



La 和 Ce 含量对挤压态 AE44-2 镁合金组织与力学性能的影响

乐泰和^{1,2}, 陈梦茹^{1,2}, 王金辉^{1,2}, 金培鹏^{1,2}

(1. 青海大学 青海省高性能轻金属合金及深加工工程技术研究中心, 西宁 810016;
2. 青海大学 青海省新型轻合金重点实验室, 西宁 810016)

摘要:通过重力铸造法制备不同成分的 AE44-2 合金以及热挤压成型, 研究 La、Ce 含量对挤压态 AE44-2 镁合金的组织、织构和力学性能的影响。结果表明: 挤压过程中 AE44-2 镁合金破碎的 Al-RE 相, 可以提供大量异质形核点, 促进晶粒进行动态再结晶, 形成细小晶粒, 有利于弱化织构强度和um提高力学性能。由于 La、Ce 添加量不同, 4 种挤压态 AE44-2 镁合金平均晶粒尺寸为 3.7 μm 左右, 富 Ce 挤压态 AE44-2 镁合金的再结晶程度比富 La 的更完全, 富 Ce 弱化挤压态 AE44-2 镁合金的织构效果比富 La 弱化挤压态 AE44-2 镁合金的强。4 种合金中, Mg-4Al-1.5La-2.5Ce-0.3Mn 合金的再结晶程度较完全, 织构强度小, 平均晶粒细小至 3.2 μm 且 Al-RE 相分布均匀, 综合力学性能最好。

关键词: AE44-2 镁合金; 热挤压; 再结晶; 织构; 力学性能

文章编号: 1004-0609(2021)-06-1463-12

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

引文格式:乐泰和, 陈梦茹, 王金辉, 等. La 和 Ce 含量对挤压态 AE44-2 镁合金组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(6): 1463–1474. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36578

LE Tai-he, CHEN Meng-ru, WANG Jin-hui, et al. Effect of La and Ce contents on microstructure, texture and mechanical properties of extruded AE44-2magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(6): 1463–1474. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36578

为了节能环保问题, 科研工作者一直寻求在加工和应用方面都表现出优良性能的轻质结构材料^[1]。镁合金密度比钢和铝都低, 还具有高比强度、高比刚度、可加工和可回收利用等特点, 是轻质节能和绿色环保实用的金属材料, 应用于航天、航空和车辆等领域^[2-5]。由于纯镁自身独特的密排六方结构, 滑移系少, 强度低, 在室温条件下非基面滑移难以激活, 容易激活基面滑移, 这些缺点限制了镁合金广泛应用于各个领域^[6-8]。

近年来, 镁铝稀土(Mg-Al-RE)系合金因其高比强度、优良的可铸造性能、出色的高温蠕变性能和第二相热稳定性受到了广泛关注^[9], 稀土合金化对镁合金的组织细化和力学性能改善有显著影响, 还

可以显著提高镁合金延展性^[9-11]。就延展性而言, Ce 元素对 Mg-4Al 基合金影响大于 La 和 Nd 元素^[12]。WANG 等^[13]研究挤压 Mg-5Al-2Nd-0.2Mn 合金的组织、织构和力学性能发现: 热挤压后, Al₁₁Nd₃ 和 Al₂Nd 相破碎并沿挤压方向分布, 这些第二相通过粒子激发形核作为动态再结晶的成核位点, 从而形成精细的微观结构和提高力学性能。大多数稀土元素价格昂贵, 如 Nd、Pr 等稀土元素。为了节约成本, 本文添加的轻稀土 La 和 Ce 元素是一种价格低廉的元素, La 元素可以细化晶粒, Ce 元素可以有效地弱化织构强度^[14-15]。MENG 等^[11]研究 Mg-xAl-4La 体系的金属间化合物结果显示: 通过控制合金化添加量来改善金属间化合物形成,

基金项目: 青海省重大科技专项(2018-GX-A1)

收稿日期: 2020-06-17; 修订日期: 2020-12-16

通信作者: 王金辉, 副教授, 博士; 电话: 13709742114; E-mail: 61671465@qq.com

进而提高合金强度是可行的。RZYCHON 等^[16]研究压铸 AE44 镁合金的微观组织稳定性与蠕变性能发现: $Al_{11}RE_3$ 热稳定相分布于晶界, 可以有效抑制晶界滑动, 使得 AE44 镁合金具有良好的高温蠕变性能, 间接提高高温力学性能。在热挤压中变形组织存在严重应变, 会产生大量的动态再结晶晶粒, 可以有效地细化合金晶粒和提高力学性能^[17]。STANFORD^[18]研究发现: La、Ce 和 Gd 都对镁合金织构有改善作用, 可能与位错和晶界相互作用有关, Ce 和 La 对合金具有强溶质作用。所以, 研究 La、Ce 含量对挤压态 AE44-2 镁合金的影响具有一定的意义。

目前, 有关报道中的 AE44 镁合金大多数是压铸镁合金, 只有少数为挤压镁合金。因此, 本实验中 La 和 Ce 稀土元素一起添加, 采用熔炼及热挤压工艺制备 4 种 La、Ce 含量不同的挤压态 AE44-2 镁合金, 并对其微观组织、织构与力学性能进行分析与讨论。

1 实验

本实验以高纯镁($w(Mg) \geq 99.95\%$)、高纯铝($w(Al) \geq 99.95\%$)、Mg-25%Ce 中间合金、Mg-25%La 中间合金和 Mg-5%Mn 中间合金为原材料(质量分数), 在 SF_6 和氩气的混合保护气体下, 利用电阻炉熔炼制备 4 种 AE44-2 镁合金, 其中 2 指的是 La 和 Ce 元素。首先, 对原材料进行预处理烘干, 把高纯镁放入电阻炉熔化; 熔体温度升到 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 添加高纯铝和 Mg-5%Mn 中间合金, 等熔体温度升高到 $730\text{ }^\circ\text{C}$ 添加 Mg-25%Ce 中间合金和 Mg-25%La 中间合金; 再次升到 $730\text{ }^\circ\text{C}$ 搅拌拔渣, 保温静置 30 min; 最后降温到 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 浇注, 得到直径 60 mm 的铸锭。4 种 Mg-4Al-xLa-yCe-0.3Mn ($x+y=4$) 镁合金(即

AE44-2) 化学成分见表 1。通过多次熔炼计算 Mg-5%Mn 中间合金的烧损率约为 38%。根据烧损率计算 Mn 添加量, 选取 Mn 含量较为稳定的 4 种合金进行后续研究。接着利用线切割将铸锭切成直径 44 mm、高度 30 mm 挤压坯料, 再对挤压坯料进行($450\text{ }^\circ\text{C}$, 12 h)均匀化处理。将均匀化处理后的挤压坯料在 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 下保温 1 h, 利用四柱挤压机上进行热挤压, 挤压比为 19.36, 最后得到 10 mm 表面光滑的棒材。将挤压式样放入热处理炉进行($250\text{ }^\circ\text{C}$, 1 h)去应力退火处理, 称为挤压态式样。

利用 LEICA DMI3000M 金相显微镜(OM)对挤压态式样进行金相组织观察; 采用 Brooke XD8 ADVANCE A25 X 射线衍射仪(XRD)对挤压态式样进行物相测试, 使用铜靶 K_α 线的扫描速率 $0.02\text{ }^\circ/\text{s}$ 和 2θ 的范围为 $20^\circ\sim 90^\circ$; 通过 ZEISS 场发射扫描电镜(SEM)以及背散射衍射(EBSD)技术对挤压态式样纵截面进行组织分析, 使用 Oxford HKL Channel 5 软件进行 EBSD 分析; 利用 Instron-5982 万能试验机对挤压态式样进行室温和 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 拉伸测试, $200\text{ }^\circ\text{C}$ 拉伸前保温 10 min。拉伸式样沿着挤压方向制备, 每种合金 3 组式样; 同样使用 SEM 对挤压态式样断口形貌观察分析。

2 结果与分析

2.1 不同 La 和 Ce 含量挤压态 AE44-2 镁合金的显微组织

图 1 所示为不同 La、Ce 含量的挤压态 AE44-2 镁合金 XRD 谱。分析结果显示, 不同的镧铈含量对 AE44-2 镁合金相的形成影响较小。挤压态 AE44-2 镁合金除基体 α -Mg 外, 第二相主要为 $Al_{11}RE_3$ 、 $Al_{10}RE_2Mn_7$ 和 Al_2RE , 未观察到 $Mg_{17}Al_{12}$ 相。这是由于稀土元素与 Al 的亲合力比 Mg 强, 抑

表 1 Mg-4Al-xLa-yCe-0.3Mn 合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of Mg-4Al-xLa-yCe-0.3Mn alloys

Alloy No.	Sample	Mass fraction/%				
		Al	La	Ce	Mn	Mg
1	Mg-4Al-0.5La-3.5Ce-0.3Mn	4.01	0.44	3.41	0.28	Bal.
2	Mg-4Al-1.5La-2.5Ce-0.3Mn	3.93	1.34	2.33	0.27	Bal.
3	Mg-4Al-2.5La-1.5Ce-0.3Mn	3.89	2.43	1.37	0.26	Bal.
4	Mg-4Al-3.5La-0.5Ce-0.3Mn	3.92	3.27	0.48	0.27	Bal.

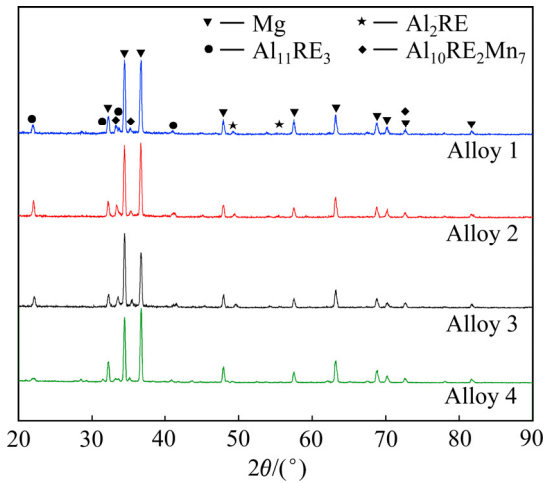


图 1 不同成分挤压态 AE44-2 镁合金的 XRD 谱
Fig. 1 XRD patterns of extruded AE44-2 magnesium alloy with different compositions

制了 $Mg_{17}Al_{12}$ 相产生。此外, 随着 La、Ce 含量变化, 各衍射峰的强度变化不明显。为了进一步确定上述析出相, 做了能谱(EDS)分析如图 2 所示。从

图 2 可看出, 析出相主要元素为 Al、RE 元素, 还有少量 Mn 元素。结合 EDS 元素图谱分析针状 $Al_{11}RE_3$ 和多边形 Al_2RE 破碎成细小颗粒 Al-RE 相, 沿挤压方向分布形成挤压带; 但较多的块状 $Al_{10}RE_2Mn_7$ 相质地硬不易破碎且随机分布^[9]。

不同成分挤压态 AE44-2 镁合金金相组织如图 3 所示。从图 3 中可看出, 由于在热挤压下合金晶粒发生破碎和动态再结晶, 使得挤压态合金晶粒细小, 破碎的第二相与细小晶粒共同构成了沿 ED 的挤压带。从图 3(b)可以看出, 合金 2 的挤压带分布相比另外 3 种合金均匀, 相对的第二相分布均匀。此外, 结合图 2 分析, 在挤压过程中破碎后 Al-RE 相, 弥散分布于合金挤压带上, 其周围形成了大量细小晶粒。原因是在热挤压过程中破碎的 $Al_{11}RE_3$ 相和 Al_2RE 相, 能提供大量异质形核点, 可以为动态再结晶提供必备的条件^[13]。Al-RE 相周围率先发生形核, 限制基体 α -Mg 的再结晶与晶粒长大, 所以 Al-RE 相附近形成细小晶粒。这说明合金中的 Al-RE 相在热挤压时能有效阻碍基体晶粒长大。

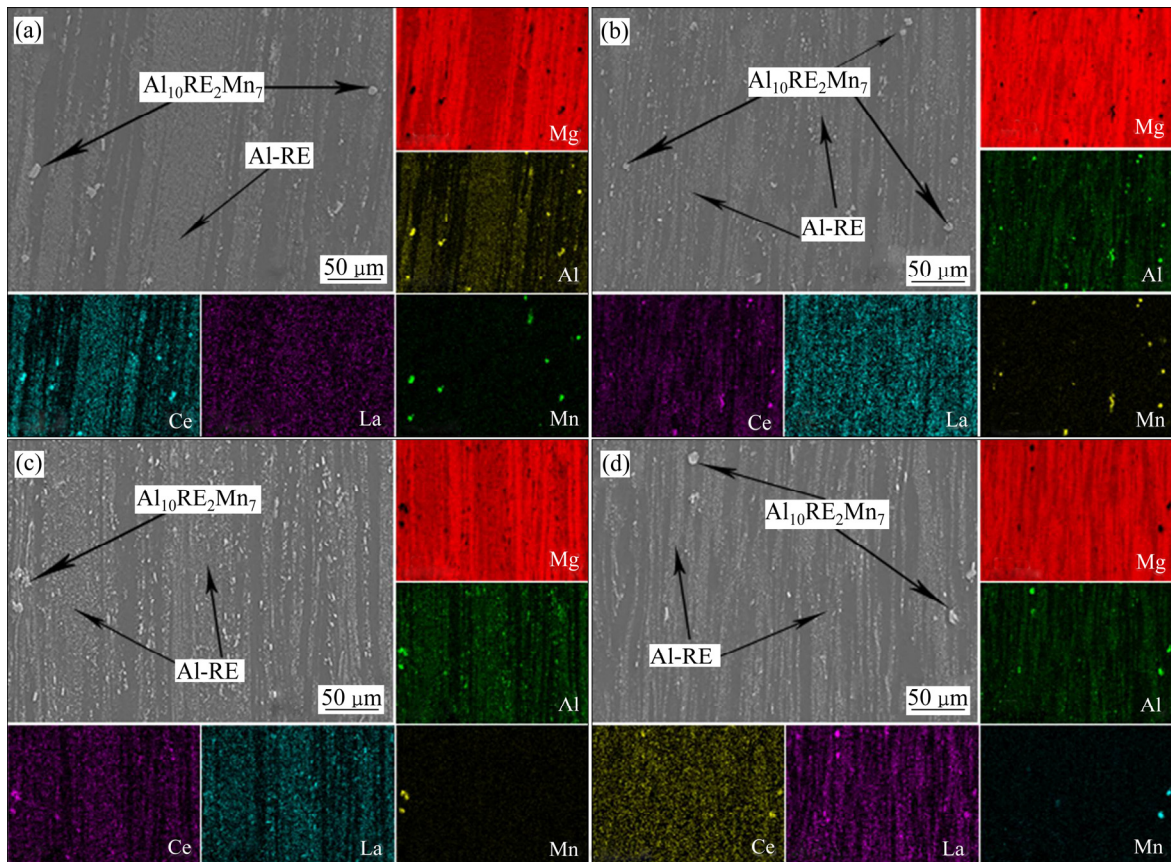


图 2 不同成分挤压态 AE44-2 镁合金 SEM 像和 EDS 谱
Fig. 2 SEM images and EDS spectra of extruded AE44-2 magnesium alloy with different compositions: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2; (c) Alloy 3; (d) Alloy 4

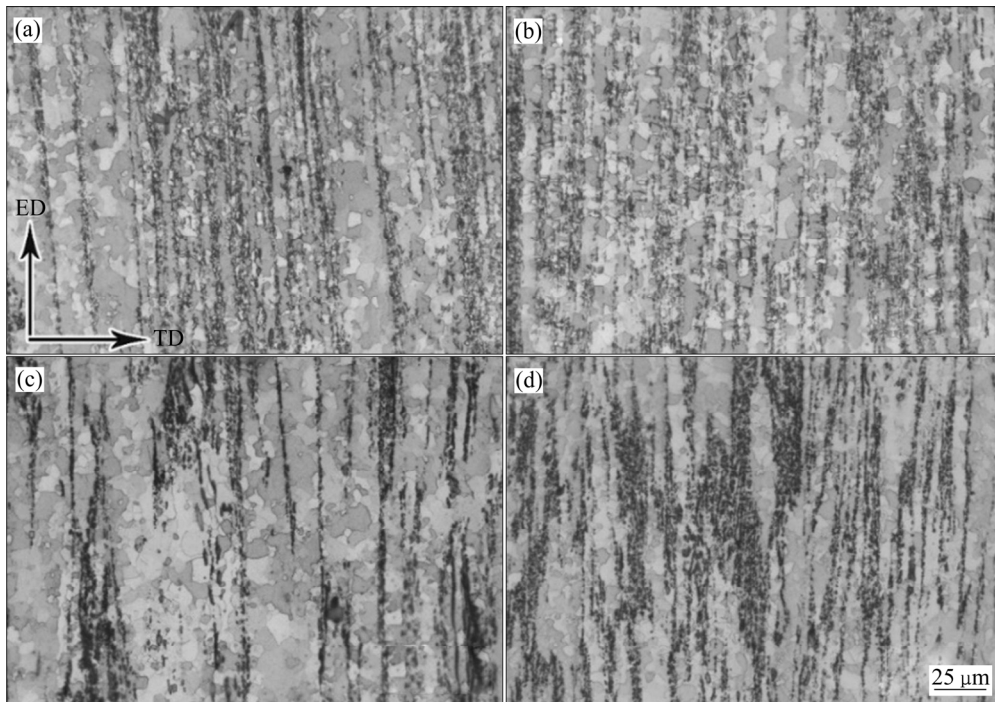


图3 不同成分挤压态 AE44-2 镁合金的金相组织图

Fig. 3 Metallographic structures of extruded AE44-2 magnesium alloy with different compositions: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2; (c) Alloy 3; (d) Alloy 4

为了确定合金的晶粒大小、再结晶和织构，利用扫描电镜的背散射技术(EBSD)对合金进行表征。图4和5所示分别为不同成分挤压态 AE44-2 镁合金 EBSD 图和相应的取向差角分布图，ED 和 TD 分别代表挤压方向和横向方向。从图4可看出，4种挤压态合金晶界清晰，晶粒细小，平均尺寸为 $3.7 \mu\text{m}$ 左右，未看到孪晶产生。随着 La、Ce 含量变化，对合金晶粒大小影响不大，富 Ce 挤压态 AE44-2 合金平均尺寸大小比富 La 大 $0.2 \mu\text{m}$ 。此外，挤压态合金中晶粒取向相对比较分散，尤其是细小晶粒取向更加分散。图4显示出合金中存在部分大晶粒，在大晶粒周围存在很多细小晶粒，该晶粒属于再结晶过程中没有完全长大的晶粒，说明这些部位位错密度可能较高。从图5可看出，合金相应的取向差角主要集中在高角度晶界，小角度晶界占比三分之一左右，该现象表明挤压合金中存在织构。取向差角分布图(见图5)均出现相对较高的 30° 峰，该值出现可能与再结晶过程密切相关，且取决于再结晶体积分数。镁合金中 30° 角峰值的出现与合金晶体中近重合晶体点阵晶界 $\Sigma 15a$ 有关，该结构在再结晶的镁合金晶粒长大过程中，能够起到织构弱化作用^[19]。因此，4种挤压态 AE44 合金都出现了相对

较高的 30° 峰峰值，推测 La、Ce 都具有弱化织构的作用。

为了进一步研究不同 La、Ce 含量的挤压态 AE44-2 镁合金的再结晶情况，从 EBSD 数据得到再结晶晶粒分布图如图6所示，蓝色区域代表再结晶，黄色区域代表亚晶，红色区域代表变形组织。在挤压应力和加热温度下，合金组织先沿晶界形成亚晶组织，进而通过亚晶结构合并机制和晶界迁移形成大角度亚晶，并发生动态再结晶，最终形成细小晶粒^[20-21]。图6显示出亚晶大部分分布在挤压带附近，说明位错密度能引起亚晶的形成^[22]。从图6(a)中可以看出，合金1中为再结晶晶粒为主，占有 81.7%，亚晶占比 17.5%，变形晶粒占比很少。从图6(b)可以看出，合金2中为再结晶晶粒与亚晶共同主导，变形晶粒所占区域相比合金1增加。从图6(d)中可以看出，合金4相比合金1再结晶晶粒减少至 23.3%，亚晶增加至 74.7%，变形晶粒所占区域没有明显变化。结果表明，随着 Ce 含量的减少与 La 含量的增加，再结晶晶粒逐渐会被亚晶及变形晶粒取代，减少再结晶晶粒分数；合金1和合金2的再结晶程度相对合金3和合金4的更完全，有利于弱化织构。

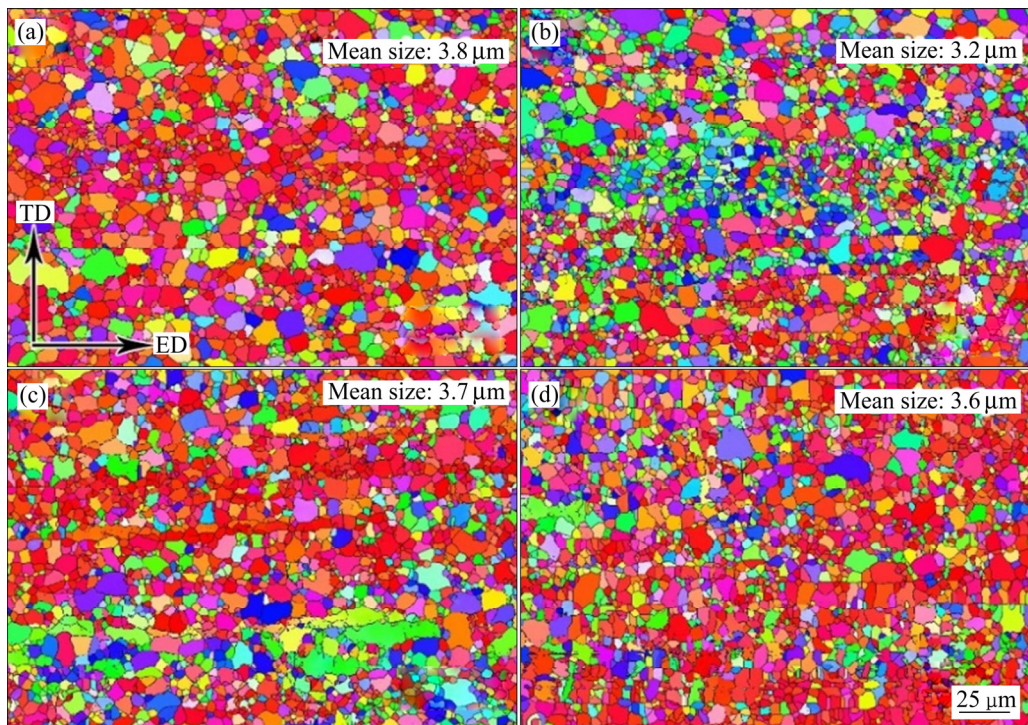


图 4 不同成分挤压态 AE44-2 镁合金的 EBSD 图

Fig. 4 EBSD diagram of extruded AE44-2 magnesium alloy with different compositions: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2; (c) Alloy 3; (d) Alloy 4

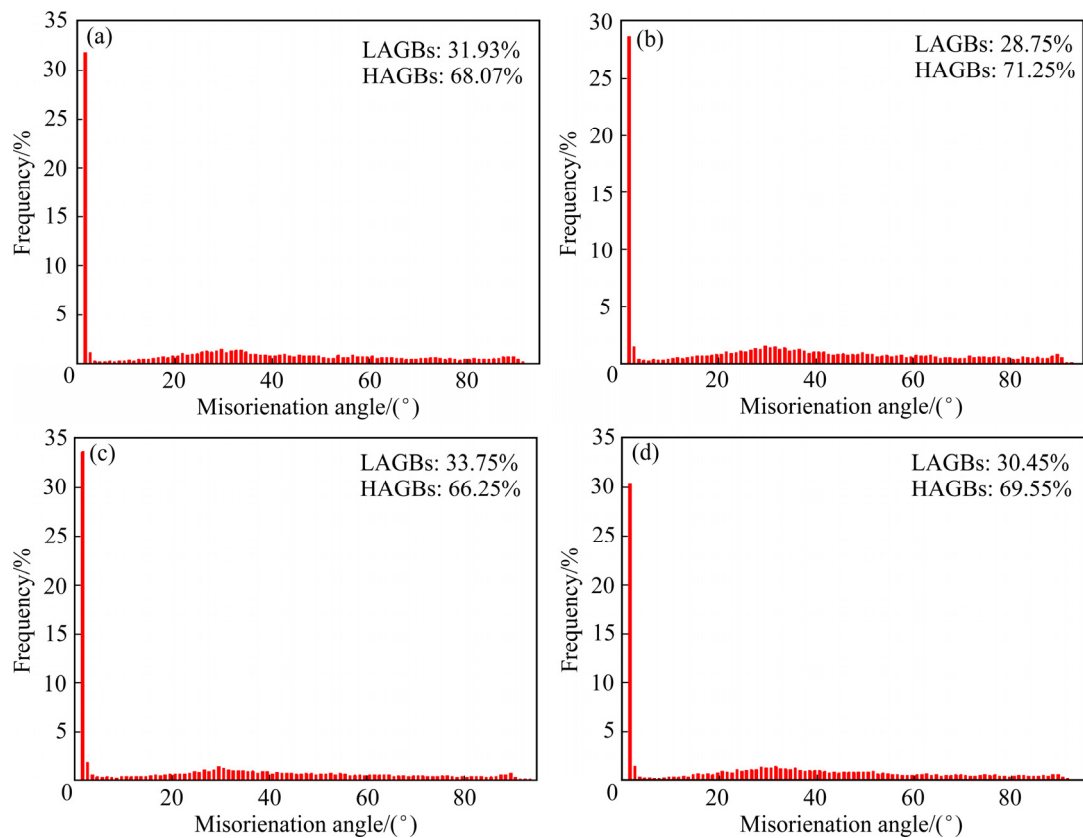


图 5 不同成分挤压态 AE44-2 镁合金的取向差角分布图

Fig. 5 Different orientation angles distributions of extruded AE44-2 magnesium alloy with different compositions: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2; (c) Alloy 3; (d) Alloy 4

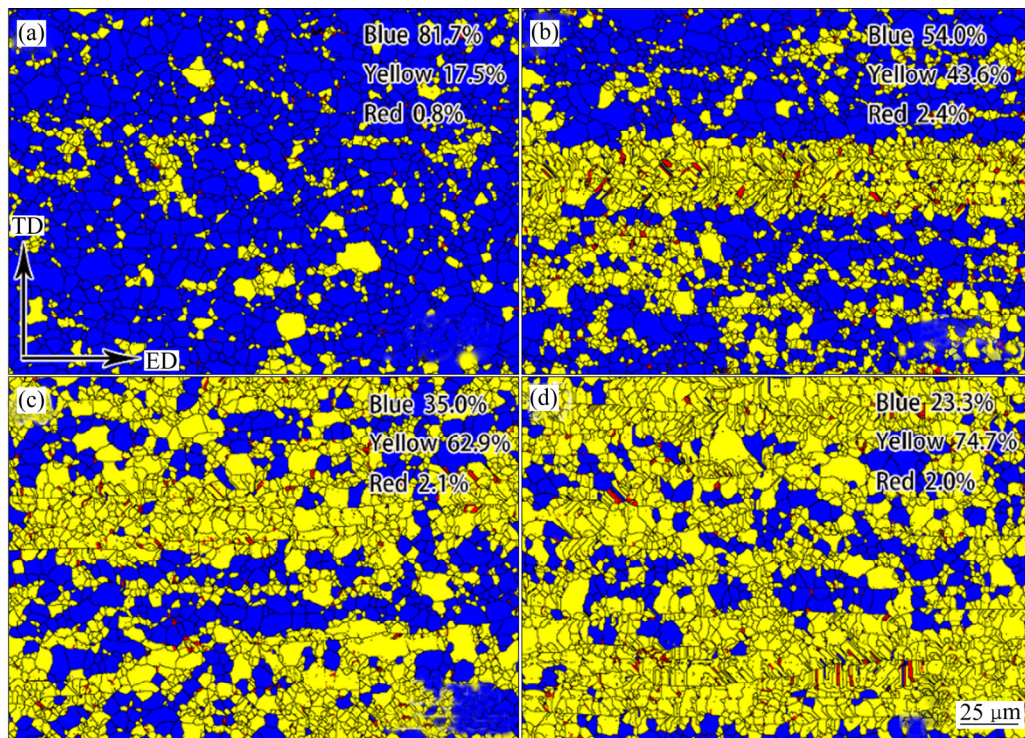


图6 不同成分挤压态 AE44-2 镁合金的动态再结晶分布图

Fig. 6 Dynamic recrystallization distributions of extruded AE44-2 magnesium alloy with different compositions: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2; (c) Alloy 3; (d) Alloy

2.2 不同 La 和 Ce 含量挤压态 AE44-2 镁合金的织构

热加工产生的织构对流变应力有明显的影响,这是由于镁自身独特的密排六方结构中可利用的滑移系数数量有限^[13]。因此,研究挤压态 AE44-2 镁合金织构是有必要的。从 EBSD 数据中得到不同 La、Ce 含量挤压态 AE44-2 镁合金的 $\{0001\}$ 面、 $\{11\bar{2}0\}$ 面和 $\{10\bar{1}0\}$ 面极图如图7所示。从图7可看出,4种挤压态 AE44-2 镁合金基面织构都为典型的纤维织构,添加 La、Ce 含量不同,在一定程度上改变了织构强度,这是由于镁合金在热挤压过程中晶粒择优取向引起的。不同 La、Ce 含量挤压态 AE44-2 镁合金的织构强度都较弱,此现象和许多研究中所提到的稀土合金化的挤压态镁合金相吻合,即稀土镁合金比不含稀土镁合金具有更弱的织构^[18, 22-23]。

从图7(a)和(d)中的 $\{0001\}$ 面极图可以看出,合金1和4的 $\{0001\}$ 面取向密度的分布比较聚集;从图7(b)和(c)中的 $\{0001\}$ 面极图可以看出,合金2和3的 $\{0001\}$ 面取向密度的分布比较分散;从图7中的 $\{11\bar{2}0\}$ 面和 $\{10\bar{1}0\}$ 面极图看出,4种合金的

$\{11\bar{2}0\}$ 和 $\{10\bar{1}0\}$ 面取向密度分布在挤压方向(ED)两极边缘且织构密度较弱。合金1到4的 $\{0001\}$ 面织构强度从5.69增加到6.23,即富La合金织构强度高,说明富Ce弱化挤压态 AE44-2 镁合金织构的能力比富La强,结果与再结晶分析相一致。由于非基面滑移系的激活导致晶粒旋转,再加 α -Mg与第二相颗粒之间形变能力不匹配,导致颗粒周围位错密度增加和再结晶的驱动力增加,使再结晶形核增加与晶粒取向随机化,进而弱化织构^[13, 24]。

STANFORD等^[25]通过表征挤压合金的织构发现RE元素合金化可以使合金的挤压织构变弱和增加伸长率的现象,主要因为镁合金在室温下基面滑移临界剪切应力低容易启动,挤压织构会阻碍挤压方向(ED)拉伸变形的基面滑移。因此,弱化织构可以减少对基面滑移的阻碍作用,进而改善镁合金的变形能力。

2.3 不同 La 和 Ce 含量挤压态 AE44-2 镁合金的力学性能

不同 La、Ce 含量的挤压态 AE44-2 镁合金力学性能测试结果如图8所示。结合之前报道^[26],铸态

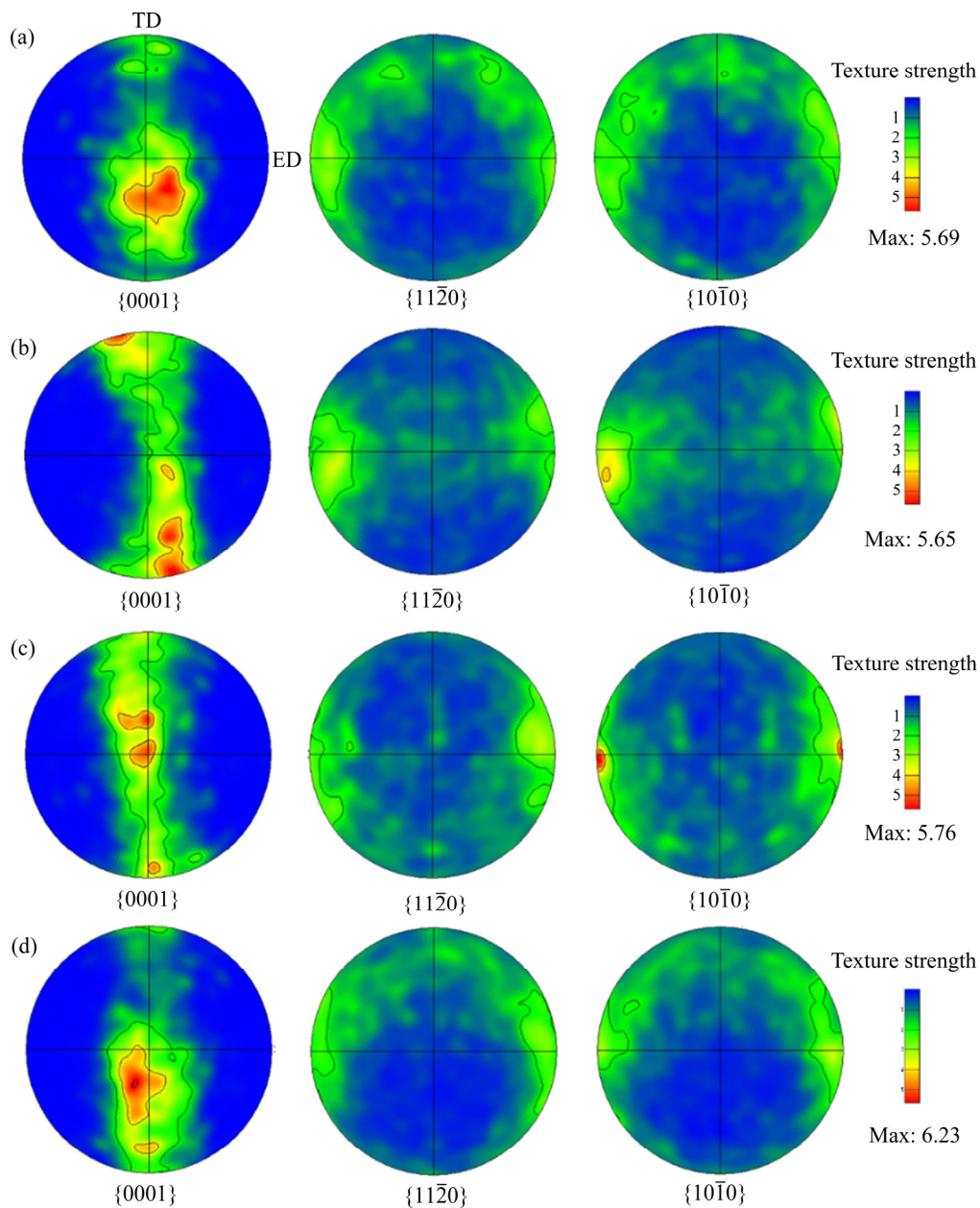


图 7 不同成分挤压态 AE44-2 镁合金极图

Fig. 7 Pole diagrams of extruded AE44-2 magnesium alloy with different compositions: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2; (c) Alloy 3; (d) Alloy 4

合金的力学性能最好达到 220.4 MPa, 经过挤压后的合金力学性能可以得到大幅度提升。由于在挤压过程中, 镁合金发生动态再结晶, 晶粒明显细化, 毗邻晶粒更易协调变形, 晶界密度的增大对裂纹的萌生和扩展有阻碍作用, 然而细小晶粒有利于改善合金强度和塑性^[21]。根据 Hall-Petch 关系, 通过细小晶粒可以大大提高热挤压样品的强度。从图 8(a) 上看出, 合金 2 和合金 3 的室温拉伸性能相差不大, 富 La 合金 4 的抗拉强度和屈服强度比富 Ce 合金 1 的更优异, 富 Ce 合金 1 的伸长率更好, 符合基面

织构强度的结果。在 4 种挤压态 AE44-2 镁合金中, 合金 2 的力学性能最好, 其抗拉强度 282.8 MPa, 屈服强度 219.8 MPa, 伸长率 22.1%。合金 2 的组织相对于其他 3 种合金的组织更均匀, 且晶粒尺寸较小, 织构强度较弱, Al-RE 相分布较均匀。

由于温度对材料性能有较大影响, 在高温下, 金属材料容易产生蠕变和应力松弛现象, 进而影响力学性能^[27]。从图 8(b) 可以看出, 4 种合金在达到应力峰值过后出现软化现象, 其拉伸强度比室温下的拉伸强度有了大幅度降低, 这是高温下发生晶粒

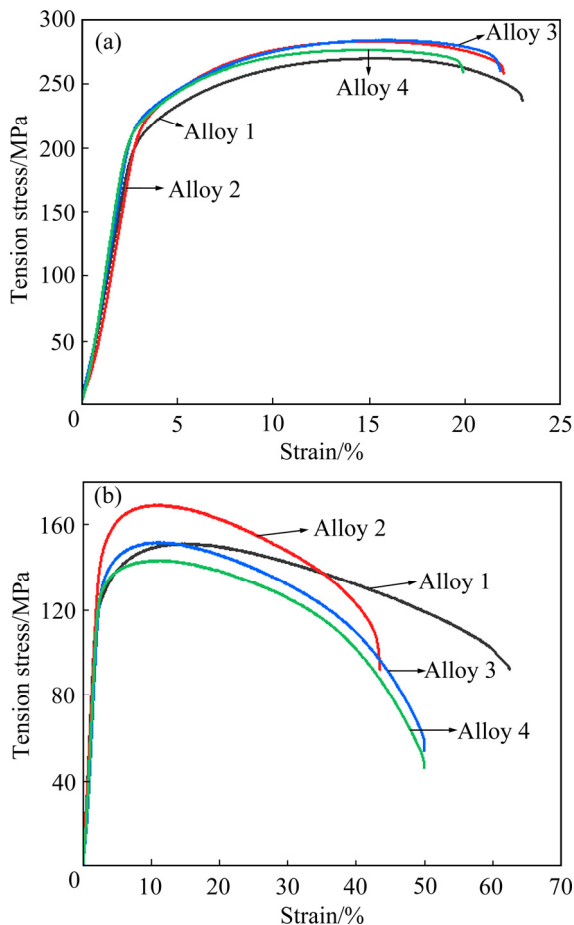


图 8 不同成分挤压态 AE44-2 镁合金力学性能
Fig. 8 Mechanical properties of extruded AE44-2 magnesium alloy with different compositions: (a) At room temperature(RT); (b) At 200 °C

的长大、动态再结晶和更容易启动滑移系造成的。因此，晶粒长大会导致屈服强度下降，更多的滑移系启动有助于伸长率的上升。在 200 °C 拉伸时，合金 2 的强度下降幅度最小，抗拉强度依然保持在 165 MPa 左右。另外 3 种合金伸长率虽然有显著的提升，但拉伸强度下降幅度较大。根据之前的报道^[26]，

表 2 相关的 AE44 镁合金力学性能

Table 2 Related mechanical properties of AE44 magnesium alloy

Alloy	Room temperature			200 °C			Reference
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	η /%	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	η /%	
Alloy 1	269.5	203.3	23.0	151.1	125.7	62.6	This work
Alloy 2	282.8	219.6	22.1	168.8	140.1	43.9	This work
Alloy 3	283.7	216.9	21.9	151.8	128.6	50.5	This work
Alloy 4	276.1	209.1	20.1	148.7	127.1	50.5	This work
AE44	265.2	180.1	9.5	129	101	24.97	[27]
ALa44	311	242	15				[5]

4 种不同成分的合金中晶界处都分布了高温稳定性优良的 $Al_{11}RE_3$ 相，而合金 2 含有更多的同样具备优良高温稳定性的 Al_2Ce 相并且分布于晶粒内部，可以有效阻碍晶粒长大和位错滑移，因此，在 200 °C 拉伸下，合金 2 相对于另外 3 种合金具有更好的强度。在高温时更容易启动滑移系，因此，4 种合金的塑性都有很大提高。除第二相分布外，晶内热稳定相与抗变形能力对合金高温性能的影响也很大^[28]。表 2 所列为已报道的相关 AE44 镁合金的力学性能，其中室温，抗拉强度(σ_b)，屈服强度($\sigma_{0.2}$)和伸长率(η)，可以看出本文实验采用重力熔铸法及热挤压工艺制备的 AE44-2 镁合金具有更好的综合力学性能。

2.4 不同 La 和 Ce 含量挤压态 AE44-2 镁合金的拉伸断口分析

不同 La、Ce 含量的挤压态 AE44-2 镁合金室温拉伸断口形貌如图 9 所示，从图 9 中可看出，拉伸断口存在大量的韧窝、撕裂棱以及少量的解理台阶，还有方块状的第二相(箭头所指)，说明 4 种成分的合金都是以韧性断裂为主，解理断裂为辅。图 9(b)中 SEM 能谱分析出方块状第二相为 $Al_{10}RE_2Mn_7$ 。从图 9(a)中可以看出，合金 1 的撕裂棱更多且有明显的韧窝，这表示该成分的合金塑性最好，这与拉伸性能分析结果一致。从图 9(b)和(c)中可以看出，合金 2 的断口形貌与合金 3 没有明显的差别，撕裂棱数量相对合金 1 较少，且出现较明显的解理台阶；从图 9(d)中可以看出，合金 4 的断口形貌中出现较多的解理台阶，组织不均匀，导致其塑性较差，这与前面的实验分析结果相对应。

不同 La、Ce 含量的挤压态 AE44-2 镁合金 200 °C 拉伸断口 SEM 像如图 10 所示。图 10 中呈现

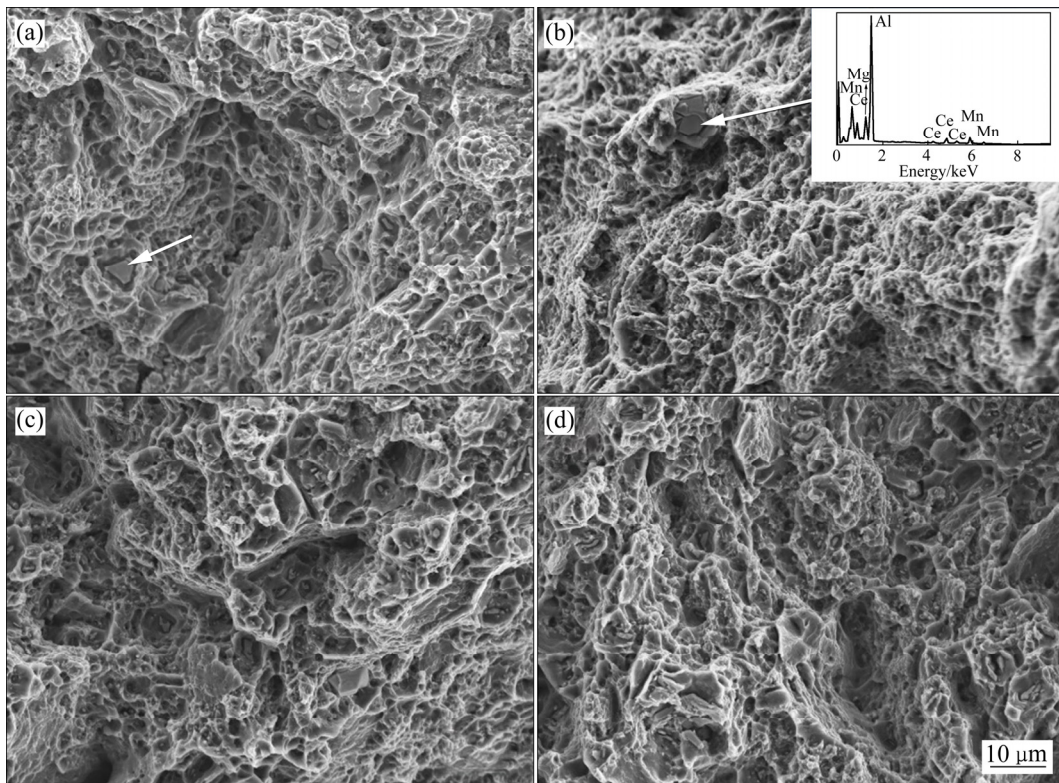


图 9 不同成分挤压态 AE44-2 镁合金室温拉伸断口形貌

Fig. 9 Tensile fracture morphologies of extruded AE44-2 magnesium alloy with different compositions at room temperature: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2; (c) Alloy 3; (d) Alloy 4

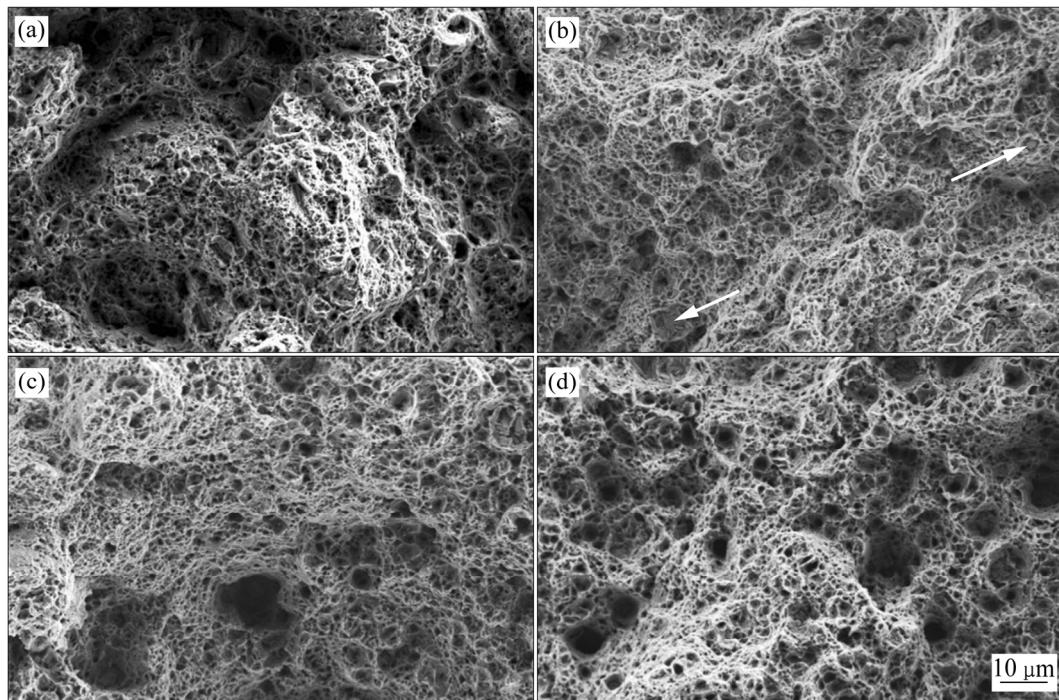


图 10 不同成分挤压态 AE44-2 镁合金 200 °C 拉伸断口形貌

Fig. 10 Tensile fracture morphologies of extruded AE44-2 magnesium alloy with different compositions at 200 °C: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2; (c) Alloy 3; (d) Alloy 4

出明显的韧性断裂特征,解理台阶基本消失,观察到大量的韧窝和撕裂棱。在图 10(b)中观察到更多的方块状 $Al_{10}RE_2Mn_7$ 相(见箭头所指),因其不具有优越的高温稳定性,容易在受力时断裂,这个可能是合金 2 伸长率比另外 3 种合金低的原因之一。

3 结论

1) 在挤压过程中,破碎后 Al-RE 相颗粒,可以提供大量异质形核点,促进动态再结晶,使 Al-RE 相周围形成大量细小晶粒;富 Ce 挤压态 AE44-2 镁合金再结晶程度比富 La 挤压态 AE44-2 合金更完全;Mg-4Al-1.5La-2.5Ce-0.3Mn 合金平均晶粒尺寸最小,为 3.2 μm ,再结晶比较充分,晶粒细小且较均匀,Al-RE 相分布均匀。

2) Ce 和 La 对镁合金都有弱化织构的效果,富 Ce 稀土弱化织构作用的效果比富 La 稀土强;富 Ce 挤压态 AE44-2 镁合金的织构强度较低,Mg-4Al-1.5La-2.5Ce-0.3Mn 合金的织构强度最小为 5.65,塑性较好。

3) 挤压态 AE44-2 镁合金的力学性能明显提高,这归因于晶粒细小,破碎后 Al-RE 相颗粒弥散分布挤压带起到强化作用。4 种合金中,Mg-4Al-1.5La-2.5Ce-0.3Mn 合金综合力学性能最好,其室温抗拉强度为 282.8 MPa,屈服强度为 219.6 MPa,伸长率为 22.1%;其 200 $^{\circ}C$ 抗拉强度为 168.8 MPa,屈服强度为 140 MPa,伸长率为 43.6%。4 种合金都是以韧性断裂为主,解理断裂为辅。

REFERENCES

- [1] MILLER V M, BERMAN T D, BEYERLEIN I J, et al. Prediction of the plastic anisotropy of magnesium alloys with synthetic textures and implications for the effect of texture on formability[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2016, 675: 345–360.
- [2] KUMAR A, MEENASHISUNDARAM G K, MANAKARI V, et al. Lanthanum effect on improving CTE, damping, hardness and tensile response of Mg-3Al alloy[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2017, 695: 3612–3620.
- [3] WANG J, LIAO R, WANG L, et al. Investigations of the properties of Mg-5Al-0.3Mn-xCe ($x=0-3$, wt.%) alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 477(1): 341–345.
- [4] SONG J, SHE J, CHEN D, et al. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, 8(1): 1–41.
- [5] LIU Y F, JIA X J, QIAO X G, et al. Effect of La content on microstructure, thermal conductivity and mechanical properties of Mg-4Al magnesium alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 806: 71–78.
- [6] YOU S, HUANG Y, KAINER K U, et al. Recent research and developments on wrought magnesium alloys[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2017, 5(3): 239–253.
- [7] 黄伦, 黄光胜, 邓钱元, 等. 微量 Ce 和 Ca 对 AZ31 组织演变及成形性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(3): 429–438.
HUANG Lun, HUANG Guang-sheng, DENG Qian-yuan, et al. Effects of trace Ce and Ca on microstructure evolution and formability of AZ31 alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(3): 429–438.
- [8] LANGELIER B, NASIRI A M, LEE S Y, et al. Improving microstructure and ductility in the Mg-Zn alloy system by combinational Ce-Ca microalloying[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2015, 620: 76–84.
- [9] YANG Q, LV S H, MENG F Z, et al. Detailed structures and formation mechanisms of well-known $Al_{10}RE_2Mn_7$ phase in die-cast Mg-4Al-4RE-0.3Mn Alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2019, 32(2): 178–186.
- [10] LI S Y, LI D J, ZENG X Q, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr alloy processed by high-vacuum die-casting[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(12): 3769–3776.
- [11] MENG F, LÜ S, YANG Q, et al. Developing a die casting magnesium alloy with excellent mechanical performance by controlling intermetallic phase[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 795: 436–445.
- [12] ZHU S, EASTON M A, ABBOTT T B, et al. The influence of individual rare earth elements (La, Ce, or Nd) on creep resistance of die-cast magnesium alloy AE44[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2016, 18(6): 932–937.
- [13] WANG J, GUO Y, LI J, et al. Microstructure, texture and mechanical properties of extruded Mg-5Al-2Nd-0.2Mn alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 653: 100–107.
- [14] ZHANG J, YU P, LIU K, et al. Effect of substituting

- cerium-rich mischmetal with lanthanum on microstructure and mechanical properties of die-cast Mg-Al-RE alloys[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(7): 2372–2378.
- [15] LIU P, JIANG H, CAI Z, et al. The effect of Y, Ce and Gd on texture, recrystallization and mechanical property of Mg-Zn alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 4: 188–196.
- [16] RZYCHON T, KIELBUS A, CWAJNA J, et al. Microstructural stability and creep properties of die casting Mg-4Al-4RE magnesium alloy[J]. *Materials Characterization*, 2009, 60(10): 1107–1113.
- [17] XU Y, CHEN C, ZHANG X, et al. Dynamic recrystallization kinetics and microstructure evolution of an AZ91D magnesium alloy during hot compression[J]. *Materials Characterization*, 2018, 145: 39–52.
- [18] STANFORD N. Micro-alloying Mg with Y, Ce, Gd and La for texture modification—A comparative study[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2010, 527(10/11): 2669–2677.
- [19] MA Q, LI B, MARIN E B, et al. Twinning-induced dynamic recrystallization in a magnesium alloy extruded at 450 °C[J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65(9): 823–826.
- [20] ZHU S M, GIBSON M A, NIE J F, et al. Microstructural analysis of the creep resistance of die-cast Mg-4Al-2RE alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 58(6): 477–480.
- [21] LIAO Q, LE Q, CHEN X, et al. Superplastic deformation behavior of the as-extruded AZ110 magnesium alloy with La-rich Mish metal addition[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(3): 6777–6789.
- [22] LIAO Q, HU W, LE Q, et al. Microstructure, mechanical properties and texture evolution of Mg-Al-Zn-La-Gd-Y magnesium alloy by hot extrusion and multi-pass rolling[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33: 1359–1368.
- [23] STANFORD N, ATWELL D, BEER A, et al. Effect of microalloying with rare-earth elements on the texture of extruded magnesium-based alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 59(7): 772–775
- [24] ZHANG M, WANG J, ZHU Y, et al. Ex-situ EBSD analysis of hot deformation behavior and microstructural evolution of Mg-1Al-6Y alloy via uniaxial compression[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 775: 138978.
- [25] STANFORD N, BARNETT M. Effect of composition on the texture and deformation behaviour of wrought Mg alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 58(3): 179–182.
- [26] 陈梦茹, 乐泰和, 金培鹏. 不同镧铈含量对 AE44 镁合金组织与性能的影响[J]. *有色金属工程*, 2020, 10(5): 17–21. CHEN Meng-ru, LE Tai-he, JIN Pei-peng. Effects of lanthanum and cerium contents on microstructure and properties of AE44 magnesium alloy[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2020, 10(5): 17–21.
- [27] 艾向乐. 热挤压和轧制工艺对 AE44 镁合金组织和性能的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2018. AI Xiang-le. The effect of hot extrusion and rolling process on microstructure and properties of AE44 magnesium alloy[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [28] ZHANG J, LIU K, FANG D, et al. Microstructure, tensile properties, and creep behavior of high-pressure die-cast Mg-4Al-4RE-0.4Mn (RE=La, Ce) alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44(8): 2046–2054.

Effect of La and Ce contents on microstructure, texture and mechanical properties of extruded AE44-2magnesium alloy

LE Tai-he^{1,2}, CHEN Meng-ru^{1,2}, WANG Jin-hui^{1,2}, JIN Pei-peng^{1,2}

- (1. Qinghai Provincial Engineering Research Center of High-Performance Light Metal Alloys and Forming, Qinghai University, Xining 810016, China;
2. Qinghai Province Key Laboratory of New Light Alloys, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: The different compositions of extruded AE44-2 alloy were prepared by gravity casting and hot extrusion forming. The effects of La and Ce contents on the microstructure, recrystallization, texture and mechanical properties of extruded AE44-2 magnesium alloy were investigated. The results show that the Al-RE phase of the AE44-2 magnesium alloy is fragmented to provide a large amount of heterogeneous nucleation point and promote dynamic recrystallization during the extrusion process, which makes the alloy grain refinement. Both of them promote the weakening of texture and improve the mechanical properties. Due to the different contents of La and Ce, the average grain size of the four kinds of extruded AE44-2 magnesium alloys is about 3.7 μm , and the texture effect of Ce-rich extruded AE44-2 magnesium alloy is stronger than that of La-rich one, and the degree of recrystallization of Ce-rich extruded AE44-2 magnesium alloy is more complete than that of La-rich one. Among them, the recrystallization of Mg-4Al-1.5La-2.5Ce-0.3Mn alloy is more complete and the texture strength is low, the average grain size is fined to 3.2 μm and the Al-RE phase distributes homogeneously, and the comprehensive mechanical properties are the best.

Key words: AE44-2 magnesium alloy; hot extrusion; recrystallization; texture; mechanical properties

Foundation item: Project(2018-GX-A1) supported by the Qinghai Provincial Science and Technology Key Program, China

Received date: 2020-06-17; **Accepted date:** 2020-12-16

Corresponding author: WANG Jin-hui; Tel: +86-13709742114; E-mail: 61671465@qq.com

(编辑 李艳红)