

# 一种制备强韧性耐蚀AZ91D镁合金的组合加工方法

申请号：[201210017472.9](#)

申请日：2012-01-19

申请(专利权)人 [河海大学 常州市河海科技研究院有限公司](#)

地址 [210098 江苏省南京市西康路1号](#)

发明(设计)人 [马爱斌 周祺 江静华 宋丹](#)

主分类号 [C22F1/06\(2006.01\)I](#)

分类号 [C22F1/06\(2006.01\)I](#) [C25D11/30\(2006.01\)I](#)

公开(公告)号 [102560302A](#)

公开(公告)日 [2012-07-11](#)

专利代理机构 [南京经纬专利商标代理有限公司 32200](#)

代理人 [楼高潮](#)



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102560302 B

(45) 授权公告日 2013. 10. 30

(21) 申请号 201210017472. 9

CN 102080248 A, 2011. 06. 01, 说明书第 1 页第 4-5 段.

(22) 申请日 2012. 01. 19

朱世凤等. 等径角挤压制备 AZ91D 镁合金的组织与性能. 《精密成形工程》. 2011, 第 3 卷 (第 3 期), 第 1-4、9 页.

(73) 专利权人 河海大学

地址 210098 江苏省南京市西康路 1 号

专利权人 常州市河海科技研究院有限公司

审查员 杨冰

(72) 发明人 马爱斌 周祺 江静华 宋丹

(74) 专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司 32200

代理人 楼高潮

(51) Int. Cl.

C22F 1/06 (2006. 01)

C25D 11/30 (2006. 01)

(56) 对比文件

CN 1792487 A, 2006. 06. 28, 全文.

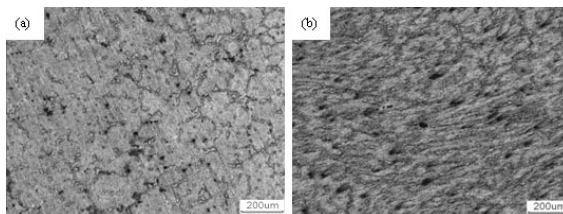
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 10 页

## (54) 发明名称

一种制备强韧性耐蚀 AZ91D 镁合金的组合加工方法

## (57) 摘要

一种制备高强韧耐蚀镁合金的组合加工方法: 第一步, 连续等通道转角挤压加工: 将铸态 AZ91D 镁合金块材切割成柱状试件, 试件经常规预处理后与模具表面都均匀涂覆固体润滑剂, 置入模具中随炉加热至 230℃ -300℃ 保温后进行连续多道次等通道转角挤压变形, 相邻挤压道次之间试样旋转 180°, 实现合金组织超细化; 第二步: 后续微弧氧化表面处理: 将第一步所得的试件切成构件所需的形状, 试样表面经打磨、抛光、超声清洗后进行微弧氧化处理, 将试样放入硅酸盐电解液中, 在外加电压 350-400V, 占空比 15-30%, 频率 400-600Hz 的条件下, 微弧氧化处理 15-20min, 最终得到兼备优良强韧性和耐蚀性的 AZ91D 镁合金合金块材。本发明具有成材率高、工艺操作与设备要求简单, 具有良好的工业应用前景。



1. 一种制备强韧性耐蚀 AZ91D 镁合金的组合加工方法,其特征在于加工步骤如下:

第一步:连续等通道转角挤压加工:将铸态 AZ91D 镁合金块材切割成柱状试件,将试件按常规预处理获得清洁表面,然后在试件表面和模具表面均匀涂覆固体润滑剂,把试件置入模具中随炉加热至 230℃ -300℃ 保温 10min 后进行连续多道次等通道转角挤压变形,相邻挤压道次之间试样旋转 180°,实现合金组织超细化,同时实现合金高强韧;

第二步:后续微弧氧化表面处理:将第一步所得的试件切成构件所需的形状,试样表面经砂纸逐级打磨、抛光并在无水乙醇中超声清洗 10min 后进行微弧氧化处理,将 AZ91D 镁合金试样放入电解液中,该电解液配比为:硅酸钠 15-20g/L;氢氧化钠 5-10g/L;氟化钾 5-10g/L;甘油 10-15g/L;硼砂 1-15g/L,试样与微弧氧化电源连接作为阳极,不锈钢板与电源相连作为阴极,在外加电压 350-400V,占空比 15-30%,频率 400-600Hz 的条件下,微弧氧化处理 15-20min,显著提高超细晶 AZ91D 镁合金耐腐蚀性能,最终获得高强韧耐蚀 AZ91D 镁合金块材。

## 一种制备强韧性耐蚀 AZ91D 镁合金的组合加工方法

### 一、技术领域

[0001] 本发明涉及一种利用等通道转角挤压和后续微弧氧化表面处理改善 AZ91D 镁合金的组织结构和表面状态以提高其强韧性和耐蚀性的组合加工方法,属于合金加工技术领域。

### 二、背景技术

[0002] 尽管 AZ91D 镁合金具有较好的比强度、比刚度和切削加工性,但其为密排六方结构 (HCP),强度低、塑性差。此外镁合金中主要是含镁,镁的标准电极电位为  $-2.37\text{V}$ ,为金属结构材料中电极电位最负的,同时镁合金在空气中表面形成的氧化膜 ( $\text{MgO}$ ) 的 PB 比  $< 1$ ,不能对基体起到稳定有效的防护作用,因此镁合金在实际应用中极易发生腐蚀。

[0003] 目前,晶粒细化是公认的同时改善金属材料强韧性的有效方法,从 AZ91D 镁合金的组织细化和加工工艺入手,有望改善其微观组织结构,从而提高其强韧性。

[0004] 一般可通过两种途径获得超细晶:一是粉碎法,即通过机械作用将粗大颗粒逐步破碎,细化晶粒;另一种是造粉法,即利用原子、分子或离子通过形核和长大两个阶段获得。按物料状态又可分为气相法、液相法和固相法。其中,固相法主要包括高能机械球磨、非晶晶化法、高压下高温固相淬火法以及大塑性变形法 (SPD) 等。

[0005] 在所有超细晶制备方法中,大塑性变形法能够制备无残留微孔隙、界面清洁的超细晶块材,被认为是最有工业应用前景和最有希望实现工业化生产的块体超细晶材料加工技术。材料经过 SPD 加工后可获得大的塑性变形,极大细化晶粒组织,制备出亚微米级/纳米级尺寸的晶粒。SPD 方法包括等通道转角挤压 (ECAP)、高压扭转 (HPT)、循环挤压或往复挤压 (CEC)、异步轧制 (Differential speed rolling technology)、大比率挤压 (HRE)、累积轧制 (ARB)、多轴压缩 (MAC) 和等通道挤压轧制 (ECAP-Rolling) 等。由俄罗斯科学家 VM Segal 于 20 世纪 80 年代发明的 ECAP 法具有加工方便、被加工材料尺寸改变小、可多道次持续加工等特点,许多国家的科研人员都在对该方法或由该方法制备的材料进行研究。

[0006] 90 年代后,ECAP 逐渐发展为一种制备块状、致密、超细晶块体金属材料的有效方法。利用试验材料在两个等径通道的相交区域发生的近似理想的剪切变形以及在加工过程中存在的加工硬化、动态回复和再结晶等来控制材料微观组织,从而达到细化晶粒和提高材料性能的目的。利用 ECAP 工艺制备的超细晶材料表现出优异的机械和理化特性,如:W. J. Kim 等人发现 AZ61 镁合金随着挤压道次的增加,晶粒明显细化且塑性大幅度提高;粒径为  $1.4\mu\text{m}$  的 ZK60 镁合金,在  $200^\circ\text{C}$ 、应变速率为  $1\times 10^{-2}/\text{s}$  时,伸长率达到 1083%,应变速率敏感系数约为 0.4-0.5。利用等通道转角挤压技术细化合金晶粒,对镁合金强度和韧性的同时提高具有显著效果。

[0007] 表面处理是提高镁合金耐蚀性最为有效的技术之一。常用的表面处理技术有:激光表面处理、表面离子注入、表面渗层处理、化学镀、阳极氧化和微弧氧化等方法。同其它表面处理方法相比,微弧氧化方法具有工序简单、效率高、处理工件尺寸变化小、对环境无污染符合当前清洁工业的发展要求,是镁合金表面处理的重点发展方向之一,在航空、航天、

机械、电子以及生物材料等领域有广泛的应用前景。同时,微弧氧化反应只发生在材料表面几微米厚度内,不会破坏材料整体的应力平衡,成膜过程对 AZ91D 超细晶镁合金的强韧性无任何不利影响。

[0008] 微弧氧化 (micro-arc oxidation, MAO) 又称为微等离子体氧化 (micro-plasma oxidation, MPO)、阳极火花沉积 (anode spark deposition, ASD)、火花放电阳极氧化 (ANOF) 或等离子体增强电化学表面陶瓷化 (PECC)。它是一种从传统的阳极氧化技术上发展起来的一种新型表面处理方法。它利用电化学方法,通过微区瞬间高温烧结作用直接在 Mg、Al、Ti 等阀金属表面原位生长陶瓷层的新技术。微弧氧化 (MAO) 突破传统阳极氧化技术的限制,电压由几十伏迅速提高到几百伏,氧化电流由小电流发展到大电流,使工件表面产生火花放电、辉光甚至火花斑。采用该技术能在合金表面生长一层致密的氧化物陶瓷膜。该膜与基体结合力强、耐磨、耐蚀、抗热冲击及绝缘性好、厚度可控制。

[0009] 进入上世纪 90 年代,美、俄、德、日等国加快了微弧氧化技术的研究开发工作,已工业化应用的微弧氧化工艺主要有:Keronite 工艺、Magoxid 工艺、Tagnite 工艺、Microplasmic Process 工艺和 Anomag 工艺。我国从上世纪 90 年代初开始关注此技术,在引进吸收俄罗斯技术的基础上,现在开始以耐磨、装饰性涂层的形式走向实用阶段,但仍处于起步阶段。主要研究单位有北京师范大学、北京有色金属研究总院、西安理工大学、燕山大学、哈尔滨工业大学、哈尔滨理工大学等。微弧氧化膜层可分为致密内层和疏松外层,其耐蚀性和硬度远远优于传统的 DOW17 工艺和铬化处理。微弧氧化工艺现已被广泛应用于用于汽车齿轮箱,计算机、手机与电子产品构件、运动器材以及航空航天和动力工具产品上。但有关超细晶 AZ91D 列镁合金微弧氧化工艺的研究与应用未见报道。

### 三、发明内容

[0010] 鉴于等通道转角挤压加工技术和微弧氧化表面处理技术在提高 AZ91D 镁合金强韧性和耐蚀性方面的广阔实用前景及组合优势,我们围绕 AZ91D 镁合金的等通道转角挤压和后续微弧氧化表面处理组合加工工艺进行了细致的研究工作,旨在改善该系列镁合金的微观组织结构和表面状态以提高其强韧性和耐蚀性能。本专利申请涉及了一种具有实用价值的提高 AZ91D 镁合金强韧性和耐蚀性能的组合加工方法。

[0011] 本发明的目的提供一种工艺操作与设备要求简单的制备强韧性耐蚀 AZ91D 镁合金组合加工方法,藉此在不改变试件形状和尺寸的情况下提高合金的强韧性,并解决其耐蚀性较差的问题,提高其成材率。

[0012] 本发明的特征在于将连续 ECAP 热挤压和后续微弧氧化表面处理组合工艺应用于强度低、韧性和耐蚀性差的 AZ 镁合金,通过组织细化和原位生长的陶瓷膜实现其强韧性和耐蚀性能的提高。

[0013] 一种制备强韧性耐蚀 AZ91D 镁合金的组合加工方法,其特征在于加工步骤如下:

[0014] 第一步:连续等通道转角挤压加工:将铸态 AZ91D 镁合金块材切割成柱状试件,将试件按常规预处理获得清洁表面,然后在试件表面和模具表面均匀涂覆固体润滑剂,把试件置入模具中随炉加热至 230℃ -300℃ 保温 10min 后进行连续多道次等通道转角挤压变形,相邻挤压道次之间试样旋转 180°,实现合金组织超细化,同时实现合金高强韧;

[0015] 第二步:后续微弧氧化表面处理:将第一步所得的试件切成构件所需的形状,试

样表面经砂纸逐级打磨、抛光并在无水乙醇中超声清洗 10min 后进行微弧氧化处理,将 AZ91D 镁合金试样放入电解液中,该电解液配比为:硅酸钠 15-20g/L;氢氧化钠 5-10g/L;氟化钾 5-10g/L;甘油 10-15g/L;硼砂 1-15g/L,并与微弧氧化电源连接作为阳极,不锈钢板与电源相连作为阴极,在外加电压 350-400V,占空比 15-30%,频率 400-600Hz 的条件下,微弧氧化处理 15-20min,显著提高超细晶 AZ91D 镁合金耐腐蚀性能,最终获得高强韧耐蚀 AZ91D 镁合金块材。

[0016] 与其他超强高韧耐蚀材料的组合加工方法相比,本发明提供的加工方法具有以下优点:将 ECAP 工艺和微弧氧化表面处理工艺相结合,可在不改变试件形状和尺寸的情况下细化 AZ91D 镁合金晶粒和第二相分布形态,提高合金强韧性。同时,超细晶中特殊的微结构特征(高密度位错,大角度晶界和极度极化且分布均匀的第二相粒子等)还能改善微弧氧化成膜过程,提高微弧氧化膜致密性,解决了 AZ91D 镁合金耐蚀性差的问题,且成膜过程对 AZ91D 超细晶镁合金的强韧性无任何不利影响,提高其成材率。该组合加工方法工艺操作与设备要求简单,可用于大块细晶高强韧耐蚀 AZ91D 镁合金的制备与加工,有良好的工业应用前景。

#### 四、附图说明

[0017] 图 1 实例 1 合金室温金相组织 (a) 铸态 AZ91D 合金;(b) 250°C ECAP 16 道次 AZ91D 合金,

[0018] 图 2 实例 1 铸态及 250°C ECAP 加工 16 道次后 AZ91D 镁合金室温拉伸载荷-位移曲线,

[0019] 图 3 实例 1 微弧氧化膜表面 SEM 形貌 (a) 铸态 AZ91D 合金;(b) 250°C ECAP 16 道次 AZ91D 合金,

[0020] 图 4 实例 1 微弧氧化膜横截面 SEM 形貌 (a) 铸态 AZ91D 合金;(b) 250°C ECAP 16 道次 AZ91D 合金,

[0021] 图 5 实例 1 试样在 3.5wt. % NaCl 溶液中浸泡 20d 后 SEM 腐蚀形貌图 (a) 铸态 AZ91D 合金;(b) 250°C ECAP 16 道次 AZ91D 合金,

[0022] 图 6 实例 1 电化学动电位扫描极化曲线图,

[0023] 图 7 实例 1 浸泡初期电化学交流阻抗谱 (a) 及电化学阻抗值与浸泡时间的关系曲线 (b)

[0024] 图 8 实例 2AZ91D 合金经 250°C ECAP 加工 12 道次后的室温金相组织,

[0025] 图 9 实例 2AZ91D 合金经组合加工 (250°C ECAP 12 道次+MAO) 的 SEM 表面形貌,

[0026] 图 10 实例 2AZ91D 合金经组合加工 (250°C ECAP 12 道次+MAO) 的 SEM 横截面形貌,

[0027] 图 11 实例 2AZ91D 合金经组合加工 (250°C ECAP 12 道次+MAO) 电化学动电位扫描极化曲线图,

[0028] 图 12 实例 2 浸泡初期电化学交流阻抗谱 (a) 及电化学阻抗值与浸泡时间的关系曲线 (b),

[0029] 图 13 实例 3AZ91D 合金经 250°C ECAP 加工 8 道次后的室温金相组织,

[0030] 图 14 实例 3AZ91D 合金经组合加工 (250°C ECAP 8 道次+MAO) 的 SEM 表面形貌,

- [0031] 图 15 实例 3AZ91D 合金经组合加工 (250℃ ECAP 8 道次 +MAO) 的 SEM 横截面形貌,
- [0032] 图 16 实例 3AZ91D 合金经组合加工 (250℃ ECAP 8 道次 +MAO) 电化学动电位扫描极化曲线图,
- [0033] 图 17 实例 3 浸泡初期电化学交流阻抗谱。

## 五、具体实施方式

[0034] 下面结合具体实例对本发明的技术方案进行进一步说明。本发明所述的连续 ECAP 热挤压和后续微弧氧化表面处理组合加工以提高 AZ91D 镁合金强韧性和耐蚀性能的方法不只局限于该具体实例。

[0035] 所有试验用 AZ91D 镁合金试件在组合加工前均需根据 ECAP 模具的尺寸进行切割,并按常规预处理工艺处理以获得清洁、干燥的表面。根据试件表面实际状况,预处理工艺可选择以下步骤的不同组合,即:磨光、清洗(如:超声波清洗)、除油(如:无水乙醇清洗)、涂敷固体润滑剂(如:涂敷石墨)。

[0036] 实施例 1:

[0037] 采用线切割将铸态 Mg-9.05wt. % Al-0.65wt. % Zn 合金加工成 19.5mm×19.5mm×40mm 的柱状试件,其铸态组织主要是由  $\alpha$  (Mg) 基体和枝晶间呈网状分布的  $Mg_{17}Al_{12}$  ( $\beta$ ) 相组成(见图 1(a))。其中  $\beta$  相以两种形式存在,一种是以粗大的块状  $\beta$  相,另一种是 ( $\alpha + \beta$ ) 共晶组织中的细小的层片状  $\beta$  相。将切割后的试件进行表面预处理,然后置入模具中随炉加热至 250℃ 保温 10min,再施加压力进行连续 16 道次 ECAP 挤压,相邻挤压道次之间试样旋转 180° (即传统的 C 路径) 以提高挤压组织均匀性,加工后合金组织显著细化(见图 1(b))。Mg-9.05wt. % Al-0.65wt. % Zn 合金经 ECAP 加工 16 道次后,屈服强度和抗拉强度都有较大幅度的提高,室温拉伸强度提高了 79%,延伸率提高 39%,见图 2。将 ECAP 后试件经线切割成 10mm×10mm×10mm 的立方试件,经砂纸逐级打磨至 1200#、抛光并无水乙醇超声清洗 10min 后放入碱性硅酸盐电解液(硅酸钠 18g/L;氢氧化钠 8g/L;氟化钾 10g/L;甘油 10g/L;硼砂 10g/L) 中。试样作为阳极与微弧氧化电源相连,不锈钢板与电源相连作为阴极,在外加电压 400V,占空比 30%,频率为 600Hz 条件下微弧氧化处理 20min。处理后其表面形貌(见图 3) 呈现典型的微弧氧化膜多孔形貌。表面形貌主要反映的是疏松层表面形貌特征。与采用已有成熟工艺(外加电压 350V,占空比 20%,频率为 500Hz,微弧氧化处理 20min) 制备的铸态试样表面微弧氧化膜相比,其微孔尺寸均匀,无细小微孔 (1-2  $\mu$ m) 偏聚现象。但从横截面形貌对比(见图 4) 可以发现超细晶试样表面膜层较厚且致密,无明显贯穿孔存在,对腐蚀液的侵入具有良好的屏蔽作用,对耐蚀性提高有利。经微弧氧化处理后,试样腐蚀类型由严重的局部点蚀破坏转变为均匀腐蚀形貌,如图 5 所示。全浸泡腐蚀速率由 ECAP16 道次试样的  $3.3\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  减小为  $3.6 \times 10^{-4} \text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 腐蚀电流密度由 ECAP16 道次试样的  $129 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  减小为  $0.5997 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , 阻抗值由 ECAP16 道次试样的  $300\text{ohms} \cdot \text{cm}^2$  增大到  $7765000\text{ohms} \cdot \text{cm}^2$ , 如图 6、图 7 所示。微弧氧化对耐蚀性的提高具有显著作用。同时,由于超细晶中特殊的微结构特征(高密度位错,大角度晶界和极度极化且分布均匀的第二相粒子等) 能改善微弧氧化成膜过程,提高微弧氧化膜致密性,使得超细晶 AZ91D 表面微弧氧化膜耐蚀性较铸态试样直接微弧氧化后耐蚀性有明显提高,主要体现在较高的点蚀电位和自腐蚀电位、较小的自腐蚀电流和较大的阻抗值。从图 7(b) 还

可知,超细晶 AZ91D 表面微弧氧化膜具有更长时间的保护性。经组合处理后,Mg-9.05wt. % Al-0.65wt. % Zn 合金强韧性和耐蚀性能得到显著提升。

[0038] 实施例 2:

[0039] 采用线切割将铸态 Mg-9.05wt. % Al-0.65wt. % Zn 合金加工成 19.5mm×19.5mm×40mm 的柱状试件,其铸态组织主要是由  $\alpha$  (Mg) 基体和枝晶间呈网状分布的  $Mg_{17}Al_{12}$ ( $\beta$ ) 相组成(见图 1)。其中  $\beta$  相以两种形式存在,一种是以粗大的块状  $\beta$  相,另一种是( $\alpha + \beta$ )共晶组织中的细小的层片状  $\beta$  相。将切割后的试件进行表面预处理,然后置入模具中随炉加热至 250℃保温 10min,再施加压力进行连续 12 道次 ECAP 挤压,相邻挤压道次之间试样旋转 180°(即传统的 C 路径)以提高挤压组织均匀性,加工后合金组织显著细化(见图 8)。Mg-9.05wt. % Al-0.65wt. % Zn 合金经 ECAP 加工 12 道次后,屈服强度为 133.43MPa,抗拉强度为 230.52MPa。与铸态试样相比,屈服强度和抗拉强度都有较大幅度的提高。将 ECAP 后试件经线切割成 10mm×10mm×10mm 的立方试件,放入碱性硅酸盐电解液(硅酸钠 20g/L;氢氧化钠 10g/L;氟化钾 10g/L;甘油 15g/L;硼砂 15g/L)中并与微弧氧化电源相连作为阳极,不锈钢板与电源相连作为阴极,在外加电压 350V,占空比 20%,频率为 500Hz 条件下微弧氧化处理 20min。处理后其表面形貌(见图 9)呈现典型的微弧氧化膜多孔形貌,从其横截面形貌(见图 10)可以发现膜层较为致密,贯穿孔数量较少,对腐蚀液的侵入具有较好的屏蔽作用。经微弧氧化处理后试样全浸泡腐蚀速率由 ECAP12 道次试样的  $3.0\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$  减小为  $2.2 \times 10^{-4}\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ;腐蚀电流密度由 ECAP12 道次试样的  $30.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  减小为  $0.006173 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,阻抗值由 ECAP12 道次试样的  $1150\text{ohms} \cdot \text{cm}^2$  增大到  $349000\text{ohms} \cdot \text{cm}^2$ ,如图 11、图 12 所示。合金试样耐蚀性得到显著提高。经组合处理后,Mg-9.05wt. % Al-0.65wt. % Zn 合金强韧性和耐蚀性能得到显著提升。

[0040] 实施例 3:

[0041] 采用线切割将铸态 Mg-9.05wt. % Al-0.65wt. % Zn 合金加工成 19.5mm×19.5mm×40mm 的柱状试件,其铸态组织主要是由  $\alpha$  (Mg) 基体和枝晶间呈网状分布的  $Mg_{17}Al_{12}$ ( $\beta$ ) 相组成(见图 1)。其中  $\beta$  相以两种形式存在,一种是以粗大的块状  $\beta$  相,另一种是( $\alpha + \beta$ )共晶组织中的细小的层片状  $\beta$  相。将切割后的试件进行表面预处理,然后置入模具中随炉加热至 250℃保温 10min,再施加压力进行连续 8 道次 ECAP 挤压,相邻挤压道次之间试样旋转 180°(即传统的 C 路径)以提高挤压组织均匀性,加工后合金组织被拉长,晶粒得到显著细化(见图 13)。Mg-9.05wt. % Al-0.65wt. % Zn 合金经 ECAP 加工 8 道次后,屈服强度为 150.5MPa,抗拉强度为 227.30MPa。与铸态试样相比,屈服强度和抗拉强度都有较明显的提高。将 ECAP 后试件经线切割成 10mm×10mm×10mm 的立方试件,放入碱性硅酸盐电解液(硅酸钠 15g/L;氢氧化钠 5g/L;氟化钾 5g/L;甘油 10g/L;硼砂 5g/L)中并与微弧氧化电源相连作为阳极,不锈钢板与电源相连作为阴极,在外加电压 350V,占空比 15%,频率为 400Hz 条件下微弧氧化处理 15min。处理后其表面形貌(见图 14)呈现典型的微弧氧化膜多孔形貌,从其横截面形貌(见图 15)可以发现膜层较为均匀覆盖在基体表面,对腐蚀液的侵入具有一定的屏蔽作用。经微弧氧化处理后试样全浸泡腐蚀速率由 ECAP 8 道次试样的  $2.8\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$  减小为  $8.8 \times 10^{-4}\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ;腐蚀电流密度由 ECAP 8 道次试样的  $67.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  减小为  $0.01469 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,阻抗值由 ECAP 8 道次试样的  $808\text{ohms} \cdot \text{cm}^2$  增大到  $146700\text{ohms} \cdot \text{cm}^2$ ,如图 16、图 17 所示。合金试样耐蚀性得到提高。经组合处理后,



Mg-9.05wt. % Al-0.65wt. % Zn 合金强韧性和耐蚀性能得到显著提升。

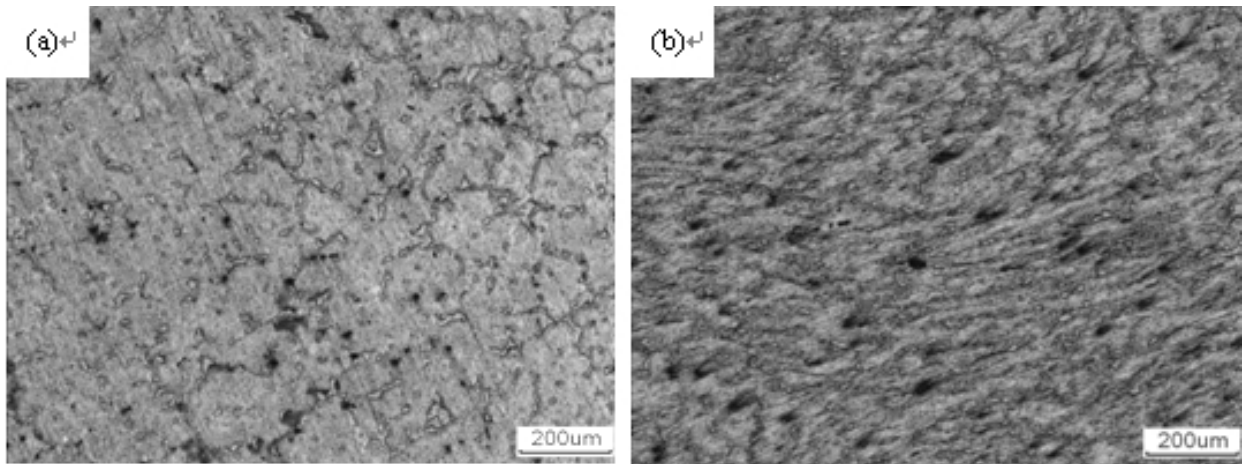


图 1

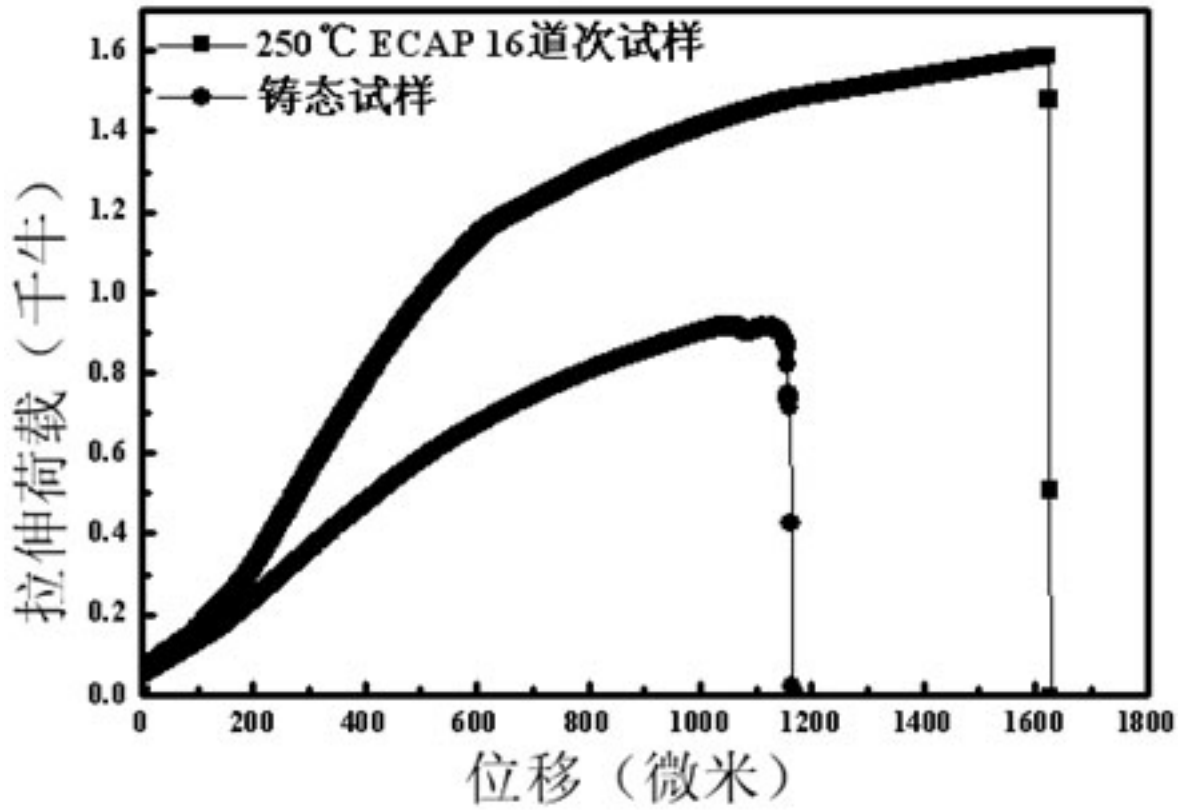


图 2

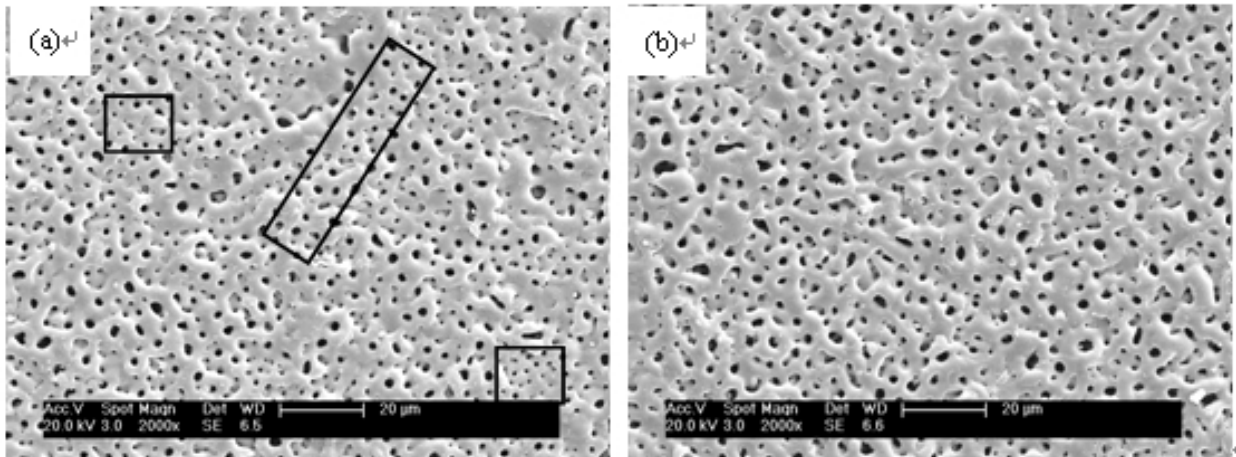


图 3

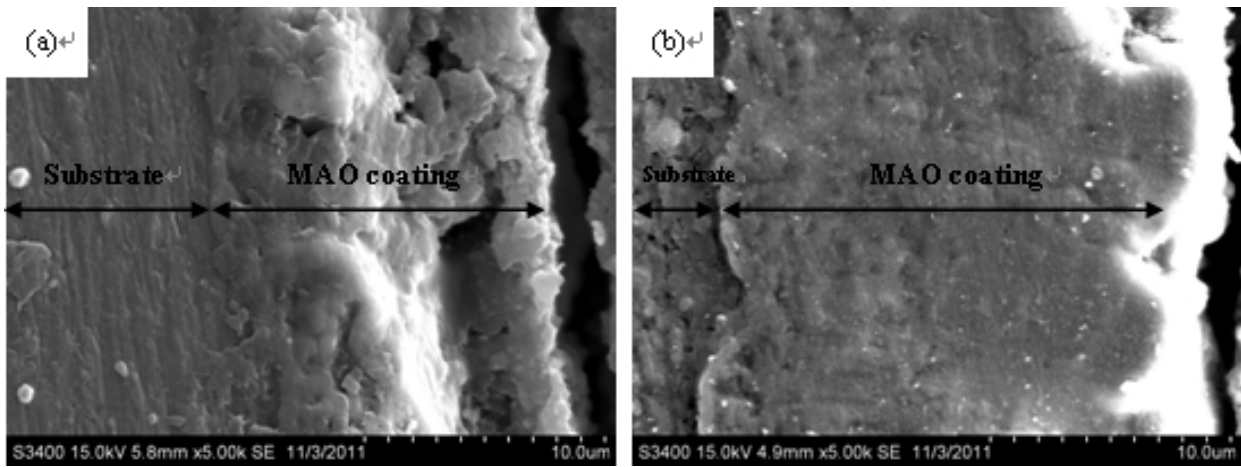


图 4

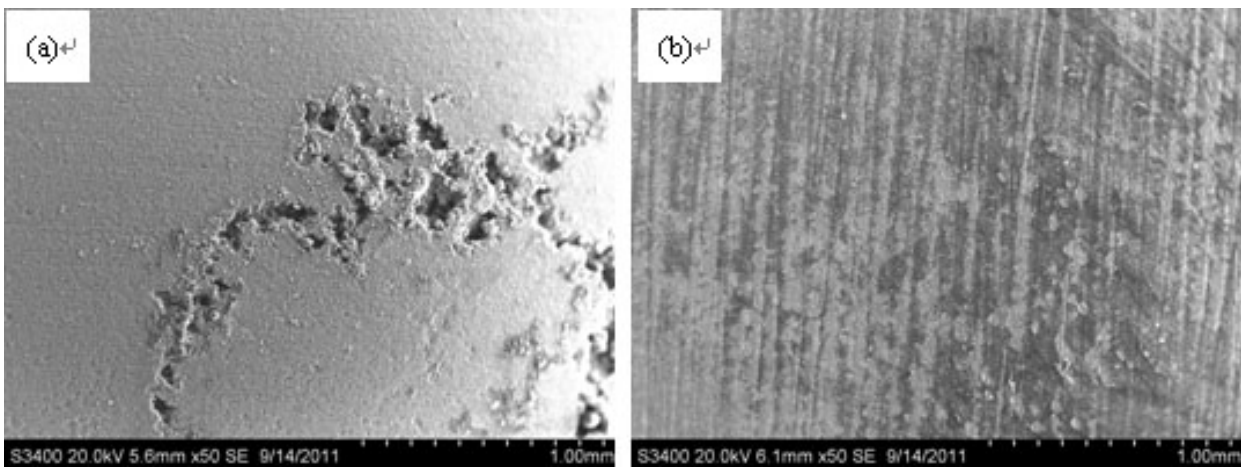


图 5

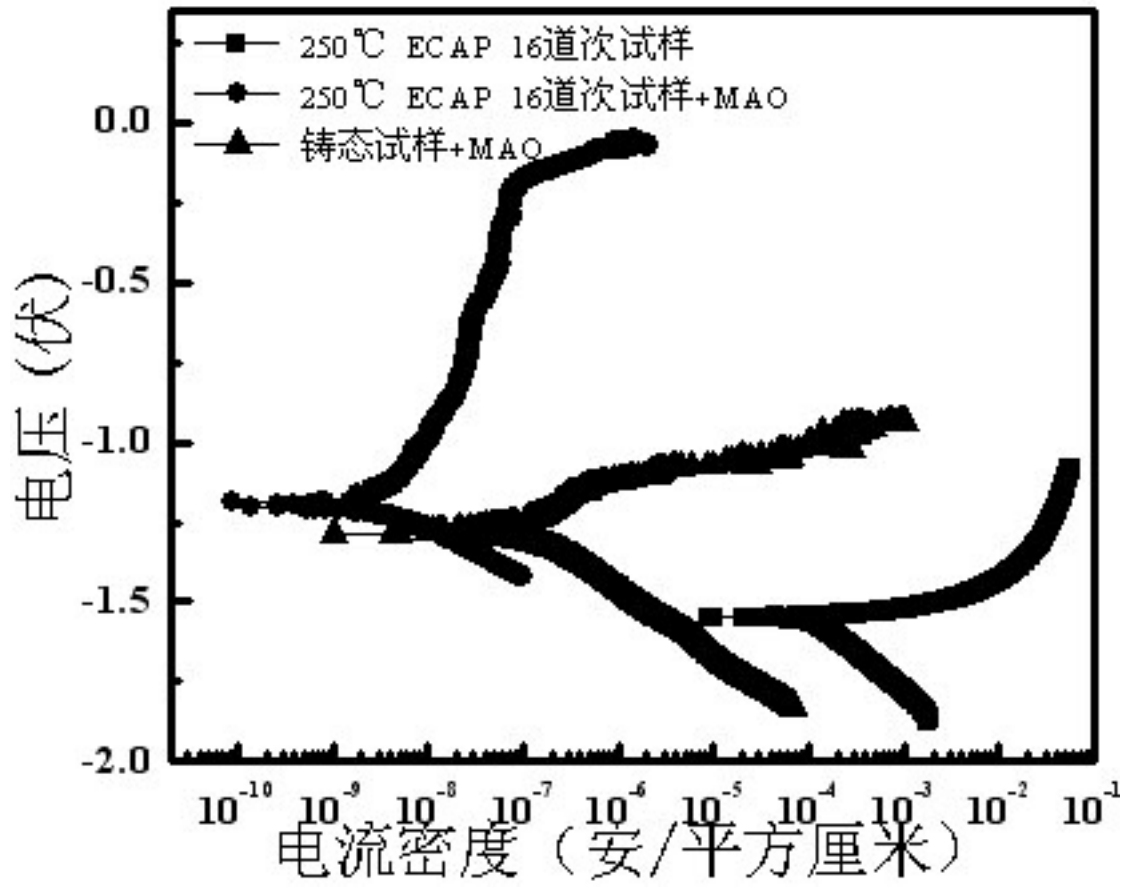


图 6

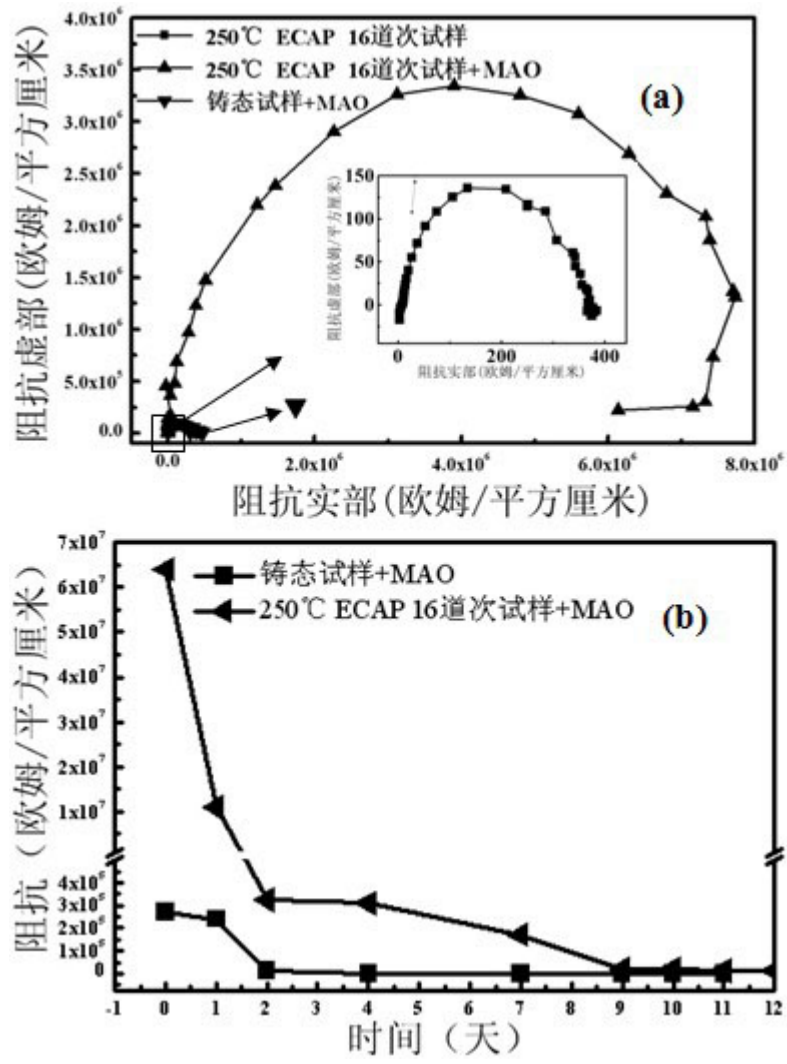


图 7

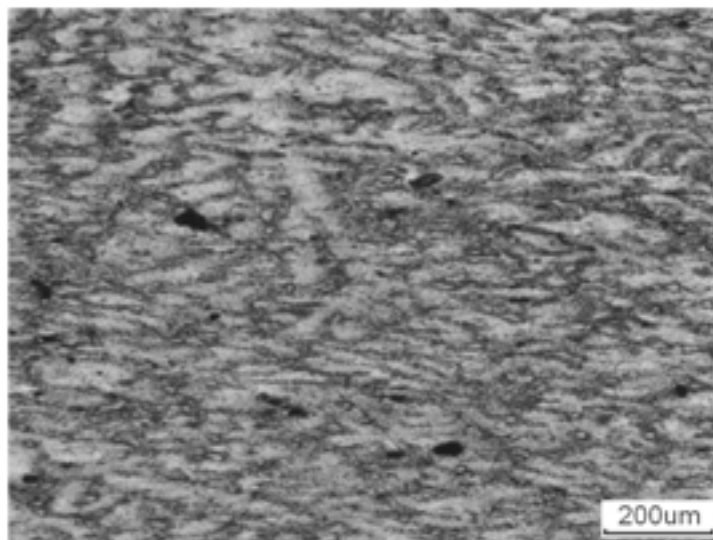


图 8

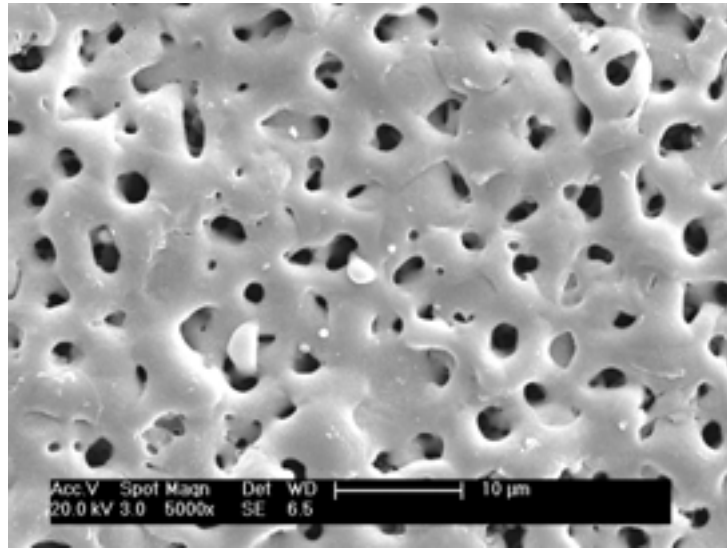


图 9

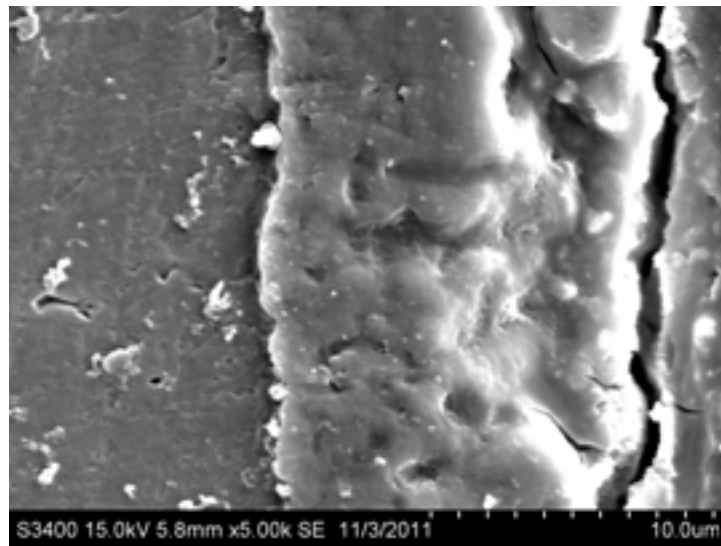


图 10

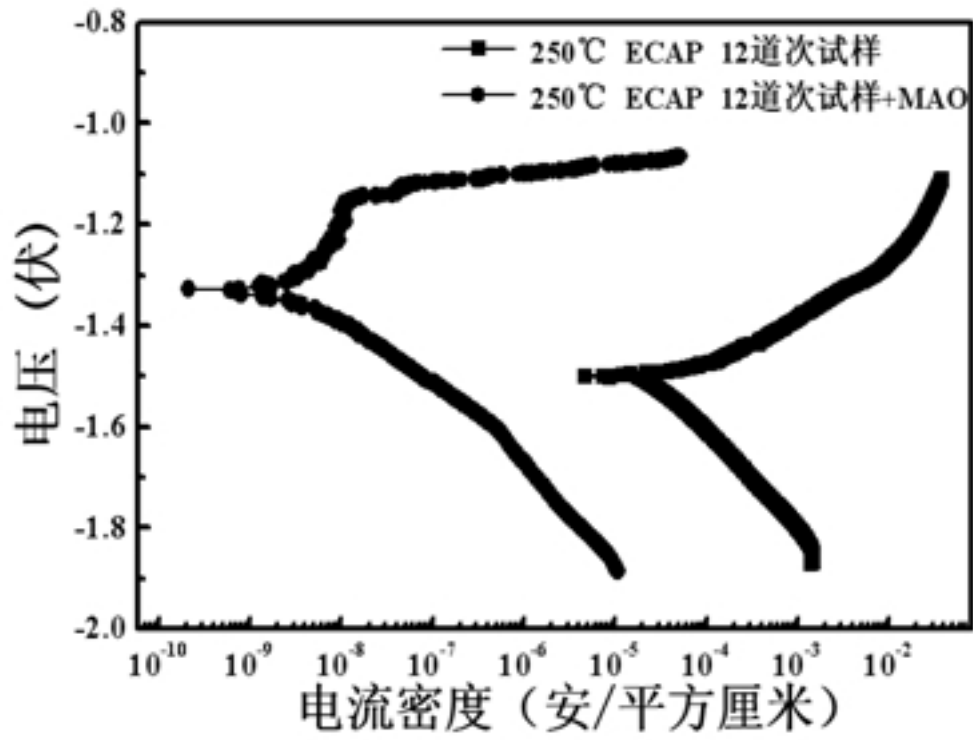


图 11

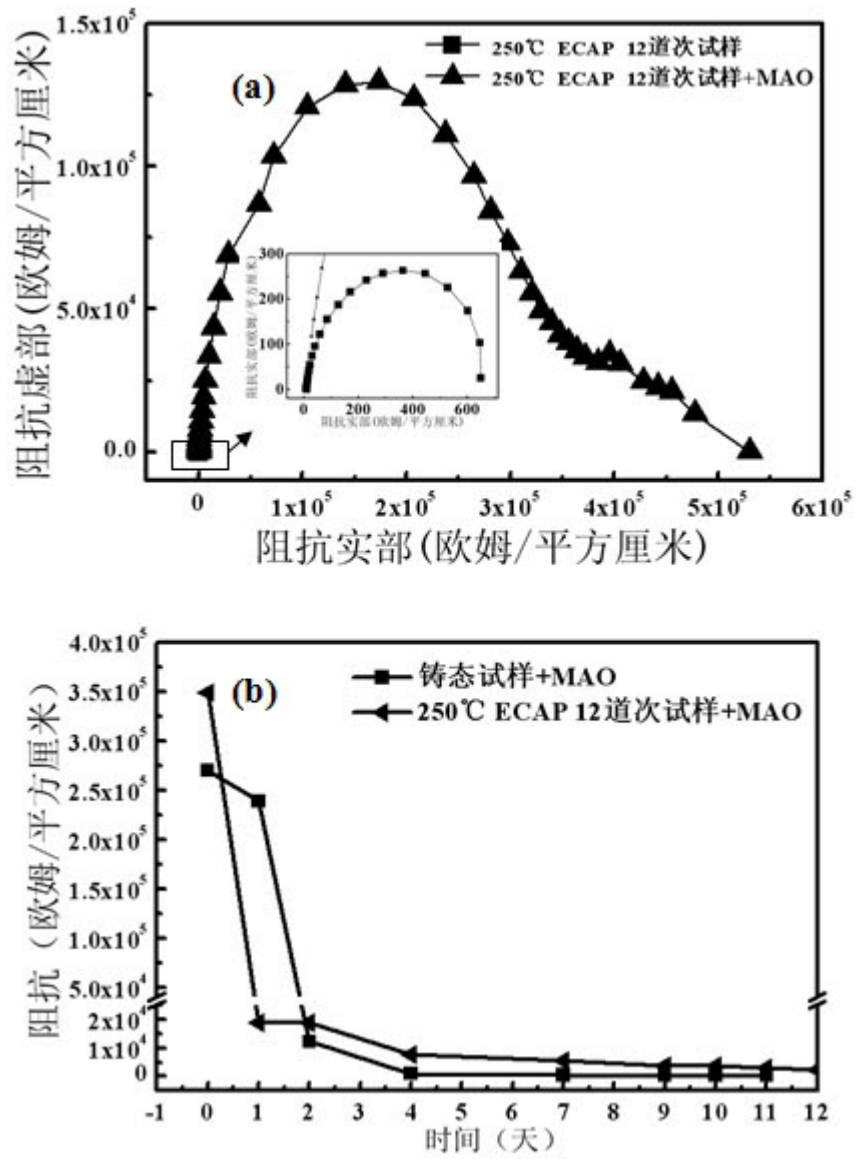


图 12



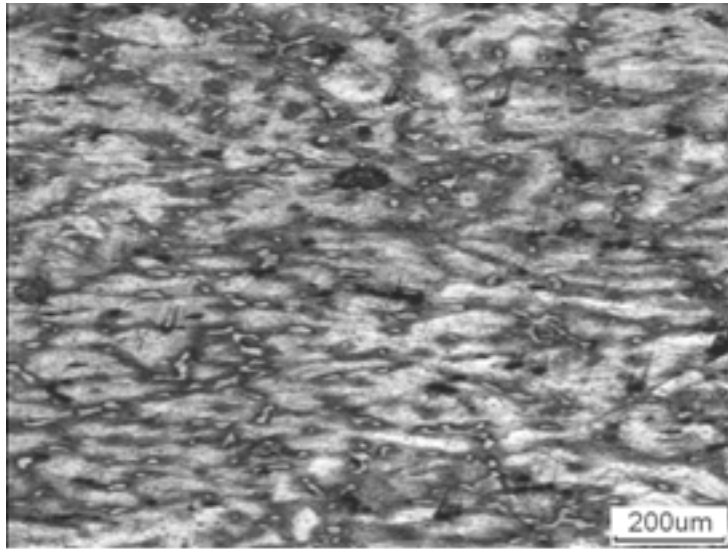


图 13

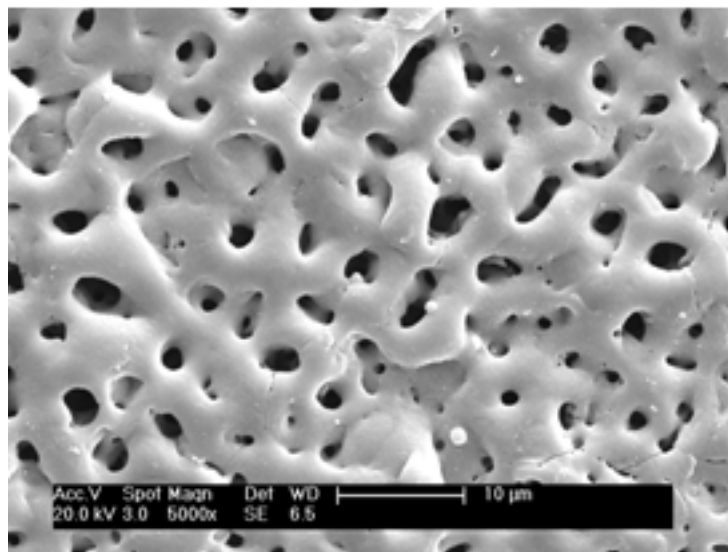


图 14

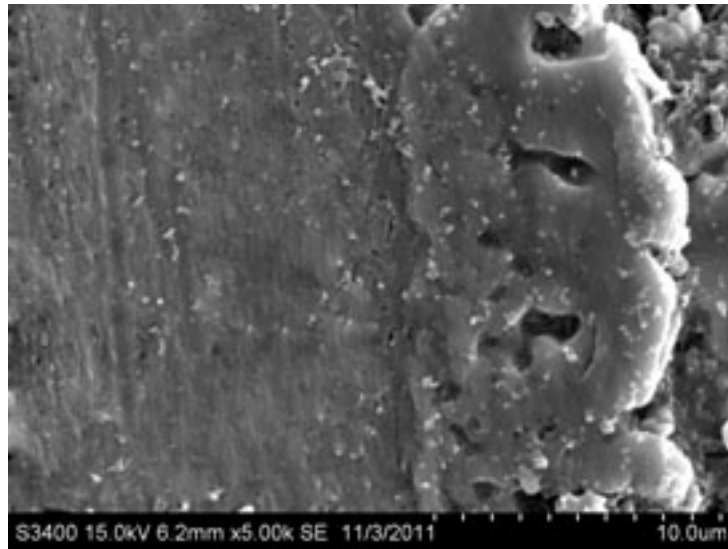


图 15

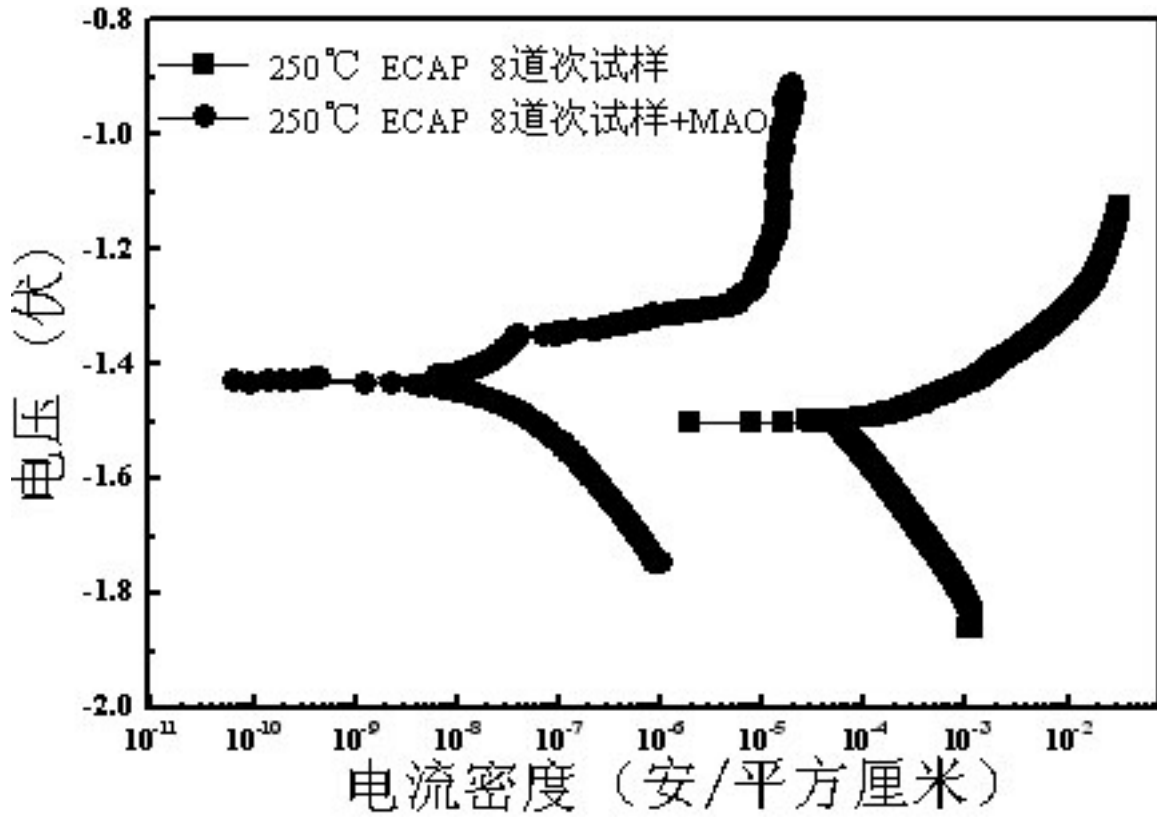


图 16

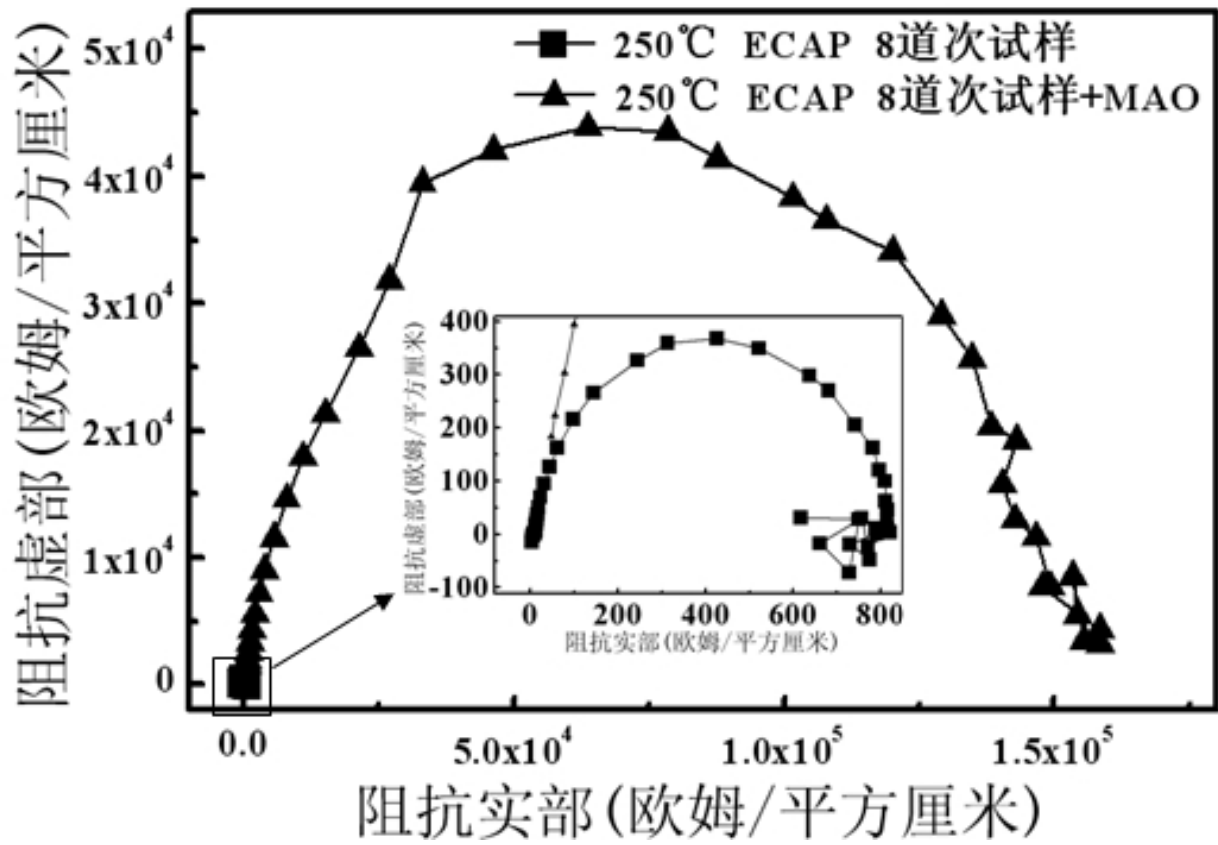


图 17