

# 深冷处理的铝合金点焊电极寿命研究\*

吴志生 单平 胡绳荪 廉金瑞 王晓峰

(天津大学材料科学与工程学院 天津 300072)

刘翠荣 杨新华

(太原科技大学材料学院 太原 030024)

摘要：为了提高铝合金点焊电极寿命，提出了点焊电极的深冷处理方法。采用不同深冷处理工艺参数加工了点焊电极，用这些电极进行了铝合金点焊电极寿命试验，比较了深冷处理电极与未深冷处理电极寿命，观测、比较了深冷处理前后点焊电极端面、焊点表面的宏观形貌，观察了深冷处理电极与未深冷处理电极微观组织，测试了深冷处理电极与未深冷处理电极物理性能。试验结果表明：深冷处理改变了电极微观组织，改善了电极导电、导热性能，提高了点焊电极寿命，使电极寿命由原来的 620 点提高到 2 145 点。

关键词：深冷处理 铝合金 点焊 电极寿命

中图分类号：TG457

## 0 前言

汽车轻量化并降低油耗已成为汽车工业发展的重要方向，采用轻质材料是减轻汽车重量的有效措施之一<sup>[1]</sup>。铝合金是汽车制造业采用的主要轻质材料之一，在相同刚度和强度条件下，采用铝合金轿车车身可以减少车体重量 60% 左右<sup>[2]</sup>。但铝合金点焊存在电极寿命低、飞溅大、焊点表面形差及点焊接头质量不稳定等问题<sup>[3]</sup>。对于低碳钢点焊，电极寿命可以达到几千个焊点，而点焊铝合金一般仅能达到几十个焊点<sup>[4]</sup>。铝合金点焊电极寿命的显著下降，使电极频繁修整及更换，严重降低生产率，导致点焊质量不稳定并增加电极材料消耗。

为提高电极寿命，曾采取电极表面改性、铝合金板材表面处理、优化点焊工艺参数及改进点焊设备等措施<sup>[5]</sup>。提出了提高电极寿命的电极深冷处理方法，进行了深冷处理电极的铝合金点焊电极寿命试验，研究了深冷处理提高电极寿命的原因。

## 1 深冷处理的点焊电极寿命试验

对经过 -150 ℃, 2 h、-150 ℃, 4 h、-170 ℃, 2 h 及 -170 ℃, 4 h 深冷处理电极进行了电极寿命试验，对 -170 ℃, 4 h 深冷电极及未深冷处理电极还进行了点焊接头拉剪破坏试验，观测了电极深冷前后焊点表面宏观形貌及电极端面形貌。

### 1.1 试验材料及设备

电极寿命试验用 LF2 铝合金，厚度 0.8 mm，强度 104 MPa，铝合金经酸洗处理。依据日本标准 JISC9304 - 1986 选择电极尺寸及形状如图 1 所示。铬钴铜电极材料主要成分为含 Cr 0.35%、Zr 0.12%。熔核质量评定级别及检测方法依据日本标准 JISZ3140 - 1989，依 JISZ3136 - 1978 确定的点焊接头拉剪试验片形状及尺寸如图 2 所示。

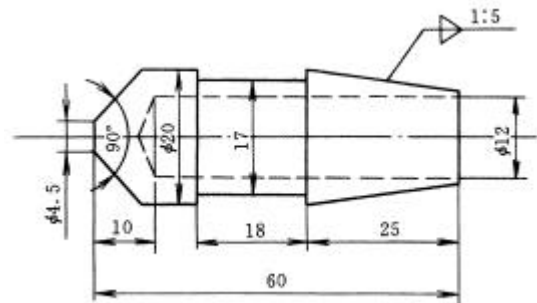


图 1 电极形状尺寸

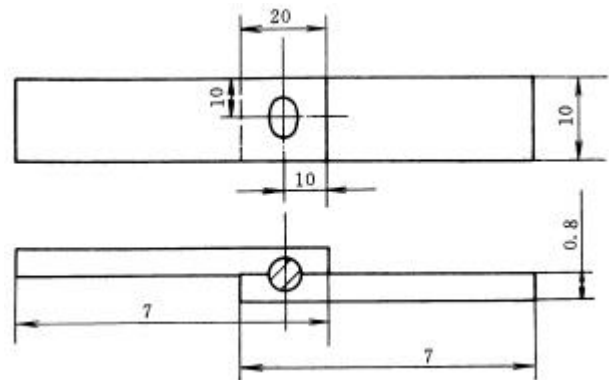


图 2 试验片形状及尺寸

\* 国家自然科学基金(50175080)、中国博士后基金(2004035146)和教育部高等学校博士学科专项科研基金(2005612)资助项目。20040409 收到初稿，20040913 收到修改稿

点焊机为 Panasonic 型 YR-700CM2 单相交流固定式电阻焊机, 电流测试仪为 MIYACHI MM-326B。采用万能电子测试仪进行拉剪试验。

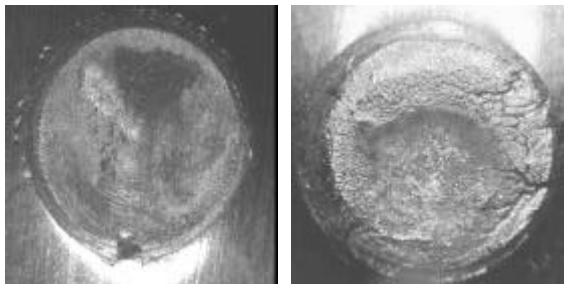
电极寿命试验点焊规范参数：焊接电流 23 kA, 焊接时间 3 周, 维持时间 5 周, 休止时间 3 周, 预压时间 6 周, 电极压力 3 724 N, 冷却水流量 3 L/min。

### 1.2 未深冷处理电极寿命试验

电极寿命试验结果及点焊粘附、飞溅等情况如表 1 所示。每焊 100 焊点观测焊点表面宏观形貌, 第 1 及第 620 焊点宏观形貌如图 3 所示。电极端面形貌如图 4 所示, 电极寿命曲线如图 5 所示。

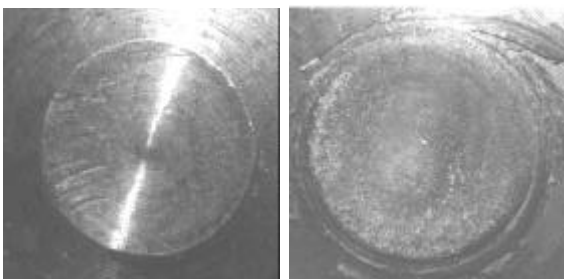
表 1 未处理电极点焊试验结果

电极材料	电极端面直径 d/mm	粘附及 飞溅	表面质量	电极寿命 N/点
CrZr 铜	5.45	较重	较差	620



(a) 焊点 1 ×7 (b) 焊点 620 ×7

图 3 焊点表面宏观形貌



(a) 点焊前 ×7 (b) 点焊后 ×7

图 4 点焊前后电极端面形貌

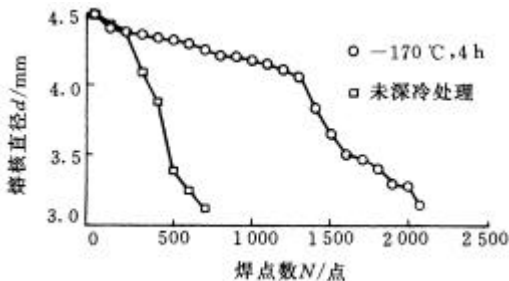


图 5 深冷处理前后的电极寿命

表 1、图 3 及图 4 显示：点焊酸洗铝合金, 第 1 焊点表面即粘附铝合金, 存在严重飞溅, 焊点表面粗糙, 随焊点数增加, 焊点表面质量恶化, 焊点达到 620 点时, 焊点表面严重恶化; 电极端面尺寸变大, 由 4.5 mm 达到 5.45 mm, 电极边缘存在飞边,

电极端面有大量飞溅粘附物, 电极端面已严重变形、变大, 电极寿命为 620 点。

铝合金点焊过程中, 电阻热作用下的铜合金电极端面与工件表面熔化的铝发生反应, 生成了铜铝合金薄层, 使电极局部导电性下降, 导致局部温升增大, 瞬时温升可达 600 以上<sup>[6]</sup>。铬锆铜的软化温度 550 , 因此, 在高温作用下, 电极端部的铜合金发生再结晶而软化, 使材料强度下降, 在反复的热、压力作用下, 电极端部发生严重变形。

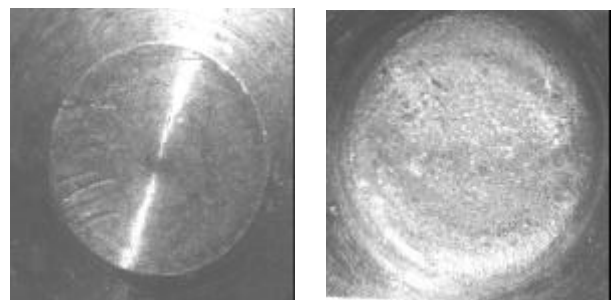
图 5 中未深冷处理电极寿命曲线表明：在 100 点前, 焊点熔核直径比较稳定, 150 点以后熔核直径随焊点数增加变化较大, 熔核直径变得很不稳定。这是因为电极不断被烧损与压溃变形, 表面接触电阻不稳, 不稳的表面接触电阻使焊接过程不稳定, 表现为熔核直径不稳定, 使焊点质量不稳。

### 1.3 深冷处理电极寿命试验

深冷处理的点焊电极寿命试验结果如表 2 所示。-170 , 4 h 深冷电极端面形貌在点焊前后如图 6 所示。每焊 400 焊点观测了焊点表面宏观形貌, 第 1 焊点和第 2 145 个焊点表面宏观形貌如图 7 所示。深冷处理电极寿命曲线如图 5 所示。

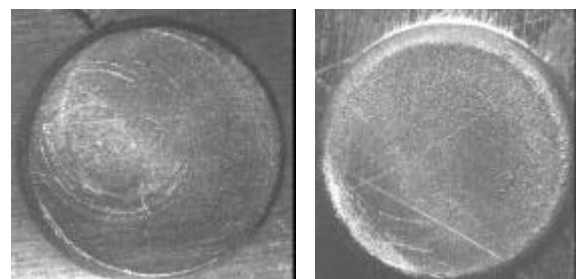
表 2 深冷处理电极寿命试验结果

深冷工艺	电极端面直径 d/mm	粘附及 飞溅	表面 质量	电极寿命 N/点
-150 , 2 h	5.32	轻微	良好	1 600
-150 , 4 h	5.41	轻微	良好	1 650
-170 , 2 h	5.58	轻微	良好	2 050
-170 , 4 h	5.73	轻微	良好	2 145



(a) 点焊前 ×7 (b) 点焊后 ×7

图 6 点焊前后深冷电极端面形貌



(a) 焊点 1 ×7 (b) 焊点 2 145 ×7

图 7 深冷处理电极所焊焊点表面形貌

由表 2 和图 4、6 可以看出,虽然深冷处理电极端面产生了变形,但电极端面变形均匀,保持规则形状。未处理电极端面变形严重,周围产生了大量飞边。 $-170^{\circ}\text{C}$ , 4 h 深冷处理电极焊接结束时电极端面仍较圆整,未出现粘附物,电极端面直径由原来的 4.5 mm 扩大到 5.73 mm,变化较小。

表 2 和图 5、7 表明,深冷处理电极点焊过程平稳,飞溅较少,焊点表面比较光滑平整,未出现粘附物,焊点表面质量稳定。随着深冷处理温度下降及深冷处理时间延长,电极寿命增加。在深冷处理温度为  $-170^{\circ}\text{C}$ 、深冷处理时间为 4 h 时,电极寿命达到 2 145 点。点焊过程中,深冷处理电极端面扩大速度比未深冷处理电极的慢,变形比较均匀,焊接终了时电极端面尺寸扩大较小,在前 1 200 点,随焊点数变化,深冷处理电极所焊熔核直径比较稳定。 $-150^{\circ}\text{C}$ , 2 h 与  $-150^{\circ}\text{C}$ , 4 h 的电极寿命分别为 1 600 点与 1 650 点,电极寿命基本相同。这主要是由于铜导热性很好,电极直径仅为 20 mm 并且空心,在冷箱中很快冷透,达到与周围环境相同温度,电极获得一定的组织及性能。 $-170^{\circ}\text{C}$ , 2 h 深冷处理电极寿命 2 050 点,其焊接工艺过程表现与  $-170^{\circ}\text{C}$ , 4 h 的深冷处理电极的表现相同,电极经更低温深冷处理后,焊接过程更为稳定,在 1 000 点范围内熔核直径随焊点数增加而变化较小,熔核直径比较稳定。

采用  $-170^{\circ}\text{C}$ , 4 h 的深冷处理电极与未深冷处理电极的点焊接头拉剪破坏载荷随焊点数变化的试验曲线如图 8 所示。

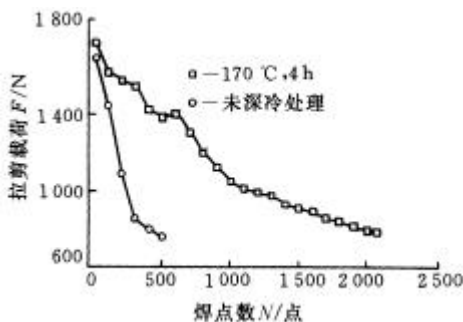


图 8 点焊接头拉剪破坏载荷与焊点数关系

未深冷处理电极点焊的第 1 焊点拉剪破坏载荷为 1 596.84 N, 电极寿命 620 焊点的拉剪破坏载荷为 658.85 N; 采用  $-170^{\circ}\text{C}$ , 4 h 的深冷处理电极点焊第 1 焊点的拉剪破坏载荷为 1 683.14 N, 电极寿命 2 145 焊点的拉剪破坏载荷为 686.90 N。

深冷处理与未深冷处理电极所焊焊点的拉剪破坏载荷  $F$  随焊点数  $N$  的变化及图 5 中焊点熔核直径  $d$  随焊点数  $N$  的变化结果都表明,深冷处理使铝

合金点焊电极寿命显著改善,使点焊过程的粘附及飞溅程度显著下降,焊点表面比较光滑平整。在相同深冷处理温度下,电极寿命相近,与深冷处理保温时间相比,电极深冷处理温度对提高电极寿命影响较大。

## 2 深冷处理的铝合金点焊电极性能

试验采用气体法深冷处理工艺,将电极装入冷箱中,控制降温速率,缓慢将电极降到保温温度,保温一定时间,按升温曲线缓慢升到室温。本文的深冷处理工艺参数为降温速率  $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,保温温度  $-150^{\circ}\text{C}$ 、 $-170^{\circ}\text{C}$ ,保温时间 2 h、4 h,保温后缓慢升至室温。

依据国家标准 GB3048.2-1993 “金属材料电阻率试验方法”,采用直流电桥法测试了深冷处理前后点焊电极电阻率。用布氏硬度机测试了深冷处理后的电极硬度。用磨损试验机测试了深冷处理电极的耐磨性。试验测试结果如表 3 所示。

表 3 电极性能测试结果

深冷处 理工艺	未处理	$-150^{\circ}\text{C}$ 和 2 h	$-150^{\circ}\text{C}$ 和 4 h	$-170^{\circ}\text{C}$ 和 2 h	$-170^{\circ}\text{C}$ 和 4 h
电阻率 $r/(\Omega \cdot \mu\text{m})$	1.801	1.425	1.362	1.049	0.976
硬度 HB	80	82	82	82	83
耐磨系数 $K/$ ( $\text{kPa} \cdot \text{mg}^{-1}$ )	0.23	0.20	0.18	0.16	0.14

由表 3 可以看出:随深冷处理温度下降及深冷处理时间延长,电阻率逐渐下降,经过  $-170^{\circ}\text{C}$ , 4 h 深冷处理的电极电阻率较未深冷处理电极下降二分之一,深冷处理使电极电阻率显著下降,导电能力大幅度提高。随深冷处理温度下降及深冷处理时间延长,电极耐磨性显著提高。深冷处理对电极硬度影响不大。

金属材料导电、导热的载体皆是自由电子,电子在金属导电、导热过程起主导作用。因此,电导率高的金属热导率也高。根据罗伦兹关系式<sup>[7]</sup>

$$\frac{l}{sT} = L$$

式中  $T$ ——热力学对温度(K)

$s$ ——电导率(S/m)

$l$ ——热导率 [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]

$L$ ——罗伦兹常数( $\text{W}/\text{K}^2$ )

电极电导率提高一倍,其热导率也提高一倍。

### 3 深冷处理电极的微观组织

深冷处理与未深冷处理电极试样扫描电镜 (SEM) 背散射观测结果如图 9 所示。

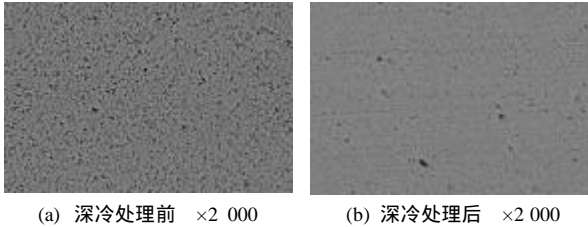


图 9 深冷处理前后电极 SEM 背散射形貌图

图 9 表明, 未深冷电极基体存在较多显微孔洞, 致密性较差, 显微孔洞使材料点阵结构完整性与材料连续性受到破坏。深冷电极显微孔洞数量比未深冷电极的明显减少, 电极基体致密性明显提高。

深冷处理前后电极铜合金中 Cr、Zr 元素分布状态的 SEM 扫描分析结果如图 10、11 所示。

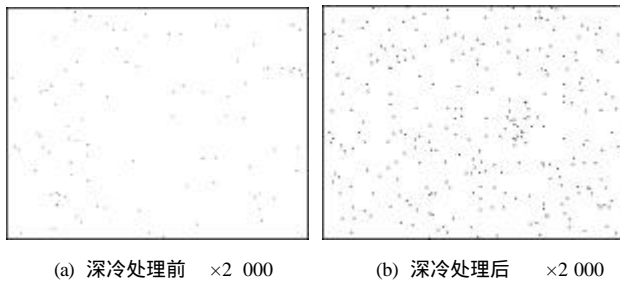


图 10 深冷处理前后电极中 Cr 元素分布

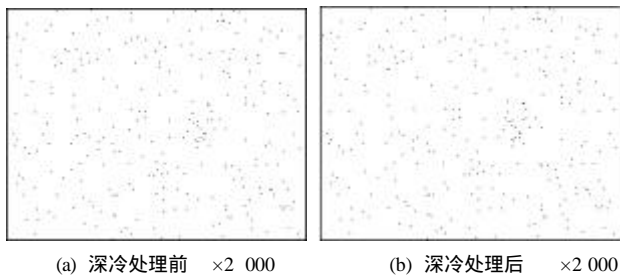


图 11 深冷处理前后电极中 Zr 元素分布

图 10、11 显示, 电极深冷处理前后试样中铬、锆元素分布发生明显变化, 未深冷处理电极基体中游离 Cr、Zr 颗粒数量较少, 作为合金元素部分溶解于铜合金电极基体, 而深冷处理电极铜合金基体出现了较多弥散分布的 Cr、Zr 颗粒。因为深冷处理使 Cr、Zr 元素在电极铜合金中溶解度下降, 过饱和 Cr、Zr 元素从电极铜合金中析出, 析出的 Cr、Zr 元素呈现弥散分布。

采用 X 射线衍射方法对深冷处理前后电极铜合金试样晶粒大小进行了测试, 电极试样 X 射线衍射

晶粒大小测试分析报告如表 4 所示。

表 4 X 射线衍射分析报告

测试参数	未深冷处理电极	深冷处理电极
试验样品半高宽 $b/cm$	4.0	4.5
试验样品角度 $2q/(^\circ)$	43.28	43.36
标准样品半高宽 $b/cm$	3.0	3.0
标准样品角度 $2q/(^\circ)$	26.6	26.6
(1 1 1)晶面平均晶粒尺寸 $d/nm$	159.7	82.9

表 4 表明, 深冷处理前衍射线半高宽 4 cm, 深冷处理后衍射线半高宽 4.5 cm, 衍射线宽化。对 X 射线衍射谱图测算, 其铜峰处理前后半高宽之比为 0.88。深冷处理前平均晶粒大小为 159.7 nm, 深冷处理后平均晶粒大小为 82.9 nm, 晶粒明显细化。

### 4 深冷处理提高电极寿命的原因

导体中自由电子在定向迁移过程中, 不断与正离子发生碰撞, 使电子迁移受阻, 从而产生电阻。若金属中含有少量杂质, 由于其杂质原子使金属正常结构发生畸变, 引起电子额外散射导致电阻率增高。固体中溶质和溶剂原子在微观区域分布不均匀即固体存在原子偏聚区域会强烈地散射电子, 使不均匀固体电阻值提高。

热传导过程是材料内部能量传输过程。固体溶质(杂质)原子引起的弹性畸变、位错和点阵缺陷等都会引起电子散射而使导热系数下降。当固体合金出现有序结构时, 由于点阵周期性增强, 使传导电子的平均自由程增大, 因而其导热系数将比无序时明显增大。此外, 倘若金属内部有弥散分布的孔洞, 材料导热系数将降低。

电极铜合金 SEM 分析表明: 未深冷处理电极基体存在较多显微孔洞, 因此, 使定向移动的电子受到剧烈散射, 导致材料导电性及导热性下降。深冷电极基体的显微孔洞数量显著减少, 基体致密程度明显提高, 因此, 改善了电极导电、导热与抗变形能力; 由于铬、锆元素在铜基体中质量分数很小, 电极材料属于低浓度固溶体, 低浓度固溶体的电阻服从马提森定则<sup>[5]</sup>, 电极铜合金中固溶的铬、锆经深冷处理从基体析出, 降低了基体溶质原子浓度, 提高铜基体纯度, 从而降低溶质元素产生的附加电阻, 改善电极铜合金导电、导热能力; 金属材料屈服强度与晶粒直径平方根倒数呈线性关系, 晶界越多即晶粒越细小, 则强化作用越强<sup>[8]</sup>。深冷处理后, 铜合金晶粒明显细化, 深冷处理将使电极强度提高。

## 5 结 论

(1) 深冷处理明显提高电极基体致密度, 改变电极基体合金元素分布, 细化铜合金晶粒, 使电极电阻率显著下降。

(2) 深冷处理使电极耐磨性明显提高。随深冷处理温度下降及深冷处理时间延长, 电极硬度不变。

(3) 点焊接头拉剪载荷破坏试验及焊点熔核直径随焊点数变化试验皆表明: 深冷处理显著提高了电极寿命。其原因为深冷处理使电极导电、导热能力加强, 使点焊过程中的电极产热减少, 散热加快, 并使电极抗变形能力、耐磨性能提高。

### 参 考 文 献

- 1 曲晓峰. 轻质材料在汽车上的应用. 中国机电行业, 2002(7): 37 ~ 38
- 2 邓泽英. 汽车材料发展趋势. 上海汽车, 2001(10): 26 ~ 29
- 3 Bob I. Auto industry gears up for aluminum. Welding Journal, 2000, 79(10): 63 ~ 68
- 4 程方杰. 铝合金点焊接触电阻与电极烧损: [博士学位论文. 天津: 天津大学, 2002
- 5 Micheal A. Nickel plated electrodes for spot welding aluminum. SAE Trans., 1976, 76167: 780 ~ 794
- 6 刘尧铭. 点焊电极材料及结构设计. 汽车技术, 1995(5): 3 ~ 5
- 7 徐京娟, 邓志煜, 张同俊. 金属物理性能分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1988
- 8 崔忠圻. 金属学与热处理. 北京: 机械工业出版社, 1989

## STUDY ON DEEP CRYOGENIC TREATMENT ELECTRODE LIFE FOR SPOT WELDING ALUMINUM ALLOY

Wu Zhisheng Shan Ping Hu Shengsun  
Lian Jinrui Wang Xiaofeng

(School of Materials Science and Engineering,  
Tianjin University, Tianjin 300072)

Liu Cuirong Yang Xinhua

(School of Materials Science and Engineering,  
Taiyuan University of Science and Technology,  
Taiyuan 030024)

**Abstract :** To improve electrode life of resistance spot welding of aluminum alloy LF2, the deep cryogenic treatment technology of electrodes is put forward. Electrodes are treated by deep cryogenic treatment with different deep cryogenic treatment parameters. Deep cryogenic treatment electrodes life experiment is carried out and the experimental results are compared with the non-deep cryogenic treatment electrodes life experiment ones. The properties of the deep cryogenic treatment electrodes and the non-deep cryogenic treatment electrodes are tested. The SEM area scanning and the SEM back scattering of electrodes are carried out. The grain degree of deep cryogenic treatment electrodes and the non-deep cryogenic treatment electrodes are tested by X-ray diffraction. The reason of deep cryogenic treatment improving electrode life for resistance spot welding of aluminum alloy is studied. The experimental results show that deep cryogenic treatment makes Cr, Zr in deep cryogenic treatment electrodes emanate dispersedly and makes the grain of deep cryogenic treatment electrodes smaller than non-cryogenic treatment ones, so that the electrical conductivity and the thermal conductivity of deep cryogenic treatment electrodes are improved very much, which make electrode life for spot welding aluminum alloy improve from 620 to 2 145.

**Key words:** Cryogenic treatment Aluminum alloy  
Spot welding Electrode life

作者简介: 吴志生, 男, 1963 年出生, 教授, 博士后。主要研究方向为焊接过程控制自动化, 发表论文 20 余篇。

E-mail: wuzhisheng@tyhmi.edu.cn