



超轻 Mg-Li-Al 系变形镁合金挤压板材的组织及性能

李瑞红¹, 蒋 斌², 陈志军³, 潘复生⁴

(1. 内蒙古科技大学 材料与冶金学院, 包头 014010;

2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044;

3. 内蒙古第一机械集团有限公司 第十分公司, 包头 014030;

4. 重庆大学 国家镁合金工程技术研究中心, 重庆 400044)

摘 要: 通过 OM、SEM、XRD 和拉伸实验研究 3 种典型的 Mg-Li-Al 合金的铸态和挤压态组织及力学性能。结果表明: 随着 Li 含量的增加, 合金的结构从密排六方向体心立方转变, 合金的铸态组织随之发生改变。经过 250 °C 挤压处理后, Mg-5Li-1Al 和 Mg-9Li-1Al 合金的晶粒沿挤压方向呈方向性排列, Mg-14Li-1Al 合金由均匀的等轴晶(再结晶晶粒)组成。随着 Li 含量的增加, 挤压态合金板材的屈服强度逐渐增大, 其中挤压态 Mg-9Li-1Al 合金板材的综合力学性能最佳(屈服强度达到 149 MPa, 伸长率达到 25%)。

关键词: 镁锂合金; 挤压; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG113.25 TG146.22

文献标志码: A

作为最轻的金属结构材料, 镁锂合金具有比强度和比刚度高、阻尼减震性能优良、抗高能粒子穿透能力强, 尤其是其变形性能的优势, 使得它在宇航、兵器、汽车、电子等领域有广阔的应用前景^[1-4]。根据 Mg-Li 合金相图^[5-7], 随着 Li 含量的增加, Mg-Li 合金可分为 α 相合金($w(\text{Li}) < 5.5\%$)、 $\alpha+\beta$ 两相合金($5.5\% < w(\text{Li}) < 11\%$)和 β 相合金($w(\text{Li}) > 11\%$)。其中 α 相为锂固溶于镁中的固溶体, 具有密排六方晶体(HCP)结构; β 相为镁固溶于锂中的固溶体, 具有体心立方(BCC)结构。由于体心立方结构的出现, 使 Mg-Li 合金的塑性得到极大改善, 并改变了镁合金因滑移系少、加工成型困难的缺点, 从而引起各国研究者的极大兴趣^[8-11]。

同时, 随着 Li 含量的增加, 镁锂合金的强度、耐腐蚀性及抗蠕变性能下降比较多。为得到性能优良、稳定性好的镁锂系合金, 合金化作为一种强化手段, 被广泛应用。铝在固态镁中有较大的固溶度, 它是 Mg-Li 合金的主要强化元素之一^[12-14]。近年来, 已经广泛应用的 Mg-Li-Al 合金主要有 Mg-14Li-1Al(LA141)、Mg-9Li-1Al(LA91)等。

由于 Li 元素的出现, 使得镁锂合金的结构发生了变化。因此, 近年来对于镁锂合金的研究在逐年增加,

研究人员的主要精力集中于镁锂合金中的结构转变, 对于单相合金而言, 随着 Li 含量的增加, 其性能的变化以及其中的机理研究^[15-18]。WANG 等^[19]研究了随着 Li 含量的增加, 铸态镁锂合金的阻尼性能, 但是并没有研究其力学性能的变化。XU 等^[1]研究 Mg-8Li-3Al-0.5Mn-Sr 合金的铸态及挤压态显微组织, 同时也研究了挤压棒材的力学性能。结果表明: LAM830-0.75Sr 合金的抗拉强度可以达到 265.46 MPa, 但其伸长率只有 17.1%。随着镁合金产品的逐步推广, 作为高技术含量、高附加值的产品, 镁合金板材是支撑镁合金广泛应用的主要基础结构材料。因此, 如何在密度、塑性和强度三者之间取得较好的结果是 Mg-Li 系合金板材发展和应用中的关键问题。本文作者对 3 种不同锂含量、较为典型的 Mg-Li-Al 合金的组织与力学性能进行了研究, 以期对镁锂合金板材的广泛应用提供理论依据。

1 实验

本实验中所用原料为 99.90%Mg、99.90%Li、

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2015BS0512); 内蒙古科技大学创新基金资助项目(2014QDL016); 国家自然科学基金资助项目(51171212)

收稿日期: 2015-05-08; **修订日期:** 2015-10-18

通信作者: 李瑞红, 讲师, 博士; 电话: 0472-6896872; E-mail: liruihong1019@163.com

99.90%Al(质量分数)。实验所使用的合金是在真空感应熔炼炉中,采用氩气气氛保护熔炼而成。按照纯锂锭的质量计算设计合金的质量。首先,将纯镁锭和纯铝锭按照设定成分进行切割、称量、打磨、清洗,使其表面光滑无氧化层。其次,将熔炼炉加热至 150 ℃ 烘干,把所有原料快速加入到熔炼炉中的坩埚,并将炉密封;对感应熔炼炉抽真空至气压 $\leq 1 \times 10^{-2}$ Pa,然后充入纯氩气至 30 kPa;之后将感应炉加热进行熔炼,待原料充分熔化后,在 720 ℃ 保温静置 20 min,然后加大氩气的通入量增加炉膛内压力,将熔体压入预热的金属模具(模具尺寸为 $d168 \text{ mm} \times 510 \text{ mm}$)中;待铸锭在空气中冷却后,从模具中取出。为防止金属锂被氧化,实验全程在氩气保护下进行。合金的实测化学成分如表 1 所列。

表 1 试验合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of alloys

Alloy	Chemical composition, w/%		
	Li	Al	Mg
LA51	4.72	0.98	Bal.
LA91	8.31	1.14	Bal.
LA141	14.3	1.11	Bal.

合金铸锭经 250 ℃ 保温 10 h 均匀化处理后,在 1250T 型挤压机上挤压成宽 120 mm、厚 2 mm 的板材。挤压方式为正向热挤压,挤压比为 83.7。由于锂含量不同,3 种合金的变形温度也不同,LA51 的挤压温度为 350 ℃,而 LA91 与 LA141 合金的挤压温度设定为 280 ℃。从铸态及挤压态合金上分别截取试样,在 Newphot-30 型金相显微镜观察组织形貌,采用 Rigaku D/max 2500PC X 型射线衍射仪进行合金相成分分析。采用 CMT5000 系列微机控制电子万能试验机对挤压态合金进行力学性能测试,按照与挤压方向呈 0°、45°、90° 3 个方向取样,力学性能数据取至 3 个试样的平均值。

2 结果与分析

2.1 合金的显微组织

图 1 所示为 3 种铸态合金的 XRD 谱。从图 1 中可以看出,3 种合金的相组成完全不同:LA51 合金主要由 α -Mg 单相组成(见图 1(a)),LA91 合金主要由 α -Mg 和 β -Li 相组成(见图 1(b)),而 LA141 合金则主要由 β -Li 组成(见图 1(c))。另外,在 LA91 和 LA141

合金中还有少量的 LiMgAl_2 相存在,这种相组成也与后面的显微组织相对应。

图 2 所示为 3 种合金的铸态显微组织。如图 2(a)所示,LA51 合金由均匀的等轴状晶粒组成,晶粒内

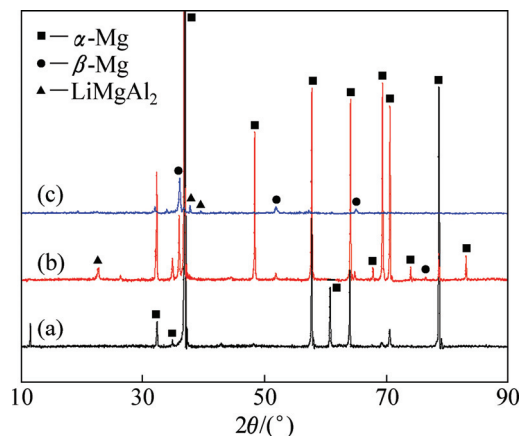


图 1 试验合金的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of studied alloys: (a) LA51; (b) LA91; (c) LA141

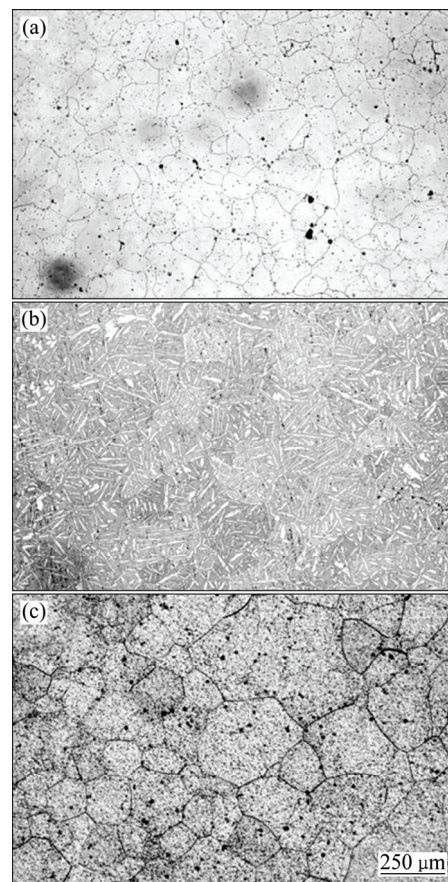


图 2 试验合金的铸态金相组织

Fig. 2 As-cast optical microstructures of studied alloys: (a) LA51; (b) LA91; (c) LA141

几乎没有其他相的存在。LA91 合金由细小白色针状的 α -Mg(HCP)相和灰色 β -Li(BCC)相组成(见图 2(b))。LA141 铸态合金的晶粒比较粗大(见图 2(c))。

图 3 所示为不同 Li 含量的 3 种镁锂合金的挤压态组织。由图 3 可以看出, 3 种合金的组织较铸态时细小许多。其中 LA51 合金由均匀细小的再结晶晶粒组成, 大部分晶粒沿着挤压方向(ED)排列。LA91 合金仍然由两相组成, 只是 α 相与 β 相沿挤压方向呈现出明显的方向性。LA141 合金虽然与 LA91 的挤压温度相同, 但表现出截然不同的组织形貌, 由均匀的再结晶晶粒组成。

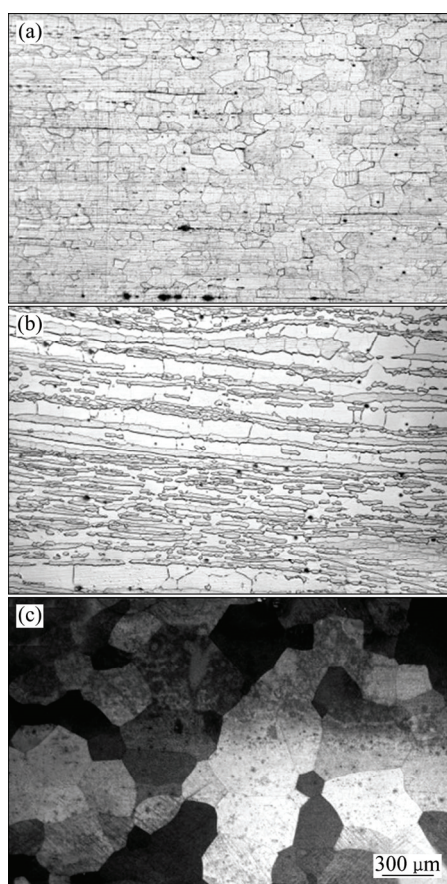


图 3 试验合金的挤压态组织

Fig. 3 As-extruded microstructures of studied alloys: (a) LA51; (b) LA91; (c) LA141

2.2 挤压态合金的力学性能

对挤压态的试验合金进行了拉伸实验, 其实验结果如表 2 所列。由于基体相的不同, 3 种合金表现出不同的力学性能。在本试验范围内, 屈服强度(YS)随着 Li 含量的增加而增大(沿各个方向的数据变化一致), 这与许天才等^[20]的研究结果不符, 而伸长率在 Li 含量为 9%时达到最大值。LA141 合金的屈服强度比较大, LA51 合金在各个方向上的塑性各向异性最小。

表 2 挤压态合金沿着不同方向的力学性能

Table 2 Mechanical properties of extruded alloys along different tensile directions

Alloys	Tensile strength/MPa			Yield strength/MPa			Elongation/%		
	ED	45°	TD	ED	45°	TD	ED	45°	TD
LA51	171	148	155	102	77	67	23	34	34
LA91	163	138	177	131	114	149	35	56	25
LA141	159	157	166	147	149	157	21	20	12

2.3 合金的断口形貌

3 种挤压态合金板材拉伸后的断口形貌如图 4 所示。由图 4 可见, 3 种合金的拉伸断口完全不同。LA51 合金的断口以解理面和解理台阶为主, 呈现脆性断裂

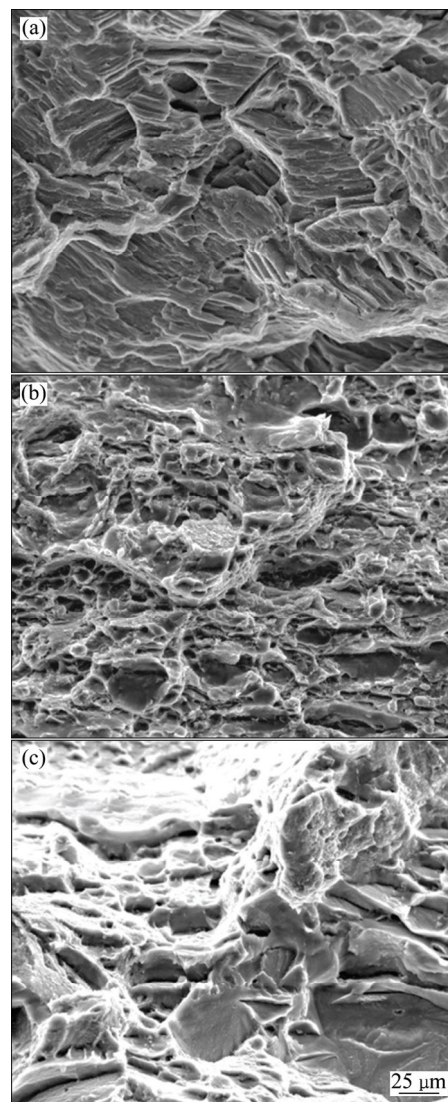


图 4 实验合金沿挤压方向拉伸后的断口形貌

Fig. 4 Fracture surface morphologies of extruded alloys tested along ED: (a) LA51; (b) LA91; (c) LA141

机制(见图 4(a)); LA91 合金断口为大量密集且较深的韧窝,表明该合金主要以韧性断裂为主(见图 4(b)); LA141 合金的断口上既有解理面,又有小而深的韧窝,呈现脆性和韧性混合的断裂机制(见图 4(c))。3 种合金断裂方式的不同主要与合金的晶体结构有关。虽然 LA51 合金的塑性较好(伸长率达到 23%,较 LA141 的伸长率高),但其晶体结构仍为密排六方,在室温下的变形没有体心立方结构合金的容易。LA141 合金由于体心立方结构的出现,断口形貌呈现脆性和韧性混合断裂特征。LA91 合金由于 α 相和 β 相的相互协调作用,使其具有较好的塑性,因而断口形貌呈现韧性断裂特征。

2.4 合金的力学性能变化

挤压变形是提高合金力学性能的有效手段之一。在一定的温度条件下施加应力,使原有的组织形貌完全破碎,同时获得较为细小的部分再结晶或完全再结晶晶粒组织。挤压变形还能使铸态合金中存在的一些气孔和显微裂纹消失。在挤压变形过程中还有可能伴随着固态相变的发生,由于组织细化及一定数量的弥散相的出现,使得挤压变形后合金的力学性能往往会显著提升^[21-23]。

通常情况下,随着 Li 含量的增加,由于具有体心立方结构的 β -Li 相的出现,合金的塑性随之增加,合金的强度则随之下降。而本试验中的结果则与之不同。挤压态 LA141 合金板材的屈服强度最大,伸长率最小;但 LA91 的伸长率最佳。

对于 α -Mg 基合金而言,较“软”的相为 α -Mg 相,即位错更容易在大晶粒尺寸的 α -Mg 相中开动。LA51 由于是以密排六方 α 相为基体,故其拉伸强度较其他高锂含量合金的高。文献[2, 24]中报道,在镁中添加 Li 元素,会使镁的轴比 c/a 降低,原子间距的减小降低了六方晶格沿 $\{1010\}\langle 1210 \rangle$ 棱面滑移的启动能,从而使得非基面滑移在室温下与基面滑移同时发生。因此,对于 α 单相的 Mg-Li 合金,虽仍为 HCP 结构,也具有良好的变形能力,且各向异性行为减弱。但从另一方面来讲,由于非基面滑移的启动,使得位错的移动较为容易,所以合金的强度会比常规镁合金的强度低,如 AZ31(Mg-3Al-1Zn)合金^[25-26]。这与本实验中 LA51 合金的研究较为符合。

当继续增加 Li 含量,合金的组织由 α (HCP) $\rightarrow \alpha + \beta \rightarrow \beta$ (BCC)转变,合金的塑性变形能力进一步得到改善,使其在室温下的伸长率得到提高。在 LA91 合金中,由于 BCC 结构的 β 相和 HCP 结构的 α 相的相互协调作用,从图 3(b)中可以看出,在挤压变

形过程中, α -Mg 相及 β -Li 相均沿挤压方向呈现带状分布。这也说明在 β -Li 相存在的情况下, α -Mg 相的变形更加顺利,使得合金的强度和塑性大为改善。当 Li 含量增加到 14%时,合金完全由 β -Li 相组成,在挤压变形的作用下,LA141 合金的晶粒尺寸较铸态时细化更多,同时,本实验采用的挤压温度较低,所以,LA141 合金的屈服强度较高。这也说明了本实验工艺制备的 LA141 合金的力学性能较好。在本实验中,LA91 合金的屈服强度较 LA141 合金的略低,但其屈服强度比也较 LA141 的低,故可通过冷变形进一步强化。

3 结论

- 1) 随着 Li 含量的增加,合金的结构由 α -Mg(HCP) 向 β -Li(BCC)转变,且合金的组织随之发生改变。
- 2) 挤压后 LA51 和 LA91 合金的晶粒沿挤压方向呈现方向性排列,LA141 合金的晶粒由均匀的再结晶晶粒构成。
- 3) 随着 Li 含量的增加,挤压态合金板材的屈服强度随之增加,这与合金的结构和织构有关。LA91 的综合力学性能最佳。

REFERENCES

- [1] XU Tian-cai, PENG Xiao-dong, JIANG Jun-wei, XIE Wei-dong, CHEN Yuan-fang, WEI Guo-bing. Effect of Sr content on microstructure and mechanical properties of Mg-Li-Al-Mn alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24 (9): 2752-2760.
- [2] 吴章斌, 桂良进, 范子杰. AZ31B 镁合金挤压材料的力学性能与本构分析[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 293-300.
WU Zhang-bin, GUI Liang-jin, FAN Zi-Jie. Mechanical properties and constitutive analysis of extruded AZ31B magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 293-300.
- [3] DONG Han-Wu, PAN Fu-Sheng, JIANG Bin, LI Rui-Hong, HUANG Xiao-Yong. Mechanical properties and deformation behaviors of hexagonal Mg-Li alloys[J]. Materials & Design, 2015, 65: 42-49.
- [4] SUH B, SHIM M, SHIN K S, KIM N J. Current issues in magnesium sheet alloys: Where do we go from here? [J] Scripta Materialia, 2014, 84/85: 1-6.
- [5] 王军武, 刘旭贺, 王飞超, 肖 阳. 航空航天用高性能超轻镁锂合金[J]. 军民两用技术与产品, 2013(6): 21-24.
WANG Jun-wu, LIU Xu-he, WANG Fei-chao, XIAO Yang. High performance super light magnesium lithium alloy used in

- aerospace[J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2013(6): 21–24.
- [6] 宋波, 辛仁龙, 郭宁, 刘婷婷, 杨青山. 变形镁合金室温应变硬化行为的研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(11): 2699–2710.
- SONG Bo, XIN Ren-long, GUO Ning, LIU Ting-Ting, YANG Qing-shan. Research progress of strain hardening behavior at room temperature in wrought magnesium alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(11): 2699–2710.
- [7] YIN Heng-mei, JIANG Bin, HUANG Xiao-yong, ZENG Ying, YANG Qing-shan, ZHANG Ming-xing. Effect of Ce addition on microstructure of Mg-9Li alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(7): 1936–1941.
- [8] 崔崇亮, 朱天龙, 冷哲, 巫瑞智, 张景怀, 张密林. 复合添加Y和Nd对Mg-Li合金显微组织及室温压缩结构的影响[J]. *金属学报*, 2012, 48(6): 725–732.
- CUI Chong-liang, ZHU Tian-long, LENG Ze, WU Rui-zhi, ZHANG Jing-huai, ZHANG Ming-lin. Effects of combined addition of Y and Nd on microstructure and texture after compression of Mg-Li alloy at room temperature[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2012, 48(6): 725–732.
- [9] LI Rui-hong, PAN Fu-sheng, JIANG Bin, YANG Qing-shan, TANG Ai-tao. Effects of combined additions of Li and Al-5Ti-1B on the mechanical anisotropy of AZ31 magnesium alloy[J]. *Materials & Design*, 2013, 46: 922–927.
- [10] DING Han-lin, ZHANG Peng, CHENG Guang-ping, KAMADO S. Effect of calcium addition on microstructure and texture modification of Mg rolled sheets[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(9): 2875–2883.
- [11] LI Rui-hong, PAN Fu-sheng, JIANG Bin, DONG Han-wu, YANG Qing-shan. Effect of Li addition on the mechanical behavior and texture of the as-extruded AZ31 magnesium alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2013, 562: 33–38.
- [12] 余远清. 新型超轻Mg-Li-Al-Gd合金制备及组织性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- YU Yuan-qing. Preparation and research on microstructure and properties of new ultralight Mg-Li-Al-Gd alloys[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [13] 李明, 郝海, 张爱民, 宋迎德, 张兴国. Al-Ti-C中间合金对Mg-8Li-3Al合金组织和性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2013, 33(1): 81–84.
- LI Ming, HAO Hai, ZHANG Ai-ming, SONG Ying-de, ZHANG Xing-guo. Effects of Al-Ti-C master alloy on microstructure and mechanical properties of Mg-8Li-3Al alloy[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2013, 33(1): 81–84.
- [14] YANG Yan, PENG Xiao-dong, WEN Hai-ming, ZHENG Bao-long, ZHOU Yi-zhang, XIE Wei-dong, LAVERNIA E J. Influence of extrusion on the microstructure and mechanical behavior of Mg-9Li-3Al-xSr alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2013, 44(2): 1101–1113.
- [15] ZHU Tian-long, SUN Jian-feng, CUI Chong-liang, WU Rui-zhi, BETSOFFEN S, LENG Zhe, ZHANG Jing-huai, ZHANG Mi-lin. Influence of Y and Nd on microstructure, texture and anisotropy of Mg-5Li-1Al alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2014, 600: 1–7.
- [16] ZHOU Li-juan, SU Ke-he, WANG Yan-li, ZENG Qing-feng, LI Yu-long. First-principles study of the properties of Li, Al and Cd doped Mg alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 596: 63–68.
- [17] SHIN I, CARTER E A. First-principles simulations of plasticity in body-centered-cubic magnesium-lithium alloys[J]. *Acta Materialia*, 2014, 64: 198–207.
- [18] KIM Y, KIM J, YU H, CHOI J, SON H. Microstructure and mechanical properties of Mg-xLi-3Al-Sn-0.4Mn alloys (x=5, 8 and 11wt%)[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 583: 15–20.
- [19] WANG Jing-feng, XU Dan-dan, LU Ruo-peng, PAN Fu-sheng. Damping properties of as-cast Mg-xLi-1Al alloys with different phase composition[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(2): 334–348.
- [20] 许天才, 彭晓东, 张玺, 陈元芳, 姜军伟, 陈洁. Mg-xLi-Al变形镁合金微观组织与拉伸性能[J]. *功能材料*, 2014, 45(7): 7066–7069.
- XU Tian-cai, PENG Xiao-dong, ZHANG Xi, CHEN Yuan-fang, JIANG Jun-wei, CHEN Jie. Microstructure and tensile properties of Mg-xLi-Al wrought alloy[J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, 45(7): 7066–7069.
- [21] 许天才, 彭晓东, 张宝, 魏国兵, 陈元芳, 姜军伟. 微量Sr和Mn对Mg-8Li-3Al变形合金力学性能的影响[J]. *材料研究学报*, 2014, 28(9): 649–656.
- XU Tian-cai, PENG Xiao-dong, ZHANG Bao, WEI Guo-bing, CHEN Yuan-fang, JIANG Jun-wei. Effects of minor addition of Sr and Mn on mechanical properties of micro-alloying Mg-8Li-3Al wrought alloy[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2014, 28(9): 649–656.
- [22] 程丽任. 铸造态、挤压态、半固态Mg-Li-Al系合金组织和力学性能研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2011.
- CHENG Li-ren. Investigation on microstructure and mechanical properties of as-cast, extruded and semisolid Mg-Li-Al magnesium alloys[D]. Jilin: Jilin University, 2011.
- [23] GUO Fei, ZHANG Ding-fei, YANG Xu-sheng, JIANG Lu-yao, PAN Fu-sheng. Microstructure and texture evolution of AZ31 magnesium alloy during large strain hot rolling[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(1): 14–21.
- [24] LENTZ M, COELHO R S, CAMIN B. In-situ, ex-situ EBSD and (HR-) TEM analyses of primary, secondary and tertiary twin development in an Mg-4wt%Li alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2014, 610: 54–64.
- [25] YIN De-liang, LIU Jin-qiang, WU Bing. Deformation

mechanisms of Mg-3Al-1Zn alloy by polycrystal plasticity modeling[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(7): 2188–2194.

[26] LU Li-wei, LIU Tian-mo, CHEN Yong, WANG Li-guang,

WANG Zhong-chang. Double change channel angular pressing of magnesium alloys AZ31[J]. Materials & Design, 2012, 35: 138–143.

Microstructure and mechanical properties of as-extruded ultra-light Mg-Li-Al sheet

LI Rui-hong¹, JIANG Bin², CHEN Zhi-jun³, PAN Fu-sheng⁴

(1. School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. The Tenth Sub-company, Inner Mongolia First Machinery Group Corporation, Baotou 014030, China;

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

Abstract: The as-cast and extruded microstructures and mechanical properties of three kinds of Mg-Li-Al alloys were studied by optical microscopy, SEM, XRD and tensile test. The results show that, with the increase of lithium additions, the crystal structure transforms from close-packed hexagonal (HCP) structure to body centered cubic (BCC) structure, and the as-cast microstructures of the Mg-Li-Al alloys change correspondingly. After extrusion at 250°C, the grain of Mg-5Li-1Al and Mg-9Li-1Al alloys are arranged along the extruded direction, but the microstructures of Mg-14Li-1Al alloy sheet consist of equiaxed crystals. The yield stress of the extruded alloys is improved gradually with the increase of lithium content. The extruded Mg-9Li-1Al alloy obtains the optimal mechanical properties (the yield stress and elongation are 149 MPa and 25%, respectively), along the transverse direction.

Key words: Mg-Li alloy; extrusion; microstructure; mechanical property

Foundation item: Project (2015BS0512) supported by the Natural Science Foundation of the Inner Mongolia Autonomous Region, China; Project (2014QDL016) supported by Inner Mongolia University of Science and Technology Innovation Fund, China; Project (51171212) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2015-05-08; **Accepted date:** 2015-10-18

Corresponding author: LI Rui-hong; Tel: +86-472-6896872; E-mail: liruihong1019@163.com

(编辑 李艳红)