DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3111

Zn 对 Mg–Gd–Y–Zr 镁合金微观组织和力学性能的影响

田　军[1,2],屠　涛[1,2],代　盼[3],徐春杰[4,5],曾建新[1]

(1. 镁高镁诺奖(铜川)新材料有限公司,陕西 铜川 727031; 2. 西安诺高镁防务技术有限公司, 陕西 西安 710076; 3. 西安石油大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710065; 4. 西安谢赫特曼诺奖新材料研究院,陕西 西安 710048; 5. 西安理工大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710048)

摘　要:Zn 元素的添加对 Mg-Gd-Y-Zr 合金的微观组织和力学性能具有重要影响，特别是 LPSO 结构的演变对高性能镁合金的产业化应用具有重要的作用。为研究 Zn 对 Mg-Gd-Y-Zr 合金微观组织演变和性能影响,对不同 Zn 元素含量的 Mg-10Gd-4Y-0.5Zr-*x*Zn(*x*=0, 1, 2, 质量分数,%)铸棒进行挤压处理,采用 OM、SEM、XRD、和 TEM 对挤压试样进行了组织观测，并对试样的力学性能进行检测。结果显示，挤压状态 Mg-10Gd-4Y-0Zn-0.5Zr 由基体 α-Mg 和少量的 Mg-RE 微粒相组成。随着元素 Zn 的添加,试样的相组成变为大量基体 α-Mg、晶界流线形 LPSO 结构、晶粒内部微小层片状 LPSO 及少量随机分布 Mg-RE 微粒相。随着元素 Zn 的不断增加,晶粒尺寸不断细化,细晶强化效果不断增强,使得试样的强度显著提升,而试样伸长率呈现先增强后减弱的趋势。

关键词:Mg-Gd-Y-Zn-Zr;微观组织;力学性能

中图分类号: TG113.25　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)10-0935-06

Effect of Zn–addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Mg–Gd–Y–Zr Alloy

TIAN Jun[1,2], TU Tao[1,2], DAI Pan[3], XU Chunjie[4,5], ZENG Jianxin[1]

(1. Meigaomei Nobel Prize (Tongchuan) New Materials Co., Ltd., Tongchuan 727031, China; 2. Xi'an Nuogaomei Defense Technology Co., Ltd., Xi'an 710076, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 4. Xi'an Shechtman Nobel Prize New Materials Institute, Xi'an 710048, China; 5. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The addition of Zn has a significant impact on the microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy. In particular, the evolution of the LPSO structure plays an important role in the application of high-performance magnesium alloys. To investigate the effect of Zn on the microstructure evolution and properties of the Mg-Gd-Y-Zr alloy, Mg-10Gd-4Y-0.5Zr-*x*Zn (*x*=0, 1, 2, mass fraction, %) alloys with different Zn contents were prepared by extrusion. The microstructure of the as-extruded alloys was observed by OM, SEM, XRD and TEM, and the tensile properties at room temperature were tested. The results show that the as-extruded alloy without Zn consists of the α-Mg matrix and a small amount of the Mg-RE phase. With the addition of Zn, the alloy consists of α-Mg with lamellar 14H-LPSO in the matrix, linear flow 14H-LPSO at the grain boundary and the Mg-RE phase. The grain size of the as-extruded alloy continuously decreases and the effect of fine grain strengthening increases with increasing Zr content. As a result, the strength of the alloy increases, while the elongation of alloys increases primarily and then weakens with the addition of Zr.

Key words: Mg-Gd-Y-Zn-Zr; microstructure; mechanical property

收稿日期: 2023-05-14

基金项目:陕西省厅市联动重点项目(2022GD-TSLD-49);2022 年陕西省关键核心技术产业化“揭榜挂帅”项目,西安市科技计划项目(22SFGX0003);秦创原引用高层次创新创业人才项目(QCYRCXM-2022-62);秦创原引用高层次创新创业人才项目(QCYRCXM-2022-138);陕西省教育厅专项科研计划项目(22JK0512);西安市科技计划项目(22GXFW0099)

作者简介:田　军,1988 年生,硕士生,工程师. 主要从事有色金属材料组织性能调控及工艺设计方面的工作. Email: tianjunfly@163.com

引用格式:田军,屠涛,代盼,等. Zn 对 Mg-Gd-Y-Zr 镁合金微观组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术,2023, 44(10): 935-940.

TIAN J, TU T, DAI P, et al. Effect of Zn-addition on the microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy[J]. Foundry Technology, 2023, 44(10): 935-940.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

镁合金作为最轻的金属结构材料，兼具突出的电磁兼容、显著的吸噪减振等优点，使其在兵装、航空航天和高端智能装备等领域具有一定应用潜力[1]。然而，常规镁合金伸长率较差、力学强度不高等，极大地阻碍了镁合金产业化应用。稀土元素的添加，可提升镁合金固溶和时效强化效果，从而显著提升其力学性能[2]。而含有稀土Gd和Y等元素的镁合金展现出优异的强度和耐蚀特性，受到科研人员的广泛关注，特别是Mg-Gd-Y系材料的生产方法、热加工工艺和不同元素对材料的影响规律成为探究的热点。对于添加不同元素对合金组织和性能的影响已有相关报道，例如王敬丰等[3]研究了轧制工艺对Mg-Gd-Y系合金性能和组织演变的影响；宋鹏飞等[4]探究了元素Zn对热挤压处理状态Mg-Gd试样微观相组成、组织演变和材料阻尼特性的影响规律；Wu等[5]研究了Zn元素含量对铸态Mg-Gd-Y系合金组织演变的影响规律。同时，Zn作为添加剂加入到稀土镁合金材料中可形成长周期堆垛有序(LPSO)结构[6]，而细小的LPSO结构能够有效改善材料的力学性能。Lei等[7]分析了合金中不同Zn元素含量对Mg-Gd-Zr系试样的相组成和性能的影响，结果表明Zn元素的含量从0到1.5%(质量分数)变化时，合金中晶粒尺寸由6.02 μm降为3.05 μm，同时合金的伸长率也得到了明显提高。Mg-Gd-Y-Zn-Y作为高强耐热镁合金中性能最好的合金之一[8]，其中Zn元素的含量对组织和性能的影响尚缺乏相关研究报道。

本文研究不同Zn含量的挤压态Mg-10Gd-4Y-0.5Zr-*x*Zn合金，对材料组织和力学性能的影响，以期为高强韧Mg-Gd稀土镁合金的广泛推广和产业化应用总结和提供基础研究及成果。

1 实验方法

使用井式真空氩气保护电阻炉，以纯镁(纯度99.95%)、Mg-30Gd、Mg-25Zr、锌锭(纯度99.5%)及Mg-30Y等材料制备Mg-10Gd-4Y-*x*Zn-0.5Zr(*x*=0, 1, 2, 质量分数，%)铸棒。将制备的尺寸为ϕ55 mm×110 mm的Mg-10Gd-4Y-0.5Zr-*x*Zn合金铸锭进行520 ℃×14 h均匀化退火，并将热处理后的棒料加工成尺寸为ϕ49 mm×80 mm挤压毛坯。挤压处理温度为420 ℃，加热保温时长为15 min，挤压变形速率为15 mm/min，挤压棒直径为14 mm。

采用OM、SEM及TEM对合金组织进行观察与表征。其中OM和SEM观测试样粗细砂纸逐层研磨，试样观测表面抛光，随后用浓度为4%的硝酸酒精轻微腐蚀。TEM薄膜观测样品先通过研磨抛光，再进行减薄处理获得。XRD分析在X射线衍射分析仪上进行。试样的拉伸性能按照GB/T 228.1-2021标准，在HT2402型材料试验机上进行试验速率为1 mm/min。

按照GB/T 6394-2017要求，采用截点法测量平均晶粒尺寸。晶界附近块状第二相体积分数利用Image pro plus图象处理软件获得。依据体视学原理，在Image pro plus软件中设定图象比例尺并计算第二相的面积分数，可视为体积分式。实验所需设备名称及型号详见表1。

2 实验结果与分析

2.1 元素Zn对挤压态Mg–Gd–Y–Zn系合金组织的影响

不同Zn含量试样的组织见图1。图1a、c、e为挤压试样横截面组织，观察可知Mg-10Gd-4Y-0.5Zr合金晶粒内部和晶界处均未出现层片状结构，随着Zn元素的添加，晶粒内部生成大量细小层片状结构。由图1c、e可知，Mg-10Gd-4Y-1Zn-0.5Zr和Mg-10Gd-4Y-2Zn-0.5Zr的平均晶粒尺寸分别为25 μm和16 μm。由此可知，热挤压过程中，晶粒均

表 1 实验设备及型号
Tab.1 The experimental equipment and model

设备用途	目的	实验设备及型号
材料制备	合金熔炼	井式真空氩气保护电阻炉(配有数显调节仪和测温仪)
	热处理	RX-15-9 箱式电阻热处理炉(100~1 000 ℃)
	热挤压	YJ32-315 型四柱三梁液压机
显微组织观察	OM 组织	Olympus GX71 型光学显微镜(金相观察)
	SEM 组织	JSM-6700F 扫描电子显微镜
	TEM 分析	JEM-3010 高分辨透射电子显微镜
	XRD 分析	XRD-7000X- 射线衍射仪
力学性能测试	拉伸试验	HT2402 型计算机伺服控制材料试验机
辅助设备	双喷减薄	MTA-IA 型磁力驱动双喷射电解减薄器
	离子减薄	FISCHONE1010 型离子减薄仪
辅助软件	图象处理软件	Image pro plus 图象处理软件

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

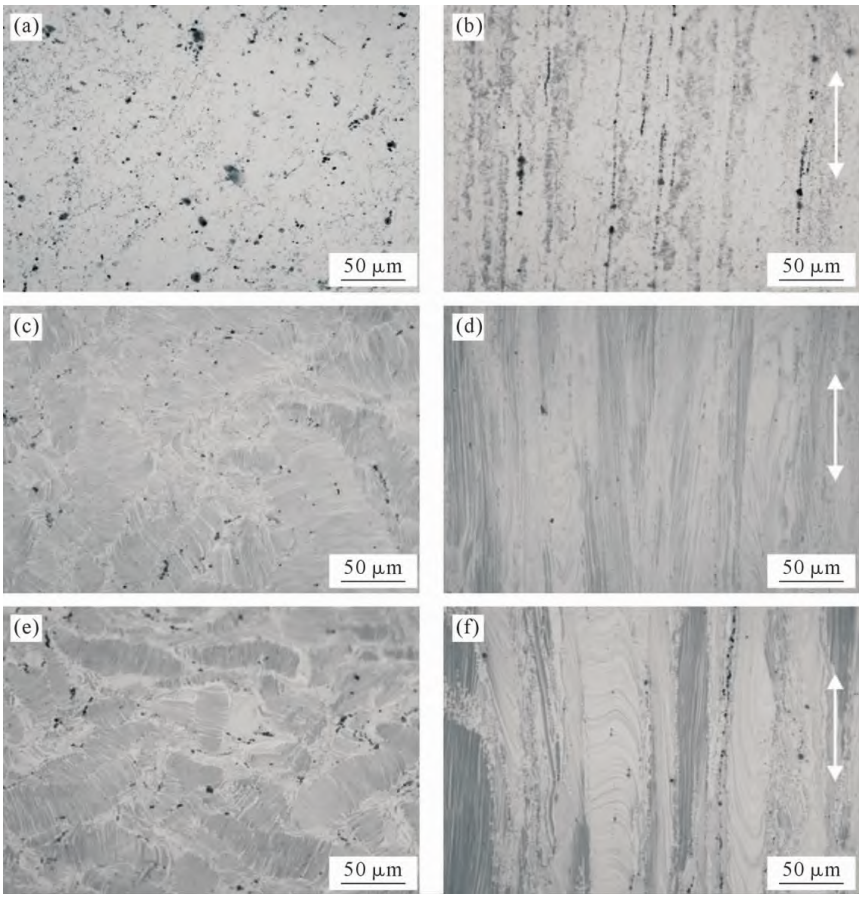


图 1　挤压态 Mg-10Gd-4Y-*x*Zn-0.5Zr (*x*=0, 1, 2, 质量分数，%)试样的 OM 形貌：(a) *x*=0，横截面，(b) *x*=0，纵截面，(c) *x*=1，横截面，(d) *x*=1，纵截面，(e) *x*=2，横截面，(f) *x*=2，纵截面

Fig.1　OM morphology of as-extruded Mg-10Gd-4Y-*x*Zn -0.5Zr (*x*=0, 1, 2, mass fraction, %) alloy: (a) *x*=0, transverse direction, (b) *x*=0, longitudinal direction, (c) *x*=1, transverse direction, (d) *x*=1, longitudinal direction, (e) *x*=2, transverse direction, (f) *x*=2, longitudinal direction

发生了不同程度的形变，且伴随着Zn元素添加量的提高，晶粒的尺寸逐渐缩小。

采用Image pro plus图象处理软件分别处理图1c、e，热挤压处理状态的Mg-10Gd-4Y-1Zn-0.5Zr和Mg-10Gd-4Y-2Zn-0.5Zr合金晶界处块状第二相的体积分数分别为3.7%和8.4%。由此可知，随着Zn含量的增加，晶界附近块状第二相的体积分数逐渐增加。

图1d~f分别热挤压处理态试样的纵截面组织，白色箭头代表热挤压的方向，表明挤压过程中3种试样晶粒内薄片结构都出现一定程度的弯曲和破碎等现象，晶界附近块体结构沿热挤压方向呈均匀细线状排布，并且再结晶的细小晶粒出现在晶界附件，导致热挤压处理的试棒内部产生组织不均匀的情况。Zn含量的不断提高，试样的晶粒尺寸变小，细小线状第二相分布在晶界附近的数量不断增多，从而细化了试样的组织。

图2为热挤压处理状态Mg-10Gd-4Y-1Zn-0.5Zr试样的微观组织。在热挤压过程中，晶粒内部层片状结构沿一定方向出现变形现象，可知层片状结构在挤压力的作用下发生了破碎和塑性变形，见图2a中D区域和图2b中A区域所示。外在压力作用下，一部

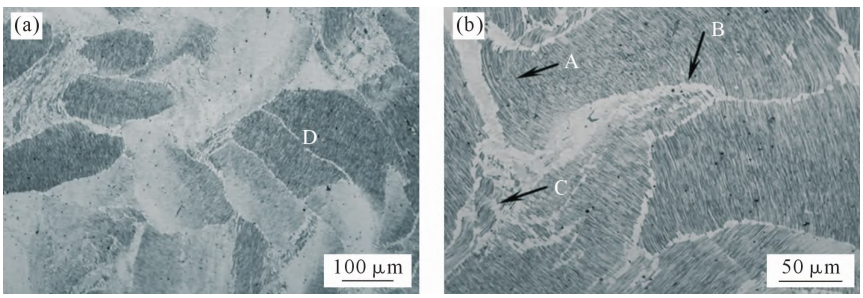


图 2　挤压态 Mg-10Gd-4Y-1Zn-0.5Zr 合金的微观组织：(a) 低倍，(b) 高倍

Fig.2　The OM images of as-extruded Mg-10Gd-4Y-1Zn-0.5Zr alloy: (a) low magnification, (b) high magnification

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

分尺寸较大的晶粒转化为尺寸较小的晶粒，并在晶粒附件区域串联在一起，发生再结晶现象，如图2b中B和C区域所示。

图3为Zn含量为1%(质量分数)时，挤压态Mg-10Gd-4Y-1Zn-0.5Zr合金的TEM微观组织，图2a为该晶界附近发生再结晶现象的晶粒TEM图片见图3a，可见再结晶产生了大量均匀分布的微小等轴晶，且薄层结构析出在部分晶粒内部。图3b显示出挤压态Mg-10Gd-4Y-1Zn-0.5Zr合金晶粒内部存在大量细小的层片状结构，左下角插图为合金沿着Mg晶带轴的选取电子衍射花样，因此可确定该层片状结构为14H-LPSO结构，该结构是Mg-RE系合金中更稳定的LPSO结构类型，14H-LPSO结构的HRTEM图像见图3c，该薄片结构由1.828 nm厚的2个堆垛单元组成，薄片厚度数值与Zhu等[9]观测的14H-LPSO堆垛单元厚度数值相同。

不同Zn含量的挤压态试样的XRD测试结果见图4。结合OM和TEM组织可知，不含Zn的材料经过固溶和热挤压处理后，组织内部发生了再结晶的情况，导致添加的稀土Gd、Y等稀土元素固溶在晶粒中，未出现层片状LPSO结构。因此不含Zn的试样组织由大量的基体α-Mg和随机分布的少量Mg-RE微粒相构成(图4a)。

Zn含量分别为1%和2%的相组成为大量的α-Mg基体、薄片状均匀分布在晶粒内的14H-LPSO结构、细线形状分布在晶界附近的14H-LPSO结构以及随机分布微量的Mg-RE微粒相。晶界处细线状LPSO结构包含两种生产机制：①固溶处理出现的块状14H-LPSO结构在热塑性变形处理中形变和破碎，沿塑性变形方向分布；②热塑性变形中，基体薄片形状的14-LPSO结构出现细化，晶界附近少量微小薄片结构发生纠缠，同时在较高的温度下生长，进而出现粗大的块状LPSO结构[6,10]。

元素Zn可降低稀土镁合金的层错能量，有助于再结晶现象在塑性变形在热塑性变形中发生[11]，因此Zn含量不断增大，基体中形成大量的层片状的LPSO结构和均匀分布在晶界附近的块状LPSO结构。一是因为，热塑性变形处理时分布在基体和晶界附近的LPSO结构显著抑制大量的孪晶和位错运动，从而在组织中出现位错缠绕和积塞[12]，推动了再结晶现象的出现；同时，分布在基体内部的14H结构排布具有明显各向异性[13]，在热挤压变形处理时在晶界附近形成应力集中，导致局部出现大的形变量，也会推动再结晶的发生，进而实现组织细化的目标。因此，Zn元素的添加和含量的不断增大，热挤压变形过程中的再结晶现象显著加剧，达到细化合金微观组织的目的。

2.2 元素Zn对挤压态Mg–Gd–Y–Zn系合金力学性能的影响

图5显示了不同Zn含量试样经过挤压处理后的拉伸试验结果。3种热挤压材料的室温抗拉强度分别为310、351和357 MPa，屈服强度分别为265、306和335 MPa。元素Zn的不断添加，试样的强度显著改善。造成其强度升高的原因有两个方面：首先，细晶

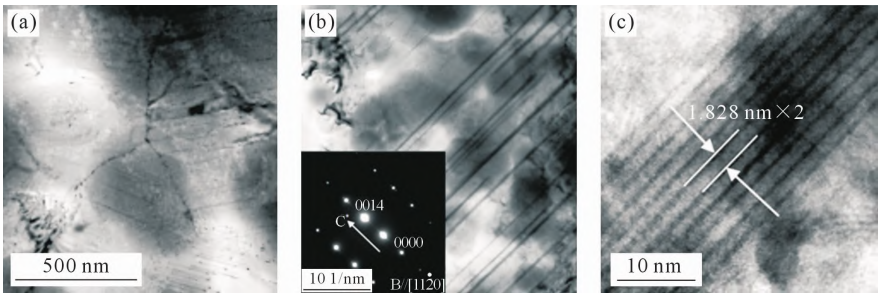


图 3 挤压态 Mg-10Gd-4Y-0.5Zr-1Zn 合金的 TEM 组织：(a) 晶界组织，(b) 晶内组织，(c) HRTEM 图像
Fig.3 TEM images of the as-extruded Mg-10Gd-4Y-0.5Zr-1Zn alloy: (a) structure at the grain boundary, (b) intergranular structure, (c) HRTEM image

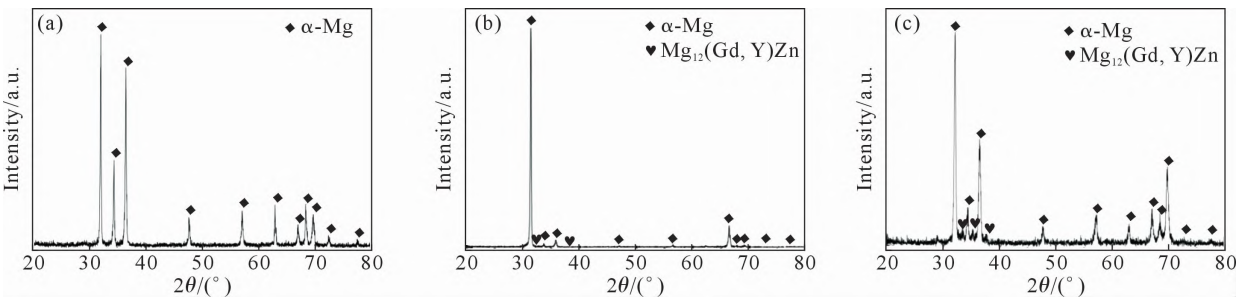


图 4 热挤压处理态 Mg-10Gd-4Y-*x*Zn-0.5Zr(*x*=0, 1, 2, 质量分数，%)试样 XRD 结果：(a) *x*=0, (b) *x*=1, (c) *x*=2
Fig.4 XRD patterns of as-extruded Mg-10Gd-4Y-*x*Zn-0.5Zr(*x*=0, 1, 2, mass fraction, %) alloy: (a) *x*=0, (b) *x*=1, (c) *x*=2

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

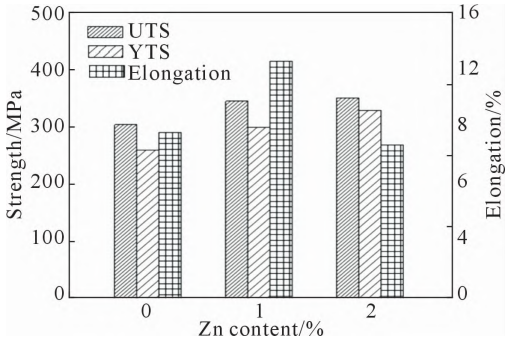


图 5 热挤压处理试样的拉伸性能

Fig.5 The tensile properties of the as-extruded alloy

强化为该合金主要的强化方式,Zn含量的增加导致合金在热挤压变形时层片状14H结构和晶粒破碎和再结晶程度更加剧烈，试样微观组织愈发细化,由Hall-Petch推论分析,内部晶粒的尺寸越细小,合金的强度等力学性能逐渐增加；其次,Zn的添加和含量增加能有效减小了LPSO结构的层错能，是形成LPSO结构的核心要素,LPSO结构是一种超高硬度的增强相[14-15],有效改善了试样的强度;同时,随着基体内部薄片形貌的LPSO结构的形成,热塑性形变处理时14H结构在外力的作用下出现细化并与晶界相互作用,且随着微观组织的细化,晶界与晶粒内部14H-LPSO结构的交互作用越强烈,从而提升了加工硬化的效果[16-17];除此之外,破碎后的细小层片状LPSO结构兼具固溶和细晶强化效果,从而有效提高试样强度。

不同Zn含量试样的伸长率分别为9.57%、13.43%和8.73%。由此可知,Mg-Gd-Y试样中随着不断增大Zn的添加量,试样的伸长率呈现先升高后降低的趋势。这主要是由于试样中Zn的增加细化了组织,随着Zn含量的增加组织更加细小,导致晶粒内部细小层片状14H结构与晶界等交互作用越强烈[18],显著改善了试样的伸长率。另一方面,Mg-Gd-Y试样中Zn含量的增大，分布于晶界附近的粗大块状14H结构增多,在热挤压变形过程中极易形成应力集中现象[17,19],导致试样的伸长率变差。上述两个相互抑制的原因导致材料的塑性展现先改善后减弱的趋势。

图6为Mg-10Gd-4Y-0.5Zr-*x*Zn试棒的断口组织。不同试样的断口都产生了深度不同、尺寸不均的韧窝,属于微孔聚集型的断裂形式[20]。当Zn含量增加到1%时,断口中出现深度相当的等轴韧窝,为韧性断裂的典型特征,说明材料展现出良好的塑性。其余两种试样断口中还出现了一定数量的撕裂棱和少量的韧窝，属于同时包含韧性和脆性断裂的混合断裂方式,从而导致试样的塑性减弱。

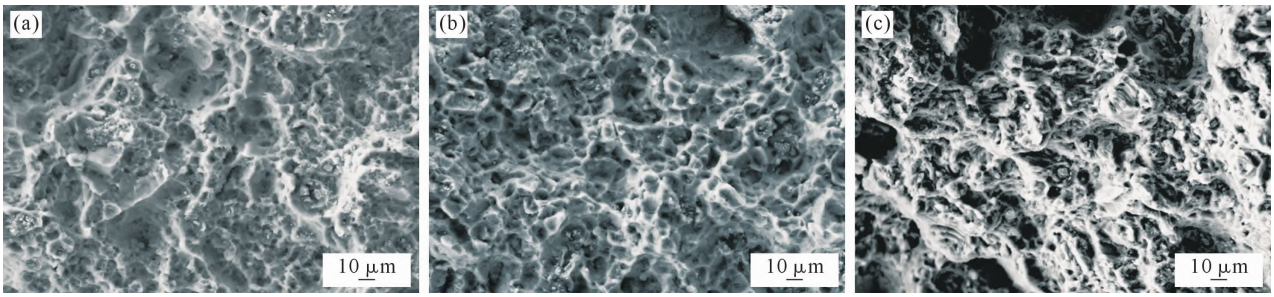


图 6 热挤压处理态 Mg-10Gd-4Y-*x*Zn-0.5Zr(*x*=0, 1, 2, 质量分数,%)试样的断口形貌:(a) *x*=0, (b) *x*=1, (c) *x*=2

Fig.6 Tensile fracture morphology of extruded Mg-10Gd-4Y-*x*Zn-0.5Zr(*x*=0, 1, 2, mass fraction, %) alloy: (a) *x*=0, (b) *x*=1, (c) *x*=2

3 结论

(1)不含Zn的Mg-10Gd-4Y-0.5Zr(质量分数,%)材料经过挤压处理后,试样的相组成为大量基体α-Mg和随机分布少量Mg-RE微粒相，随着Zn元素的添加，其余两种试样的相组成变为大量的基体α-Mg、晶粒内部具有一定排布方向的微小薄片形貌的14H-LPSO结构、细线状分布在晶界附近的14H-LPSO结构和随机分布的微量Mg-RE微粒相。

(2)随着元素Zn的不断添加,3种热挤压处理态试样的晶粒不断细化,细晶强化效果显著改善,且具有一定排布方式的细小薄片形貌的14H-LPSO结构具有加工硬化效果,从而提升试样的强度,导致材料的抗拉强度和屈服强度不断升高。

(3)随着元素Zn的不断增加,热挤压时试样内部发生了基体变形破碎、晶粒再结晶和LPSO结构与晶界等交互作用现象,材料的塑性不断改善;而Zn含量的增加使得晶界处块状LPSO结构增多,晶界处粗大块状相的增多使得变形过程易出现应力集中,两个相互抑制的因素导致试样伸长率呈现为先改善后减弱的趋势。

参考文献:

[1] MA Z D, LI G, PENG Q, et al. Microstructural evolution and enhanced mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy via centrifugal casting, ring-rolling and aging[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 10(1): 119-128.

[2] 徐春杰,屠涛,马涛,等. 热处理对Mg-3Sn-1Y合金显微组织及显微硬度的影响[J]. 中国有色金属学报,2013, 23(1): 9-14.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

XU C J, TU T, MA T, et al. Effects of heat treatment on microstructure and microhardness of Mg-3Sn-1Y alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013(1): 9-14.

[3] 王敬丰,黄秀洪,谢飞舟,等. 轧制工艺对Mg-Gd-Y-Zn-Mn合金中LPSO相及其组织性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2016, 26(8): 1588-1596.
WANG J F, HUANG X H, XIE Z F, et al. Influences of rolling processes on LPSO phase, microstructure and property of Mg-Gd-Y-Zn-Mn alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 28(8): 1588-1596.

[4] 宋鹏飞,王敬丰,周小蒽,等. Zn含量对Mg-10Gd-6Y-*x*Zn-0.6Zr合金显微组织、力学和阻尼性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(9): 2430-2438.
SONG P F, WANG J F, ZHOU X E, et al. Effects of Zn content on microstructure, mechanical properties and damping capacities of Mg-10Gd-6Y-*x*Zn-0.6Zr alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(9): 2430-2438.

[5] WU Y J, XU C, ZHENG F Y, et al. Formation and characterization of microstructure of as-cast Mg-6Gd-4Y-*x*Zn-0.5Zr (*x*=0.3, 0.5 and 0.7wt.%) alloys[J]. Materials Characterization. 2013, 79: 93-99.

[6] 徐春杰,田军,陈丽萍,等. 镁合金中LPSO结构与形成机制的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程,2015, 38(3): 131-135.
XU C J, TIAN J, CHEN L P, et al. Research progress of long-period stacking ordered (LPSO) structures and formation mechanisms in magnesium alloys[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(3): 131-135.

[7] LEI B, DONG Z H, YANG Y, et al. Influence of Zn on the microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Zr alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 843: 143136.

[8] 曾小勤,陈义文,王精雅,等. 高性能稀土镁合金研究新进展[J]. 中国有色金属学报,2021, 31(11): 2963-2975.
ZENG X Q, CHEN Y W, WANG J Y, et al. Research progress of high-performance rare earth magnesium alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 2963-2975.

[9] ZHU Y M, MORTON A J, NIE J F. The 18R and 14H long-period stacking ordered structures in Mg-Y-Zn alloys[J]. Acta Materialia, 2010, 58(8): 2936-2947.

[10] 徐春杰,田军,陈丽萍,等. Mg-RE合金LPSO结构的析出与控制研究进展[J]. 兵器材料科学与工程,2015, 38(4): 132-138.
XU C J, TIAN J, CHEN L P, et al. Research progress in precipitation and control of LPSO structure in Mg-RE alloys[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(4): 132-138.

[11] JIN X Z, XU W C, YANG Z Z, et al. Analysis of abnormal texture formation and strengthening mechanism in an extruded Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 45: 133-145.

[12] WANG J F, XIE F Z, LIU S J, et al. Hot deformation behavior and processing maps of As-homogenized Mg-Gd-Y-Zn-Mn alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(6): 1700-1707.

[13] YANG X D, ZHOU X J, YU S L, et al. Tensile behavior at various temperatures of the Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloys with different initial morphologies of LPSO phases prior to extrusion[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 851: 143634.

[14] ZHANG J S, CHEN C J, QUE Z P, et al. 18R and 14H long-period stacking ordered structures in the $Mg_{93.96}Zn_2Y_4Sr_{0.04}$ alloy and the modification effect of Sr on X-phase[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 552: 81-88.

[15] SHAO X H, YANG Z Q, MA X L. Strengthening and toughening mechanisms in Mg-Zn-Y alloy with a long period stacking ordered structure[J]. Acta Materialia. 2010, 58(14): 4760-4771.

[16] WANG D Y, DU Z M, ZHANG H J. Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of As-extruded Mg-Zn-Y-Zr Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2028, 47 (11): 3345-3352.

[17] LENG Z, ZHANG J H, YIN T T, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-9RY-4Cu alloy with long period stacking ordered phase[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 580: 196-201.

[18] WU G Q, LI Z C, YU J M, et al. Texture evolution and effect on mechanical properties of repetitive upsetting-extruded and heat treatment Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy containing LPSO phases[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 938: 168666.

[19] XIAO J X, CHEN Z Y, SHAO J B, et al. Evolution of long-period stacking ordered phase and their effect on recrystallization in extruded Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy during annealing[J]. Materials Characterization, 2020, 167: 110515.

[20] 郑修麟. 材料的力学性能 (第二版)[M]. 西安：西北工业大学出版社,2001.
ZHENG X L. Mechanical Behaviors of Engineering Materials (2nd)[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press Co., Ltd., 2001.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net