

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.12.016

挤压态 Mg-9Li-3Al-xSr 镁合金的微观组织与力学性能

杨艳^a, 彭晓东^{a,b}, 李俊辰^a, 谢卫东^{a,b}, 魏国兵^a, 魏群义^a

(重庆大学 a. 材料科学与工程学院; b. 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044)

摘要: 采用 SEM、EDS、XRD、TEM 和力学性能测试等手段研究了挤压态 Mg-9Li-3Al-xSr (LA93-xSr, $x=0, 1.5, 2.5, 3.5$ wt%) 镁合金的微观组织与力学性能, 探讨了 Sr 含量对挤压态合金的微观组织及力学性能的影响规律。结果表明: LA93-xSr 镁合金包括 α -Mg (hcp) 和 β -Li (bcc) 两种基体相。Sr 含量对挤压态合金的晶粒大小没有明显影响。随着 Sr 元素的加入, 合金中形成 Al_4Sr 新相, 主要分布于 α/β 相界面, 并沿挤压轴向呈流线分布。合金的强度随着 Sr 含量的增加呈现先增加后降低的趋势, 合金的延伸率随着 Sr 含量的增加呈现逐渐降低的趋势。当 Sr 含量为 2.5wt% 时, 挤压态 Mg-9Li-3Al-2.5Sr (LAJ932) 合金的抗拉强度达到最大值 235.2 MPa, 屈服强度达到 220.6 MPa, 延伸率为 19.4%, 合金呈现出良好的力学性能。挤压过程中, α -Mg 相中发生形变诱发的晶粒细化, β -Li 相中发生常规动态再结晶。

关键词: 镁锂合金; 铈; 挤压; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)12-103-08

Microstructure and mechanical properties of extruded Mg-9Li-3Al-xSr alloys

YANG Yan^a, PENG Xiaodong^{a,b}, LI Junchen^a, XIE Weidong^{a,b}, WEI Guobing^a, WEI Qunyi^a

(a. College of Materials Science and Engineering; b. National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of extruded Mg-9Li-3Al-xSr (LA93-xSr, $x=0, 1.5, 2.5, 3.5$ wt%) alloys are investigated by SEM, EDS, XRD, TEM and mechanical property test. The influence of Sr content on microstructure and mechanical properties the extruded alloys is discussed. The results show that LA93-xSr alloys contain both α -Mg (hcp) and β -Li (bcc) matrix phases. The effect of Sr on the grain size of the extruded alloys is not significant. The addition of Sr leads to the formation of intermetallic compound (Al_4Sr), which is mainly distributed along the α/β interface and appears fibrous structure along the extrusion direction. The mechanical properties of alloys initially enhance and then decrease while the elongation declines with the increase of Sr content. When Sr addition is 2.5wt%, the extruded Mg-9Li-3Al-2.5Sr (LAJ932) alloy exhibits a favorable combination of strength and ductility with an ultimate tensile strength of 235.2 MPa, yield strength of 220.6 MPa and an elongation of 19.4%. Microstructure evolution during extrusion is governed by deformation induced grain refinement in the α -Mg phase whereas dynamic recrystallization occurs in the β -Li phase.

Key words: Mg-Li alloys; Sr; extrusion; microstructure; mechanical properties

收稿日期: 2013-03-01

基金项目: 国家 973 计划资助项目(2007CB613702)

作者简介: 杨艳(1983-), 女, 重庆大学博士研究生, 主要从事轻合金的制备及其组织性能研究, (Tel)13657652030; (E-mail)yycqu023@163.com。

彭晓东(联系人), 重庆大学教授, 博士生导师, (Tel)023-65111625; (E-mail)pxd@cqu.edu.cn。

Mg-Li^[1-3]合金是目前最轻的金属结构材料,也被称为超轻镁合金,它具有低密度、高比强度和良好的塑性加工性能等优点,已经在航空航天、军工以及通讯电子等领域有了一定的应用。但是传统的 Mg-Li 合金强度不高、热稳定性差、耐腐蚀性能差,限制了该系合金的应用。

为了提高 Mg-Li 合金的性能,通常对其进行强化处理,其中最常用的强化方法是向合金中添加具有强化作用的 Al, Zn, RE 和 Si 等合金化元素^[4]。由于铝元素具有较小的密度且在镁中具有较大的固溶度,铝是 Mg-Li 合金中最常用的合金化元素,因此 Mg-Li-Al 系合金是当前 Mg-Li 合金中的研究热点。然而, Mg-Li-Al 三元合金的强度仍然很低,例如: Mg-8Li-1Al 合金的室温抗拉强度仅为 150 MPa, Mg-14Li-1Al 合金的室温抗拉强度仅为 135 MPa^[5]。因此,有必要向 Mg-Li-Al 合金中引入新的合金化元素以提高合金的力学性能。目前,已有关于 RE、Zn 等对 Mg-Li-Al 合金的性能影响的研究报道^[6-7],研究认为向 Mg-Li-Al 系合金中加入一定量的 RE 和 Zn 等元素,合金中会形成新的具有强化作用的化合物相,从而改善 Mg-Li 合金的力学性能和耐腐蚀性能等。

Sr 是镁合金中常用的合金化元素,重庆大学潘复生和彭晓东^[8-10]等人的研究表明:向镁合金中加入适量的金属 Sr,合金中生成新的 Al₄Sr 相,可以显著的改善镁合金的力学性能,特别是高温性能。但是到目前为止,关于 Sr 元素添加到 Mg-Li 或者 Mg-Li-Al 系列合金中的研究报道还较少。本研究拟用 Sr 元素来改善 Mg-Li-Al 系列合金的性能,并在此基础上制备了不同成分的 Mg-9Li-3Al-xSr (LA93-xSr)合金。变形强化是近年来在金属材料中广泛应用的另外一种强化方式,通过塑性变形可以显著消除合金的铸造缺陷,细化合金的晶粒,从而大幅度改善合金的性能^[11-13]。张密林^[14]等人研究了挤压变形对 Mg-Li-Al-Ce 合金的组织及力学性能的影响,结果表明:在挤压变形过程中合金发生动态再结晶,晶粒细化,力学性能提高。鉴于上述原因,重点研究了挤压态 Mg-9Li-3Al-xSr 合金的微观组织与力学性能,并探讨了 Sr 含量对合金的微观组织及力学性能的影响规律,分析了合金在热挤压变形过程中的组织演变规律。

1 实验

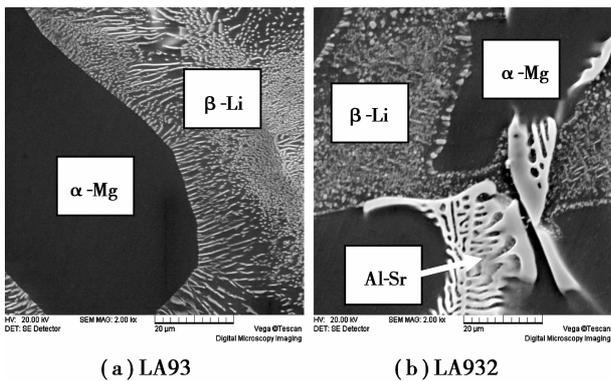
实验所用的原材料为纯 Mg(纯度 99.9wt%)、纯 Al(纯度 99.9wt%)、纯 Li(纯度 99.9wt%)和 Mg-8Sr 中间合金(含 8wt% Sr,质量百分比)。首先将纯 Mg 和纯 Al 放置于电阻熔炼炉中的石墨坩埚内,充氩气保护,加热到 720 °C 使其全部熔化,然后将温度调整至 680 °C,加入金属 Li,再将温度调至 720 °C,加入 Mg-8Sr 中间合金后保温 30 min,最后将温度降低至 680 °C,将合金液浇注到金属型模具中得到铸态合金锭,模具尺寸为 $\Phi 90 \times 30$ mm。将合金铸锭在热处理炉中进行均匀化处理,均匀化温度为 260 °C,时间为 12 h。在挤压机上对铸态合金锭进行挤压,挤压温度为 260 °C,挤压比为 28:1。利用原子吸收光谱法测定合金的成分(详细结果见表 1),根据 Sr 含量的不同,按照国标将上述合金分别命名为 LA93, LAJ931, LAJ932 和 LAJ933。挤压态合金沿挤压轴向和横向打磨抛光后,采用 2% 硝酸+酒精溶液进行侵蚀,采用 JEOL JSM 6460LV 型扫描电子显微镜观测合金试样的组织形态、组织分布情况,并用 Genesis 7000 X-射线能量分散谱仪(EDS)定性分析合金的成分。采用日本理光 D/MAX-2500pc-X 射线衍射仪分析实验合金组织中的相成分。采用 JEOL JEM 2500 SE 透射电子显微镜对 LAJ932 合金试样进行 TEM 形貌观察,试样采用离子减薄方法制备。在新三思 CMT-5105 电子万能试验机上对挤压态实验合金进行拉伸性能测试,拉伸方向沿挤压轴向,拉伸速度为 1 mm/min。对 LAJ932 合金中的不同相进行微观硬度测试。

2 结果与分析

2.1 铸态 LA93 和 LAJ932 合金的显微组织

图 1 所示为 $\Phi 90$ mm 铸锭 LA93 和 LAJ932 合金的 SEM 形貌。由图 1 可明显看出,铸态合金的晶粒整体较粗。合金基体由黑色的 α -Mg 和白色的 β -Li 两相组成, α -Mg 相是 Li 溶于 Mg 形成的具有 hcp 晶体结构的固溶体, β -Li 相是 Mg 固溶于 Li 形成的具有 bcc 晶体结构的固溶体^[15-16]。随着 Sr 的加入,合金中出现鱼骨状的新相,新相偏聚于 α -Mg 和 β -Li 的相界面处。

图 2 和图 3 分别为垂直于挤压方向和平行于



(a) LA93 (b) LA932

图 1 铸态合金的 SEM 形貌

挤压方向的挤压态合金的 SEM 形貌。由挤压态合金的 SEM 形貌可以看出,挤压态合金晶粒整体较细小,与铸态相比,挤压态合金晶粒明显细化,合金中的化合物相相对均匀弥散的分布于合金基体中。由图 3 可以看出:挤压变形后,合金中的 α -Mg 相沿挤压轴向伸长,合金组织沿挤压轴向呈现一定的方向性,合金中的白色化合物相沿挤压轴向呈流线形分布,主要集中在 α/β 相界面处和 β 相中, Sr

含量越高,流线越密集。流线是化合物相在压应力作用下的定向分布,可以作为动态再结晶有效的形核核心,但在流线之间存在一些反常长大的晶粒。结合图 1、图 2 和图 3,可以看出合金晶粒在挤压过程中被压扁、压碎、拉长并发生动态再结晶,合金晶粒细化^[17]。为更加清楚的展现挤压态实验合金的组织形貌,对 LAJ932 合金的微观组织进行了 TEM 观察。图 4 所示为 LAJ932 合金的 TEM 形貌。图 4(a)(b)所示为挤压态 LAJ932 合金中的 α -Mg 晶粒, α -Mg 晶粒的晶界形状不规则,晶粒内部呈现出大量的黑色线条,说明晶粒内部的位错密度较高。挤压态 LAJ932 合金中的 β -Li 相晶粒如图 4(d)(e)所示, β -Li 相晶粒的晶界比较平直,晶粒形状规则,晶粒内部相对干净,说明晶粒内部的位错密度很小。为明确辨别 α -Mg 和 β -Li 相,分别对 α -Mg 和 β -Li 相进行了衍射花样分析,如图 4(c)和图 4(f)所示,由晶粒衍射花样的不同,可以明确区分 α -Mg 和 β -Li 相。由于 α -Mg 和 β -Li 相的晶粒形貌有很大的不同,因此可以预测 α -Mg 和 β -Li 相在挤压变形过程中呈现出不同的组织演变机理。

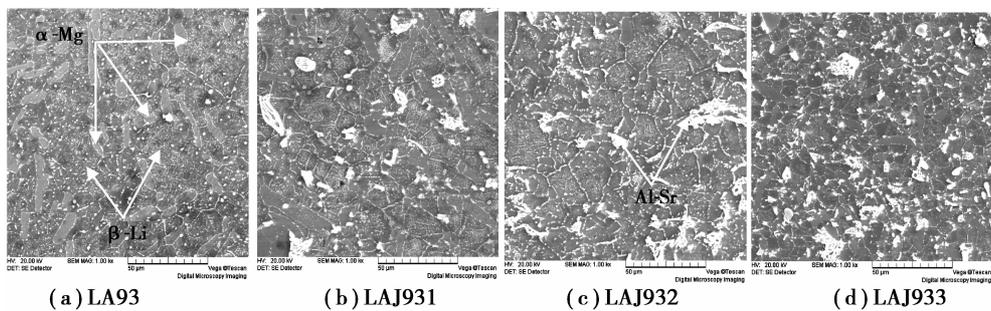


图 2 垂直于挤压方向的 LA93-xS 合金的 SEM 形貌

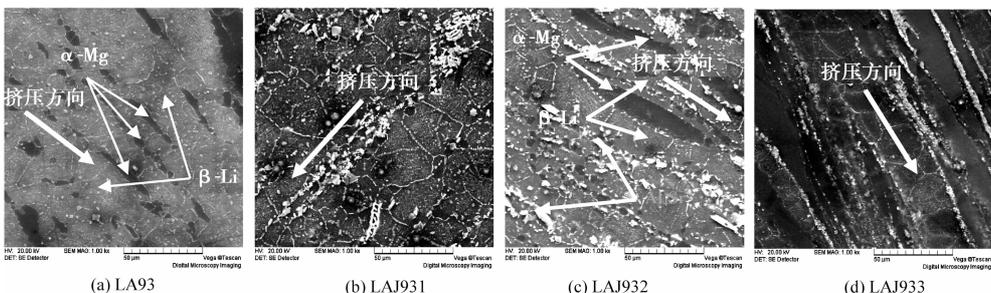


图 3 平行于挤压方向的 LA93-xS 合金的 SEM 形貌

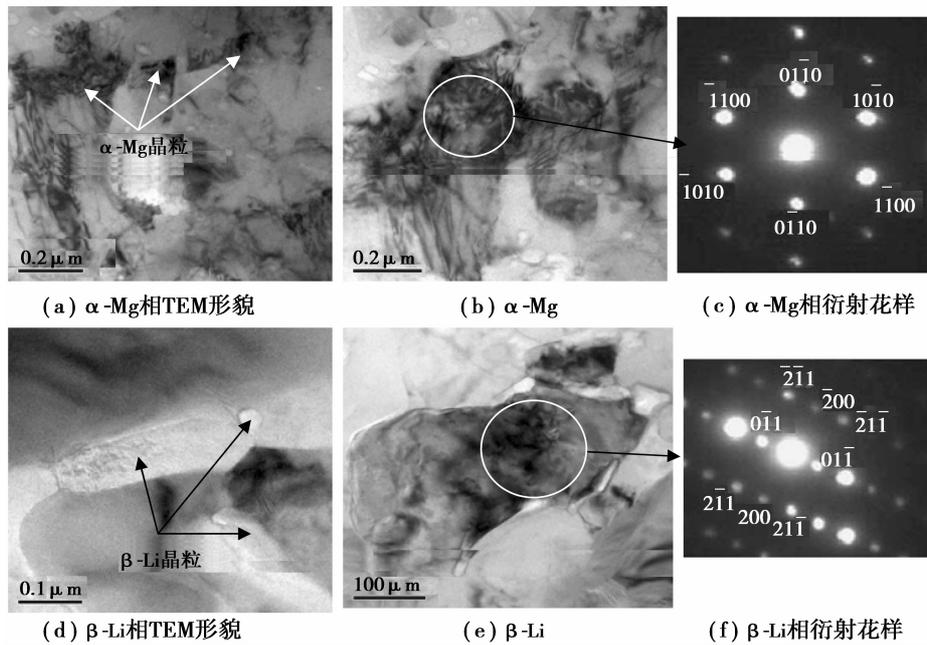


图 4 LAJ932 合金的 TEM 形貌及不同基体相的衍射花样

图 5 所示为挤压态 LAJ932 合金的 SEM 形貌和合金中化合物相的 EDS 分析结果。EDS 分析结果显示 A 点白色化合物相由 Mg, Al, Sr 3 种元素构成, 可见金属 Sr 主要分布于块状或颗粒状的化合物相中, 结合 Al-Sr 合金相图, 初步判定合金中的化合

物相为 Al-Sr 相。图 6 所示为挤压态 LAJ932 合金的 EDS 面扫描分析结果, 挤压态 LAJ932 合金的元素分布整体比较均匀, 但是在金属化合物相分布的区域金属 Al 和金属 Sr 有一定的偏聚现象, 而 Mg 的分布相对较少。

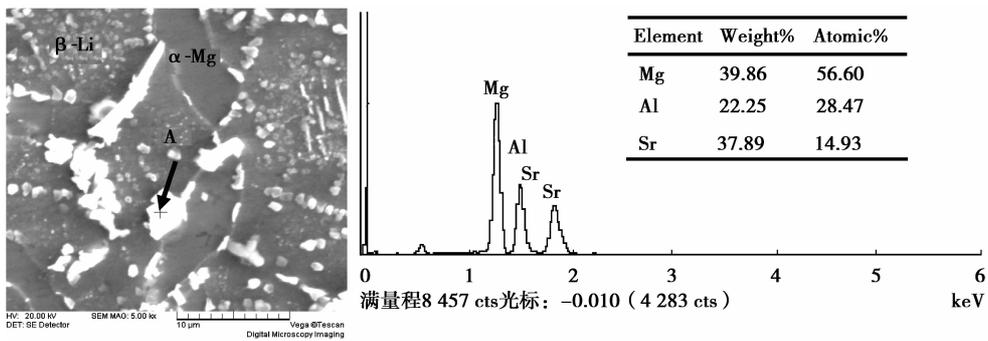


图 5 挤压态 LAJ932 合金的 SEM 形貌和 EDS 分析结果

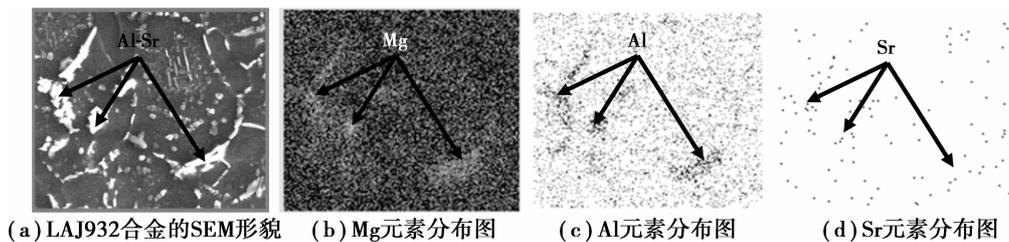


图 6 挤压态 LAJ932 合金的 EDS 面扫描析

图 7 所示为挤压态 LA93 和 LAJ932 合金的 XRD 衍射图谱。结合合金的 EDS 分析结果,可以确定挤压态 LA93 合金主要由 α -Mg、 β -Li 和 $Mg_{17}Al_{12}$ 构成,随着金属 Sr 的加入,合金中形成新的 Al_4Sr 相。

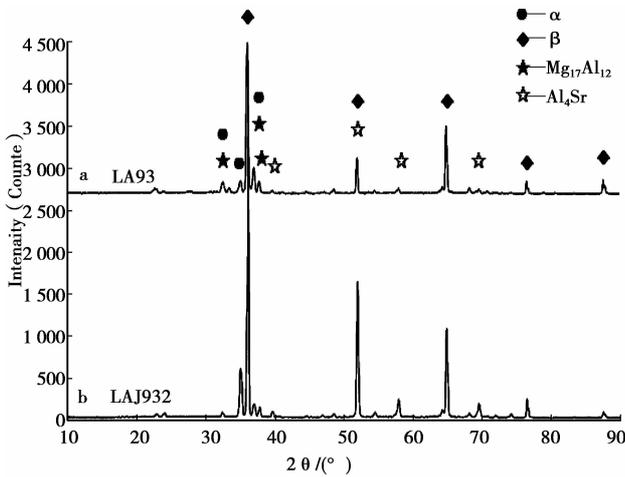


图 7 挤压态 LAJ93-xSr 合金的 XRD 衍射图谱

碱土化合物的形成机理可以通过电负性差值来判断,Al 与 Sr 的电负性差值为 0.66,大于 Al 与 Mg 的电负性差值 0.30,因此,仅从热力学角度来看,随着 Sr 的加入,合金中将优先生成 Al-Sr 化合物相。XRD 图谱显示,随着金属 Sr 的加入, $Mg_{17}Al_{12}$ 相的相对强度降低,说明随着金属 Sr 的加入,金属 Al 优先与金属 Sr 反应生成 Al-Sr 相,从而导致了 $Mg_{17}Al_{12}$ 相含量降低,与理论分析结果一致。结合图 2(a)和图 3(a)可推断, $Mg_{17}Al_{12}$ 相形貌与 β 相相似,以颗粒状的形态分布于合金的基体中,随着 Sr 的加入,其含量降低,但其形貌无明显变化。

2.2 挤压态 Mg-9Li-3Al-xSr 合金的力学性能

对挤压后得到的 LA93-xSr 镁合金棒材沿挤压方向进行力学性能测试。图 8 所示为室温下不同 Sr 含量的挤压态 LA93-xSr 镁合金的抗拉强度、屈服强度和延伸率。图 8 表明,随着 Sr 含量的增加,实验合金的抗拉强度和屈服强度逐渐升高,当 Sr 含量为 2.5wt% 时,合金的抗拉强度和屈服强度达到最大值,此时合金的屈服强度达到 220.6MPa,抗拉强度达到 235.2MPa,延伸率为 19.4%,但是当 Sr 含量继续增加至 3.5wt% 时,合金的强度又开始下降。由此可见合金的强度随着 Sr 含量的增加呈现先增加后降低的趋势。挤压态 LA93-xSr 合金的延伸率较高,但是随着 Sr 的加入,合金的延伸率整体上呈现逐渐降低的趋势。对挤压态 LAJ932 合金中的 α -

Mg 相, β -Li 相和 Al-Sr 相进行了微观硬度测试,测试结果如图 9 所示,测试结果表明 Al_4Sr 相的硬度最高, β -Li 相的硬度最低,可见 Al_4Sr 相是合金中的强化相。 Al_4Sr 相的熔点极高,是合金中的稳定相,在实验设定的挤压条件下,不会发生分解,因此挤压前后合金中的 Al_4Sr 相的数量不改变。但在挤压变形后, Al_4Sr 相被破碎并弥散分布于 α -Mg 和 β -Li 基体相界面处,能够有效的阻碍变形过程中晶界和位错的移动,从而提高了合金的强度。但是当 Sr 含量过高时,合金中的 Al_4Sr 相增加,经过挤压变形之后,也不能有效改善其分布状态, Al_4Sr 相弥散分布程度降低,出现偏聚,割裂了基体,在拉伸过程中, Al_4Sr 相的尖端易产生应力集中并形成微裂纹,从而降低了合金抵抗断裂的能力,导致合金性能下降^[18]。

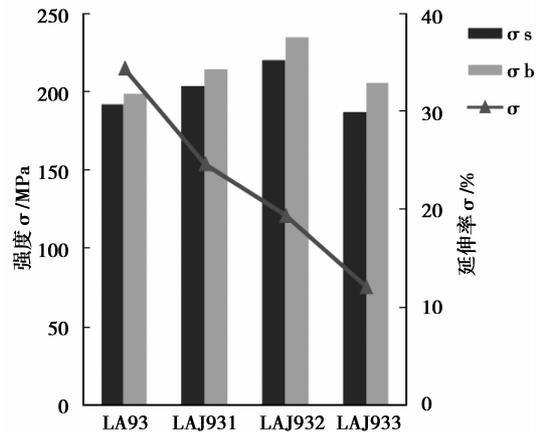


图 8 挤压态 LA93-xSr 合金的力学性能

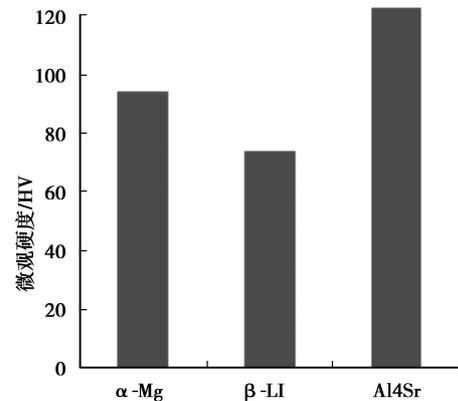


图 9 LAJ932 合金中不同相的微观硬度测试结果

2.3 断口形貌分析

挤压态 LA93-xSr 合金的断口形貌如图 10 所

示。图 10(a)为不含 Sr 的挤压态 LA93 合金的断口形貌,断口存在大量的韧窝,韧窝小而均匀,为典型的塑性断裂,此合金的塑性好,延伸率达到 34.5%。随着 Sr 的加入,断口开始出现少量的撕裂棱,合金断口呈现韧窝断裂+局部解理断裂的混合断裂特征。随着 Sr 含量的增加,撕裂棱增加。可见,在拉伸过程中,Al₄Sr 相的尖端易产生应力集中并形成

微裂纹,随着应力的增加,局部开始断裂,因此挤压态实验合金的延伸率随着 Sr 含量的增加呈现出一定的降低趋势。但由于挤压态实验合金的晶粒比较细小,化合物相分布相对比较均匀,在拉伸过程中应力集中效应较分散,因此合金断口形貌整体上仍然呈现为以韧窝为主的塑性断裂机制,合金具有较好的塑性。

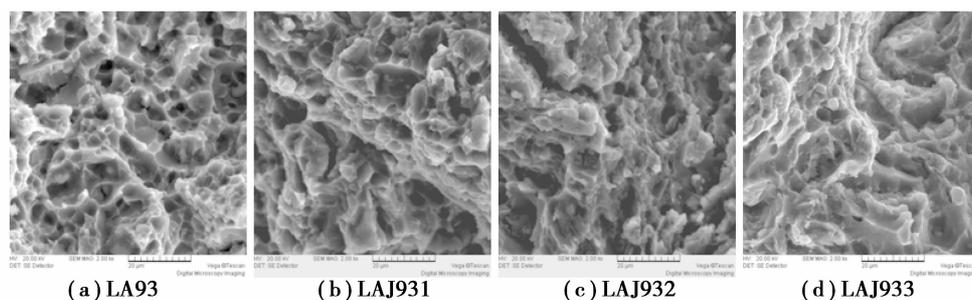


图 10 挤压态 Mg-9Li-3Al-xSr 合金拉伸断口的 SEM 形貌

3 讨论

3.1 挤压过程中的组织演变

经过热挤压之后,合金的晶粒得到了显著的细化。由于 LA93-xSr 合金基体包括 α -Mg 和 β -Li 双相并且 α -Mg 相和 β -Li 相的物理性质(比如:熔点、塑性和晶体结构等)有很大的差异,因此挤压过程中不同基体相的组织演变规律有所不同。

1) α -Mg 相

如图 3 所示,挤压过程中 α -Mg 相沿挤压方向被拉长。挤压后 α -Mg 晶粒的晶界不规则,晶粒内部的位错密度很高(如图 4(a)(b)所示),为典型的形变诱发晶粒细化的晶粒特征。形变诱发的晶粒细化过程包括:在挤压应力和挤压热的作用下,塑性变形首先导致位错的堆积和重组,变形合金中首先发生高密度位错区域的位错束集,并形成位错包结构。随着变形的进行,位错包结构逐渐转变为小角度亚晶结构,进而通过亚晶合并机制形成大角度亚晶粒。随后,通过晶界迁移、亚晶进一步合并和转动,最终形成一定尺寸的大角度细小晶粒^[19-20]。通常情况下,形变诱发的晶粒细化的微观结构中晶界很不规则,且晶粒内部的位错密度一般较高。对比分析可见, α -Mg 相的晶粒特征表明 α -Mg 相中发生形变诱发的晶粒细化过程,即连续动态再结晶。

2) β -Li 相

LA93-xSr 合金为多相合金,包括软的 β -Li 相,较硬的 α -Mg 相,分布于 α/β 相界面的 Al₄Sr 化合物

相, β -Li 相为 bcc 结构,通常 bcc 结构的金属材料其堆垛层错能较高,位错的攀移和交滑移容易进行,热变形过程中易发生动态回复而不易发生动态再结晶。但是在挤压变形过程中,塑性变形首先发生在 β 相,由于 α/β 相界面和 Al-Sr 化合物相阻碍位错运动,易造成位错塞积,从而抑制了 β 相的动态回复过程,促使 β 相发生动态再结晶。动态再结晶晶粒一般具有规则的晶界,晶粒内部的位错密度相对较低。 β -Li 相的 TEM 形貌表明: β -Li 晶粒的晶界规则,晶粒内部相对干净,晶粒内部的位错密度较低。 β -Li 相晶粒呈现出典型的动态再结晶晶粒的特征。挤压态 LA93-xSr 合金的 β -Li 相呈现此特征,表明 β -Li 相中发生典型的常规动态再结晶。

通常情况下,具有 bcc 结构的金属具有较高的堆垛层错能,更容易发生动态回复。但是在 LA93-xSr 合金中, α -Mg 相和分布于 α/β 相界面的 Al-Sr 化合物相阻碍了 β -Li 相的位错运动,从而阻碍了 β 相的动态回复,促进了 β 相的动态再结晶。由此可见, α -Mg 相和 Al₄Sr 相促进了 β -Li 相动态再结晶。此外,具有 bcc 结构的 β 相比 α 相软,挤压过程中塑性变形首先发生在 β -Li 相,使得 β -Li 相更容易达到动态再结晶所需要的临界应变。 β -Li 相具有较低的熔点(588 °C),因此 260 °C 的挤压温度能够满足 β -Li 相中发生动态再结晶的温度要求。因此, β -Li 相中发生动态再结晶且晶粒相对铸态明显细化。虽然 Al₄Sr 相促进了 β -Li 相的动态再结晶,但是 Al₄Sr 相对 β -Li 相的动态再结晶结果没有显著影响,因

此, Sr 含量对挤压态实验合金的组织没有明显的影响。

3) Al₄Sr 相

Al₄Sr 相硬而脆, 在挤压变形过程中, 铸态下网状的 Al₄Sr 相被压碎并呈块状或颗粒状分布于合金基体中。挤压变形之后, Al₄Sr 相的颗粒比较细小且分布相对均匀, 有利于合金性能的提高。

3.2 Sr 含量对合金的力学性能的影响

LA93-xSr 合金的强度随着 Sr 含量的增加呈现出先增加后降低的趋势。LAJ932 合金具有最高的抗拉强度和屈服强度。合金的延伸率随着 Sr 含量的增加而降低。由 LAJ932 合金的微观硬度可知 Al₄Sr 相为合金中的强化相。挤压态 LA93-xSr 合金中 Al₄Sr 相颗粒大约为 2-15 μm。可以将挤压态 LA93-xSr 合金简化为 Al₄Sr 相颗粒强化的复合材料来探讨合金的力学性能。以颗粒强化理论为基础, 可用下述公式估计合金的强度^[21]

$$\sigma = f_m \times \sigma_m + f_h \times \sigma_h, \quad (1)$$

式中 σ 、 σ_m 和 σ_h 分别为 LA93-xSr 合金、LA93 合金基体和 Al₄Sr 相的强度。 f_m 和 f_h 分别为合金基体和 Al₄Sr 强化颗粒的体积分数。随着 Sr 含量的增加, Al₄Sr 相强化颗粒的体积分数 f_h 增加, 因此, 合金的强度随着 Sr 含量的增加而增加。但是太多的 Sr 会导致 Al₄Sr 相的偏聚并造成应力集中, 在拉伸试验过程中 Al₄Sr 相会转化为裂纹源, 从而降低合金的强度。此外, 由于 Al₄Sr 相硬而脆, 在拉伸过程中极有可能成为合金中的裂纹源, 因此合金的延伸率随着 Sr 含量的增加而降低。

强化相的形状和分布对合金的强化效果有很大的影响, 通常强化相的尺寸越细小, 分布越均匀, 合金的强化效果越好, 本实验条件下制备的 Al₄Sr 相大约为 2-15 μm, 颗粒并非特别细小均匀, 因此通过其他大塑性变形(比如等通道挤压, 高压扭转等)方法细化其颗粒大小, 改善其分布状况, 极有可能进一步提高合金的强度, 但仍需要进一步研究。

4 结 论

1) Sr 含量对挤压态 LA93 合金的微观组织没有显著影响。挤压态 LA93 镁合金主要由 α -Mg、 β -Li, 和 Mg₁₇Al₁₂ 构成, 随着 Sr 的加入, 合金中形成 Al₄Sr 新相。Al₄Sr 新相主要分布于 α/β 相界面, 挤压变形过程中, Al₄Sr 相被破碎, 并沿挤压轴向呈流线分布。

2) 挤压态 LA93-xSr 镁合金的强度随着 Sr 含量的增加呈现先增加后减小的趋势, LAJ932 合金展

现出良好的力学性能, 其抗拉强度达到 235.2 MPa, 屈服强度为 220.6 MPa, 延伸率为 19.4%。但随着 Sr 含量的继续增加, 合金的强度反而降低。合金的延伸率随着 Sr 含量的增加呈现逐渐减小的趋势, 但整体塑性较好。

3) 挤压态 LA93-xSr 合金的断口由大量细小均匀的韧窝构成, 随着 Sr 含量的增加, 开始出现少量的解理台面, 但整体仍表现为以韧窝为主的塑性断裂机制。

4) 挤压过程中, α -Mg 相中发生形变诱发的晶粒细化(即连续动态再结晶), β -Li 相中发生常规的动态再结晶。 α -Mg 相和 Al₄Sr 化合物相促进了 β -Li 相的动态再结晶。

参考文献:

- [1] Chang T C, Wang J Y, Chu C L, et al. Mechanical properties and microstructures of various Mg-Li alloys [J]. Materials Letters, 2006, 60 (27): 3272-3276.
- [2] Wu L B, Cui C L, Wu R Z, et al. Effects of Ce-rich RE additions and heat treatment on the microstructure and tensile properties of Mg-Li-Al-Zn-based alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 2174-2179.
- [3] Zdenek D, Zuzanka T, Stanislav K. Deformation behaviour of Mg-Li-Al alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2004, 378: 192-195.
- [4] 刘滨, 张密林, 胡耀宇, 等. 富镧混合稀土对 Mg-10Li-4Al 合金组织和力学性能的影响 [J]. 航空材料学报, 27(6): 17-21.
LIU Bin, ZHANG Milin, HU Yaoyu, et al. Influences of La-Rich RE on the microstructure and mechanical properties of Mg-10Li-4Al Alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2007, 27(6): 17.
- [5] Liu B, Zhang M L, Wu R Z. Effects of Nd on microstructure and mechanical properties of as-cast LA141 alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2008, 487(1-2): 347-351.
- [6] Cui C L, Wu L B, Wu R Z, et al. Influence of yttrium on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-5Li-3Al-2Zn alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509: 9045-9049.
- [7] Qu Z K, Wu R Z, Zhang M L. Microstructure and mechanical properties of Mg-8Li-(1, 3) Al-(0, 1) Y alloys [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2010, 23: 364-367.
- [8] Yang M B, Pan F S, Cheng R J, et al. Effect of Mg-10Sr master alloy on grain refinement of AZ31

- magnesium alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2008, 491(1-2): 440-445.
- [9] Yang M B, Pan F S, Cheng R J, et al. Comparison about efficiency of Al-10Sr and Mg-10Sr master alloys to grain refinement of AZ31 magnesium alloy[J]. *J Mater Sci*, 2007, 42: 10074-10079.
- [10] 徐宋兵, 彭晓东, 陈刚, 等. Mg-8Sr 中间合金对 AZ91 晶粒细化的研究[J]. *轻金属加工技术*, 2005, 33(10): 29-32.
XU Songbin, PENG Xiaodong, CHEN Gan, et al. Grain Refinement for AZ91 Magnesium Alloy by Mg-8Sr Alloy[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2005, 33(10): 29-32.
- [11] 张丁非, 齐福刚, 赵霞兵, 等. Mg-Zn 系高强度镁合金的研究进展[J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(11): 53-61.
ZHANG Dingfei, QI Fugang, ZHAO Xiabing, et al. Research progresses of high strength Mg-Zn series alloys[J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(11): 53-61.
- [12] 张力, 卢立伟, 刘天模, 等. 双向挤压后 AZ31 镁合金的微观组织与性能[J]. *重庆大学学报*, 2009, 32(8): 931-936.
ZHANG Li, LU Liwei, LIU Tianmo, et al. Microstructure and mechanical properties of AZ31Mg alloy after dual-directional extrusion [J]. *Journal of Chongqing University*, 2009, 32(8): 931-936.
- [13] 李永军, 张奎, 李兴刚, 等. 挤压变形对 Mg-5.0Y-7.0Gd-1.3Nd-0.5Zr 合金组织和性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(9): 1692-1697.
LI Yongjun, ZHANG Kui, LI Xinggang, et al. Influence of extrusion on microstructures and mechanical properties of Mg-5.0Y-7.0Gd-1.3Nd-0.5Zr magnesium alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(9): 1692-1697.
- [14] Wang T, Zhang M L, Wu R Z. Microstructure and properties of Mg-8Li-1Al-1Ce alloy [J]. *Materials Letters*, 2008, 62(12-13): 1846-1848.
- [15] Chiu C H, Wu H Y, Wang J Y, et al. Microstructure and mechanical behavior of LZ91 Mg alloy processed by rolling and heat treatments[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 460(1-2): 246-252.
- [16] Son G S, Mark S, Milo K. Some new characteristics of the strengthening phase in β -phase magnesium-lithium alloys containing aluminum and beryllium[J]. *Materials Science and Engineering*, 2004, 371(1-2): 371.
- [17] 陈昭运, 余春, 李志强, 等. 挤压 Mg-Li-Zn-Ce-Y-Zr 合金的热变形行为[J]. *稀有金属材料与工程*. 2011, 40(1): 90-95.
CHEN Zhaoyun, YU Chun, LI Zhiqiang, et al. Hot deformation behaviors of an extruded Mg-Li-Zn-Ce-Y-Zr alloy [J]. *Rare metal materials and engineering*, 2011, 40(1): 90-95.
- [18] Aljarrah M, Parvez M A, LI J, et al. Microstructural characterization of Mg-Al-Sr alloys [J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2007, 8(4): 237-248.
- [19] 梁书锦, 王欣, 刘祖岩, 等. AZ31 镁合金不同温度挤压后组织性能研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(7): 1276-1279.
LIANG Shujin, WANG Xin, LIU Zuyan, et al. Mechanical properties of AZ31 Mg alloy extruded at different die temperatures [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(7): 1276-1279.
- [20] 郭学锋, 杨文朋, 宋佩维. 往复挤压 Mg-4Al-2Si 合金的高温拉伸性能[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(6): 1032-1038.
GUO Xuefeng, YANG Wenpeng, SONG Peiwei. Elevated temperature tensile properties of Mg-4Al-2Si alloy prepared by reciprocating extrusion [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(6): 1032-1038.
- [21] Kim H S. On the rule of mixtures for the hardness of particle reinforced composites [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, 289(1-2): 30-33.

(编辑 侯 湘)