

# Effect of Zn/Mg Ratio on Microstructure and Properties of 7003 Aluminum Alloy Extruded Profile

Yanquan Lan<sup>1</sup>, Zhao Yang<sup>1</sup>, Sen Lin<sup>1</sup>, Li Wan<sup>1</sup>, Yunlai Deng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan

<sup>2</sup>National Key Laboratory of Science and Technology for National Defense on High-Strength Structural Materials, Central South University, Changsha Hunan

Email: luckdeng@csu.edu.cn

Received: Dec. 13<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 26<sup>th</sup>, 2019; published: Jan. 2<sup>nd</sup>, 2020

## Abstract

The comprehensive regulation of the corrosion and mechanical properties of medium-high strength Al-Zn-Mg alloys is particularly important in engineering applications. In this paper, 7003 aluminum alloy extruded profiles with different Zn/Mg ratios are taken as the object. At the metallurgical mass of 6.6wt.% of total (Zn + Mg), the analysis and test methods such as room temperature tensile and intergranular corrosion are adopted. Scanning electron microscope (SEM) and transmission electron microscope (TEM) were used to observe the microscale second phase and nanoscale aging precipitated phases, respectively. The influence of Zn/Mg ratio on mechanical properties and resistance to intergranular corrosion was studied. Results show that under the peak aging condition at 120°C, the Zn/Mg ratio decreases from 11.4 to 6.1, the distribution density of  $\eta'$  phase in 7003-T6 aluminum alloy increases, which increases the tensile strength and yield strength by 34.1% and 47.4%, respectively. And the reduction of the volume fraction of the second phase and the narrowing of the PFZ reduced the elongation by only 1.1%. In addition, the grain boundary precipitation phase changes from continuous to discontinuous distribution, which reduces the tendency of intergranular corrosion of 7003 aluminum alloy.

## Keywords

Zn/Mg Ratio, Al-Zn-Mg Alloy, Microstructure, Mechanical Properties, Corrosion Resistance

# Zn/Mg比对7003铝合金挤压型材组织与性能的影响

蓝艳全<sup>1</sup>, 杨昭<sup>1</sup>, 林森<sup>1</sup>, 万里<sup>1</sup>, 邓运来<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中南大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙

<sup>2</sup>中南大学轻质高强结构材料国防科技重点实验室, 湖南 长沙

Email: luckdeng@csu.edu.cn

收稿日期: 2019年12月13日; 录用日期: 2019年12月26日; 发布日期: 2020年1月2日

## 摘要

中高型Al-Zn-Mg合金的腐蚀性能及力学性能的综合调控在工程应用上尤为重要。本文以不同Zn/Mg比的7003铝合金挤压型材为对象, 在(Zn + Mg)总量约为6.6 wt.%的冶金质量下, 通过室温拉伸、晶间腐蚀等分析测试方法, 并采用扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)分别对微米级第二相和纳米级时效析出相进行观察, 研究了Zn/Mg比对力学性能和抗晶间腐蚀性能的影响规律。结果表明: 在120℃的峰值时效状态下, Zn/Mg比从11.4降至6.1, 7003-T6铝合金中 $\eta'$ 相分布密度增加, 使抗拉强度和屈服强度分别提高34.1%和47.4%, 而第二相体积分数的减少及PFZ的窄化使得延伸率仅降低了1.1%。加之晶界析出相从连续转变为断续分布的状态, 降低了7003铝合金的晶间腐蚀倾向性。

## 关键词

Zn/Mg比, Al-Zn-Mg合金, 微观组织, 力学性能, 抗腐蚀性能

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

7003 铝合金属于中等强度铝合金, 具有强度高、焊接性及成型性好等优点, 作为一种轻质合金材料广泛应用在车辆、建筑、桥梁等领域中[1] [2] [3]。众所周知, 该合金为时效强化合金, 其析出序列[4]为: 过饱和固溶体(sss)→偏聚区(GP 区)→亚稳相  $\eta'$  ( $\text{Mg}(\text{Zn}, \text{Cu}, \text{Al})_2$ )→平衡相  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ )。一般认为, 峰值时效(T6)状态下, 该合金基体中析出高密度的半共格  $\eta'$ 相, 可使合金的力学性能最佳。但是, 晶界上连续分布的析出相导致合金的耐腐蚀性能变差[5]。对于目前高强的 Al-Zn-Mg-Cu 系合金而言, Cu 元素的加入能够提高晶内析出相密度及晶界相的电位, 使其阳极溶解速率和应力腐蚀裂纹扩展速率降低, 力学性能提高。然而共晶的  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  相的增加对点蚀及断裂性能的降低尤为明显[6], 不适用于制备具有复杂形貌的型材。耐腐蚀性能是 7xxx 系铝合金材料服役过程中的一项重要参考指标, 其在很大程度上限制了该合金在工程上的应用。

Zn 和 Mg 作为主合金元素, 显著影响 Al-Zn-Mg 合金的微观组织、力学性能与腐蚀性能, 它们总量的增加必然使合金中沉淀强化相的体积分数增加, 提高强度, 但溶质浓度过高会对合金的韧性和抗应力腐蚀性能产生不利影响[7] [8]。另外, Mg 含量过高会导致熔铸过程中易发生氧化而产生气孔等铸造缺陷[9], 而 Zn 含量过高则易形成较大的内应力, 降低抗晶间腐蚀性能, 导致构件服役时容易出现晶间裂纹而断裂[10]。因此, 对 Zn 和 Mg 元素之间的比例调整尤其重要。有研究[11] [12]表明, Zn/Mg 比值的大小改变了时效过程的析出序列, 从而显著影响合金的强度。Zn/Mg 比较高( $\text{Zn}/\text{Mg} > 2.2$ )时, GP 区主要转变为  $\eta'$ 或  $\eta$ 平衡相; Zn/Mg 比较低( $\text{Zn}/\text{Mg} \leq 2.2$ )时, GP 区主要转变为 T'或 T平衡相( $\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}$ )。然

而,在不改变析出序列的前提下,Zn/Mg 比值对合金组织与性能方面的相关研究较少。

因此,本文以 7003 铝合金挤压型材为研究对象,在保证(Zn + Mg)总量不变的情况下,研究 Zn/Mg 比对力学性能与晶间腐蚀性能的影响,并揭示其影响机理。从而为该合金的成分优化与性能调控提供参考。

## 2. 实验材料与方法

### 2.1. 实验材料及热处理

实验材料为 4.5 mm 厚度的 7003 铝合金挤压型材。三种合金材料的(Zn + Mg)总量约为 6.6 wt.%, 其 Zn/Mg 比(质量分数比,下同)分别为 11.4 (1#合金)、8.1 (2#合金)和 6.1 (3#合金),其实际化学成分如表 1 所示。实验合金先在空气炉中进行 480℃ 保温 1 h 的固溶处理,室温下水淬冷却,置于干燥的电阻炉中进行 120℃ 的峰值时效。

**Table 1.** Composition of 7003 aluminum alloy with different Zn/Mg ratios (wt.%)

**表 1.** 不同 Zn/Mg 比的 7003 铝合金化学成分(mass fraction, %)

Alloy	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Ti	Zr	Fe	Si	Al	Zn + Mg	Zn/Mg
1#	6.04	0.53	0.17	0.25	0.12	0.08	0.20	0.15	0.06	Bal.	6.57	11.4
2#	5.85	0.72	0.16	0.23	0.15	0.07	0.17	0.15	0.06	Bal.	6.57	8.1
3#	5.68	0.93	0.16	0.26	0.14	0.08	0.19	0.14	0.07	Bal.	6.61	6.1

### 2.2. 性能测试

沿 7003 合金型材的挤压方向各取三组平行试样,采用 320、600、800、1000 目砂纸打磨试样的平行长度,试样标距为 30 mm,在 DDL100 型电子万能材料试验机上进行室温拉伸性能测试,拉伸速度为 2 mm/min,实验结束后通过测量断后标距计算试样的断后伸长率。

晶间腐蚀试验按照 GB/T7988-2005 标准执行,试样首先用无水乙醇清洗表面油污,采用 400、600、800、1000、1500 目砂纸将检测面打磨平滑,放入 NaOH 溶液中碱洗 15 min,然后取出放入 HNO<sub>3</sub> 溶液中浸泡 3 min 至出光,用蒸馏水洗净并吹干。对试样的非检测面采用松香进行封装处理,平放于预先配置和经水浴锅预热至 35 ± 2℃ 的晶间腐蚀溶液(57 g NaCl + 10 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,用蒸馏水稀释至 1 L)中浸泡 6 h。实验结束后截取试样横截面用砂纸进行打磨并抛光,在 OLYMPUS BX51M 型光学显微镜(OM)下观察腐蚀形貌并测量最大腐蚀深度。

### 2.3. 微观组织观察

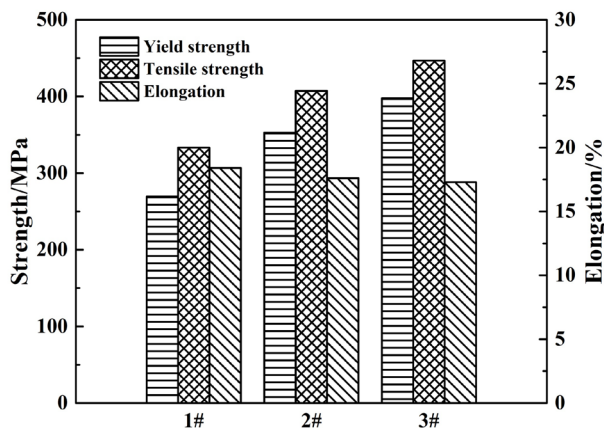
分别切取纵截面试样,采用 400、600、800、1000、1500 目砂纸进行打磨,机械抛光至表面无划痕。采用 Zeiss EVO MA10 型扫描电子显微镜(SEM)观察合金的微米级第二相分布情况,并对其进行能谱(EDS)分析。另外取三个薄片试样,用砂纸预磨至 100 μm,冲成直径为 3 mm 的圆片,双喷减薄至 50 μm,电解液为 20% HNO<sub>3</sub> + 80% CH<sub>3</sub>OH,电压为 20 V,电流为 50 mA,温度控制在 -30 ± 5℃。采用 TECNAIG2 F20 型透射电子显微镜(TEM)观察合金晶内与晶界的纳米级第二相分布情况。

## 3. 实验结果

### 3.1. 室温拉伸性能

图 1 为三种不同 Zn/Mg 比合金时效后的室温拉伸试验结果。可见,合金的抗拉强度与屈服强度随着

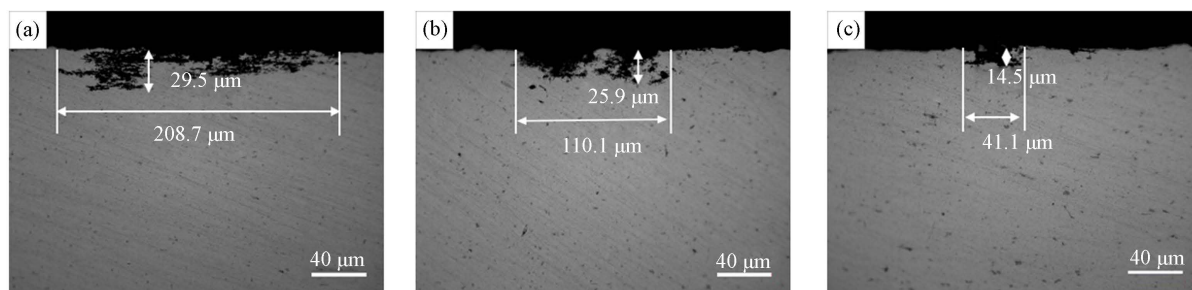
Zn/Mg 比的降低而显著提高。1#、2#、3#合金的抗拉强度与屈服强度分别为 333.2 MPa、407.3 MPa、446.9 MPa 和 269.4 MPa、352.9 MPa、397.2 MPa，Zn/Mg = 6.1 合金的抗拉强度与屈服强度比 Zn/Mg = 11.4 合金分别提高了 34.1%和 47.4%。此外，1#、2#、3#合金的断后伸长率分别为 18.4%、17.6%和 17.3%。可见 Zn/Mg 比的降低对合金强度有明显的提升作用，而对断后伸长率的影响较小。



**Figure 1.** Tensile properties of alloys with different Zn/Mg ratios at room temperature  
**图 1.** 不同 Zn/Mg 比合金的室温拉伸性能

### 3.2. 晶间腐蚀

三种合金的晶间腐蚀形貌及其腐蚀深度的测定如图 2 所示。可见，三种合金的腐蚀形貌均为典型的晶间腐蚀形貌，腐蚀从表面沿垂直和水平方向侵蚀。1#、2#、3#合金的最大腐蚀深度分别为 29.5 μm、25.9 μm 和 14.5 μm，其对应的腐蚀宽度分别为 208.7 μm、110.1 μm 和 41.1 μm。综上可知，合金在相同的时效状态及浸泡条件下，随着 Zn/Mg 比的降低，其晶间腐蚀过程中最大扩展深度及宽度均呈现下降趋势，根据国标可评定合金的抗晶间腐蚀性能得以提升。

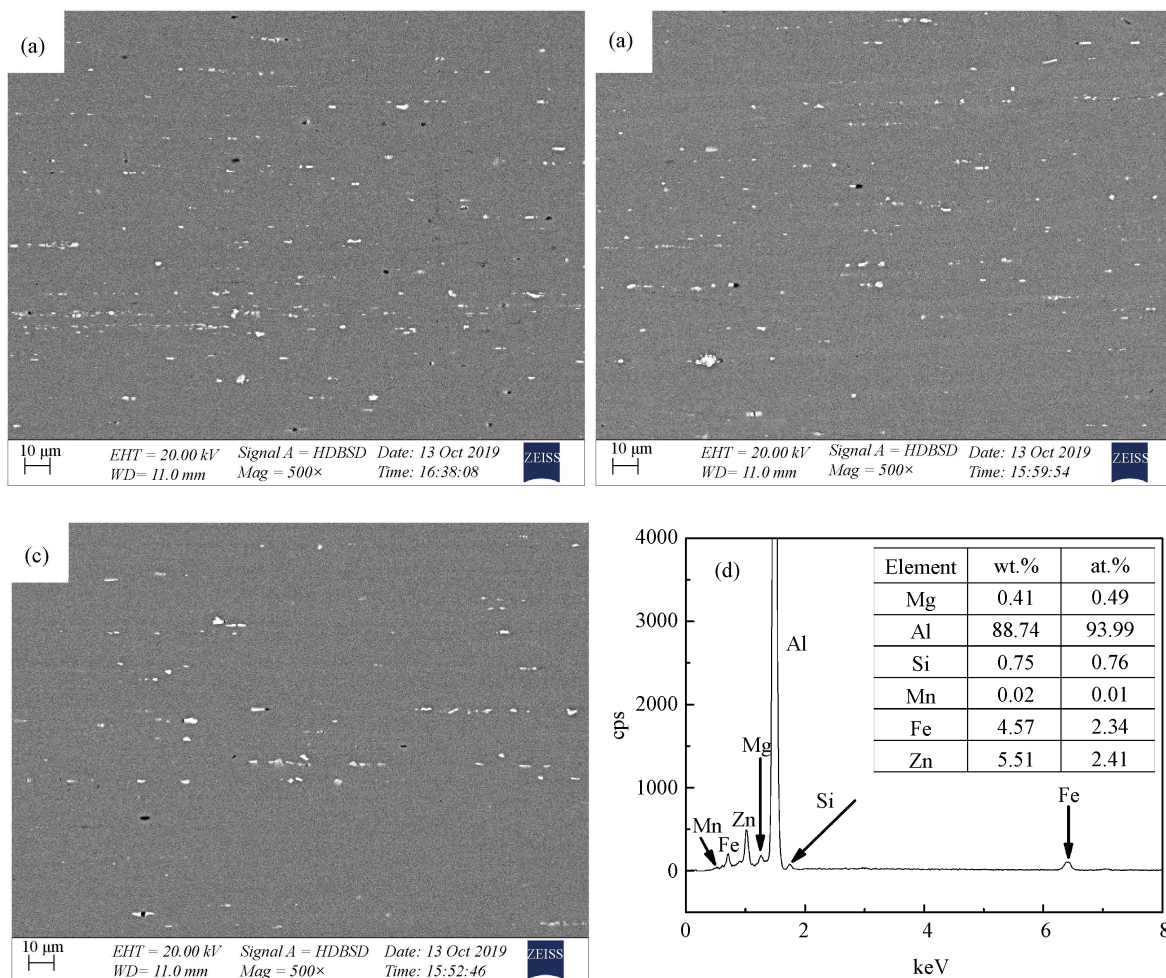


**Figure 2.** Intergranular corrosion morphologies of alloys with different Zn/Mg ratios: (a) 1# alloy; (b) 2# alloy; (c) 3# alloy  
**图 2.** 不同 Zn/Mg 比合金的晶间腐蚀形貌：(a) 1#合金；(b) 2#合金；(c) 3#合金

### 3.3. 微观组织

图 3 为不同 Zn/Mg 比合金的 SEM 图像与 EDS 分析谱图。由图 3(a)、(b)、(c)可见，T6 时效热处理状态下的第二相粒子在背散射电子模式下呈现白色且形态各异，沿着挤压方向不均匀分布在基体上。结合图 3(d)的 EDS 分析结果可知，这些白色的第二相粒子主要为含 Fe、Si 元素的 AlFeMnSi 杂质相，并溶入其周围基体中的少量 Zn、Mg 原子。运用 Image Pro Plus 分析软件对试样多个区域的第二相粒子数目进

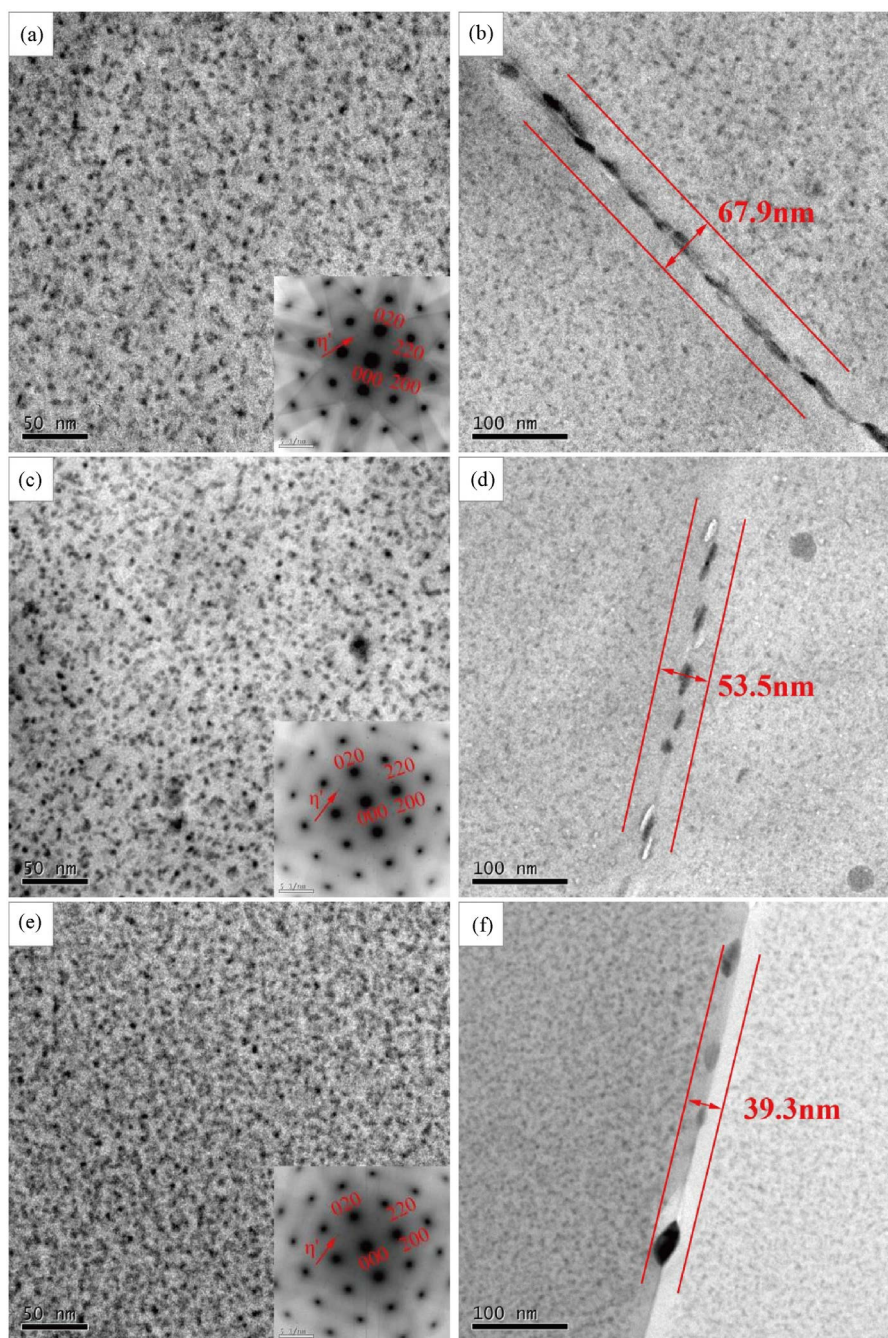
行统计分析,结果显示 1#、2#、3#合金基体单位面积上析出的第二相粒子数目分别为 9609 个/mm<sup>2</sup>、7852 个/mm<sup>2</sup>、5216 个/mm<sup>2</sup>。说明随着 Zn/Mg 比的降低,合金基体上析出的第二相粒子体积分数明显减少。



**Figure 3.** SEM images and EDS analysis of alloys with different Zn/Mg ratios: (a) 1# alloy; (b) 2# alloy; (c) 3# alloy; (d) EDS analysis of white phase

**图 3.** 不同 Zn/Mg 比合金的 SEM 图像与 EDS 谱图: (a) 1#合金; (b) 2#合金; (c) 3#合金; (d) 白色相的 EDS 分析

图 4 所示为时效后三种不同 Zn/Mg 比合金的晶内与晶界纳米结构相的 TEM 图像。可见,在 120°C 峰值时效热处理后合金晶粒内部均匀析出圆盘状的纳米析出相,且在晶界处均出现明显的无沉淀析出带 (PFZ)。由图 4(a)、(c)、(e) 中右下方的衍射斑点可知,电子沿  $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$  晶带轴入射,除了铝基体斑点,在晶向族  $\{311\}$  的  $1/3$  和  $2/3$  位置处出现了明显的衍射斑点,根据文献[13]可认为该析出粒子为  $\eta'$  相。另外,从图中可发现,1#合金的  $\eta'$  相尺寸相比于 2#、3#合金较粗大,3#合金的  $\eta'$  相尺寸最小,2#合金介于两者之间。运用 Image Pro Plus 分析软件对多个区域的  $\eta'$  相密度进行统计分析。结果显示 1#、2#、3#合金的  $\eta'$  相析出密度分别为 6652 个/ $\mu\text{m}^2$ 、8786 个/ $\mu\text{m}^2$ 、11814 个/ $\mu\text{m}^2$ 。三种合金在晶界上的析出情况如图 4(b)、(d)、(f) 所示。可见,1#合金的晶界处析出相密集且连续分布,PFZ 宽度约为 67.9 nm; 2#合金的晶界相明显稀疏,PFZ 宽度约为 53.5 nm; 3#合金的晶界相间距进一步增大,PFZ 宽度缩小至 39.3 nm。综上可知,随着 Zn/Mg 比的降低,合金晶粒内部析出的  $\eta'$  强化相的尺寸逐渐减小,数量密度逐渐增大,其晶界上的析出相逐渐从连续向断续分布状态转变,且析出相之间的间距变大,PFZ 宽度逐渐减小。



**Figure 4.** TEM images of the alloys with different Zn/Mg ratios: (a), (b) 1# alloy; (c), (d) 2# alloy; (e), (f) 3# alloy

**图 4.** 不同 Zn/Mg 比合金的 TEM 照片：(a)、(b) 1#合金；(c)、(d) 2#合金；(e)、(f) 3#合金

#### 4. 分析与讨论

Al-Zn-Mg 合金的强化方式分别为固溶强化、晶界强化、位错强化和析出强化，固溶及晶界强化对于可时效强化铝合金而言贡献较少，位错密度在固溶过程中亦大量消失，因此本研究仅对其析出强化的贡献进行讨论，它的强化机制与析出相的种类和间隔密切相关。众所周知，在合金时效过程的析出序列中，亚稳的 GP 区及  $\eta'$  相对塑性变形过程中位错的绕过与切过的阻碍作用较为严重，显著影响合金的强度，

而  $\eta$  相由于与基体不共格, 强化效果减弱, 因此合金在过时效(T7)阶段的强度明显低于 T6 态[14]。三种实验合金均处于 T6 峰值时效状态, 可保证合金晶内强化相的最大析出程度。1#、2#、3#合金的 Zn/Mg 质量分数比值分别为 11.4、8.1、6.1, 均高于  $\text{MgZn}_2$  相的质量比( $\text{Zn/Mg} = 5.4$ ), 说明在合金中 Zn 元素过量, 故  $\eta'$  相的析出密度主要取决于 Mg 元素的含量。在 Zn、Mg 原子能够充分反应并转变为强化相的情况下, 随着 Zn/Mg 比的降低, Mg 原子浓度增加, 溶质可反应浓度增加, 促使反应自发向生成  $\eta'$  相的方向进行, 最终使  $\eta'$  相的析出密度增加, 间隔减小。因此, Zn/Mg 比降低, 合金的屈服强度和抗拉强度得到明显的提升。

在 Zn/Mg 比较高的合金中, 由于 Zn 原子大量剩余, 倾向于与 Al、Fe、Mn、Si 原子结合形成粗大的 AlFeMnSi 杂质相(图 3 所示), 造成杂质相的体积分数的增加。该相与基体相邻界面非共格, 塑性变形阶段易于形成应力集中, 产生微裂纹并与基体分离, 为宏观裂纹形成前提供损伤起始点。另一方面, 时效析出机理为溶质扩散析出过程, 随着 Zn/Mg 比的降低, 基体中 Zn 原子浓度降低, Mg 原子浓度增加。由于 Mg 原子的扩散系数低于 Zn 原子[15], 从晶内向晶界析出过程缓慢, 降低整体溶质原子的扩散速率, 加之  $\eta'$  相在晶内大量形核, 故使 PFZ 窄化, 强化晶界强度, 对中高强铝合金断裂韧性的影响较为明显。因此, Zn/Mg 比降低, 在屈服强度增加的情况下增大了杂质相 - 基体界面及晶粒 - 晶粒交界面的应力差, 但由于第二相粒子的减少及 PFZ 宽度的降低, 降低了其空洞与裂纹的萌生和沿晶断裂倾向性, 相对于单一调控 Mg 含量的合金而言, 降低断后延伸率的下降程度, 使强度和断裂韧性的关系得到良好调控。

Al-Zn-Mg 合金腐蚀的发生往往与相电位差有关[16], 并且腐蚀的源头一般发生于粗大第二相及能量亚稳的晶界处。对于富含 Fe、Si 的杂质相, 通常分布于晶界处及附近, 与基体产生较大的电位差而引起周围的 Al 基质被侵蚀, 因此一般被认为是点蚀或晶间腐蚀的起源。另一方面, 对于晶界 PFZ 和晶内而言, 晶界上  $\text{MgZn}_2$  相的电位较低, 优先发生阳极溶解, 当晶界的析出相连续分布时, 则形成了连贯的腐蚀通道, 在腐蚀形态上表现为沿晶腐蚀。此外, Zn 在铝中有很大的固溶度, 在基体中十分稳定, 而 Mg 容易在晶界上偏聚, 形成较大的富 Mg 区[17], 此较大的富 Mg 区从晶界以及周围晶体的基质中汲取 Zn 原子, 促进  $\eta'$  相粗化转变为  $\eta$  相。Zn/Mg 比低的合金由于晶内析出高密度的  $\eta'$  相, 晶界附近的  $\eta'$  相不断向晶界迁移, 导致晶界上  $\eta'$  相互相吞噬长大, 相之间的间距增大, 在晶界上表现为断续分布。综上所述, 随着 Zn/Mg 比的降低, 杂质相的体积分数降低, 减少了点蚀的触发, 且晶界上析出相之间的间隔变大, PFZ 变窄, 降低了晶界相与周围基质的电位差, 从而阻断了腐蚀过程, 因此合金的抗晶间腐蚀性能提高。

## 5. 结论

1) 在 Zn + Mg 总量约为 6.6 wt.% 的 7003-T6 铝合金中, Zn/Mg 比值从 11.4 降到 6.1, 合金的抗拉强度与屈服强度分别提高了 34.1% 和 47.4%, 延伸率仅降低了 1.1%。合金的抗晶间腐蚀性能随着 Zn/Mg 比的降低而有所改善, 其最大腐蚀深度与宽度均逐渐减小。

2) Zn/Mg 比的降低增加了合金基体中 Mg 元素的含量, 时效后析出更大密度的  $\eta'$  相, 使合金的强度提高, 同时降低了杂质第二相的体积分数和缩小了无沉淀析出带的宽度, 相比于单一调控 Mg 含量的合金减少了断后延伸率的降低。晶界上 Zn 原子含量及溶质整体扩散系数的降低, 对  $\text{MgZn}_2$  相的长大过程不起阻碍作用, 阻断晶界相的连续性, 减缓了合金的沿晶腐蚀现象, 使垂直和水平扩展腐蚀宽度分别降低了 50.8% 和 80.3%。从力学与抗腐蚀性能方面考虑, 在三种不同的比例中 Zn/Mg 比为 6.1 时 Al-Zn-Mg 合金的综合性能较佳。

## 基金项目

本文研究工作得到了“国家重点研发计划课题(2016YFB0300901)”“国家自然科学基金课题

(51705539)”提供的资助。

## 参考文献

- [1] Ludtka, G.M. and Laughlin, D.E. (1982) The Influence of Microstructure and Strength on the Fracture Mode and Toughness of 7XXX Series Aluminum Alloys. *Metallurgical Transactions A*, **13**, 411-425. <https://doi.org/10.1007/BF02643350>
- [2] 章淑芳, 王晓敏, 陈辉. 7003 铝合金动车柜体的应力腐蚀开裂[J]. 材料工程, 2015, 43(7): 105-112.
- [3] 李慎兰, 黄昌龙, 黄志其. 固溶处理工艺对 7003 铝合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(2): 42-48.
- [4] Sha, G. and Cerezo, A. (2004) Early-Stage Precipitation in Al-Zn-Mg-Cu Alloy (7050). *Acta Materialia*, **52**, 4503-4516. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.06.025>
- [5] 章国辉, 杨修波, 黄磊萍. 人工时效 7055 铝合金晶间腐蚀形貌与微观机理的关系[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(11): 3393-3399.
- [6] Dong, P., Chen, S. and Chen, K. (2019) Effects of Cu Content on Microstructure and Properties of Super-High-Strength Al-9.3Zn-2.4Mg-xCu-Zr Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **788**, 329-337. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.228>
- [7] 刘晓涛, 崔建忠. Al-Zn-Mg-Cu 系超高强铝合金的研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(3): 47-51.
- [8] Deng, Y., Wan, L. and Zhang, Y. (2011) Influence of Mg Content on Quench Sensitivity of Al-Zn-Mg-Cu Aluminum Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, **509**, 4636-4642. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.01.147>
- [9] Carroll, M.C., Gouma, P.I. and Mills, M.J. (2000) Effects of Zn Additions on the Grain Boundary Precipitation and Corrosion of Al-5083. *Scripta Materialia*, **42**, 335-340. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(99\)00349-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(99)00349-8)
- [10] 欧世声, 邓运来, 刘胜胆. 锌镁元素含量对新型 Al-Mg-Zn 合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(24): 135-139.
- [11] Maloney, S.K., Hono, K. and Polmear, I.J. (1999) The Chemistry of Precipitates in an Aged Al-2.1Zn-1.7Mg at.% Alloy. *Scripta Materialia*, **41**, 1031-1038. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(99\)00253-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(99)00253-5)
- [12] 屈华, 刘伟东, 张旭. Zn/Mg 比对 Al-Zn-Mg 合金时效析出顺序的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(6): 1766-1770.
- [13] Lin, Y.C., Zhang, J. and Chen, M. (2016) Evolution of Precipitates during Two-Stage Stress-Aging of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **684**, 177-187. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.05.161>
- [14] 侯泽北, 夏山林, 高建宇. 不同热处理工艺对 7003 铝合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(16): 249-252.
- [15] 张伟彬. 多元 Al 合金扩散系数研究及扩散行为模拟[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [16] 单际强, 侯丹丹, 张今捷. 6082 铝合金电化学腐蚀行为及晶间腐蚀机理研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(4): 353-361.
- [17] 刘贵立, 方戈亮. Al-Zn-Mg-Cu 超高强铝合金晶界偏聚与腐蚀机制研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(9): 1598-1601.