

铝合金点焊电极寿命改善技术的研究进展

潘晓倩, 刘鹏鹏, 罗林, 白清伟, 瞿淼晋, 王小玲, 刘圣祥
(蔚来, 上海, 201800)

摘要: 铝合金的电阻点焊 (RSW) 是新能源汽车生产中关键的焊接工艺之一, 其应用广泛且重要性显著. 然而, 铝板 RSW 工艺主要痛点是电极磨损严重、修磨频次高, 不仅导致制造成本上升, 还影响了生产节拍, 成为制约生产效率的重要因素. 由于铝合金的高热导率和高导电性, RSW 时通常采用大电流、短时间参数, 使得电极在高温高压作用下烧损严重. 此外, 铝板表面的高熔点氧化铝薄膜不利于电极和铝板的良好结合. 因此, 减少铝点焊电极磨损, 延长电极使用寿命是亟需解决的问题. 文中对铝合金 RSW 电极的失效形式及其失效机理进行了综述, 并从电极材料、电极表面改性、电极结构设计、铝板表面处理和焊接工艺等角度, 系统探讨了国内外提高铝合金 RSW 电极寿命的技术手段, 对相关生产和使用者有重要指导和参考作用.

创新点: (1) 分析了铝合金电阻点焊的工艺特点并总结了其失效形式及机理.
(2) 多角度系统阐述国内外提高铝合金点焊电极寿命的技术手段和研究进展.

关键词: 铝合金点焊; 失效机理; 提高电极寿命; 新能源汽车; 电极磨损

中图分类号: TG 457.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20240218001

Research progress on the improvement of electrode lifespan of spot welding for aluminum alloy

PAN Xiaolian, LIU Pengpeng, LUO Lin, BAI Qingwei, QU Miaojin,
WANG Xiaoling, LIU Shengxiang
(NIO, Shanghai, 201800)

Abstract: Resistance spot welding (RSW) of aluminum alloys is one of the critical welding processes in the manufacturing of new energy vehicles, with widespread applications and significant importance. However, severe electrode wear and a high frequency of reconditioning are the main challenges for RSW of aluminum sheets. These issues not only lead to increased manufacturing costs but also affect production efficiency, becoming a major factor constraining production pace. Due to the high thermal conductivity and good electrical conductivity of aluminum alloys, RSW of aluminum typically employs high current and short-time, which cause severe electrode burning under high temperature and pressure. Additionally, the high-melting-point alumina film on the surface of the aluminum sheet is detrimental to the optimal bonding between the electrode and the aluminum sheet. Therefore, reducing electrode wear in aluminum RSW and extending the service life of electrode caps are urgent problems requiring solutions. The failure modes and mechanisms of electrodes in aluminum RSW are reviewed. The technical approaches to improve the lifespan of aluminum RSW electrodes are systematically discussed from the perspectives of electrode materials, electrode surface modification, electrode structure design, aluminum sheet surface treatment, and welding processes. It provides important guidance and reference for related producers and users.

Highlights: (1) The process characteristics of aluminum alloy resistance spot welding are analyzed and its failure modes and mechanisms are summarized.

(2) The different technologies and research progress of improving the electrode life of aluminum spot welding both domestic and abroad were reviewed.

Key words: aluminum spot welding; failure mechanism; electrode lifespan improvement; new energy vehicles; electrode wear

0 序言

电阻点焊是一种在电极压力作用下, 利用电流通过焊件及接触处产生的电阻热将工件间的接触表面熔化而实现连接的一种焊接方法^[1-3]. 它是一个涉及电、热、力、磁、流、冶金等多因素耦合的复杂过程. 随着铝合金在新能源汽车工业中扮演越来越重要角色^[4-6], 铝板焊接的问题也越来越突出. 由于铝合金的良好导电导热性以及其它物理性^[7-8], 在焊接过程中会产生一系列的问题, 具体表现为^[9-12]: ①铝合金表面易氧化, 在表面形成一层致密的氧化铝薄膜 (熔点约 2050 °C), 难熔的氧化铝膜阻碍金属之间的良好结合, 从而影响焊接工艺和焊接质量; ②铝合金的热导率大^[13] (约为钢的 4 倍), 导电性好^[14], 多采用大电流、短时间的硬规范, 因此铝板焊接所需功率要比钢的大 2 ~ 4 倍; ③铝合金的线膨

胀系数大, 焊件会产生较大的热应力、变形及裂纹的倾向. 上述几方面均给铝合金的电阻点焊带来了困难. 与普通碳钢点焊相比, 铝合金点焊需要采用较大的焊接电流, 且焊接分流影响较大, 电极烧损严重^[15]. 对于普通碳钢焊接, 电极可以连续点焊几百点, 而在铝合金的连续点焊一般仅为几十点, 远远不能满足连续化生产的要求, 从而严重影响了铝合金在汽车工业中的应用^[16-17]. 因此, 减少铝点焊的电极磨损^[18-19], 延长电极帽使用寿命是亟需解决的问题.

1 铝点焊电极失效形式

表 1 展示了铝和钢的相关物理性能^[9], 相对于钢, 铝的热导率高, 导电性好, 以及表面易产生高熔点氧化铝薄膜等物理性能, 导致铝板点焊电极工作过程中存在以下几种失效形式^[20-22].

表 1 铝和钢的物理性能^[9]
Table 1 Physical properties of aluminum and steel^[9]

板材	熔点 $T_m/^\circ\text{C}$	热导率 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	电阻率 $R/(\mu\Omega\cdot\text{cm})$	表面氧化物	表面氧化物熔点 $T_c/^\circ\text{C}$
铝	660	237	220	Al_2O_3	2050
钢	1538	60	73	FeO_x	1370 ~ 1565

(1) 塑性变形. 塑性变形是由电极头部在焊接压力和高温共同作用下的结果. 焊接时, 电极头部与铝板接触处的温度高, 如果点焊压应力大于点焊温度下电极材料的屈服强度, 电极就会产生塑性变形. 由于温度分布不均匀, 产生的塑性变形不均匀, 则电极端部将发生“蘑菇化”, 导致电极直径增加.

(2) 合金化. 在点焊高温环境下, 铜电极表面会与铝板发生合金化反应, 产生 Al-Cu 合金产物. 当电极离开工件表面时, 在机械撕扯力的作用下这些金属间化合物部分剥离电极, 部分存留在电极表面, 使电极表面凹凸不平. 随着点焊次数增多, 接触面处的铜铝合金化现象更加严重, 显著增加了电极头部的电阻, 增加了焊接产热, 从而加速电极失效.

(3) 点蚀. 电极与工件表面产生低熔点合金产物时, 部分低熔点合金在飞溅作用下离开电极表面, 在电极端面产生弧坑, 许多小的弧坑聚集形成蚀坑. 蚀坑的产生提高周围的电流密度和工作压力, 使得蚀坑周围产生更严重的塑性变形和脱落, 从而导致电极长度减少以及直径增加.

(4) 热疲劳. 点焊电极在工作过程中不仅要在高温下传递压力, 而且承受着加热和冷却的周期应力作用, 产生热疲劳, 导致电极表面脱落, 引起电极失效.

总体说, 电极失效开始于电流循环期间电极和工件的局部合金化或者塑性变形等原因, 引起电流和接触压力分布不均匀, 导致电极点蚀, 以及最终失效. 电极失效过程会引起焊点强度等性能变化, 其变化可根据电极与工件间的接触面积和电极点蚀来解释. 据此可将点焊过程电极寿命分为 4 个阶段, 如图 1 所示^[23]. ①第一阶段: 接触面积增长, 没有任何明显点蚀, 焊点强度增加; ②第二阶段: 焊点强度达到最大值, 接触面积随着电极的初始点蚀而继续增长; ③第三阶段: 随着接触面积不断增加, 焊点强度开始下降, 但与此同时, 电极的点蚀变得显著, 并继续形成大蚀坑; ④第四阶段: 当电极尖端表面出现大空腔时, 焊点强度达到失效标准.

目前汽车生产厂家广泛采用的是电极修磨, 通过机械加工的方法在电极磨损以后切削其端面使

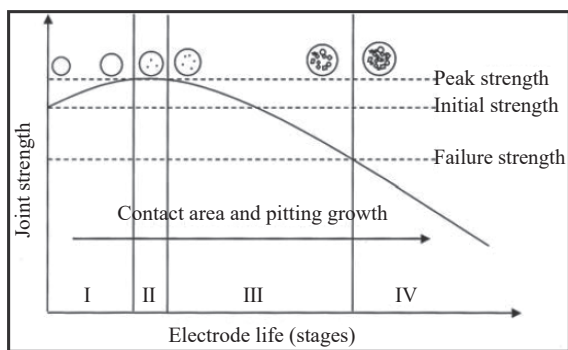


图 1 电极寿命的 4 阶段示意图: 与电极点蚀、电极和工件接触面积相关的焊点强度变化^[23]

Fig. 1 Schematic illustration of four stages of electrode life: the change of the joint strength related to the pitting of electrode and the contact area between electrode and worksheet^[23]

其恢复正常端面形貌, 从而可以继续使用. 不同于使用常规机械加工修磨技术, BOOMER 等人^[24]通过定期频繁对铝铜电极进行轻微抛光仅去除新生金属化合物的技术来确保电极始终保持良好状态, 即每隔 15~50 次点焊后, 对电极帽进行短时间 (约 1 s) 打磨, 这将引起电极的整体寿命增加了至少三倍, 并提高了焊接质量. 机器制造商 Centerline 在 1995 年提交的美国专利中就曾对类似技术进行了描述, 他们在电极帽失效的初始阶段就抛光铝铜合金化合物, 从而防止了电极磨损渐进过程的开始^[25]. 但铝点焊的修磨频次高、消耗大量的电极帽并牺牲生产节拍, 仍将是铝点焊工艺的痛点.

2 提高铝点焊电极寿命

基于上述电极失效原因及其失效形式, 国内外关于提高铝点焊电极寿命已经展开了一系列相关研究, 主要包括以下几方面.

2.1 材料体系

铜基合金由于高强度、硬度、以及高导电、导热性等综合性能良好而被广泛用于点焊电极. 铜的电导率在金属中仅次于银, 并且价格远远低于银. 通常需在铜中添加少量合金元素或第二相颗粒来改善铜的物理—力学性能, 尤其能显著提高其强度、硬度和软化温度^[26-28]. 但其他元素固溶在铜基体中会降低其导电性, 所以必须选择合适的铜合金体系来兼顾电极帽所需的综合性能. 电极用铜合金中常用的合金化元素有铬 (Cr)、锆 (Zr)、镉 (Cd)、银 (Ag)、镍 (Ni)、硅 (Si)、铍 (Be)、钴 (Co)、铝 (Al) 等. 它们与铜组成的二元合金、三元合金或多元合金具

有不同的性能, 能适应各种金属材料焊接的不同需求^[29]. 常用的点焊电极用铜基合金包括基于析出强化的 Cu-Cr, Cu-Cr-Zr 和 Cu-Zr 合金, 或者基于弥散强化的 Cu-Al₂O₃ 合金^[30-31].

2.1.1 析出强化铜合金

现阶段国内工业一般采用固溶—变形—时效的加工工艺来加工 CuCr, CrZrCu 和 ZrCu^[32]. 如图 2 所示^[33], Cr 与 Zr 元素在 Cu 基体中具有较大的平衡溶解度梯度, 低温下 Cr 在 Cu 中的平衡溶解度不高, 而当温度提高至 960 °C 和 1076 °C 时, 其溶解度分别增高至 0.64% 和 0.71% (质量分数). 相比之下, Zr 在 Cu 中的溶解度更低, 在室温下几乎不溶解于 Cu 基体, 在 965 °C 时达到最大溶解度, 约 0.12% (质量分数). 因此通常在 960 °C 左右对 ZrCu、CrCu 和 CrZrCu 合金进行固溶与淬火, 并且通过后续时效处理使合金中的 Cr 和 Zr 以弥散细小的沉淀相形式析出. Cr 和 Zr 沉淀相的析出不仅能恢复基体的导电性, 还能提高基体的强度和硬度. 然而, 这些铜合金的软化温度即高温强度有限. CrZrCu 的软化温度低于 500 °C, 因此在温度高于

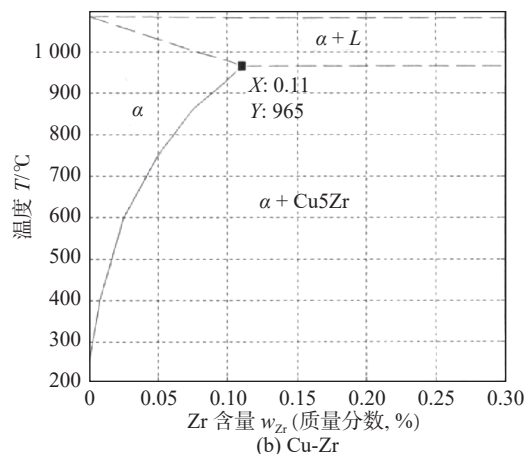
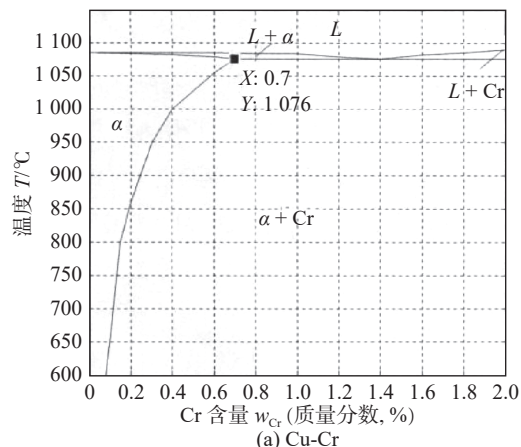


图 2 铜合金相图^[33]

Fig. 2 Phase diagrams of Cu alloy. (a) Cu-Cr; (b) Cu-Zr

500 °C 时, 强化作用消失, 强度随之迅速降低, 这将严重影响点焊电极的寿命^[34-35].

随着研究深入, 已有众多关于优化其成分和工艺来提高铜合金电导率和强度的相关研究. 通过合适的成分控制, 以及固溶时效热处理、冷变形、冷镦加工等工艺过程控制, 可以获得具有高强度和高电导率等综合性能优良的电极用铜合金^[36-38]. 赵志方^[26]研究表明, CrZrCu 合金在铸造 + 轧制 + 等通道挤压 + 450 °C 时效 3h 后, 硬度、强度和电导率等综合性能达到最佳; 潘振亚^[38]表明, 与自然凝固试样相比, 定向凝固 CrCu 合金的力学性能和导电性能均得到大幅度提高.

值得一提的是, 深冷处理是常规热处理的一种延伸, 又称为超低温处理 (-196 ~ -130 °C), 可以用来优化多种金属的组织 and 性能, 进而改善其物理性能和综合力学性能^[39]. 吴志生等人^[40]在 -150 °C 和 -170 °C 下对 CrZrCu 电极进行深冷处理后发现, 电极基体的显微孔洞数量显著减少, 电极电阻率降低, 并且基体致密程度和耐磨性也得到明显提高. 刘克明等人^[41]的研究也表明深冷处理引起冷轧铜合金的抗拉强度、电导率和断后伸长率都得到提高; 因此, 深冷处理可以改善电极的导电、导热与抗变形能力, 进而减少点焊过程中电极产热, 加快散热, 进而显著提高铝点焊电极寿命^[42-44].

2.1.2 弥散强化铜合金

弥散强化合金被认为是颗粒增强金属基复合材料的延伸, 其强化机制主要为奥罗万 (Orowan) 强化, 即利用弥散分布的第二相粒子来强化基体合

金^[27]. 由于 Al_2O_3 熔点高 (2015 °C)、硬度大、热稳定性好、与铜基体几乎不润湿, 是稳定的惰性粒子, 在铜基体中 Al_2O_3 粒子尺寸细小且均匀分布, 所以弥散 Al_2O_3 强化铜合金展现了高强度、高导电和优良的抗高温软化性能, 开始被广泛应用于汽车焊接工业^[45].

20 世纪 70 年代, 美国 SCM 公司采用内氧化法成功研制出不同含量 Al_2O_3 弥散铜合金, 与传统的 CrZrCu 电极材料相比, 其软化温度高达 900 °C^[46]. 国内 Al_2O_3 弥散铜合金研究起步较晚, 20 世纪 70 年代洛阳铜加工厂曾建立一条弥散铜合金生产线, 但由于成本高, 制品性能差, 未能规模生产^[47]. 20 世纪 80 年代国内高校及科研院所才开始进行研究, 目前, 北京有色金属研究总院、广州有色金属研究院、昆明冶金研究院、中南大学在内的众多科研院所正在对此类材料进行研发^[48-51].

Al_2O_3 弥散铜合金的主要制备方法有: 机械合金化法、复合电沉积法、溶胶凝胶法、热压法、内氧化法等^[31, 45, 51-52]. 其中内氧化法是目前工业化生产弥散强化铜合金时普遍采用的生产工艺, 利用该方法制备的 Al_2O_3 弥散铜具有优良的综合性能^[53]. 图 3 展示了典型内氧化制备工艺: Cu-Al 合金熔炼 → 雾化制粉 → Cu_2O 氧源制备 → 混料 → 等静压成形 → 内氧化-还原-烧结 → 热挤压 → 冷拔 → 固溶时效^[51]. 根据 Orowan 机制, 弥散强化与粒径和粒子间距有关, 通过合理控制工艺参数获得均匀分布的细小 Al_2O_3 强化粒子是弥散强化合金优异综合性能的关键.

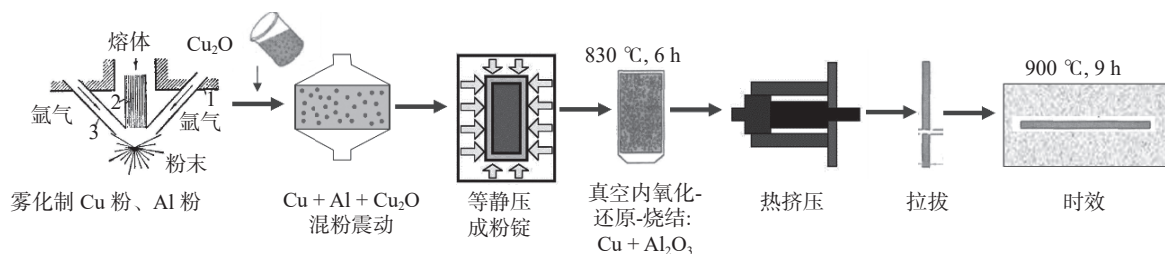


图 3 内氧化制备工艺示意图

Fig. 3 Schematic illustration of internal oxidation preparation process

Al_2O_3 弥散铜较 ZrCu 等析出强化铜合金展示了更优异的综合性能: 高软化温度、高强度, 并保证了高电导率, 所以 Al_2O_3 弥散铜将成为合适的铝点焊电极材质^[53]. 目前已有不少汽车公司在钢点焊中使用 Al_2O_3 弥散铜高寿命电极帽, 但弥散铜电

极帽在铝点焊的应用现状较少, 这主要归因于弥散铜合金的粉末冶金过程复杂, 制备成本高, 质量稳定性较差等缺点. 如果上述问题能得到解决, 将会大大促进 Al_2O_3 弥散铜合金在铝点焊电极帽的应用.

2.2 电极表面改性

如第 1 节所述, 铝铜合金化是点焊电极失效的主要原因之一, 因此减少铜电极帽与铝板合金化是提高电极寿命的重要手段. 已有相关研究表明, 对点焊电极进行表面改性, 即在电极表面制备一层能阻挡合金化的材料 (单质、化合物或复合涂层) 可以减少点焊过程中铜电极和铝板的合金化^[51].

董仕杰等人^[54]通过电火花沉积方法在铜电极表面沉积鳞片状 TiB_2/TiC , TiN 或 ZrB_2 等复合涂层来提高电极寿命, TiB_2/Cu 电极在点焊镀锌钢板的平均使用寿命是 CrZrCu 合金电极的 4 倍; 于汇泳等人^[55]也认为在电极端面制备 Cu-Ti-B 复合涂层可减轻电极烧损, 提高电极的使用寿命; 王涛^[56]采用电火花沉积技术, 在 CrZrCu 电极上沉积 Ni /金属陶瓷涂层, 制得双涂层电极帽, 在镀锌钢板点焊时, 该涂层可限制锌层与电极之间合金化, 提高电极的抗塑性变形能力, 使涂层电极寿命达到普通电极寿命的 2.5 倍以上; 邹家生等人^[57]研究了电极表面的多涂层沉积工艺及其对涂层质量的影响, 其涂层电极硬度大大高于普通 CrZrCu 电极硬度, 且涂层质量好、无缺陷, 显著提高了电极寿命.

目前涂层电极在工业上的应用仍然有限, 主要归因于涂层制备成本、制备工艺、以及涂层电极失效后的修磨、迭代等问题.

2.3 电极结构设计

电极形状对铝合金点焊工艺、焊点性能以及电极寿命也将存在明显影响, 合理的电极形状不但可以提高铝合金点焊接头的力学性能, 还可以改善焊接区的热、力循环, 对提高电极寿命、减少和抑制接头裂纹有重要作用^[58]. 因此, 通过对电极的端面直径、端面曲率、端面形貌、电极锥角等进行改进和创新设计, 能有效提高电极端面电流密度分布均匀性, 从而降低电极不均匀烧损.

杜慧敏等人^[59]研究发现, 电极端面直径越大, 电流密度以及熔核尺寸越小, 并且球头电极烧损 (图 4(a) 所示) 比球平面电极 (图 4(b) 所示) 更严重. 直径 6 mm 的球平面电极进行 5052 铝板点焊时, 其寿命比球头电极提高了 20%. 另外, 张敏等人^[60]研究了 CrZrCu 球平面 (图 4(b) 所示) 和锥平面 (图 4(c) 所示) 对 AA5182 铝合金电阻点焊的影响, 结果表明锥平面电极寿命优于球平面电极. 完成单个点焊时, 锥平面电极处于高温状态的时间更短, 电极处的压强降低, 由此缓解了铜电极端面和铝板之间的

合金化反应, 从而改善了电极烧损.

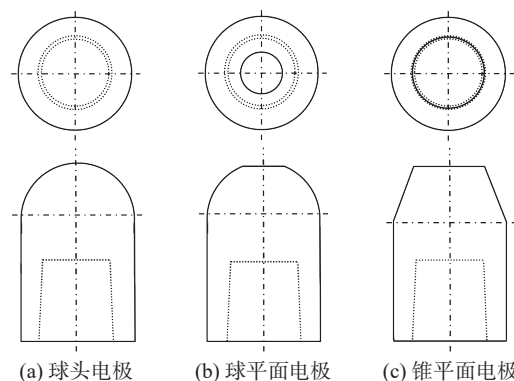


图 4 电极形状示意图

Fig. 4 Schematic illustration of electrode shape. (a) ball electrode; (b) spherical electrode with flat end face; (c) cone electrode

如图 5 所示, 上海交大 LI 团队^[61]研究了电极锥角 (15° , 30° , 45° 和 60°) 对电阻点焊的影响, 认为锥角不仅影响焊接质量, 还影响电极使用寿命. 图 5 可见, 锥角越大, 电极温度越高. 这是因为, 小锥角电极具有较大的体积, 展示更高的冷却能力, 有利热量排放, 缓解电极热量聚集, 从而具有更高的电极寿命. 但是, 由于小锥角电极具有优异的冷却能

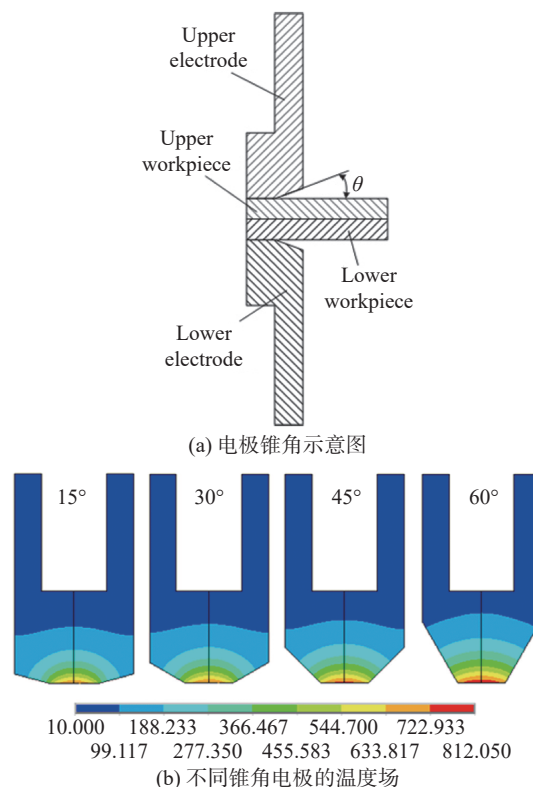


图 5 电极示意图及其温度场分布^[61]

Fig. 5 Schematic diagram of electrodes and the temperature field. (a) schematic diagram of electrode cone angle; (b) temperature field in electrode under different cone angles

力,必须施加更大的焊接电流来补偿电极散发的热量. 因此,考虑到电极锥角对电极寿命、焊接质量和生产成本的影响,在车身焊接中建议使用 30° 和 45° 锥角电极.

通用汽车研发部针对铝合金连接,在传统焊接技术上进行了创新开发,发明了多环圆顶 (multi ring dome, MRD) 电极专利,在电极端面上设计了多个凸起的同心圆环,如图 6 所示^[62-64]. 点焊时,凸起的圆环压破铝板表面氧化物,减小了电极与工件界面的接触电阻,从而改善了界面间传热行为,降低了界面温度.



图 6 多环圆顶电极帽^[62-64]

Fig. 6 Multi ring dome (MRD) electrode

王艳俊等人^[65]分别采用 MRD 和平头电极对 2 mm 厚 5182 铝合金进行电阻点焊对比试验. 结果表明,电极力下 MRD 圆环将氧化膜挤压到圆环附近,促使氧化膜规律性分布,利用环形触点在合金内部形成导电,电流均匀通过,提高了产热效率. 另外,圆环的存在增大了接触面积,表面散热更好、温度较低,从而可以提高电极寿命,使得焊点连续性更好,接头强度更稳定;LI 等人^[66]通过显微组织分析和力学性能测试,探讨了 MRD 等电极端面形貌对 1.2 mm 厚 6022 铝板电阻点焊的影响,表明电极表面形貌可以显著影响电极发热和冷却效果,并产生具有独特形态、微观结构和力学性能的焊缝,但这将对修磨技术提出新的要求,并且对表面质量要求较高的场景并不适用.

2011 年,福尼斯 (Fronius) 公司推出 Delta 点焊系统,即电极带式电阻点焊. 如图 7 所示,在电极与板材之间增加一条铜带,铜带与板材形成三明治结构,电流流经铜带完成板材连接. 随着焊接进行铜带发生转动,每次点焊均使用新铜带,因此 Delta 点焊系统的消耗品主要是铜带而非电极帽,电极不与铝板直接接触而避免电极失效,从而大大降低电极帽损耗^[67-68].

CAO 等人^[69]利用电阻点焊的热、电和机械增量耦合有限元分析,设计开发了一种可以显著延长铝点焊电极寿命的新型电极. 如图 8(a) 所示,该电

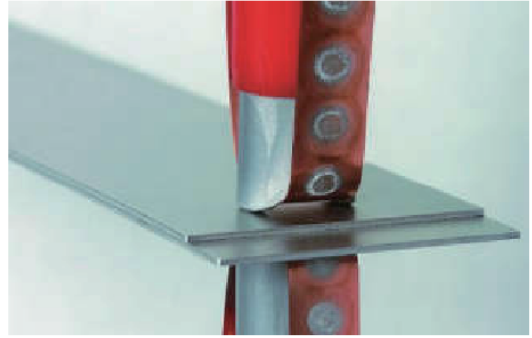
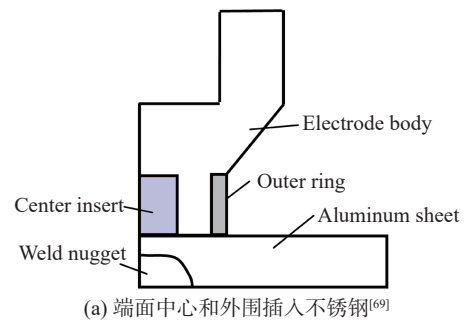


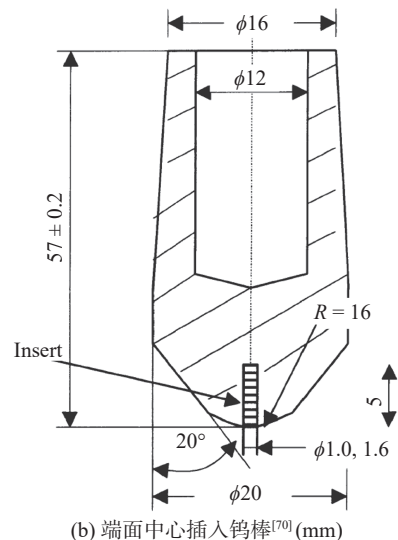
图 7 电极带式电阻点焊机^[67-68]

Fig. 7 Delta spot welding machine

极采用了不同材料的复合表面结构,其中,电极基材仍由铜合金制成,在电极端面中心嵌入圆柱状不锈钢、钨等高温强度高、电导率低的材料,在电极外围插入不锈钢环形外套管. 这种电极设计其一可以通过优化电流流动路径来改善电—热—机械条件,以降低焊核形成所需的电流水平,使得电极/板材接触表面温度没有明显升高;其二优化了电极力分布,由于接触压力峰值位于电极的中心和外围边缘,外部和中心插入不锈钢承受了这些峰值接触压



(a) 端面中心和外围插入不锈钢^[69]



(b) 端面中心插入钨棒^[70](mm)

图 8 新型电极帽设计

Fig. 8 Designed electrode configuration. (a) center insert and outer ring of stainless steel; (b) center insert of tungsten rod

力,最大限度地降低了电极表面加热和塑性变形;其三,外部环也可以防止电极外围“蘑菇化”生长。上述几方面共同促进了该新型电极的高寿命;同样,如图 8(b)所示,DE 等人^[70]的研究表明在电极端面中间插入钨棒可以有效阻止电极表面的合金化反应,并且该钨棒直径对点焊结果有很大影响,直径 1 mm 钨棒的效果最好。

综上,已有不少研究工作对电极结构进行设计来改善焊接过程中的热力分布,从而提高焊接质量和点焊寿命。但不同的电极结构设计需要对修磨技术提出新的要求,且实际点焊的具体应用场景并不能满足所有结构电极,例如法兰盘有限的区域不能使用端面太大的电极帽。

2.4 铝板表面处理

如图 9 所示,在电极力作用下,氧化膜发生不均匀破碎,造成电流集中,局部产生很高温度,促进了合金化,在电极离开铝板后造成坑蚀^[21]。可见,高熔点、低电导率的致密 Al_2O_3 薄膜使铝板表面接触电阻幅值较大、不稳定,进而影响铜电极和铝板之间热量传递,因此控制铝板表面是提高电极寿命和改善焊接质量的关键因素之一。

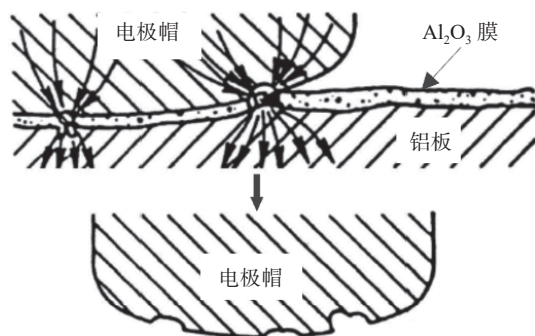


图 9 电极帽坑蚀示意图^[21]
Fig. 9 Schematic of electrode pitting

2.4.1 接触电阻

为了提高电极寿命,在无法完全去除表面氧化层时,应保证薄而均匀的 Al_2O_3 层来实现均匀传热,减少接触界面处的热量集中。根据德国标准 DVS 2929,将薄板接触电阻控制在 $20 \sim 50 \mu\Omega$ 可以实现具有均匀焊核的稳定焊接过程,但只有对板材表面进行适当处理时,才能实现这种理想接触电阻^[71]。国内外已有众多关于控制表面氧化层以及接触电阻来提高电极寿命的研究。

LEONE 和 ALTSHULLER^[72]将点焊数量与表面接触电阻以及氧化层厚度之间建立了抛物线关系,分别如图 10(a)和图 10(b)所示,并估计了接触

电阻和氧化物厚度之间的线性关系,如图 10(c)所示。可见,表面电阻与氧化层厚度呈正线性相关(图 10(c)),约 $330 \text{ \AA}$ 的氧化层厚度产生最高点焊数量(图 10(a)),这对应约 $50 \times 10^3 \mu\Omega$ 的平均表面接触电阻,如图 10(b)所示。

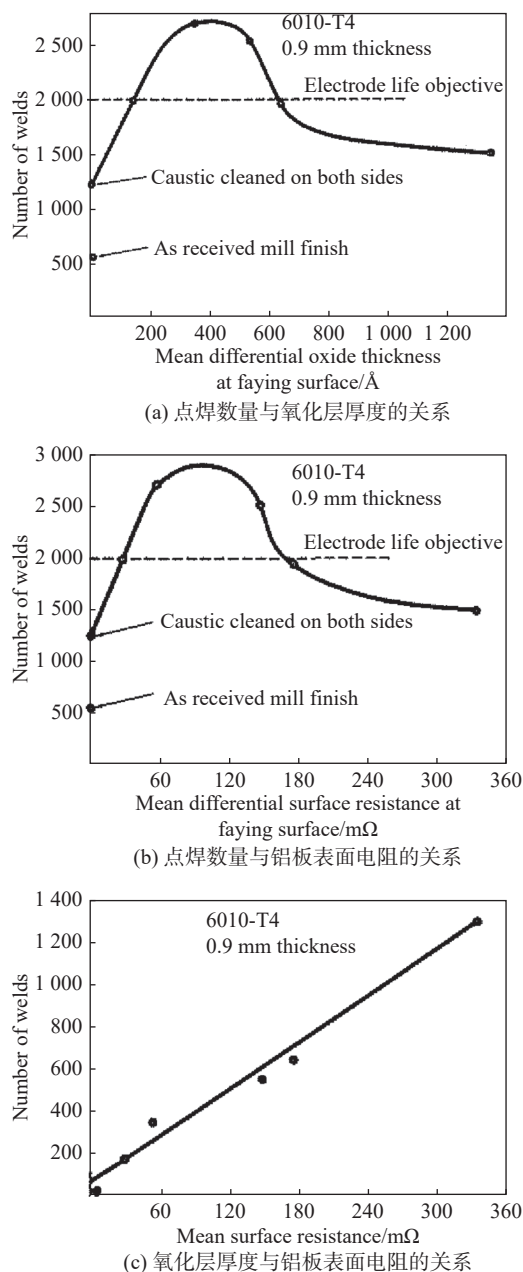


图 10 点焊数量、氧化层厚度以及表面电阻的关系^[72]
Fig. 10 Relationship of welding number, oxide thickness and surface resistance. (a) welding number-oxide thickness; (b) welding number-surface resistance; (c) oxide thickness-surface resistance

SAMUEL 等人^[73]设计了一种通过扭转电极来破坏铝板表面氧化层进而提高电极寿命的新方法。在电极接触工件时,旋转约 20° ,通过电极尖端研磨工件,破坏铝板表面氧化膜,并且对电极尖端进行清洁,保证电极和铝板之间良好接触,这将减少界

面产热,从而延长了电极帽寿命并获得均匀焊接。进一步的测试结果表明,使用扭转电极点焊脱脂铝板和涂油铝板时,电极帽寿命均明显提高,脱脂铝板焊接的扭转电极较传统电极寿命提高了近 500%。

除了与电极接触的铝板表面外,两铝板贴合界面对点焊也存在明显影响。为了降低两铝板贴合界面处的接触电阻,可以利用两个工件之间的滑动来降低电阻。CRINON 等人^[74]研究了表面粗糙度、氧化膜厚度和界面滑动对两铝板界面接触电阻的影响。他们指出,仅约 10 μm 的滑动位移可以显著降低铝板与铝板贴合表面的接触电阻。

由于铝合金的易氧化性,在实际生产中想要完全去除铝板表面氧化膜,以及合理控制氧化膜厚度及其接触电阻存在一定的难度。

2.4.2 表面清洗

铝板表面处理可以改变氧化层微观结构和表面粗糙度等,影响表面电阻的大小和分布,进而影响电极寿命。

HANA 等人^[75]研究了未处理、脱脂、化学清洗和电弧清洗的 5A02 合金表面处理方法对 CrZrCu 电极寿命的影响。图 11 展示了这四种条件铝板对应的表面电阻,其中,铝板表面经化学清洗和电弧清洗后具有较低的表面电阻,此时电极帽寿命明显较高。另外,化学清洗铝板的点焊电极寿命最佳,因为化学清洗后铝板表面的 Al_2O_3 层最薄、最均匀。图 11 所示,虽然电弧清洗的铝板具有更低的表面电阻,但电弧清洗并不总能产生均匀一致的表面,所以电弧清洗铝板的点焊电极寿命略低于化学清洗铝板的电极寿命。THORNTON 和 NEWTON 等人^[76]的试验研究表明,如果对 2 mm 薄板表面进行适当的脱脂或化学清洗,可以实现高达 1000 个点焊的电极寿命;使用由特殊薄膜涂敷的铝板获得了

类似的高电极寿命。

2.4.3 表面涂敷物质

在铝板表面涂敷合适物质来改变接触摩擦,影响表面粗糙度和接触电阻,也能一定程度上提高电极寿命。

李青松等人^[77]研究表明,在铝合金表面加入有机油、硫酸铜溶液、碳化硼等都能改善基体组织,有效减弱点焊时的铜铝合金化。其中,有机油和碳化硼的效果最好,电极磨损最轻,能有效改善铝点焊质量和电极寿命,这与周慧琳等人的试验结果一致^[78]。

RASHID 等人^[23]研究了不同铝板润滑剂对铝点焊电极寿命的影响,发现一种良好润滑剂可以将 ZrCu 电极寿命延长 200%。他们分析揭示了这种润滑剂使铝板表面氧化层变薄,减少了电极工件界面处的接触电阻和产热,从而降低了合金化和点蚀速率,延长了电极寿命。

英国华威大学的 HANA 等人^[75]研究了氧化层去除程度和表面固体润滑剂对 AA5754 铝板点焊的影响。他们认为不完全去除氧化膜不利于焊接,完全去除氧化膜有助提高焊接质量的稳定性,对应更宽的焊接窗口。利用预热脉冲可有效去除固体润滑油,降低接触电阻,防止飞溅。进一步研究了 MF(mill finish)和 EDT(electrical discharge texture)对 AA6011 点焊熔核的影响,表明 MF 在铝板表面产生平行于轧制方向的线性纹理,其点焊工艺窗口较窄。

PATRICK 等人^[79]进行的早期工作表明,需要对板/电极界面和两铝板贴合面进行不同处理来实现最佳点焊。一方面,将与电极接触的铝板表面进行电弧清洗,另一方面,将两铝板贴合表面使用铬磷化转化膜以实现均匀的电阻和化学稳定性,这两方面共同作用实现了高寿命点焊电极。

综上,在铝板表面涂敷物质能改善电极帽和铝板之间的接触行为,从而提高点焊寿命。但在实际应用中,铝板表面涂敷物质除了考虑对点焊的影响外,还需考虑对胶粘、电泳等整车生产过程中后续工艺的影响。

2.4.4 表面凸点

在两铝板贴合面引入局部过渡凸块可以避免焊接过程中板材的直接接触,以更大的熔核尺寸、更少的缺陷和更高的强度来实现更好焊接^[80]。如图 12 所示,ZHANG 等人^[81-82]在铝板焊接处进行

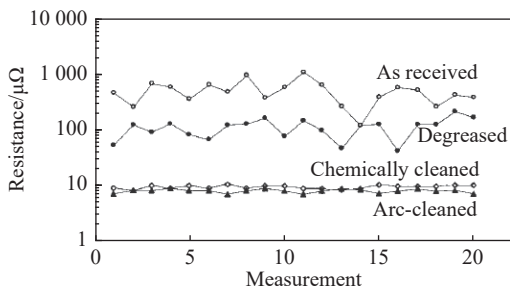


图 11 不同表面处理铝板的电阻^[75]

Fig. 11 Resistance of aluminum sheet surface with various surface conditions

凸点处理,发现与采用球形电极帽的传统电阻点焊相比,凸点辅助点焊工艺可以改变焊接过程中电流密度以及温度场分布,使焊后接头表面无明显压痕,并且焊透、电极帽粘黏等现象得到缓解,接头无表面裂纹,但生成的熔核直径小,抗剪强度低。

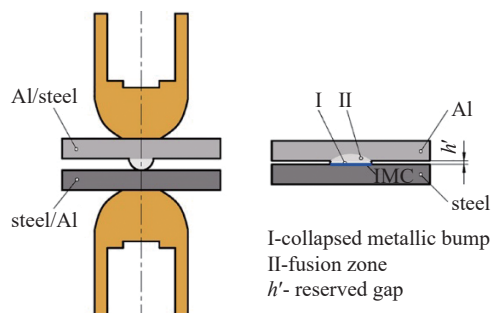


图 12 金属凸块辅助电阻点焊示意图^[81]

Fig. 12 Schematic illustration of metallic bump assisted resistance spot welding

类似于金属凸点辅助电阻点焊, Arplas 焊接技术是汽车制造领域白车身钣金件焊接的一种全新技术, 如图 13 所示, 它是基于点焊原理, 但采用不同于传统电阻点焊技术的方式和参数^[83]. Arplas 焊接采用平头电极帽, 在极短时间内高电流脉冲熔化零件完成焊接, 焊接热变形和压痕极小. 并且, 在焊接之前必须在一个零件上冲出一个凸起, Arplas 焊接时, 该凸起与另一个零件在高电流脉冲下完全熔合. 在采用 Arplas 焊接的工件中几乎不存在传统电阻焊中普遍存在的热应力, 能有效解决传统电阻点焊的质量问题和低电极寿命问题^[84].

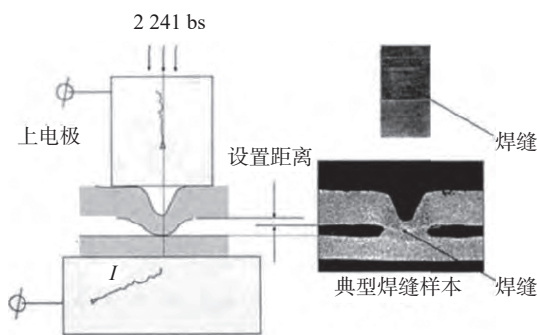


图 13 Arplas 焊接成形示意图^[83]

Fig. 13 Schematic diagram of Arplas welding and forming

表面凸点处理方法在试验理论研究中可以达到较好提高电极寿命效果, 但在整车应用中可实施性存在局限性。

2.5 焊接工艺

由于铝合金的低熔点、高导热和导电性^[85], 点焊时多采用大电流、短时间的硬规范. 合适的焊接

时间、电流、压力等工艺参数对保证点焊质量和电极寿命具有重要作用. 通过改善焊接工艺来提高电极寿命已展开了大量研究。

2.5.1 预热和预压

西北工业大学张勇等人^[86]的研究表明, T4 高强铝合金电阻点焊时采用预热电流改善了接触电阻分布的随机性和不均匀现象, 降低了铝合金点焊对工件表面状态和工艺参数波动的敏感性, 这有利于点焊电极寿命的提高。

较大的电极力会减小板与板、板与电极之间的贴合空隙, 降低接触电阻, 将在电极界面处产生较少的热量和合金化. 因此, 对于电极寿命而言, 适当的大电极力是优选的. 然而, 如图 14 所示, ZHEN 等人^[87]关于预压和预热对 AA5052 电阻点焊质量和一致性的影响研究表明, 单纯增大电极力不能显著降低电极/铝板界面处或铝板贴合面处的接触电阻. 采用适当的预热处理 (8 kA 的预热电流和 50 ms 的预热时间) 可以在铝板贴合面处产生轻微的熔融区, 从而抑制铝板表面的氧化膜, 使得铝板贴合面的接触电阻降低两个数量级, 并且接触电阻的均匀性得到明显提高。

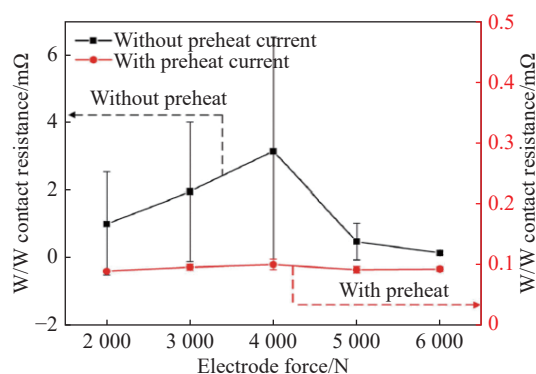


图 14 不同电极力、有无预热 (8 kA 预热电流和 50 ms 预热时间) 条件下铝板间接触电阻^[87]

Fig. 14 Contact resistance between aluminum sheets under different electrode pressures and with or without preheating (preheating current of 8kA and preheating time of 50 ms)

2.5.2 电流补偿 (步进电流)

在电极磨损时补偿焊接电流是减小电极磨损的有效方法. 电极磨损后其端面直径增大, 电流密度降低, 所以通过补充电流以使电流密度不变, 从而保证焊接质量, 提高电极寿命^[88].

LI 等人^[89]建立了电极磨损估计方法模型, 他们利用动态电阻来表征电极与工件的接触行为, 通过测量动态电阻, 监控焊接时电极与工件的接触面

积,实时进行电流补偿焊接,从而改进了电阻点焊工艺质量. WADDELL 和 WILLIAMS^[90] 的研究也表明了步进电流对提高电极寿命的有效作用,其中,采用步进电流促使 CrZrCu 电极的点焊数量从 ~1600 增加到 ~5000. 另一方面,采用步进电流会导致电极尖端温度更高,高温时间更长, CrZrCu 电极由温度过高而引起尖端变形失效的风险增大. 而 Al_2O_3 弥散铜比 CrZrCu 的软化温度更高,高温下硬度更大,其抵抗高温变形能力更强,所以采用步进电流使得 Al_2O_3 弥散铜电极寿命更有优势.

2.5.3 多脉冲电流

上海交通大学吴松等人^[91]关于 5052-O 铝合金的电阻点焊研究发现,相对于单脉冲电流,多脉冲电流的非持续输入,使得焊接过程中存在一定冷却时间,其裂纹危险分布系数有所降低. 多脉冲工艺下,含有环状凹痕端面的电极能够完全抑制裂纹产生,并可以提升点焊接头的力学性能. 首钢刘兴全等人^[92]也认为多脉冲焊接相对于单脉冲焊接可扩宽可焊电流范围,提高板材可焊性,以及降低飞溅发生率,抑制裂纹和缩孔缺陷.

天津大学程方杰等人^[93]认为电极烧损与飞溅的发生主要归因于在通电初期接触面上产热严重不均匀以及局部区域点热量迅速积累,所以减小电极烧损主要措施是尽量消除开始通电时的电流分布不均匀以及初始阶段接触表面上的热量积累,从而减小局部熔化倾向. 因此,他们提出了一种适合于铝点焊的新电流控制法,如图 15 所示,该方法的电流脉冲分为焊接状态稳定化脉冲和焊接脉冲两部分. 前者是几个不连续的小幅值电流脉冲,主要作用是促使表面接触均匀化,保证接触电阻稳定在一个较小值;后者焊接脉冲是为了加热工件,形成熔核可以有效减少飞溅发生,使电极烧损变慢、变均匀,还可以降低对工件表面处理工艺的要求.

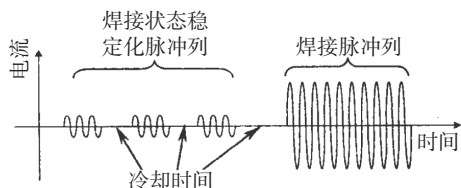


图 15 电流控制方式示意图^[93]

Fig. 15 Schematic diagram of current control method

相比于上述讨论的电极材料改善、表面改性、结构设计和铝板表面处理等技术方案,通过点焊工

艺调控来提高电极寿命理论上不需要额外的成本投入,带来的效益将更显著,但需要考虑对生产节拍的影响.

3 结束语

(1) 综上所述,铝点焊电极失效的主要原因机理已被理解,电极失效开始于电极表面的局部合金化、塑性变形、热疲劳等原因,导致电流和接触压力分布不规则,进而引起点蚀,电极的最终失效通常是坑蚀形成的结果. 目前虽然已经做了大量研究来提高铝点焊电极寿命,也取得了很多成果,但寻找能彻底有效提高铝点焊电极寿命的技术仍有待进一步探索.

(2) 电极材料需同时保证高导电、导热率以及高温强度等综合性能,目前电极材料主要是铜合金,在焊接高温下铜电极难以避免会与铝板发生合金化而引起失效. 对电极进行涂敷涂层等表面处理来阻止铝铜合金化也是技术路线之一,但涂层制备工艺、成本以及迭代等问题制约着涂层电极. 所以寻找新的电极材质体系来避免高温下合金化、热疲劳等行为仍是相关研究者的一个重要研究方向.

(3) 由于电极失效涉及电、热、力、流、冶金等多因素耦合的复杂过程,目前还不能完全抑制电极劣化,但根据铝点焊实际情况,探索合适的电极结构、铝板表面处理方法和焊接工艺等技术路线来减缓电极失效,可以在相对较长的生产周期内以较低的维护成本保持可接受的焊接质量,这仍然具有重要意义.

参考文献

- [1] 王敏. 电阻焊在汽车工业中的应用[J]. 电焊机, 2003, 33(1): 1-6.
WANG Min. Application of resistance welding in automobile industry[J]. *Electric Welding Machine*, 2003, 33(1): 1-6.
- [2] WANG R, ZHANG S, HU Y, et al. Effects of welding current on microstructure evolution and mechanical behavior of WC-Co/X32 steel joints by resistance spot welding[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2025, 128: 107048.
- [3] MERMER E, TAYLAN E, EYLEN E, et al. A comparative study on microstructure and hardness properties of Inconel 625 alloy by resistance spot and seam welding methods[J]. *Materials Letters*, 2025, 386: 138220.

- [4] WEI F, WANG Y, YIN Q, *et al.* Optimizing electrode combinations to improve welding current density distribution and intermetallic layer morphology growth for resistance spot welding of aluminum alloys to steels[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024(13): 1 – 12.
- [5] GAO C Y, DONG X B, YANG Y H, *et al.* Research progress, application and development of high performance 6000 series aluminum alloys for new energy vehicles[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 32: 1868 – 1900.
- [6] MAJUMDAR S, SINHA A, DAS A, *et al.* An insight view of evolution of advanced aluminum alloy for aerospace and automotive industry: current status and future prospects[J]. *Journal of the Institution of Engineers (India)*, 2024(Series D): 1 – 18.
- [7] EJTAK T, SHYAM A, BLAU P, *et al.* Additively manufactured and cast high-temperature aluminum alloys for electric vehicle brake rotor application[J]. *Wear*, 2025(570): 205961.
- [8] FAN H, HU J, WANG Y, *et al.* A review of laser additive manufacturing (LAM) aluminum alloys: Methods, microstructures and mechanical properties[J]. *Optics and Laser Technology*, 2024, 175: 110722.
- [9] 吴卫枫, 鲁厚国. 铝合金电阻点焊技术研究 [J]. *汽车制造业*, 2003, 3: 46 – 48.
- WU Weifeng, LU Houguo. Research on resistance spot welding technology of aluminum alloy[J]. *Automotive Industry*, 2003, 3: 46 – 48.
- [10] 郑强, 陈康华, 刘红卫, 等. 浅谈铝合金的焊接 [J]. *铝加工*, 2003, 26(5): 49 – 50.
- ZHENG Qiang, CHEN Kanghua, LIU Weihong, *et al.* Discussion on welding of aluminum alloy[J]. *Aluminum Processing*, 2003, 26(5): 49 – 50.
- [11] 王艳俊. 轻量化汽车车身铝合金的电阻点焊研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- WANG Yanjun. Resistance spot welding of aluminium alloy for lightweight vehicle body structure[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.
- [12] 袁波. 车身用铝合金的电阻点焊工艺研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- YUAN Bo. Research on resistance spot welding technology of aluminum alloy for automobile body[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [13] ZHANG A, LI Y. Thermal conductivity of aluminum alloys—A review[J]. *Materials*, 2023, 16(8): 2972.
- [14] LUNN F K, APELIAN D. Thermal and electrical conductivity of aluminum alloys: fundamentals, structure-property relationships, and pathways to enhance conductivity[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2025, 924: 147766.
- [15] 钟丽慧, 韩立军, 郭院波. 车身铝板电阻点焊技术发展趋势与分析 [J]. *电焊机*, 2003, 50(6): 1 – 9.
- ZHONG Lihui, HAN Lijun, GUO Yuanbo. Development trend and analysis of resistance spot welding technology for aluminum plate of vehicle body[J]. *Electric Welding Machine*, 2003, 50(6): 1 – 9.
- [16] FUKUMOTO S, LUM I, BIRO E, *et al.* Effects of electrode degradation on electrode life in resistance spot welding of aluminum alloy 5182[J]. *Welding Journal*, 2003(11): 307s – 312s.
- [17] WILLIAMS N T. Suggested topics for future research in resistance welding[J]. *Welding in the World*, 1984(1/2): 28 – 34.
- [18] STEFAN H, MARTIN B, JOHANNES K, *et al.* Electrode wear investigation of aluminium spot welding by motion overlay[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 123(3-4): 749 – 760.
- [19] PARK G H, KUMAR D, PARK S K, *et al.* Electrode life evaluation for varied electrode material composition and geometry in resistance spot welding of aluminum alloys[J]. *Welding in the World*, 2024, 68(10): 2701 – 2712.
- [20] 刘丹. 合金点焊电极的延寿技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- LIU Dan. The study on Prolonging the electrode life of aluminum alloy spot welding[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [21] 徐梅. 点焊铝合金时点焊电极磨损研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2003.
- XU Mei. Research on electrode wear during spot welding of aluminum alloy[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2003.
- [22] 刘丹, 王惜宝, 罗震, 等. 铝合金表面氧化膜对点焊电极磨损的影响 [J]. *焊接技术*, 2005, 34(5): 18 – 20.
- LIU Dan, WANG Xibao, LUO Zhen, *et al.* Effect of aluminium alloy outer oxide films on the loss of electrode during spot welding[J]. *Welding Technology*, 2005, 34(5): 18 – 20.
- [23] RASHID B M, FUKUMOTO S, MEDLEY J B. Influence of lubricants on electrode life in resistance spot welding of aluminum alloys[J]. *Weld Research*, 2007, 86(3): 62 – 70.
- [24] BOOMER D R, HUNTER J A, CASTLE D R. A new approach for robust high productivity resistance spot welding of aluminium[J]. *SAE Transactions*, 2003(112): 280 – 292.
- [25] BENETEAU D J, BENETEAU M J. Resistance spot welding of metal, particularly aluminum: US, 5449878[P]. 1995–09–12.
- [26] 赵志方. 高强度高导电 Cu-Cr-Zr 合金性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2018.
- ZHAO Zhifang. Study on the performance of high strength and high conductivity Cu-Cr-Zr alloy[D]. Shenyang: Shenyang University, 2018.
- [27] 王伟阳, 肖柱, 雷前, 等. 氧化物弥散强化铜合金的研究现状 [J].

- 粉末冶金材料科学与工程, 2021, 26(6): 492 – 499.
- WANG Weiyang, XIAO Zhu, LEI Qian, *et al.* Research progress of oxide dispersion strengthening copper alloys[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2021, 26(6): 492 – 499.
- [28] 代雪琴, 贾淑果, 范俊玲, 等. 高强高导铜合金的强化机理与研究热点 [J]. 材料热处理学报, 42(10): 18-26.
- DAI Xueqin, JIA Shuguo, FAN Junlin, *et al.* Strengthening mechanism and research focus of high strength and high conductivity copper alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 42(10): 18-26.
- [29] 胡芳怡, 郑哲帅, 郑必长, 等. 析出型高性能铜合金的研究进展和展望 [J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45(5): 189 – 196.
- HU Fangyi, ZHENG Zhesuai, ZHENG Bichang, *et al.* Progress and prospect in high-performance copper alloys dominated by precipitation processing[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2022, 45(5): 189 – 196.
- [30] 慕思国. 高强高导 Cu-Cr-Zr 系合金制备新工艺及理论研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- MU Siguo. Study on technology and theory preparing high strength and high conductivity Cu-Cr-Zr alloys[D]. Changsha: Zhongnan University, 2008.
- [31] 韩胜利, 田保红, 刘平. 点焊电极用弥散强化铜基复合材料的进展 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2003, 24(4): 16 – 19.
- HAN Shengli, TIAN Baohong, LIU Ping. Development of oxide dispersion-strengthened copper-based composites for electrode of spot welding[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2003, 24(4): 16 – 19.
- [32] YANG H Y, MA Z C, LEI C H, *et al.* High strength and high conductivity Cu alloys: A review[J]. Science China (Technological Sciences), 2020, 63(12): 41 – 53.
- [33] 王俊豪. 高强高导 CuCrZr 合金的制备与组织性能的研究 [D]. 河北: 燕山大学, 2021.
- WANG Junhao. Investigation on preparation and microstructure and properties of high strength and high conductivity CuCrZr alloys[D]. Hebei: Yanshan University, 2021.
- [34] HAN S L, QIN X D, CAI Y X, *et al.* Properties and fabrication of alumina dispersion strengthened copper alloy with high softening temperature[C]// Materials Science Forum, 2013: 425-431.
- [35] 韩胜利, 蔡一湘, 秦晓东, 等. 高强高导高软化温度 Al_2O_3/Cu 合金的制备及研究进展 [J]. 材料导报, 27(1): 103-107.
- HAN Shengli, CAI Yixiang, QIN Xiaodong, *et al.* Preparation and research progress of high strength, high conductivity and high softening temperature Al_2O_3/Cu alloy[J]. Material Reports, 27(1): 103-107.
- [36] 文靖瑜. 高强高导铜合金制备方法的研究现状及应用 [J]. 金属材料与冶金工程, 2017, 3: 3 – 9.
- WEN Jinyu. Study status and applications of preparation methods of high strength and high conductivity copper alloy[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2017, 3: 3 – 9.
- [37] 侯东健. Cu-Cr-Zr 系高强高导铜合金的时效行为研究 [D]. 南京: 南京理工, 2016.
- HOU Dongjian. Aging behavior of Cu-Cr-Zr copper alloy with high strength and high conductivity[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016.
- [38] 潘振亚. 高强高导 Cu-Cr-Zr 合金组织和性能的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- PAN Zhenya. Study on microstructure and property of high-strength and high-conductivity Cu-Cr-Zr alloys[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [39] 任树杰, 高珊, 吴志生, 等. 铝合金深冷处理现状研究 [J]. 焊接, 2015(4): 10 – 14.
- REN Shujie, GAO Shan, WU Zhisheng, *et al.* Study status of deep cryogenic treatment of aluminum alloys[J]. Welding & Joining, 2015(4): 10 – 14.
- [40] 吴志生, 单平胡, 胡绳荪, 等. 深冷处理的铝合金点焊电极寿命研究 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(3): 146 – 150.
- WU Zhisheng, SHAN Pinghu, HU Shengsun, *et al.* Study on deep cryogenic treatment electrode life for spot welding aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(3): 146 – 150.
- [41] 刘克明, 盛晓春, 李小龙, 等. 深冷处理对冷轧铜合金组织与性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(1): 215 – 221.
- LIU Keming, SHENG Xiaochun, LI Xiaolong, *et al.* Influence of deep cryogenic treatments on microstructure and properties of cold rolled Cu-based alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(1): 215 – 221.
- [42] 刘翠荣, 闫献国, 郭建刚, 等. 深冷处理对铝合金点焊电极烧损的影响 [J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 57 – 60.
- LIU Cuirong, YAN Xianguo, GUO Jiangang, *et al.* Influence of deep cryogenic treatment on electrodes wearing for aluminum alloy spot welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(3): 57 – 60.
- [43] 李旭. 深冷处理对铬锆铜点焊电极性能的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- LI Xu. Influence of deep cryogenic treatment on properties of electrode in coated steel spot welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [44] 王晓峰, 单平, 胡绳荪, 等. 深冷处理点焊电极的组织及力学性能研究 [C]//第十一次全国焊接会议论文集, 上海, 2005.
- Wang Xiaofeng, Shan Pinghu, HU Shengsun, *et al.* Study on the

- structure and mechanical properties of deep cryogenic treatment spot welding electrodes[C]//Proceedings of the 11th National Welding Conference, Shanghai, 2005.
- [45] 王孟君, 姜燕, 张辉, 等. 弥散强化铜电阻焊电极材料的研制 [J]. *矿冶工程*, 2000, 20(2): 54 – 56.
- WANG Mengjun, LOU Yan, ZHANG Hui, *et al.* A study of aluminium oxide dispersion strengthened copper electrodes[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2000, 20(2): 54 – 56.
- [46] 美国金属学会. 金属手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- American Society of Metals. Metals Handbook[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1992.
- [47] 李达人. 焊接电极用抗粘结纳米氧化铝弥散铜合金研究进展 [J]. *电工材料*, 2019, 2: 18 – 24.
- LI Daren. Research progress of anti-bonding nano-alumina dispersed copper alloys for welding electrodes[J]. *Electrical Materials*, 2019, 2: 18 – 24.
- [48] 向紫琪, 雷前, 肖柱, 等. Cu-2.7% Al_2O_3 弥散强化铜合金的微观组织和力学性能研究 [J]. *矿冶工程*, 2014, 34(6): 132 – 148.
- XIANG Ziqi, LEI Qian, XIAO Zhu, *et al.* Investigation on the microstructure and mechanical properties of Cu-2.7% Al_2O_3 dispersion strengthened copper Alloy[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2014, 34(6): 132 – 148.
- [49] 秦晓冬, 蔡一湘, 韩胜利, 等. Al_2O_3 弥散强化 Cu 复合材料研究进展 [J]. *研究与应用*, 2012, 6(4): 224 – 230.
- QIN Xiaodong, CAI Yixiang, HAN Shengli, *et al.* Research progress on Al_2O_3 /Cu composite material[J]. *Materials Research and Application*, 2012, 6(4): 224 – 230.
- [50] 陆艳杰, 康志君, 崔舜, 等. 粉末冶金 Cu-0.6%Al 合金内氧化析出产物的观察 [J]. *粉末冶金技术*, 2006, 24(4): 256 – 258.
- LU Yanjie, KANG Zhijun, CUI Shun, *et al.* Study on internal oxidation product of Cu-0.6%Al alloy prepared by powder metallurgy[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2006, 24(4): 256 – 258.
- [51] 燕鹏, 林晨光, 崔舜, 等. 弥散强化铜合金的研究与应用现状 [J]. *材料导报*, 2011, 25(11): 101 – 106.
- YAN Peng, LIN Chenguang, CUI Shun, *et al.* Present status in research and application on dispersion strengthened copper by in-situ methods[J]. *Material Reports*, 2011, 25(11): 101 – 106.
- [52] 闫志巧, 陈峰, 蔡一湘. 高速压制法制备 Al_2O_3 弥散强化铜合金 [J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(3): 747 – 753.
- YAN Zhiqiao, CHEN Feng, CAI Yixiang. Al_2O_3 dispersion strengthened copper alloy prepared by high-velocity compaction[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(3): 747 – 753.
- [53] 岳灿甫, 王永朝, 郭海霞, 等. 内氧化法制备 Al_2O_3 弥散强化铜合金及其组织与性能 [J]. *材料导报 A: 综述篇*, 2007, 22(4): 7 – 10.
- YUE Canpu, WANG Yongchao, GUO Haixia, *et al.* Al_2O_3 dispersion strengthened copper alloy produced through internal oxidation and its microstructure and property[J]. *Material Reports A: Reviews*, 2007, 22(4): 7 – 10.
- [54] 董仕节, 史耀武, 雷永平, 等. TiB_2 /Cu 复合材料作电极点焊镀锌钢板的失效分析 [J]. *热加工工艺*, 2002, 2: 10 – 15.
- DONG Shijie, SHI Yaowu, LEI Yongping, *et al.* Analysis of electrode failure during resistance spot welding of zinc coated steel using Cu/ TiB_2 electrodes[J]. *Hot Working Technology*, 2002, 2: 10 – 15.
- [55] 于汇泳, 周慧琳, 刘丹. 铝合金汽车车身点焊电极失效机理及延寿技术研究 [J]. *河南工程学院学报*, 2020, 28(1): 55 – 59.
- YU Huiyong, ZHOU Huilin, LIU Dan. The research on the failure mechanism and life extension technology of spot welding electrode for aluminum alloy automobile body[J]. *Journal of Henan Institute of Technology*, 2020, 28(1): 55 – 59.
- [56] 王涛. 镀锌钢板电阻焊涂层电极寿命及应用 [D]. 江苏: 江苏科技大学, 2010.
- WANG Tao. Research on operational life span and applications of coated electrode resistance welding for galvanized steel[D]. Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2010.
- [57] 邹家生, 陈艳青, 沈乔. 镀锌钢板电阻焊电极材料的研究现状及进展 [J]. *焊接技术*, 2009, 38(9): 11 – 14.
- ZOU Jiasheng, CHEN Yanqing, SHEN Qiao. Research status and development of the electrode materials in resistance welding of galvanized steel sheets[J]. *Welding Technology*, 2009, 38(9): 11 – 14.
- [58] ZHANG G T, LI Y B, LIN Z Q. Evolution mechanism of geometry morphology for metallic bump assisted resistance spot welded (MBarSW) joints[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 59: 432 – 443.
- [59] 杜慧敏, 罗震, 敖三三. 5052 铝合金电阻点焊电极形状对电极寿命的影响 [J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(6): 708 – 712.
- DU Huimin, LUO Zhen, AO Sansan. Influence of the electrode shape on service life in 5052 aluminum alloy resistance spot welding[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2019, 53(6): 708 – 712.
- [60] 张敏, 孔谅, 王敏. 电极形状对 AA5182 铝合金电阻点焊性能的影响 [J]. *焊接学报*, 2018, 39(4): 84 – 88.
- ZHANG Min, KONG Liang, WANG Min. Study of electrode tip morphology on the performance in resistance spot welding of AA5182 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(4): 84 – 88.
- [61] LI Y B, WEI Z Y, LI Y T, *et al.* Effects of cone angle of truncated electrode on heat and mass transfer in resistance spot welding[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 65:

- 400 – 408.
- [62] SIGLER D R, CARLSON B E, JANIAK P. Improving aluminum resistance spot welding in automotive structures[J]. *Welding Journal*, 2013, 92(6): 64 – 72.
- [63] SIGLER D R, KARAGOULIS M J. Welding electrode with contoured face: US, 8436269[P]. 2013-05-07.
- [64] SIGLER D R, SCHROTH J G, KARAGOULIS M J. Electrode for spot welding: US, 8525066[P]. 2013-09-03.
- [65] 王艳俊, 朱政强, 杨上陆, 等. 电极形貌对铝合金点焊工艺稳定性的影响 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2017, 40(4): 56 – 59.
- WANG Yanjun, ZHU Zhengqiang, YANG Shanglu, *et al.* Influence of electrode shape on spot welding process stability of aluminum alloy[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2017, 40(4): 56 – 59.
- [66] LI B Y, DENG L, CARLSON B E, *et al.* Effects of electrode surface topography on aluminum resistance spot welding[J]. *Welding Research*, 2018, 97: 120s – 132s.
- [67] SREENIVASULU R. Joining of dissimilar alloy sheets (Al 6063&AISI 304) during resistance spot welding process: a feasibility study for automotive industry[J]. *Independent Journal of Management & Production*, 2014, 5(4): 966 – 983.
- [68] LUBOŠ K, VIŇAŠ J, SPIŠÁK E. Deltaspot as an innovative method of resistance spot welding[J]. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej*, 2012, 84(3/12): 43 – 53.
- [69] CAO Z N, DONG P S. Innovative electrode design and FEA validation of aluminum resistance spot welding[C]// SAE World Congress, Detroit, Michigan, 2006: 1 – 5.
- [70] DE A, DORN L, GUPTA O P. Analysis and optimisation of electrode life for conventional and compound tip electrodes during resistance spot welding of electrogalvanised steels[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2000, 5(1): 49 – 57.
- [71] SCHULTZ H, MATTHES K J. Resistance welding: Measurement of the transition resistance in aluminum materials[C]// DVS 2929. Deutscher Verband für Schweisstechnik e. V Dusseldorf (in German), 1985: 535 – 539.
- [72] LEONE G L, ALTSHULLER B. Improvement on the resistance spot weldability of aluminum body sheet[J]. *SAE Technical Paper Series*, 1984, 840292: 1 – 7.
- [73] SAMUEL E, ARRINGTON Jr. Twisting electrodes improve tip life and weld quality on resistance spot welded aluminum sheet[J]. *SAE Technical Paper Series*, 1995, 950717: 26 – 30.
- [74] CRINON E, EVANS J T. The effect of surface roughness, oxide film thickness and interfacial sliding on the electrical contact resistance of aluminium[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1998, 242: 121 – 128.
- [75] HANA L, THORNTONA M, BOOMERB D, *et al.* Effect of aluminum sheet surface conditions on feasibility and quality of resistance spot welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210: 1076 – 1082.
- [76] THORNTON M C, NEWTON C J, KEAY B F P, *et al.* Some surface factors that affect the spot welding of aluminium[J]. *Transactions of the IMF*, 1997, 75(4): 165 – 170.
- [77] 李青松, 罗震, 李中伟, 等. 铝合金电阻点焊电极延寿技术的研究 [J]. *电焊机*, 2009, 39(7): 59 – 61.
- LI Qingsong, LUO Zhen, LI Zhongwei, *et al.* Research on maintaining service life technology for the electrode of Al-alloy resistance spot welding[J]. *Electric Welding Machine*, 2009, 39(7): 59 – 61.
- [78] 周慧琳, 于汇泳, 刘丹. 铝合金工件表面涂敷涂料对点焊电极寿命的影响 [J]. *焊接设备与材料*, 2013, 42(5): 62 – 64.
- ZHOU Huilin, YU Huiyong, LIU Dan. Effect of surface coating of aluminum alloy workpieces on the life of spot welding electrodes[J]. *Welding Equipment and Materials*, 2013, 42(5): 62 – 64.
- [79] PATRICK E P, AUHL J R, SUN T S. Understanding the process mechanisms is key to reliable resistance spot welding aluminum auto body components[J]. *SAE Technical Paper Series*, 1984, 840291: 1 – 14.
- [80] 李昊. 凸点辅助铝合金点焊工艺研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- LI Hao. Study on bump assisted aluminum resistance spot welding[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [81] ZHANG G T, ZHAO H, XU X H, *et al.* Metallic bump assisted resistance spot welding (MBaRSW) of AA6061-T6 and bare DP590 part II-joining mechanism and joint property[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 44: 19 – 27.
- [82] ZHANG G T, ZHAO H, XU X H, *et al.* Metallic bump assisted resistance spot welding (MBaRSW) of AA6061-T6 and bare DP590 part I printing of metallic bump[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 44: 427 – 434.
- [83] 任涛, 潘青. 阿普拉斯焊接技术及应用 [J]. *电焊机*, 2014, 44(2): 35 – 38.
- REN Tao, PAN Qing. Arplas welding technology and its application[J]. *Electric Welding Machine*, 2014, 44(2): 35 – 38.
- [84] 李克政. 阿普拉斯焊接在白车身的应用及优势 [J]. *制造与工艺*, 2023(12): 156 – 158.
- LI Kezheng. Application and advantages of APRAS welding in body-in-white[J]. *Manufacturing and Process*, 2023(12): 156 – 158.
- [85] 金聪聪, 黄立兵, 黄文彬, 等. 新型铝合金 MIG 焊接头微观组织与力学性能 [J]. *焊接学报*, 2024, 45(7): 74 – 82.
- JIN Congcong, HUANG Libing, HUANG Wenbin, *et al.* Micro-

- structure and mechanical properties of a novel aluminum alloy MIG welded joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2024, 45(7): 74 – 82.
- [86] 张勇, 张涛, 刘宗芳, 等. 预热电流工艺在高强铝合金电阻点焊中的应用研究 [C]//中国机械工程学会焊接学会第十八次全国焊接学术会议论文集-S01 压力焊, 南昌, 2013, 20 – 23.
- ZHANG Yong, ZHANG Tao, LIU Zongfang, *et al.* Research on the application of preheating current process in resistance spot welding for high strength aluminum alloy[C]// Proceedings of the 18th National Welding Academic Conference of the Welding Society of the Chinese Mechanical Engineering Society-S01 Pressure Welding, Nanchang, 2013, 20 – 23.
- [87] LUO Z, AO S S, CHAO Y J, *et al.* Application of pre-heating to improve the consistency and quality in AA5052 resistance spot welding[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24(10): 3881 – 3891.
- [88] WILLIAMS N T, PARKER J D. Review of resistance spot welding of steel sheets-part 2, factors influencing electrode life[J]. *International Materials Reviews*, 2004, 49(2): 77 – 108.
- [89] LI W. Modeling and on-line estimation of electrode wear in resistance spot welding[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2005, 127: 709 – 717.
- [90] WADDELL W, WILLIAM N T. Control of resistance spot welded quality using multi-parameter derived algorithms for zinc coated sheets[C]// Research Report EUR 17859, Commission of European Communities, Technical Steel Research Programme, 1997: 17859.
- [91] 吴松, 王敏, 孔谅, 等. 5052-O 铝合金电阻点焊裂纹产生机理及抑制 [J]. *焊接学报*, 2014, 35(9): 92 – 96.
- WU Song, WANG Min, KONG Liang, *et al.* Mechanism and suppression of cracking in 5052-O aluminum alloy resistance spot weld[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(9): 92 – 96.
- [92] 刘兴全, 张永强, 王威, 等. 多脉冲电阻点焊对镀锌高强汽车板组织性能的影响研究 [C]//第十六次全国焊接学术会议论文集, 镇江, 2011, 358 – 388.
- LIU Xingquan, ZHANG Yongqiang, WANG Wei, *et al.* Study on the effect of multi pulse resistance spot welding on the micro-structure and properties of galvanized high strength automotive sheet [C] //Proceedings of the 16th National Welding Academic Conference, Zhenjiang, 2011, 358 – 388.
- [93] 程方杰, 单平, 廉金瑞, 等. 一种新的适合于铝合金点焊的电流控制法 [J]. *汽车技术*, 2002, 4: 25 – 27.
- CHENG Fangjie, SHAN Ping, LIAN Jinrui, *et al.* A new current control method suitable for aluminum alloy spot welding[J]. *Automotive Technology*, 2002, 4: 25 – 27.
-
- 第一作者: 潘晓倩, 博士; 主要研究方向为材料开发和数字模拟仿真; Email: xiaoqian.pan@nio.com.

(编辑: 周珍珍)

(上接第 129 页)

- [18] SHI R, WANG T, GAO K, *et al.* Achieving low yield ratio in high - strength steel by tuning multiple microstructures[J]. *Steel Research International*, 2022, 93(4): 2100415.
- [19] ZUO Y, AN T, MA C, *et al.* Embrittlement mechanism of 460 MPa-Grade nuclear power steel deposited after heat treatment[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2023, 202: 104920.
- [20] CAO R, CHAN Z, YUAN J, *et al.* The effects of silicon and copper on microstructures, tensile and Charpy properties of weld metals by refined X120 wire[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2018(7): 350 – 362.
- [21] 曹志龙, 朱浩, 安同邦, 等. 1 000 MPa 级高强钢熔敷金属强化机理分析 [J]. *焊接学报*, 2023, 44(7): 116 – 122.
- CAO Zhilong, ZHU Hao, AN Tongbang, *et al.* Analysis of the strengthening and toughening mechanism of deposited metal of 1 000 MPa grade high strength steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(7): 116 – 122.
- [22] 焦继军, 曹睿, 李义民, 等. 焊后热处理对 Q690 高强钢焊缝金属冲击韧性的影响 [J]. *材料导报*, 2025, 39(4): 131 – 138.
- JIAO Jijun, CAO Rui, LI Yimin, *et al.* Effect of Post-welding Heat Treatment on Impact Toughness of Q690 High Strength Steel Welded Metal[J]. *Materials Reports*, 2025, 39(4): 131 – 138.
-
- 第一作者: 曹志龙, 硕士; 主要从事钢铁材料焊接性及焊接材料的研究; Email: zhilongcao@126.com.
- 通信作者: 安同邦, 博士, 高级工程师; Email: anran30002000@sina.com.

(编辑: 周珍珍)