

稀土 Y 对挤压态 Mg-5Li 合金组织及性能的影响

祖国胤, 杜 鹏, 宋洪全, 孙世亮
(东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 采用表面覆盖剂及氩气保护的熔炼方法制备了 Mg-5Li- x Y ($x=0, 1, 2, 3, 4$) 合金, 研究了稀土元素 Y 对挤压态 Mg-5Li 合金的显微组织及力学性能的影响。研究表明, Mg-5Li 合金中的 Y 元素主要是以稀土化合物 $Mg_{24}Y_5$ 的形式存在于合金中; 挤压变形后, 合金发生了明显的动态再结晶, 出现了大量的等轴晶, 弥散分布的 $Mg_{24}Y_5$ 相阻碍了动态再结晶过程中的晶粒长大, 晶粒明显细化。挤压态 Mg-5Li-3Y 合金获得了优异的力学性能, 其抗拉强度和断裂伸长率分别达到了 231.63 MPa 和 9.35%, 合金断裂方式主要为韧性断裂。

关 键 词: 镁锂合金; 稀土 Y; 挤压变形; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG 146.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)10-1422-05

Effects of Y on Microstructure and Properties of As-Extruded Mg-5Li Alloys

ZU Guo-yin, DU Peng, SONG Hong-quan, SUN Shi-liang

(School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZU Guo-yin, E-mail: zugy@smm.neu.edu.cn)

Abstract: With the protection of surface covering agents and argon protection, the Mg-5Li- x Y ($x=0, 1, 2, 3, 4$) alloys were prepared by conventional casting methods. The effects of rare earth on microstructure and mechanical properties of the as-extruded alloys were investigated. The results showed that the RE compound $Mg_{24}Y_5$ generated after adding Y into the Mg-5Li alloy. The dynamic recrystallization arose during the hot extrusion process, leading to a large number of equiaxed grains appeared. The dispersive distribution of $Mg_{24}Y_5$ phase hindered the growth of the grains during the dynamic recrystallization, which led to the grain refinement. The as-extruded Mg-5Li-3Y alloy achieved the best mechanical property: the tensile strength and elongation reached up to 231.63 MPa and 9.35%, respectively. The fracture mode of the alloy is mainly ductile fracture.

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

镁合金是迄今为止最轻的商业化结构材料, 它具有良好的比强度和弹性模量, 其密度只有 1.74 g/cm^3 。但由于镁的晶体结构为密排六方, 因而其变形能力较差, 制约了镁合金的应用^[1-2]。在一系列镁合金中, Mg-Li 合金属于超轻合金, 而且随着 Li 元素的添加, 镁合金的晶体结构由密排六方向体心立方转变, 从而具有更多的滑移系^[3]。因此, Li 元素添加到镁合金中能够显著提高合金的变形能力, 使其在结构材料和电气装置

元件领域具有广阔的应用前景^[4-5]。但是, 由于 Mg-Li 合金的强度偏低, 不能很好地满足应用领域的需求, 在很大程度上制约了其发展与应用。

稀土元素 Y 是镁锂合金的有益添加元素, 合金中加入 Y 元素不但可以阻燃、改善合金的铸造性能, 还可以起到固溶强化、细晶强化及弥散强化等作用, 显著提高铸态合金的室温强度及热稳定性^[6-9]。本文对具有广阔应用前景的挤压态 Mg-5Li- x Y ($x=0, 1, 2, 3, 4$) 合金的显微组织进行

了研究,重点分析了稀土元素 Y 对挤压态 Mg-5Li 合金力学性能的影响,以期对该类合金在汽车制造、电子 3C 等行业的应用提供理论依据。

1 实验材料和方法

研究中选用的实验原料为纯镁锭(99.9%)、锂锭(99.9%)和 Y 质量分数为 30% 的 Mg-Y 中间合金。在电阻炉中采用表面覆盖剂及氩气保护的熔炼方法制备出直径为 70 mm、长 135 mm 的 Mg-5Li-xY ($x=0, 1, 2, 3, 4$) 合金棒。合金在 673 K 的温度下固溶处理 24 h,之后加工成 $\phi 60$ mm、长 120 mm 的柱状合金棒,在 532 K 的温度条件下进行反向挤压变形,挤压比为 25:1,挤压速度为 30 mm/s。金相试样经过砂纸打磨及抛光后使用苦味酸-乙醇溶液进行浸蚀,使用 Olympus DXS600 金相显微镜观察合金的显微组织。采用 Ultra Plus 扫描电镜及其附带的能谱仪分析合金的显微组织和微区成分。在 X'Pert Pro 型

X 射线衍射仪上分析合金的相组成。在 Instron 5969 型电子万能试验机上进行拉伸性能测试,拉伸速度为 1 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 挤压态 Mg-5Li-xY 合金的显微组织

稀土元素 Y 已被研究证实具有有效细化镁合金晶粒的作用,并可通过改变滑移或孪生的作用机制,显著提高镁合金的韧性。图 1 是合金垂直于挤压方向的金相显微照片。由图可见,挤压态 Mg-Li 二元合金的晶粒尺寸较大,并且大小不均。合金中添加稀土 Y 元素后,晶粒得到了明显细化,出现大量的等轴晶,并且随着 Y 质量分数的增加,细化效果逐渐增强,合金中的颗粒状稀土相增多,有效地抑制了合金在挤压过程中动态再结晶晶粒的长大,从而使合金的晶粒得到了明显的细化。

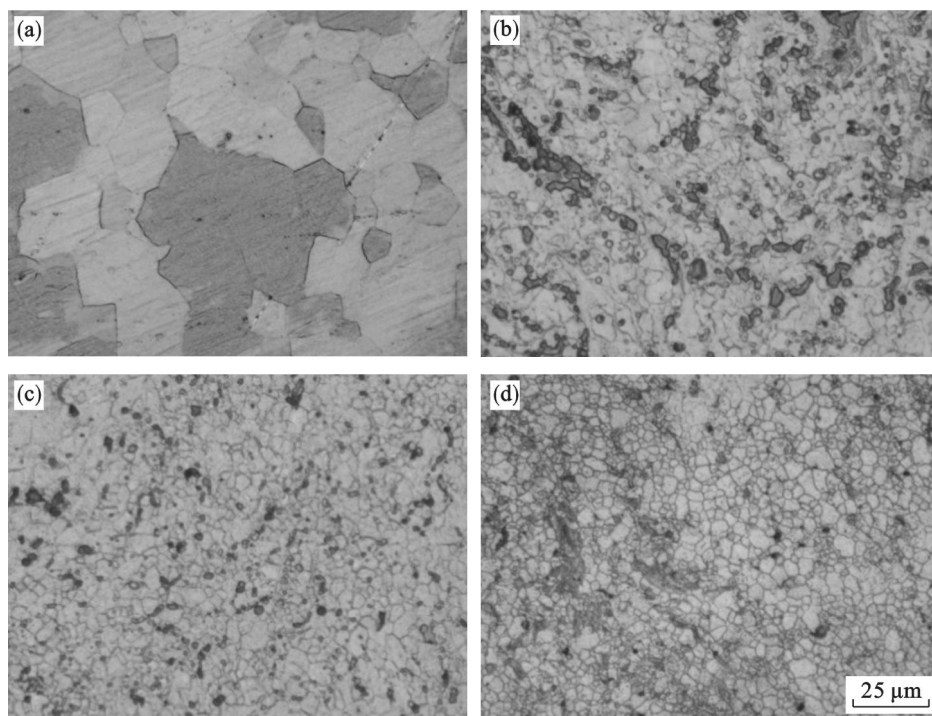


图 1 挤压态 Mg-5Li-xY 合金的金相显微组织(垂直于挤压方向)

Fig. 1 Microstructures of as-extruded Mg-5Li-xY alloys (perpendicular to extrusion direction)

(a)— $x=0$; (b)— $x=1$; (c)— $x=3$; (d)— $x=4$.

Mg-5Li-xY 中以体心立方结构的 β 相为主,合金具有良好的塑性变形能力,挤压成形过程的三向压应力状态也有助于避免合金中裂纹等缺陷的形成。图 2 是合金平行于挤压方向的金相显微照片。由图可以发现,经过挤压变形后,合金中

出现了明显的挤压带。合金中稀土化合物也表现出沿着挤压方向分布的特点,并且随着 Y 质量分数的增加而增多。晶粒尺寸随 Y 质量分数的增加而发生的变化与图 1 中垂直于挤压方向观察到的形貌相同。

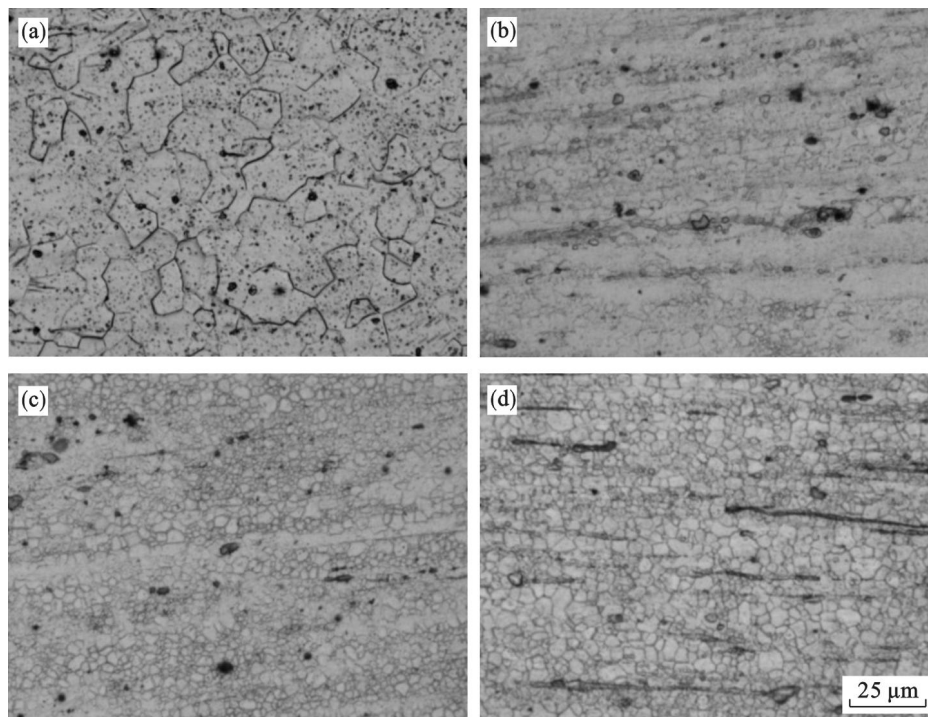


图2 挤压态 Mg-5Li-xY 合金的金相显微组织(平行于挤压方向)
Fig. 2 Microstructures of as-extruded Mg-5Li-xY alloys (parallel to extrusion direction)
(a)— $x=0$; (b)— $x=1$; (c)— $x=3$; (d)— $x=4$.

2.2 挤压态 Mg-5Li-xY 合金相组成分析

表征并分析 Y 元素在 Mg-5Li-xY 合金中的赋存状态,并从相组成角度分析其强韧化机理,这对明确 Mg-5Li-xY 合金的成分设计原则,进而实现对合金力学性能的调控具有重要意义.图 3 为挤压态 Mg-5Li-3Y 合金的 X 射线衍射谱.由图可见,合金中主要存在 α -Mg 相, β -Li 相和 Mg_{24}Y_5 相,物相分析结果进一步说明合金中的稀土元素 Y 主要以稀土化合物 Mg_{24}Y_5 的形式存在.

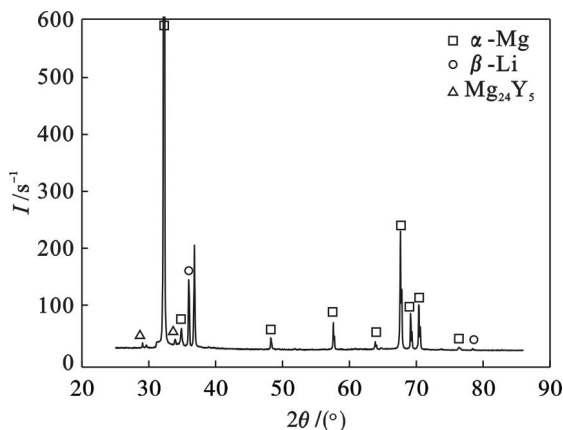


图3 挤压态 Mg-5Li-3Y 合金 XRD 衍射谱
Fig. 3 XRD pattern of as-extruded Mg-5Li-3Y alloy

图4 为挤压态 Mg-5Li-3Y 合金的 SEM 形

貌及能谱分析图.对 A 点位置进行能谱分析,结果如图 4b 所示,说明基体相主要是由 Mg 元素组成的,并且还检测出了 Y 元素的存在,表明合金中有部分 Y 元素固溶到了 α -Mg 基体中.在合金中选取 B 点位置的化合物进行能谱分析,其结果如图 4c 所示,其 Mg 与 Y 的原子数比接近 24:5,结合 XRD 分析结果,可以确认为 Mg_{24}Y_5 相.结合对合金显微组织及物相分析的测试结果,在 Mg-5Li 合金中添加稀土 Y 元素后,合金中出现了一定量的稀土化合物 Mg_{24}Y_5 ,部分稀土化合物在挤压过程中被挤碎成小颗粒,最终沿挤压方向呈带状分布在合金基体中.

2.3 Y 对挤压态 Mg-5Li 合金力学性能的影响

稀土镁合金的研究发现,合金中添加适量的 Y 元素可以改善合金的铸造性能,细化组织,增强合金耐蚀性能,对提高合金室温及高温力学性能也具有积极作用.图 5 给出了挤压态合金的抗拉强度、屈服强度和断裂伸长率.从图中可以看出,合金中添加稀土 Y 元素后,合金的屈服强度和抗拉强度均有较大幅度的提高.合金中添加 1% Y 元素后,合金的抗拉强度达到了 218.76 MPa,较 Mg-5Li 二元挤压态合金的抗拉强度提高了 48.2%.当 Y 的质量分数增加到 3% 时,合金的抗拉强度达到了最高值 231.63 MPa.继续增大合金中 Y 的质量分数,合金的抗拉强度反而有所下

降. 合金的屈服强度与抗拉强度的变化趋势一致, Mg-5Li-3Y 合金获得了 175.87 MPa 的最大屈服强度. 结合对挤压态合金显微组织的分析可知, Mg-5Li-3Y 合金具有较小的晶粒尺寸, 细晶强化效果显著, 并且合金中具有较多弥散分布的颗粒状化合物, 对晶界也起到了一定的钉扎作用, 阻

碍了晶粒之间的相互运动, 使合金变形抗力增加, 发挥了第二相强化的作用, 从而提高了合金的力学性能^[10]. 而当 Y 质量分数达到 4% 时, 合金中的稀土相增多, 部分发生了团聚, 形成了体积较大的化合物, 第二相强化作用减弱, 从而影响了合金的强度.

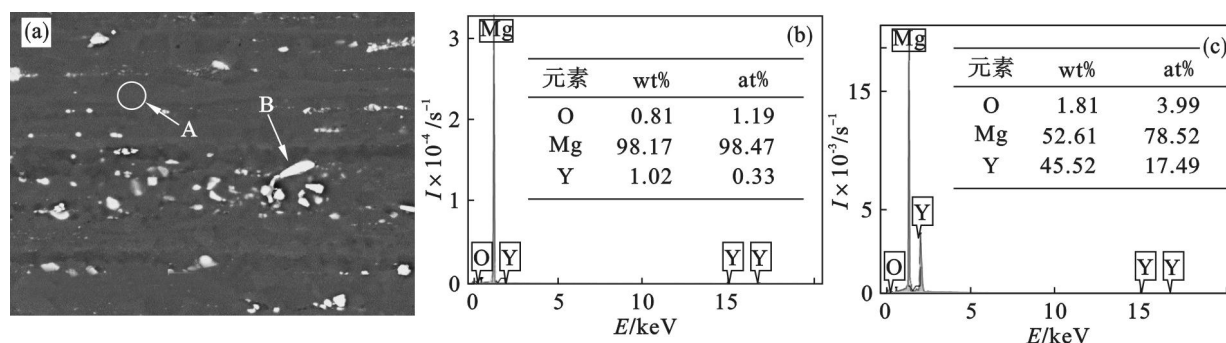


图 4 挤压态 Mg-5Li-3Y 合金的 SEM 形貌及能谱分析结果
Fig. 4 SEM image and EDS results of as-extruded Mg-5Li-3Y alloy
(a)—SEM; (b)—A 点能谱分析; (c)—B 点能谱分析.

此外, 从图 5 中还可以发现, 合金的断裂伸长率同样表现为先增大后减小的趋势, Mg-5Li-3Y 合金的伸长率可达到 9.35%. Mg-5Li 合金添加 Y 后, 合金的晶粒尺寸大幅度下降, 由于晶粒尺寸越小, 单位体积内的晶粒数目就越多, 在相同的变形应力下, 可有效阻碍裂纹的传播, 从而使合金具有较好的塑性. 图 6 为 Mg-5Li-3Y 挤压态合金的拉伸断口形貌, 由图可见, 拉伸断口处有大量的撕裂棱, 局部有小的解理断裂面, 但是并没有观察到明显的规则解理面. 同时, 从图中箭头处可知, 断口处形成了一定量的“空洞”. 这是由于合金在铸造过程中, 由于镁元素的烧损及锂元素的挥发, 产生了一定量的微缺陷, 拉伸过程中这部分缺陷成为应力集中的区域, 断裂失效后即形成“空洞”. 总体而言, 挤压态 Mg-5Li-3Y 合金的

拉伸断裂方式以韧性断裂为主, 但在局部出现了少量的解理断裂特征.

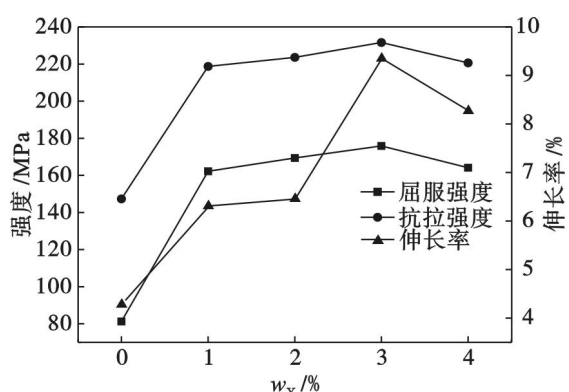


图 5 挤压态 Mg-5Li-xY 合金屈服强度、抗拉强度和断裂伸长率
Fig. 5 Tensile strength, yield strength and elongation of as-extruded Mg-5Li-xY alloys

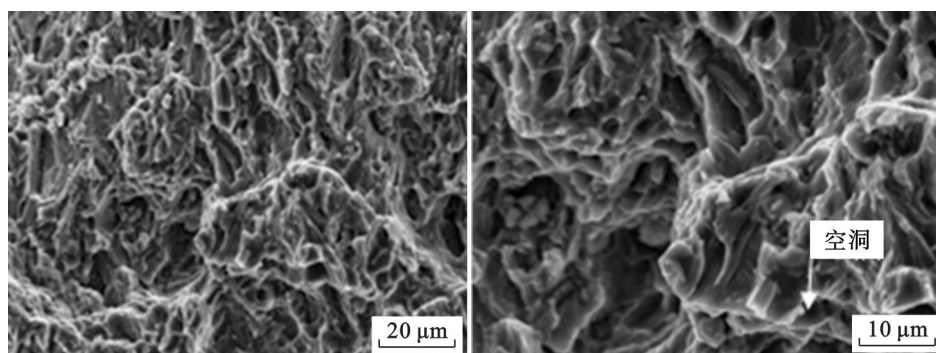


图 6 挤压态 Mg-5Li-3Y 合金的室温拉伸断口形貌
Fig. 6 Tensile fracture morphology of as-extruded Mg-5Li-3Y alloy at room temperature.

(下转第 1430 页)