

# 最终形变热处理工艺对 Al-5.2Mg-3.1Zn 铝合金组织性能的影响

丁清伟, 张 迪, 侯胜利, 潘艳林, 张济山

(北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 深入研究了最终形变热处理工艺对 Al-5.2Mg-3.1Zn 铝合金组织性能的影响。通过维氏硬度测试研究了变形工艺对最终形变热处理最终时效工艺的影响。通过金相观察和透射电镜观察发现经过最终形变热处理的板材内部存留大量的位错结构和纤维状组织, 且其含量取决于板材的变形工艺。通过板材的力学性能和晶间腐蚀性能研究发现变形温度的提高会降低板材的强度, 但会提高板材的延伸率; 而变形量的作用则恰恰与之相反; 提高变形温度和变形量都有利于提高板材的抗晶间腐蚀性能。

**关键词:** 最终形变热处理; Al-Mg-Zn 合金; 力学性能; 晶间腐蚀

中图分类号: TG156.93

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)08-2661-06

形变热处理 (thermo-mechanical treatment, TMT) 是将塑性变形的形变强化机制和热处理时的相变强化机制相结合, 使成型工艺与所获得最终性能统一起来的一种工艺方法<sup>[1]</sup>。在铝合金当中, 形变热处理按析出相的作用又可细分为中间形变热处理 (intermediate thermo-mechanical treatment, ITMT) 和最终形变热处理 (final thermo-mechanical treatment, FTMT)<sup>[2,3]</sup>。关于 FTMT 对铝合金组织性能影响的研究<sup>[4,5]</sup>表明 FTMT 工艺能有效改善铝合金的强度并对其塑性、腐蚀性能、疲劳性能等都产生影响, 但是由于 FTMT 工艺参数的不同, 这些影响也不尽相同。FTMT 的工艺参数主要包括预时效工艺、变形工艺 (变形温度、变形速率及变形量) 以及终时效工艺。工艺参数的多元化使得这种复杂的形变热处理工艺在不同合金之间展现出不同的特性。

FTMT 工艺常用于时效强化型的铝合金当中, 如 2000 系和 7000 系铝合金<sup>[6]</sup>。5000 系的 Al-Mg 合金因为它不可热处理强化, 因而 FTMT 工艺对这类合金的影响不大。但是, 当 Al-Mg 合金中添加了一定量的 Zn 元素后, 大量的 T-Mg<sub>32</sub>(Al, Zn)<sub>49</sub> 相从合金基体中沉淀析出并使得该系合金变得可时效强化<sup>[7,8]</sup>。对于这种新型时效强化型 Al-Mg-Zn 合金而言, FTMT 工艺对其组织性能的影响尚不明朗。本工作针对 FTMT 中的变形工艺 (变形温度和变形量) 对时效强化型 Al-5.2Mg-

3.1Zn (质量分数, %) 铝合金组织性能的影响展开研究, 并研究在不同变形工艺下 FTMT 的最佳终时效工艺, 为获得具有最佳综合性能的新型 Al-Mg-Zn 合金板材的 FTMT 工艺参数提供依据。

## 1 实 验

本研究的 Al-5.2Mg-3.1Zn 铝合金板材的传统制备工艺 (conventional processing, CP) 为: 经过熔炼铸造 (铣面后铸锭厚、宽、高为 90 mm×100 mm×200 mm)、均匀化热处理 (430 °C/8 h+470 °C/24 h)、热轧 (热轧变形量 93%)、完全退火 (375 °C/75 min)、冷轧 (15%冷轧变形量)、固溶处理 (495 °C/50 min) 和 T6 时效处理 (90 °C/24 h+140 °C/25 h)。FTMT 采用热轧后固溶、预时效 (90 °C/24 h)、低温变形及最终时效处理 (140 °C/1~35 h), 低温变形工艺参数如表 1 所示。

表 1 低温变形工艺参数

Table 1 Parameters of low temperature deformation		
No.	Deformation temperature/°C	Deformation/%
FTMT1	140	15
FTMT2	140	30
FTMT3	140	50
FTMT4	180	15
FTMT5	180	30
FTMT6	180	50

收稿日期: 2018-11-30

基金项目: 国防科技创新特区项目; 现代交通金属材料与加工技术北京实验室资助; 中央高校基本科研业务费 (FRF-GF-17-A1)

作者简介: 丁清伟, 男, 1989 年生, 博士生, 北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083, E-mail: dingqingwei226@163.com

首先分别对 CP 态以及表 1 所述 6 种 FTMT 工艺处理后的板材最终时效工艺进行研究, 研究通过分析时效硬化曲线进行, 即对不同板材在终时效温度 (140 °C) 下保温不同时间的试样进行维氏硬度测试, 从而研究不同变形工艺对终时效工艺的影响。

对 CP 态以及 6 种 FTMT 工艺处理后的合金板材进行微观组织观察, 包括金相观察以分析晶粒组织以及透射电子显微镜 (transmission electron microscopy, TEM) 观察以分析晶内析出相情况。金相组织观察试样取自各板材的纵截面, 试样经磨制、抛光后于 45 °C 的 40% 磷酸溶液中侵蚀 2 min, 然后在 Zeiss MC80DX 金相显微镜 (optical microscopy, OM) 上观察试样的晶粒组织。TEM 试样取自板厚的 1/4 处, 试样经过双喷减薄后在 FEI Tecnai F20 上进行微观组织的观察分析。

对峰时效状态的合金板材进行力学性能与晶间腐蚀性能测试。力学性能测试在万能拉伸试验机上进行, 测试样品的标距为 25 mm、宽 6 mm。晶间腐蚀测试按照 GB T 7998 中关于 5000 系铝合金晶间腐蚀试验的方法进行, 腐蚀后的样品从横截面取样观察晶间腐蚀深度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 FTMT 变形工艺对最终时效的影响

从经过不同 FTMT 变形工艺处理的板材中取样分别进行 140 °C/1~35 h 终时效处理, 并分别进行维氏硬度测试, 测得各种变形工艺下板材在 140 °C 终时效的时效硬化曲线 (如图 1)。从图 1 可以看出, FTMT1~6 的时效硬化曲线基本一致: 维氏硬度在 0~3 h 的时候因为晶内析出相的析出与长大而逐渐升高; 在 3~5 h

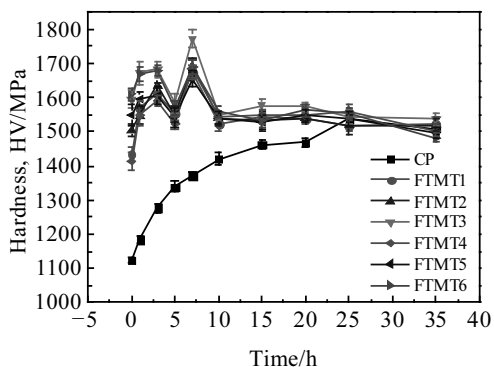


图 1 不同变形工艺板材终时效硬化曲线

Fig.1 Final aging hardening curves of sheets after different FTMT processes

时, 试样的维氏硬度开始下降, 这主要是由回复使试样内部位错密度降低导致的; 而在 5~7 h 时, 试样的维氏硬度继续升高并在 7 h 时达到峰值, 这说明在此时回复和析出强化匹配达到了一个最佳的状态; 而在 7~10 h 时, 试样的硬度急剧降低并达到一个稳定的值, 此时的试样在短时间内达到过时效状态, 而回复所引起的位错密度的变化也达到一个相对稳定的状态。总之, 变形工艺对 FTMT 终时效工艺并无太大的影响, 而板材在 FTMT 最终时效过程中硬度的变化取决于析出强化效应和位错强化效应的相互影响和相互作用。此外, 对比传统工艺下的时效硬化曲线可以看出板材经过 FTMT 处理后峰时效大大提前了, 且峰时效所达到的硬度也提高了很多。

### 2.2 FTMT 变形工艺对峰时效态板材微观组织的影响

首先分别从 CP 态、FTMT1~6 峰时效态板材中取样观察各板材纵截面金相组织 (如图 2 所示)。从图中所示结果来看, 板材经过 FTMT 工艺处理后组织被拉长, 且在组织中保留了大量的纤维状组织, 而这种纤维状组织的数量与变形工艺有关: 变形温度越高, 板材在变形时更容易发生动态回复和动态再结晶, 从而微观组织中保留的纤维状组织减少, 常规晶粒组织增多; 而随着变形量的增加, 板材的微观组织中保留的纤维组织含量也提高。

为进一步研究 FTMT 板材的微观组织特征, 分别从板材中取样进行 TEM 组织观察分析。从图 3 所示的结果可以看出, 经过 FTMT 工艺处理后, 板材微观组织中存在大量的位错结构。此外, 在图 3 中还能发现大量弥散分布的析出相, 在之前的研究中已经确定这些弥散的析出相为 T-Mg<sub>32</sub>(Al, Zn)<sub>49</sub> 相<sup>[7,8]</sup>。这些 T 相与基体共格, 因此具有良好的共格强化效应<sup>[8,9]</sup>, 这也正是 Al-Mg-Zn 合金可时效强化的原因所在。

### 2.3 FTMT 变形工艺对峰时效态板材力学性能的影响

从 CP 态、FTMT1~6 峰时效态板材中分别取样进行力学性能测试, 测得各板材的工程应力-工程应变曲线如图 4 所示。从图 4 所示的结果可以看出, 板材经过 FTMT 处理后强度得到了很明显的提升。这主要与 FTMT 处理后板材微观组织中引入的大量位错结构有关 (如图 2、图 3 所示)。

为了更直观地分析变形工艺 (变形温度和变形量) 对板材力学性能的影响, 分别对各工艺状态下板材的抗拉强度、屈服强度以及断后伸长率进行对比分析, 分析结果如图 5 所示。从图 5 所示的结果可以看出, 不论板材在哪种温度下变形, 随着变形量的增加, 板

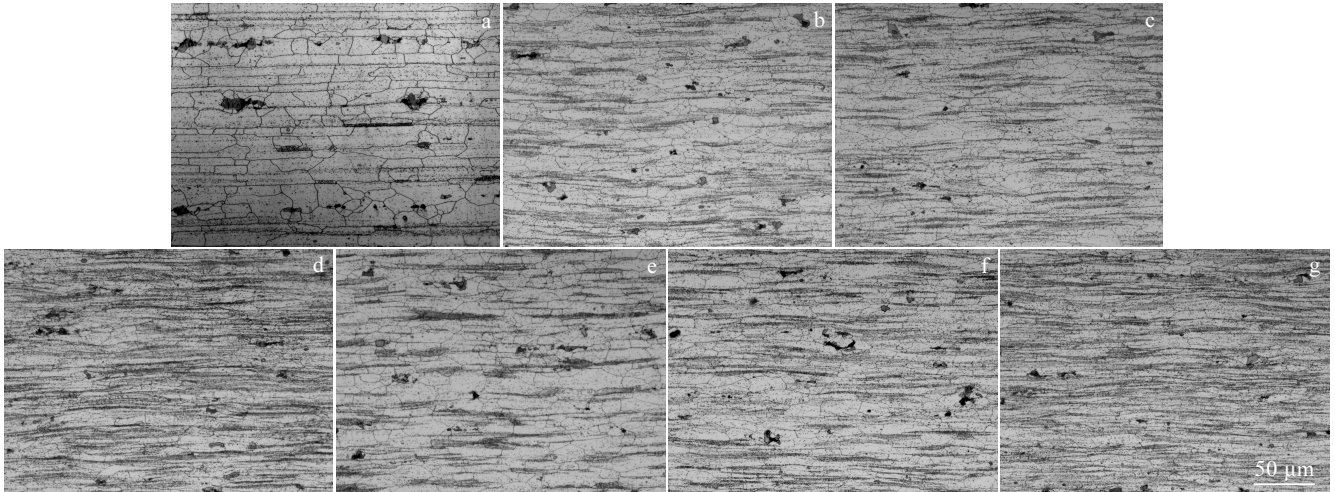


图 2 不同 T6 态板材金相组织

Fig.2 Metallographic structures of different T6 sheets: (a) CP, (b) FTMT1, (c) FTMT2, (d) FTMT3, (e) FTMT4, (f) FTMT5, and (g) FTMT6

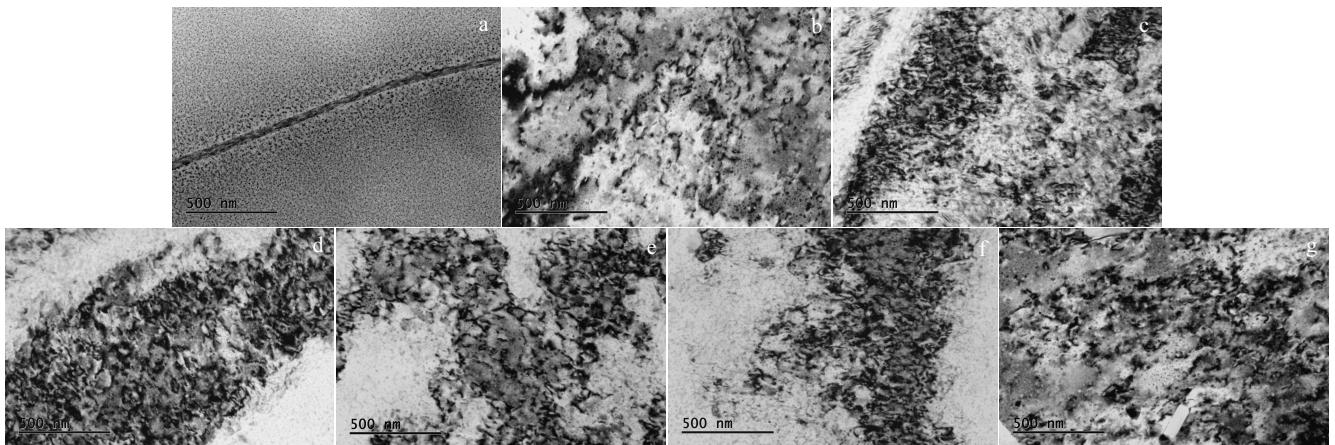


图 3 不同 T6 态板材 TEM 组织

Fig.3 TEM images of different T6 sheets: (a) CP, (b) FTMT1, (c) FTMT2, (d) FTMT3, (e) FTMT4, (f) FTMT5, and (g) FTMT6

材的强度提高，延伸率降低。值得注意的是板材在 180 °C 变形时，当变形量从 15% 增加到 30% 的时候，板材的屈服强度反而降低了，但是抗拉强度依然是升高的。此外，在同等变形量的情况下，随着变形温度的提高，板材的延伸率增加，强度降低。但是在变形量为 15% 的时候，随着变形温度的提高，板材的强度和延伸率均得到提升。

对铝合金进行 FTMT 工艺处理能在合金组织中引入大量的位错，从而使合金组织中出现大量位错结构。位错强化机制对合金强度的影响与合金组织中位错密度的大小有直接的关系<sup>[10,11]</sup>：

$$\sigma_{dis} = M\alpha Gb\rho^{1/2} \tag{1}$$

式中， $\sigma_{dis}$  为位错强化效果， $M$ 、 $\alpha$  是常数， $G$ 、 $b$  和  $\rho$  分别代表合金的剪切模量、柏氏矢量和位错密度。从公式 (1) 可以看出，位错强化效果与位错密度成正比，也就是说合金组织中位错密度越高，强度则越高。在图 2 中我们观察到随着变形温度的降低、变形量的增加，合金板材组织中的纤维状组织含量增加，而这种纤维状组织是由位错堆积、缠结形成的。也就是说纤维状组织含量越高，合金板材中位错密度越高，那么相应的合金强度则越高。这与图 5 所示的结果基本一致，而其中板材强度在变形量为 15% 的时候与这一规律相

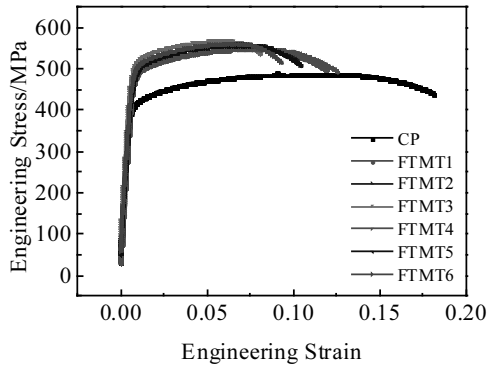


图 4 不同工艺板材峰时效态工程应力-工程应变曲线

Fig.4 Engineering stress-engineering strain curves of T6 sheets after different processes

性的主要原因是在 Al-Mg-Zn 合金中存在显著的析出强化作用。而在 FTMT 工艺下，析出强化与位错强化相互影响，且这种影响会随着 FTMT 工艺的变化而发生变化<sup>[12,13]</sup>。

### 2.4 FTMT 变形工艺对峰时效态板材晶间腐蚀性能的影响

从不同变形工艺状态下的 T6 板材中取样分别进行晶间腐蚀实验，腐蚀后从横截面取样观察晶间腐蚀后各板材试样的金相组织（如图 6 所示）。从图中所示结果来看，板材经过 FTMT 处理后晶间腐蚀深度明显降低，即抗晶间腐蚀性能明显提高。

为研究 FTMT 变形工艺对板材抗晶间腐蚀性能的影响，分别统计 FTMT1~6 板材的晶间腐蚀深度，统计结果如图 7 所示。从图中可以看出，随着变形量的

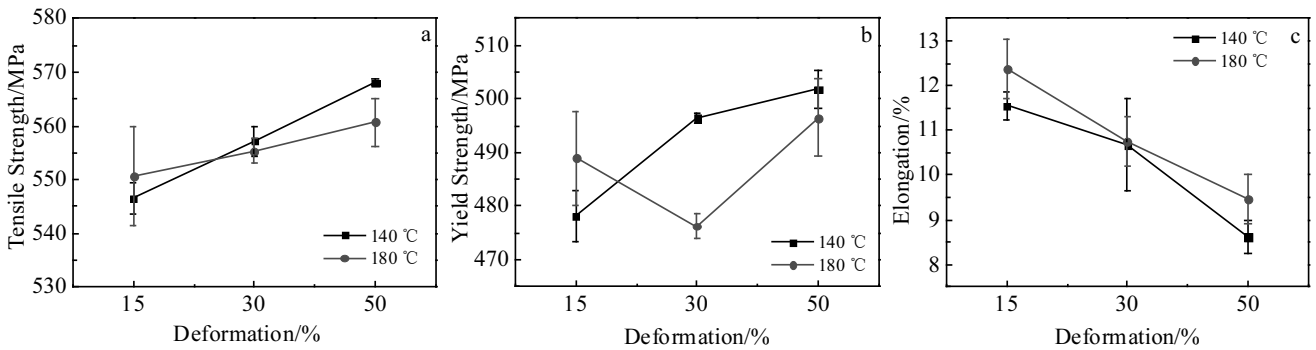


图 5 FTMT 变形工艺对板材抗拉强度、屈服强度和断后伸长率的影响

Fig.5 Effect of deformation process on the tensile strength (a), yield strength (b) and elongation (c)

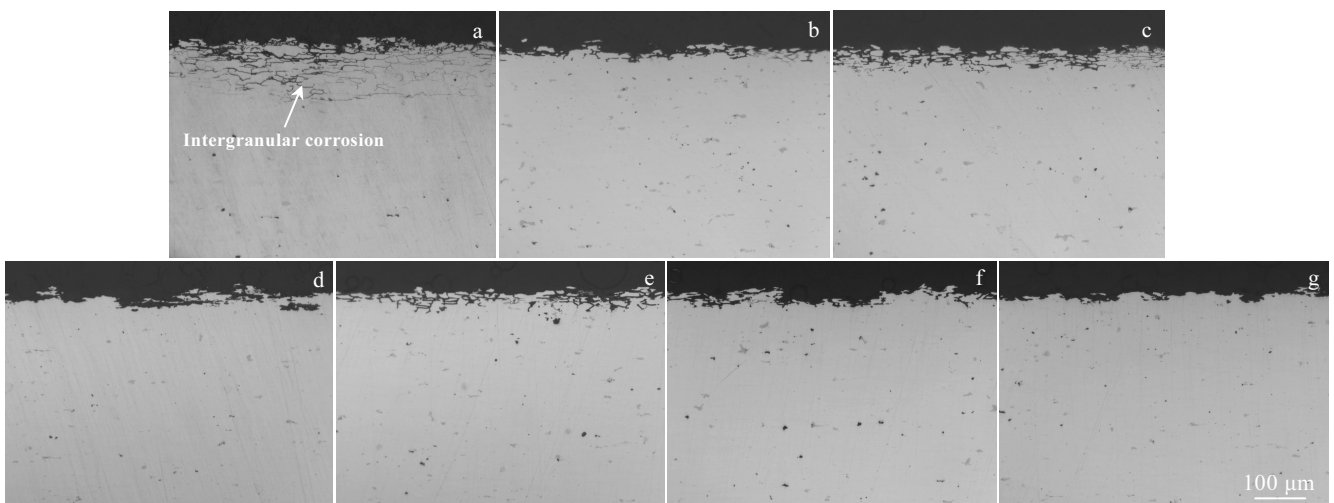


图 6 不同 T6 态板材晶间腐蚀金相组织

Fig.6 Metallographic structures of different T6 sheets after intergranular corrosion: (a) CP, (b) FTMT1, (c) FTMT2, (d) FTMT3, (e) FTMT4, (f) FTMT5, and (g) FTMT6



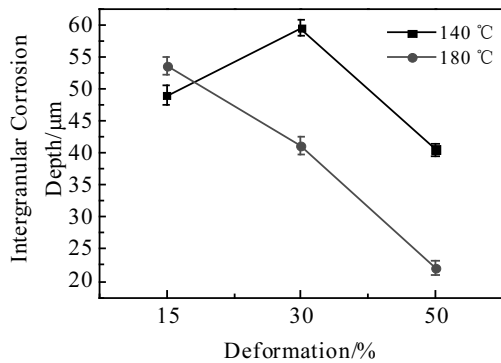


图 7 变形工艺对 T6 态板材晶间腐蚀深度的影响

Fig.7 Effect of deformation process on the intergranular corrosion depth

增加, 峰时效态板材的晶间腐蚀深度降低, 也就是抗晶间腐蚀性能提高; 而随着变形温度的提高, 板材的晶间腐蚀深度有下降的趋势, 尤其是在 30% 和 50% 变形量的时候, 变形温度的提高明显地改善了板材的抗晶间腐蚀性能。

铝合金的晶间腐蚀与合金微观组织中晶界析出相的特征以及晶界特征有关, 晶界析出相分布越断续, 则合金的抗晶间腐蚀性能越好<sup>[14,15]</sup>。当 Al-Mg-Zn 合金经过 FTMT 工艺处理后, 在最终时效时, 由于变形引入大量的位错, 一方面位错上的 T 相会优先长大; 另一方面会促进晶界析出相的球化和长大。这些都会使晶界析出相的连续性变差, 从而使合金的抗晶间腐蚀性能提高。

### 3 结 论

1) FTMT 能有效加速合金板材时效硬化进程, 大大缩短峰时效所需的时间。而 FTMT 变形温度和变形量对 FTMT 工艺的最终时效基本没有影响, Al-5.2Mg-3.1Zn 铝合金 FTMT 终时效的峰时效工艺为 140 °C/7 h。

2) Al-5.2Mg-3.1Zn 铝合金经过 FTMT 处理后微观组织中保留了大量的位错结构和纤维状组织。而降低 FTMT 变形温度或提高变形量都能增加板材组织中纤维状组织的含量, 从而使板材的强度和抗晶间腐蚀性能都得到明显提高。

3) 变形温度的提高会降低 FTMT 板材的强度, 但会提高板材的延伸率; 而变形量的提高则会提高板材的强度而降低延伸率。

4) 提高变形温度和变形量都有利于提高 FTMT 板材的抗晶间腐蚀性能。

### 参考文献 References

- [1] Wang Zhutang(王祝堂), Tian Rongzhang(田荣璋). *Aluminium Alloy and Its Processing Manual*(铝合金及其加工手册)[M]. Changsha: Central South University Press, 2000: 103
- [2] Huo Wangtu(霍望图), Guo Mingxing(郭明星), Hou Longgang(侯陇刚) *et al. Journal of Materials Science and Engineering* (材料科学与工程学报)[J], 2014, 32(2): 284
- [3] Di Russo E, Conserva M, Buratti M *et al. Material Science and Engineering*[J], 1974, 14(1): 23
- [4] Di Russo E, Conserva M, Gatto F *et al. Metallurgical Transactions*[J], 1973, 4(4): 1133
- [5] Huang Y J, Chen Z G, Zheng Z Q. *Scripta Materialia*[J], 2011, 64(5): 382
- [6] Wan Rutao(万茹涛). *Science & Technology Information*(科技资讯)[J], 2018(2): 103
- [7] Bigot A, Auger P, Chambreland S *et al. Microscopy Microanalysis Microstructures*[J], 1997, 8(2): 103
- [8] Hou Shengli, Liu Pingping, Zhang Di *et al. Journal of Materials Science*[J], 2018, 53(5): 3846
- [9] Yang X B, Chen J H, Liu J Z *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 610: 69
- [10] Kamikawa N, Huang X X, Tsuji N *et al. Acta Materialia*[J], 2009, 57(14): 4198
- [11] Gazder A A, Cao W Q, Davies C H J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 497(1-2): 341
- [12] Fei Yue(费 玥), Jin Man(金 曼), Li Jing(李 晶) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2006, 31(5): 68
- [13] Sang Xiaoming, Wang Pengcheng, Ai Liqun *et al. Advanced Materials Research*[J], 2011, 284-286: 1621
- [14] Zuo Jinrong, Hou Longgang, Shi Jintao *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 708: 1131
- [15] Li Chen, Pan Qinglin, Shi Yunjia *et al. Materials & Design* [J], 2014, 55: 551

## Effect of Final Thermo-Mechanical Treatment on the Microstructure and Property of Al-5.2Mg-3.1Zn Aluminum Alloy

Ding Qingwei, Zhang Di, Hou Shengli, Pan Yanlin, Zhang Jishan

(State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The effect of final thermo-mechanical treatment on the microstructure and property of Al-5.2Mg-3.1Zn (mass fraction, %) aluminum alloy was studied. The effect of deformation parameter on the final aging treatment was studied by Vickers hardness tests. Observations under optical microscopy and transmission electron microscopy show that there are lots of dislocation structure and fibrous structure in the microstructure, and their volume fractions depend on the deformation parameter. The tensile test reveals that the increase of deformation temperature increases the strength of sheets, but decreases the elongation. However, the amount of deformation has the completely opposite effect on the tensile property. The increase of deformation temperature and deformation amount both increase the intergranular corrosion resistance of sheets.

**Key words:** final thermo-mechanical treatment; Al-Mg-Zn aluminum alloy; mechanical property; intergranular corrosion

---

Corresponding author: Zhang Di, Ph. D., Associate Professor, State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-82375844, E-mail: zhangdi@skl.ustb.edu.cn