

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2013.07.014

# Cu 含量对 AZ61 镁合金显微组织和力学性能的影响

张丁非, 段作衡, 张红菊, 齐福刚

(重庆大学 材料科学与工程学院; 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044)

**摘要:**通过真空感应熔炼技术制备出不同 Cu 含量的 AZ61 镁合金,采用光学显微镜(OM)、X 射线衍射(XRD)、差热分析(DSC)、扫描电镜(SEM)和能谱分析(EDS)等方法研究了 Cu 元素对合金组织和力学性能的影响。结果表明:Cu 元素以三元 AlCuMg 相存在于合金中,主要分布在晶界处及枝晶间;添加 Cu 元素后能够细化合金铸态组织,并使  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相数量减少、尺寸变细;随着 Cu 含量增加,挤压态合金强度先上升后下降,而延伸率只有当 Cu 含量达到 1% 时才开始显著下降。其中 AZ61-1Cu 具有最佳的综合力学性能,屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 230 MPa、321 MPa 和 9.7%;当 Cu 含量为 1.5% 时,粗大的 AlCuMg 相割裂了合金基体,使合金力学性能下降。

**关键词:**AZ61 镁合金;Cu;AlCuMg 相;显微组织;力学性能

**中图分类号:**TG146 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2013)07-079-06

## Effects of Cu content on the microstructure and mechanical properties of AZ61 alloy

ZHANG Dingfei, DAUN Zuoheng, ZHANG Hongju, QI Fugang

(College of Materials Science and Engineering;

National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Microstructures and mechanical properties of AZ61 with Cu addition are investigated by optical microscope(OM), X-ray diffraction analysis(XRD), differential thermal analysis(DSC), scanning electron microscopy(SEM) and energy spectrum analysis(EDS). The results show that some ternary AlCuMg phases are observed along the grain boundaries and between dendrites in AZ61-xCu alloys, and they can refine the microstructure of as-cast alloys. Meanwhile, with the addition of Cu, the quantity and the size of  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> decrease. As Cu content increasing, the strength of as-extruded alloys increase first and then decrease. The elongation has no obvious decrease until Cu content reaches 1.5%. AZ61-1Cu alloy has optimum combination mechanical properties, with  $\sigma_{0.2}$ =230 MPa,  $\sigma_b$ =321 MPa and  $\delta$ =9.7%, respectively. When Cu content is 1.5%, the coarse AlCuMg phase splits the matrix and deteriorates mechanical properties.

**Key words:**AZ61 magnesium alloy; Cu; AlCuMg phase; microstructure; mechanical property

收稿日期:2013-01-25

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2007CB613700);国家杰出青年科学基金项目(No. 50725413);中央高校基本科研业务费科研专项“研究生科技创新基金”(CDJXS11132228)

作者简介:张丁非(1963-),重庆大学教授,博士生导师,主要从事轻合金材料及加工技术研究,(Tel)023-65112491;(E-mail)zhangdingfei@cqu.edu.cn。

镁合金是目前质量最轻的结构材料,具有密度小,比强度、比刚度高,易于切削加工,尺寸稳定性高等优点,在汽车和航空工业受到了越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>。其中 AZ 系镁合金具有较高的强度和塑性,因而成为了最常用的合金系<sup>[3-4]</sup>之一,但在实际应用中,镁合金的强度还不够高,不能用于重要结构件的制造<sup>[5-6]</sup>。添加合金元素到镁合金中可以有效地影响镁合金的力学、物理及工艺性能<sup>[7-9]</sup>,是一种提高镁合金性能的有效途径。在设计新合金时 Cu 元素是一种常用的合金元素,有文献<sup>[10-13]</sup>指出它能改变合金共晶组织演变过程,合金中含 Cu 第二相往往也会提高合金的室温及高温力学性能。但 Cu 元素对 AZ 系镁合金组织和性能的研究则鲜于报道<sup>[14]</sup>,笔者通过合金化方法,向 AZ61 合金中加入了不同含量的 Cu,采用 OM、XRD、DSC、SEM 和 EDS 等方法系统研究了 Cu 含量对 AZ61 合金组织和力学性能的影响。

## 1 实验材料和方法

本实验设计了 4 种合金成分,实验合金成分经过 X 射线荧光光谱仪(XRF)测定后列于表 1。实验合金采用真空感应熔炼方式熔炼,在氩气保护下进行,原料为纯 Mg,纯 Zn,Al-50%Cu(质量分数)中间合金和 Mg-4.1%Mn(质量分数)中间合金。熔炼所得的原始铸锭经过锯切、去皮后,最后得到尺寸为  $\phi 100\text{ mm} \times (120 \sim 140)\text{ mm}$  的铸锭。对 4 种成分的铸锭进行均匀化处理,其工艺为  $400^\circ\text{C}/12\text{ h}$ 。均匀化后立即将铸锭放入吨位为 500 t 的挤压机上进行挤压,挤压参数见表 2。

表 1 实验合金的化学成分(质量分数) %

合金	Mg	Al	Zn	Mn	Cu
AZ61	92.13	6.81	0.96	0.09	—
AZ61-0.5Cu	91.19	7.14	1.05	0.11	0.49
AZ61-1.0Cu	91.44	6.52	1.00	0.12	0.91
AZ61-1.5Cu	90.74	6.77	0.99	0.11	1.37

对挤压后的实验合金进行室温拉伸力学性能测试,测试在新三思 CMT-5105 微机控制电子万能试

验机上进行,采用匀速单向位移拉伸,拉伸速率为  $3\text{ mm/min}$ 。金相组织观察采用 MDS 金相显微镜,金相观察的腐蚀剂为 4% 的硝酸酒精溶液和苦味酸溶液。X 射线衍射(XRD)分析采用块状样品,使用 D/MAX-2500PC 型 X 射线衍射仪进行测试。铸态合金相变温度的测定在 METTLER TGA DSC1/1100LF 型差热分析仪上进行,升温速度为  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 。合金试样表面的形貌观察采用 TESCAN VEGA II LMU 扫描电子显微镜,微区能谱分析采用 OXFORD INCA 型 EDS。

表 2 实验合金挤压参数

坯料温度/ $^\circ\text{C}$	模具温度/ $^\circ\text{C}$	挤压筒温度/ $^\circ\text{C}$	挤压速度/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	挤压比
400	400	390	1.3~2.8	28

## 2 结果及讨论

### 2.1 实验合金的相组成及分析

图 1 是实验合金的 DSC 曲线,其中 AZ61 镁合金在  $430^\circ\text{C}$  处有一个吸热峰,对应的是  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  相的吸热峰。可以看到 AZ61-1.5Cu 的 DSC 曲线在  $520^\circ\text{C}$  左右出现了一个非常明显的吸热峰,这说明加入 Cu 后,在 AZ61 合金中生成了一种高熔点的新相,它们在较高温度下也能保持较好的稳定性,能提高合金的性能。

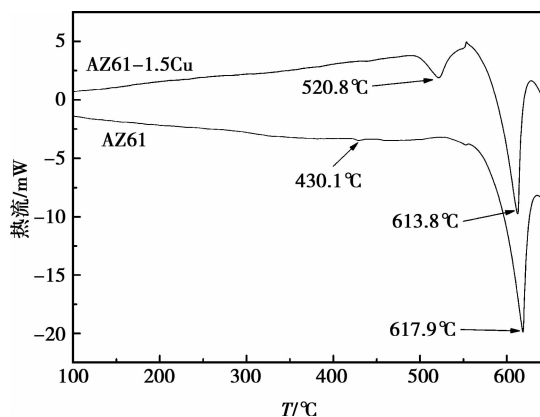


图 1 铸态合金 DSC 曲线

其具体成分由 XRD 物相分析后可知是 AlCuMg 相。图 2 是 AZ61-xCu 铸态合金的 X 射线衍射图谱,由图可见随 Cu 的加入  $\beta$  相的衍射峰强度下降,同时出现了 AlCuMg 的衍射峰。这说明铸态

AZ61- $x$ Cu 合金主要由  $\alpha$ -Mg 基体,  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相和 AlCuMg 相所组成。为了进一步确定合金的相组成,采用了 EDS 验证上述结果。图 3 是 AZ61-1.5Cu 的 SEM 照片及 EDS 能谱分析结果。图 3 (b),(c)分别是 A,B 两点的 EDS 分析结果,其中 A 点成分是 Mg、Al 和少量固溶的 Zn, B 点主要成分为 Mg、Al、Cu,并且 Al、Cu 之间的原子约为 1:1,这与 AlCuMg 相的原子比十分接近。根据 EDS 分析结果并结合 XRD 衍射图谱可以判定 A 点是  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>, B 点是 AlCuMg 相。

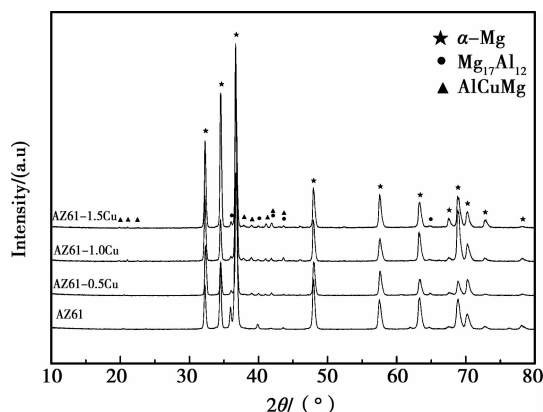


图 2 铸态 AZ61- $x$ Cu 合金的 XRD 图谱

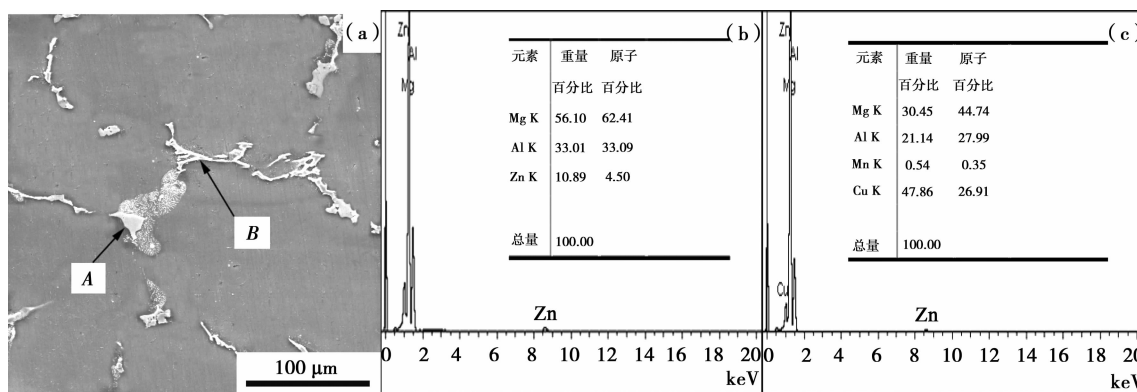


图 3 铸态 AZ61-1.5Cu 合金的 SEM 照片及能谱分析结果

## 2.2 实验合金显微组织及分析

图 4 是 AZ61- $x$ Cu 合金铸态金相组织,在非平衡凝固条件下,AZ61 的组织如图 4(a)所示,由  $\alpha$ -Mg 和  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相组成,晶界上浅色的不规则块状相为离异  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>,而黑色组织是在共晶反应后的冷却过程中,由  $\alpha$ -Mg 固溶体析出的层片状  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相,其析出受固态相变规律控制<sup>[7]</sup>。

可以看出随着 Cu 的加入,铸态组织明显细化,其原因是加入 Cu 元素后,镁合金在凝固时, $\alpha$ -Mg 一边结晶一边将 Al、Cu 元素向晶外推移,最后在晶界处生成了热稳定性较好的 AlCuMg 相,对晶界有钉扎作用,阻碍了  $\alpha$ -Mg 的长大。图 5 是 AZ61- $x$ Cu 铸态合金 SEM 照片,可以清晰地看出随 Cu 的加入不仅生成了 AlCuMg 相,并且使分布在晶界处的离异共晶  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相数量减少,尺寸变细,其中从  $\alpha$ -Mg 固溶体析出的层片状  $\beta$  相数量减小的最为明显。这是由于 AlCuMg 相中 Mg 与 Al 原子比为 1,显然 AlCuMg 相对于 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 会占用更多的 Al 原子,使得  $\beta$  相数量减少。

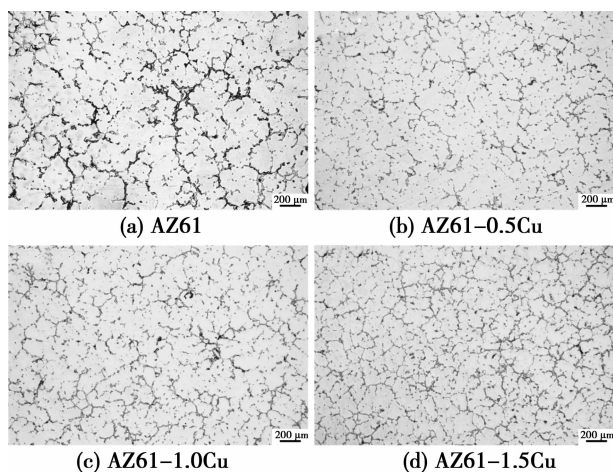


图 4 铸态 AZ61- $x$ Cu 合金金相照片

AZ61- $x$ Cu 合金均匀化退火后的金相组织如图 6 所示,经过 400℃/12h 均匀化退火后,枝晶偏析基本得到消除,适合进行后续挤压变形,原来沿晶界连续分布的网状第二相大部分都溶入基体,少量第二相断续的残留在晶界。随着 Cu 的加入,未溶的第二相增多,这是由于 Cu 含量高时,难溶的高熔点

AlCuMg 相数量也越多。

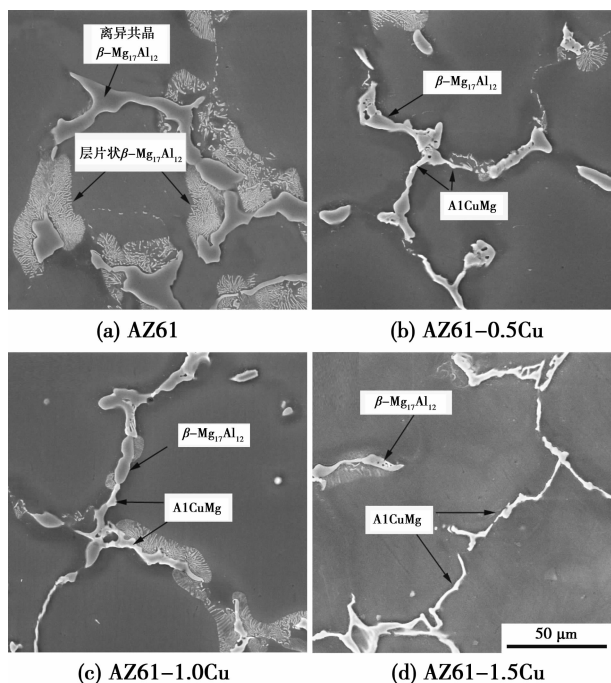


图 5 铸态 AZ61-xCu 合金的 SEM 图像

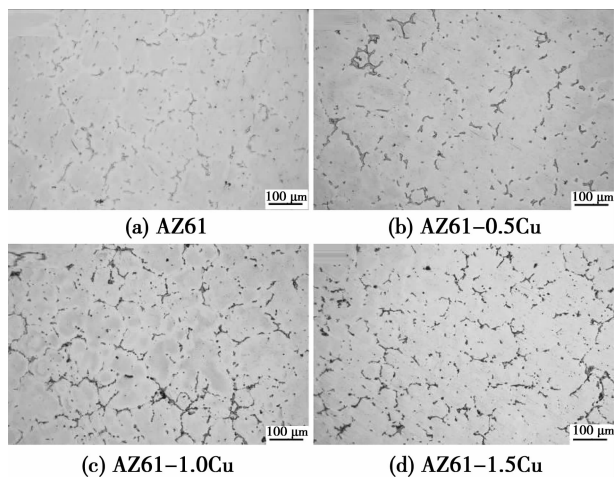


图 6 铸态 AZ61-xCu 合金均匀化退火后的金相组织照片

图 7 和图 8 分别是合金沿挤压方向的金相组织和 SEM 扫描电镜照片,可以看出在热挤压过程中合金发生了动态再结晶,观察挤压态合金组织,发现 Cu 元素对合金的晶粒度影响不大,合金晶粒尺寸较为均匀,平均晶粒尺寸分布在  $11\sim 14\ \mu\text{m}$ 。合金经挤压变形后第二相沿挤压方向呈流线分布,其中较大的团状相为 AlCuMg 相,它们弥散分散在基体中,当 Cu 含量较高时,AlCuMg 相数量较多,尺寸较大。

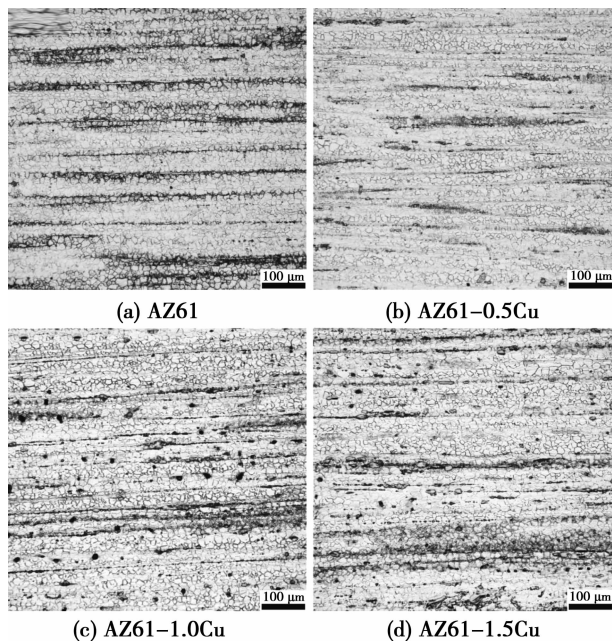


图 7 挤压态 AZ61-xCu 合金金相照片

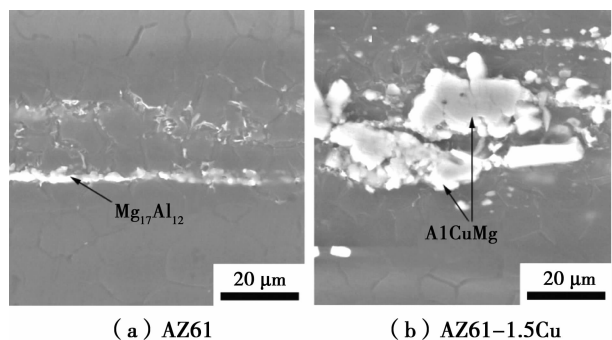


图 8 实验合金挤压态 SEM 照片

### 2.3 实验合金的力学性能及其分析

表 3 是挤压态合金的室温力学性能,其规律如图 9 所示。笔者发现合金的屈服强度、抗拉强度随 Cu 含量的增加先上升后下降,当 Cu 含量在 1% 以内时,屈服强度少许提高,但提升不明显,但抗拉强度提升较为明显,最大增幅达 8%,延伸率基本保持不变,其中 AZ61-1Cu 具有最佳的综合力学性能,屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 230 MPa、321 MPa 和 9.7%,其原因是:在 AZ61 合金中加入 Cu 后形成了三元强化相 AlCuMg,这些强化相分布在基体之中使合金性能提高。通常挤压变形时,第二相会在变形作用下发生弯折,弯折处易聚集大量位错,第二相粒子在位错聚集的第二相/基体界面处发生部分溶解,产生缩颈,在大应力的作用下拉断或切断,最后导致第二相的破碎<sup>[15]</sup>。当 Cu 含量为 1.5% 时,铸

态下生成的 AlCuMg 相数量较多, 尺寸较大。他们在挤压时, 半连续网状 AlCuMg 相被折弯, 由于初始 AlCuMg 相数量较多, 折弯变形后的 AlCuMg 相在三向应力作用下有聚集形成大块团状形貌的趋势。在挤压过程中, 如果应力不够大, 就难以切断破碎大块的 AlCuMg 相粒子, 如图 8(b) 所示。另一原因是 AlCuMg 相有较好的热稳定性, 在挤压过程中不易溶解产生紧缩, 使破碎大块 AlCuMg 相难以上升。这些第二相量越多, 形状越粗大, 对基体割裂作用越强, 合金力学性能因之快速恶化, 其中延伸率下降最为明显。根据文献<sup>[15-16]</sup>, 可采用往复挤压或 ECAP 变形等新工艺, 解决上述问题。

表 3 挤压态合金力学性能

合金	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
AZ61	219	297	10.2
AZ61-0.5Cu	224	305	10
AZ61-1.0Cu	230	321	9.7
AZ61-1.5Cu	210	293	7.9

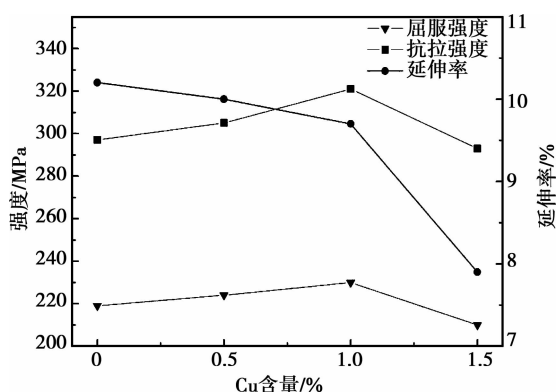


图 9 挤压态合金力学性能

### 3 结 论

1) AZ61-xCu 铸态合金主要由  $\alpha$ -Mg 基体,  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相及 AlCuMg 相组成。其中 Cu 元素以三元 AlCuMg 相的形式存在, 主要分布在晶界及枝晶间。添加 Cu 元素后能细化合金铸态枝晶组织, 同时使  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相数量减少、尺寸变细。

2) 随着 Cu 含量的增加, 合金屈服强度和抗拉强度先上升后下降, 延伸率开始无明显变化, 后急剧

下降。其中添加量为 1% 时, 挤压态合金具有最佳的综合力学性能, 屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 230 MPa、321 MPa 和 9.7%。

3) 当 Cu 含量为 1.5% 时, 分布在基体上的粗大三元 AlCuMg 相, 割裂了合金基体, 使合金力学性能下降。

### 参考文献:

- [1] Yang Z, Li J P, Zhang J X, et al. Review on research and development of magnesium alloys [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 21(5):313-328.
- [2] Ye H Z, Liu X Y. Review of recent studies in magnesium matrix composites[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(20):6153-6171.
- [3] 肖盼, 刘天模, 姜丹. AZ31 镁合金的研究进展[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(11):81-84. XIAO Pan, LIU Tianmo, JIANG Dan. Research status and development of AZ31 magnesium alloy[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(11):81-84.
- [4] 张广俊, 龙思远, 曹凤红. Al 含量对 AZ 系镁合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(9):848-850. ZHANG Guangjun, LONG Siyuan, CAO Fenghong. Effects of aluminum content on the microstructure and mechanical properties of AZ magnesium alloys [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2009, 29(9):848-850.
- [5] Zhou H T, Zeng X Q, Liu L F, et al. Effect of cerium on microstructures and mechanical properties of AZ61 wrought magnesium alloy [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(2):7061-7066.
- [6] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [7] 刘正, 张奎, 曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [8] 张代东, 康云, 宫长伟, 等. AZ61+xCe(x=0~1.5)合金的微观组织研究[J]. 电子显微学报, 2010, 29(1):93-97. ZHANG Daidong, KANG Yun, GONG Changwei, et al. Study on microstructures of AZ61+xCe(x=0~1.5) alloys[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2010, 29(1):93-97.
- [9] 黄晓锋, 朱凯, 曹喜娟. 主要合金元素在镁合金中的作

- 用[J]. 铸造技术, 2008, 29(11):1574-1578.
- HUANG Xiaofeng, ZHU Kai, CAO Xijuan. The roles of alloying elements in magnesium alloys[J]. Foundry Technology, 2008, 29(11):1547-1578.
- [10] Xiao D H, Wang J N, Ding D Y, et al. Effect of Cu content on the mechanical properties of an Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 343(1/2): 77-81.
- [11] 肖亚庆, 谢水生, 刘静安, 等. 铝加工技术实用手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2005.
- [12] Zeren M. Effect of copper and silicon content on mechanical properties in Al-Cu-Si-Mg alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169(2): 292-298.
- [13] Helwig H M, Garcia-Moreno F, Banhart J. A study of Mg and Cu additions on the foaming behaviour of Al-Si alloys[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(15): 5227-5236.
- [14] 郝启堂, 杨光昱, 介万奇, 等. Mg-Al-Cu 系砂型铸造镁合金组织和性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(4):671-675.
- HAO Qitang, YANG Guangyu, JIE Wanqi, et al. An investigation of properties and microstructures of Mg-Al-Cu sand-cast magnesium alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(4):671-675.
- [15] 王红霞, 周康康, 梁伟, 等. Mg15Al 镁合金 ECAP 变形过程中  $\beta$  相的碎化机理及动态析出行为[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(8):1794-1800.
- WANG Hongxia, ZHOU Kangkang, LIANG Wei, et al. Fragmentation mechanism and dynamic precipitation behavior of  $\beta$  phase in Mg15Al magnesium alloy during ECAP[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(8):1794-1800.
- [16] 郭学锋, 杨文朋, 宋佩维. 往复挤压 Mg-4Al-2Si 合金中 Mg<sub>2</sub>Si 颗粒形貌与分布[J]. 材料工程, 2011(11): 62-67.
- GUO Xuefeng, YANG Wenpeng, SONG Peiwei. Morphological and distribution characteristics of Mg<sub>2</sub>Si particles in Mg-4Al-2Si alloy prepared by reciprocating extrusion[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(11): 62-67.

(编辑 王维朗)