

DD5 合金钎焊前电阻焊定位界面成形及性能分析研究

盛红飞^{1,2}, 邓黎鹏^{1,2,✉}, 易润华^{1,2}, 李海涛², 程东海², 黄斌³

1 南昌航空大学航空制造工程学院, 南昌 330063

2 南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 南昌 330063

3 中国航发南方工业有限公司 417 室, 湖南 株洲 412000

本研究研究了某航空发动机 DD5 镍基单晶高温合金构件真空钎焊电阻焊定位界面成形及性能。以 $\Phi 3.0 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 的 GH3030 箔片为微隙支点, 采用直流电阻焊机进行焊接, 研究等值双脉冲电阻焊工艺参数 (焊接电流 $I_1 = I_2$ 、焊接时长 $t_1 = t_2$ 、焊接压力 P) 对微隙界面成形及力学性能的影响。结果表明, 界面拉伸载荷随焊接时长及焊接压力的增加呈倒“V”形变化。在 $t_1 = t_2 = 0.2 \text{ s}$ 、 $P = 11.54 \text{ kN}$ 条件下, 随焊接电流的增大, 界面微隙定位点连接面逐渐增大、 γ -Ni 相枝晶组织的生长方向趋于一致、拉伸载荷逐渐增大, 且 TaC 的大量析出使得在 TaC 的富集区出现孔洞缺陷。同时, 当 $I_1 = I_2 = 6.7 \text{ kA}$ 时, 微隙界面拉伸载荷达到最大值 8.63 kN , 微隙尺寸为 0.05 mm ; 当 $I_1 = I_2 > 6.7 \text{ kA}$ 时, 支点飞溅严重, 力学性能大幅下降。单脉冲拉伸断面口韧窝较小且有未焊合现象, 等值双脉冲拉伸断面口韧窝较大, 断裂位置在热影响区。

关键词 DD5 镍基单晶高温合金 电阻焊 微隙 钎焊

中图分类号: TG453.9 文献标识码: A

Analysis on the Forming of Positioning Interface in Pre-brazing Resistance Welding for DD5 Alloy and the Joint Performance

SHENG Hongfei^{1,2}, DENG Lipeng^{1,2,✉}, YI Runhua^{1,2}, LI Haitao², CHENG Donghai², HUANG Bin³

1 School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

2 National Defense Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

3 Room 417 of AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412000, Hunan, China

This work was focused on the forming and performance analysis of resistance welding positioning interface prior to vacuum brazing with respect to the DD5 nickel-based single crystal high-temperature alloy components of a certain type of aircraft engine. The GH3030 foil with a thickness of 0.1 mm was used as the microgap support point for welding and on a resistance welding machine. The influence of equivalent double pulse resistance welding process parameters (welding current $I_1 = I_2$, welding time $t_1 = t_2$, welding pressure P) on the formation and mechanical properties of the microgap interface was studied. The interfacial properties showed an inverted V-shaped trend with the increase of welding time and welding pressure. Under the conditions of $t_1 = t_2 = 0.2 \text{ s}$ and $P = 11.54 \text{ kN}$, the rise of welding current resulted in a gradual increase of the area of interface microgap positioning point connection, the homogenization of the growth directions of the γ -Ni phases dendritic structure, and a gradual increase of tensile load. As a large amount of TaC precipitates, pore defects appeared in the enriched area of TaC. When $I_1 = I_2 = 6.7 \text{ kA}$, the tensile load at the microgap interface reached its maximum of 8.63 kN , with a microgap size of 0.05 mm . When $I_1 = I_2 > 6.7 \text{ kA}$, the supporting GH3030 splashed severely and the mechanical properties decreased significantly. The single-pulse tensile fracture had a small dimple with incomplete welding defects observed, while the equivalent double-pulse tensile fracture had a larger dimple and located in the heat-affected zone.

Key words DD5 nickel based single crystal high-temperature alloy, resistance welding, microgap, brazing

0 引言

镍基单晶高温合金在高温环境下拥有较好的力学性能和蠕变性能并且组织也比较稳定,因而广泛应用于生产航空发动机的涡轮和导向叶片^[1-3],但此种材料成分含有大量难熔元素,导致其焊接性较差^[4-5]。目前国内外学者对单晶高温合金的连接开展了积极的研究工作,所涉及的方法包括瞬态液相连接^[6]、扩散焊^[7-8]、钎焊^[9]和电阻焊^[10]等。在电阻焊方面,国外 Bemani 等^[11]对 Nimonic 263 与 Hastelloy X 镍基高温合金异材点焊接头进行了研究,发现电阻焊非平衡凝固过程中 Mo 和 C 的正偏析行为导致枝晶间富 Mo 碳化物的形成,其超快冷特性使得熔核以超细枝晶组织为主。相比之下,钎焊技术对试样的形貌改变较小,能够大规模廉价生产,成为单晶高温合金最常用的连接方法^[12-14],李可馨等^[15]采用三种混合粉末钎料钎焊第三代含铌单晶高温合金并进

行分段加热保温处理,实验结果表明钎焊接头的缺陷随加入的高温合金粉末比例的增加而增多。中国科学院金属研究所孙元等^[16-17]对 DD5 镍基单晶高温合金进行了较为深入的研究,发现当焊缝间隙为 $10 \mu\text{m}$ 时接头的抗拉强度高达 792 MPa ,随焊缝间隙的逐渐增大焊缝中的脆性相增多、高温抗拉强度降低,当焊缝间隙增至 $200 \mu\text{m}$ 以上时,焊缝的抗拉强度降低至 400 MPa 左右,而焊缝间隙取决于钎焊前定位的方法。常用定位方法有焊接工装夹具定位、局部熔焊定位等,其中后者所定位的焊点的熔点高于后期钎焊温度,因而将永久保留在钎焊构件内,其组织结构及强度会在一定程度上影响整个钎焊缝的质量。

本工作以 GH3030 箔片作为微隙支点材料,并采用电阻焊技术将其固定于对 DD5 镍基单晶高温合金钎焊前对接界面处,研究电阻焊后微隙界面宏观形貌、微观组织特征及力学性能,以期对某航空发动机 DD5 镍基单晶高温合金构件的

基金项目:国家自然科学基金(51965045);南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室开放基金(EG201903453)

✉ denglipeng@nchu.edu.cn

24030006-1

DOI: 10.11896/cldb.24030006

真空钎焊工艺研究提供基础。

1 实验

试验材料为某发动机企业提供的第二代镍基单晶高温合金 DD5 棒材, 直径为 16 mm, 其主要合金元素含量见表 1。微隙支点是厚度为 0.1 mm 的 GH3030 箔片, 其主要合金元素含量见表 2。实验采用频率为 50 Hz 的 DZ-3×100 三相次级整流电阻点焊机进行焊接, 额定功率 300 kW, 电极选用 Cr-Zr-Cu 平面电极, 端面直径为 20 mm, 点焊示意图 1, 焊接工艺参数如表 3 所示。焊后在万能力学性能实验机上进行力学性能测试。使用化学腐蚀剂 (成分为 44% CuSO₄ + 33% HCl + 23% H₂O (体积分数)) 腐蚀试样表面, 对接头各区域组织进行 SEM、EDS 分析, 并通过断口 XRD 测试来确定界面处的相组成。

表 1 DD5 合金的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions (wt%) of the DD5 alloy used as base metal in this work

| Ni | Cr | Co | W | Al | Ta | Mo |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 余量 | 6~8 | 7~9 | 4~6 | 6~8 | 6~8 | 24 |

表 2 GH3030 化学成分 (质量分数, %)

Table 2 Chemical compositions (wt%) of GH3030 used as weld metal in this work

| Ni | Cr | Ti | Mn | Si | P | C |
|----|-------|------|------|------|-----|------|
| 余量 | 19.89 | 0.19 | 0.39 | 0.36 | 0.1 | 0.06 |

表 3 点焊实验的焊接脉冲工艺参数

Table 3 Welding pulse parameters of the spot welding experiments

| 脉冲工艺 | 焊接电流 I ₁ /kA | 焊接电流 I ₂ /kA | 焊接时长 t ₁ /cyc | 焊接时长 t ₂ /cyc | 焊接压力 P/kN |
|-------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|
| 单脉冲 | 4.7~6.7 | — | 20 | — | 9.5 |
| | 5.7 | — | 12~28 | — | 9.5 |
| | 5.7 | — | 20 | — | 7.5~15.2 |
| 等值双脉冲 | 4.7~8.5 | 4.7~8.5 | 10 | 10 | 9.5 |
| | 6.5 | 6.5 | 6~14 | 6~14 | 9.5 |
| | 6.5 | 6.5 | 10 | 10 | 7.5~15.2 |

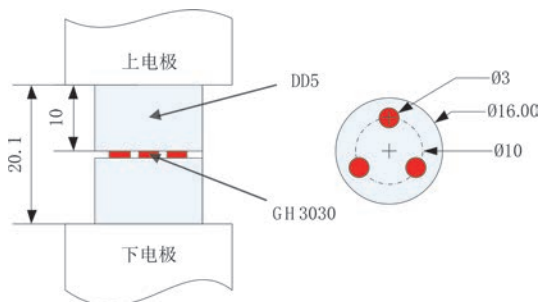


图 1 点焊示意 (单位: mm)

Fig. 1 Schematic geometry (in millimeters) of the spot welding

2 结果与分析

2.1 组织分析

图 2 是单脉冲工艺 $I=5.1\text{ kA}$ 、 $t=20\text{ cyc}$ 、 $P=9.5\text{ kN}$ 条件下获得的 DD5 点焊支点的宏观图像。其中两侧为母材

DD5, 中心为熔核。从图 2 中可以明显发现熔核的上下两侧有明显差异, 熔核比较小, 焊缝整体较为平整, 平均微隙尺寸为 0.08 mm。

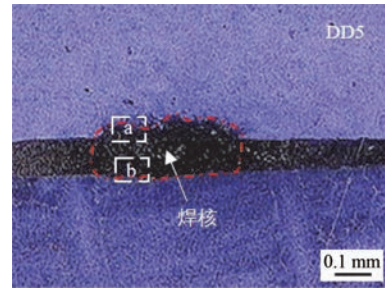


图 2 5.1 kA 的单脉冲电流下点焊所得微隙支点的截面宏观形貌

Fig. 2 Cross-sectional macroscopic morphology of the microgap support obtained by spot welding using a single pulse of 5.1 kA

图 3 为在焊接时长 $t=10\text{ cyc}$ 、焊接压力 $P=9.5\text{ kN}$ 条件下使用不同电流的等值双脉冲获得的 DD5 点焊支点的宏观图像。图 3a 的焊接电流 $I=5.1\text{ kA}$, 图中未见明显的电阻焊核心形貌, 焊缝整体较为平整, 平均微隙尺寸为 0.08 mm。图 3b 的焊接电流 $I=6.7\text{ kA}$, 从图中可以发现焊接表面无缺陷, 平均微隙尺寸为 0.05 mm。

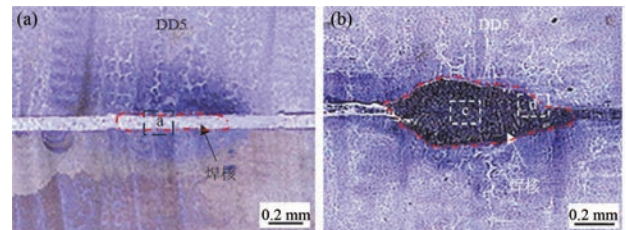


图 3 (a) $I=5.1\text{ kA}$ 和 (b) $I=6.7\text{ kA}$ 的等值双脉冲输入下点焊所得微隙支点的截面宏观形貌

Fig. 3 Cross-sectional macroscopic morphology of the microgap supports obtained by spot welding using equivalent dual pulses of (a) $I=5.1\text{ kA}$ and (b) $I=6.7\text{ kA}$

图 4、图 5 分别是在焊接总时长为 20 cycles、焊接压力为 11.54 kN 的条件下使用不同脉冲工艺获得的点焊支点的微隙尺寸和拉伸载荷。由图 4、图 5 可知, 使用单脉冲电流点焊时, 支点最大拉伸载荷为 4.42 kN, 远小于使用等值双脉冲点焊支点的最大拉伸载荷 (8.63 kN), 主要是因为第一段脉冲电流经过时, 各支点产生大量热量, 在电极的压力下支片被压扁、截面变大并与母材初步焊接, 第一段电流及时停止使得支点处于熔化核心塑性环的安全范围内, 有效地防止了飞溅。对比之下, 等值双脉冲工艺所得接头的性能比单脉冲工艺更佳。两种脉冲工艺获得的支点的拉伸载荷均随焊接电流的增大而先增后降, 以等值双脉冲工艺为例, 当 $I=4.5\text{ kA}$ 时, 电阻热产生的热输入量较小, 熔核的扩张较慢, 生成的熔核小, 支点的有效承载面积不够, 使得拉伸载荷总体偏小; 当 I 不断增加 (4.5~6.7 kA) 时, 支点界面处热输入量增加, 生成的熔核也不断变大, 当母材内部温度达到熔点时, 母材元素与支点元素发生反应, 有效增加了界面连接强度, 且随着熔核的增大, 支点的有效承载面积增加, 接头的承载能力得到较大的提高; 当 $I=7.5\text{ kA}$ (单脉冲 $I=6.7\text{ kA}$) 时, 拉伸性能大幅下降, 这是由于熔核生长速度超过塑性环扩展的

速度,三个支点中某一支点产生飞溅,导致各支点受力不均,造成虚焊。

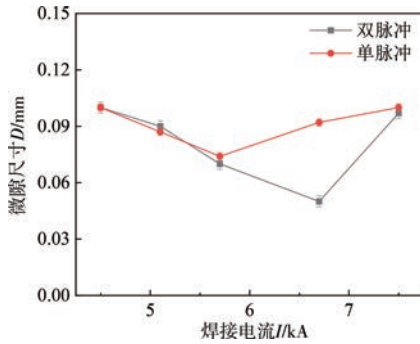


图4 单、双脉冲点焊工艺获得的微隙尺寸
Fig. 4 Microgap size vs. pulse current under single-pulse and dual-pulse spot welding

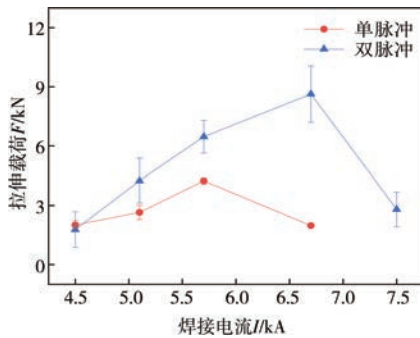


图5 单、双脉冲点焊所得支点的拉伸载荷
Fig. 5 Support tensile strength vs. pulse current under single-pulse and dual-pulse spot welding

图6为不同焊接参数下DD5点焊支点的SEM照片及EDS线扫描结果,表4、表5分别为图6a、b界面层各点的元素分布。根据表4中点2、点3的EDS结果和图7的断口XRD结果可以确认,较大焊接电流下焊核界面处的块状及长条蛇形组织为 γ' 相。由表4中点1的EDS结果可知晶界处

白色组织为TaC,由点4的EDS结果可知黑色颗粒的元素主要为Ti和C,二者原子比为3:1,根据文献[18]可知该黑色颗粒为 α -Ti和TiC共晶。根据图6c可知,在白色区域Ta元素发生聚集,并且Ni和Al元素占比大幅下降,在整个线扫描区域,从母材区到焊缝中心Cr元素占比一直在增大,说明Cr元素在焊接过程中发生了稳定的扩散,其原因是点焊过程中产生的热量使界面处部分母材熔化并与微隙支点元素相互扩散。根据表5中点3、4的EDS结果可知,Al元素在焊核和热影响区的元素占比相差极大,对比图6d可知Al元素的比

表4 图6a标记的界面处各点的EDS分析结果(原子分数,%)
Table 4 EDS analysis (at%) of the points on the interface layer marked in Fig. 6a

| 点标记 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------|-------|--------------|--------------|--------|
| Ni | 25.74 | 74.31 | 73.05 | 2.15 |
| Cr | 6.01 | 10.05 | 10.11 | 10.88 |
| Al | 4.74 | 9.40 | 8.66 | — |
| Ta | 25.13 | 3.00 | 4.73 | — |
| C | 38.38 | 3.24 | 3.45 | 23.51 |
| Ti | — | — | — | 63.46 |
| 可能的相 | TaC | γ -Ni | γ -Ni | Ti+TiC |

表5 图6b标记的界面层处各点的EDS分析结果(原子分数,%)
Table 5 EDS analysis (at%) of the points on the interface layer marked in Fig. 6b

| 点标记 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------|--------|-------|----------------------|--------------|-----------|
| Ni | 5.86 | 27.16 | 74.03 | 76.22 | 69.59 |
| Cr | 12.51 | 4.67 | 8.86 | 23.26 | 7.90 |
| Al | 0.48 | 5.65 | 14.64 | 0.08 | 19.92 |
| Ta | 0.12 | 37.70 | 2.47 | 0.44 | 2.29 |
| C | 22.03 | 24.82 | — | — | — |
| Ti | 59.00 | — | — | — | — |
| 可能的相 | Ti+TiC | TaC | γ + γ' | γ -Ni | γ' |

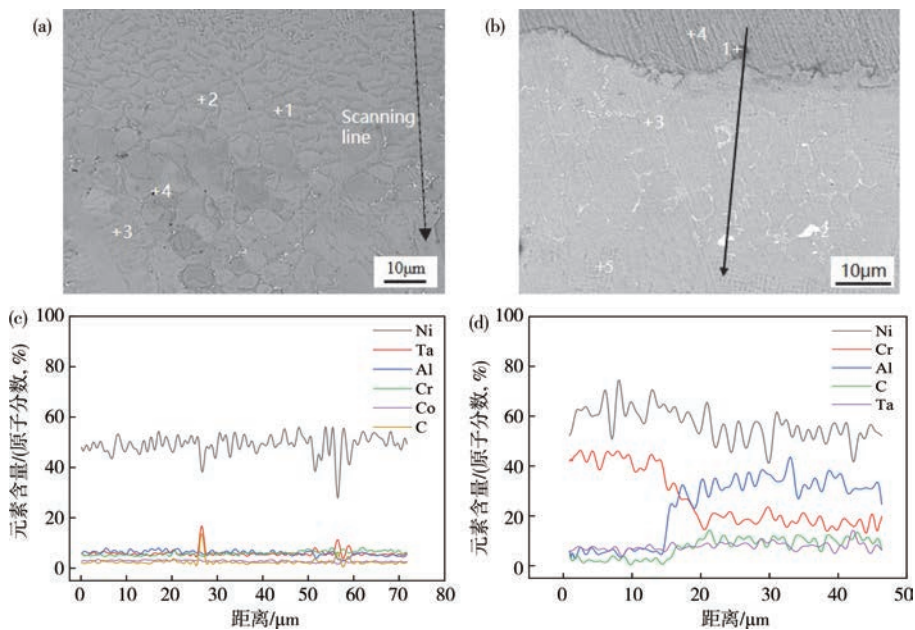


图6 (a,c) $I=5.1$ kA和(b,d) $I=6.7$ kA下点焊微隙支点界面层的SEM图和元素线扫描结果(电子版为彩图)
Fig. 6 SEM images and the corresponding elemental line scans of the interface layers at the support points obtained by spot welding using pulses of (a,c) $I=5.1$ kA and (b,d) $I=6.7$ kA

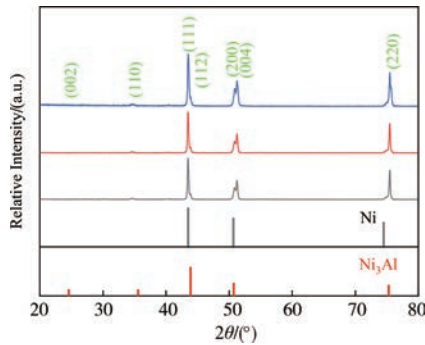


图7 支点的断口 XRD 分析
Fig. 7 XRD analysis of the fractured surface of the welded support

例从热影响区到焊核再到热影响区呈大幅提升的趋势,而 Cr 元素占比显著下降,其他元素占比与原材料相比没有大的变化。总体而言,在较低的焊接电流下,焊核处元素没有发生明显的扩散,主要是由于电流较小,焊核处产热量不足,焊接结束后支点与 DD5 棒材之间形成熔化核心并生长,熔核周边棒材未发生熔化。

在较大电流情况下,焊接脉冲结束后焊核开始冷却结晶,由于焊缝中有未熔化的高温组织 TiC 颗粒,液相中 γ -Ni 相以 TiC 颗粒为核发生聚集、长大。在靠近母材的区域,由于母材导热性能较好且铜电极为循环水冷,温度梯度较大,高温作用时间短,故该区域中液相的 $(\gamma+\gamma')$ 相自发形成了部分晶粒较小的胞状晶并且生长不均匀。而在中心区域,温度梯度小且有较长的高温作用时间,这样,从高温区到边界处形成了一个比较大的温度梯度,产生了一段时间的单向热

流,在此期间 γ -Ni 相枝晶组织沿热流方向长大,因此可以在焊核中心区域发现大量的定向生长的枝晶组织。在焊接过程中, Ta 元素从母材向焊缝扩散,在枝晶组织长大过程中不断从晶界处析出,并与合金中微量的 C 元素结合形成白色的 TaC。在靠近焊缝的热影响区,由于 Ta 含量下降, γ' 相无法再维持立方形,加之 γ' 相高温回溶和低温再析出的特点, γ' 相在焊接过程中回溶,后在冷却过程中与 γ 相一起形成 $(\gamma+\gamma')$ 共晶组织。同时,由于析出的 TaC 有阻碍 γ 相生长的作用,焊接过程中 TaC 富集处易出现空洞缺陷,进而降低接头强度。

在较小电流情况下,焊接脉冲结束时,焊接过程中的产热量在多方散热的影响下仍不足以使母材边界处熔化,因此母材元素与微隙支点元素在整个焊接过程中未得到较好的扩散。焊接脉冲结束后,母材边界与熔核中液相形成了固-液相界面结构,液相中 γ -Ni 相在该界面处聚集长大,在冷却过程中,较大的焊接压力使得焊核中心的 γ -Ni 相再结晶,形成奥氏体组织。

2.2 界面性能分析

图 8 是在焊接总时长为 20 cyc、焊接压力为 11.54 kN 条件下,使用不同脉冲工艺获得的支点的拉伸载荷。从图 8 可以看出,使用单脉冲电流进行点焊得到的支点的最大拉伸载荷为 4.42 kN,远小于使用等值双脉冲工艺获得的定位强度。其主要原因是:第一段脉冲电流经过时,各支点大量产热并在电极的压力下被压扁变大,进而与母材初步焊合;第一段脉冲及时停止,使得支点处熔化核心仍在塑性环范围内,有效地预防了飞溅。

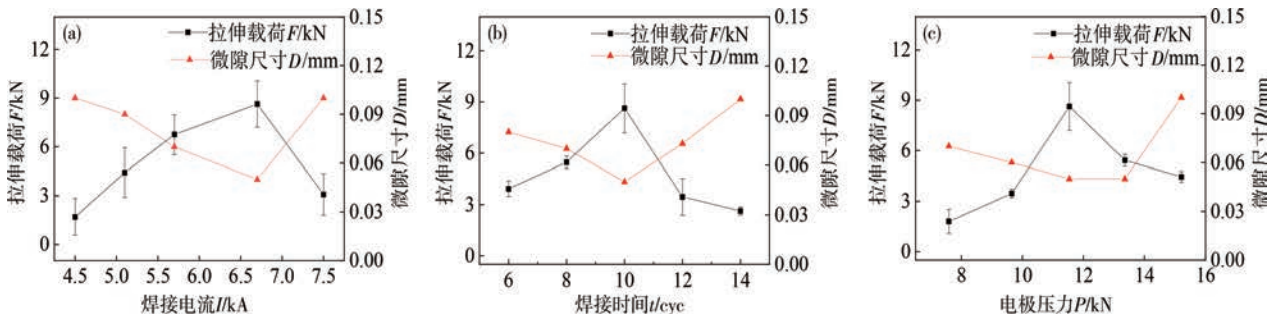


图 8 工艺参数对点焊接头拉伸载荷 F 及微隙尺寸 D 的影响:(a) 焊接电流, (b) 焊接时长, (c) 电极压力
Fig. 8 Effects of process parameters on tensile load (F) and microgap size (D) of the spot-welded joint: (a) pulse current; (b) welding time length; (c) welding pressure applied

图 8a—c 分别为等值双脉冲点焊的工艺参数(焊接电流 I 、焊接时长 t 和焊接压力 P)对 DD5 点焊接头拉伸载荷 F 和微隙尺寸 D 的影响。可知当 $I=6.7$ kA、 $t=10$ cyc 和 $P=11.54$ kN 时,点焊接头拉伸载荷 F 达到最大值 8.63 kN。在 $I=4.5\sim 7.5$ kA、 $t=6\sim 12$ cyc、 $P=7.59\sim 15.21$ kN 范围内,点焊接头的拉伸载荷 F 随 I 和 t 的增大呈倒“V”形变化趋势,焊缝间隙 D 则随 I, t, P 的增大呈“V”形变化趋势。

在一定范围内,随焊缝间隙逐渐减小,点焊接头界面逐渐增大,接头有更高的承载能力。在焊接电流较小或焊接时长较小时,焊接过程的热输入量也比较小,在焊接脉冲结束后,焊缝中心区域受高温作用的时长较小,在压力的作用下很快就开始再结晶,导致焊缝与母材接触处的固-液相界面结构难以维持,并且该区域的相组织生长不连续,有效的界面

层连接区域较小,承载能力较弱,接头的最大拉伸载荷较低。随热输入量的增大,焊缝与母材接触处的固-液相界面结构在一定时间内得以维持,界面处与母材连接的 γ -Ni 相面积增大且趋于连续。当达到一定热输入量时部分母材发生熔化并与微隙支点元素反应,使母材与焊核连接得更好。当焊接电流 $I=6.7$ kA、焊接时长 $t=10$ cyc 时,获得最大拉伸载荷 8.63 kN。继续增大焊接电流,熔核生长速度超过塑性环扩展的速度,三个支点中某一支点发生飞溅,降低了支点承载能力。由图 8c 可知,电极压力对支点的拉伸载荷及直径的影响较焊接电流及通电时间的影响弱。电极压力主要影响等效电阻及支点散热情况,当电极压力较小时,微隙支点与两母材的接触较差,点焊热输入量较大,散热慢,熔核生长过快导致飞溅,进而影响支点承载能力,严重降低了支点的拉伸载荷。

电极压力为 11.54 kN 时获得最大的拉伸载荷,此后进一步增大焊接压力,点焊热输入量也随之降低,当焊接压力过大时,在焊接的瞬间熔核拓展超过塑性环,同样会导致飞溅并降低支点承载能力。

图 9 是不同脉冲电流下 DD5 微隙支点断口的显微组织。由图 9a、b 可知,在单脉冲工艺下支点断口微观形貌为韧窝状,但韧窝表面平直且小而浅,同时在焊核中间区域出现未焊合现象。由图 9c、d 可知,在单脉冲工艺下,支点拉伸断口的韧窝较大,其韧窝底部能明显看到母材中 γ' 相组织,结合前文分析,表明韧窝断裂位置在焊核的热影响区。

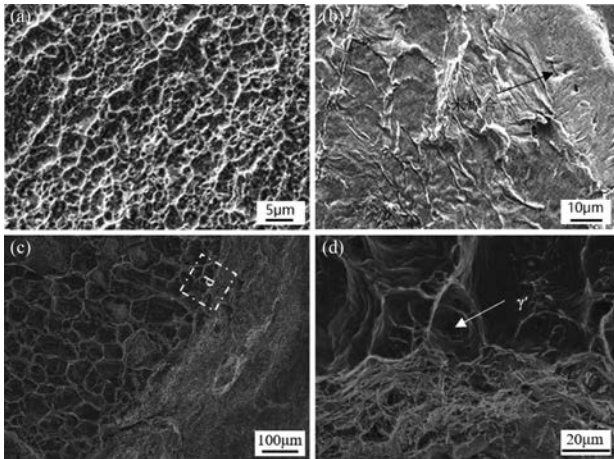


图 9 (a) 单脉冲点焊所得支点的断口及 (b) 其中间区的组织形貌; (c) 等值双脉冲点焊所得支点的断口及 (d) 其 d 区的组织形貌

Fig. 9 Microstructure morphology of (a) the fractured surface and (b) its middle zone of the microgap support obtained by single-pulse spot welding. Microstructure morphology of (c) the fractured surface and (d) its d-zone of the microgap support obtained by equivalent dual-pulse spot welding

3 结论

(1) 相比单脉冲工艺,使用等值双脉冲工艺进行电阻点焊能够得到界面组织及性能更优的支点,为 DD5 合金后续对接钎焊过程提供尺寸更为稳定的微小间隙,继而保证钎料更好地润湿对接面。

(2) 在等值双脉冲工艺下,当焊接电流 $I=6.7$ kA、焊接时长 $t=10$ cyc、电极压力 $P=11.54$ kN 时,DD5 棒材与 GH3030 支点之间的元素扩散明显,微隙界面拉伸载荷达到最大值(8.63 kN),微隙尺寸为 0.05 mm。

(3) 由 DD5 棒材端面到 GH3030 支点中心的界面组织依次为胞状晶和枝晶,且焊核中心区域的 γ -Ni 相枝晶组织的生长方向具有一致性,在富 TaC 处出现孔洞缺陷。



盛红飞,南昌航空大学航空制造工程学院硕士研究生,在邓黎鹏教授的指导下进行研究,主要研究方向为镍基高温合金连接技术。

参考文献

- Cui R, Huang Z. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(8), 2079.
- Ma D X. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(10), 1179 (in Chinese). 马德新. *金属学报*, 2015, 51(10), 1179.
- Fuchs G E. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 300(1-2), 52.
- Chen J W, Salvati E, Uzun F, et al. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 53, 190.
- Ma T J, Yan M, Yang X W, et al. *Materials & Design*, 2015, 85, 613.
- Wu Y, Chen J, Zhang L, et al. *Materials Today Communications*, 2022, 31, 103375.
- Zeng Zhiqiang. Effect of pressure on microstructure and properties of liquid phase diffusion bonding joint of nickel-base single crystal. Master's Thesis, Nanchang Hangkong University, China, 2016 (in Chinese). 曾志强. 压力对镍基单晶液相扩散焊接接头组织及性能的影响. 硕士学位论文, 南昌航空大学, 2016.
- Liu Jiakun. Research on process and mechanism of diffusion bonding DD3 nickel-based superalloy to Ti_3AlC_2 ceramic. Ph. D. Thesis, Harbin Institute of Technology, China, 2019 (in Chinese). 刘甲坤. DD3 镍基高温合金与 Ti_3AlC_2 陶瓷扩散连接工艺及机理研究. 博士学位论文, 哈尔滨工业大学, 2019.
- Zhang Zhipeng. Study on brazing process of a fourth generation nickel-based single crystal superalloy. Master's Thesis, Shenyang University of Technology, China, 2022 (in Chinese). 张志鹏. 一种第四代镍基单晶高温合金的钎焊工艺研究. 硕士学位论文, 沈阳工业大学, 2022.
- Zhou Qingquan, Shuai Gewang, Liu Zeming. *Materials for Mechanical Engineering*, 2017, 41(4), 20 (in Chinese). 周清泉, 帅歌旺, 刘泽民. *机械工程材料*, 2017, 41(4), 20.
- Bemani M, Pouranvari M. *Materials Science & Engineering A*, 2020, 773 (Part C), 138825.
- Li Zhiqiang, Huang Chaohui, Tan Yongning, et al. *Journal of Aeronautical Materials*, 2011, 31(5), 1. 李志强, 黄朝晖, 谭永宁, 等. *航空材料学报*, 2011, 31(5), 1.
- Xiong Huaping, Li Hong, Mao Wei, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(5), 108 (in Chinese). 熊华平, 李红, 毛唯, 等. *焊接学报*, 2011, 32(5), 108.
- Neumeier S, Dinkel M, Pyczak F, et al. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(3), 815.
- Li Kexin, Hou Xingyu, Wang Shiyang, et al. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41(5), 78 (in Chinese). 李可馨, 侯星宇, 王诗洋, 等. *航空材料学报*, 2021, 41(5), 78.
- Sun Yuan, Hou Xingyu, Jin Tao, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(1), 117 (in Chinese). 孙元, 侯星宇, 金涛, 等. *焊接学报*, 2017, 38(1), 117.
- Sun Yuan, Liu Jide, Liu Zhongming, et al. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(12), 1581 (in Chinese). 孙元, 刘纪德, 刘忠明, 等. *金属学报*, 2013, 49(12), 1581.
- Lu Chao, Min Xiaohua, Wang Weiqiang, et al. *Hot Working Technology*, 2023(19), 36 (in Chinese). 鹿超, 闵小华, 王伟强, 等. *热加工工艺*, 2023(19), 36 (责任编辑 房威)



邓黎鹏,通信作者,副教授,硕士研究生导师。目前主要从事钛合金、高温合金、铝合金等有色金属的电阻焊、搅拌摩擦焊等方面的技术与装备研究。