

钙与电磁搅拌对 Mg-Li-Al 合金微观组织和力学性能的影响

郝海, 姚磊, 谷松伟, 马蕾娟, 张兴国

(大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 116024)

摘要: 以 Mg-8%Li-3%Al 合金为基体, 研究合金化元素 Ca 以及 Ca 与电磁搅拌复合作用对其凝固组织和力学性能的影响, 并探讨其化学成分、组织结构和力学性能间的关系。结果表明: 合金化元素 Ca 以及 Ca 与电磁搅拌复合作用都能改善 Mg-8%Li-3%Al 合金的凝固组织和力学性能; 当铸态合金中 Ca 含量为 0.5%(质量分数)时, 合金中 β 相细小均匀, 室温抗拉强度和伸长率分别达到 188.93MPa 和 11.35%; 施加 80 V 电磁场电压以及加入 0.5%Ca 后, 晶粒组织均匀有序, 布氏硬度、抗拉强度和伸长率分别为 67.5HB、203.8MPa 和 7.7%。

关键词: Mg-Li-Al 合金; 电磁搅拌; 凝固组织; 力学性能

中图分类号: TG146.22

文献标志码: A

Effects of Ca and electromagnetic stirring on microstructures and mechanical properties of Mg-Li-Al alloys

HAO Hai, YAO Lei, GU Song-wei, MA Lei-juan, ZHANG Xing-guo

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The effects of Ca and combined electromagnetic stirring and Ca on the microstructures and mechanical properties of Mg-8%Li-3%Al alloys were studied, and the relationships among the chemical composition, microstructures and mechanical properties were discussed. The results show that both Ca and combined electromagnetic stirring and Ca improve the microstructures and mechanical properties of Mg-8%Li-3%Al alloys. Adding 0.5% Ca into the as-cast alloys, the β phase becomes thinner, and the tensile strength and elongation reach to 188.93 MPa and 11.35%, respectively. The microstructure is fine and uniform, and the Brinell hardness, tensile strength, and elongation are 67.5HB, 203.8 MPa and 7.7% at electromagnetic stirring of 80 V combined with 0.5%Ca.

Key words: Mg-Li-Al alloy; electromagnetic stirring; microstructure; mechanical properties

Mg-Li 系合金是目前已知的最轻的合金, 它具有较高的比强度、较高的冲击韧性、良好的切削加工性^[1]、良好的电磁屏蔽和减震性能^[2]以及较强的抗高能粒子穿透能力等优点, 因而受到兵器、宇航、汽车和电子等领域的广泛重视^[3]。

Mg 中由于低密度金属 Li 的加入, 在大大减轻合金质量的同时, 合金塑性明显提高^[4]。但二元 Mg-Li 合金的绝对强度较低, 易腐蚀, 且在室温下即可发生蠕变, 限制该合金作为结构材料的使用^[5-6]。向二元

Mg-Li 合金中加入合金元素, 可以改善合金的性能, 其中研究最多的是 Mg-Li-Al 合金^[7-9]。研究表明, 随 Al 含量的增加, 合金的强度也随之增加, 塑性却随之降低, 当 Al 含量大于 6%(质量分数)时, 强度的增加不明显, 但塑性却明显降低, 故一般认为 $w(\text{Al}) < 6\%$ 为宜^[10-11]。综合考虑合金的强度和塑性, 确定 Al 的质量分数为 3%。考虑到共晶成分范围的 Mg-Li 二元合金具有极优的变形性能, 本实验的研究对象确定为 Mg-8%Li-3%Al 合金。

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2009AA03Z525); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0080); 辽宁省自然科学基金资助项目(20082172)

收稿日期: 2009-11-15; 修订日期: 2010-01-05

通信作者: 郝海, 副教授, 博士; 电话: 0411-84709458, E-mail: haohai@dlut.edu.cn

Ca元素在自然界中含量极其丰富,且具有价格低廉以及密度小等一系列优点,另外元素Ca具有细化晶粒和降低镁合金活性的作用^[12-13],因此研究其对Mg-Li-Al系合金的作用具有重要的现实意义。电磁搅拌改善金属熔体凝固过程中的流动、传热和迁移过程,对合金有较强的组织细化作用,促进合金由枝晶生长转化为细小等轴晶生长,改善合金质量^[14-16]。

本文作者在前期研究工作的基础上,进一步研究不同Ca含量对Mg-8%Li-3%Al合金的影响以及Ca元素和电磁场复合作用对Mg-8%Li-3%Al合金组织性能的影响。

1 实验

本试验以纯Mg(99.9%)、Li(99.95%)、Al(99.99%)和Ca(99.9%)为原料,采用覆盖剂(75%LiCl+25%LiF)与氩气相结合的方法,用钢坩埚(长径比为3:1)在SG25210型井式坩埚电阻炉中进行熔炼。分别熔炼Mg-8%Li-3%Al-(0%, 0.5%, 1%, 1.5%)Ca合金试样。浇注采用倾注法,以SF₆标准气体保护,浇注温度为700℃。再对Mg-8%Li-3%Al-0.5%Ca合金凝固过程中分别加入不同强度的电磁搅拌,制备不同电磁场下的合金试样:频率为50Hz,电压分别为40、60、80、100V,搅拌时间为3min。

金相试样经机械抛光后用4%草酸水溶液腐蚀,

在MEF3型多功能光学显微镜观察合金显微组织;用EPMA-1600电子探针分析仪对试样进行面扫描;用HB-3000型布氏硬度机测试试样的硬度;用WD-10A电子万能试验机测试试样的室温拉伸性能,拉伸试样按照国标GB/T 16865—1997制备,拉伸速率为1mm/min,用JSM25600LV型扫描电镜观察断面形貌。

2 结果与讨论

2.1 Ca对Mg-Li-Al合金显微组织的影响

图1所示为不同Ca含量的Mg-8%Li-3%Al合金的铸态显微组织。合金由 α + β 两相组成。由图1可看出,未加元素Ca时,合金晶粒粗大不均匀;添加0.5%Ca元素时, β 相明显细化均匀;当Ca含量增加至1%时, β 相变得更加细小;随着Ca含量的增加,当含量为1.5%时, β 相数量反而增加且在相界出现黑色析出相。

由于检测设备局限,对原子序数较小的Li元素用电子探针检测不到。图2和3所示分别为Mg-8%Li-3%Al-0.5%Ca和Mg-8%Li-3%Al-1.5%Ca合金的SEM像,通过对合金试样进行面扫描,得到各元素的分布情况。图3中白色块状相是富Mg相,即 α 相,灰色相即为 β 相。图2中出现了短棒状、颗粒状的富Ca相,Al相的分布较为均匀;而图3中出现短棒状、颗粒状及狭长鱼骨状的富Ca相,Al相的分布区域部分

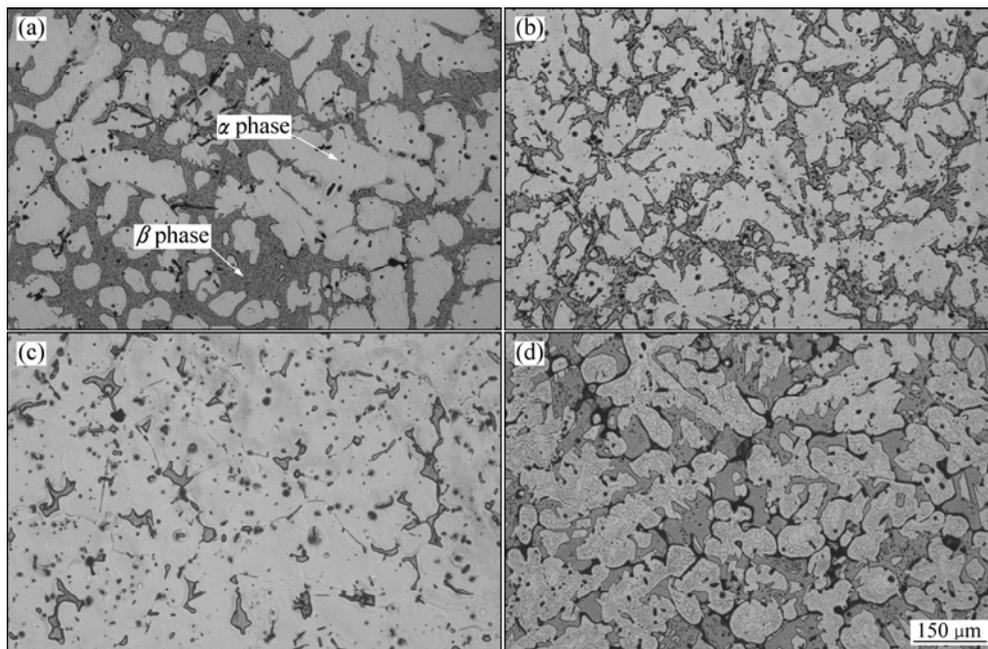


图1 Ca含量对Mg-8%Li-3%Al合金铸态显微组织的影响

Fig.1 Effects of Ca content on microstructure of Mg-8%Li-3%Al alloys: (a) 0%Ca; (b) 0.5%Ca; (c) 1%Ca; (d) 1.5%Ca

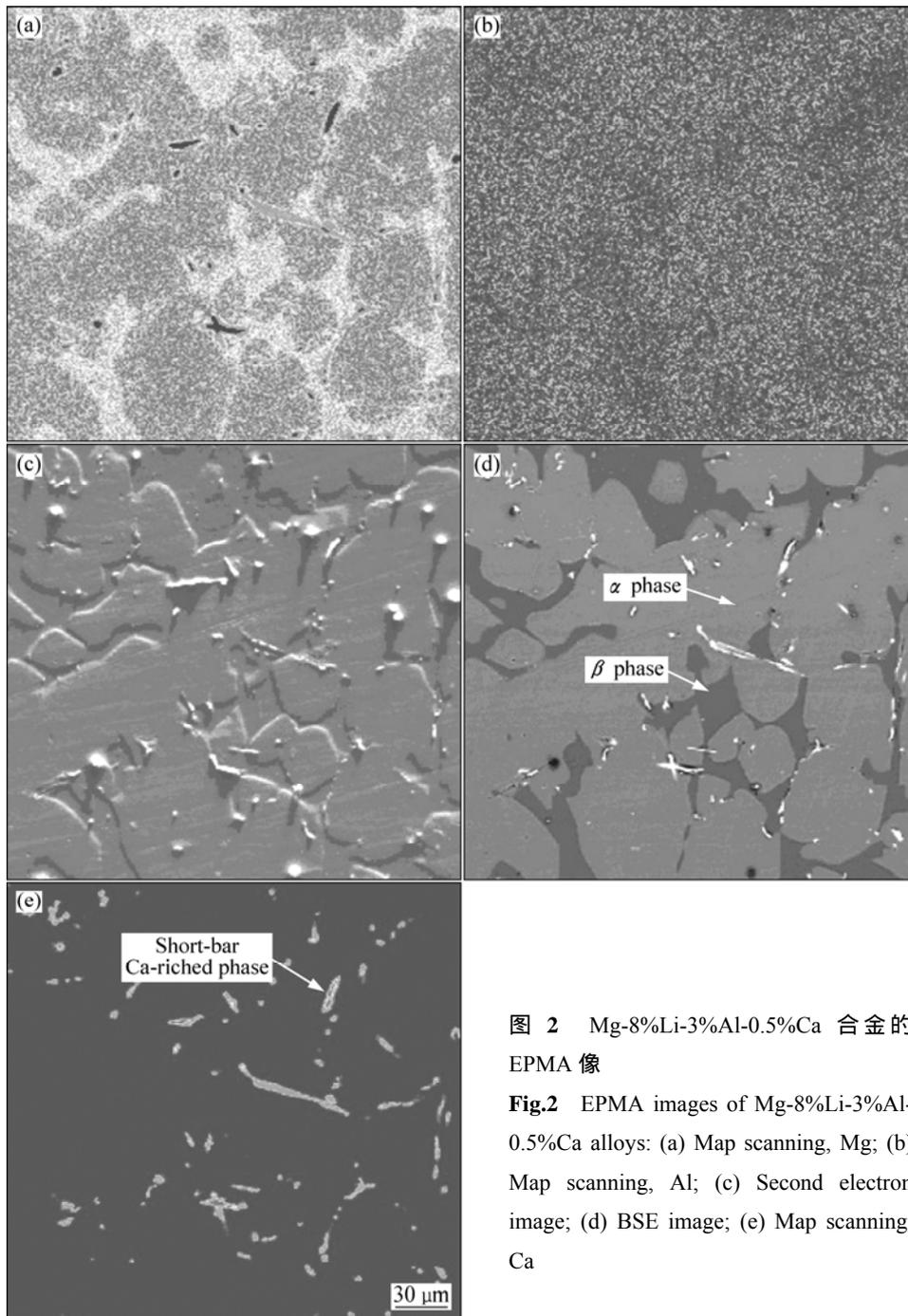


图 2 Mg-8%Li-3%Al-0.5%Ca 合金的 EPMA 像

Fig.2 EPMA images of Mg-8%Li-3%Al-0.5%Ca alloys: (a) Map scanning, Mg; (b) Map scanning, Al; (c) Second electron image; (d) BSE image; (e) Map scanning, Ca

与 Ca 相相同。因在镁锂合金中 Ca 不易与 Li 发生反应生成新相^[17]，从而可推测生成的富 Ca 相为钙与镁或铝形成的化合物。对狭长鱼骨状的新相进行 EDS 分析(见图 4)，结果表明此相为 Al_2Ca 相。由此可以看出，含钙量为 0.5% 时，因 Ca 为表面活性元素，具有较强的偏聚能力，被排挤到晶粒结晶前沿，与 Al 形成了 Al_2Ca 相，生成的 Al_2Ca 新相比较均匀地以短棒状或颗粒状分布在相界周围，将其部分地包裹起来，抑制晶粒的生长，造成 β 相的细化。随着 Ca 含量的增多，

生成的 Al_2Ca 相较大部分呈狭长鱼骨状偏聚分布在相界面处，产生的细化作用有限。因而，从图 1 中可看出，Mg-8%Li-3%Al-1.5%Ca 的 β 相就要比 Mg-8%Li-3%Al 的细化，但要比 Mg-8%Li-3%Al-0.5%Ca 的粗大。

2.2 Ca 对 Mg-Li-Al 合金力学性能的影响

Ca 含量对 Mg-8%Li-3%Al 合金抗拉强度的影响如图 5 所示。由图 5 可以看出：当 Ca 的加入量小于 0.5% 时，合金的抗拉强度随着 Ca 加入量的增加而增

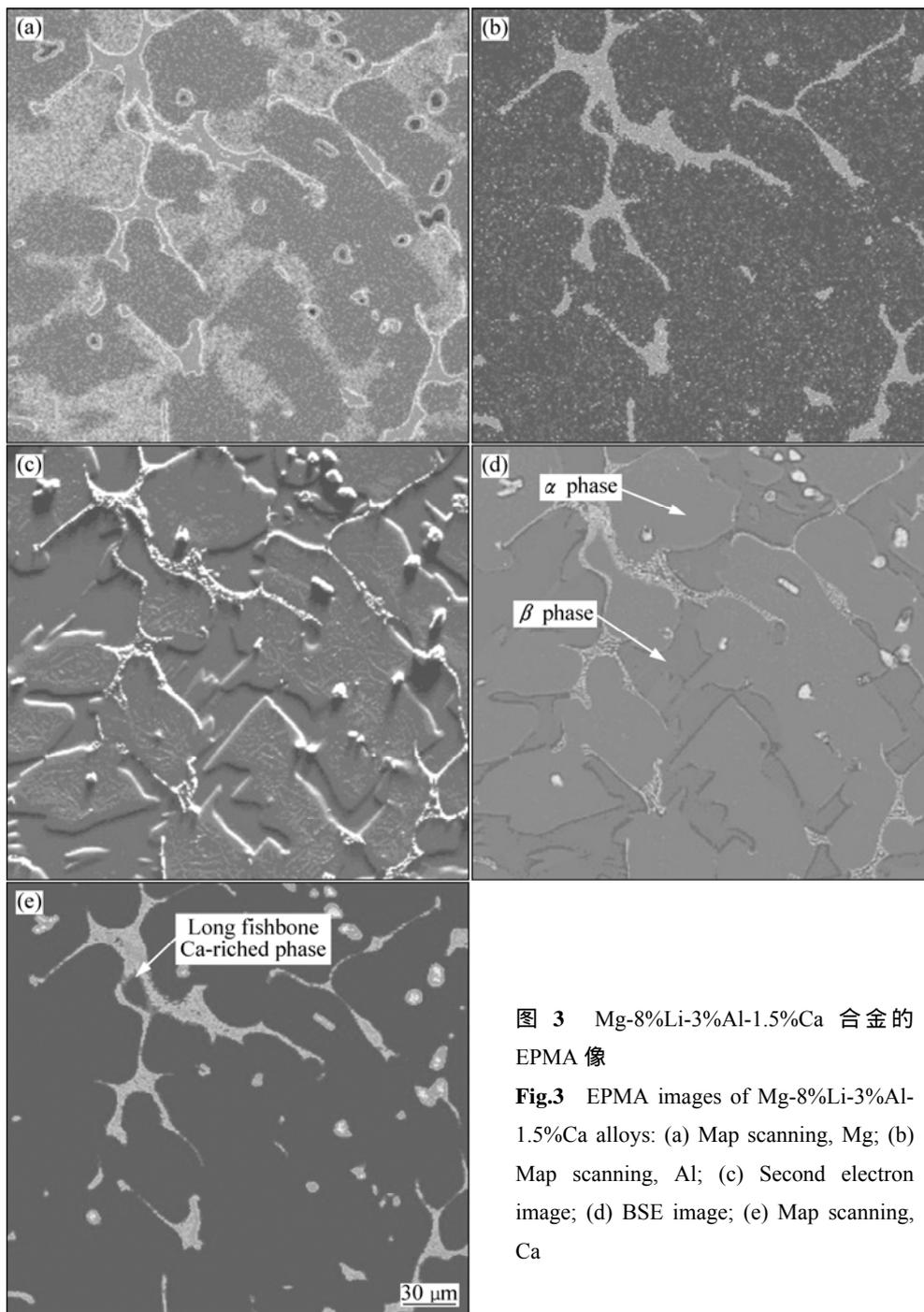


图 3 Mg-8%Li-3%Al-1.5%Ca 合金的 EPMA 像

Fig.3 EPMA images of Mg-8%Li-3%Al-1.5%Ca alloys: (a) Map scanning, Mg; (b) Map scanning, Al; (c) Second electron image; (d) BSE image; (e) Map scanning, Ca

加;当 Ca 的加入量为 0.5%时,合金的抗拉强度最好,抗拉强度和伸长率分别达到 188.93 MPa 和 11.35%;添加 1.0%Ca 时,抗拉强度和伸长率略有下降;当 Ca 含量增至 1.5%后,抗拉强度和伸长率迅速下降。

当 Ca 的加入量小于 0.5%时,Ca 细化了合金的显微组织,有助于强度的提高;另一方面,Ca 和 Li 形成的新相成颗粒状或者短棒状弥散分布于合金组织中,起了强化作用。添加 1.0%Ca 时,抗拉强度和伸长率略有下降,这是由于合金中 β 相大量减少而 α 相

大量分布, α 相是 Li 在 Mg 中的固溶体,密排六方结构,变形性差, β 相为 Mg 在 Li 中的固溶体,为体心立方结构,有较好的变形能力,这就使得合金随 β 相的减少伸长率下降。同时,在合金晶界上有化合物析出,部分割裂了基体。当 Ca 含量增至 1.5%后, Al_2Ca 相网状分布在相界处,将基体割裂开来,使合金容易在晶界处发生脆断,因而强度和塑性大大降低;另外,脆性相 Al_2Ca 呈鱼骨状析出,增加合金的脆性,常温抗拉强度和伸长率迅速下降。

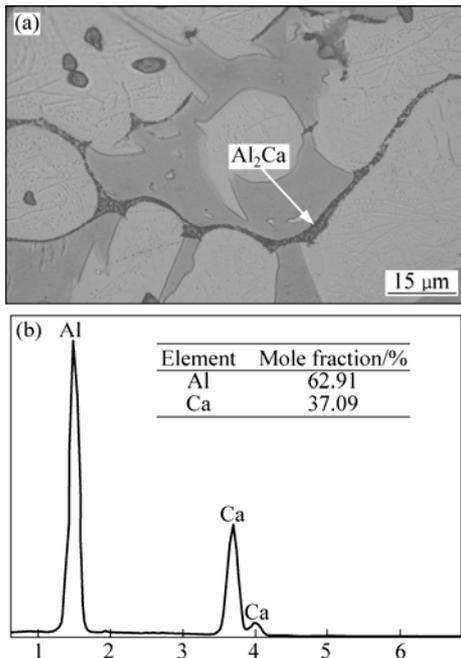


图4 Mg-8%Li-3%Al-1.5%Ca合金显微组织和EDS分析结果

Fig.4 Microstructure of Mg-8%Li-3%Al-1.5%Ca alloy (a) and EDS analysis results (b) of Al_2Ca in Fig.(a)

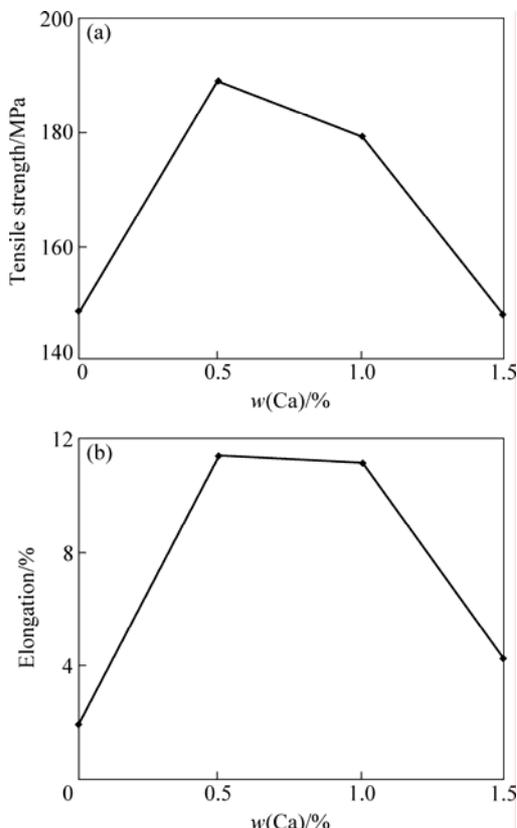


图5 Ca含量对Mg-8%Li-3%Al合金抗拉强度和伸长率的影响

Fig.5 Effects of Ca content on tensile strength (a) and elongation (b) of Mg-8%Li-3%Al alloy

2.3 Ca和电磁搅拌对Mg-Li-Al合金显微组织的影响

图6所示为合金化元素Ca的添加和电磁搅拌对Mg-8%Li-3%Al合金显微组织的影响。由图6可以看到,相对于无电磁搅拌无添加Ca得到的Mg-8%Li-3%Al合金铸锭的显微组织(见图6(a)),施加40V电磁场电压和添加0.5%Ca后,合金中的晶粒已经明显细化, α 相细小弥散分布;当电磁场电压增大到80V时,晶粒进一步细化,组织变得更为均匀有序;当电磁场电压增大到100V时, α 相粗大,合金组织不均匀。

在凝固过程中施加搅拌作用,由于在电磁场的作用下存在着电磁力,熔体产生强迫对流,使各部分的温度趋于一致,由于温度场和溶质场的均匀化,以及初生相合金的机械破碎、相互摩擦、破碎枝晶的异质形核作用,获得更多的结晶核心,使晶粒组织细化^[18]。当加入0.5%的钙后,在 α 相生长前沿会富集Ca原子,使 α 相的生长受阻。同时电磁搅拌促进溶质的扩散,同时还会使Ca元素更加均匀地分布在细化的 α 相的相界上,促使合金 α 相细小弥散分布。随着搅拌电压的增大,这种细化作用更加明显,但当电压增大到100V时,组织变得粗大不均匀。这是由于电磁搅拌强度过大造成的,即当搅拌强度达到一定的值时,晶粒的大小实际不再发生变化,即等轴晶率不再增加,这是造成100V时合金的晶粒没有进一步细化的一个原因。另外,电磁场能够产生热量加热金属熔体。并且磁场强度越大,感应加热也越多,熔体温度升高也就越快。当电磁场电压达到100V时,焦耳热的增加可能减慢了金属液的凝固过程,造成了部分晶粒的长大。

2.4 Ca的添加和电磁搅拌对Mg-Li-Al合金力学性能的影响

图7所示为元素Ca的添加和电磁搅拌对Mg-8%Li-3%Al合金布氏硬度的影响。由图7可看出,电磁场电压增至60V之前,布氏硬度变化不大;当电磁场电压增至60V之后,布氏硬度开始增大;当电磁场电压增至80V时,布氏硬度达到最大值为67.5HB,然后迅速下降。布氏硬度的变化曲线跟晶粒的大小密切相关,在对含钙量为0.5%的镁锂铝合金施加不同强度的磁场电压,当电压从40V到80V变化时, α 相微观组织变的愈加细小均匀,硬度也随着不断升高;到电压为100V时, α 相组织变的粗大,合金的硬度也急速下降,这符合Hall-Petch关系式。

图8所示为Ca的添加和电磁搅拌对Mg-8%Li-3%Al合金拉伸性能的影响。由图8可看出,电磁场电压增至60V之前,抗拉强度变化不大,约为200

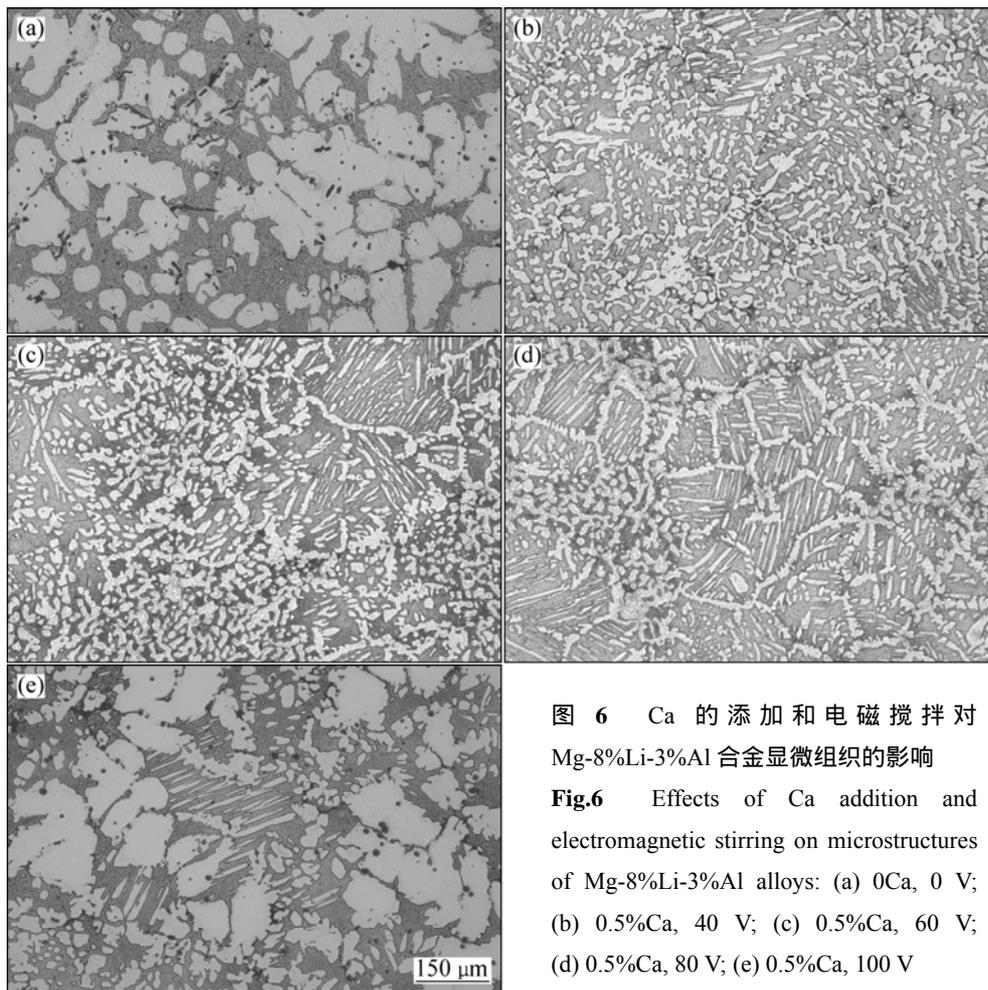


图 6 Ca 的添加和电磁搅拌对 Mg-8%Li-3%Al 合金显微组织的影响

Fig.6 Effects of Ca addition and electromagnetic stirring on microstructures of Mg-8%Li-3%Al alloys: (a) 0Ca, 0 V; (b) 0.5%Ca, 40 V; (c) 0.5%Ca, 60 V; (d) 0.5%Ca, 80 V; (e) 0.5%Ca, 100 V

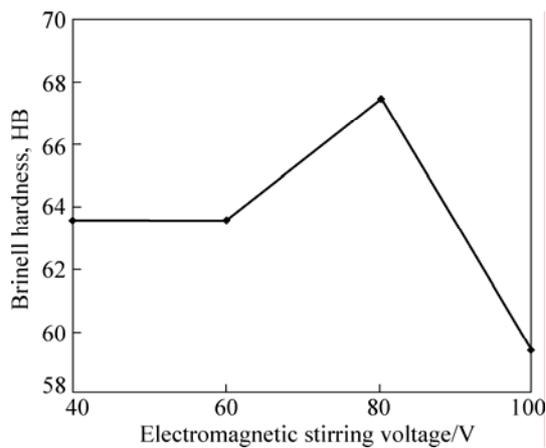


图 7 电磁搅拌对 Mg-8%Li-3%Al-0.5%Ca 合金布氏硬度的影响

Fig.7 Effects of electromagnetic stirring on Brinell hardness of Mg-8%Li-3%Al-0.5%Ca alloy

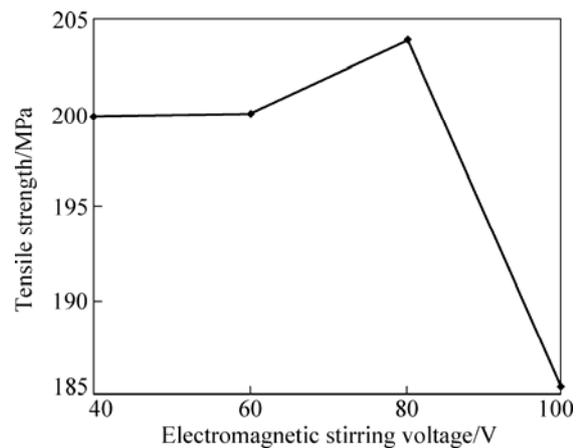


图 8 电磁搅拌对 Mg-8%Li-3%Al-0.5%Ca 合金抗拉强度的影响

Fig.8 Effects of electromagnetic stirring on tensile strength of Mg-8%Li-3%Al-0.5%Ca alloy

MPa ;电磁场电压增至 60 V 之后 ,抗拉强度开始增大 ;电磁场电压增至 80 V 时 ,抗拉强度达到最大值 ,为

203.8 MPa ,与无电磁搅拌无添加 Ca 情况下得到的合金(其抗拉强度为 148.41 MPa)相比 ,提高了 37.3% ;

继续加大电磁场电压,然后迅速下降,到100 V时,抗拉强度降为185.5 MPa,仍然远高于无电磁搅拌不添加Ca得到的合金。这说明Ca的添加和电磁搅拌的双重作用使合金晶粒细化,且使凝固过程传热传质过程得到改善,从而使合金的强度大幅提高。

图9所示为Ca的添加和电磁搅拌对Mg-8%Li-3%Al合金伸长率的影响。由图9可看出,在添加0.5%Ca、施加电磁场电压60 V之前,伸长率保持在10%左右;随着电磁场电压的增大,伸长率开始下降,电磁场电压达到100 V时,伸长率降为5.6%。伸长率受晶粒大小和Ca元素分布的影响,一方面晶粒细化能提高伸长率,另一方面添加Ca后,除了形成新相外,在晶界处Ca薄膜在晶粒周围的包裹使得晶粒相互隔离,降低晶间张力,这使得合金在发生微量塑性变形时,更倾向于过早发生断裂,这可能是伸长率稍差的原因。

图10所示为Ca的添加和电磁搅拌对Mg-8%Li-3%Al合金拉伸断口形貌的影响。由图10可看出:合金中不含Ca时,断口存在大量较深但孔径较大的等轴韧窝;添加0.5%Ca和经40 V电磁搅拌后,

出现了大量细孔径的等轴韧窝,说明合金的塑性较好;当电压增加到60 V和80 V时,仍旧有较多的细孔经的等轴韧窝,但韧窝相对较浅;电磁场电压达到100 V时,韧窝几近消失,合金具有沿晶断裂的特征,说明合

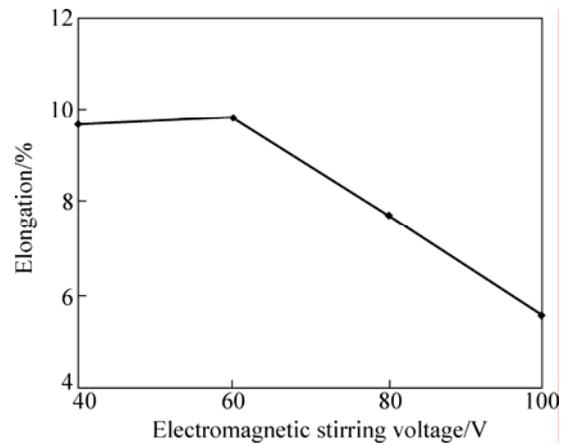


图9 电磁搅拌对Mg-8%Li-3%Al-0.5%Ca合金伸长率的影响

Fig.9 Effects of electromagnetic stirring on elongation of Mg-8%Li-3%Al-0.5%Ca alloys

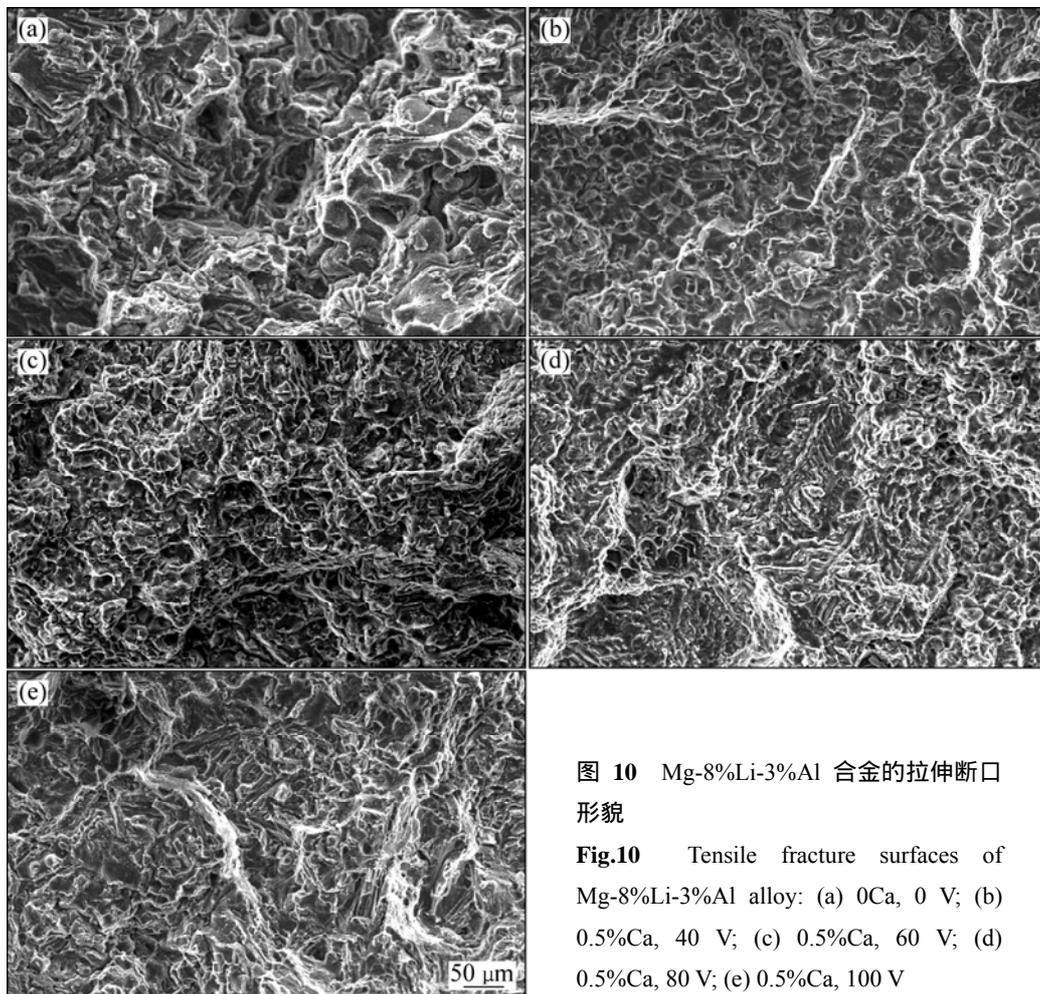


图10 Mg-8%Li-3%Al合金的拉伸断口形貌

Fig.10 Tensile fracture surfaces of Mg-8%Li-3%Al alloy: (a) 0Ca, 0 V; (b) 0.5%Ca, 40 V; (c) 0.5%Ca, 60 V; (d) 0.5%Ca, 80 V; (e) 0.5%Ca, 100 V

金塑性稍差。这主要是脆性的Ca化合物在晶界处的聚集致使合金拉伸时晶界处率先断裂,进而导致合金的塑性变差。

3 结论

1) 添加少量Ca(小于0.5%)时,合金的组织性能提高,这是由于新相 Al_2Ca 化合物的弥散分布及其对 β 相的细化作用;随着Ca含量(大于1.0%)的增大,合金组织性能全面下降,这是由于生成的脆性相 Al_2Ca 呈网状分布。

2) Ca含量为0.5%时,Mg-8%Li-3%Al合金的组织学和力学性能达到最佳:合金的 β 相细小均匀,室温抗拉强度和伸长率分别达到188.93 MPa和11.35%。

3) 添加0.5%Ca和施加80 V电磁场电压后,合金中的晶粒明显细化,组织均匀有序,Mg-8%Li-3%Al合金的硬度和强度最佳,硬度为67.5HB,抗拉强度为203.8 MPa。这是电磁场和合金化元素Ca共同作用的结果。

REFERENCES

- [1] 周惦武,庄厚龙,刘金水,彭平. 镁合金材料的研究进展与发展趋势[J]. 河南科技大学学报自然科学版, 2004, 25(3): 14-18.
ZHOU Dian-wu, ZHUANG Hou-long, LIU Jin-shui, PENG Ping. Research advancement and development trend of magnesium alloys[J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2004, 25(3): 14-18.
- [2] 阿合买提·依明,黄晋. Mg-Li合金国内外研究进展[J]. 新疆有色金属, 2008, 2: 100-101.
AHEMAITI Yi-ming, HUANG Jin. Advances of studies on Mg-Li alloy at home and abroad[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2008, 2: 100-101.
- [3] 乐启织,崔建忠,李红斌,张新建. Mg-Li合金研究最新进展及其应用[J]. 材料导报, 2003, 17(12): 1-4.
LE Qi-zhi, CUI Jian-zhong, LI Hong-bin, ZHANG Xin-jian. Current research developments in Mg-Li alloy and its applications[J]. Materials Review, 2003, 17(12): 1-4.
- [4] MORDIKE B L, EBERT T. Magnesium properties-application-potential[J]. Mater Sci Eng A, 2001, 302: 37-45.
- [5] 李红斌,姚广春,吉海滨,刘宜汉. 超轻Mg-Li-Zn系变形镁合金冷轧及热处理后的显微组织和性能[J]. 过程工程学报, 2005, 5(5): 563-567.
LI Hong-bin, YAO Guang-chun, JI Hai-bin, LIU Yi-han. Microstructures and properties of super light Mg-Li-Zn wrought alloys in cold-rolling and annealing states[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2005, 5(5): 563-567.
- [6] 黄清民,魏晓伟,周玉辉. LA141镁锂合金压缩蠕变性的研究[J]. 铸造, 2005, 54(11): 1079-1081.
HUANG Qing-min, WEI Xiao-wei, ZHOU Yu-hui. Compressive creep behavior of LA141 Mg-Li alloy[J]. Foundry, 2005, 54(11): 1079-1081.
- [7] 陈斌,冯林平,钟皓,周铁涛,刘培英. 变形Mg-Li-Al-Zn合金的组织与性能[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(10): 976-979.
CHEN Bin, FENG Lin-ping, ZHONG Hao, ZHOU Tie-tao, LIU Pei-ying. Microstructures and properties of a Mg-Li-Al-Zn wrought alloy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(10): 976-979.
- [8] 刘滨,张密林. Ce对Mg-Li-Al合金组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(5): 329-331.
LIU Bin, ZHANG Mi-lin. Effects of Ce on microstructure and mechanical properties of Mg-Li-Al alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2007, 27(5): 329-331.
- [9] WU Horng-yu, GAO Zhen-wei, LIN Jia-yu, CHIU Chui-hung. Effects of minor scandium addition on the properties of Mg-Li-Al-Zn alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 474: 158-163.
- [10] 李劲风,郑子樵,陶光勇. 超轻Mg-Li合金[J]. 轻合金加工技术, 2004, 32(10): 35-38.
LI Jin-feng, ZHENG Zi-qiao, TAO Guang-yong. Review on super light Mg-Li alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2004, 32(10): 35-38.
- [11] 于化顺,闵光辉,陈熙琛. 合金元素在Mg-Li基合金中的作用[J]. 稀有金属材料与工程, 1996, 25(2): 1-5.
YU Hua-shun, MIN Guang-hui, CHEN Xi-chen. Effect of alloying elements on Mg-Li base alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1996, 25(2): 1-5.
- [12] 曹林锋,杜文博,苏学宽,聂祚仁,左铁镛. Ca合金化在镁合金中的作用[J]. 铸造技术, 2006, 27(2): 182-184.
CAO Lin-feng, DU Wen-bo, SU Xue-kuan, NIE Zuo-ren, ZUO Tie-yong. Role of calcium alloying in magnesium alloys[J]. Foundry Technology, 2006, 27(2): 182-184.
- [13] 宫宁宁,张兴国,郝海,房灿峰,金俊泽. 钙对Mg-6Al变形镁合金显微组织和拉伸性能的影响[J]. 机械工程材料, 2008, 32(9): 20-23.
GONG Ning-ning, ZHANG Xing-guo, HAO Hai, FANG Can-feng, JIN Jun-ze. Effect of calcium on microstructure and tensile properties of Mg-6Al wrought magnesium alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008, 32(9): 20-23.
- [14] 齐雅丽,贾光霖,张国志. 电磁搅拌对液态金属运动及凝固

- 组织的影响[J]. 铸造技术, 2005, 26(2): 118-120.
- QI Ya-li, JIA Guang-lin, ZHANG Guo-zhi. Effect of electromagnetic stirring on liquid metal fluid flow and solidification structure[J]. Foundry Technology, 2005, 26(2): 118-120.
- [15] 卞 之. 电磁铸造及其材料宏观组织的形成机制[J]. 铸造技术, 2004, 25(7): 496-497.
- BIAN Zhi. Electromagnetic casting and the forming mechanism of the casting macrostructure[J]. Foundry Technology, 2004, 25(7): 496-497.
- [16] 刘 倩, 唐靖林, 曾大本. Sr 与电磁搅拌对 AZ91D 合金显微组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(1): 63-65.
- LIU Qian, TANG Jing-lin, ZENG Da-ben. Effects of Sr and electromagnetic stirring on microstructure of AZ91D alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2008, 28(1): 63-65.
- [17] SONG G S, KRAL M V. Characterization of cast Mg-Li-Ca alloys[J]. Materials Characterization, 2005, 54: 279-286.
- [18] 詹美燕, 李元元, 陈维平. 电磁搅拌铸造及其在镁合金上的应用[J]. 轻合金加工技术, 2007, 35(8): 6-10.
- ZHAN Mei-yan, LI Yuan-yuan, CHEN Wei-ping. Electro-magnetic stirring casting processing and its application on magnesium alloys[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2007, 35(8): 6-10.

(编辑 李艳红)