

# 固溶温度对 Al-Zn-Mg 合金显微组织及力学性能的影响

郭兆东<sup>1</sup>, 宋骥羽<sup>1</sup>, 刘文异<sup>1</sup>, 钟雨龙<sup>1</sup>, 孙明岩<sup>1</sup>, 索忠源<sup>2</sup>

(1. 吉林江机特种工业有限公司计量测试中心, 吉林吉林 132021; 2. 吉林化工学院机电工程学院, 吉林吉林 132022)

**摘要:** 采用光学显微镜、扫描电镜、能谱分析、布氏硬度、室温拉伸测试等手段分析了不同固溶温度对Al-Zn-Mg铸态铝合金显微组织及力学性能的影响规律。结果表明: 随着固溶温度由480 ℃逐渐增大到510 ℃过程中, Al-Zn-Mg铸造铝合金第二相MgZn<sub>2</sub>由不完全固溶逐渐转变为完全固溶, 到535 ℃时, 晶界处出现复熔球; 基体α相在整个固溶温度区间未发生明显变化。Al-Zn-Mg铸造铝合金的最佳固溶时效工艺为: 固溶温度495~500 ℃, 保温时间6 h, 时效温度为177~180 ℃, 保温时间12 h。抗拉强度达到318~320 MPa, 伸长率为3.3%~3.5%, 布氏硬度达到HBW 104~108, 合金具有较好的综合力学性能。

**关键词:** Al-Zn-Mg铝合金; 固溶温度; 显微组织; 力学性能

Al-Zn-Mg系铝合金, 因其具有较高的比刚度、比强度、良好的抗腐蚀性能以及优秀的成形性能, 作为重要的结构材料应用于航空航天及军工等领域<sup>[1-3]</sup>。该系合金中Zn和Mg元素的加入使得合金体系进一步加强了时效强化, 同时又降低了其热加工性能<sup>[4-6]</sup>。本项目结合该理论及某军工型号产品性能要求而自主研发了新型Al-Zn-Mg系铸造铝合金。该产品毛坯外形尺寸为1 040 mm × 105 mm × 80 mm, 扭曲变形小于0.1 mm。铸造产品经过固溶处理和人工时效后, 产品既容易切削加工, 又保证铸件有足够的强度、硬度。该产品零件加工后持久不变形, 具有耐腐蚀等优异性能, 适合铸造大型零件。

## 1 试验材料及方法

本研究选用的材料为自主研发的Al-Zn-Mg系铸造铝合金, 具体成分见表1。合金长架经过钢型浇注后, 经过480 ℃、495 ℃、500 ℃、510 ℃、535 ℃保温6 h的固溶, 并迅速在65 ℃的热水中冷却, 获得过饱和固溶体, 再经过177~180 ℃ × 12 h时效处理, 在长架铸件制品上分前中后三个不同位置切取试样。试样磨光并抛光后, 采用Keller试剂(体积配比: HF:HCl:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=2:3:5:190)进行腐蚀处理。采用PTI-2000光学显微镜及配有能谱(EDS)分析的JSM-6490扫描电镜对不同固溶温度及人工时效合金的微观组织进行观察, 并对典型的析出相进行EDS分析。试样按照GB/T 16865—1997标准规定的尺寸进行加工, 如图1所示。抗拉强度采用DNS100型电子万能试验机, 以5 mm/min的试验速度进行测试拉伸, 利用扫描电镜观察其断口形貌。分别取不同固溶温度下的试样, 用德国ZwickHB3000布氏硬度计进行测试, 每组分别测试5个试样, 然后取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 固溶温度对合金显微形貌的影响

图2为铸态Al-Zn-Mg铝合金经480~535 ℃ × 6 h固溶处理+177~180 ℃ × 12 h时效后的显微组织。从图2可以看出, 经固溶时效处理后, 合金组织均由α-Al相+第

作者简介:

郭兆东(1971-), 男, 工程师, 从事金属材料组织、性能检测工作。电话: 13943293597, E-mail: 1723010122@qq.com

通讯作者:

索忠源, 男, 副教授。电话: 15843280391, E-mail: zhy\_suo@126.com

中图分类号: TG146.2<sup>+1</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)11-1158-04

收稿日期:

2020-07-03 收到初稿,  
2020-08-06 收到修订稿。

二相组成，且 $\alpha$ 相组织尺寸与其固溶温度的变化关系不大。从图2a的480℃固溶时效处理后的显微组织可见，因固溶温度相对较低，第二相未完全溶入 $\alpha$ 相中，在晶界处富集，如箭头所示。因此，合金的固溶效果相对较差，不能起到强化基体的作用，可能会造成材料脆化。随着固溶温度的不断升高，当温度达到495~510℃时，合金组织晶界处的第二相析出含量明显减少， $\alpha$ -Al基体中的溶质饱和度随之增加，经时效处理后，在晶内及晶界处沉淀析出细小第二相，如图2b、c箭头所示。为了进一步了解合金的微观组织形貌，结合图2b、c结果，对500℃×6h固溶+177~180℃×12h时效处理下的试样进行了扫描电镜观察及EDS分析，结果如图3所示。通过能谱分析可知，晶界处短杆状析出相主要是 $MgZn_2$ 相。该相的沉淀强化对于阻碍位错运动起到重要的促进作用<sup>[7-8]</sup>。当固溶温度升高至535℃时，晶界处开始出现明显的复熔球及晶界粗化现象，主要由于固溶温度偏高，导致低熔点元素（Zn）在晶界处发生了二次熔化。该种现象的出现，导致合金在外力作用下沿晶界开裂，力学

性能下降。由此发现，随着固溶温度从480℃升高至535℃， $\alpha$ -Al基体相的过饱和度逐渐增大，原铸态第二相颗粒逐渐溶解至完全溶解合金基体中，当温度达到495~510℃时，固溶处理效果良好，时效时所析出的颗粒状第二相 $MgZn_2$ 相，如图3a所示，与文献[9-10]的结论一致。固溶温度达到535℃后，由于复熔球的出现以及晶界粗化，造成力学性能显著下降。因此，第二

表1 Al-Zn-Mg系铸造铝合金化学成分  
Table 1 Chemical composition of Al-Zn-Mg cast aluminum alloy

Zn	Mg	Si+Ti+Mn	Fe+Cu	Al	$w_B / \%$
3.5	2.1	<1.3	<1	余量	

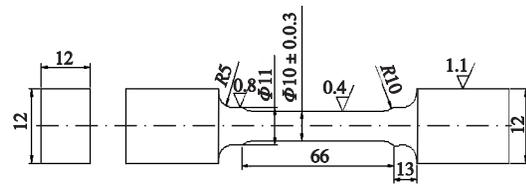
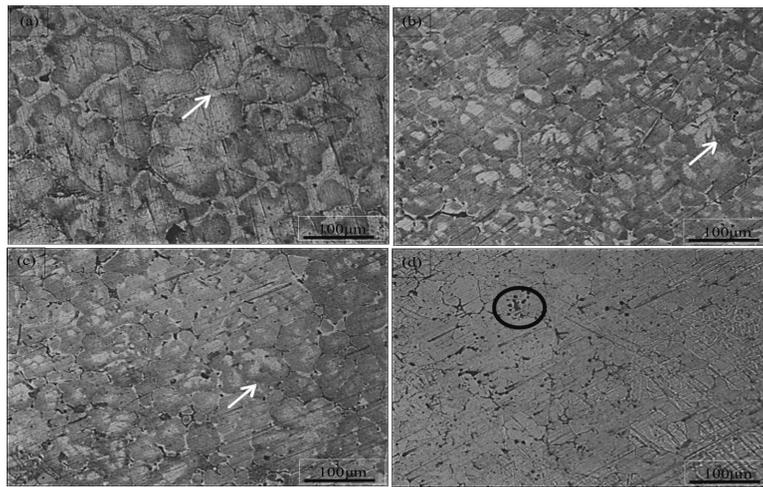


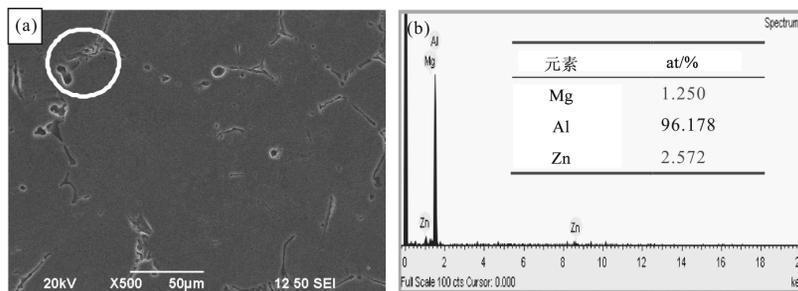
图1 拉伸试样标准尺寸  
Fig. 1 Standard size of tensile specimen



(a) 480℃; (b) 495℃; (c) 510℃; (d) 535℃

图2 Al-Zn-Mg合金经不同温度固溶及12h时效处理后的显微组织

Fig. 2 Microstructure of Al-Zn-Mg alloy after solution treatment at different temperatures and aging treatment for 12 h



(a) SEM形貌

(b) 图a中圈定部位的EDS分析

图3 Al-Zn-Mg合金经500℃固溶及时效后晶界的显微形貌及EDS分析

Fig. 3 SEM image and EDS analysis of grain boundaries for Al-Zn-Mg alloy after solution at 500℃ and aging

相的析出形态、数量和分布状态对铸态Al-Zn-Mg铝合金的强度和硬度有着重要的影响。

## 2.2 固溶温度对合金力学性能的影响

图4为铸态Al-Zn-Mg铝合金在不同固溶温度下的布氏硬度变化曲线。从曲线上可以看出,随着固溶温度的升高(480~535℃),合金的硬度先升高随后略有降低。当固溶温度为500℃时,其硬度值最大为HBW 108。当温度超过达到535℃时,硬度为HBW 101。480℃时,固溶不完全,此时硬度值相对较低为HBW 90,从而导致时效时G.P区的析出第二相数量和密度较低,未能达到较好的强化效果。固溶温度高于500℃后,MgZn<sub>2</sub>相形态及分布发生改变,特别是535℃时出现了复熔球和晶界宽化,弱化了强化效果,合金整个基体组织的硬度略有降低。

为了进一步研究该工艺的合理性,对其拉伸性能

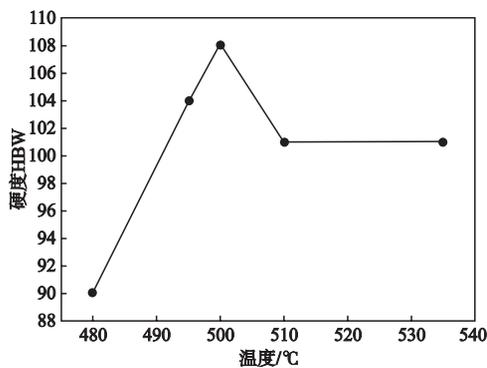


图4 不同固溶温度对Al-Zn-Mg铝合金硬度的影响  
Fig. 4 Effect of different solution temperatures on hardness of Al-Zn-Mg aluminum alloy

进行了测试,发现固溶温度变化对拉伸及断后伸长率的影响较大,如图5所示。当合金固溶温度从480℃逐步增加到535℃时,Al-Zn-Mg铝合金的抗拉强度从236 MPa逐渐增大到328 MPa,然后再减小到295 MPa。断后伸长率由480℃时的1%,先增加到500℃时的3.5%,而后快速降低到535℃的1.5%。当固溶温度为495~500℃时,抗拉强度及断后伸长率均较高,综合性能较好。该产品性能要求高于GB/T 1173—2013中的ZL101A合金的性能指标(抗拉强度≥275 MPa、断后伸长率≥2%、布氏硬度≥HBW 80)。综合上述分析,该产品的最佳固溶处理工艺为:495~500℃×6 h固溶+177~180℃×12 h时效。

图6为Al-Zn-Mg铝合金不同固溶温度下拉伸断口的SEM形貌。从图6a可以看出,当固溶温度为480℃时,该合金的断口为完全的解理断裂,且断口内出现了较大的断裂裂纹,与图5较低的断后伸长率相对应。当固溶温度为495~510℃时,Al-Zn-Mg铝合金的拉伸断口

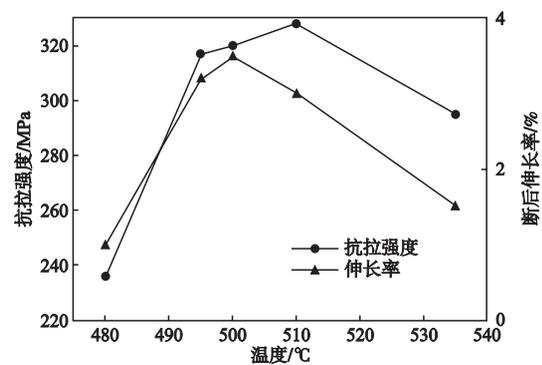
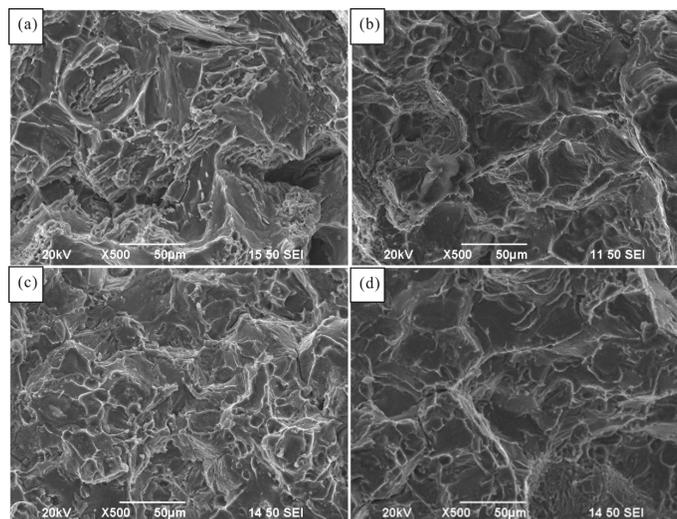


图5 不同固溶温度对Al-Zn-Mg铝合金抗拉强度及断后伸长率的影响  
Fig. 5 Effect of different solution temperatures on tensile strength and elongation after fracture of Al-Zn-Mg aluminum alloy



(a) 480℃; (b) 495℃; (c) 510℃; (d) 535℃

图6 Al-Zn-Mg铝合金不同固溶温度下拉伸断口的SEM形貌

Fig. 6 SEM morphology of tensile fracture of Al-Zn-Mg aluminum alloy at different solution temperatures

由大小不等的韧窝和较多的撕裂棱和解理台阶组成,表现出较为明显的韧性断裂和脆性断裂的混合断裂特征,该混合断裂以脆性断裂为主、韧性断裂为辅。温度升高到535 ℃时,韧窝形貌消失,解理和类解理占据主要形貌特征,合金表现出了完全的脆性断裂。

### 3 结论

(1) 铸态Al-Zn-Mg铝合金在480~535 ℃温度下的固溶过程中,合金基体中的第二相 $MgZn_2$ 由欠固溶逐渐转变为完全固溶,到535 ℃时,晶界处出现复熔球。

(2) 当固溶温度达到495~500 ℃时,合金抗拉强度达到318~320 MPa,伸长率为3.3%~3.5%,布氏硬度达到HBW 104~108,合金具有较好的综合力学性能。

(3) 综合考虑客户要求和企业生产过程,该产品的最佳固溶处理工艺为:495~500 ℃×6 h固溶+177~180 ℃×12 h时效。

#### 参考文献:

- [1] 刘华娜, 杨光昱, 齐元昊, 等. Sc对Al-Zn-Mg-Cu系铸造铝合金组织与性能的影响 [J]. 铸造, 2013, 62 (1): 4-9.
- [2] 王孝国, 李秋书, 宁小丹, 等. Al-Zn-Mg 铝合金成分优化设计及性能仿真 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (11): 2477-2480.
- [3] 邢清源, 杨守杰, 李晓玲, 等. 铸态Sc、Er元素在Al-Zn-Mg合金中的作用机理研究 [J]. 铸造, 2019, 68 (2): 144-151.
- [4] 彭速中. 高强铝合金7B04强韧化固溶时效热处理工艺的研究 [J]. 铝加工, 2004 (3): 49-54.
- [5] JIN N, ZHANG H, HAN Y, et al. Hot deformation behavior of 7150 aluminum alloy during compression at elevated temperature [J]. Materials characterization, 2009, 60: 530-536.
- [6] ZHAO G W, DING C, GU X S. Solidification path calculations of Al-Zn-Mg alloys in Al-rich corner [J]. China Foundry, 2017, 14 (5): 443-448.
- [7] 孙燕, 任洁, 张艳姝. 固溶处理及双级时效对7050铝合金微观组织和硬度的影响 [J]. 金属热处理, 2016, 41 (3): 25-31.
- [8] 王江涛, 谭文胜, 周东帅, 等. 固溶时效对7075铝合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2017, 42 (12): 148-154.
- [9] DAVIES C H J. Ageing kinetics of a silicon carbide reinforced Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Acta Metallurgy Materials, 1994, 42 (1): 309-318.
- [10] UCHIDA H, YOSHIDA H. Heat treatment of aluminum alloys [J]. Sumitomo Light Metal Technical Reports, 1997, 38: 177-180.

---

## Effect of Solution Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Zn-Mg Alloys

GUO Zhao-dong<sup>1</sup>, SONG Qi-yu<sup>1</sup>, LIU Wen-yi<sup>1</sup>, ZHONG Yu-long<sup>1</sup>, SUN Ming-yan<sup>1</sup>, SUO Zhong-yuan<sup>2</sup>

(1. Measuring and Testing Center, Jilin Jiang Ji Special Industrial Co., Ltd., Jilin 132021, Jilin, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, Jilin, China)

#### Abstract:

The effects of different solution temperatures on the microstructures and mechanical properties of Al-Zn-Mg as-cast aluminum alloy were studied by means of optical microscopy, scanning electron microscopy, energy spectrum analysis, Brinell hardness and tensile test at room temperature. The results show that the second phase  $MgZn_2$  of Al-Zn-Mg cast aluminum alloy is changed from under-solution to complete solution with increasing the solution temperature from 480 ℃ to 510 ℃. The remelting spheres appear at the grain boundary at 535 ℃. The matrix  $\alpha$  phase does not change obviously in the whole solution temperature range. The optimum heat treatment process for the Al-Zn-Mg cast aluminum alloy is solution at 495-500 ℃ for 6 h followed by aging at 177-180 ℃ for 12 h. Thus, the tensile strength, elongation and Brinell hardness can reach 318-320 MPa, 3.3%-3.5%, and HBW 104-108, respectively, exhibiting the good combination of the superior mechanical properties.

#### Key words:

Al-Zn-Mg aluminum alloy; solution temperature; microstructure; mechanical properties