

# 稀土Ce对铝基耐温牺牲阳极电流效率影响研究

焊接（卓越班）2101班：田书艳 指导教师：孙良 论文类型：毕业论文

**摘要：**本研究探究稀土Ce对铝基耐温牺牲阳极电流效率的影响，制备含2%、6%、10%Ce的Al-Zn-In-Mg-Sn-Ce合金，在25°C和70°C的3.5%NaCl溶液中开展电化学性能测试，采用恒电流加速、极化曲线等多种方法分析Ce的作用机制。实验结果表明：常温下，6%Ce合金自腐蚀电流密度最小，晶粒细化明显，电流效率最佳；高温下，Ce可抑制阳极钝化，10%Ce合金形成多孔保护结构，提升耐蚀性。SEM分析显示，Ce以金属间化合物形式分布于晶界，细化晶粒并改善腐蚀形貌。研究证实，Ce通过优化微观组织、调控钝化膜稳定性，显著提升铝基牺牲阳极的耐温性与电流效率，其中6%Ce含量在常温和高温环境下综合性能表现优异。

**关键词：**稀土Ce；铝基牺牲阳极；电化学性能测试；电流效率

## 1 研究背景

海底管道多为钢材，其金属腐蚀是核心问题，由周围介质物理、化学和电化学作用引发。阴极保护是防外腐蚀的重要措施，其通过电化学反应使金属阴极极化减缓腐蚀。铝合金牺牲阳极因高电流效率等优点，在海洋金属设施阴极保护中广泛应用。但随着海上油气设施建设加速，在极端环境和长期服役下，深海腐蚀防护面临挑战。高温高压工况对铝基牺牲阳极性能要求更高，研究表明添加Ce能细化微观组织、形成耐高温氧化层，因此研究稀土Ce对铝基耐温牺牲阳极电流效率的影响，具有重要工程实用价值。

## 2 发展现状

### 2.1 稀土Ce对铝合金性能和组织的影响

王武孝等经实验表明，适量Ce可细化铝合金晶粒，产生细晶强化效果，提升强度。Lin等发现，Ce可作为异质形核核心增加形核率，细化晶粒。此外，添加Ce会促使合金形成新的第二相，如Al-0.2Ce-0.1Y合金中生成 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 相，其与 $\alpha\text{-Al}$ 的二维错配度为4.43%，可为 $\alpha\text{-Al}$ 提供形核基底。

### 2.2 温度对铝基牺牲阳极的影响

宋正伟等指出，当温度升高（>80°C），阳极溶解转变为以小孔腐蚀和晶间腐蚀为主。高温还改变活性元素沉积行为：扩散加快加剧局部腐蚀，同时抑制部分元素沉积，减少活性位点。在深海（水深>300m）及高温井下等极端工况中，高压加剧阳极极化，高温使局部腐蚀速率提升300-500%，形成>200 $\mu\text{m}$ 蚀坑，导致电流效率下降40-60%，严重影响井筒保护。

在此背景下，研究稀土Ce对铝基耐温牺牲阳极电流效率的影响，有望开发适用于高温高压环境的高性能材料，解决传统阳极在极端工况下的性能衰减问题，对海上能源开采等领域具有重要理论与实际意义。

### 3 相关分析

#### 3.1 铝基牺牲阳极金相组织分析

使用Axiovert405M金相显微镜观察稀土Ce含量为0%、2%、6%和10%的铝基牺牲阳极金相样品，结果如图1所示。不含Ce的铝基合金呈现典型铸造组织，存在树枝状晶结构，枝晶干与枝晶间区域成分偏析导致组织不均。2%Ce合金晶粒尺寸大、形状不规则，部分区域有方向性；第二相粒子数量少且分散，呈短条状或颗粒状。6%Ce合金晶粒尺寸减小，呈等轴状，第二相粒子数量增多，在晶界偏聚，有颗粒状和细小网状结构。10%Ce合金晶粒尺寸与6%相近，但分布不均，第二相粒子数量进一步增加，晶界处连续密集，晶内大量细小弥散分布。

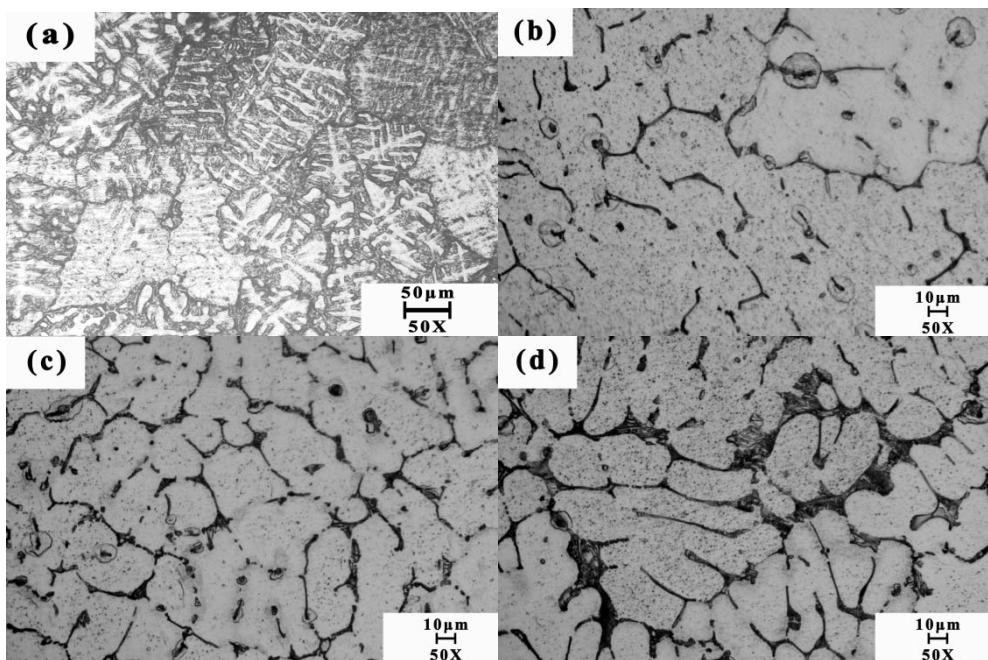


图1 铝基牺牲阳极金相图样 (a)含0%Ce (b)含2%Ce (c)含6%Ce (d)含10%Ce

#### 3.2 电化学性能测试分析

##### 3.2.1 电流效率分析

表1为含2%、6%、10%Ce铝基牺牲阳极在25°C的3.5%NaCl溶液中按GB/T17848-1999试验后的性能数据（1号~3号分别对应2%、6%、10%Ce）：1号开路电位最负，驱动电压优势显著，更利于释放保护电流。实际电容量均低于理论值，且与理论值变化趋势一致。2号电流效率最高为71.33%，其电能利用更充分。

表1 含Ce铝基牺牲阳极的开路电位、理论电容量和电流效率

序号	开路电位/V	理论电容量/(A·h/kg)	实际电容量/(A·h/kg)	电流效率/%
1(25°C)	-1.112	2828.8581	1990.9214	69.66%

2(25°C)	-1.110	2771.1263	1976.5948	71.33%
3(25°C)	-1.007	2713.3945	1850.0495	68.18%

### 3.2.2 极化曲线分析

经极化曲线拟合获得含Ce铝基牺牲阳极的自腐蚀电位与电流密度（表2），1-3号为25°C下2%、6%、10%Ce材料，4-6号对应70°C同含量材料。研究发现：

2%、6%、10%Ce合金在70°C下，相同电位的电流密度高于25°C，说明升温促进电极反应，加快腐蚀速率。70°C时自腐蚀电位负移，电流密度显著增大，腐蚀倾向加剧。25°C时，6%Ce合金自腐蚀电流密度最小，表明该含量Ce在常温下抑制腐蚀效果较好；70°C时，不同Ce含量合金自腐蚀电流密度差异缩小。

表2 含Ce铝基牺牲阳极极化曲线的拟合参数

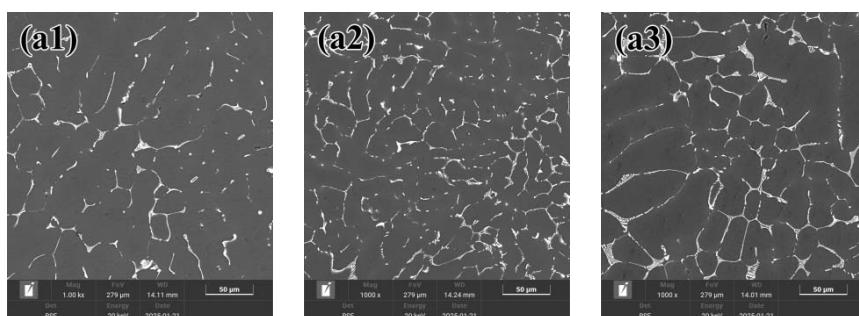
序号	$E_{corr}/V(vs. SCE)$	$I_{corr}/(A/cm^2)$
1(25°C)	-1.0887	$2.2860 \times 10^{-5}$
2(25°C)	-0.6848	$2.3447 \times 10^{-8}$
3(25°C)	-1.0783	$3.9542 \times 10^{-5}$
4(70°C)	-1.2402	$1.0277 \times 10^{-3}$
5(70°C)	-1.2626	$2.8818 \times 10^{-4}$
6(70°C)	-1.2454	$1.5439 \times 10^{-4}$

### 3.2.3 电化学阻抗谱分析

2%Ce、6%Ce和10%Ce铝基牺牲阳极在25°C和70°C的3.5%NaCl溶液中的阻抗谱测试结果显示：温度从25°C升至70°C时，三种合金Nyquist图的容抗弧半径均减小。表明电荷转移电阻降低，加速了腐蚀电化学反应。25°C下，6%Ce合金容抗弧在横坐标跨度更大，对应电荷转移电阻更高，说明该合金在常温下腐蚀反应更难进行，体现Ce含量增加对腐蚀反应的抑制作用。

### 3.3 铝基牺牲阳极电化学试验前后形貌分析

使用TH-F120扫描电镜分析2%、6%、10%Ce铝基牺牲阳极在未电化学试验、25°C和70°C电化学试验后的形貌，结果如图2所示。Ce通过细化晶粒、调控第二相分布（金属间化合物）改善合金耐蚀性：6%Ce合金在常温和高温下表面缺陷少、耐蚀性最优；10%Ce高温下形成多孔保护结构，但局部腐蚀风险需关注。



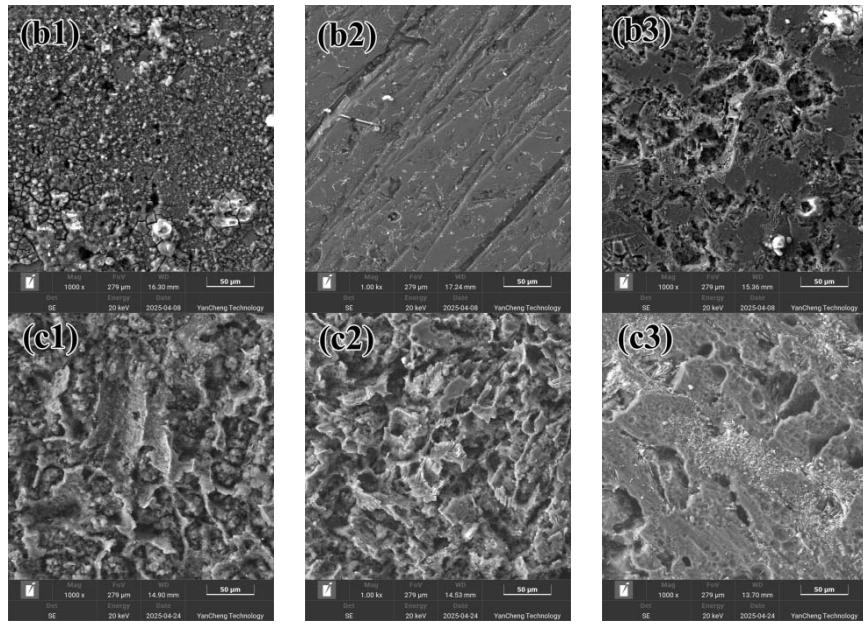


图2 含Ce铝基牺牲阳极SEM形貌 (a)未电化学试验 (a1)含2%Ce (a2)含6%Ce (a3)含10%Ce (b)常温电化学试验 (b1)含2%Ce (b2)含6%Ce (b3)含10%Ce (c)高温电化学试验 (c1)含2%Ce (c2)含6%Ce (c3)含10%Ce

## 4 研究结论及对策建议

### 4.1 研究结论

本论文研究稀土Ce对铝基耐温牺牲阳极电流效率的影响，结果如下：

(1) 电化学性能影响：常温下6%Ce合金自腐蚀电流密度低至 $2.3447 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ ，自腐蚀损耗小，电流效率最佳。70°C时Ce抑制阳极钝化，10%Ce合金虽因电荷转移电阻降低加速腐蚀反应，但表面形成的多孔保护结构可提升耐蚀性。

(2) 微观组织优化：Ce在凝固过程中作为异质形核核心，增加形核率，使合金晶粒从不规则多边形逐渐细化为均匀等轴晶。

(3) 腐蚀机制改善：常温下，6%Ce合金腐蚀形貌均匀，减少局部腐蚀；高温下，10%Ce合金的多孔保护结构可减缓深蚀坑形成与扩展，抑制电流效率下降。

### 4.2 对策建议

将Ce的添加量在6%左右进行细化，寻找到最佳添加量。