

## 新型电阻塞焊连接方法分析

冯悦峤<sup>1</sup>, 罗震<sup>1,2</sup>, 李洋<sup>1</sup>, 张成大<sup>3</sup>

(1. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072; 2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240;  
3. 大庆油田有限责任公司第二采油厂, 大庆 163459)

**摘 要:** 使用一种新型的“电阻塞焊”连接方法焊接 7075 铝合金搭接接头。“电阻塞焊”的工艺过程是先在两板材搭接部分的中心位置打一个孔, 将圆柱填充物压入, 最后用电阻点焊的方法将填充物与板材焊在一起。该工艺方法旨在保持点焊原有优点的同时, 提高其强度等接头性能。研究分析了该新方法的工艺、形核过程、力学性能以及微观组织, 并对比研究了同参数下电阻点焊试件的接头性能。结果表明, 采用新型电阻塞焊方法的接头在强度等力学性能方面优于同参数下的电阻点焊试件, 同时焊点处的裂纹等缺陷也较少, 接头的综合性能更为优良。

**关键词:** 电阻塞焊; 铝合金; 力学性能; 微观组织

**中图分类号:** TG 441.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)08-0051-04

### 0 序 言

目前电阻点焊作为一种已经发展较为成熟的连接方法在工业领域得到了十分广泛的应用。电阻点焊具有众多的优点, 但也存在着点焊接头的抗拉强度较低等缺点<sup>[1-3]</sup>, 需要使用新的工艺方法进行改善, 所以提出电阻塞焊新连接工艺方法。目前对于该方法的国内外研究还很少。

### 1 新型电阻塞焊连接方法

电阻塞焊方法是首先在待点焊区域预制一个圆通孔, 然后将一圆柱状固体填充物(要求焊接性好于母材)压入预制的通孔内, 最后用电阻点焊的方法在填充物处进行点焊, 以实现两块板材连接的工艺方法, 电阻塞焊的试件形式及尺寸如图 1 所示。

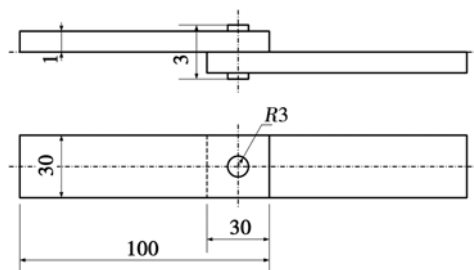


图 1 电阻塞焊试件的尺寸(mm)

Fig. 1 Size of resistance plug welding specimen

电阻塞焊的出发点在于点焊熔核对接头性能具有重大影响。焊接性较差的材料熔核质量不好, 如果在母材的原本形核部位用一种焊接性较好的材料替换原有的母材, 并且加入的材料与原本的母材能够很好地实现连接, 那么焊件的接头性能可能会有很大的提高。电阻塞焊连接方法目前主要适用于焊接性差的材料如铝合金, 加入的填充物较母材的点焊性能好并且与母材的连接性好是实现电阻塞焊连接的两个前提。

### 2 电阻塞焊的形核过程及连接机制

电弧点焊的形核首先在两工件接触面形成初始熔核, 然后熔核向四周长大, 最后冷却结晶。电阻塞焊的形核过程大体分为 3 个阶段。如图 2 所示, 与铝合金点焊不同<sup>[4,5]</sup>。(1) 压平阶段。焊接电流通过填充物使填充物温度升高, 屈服强度下降, 在电极力作用下, 填充物高出工件部分被压平;(2) 环形熔化阶段。圆柱填充物与工件接触处首先熔化, 形成一个环形熔化区;(3) 扩展阶段。该环形熔化区向内生长, 并最终汇合形成椭圆形熔核。

电阻塞焊的连接机制实际上是两种连接机制的结合。一方面类似于传统的电阻点焊, 在加入的圆柱状填充物处形成熔核实现连接; 另一方面, 填充物边缘与母材结合处实现了熔化连接。这种连接机制是“两段连接”。正因为这种特殊的连接机制, 电阻塞焊的接头组织与点焊也有所不同, 电阻塞焊接头的组织构成相对来说更为复杂。

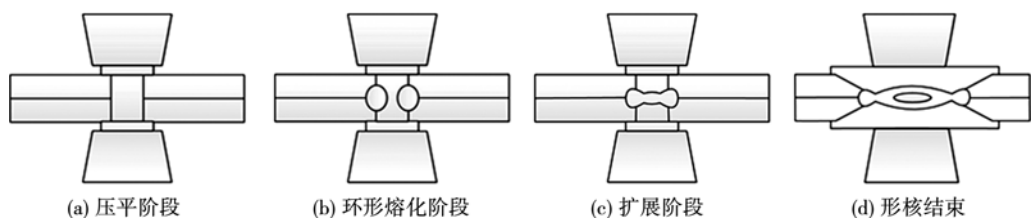


图 2 电阻塞焊形核过程示意图  
Fig. 2 Nucleation process of resistance plug welding

图 3 给出了典型的电阻塞焊的接头宏观形貌.

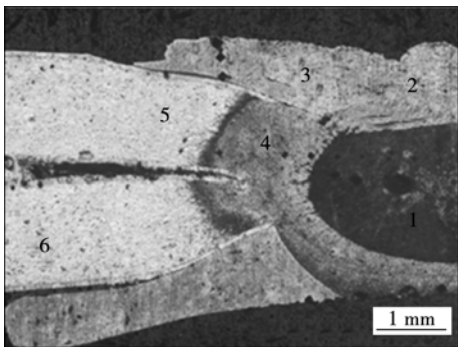


图 3 电阻塞焊接头组织形貌  
Fig. 3 Macrostructure of resistance plug welding joint

图 3 中 1 区为熔核区,2 区为热影响区,3 区为填充材料母材区,4 区为过渡层区,填充材料与母材通过过渡层实现了熔合连接,5 区为拉长区,在该区母材晶粒被拉长,6 区为母材区.

3 电阻塞焊试验

试验以 1 mm 厚的 7075 铝合金为例对电阻塞焊工艺进行了研究. 7075 铝金属 Al-Zn-Mg-Cu 系超硬铝,是典型的航空用铝. 点焊在航空用高强铝合金的制造中有所应用<sup>[6]</sup>. 7075 铝合金点焊性能很差,其焊接的难点表现在易发生热裂纹及接头软化、薄板易发生波浪变形等等<sup>[2,7,8]</sup>. 加入的固体填充物为 5052Al-Mg 合金,焊接性良好,同时与 7075 铝合金母材具有良好的相溶性.

在不同的焊接参数条件下,分别对预制好的试件进行了电阻塞焊和电阻点焊试验. 每组参数均重复 3 次. 电极力保持在 2.4 kN.

焊后对试件进行剪切拉伸测试,拉伸速度设定为 0.5 mm/min. 对于电阻塞焊及点焊试件,进行了显微组织观察. 使用显微硬度计对试样进行显微维氏硬度测试. 试验中所加载荷为 0.98 N,加载时间为 10 s.

4 试验结果及讨论

4.1 力学性能试验结果分析

表 1 给出了不同焊接参数下的拉伸结果. 结果表明,各参数下的电阻塞焊的平均峰值载荷均高于电阻点焊. 使用电阻塞焊试件强度之所以高,主要是在焊接过程中实现了两段连接,说明了两段连接机制的确可以提高焊件的抗拉强度.

表 1 拉伸试验结果  
Table 1 Tensile shear test results

序号	焊接电流 $I/\text{kA}$	焊接时间 $t/\text{ms}$	塞焊平均峰值载荷 $F_1/\text{N}$	点焊平均峰值载荷 $F_2/\text{N}$
1	15	100	1 123.60	1 020.30
2	15	200	1 402.40	1 150.80
3	15	400	1 198.10	150.00
4	16	100	1 067.30	988.10
5	16	200	1 047.50	826.30
6	16	400	889.80	841.90
7	17	100	1 007.90	954.40
8	17	200	1 080.00	1 000.30
9	17	400	1 188.50	1 070.80

在焊接电流为 15 kA,焊接时间为 200 ms,电极力为 2 400 N 时电阻塞焊与点焊试件均具有最高的平均峰值载荷. 这组参数称为最优参数. 随后,又使用该最优参数焊接了 3 组使用 7075 铝棒的电阻塞焊焊件,并对这些试件进行了拉伸试验. 得到平均峰值载荷为 1 265.3 N,小于使用 5052 铝棒进行电阻塞焊的焊件. 说明在焊件形成熔核部位改用焊接性能更好的材料确实有助于改善接头的力学性能.

图 4 为最优焊接参数下的点焊和电阻塞焊试件的拉伸曲线. 从图 4 中可以看出,电阻塞焊试件的峰值载荷要高于电阻点焊. 同时电阻塞焊试件的断后伸长率也明显地高于电阻塞焊试件,一定程度上说明电阻塞焊试件在塑性上也高于电阻点焊试件.

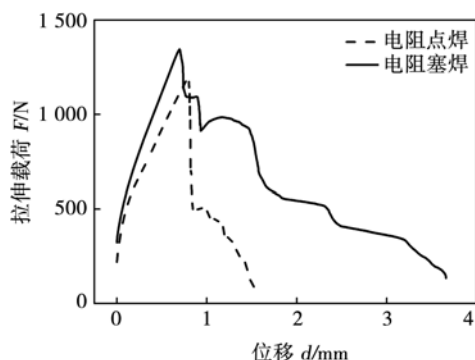


图 4 最优参数下的点焊和塞焊试件拉伸曲线

Fig. 4 Tensile curves of spot and plug welding specimens under optimal parameters

特别地对于电阻塞焊试件,在拉伸过程中拉力达到最大值开始下降之后,还会出现一个短暂的回升现象,这种现象是“回峰现象”。绝大部分的电阻塞焊试件都会出现这种状况。造成这种现象的原因就是前文中所提到的两段连接机制。为了进一步探究在拉伸曲线中产生双峰的原因,在拉伸过程中试件到达一个峰值开始下降时,就立即停止拉伸试验,取下试件,对其进行了显微组织观察,得到的试验结果如图 5 所示。

从图 5 中可以明显看出熔核部位发生了断裂。因此在拉伸过程中,首先是熔核部分主要承受载荷,在其达到最大承载能力断裂之后,改由铝棒边缘和母材的熔化结合部分承受主要载荷,所以电阻塞焊拉伸曲线中会出现所谓的回峰现象。

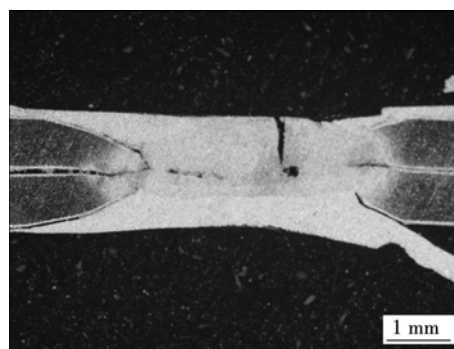


图 5 第一峰拉断后的试样显微组织形貌

Fig. 5 Macroscopic morphology after the first peak load

## 4.2 接头组织分析

图 6 给出了点焊和塞焊接头不同区域的微观组织以及点焊接头的宏观形貌。可以看出,在点焊的熔核区域可以观察到裂纹。而如图 3 所示,在使用电阻塞焊新工艺方法的接头没有观察到十分明显的裂纹。这是因为电阻塞焊是在加入的 5052 铝棒部位形成熔核,5052 铝合金的焊接性较好,产生裂纹的倾向不大。裂纹在拉伸过程中容易开裂,会降低试件的强度,这是电阻塞焊试件强度较高的原因之一。同时点焊接头的组织构成比较简单,1 区为熔核区,2 区为热影响区,3 区为母材区。

对比图 6c 和图 6d,电阻塞焊试件的热影响区组织较点焊热影响区更为细小均匀,一定程度上起到了细晶强化的作用。电阻点焊热影响区由粗晶细晶两部分组成,靠近母材的组成部分晶粒粗大,组织

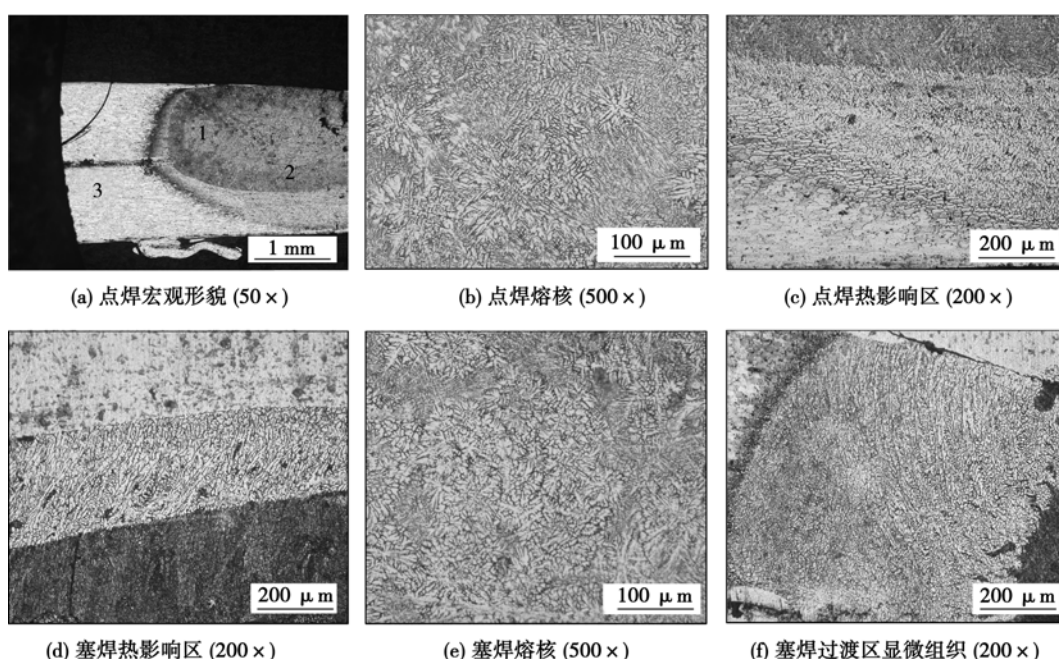


图 6 焊件各区域微观组织及点焊接头宏观形貌

Fig. 6 Microstructure of different areas and macrostructure of resistance spot welding joint

不是很均匀. 图 6b 和图 6e 为熔核组织, 两种焊接方法的熔核组织构成基本相同. 但电阻点焊试件熔核区为 7075 铝合金形成的, 熔核组织相对粗大, 在这个区域容易出现缩孔裂纹等. 电阻塞焊试件的熔核为 5052 铝合金形成, 熔核组织相对细小, 提高了接头的性能.

图 6f 为采用电阻塞焊新工艺方法的焊件过渡区的显微组织形貌, 电阻点焊试件没有该区域. 从图 6f 中可以看出, 过渡区组织又分为两部分, 具有明显的过渡特征, 证明了母材与铝棒在边缘部位实现了连接.

### 4.3 硬度结果分析

图 7 为维氏硬度试验结果. 从结果可以看出, 电阻塞焊试件与电阻点焊试件相比, 各区域的维氏硬度相差不大, 两种焊接工艺的试件均是母材区域维氏硬度最高, 焊点区域维氏硬度较低. 从曲线上来看电阻塞焊焊件的维氏硬度过渡较为平滑, 并没有很明显的突变部位, 从而排除了生成强化相而使接头强度提高的可能.

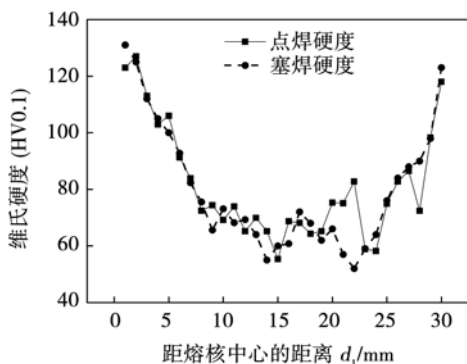


图 7 硬度试验结果

Fig. 7 Results of hardness test

## 5 结 论

(1) 电阻塞焊新工艺方法焊接的板材的连接机制是一种两段连接机制. 既会在加入的铝棒处会形成核, 又会在铝棒边缘与母材分界处实现熔化连接. 承载时熔核部位首先承载, 在其断裂后改为铝棒边缘与母材的结合处承载, 分两段断裂.

(2) 采用电阻塞焊进行焊接的铝合金薄板的峰值载荷高于同参数下焊接的点焊试件, 焊件断后伸长率提高, 说明其塑性也有了一定程度的提高.

(3) 采用电阻塞焊工艺的焊接接头的熔核质量较点焊好, 组织均匀致密, 没有明显的裂纹, 同时热影响区与母材的接触部位有过渡组织的存在.

### 参考文献:

- [1] 陈素玲, 刘翠荣, 吴志生. 铝合金电阻点焊技术的发展现状[J]. 铝加工, 2008(4): 1-3.  
Chen Suling, Liu Cuirong, Wu Zhisheng. The current situation of the development of resistance spot welding technology of aluminum alloy[J]. Aluminum Processing, 2008(4): 1-3.
- [2] 塞海根, 姜 锋, 官迪凯, 等. 航空用高强韧 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金的研究进展[J]. 热加工工艺, 2006, 35(12): 61-66.  
Jian Haigen, Jiang feng, Guan Dikai, et al. Research progress of high strength Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloy for aviation[J]. Hot Working Technology, 2006, 35(12): 61-66.
- [3] 刘晓涛, 崔建忠. Al-Zn-Mg-Cu 系超高强铝合金的研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(3): 47-51.  
Liu Xiaotao, Cui Jianzhong. Research progress of super high strength Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloy[J]. Materials Review, 2005, 19(3): 47-51.
- [4] 冀春涛, 邓黎鹏. 铝合金和低碳钢的电阻点焊数据特征[J]. 焊接学报, 2013, 34(3): 102-104.  
Ji Chuntao, Deng Lipeng. The characteristics of the data of resistance spot welding of aluminum alloy and low carbon steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(3): 102-104.
- [5] 程方杰, 单 平, 廉金瑞, 等. 铝合金电阻点焊的形核特点[J]. 焊接学报, 2003, 24(2): 35-39.  
Cheng Fangjie, Shan Ping, Lian Jinrui, et al. The nucleation process of aluminum alloy resistance spot welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(2): 35-39.
- [6] 王 锋, 宋永伦, 张 军. 航天高强铝合金点焊工艺对焊点质量的细致影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(12): 37-41.  
Wang Feng, Song Yonglun, Zhang Jun. The effects of resistance spot welding process on weld quality of high strength aluminum alloy for aviation[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(12): 37-41.
- [7] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册, 第三卷[M]. 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [8] 吴圣川, 唐 涛, 李 正. 高强铝合金焊接的研究进展[J]. 现代焊接, 2011(2): 5-8.  
Wu Shengchuan, Tang Tao, Li Zheng. Research progress of high strength aluminum alloy[J]. Modern Welding, 2011(2): 5-8.

**作者简介:** 冯悦屹,男,1990 年出生,硕士研究生. 主要从事电阻点焊和深熔 TIG 焊方面的科研工作. Email: tjufyq@tju.edu.cn

**通讯作者:** 罗 震,男,教授. Email: lz@tju.edu.cn