

铝合金与低碳钢的复合电极电阻点焊接头特性

邱然锋^{1,2}, 李久勇¹, 崔立虎¹, 石红信^{1,2}

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 洛阳 471023; 2. 有色金属共性技术河南省协同创新中心, 洛阳 471003)

摘 要: 针对铝/钢难以焊接这一课题, 研发了基于复合电极的电阻点焊新工艺, 并对铝合金 A6061 与低碳钢 Q235 进行了点焊. 介绍了复合电极的设计、制造流程, 观察分析了结合界面区反应层形貌及分布等微观组织特点, 探讨了焊接电流对熔核尺寸和接头抗剪载荷的影响. 在结合界面上观察到了反应层的生成, 其厚度随位置的变化而变化. 焊接接头熔核直径与抗剪载荷随焊接电流的增加而增大. 结果表明, 在铝合金与低碳钢的电阻点焊中, 镶嵌式复合电极的使用能够起到抑制界面反应层在焊点中央区域生长的效果.

关键词: 铝合金; 低碳钢; 复合电极; 电阻点焊

中图分类号: TG 441.2 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb20151008002

0 序 言

随着环保和能源问题的日益突出, 汽车车身轻量化已成为汽车工业发展的必然选择, 而以铝合金等轻质材料取代传统的钢铁材料用于汽车车身结构则是汽车轻量化的最主要的途径. 在这种“钢 + 铝”复合结构里, 主要承重件如柱、梁、筋类部件仍使用钢铁材料以确保其安全性, 其余覆盖件则采用铝合金等轻质材料以实现车身整体的轻量化. 因此, 铝/钢异种金属的连接将不可避免. 然而, 由于铝合金与钢在密度、熔点、比热、热导率、线膨胀系数和弹性模量等物理性能方面相差悬殊, 致使其焊接性较差. 铝铁间的固溶度较低 (铁在固态铝中的溶解度几乎为零), 两种材料焊接时在界面容易发生冶金反应而生成硬脆的 Al-Fe 系金属间化合物, 采用传统的熔化焊难以实现有效连接.

近年来铝钢异种金属的扩散焊^[1], 摩擦焊^[2], 搅拌摩擦焊^[3]等国相连接技术被广泛研究. 结果表明, 虽然采用这些固相焊接可有效地控制金属间化合物的成长, 但由于受接头形式、工件尺度等方面的限制这些固相焊接技术迄今尚未应用到汽车车身制造中. 电阻点焊是汽车车身焊装的主要焊接方法, 有关铝/钢电阻点焊的研究在国内外也得到了关注^[4-5]. 对铝/钢异种金属直接点焊的研究发现, 生成的反应层厚度在界面分布呈中央厚、外缘薄的

“山”状分布, 生成于焊点中央区域的反应层较厚是接头强度低下的原因^[6].

基于此, 试验提出采用镶嵌式复合电极对铝合金和低碳钢进行电阻点焊以凹化 (使焊点中心部位温度低) 点焊温度场, 从而达到抑制反应物在焊接区中央部位的生长、改善铝/钢异种金属电阻点焊接头性能的思路. 试验主要目的就是通过观察界面反应层的形貌与厚度分布, 分析接头的性能, 以探讨采用复合电极点焊铝合金与钢的有效性.

1 复合电极电阻点焊

电阻点焊是利用电流流经工件时产生的电阻热使母材金属局部熔化, 并在压力的作用下形成焊点. 采用电阻点焊焊接铝合金与钢异种材料时, 其温度场特性导致了界面反应层呈“山”状分布^[7]. 试验为了抑制反应物在焊接区中央部位的生长, 通过电极结构控制电流路径, 改变点焊温度场, 使之凹化, 采用复合电极焊接铝合金与钢.

所采用的复合电极如图 1 所示. 其制作过程如下, 将钨棒竖直放入专门设计的凹模的凹腔中央, 再将熔融的铜合金液体倒入凹腔中, 然后利用压力机迅速将配套的凸模压入凹模凹腔中, 并维持一定时间. 脱模后, 对所得电极毛坯进行机械加工, 至所需的形状与尺寸. 采用设计的复合电极点焊铝合金与钢时, 由于电极中心部为高电阻的钨, 外缘部为铜合金, 根据焦耳定律和电流的“就低原则”, 焊接电流主要从电极外缘部流经. 这样在焊接区可形成环形加热, 使点焊温度场凹化, 进而实现抑制反应物在焊接区中央部位的生长.

收稿日期: 2015-10-08
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1204520); 河南省国际合作项目 (162102410023); 河南省高校科技创新人才计划资助项目 (16HASTIT050)

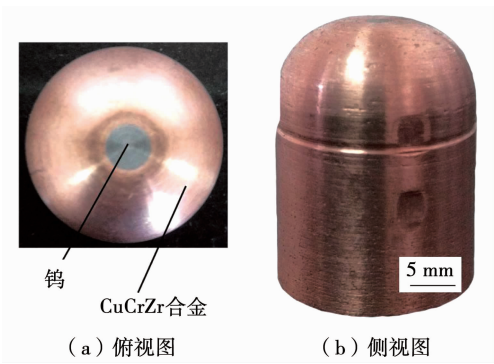


图 1 复合电极电极
Fig. 1 Compound electrode

2 试验方法

试验材料为 1.0 mm 厚的 A6061 铝合金板和

Q235 低碳钢板,其化学成分见表 1. 将铝合金板和低碳钢加工成 100 mm×30 mm×1 mm 的试板,利用无水乙醇将其洗净并烘干. 将铝合金与低碳钢板搭接 30 mm 进行装配. 采用 DM-200 中频逆变式电阻点焊机进行焊接. 焊接时,焊接时间为 10 周波、电极压力为 2 105 N 保持不变,焊接电流在 10 ~ 22 kA 范围内,每 2 kA 进行变化. 试验所用上下电极均为复合电极,其端面直径为 6 mm,内嵌钨棒的直径为 4 mm. 焊后,利用 AG-1 250 kN 拉伸实验机在室温条件下以 1.7×10^{-5} m/s 的速率对焊接接头进行抗剪试验. 对部分接头进行断面观察试验. 垂直于结合界面沿焊点直径横切焊接接头,研磨、抛光其断面. 用扫描电子显微镜 (SEM, JEOL JSM-6300) 沿结合面观察界面区微观形貌,并对界面反应层进行成分分析. 文中所列接头抗剪载荷、熔核直径为相同条件下焊接的 5 个接头的平均值.

表 1 材料化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical compositions of materials

材料	Cr	Cu	Ti	Mg	V	C	P	S	Si	Mn	Fe	Al
A6061	0.04	0.3	0.15	1.0	—	—	—	—	0.6	0.15	—	余量
Q235	—	—	—	—	0.06	0.14	0.04	0.02	0.4	1.0	余量	—

3 试验结果与分析

图 2 显示了接头横断面的宏观图像,该接头是在焊接电流为 16 kA 条件下获得的. 从图中可以看出有鼓形的熔核生成. 与母材原始厚度相比,在熔核部位的铝合金变得较薄,这主要是由于电极压力较大所致. 它对接头性能也有着影响(如后所述). 利用扫描电子显微镜沿铝合金/钢接合界面进行了观察,图 3 显示了界面区 SEM 图像,其中图 3a ~ 3d 分别取自图 2 中 A ~ D 处.

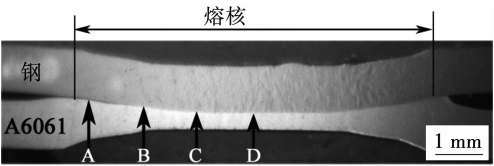


图 2 接头横断面宏观形貌
Fig. 2 Appearance of cross-section joint

如图 3 所示,在铝合金与钢接合界面观察到了反应层. 从其所表现的形貌上来看,反应层靠近钢一侧边缘相对较为平直,而靠近铝合金的一侧则显凹凸不平. 但与热补偿电阻点焊获得的铝合金/钢接头界面相比,界面处的突起比较小^[8],这主要因

为铝合金电阻率较低所致. 试验采用复合电极点焊铝合金与钢,由于铝合金导电性好,在焊接区产生的焦耳热较少;而采用热补偿电阻点焊时因工艺垫片的热补偿作用致使焊接区热量较充分^[8]. 因此所得接头界面上反应物生长不激烈,反映到其形态上就是界面微突起较小. 这也是试验获得接头界面上反应层厚度较薄的原因.

观察结果显示,反应层厚度沿界面方向的变化并非呈单调性,比较复杂. 如图 3a 所示,在焊点外缘部位生成的界面反应层非常薄,约为 0.5 μm. 随距焊点中心距离减小,界面反应层厚度逐渐增加,至图 2 所示的 B 处反应层厚度约为 2 μm(图 3b),到图 2 所示的 C 处时,反应层厚度增大至 2.5 μm 左右(图 3c).

继续向焊点中心处观察,界面反应层厚度则呈减小趋势. 图 3d 显示了图 2 中 D 处的接合界面区 SEM 图像,这时界面反应层已变成非连续状,其厚度最大处也不足 1 μm. 反应层厚度沿界面呈这种变化主要与焊接过程中的温度场有关. 反应层的成长与原子扩散速率和扩散程度有关. 根据阿罗尼乌斯 (Arrhenius) 公式,原子扩散系数主要由温度决定. 温度越高,扩散系数越大. 而界面区高温停留时间(反应时间)决定了原子扩散的程度,时间愈长,扩散愈充分. 虽然在电阻点焊过程中焊接温度

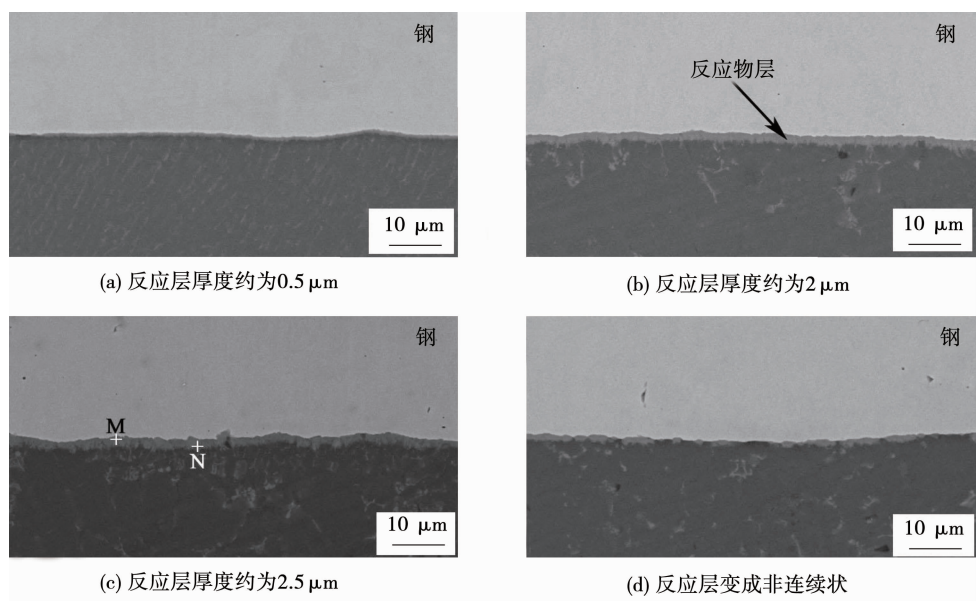


图3 接合界面区的扫描电镜图像
Fig. 3 SEM images of interfacial zone

场比较复杂,其高温停留时间与温度有关,而温度与生成的电阻热及散失的热量有关,但是仍可按照阿罗尼乌斯公式对界面反应层厚度变化进行定性分析.

由于铝合金导热系数较大,点焊过程中通过母材铝合金板散失的热量较多,这导致了焊点外缘处(图2中A处)温度较低、高温停留时间较短.所以,此处的界面反应层成长不充分(图3a),其厚度也比较薄.由于试验所采用的电极为复合电极,如图1所示,在电极基材铜合金的中心部镶嵌着钨棒,而钨的电阻率远远大于铜的电阻率.根据电流“就低原则”,点焊时焊接电流优先从电极外缘的铜合金通过,而流经电极中心部位钨的焊接电流很少,从而致使电流环形聚集、在焊接区形成环形加热.所以,在环形加热区(图2中B,C处)的温度较高、高温停留时间较长,界面反应物生长较充分,形成的反应层较厚(图3b,c).在焊点中心区域(图2中D处),即点焊时电极中心部位钨棒的对应处,由于流过的焊接电流很少、生成的焦耳热较少.此处的热量主要是从其周围的环形加热区传导而来,但非常有限.所以焊点中心区域的温度较低、高温停留时间较短,生成的界面反应层较薄(图3d).

采用普通电极点焊铝/钢时,生成的界面反应层呈中央厚、外缘薄的“山”状分布^[6].与既往的结果相比,试验采用复合电极点焊铝合金与钢,通过控制电流路径,实现了抑制界面反应物在焊点中央区域的生长.所以,从界面反应层厚度分布方面来说,采用复合电极点焊铝合金与钢异种材料是行之有效

的,这也达到了试验的预期目标.

对图3中M处与N处进行了成分分析,其结果显示M处Al,Fe原子分数分别为68.74%,31.26%,而N处则为74.25%,25.75%.根据Al-Fe二元相图^[9],M,N处的反应物成分分别与 Fe_2Al_5 , FeAl_3 相一致.据此,可判断靠近低碳钢Q235,铝合金A6061侧的反应物分别为 Fe_2Al_5 与 FeAl_3 .试验所得结果与文献报道的比较一致^[4,7,8].

图4显示了焊接电流对熔核直径与接头抗剪载荷的影响.如图所示,熔核直径随焊接电流的增加而增大.根据焦耳定律,在电阻点焊中焊接电流的增大,将析出较多的电阻热.所以,随焊接电流的增大,生成的熔核较大.试验所得熔核的直径处于7.1~10.45mm之间,均满足 $D > 4t^{0.5}$ (D 为熔核

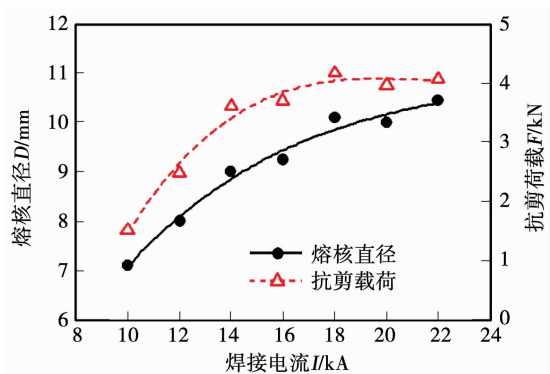


图4 焊接电流对接头熔核直径和抗剪载荷的影响
Fig. 4 Effect of welding current on nugget diameter and tensile shear load of joint

直径, t 为板厚), 符合相关标准的要求^[10]. 焊接电流为 10 kA 时, 采用普通电极焊接铝合金/低碳钢接头的熔核直径仅为 5 mm^[8]. 与这一结果相比, 试验采用复合电极焊接铝合金与低碳钢, 能在较低焊接电流范围内获得较大的熔核. 这是因为试验采用复合电极使焊接电流环形聚集, 与普通电极点焊相比, 焊接加热区的电流密度较高.

如图 4 所示, 随着焊接电流的增加, 接头抗剪载荷也呈增大的趋势. 在 10 ~ 16 kA 焊接电流范围内, 接头抗剪载荷的增大幅度较大, 而当焊接电流超过 16 kA 时, 接头抗剪载荷的增加较为平缓. 接头的断裂也呈现两种形式. 焊接电流为 10 ~ 16 kA 时, 接头呈界面撕裂破坏; 焊接电流大于 16 kA 时接头则为纽扣式破坏. 接头随焊接电流增大呈这种变化是因为焊接电流的增加致使接头熔核增大, 致使其承载能力也随之增大. 焊接电流较低时, 随焊接电流增加熔核变大, 这是接头抗剪载荷大幅增大的原因. 但是焊接电流继续增大, 不仅导致熔核直径的增大; 还使焊接区铝合金母材变薄(图 2), 并且界面反应层厚度进一步增大. 前者使接头抗剪载荷增大, 而后者则使接头抗剪载荷弱化, 二者综合作用致使接头抗剪载荷在高焊接电流范围内变化平缓. 而异种材料焊接接头性能的评价主要依据母材中强度较低的一方进行. 有关铝合金点焊接头性能标准规定板厚为 1.0 mm 的 I 级接头抗剪载荷值应不低于 1 380 N^[10]. 如图 4 所示, 试验选用焊接条件下, 采用复合电极焊接铝合金与低碳钢接头的抗剪载荷均达到 I 级接头的标准要求. 其中, 具有 4.17 kN 的最大抗剪载荷的接头是在焊接电流为 18 kA 条件下获得的.

4 结 论

(1) 在接合界面上观察到了反应物的生成, 反应层厚度随其在界面上的位置的变化而变化. 在焊点中心区域的反应层较薄.

(2) 铝合金 A6061 与低碳钢 Q235 复合电极电阻点焊接头熔核直径随焊接电流的增加而增大; 接头抗剪则随焊接电流的增加则呈先急剧增加后平缓变化的趋势. 在焊接条件下获得的接头熔核直径和抗剪力均达到相关标准要求.

(3) 在铝合金与低碳钢的电阻点焊中, 镶嵌式复合电极的使用能够起到抑制界面反应层焊点中央区域生长的效果.

参考文献:

- [1] Ogura Tomo, Umeshita Hidetaka, Saito Yuichi, *et al.* Characteristics and estimation of interfacial microstructure with additional elements in dissimilar metal joint of aluminum alloys to steel[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2009, 27(2): 174s - 178s.
- [2] Emel Taban, Jerry E Gould, John C Lippold. Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel[J]. Materials and Design, 2010(31): 2305 - 2311.
- [3] Lee Won-Bae, Schmoecker Martin, Mercardo Ulises Alfaro, *et al.* Interfacial reaction in steel-aluminum joints made by friction stir welding[J]. Scripta Materialia, 2006(55): 355 - 358.
- [4] Wang Nan, Yamaguchi Tomiko, Nishio Kazumasa. Interfacial microstructure and strength of aluminum alloys/steel spot welded joints[J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 2013, 77(7): 259 - 26.
- [5] 邱然锋, 申中宝, 李青哲, 等. 铝合金与钢的电阻铆焊[J]. 焊接学报, 2016, 37(9): 39 - 42.
Qiu Ranfeng, Shen Zhongbao, Li Qingzhe, *et al.* Resistance rivet-welding of aluminum alloy and steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(9): 39 - 42.
- [6] Qiu Ranfeng, Satonaka Shinobu, Iwamoto Chihiro. Effect of interfacial reaction layer continuity on the tensile strength of resistance spot welded joints between aluminum alloy and steels[J]. Materials & Design, 2009, 30(9): 3686 - 3689.
- [7] Zhang Weihua, Sun Daqin, Han Lijun, *et al.* Characterization of intermetallic compounds in dissimilar material resistance spot welded joint of high strength steel and aluminum alloy[J]. ISIJ International, 2011, 51(11): 1870 - 1877.
- [8] 王楠楠, 邱然锋, 石红信, 等. 铝合金与低碳钢的夹层电阻点焊接头特性[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(1): 70 - 74.
Wang Nannan, Qiu Ranfeng, Shi Hongxin, *et al.* Joining phenomena of resistance spot welded joint between aluminum alloy and mild steel with an interlayer[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2005, 15(2): 165 - 178.
- [9] 梁基谢夫. 金属二元系相图手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [10] 中国航空航天工业部航天工业标准. QJ2205 - 1995, 铝合金电阻点焊、焊缝技术条件[S]. 北京: 中国航空航天工业部, 1995.

作者简介: 邱然锋, 男, 1974 年出生, 博士, 副教授, 从事异种材料连接研究. 发表论文 50 余篇. Email: qiur1221@163.com