

# 等离子体微弧氧化表面处理 LY12 铝合金 的高温拉伸性能\*

滕敏 李焱 赫晓东 关春龙

(哈尔滨工业大学复合材料研究所, 哈尔滨 150001)

**文 摘** 采用等离子体微弧氧化技术对 LY12 铝合金表面进行氧化处理, 对处理前后材料的高温拉伸性能进行了研究, 用 SEM 观察试样拉伸断口及陶瓷涂层形貌。结果表明: 在高温条件下, LY12 铝合金表面陶瓷化后拉伸强度有一定提高, 且随温度的升高, 拉伸强度提高的比率增大, 说明在高温条件下陶瓷涂层对铝基体起到了一定的隔热作用; 表面陶瓷化对 LY12 铝合金的延伸率影响不大。试样为典型的韧性断裂, 且断裂后陶瓷膜层没有出现大面积脱落, 表明陶瓷涂层与铝基体结合良好。

**关键词** 等离子体微弧氧化, 铝合金, 拉伸性能

## High Temperature Tensile Properties of LY12 Aluminum Alloy Processed by Plasma Microarc Oxidation

Teng Min Li Yao He Xiaodong Guan Chunlong

(Center For Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** High temperature tensile properties of LY12 aluminum alloy processed by plasma microarc oxidation are investigated. Fractographs of tensile specimens and surface of ceramic coating are studied by using SEM. The results show that the tensile strength of LY12 aluminum alloy coated with ceramic coating is increased under high temperature. Moreover, the enhanced proportion of tensile strength increases with temperature rise, which indicates that the ceramic coating plays a role in thermal insulation, but elongation of the tensile specimens has no change obviously. Specimens are typical toughness rupture, and there are no large acreage of ceramic-coating spalling after tensile rupture. It is indicated that the bonding between ceramic coating and matrix is tight.

**Key words** Plasma microarc oxidation, Aluminum alloy, Tensile property

### 1 引言

等离子体微弧氧化作为新兴的材料表面陶瓷化技术, 是在液体介质中采用等离子体弧光放电手段增强基体表面陶瓷化的电化学技术, 由于等离子体弧光放电具有高密度能量, 可以在基体与外来陶瓷膜层物料间形成气相搅拌, 使之充分混合、反应并烧结, 通过合理控制沉积速率、反应速度及烧结能量,

即可在基体(阳极工件)表面上获得具有较高硬度且与基体结合良好的陶瓷化膜层; 同时, 由于参与反应并形成陶瓷相的物料离子在液体中受到电场力作用可均匀传输到基体附近的空间, 在膜层的均匀性、对基体形状尺寸允许程度等方面会有较好保证。通过改变电解液成分及工艺参数, 可以制备出不同化学成分配比、晶体结构类型及性能的陶瓷膜层。膜

收稿日期: 2003-10-31; 修回日期: 2004-03-01

\* 黑龙江博士后基金资助: LRB0047

滕敏, 1972 年出生, 硕士研究生, 主要从事高温隔热复合材料的研究工作

层主要的相成分是  $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ , 其厚度可达  $10 \mu\text{m} \sim 300 \mu\text{m}$ , 硬度 (HV) 可达  $200 \sim 1500$ <sup>[1-3]</sup>。该技术可在铝及其合金表面生成一层陶瓷膜层, 可以极大地提高铝合金的耐磨、耐蚀、耐高温性能, 还可作为热障层或绝缘层, 大大拓宽铝合金的适用范围, 在航空、航天、机械、纺织、石化等领域有广泛的应用前景, 因此受到普遍重视和广泛研究。

但是, 工件在经过等离子体微弧氧化处理后, 能否保持原有的拉伸性能是实际应用时需注意的问题; 目前关于这方面的报道较少。本文通过采用等离子体表面氧化技术对 LY12 铝合金表面进行氧化处理并对处理前后的 LY12 铝合金在  $100^\circ\text{C}$ 、 $200^\circ\text{C}$  和  $300^\circ\text{C}$  下的拉伸性能进行对比。用 SEM 观察试样拉伸断口及陶瓷涂层形貌, 以期得到一些有益的结论。

## 2 试验

### 2.1 材料

试验材料为 1 mm 厚的 LY12 铝合金板材, 成分见表 1。试样分两组, I 组为未经等离子体微弧氧化处理; II 组为经等离子体微弧氧化处理。

表 1 LY12 铝合金化学成分  
Tab. 1 Chemical constitution of LY12 aluminum alloy  
%(质量分数)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Al
4.5	1.5	0.6	0.2	0.3	余量

### 2.2 等离子体微弧氧化处理

图 1 是等离子体微弧氧化电解池示意图。阳极为 LY12 铝合金板, 阴极为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板。外加等离子源, 利用等离子体弧光放电的高密度能量增强在阳极上发生的电化学反应, 并将电化学反应的产物迅速烧结, 在阳极表面形成一层陶瓷膜。试样的处理工艺为: 前清洗→漂洗→等离子体微弧氧化处理→漂洗→烘干。电解液成分如表 2 所示, 处理过程中溶液温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 时间为 10 min。

表 2 电解液成分  
Tab. 2 Composition of electrolyte solution  
%(质量分数)

$(\text{NaPO}_3)_6$	$\text{Na}_2\text{WO}_3$	$\text{CoSO}_4$
0.7	0.2	0.1

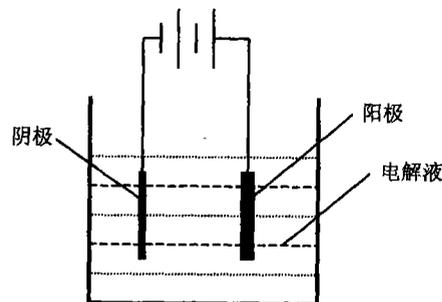


图 1 等离子体微弧氧化电解池示意图  
Fig. 1 Schematic of plasma microarc oxidation electrolyzer

### 2.3 试验方法

采用线切割将试验材料制成拉伸试样, 在各温度下, 每组试样数为 3 个, 用以取平均值。高温拉伸试验设备为 INSTRON - 5500R 电子万能材料试验机。试样装好放入高温环境箱中, 达到试验温度并保温 10 min 后开始拉伸, 拉伸速度为 2 mm/min。微机自动记录试验数据并给出载荷-位移曲线。用 X-650 型 SEM 观察试样断口及陶瓷膜层形貌。通过 CTG-10 数字式覆层涡流测厚仪测量出陶瓷膜层的厚度为  $30 \mu\text{m}$ 。

## 3 结果及分析

### 3.1 处理前后 LY12 铝合金拉伸性能

等离子体微弧氧化处理前后 LY12 铝合金拉伸试验结果如表 3 所示。从表 3 可以看出, 随着温度的升高, 材料的拉伸强度降低, 延伸率增大; 但在同温度条件下, LY12 铝合金表面陶瓷化后, 拉伸性能有一定提高, 且随温度的升高, 拉伸强度提高的比率增大(在  $100^\circ\text{C}$  提高 5.9%, 在  $200^\circ\text{C}$  提高 6.5%, 在  $300^\circ\text{C}$  提高 11.3%)。在室温拉伸试验中, I 组和 II 组试样的拉伸强度分别是 382.1 MPa 和 383.9 MPa, 二者的拉伸强度变化不大, 故推断在高温条件下经处理后铝合金试样强度提高的原因是在试验温度不是很高、保温时间仅为 10 min 的情况下, 试验材料未达到透烧的程度, 陶瓷膜层对铝基体起到了一定的隔热作用, 使 II 组试验材料的铝基体实际温度略低于试验温度, 致使在同试验温度下其拉伸强度高于 I 组材料的拉伸强度。

表3 各种温度下处理前后试样拉伸性能  
Tab.3 Tensile properties of specimens before and after treated under various temperatures

试样	温度/℃	拉伸强度/MPa	延伸率/%
I	100	348.5	15.3
II		369.0	15.5
I	200	307.9	20.0
II		327.9	21.7
I	300	169.6	19.7
II		188.8	21.7

### 3.2 陶瓷膜层形貌及试样断口

图2为陶瓷膜层截面SEM照片。从图2可见,靠近铝合金基体的陶瓷膜层较为致密,而陶瓷膜层的外层相对疏松,粗糙度较大。在陶瓷膜层与铝基体结合界面呈交错状,且界面处有微孔,这是膜层迅速烧结后残留下来的。表面疏松层由一层较硬但孔隙较大的物质组成,与基体结合不够牢固,易被打磨掉;致密层含有很多的 $\alpha - Al_2O_3$ 相,硬度很高,也很耐磨。在等离子体微弧氧化处理过程中,膜层中的陶瓷相粒子是在铝基体上直接生长起来的,膜层与基体间结合是离子键结合和微区冶金结合<sup>[4]</sup>,这也是等离子体微弧氧化陶瓷膜层与基体结合牢固的主要原因。

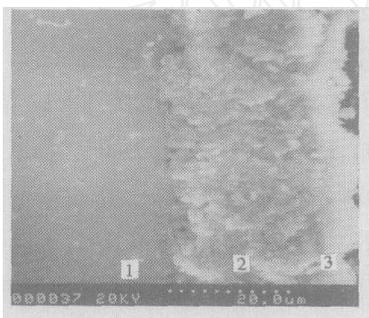


图2 陶瓷膜层截面SEM照片

Fig.2 SEM image showing cross-section of ceramic coating

1—铝合金基体;2—致密层;3—疏松层。

图3(a)是未经等离子体微弧氧化处理的铝合金试样在100℃下的拉伸断口照片,可以看出,断口特征为典型的韧性断裂,出现许多大小不等的韧窝;图3(b)、图3(c)和图3(d)分别为100℃、200℃和300℃条件下有陶瓷膜层试样拉伸后断口照片。从三个照片中可以看出,陶瓷膜层的外部疏松层有部分陶瓷剥落,陶瓷膜层内部的致密层形状保持良好,

断口边缘残留着几微米厚的陶瓷膜,陶瓷膜层未出现大面积脱落,许多陶瓷碎片均匀分布在铝基体表面上,这也显示出陶瓷膜层与基体结合良好。

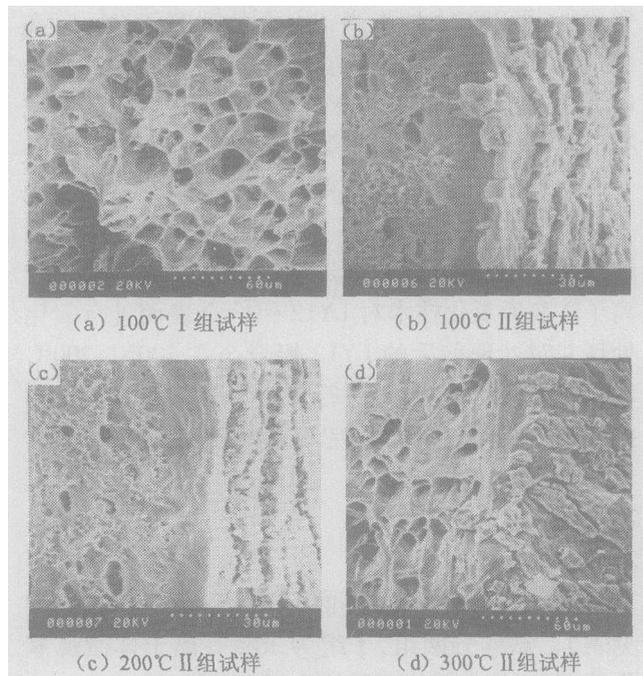


图3 试样拉伸后断口照片

Fig.3 Fractographs of tensile specimens

### 4 结论

(1) LY12 铝合金经等离子体微弧氧化表面处理后,其表面性能得到了改善,同时,在高温条件下,拉伸性能也有所提高;

(2) 随温度的升高,处理后铝合金试样拉伸性能提高的比率增大,说明陶瓷膜层在高温条件下,对基体材料起到了一定的隔热作用;

(3) 试样拉伸后,表面保存大量的陶瓷碎片,表明陶瓷膜层与铝基体界面结合良好。

### 参考文献

- 1 左洪波,孔庆山,尚久琦. 等离子体增强电化学表面陶瓷化技术. 材料保护,1995;28(7):21~22
- 2 左洪波,郝相君,孔庆山,李欣. 一种新型表面改性技术——等离子体增强电化学表面陶瓷化. 中国表面工程,1999;12(2):38~40
- 3 Butyagin P I, Khokhryakov Ye V, Mamaev A I. Microplasma systems for creating coatings on aluminium alloys. Materials Letters,2003;57:1748~1751
- 4 刘兆晶,左洪波,束术军,李凤珍. 铝合金表面陶瓷膜层形成机理. 中国有色金属报,2000;10(6):859~863

(编辑 李洪泉)

宇航材料工艺 2004年 第5期