

汽车用5182-H111铝合金电阻点焊铜电极寿命研究

刘庆永, 李英东, 毛晓东, 赵丕植

中铝材料应用研究院有限公司 北京 102209

摘要: 针对车身常用1.2mm厚5182-H111铝合金板材料电阻点焊过程中的铜电极寿命进行研究, 揭示了影响铜电极寿命的关键因素在于铝-铜之间的界面反应, 并在“铜电极材料抗高温软化性能-焊接过程中的软化通道-铜电极寿命”之间建立关联。分别研究了铜电极种类及成分、铝合金表面状态对电极寿命的影响。结果表明: 将5182-H111轧制态板材在相同焊接参数下焊接, 不同铜电极种类及成分对应的寿命排序为: C15760 > C18200 > C18150 > C18140 > C15715, 其中, C15760对应铜电极寿命为83点, C18200对应铜电极寿命为61点, C18150对应铜电极寿命为48点, C18140铜电极对应电极寿命为43点, C15715对应铜电极寿命为38点; 以C15760铜电极开展测试, 在各自表面状态对应的最优工艺参数下, 不同铝合金表面状态对应的电极寿命排序为: 钝化态板材 > 清洗态板材 > 轧制态板材, 其中, 钝化态铝合金板材电极寿命为380点, 清洗态铝合金板材电极寿命为260点, 轧制态铝合金板材电极寿命为83点。

关键词: 5182-H111铝合金; 电极寿命; 铜电极; 表面状态

Study on life of resistance spot welding copper electrode of 5182-H111 aluminum alloy for automobile

LIU Qingyong, LI Yingdong, MAO Xiaodong, ZHAO Pizhi

Chinalco Materials Application Research Institute Co., Ltd., Beijing 10029, China

Abstract: The life of copper electrode during resistance spot welding of 5182-H111 aluminum alloy with thickness of 1.2mm is studied, and the interface reaction between aluminum and copper is the key factor affecting the life of copper electrode, and the relationship between “resistance of copper electrode material to high temperature softening - softening channel during welding - life of copper electrode” is established. The relationship between resistance of copper electrode material to high temperature softening - softening channel during welding - life of copper electrode is established. The effects of the type and composition of copper electrode and the surface state of aluminum alloy on the electrode life were studied. The results show that when 5182-H111 rolled sheet is welded under the same welding process parameters, the corresponding life sequence of electrodes with different copper electrode types and components is as follows: C15760 > C18200 > C18150 > C18140 > C15715. The corresponding electrode life of C15760 copper electrode life is 83 points, C18200 copper electrode life is 61 points, C18150 copper electrode life is 48 points, C18140 copper electrode is 43 points, and C15715 copper electrode life is 38

基金项目: 国家重点研发计划项目: 舱室高强耐蚀铝合金挤压型材关键技术 (2021YFB3704203)。

points. C15760 copper electrode was used for testing. Under the optimal process parameters corresponding to their respective surface states, the electrode life sequence corresponding to different aluminum alloy surface states was as follows: Passivated plate > clean plate > rolled plate, the electrode life of passivated aluminum alloy plate is 380 points, the electrode life of cleaned aluminum alloy plate is 260 points, and the electrode life of rolled aluminum alloy plate is 83 points.

Keywords: 5182-H111 aluminum alloy; Electrode life; Copper electrode; Surface state.

1 序言

汽车轻量化是当前的发展趋势，若要实现轻量化，则主要有3种途径：应用高强轻质材料、优化车身结构设计、采用先进应用技术手段^[1]。原有钢制车身的连接方式以电阻点焊为主，在当前“以铝代钢”的研究进程中，铝制白车身的电阻点焊连接技术受到了严峻的挑战。原因为铝合金应用铜电极进行焊接时，在界面处会出现 Al_2Cu 和 Al_4Cu_9 等脆性金属间化合物，使铜电极表面随着焊接次数的增加逐渐发生磨损，继而增加焊点表面污损程度，降低焊点熔核直径和焊点力学性能，从而造成电极寿命的下降^[2]。

铝合金电阻点焊的技术难点有以下两个方面。

1) 铜电极与铝合金基体焊接时发生黏连现象，造成铜电极的连续打点性能差^[3]，原因有以下两点。

其一，铝合金表面存在组织致密、熔点极高、导电性能极差的氧化膜，焊接过程中产生大量接触电阻，根据焦耳定律产热公式，铜电极与铝合金板材间因产生大量电阻热而形成高温环境，铝合金与铜在高温下会形成低熔点（548℃）的Al-Cu金属间化合物，该共晶反应使铜电极与铝合金的表面发生强烈黏连，因此在铝合金电阻点焊时铜电极烧损严重。

其二，与此同时，新生成的Al-Cu金属间化合物电阻率较大（约为铜的5倍），因此增大了电极与铝合金的接触电阻，加剧了铜电极的烧损程度^[4]。

2) 铝合金电阻点焊接头力学性能较差。原因有以下几点。

其一，焊点热影响区组织软化，如：5系铝合金出现晶粒长大、6系铝合金出现晶粒长大和强化相回溶等。

其二，接头的熔核位置易形成缩松和气孔，热

影响区易形成液化裂纹。

其三，由于工件表面有强氧化物，因此在焊接过程中会造成短暂通电，导致结合面熔合不完整，减小了熔核的有效直径。

其四，铝合金热膨胀系数较大（约为钢的2倍），点焊熔化时的热膨胀较大，易在工件接触面间造成喷溅，在电极与工件间造成飞溅，继而带走部分热量和熔化金属，从而影响熔核直径的大小^[5]。

针对现有电阻点焊的技术难点，本文计划从Al-Cu界面层控制的角度进行优化，以提高焊点力学性能和电极寿命。影响Al-Cu界面反应的因素主要有3个方面。

1) 焊接参数。目前，在主机厂和行业标准中，往往要求在工艺窗口内的焊接中值电流条件下对焊点的电极寿命进行测定，无法进行调节。

2) 铜电极的种类和成分。目前，市场上常用的铜电极材料主要为CuCrZr电极、CuCr电极、Cu- Al_2O_3 电极等。

3) 铝合金材料的表面状态。目前，主要为冷轧态、清洗态和钝化态板材3种。

因此，本文主要研究铜电极种类和铝合金表面状态对铜电极寿命的影响规律。

2 试验过程

2.1 试验材料

试验采用中铝瑞闽股份有限公司生产的1.2mm厚5182-H111铝合金板材，其化学成分和力学性能见表1。其制造工序为：熔铸→均热→热轧→冷轧

表1 5182-H111铝合金化学成分及力学性能

化学成分（质量分数，%）					力学性能		
Mg	Si	Cu	Mn	Fe	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 （%）
4.5	0.2	0.35	0.3	0.35	115	267	12

→中间退火→冷轧→表面预处理。试验采用苏州中色华人铜业生产的铜铬锆（CuCrZr）电极、铜铬（CuCr）电极，以及常州诺而达公司生产的氧化铝弥散铜（Cu-Al₂O₃）电极，电极成分及性能见表2。以上试验材料均满足试验要求。

表2 铜电极成分及性能

铜电极种类	牌号	成分 (质量分数, %)	显微硬度 HV	电导率 (%IACS)	软化温度 /℃
CuCrZr	C18140	Cr: 0.49 Zr: 0.02	163.5	83.9	590
CuCrZr	C18150	Cr: 0.92 Zr: 0.064	169.69	81.11	596
CuCr	C18200	Cr: 1.0	172.07	83.25	603
Cu-Al ₂ O ₃	C15715	Al: 0.1	113.3	94.84	1040 (上限)
Cu-Al ₂ O ₃	C15760	Al: 0.53	161.2	78.3	1040 (上限)

2.2 表面预处理方法

铝合金板材轧制完成后依次进行清洗、钝化处理。本次试验所用板材分为3种表面状态，分别为轧制态（未表面处理）、清洗态及钝化态。其中清洗工艺分为4个工步，依次为碱洗、水洗、酸洗、纯水洗。钝化态样品经过清洗、钝化两道工序处理。对清洗工艺而言，碱洗采用专业碱洗溶液，溶液温度为50℃，碱洗时间为8s。水洗采用自来水冲洗，水温控制在20~30℃，水洗时间为6s。酸洗采用专业酸洗溶液，酸洗温度为50℃，酸洗时间为8s。纯水洗采用去离子水冲洗，温度控制在20~30℃，时间为6s。钝化处理采用钝化专用溶液，处理温度为35℃，处理时间为4s。钝化后进行烘干处理，在180℃下烘干30s。铝合金板材完成表面处理，将其加工为150mm×50mm×1.2mm的铝合金样片。

2.3 材料表面分析

(1) 表面成分分析 采用GD-Profiler 2™型辉光放电光谱仪测试3种不同表面状态的5182-H111铝合金表面元素含量随深度的变化趋势，阳极采用4mm直径铜阳极，其他参数为压力700Pa、功率40W、吹扫时间12s、背景采集时间5s、预积分时间30s、采集时间10s。

(2) 组织形貌分析 采用JSM-7800F型扫描电镜观察3种不同表面状态的5182-H111铝合金表面形貌。

(3) 表面粗糙度 采用SENSOFAR光学轮廓仪对3种不同表面状态的5182-H111铝合金表面轮廓进行图像采集，采用SensoVIEW软件进行图像分析并计算表面粗糙度数值。

2.4 电阻点焊试验

(1) 电阻点焊过程 本试验选用焊接设备为安徽日基焊接设备有限公司生产的PWF2AM-300型中频直流固定式点焊机，如图1所示。采用行业常用的端面直径6mm的球形平端面电极，电极帽形状如图2所示。开展焊点抗剪拉伸性能测试时所用的试片尺寸为150mm×50mm，焊点抗剪拉伸试样形状如图3所示。焊前通过酒精擦拭来清除铝合金试片正反面的杂质及油污，保证待焊面清洁。



图1 中频直流固定式点焊机

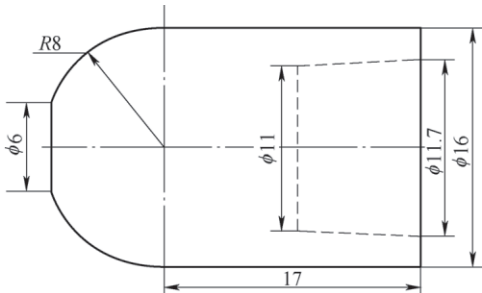


图2 电极帽形状

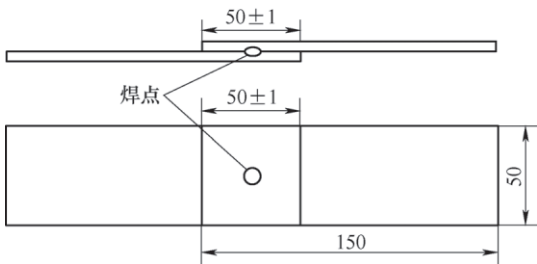


图3 焊点抗剪拉伸试样形状

(2) 焊点抗剪拉伸试验 采用AG-XPlus-100kN 伺服万能试验机, 将电阻点焊抗剪拉伸试样夹持到力学性能试验机上, 夹持长度 $\geq 30\text{mm}$, 以 10mm/min 的速率对试样进行拉伸, 取5个平行试样, 记录载荷-位移曲线, 并记录最大失效载荷和最大失效位移。

(3) 铜电极寿命测试方法 参照美国焊接协会AWS D8.2M: 2017《Specification for Automotive Weld Quality-Resistance Spot Welding of Aluminum》中对于电极寿命的评价指标, 首先通过焊接工艺窗口测试确定铝合金板材可用的焊接电流范围, 取焊接电流范围的中值作为电极寿命测试电流, 依次开展焊点的抗剪拉伸性能测试, 并分别记录首个焊点和后续10的倍数焊点的抗剪拉伸性能。随着测试焊点数量的增加, 电极帽表面污损程度增加, 焊点抗剪拉伸性能逐渐减小, 以焊点抗剪拉伸性能降低至最初焊点力学性能的80%对应的电极打点数为电极寿命点。

3 结果与分析

3.1 铜电极与铝合金界面反应情况分析

根据产热公式 $Q=\eta I^2 R t$ (η 为效率系数)可知, 在相同焊接电流条件下, 电阻越大, 产热量越大, 在铝合金焊接过程中, 不同材料的电阻率排序为: 轧制态铝合金表面氧化膜 $>$ Al-Cu金属间化合物 $>$ TiZr钝化膜 $>$ Al基体 $>$ CuCrZr电极 $>$ Cu- Al_2O_3 铜电极。因此, 在电阻点焊初期过程中, 热量生成位置主要集中在铝合金和铜电极的搭接面, 电阻点焊产热如图4所示。由图4可知, 板材中间处的产热为形成熔核的热量, 板材与上下电极接触的产热则会引起铜电极和铝合金板的界面化学反应, 影响电极寿命。

在采用行业内常用的中频直流电阻点焊设备进

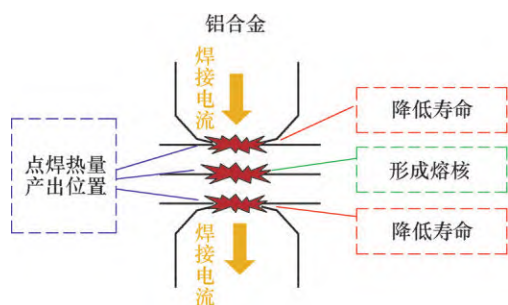


图4 电阻点焊产热示意

行焊接时, 电流极性会导致上下铜电极的磨损程度不同, 如图5所示。由图5可知, 在电阻点焊过程中焊接电流会引起电子的迁移, 且电子的移动具有方向性, 从铜负极撞向铝合金板, 再从铝合金板撞向铜正极, 这种撞击能量使电极帽正负电极的损耗不同。目前, 行业内的普遍情况为正极的磨损程度超过负极的30%, 因此本次的电极寿命测试围绕铜电极正极的变化开展。

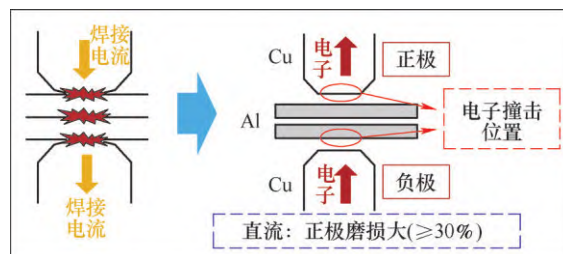


图5 电流极性对电极磨损的影响示意

3.2 不同铜电极种类对电极寿命的影响及分析

针对1.2mm厚的5182-H111冷轧态板材开展不同铜电极种类的优化, 该冷轧态板材对应的最优工艺参数前期已通过单因素变量法完成测试。其最优焊接参数为: 电极压力3.5kN、焊接电流21kA、焊接时间200ms、保持时间150ms。因此, 在此焊接参数下, 分别对C18140、C18150、C18200、C15715和C15760共5种不同成分的电极帽进行电极寿命测试, 结果如图6所示。

以电极打点数为横轴, 以不同打点数的焊点峰值载荷为纵轴建立坐标系, 每10个点进行一次力学性能测试, 获得相应的电极寿命曲线, 并对电极寿命曲线进行拟合。由图6可知, 不同电极帽的电极寿命排序为C15760 $>$ C18200 $>$ C18150 $>$ C18140 $>$ C15715。

对经过100点电极寿命测试的C18150电极进行形貌观察, 如图7所示。由图7可知, 电极表面附着大量的Al-Cu金属间化合物, 同时在铜电极表面边缘处出现沟槽, 通过对铜电极表面进行EDS (见表3) 及面扫描分析可知, 沟槽处主要为焊接过程中铝合金发生飞溅向外逸散的通道。软化通道越多, 焊接

表3 不同位置EDS结果 (原子分数) (%)

位置	Al	Cu	O	其他
1	55.7	31.9	9.4	—
2	6.65	78.9	12.45	—
3	61.4	11.7	25.48	—

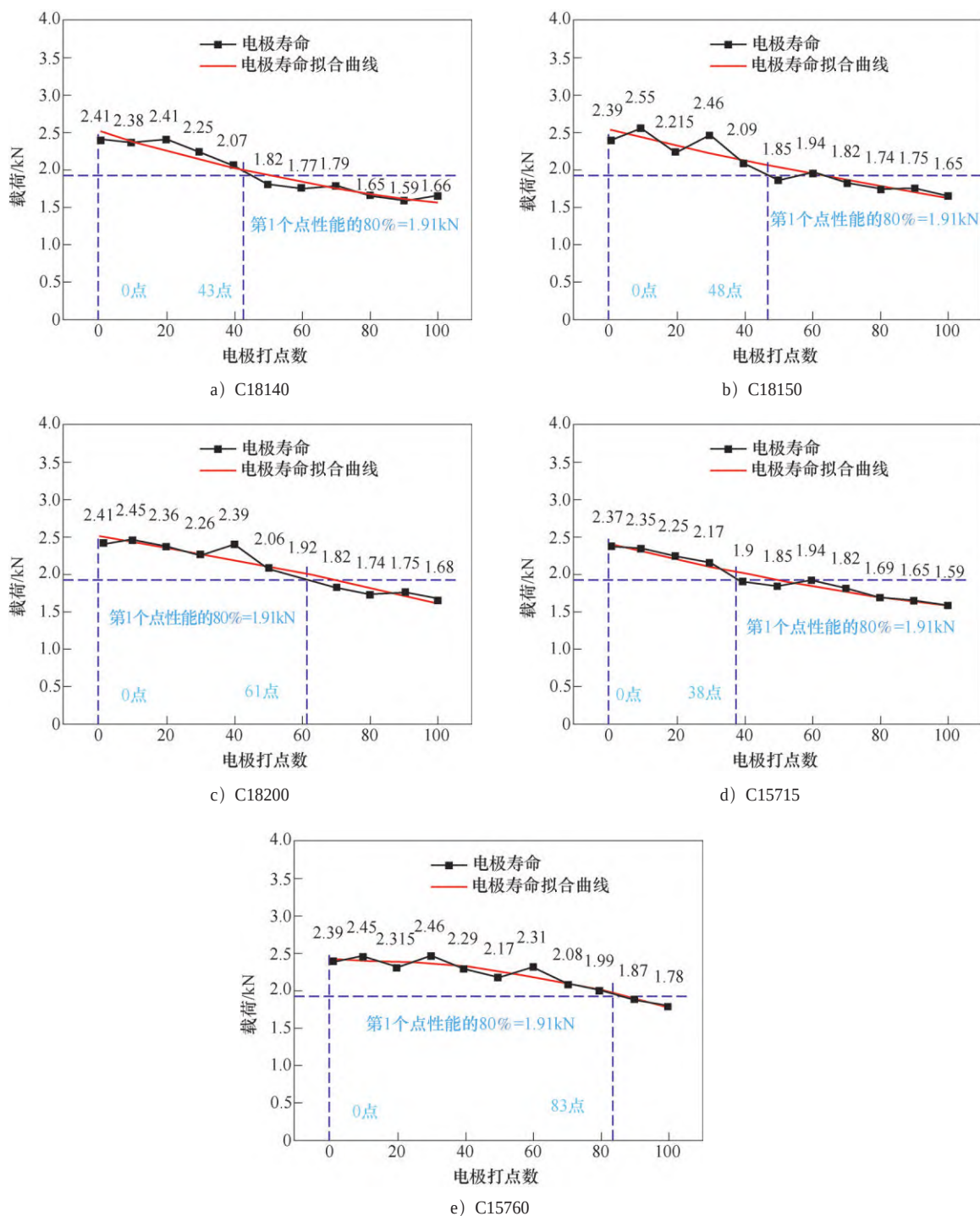


图6 5182-H111原始冷轧态板材应用不同电极帽时的电极寿命测试结果

过程中越易产生飞溅,焊点处熔核质量越差,性能下降速度越快,电极寿命越小。

不同电极帽完成100点电极寿命测试后的表面形貌如图8所示(红色圆圈部分是软化通道)。由图8可看到,不同电极帽端面边缘位置的软化通道个数与不同电极帽的电极寿命长短的规律相同,电极帽的电极寿命越短,其端面边缘位置的软化通道

越多,参照软化通道数量和通道尺寸可知,不同电极帽的软化通道数量排序为C15715>C18140>C18150>C18200>C15760。

对上述经过100点电极寿命测试的不同电极帽轴向面进行剖切,在进行打磨、抛光、腐蚀后,腐蚀试剂成分:50mL氨水+50mL双氧水(质量分数为3%)+50mL水,分别进行金相测试和显微硬度检

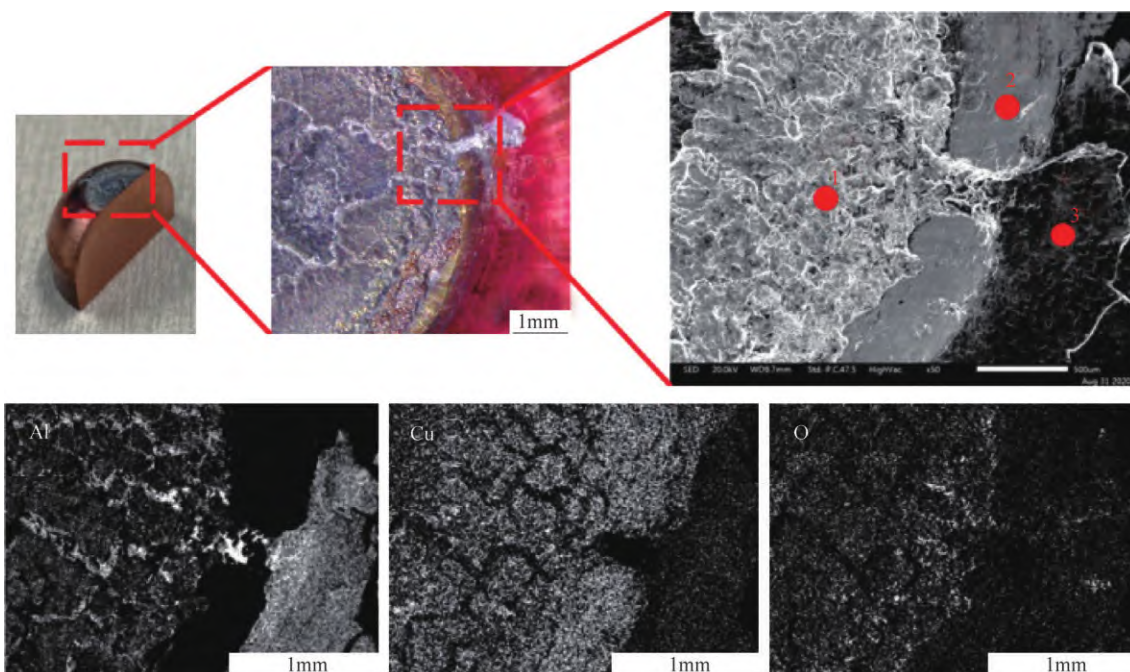


图7 5182-H111原始冷轧态板材应用C18150电极帽时的表面形貌

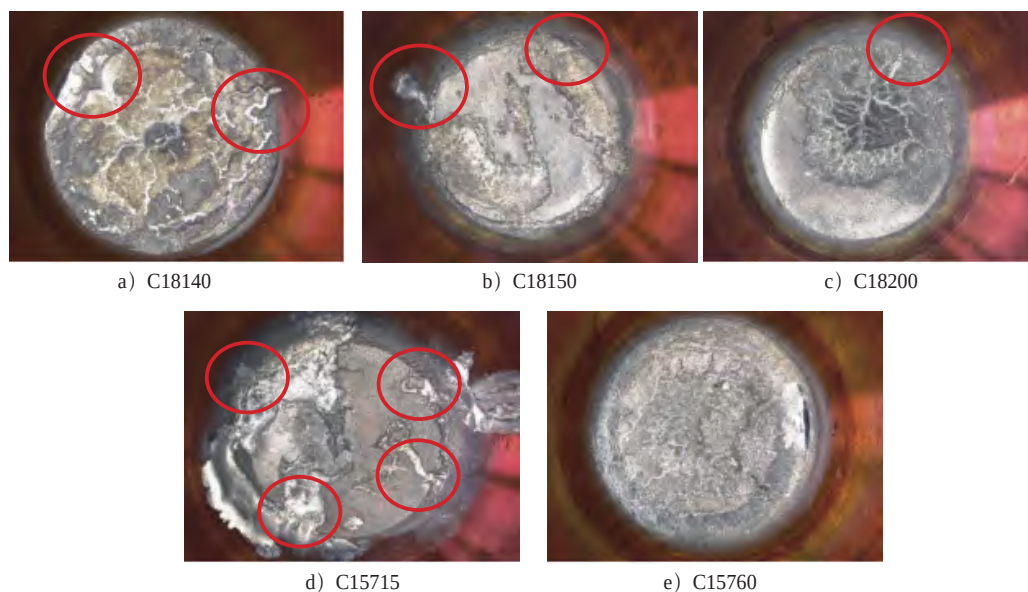


图8 5182-H111原始冷轧态板材应用不同电极帽焊接100点后电极形貌

测，其中显微硬度的载荷为500gf (4.9N)，加载时间为10s，测量点间隔0.5mm，金相及显微硬度的检测结果分别如图9、图10所示。

由图9可知，经过100点电极寿命测试后，不同电极帽在Al-Cu反应界面位置的晶粒形貌不同，其中C18140和C15715电极帽在反应界面附近的晶粒组织存在着因焊接过程而导致的墩粗变形，而C18150、C18200和C15760电极帽在界面附近的晶粒无墩粗

和变形。对比图10中的剖切面显微硬度变化规律可知，在靠近反应界面位置，不同电极帽种类的材料硬度规律为C15760>C18200>C18150>C18140>C15715，材料硬度越低，焊接过程中就越容易形成软化通道，该规律也与不同电极帽的软化通道数量排序相对应。

为了更清晰地描述焊接过程中的电极帽软化规律，对上述不同电极帽在不同温度下进行软化行

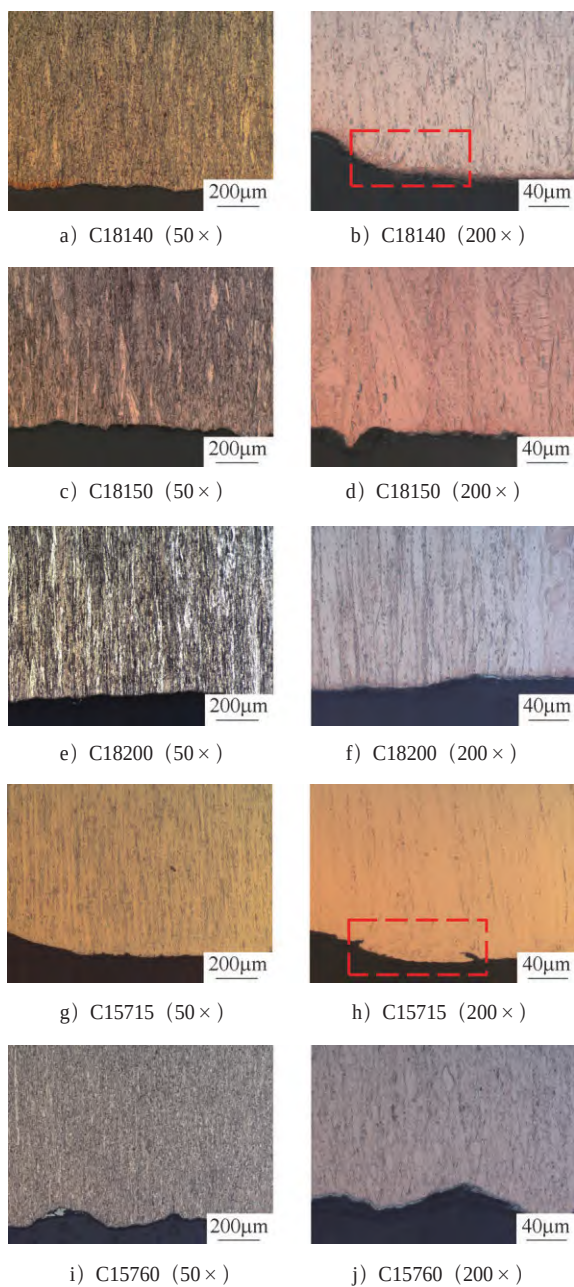
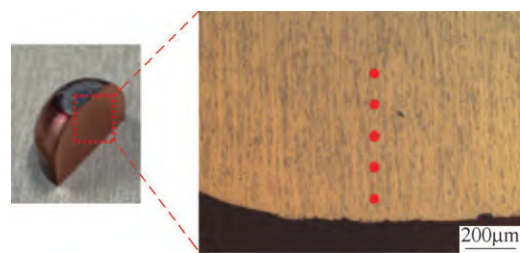
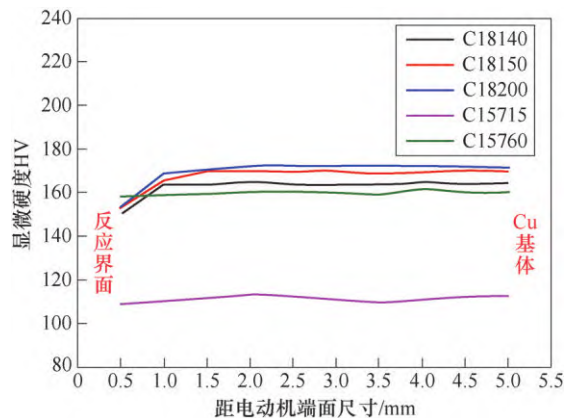


图9 5182-H111原始冷轧态板材不同电极帽焊接100点后
剖面形貌

为测试。Al-Cu二元合金相图如图11所示。由图11可知，合金反应共晶点的温度为 548.2°C ，对比电极帽在不同温度下的显微硬度（见图12）可知，在 548.2°C 条件下，电极帽的显微硬度变化规律为 $\text{C15760} > \text{C18200} > \text{C18150} > \text{C18140} > \text{C15715}$ 。由此可说明，由于不同电极帽在界面温度 548.2°C 下的软化程度不同，且电极帽在焊接过程中存在墩粗效应，并会出现铝合金溢出通道，软化程度越大的电极帽，在焊接中越易出现墩粗，同时铝合金的溢出



a) 硬度检测取点示意



b) 检测结果

图10 5182-H111原始冷轧态板材不同电极帽焊接100点后
剖面显微硬度

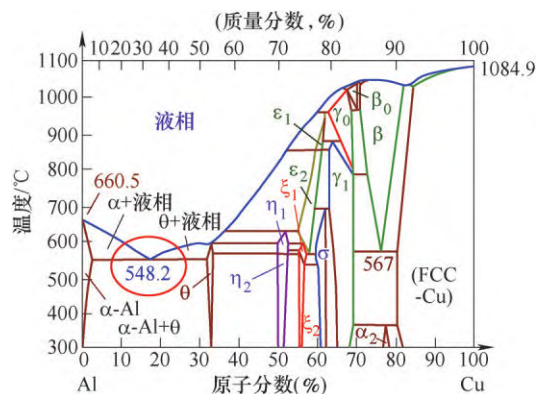


图11 Al-Cu二元合金相图

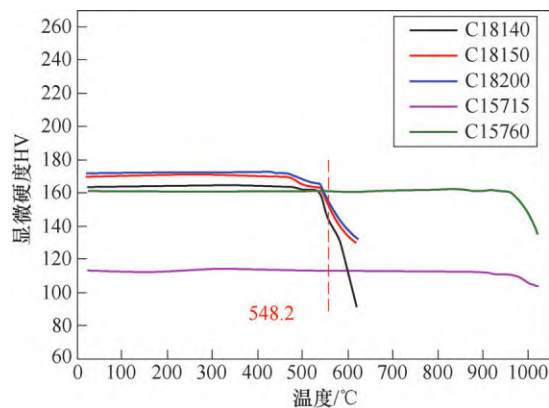


图12 电极帽在不同温度下的显微硬度

通道也会增多,造成焊接热量损失严重,影响电阻点焊过程中焊点位置的熔核形成,造成性能下降。

3.3 不同表面状态情况分析

5182-H111铝合金经过不同表面预处理后,样品表面辉光放电光谱分析(GDOES)结果如图13所示。轧制态5182-H111铝合金表面元素含量随距表面深度的变化趋势如图13a、d所示,随着距表面深度的增加,Al元素含量逐渐增加,Mg元素含量稍有增加后逐渐下降至一稳定值,O元素从峰值开始逐渐减小,Ti、Zr含量总量极少。清洗态5182-H111

铝合金表面元素含量随距表面深度的变化趋势如图13b、e所示,相比于轧制态样品,清洗态样品表面元素总体趋势一致,主要表现出两点区别,一是O元素下降的速度更快,在较小的深度含量已经下降到10%以下;二是样品表面Mg元素要低于轧制态样品,这表明清洗态样品氧化膜膜层厚度更小。同时,前两种状态样品表面均未出现Ti、Zr元素。钝化态5182-H111铝合金表面元素含量随深度的变化趋势如图13c、f所示,钝化态表面元素O、Mg、Al变化趋势与清洗态一致,差别主要在于表面具有较

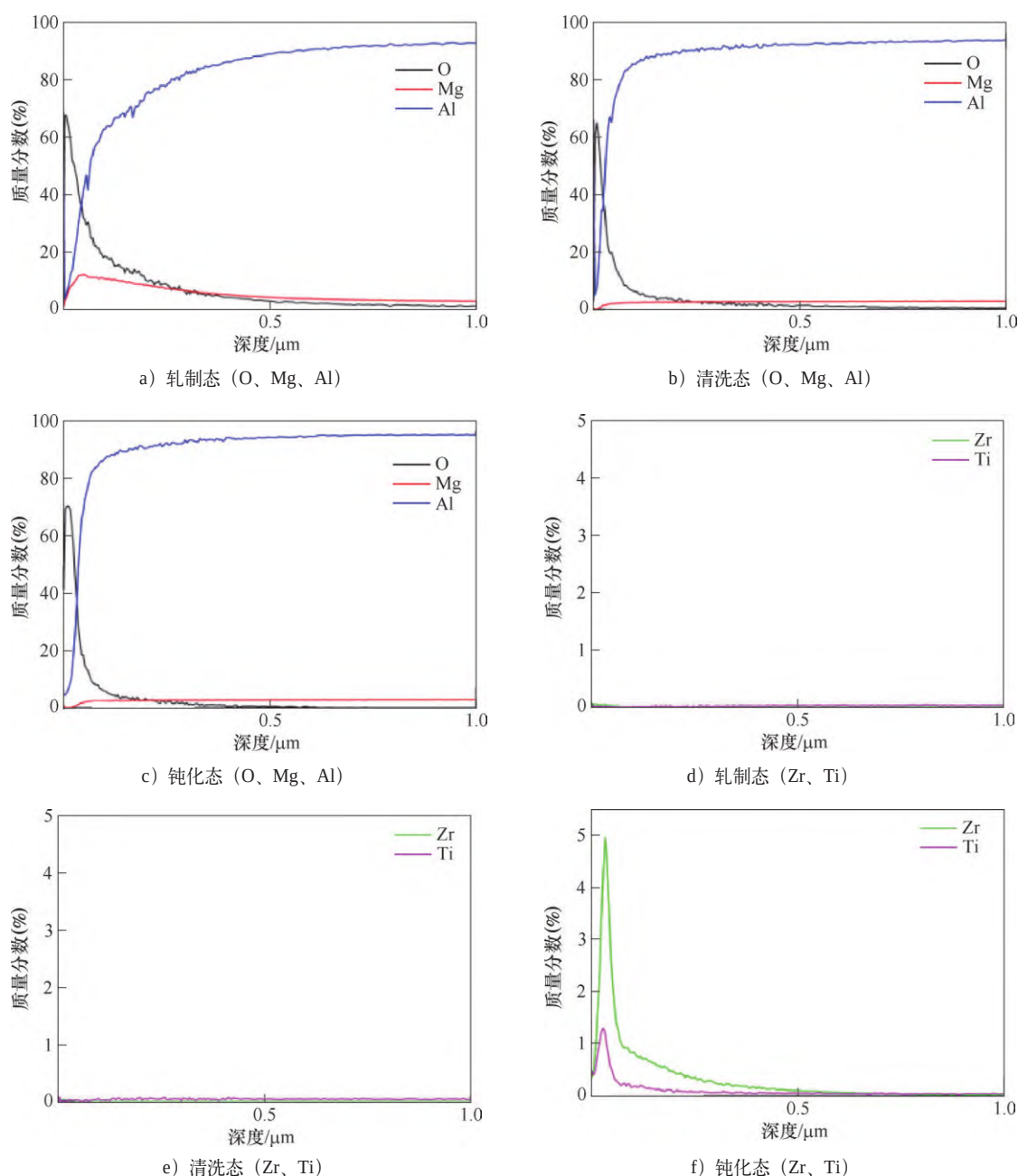


图13 不同表面状态的5182-H111铝合金表面辉光放电光谱分析结果

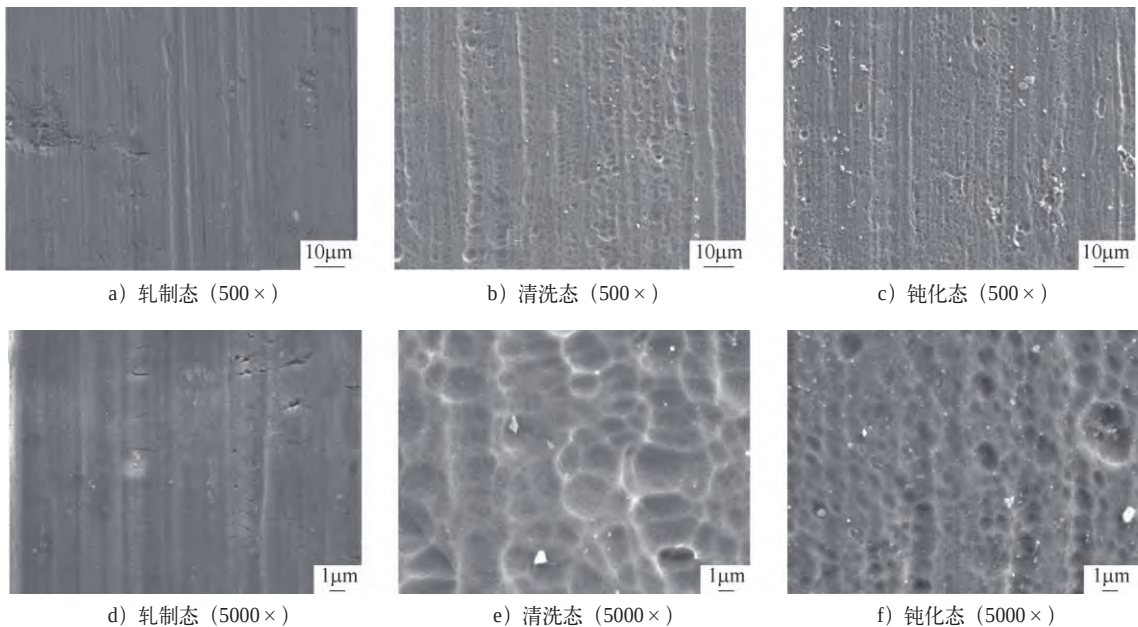


图14 不同表面状态的5182-H111铝合金表面微观形貌

高的Ti、Zr元素，Ti元素峰值含量可以达到1%，Zr元素峰值含量可以达到5%。

不同表面状态的5182-H111铝合金表面微观形貌如图14所示。由图14可知，轧制态样品表面可见明显的轧制纹理。清洗态样品在放大500倍时表面为大量的腐蚀微坑，进一步放大至5000倍后可见每个微坑内部均存在着细小的层状纹理。钝化态样品在放大500倍时与清洗态样品差异不大，同样布满细小微坑，进一步放大至5000倍后可见许多细小白色颗粒分布在样品表面。

不同表面状态的5182-H111铝合金表面粗糙度值见表4，微观三维形貌如图15所示。由表4、图15

表4 不同表面状态的5182-H111铝合金表面粗糙度值 (μm)

表面状态	检测点			平均值	均方差
	1	2	3		
轧制态	0.2336	0.2254	0.2160	0.2250	0.0088
清洗态	0.2334	0.2292	0.2219	0.2281	0.0058
钝化态	0.2133	0.244	0.2309	0.2294	0.0154

可知，3种表面状态的5182-H111铝合金表面粗糙度值均在0.22μm左右，三维形貌的上表面轮廓也未出现明显差异，不同之处在于清洗态和钝化态两种样品表面轮廓底部出现较多的细小针状轮廓，这与扫描电镜下观察到的细小微坑形貌相一致。

3.4 不同表面状态对铜电极寿命的影响及分析

综上所述可知，最优的电极帽为C15760氧化铝弥散铜，采用该电极帽开展铝合金不同表面状态对电极寿命的影响，表面状态按照轧制态、清洗态和钝化态3种区分。因为不同表面状态对焊接参数影响较大，因此需通过单因素变量法对轧制态、清洗态和钝化态板材进行最优工艺的摸索，最优工艺的确定以力学性能和熔核尺寸进行综合判定。

本项目中，通过单因素变量法开展焊接试验，调整焊接电流、焊接时间和电极压力，分别得到3种表面状态板材的最优焊接参数，其中轧制态板材最优焊接参数：电极压力3.5kN、焊接电流21kA、焊接时间200ms、保持时间150ms；清洗态板材最优焊

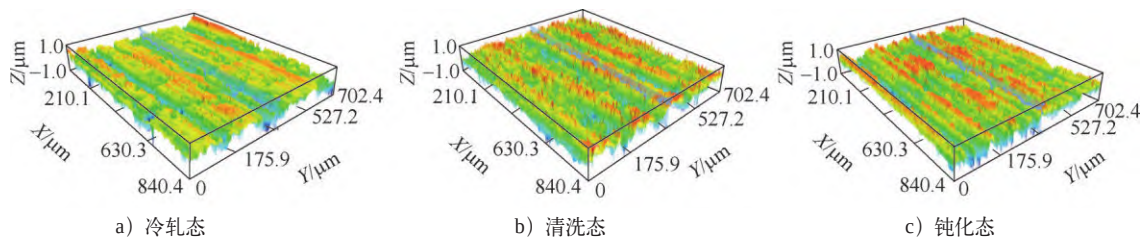
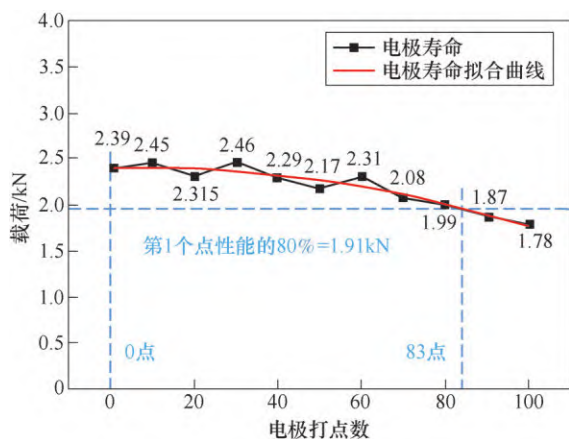


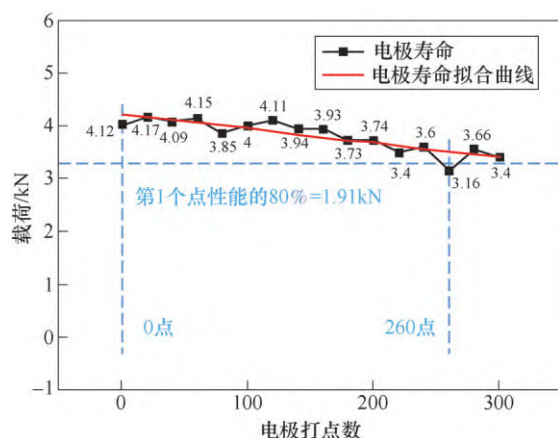
图15 不同表面状态的5182-H111铝合金表面微观三维形貌

接工艺参数为：电极压力3.5kN、焊接电流24kA、焊接时间200ms、保持时间150ms；钝化态板材最优焊接参数为：电极压力3.5kN、焊接电流21kA、焊接时间200ms、保持时间150ms。

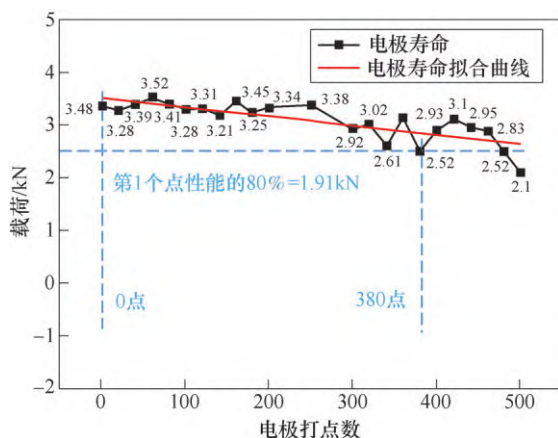
针对不同表面状态5182-H111铝合金，分别在各自最优焊接参数下获得对应的电极寿命，如图16所示。由图16可知，轧制态板材的电极寿命为83



a) 轧制态



b) 清洗态

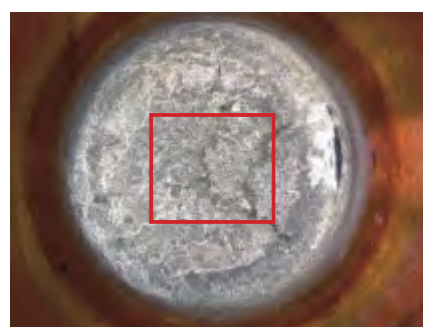


c) 钝化态

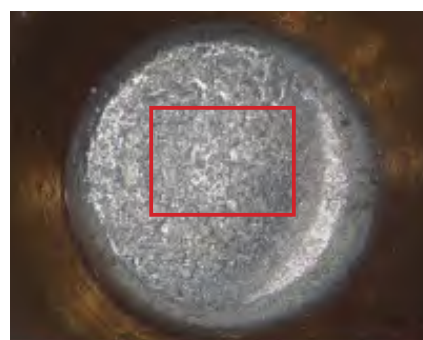
图16 不同表面状态5182-H111的铝合金板材电极寿命

点，清洗态板材的电极寿命为260点，钝化态板材的电极寿命为380点。

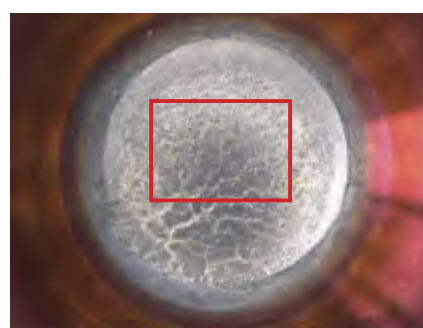
针对相同打点数（100点）铜电极材料，观察不同表面状态下C15760电极端面形貌，如图17所示。从界面反应程度看，钝化态对应电极表面状态优于清洗态，清洗态板材优于轧制态。5182-H111铝合金不同表面状态电极端面中心位置能谱分析结果见表5。由表5可知，钝化态对应电极界面反应程度较



a) 轧制态



b) 清洗态



c) 钝化态

图17 5182-H111不同表面状态铝合金板材电极端面形貌

表5 5182-H111铝合金不同表面状态电极端面中心位置能谱分析结果（原子分数）（%）

表面状态	Al	Cu	其他
轧制态	44.7	38.6	—
清洗态	40.2	40.4	—
钝化态	38.9	43.2	—

低，表面铝含量较少，清洗态偏多，轧制态最多。

4 结束语

1) 针对1.2mm厚5182-H111铝合金原始冷轧板，不同电极种类的电极寿命不同，其中，C18140电极为43点、C18150电极为48点、C18200电极为61点、C15715电极为38点、C15760电极为83点。由此可知，C15760电极帽的寿命最高。

2) 应用C15760电极开展1.2mm厚5182-H111铝合金板电阻点焊时，获得不同表面状态下的优化焊接参数，其中轧制态板材最优焊接参数为：电极压力3.5kN、焊接电流21kA、焊接时间200ms、保持时间150ms；清洗态板材最优焊接参数为：电极压力3.5kN、焊接电流24kA、焊接时间200ms、保持时间150ms；钝化态板材最优焊接参数为：电极压力3.5kN、焊接电流21kA、焊接时间200ms、保持时间150ms。

3) 应用C15760电极焊接1.2mm厚不同表面状态的5182-H111铝合金时，电极寿命差别明显。其中，轧制态铝合金板电极寿命为83点，清洗态铝合

金板电极寿命为260点，钝化态铝合金板材电极寿命为380点。其中，钝化态铝合金板材的电极寿命最高。

参考文献：

- [1] 张自锋，陈海峰，牛瑶. 提高电阻点焊电极寿命的研究进展与展望[J]. 热加工工艺，2025（11）：7-12.
- [2] 钟昌炽. 退火工艺对纯钨电阻点焊电极显微组织性能及使用寿命的影响[J]. 山西冶金，2021，44（6）：81-82.
- [3] 郑立好，张超群，张庆鑫，等. 铝合金电阻点焊铈铬铜电极的寿命研究[J]. 中国机械工程，2020，31（21）：2632-2637.
- [4] 葛世伟. 关于铝合金电阻点焊电极寿命及烧损机理的研究[J]. 科学技术创新，2019（21）：9-10.
- [5] 杜慧敏，罗震，敖三三，等. 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.

（收稿日期：20250219）

（上接第51页）

- Augmented Reality[C]. USA: IEEE, 2004: 298-299.
- [7] 黄俊. 具有力反馈的SMAW焊接仿真系统的设计与研究[D]. 南昌：南昌大学，2011.
 - [8] 钟正，陈丽，史会芳，等. 基于触觉反馈的沉浸式虚拟仿真实验设计[J]. 实验科学与技术，2019，17（6）：73-76.
 - [9] 周晖. 湾流氩弧焊实景仿真模拟操作训练系统V1.0[Z]. 武汉：武汉湾流新技术有限公司，2014-06-30.
 - [10] 张建勋. 基于虚拟现实技术的焊接技能培训系统研发及推广[Z]. 青岛：西安交通大学青岛研究院，2016-09-14.
 - [11] 薛金保，张建勋，王启宇，等. 一种单面焊双面成形过程模拟与仿真的网格实现方法：CN201110200564.6 [P]. 2012-03-28.
 - [12] 盖登宇，褚元召，李庆芬，等. 组合热源模型在焊接数值模拟中的应用[J]. 焊接学报，2009，30（5）：61-64.
 - [13] 张亚龙. 光学定位在虚拟现实中的研究与应用[D]. 开封：河南大学，2017.
 - [14] 刘红梅. 面向VR视觉不适的智能位置感知方法研究[D]. 广州：华南理工大学，2022.
 - [15] 杨志超. 面向虚拟焊接质量评估的深度学习方法及应用研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2019.
 - [16] 和豪涛，陈超. 虚拟仿真技术在汽车焊接实训中的应用[J]. 邢台职业技术学院学报，2024，41（3）：58-62.
 - [17] 张一然，王锐，蔡子琳. 基于理虚实一体化的中职《焊接结构生产》教学设计与实践[J]. 吉林工程技术师范学院学报，2023，39（7）：27-30.

（收稿日期：20250217）