

预回复对 Al-10.78Zn-2.78Mg-2.59Cu-0.22Zr-0.047Sr 铝合金组织与性能的影响

丁 清, 许晓静, 张景玉, 徐 驰, 陈 洋, 汪成松, 朱金鑫, 杨 帆

(江苏大学, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 采用电子背散射衍射分析 (EBSD)、X 射线衍射分析 (XRD)、硬度测试、电导率测试、拉伸试验、晶间腐蚀和剥落腐蚀试验, 研究了预回复处理 (250 °C/24 h + 300 °C/6 h + 400 °C/6 h) 对超高强铝合金 Al-10.78Zn-2.78Mg-2.59Cu-0.22Zr-0.047Sr 组织与性能的影响。结果表明: 合金固溶前的预回复处理可以细化合金晶粒, 平均晶粒尺寸从 7.30 μm 减小到 5.57 μm; 经预回复处理的合金中存在较多的低角度晶界, 其比例为 0.623。预回复处理对合金的硬度与电导率影响较小, 但经预回复处理的合金强度明显提高。峰值时效 (120 °C/48 h) 下经预回复处理的合金屈服强度为 633.2 MPa, 相对未预回复处理的合金屈服强度提高 35 MPa。预回复处理对合金的抗晶间腐蚀与剥落腐蚀性能影响较大, 晶间腐蚀等级从 4 级改善到 3 级; 剥落腐蚀等级从 EA 级提升到 PB 级。

关键词: Al-Zn-Mg-Cu 合金; 预回复; 固溶; 高/低角度晶界; 组织性能

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)04-1226-06

Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金具有质量轻、比强度高及良好的耐腐蚀性能等优点, 已经广泛应用于航空航天和交通运输等重要领域。随着现代工业的不断发展, 对超高强铝合金的综合性能提出了更高的期望。当前如何协调好超高强铝合金的强韧性与抗腐蚀性一直是研究的焦点^[1,2]。

Al-Zn-Mg-Cu 系合金的塑性加工使其内部存在一定量的形变储能, 导致合金在后续固溶处理中容易发生再结晶及晶粒长大, 严重影响材料的综合性能。许晓静^[3]等人研究了预回复退火对 7085 合金组织和性能的影响, 结果表明, 预回复退火可以明显细化合金晶粒, 抑制合金在强化固溶处理时的再结晶, 提高合金的拉伸力学性能。文献[4]研究表明 7050 铝合金固溶处理时采用缓慢升温, 由于合金发生预回复消耗形变储能, 有助于抑制再结晶的发生。文献[5]研究了预回复对 7085 铝合金组织与抗腐蚀性能的影响, 结果表明, 预回复处理可以显著改善合金的抗晶间、剥落腐蚀性能。

目前预回复处理改善已知牌号 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织、性能的研究较多, 而关于 700 MPa 级超高强铝合金的研究较少。本研究自制了 Al-10.78Zn-2.78Mg-2.59Cu-0.22Zr-0.047Sr 超高强铝合金, 研究了预回复

处理对挤压态超高强铝合金组织与性能的影响, 探究了该合金的最佳时效工艺, 以期改善超高强铝合金的组织及性能提供依据。

1 实 验

试验用 Al-Zn-Mg-Cu 合金以工业纯铝、纯锌、纯镁和含 Cu 量为 50.12% 的 Al-Cu 中间合金, 含 Zr 量为 4.11% 的 Al-Zr 中间合金, 含 Sr 量为 9.89% 的 Al-Sr 中间合金为熔炼原材料, 熔炼浇注后将铸锭进行 400 °C/6 h+420 °C/6 h+440 °C/6 h+460 °C/12 h 的均匀化退火处理, 挤压成型时先在 480 °C 保温 8 h, 然后挤压成直径为 35 mm 的圆棒, 挤压比约为 12。利用德国 SPECTRO MAX 光谱仪测得合金化学成分(质量分数, %)为: Al 83.43, Zn 10.78, Mg 2.78, Cu 2.59, Zr 0.22, Sr 0.047, Fe 0.115, Si 0.035, B 0.002。

线切割试样尺寸为 30 mm×12 mm×12 mm。部分试样在固溶前进行 250 °C/24 h + 300 °C/6 h + 400 °C/6 h 的预回复处理, 然后进行 450 °C/2 h + 460 °C/2 h + 470 °C/2 h 的分级固溶处理, 固溶水淬后对样品进行 120 °C 的单级时效处理, 探究出最佳的时效工艺。

采用配备 EBSD 探头的 FEG-SEM 型场发射扫描电子显微镜观察微观结构, 并通过 HKL Channel 5 软

收稿日期: 2017-04-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51074079); 江苏省高校科研成果产业化推进项目 (JH10-37); 江苏高校优势学科建设工程项目; 江苏省高校研究生科研创新计划项目 (CX12-0620)

作者简介: 丁 清, 男, 1992 年生, 硕士生, 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013, E-mail: dingq199204@126.com

件包对实验数据进行分析；XRD 分析在 Bruker 公司 D8 Advance 型 X 射线衍射仪进行，设定其参数为扫描速率 5°/min，扫描范围 30°~120°，Cu 靶 K α 射线（波长 λ 为 0.154 nm）；显微硬度用 HV-1000 型硬度仪测定；电导率用 7501 型涡流电导仪测定；拉伸试验在国产 WDW-200 型微机控制式万能试验机上进行，拉伸试样标距尺寸为 7 mm×4 mm×2 mm，初始应变速率为 1.0×10⁻³ s⁻¹；分别按照 GB/T 7998-2005^[6] 和 GB/T 22639-2008^[7] 标准进行晶间腐蚀和剥落腐蚀试验。

2 实验结果

2.1 EBSD 分析及晶粒晶界特征分布

图 1 为高强铝合金经不同热处理后的 EBSD 微观组织、晶粒尺寸及晶界取向差分布图。表 1 列出了高强铝合金经不同热处理后的晶粒和晶界角度参数，其

中 \bar{L} 、 θ 分别为平均晶粒尺寸与平均晶界角度， f_H 、 f_L 分别为高低角度晶界百分比， $\bar{\theta}_H$ 、 $\bar{\theta}_L$ 分别为高低角度晶界平均角度。从微观组织图可以看出，2 种状态的合金晶粒趋于等轴状，经预回复处理后部分晶粒明显细化。对比 2 种状态的晶粒尺寸分布图及参数，可以发现经预回复处理后的合金中大尺寸晶粒(>20 μm) 比例明显减少，大多数晶粒都在 10 μm 以内，平均晶粒尺寸 (\bar{L}) 显著减小，从 7.30 μm 减小到 5.57 μm ，表明预回复处理可以细化合金的晶粒尺寸。

从晶界角度分布及晶界角度参数可以看出经预回复处理后的合金中存在较多的低角度晶界（定义低角度晶界 1°~15°，高角度晶界 >15°），低角度晶界比例 (f_L) 达到 0.623。这表明预回复处理有效地保存挤压态合金中的低角度晶界，抑制再结晶的发生，即阻碍低角度晶界在随后固溶过程中向高角度晶界发展。

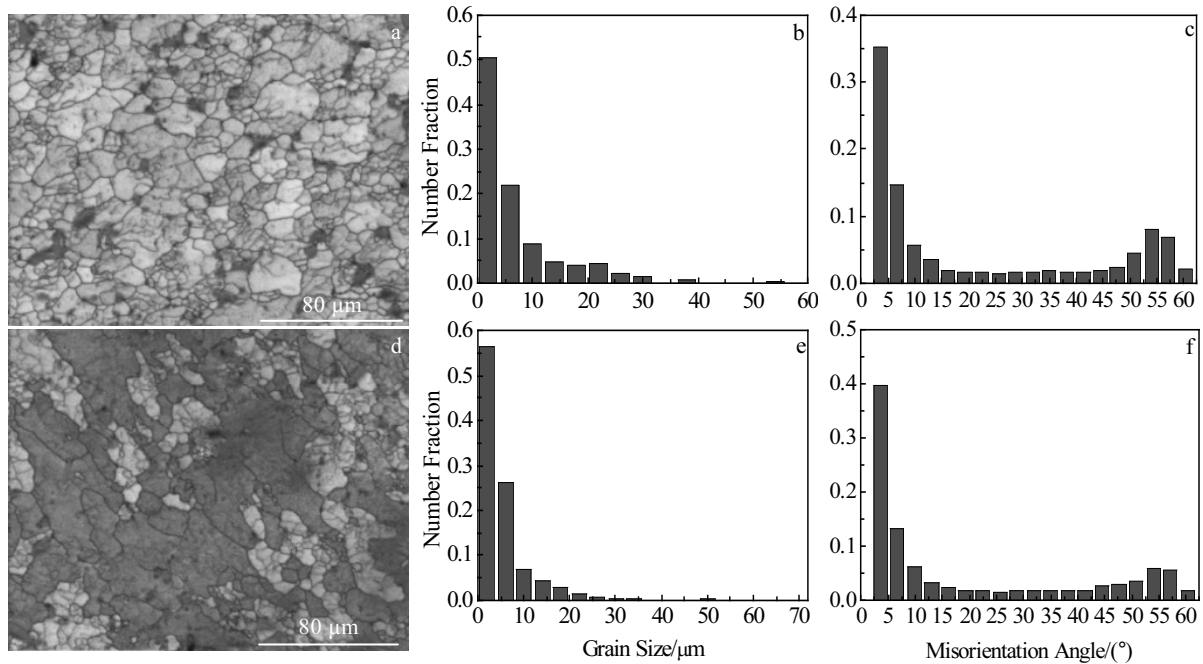


图 1 Al-10.78Zn-2.78Mg-2.59Cu-0.22Zr-0.047Sr 合金经不同热处理后的 EBSD 组织、晶粒尺寸和晶界角度分布图

Fig.1 EBSD microstructure (a, d), grain size distribution (b, e) and grain boundary angle (c, f) of Al-10.78Zn-2.78Mg-2.59Cu-0.22Zr-0.047Sr alloy processed by different heat treatments: (a~c) solution and (b~f) prerecovery-solution

表 1 Al-10.78Zn-2.78Mg-2.59Cu-0.22Zr-0.047Sr 合金经不同热处理后的晶粒尺寸和晶界角度参数

Table 1 Grain size and parameters of angle of grain boundary of Al-10.78Zn-2.78Mg-2.59Cu-0.22Zr-0.047Sr alloy processed by different heat treatments

Heat treatment	$\geq 1^\circ$		$1^\circ \sim 15^\circ$		$> 15^\circ$	
	$\bar{L}/\mu\text{m}$	$\theta/(\circ)$	f_L	$\bar{\theta}_L/(\circ)$	f_H	$\bar{\theta}_H/(\circ)$
Solution	7.30	21.45	0.588	5.52	0.412	44.19
Prerecovery-solution	5.57	19.46	0.623	5.36	0.377	42.81

2.2 XRD 分析及位错密度

图 2 所示为合金经不同热处理后的 XRD 分析谱和半高峰宽 (FWHM)。对比可以看出，预回复处理没有使各衍射峰位置与峰间强度比率发生明显的变化，说明预回复处理对合金组织的晶体取向没有太大影响。

XRD 中平均晶粒尺寸 (d)、晶格应变 ($\langle e^2 \rangle^{1/2}$) 与各衍射峰最大值位置 (θ_0)、测得的积分宽度 ($\delta 2\theta$) 及 Cu-K α 射线波长 (λ) 之间的关系用如下公式描述^[8]：

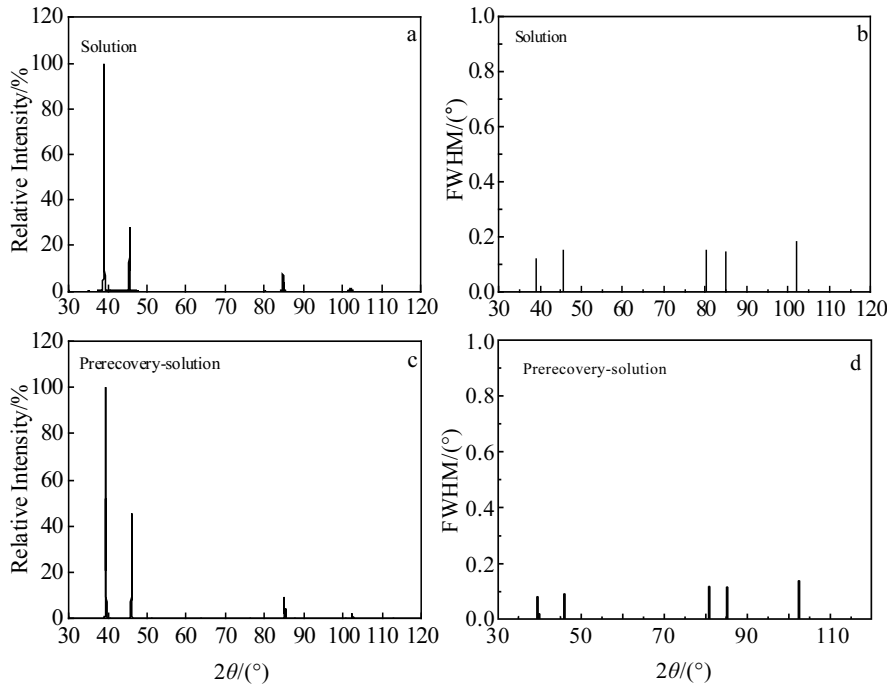


图 2 Al-10.78Zn-2.78Mg-2.59Cu-0.22Zr-0.047Sr 合金经不同热处理后的 XRD 分析谱和半高峰宽

Fig.2 XRD patterns (a, c) and FWHM (b, d) of Al-10.78Zn-2.78Mg-2.59Cu-0.22Zr-0.047Sr alloy processed by different heat treatments: (a, b) solution and (c, d) prerecovery-solution

$$\frac{(\delta 2\theta)^2}{\tan^2 \theta_0} = 25 \langle e \rangle^2 + \frac{\lambda}{d} \left(\frac{\delta 2\theta}{\tan \theta_0 \sin \theta_0} \right) \quad (1)$$

图 3 所示为不同 XRD 分析谱中 $(\delta 2\theta)^2 / \tan^2 \theta_0$ 与 $\delta 2\theta / (\tan \theta_0 \sin \theta_0)$ 之间的关系。通过线性拟合，计算得到 XRD 中平均晶粒尺寸和晶格应变 ($\langle e \rangle^{1/2}$)，结果列于表 2。合金内部晶界位错密度 (ρ) 与 XRD 平均晶粒尺寸、平均晶格应变之间的函数关系通常可用如下公式描述^[9]：

$$\rho = 2\sqrt{3} \langle e \rangle^{1/2} / (d \cdot b) \quad (2)$$

式中 b 为柏氏矢量，对于铝为 $0.286 \text{ nm}^{[10]}$ 。利用上式可以计算出晶界位错密度，其值列于表 2。从表 2 可以看出，挤压态合金直接经固溶处理后晶界位错完全消耗，晶界位错密度为零；而对于经预回复处理的合金而言，合金中晶界累积一定量的位错，位错密度为 $0.168 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ ，这将有利于提高位错强化贡献。

2.3 单级时效硬度及电导率

合金完成固溶处理后，为确定合宜的峰值时效制度，在 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 下对试样进行单级时效处理，合金的时效硬化曲线及电导率变化规律如图 4 所示。从图 4a 中可以看出，高强铝合金具有很强的时效强化效果，合金经固溶处理后的硬度均较低，固溶态、预回复-固溶态的硬度 (HV) 分别为 1614, 1641 MPa。时效初始阶段，硬度明显提高，12 h 后硬度值开始接近峰

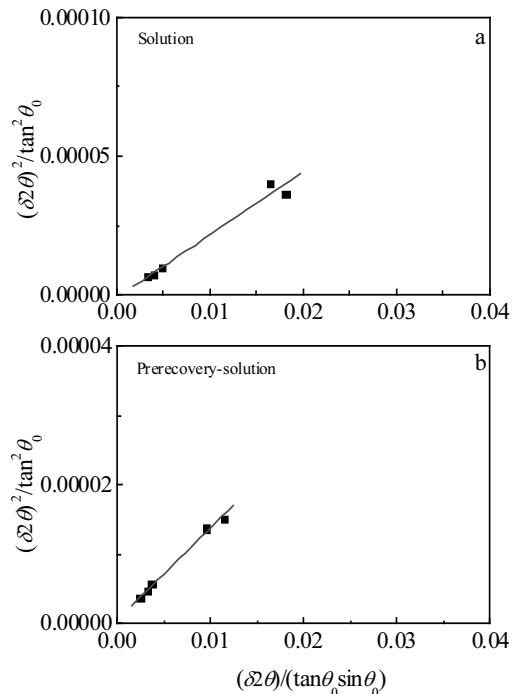


图 3 Al-10.78Zn-2.78Mg-2.59Cu-0.22Zr-0.047Sr 合金 $(\delta 2\theta)^2 / \tan^2 \theta_0$ 与 $\delta 2\theta / (\tan \theta_0 \sin \theta_0)$ 之间的拟合关系

Fig.3 Fitting relationship between $(\delta 2\theta)^2 / \tan^2 \theta_0$ and $\delta 2\theta / (\tan \theta_0 \sin \theta_0)$ of Al-10.78Zn-2.78Mg-2.59Cu-0.22Zr-0.047Sr alloy: (a) solution and (b) prerecovery-solution

表2 XRD 数据分析出的微观结构参数
Table 2 Microstructural parameters calculated from XRD data

Heat treatment	Lattice micro strain, $\langle e^2 \rangle^{1/2}$	Coherent domain size, d/nm	Dislocation density, $\rho/\times 10^{14} m^{-2}$
Solution	0	67.57	0
Prerecovery-solution	1.65×10^{-4}	118.51	0.168

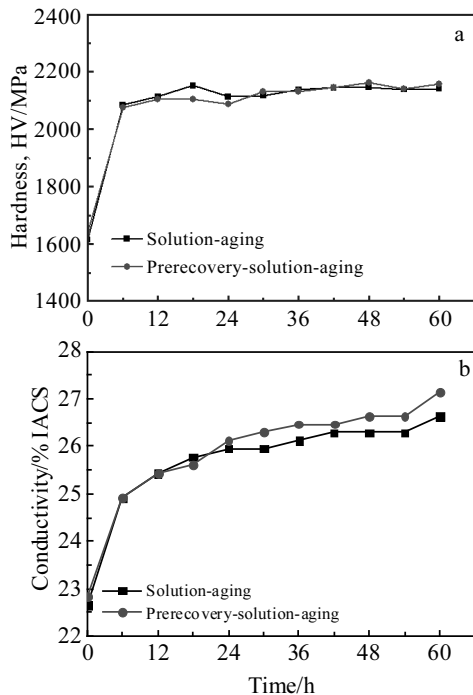


图4 Al-10.78Zn-2.78Mg-2.59Cu-0.22Zr-0.047Sr 合金热处理后硬度和电导率随时效时间的变化规律

Fig.4 Variation of hardness (a) and conductivity (b) with aging time of Al-10.78Zn-2.78Mg-2.59Cu-0.22Zr-0.047Sr alloy processed by different heat treatments

值。随着时效时间的延长, 硬度在峰值上下波动, 峰值基本出现在 48 h, 固溶及预回复-固溶工艺下的峰时效 (120 °C/48 h) 硬度 (HV) 分别为 2146, 2162 MPa。比较合金在 2 种工艺下的时效硬化曲线可以看出, 合金的硬度大致保持在同一水平。

从图 4b 中可以发现, 随着时效时间的延长, 合金的电导率在逐渐升高。通常合金的电导率取决于过饱和固溶体的固溶度。随着时效的进行, 合金中溶质固溶度的降低使晶格畸变程度减轻, 电导率增加; 同时

析出相的粗化也有助于提高电导率。合金在 2 种工艺峰时效电导率分别为 26.3 %IACS, 26.6 %IACS。对比合金在不同工艺下的电导率曲线, 可以发现预回复处理小幅度提高合金的电导率。而铝合金的抗应力腐蚀性能与其电导率存在一定的正相关性, 可以预期预回复处理有助于提高材料的抗应力腐蚀。

2.4 拉伸性能

试样经不同热处理后的室温拉伸性能见表 3。从表中的数据可以看出, 合金屈服强度达到 500 MPa 以上, 基本满足超高强铝合金的强度要求, 但延伸率相对较小。对比发现, 预回复处理提高了合金峰值时效的强度, 合金屈服强度从 598.2 MPa 提高到 633.2 MPa, 抗拉强度从 644.6 MPa 提高到 681.5 MPa。

2.5 抗晶间腐蚀性能

将经不同热处理后的试样放入晶间腐蚀液中, 试验开始阶段, 试样表面产生气泡; 1 h 后试样表面逐渐变为黄褐色并附有白色物质; 6 h 后取出腐蚀试样, 试样为黑褐色。取样品侧面为观察面, 镶嵌打磨后, 在光学显微镜下观察晶间腐蚀的形貌及深度。图 5 为合金经不同热处理后的晶间腐蚀形貌。可以看出, 与未经预回复处理的合金试样相比, 预回复使晶间腐蚀的最大深度从 110.2 μm 下降到 42.4 μm 。根据 GB/T 7998-2005 标准, 腐蚀等级从 4 级提升到 3 级, 表明预回复处理在很大程度上提高合金的抗晶间腐蚀性能。

2.6 抗剥落腐蚀性能

将经不同热处理后的试样放入剥落腐蚀(EXCO) 溶液中, 样品表面均有气泡产生。试验结束后, 目视法观察试样的剥落腐蚀性能, 所有样品均出现不同程度的腐蚀。图 6 为合金经不同热处理后的剥落腐蚀形貌。不难看出预回复提高了合金的抗剥落腐蚀性能。

对于固溶-时效的试样 (图 6a) 而言, 其表面出现明显的起皮, 并向试样内部纵深发展, 根据 GB/T 22639-2008 标准, 腐蚀等级为 EA。而经预回复处理后的试样 (图 6b), 其表面发生较严重的点蚀, 腐蚀等级为 PB。

3 分析与讨论

本实验使用的高强铝合金经过热挤压处理(挤压比为 12), 其内部存在变形储能。由于后续固溶处理温度较高且时间较长, 会很容易发生再结晶。若在固

表3 试样经不同热处理后的部分基本性能

Table 3 Partial basic properties of alloy processed by different heat treatments

Heat treatment	Hardness, HV/MPa	Conductivity/%IACS	$\sigma_{0.2}/MPa$	σ_b/MPa	Elongation/%
Solution-aging (120 °C/48 h)	2146	26.3	598.2	644.6	7.5
Prerecovery-solution-aging (120 °C/48 h)	2162	26.6	633.2	681.5	7.9

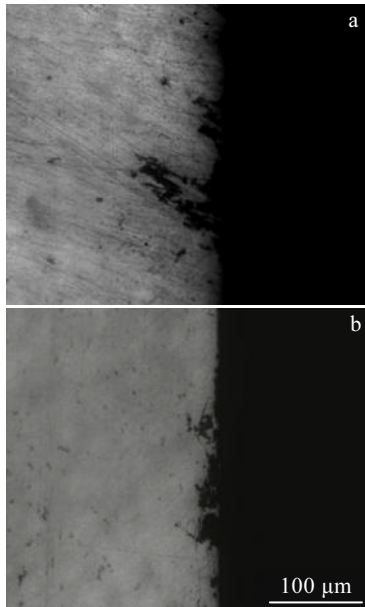


图 5 试样经不同处理后的晶间腐蚀形貌

Fig.5 Intergranular corrosion morphologies of alloy processed by different heat treatments: (a) solution-aging and (b) pre-recovery-solution-aging

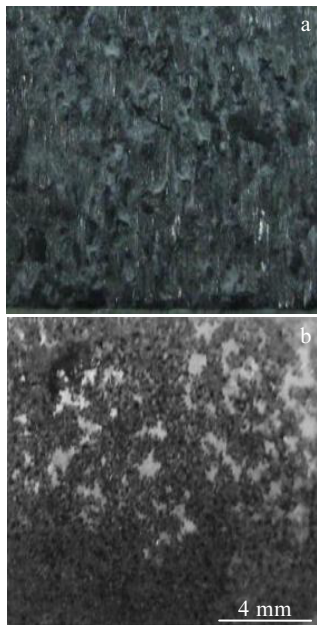


图 6 试样经不同处理后的剥落腐蚀形貌

Fig.6 Exfoliation corrosion morphologies of alloy processed by different heat treatments: (a) solution-aging and (b) pre-recovery-solution-aging

溶前进行预回复处理,可以消耗合金中部分形变储能,使其内部形变储能降低,从而降低合金的再结晶驱动力,在一定程度上抑制再结晶,保留低角度晶界及亚

晶组织,改善合金的性能。

3.1 预回复处理对合金强化机理的影响

Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金屈服强度($\sigma_{0.2}$)的组成可以用下面的公式描述^[10-12]:

$$\sigma_{0.2} = \sigma_0 + \sigma_{LAGB} + \sigma_{HAGB} + \sigma_{SS} + \sigma_i \quad (3)$$

式中 σ_0 为晶格摩擦应力, σ_{LAGB} 为位错强化, σ_{HAGB} 为晶界强化, σ_{SS} 为固溶强化, σ_i 为时效沉淀析出相强化。其中 σ_{LAGB} 及 σ_{HAGB} 可以用下面公式进行表示^[9]:

$$\sigma_{LAGB} = M\alpha G [b^2\rho + 3b(1-f_H)\bar{\theta}_L/\bar{L}]^{1/2} \quad (4)$$

$$\sigma_{HAGB} = k_{H-P} (f_H/\bar{L})^{1/2} \quad (5)$$

式(4)、(5)中符号 M 、 α 、 G 及 k_{H-P} 分别为 Taylor 位向因子(不考虑织构时为 3.06^[9])、数值因子(0.24^[9])、剪切模量(26 GPa^[10])、Hall-Petch 因子(对于铝为 0.04 MPa/ \sqrt{m} ^[10])。表 4 列出了位错强化和晶界强化计算数值。由表 4 可知,预回复处理提高了合金的位错强化及晶界强化,两者的总强化值从 58.8 MPa 提高到 71.8 MPa,增大 13 MPa,但小于屈服强度升高的幅度(为 35 MPa),说明预回复处理提高了合金在峰时效态的固溶强化和时效沉淀强化的总强化,并且合金强度的提高主要归因于合金固溶强化和时效沉淀析出相强化的总强化的提高。通常情况下,Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金的固溶程度决定合金的电导率,而晶内时效沉淀析出相主导合金的强化。对于本合金,由于预回复处理一定程度上提高了合金的电导率,因此可以推断,预回复处理降低了合金的固溶程度及固溶强化,相应地促进了合金的时效沉淀析出,这可能与合金内部低角度晶界增多提供了更多时效沉淀析出形核位置有关。

表 4 合金经不同热处理后的部分强化贡献

Table 4 Partial strengthening contribution of alloy processed by different heat treatments

Heat treatment	σ_{LAGB} / MPa	σ_{HAGB} / MPa	$(\sigma_{LAGB} + \sigma_{HAGB})$ / MPa
Solution	49.3	9.5	58.8
Prerecovery-solution	61.4	10.4	71.8

3.2 预回复处理对合金抗腐蚀性能的影响

铝合金的晶间腐蚀主要是由于基体与晶界析出相的电位差异而引起的,同时受到析出相尺寸和间距、无沉淀析出带及溶质溶度梯度等一系列微观组织影响。研究发现,低角度晶界或亚晶界由于晶界上析出相尺寸小,并且容易形成不连续的晶界析出相,使其抗腐蚀能力增强。合金经预回复-固溶处理后内部存在较大比例的低角度晶界,因而降低了合金的晶间腐蚀

敏感性。而合金的剥落腐蚀一般起源于晶间腐蚀, 合金对晶间腐蚀越敏感, 相对也会对剥落腐蚀更加敏感。影响合金抗剥落腐蚀性能的因素主要有 2 个, 一个是晶粒的长径比, 另一个是晶界析出相。从 EBSD 微观组织图看出 2 种工艺合金晶粒趋于等轴状, 合金的剥落腐蚀性主要取决于晶界析出相。从剥落腐蚀试验结果可以看出, 预回复处理也使合金的抗剥落腐蚀性得到改善。

4 结 论

1) 合金固溶前的预回复处理可以一定程度上细化合金晶粒, 平均晶粒尺寸从 7.30 μm 减小到 5.57 μm ; 经预回复处理的合金中存在较多的低角度晶界, 其比例为 0.623。

2) 预回复处理对合金的硬度与电导率影响较小, 但强度得到明显提高。峰值时效 (120 $^{\circ}\text{C}/48\text{ h}$) 下合金的屈服强度为 633.2 MPa, 相对未经预回复处理的合金屈服强度提高 35 MPa, 这与位错强化及晶界强化的提高有关。

3) 预回复处理对合金的抗晶间腐蚀与剥落腐蚀性能影响较大, 相对未经预回复处理的合金, 峰值时效下晶间腐蚀深度从 110.2 μm 下降到 42.4 μm , 晶间腐蚀等级从 4 级改善到 3 级; 剥落腐蚀等级从 EA 级提升到 PB 级。

参考文献 References

[1] Li Hongying, Geng Jinfeng, Dong Xianjuan *et al.* *Journal of Wu-*

han University of Technology-Mater Sci Ed[J], 2007, 22(2): 191

[2] Oliveira Jr A F, De Barros M C, Cardoso K R *et al.* *Materials Science Engineering A*[J], 2004, 379(1-2): 321

[3] Xu Xiaojing(许晓静), Zhang Yunkang(张允康), Deng Ping'an(邓平安) *et al.* *Transaction of Materials and Heat Treatment* (材料热处理学报)[J], 2014, 35(8): 36

[4] Deng Yunlai, Wan Li, Zhang Yong *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2010, 498(1): 88

[5] Fan Yazhou(范亚洲), Xu Xiaojing(许晓静), Ruan Hongyan(阮鸿雁) *et al.* *Transaction of Materials and Heat Treatment* (材料热处理学报)[J], 2015, 36(7), 114

[6] GB/T 7998-2005. *Test Method for Intergranular Corrosion of Aluminium Alloy*[S], 2005

[7] GB/T 22639-2008. *Test Method of Exfoliation Corrosion for Wrought Aluminium and Aluminium Alloys*[S], 2008

[8] Youssef K M, Scattergood R O, Murty K L *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2006, 54(2): 251

[9] Song Tao(宋涛), Xu Xiaojing(许晓静), Fan Zhen(范真) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(S2): 373

[10] Cabibbo M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 560: 413

[11] Luo P, McDonald D T, Xu W *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2012, 66(10): 785

[12] Ma Kaka, Wen Haiming, Hu Tao *et al.* *Acta Materialia*[J], 2014, 62: 141

Effects of Prerecovery on the Microstructure and Properties of Al-10.78Zn-2.78Mg-2.59Cu-0.22Zr-0.047Sr Aluminum Alloy

Ding Qing, Xu Xiaojing, Zhang Jingyu, Xu Chi, Chen Yang, Wang Chengsong, Zhu Jinxin, Yang Fan
(Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The effects of prerecovery (250 $^{\circ}\text{C}/24\text{ h}+300\text{ }^{\circ}\text{C}/6\text{ h}+400\text{ }^{\circ}\text{C}/6\text{ h}$) on the microstructure and properties of Al-10.78Zn-2.78Mg-2.59Cu-0.22Zr-0.047Sr aluminum alloy were investigated by EBSD, XRD and test of hardness, conductivity, tension, intergranular corrosion and exfoliation corrosion. The results show that prerecovery treatment can refine grain size with average size declining from 7.30 μm to 5.57 μm and increase the proportion of low angle grain boundary from 0.588 to 0.623. The effects of prerecovery on the hardness and conductivity of the alloy are small, but the strength of the alloy is obviously improved by the prerecovery. The yield strength of the alloy at peak aging (120 $^{\circ}\text{C}/48\text{ h}$) processed by prerecovery is 633.2 MPa, which is increased by 35 MPa compared with that without prerecovery treatment. The intergranular corrosion and exfoliation corrosion of the alloy after prerecovery treatment are improved from rank 4 to rank 3 and rank EA to rank PB, respectively.

Key words: Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloy; prerecovery; solution; high/low angle grain boundaries; microstructure and properties

Corresponding author: Xu Xiaojing, Ph. D., Professor, Engineering Institute of Advanced Manufacturing and Modern Equipment Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, P. R. China, E-mail: xjxu67@ujs.cn