

# 轧制变形量对 Zn-3Cu 合金显微组织、力学和耐腐蚀性能的影响

李然然, 杨家财, 林建国, 张德闯

(湘潭大学 材料科学与工程学院, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:** 以 Zn-3Cu 合金为研究对象。研究轧制变形量对 Zn-3Cu 合金的显微组织、力学性能和耐腐蚀性能的影响。结果表明, 随着轧制变形量的增加, Zn-3Cu 合金基体晶粒细化程度不断加深, 合金中的 CuZn<sub>4</sub> 相沿着轧制方向不断被拉长并出现部分断裂。Zn-3Cu 合金的强度先增后减, 塑性不断增强, 60% 变形量的 Zn-3Cu 合金具有最高的屈服强度, 达到了 (263.1±4.9) MPa。随着变形量增加, 轧态 Zn-3Cu 合金的耐腐蚀性能逐渐减弱, 铸态 Zn-3Cu 合金表现出优异的耐腐蚀性能。

**关键词:** 锌基合金; 轧制处理; 组织; 性能

**中图分类号:** TG146.1+3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2024)05-1437-07

生物锌合金作为常用的可降解生物医用材料之一, 具有巨大的发展潜力<sup>[1]</sup>。与镁和铁相比, 锌的自腐蚀电位适中, 具有较理想的生物降解速率和生物相容性<sup>[2]</sup>, 但纯锌的强度和塑性均难以达到应用的要求<sup>[3-4]</sup>。微合金化是能解决该问题的方法之一, 添加少量的铜之后可使得锌合金的强度和塑性提高<sup>[5-11]</sup>。同时, 锌和铜是人体所需的营养元素, 前者参与人体细胞发育生长、基因表达、免疫系统和神经系统等大量生理反应过程, 后者能促进血管细胞和骨细胞的再生<sup>[12-13]</sup>, 对细胞和机体无毒害作用。Niu 等人<sup>[14]</sup>对 Zn-4Cu 合金进行热挤压处理, 发现合金的力学性能较纯锌而言有所改善, 且 Zn-4Cu 合金对内皮细胞组织的细胞毒性在可接受范围。除微合金化外, 塑性变形也能提高合金的力学性能, 随着轧制变形量的增大, 合金中粗大的未溶解相会使残余应力聚集区增多, 该种残余应力集中区可储存巨大的形变能, 从而降低合金在后期的工艺程序中发生再结晶的难度<sup>[15-17]</sup>。Wang 等人<sup>[18]</sup>对双熔混铸工艺制备的 Cu-10Fe 合金坯料进行冷轧, 结果发现, 30% 变形量的合金基体中产生大量位错, 第二相颗粒发生轻微变形; 90% 变形量的合金基体发生动态再结晶, 枝晶第二相沿轧制方向均匀分布; 98% 变形量的合金所具有的抗拉强度和硬度分别为 543 MPa 和 1607.2 MPa, 与铸态合金 (340 MPa、852.6 MPa) 相比有明显的提高。本实验以 Zn-3Cu 合金为研究对象, 研究轧制变形量对合金显微组织, 力学性能以及耐腐蚀性能的影响。

## 1 实验

Zn-3Cu 合金原材料是纯度为 99.99% 的纯锌锭和纯铜丝, 将原材料放入石墨坩埚, 置于井式炉加热到 600 °C, 待材料彻底融化后保温 20 min, 再将熔融金属液浇铸到预热好的模具中, 熔炼过程在氩气的保护下完成。铸态试样以 AC(as-cast)来表示。将 Zn-3Cu 合金铸锭在马弗炉中保温 10 h, 保温温度 320 °C, 进行均匀化退火。铸锭采用线切割机加工成试样, 然后将试样置于二辊轧机上进行轧制, 每道次压下量为 1 mm, 前 3 道次轧制在轧制前将试样于 280 °C 分别保温 1 h、5 min、5 min。后续轧制直接在室温进行, 得到总变形量为 40%、60%、90% 的轧态 Zn-3Cu 合金, 制成合适的试样。从铸锭中部线切割取样制备金相试样, 进行抛光处理, 用 0.5 vol% 的硝酸乙醇溶液腐蚀, 然后采用 DM2500C 型光学显微镜进行观察。采用 D/maX 2500 型 X 射线衍射仪进行物相分析。采用 Pro X FEI 型扫描电子显微镜对试样的显微组织、拉伸断口、腐蚀产物和腐蚀表面形貌等进行表征, 采用 X-Max 型 X 射线能谱仪对试样物相成分进行测定分析, 测试电压为 15 kV。使用维氏显微硬度计 (MicroMet 6000) 完成对样品的硬度检测, 试验载荷为 100 g, 保载时间为 15 s, 共检测 10 个点。拉伸试样尺寸如图 1 所示, 采用 Instron 5569 型电子万能试验机进行拉伸试验, 拉伸速率为 1 mm/min。

收稿日期: 2023-05-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (11872053)

作者简介: 李然然, 女, 2000 年生, 湘潭大学材料科学与工程学院, 湖南 湘潭 411105, E-mail: 867376648@qq.com

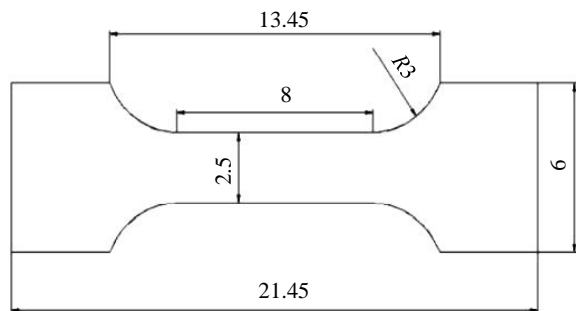


图 1 拉伸试样尺寸

Fig.1 Size of tensile specimen

采用 ParStat 2273 型电化学工作站平台测试极化曲线和电化学交流阻抗, 试样尺寸为  $\phi 10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ , 试验在装有 Hank's 溶液<sup>[17]</sup>的烧杯中进行, 并利用恒温水浴控制温度在  $(37 \pm 0.5)\text{ }^\circ\text{C}$ , 实验时采用三电极体系, 试样为工作电极, 铂板电极为辅助负极, 饱和甘汞电极为参比电极。先测试开路电位, 待其平衡后再进行电化学交流阻抗 (EIS) 测试。极化曲线测试速率为  $1\text{ mV/s}$ , 扫描范围以开路电位  $-0.5$  至  $1\text{ V}$ 。电化学交流阻抗谱测试的频率范围为  $0.01\text{ Hz} \sim 100\text{ kHz}$ , 振幅为  $10\text{ mV}$ 。根据 ASTM G102-89<sup>[19]</sup>算出 Zn-3Cu 合金的腐蚀速率。

静态腐蚀实验在  $37\text{ }^\circ\text{C}$  的 Hank's 溶液中进行, Hank's 的主要成分为:  $\text{NaCl}$  ( $8.0\text{ g/L}$ ),  $\text{CaCl}_2$  ( $0.14\text{ g/L}$ ),  $\text{KCl}$  ( $0.4\text{ g/L}$ ),  $\text{NaHCO}_3$  ( $0.35\text{ g/L}$ ),  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  ( $0.06\text{ g/L}$ ),  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ( $0.06\text{ g/L}$ ),  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ( $0.2\text{ g/L}$ )。用线切割取直径  $\phi 8\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  的腐蚀试样经打磨后, 置于恒温  $37\text{ }^\circ\text{C}$  的 Hank's 溶液中  $30\text{ d}$ , Hank's 体积与腐蚀试样表面积之比为  $20\text{ mL}/1\text{ cm}^2$ 。使用 X 射线衍射仪分析试样的腐蚀产物, 并利用扫描电镜拍摄试样的腐蚀表面。最后将试样放入  $\text{CrO}$  ( $3200\text{ g/L}$ ) 和  $\text{AgNO}_3$  ( $10\text{ g/L}$ ) 的铬酸溶液中超声波清洗  $5\text{ min}$ , 去除腐蚀产物。将去除腐蚀产物后的试样进行清洗干燥, 然后在电子天平上称量实验前后的试样质量, 得出腐蚀过程中的质量损失, 静态腐蚀速率降解依据 ASTM G31-72<sup>[20]</sup>得出结果。

## 2 结果与讨论

### 2.1 显微组织

图 2 是铸态和变形量 40%、60%、90% 轧态 Zn-3Cu 合金的 XRD 图谱。ZnCu 合金中易形成 ZnCu 金属间化合物, 如  $\text{CuZn}_4$  相和  $\text{CuZn}_5$  相。两相晶格结构相近, 在 XRD 图谱中衍射峰不易区分。经过对比, 图谱中第二相的衍射峰为  $\text{CuZn}_4$  相衍射峰<sup>[21]</sup>。可见 Zn-3Cu 合金由  $\alpha\text{-Zn}$  相和  $\text{CuZn}_4$  相两相组成。随着变形量的增大,  $\alpha\text{-Zn}$  基体

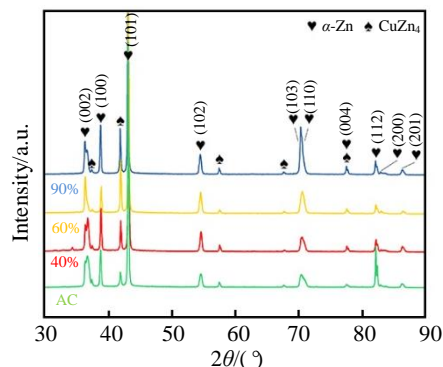


图 2 铸态和不同变形量轧态 Zn-3Cu 合金 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of as-cast Zn-3Cu alloy and Zn-3Cu alloy rolled with the deformation of 40%, 60% and 90%

相的 (112) 晶面的衍射强度一直下降, (103) 和 (110) 晶面衍射强度明显增强。且第二相  $\text{CuZn}_4$  相的衍射强度会随着变形量的增大先增强后减弱。

图 3 是铸态 Zn-3Cu 合金显微组织及对应的 EDS 元素面扫和点扫成分分析。从图中可以看出, Zn 元素呈均匀分布状态, Cu 元素集中分布在不规则椭圆形的第二相 (区域 1、2)。且合金组织的第二相中 Zn 元素和 Cu 元素的摩尔比接近 5:1, 经过对比, 可判断第二相成分为  $\text{CuZn}_4$  (图 3a 区域 1、2), 基体相为  $\alpha\text{-Zn}$  (图 3a 区域 3)<sup>[21]</sup>。

图 4 是铸态和变形量 40%、60%、90% 轧态 Zn-3Cu 合金的显微组织。从图中能够看出, 随着变形量的增加, Zn-3Cu 合金基体相的晶粒尺寸一直减小, 第二相沿着轧制方向不断被拉长并出现断裂, 两相分布更加均匀。此外, 铸态 Zn-3Cu 合金显微组织中可观察到树枝状和不规则椭圆形  $\text{CuZn}_4$  相, 晶界清晰, 基体相中存在明显的孪晶和缺陷。40% 变形量轧态 Zn-3Cu 合金出现明显的冷加工变形, 90% 变形量轧态 Zn-3Cu 合金发生了再结晶。

### 2.2 力学性能

图 5 是铸态和变形量 40%、60%、90% 轧态 Zn-3Cu 合金的应力-应变曲线。图 6 是由图 5 得到的铸态和 40%、60%、90% 变形量轧态 Zn-3Cu 合金的力学性能, 从图 6 中可以看出, 铸态 Zn-3Cu 合金的抗拉强度 ( $\sigma_{\text{uts}}$ ) 和屈服强度 ( $\sigma_{\text{ys}}$ ) 分别为  $(98.9 \pm 5.2)\text{ MPa}$  和  $(94.5 \pm 4.9)\text{ MPa}$ 。经轧制后, Zn-3Cu 合金的抗拉强度和屈服强度出现明显提高。随着变形量的增加, 合金的抗拉强度先增加后降低, 60% 变形量轧态 Zn-3Cu 合金具有最大的抗拉强度, 为  $(263.1 \pm 4.9)\text{ MPa}$ 。Zn-3Cu 合金的屈服强度随着变形量的增加而降低, 40% 变形量轧态 Zn-3Cu 合金具有最大的屈服强度, 为  $(234.8 \pm 4.5)\text{ MPa}$ 。随着变形量的增加, 轧态 Zn-3Cu 合金的延伸率 ( $\epsilon$ ) 较铸态有了

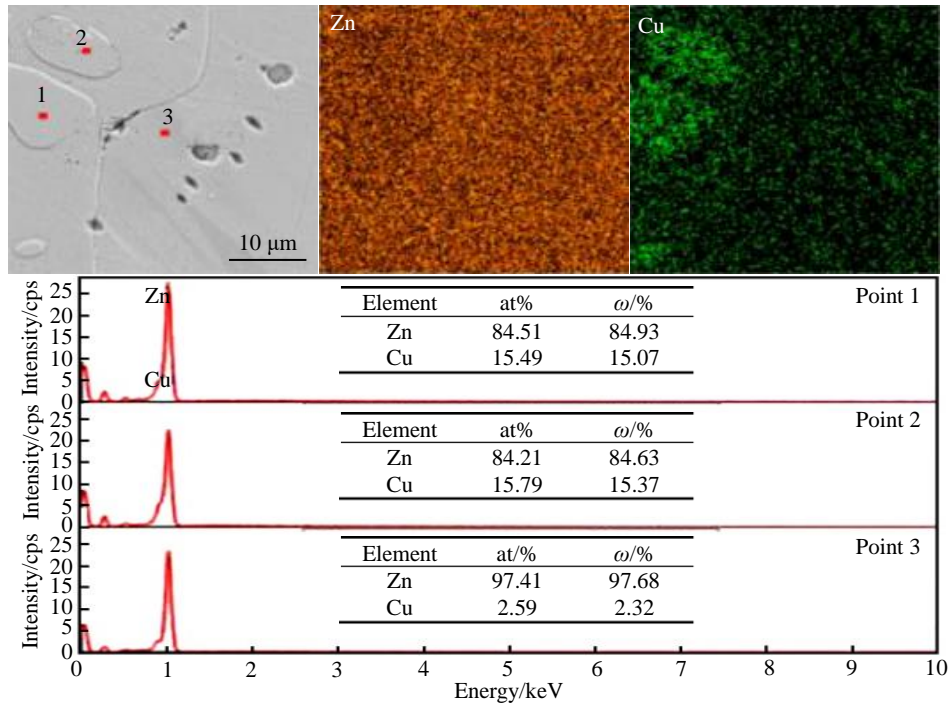


图 3 铸态 Zn-3Cu 合金 SEM 照片及对应 EDS 成分分析

Fig.3 SEM image and EDS analysis results of as-cast Zn-3Cu alloy

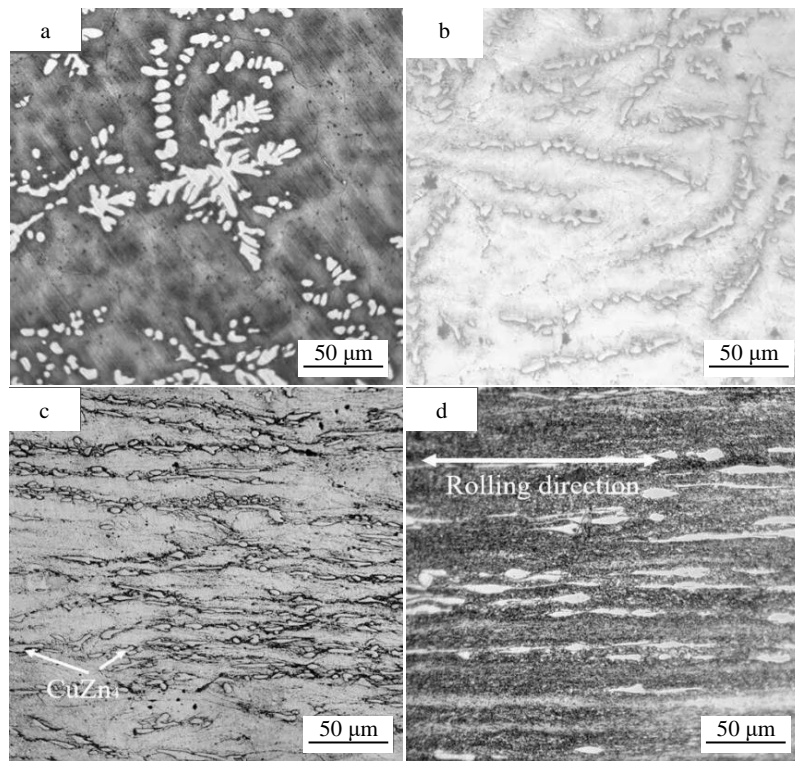


图 4 铸态和不同变形量轧态 Zn-3Cu 合金光学显微组织

Fig.4 OM images of Zn-3Cu alloy with different deformations: (a) as-cast, (b) 40%, (c) 60%, and (d) 90%

大幅度提升，且变形量越大延伸率越高，其中铸态 Zn-3Cu 合金延伸率仅为 2.2%，变形量 90% 轧态 Zn-3Cu 合金延伸率为(67.6±2.7)%。Zn-3Cu 合金经轧制后，基体

相发生破碎，晶粒尺寸变小，出现更多晶界，从而阻碍位错的运动，合金的强度也得到提高<sup>[22-23]</sup>。通常，强度随着变形量的增加而增加，塑性随着强度的增加而

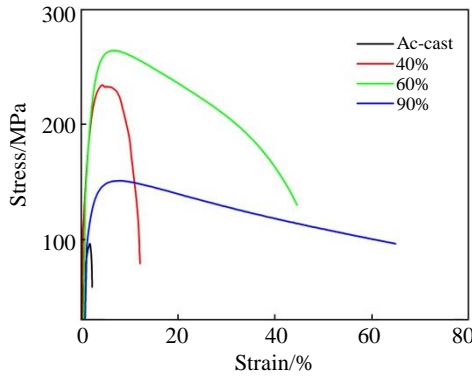


图 5 铸态和不同变形量轧态 Zn-3Cu 合金应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of as-cast Zn-3Cu alloy and the alloy rolled at with different deformation

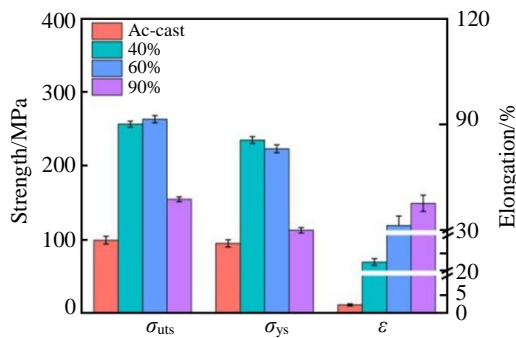


图 6 铸态和不同变形量轧态 Zn-3Cu 合金力学性能参数

Fig.6 Mechanical properties of as-cast Zn-3Cu alloy and the alloy rolled with different deformations

减小。但是锌合金的动态再结晶温度很低，约 80 °C，室温轧制能产生足够的热量，发生动态再结晶。轧制变形量越大，合金动态再结晶后的晶粒更加细小，塑性提高<sup>[24-26]</sup>。

图 7 是铸态和变形量 40%、60%、90% 轧态 Zn-3Cu 合金的拉伸断口 SEM 照片。从图 7 可以看出，铸态 Zn-3Cu 合金的拉伸断口由大量解理面组成，观察不到明显的韧窝和撕裂棱，属于脆性断裂，合金的塑性较差。变形量 40% 轧态 Zn-3Cu 合金的拉伸断口存在少量的解理面和韧窝，表现出脆性断裂和韧性断裂共存的混合断裂形貌。变形量 60% 轧态 Zn-3Cu 合金的拉伸断口处韧窝和撕裂棱的分布更加密集，观察不到明显的解理面，合金的塑性较好。变形量 90% 轧态 Zn-3Cu 合金断口处韧窝的数量和尺寸进一步增大，合金的塑性得到提高。由此可见，随着轧制变形量的增加，Zn-3Cu 合金的塑性变形能力逐渐增强。上述铸态和不同变形量轧态 Zn-3Cu 合金的拉伸断口形貌特征与图 5、图 6 中 Zn-3Cu 合金的延伸率具有相同的变化规律。

表 1 列出了铸态和变形量 40%、60%、90% 轧态 Zn-3Cu 合金的维氏硬度 (HV)。从表中可以看出，铸态 Zn-3Cu 合金硬度值约为(683.06±27.44) MPa。经轧制后，Zn-3Cu 合金硬度值较铸态先增加后降低，变形量 40% 轧态 Zn-3Cu 合金硬度值最高，为(869.26±21.56) MPa。由此可见，铸态和不同变形量轧态 Zn-3Cu 合金的硬度变化与图 5 和图 6 中力学性能变化相符合。

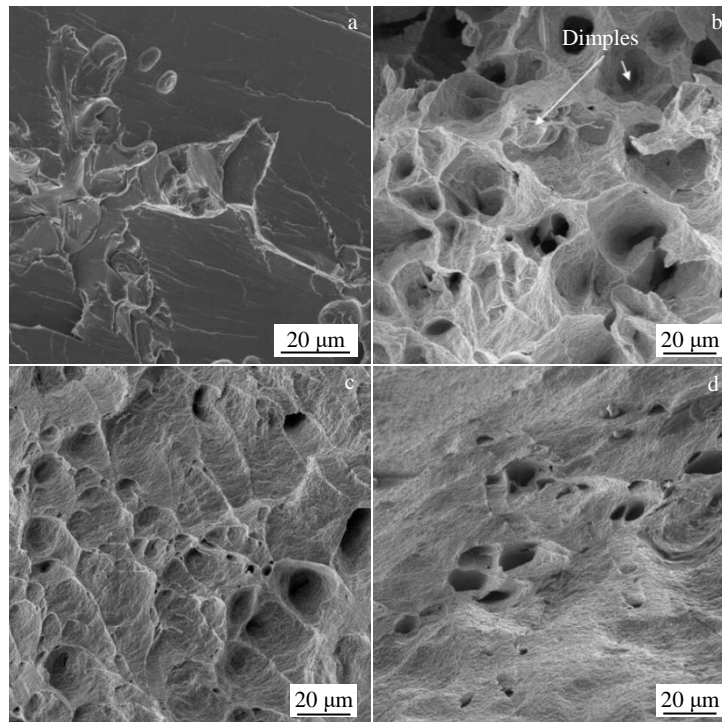


图 7 铸态和不同变形量轧态 Zn-3Cu 合金拉伸断口 SEM 照片

Fig.7 Tensile fracture SEM images of as-cast Zn-3Cu alloy and the alloy rolled with different deformations: (a) as-cast, (b) 40%, (c) 60%, and (d) 90%

表 1 铸态和不同变形量轧态 Zn-3Cu 合金维氏硬度值

Table 1 Vickers hardness of as-cast Zn-3Cu alloy and the alloy rolled with different deformation ( $\times 9.8$  MPa)

| Sample  | Vickers hardness |
|---------|------------------|
| As-cast | 69.7 $\pm$ 2.8   |
| 40%     | 88.7 $\pm$ 2.2   |
| 60%     | 81.3 $\pm$ 2.9   |
| 90%     | 54.8 $\pm$ 1.8   |

2.3 耐腐蚀性能

图 8 是铸态和变形量 40%、60%、90% 轧态 Zn-3Cu 合金在 Hank's 溶液中的极化曲线。由图 8 通过 Tafel 外推法可得到 Zn-3Cu 合金的自腐蚀开路电位 ( $E_{corr}$ )、自腐蚀电流密度 ( $i_{corr}$ ) 及自腐蚀速率 ( $v_{corr}$ )，如表 2 所示。

从表 2 可以看出，铸态 Zn-3Cu 合金的腐蚀电位、腐蚀电流密度和腐蚀速率分别为(-1.062 $\pm$ 0.105) V、(10.7 $\pm$ 0.7)  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>、(152.2 $\pm$ 10.0)  $\mu$ m/a。经轧制后，Zn-3Cu 合金的腐蚀电位 ( $E_{corr}$ ) 逐渐向负方向移动。Zn-3Cu 合金的腐蚀电流密度和腐蚀速率随着轧制变形量增加而增加，90% 变形量轧态 Zn-3Cu 合金得到最大的腐蚀电流密度和腐蚀速率，分别为(17.3 $\pm$ 0.5)  $\mu$ A/cm<sup>2</sup> 和

(245.0 $\pm$ 7.10)  $\mu$ m/a。由此可见，随着轧制变形量增加，Zn-3Cu 合金的耐腐蚀性能逐渐减弱。

图 9 是铸态和变形量 40%、60%、90% 轧态 Zn-3Cu 合金在 Hank's 溶液中浸泡 30 d 的腐蚀速率。从图 9 中可看出，铸态 Zn-3Cu 合金的腐蚀速率最慢，耐腐蚀性能最好，腐蚀速率为(21.4 $\pm$ 0.8)  $\mu$ m/a。Zn-3Cu 合金的腐蚀速率随着轧制变形量增加而不断增加，90% 变形量

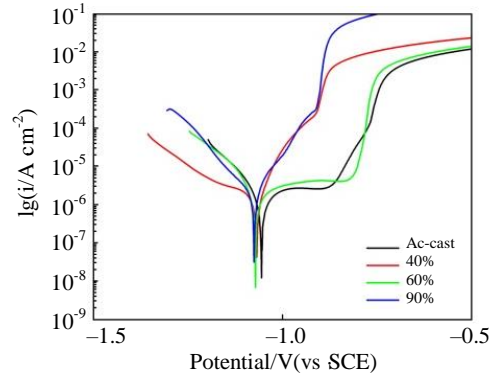


图 8 铸态和不同变形量轧态 Zn-3Cu 合金在 Hank's 溶液中的极化曲线

Fig.8 Polarization curves of Zn-3Cu alloy at Hank's solution with different deformation

表 2 铸态和不同变形量轧态 Zn-3Cu 合金在 Hank's 溶液中的性能参数

Table 2 Performance parameters of as-cast Zn-3Cu alloy and the alloy rolled with different deformations in Hank's solution

| Sample  | $E_{corr}$ /V(vs. SCE) | $i_{corr}$ / $\mu$ A $\cdot$ cm <sup>-2</sup> | $R_p$ /k $\Omega$ $\cdot$ cm <sup>2</sup> | $V_{corr}$ / $\mu$ m $\cdot$ a <sup>-1</sup> |
|---------|------------------------|---|---|--|
| As-cast | -1.062 $\pm$ 0.105     | 10.7 $\pm$ 0.7                                | 3.4 $\pm$ 0.2                             | 152.2 $\pm$ 10.0                             |
| 40%     | -1.079 $\pm$ 0.076     | 12.1 $\pm$ 0.8                                | 3.0 $\pm$ 0.2                             | 171.0 $\pm$ 11.3                             |
| 60%     | -1.085 $\pm$ 0.083     | 14.4 $\pm$ 0.9                                | 2.5 $\pm$ 0.2                             | 203.6 $\pm$ 12.7                             |
| 90%     | -1.091 $\pm$ 0.043     | 17.3 $\pm$ 0.5                                | 2.1 $\pm$ 0.1                             | 245.0 $\pm$ 7.10                             |

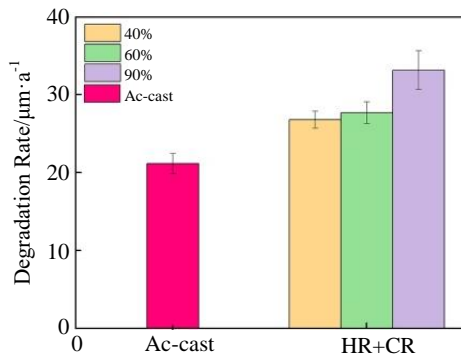
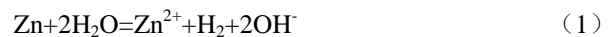


图 9 铸态和不同变形量轧态 Zn-3Cu 合金在 Hank's 溶液中浸泡 30 d 的腐蚀速率

Fig.9 Corrosion rate of as-cast Zn-3Cu alloy and the alloy rolled with different deformations after soaking in Hank's solution for 30 d

轧态 Zn-3Cu 合金的腐蚀速率最快，为(33.6 $\pm$ 1.1)  $\mu$ m/a。通过静态腐蚀实验与电化学实验测得的腐蚀速率变化规律具有相同的趋势。

据 Vojtěch 等人<sup>[27]</sup>的研究成果，人体模拟液对锌合金的腐蚀过程可通过锌与水的电化学反应表示：



Zn-3Cu 合金组织中 CuZn<sub>4</sub> 第二相与  $\alpha$ -Zn 基体相形成电偶腐蚀，其中  $\alpha$ -Zn 相为阳极，CuZn<sub>4</sub> 相为阴极。随着轧制变形量的增加，Zn-3Cu 合金组织基体相发生晶粒细化，在组织的单位面积内可形成更多的原电池，对应的腐蚀速率更快。

图 10 是铸态和变形量 40%、60%、90% 轧态 Zn-3Cu 合金在 Hank's 溶液中浸泡 30 d 后去除腐蚀产物的 SEM

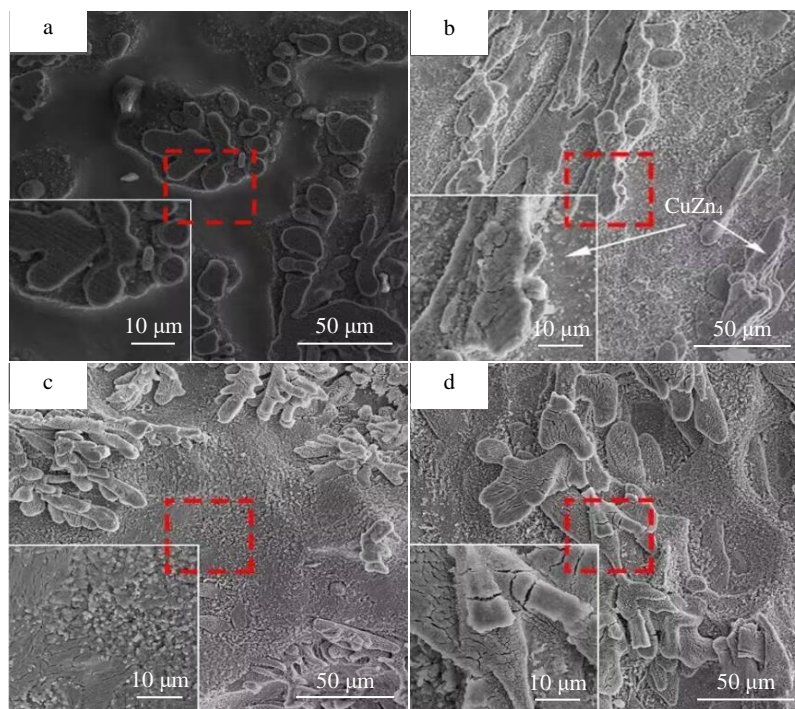


图 10 铸态和不同变形量轧态 Zn-3Cu 合金在 Hank's 溶液中浸泡 30 d 去除腐蚀产物后的表面 SEM 照片

Fig.10 SEM images of as-cast Zn-3Cu alloy and the alloy rolled with different deformations after removal of corrosion products by soaking in Hank's solution for 30 d: (a) as-cast, (b) 40%, (c) 60%, and (d) 90%

照片。从图 10 可以看出, 铸态 Zn-3Cu 合金基体相和 CuZn<sub>4</sub> 相表面光滑, 基体相凹陷较浅。经轧制后, 40% 变形量轧态 Zn-3Cu 合金显微组织中出現较多的颗粒和小凹坑, 基体相和第二相表面粗糙, 且基体相整体凹陷程度加深。变形量 60% 轧态 Zn-3Cu 合金基体相进一步凹陷, CuZn<sub>4</sub> 相裸露部分增多。变形量 90% 轧态 Zn-3Cu 合金 CuZn<sub>4</sub> 相基体相凹陷更严重, 第二相内部出现小凹坑, 整体上凹坑数量增多。锌合金的腐蚀是由阳极基体相和阴极第二相之间的电位差所导致的电偶腐蚀。随着轧制变形量的增加, 合金两相的晶粒逐渐细化, 且伴有次生第二相的析出, 使得单位面积内阴极和阳极区域增多, 电偶腐蚀间的腐蚀电流密度增大, 加速了腐蚀的发生, 导致合金表面小凹坑增多。由此可知, CuZn<sub>4</sub> 相较基体相更耐腐蚀, Zn-3Cu 合金的耐腐蚀性随着轧制变形量的增加而降低。

### 3 结 论

1) 铸态 Zn-3Cu 合金的组织由  $\alpha$ -Zn 相和 CuZn<sub>4</sub> 相组成, 其中 CuZn<sub>4</sub> 相呈树枝状和不规则形状。随着变形量增加, Zn-3Cu 合金的晶粒尺寸减小且 CuZn<sub>4</sub> 相沿着轧制方向被不断拉长和断裂, 两相分布更加均匀。

2) 铸态 Zn-3Cu 合金的抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为(98.9±5.2) MPa、(94.5±4.9) MPa、2.2%。随着

轧制变形量增加, Zn-3Cu 合金的强度先增后减, 塑性不断增强。60% 变形量轧态 Zn-3Cu 合金屈服强度最高, 为(263.1±4.9) MPa。变形量 40% 轧态 Zn-3Cu 合金的抗拉强度和硬度最高, 分别为(234.8±4.5) MPa 和(869.26±21.56) MPa。变形量 90% 轧态 Zn-3Cu 合金的抗拉强度和硬度最低, 分别为(112.4±3.7) MPa 和(537.04±17.64) MPa, 但其延伸率达到(67.6±2.7)%。

3) 电化学试验和浸泡试验测得的铸态 Zn-3Cu 合金的在 Hank's 溶液中的腐蚀速率分别为(152.2±10.0)  $\mu\text{m/a}$ 、(21.4±0.8)  $\mu\text{m/a}$ 。随着变形量的增加, 轧态 Zn-3Cu 合金的耐腐蚀性能较铸态 Zn-3Cu 合金不断减弱。变形量 90% 轧态 Zn-3Cu 合金在 Hank's 溶液中的电化学试验测得的腐蚀速率为(245.0±7.1)  $\mu\text{m/a}$ , 浸泡试验测得的腐蚀速率为(33.6±1.1)  $\mu\text{m/a}$ 。

### 参考文献 References

- [1] Dai Xiaojun(代晓军), Yang Xirong(杨西荣), Wang Chang(王昌) *et al. Materials Reports(材料导报)*[J], 2018, 32(21): 3754
- [2] Hehrlein Christoph, Schorch Björn, Haberstroh Jörg *et al. Minimally Invasive Therapy and Allied Technologies*[J], 2020, 31(1): 1
- [3] Cheng J, Liu B, Wu Y H *et al. Journal of Materials Science and Technology*[J], 2013, 29(7): 619
- [4] Bowen P K, Drelich J, Goldman J. *Advanced Materials (Deerfield*

- Beach, Fla.)[J], 2013, 25(18): 2577
- [5] Zhao S, Jan M S, Rainer E *et al. Materials Science and Engineering C*[J], 2017, 76: 301
- [6] Sikora-Jasinska M, Mostaed E, Mostaed A *et al. Materials Science and Engineering C*[J], 2017, 77: 1170
- [7] Lu Hongmei(陆红梅). *Study on Microstructure and Properties of Zinc-Based Biodegradable Biomedical Materials*(锌基生物医用可降解材料的组织与性能研究)[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008
- [8] Li Huafang, Yang Hangtang, Zheng Yufeng *et al. Materials and Design*[J], 2015, 83: 95
- [9] Guo Zihui(郭子辉), Huang Haitao(黄海滔), Ma Yiming(马义明) *et al. Shanghai Metals*(上海金属)[J], 2019, 41(6): 19, 28
- [10] Huang Haitao(黄海滔), Guo Zihui(郭子辉), Ma Yiming(马义明) *et al. Shanghai Metals*(上海金属)[J], 2021, 43(3): 58
- [11] Tang Zibo, Niu Jialin, Huang Hua *et al. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*[J], 2017, 72 : 182
- [12] Jana Elena Kessels, Inga Wessels, Hajo Haase *et al. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*[J], 2016, 37: 125
- [13] Yang Peng, Wang Yixuan, Macfarlan S T. *Trends in Genetics*[J], 2017, 33(11): 871
- [14] Niu J L, Tang Z B, Huang H *et al. Materials Science and Engineering C*[J], 2016, 69: 407
- [15] Sun He(孙 贺). *Study on Deformation Microstructure and Texture of ME21 Rare Earth Magnesium Alloy during Asynchronous Warm Rolling*(ME21 稀土镁合金异步温轧变形组织及织构研究)[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2021
- [16] Cui Yan(崔 岩), Wang Licheng(王利成), Dong Changqing(董常青) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2019, 48(24): 78
- [17] Qin Liangjie(秦梁杰). *Study on Microstructure and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Sheet with Equal Path Angle Rolling and Single Pass Bending Deformation*(等径角轧制—单道次弯曲变形 AZ31 镁合金板材组织与力学性能研究)[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2018
- [18] Wang M, Jiang Y B, Li Z *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2021, 801: 140379
- [19] Luo Heng(罗 衡), Chen Zhenhua(陈振华), Xia Weijun(夏伟军) *et al. Mining and Metallurgical Engineering*(矿冶工程)[J], 2008(5): 103
- [20] Li Rongde(李荣德), Song Xianjie(宋宪杰), Liu Jingfu(刘敬福). *Journal of Shenyang University of Technology*(沈阳工业大学学报)[J], 2010, 32(4): 363
- [21] Jiang J M, Huang H, Niu J L *et al. Scripta Materialia*[J], 2021, 200: 113907
- [22] Mani G, Feldman M D, Patel D *et al. Biomaterials* [J], 2007, 28(9): 1689
- [23] Hall E O. *Proceedings of the Physical Society. Section B*[J], 1951, 64(9): 747
- [24] Jarzębska A, Maj Ł, Bieda M *et al. Materials*[J], 2021, 14(13): 3483
- [25] Mostaed E, Ardakani M S, Sikora-Jasinska M *et al. Materials Letters*[J], 2019, 244: 203
- [26] Zhang Yuan(张 源), Zheng Ruiyu(郑瑞宇), Liu Yun(刘 芸) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 511(12): 4646
- [27] Vojtěch D, Kubasek J, Jaworska L *et al. Acta Biomaterialia*[J], 2011, 7(9): 3515

## Effect of Rolling Deformation on Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Zn-3Cu Alloy

Li Ranran, Yang Jiakai, Lin Jianguo, Zhang Dechuang

(School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** The effects of rolling deformation on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of Zn-3Cu alloy were studied. Results show that with the increase in rolling deformation, the grains of Zn-3Cu alloy matrix are refined, and the CuZn<sub>4</sub> phase in the alloy is elongated and partially broken along the rolling direction. The strength of Zn-3Cu alloy increases first and then decreases, and the plasticity increases continuously. The Zn-3Cu alloy with the deformation of 60% has the highest yield strength, reaching (263.1 ± 4.9) MPa. With the increase in deformation, the corrosion resistance of the as-rolled Zn-3Cu alloy gradually decreases, while the as-cast Zn-3Cu alloy exhibits excellent corrosion resistance.

**Key words:** zinc base alloy; rolling treatment; microstructure; performance

Corresponding author: Zhang Dechuang, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, P. R. China, E-mail: dczhang@xtu.edu.cn