

复合添加 Si、Nd 元素对 Mg-11Li-3Al 合金组织与力学性能的影响

卫爱丽, 刘兴海, 张焜禹, 董丽, 梁伟

(太原理工大学, 山西 太原 030024)

摘要: 利用磁悬浮真空高频感应加热法熔炼高质量的镁锂合金, 通过 Si、Nd 元素复合添加来研究其对 Mg-11Li-3Al 合金组织与力学性能的影响。结果表明: 加入 Si、Nd 元素后, 组织中主要生成 Mg_2Si 和 $Al_{11}Nd_3$ 2 种第二相, 其中 Si 的添加能够促使合金组织中形成骸体形貌的黑色析出物聚集区, 而 Nd 的加入能够细化这种黑色棒状的析出物, 并减小晶粒尺寸、洁净组织。当 Nd 的添加量为 1% (质量分数) 时其晶粒细化的效果最佳。经过 XRD 和 EDS 分析发现, 这种黑色棒状的析出物为 Mg_2Si 相和 $Al_{11}Nd_3$ 相结合体。铸态合金的抗拉强度随着 Si 含量的增加递增, 最后趋于稳定; 其塑性并不会随某一种或是复合元素的添加而单调变化。实验得到了一种综合力学性能最佳的合金 Mg-11Li-3Al-1Si-1Nd, 其抗拉强度和伸长率分别为 212.3 MPa 和 46.2 %。

关键词: 镁锂合金; Si-Nd 复合添加; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2²

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)04-0990-07

镁锂合金作为当代最轻的金属结构材料, 其应用有限集中在航空航天和军事领域, 成熟的合金种类很少, 大规模的商业应用前尚有许多工作需要开展^[1-4]。由于镁锂合金具有低强度、高塑性的特点, 因此如何强化富锂 β 相成为提高镁锂合金综合力学性能、扩大镁锂合金应用领域的关键。二元镁锂合金的强度很低, 难以适应当前社会对轻质结构材料的需求, 需要通过进一步合金化改善其强度。其中 Al 元素能够以弥散强化和固溶强化的作用增强镁锂合金的综合性能, 当 Al 元素的含量大于 5% (质量分数) 时会严重损害镁锂合金的塑性^[5]。Si 的添加能够形成细小弥散的第二相, 大幅提高强度, 但是过量的 Si 也会严重损害合金的塑性^[6,7]。稀土 Nd 则是增强合金综合性能的重要元素之一^[8]。

本研究选用三元 Mg-11Li-3Al 合金作为基底, 这种 β 单相合金含 Li 量较高, 密度轻, 塑韧性很好, 有较强的冷、热变形能力, 强度也高于普通的二元镁锂合金。通过添加 Si、Nd 元素, 研究多种元素复合作用对其组织与力学性能的影响, 旨在获得一种高强塑、超轻质的镁锂合金。

1 实验

所用原料为纯镁、纯锂、铝硅及镁钕中间合金, 金属元素的纯度都在 99.9 % 以上。原料在使用前都要经过适当的处理, 镁锭和 Mg-Nd、Al-Si 中间合金需要打磨去除氧化皮, 锂从真空包装中取出并迅速清理覆盖的油脂。采用磁悬浮真空高频感应加热法来进行合金熔炼, 在铜模中吸铸成型以达到快速凝固的目的。熔炼过程中不加覆盖剂, 所通惰性气体为氩气, 纯度为 99.99 %。合金熔炼前, 所有的原料 (除了 Li) 都需要进行烘烤去除水汽。本实验制备合金的化学成分见表 1。

表 1 试验合金的实际化学成分

Table 1 Actual chemical compositions of tested alloy ($\omega/\%$)

No.	Alloy	Li	Al	Si	Nd
1#	Mg-11Li-3Al	11.17	2.99	0	0
2#	Mg-11Li-3Al-0.4Si	10.94	2.93	0.37	0
3#	Mg-11Li-3Al-0.4Si-0.5Nd	10.86	3.02	0.39	0.48
4#	Mg-11Li-3Al-0.4Si-1Nd	11.06	3.05	0.36	1.05
5#	Mg-11Li-3Al-0.4Si-1.5Nd	11.07	3.10	0.38	1.45
6#	Mg-11Li-3Al-1Si-0.5Nd	10.88	2.89	1.03	0.52
7#	Mg-11Li-3Al-1Si-1Nd	10.96	2.96	0.98	0.99
8#	Mg-11Li-3Al-1Si-1.5Nd	10.96	3.01	0.96	1.53

收稿日期: 2015-04-24

基金项目: 国家自然科学基金 (51175363, 51274149); 山西省青年科技研究基金 (2008021033)

作者简介: 卫爱丽, 女, 1970 年生, 博士, 副教授, 太原理工大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024, 电话: 0351-6010022, E-mail: weiailidd@126.com

合金的室温拉伸试验在 INSTRON-5544 型万能试验机上进行, 拉伸速率为 0.5 mm/min。采用 FEICA DM 2500M 型金相显微镜观察合金的显微组织, 铸态试样用 1% 的硝酸乙醇溶液腐蚀。采用捷克制造的 TESCAN VEGA MIRA 3 型扫描电镜并结合能谱仪分析合金析出相的组成及成分。采用 KY₂ 2000 型 X 射线衍射仪对不同成分的合金进行物相分析。

2 结果与分析

2.1 铸态合金的显微组织分析与相组成

2.1.1 铸态合金的显微组织

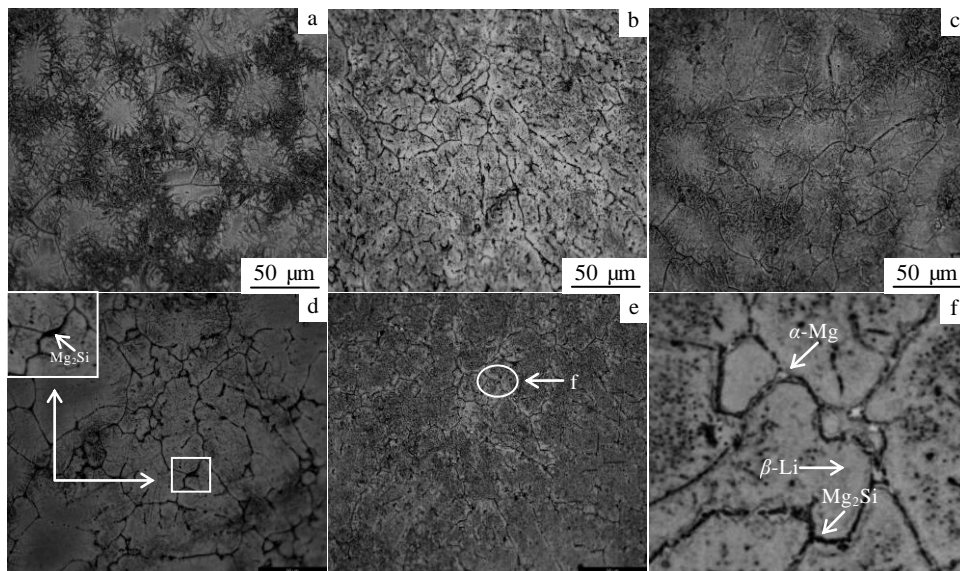
图 1 为编号 1#~5# 的 Mg-11Li-3Al-*x*Si-*y*Nd 合金金相显微组织。由图可见, 该合金系皆是以 β -Li 为基体的单相合金。由图 1a、1b 可以看出 1# 合金 Mg-11Li-3Al 晶粒较大, 晶界呈现出一种规则的花瓣状, 加入 0.4% (质量分数) 的 Si 元素后, 合金晶界清晰连续, 晶粒呈块状和部分长条形, 晶粒得到明显细化, 并在晶界密集处有少量黑色点状析出。随着 Nd 的加入, 合金组织有了显著改变, 如图 1c、1d、1e 所示, 当 Nd 的加入量为 0.5% (质量分数, 下同) 时, 显微组织的晶粒明显变大; Nd 的加入量为 1% 时, 组织较为洁净, 出现了部分尺寸较小的晶粒, 且晶界处出现连续的条形黑色析出物; Nd 的加入量为 1.5% 时, 合金组织明显细化, 并围绕晶界共同析出了白色的 α -Mg 和黑色棒状物。

图 1f 为 Mg-11Li-3Al-0.4Si-1.5Nd 合金组织的局部放大图。图中晶界处的析出物清晰可见, 2 种析出物互相连续环绕晶界, 形成晶界强化, 可使合金获得较高的抗拉强度。其晶粒内部也出现大量细小弥散黑色析出相。

图 2 为编号 6#~8# 的 Mg-11Li-3Al-1Si-*y*Nd 合金显

微组织。由图可见, 当 Si 的加入量为 1% (质量分数, 下同) 时, 合金的显微组织出现了新的形貌特点。图 2a 为 Mg-11Li-3Al-1Si-0.5Nd 合金的显微组织, 组织中晶粒晶界清晰可见, 其晶界缠结处析出了大量不规则的条状黑色析出物, 这些黑色条状的第二相密集交错, 主要分布在晶界上及晶界附近的晶粒内部, 或平行或交叠, 形似中国书法中的小篆 (见图 2d)。晶粒的中心区域和晶粒交界处比较洁净, 析出物较少。图 2b 为 Mg-11Li-3Al-1Si-1Nd 合金的显微组织, 合金的晶粒明显细化, 晶粒内部和晶界处非常洁净, 未发现篆体形貌的第二相析出。其晶界处仍有较多的长条形黑色物质, 并伴随出现了极少的大型眼球状析出物, 如图 2b 局部放大图所示。据检测, 眼球形貌是由 3 种不同的相共同组成, 最外圈的白色物质为 α -Mg, 其中液滴状的 Li 包裹的黑色析出物为 Mg_2Si 相。这种特殊组织的形成可能是由于在合金的凝固过程中 Si 原子的偏聚引起的。Si 原子极易与 Mg 原子结合生成 Mg_2Si 相, 在白色 α -Mg 上析出的 Mg_2Si 吸收了 α -Mg 中的部分 Mg 原子, 使 α -Mg 中的 Li 部分析出, 表现在白色 α -Mg 上黑点状 Mg_2Si 相周围出现了一层灰色 Li 圈, 形成了眼球这种罕见的形貌。

图 2c 为 Mg-11Li-3Al-1Si-1.5Nd 合金的显微组织, 当 Nd 含量增加到 1.5% 时, 合金组织中又重新出现



50 μm 50 μm 5 μm

图 1 Mg-11Li-3Al-xSi-yNd 合金显微组织 (1#~5#)

Fig.1 Microstructures of the Mg-11Li-3Al-xSi-yNd alloys (1#~5#): (a) 0Si-0Nd, (b) 0.4Si, (c) 0.4Si-0.5Nd, (d) 0.4Si-1Nd, (e) 0.4Si-1.5Nd, and (f) partial enlarged picture of the Mg-11Li-3Al-0.4Si-1.5Nd alloy

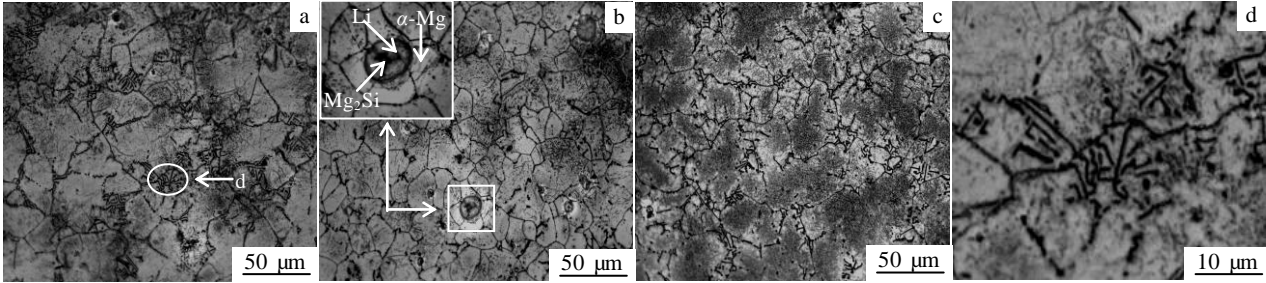


图 2 Mg-11Li-3Al-1Si-yNd 合金显微组织 (6#~8#)

Fig.2 Microstructures of the Mg-11Li-3Al-1Si-yNd alloys (6#~8#): (a) 1Si-0.5Nd, (b) 1Si-1Nd, (c) 1Si-1.5Nd, and (d) partial enlarged picture of the Mg-11Li-3Al-1Si-0.5Nd alloy

了黑色条状析出物形成的篆体形貌，同时晶粒又变得粗大。与图 2a 相比较，此时的篆体第二相形貌规格上较小，比较细碎，合金组织的晶粒也比较小。

由以上合金组织形态的变化可分析得出，Si 元素的添加能够促使合金组织中形成篆书形貌的黑色析出聚集区，而 Nd 能够细化黑色析出物、减小晶粒尺寸、洁净组织。对于 Mg-11Li-3Al-xSi-yNd 合金，以 1%Nd 添加量其晶粒细化效果最佳。

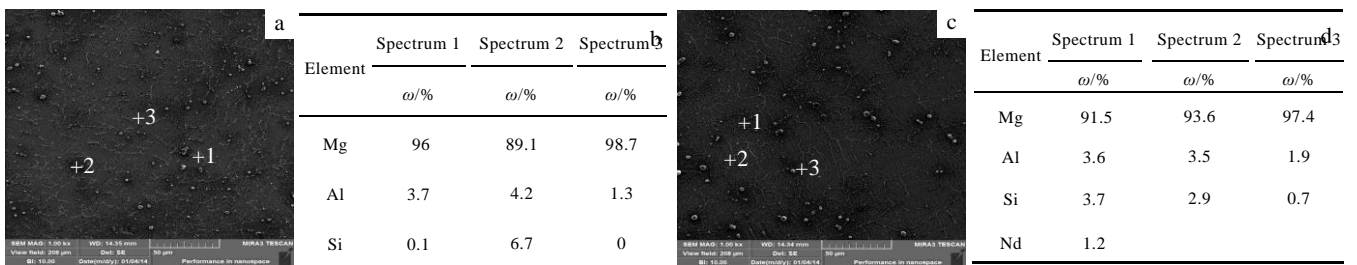
2.1.2 铸态合金的相组成

图 3 分别为 2#合金 Mg-11Li-3Al-0.4Si 和 3#合金 Mg-11Li-3Al-0.4Si-0.5Nd 的 SEM 形貌和 EDS 能谱。其中点扫描打出的化合物相的元素组成已在图中标示，由于这 2 种合金中 Si、Nd 元素的添加量较少，相关的第二相颗粒生成少，尺寸也较小，EDS 绘出的元素成分偏低。图 4 为 2 种合金的 XRD 图谱。由图可知，Mg-11Li-3Al-0.4Si 合金主要由 β-Li 与 α-Mg、AlLi 相和 Mg₂Si 相组成。Mg 与 Si 的电负性差值为 0.59，远大于 Mg 与 Al 的差值 0.3 和 Si 与 Al 的差值 0.29，因此在合金的凝固过程中会优先生成稳定性较高的 Mg₂Si 相^[9,10]。由光学组织的形态和结构结合 EDS 能谱分析可以推测其晶界处的黑色连续析出物为 Mg₂Si

相。Mg-11Li-3Al-0.4Si-0.5Nd 合金主要由 β-Li 基体、α-Mg 相、MgLi₂Al 相、AlLi 相和 Mg₂Si 相组成，这是由于 Nd 元素的加入会在合金的凝固过程中出现成分过冷，富集在固液界面前沿并阻碍其它原子的扩散，抑制亚稳态的 MgLi₂Al→AlLi 的转变，在合金组织中保留了部分的 MgLi₂Al 相。同时 Nd 还起到了异质形核的作用，以细晶强化的作用增强了 β-Li 基体，表现在 XRD 图谱上为 β-Li 的衍射峰加强，而 α-Mg 的衍射峰值减弱。

图 5 为 5#合金 Mg-11Li-3Al-0.4Si-1.5Nd 的 SEM 形貌和 EDS 能谱，其中 Nd 元素的添加量较多，在晶粒内部出现了含 Nd 的第二相析出物，这种析出物呈亮色，细长如针状，其元素含量如图 5b 所示，经计算 Al 与 Nd 的原子分数分别为 5.86% 与 8.81%。

图 6 为 Mg-11Li-3Al-0.4Si-1.5Nd 合金的 XRD 图谱。发现其组成相为 β-Li 基体、α-Mg 相、AlLi 相、Mg₂Si 相和 Al₁₁Nd₃ 相。由于稀土元素 Nd 为表面活性元素，在合金的凝固过程中会优先和 Al 生成高熔点的 Al₁₁Nd₃ 化合物，根据这种含 Nd 化合物的针状形貌特征，并结合相关文献描述^[11,12]和 XRD 分析，确定这种含 Nd 的第二相析出物为 Al₁₁Nd₃ 相，其原子百分比也与测定值相符。



Element	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
	ω/%	ω/%	ω/%
	Mg	96	89.1
Al	3.7	4.2	1.3
Si	0.1	6.7	0

Element	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
	ω/%	ω/%	ω/%
	Mg	91.5	93.6
Al	3.6	3.5	1.9
Si	3.7	2.9	0.7
Nd	1.2		

图 3 铸态合金的 SEM 形貌和 EDS 分析 (2#, 3#)

Fig.3 SEM morphologies (a, c) and EDS analysis (b, d) of the as-cast alloys (2#, 3#): (a, b) Mg-11Li-3Al-0.4Si and (c, d) Mg-11Li-3Al-0.4Si-0.5Nd

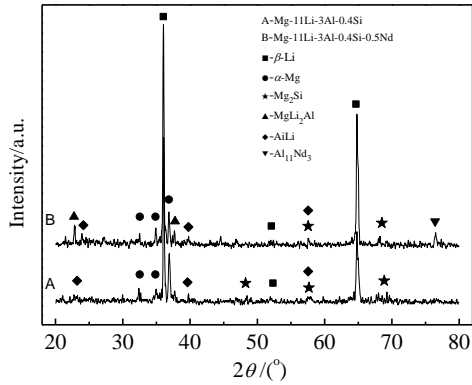


图 4 Mg-11Li-3Al-0.4Si 和 Mg-11Li-3Al-0.4Si-0.5Nd 合金的 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of the Mg-11Li-3Al-0.4Si and Mg-11Li-3Al-0.4Si-0.5Nd alloy

图 7 分别为 7#合金 Mg-11Li-3Al-1Si-1Nd 与 8#合金 Mg-11Li-3Al-1Si-1.5Nd 的 SEM 形貌和 EDS 能谱分析。由图 7a 可见 Mg-11Li-3Al-1Si-1Nd 合金组织较为洁净，对晶界处 1、2 的析出物点扫描发现 Al 元素和 Si 元素大量富集，结合图 8 该合金的 XRD 图谱，认为此处析出物为条形的 Mg_2Si 连续析出相。图 7a 中 3 中白色颗粒状析出物只含有大量的 Mg 元素和极少的 Al 元素，应为 $\alpha-Mg$ 相。图 7c, 7d 分别为 Mg-11Li-3Al-1Si-1.5Nd 合金的 SEM 形貌和 EDS 能谱分析。经计算图 7c 中 3 中黑色块状析出物 Mg 元素与 Si 元素的原子比约为 2:1，为 Mg_2Si 相。而在对组成汉字形貌的黑色棒状析出物点扫描发现，其元素组成包含了全部的元素 Mg、Al、Si、Nd，其中 Nd 的含量极少，Al 次之，Mg 和 Si 的含量最高，如图 7c 中 1、2 所示。根据图 8 中 2 种组分合金的 XRD 衍射图谱发现，含

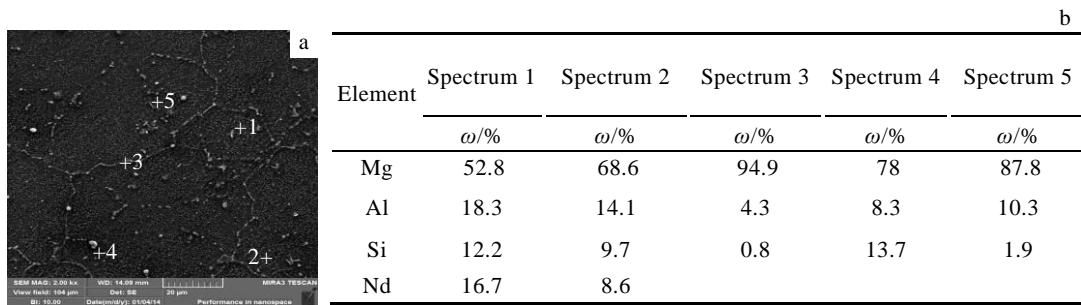


图 5 Mg-11Li-3Al-0.4Si-1.5Nd 合金的 SEM 形貌和 EDS 分析 (5#)

Fig.5 SEM morphology (a) and EDS analysis (b) of the Mg-11Li-3Al-0.4Si-1.5Nd alloy (5#)

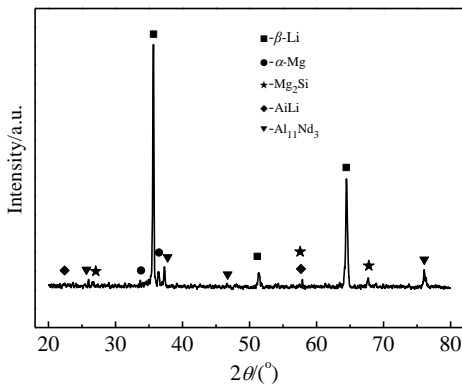


图 6 Mg-11Li-3Al-0.4Si-1.5Nd 合金的 XRD 图谱

Fig.6 XRD patterns of the Mg-11Li-3Al-0.4Si-1.5Nd alloy

有大量汉字形貌析出物的 Mg-11Li-3Al-1Si-1.5Nd 合金中 $Al_{11}Nd_3$ 相的衍射峰强度极弱，甚至无峰，而组织较为洁净的 Mg-11Li-3Al-1Si-1Nd 合金中 $Al_{11}Nd_3$ 相的衍射峰稍强。由此可判断具有篆体汉字形貌聚集区的黑色棒状析出物应是 Mg_2Si 相和 $Al_{11}Nd_3$ 相结合体，其中 $Al_{11}Nd_3$ 相充当了 Mg_2Si 相的形核质点。

根据以上各组合金的组织形貌与物相分析，可以推断出具有篆体形貌的 Mg_2Si 相聚集区的形成机理。当合金中 Si 元素的加入量为 1% 时，组织中将会生成大量的 Mg_2Si 相。 Mg_2Si 相属于小晶面生长，当长到一定尺寸时，由于其固液界面生长前沿的溶质边界层形成的成分过冷以及生长晶面上不同区域之间硅元素的过饱和度的差异，使得 Mg_2Si 晶体凝固界

面失稳，由平面生长方式变为枝晶生长方式。在本合金的凝固过程中，加入了稀土元素 Nd，Nd 在含量较少的情况下会优先和 Al 元素生成针状的 $Al_{11}Nd_3$ 相。高熔点的 $Al_{11}Nd_3$ 化合物在合金凝固过程中首先结晶析出，为 Mg_2Si 相的形成提供了异质

形核质点，促进 Mg_2Si 相以针状的形式生成。同时 Nd 是表面活性元素，容易在凝固过程中富集在固液界面前沿，形成成分过冷并机械地阻碍其它原子扩散，有抑制 Mg_2Si 相长大，并且细化晶粒的作用。Nd 容易偏聚在晶粒边界，而 Mg_2Si 相也较易在晶界

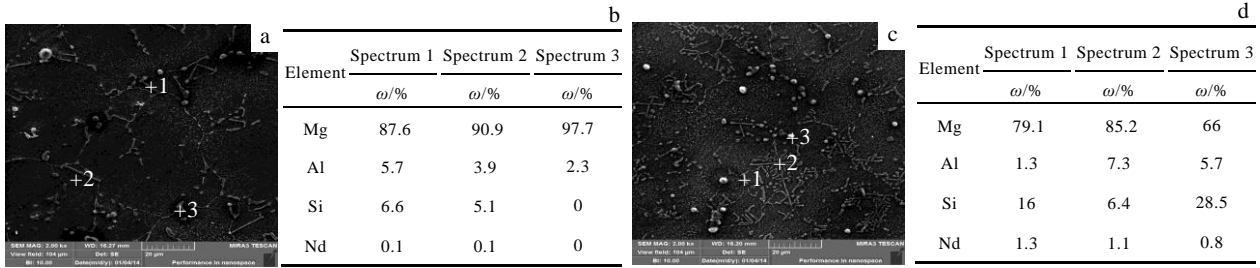


图 7 铸态合金的 SEM 形貌和 EDS 分析 (7#, 8#)

Fig.7 SEM morphologies (a, c) and EDS analysis (b, d) of the as-cast alloys (7#, 8#): (a, b) Mg-11Li-3Al-1Si-1Nd and (c, d) Mg-11Li-3Al-1Si-1.5Nd

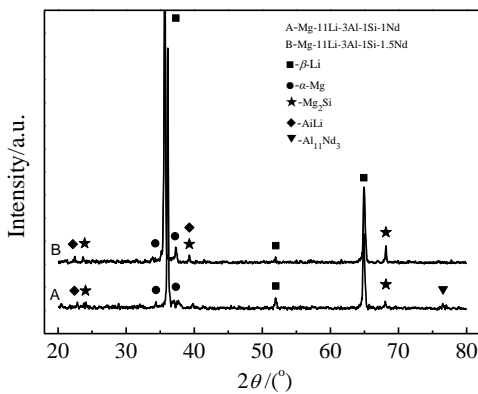


图 8 Mg-11Li-3Al-1Si-1Nd 和 Mg-11Li-3Al-1Si-1.5Nd 合金的 XRD 图谱

Fig.8 XRD patterns of the Mg-11Li-3Al-1Si-1Nd and Mg-11Li-3Al-1Si-1.5Nd alloy

处析出^[13]，同时稀土元素 Nd 在 Mg 中有相对较大的固溶度，这也促进了 Nd 对 Mg_2Si 相的细化作用。正是由于 Nd 既能促进 Mg_2Si 相的形成并细化 Mg_2Si ，又能抑制其长大，2 种机制共同作用才能形成这种以 Mg_2Si 为主体的篆体汉字特殊形貌。在具有这种形貌的 Mg-11Li-3Al-1Si-yNd 合金中，当 Nd 的加入量为 1% 时，组织最为洁净， Mg_2Si 相只在晶界处局部析出（图 2b），此时 Nd 主要起到抑制其长大的作用；当 Nd 的加入量为 1.5% 时，组织中出现了更多、更加细密的篆体组织（图 2c），此时 Nd 促进 Mg_2Si 的形成和细化 Mg_2Si 相的作用占据主导地位。

2.2 铸态合金的力学性能

表 2 为编号 1#~8# 的铸态合金的力学性能。可见，8# 合金 Mg-11Li-3Al-1Si-1.5Nd 的抗拉强度最高为 239 MPa；3# 合金 Mg-11Li-3Al-0.4Si-0.5Nd 的塑性最好，伸长率为 46.2 %。综合力学性能最好的为 7# 合金 Mg-11Li-3Al-1Si-1Nd，其抗拉强度和伸长率分别为 212.3 MPa、46.2 %。

由 1# 合金与 2# 合金性能对比可发现，在 Mg-11Li-3Al 合金中加入 0.4% Si 元素后，合金的抗拉强度略微提升，塑性下降，这是由于 Si 加入后，铸态合金组织中晶粒细化，在晶界处和基体中析出少量点状的 Mg_2Si 相，起到部分第二相强化的作用，提高了合金的抗拉强度，而在晶界处析出的点状 Mg_2Si 损害了合金的塑性，其表现为伸长率略微下降。

对比 3#、4#、5# 合金发现，随着 Nd 含量的增加，合金的抗拉强度先是大幅上升，随后稳定不变；而塑性呈现一种先降后升的趋势。在 Mg-11Li-3Al-0.4Si 合金中加入 0.5% Nd 时，组织晶粒较为粗大、均匀，析出相极少，此时稀土元素 Nd 并没有表现出其晶粒细化作用，由于所加的合金化元素含量较少，固溶强化和弥散强化的作用并不明显，合金的抗拉强度降低，而此时的晶粒形态均匀，晶界洁净，位错运动可以顺利地发生，合金较易变形，表现出了优良的塑性。当 Nd 的加入量为 1% 时，合金的抗拉强度大幅上升，塑性大幅下降，分别由 3# 合金的 144 MPa 升至 4# 合金的 188 MPa，由 46.2 % 的伸长率降至 15.4 %。这是由于随着 Nd 元素的继续增加，其晶粒细

表2 铸态合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of the as-cast alloys

Alloy No.	Tensile strength/MPa	Elongation/%
1#	159.4	38.5
2#	163	30.8
3#	144	46.2
4#	188	15.4
5#	187	43.8
6#	224	30.8
7#	212.3	46.2
8#	239	15.4

作用开始显现,如图 1d 中已出现了少量的小晶粒,同时沿晶界处析出了连续黑色点状的 Mg_2Si 相。Nd 的细晶强化和第二相粒子强化晶界共同作用,大幅提升了合金的强度,由于 Mg_2Si 是一种硬脆相,很难变形,因此钉扎在晶界并阻碍晶界运动的 Mg_2Si 相是其塑性降低的主要原因。当 Nd 的加入量为 1.5% 时,合金的强度不再增加,塑性上升至一较高水平。由图 1e, 1f 观察其显微组织可以发现,该合金的晶粒已较为细小,晶界处同时析出了白色的条形 $\alpha-Mg$ 和黑色的连续析出物 Mg_2Si 。 Mg_2Si 相包裹在 $\alpha-Mg$ 之中,由于 $\alpha-Mg$ 的变形能力较强,降低了 Mg_2Si 对塑性的恶化作用,合金的塑性得到明显改善,伸长率明显提高。

由 6#、7#、8# 合金的力学性能可以发现,随着 Si 含量增加到 1%,合金的抗拉强度已达一较高水平(均大于 210 MPa)。此时合金组织中开始出现了主要由棒状 Mg_2Si 析出相构成的篆体形貌区(如图 2),正是这种具有特殊形貌的析出区使得合金达到很高的强度。Nd 含量的改变主要影响了该析出聚集区的形态和分布,从而导致合金塑性发生变化。当 Nd 的加入量为 0.5% 时,汉字形貌析出区的棒状 Mg_2Si 相主要分布在晶界缠结处,析出区的形态较大,起到了强化晶界、阻碍晶界滑移的作用,位错运动到晶界受阻发生缠结易形成应力集中引起裂纹的萌生,降低合金塑性,此铸态合金的伸长率为 30.8%。当 Nd 的加入量为 1% 时,主要起到了细化晶粒、抑制 Mg_2Si 相长大的作用,组织洁净,晶粒非常细小,只有少量的短棒状 Mg_2Si 弥散分布在晶界处,合金获得了最高的伸长率为 46.2%,抗拉强度略有下降。当 Nd 的加入量为 1.5% 时,组织中重新出现了 Mg_2Si 汉字形貌析出区,只是析出区形态变小,其中的棒状析出物明显短化细化,取向多垂直于晶界(如图 2d),在塑性变形过程中容易撕裂基体,产生裂纹,因而合金表现出较差的塑性,其伸长率仅为 15.4%。

纵观全体铸态合金,其抗拉强度是随着 Si 含量

(0~0.4~1.0) 的增加递增,最后趋于稳定;其塑性并不会随某一种或是复合元素的添加而单调变化。Nd 元素可以与 Si 元素相辅相成共同作用,通过细化晶粒和改变 Mg_2Si 析出相的形貌来调节合金的塑性。根据 Nd 含量的不同,一方面 Nd 元素能与 Al 元素结合生成 $Al_{11}Nd_3$ 为 Mg_2Si 相提供形核质点,改变其形貌和生长方式,另一方面 Nd 在固液界面前沿形成溶质富集又能阻碍 Mg_2Si 相的长大,并细化 Mg_2Si 相。不同组分的合金形成不同的组织形貌决定了合金的综合力学性能。

3 结论

1) Si 的添加能够促使合金组织中形成篆体形貌的黑色析出聚集区,而 Nd 的加入能够细化这种黑色棒状析出物,并减小晶粒尺寸、洁净组织。对于该系合金,加入 1% 的 Nd 其晶粒细化的效果最佳。

2) 加入 Si、Nd 元素后,组织中主要生成 Mg_2Si 和 $Al_{11}Nd_3$ 2 种第二相化合物,对组成篆体形貌析出聚集区的物相分析表明,黑色棒状析出物应是 Mg_2Si 相和 $Al_{11}Nd_3$ 相结合体,其中 $Al_{11}Nd_3$ 相充当了 Mg_2Si 相的形核质点。

3) 铸态合金的抗拉强度随着 Si 含量的增加递增,最后趋于稳定;其塑性并不会随某一种或是复合元素的添加而单调变化。得到了一种综合性能较好的 Mg-11Li-3Al-1Si-1Nd 合金,其抗拉强度和伸长率分别为 212.3 MPa 和 46.2%。

参考文献 References

- [1] Kalimullin R K, Spiridonov V B, Berdnikov A T *et al.* *Metal Science and Heat Treatment*[J], 1988, 30(5-6): 338
- [2] Mason J F, Warwick C M, Smith P J *et al.* *Journal of Materials Science*[J], 1989, 24: 3924
- [3] Haferkamp H, Niemeyer M, Boehm R *et al.* *Materials Science Forum*[J], 2000, 350-351: 31
- [4] Trojanov á Z, Drozd Z, K údela S *et al.* *Composites Science and Technology*[J], 2007, 67(9): 1965
- [5] Chang T C, Wang J Y, Chu C L *et al.* *Materials Letters*[J], 2006, 60: 3272
- [6] Zhang C X, Guan S K, Zhao H L. *Materials Science Forum*[J], 2005, 488-489(6): 197
- [7] Yang Mingbo, Pan Fusheng, Shen Jia *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2009, 19(2): 287
- [8] Ohuchi K, Iwasawa S, Kamado S *et al.* *Journal of Japanese Institute of Light Metals*[J], 1992, 42(8): 446
- [9] Zhang Dingfei(张丁非), Li Pengcheng(李鹏程), Tang An(汤

- 安) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2010, 40(8): 1402
39(18): 1
- [10] Zhang Chunxiang, Guan Shaokang, Liu Tao *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21(1): 52
- [11] Zou Zhiwen(邹志文), Xiong Shoumei(熊守美). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(8): 1402
- [12] Huang Xiaofeng(黄晓峰), Wang Qudong(王渠东), Zeng Xiaoqin(曾小勤) *et al. Journal of the Chinese Society of Rare Earths*(中国稀土学报)[J], 2004, 22(3): 361
- [13] Carbonneau Y, Couture A, Neste Van *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 1998, 29A: 1759

Effects of Si and Nd Co-addition on Microstructures and Mechanical Properties of Mg-11Li-3Al Alloy

Wei Aili, Liu Xinghai, Zhang Kunyu, Dong Li, Liang Wei
(Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: A magnetic high frequency induction heating method was used to prepare high quality magnesium-lithium alloys. The effects of Si-Nd co-addition on microstructures and mechanical properties of Mg-11Li-3Al alloy were studied. The results indicate that two main second phases Mg_2Si and $Al_{11}Nd_3$ are formed in the alloys with Si and Nd addition. The added Si element can promote the formation of the gathering area of black precipitates with Chinese characters morphology, and Nd can refine the rod-like black precipitates and reduce the grain size as well as clean the tissue. When the addition amount of Nd is 1 wt%, the best refinement is obtained. The XRD and EDS analyses find that the rod-like black precipitates are combined phases of Mg_2Si and $Al_{11}Nd_3$. The tensile strength of the as-cast alloys increases with Si content increasing and finally levels off. The plasticity does not change monotonously with a certain or compound element. The Mg-11Li-3Al-1Si-1Nd alloy acquires the best comprehensive mechanical properties, whose tensile strength and elongation reach 212.3 MPa and 46.2 %, respectively.

Key words: magnesium-lithium alloy; Si-Nd co-addition; microstructures; mechanical properties

Corresponding author: Liang Wei, Ph. D., Professor, College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, Tel: 0086-351-6010022, E-mail: 554145958@qq.com