

外加磁场对铝合金电阻点焊质量的影响

李 洋¹, 姚 杞¹, 张 禹¹, 罗 震¹, 郭 客^{2,3}

(1. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072; 2. 辽宁科技大学 化工学院, 鞍山 114051;

3. 鞍钢集团矿业设计研究院, 鞍山 114001)

摘 要: 分析了外加磁场对铝合金电阻点焊接头质量的影响, 包括熔核尺寸、接头力学性能和微观组织。结果表明, 外加磁场增大了熔核直径、提高了点焊接头的剪切力和吸收能。在不同工艺参数下, 熔核直径增长在 5% ~ 25%, 剪切拉伸力可提高 10% ~ 30%。在一些焊接参数下, 外加磁场可以降低焊接电流、减短焊接时间, 从而提高焊接效率、降低能耗。外加磁场可促进点焊熔核内等轴晶的生成和细化晶粒。当焊接电流很小或很大、焊接时间过短或过长时, 都会降低外加磁场的效应。因此当对点焊施加外磁场时, 应在合理的工艺参数下进行, 以最大限度地发挥外加磁场的作用。

关键词: 电阻点焊; 外加磁场; 铝合金; 点焊质量

中图分类号: TG 453.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)12-0069-04

0 序 言

目前在汽车装配工业中, 电阻点焊仍然是一项主要的连接技术。但是由于电阻点焊本身就是一个复杂的冶金过程, 对于汽车制造者来说如何保证焊点质量一直是一个挑战。通常电阻点焊熔核直径是判断焊点质量的重要标准^[1]。传统的提高焊点质量的方法主要依靠优化焊接参数来实现, 如延长焊接时间, 增加焊接电流, 加大电极力等^[2], 但是这些方法会增加电能消耗, 降低焊接效率, 降低电极寿命。

近年来电磁搅拌技术广泛地应用于电弧焊的质量改善。研究表明, 外加磁场可改变电弧中等离子流和电流密度的径向分布, 从而影响母材的加热熔化和焊缝成形; 通过电磁搅拌, 改变焊接熔池液态金属的传热传质过程, 细化组织, 减少偏析, 提高焊缝的力学性能^[3-5]。鉴于电磁搅拌技术在弧焊领域的成功应用, 越来越多的学者将电磁搅拌技术应用到电阻点焊领域。Popov^[6]对无镍奥氏体不锈钢外加径向磁场进行电阻点焊研究发现, 外加磁场可以有效地减少气孔, 提高焊点韧性和疲劳寿命。Watanabe 等人^[7]发现外加径向磁场可以增大 301 不锈钢焊点熔核的直径。张忠典等人^[8]指出外加磁场能够有效改善 30CrMnSi 钢的电阻点焊接头组织。沈琦和 Li 等人^[9,10]发现外加磁场能够显著细化先进高

强钢 DP780 和 DP980 的晶粒, 增大焊点直径, 从而提高焊点的剪切力和韧性。

目前电阻点焊外加磁场均集中于碳钢, 而对铝合金电阻点焊质量的影响鲜有报道。随着对汽车轻量化要求的不断提高, 铝合金作为一种轻质高强合金在汽车工业中的应用越来越广泛。同时铝合金与碳钢相比具有更高的导热和导电性, 铝合金表面的氧化层也使得铝合金点焊形核过程更加复杂。因此文中研究了外加磁场对铝合金电阻点焊质量的影响, 为铝合金电阻点焊的质量强化提供新方法。

1 试验方法

试验用材料为 1 mm 厚的 5052 铝合金, 表 1 为其化学成分。试件尺寸为 100 mm × 25 mm × 1 mm, 搭接长度 25 mm。

表 1 5052 铝合金的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of AA 5052 aluminum alloy

| Al | Mg | Cr | Si | Fe |
|-------|-------------|-------------|-------|-------|
| 95.70 | 2.20 ~ 2.80 | 0.15 ~ 0.35 | ≤0.25 | ≤0.40 |
| Cu | Mn | Zn | 其它 | |
| ≤0.10 | ≤0.10 | ≤0.10 | ≤0.15 | |

试验中的外加磁场由一对环形钕铁硼(NdFeB)永磁铁 N40 产生, 其性能参数见表 2。试验装置如图 1 所示。上、下永磁体 S 极相对, 以两试件的接触

面为中心对称面,沿电极臂中心线呈轴对称安装,两者之间产生相斥磁场. 永磁体通过尼龙夹具固定在电极臂上. W_D 为永磁铁的工作距离,试验中 W_D 取 9 mm.

表 2 N40 型钕铁硼永磁铁性能参数和几何尺寸
Table 2 Dimensions and performance parameters of N40 type NdFeB permanent magnet

| 剩磁 B_r/T | 最大磁能积 $(BH)_{\max}/(kJ\cdot m^{-3})$ | 内禀矫顽力 $H_c/(kA\cdot m^{-1})$ | 工作温度 $T/^\circ C$ | 内径 d/mm | 外径 D/mm | 厚度 H/mm |
|---------------|---|---------------------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|
| 1.25 ~ 1.28 | 302 ~ 326 | ≥ 907 | ≤ 80 | 40 | 100 | 10 |

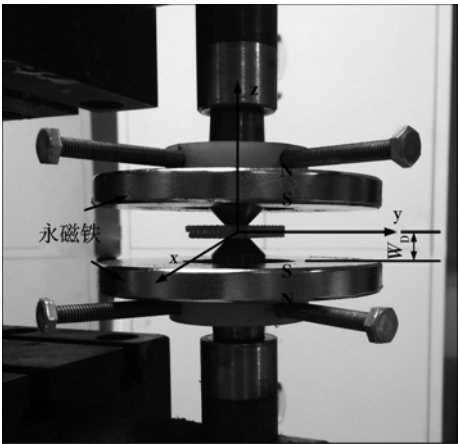


图 1 点焊外加磁场试验装置

Fig. 1 Experimental setup of magnetic assisted RSW process

点焊机为逆变直流点焊机. 电极采用端部直径为 6 mm 的锥形电极头. 试验参数如表 3 所示. 焊后采用 CSS-44100 型万能试验机对点焊接头进行剪切拉伸测试,拉伸速度为 1.0 mm/min. 焊后对熔核进行金相观察,并测量点焊熔核的维氏硬度.

表 3 试验参数
Table 3 Experimental parameters

| 焊接电流 I/kA | 焊接时间 t/ms | 电极力 F/kN |
|-------------|-------------|------------|
| 14 ~ 22 | 200 | 3.6 |
| 16 | 100 ~ 900 | 3.6 |

2 试验结果与讨论

2.1 外加磁场对点焊熔核尺寸的影响

图 2 为无磁场和外加磁场下焊接电流对熔核尺寸的影响. 在 5 个焊接电流水平下,其熔核直径分别增加了 15.2% ,24.0% ,27.6% ,26.7% 和 4.6% . 这是由于外加磁场产生的磁场力迫使熔化的金属做高速离心运动,从而将更多的热量带到熔核边缘,有利于熔核直径的增加^[10]. 当焊接电流较小(14 kA) 时,外加磁场力小,同时由于热输入不足,形成的熔

核尺寸也较小. 因而外磁场的作用也相对较小. 而当焊接电流较大时(22 kA),焊接热输入非常充足,即使无外加磁场,熔核也已充分生长,外磁场难以令熔核进一步生长,因此其作用也相对减弱.

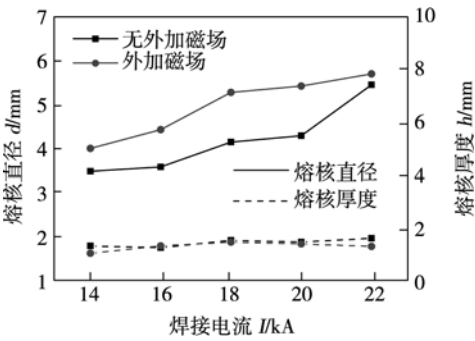


图 2 无磁场和外加磁场下焊接电流对熔核尺寸的影响

Fig. 2 Effect of welding current on nugget size with and without EMF

图 3 为无磁场和有外磁场时熔核尺寸随焊接时间的变化规律. 在 5 个焊接时间水平下,其熔核直径分别增加了 13.5% ,21.6% ,25.6% ,6.8% 和 3.5% . 不难发现其规律与焊接电流的作用相似.

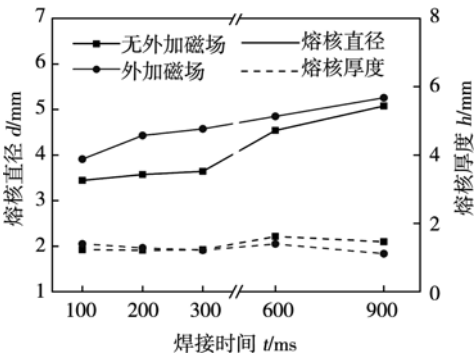


图 3 无磁场和外加磁场下焊接时间对熔核尺寸的影响

Fig. 3 Effect of welding time on nugget size with and without EMF

2.2 外加磁场对点焊接头强度的影响

图 4 给出了焊接电流对接头剪切力与吸收能的

影响. 图 4 中上方两条曲线代表剪切力, 下方两条曲线表示吸收能. 吸收能是指载荷—位移曲线中, 曲线达到峰值载荷时曲线下的面积. 在 5 个焊接电流水平下, 其峰值载荷分别增加了 29.3%、10.2%、10.4%、15.6% 和 8.0%. 注意在 18 和 20 kA 加磁场时, 其峰值载荷已经高于 20 和 22 kA 未加磁场时的峰值载荷. 这表明通过外加磁场, 可以利用较低的焊接电流得到较高的焊点强度, 从而实现节约能耗、降低电极头磨损的目的. 对于吸收能, 在外磁场作用下均有一定的增加, 这表明外加磁场可以在一定程度上提高焊点的抗冲击性.

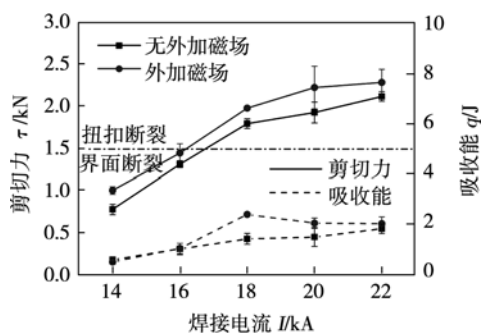


图 4 无外磁场和外加磁场下焊接电流对焊点强度的影响

Fig. 4 Effect of welding current on weld strength with and without EMF

焊接时间对焊点强度的影响如图 5 所示.

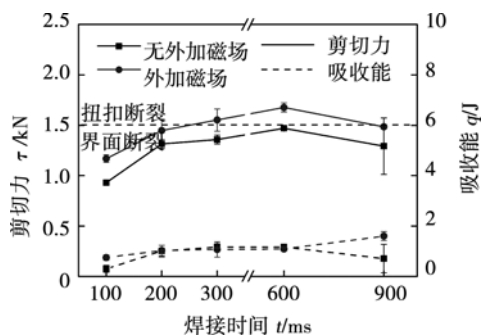


图 5 无外磁场和外加磁场下焊接时间对焊点强度的影响

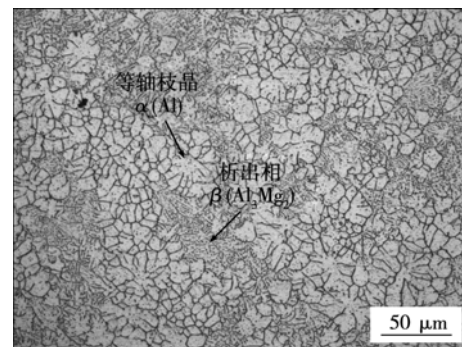
Fig. 5 Effect of welding time on weld strength with and without EMF

在 5 个焊接时间水平下, 其峰值载荷分别增加了 25.6%、10.3%、14.2%、14.2% 和 14.9%. 首先, 外加磁场、短时间 (200 ms) 的焊点强度高于无磁场、长时间 (300 ms). 表明通过外加磁场可以缩短焊接时间, 提高焊接效率. 同时焊接时间的缩短也可以降低电极头的磨损. 其次, 外加磁场对断裂模式具有改善作用. 值得注意的是在 900 ms 时, 焊

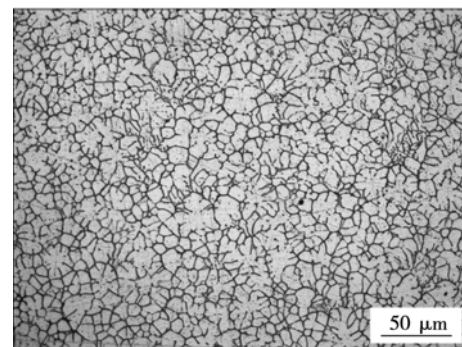
点的峰值载荷有所下降. 这是由于第一, 焊接时间过长, 导致工件表面压痕变深; 第二, 工件过热导致其内部组织晶粒粗化, 从而降低其力学性能.

2.3 外加磁场对点焊接头微观组织的影响

图 6 为传统点焊和外加磁场点焊时熔核中心的等轴晶区组织.



(a) 无外加磁场



(b) 外加磁场

图 6 无外磁场和外加磁场下点焊接头等轴晶组织

Fig. 6 Equiaxed grain in weld nugget with and without EMF

在传统点焊时, 等轴晶区包括白亮色的等轴枝晶 $\alpha(\text{Al})$ 相, 同时白亮色组织之间存在的大量析出相 $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_2)$ 相 (图 6a). 而在外加磁场的点焊熔核中, 等轴晶区中的 β 相数量显著减少, 在图 6b 中等轴晶区几乎全部都是等轴枝晶 α 相, 同时等轴晶发生了细化.

当外加磁场点焊时, 外磁力促使液态熔核做周向旋转, 促进了熔核中心高温液体向熔核周围的流动, 使得液态熔核内部的温度梯度下降, 促进等轴晶的生成. 此外外加磁场引起的电磁搅拌还会使树枝晶发生机械折断. 折断的枝晶碎片在搅拌对流作用下被带入熔体内部作为新的长大核心保存下来, 使得熔核内部形核质点增多, 同时电磁搅拌也使熔核内部的形核质点分布更加均匀, 这些都促使了点焊熔核内等轴晶的生成.

2.4 熔核硬度

文中对两种典型的点焊接头进行了显微硬度测

量,结果如图 7 所示. 图 7 中 BM 表示母材,HAZ 表示热影响区,CG 表示柱状晶区,EG 表示等轴晶区.

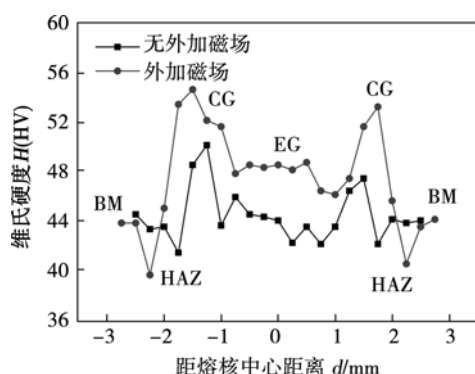


图 7 无外加磁场和外加磁场时点焊熔核硬度分布

Fig. 7 Hardness distribution in weld nugget during RSW with and without EMF

结果表明,有外加磁场时,接头柱状晶区和等轴晶区硬度升高,这是由于外加磁场时晶粒发生细化引起的. 同时外加磁场时,接头 HAZ 区硬度出现下降. 这表明外加磁场使熔核具有更好的塑性^[10,11], 因此其更可能发生纽扣断裂.

3 结 论

(1) 外加磁场引起的磁场力促使液态熔核周向旋转,使得熔核直径增大,在不同的工艺参数下,直径的增长比例在 5% ~ 25% 不等.

(2) 外加磁场提高了点焊力抗拉强度增幅在 10% ~ 30% 不等.

(3) 外加磁场促使了点焊熔核内晶粒的细化. 同时外加磁场可以软化 HAZ 区硬度,这些使得外加磁场后点焊接头更容易发生纽扣断裂失效.

(4) 当焊接电流很小或很大,焊接时间很短或很长时,都会降低外加磁场的效应. 因此当对点焊施加外磁场时,应在合理的工艺参数下进行.

参考文献:

[1] Zhang H, Senkara J. Resistance welding: fundamentals and ap-

plications[M]. New York: CRC press, 2005.

[2] Marya M, Gayden X. Development of requirements for resistance spot welding dual-phase (DP600) steels part 1-The causes of interfacial fracture[J]. Welding Journal, 2005, 84(11): 172s - 182s.

[3] Villafuerte J, Kerr H. Electromagnetic stirring and grain refinement in stainless steel GTA welds[J]. Welding Journal, 1990, 69(1): 1 - 13.

[4] 江淑园, 郑晓芳, 陈焕明, 等. 外加磁场对 CO₂ 焊飞溅的控制机理[J]. 焊接学报, 2004, 25(2): 65 - 67.

Jiang Shuyuan, Zheng Xiaofang, Chen Huanming, *et al.* Outside magnetic field control to spatter of CO₂ arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(3): 65 - 67.

[5] 罗 键, 贾昌申, 王雅生, 等. 外加纵向磁场 GTAW 焊缝成形机理[J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 17 - 20.

Luo Jian, Jia Changshen, Wang Yasheng, *et al.* Mechanism of longitudinal intermittent alternative magnetic field on weld formation in tungsten inert gas arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(3): 17 - 20.

[6] Popov V. Effect of the magnetic field on the formation of the joint in resistance spot welding[J]. Welding International, 1993, 7(11): 905 - 907.

[7] Watanabe Y, Takeda T, Sato H. Effect of magnetic field on weld zone by spot-welding in stainless steel[J]. ISIJ International, 2006, 46(9): 1292 - 1296.

[8] 张忠典, 王亚荣, 李双双. 外加径向恒定磁场改善高强钢点焊质量[C]// 第十一次全国焊接会议论文集(第 1 册). 北京: 机械工业出版社, 2005: 406 - 409.

[9] 沈 琦, 李永兵, 陈关龙, 等. 永磁体磁场对双向高强钢电阻点焊质量的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 21 - 24.

Shen Qi, Li Yongbing, Chen Guanlong, *et al.* Impact of external magnetic field generated by permanent magnet on quality of dual phase high strength steel by resistance spot welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(4): 21 - 24.

[10] Li Y B, Li Y T, Shen Q, *et al.* Magnetically assisted resistance spot welding of dual-phase steel[J]. Welding Journal, 2013, 92(4): 124s - 132s.

[11] Qi Shen, Yongbing Li, Zhongqin Lin, *et al.* Impact of external magnetic field on weld quality of resistance spot welding[J]. ASME Transaction Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2011, 133: 051001 - 051001 - 7.

作者简介: 李 洋,男,1986 年出生,博士. 主要从事电阻点焊质量强化和质量检测研究. 发表论文 10 篇. Email: liytju@163.com

通讯作者: 罗 震,男,教授,博士研究生导师. Email: lz@tju.edu.cn