

Ca 和 Mn 微合金化对 Mg-14Li-3Al-0.5Y 合金微观组织和力学性能的影响

刘文才¹ 孙家伟¹ 张泉达² 高占奎¹ 吴国华¹ 丁文江¹
(1.上海交通大学材料科学与工程学院,轻合金精密成型国家工程研究中心;
2.北京机科国创轻量化科学研究院有限公司)

摘要 通过在强度较高而塑性不足的 Mg-14Li-3Al-0.5Y 合金基础上分别添加微量 Ca、Mn 元素,以研究 Ca 和 Mn 微合金化对铸态合金微观组织和力学性能的影响。结果发现,添加微量 Ca 使合金中生成了分布于 β -Li 晶界的半连续网状 Al_2Ca 相,消耗了具有固溶强化效果的 Al 元素, β -Li 显著细化。微量 Mn 的加入使合金中生成了弥散分布于 β -Li 基体的含 Mn 相和 Al_2Mn_3 相,显著抑制了 β -Li 的长大。开发了具有超低密度(1.36 g/cm^3)、高伸长率(11%)的新型 Mg-14Li-3Al-0.5Y-0.2Mn 合金,其屈服强度和抗拉强度分别达到 144 MPa 和 175.5 MPa。

关键词 Mg-Li 合金;单相 β -Li;显微组织;力学性能

中图分类号 TG146.22 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.07.003 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of Ca and Mn Microalloying on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-14Li-3Al-0.5Y Alloy

Liu Wencai¹, Sun Jiawei¹, Zhang Quanda², Gao Zhankui¹, Wu Guohua¹, Ding Wenjiang¹

(1.National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University; 2.Beijing National Innovation Institute of Lightweight Co., Ltd.)

Abstract: The influence of Ca and Mn microalloying on microstructure and mechanical properties of Mg-14Li-3Al-0.5Y alloy with high strength and low density was investigated. The results indicate that the addition of Ca leads to the formation of semi-continuous netlike Al_2Ca phase distributed in the β -Li grain boundary in the alloy, which consumes the Al element with solid solution strengthening effect and significantly refines the β -Li. The addition of Mn can generate the Mn phase and Al_2Mn_3 phase dispersed in the β -Li matrix in the alloy, which inhibits the growth of β -Li. The superlight Mg-14Li-3Al-0.5Y-0.2Mn alloy with ultra-low density (1.36 g/cm^3) and high elongation (11%) was developed, of which the strength and tensile strength reach 144 MPa and 175.5 MPa, respectively.

Key Words: Mg-Li Alloy, Single Phase β -Li, Microstructure, Mechanical Properties

收稿日期:2021-04-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51771115,U2037601);先进成形技术与装备国家重点实验室开放基金资助项目(SKL2020005);航天一院高校联合创新基金资助项目(CALT2020-TS07)
第一作者简介:刘文才,男,1980 年出生,副研究员,上海(200240),E-mail: liuwc@sjtu.edu.cn
引用格式:刘文才,孙家伟,张泉达,等. Ca 和 Mn 微合金化对 Mg-14Li-3Al-0.5Y 合金微观组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(7):808-813.
LIU W C, SUN J W, ZHANG Q D, et al. Influence of Ca and Mn microalloying on microstructure and mechanical properties of Mg-14Li-3Al-0.5Y Alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7):808-813.

压铸造工艺方案进行优化后,整个铸造过程中铸件可以保持平稳充型和自上而下的顺序凝固,并且不会出现孤立液相区,热节部位的金属熔体也能到充分补缩,可以有效避免缩孔、缩松缺陷产生。

(3)优化方案的有效性得到了生产试制结果的验证,按照优化工艺方案试制的铸件各项品质和性能指标均满足使用要求。

参 考 文 献

[1] 李家奇,杨钢,陈俊宇,等.汽车轻量化铝合金研究进展[J].云南治

金,2020,49(5):68-75.

[2] 范子杰,桂良进,苏瑞意.汽车轻量化技术的研究与进展[J].汽车安全与节能学报,2014,5(1):1-16.

[3] 柳百成.铸造技术与计算机模拟发展趋势[J].铸造技术,2005,26(7):611-617.

[4] 孙冬恩,程和法,周宏伟,等.低压铸造铝合金轮毂的数值模拟及工艺优化[J].特种铸造及有色合金,2020,40(7):763-767.

[5] 白清华.低压铸造大型壁厚不均铸件缩松的解决[J].特种铸造及有色合金,2009,29(5):434-435,388.

[6] 邱孟书,王小平.低压铸造实用技术[M].北京:机械工业出版社,2011.

(编辑:彭瑾)

Mg-Li 合金具有较高的比强度,良好的阻尼和塑性变形能力以及出色的电磁屏蔽性能,是航空航天、军事、3C 工业和医疗设备领域最理想和最有前途的金属结构材料之一。Mg-Li 合金的应用有望成为航空航天以及军工领域减少装备质量的有效手段^[1,2]。

在 Mg-Li 二元合金中,Li 含量的增加会降低密排六方的轴比(c/a),进而引起 Mg-Li 合金晶体结构从密排六方堆积(hcp)向体心立方(bcc)转变^[3,4]。当 Li 含量低于 5.7% 时,Mg-Li 合金由 hcp 结构的单相 α -Mg 构成;当 Li 含量为 5.7%~10.3% 时,Mg-Li 合金呈现典型的 α -Mg+ β -Li 双相组织;当 Li 含量超过 10.3% 时,合金的显微组织将由双相($\alpha+\beta$)转变为单相(β)。 β -Li 是以 Li 为基体的固溶体,由于 bcc 的晶体结构具有更多的滑移系,单相 β -镁锂合金具有更好的塑性。

目前已有单相 β -镁锂合金实现商业应用,如 Mg-14Li-1Al 合金(密度仅为 1.333 g/cm³),但是其实际应用潜力之间仍存在较大差距,主要原因在于该成分合金强度低、耐腐蚀性差、易时效软化^[5]。而添加合金化元素被认为是有效的解决方法之一。Mg-Li 合金常用的合金化元素包括 Al、Zn、Gd、Y、Mn、Ca、Ce、Ag 等^[6]。

GAO Z K 等^[7]研究了 Al 和 Y 对铸态 Mg-14Li 合金(β -Li 单相合金)显微组织和力学性能的影响,发现 Al 可以高效地强化 Mg-14Li 合金,但塑性会显著恶化;少量的稀土元素 Y 能够进一步增强合金性能并且改善伸长率。最后优化出具有较高强度的 Mg-14Li-3Al-0.5Y 合金(LA143-0.5Y),其屈服强度和抗拉强度分别可达 187.5 MPa 和 205.5 MPa,但由于其伸长率过低,仅为 3.1%,限制了其在航空航天领域上的应用。

本课题主要研究在 LA143-0.5Y 合金成分的基础上添加其他合金元素,进而改善其伸长率较低的问题。金属元素 Ca 和 Mn 的添加能显著细化晶粒,细小的晶粒在合金发生变形时可以分担更多的应力,防止应力集中时合金出现裂纹迅速扩展的现象^[8~10]。以 LA143-0.5Y 作为基体合金,设置 Ca 的添加量为 0.2%、0.5% (质量分数,下同),Mn 的添加量为 0.1%、0.2%,研究微量合金化元素 Ca、Mn 对铸态 LA143-0.5Y 合金微观组织和力学性能的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验方法与材料

所用金属原料(Mg、Li、Al、Ca)均达到 99.99% 工业级高纯度,其中元素 Mn、Y 分别以 Mg-10Mn、Mg-20Y 中间合金形式加入,纯 Li 和纯 Ca 用铝箔紧紧包覆。采用真空感应熔炼炉,充入氩气作为保护气体。熔炼开始前,炉体抽真空至 3.8 Pa,然后向炉体中输入高纯氩气保护气体,使容器的压力保持在 0.07 MPa。随

后开始进行熔炼,待完全熔化后,将熔体在 680 ℃ 左右保温 8~10 min,并进行机械搅拌,最后浇入金属型。待完全凝固后获得 $\phi 68$ mm $\times$ 150 mm 的圆柱体铸件。金相试样均在远离浇口且距底部 2 cm 处的位置取样,湿磨并抛光后,用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液进行腐蚀,在金相显微镜(ZEISS, Axio observer A1)下观察组织形貌并拍摄照片。化学成分分析采用电感耦合等离子体光谱分析(ICP, Perkin Elmer, Plasma 400)法,获得合金的实际成分。拉伸试样从铸锭底部取出,并切成尺寸为 15 mm $\times$ 3 mm $\times$ 2 mm 的矩形,利用 Zwick/Roell Z020 电子万能试验机进行室温拉伸,拉伸时横梁的移动速度设置为 0.5 mm/min,至少取 3 个试样并计算其平均值。试样的密度使用排水法测量。利用 Phenom 台式扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)的背散射模式和二次电子成像模式分别进行显微组织和拉伸断口形貌的观察,并配合电镜附带的能谱仪(Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS)对特定的微区表面进行成分分析。使用 X 射线衍射仪(XRD, Ultima IV)对材料进行物相分析,采用 Cu 靶 K α 射线,电压为 40 kV,电流为 30 mA,扫描范围设置为 10 $^{\circ}$ ~90 $^{\circ}$,步长为 0.02 $^{\circ}$,扫描速度为 5 $^{\circ}$ /min。

2 试验结果及讨论

2.1 合金实际成分及密度

本试验中 Mg-14Li-3Al-0.5Y- x Ca 和 Mg-14Li-3Al-0.5Y- y Mn 合金,由 ICP 测得的实际化学成分和排水法测得的密度见表 1。成分的误差均在可接受范围内,且呈现出良好的规律性。由于添加的是微量合金化元素,合金密度波动很小。

表 1 Mg-14Li-3Al-0.5Y- x Ca/ y Mn 的实际化学成分和密度

合金	$w_B/\%$						密度/(g $\cdot$ cm $^{-3}$)
	Li	Al	Y	Mn	Ca	Mg	
LA143-0.5Y	14.73	2.77	0.34	—	—	余量	1.362 8
LA143-0.5Y-0.2Ca	13.07	2.87	0.40	—	0.16	余量	1.362 9
LA143-0.5Y-0.5Ca	13.91	2.60	0.33	—	0.47	余量	1.363 1
LA143-0.5Y-0.1Mn	12.45	2.63	0.37	0.13	—	余量	1.363 5
LA143-0.5Y-0.2Mn	13.98	2.77	0.35	0.20	—	余量	1.363 1

2.2 显微组织形貌及物相分析

图 1 为铸态 Mg-14Li-3Al-0.5Y- x Ca ($x=0, 0.2, 0.5$)合金以及 Mg-14Li-3Al-0.5Y- y Mn ($y=0.1, 0.2$)合金的金相照片。可以看出,合金基体由单相的 β -Li 等轴晶组成。由于 Mg-Li 合金的金相试样即使在室温下也容易在空气中氧化,因此在金相照片中观察到氧化的黑色颗粒。由图 1a~图 1c 可以看到,随着 Ca 含量的

增加,分布在晶粒中的颗粒状析出相增多,析出相的尺寸细小,且在晶界处观察到半连续网状析出相,该相明显阻碍晶粒尺寸长大。由图 1a、图 1d、图 1f 可观察到,随着 Mn 元素添加,基体中析出相的数量增多,这可能是形成新相的缘故,尺寸更加细小,分布也更加均匀。

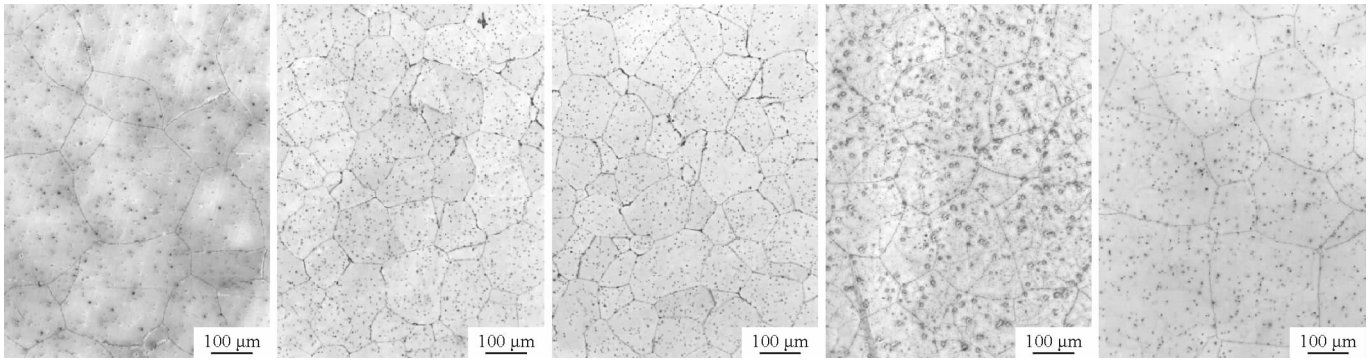


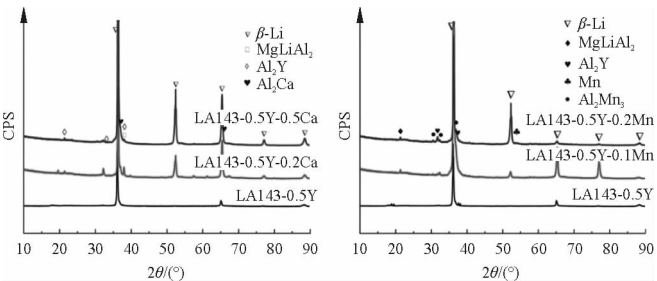
图 1 铸态 LA143-0.5Y- x Ca($x=0,0.2,0.5$)合金和 LA143-0.5Y- y Mn($y=0.1,0.2$)合金显微组织

Fig.1 Microstructure of the as-cast LA143-0.5Y- x Ca ($x=0,0.2,0.5$) and LA143-0.5Y- y Mn ($y=0.1,0.2$) alloys

表 2 铸态 LA143-0.5Y- x Ca 和 LA143-0.5Y- y Mn 合金的平均晶粒尺寸

合金	
平均晶粒尺寸/ μm	
LA143-0.5Y	179.2
LA143-0.5Y-0.2Ca	101.0
LA143-0.5Y-0.5Ca	105.7
LA143-0.5Y-0.1Mn	137.5
LA143-0.5Y-0.2Mn	155.0

图 2 为 Mg-14Li-3Al-0.5Y- x Ca($x=0,0.2,0.5$)和 Mg-14Li-3Al-0.5Y- y Mn($y=0,0.1,0.2$)合金的 XRD 衍射图谱。可以看出,两种成分体系下,合金中都存在 β -Li 相、MgLiAl₂相和 Al₂Y 相。由图 2a 可以看出,添加 Ca 元素的合金组织中出现了 Al₂Ca 相。由图 2b 可以看出,添加了 Mn 元素的合金组织中出现了 Mn 相和 Al₂Mn₃相。



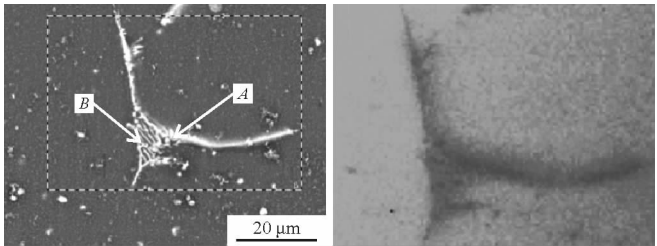
(a) LA143-0.5Y- x Ca ($x=0,0.2,0.5,\%$) (b) LA143-0.5Y- y Mn ($y=0,0.1,0.2,\%$)

图 2 铸态 LA143-0.5Y- x Ca 和 LA143-0.5Y- y Mn 合金的 XRD 衍射图谱

Fig.2 XRD patterns of the as-cast LA143-0.5Y- x Ca and LA143-0.5Y- y Mn alloys

由表 2 可以看出,添加 0.2% 的 Ca 之后, β -Li 晶粒尺寸由 179.2 μm 下降到 100 μm 左右,而继续增加 Ca,细化作用减弱;在 0.1% 的 Mn 添加量下, β -Li 晶粒尺寸从 179.2 μm 降到 137.5 μm ,而添加 0.2% 的 Mn 后合金晶粒尺寸又上升到 155.0 μm 。

图 3 和图 4 为选取的 LA143-0.5Y-0.5Ca 以及 LA143-0.5Y-0.2Mn 合金组织的微区进行能谱面扫描和点扫描结果。从图 3 可以看出,LA143-0.5Y-0.5Ca



(a) SEM (b) 面扫描,Mg 的分布

(c) 面扫描,Al 的分布 (d) 面扫描,Y 的分布

(e) 面扫描,Ca 的分布 (f) 点 A、B 的 EDS

图 3 铸态 LA143-0.5Y-0.5Ca 合金的 SEM 照片和 EDS 能谱分析

Fig.3 SEM micrographs and EDS analysis of the as-cast LA143-0.5Y-0.5Ca alloy

位置	$x_i/\%$			
	Mg	Al	Ca	Y
A	65.07	22.26	12.53	0.14
B	57.56	28.33	13.87	0.24

合金晶界处的网状析出相内部含有较多的 Al 和 Ca 元素,Al、Ca 摩尔比接近 2 : 1,可以推断网状析出相为 Al_2Ca ;晶粒中的细小颗粒状析出相富集 Al 和 Y 元素,可以确定这种细小颗粒状析出相为 Al_2Y 相。由图 4 可以看出,LA143-0.5Y-0.2Mn 合金组织中析出相的形貌为颗粒状,0.2% 的 Mn 导致颗粒状的析出相发生聚集。图 4b~图 4e 为 Mg、Al、Y、Mn 元素的分布情况。相比 LA143-0.5Y 合金的结果(Al 的摩尔分数在 60 %

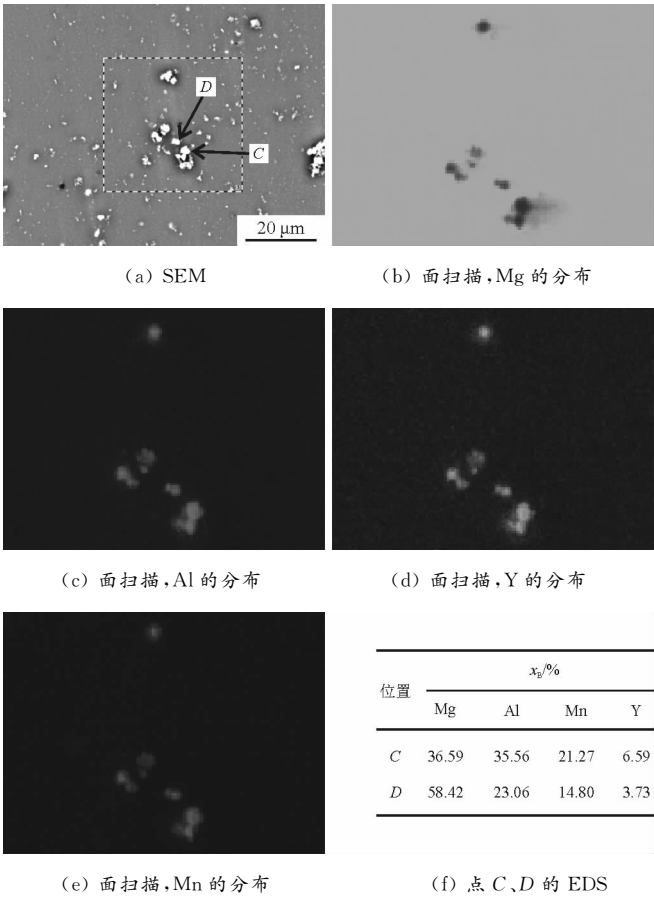


图 4 铸态 LA143-0.5Y-0.2Mn 合金的 SEM 照片和 EDS 能谱分析

Fig.4 SEM micrographs and EDS analysis of the as-cast LA143-0.5Y-0.2Mn alloy

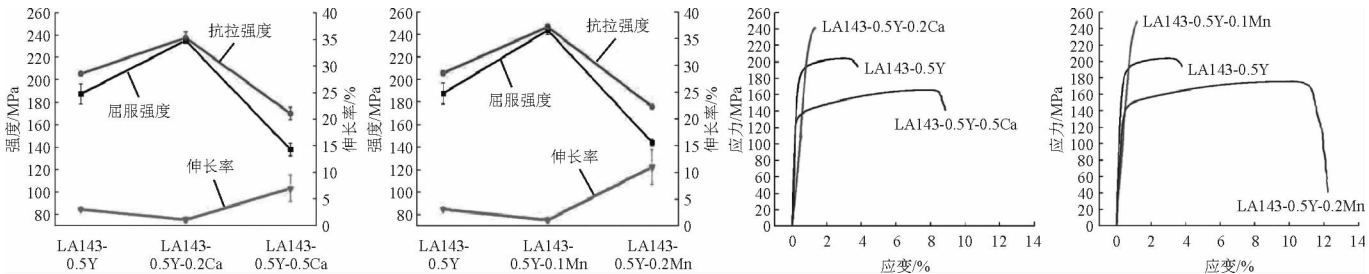


图 5 铸态 LA143-0.5Y-xCa 和 LA143-0.5Y-yMn 合金的力学性能

Fig.5 Mechanical properties of the as-cast LA143-0.5Y-xCa and LA143-0.5Y-yMn alloys

铸态 LA143-0.5Y-xCa($x=0,0.2,0.5$)合金拉伸断口 SEM 形貌见图 6。从图 6a~图 6d 可以看到,

左右),固溶的 Al 元素含量显著减少,Al、Y、Mn 偏聚在析出相的位置。图 3f 和图 4f 分别为图 3a 和图 4a 中的能谱点扫描结果,结果发现各元素的摩尔比并不符合 XRD 分析结果中的每个相组成,由此可以说明各析出相并非独自分布。

2.3 力学性能及断裂行为

各成分铸态合金的室温力学性能见表 3,其变化趋势见图 5。对于铸态 LA143-0.5Y-xCa 合金,从图 5a 中可以看到添加 0.2% 的 Ca 时可以增强基体,但并不能改善合金的塑性;当添加 0.5% 的 Ca 时,合金伸长率提升至 7%,但屈服强度和抗拉强度分别下降了 26.4% 和 17.3%。拉伸过程的应力-应变曲线见图 5c,可以发现添加 0.2% 的 Ca 后,合金在弹性变形结束后立即发生断裂,而添加 0.5% 的 Ca 的合金拉伸过程中经历了弹性变形、塑性变形和瞬时断裂 3 个完整的过程,且在塑性变形阶段表现出较好的延展性,但抗拉强度降低明显。对于铸态 LA143-0.5Y-yMn 合金,从图 5b 中可知,当添加 Mn 之后,合金强度呈先上升再下降的变化趋势,而伸长率在 Mn 添加量为 0.1% 时进一步恶化,但当添加量为 0.2% 时显著改善。图 5d 中的应力-应变曲线也反映了这一变化规律,Mn 添加量为 0.1% 的合金在拉伸过程几乎没有屈服现象,曲线一直上升而后试样发生断裂,添加 0.2% 的合金其屈服现象明显,展现出良好的延展性。

表 3 铸态 LA143-0.5Y-xCa 和 LA143-0.5Y-yMn 合金的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of the as-cast LA143-0.5Y-xCa and LA143-0.5Y-yMn alloys

合金	屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa		伸长率/%	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
LA143-0.5Y	187.5	9.2	205.5	2.1	3.1	1.1
LA143-0.5Y-0.2Ca	235.0	1.4	237.5	4.9	1.1	0.4
LA143-0.5Y-0.5Ca	138.0	5.7	170.0	5.7	7.0	2.5
LA143-0.5Y-0.1Mn	243.5	3.5	246.5	2.1	1.1	0.1
LA143-0.5Y-0.2Mn	144.0	3.0	175.5	0.6	11.0	3.2

LA143-0.5Y 和 LA143-0.5Y-0.2Ca 合金断口中主要为沿晶断裂留下的晶粒表面和少量的解理面,相同放大倍

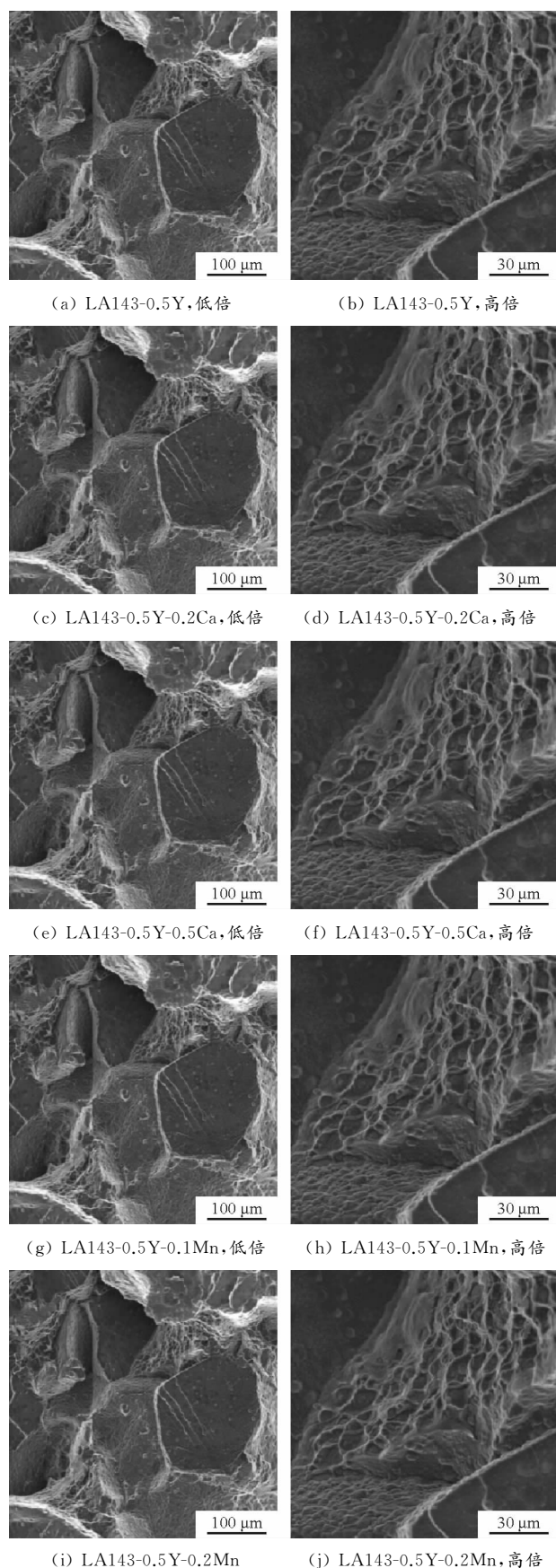


图 6 铸态 LA143-0.5Y-xCa 和 LA143-0.5Y-yMn 合金的断口 SEM 照片

Fig.6 Fracture surface of the as-cast LA143-0.5Y-xCa and LA143-0.5Y-yMn alloys

数下可以直观地观察到添加 0.2% 的 Ca 的合金晶粒发生了明显细化,这与金相照片中的观察结果是一致的。图 6e、图 6f 为添加 0.5% 的 Ca 后合金的断口形貌,断口局部出现了正向的剪切韧窝形貌,说明该合金的塑性得到了较好的改善,这与拉伸性能数据一致。图 6g~图 6j 为铸态 LA143-0.5Y-yMn($y=0.1, 0.2$)合金断口截面的 SEM 照片,清晰地显示了断口截面处的形貌特征。添加 0.1% 的 Mn 之后,合金断裂解理面的特征消失,断口照片中几乎全是完整的晶粒,且部分晶粒与晶粒之间存在尺寸较大的二次裂纹,分析认为该裂纹是在拉伸过程中晶粒发生剥落的开端,可见晶界是合金基体的薄弱区域,裂纹在此处形核并扩展,发生沿晶脆性断裂;当添加 0.2% 的 Mn 后,可以在断口中看到较浅的韧窝和解理平面,局部微区中表现为延性特征。

2.4 分析与讨论

Ca 的加入在合金组织中引入了新的 Al_2Ca 相, Al_2Ca 相以半连续网状结构分布于晶界处。其形核的过程为:在凝固初期,Ca 原子和 Al 原子在固液界面前沿富集,产生成分过冷,为形核提供了驱动力,促使 Al_2Ca 化合物在晶界处形核并长大,这种半连续网状的 Al_2Ca 化合物会有效地抑制 $\beta-Li$ 晶粒的长大。0.2% 的 Ca 和 0.5% 的 Ca 对 Mg-14Li-3Al-0.5Y 合金晶粒的细化作用相似。铸态 LA143-0.5Y-0.2Ca 合金强度得到显著提升的原因在于由晶粒细化引起的细晶强化和析出相 Al_2Ca 的析出强化的共同作用。但由于半连续网状分布于晶界处的析出相割裂了基体,且在拉伸过程裂纹在此萌生并沿着晶界扩展,从而导致合金的延展性很差;而添加 0.5% 的 Ca 的合金,由于析出的 Al_2Ca 增多,发生聚集,弱化析出强化的效果,同时也会消耗固溶进基体中的 Al 原子,降低了 Al 固溶强化的效果^[11,12],因此铸态 LA143-0.5Y-0.5Ca 合金的强度下降,但伸长率得到有效改善。这是由于固溶的 Al 减少,使合金基体更加均匀,不存在明显的薄弱区,当拉伸变形时,细化的晶粒能够发挥协调变形分散集中的应力,使合金具有较好的延展性。

在 LA143-0.5Y 合金中加入 Mn 与加入 Ca 作用类似,基体中析出了新的 Mn 相和 Al_2Mn_3 相。与 Ca 元素作用的区别在于,这两种析出相呈颗粒状弥散分布于基体中,而非以半连续网状富集在晶界处。颗粒状析出相对阻碍凝固时固液界面推移的作用不及半连续网状析出相,对抑制晶粒长大的效果没有添加 Ca 的作用显著。添加 0.2% 的 Mn 的合金中,颗粒状的析出相发生聚集,降低了析出相对晶粒细化的作用,所以添加 0.2% 的 Mn 后合金晶粒尺寸比添加 0.1% 的 Mn 时要大。力

学性能方面,添加 0.1% 的 Mn 后合金由于细晶强化和析出强化的共同作用使强度明显提高,但伸长率下降;添加 0.2% 的 Mn 后合金中增加了 Al_2Mn_3 相的析出,消耗了起到固溶强化的 Al,但是细化晶粒效果并不及 0.1% Mn^[13,14],所以合金的力学性能较基体合金 LA143-0.5Y 有所下降,但伸长率得到显著改善。

3 结 论

(1)随着微量 Ca 的添加,铸态 Mg-14Li-3Al-0.5Y 合金组织中生成了半连续网状分布于晶界的 Al_2Ca 相,消耗了具有较高固溶强化效果的 Al 元素, β -Li 晶粒得到显著细化。当添加 0.5% 的 Ca 时,合金伸长率达到 7%,但屈服强度、抗拉强度分别下降到 138 MPa、170 MPa。

(2)随着微量 Mn 的添加,铸态 Mg-14Li-3Al-0.5Y 合金组织中出现了弥散分布于基体的含 Mn 相和 Al_2Mn_3 相,它们同样起到抑制晶粒长大的作用,虽然 Mn 的细化效果不及 Ca,但含 Mn 相和 Al_2Mn_3 相的形貌及分布优于 Al_2Ca 相。当 Mn 添加量为 0.2% 时,合金综合性能最佳。

(3)在理论研究的基础上开发了具有超低密度、高伸长率的 Mg-14Li-3Al-0.5Y-0.2Mn 新型 Mg-Li 合金,其密度为 1.36 g/cm³,屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 144 MPa、175.5 MPa 和 11%。相较于 Mg-14Li-3Al-0.5Y 合金,这种新型 Mg-Li 合金的塑性得到了显著改善,有望在航空航天领域得到应用。

参 考 文 献

[1] 曹樑,李中权,刘文才,等. 镁合金高温力学性能研究进展[J]. 轻金属, 2013(6):48-53.
[2] 陈振华,夏伟军,严红革,等. 镁合金材料的塑性变形理论及其技

术[D]. 长沙:湖南大学,2004.
[3] 丁文江. 镁合金科学与技术[M]. 北京:科学出版社, 2007.
[4] YOO M. Slip, twinning, and fracture in hexagonal close-packed metals[J]. Metallurgical Transactions, 1981, A12(3): 409-418.
[5] INOUE M, MATSUZAWA K, TANNO O, et al. The effect of additional element on the tensile properties of Mg-Li binary system alloy[J]. Keikinzoku, 1992, 42(2): 67-73.
[6] WU R Z, QU Z K, ZHANG M L. Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of Mg-Li base alloys[J]. Rev. Adv. Mater. Sci., 2010, 24(3): 35-43.
[7] GAO Z K, LIU W C, WU G H, et al. Effects of Al and Y addition on microstructures and mechanical properties of as-cast Mg-14Li based alloy[J]. Advanced Engineering Materials, 2019, 21(2): 1 800 755.
[8] KIM J T, PARK G H, KIM Y S, et al. Effect of Ca addition on the plastic deformation behavior of extruded Mg-11Li-3Al-1Sn-0.4Mn alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 687: 821-826.
[9] LI Y, XIAO W L, WANG F, et al. The roles of long period stacking ordered structure and Zn solute in the hot deformation behavior of Mg-Gd-Zn alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 745: 33-43.
[10] SON H T, KIM Y H, KIM D W, et al. Effects of Li addition on the microstructure and mechanical properties of Mg-3Zn-1Sn-0.4 Mn based alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 564: 130-137.
[11] 王涛. Ca 对 Mg-Li-Al 合金组织及力学性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
[12] ZHOU Y, BIAN L, CHEN G, et al. Influence of Ca addition on microstructural evolution and mechanical properties of near-eutectic Mg-Li alloys by copper-mold suction casting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 664: 85-91.
[13] 李红斌. 新型 Mg-Li-Al-Mn 合金显微组织和力学性能[J]. 热加工工艺, 2009, 38(10):12-15.
[14] 李红斌,姚广春,梁春林,等. 微量 Mn 对 Mg-Li-Zn 合金板材显微组织和力学性能的影响[D]. 沈阳:东北大学,2006.

(编辑:彭瑾)

科学家发现可以自发改变颜色的金属材料

颜色是商品外观设计的重要属性。彩色的电子产品金属外壳不仅满足了人们的审美需求,也增加了商品的附加价值。电化学沉积是目前广泛应用的金属表面着色技术,其颜色来自于由表面氧化层厚度决定的可见光干涉。由于该氧化层的厚度在产品使用过程中不会改变,因此,该技术实现的产品颜色在使用过程中是固定的。

近期,中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心极端条件物理实验室的博士研究生王朋飞在导师孙永昊研究员和白海洋研究员的共同指导下,与来自物理所、中国科学院大学、钱学森空间技术实验室和杨伊万格利斯达浦金野大学的科研人员合作,发现了一种可以在自然条件下自发改变颜色的金属材料。这种金属材料的表面颜色几乎每周一变。该材料色泽均匀明亮、其表面在磨损后可自行修复重现颜色,且在紫外光下具有荧光效果。

这种金属材料的可自发改变颜色特性来自该合金在室温条件下持续且不中断的自发氧化。这是一种由稀土元素铈作为主要组元的非晶合金。它由于具有铈的化学活性,因此在室温下具有高的氧化速率,由于非晶结构中均匀的缺陷分布,所以避免了如多晶合金中因局域缺陷位置快速氧化带来的锈斑,使得非晶合金的表面氧化层厚度均匀。研究人员通过在铈基非晶合金中掺杂钇,可加快该金属材料在自然条件下的变色,实现了对其变色速率的调节。

(摘自中国有色网)