

文章编号:1673-9981(2018)03-0191-05

微量 Cu 元素对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织性能的影响*

杜勋贵^{1,2}, 尤俊华¹, 曲迎东¹, 周楠², 王顺成²

1. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2 广东省材料与加工研究所, 广东 广州 510650

摘要:采用光学显微镜、扫描电镜、X射线衍射仪和拉伸试验机,研究了微量 Cu 元素对 Al-Zn-Mg-Cu 合金显微组织与力学性能的影响。结果表明:Al-Zn-Mg-Cu 合金铸态组织由 α -Al 枝晶和晶间非平衡共晶相组成,经均匀化处理和挤压后,共晶相弥散分布在铝基体上。随着 Cu 含量的增加,Al-Zn-Mg-Cu 合金挤压材的抗拉强度逐渐升高,伸长率先增后减。当 Cu 质量分数为 0.4% 时,伸长率达到最大值。当 Cu 含量为 0.6% 时,合金挤压板材的抗拉强度为 439.4MPa,伸长率为 15.9%,与未添加 Cu 元素的 Al-Zn-Mg 合金挤压材相比,其抗拉强度和伸长率分别提高了 13.5% 和 9.7%。

关键词:Al-Zn-Mg 合金;挤压;固溶;时效

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

铝合金具有密度小、耐腐蚀、易回收利用等优点,在交通运输工具上的应用日益扩大。采用高强度铝合金制造大型结构件是实现交通运输工具轻量化的有效措施^[1-3]。Al-Zn-Mg 合金是可热处理强化的中高强铝合金,具有优良的焊接性能、抗弹性能和较好的挤压加工性能,代表性牌号有 7003 和 7005 铝合金^[4]。现有牌号的 Al-Zn-Mg 合金的强度偏低,难以满足交通运输工具大型结构件对铝合金强度的要求。Al-Zn-Mg-Cu 合金属于超高强度铝合金,代表性牌号有 7050,7075 和 7085 铝合金,但现有牌号的 Al-Zn-Mg-Cu 合金由于 Zn, Mg 含量较高,特别是加入了大量 Cu,虽然提高了合金的强度和抗应力腐蚀性能,但也严重损害了合金的焊接性能,无法满足大型结构件的焊接工艺要求^[5]。为了满足交通运输工具大型结构件对高强可焊铝合金的需求,本文在 Al-Zn-Mg 合金的基础上添加微量 Cu 元素,研究了微量 Cu 元素对 Al-Zn-Mg-Cu 合金显微组织与力学性能的影响。

1 试验材料与方法

试验材料为 Al-Zn-Mg 合金,该合金是以质量分数 99.85% 铝锭、99.95% 镁锭、99.9% 锌锭经熔炼而成。经 SPECTROMAX 光电直读光谱仪测定,该合金的元素质量分数为:Zn 6.01%, Mg 1.12%, Si 0.075%, Fe 0.089%, 余量为 Al。

实验设备为 200 kg 熔铝炉和半连续铸造机。在熔铝炉内于 760 °C 加热熔化 Al-Zn-Mg 合金,分别添加 0, 1%, 2% 和 3% 的 Al-20Cu 合金(对应 Al-Zn-Mg 合金中的 Cu 质量分数分别为 0, 0.2%, 0.4%, 0.6%),再加入质量分数 0.2% 的 Al-5Ti-1B 合金杆进行晶粒细化处理,经精炼除气除渣和静置保温 30 min 后,将合金液半连续铸造成直径 100 mm 的 Al-Zn-Mg-Cu 合金圆棒。

在 25 kW 箱式电阻炉内将 Al-Zn-Mg-Cu 合金圆棒加热至 420 °C 保温 2 h,再升温至 460 °C 继续保温 24 h 进行均匀化处理,然后用水雾强制冷至室温。将合金圆棒表面去皮后加热到 420 °C,在 630 t 挤压机上挤压成宽 60 mm、厚 6 mm 的 Al-Zn-Mg-

收稿日期:2018-03-12

* 基金项目:中山市科技计划项目资助(2016A1001,2017C1007);佛山市科技创新项目资助(2016AG101761)

作者简介:杜勋贵(1992-),男,山东临沂人,硕士研究生。

Cu 合金板材, 挤压模具温度为 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 挤压比为 $20:1$, 挤压速率为 1.2 m/min . 将合金挤压板材在 $470\text{ }^{\circ}\text{C}$ 固溶处理 2 h , 水淬后, 在 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 人工时效 24 h , 最后随炉冷却到室温.

在 Al-Zn-Mg-Cu 合金圆棒和挤压板材上分别取样, 试样经磨制、抛光后, 用体积分数 $2.5\% \text{HNO}_3 + 1.5\% \text{HCl} + 1\% \text{HF}$ 的混合酸水溶液腐蚀, 用 LEICA-DMI3000M 金相显微镜进行观察. 分别用 JEOLJXA-8100 型扫描电镜电子探针和 DMAX-RC 型 X-射线衍射仪对挤压板材试样的物相进行分析. 在固溶时效处理后的合金挤压板材上沿挤压方向取样, 并加工成拉伸试样, 在 DNS200 型电子拉伸试验机上进行室温拉伸试验, 拉伸速率 2 mm/min , 拉伸试样的形状尺寸如图 1 所示.

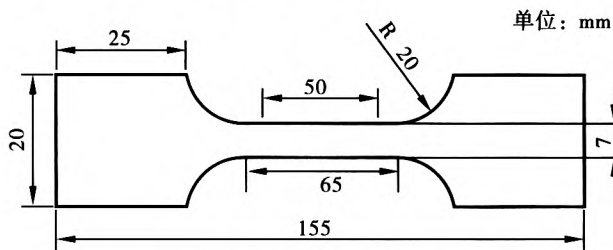


图 1 拉伸试样的形状尺寸

Fig. 1 Shape and size of tensile test sample

2 实验结果与分析

2.1 显微组织

图 2 为 Cu 含量不同的 Al-Zn-Mg-Cu 合金圆棒的显微组织. 从图 2 可看到, Al-Zn-Mg-Cu 合金圆棒的显微组织主要由 α -Al 枝晶晶粒和晶间共晶相组成. 图 2(a) 显示, 未加 Cu 元素时, Al-Zn-Mg 合金圆棒的 α -Al 枝晶尺寸较为粗大. 这是由于晶间共晶组织的数量相对较少, 导致晶界较为细小且不连续. 从图 2(a)~2(d) 可看到, 随着 Cu 含量的增加, Al-Zn-Mg-Cu 合金的 α -Al 枝晶尺寸略有减小. 这是由于晶间共晶组织的数量增多, 导致晶间变宽并形成连续网状. Al-Zn-Mg-Cu 合金半连续铸造的凝固过程属于非平衡凝固过程, 当合金液冷却到液相线温度以下时, α -Al 晶核首先从合金液中析出, 然后 Al 原子不断向 α -Al 晶核表面沉积, α -Al 晶核开始以树枝状方式不断凝固并长大成 α -Al 枝晶晶粒. 随着合金液的持续凝固, 液相成分发生变化, 固液界面前沿的溶质元素 Zn, Mg, Cu 不断向残留液相扩散富集, 并在液相和固相内造成成分梯度, 引起扩散现象和溶质再分配. 当温度降低到合金的共晶转变温度时, α -Al

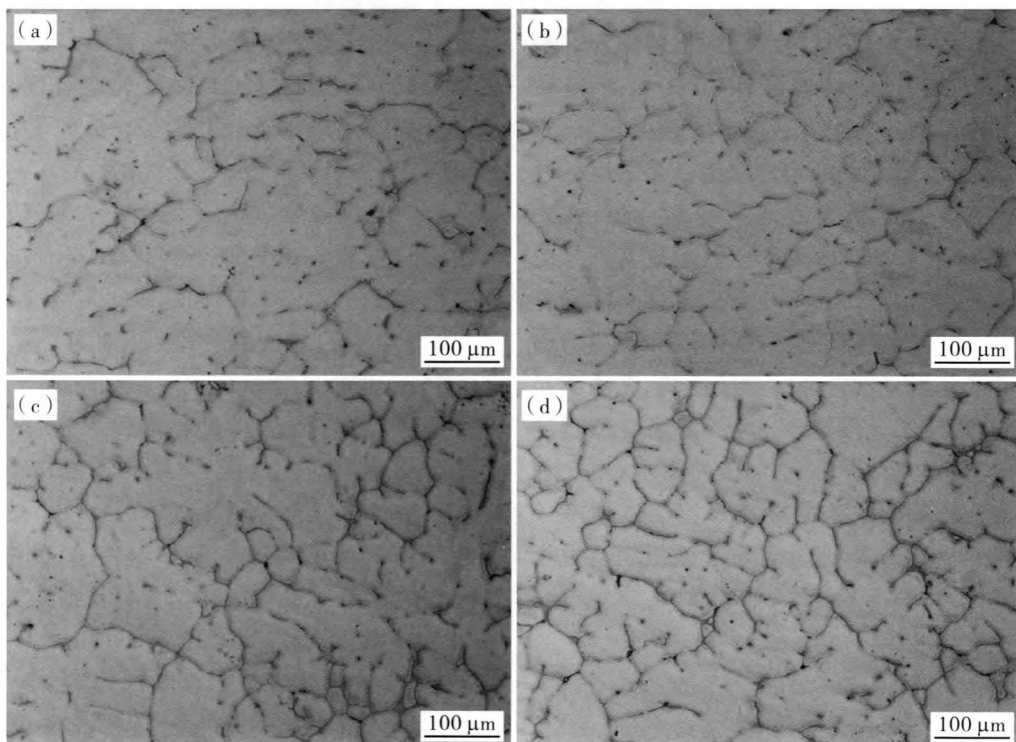


图 2 Cu 含量不同的 Al-Zn-Mg-Cu 合金圆棒的显微组织

Fig. 2 Microstructure of Al-Zn-Mg-Cu alloy round bar with different Cu content

(a) 不含铜; (b) 0.2% Cu; (c) 0.4% Cu; (d) 0.6% Cu

枝晶晶间的液相开始发生共晶转变,在晶界上逐渐析出由 $MgZn_2$, $AlZnMgCu$ 和 Al_2CuMg 相共同构成的多元非平衡共晶组织^[6-7].

图 3 为 Al-Zn-Mg-Cu 合金挤压板材的显微组织.从图 3 可看到,Al-Zn-Mg-Cu 合金圆棒经均匀化处理和挤压成形后, α -Al 枝晶和晶间连续网状共晶组织已消失,未完全溶解的共晶相 $MgZn_2$, $AlZnMgCu$

和 Al_2CuMg 弥散分布在铝基体上.随着 Cu 含量的增加,铝基体上分布的弥散相的数量也越多. Al-Zn-Mg-Cu 合金圆棒经过高温均匀化处理,部分晶界非平衡共晶相 $MgZn_2$, $AlZnMgCu$ 和 Al_2CuMg 得到溶解,Zn,Mg,Cu 元素溶入到铝基体中,消除了枝晶成分的微观偏析和铸棒的残余应力,提高了合金的塑性,改善了合金的挤压性能^[8].

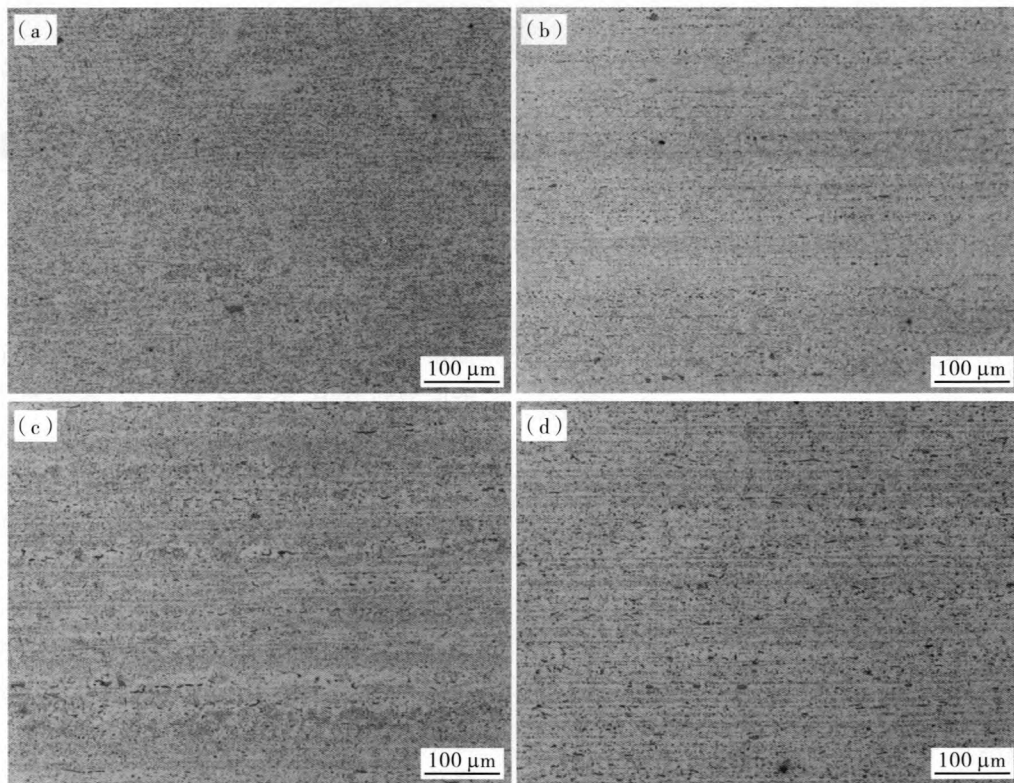


图 3 不同 Cu 含量 Al-Zn-Mg-Cu 合金挤压板材的显微组织

Fig. 3 Microstructure of as-extruded Al-Zn-Mg-Cu alloy with different Cu content

(a) 不含铜; (b) 0.2% Cu; (c) 0.4% Cu; (d) 0.6% Cu

图 4 为 Cu 质量分数 0.6% 的 Al-Zn-Mg-Cu 合金挤压材的 XRD 图谱.图 4 显示,Al-Zn-Mg-Cu 合金挤压材的显微组织由 α -Al, $MgZn_2$ 和 Al_2CuMg 相组成,未发现 $AlZnMgCu$ 四元非平衡共晶相的衍射峰.文献^[6]认为 $AlZnMgCu$ 四元非平衡共晶相具有 $MgZn_2$ 晶体结构,图 4 XRD 谱中 $MgZn_2$ 相对应位置的衍射峰,包含具有和 $MgZn_2$ 相结构相同的 $AlZnMgCu$ 相的衍射峰.

图 5 为 Cu 质量分数 0.6% 的 Al-Zn-Mg-Cu 合金挤压材的扫描电镜显微组织图.图 5(a) 显示,条带状物为 $AlZnMgCu$ 相,粗大块状物为 Al_2CuMg 相.图 5(b) 显示,弥散分布在 α -Al 基体上的细小片状物为 $MgZn_2$ 相.

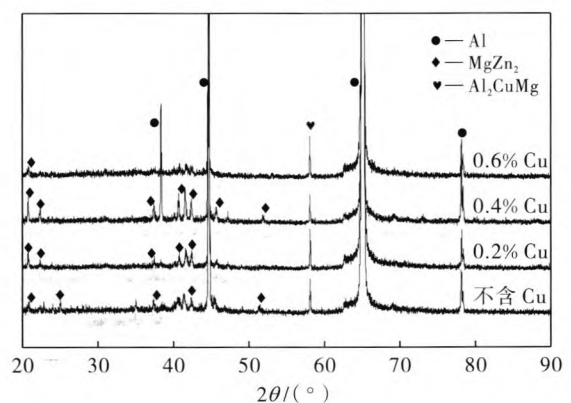


图 4 Al-Zn-Mg-Cu 合金挤压材的 X 射线衍射图谱

Fig. 4 X ray diffraction pattern of as-extruded Al-Zn-Mg-Cu alloy

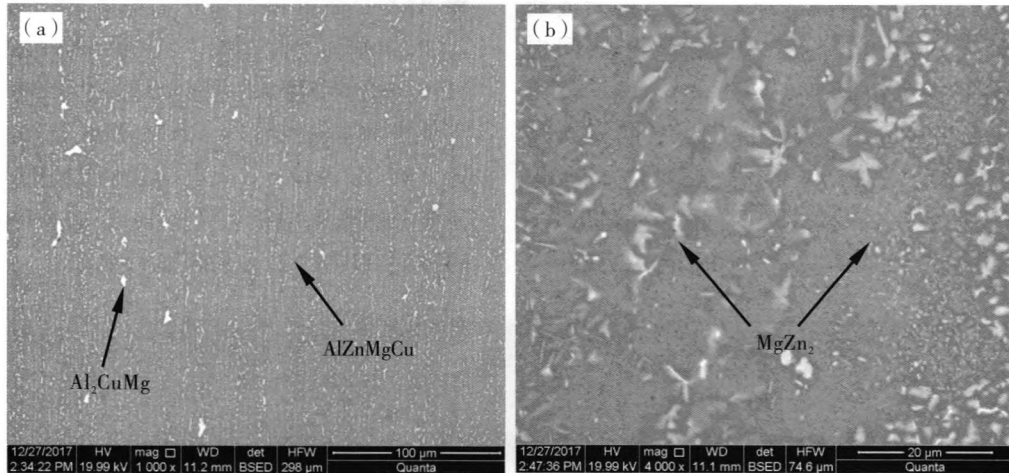


图5 Al-Zn-Mg-Cu合金挤压材的扫描电镜显微组织

Fig. 5 Scanning electron microscope microstructure of as-extruded Al-Zn-Mg-Cu alloy

2.2 力学性能

图6为固溶时效处理后Al-Zn-Mg-Cu合金挤压材的拉伸力学性能随Cu含量变化的关系曲线。由图6(a)可知,随着Cu含量逐渐增加,合金挤压材的抗拉强度逐渐升高,但上升速率逐渐下降。由图6(b)可知,随着Cu含量逐渐增加,合金挤压材的伸长率先增后减;当Cu质量分数达0.4%时,伸长率达到最大值。未添加Cu元素的Al-Zn-Mg合金挤压材的抗拉强度为387.2 MPa,伸长率为14.5%。当添加Cu质量分数达0.6%时,Al-Zn-Mg-Cu合金挤压材的抗拉强度为439.4 MPa,伸长率为15.9%,其抗拉强度和伸长率分别比未添加Cu时提高了13.5%和9.7%。

Al-Zn-Mg合金是时效强化型合金,通过固溶处

理,合金元素Zn和Mg溶入到铝基体中形成过饱和固溶体,并通过淬火将固溶体组织稳定下来。在随后的时效过程中,溶质原子有一个脱溶析出过程,其脱溶序列为GP区 \rightarrow η' 相 \rightarrow η 相。GP区是Mg和Zn原子在Al基体中某一晶面上偏聚形成的原子偏聚区,与Al基体完全共格,对合金能起到强化作用,但强化作用没有 η' 相明显。 η' 相是 $MgZn_2$ 的过渡相,与铝基体呈半共格关系。在合金塑性变形时,能强烈阻碍位错运动,增强合金的强度。 η 相是 $MgZn_2$ 的平衡相,其尺寸粗大且与铝基体呈非共格关系,基本没有强化效果^[9-10]。由此可见,Al-Zn-Mg合金的时效强化效果主要取决于GP区和 η' 相。当在Al-Zn-Mg合金基础上添加Cu元素后,首先Cu元素本身可固溶到铝基体中起到固溶强化作用,提高Al-Zn-Mg

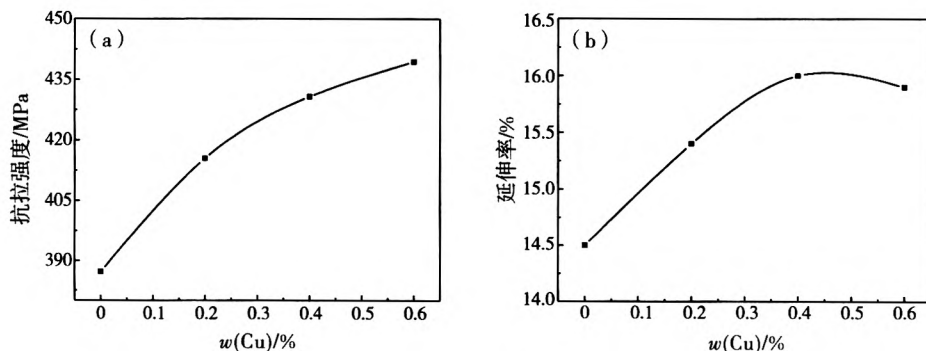


图6 Al-Zn-Mg-Cu合金挤压材拉伸力学性能与Cu含量之间的关系

(a)抗拉强度;(b)伸长率

Fig. 6 Curves of tensile mechanical properties of as-extruded Al-Zn-Mg-Cu alloy with the change of content

(a) tensile strength; (b) elongation

合金的强度;其次添加Cu元素还可以提高 $MgZn_2$ 沉淀相的弥散度,进一步提高Al-Zn-Mg合金的强度.但随着Cu含量的增加,也会增加 Al_2CuMg 和 Al_7Cu_2Fe 金属间化合物的生成, Al_7Cu_2Fe 金属间化合物是脆性相^[11],其塑性变形时与铝基体的变化速率不一致,容易导致界面处产生应力集中,成为断裂的裂纹源和裂纹扩展方向,反而使合金的塑性下降.因此,在Al-Zn-Mg合金中只能添加适量的Cu元素.

3 结论

Al-Zn-Mg-Cu合金铸态组织是由 α -Al枝晶和晶间非平衡共晶相组成,经均匀化处理和挤压后,共晶相弥散分布在铝基体上.随着Cu含量的增加,Al-Zn-Mg-Cu合金挤压材的抗拉强度逐渐升高,伸长率先增后减;当Cu质量分数为0.4%时,伸长率达到最大值.当Cu质量分数达0.6%时,合金挤压材的抗拉强度为439.4 MPa,伸长率为15.9%,与未添加Cu元素挤压材相比,其抗拉强度和伸长率分别提高了13.5%和9.7%.

参考文献:

[1] 吴海旭,杨丽,王周兵,等.我国轨道交通车辆用铝型材

发展现状[J].轻合金加工技术,2014,42(1):18-20.

- [2] 李平,孙振宇,王祝堂.铝合金轨道车辆结构及合金性能[J].轻合金加工技术,2012,40(7):1-12.
- [3] 冯林威,王春海,齐金星.轨道交通通用大型特种铝型材生产工艺研究[J].世界有色金属,2016(5s):25-27.
- [4] 张钰.浅谈Al-Zn-Mg系合金[J].铝加工,2014(2):49-53.
- [5] 甘卫平,范洪涛,许可勤. Al-Zn-Mg-Cu系高强铝合金研究进展[J].铝加工,2003(3):6-11.
- [6] 滕海涛,熊柏青,张永安,等.高Zn含量Al-Zn-Mg-Cu系铝合金的凝固态显微组织[J].中国有色金属学报,2015,25(4):852-865.
- [7] 舒文祥,侯陇刚,刘君城,等.先进高强韧Al-Zn-Mg-Cu合金凝固和均匀化组织及相构成[J].北京科技大学学报,2014,36(11):1534-1539.
- [8] 袁新雄,尹登峰,余鑫祥,等. Al-Zn-Mg-Cu-Zr-0.12Ce合金铸锭的均匀化退火及组织演变[J].中国有色金属学报,2017,27(3):459-467.
- [9] 夏朝峰,王良龙,陈思悦,等. Al-Zn-Mg-Cu合金时效析出相的研究[J].材料热处理学报,2011,34(S):79-82.
- [10] 王少华,孟令刚,房灿峰,等.新型Al-Zn-Mg-Cu合金型材双级时效组织性能研究[J].材料研究与应用,2011,5(3):190-193.
- [11] 喻征,赵晓东,李飞,等.铸态Al-Zn-Mg-Cu高强铝合金热拉伸力学性能及断裂行为[J].太原科技大学学报,2015,36(4):294-299.

Effect of trace Cu element on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy

DU Xungui^{1,2}, YOU Junhua¹, QU Yingdong¹, ZHOU Nan², WANG Shuncheng²

1. College of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
2. Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangzhou 510650, China

Abstract: The effect of trace Cu on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy was studied by optical microscope, scanning electron microscope, X ray diffractometer and tensile tester. The results show that the microstructure of as-cast Al-Zn-Mg-Cu alloy consists of α -Al dendrite and intergranular eutectic phases. After homogenized treatment and extrusion, the eutectic phases are distributed on the aluminum matrix. With the increase of Cu content, the tensile strength of as-extruded Al-Zn-Mg-Cu alloy is increased gradually, and the elongation is first increased and then decreased. When the mass fraction of Cu is 0.4%, the elongation reaches the maximum. When the mass fraction of Cu is 0.6%, the tensile strength of Al-Zn-Mg-Cu alloy is 439.4MPa and the elongation is 15.9%, in which the tensile strength and elongation are increased by 13.5% and 9.7% compared with that of the as-extruded Al-Zn-Mg alloy without Cu element.

Key words: Al-Zn-Mg alloy; extrusion; solution treatment; aging treatment