

# 稀土 Gd 对 SLM 成型医用 Mg-Zn-Gd 合金耐蚀性能的影响

杨光<sup>1</sup>, 王琮玮<sup>1</sup>, 王琮瑜<sup>1</sup>, 王金业<sup>1</sup>, 刘大志<sup>2</sup>

(1. 河北科技大学, 河北 石家庄 050018)

(2. 唐山威豪镁粉有限公司, 河北 唐山 064406)

**摘要:** 镁合金具有高比强度与良好的生物相容性, 是一种理想的骨植入材料。因镁合金降解速率过快在临床应用中受到限制, 通过选区激光熔化(SLM)可对其实现合金化并改善耐蚀性能。利用 SLM 成型 Mg-1Zn-xGd(x=0, 0.25, 0.5, 1, 2, 质量分数, %)合金, 测试镁合金在模拟体液中浸泡 72 h 平均腐蚀速率的变化趋势, 采用 SEM、EDS 与 TEM 检测手段辅助分析腐蚀机制。结果表明, Gd 含量对镁合金腐蚀速率影响显著, 添加 0%~2%Gd 后镁合金降解速率呈先降低后升高趋势, 在添加 0.5%Gd 时镁合金具有最佳耐蚀性能。腐蚀反应产生的表面钝化膜能够在一定程度减缓腐蚀的进行, 添加过量 Gd 后沿晶界析出 Mg<sub>5</sub>Gd 相增多, 加剧了镁合金的腐蚀。

**关键词:** 稀土镁合金; 耐蚀性能; 降解速率; 显微组织

**中图分类号:** TG146.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2022)06-2167-08

镁合金因具有低密度、高比强度、生物相容性好的特点, 广受国内外学者青睐<sup>[1]</sup>。镁的标准电极电位为-2.37 V, 是最活泼的金属之一, 在人体体液环境中能够自发降解<sup>[2-4]</sup>。相较于不锈钢、钛基合金等金属, 镁的弹性模量与人体自然骨(3~30 GPa)相接近, 在 41~45 GPa, 能够有效地避免“应力屏蔽”效应的发生<sup>[5,6]</sup>, 是一种十分理想的骨植入物材料。然而, 镁合金电极电位过低导致其腐蚀行为不稳定, 植入生物体后存在降解过快的问题。由于人体不同部位的骨组织对植入物降解速率的需求不同, 镁合金的降解速率并非越慢越好, 而应将其调控在一定范围内变化。选区激光熔化(selective laser melting, SLM)是新兴的快速制造技术, 可成型几乎任意形状的金属零件, 能够满足对多孔体等复杂结构植入物的制备。

合金化是改善镁合金耐蚀性的常用方法<sup>[7]</sup>。研究表明, 向镁合金内添加稀土元素不仅可以提升其力学性能, 还能增强镁合金的耐蚀性, 使镁合金的腐蚀速率减缓<sup>[8-10]</sup>。Zhang<sup>[11]</sup>等发现在 ZK61 镁合金中添加稀土元素 Gd 能够降低镁合金的腐蚀速率, 添加 Gd 元素后镁合金中第二相的形态与分布均发生变化, 原

有严重的电偶腐蚀得到改善。刘丽<sup>[12]</sup>等向 AM60 镁合金中添加 Gd 后发现合金在 0.9% NaCl 溶液内的腐蚀电位提高, 耐蚀性能得到增强。此外, 崔博帅<sup>[13]</sup>等人还对 SLM 成型 AZ91D 镁合金的腐蚀行为进行研究, 显微组织观察发现 SLM 成型的 AZ91D 镁合金晶粒尺寸仅为 5 μm。因组织结构不同, SLM 成型镁合金的腐蚀速率与铸态镁合金存在明显差异。目前国内多通过铸造成型的方式研究镁合金的耐蚀性能, SLM 成型镁合金的研究主要集中在提高其机械性能方面, 合金化对 SLM 成型镁合金耐蚀性能的影响尚缺乏系统性研究。

本研究旨在探索添加不同含量的稀土元素 Gd 对 SLM 成型医用镁合金腐蚀速率的影响规律, 研究 Mg-1Zn-xGd(x=0, 0.25, 0.5, 1, 2, 质量分数, %)合金在模拟体液(simulated body fluid, SBF)内浸泡 72 h 的平均腐蚀速率变化趋势。通过对比腐蚀后表面宏观与微观形貌辅助分析镁合金受腐蚀情况, 并借助 SEM、TEM 等技术手段观察 Mg-1Zn-0.5Gd 合金微观组织形态, 探讨 Gd 元素对 Mg-Zn-Gd 合金腐蚀行为影响的机制, 为调控 SLM 成型 Mg-Zn-Gd 系合金的降解速率提供理论基础。

收稿日期: 2021-10-20

基金项目: 国防基础科研计划(JCKY2018407C004); 中央引导地方科技发展资金(206Z1806G); 河北省高校百名优秀创新人才支持计划(SLRC2019050); 河北省研究生创新资助项目(XJXCZZSS202117)

作者简介: 杨光, 男, 1974 年生, 博士, 教授, 河北科技大学机械工程学院, 河北 石家庄 050018, 电话: 0311-81668632, E-mail: yangg@hebut.edu.cn

# 1 实验

采用纯度为 99.8% 的雾化球形纯 Mg 粉末、Mg-5Zn 中间合金粉末与 Mg-15Gd 中间合金粉末，通过物理混合的方式，配制 Mg-1Zn-xGd(x=0, 0.25, 0.5, 1, 2)三元合金粉末。为避免球磨机械混合对粉体球形度造成损害，采取轻柔搅拌方式连续操作 8 h，保证三元合金粉末均匀混合。

使用雷尼绍 AM250 选区激光熔化设备对 5 种成分的镁合金粉末进行成型制备，主要工艺参数如表 1 所示。该参数的激光能量密度较低，所成型镁合金性能良好，可一定程度上抑制镁基合金的烧损。对腐蚀试样直接成型，腐蚀试样规格为 10 mm×10 mm×3 mm，在试件边缘处设计  $\Phi 1$  mm 通孔，用于悬挂浸泡。通过线切割将腐蚀试样与成型基板分离后，经 800#~2000# 水磨砂纸对腐蚀试样表面逐级打磨与抛光，使用无水乙醇清洗试样表面并热风烘干，试样表面光洁无划痕后置于干燥处待用。

采用如表 2 所示浓度的模拟体液作为浸泡环境

进行腐蚀试验。浸泡失重试验按照 GB/T 10124-88 《金属材料实验室均匀腐蚀全浸试验方法》进行设计，将腐蚀试样恒温 37 °C 浸泡于 SBF 溶液内分别在 5、12、24、48、72 h 后捞出，放入 200 g/L CrO<sub>3</sub>+10 g/L AgNO<sub>3</sub> 混合溶液中加热至沸腾以去除腐蚀产物，利用万分之一精度电子天平进行称重，计算各成分合金的平均腐蚀速率。各成分设置 3 个平行试样。使用场发射扫描电镜 (SEM, 型号 JSM-7900F) 对 Mg-Zn-Gd 合金的显微组织与浸泡试样表面的腐蚀形貌进行表征，使用透射电子显微镜 (TEM, 型号 JEM-2100PLUS) 对 Mg-Zn-Gd 合金中稀土相进行观察，辅助分析稀土元素 Gd 对镁合金降解速率的影响机制。

表 1 SLM 成型 Mg-Zn-Gd 合金工艺参数

Table 1 Process parameters of Mg-Zn-Gd alloy formed by SLM

Laser power/W	Scanning speed/mm s <sup>-1</sup>	Scanning space/ $\mu$ m	Layer thickness/ $\mu$ m
90	300	60	50

表 2 模拟体液的化学组成

Table 2 Chemical composition of SBF solution (L<sup>-1</sup>)

Ultra-pure water/mL	NaCl/g	NaHCO <sub>3</sub> /g	KCl/g	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O/g
750	7.996	0.350	0.224	0.228
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O/g	(1 kmol/m <sup>3</sup> ) HCl/mL	CaCl <sub>2</sub> /g	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /g	(CH <sub>2</sub> OH) <sub>3</sub> CNH <sub>2</sub> /g
0.305	40	0.278	0.071	6.057

表 3 Mg-1Zn-xGd 合金浸泡 72 h 失重情况

Table 3 Mass loss of Mg-1Zn-xGd alloys after soaking for 72 h

Identification	Mg-1Zn	Mg-1Zn-0.25Gd	Mg-1Zn-0.5Gd	Mg-1Zn-1Gd	Mg-1Zn-2Gd
Mass/g	0.5504	0.5882	0.5482	0.5386	0.5278
Mass loss/g	0.2523	0.1609	0.1386	0.1563	0.3217
Mass loss rate/mg cm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	25.872	16.527	14.933	16.131	33.102

# 2 结果与分析

## 2.1 Mg-Zn-Gd 系合金的腐蚀速率

Mg-1Zn-xGd(x=0, 0.25, 0.5, 1, 2)合金在 1 倍浓度的 SBF 溶液内浸泡 72 h 后，平均质量变化情况如表 3 所示。镁合金各时间节点失重速率变化趋势如图 1 所示。可以看出，添加稀土元素 Gd 可增强镁合金耐蚀性，但过量的 Gd 元素添加则会加快镁合金的腐蚀速率。对比未添加 Gd 元素的 Mg-1Zn 合金，在添加 0%~1% Gd 后镁合金的腐蚀速率显著降低，且 Mg-1Zn-0.5Gd 合金降解速率最慢为 14.933 mg cm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>，相较 Mg-1Zn 合金减缓 42.3%。当 Gd 元素添加量超过 0.5% 后，镁合金

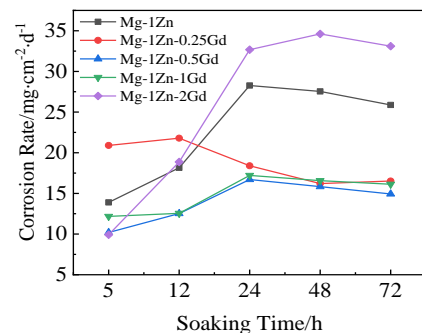


图 1 Mg-1Zn-xGd 合金腐蚀速率与浸泡时间的变化关系  
Fig.1 Variations of corrosion rate with soaking time of Mg-1Zn-xGd alloys

腐蚀速率呈上升趋势, Mg-1Zn-2Gd 合金发生严重腐蚀行为, 降解速率较未添加 Gd 时明显加快。在浸泡初期镁合金平均腐蚀速率呈上升趋势, 在第 24 h 到达峰值。随腐蚀反应的进行镁合金表面生成钝化膜, 降解行为趋于稳定。24 h 后, 镁合金腐蚀速率逐渐减缓。当加入 0%~2% 的 Gd 后镁合金腐蚀速率在 14.933~33.102 mg cm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 之间变化。各成分合金腐蚀 72 h 后质量损失率如图 2 所示。

图 3 为 SBF 溶液的 pH 值随浸泡时间的变化曲线。可以看出 pH 值在前 24 h 增长迅速, 24 h 后逐渐趋于稳定。Mg-Zn-Gd 合金在溶液中发生如式(1)~(4)反应<sup>[14]</sup>。腐蚀前期镁合金与水反应生成大量氢气, 并产生 OH<sup>-</sup>, 溶液 pH 迅速上升。随腐蚀反应发生, 腐蚀产物 Mg(OH)<sub>2</sub> 在合金表面形成一层致密钝化膜, 阻止腐蚀反应发生, 腐蚀速率趋于稳定。浸泡后 Mg-1Zn-0.5Gd 合金的 SBF 溶液具有最低的 pH 值, 表明该成分合金腐蚀速率最慢。SBF 溶液 pH 值变化结果与失重试验趋势分析一致。

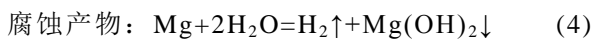
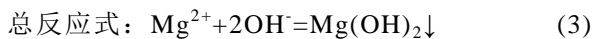
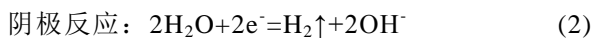
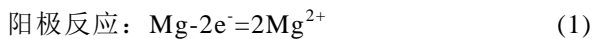


图 4 为 Mg-1Zn-xGd 合金在 SBF 溶液中浸泡 24 h 与 72 h 后宏观形貌。可以看出, 在浸泡 24 h 后镁合金表面均产生不同程度的白色钝化膜, 且形成钝化膜的强弱影响了镁合金受腐蚀程度。钝化膜的主要成分为 Mg(OH)<sub>2</sub>, 能够减缓 SBF 溶液中 Cl<sup>-</sup> 对镁合金的腐蚀<sup>[15]</sup>。浸泡 24 h 后 Mg-1Zn-0.5Gd 合金表面钝化膜最为完整、致密, 72 h 后宏观受腐蚀情况相对优于其他成分镁合金, 具有最佳的耐蚀性。Mg-1Zn-2Gd 合金在浸泡 24 h 后表面并未形成完整钝化膜, 且已发生点蚀行为, 经 72 h 浸泡后受腐蚀最为严重, 产生大量腐蚀坑。这一现象与失重速率分析相一致。

图 5 为 Mg-1Zn-xGd 合金在 SBF 溶液中浸泡 72 h 后的腐蚀形貌 SEM 照片。可以看出, Mg-1Zn-0.5Gd 合金表面均匀分布着微小的腐蚀坑, 受腐蚀程度最轻; Mg-1Zn-2Gd 合金表面产生了较大的腐蚀坑, 局部出现穿孔, 受腐蚀程度最为严重。Mg-1Zn-0.5Gd 合金表面生成的钝化膜能够阻挡 SBF 溶液中 Cl<sup>-</sup> 对合金的腐蚀, 使基体表面脱落更少, 表面腐蚀坑更加均匀。相比于 Mg-1Zn 合金, 在加入 0.25%~1% Gd 后 Mg-Zn-Gd 合金表面腐蚀坑数量明显减少, 表明合金的耐蚀性能得到提高。

2.2 显微组织观察

图 6 为通过 SEM 观察 Mg-1Zn-0.5Gd 合金的显微组织形貌。通过 SLM 技术成型的 Mg-1Zn-0.5Gd 合金晶粒极为细小, 尺寸小于 1 μm, 合金的组织由 α-Mg 基体与沿晶界分布的颗粒状第二相构成。结合图 7 中 SEM 的 EDS 分析结果可知颗粒状第二相应为 Mg<sub>5</sub>Gd 相, 其尺寸约为 100 nm。

图 8 为 Mg-1Zn-0.5Gd 与 Mg-1Zn-2Gd 合金的 TEM 分析。可以看出, 在添加 Gd 元素后 Mg-Zn-Gd 合金内出现纳米级的颗粒状稀土相。与 Mg-1Zn-0.5Gd 合金相比, 添加 2% Gd 后镁合金内的稀土相更为密集, 且颗粒体积增大。通过对稀土相选区电子衍射的测量与分析可知, 其晶格常数为 2.22 nm, 具有 fcc 结构, 属于 Mg<sub>5</sub>Gd 相。文献[16]表明, 添加 Gd 元素后镁合金在晶界析出的颗粒状 Mg<sub>5</sub>Gd 相与 α-Mg 基体间具有腐蚀电位差, α-Mg 基体因具有更低的腐蚀电位在与第二相形成的原电池中作为阳极。第二相在镁合金内分布的形态对镁合金耐蚀性产生影响, 在晶界处连续均匀分布的第二相能够减缓镁合金的腐蚀速率。当 Gd 含量较低时, Mg<sub>5</sub>Gd 相均匀分布在晶界处, 减少镁基体的腐蚀, 因此在一定范围内添加 Gd 能够降低镁合金的腐蚀速率; 当添加过量 Gd 后 Mg<sub>5</sub>Gd 相在晶界处

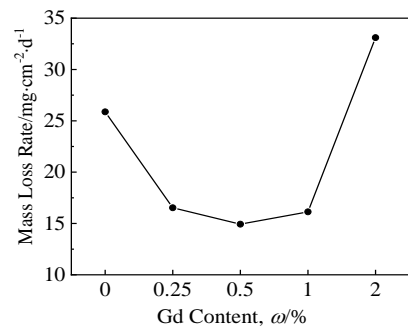


图 2 Mg-1Zn-xGd 合金腐蚀 72 h 后的质量损失率

Fig.2 Mass loss rate of Mg-1Zn-xGd alloys after corrosion for 72 h

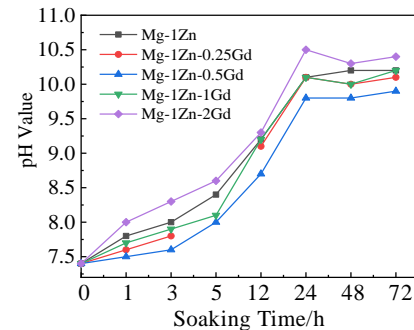


图 3 SBF 溶液的 pH 值随浸泡时间的变化

Fig.3 Variations of pH value of SBF solution with soaking time

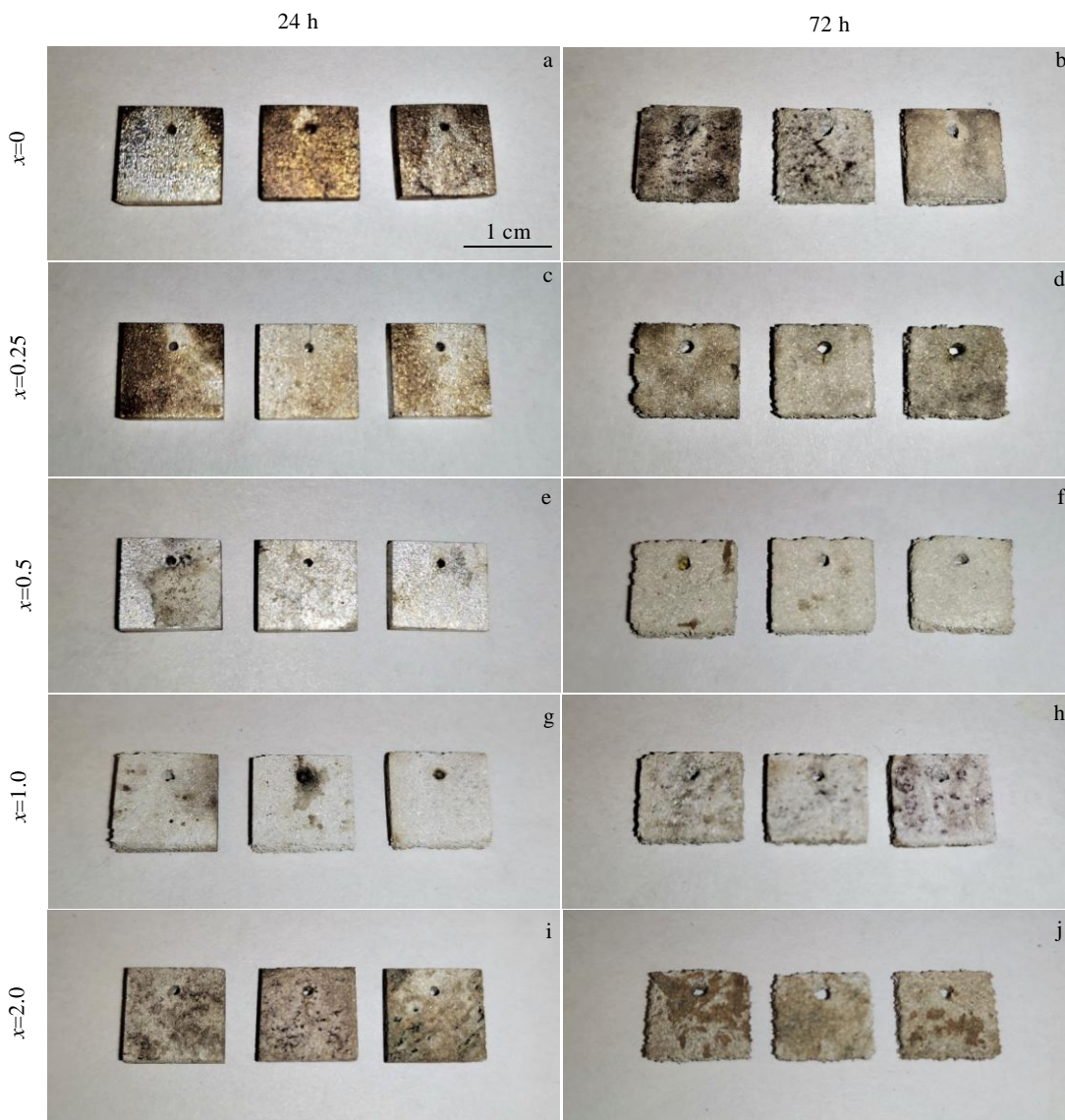


图 4 Mg-1Zn-xGd 合金宏观腐蚀形貌

Fig.4 Macroscopic corrosion morphologies of Mg-1Zn-xGd alloys

大量析出， $Mg_5Gd$  相与  $\alpha-Mg$  基体间的腐蚀电位差加剧了镁合金的电偶腐蚀，耐蚀性能下降<sup>[17]</sup>。Mg-1Zn-2Gd 合金受腐蚀最为严重。

### 2.3 讨论

本研究中采用 SLM 技术对成分为 Mg-1Zn-xGd ( $x=0, 0.25, 0.5, 1, 2$ ) 的镁合金粉末打印成型。SLM 成型的 Mg-Zn-Gd 合金晶粒细小，难以通过金相显微镜观察镁合金组织形态。由于晶粒细小且所添加 Gd 元素含量较少，XRD 检测也未能检测到  $Mg_5Gd$  相。在 SEM 放大 10000 倍后观察发现所成型镁合金的晶粒为等轴晶，晶粒尺寸不足  $1 \mu m$ 。选区激光熔化成型过程中镁合金熔凝速率极快，熔池尺寸微小，成型出的镁合金的晶粒尺寸通常小于铸态镁合金。稀土元

素 Gd 是表面活性元素，添加 Gd 能够降低 Mg-Zn-Gd 合金溶体的金属液面能，临界形核功降低，结晶核心数量增加，晶粒尺寸进一步得到细化<sup>[18]</sup>。细化晶粒能够提高镁合金的力学性能与耐腐蚀性能，但并非晶粒越细小镁合金的耐腐蚀性能越强。晶粒细化造成晶界密度增大也会在一定程度上加快合金的腐蚀速率。影响镁合金晶粒尺寸的因素较多且存在耦合关系，采取晶粒细化手段本身可能会对镁合金的腐蚀速率造成影响<sup>[19]</sup>，因此尚未有关于晶粒尺寸与腐蚀速率对应关系的确切结论。

在试验中发现 Mg-Zn-Gd 合金表面存在微小气孔，金相显微镜下表现为黑色孔洞。图 9 为 SLM 成型镁合金的表面气孔形貌。

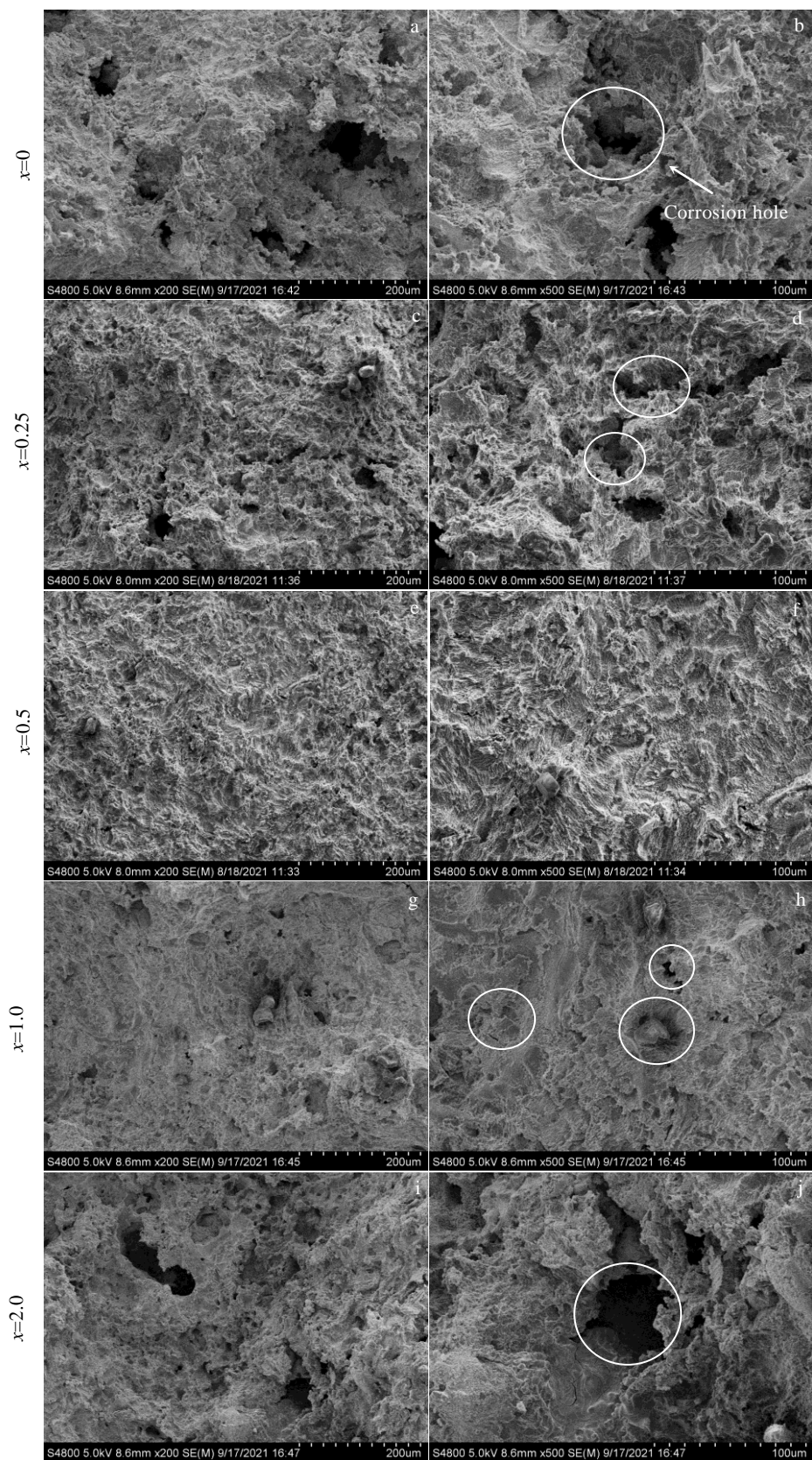


图 5 Mg-1Zn-xGd 合金微观腐蚀形貌

Fig.5 Microscopic corrosion morphologies of Mg-1Zn-xGd alloys

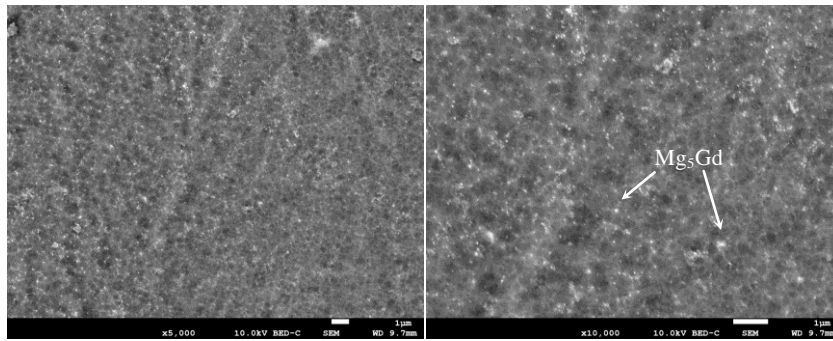
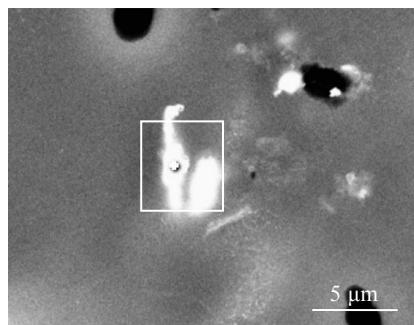


图 6 Mg-1Zn-0.5Gd 合金 SEM 形貌

Fig.6 SEM morphologies of Mg-1Zn-0.5Gd alloy



Element	$\omega/\%$	at%
Mg	67.91	92.99
Zn	0.71	0.37
Gd	31.38	6.64

图 7 Mg-1Zn-0.5Gd 合金 SEM 照片及 EDS 分析结果

Fig.7 SEM image and EDS analysis result of Mg-1Zn-0.5Gd alloy

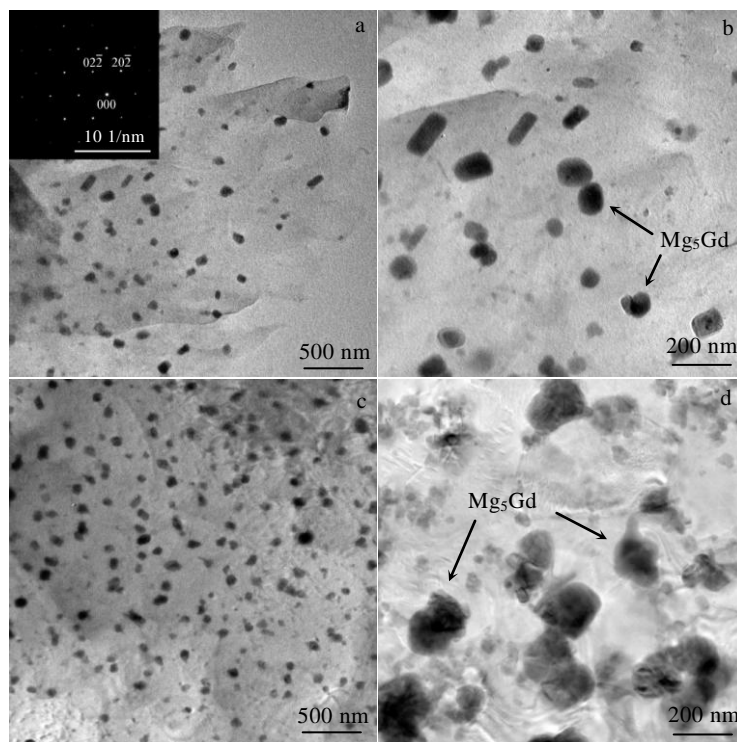


图 8 Mg-1Zn-xGd 合金的 TEM 像及稀土粒 SAED 花样

Fig.8 TEM images and  $Mg_5Gd$  particle SAED pattern of Mg-1Zn-xGd alloys: (a, b) 0.5%Gd and (c, d) 2%Gd

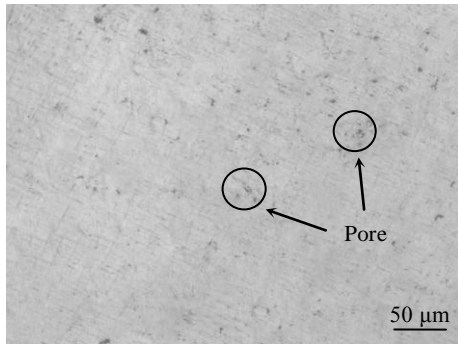


图9 SLM 成型镁合金表面气孔

Fig.9 Surface porosity of SLM magnesium alloy

研究认为, 内部微小孔隙缺陷会加剧镁合金的腐蚀速率。缺氧的内部孔隙与镁合金外表面因供氧差异形成腐蚀原电池, 导致孔隙周围发生点蚀<sup>[20]</sup>。此外, 孔隙的存在也不利于形成致密的钝化膜。金属镁的熔点较低, 仅 648.9 °C, 沸点约 1090 °C。相近的熔沸点使 Mg-Zn-Gd 合金在 SLM 成型过程中极易发生烧损行为, Mg 元素在高能量的激光照射下发生气化蒸发<sup>[21]</sup>, 产生的烧损烟尘弥漫在 SLM 成型设备的成型仓内。当烟尘遮蔽激光束时, 激光的实际能量输出低于理论值, 导致镁合金内产生微小孔隙。烟尘在成型仓内弥漫无规律且不可控, 所形成的缺陷对镁合金的耐蚀性能造成损害。后续需针对抑制镁合金烧损这一问题进行深入研究, 利用 SLM 技术制备高性能的医用镁合金。

### 3 结论

1) SLM 成型不同 Gd 含量的 Mg-1Zn-xGd 合金腐蚀速率差异明显, 在 0%~2% 范围内镁合金腐蚀速率呈先降低后升高趋势, 整体腐蚀速率在 14.933~33.102 mg cm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 之间。镁合金表面生成的钝化膜能够减缓腐蚀反应速率, Mg-1Zn-0.5Gd 合金表面的钝化膜最致密, 具有最佳的耐腐蚀性能。

2) 添加 Gd 元素后 Mg-1Zn-xGd 合金晶界处析出颗粒状 Mg<sub>5</sub>Gd 相。当加入 Gd 含量不超过 0.5% 时 Mg<sub>5</sub>Gd 相在晶界处分布均匀, 随 Gd 含量增加镁合金耐蚀性能增强; 当加入 Gd 含量超过 0.5% 后在晶界处析出大量 Mg<sub>5</sub>Gd 相加剧了镁合金的电偶腐蚀, 随 Gd 含量的增加镁合金的耐蚀性能下降, 在加入 Gd 后镁合金的腐蚀速率先降低后升高。

3) SLM 成型镁合金的组织与铸态镁合金相比更加细小, α-Mg 基体晶粒尺寸小于 1 μm, 添加 Gd 元素后生成颗粒状 Mg<sub>5</sub>Gd 相, 其尺寸约 100 nm。

### 参考文献 References

- [1] Song Yuwei(宋玉玮), Qiao Yang(乔阳). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(4): 1482
- [2] Wang Y C, Fu P H, Wang N Q et al. *Engineering*[J], 2020, 6(11): 1267
- [3] Witte F. *Acta Biomaterialia*[J], 2010, 6(5): 1680
- [4] Tian Yaqiang(田亚强), Zhao Guanzhang(赵冠璋), Liu Yun(刘芸) et al. *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2021, 49(5): 24
- [5] Wan Tian(万天), Song Shupeng(宋述鹏), Wang Jinzhao(王今朝) et al. *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2020, 48(1): 19
- [6] Fu Qingyun(符青云), Li Wei(李卫), Yu Sen(余森) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(7): 2630
- [7] Liu Yuxiang(刘玉项). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(1): 361
- [8] Liang Jinrui(梁晋瑞), Cao Furong(曹富荣). *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2021, 41(8): 932
- [9] Zheng Yufeng(郑玉峰), Liu Jianing(刘嘉宁). *Materials China*(中国材料进展)[J], 2020, 39(2): 92
- [10] Yuan Guangyin(袁广银), Niu Jialin(牛佳林). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2017, 53(10): 1168
- [11] Zhang X B, Dai J W, Dong Q S et al. *Journal of Biomedical Materials Research. Part B, Applied Biomaterials*[J], 2020, 108(3): 698
- [12] Liu Li(刘丽), Yu Sirong(于思荣). *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*(中国腐蚀与防护学报)[J], 2019, 39(2): 185
- [13] Cui Boshuai(崔博帅), Wang Jiangang(王建刚), Zhang Xin(张欣) et al. *Surface Technology*(表面技术)[J], 2021, 50(3): 323
- [14] Chen J X, Tan L L, Yu X M et al. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2019, 35(4): 503
- [15] Feng Xiaowei(冯晓伟), Qi Wenjun(戚文军), Li Xiaohui(黎小辉) et al. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*(中国腐蚀与防护学报)[J], 2016, 36(3): 267
- [16] Xu Yongdong(徐永东). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012
- [17] Chen Junxiu(陈军修). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019
- [18] Fu Xiaoyu(付晓雨), Jia Ruiling(贾瑞灵), Zhang Guilong(张贵龙) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国

- 有色金属学报[J], 2021, 31(7): 1798
- [19] Ralston K D, Birbilis N, Davies C H. *Scripta Materialia*[J], 2010, 63(12): 1201
- [20] Ma Zheng(马 政), Lu Xi(陆 喜), Gao Ming(高 明) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2018, 54(7): 1010
- [21] Zhu Zhaoyu(朱兆雨), Chen Changjun(陈长军), Zhang Min(张 敏). *Laser & Optoelectronics Progress*(激光与光电子学进展)[J], 2019, 56(19): 74

## Effect of Gd Element on Corrosion Rate of SLM Formed Medical Magnesium Alloy

Yang Guang<sup>1</sup>, Wang Congwei<sup>1</sup>, Wang Congyu<sup>1</sup>, Wang Jinye<sup>1</sup>, Liu Dazhi<sup>2</sup>

(1. Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang 050018, China)

(2. Tangshan Weihao Magnesium Powder Co., Ltd, Tangshan 064406, China)

**Abstract:** Magnesium alloy is an ideal bone implant material with high specific strength and good biocompatibility. Due to the limitation of rapid degradation rate of magnesium alloy in clinical application, it can be alloyed and corrosion resistance can be improved by selective laser melting (SLM). Mg-1Zn-xGd ( $x=0, 0.25, 0.5, 1, 2$ , wt%) alloy was formed by SLM, and the average corrosion rate of magnesium alloy soaked in simulated body fluid for 72 h was tested. The corrosion mechanism was analyzed by SEM, EDS and TEM. The results show that Gd content has a significant effect on the corrosion rate of magnesium alloy, and the degradation rate of magnesium alloy decreases first and then increases with the addition of 0wt%~2wt% Gd, and the magnesium alloy has the best corrosion resistance with the addition of 0.5wt% Gd. The surface passivation film produced by the corrosion reaction can slow down the corrosion process to a certain extent, and the Mg<sub>2</sub>Gd phase precipitated along the grain boundary increases after the addition of excessive Gd, resulting in intensified corrosion of magnesium alloy.

**Key words:** rare earth Mg alloys; corrosion resistance; degradation rate; microstructure

---

Corresponding author: Yang Guang, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Hebei 050018, P. R. China, Tel: 0086-311-81668632, E-mail: yangg@hebust.edu.cn