

# 基体合金相组成对硼化物增强镁锂基复合材料组织和性能的影响

段慧芬, 刘志坚, 喻浩然, 黄海锋

(中南大学粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

**[摘要]** 采用原位合成法制备了硼化物增强 Mg-Li 基复合材料。针对基体为 Mg-14Li-1Al-1Y 的复合材料力学性能仍不能满足工业应用需求的缺陷, 以 Mg-9Li-1Al-1Y 镁锂合金为基体制备了硼化物增强镁锂基复合材料(其成分为 (Mg-9Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C)。研究了 Li 含量对基体合金和复合材料组织和性能的影响。试验结果表明: 合金 Mg-9Li-1Al-1Y 与合金 Mg-14Li-1Al-1Y 相比, 其双相区组织晶粒更加细小, 各力学性能均有所提高。(Mg-9Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C 复合材料与 Mg-9Li-1Al-1Y 合金相比, 硬度提高了 66%, 抗拉强度提高了 31.33%, 伸长率降低了 15.5%。(Mg-9Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C 与 (Mg-14Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C 相比, 屈服强度降低了 15.4%, 硬度提高了 29.3%, 抗拉强度和伸长率基本保持不变。以上试验结果表明: 随着 Li 含量的降低复合材料的力学性能没有得到提高, 没有实现基体合金强度增加从而相应复合材料强度增加的试验预期, 说明相比镁锂基复合材料强化机制中第二相强化与细晶强化的作用, 基体强化作用较弱难以体现。

**关键词:** 镁锂基复合材料; 原位合成法; 强度

## Effect of Phase Composition of Matrix Alloys on Mg-Li Based Composites Reinforced With Boride

DUAN Huifen, LIU Zhijian, YU Haoran, HUANG Haifeng

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

**[ABSTRACT]** In this paper, we have prepared Mg-Li based composites reinforced with boride by in situ synthesis. For mechanic properties of Mg-14Li-1Al-1Y based composites cannot meet the requirement of industrial applications, the research has prepared composites reinforced with boride based on Mg-9Li-1Al-1Y (its composition is (Mg-9Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C). The effect of Li content on microstructure and properties of the matrix alloys and composites were studied. The results show that compared with Mg-14Li-1Al-1Y, the dual phase microstructure of Mg-9Li-1Al-1Y is finer and the mechanical properties are improved. Compared with Mg-9Li-1Al-1Y, the hardness and the tensile strength of (Mg-9Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C are enhanced by 66% and 31.33%, respectively, while the elongation decreases by 15.5%. Compared with (Mg-14Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C, the yield strength of (Mg-9Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C decrease by 15.4%, the hardness increases by 29.3%, and the tensile strength and elongation remains unchanged. The above experimental results show that the mechanical properties of composites have not been improved with the deduce of Li content. It does not reach the expectation that composite strength can be improved with strength increase of corresponding alloys. The matrix strengthening is too weak to reflect in comparison to the second phase strengthening and fine-grain strengthening of Mg-Li based composite reinforcement mechanism.

**Keywords:** Mg-Li based composites; Situ synthesis method; Strength

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2017.14.082

Mg-Li 合金以质轻、原料丰富和综合性能优良而被誉为 21 世纪最具发展潜力的绿色工程材料, 而 Mg-Li 合金作为最轻的金属结构材料, 具有最高的比强度和比刚度, 较好的减振性以及抗高能粒子穿透能力, 在航空、

航天、兵器工业、核工业、汽车行业、3C 产业、医疗器械等领域, 有巨大发展潜力<sup>[1-6]</sup>。由于其绝对强度低以及蠕变性能差等不足, 使得 Mg-Li 合金的应用受到了极大的限制。制备 Mg-Li 基的复合材料是改善其综合性能

并防止强度下降的有效途径之一。

原位合成法是近年发展起来的一种新的金属基复合材料制备方法。该方法是利用基体与添加物发生化学反应生成增强体来制备金属基复合材料。与传统方法相比,原位合成法能克服其他工艺普遍存在的一些问题,例如基体与第二相或增强体之间界面浸润不良、增强相分布不均匀等问题<sup>[7]</sup>。

常见的 Mg-Li 基复合材料的增强体主要包括: C 纤维、SiC 晶须、B<sub>4</sub>C 颗粒、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纤维、YAl<sub>2</sub> 颗粒以及不锈钢丝等<sup>[8]</sup>。

Mg-Li 合金中,随着 Li 含量的增加,合金密度会降低,晶体结构还会从 hcp (密排六方) 转变到 bcc (体心立方)。这是因为 Li 是 bcc 结构, Mg 是 hcp 结构, Li 会使 Mg 的晶格轴比(*c/a*)值变小<sup>[9]</sup>。1954 年, Freeth 和 Raynor<sup>[10]</sup> 绘制出了比较精确完整的 Mg-Li 二元合金相图,结果表明:当 Li 质量分数小于 5.7% 时, Mg-Li 合金为  $\alpha$  (Li 在 Mg 中的固溶体) 单相组织,具有 hcp (密排六方) 结构;这种合金由于轴比 *c/a* 减小, 滑移系增加 {1010} 或 {1011}, 其可加工性提高。当 Li 质量分数大于 10.3% 时, Mg-Li 合金为  $\beta$  (Mg 在 Li 中的固溶体) 单相组织,具有体心立方 (bcc) 结构, 塑性较高。当 Li 质量分数在 5.7%~10.3% 之间时, 这类 Mg-Li 合金为 ( $\alpha + \beta$ ) 双相组织,  $\alpha$  相的存在, 使 Mg-Li 合金保持相当的强度, 而  $\beta$  相使其具有较高的塑性。所以, 与  $\alpha$  或  $\beta$  单相组织相比, ( $\alpha + \beta$ ) 双相组织 Mg-Li 合金具有更好的力学性能。

闫立奇<sup>[11]</sup> 制备了硼化物增强 Mg-Li 基复合材料, 该复合材料相比其基体合金, 性能有所提高。他们先将 B<sub>4</sub>C 粉末在较低的温度 (<400 °C) 下分散在高 Li 的 Mg-Li 合金中, 将其作为 B<sub>4</sub>C/Li-Mg 预合金再加入高温的 Mg-Li 熔体中, 高温下原位反应制备了硼化物增强 Mg-Li 基复合材料, 但复合材料中存在严重的增强相团聚问题, 影响了材料的性能。杨晓亮等<sup>[12]</sup> 通过真空脱气处理以及碱洗处理降低 B<sub>4</sub>C 粉末的氧含量, 使处理过后的粉末与锂液之间浸润性提高, 改善增强体的分散性, 但团聚现象依然存在。任国安等<sup>[13]</sup> 研究了不同的粉末预处理方法对增强相分散性的影响。喻浩然等<sup>[14]</sup> 针对消除粉末的硬团聚和软团聚分别采用粉末沉降分级处理以及预合金挤压重熔处理, 并且取得了很好的效果, 团聚现象基本消失, 并且可以小幅度提高 B<sub>4</sub>C 粉末的含量而保持良好的分散性, 使得复合材料的力学性能提高。然而复合材料的力学性能依然不能满足工业应用需求, 而复合材料的强度由基体合金强度以及增强相对基体合金强化作用决定, 之前的研究已经基本解决了增强相的分布问题, 可以制备得到颗粒细小, 分布弥散

均匀的增强相强化的镁锂基复合材料。综上所述, 本文将从提高基体合金强度的角度出发, 采用 Li 含量较低的 Mg-9Li-1Al-1Y 合金体系作为制备复合材料的基体, 来探究具有两相组织的基体对原位合成复合材料组织和性能的影响。

## 1 试验

### 1.1 材料制备

试验用原材料为镁锭 (纯度 99.95%), 镁粉 (纯度 99.5%), 锂锭 (纯度 99.9%), 铝片 (纯度 99.95%), B<sub>4</sub>C 粉末 (粒度 <10  $\mu$ m, 纯度 95%), Mg-30%Y 合金。

将 B<sub>4</sub>C 粉末进行沉降分级处理。将处理后的 B<sub>4</sub>C 粉末与镁粉、锂锭按质量比 1:1:1 混合, 在 400 °C 以下熔炼搅拌制备 B<sub>4</sub>C/Li-Mg 预合金铸锭。将预合金在室温下进行冷挤压, 挤压比为 16:1, 挤压后再次熔化, 然后轧制成预合金板并剪碎。按专利<sup>[15]</sup> 所指方法, 将镁锭、锂锭、铝片和 Mg-Y 合金按所需比例放置在真空熔炼炉中加热到 650 °C 以上融化后搅拌, 然后将熔体温度降至 600 °C 左右再加入预合金碎片, 保温后再搅拌使之分散均匀, 继续升温到 720 °C 充分进行原位反应后再冷却, 制备得到成分为 (Mg-14Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C、(Mg-9Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C 两种硼化物增强 Mg-Li 基复合材料铸锭。按与制备复合材料相似的方法制备 Mg-14Li-1Al-1Y、Mg-9Li-1Al-1Y 两种 Mg-Li 合金铸锭。再将制备得到的 4 个铸锭经 200 °C 热锻造、220 °C 热挤压 (挤压比为 16:1) 得到硼化物/Mg-Li 基复合材料以及 Mg-Li 基体合金棒材。

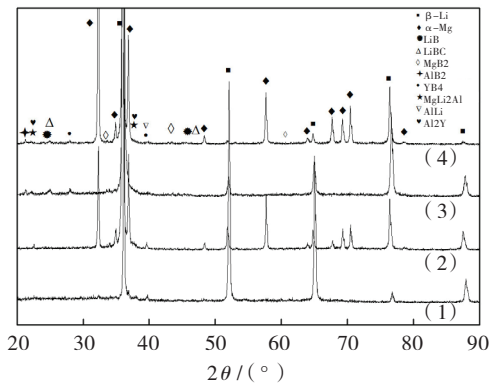
### 1.2 分析与检测

采用 MINQIAO FA2004N 电子天平称量试样的质量。采用阿基米德排水法测量 Mg-Li 基体合金及硼化物/Mg-Li 基复合材料的实际密度。采用 Rigaku D/max 2550 全自动转靶 X 射线衍射仪对基体合金与硼化物/Mg-Li 基复合材料进行 XRD 测试。采用 Leica Me F3A 金相显微镜观察材料的金相显微组织, 腐蚀剂为 4% 的硝酸酒精溶液。材料洛氏硬度 (HRB) 采用 200HRS-150 型数显洛氏硬度仪测试。将基体合金和复合材料棒材分别加工成拉伸试验样品, 在 CSS-44100 万能电子拉伸机上测试材料的抗拉强度。采用 Nova Quanta FEG 250 扫描电镜观察基体合金和复合材料的拉伸断口形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 物相组成

图 1 为基体合金及复合材料的 XRD 衍射谱, 可以看到, Li 含量 9% 的基体合金相比 Li 含量 14% 的基体



注:(1) Mg-14Li-1Al-1Y; (2) Mg-9Li-1Al-1Y; (3) (Mg-14Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C; (4) (Mg-9Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C。

图1 基体合金及复合材料的XRD衍射谱  
Fig.1 XRD pattern of matrix alloys and composites

合金,合金内除 β-Li 相外,出现了 α-Mg 相衍射峰。此外,还出现了 MgLi<sub>2</sub>Al 相、MgLi<sub>2</sub>Al 相分解产生的 AlLi 相以及 Al 和 Y 形成的 Al<sub>2</sub>Y 化合物。当添加 B<sub>4</sub>C 与基体发生原位反应后,复合材料中又出现了较多基体中的合金元素与 B、C 形成的硼化物第二相衍射峰。α-Mg 相为 hcp 结构,β-Li 相为 bcc 结构,由 α-Mg 相和 β-Li 相构成的双相组织的基体合金的强度大于 β-Li 相单相组织合金的强度。沉淀析出的 MgLi<sub>2</sub>Al 相和 Al<sub>2</sub>Y 化合物作为硬质颗粒可以阻碍位错运动,有利于材料强度硬度提高。弥散分布的硼化物对基体具有强化作用,硼化物有较好的热稳定性,不会因为时效和高温溶解,对位错有明显的阻碍作用,在复合材料中产生第二相强化作用使材料强度提高。

## 2.2 微观组织

图 2 为挤压态基体合金和复合材料的金相照片,图 2 (a) 中基体合金 Mg-14Li-1Al-1Y 挤压态组织晶粒为等轴晶状,这是因为在热挤压过程中发生了动态再结晶,平均晶粒尺寸为 60 μm; 图 2 (b) 中基体合金 Mg-9Li-1Al-1Y 的组织由 hcp 结构的 α-Mg 相和 bcc 结构的 β-Li 相组成,体积比接近 1:1,其中白色的为 α 相,其余为 β 相,合金平均晶粒尺寸只有 20 μm,小于基体合金 Mg-14Li-1Al-1Y 的晶粒尺寸,双相组织对晶粒的长大的抑制作用明显。由图 2 (c) 和图 2 (d) 可知,将基体合金分别制备成复合材料后,增强相沿挤压方向呈条状分布,由于增强相的存在,晶粒进一步细化,平均晶粒尺寸均只有 10 μm; 并且复合材料 (Mg-9Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C 也可以看到明显的双相区组织存在。晶粒细化有助于强度、硬度以及塑性同时提高。

复合材料晶粒细化的原因有:(1) 材料在挤压过程中发生动态再结晶,细小弥散的增强相可作为异质形核的形核中心,有利于再结晶形核,并且增强相阻碍晶界

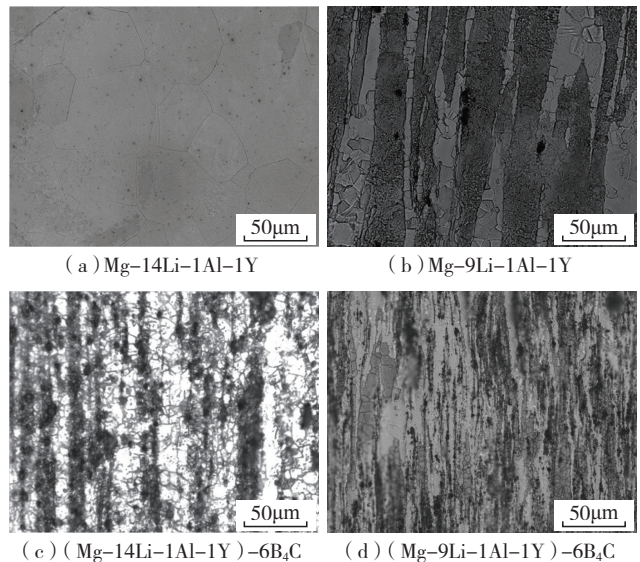


图2 基体合金和复合材料的金相照片  
Fig.2 Metallographs of matrix alloys and composites

迁移,能降低晶粒长大的速率;(2) 在材料凝固过程中,由于 Y 的平衡分配系数  $K < 1$  以及其在基体中溶解度小,所以 Y 元素在固液界面前沿聚集引起成分过冷促进形核;并且合金元素 Al 与 Y 形成 Al<sub>2</sub>Y 化合物弥散分布在晶界出阻碍晶粒长大。

复合材料 (Mg-9Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C 与复合材料 (Mg-14Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C 的平均晶粒尺寸都为 10 μm 的原因为: 由图 2 (c) 和图 2 (d) 可知,复合材料中增强相颗粒团聚较少。增强体尺寸越小、分布越均匀,不仅有利于再结晶形核,而且晶界迁移所受的阻力也越大,晶粒长大速率越小,当晶界能所提供的晶界迁移驱动力与增强相粒子对晶界迁移所施加的阻力相等时,晶粒长大后的极限晶粒平均直径与增强相颗粒尺寸之间存在下列关系式<sup>[16]</sup>:

$$\bar{D}_{lim} = \frac{4r}{3\phi} \quad (1)$$

式中,  $\phi$  为单位体积合金中增强相粒子所占的体积分数,  $r$  为增强相颗粒半径,  $\bar{D}_{lim}$  为极限平均晶粒尺寸。可见增强相粒子的体积分数越大或尺寸越小,则极限平均晶粒尺寸也越小。由于 Li 含量不同的两种基体合金中加入了相同比例的 B<sub>4</sub>C,所以两种复合材料的晶粒尺寸接近。

## 2.3 密度

表 1 为基体合金及复合材料的密度值。从表 1 中的数据可知, Mg-9Li-1Al-1Y 合金的密度高于 Mg-14Li-1Al-1Y 合金,这是因为密度较低的 Li 含量减少所致; 而将合金原位反应制成复合材料后密度均有提高,这和加入了密度相对较高的 B<sub>4</sub>C 有关; 复合材料 (Mg-

9Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C 较(Mg-14Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C 密度提高约 5%,但相对于其他镁基复合材料,仍保持低密度的优势。

## 2.4 硬度

表 2 为基体合金和复合材料的硬度值。复合材料(Mg-9Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C 较基体合金 Mg-9Li-1Al-1Y 硬度值提高 66%,这是因为复合材料中产生了比基体硬度更高的增强相,且增强相弥散在复合材料中,使得复合材料比基体合金晶粒尺寸更细小,这也能提高材料硬度。表 2 中数据还表明,Li 含量 9% 的基体合金和复合材料比 Li 含量 14% 的基体合金和复合材料硬度要高约 30%。由图 2 可知,Li 含量 9% 的基体合金相比 Li 含量 14% 的基体合金的晶粒更为细小,并且 Li 含量 9% 的基体合金由双相组织构成,这都使得其硬度更高。而 Li 含量 9% 的复合材料的硬度高于 Li 含量 14% 的复合材料是因为其双相组织以及 Al 在双相组织中溶解度相对小,可与 Y 形成更多的 Al<sub>2</sub>Y 硬相。所以,Li 含量的降低有利于材料硬度的提高。

## 2.5 力学性能

基体合金及复合材料的力学性能如表 3 所示,工程应力-应变曲线如图 3 所示。由图 3 可知,基体合金 Mg-14Li-1Al-1Y 的各项力学性能指标都是最低的,降低合金 Li 含量,合金抗拉强度提高 13.69%,伸长率提高 24.35%;把合金制备成复合材料,材料强度、伸长率和弹性模量都得到了不同程度的提高。复合材料(Mg-9Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C 相比基体合金 Mg-9Li-1Al-1Y 抗拉强度提高了 31.33%,伸长率降低了 15.5%,相比文献[17-21]中制备的合金化强化的双相区镁锂合金,力学性能具有明显优势。虽然对于合金 Li 含量的降低能提高材料强度和伸长率,但这对复合材料并不适用,从表

表1 基体合金及复合材料的密度值

基体	密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )
Mg-14Li-1Al-1Y	1.355
Mg-9Li-1Al-1Y	1.486
(Mg-14Li-1Al-1Y)-6B <sub>4</sub> C	1.458
(Mg-9Li-1Al-1Y)-6B <sub>4</sub> C	1.535

表2 基体合金和复合材料的洛氏硬度值

基体	硬度 HRB
Mg-14Li-1Al-1Y	21.00
Mg-9Li-1Al-1Y	27.77
(Mg-14Li-1Al-1Y)-6B <sub>4</sub> C	35.65
(Mg-9Li-1Al-1Y)-6B <sub>4</sub> C	46.10

表3 基体合金和复合材料的力学性能

基体	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	弹性模量 /GPa
Mg-14Li-1Al-1Y	153.75	124.41	32.98	39.98
Mg-9Li-1Al-1Y	174.8	153.88	29.82	50.07
(Mg-14Li-1Al-1Y)-6B <sub>4</sub> C	230.65	211.13	25.2	53.87
(Mg-9Li-1Al-1Y)-6B <sub>4</sub> C	229.58	178.59	24.36	56.76

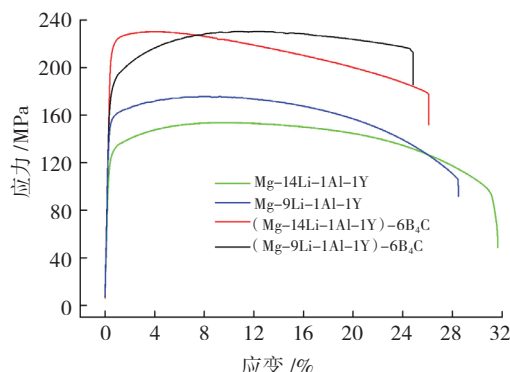


图3 基体合金和复合材料工程应力-应变曲线  
Fig.3 Engineering stress-strain curve of matrix alloys and composites

中可知不同 Li 含量的复合材料各项力学性能指标除屈服强度外差别不大,结合应力-应变图可知,复合材料(Mg-9Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C 相比复合材料(Mg-14Li-1Al-1Y)-6B<sub>4</sub>C,虽然屈服强度降低了 15.4%,但塑性变形阶段硬化率更大,材料的偶然抗过载能力更高,这是因为双相区组织中  $\alpha$ -Mg 相基体的层错能低,所以位错攀移与交滑移相比 bcc 晶体结构的单相组织更困难,加工硬化程度较高;也是由于双相区组织晶界对位错滑移的障碍作用大于单相区组织,且有一定的固溶强化效果,故继续塑性变形的能力也更大。

本文制备的硼化物强化 Mg-Li 基复合材料,增强相主要为 B<sub>4</sub>C 与 Li 原位反应形成硼化物,Li 与 B<sub>4</sub>C 原位反应生成 LiB、LiBC 和 LiC 的反应式如下:



复合材料中添加的少量合金元素如 Al、Y 也可与 B<sub>4</sub>C 反应生成 AlB<sub>12</sub> 和 YB<sub>4</sub> 等物相,以及 Al 和 Y 反应生成 Al<sub>2</sub>Y。这些化合物同位错相互牵制,对材料产生强化效果。

弥散强化和析出强化对位错的运动有明显的阻碍作用,具体表现为位错绕过增强颗粒运动,留下位错环,两弥散质点的间距越小,则位错绕过质点时的曲率半径越大,导致对位错移动阻力的增加,材料得到强化。

由测试结果知两种复合材料的抗拉强度相近,这是

因为影响复合材料抗拉强度的因素中,增强相的数量、尺寸以及分布最为重要,在  $B_4C$  加入量相同的情况下,两种复合材料中产生的增强相数量、尺寸以及分布相近,而增强相的对位错的阻碍作用相同,所以形成的第二相强化程度相同,而由前面分析可知两种复合材料的晶粒大小相似,所以细晶强化的效果相近。而相对于第二相强化与细晶强化对材料的力学性能的影响效果,双相组织对基体合金强度的提高在制备成复合材料后,其对复合材料强化效果较弱,难以体现,所以结果是两种复合材料抗拉强度相近。

与  $(Mg-14Li-1Al-1Y)-6B_4C$  相比,  $(Mg-9Li-1Al-1Y)-6B_4C$  屈服强度低的原因: 对于一个 MMC, 复合材料屈服的开始是由基体的屈服开始所支配。因为陶瓷相有比较高的刚度, 所以即使在 MMC 没有发生塑性流变时, 所加的载荷通常在相之间非常不均匀分配。作为这种情况的自然结果是, 在基体中从一点到另一点的应力状态有很大的变化。不同的基体对复合材料的屈服强度有较大的影响。但不是基体强度越高, 复合材料强度越高。康国政等<sup>[22]</sup>认为基体本身强度较低时, 复合材料的强度将有较大幅度的提高, 因此对基体本身强度较低的复合材料通过基体原位性能的大幅度提高使复合材料强度提高十分明显, 说明基体同增强体之间存在着优化选择, 合理匹配的问题。只有增强体与基体变形相协调, 缓解应力集中, 延缓裂纹产生从而对强度、塑性作出贡献。复合材料屈服强度与增强体颗粒阻碍基体位错运动而引起的强度增量有关, 本文研究的两种复合材料, 增强相对含 14%Li 的单相组织构成的复合材料引起的强度增量明显大于对含 9%Li 的双相组织构成的复合材料, 所以含 9%Li 的复合材料屈服强度低于 14%Li 屈服强度。

### 2.6 断口形貌

基体合金和复合材料拉伸断口形貌如图 4 所示。可知, 合金  $Mg-14Li-1Al-1Y$  的显微断口形貌以韧窝断裂为主, 存在少量的大韧窝和撕裂棱, 但同时也伴有脆性解理断裂的特征, 有典型的解理台阶和河流花样; 而合金  $Mg-9Li-1Al-1Y$  的断口形貌则为韧窝断裂, 平均韧窝尺寸为  $10\mu m$ 。复合材料的断口形貌都呈现纯韧性断裂, 为典型的等轴韧窝, 韧窝尺寸降为  $3\sim 5\mu m$ , 另外部分韧窝底部还可观察到有颗粒相存在, 且颗粒相比较分散, 对位错的滑移有很好的阻碍作用。断口形貌能很好地符合材料组织形貌与力学性能。

### 3 结论

(1) 与  $Mg-14Li-1Al-1Y$  合金相比,  $Mg-9Li-1Al-1Y$  合金双相区组织晶粒更加细小, 各力学性能均有所

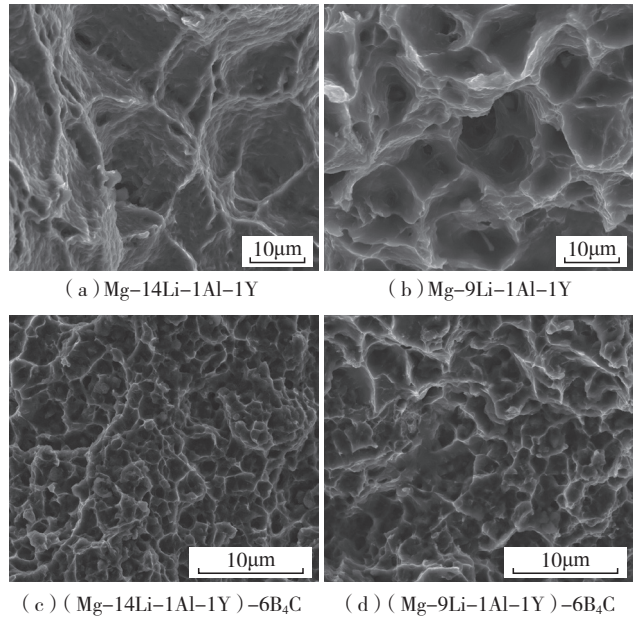


图4 基体合金和复合材料拉伸断口形貌

Fig.4 Tensile fracture morphologies of matrix alloys and composites

提高。

(2) 与  $Mg-9Li-1Al-1Y$  合金相比,  $(Mg-9Li-1Al-1Y)-6B_4C$  复合材料硬度提高了 66%, 抗拉强度提高了 31.33%, 伸长率降低了 15.5%。

(3)  $(Mg-9Li-1Al-1Y)-6B_4C$  相比  $(Mg-14Li-1Al-1Y)-6B_4C$ , 屈服强度降低了 15.4%, 硬度提高了 29.3%, 抗拉强度和伸长率基本保持不变。Li 含量的降低复合材料力学性能没有得到提高, 没有实现基体合金强度增加相应复合材料强度增加的试验预期。这说明相比镁锂基复合材料中第二相强化与细晶强化的作用, 基体强化作用较弱难以体现。

### 参考文献

- [1] FROST P D. Technical and economic status of magnesium-lithium alloys[M]. Washington: NASA,1965.
- [2] JACKSON R J, FROST P D. Properties and current applications of magnesium-lithium alloys[M]. Washington: NASA,1965.
- [3] BYRER T G, WBITE E L, FROST P D. The development of magnesium-lithium alloys for structural application[M]. Washington: NASA,1964.
- [4] MATUCHA K H. 非铁合金的结构和性能 [M]. 丁道云, 译. 北京: 科学出版社, 1999:142.  
MATUCHA K H. Structure and properties of non-ferrous alloys[M]. DING daoyun, trans. Beijing: Science Press, 1999:142.
- [5] HAFERKAMP H, NIEMERYER M, BOEHM R, et al. Development, processing and applications range of magnesium lithium

alloys[J]. Material Science Forum, 2000, 350: 31-42.

[6] AGHION E, BRONFIN B. Magnesium alloys development towards the 21st century[J]. Material Science Forum, 2000, 350: 19-28.

[7] 刘海燕, 李峻青, 刘冰, 等. Mg-Li 基复合材料的研究近况[J]. 材料导报, 2006, 20(7): 401-403.

LIU Haiyan, LI Junqing, LIU Bing, et al. Recent research on Mg-Li based composites [J]. Materials Review, 2006,20(7): 401-403.

[8] 孟祥瑞, 巫瑞智, 张密林. 超轻 Mg-Li 合金细晶强化与复合强化的研究现状 [J]. 铸造技术, 2009,30(1): 116-119.

MENG Xiangrui, WU Ruizhi, ZHANG Milin. Ultra light Mg-Li alloy fine grain and compound intensifying research [J]. Casting Technology, 2009,30 (1): 116-119.

[9] NIKULIN L V, LYKASOVA G L, SHKLYAEVA N M. Structure and properties of binary magnesium-lithium alloys subjected to pressure casting[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1986, 28(10): 777-782.

[10] FREETH W E, RAYNOR G V. The systems magnesium-lithium and magnesium-lithium-silver[J]. Journal Institute of Metals, 1954, 82: 1317-1324.

[11] 闫立奇. 原位生成硼化合物强化镁锂基复合材料的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.

YAN Liqi. Research on Mg-Li based composites reinforced with boride by in situ synthesis [D]. Changsha: Central South University, 2006.

[12] 杨晓亮, 刘志坚, 周萍, 等. 真空脱气处理对微细碳化硼粉末特性的影响 [J]. 中南大学学报, 2010, 41(6): 2127-2131.

YANG Xiaoliang, LIU Zhijian, ZHOU Ping, et al. Effects of vacuum degassing treatment on characteristics of micro-B<sub>4</sub>C powder[J]. Journal of Central South University, 2010,41(6): 2127-2131.

[13] 任国安, 刘志坚, 杨晓亮, 等. 碱洗处理对 B<sub>4</sub>C 粉末在 Mg-Li 基体中分散效果的影响 [J]. 复合材料学报, 2011, 28(6): 148-152.

REN Guoan, LIU Zhijian, YANG Xiaoliang, et al. Effects of alkali treatment on B<sub>4</sub>C powder dispersion in Mg-Li matrix[J]. Journal of composites, 2011,28 (6): 148-152.

[14] 喻浩然, 刘志坚, 黄海锋, 等. 硼化物分散工艺对 Mg-Li 基复合材料组织与性能的影响 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2015, 20(6): 887-893.

YU Haoran, LIU Zhijian, HUANG Haifeng, et al. Effect of boride distribution process on microstructure and properties of Mg-Li based composites[J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 2015, 20(6): 887-893.

[15] 刘志坚, 任国安, 杨晓亮, 等. 一种 Mg-Li 基复合材料的制备方法: 201110401057.9[P]. 2012-05-02.

LIU Zhijian, REN Guoan, YANG Xiaoliang, et al. A preparation method of Mg-Li based composites: 201110401057.9[P]. 2012-05-02.

[16] 张俊善. 材料强度学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.

ZHANG Junshan. Strength of materials [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004.

[17] WANG T, ZHANG M, WU R. Microstructure and properties of Mg-8Li-1Al-1Ce alloy[J]. Materials Letters, 2008,62(12):1846-1848.

[18] 赵亮. Mg-8Li-Y 合金的组织结构和机械性能 [D]. 成都:

西华大学, 2008.

ZHAO Liang. Microstructure and mechanical properties of Mg-8Li-Y alloys [D]. Chengdu: Xihua University, 2008.

[19] YANG Y, PENG X, WEN H, et al. 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.

[20] 周伟, 彭晓东, 杨艳, 等. Sr 对 Mg-9Li-3Al 合金显微组织及高温力学性能的影响 [J]. 铸造, 2011, 60(5): 489-492.

ZHOU Wei, PENG Xiaodong, YANG Yan, et al. Effect of Sr on microstructure and high temperature mechanical properties of Mg-9Li-3Al alloy[J]. Casting, 2011, 60(5): 489-492.

[21] 边丽萍, 孟械朴, 乐启焱, 等. Mg-9Li-5Gd-1Zr 合金的组织转变及力学性能 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(10): 38-41.

BIAN Liping, MENG Yupu, LE Qichi, et al. Organizational change and mechanical properties of Mg-9Li-5Gd-1Zr[J]. Thermal Processing Technology, 2013, 42(10): 38-41.

[22] 康国政, 高庆, 杨川, 等. 基体特性对  $\delta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 合金复合材料力学行为的影响 [J]. 复合材料学报, 2000, 17(2): 25-29.

KANG Guozheng, GAO Qing, YANG Chuan, et al. Effect of basic features on mechanical behavior of  $\delta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al alloy composite[J]. Journal of Composite Materials, 2000, 17 (2): 25-29.

通讯作者: 刘志坚, 教授, 研究方向为热电池负极材料, E-mail: lzpm@csu.edu.cn.

(责编 大漠)

(上接第81页)

Performance, 2014, 23(8):2965-2972.

[7] 徐然. TA15 钛合金焊后氢处理工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

XU Ran. A study of thermo hydrogen processing of TA15 alloy after welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

[8] 杨静. TC4 合金激光焊接工艺参数与接头组织性能研究 [J]. 热加工工艺, 2007, 36(23):15-18.

YANG Jing. Effect of laser welding parameters on microstructure and mechanical properties of TC4 welded joints[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(23):15-18.

[9] 徐秉业. 应用弹塑性力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

XU Bingye. Elastoplastic theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.

[10] 闫志峰. 基于红外热像法镁合金及其焊接接头疲劳行为及评定机理研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2014.

YAN Zhifeng. Fatigue fracture behavior and assessment theory of magnesium alloy base on infrared thermography[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.

通讯作者: 段爱琴, 博士, 研究员, 研究方向为红外热成像技术在工程制造中的应用, E-mail: 13611384073@163.com.

(责编 冬月 大漠)