学与技术, 2006 25 (1): 107—111.

[5] Debbouz O, Navai F. Mechanical characterization by dynamical tensile loading of 2017 aluminum alloy joints welded by diffusion bonding. New results and SEM observations of the failure surfaces[J]. Journal of Materials Science, 1997, 32: 475—482.

[6] Sadeler R, Totik Y, Gavgal M, *et al.* Improvements of fatigue behaviour in 2014 Al alloy by solution heat treating and age-hardening [J]. Materials and Design, 2004, 25: 439—445.

作者简介: 李京龙, 男, 1964 年出生, 博士, 副教授, 中国焊接学会理事, 陕西省摩擦焊接重点实验室主任。从事焊接与热喷涂领域科研和教学工作, 发表论文 40 余篇。

Email: lijinglg@nwpu.edu.cn

na). p33—35

Abstract: According to the physical and chemical properties of the common composition of agglomerated flux-MnO, three kinds of agglomerated flux were prepared and the parallel tests on weld microstructures and the mechanical property were discussed also. The result shows that the addition of MnO in the agglomerated flux not only increases the alkalinity of the flux and its reducibility, and purifies the weld, and improves the slag detachability and the formation ability and processing abilities but also can stabilize the austenite, and reduce the $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation temperature by controlling the quantity of Mn in the weld metal when MnO is added in, which will make a good environment for the formation of the acicular ferrite and the promotion of the mechanical property of the weld metal.

Key words: agglomerated flux; MnO; toughness; processing property

Simulation of multiphase transient fluid flow field and temperature field during plasma powder multi-layer deposition process

ZENG Lingfang, WANG Guilan, ZHANG Haiou, KONG Fanrong (Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China). p36—40

Abstract: A 2D transient mathematical model was developed to investigate plasma powder deposition shaping process, presenting the free surface evolution of multilayer and the simulation of fluid flow and heat transfer. The Level-Set approach was adopted to deal with some factors such as deposited track, liquid/vapor interface, which considered surface tension gradient (the major driving forces for the melt flow), interface curvatures, buoyancy and convection heat loss. The SIMPLEC algorithm was used for solving the governing equations. The results obtained by the simulation were in agreement with those measured in experiment, and the effect of the deposition process parameters such as input current, scanning velocity and powder feeding rate on the profile of deposition layer and shaping quality was analyzed.

Key words: plasma deposition; Level-Set approach; SIMPLEC algorithm

Effect of thermal cycles on interface evolution of vacuum diffusion bonded aluminum alloy 2A14

LI Jinglong, XIONG Jiangtao, ZHANG Fusheng (Shanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China). p41—44

Abstract: Wrought aluminum alloy 2A14 samples were diffusion bonded at 500 °C, 530 °C and 560 °C respectively for 60 min under the bonding pressure of 4 MPa and a vacuum pressure lower than 3.4×10^{-3} Pa. The bonding ratio, the morphologies of the interface and the microstructures of the base metal were examined by scanning electron microscope. The results showed that at 500 °C lower than the solid solution line, the interface after welding remained straight as original in which only a little metallurgical bonding points were presented leading to a very low bonding ratio. At 530 °C

above the solid solution line but below the Al-Cu eutectic point, CuAl₂ phase joining additionally contributed to the bonding mechanism hence the bonding ratio increased apparently. When the temperature was further raised to 560 °C above the eutectic point, CuAl₂ phase dissolved and the eutectic liquid formed at the crystal boundaries. The liquid was then extruded into the interface which crashed the oxidation film and filled the interface voids so that the bonding ratio increased remarkably. Therefore, a wavy bonded interface, composed of crystal boundaries substituted the original straight interface. Based on the analyses, a model was proposed for liquid phase formation at the crystal boundaries and oxidation film crash.

Key words: diffusion bonding; 2A14 aluminum alloy; eutectic temperature; bonding ratio

Microstructure and strength of Si₃N₄ joint brazed with Ti40Zr25Ni15Cu20 amorphous brazing alloy

ZOU Jiasheng, ZHAO Hongquan, JIANG Zhiguo (Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China). p45—48

Abstract: Si₃N₄ ceramic is brazed with Ti40Zr25Ni15Cu20 amorphous filler metal, and the effect of brazing parameter on interfacial microstructure and joint strength was discussed. The interfacial microstructure is composed of two parts which are TiN and Ti-Si, Zr-Si compound respectively with the SEM, EDX etc. Under the same experiments conditions, the joint strength brazed with amorphous filler metal increased a lot compared with the crystalline.

Key words: Ti-Zr-Ni-Cu brazing filler metal; amorphous filler metal; Si₃N₄ ceramic; interfacial microstructure; bonding strength

Partial least square approach for multi-parameter assessment of resistance spot welding quality

LI Ruihua¹, MENG Guoxiang¹, GONG Liang¹, ZHANG Ke² (1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Institute of Weld Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China). p49—52

Abstract: A new approach based on partial least square (PLS) was used in the multi-parameter monitoring and analysis of the resistance spot welding (RSW) quality. Based on the idea of extracting principal components, correlation information between the monitored RSW parameters and welding quality were screened and synthesized under the condition that the multi-parameters monitored exist multicollinearity. Moreover, various data message of the RSW quality process parameters were also shown and discussed. In addition, an integrated assessment model was built based on multi-parameter monitored. The experimental results indicate that the presented method can select and extract PLS components of RSW quality process parameters from sample data, and the problems of high dimension and multicollinearity are solved effectively in regression model. The integrated evaluation model has excellent estimation ability.

Key words: resistance spot welding; quality model; multi-