

# 加工工艺对 AZ61 镁合金拉压不对称性的影响

Effect of Machining Techniques on  
Tension-compression Yield Asymmetry  
of AZ61 Magnesium Alloy

汪 清<sup>1</sup>,王敬丰<sup>1</sup>,黄 崧<sup>1</sup>,李琳俊楠<sup>1</sup>,耿 铁<sup>2</sup>,潘复生<sup>1</sup>

(1 重庆大学 国家镁合金材料工程技术研究中心,重庆 400044;

2 河南工业大学 机电工程学院,郑州 450007)

WANG Qing<sup>1</sup>,WANG Jing-feng<sup>1</sup>,HUANG Song<sup>1</sup>,LI Lin-jun-nan<sup>1</sup>,

GENG Tie<sup>2</sup>,PAN Fu-sheng<sup>1</sup>

(1 National Engineering Research Center for Magnesium  
Alloys,Chongqing University,Chongqing 400044,China;

2 College of Mechanical & Electrical Engineering,Henan  
University of Technology,Zhengzhou 450007,China)

**摘要:** 采用一次挤压变形、二次挤压变形以及一次挤压后再进行锻造的三种加工工艺对 AZ61 镁合金进行塑性变形,研究不同的加工工艺对镁合金力学性能及拉压不对称性的影响。结果表明:挤压变形可以细化 AZ61 镁合金的晶粒,而在挤压后进行锻造变形,会使得其晶粒长大粗化。二次挤压后,由于强化了{0002}基面织构,AZ61 镁合金的拉伸屈服强度增加,压缩屈服强度下降,使得拉压不对称性加大。而一次挤压后锻造,在挤压基面织构状态得到改变,且由于晶粒粗大,从而总体上使得 AZ61 镁合金的拉伸屈服强度下降,而压缩屈服强度几乎保持不变,AZ61 的拉压不对称性得到改善。

**关键词:** 镁合金;挤压;锻造;不对称性

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.11.010

**中图分类号:** TG146.2<sup>+2</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)11-0057-05

**Abstract:** Three kinds of machining techniques including one pass extrusion, two passes extrusion and forging after extrusion were adopted to deform AZ61 magnesium alloy, then mechanical property, tension and compression yield asymmetry were studied. The results indicate that, extrusion can refine the grain size of AZ61 magnesium alloy, but the grain is coarse by forging after extrusion. Due to {0002} basal plane orientation strengthened by two passes extrusion, tensile yield strength increases while compressive yield strength decreases, which deteriorate the tension and compression asymmetry. After forging deformation,altering the basal plane texture, while coarsening the grains partly at the same time, tensile yield strength of AZ61 magnesium alloy dropped, while compressive yield strength keep almost the same. As a result, tension and compression yield asymmetry was improved.

**Key words:** magnesium alloy;extrusion;forging;asymmetry

镁及其合金是目前最轻的结构材料,具有密度小、比强度和比刚度高、机加工性能好、易回收等优点,在航空航天、汽车、通讯等行业已经得到广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。与铸造镁合金相比,变形镁合金具有更高的强度以及塑性,在作为结构材料方面受到人们广泛的关注。而变形镁合金通常需要进行挤压、锻造、轧制和冲压等塑性加工工艺。由于镁合金是密排六方结构,滑移系十分有限,对镁合金进行挤压塑性变形时会形

成挤压丝织构,使得{0002}基面平行于挤压方向<sup>[4,5]</sup>,这种织构的存在使得镁合金在挤压方向上产生了强烈的拉压不对称性,通常表现为合金的压缩屈服强度通常仅只有拉伸屈服强度的四分之三甚至二分之一<sup>[6-9]</sup>。使得单纯依据镁合金的拉伸性能来设计构件带来了安全隐患,限制了镁合金在结构材料上的应用。通常以压缩屈服强度与拉伸屈服强度的比值(CYS/TYS)来评价镁合金拉-压屈服强度不对称性的程度。

为了改善镁合金拉伸和压缩性能的不对称性,许多学者开展了大量的研究。J. Swiostek 等<sup>[10]</sup>通过静液挤压技术获得了比较细小的镁合金晶粒,从减小晶粒尺寸方面改善了镁合金的各向异性。路君等<sup>[11]</sup>通过等通道角挤压变形技术(ECAP)对 AZ31 镁合金进行塑性加工,使其织构相对随机化,从而降低了拉压不对称性。Bohlen 等<sup>[12]</sup>发现,对于镁合金材料,随着 Al 含量的增加,镁合金的拉压不对称性降低。

本工作以 AZ61 镁合金为对象,通过不同的加工工艺对其进行塑性变形,并对加工后的试样进行拉伸和压缩性能测试,研究加工工艺对镁合金力学性能以及各向异性的影响规律,探讨从加工工艺方面调整镁合金的取向分布,从而改善镁合金的拉压不对称性。

1 实验

实验材料为直径  $\phi 258\text{mm}$  的 AZ61 镁合金半连续铸锭,具体成分如表 1 所示。为消除合金在铸造过程中出现的溶质偏析等铸造缺陷,对半连续铸锭进行了  $390^{\circ}\text{C}$ , 8h 的均匀化退火处理。接着在 2500 T 的日产卧式挤压机上进行一次正挤压,其挤压比为 11 : 1,挤压温度为  $380^{\circ}\text{C}$ ,得到  $\phi 78\text{mm}$  的一次挤压棒材。取部分一次挤压的棒材在 500T XJ-500 的卧式挤压机上进行二次挤压,挤压比为 25 : 1,挤压温度为  $380^{\circ}\text{C}$ ,得到  $\phi 16\text{mm}$  的二次挤压棒材,另取部分一次挤压棒材在 YX32-800A 液压机上经  $380^{\circ}\text{C}$  保温 1.5h 后垂直于挤压方向进行自由锻造,压下率为 35%。

表 1 AZ61 镁合金的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of AZ31 magnesium alloy (mass fraction/%)

Al	Zn	Mn	Mg
5.81	0.55	0.29	Bal

采用线切割从不同加工状态的 AZ61 镁合金材料

中分别取直径 5mm,标距为 25mm 的拉伸样品(GB/T 228—2002)以及直径为 10mm,高度为 25mm 的压缩样品(GB 7314—87)。拉伸和压缩方向都平行于挤压方向。拉伸以及压缩试验是在室温下在 CMT25105 微机控制电子万能试验机上进行,实验加载速率为 2mm/min。

为了评估加工工艺对挤压后晶体取向的影响,实验中采用 Rigaku D/max2500PC X 射线衍射仪并利用 CuK $\alpha$  辐射(阳极电压为 40kV,阳极电流为 150mA)对样品横向断面进行  $10^{\circ}\sim 90^{\circ}$  的扫描,并对横截面进行织构分析。利用光学显微镜(OM)对样品的微观组织进行观察。

2 结果与分析

图 1 为 AZ61 变形镁合金一次挤压态(图 1(a))、一次挤压+锻造态(图 1(b))、二次挤压态(图 1(c))的显微组织。从图 1(a)可以看出一次挤压变形后的 AZ61 镁合金为混晶组织,在粗大晶粒的附近存在着细小的晶粒。如图 1(b)所示,一次挤压后进行锻造,晶粒变得异常粗大且极不均匀,这是因为一次挤压后材料获得了一定的变形储存能,且由于镁合金具有较低的堆垛层错能(纯镁的层错能为  $60\sim 78\text{mJ/m}^2$ )和较高的晶界迁移速率<sup>[13]</sup>,在热塑性变形时容易发生动态再结晶。在随后的自由锻造过程中,锻造温度高于 AZ61 镁合金的再结晶温度,所以在锻压过程中发生了动态再结晶。为了防止锻压时,材料出现裂纹,采用的缓慢的变形速率使得再结晶后的晶粒有足够的时间长大,以至于得到了粗大的再结晶晶粒。根据 Hall-Petch 公式<sup>[14]</sup>,粗大的晶粒会降低材料的力学性能。由图 1(c)可见,经过二次挤压变形后,AZ61 镁合金晶粒得到了细化,且较一次挤压后的晶粒更均匀细小,晶粒的细化在一定程度上可以明显改善金属材料的强度,使力学性能得到提高。

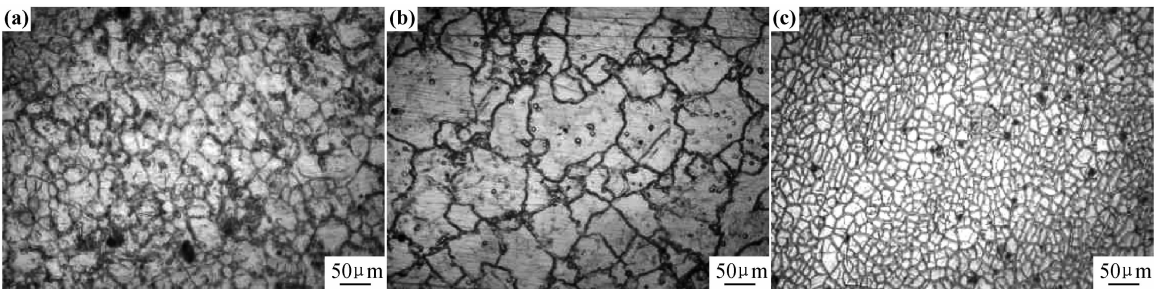


图 1 不同加工工艺 AZ61 镁合金的显微组织 (a)一次挤压;(b)一次挤压+锻造;(c)二次挤压

Fig. 1 Microstructure of AZ61 magnesium alloy after different machining techniques

(a)one pass extrusion;(b)forging after extrusion;(c)two passes extrusion

图 2 所示为在室温下,沿初次挤压方向,不同加工工艺的 AZ61 镁合金拉伸力学性能的测试结果。从图 2 中可以看出,在经过一次挤压后进行锻造,试样的拉伸屈服强度以及抗压强度急剧下降(其中屈服强度从 203MPa 下降到 157MPa,抗拉强度从 320MPa 下降至 291MPa),而经过二次挤压后,AZ61 镁合金的拉伸屈服强度增加(从 203MPa 增加到 212MPa),但抗拉强度增加不大。

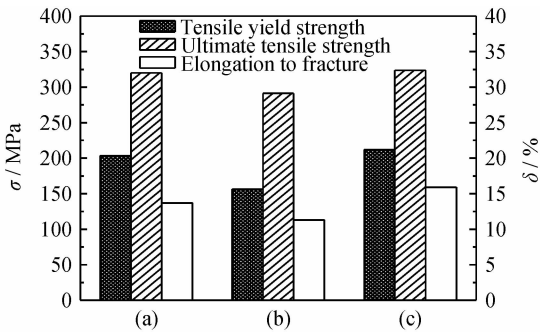


图 2 不同加工工艺 AZ61 镁合金的拉伸力学性能  
(a)一次挤压;(b)一次挤压+锻造;(c)二次挤压

Fig. 2 Tensile mechanical property of AZ61 magnesium alloy after different machining techniques  
(a)one pass extrusion;(b)forging after extrusion;(c)two passes extrusion

图 3 为在不同加工工艺下 AZ61 镁合金的压缩力学性能,从图 3 中可以看出,经过三种不同的塑性变形工艺,AZ61 镁合金的压缩力学性能也呈现出一定的差异,其中二次挤压相对于一次挤压压缩屈服强度有了一定的下降(从 149MPa 下降到 123MPa),而抗压强度有了一定的增加。而在一次挤压后进行锻造后,尽管得到粗大的晶粒,但压缩屈服强度不但没有下降,反而较一次挤压后出现了小幅的增加。而这与 Hall-Petch 公式相矛盾,故认为存在可抵消因晶粒尺寸增大而屈服强度软化的因素。

不同加工工艺对 AZ61 镁合金的拉压不对称性的影响是本次实验需要评价的指标之一。由于镁合金是密排六方晶体结构,对镁合金进行塑性变形会使材料形成强烈的择优取向,从而使其拉伸性能和压缩性能呈现出明显的不一致性<sup>[15]</sup>。

图 4 为在不同加工工艺下,AZ61 镁合金材料的拉伸屈服强度和压缩屈服强度比较。由图 4 可以看出,经过不同的加工工艺,试样的拉压不对称性变化很明显。其中经过一次挤压后,其压缩屈服强度与拉伸屈服强度之比(CYS/TYS)为 0.75,而一次挤压后经过自由锻造,其压缩屈服强度与拉伸屈服强度的比值为 0.97,AZ61 镁合金的拉压不对称性大为改善,已经

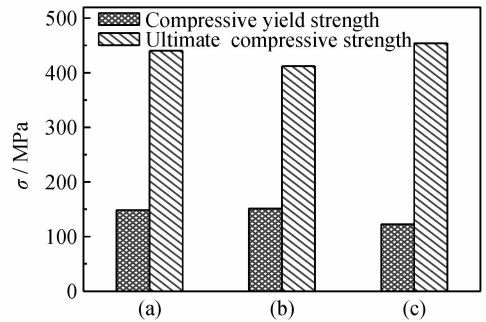


图 3 不同加工工艺 AZ61 镁合金的压缩力学性能  
(a)一次挤压;(b)一次挤压+锻造;(c)二次挤压

Fig. 3 Compressive mechanical property of AZ61 magnesium alloy after different machining techniques  
(a)one pass extrusion;(b)forging after extrusion;(c)two passes extrusion

接近理想值,其缘由是拉伸屈服强度下降,而压缩强度保持不变的缘故。而二次挤压后,压缩屈服强度与拉伸屈服强度的比值为 0.55,AZ61 镁合金的拉压不对称性加大,这是由于拉伸屈服强度增加,与此同时压缩屈服强度下降的缘故。这说明二次挤压变形加大材料的拉压不对称性,而挤压后锻造可明显地改善 AZ61 镁合金的拉压不对称性。

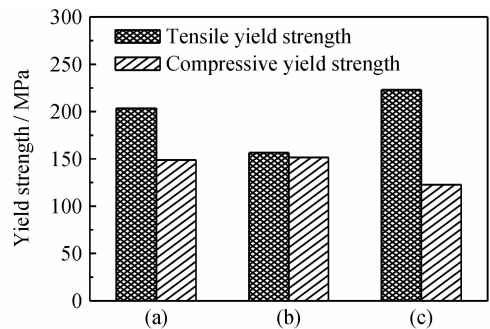


图 4 不同加工工艺对 AZ61 各向异性的影响

(a)一次挤压;(b)一次挤压+锻造;(c)二次挤压  
Fig. 4 Effect of machining techniques on tension-compression asymmetry of AZ61 magnesium alloy (a)one pass extrusion;(b)forging after extrusion;(c)two passes extrusion

为了进一步了解加工工艺对 AZ61 镁合金性能的影响,对加工后的 AZ61 试样的横向断面进行了 XRD 扫描。图 5 为在不同加工工艺下,AZ61 镁合金的 XRD 扫描图谱。从图 5 中可以看出,经过加工后,横向面上 AZ61 镁合金在 $\{10\bar{1}0\}$ 棱柱面上出现了最强的衍射峰,而衍射峰的出现也就意味着在该位置上出现了择优取向<sup>[7,16,17]</sup>。这说明经过塑性变形后的 AZ61 镁合金形成了强烈的择优取向,其中绝大部分晶胞的 $\{10\bar{1}0\}$ 晶面与横向断面的法向垂直,也就是说其

{0002}晶面平行于挤压方向。

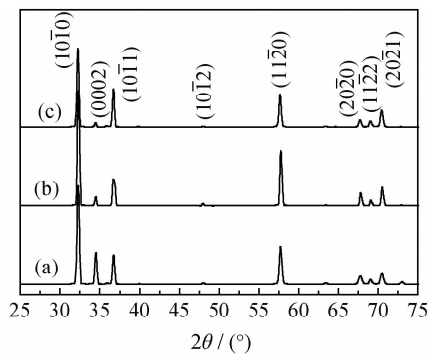


图 5 不同加工工艺 AZ61 镁合金的 XRD 扫描谱  
(a)一次挤压;(b)二次挤压;(c)一次挤压+锻造

Fig. 5 XRD patterns of AZ61 magnesium alloys after different machining techniques (a)one pass extrusion;(b)two passes extrusion;(c)forging after extrusion

对于六方金属,特别是对于镁合金来说,在较低的温度下,由于滑移系有限,形变孪生就成为塑性变形的  
主要方式之一。且由于 AZ61 镁合金满足轴比  $c/a < 1.732$ ,当受到沿着  $c$  轴方向的拉应力或垂直于  $c$  轴方

向的压应力可以诱发  $\{10\bar{1}2\}$  拉伸孪生,而受到沿着  $c$  轴方向的压应力或垂直于  $c$  轴方向的拉应力可以诱发  $\{10\bar{1}1\}$  压缩孪生<sup>[6]</sup>。室温下,镁合金基面滑移系启动的临界剪切应力(Critical Resolved Shear Stress, CRSS)约为  $0.5 \sim 0.7 \text{MPa}$ ,而  $\{10\bar{1}2\}$  拉伸孪生的 CRSS 为  $2 \sim 28 \text{MPa}$ , $\{10\bar{1}1\}$  压缩孪生的 CRSS 为  $76 \sim 153 \text{MPa}$ <sup>[18]</sup>。在有基面织构的挤压态镁合金材料中,对于沿着挤压方向的拉伸载荷,晶体的  $c$  轴受到压应力的作用, $\{10\bar{1}1\}$  压缩孪生受到激发,而该孪生变形的 CRSS 很高,故滑移是其主要的方式。而合金产生基面织构时,其 Schmid 因子为 0,根据  $\sigma_{ys} = \zeta \text{CRSS} / M$  ( $M$  为 Schmid 因子),滑移系处于硬取向状态<sup>[14]</sup>,滑移变得异常困难,从而造成了高的拉伸屈服强度。而 AZ61 镁合金沿着挤压方向受到压缩变形时,晶体的  $c$  轴受到拉应力的作用, $\{10\bar{1}2\}$  孪生受到激发,而滑移系依然处于硬取向,由于启动孪生所需的应力小,孪生成为了主要的变形方式<sup>[19]</sup>。从而使得压缩屈服强度较之拉伸屈服强度要小,从而造成镁合金的拉压不对称性。图 6 为 AZ61 镁合金经过各种加工工艺后拉伸与压缩至断裂后样品的横截断面显微组织图,从图 6(a-1),

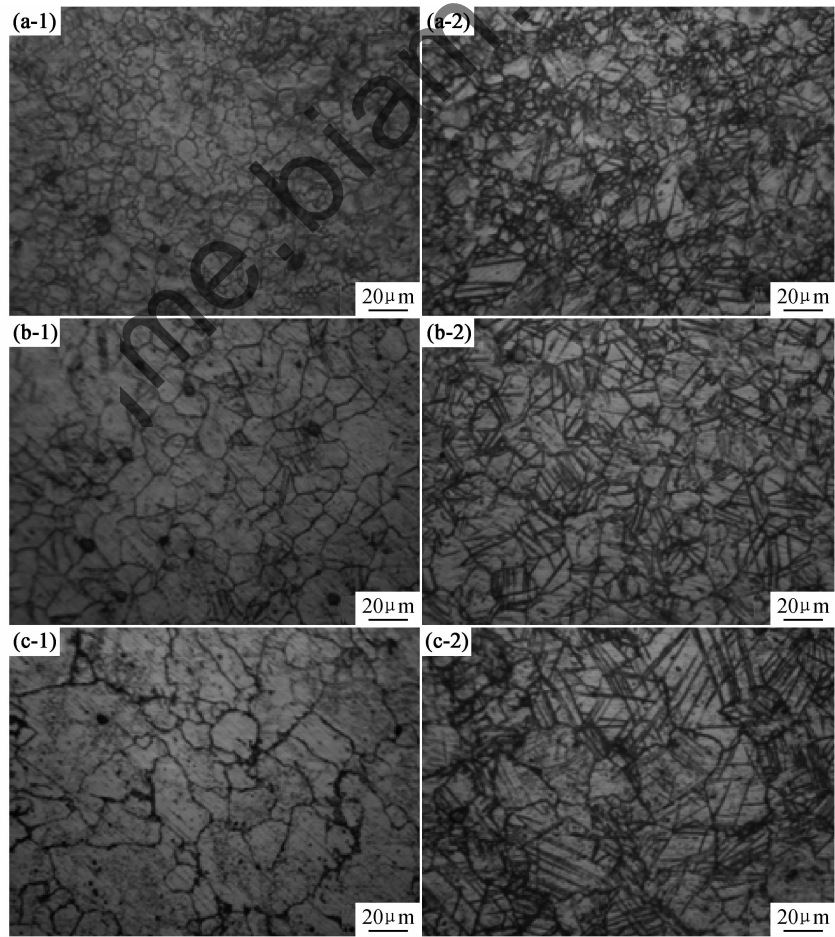


图 6 拉伸(1)及压缩(2)变形后 AZ61 镁合金横截断面的显微组织图 (a)一次挤压;(b)二次挤压;(c)一次挤压+锻造

Fig. 6 Microstructures of the cross-sectional plane of the AZ61 samples after tension(1) and compression(2)  
(a)one pass extrusion;(b)two passes extrusion;(c)forging after extrusion

(b-1)和(c-1)可以看出,在拉伸塑性变形样品的显微组织中并没有出现明显的孪晶,说明拉伸塑性变形时主要激发的变形机制的是滑移变形;而从图 6(a-2), (b-2)和(c-2)可以看出,在压缩塑性变形样品的显微组织中出现了大量的孪晶,这说明在压缩变形时,孪生在塑性变形过程中起到了很重要的作用。

图 7 所示为 AZ61 镁合金经过各加工工艺后横截面的 $\{0002\}$ 基面极图,由图 7(a)可以看出,经过小挤压比的一次挤压后,并没有形成强烈的挤压纤维织构,而图 7(b)表明经过二次挤压后,基面极密度增加, AZ61 镁合金形成了强烈的挤压丝织构,其基面极点

呈圆环状的均匀分布在挤压轴的周围,说明绝大部分 $\{0002\}$ 基面平行于挤压方向。这种织构分布使得沿着挤压方向拉伸时, $\{10\bar{1}2\}$ 拉伸孪生受到抑制,而基面滑移系产生几何硬化效果,柱面滑移及锥面滑移临界分切应力较高,从而导致 AZ61 镁合金的拉伸屈服强度提高,而在压缩变形时,启动时所需 CRSS 较小的 $\{10\bar{1}2\}$ 孪生在塑性变形中占主导作用,所以导致压缩屈服强度较一次挤压有所下降。图 7(c)表明在经过垂直于挤压方向的高温自由锻造后,部分晶面发生了转动,且由于高温锻造后不均匀的再结晶,最终导致了拉伸与压缩性能趋于同性。

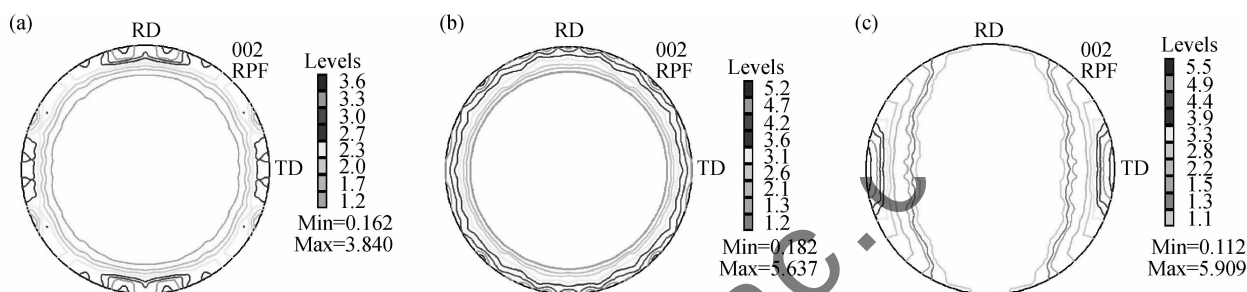


图 7 不同加工工艺 AZ61 镁合金的 $\{0002\}$ 基面极图 (a)一次挤压;(b)二次挤压;(c)一次挤压+锻造

Fig. 7 Pole figures of  $\{0002\}$  plane after different machining techniques (a)one pass extrusion;

(b)two passes extrusions;(c)forging after extrusion

值得注意的是,在压缩时,由于发生了 $\{10\bar{1}2\}$ 孪生变形,取向旋转了 $86.3^\circ$ <sup>[20]</sup>,使得原本垂直于挤压方向 $c$ 轴的发生偏转后,与挤压方向平行。在这种状态下,压缩不再激发 $\{10\bar{1}2\}$ 孪生,使得合金压缩硬化率迅速增加,这也导致镁合金抗压强度高于抗拉强度。

### 3 结论

(1)不同的加工工艺会影响 AZ61 镁合金的显微组织,一次挤压后 AZ61 镁合金为混晶组织,二次挤压后为典型的等轴晶组织,而挤压后锻造使得合金的晶粒组织粗化。

(2)通过改变塑性加工方式可以调整挤压棒的取向分布。

(3)二次挤压增强挤压丝织构,并增加拉压不对称性。而一次挤压材经过自由锻造后,部分晶体 $c$ 轴发生转动,挤压丝织构状态得到改变,拉压不对称性得到改善。

#### 参考文献

- [1] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] AVEDESIAN M, BAKER H. ASM Specialty Handbook-Magnesium and Magnesium Alloys [M]. Ohio, USA: ASM Interna-

tional, 1999. 44-51.

- [3] MORDIKE B L, EBERT T. Magnesium properties-applications-potential [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 302: 37-45.
- [4] 肖林. 密排六方金属的塑性变形[J]. 稀有金属材料与工程, 1995, 24(6): 21-28.  
XIAO L. Plastic deformation of hexagonal close-packed metals [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1995, 24(6): 21-28.
- [5] 刘庆. 镁合金塑性变形机理研究进展[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1458-1472.  
LIU Q. Research progress on plastic deformation mechanism of Mg alloys [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(11): 1458-1472.
- [6] BARNETT M R, DAVIES C H J, MA X. A constitutive law for twinning dominated flow in magnesium [J]. Scripta Materialia, 2005, 52(7): 627-632.
- [7] BALL E A, PRANGNELL P B. Tensile-compressive yield asymmetries in high strength wrought magnesium alloys [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1994, 31(2): 111-116.
- [8] WANG Y N, HUANG J C. Texture analysis in hexagonal materials [J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 81(1): 11-26.
- [9] 陈振华, 夏伟军, 程永奇, 等. 镁合金织构与各向异性[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(1): 1-10.  
CHEN Z H, XIA W J, CHENG Y Q, et al. Texture and anisotropy in magnesium alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(1): 1-10.

- [42] 刘贵立. 镁合金电子结构与腐蚀特性研究[J]. 物理学报, 2010, 59(4): 2708—2713.  
LIU G L. Electronic structure and corrosion character of Mg alloys[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(4): 2708—2713.
- [43] 游国强. 新型镁熔体气体保护技术基础研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [44] KOJIA Y, AIZAWA T, HIGASHI K, et al. Issues that influence magnesium's use in the automotive industry[J]. Materials Science Forum, 2003, 419—422; 43—50.
- [45] 黄玉光, 吴国华, 王玮, 等. 熔剂净化对 Mg-Gd-Y-Zr 合金流动性的影响[J]. 铸造, 2009, 58(2): 104—107.  
HUANG Y G, WU G H, WANG W, et al. Effect of flux purification on fluidity of Mg-Gd-Y-Zr magnesium alloy[J]. Foundry, 2009, 58(2): 104—107.
- [46] WANG W, HUANG Y G, WU G H, et al. Influence of flux containing YCl<sub>3</sub> additions on purifying effectiveness and properties of Mg-10Gd-3Y-0.5Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 480(2): 386—391.
- [47] DING W J, WU G H, BONG S Y, et al. Effects of CeCl<sub>3</sub>-containing flux on the microstructure and mechanical properties of magnesium alloy containing rare earth[J]. Materials Science Forum, 2007, 546—549; 563—566.
- [48] WANG W, WU G H, WANG Q D, et al. Investigation of flux

\*\*\*\*\*

(上接第 61 页)

- [10] SWIOSTEK J, GÖKEN J, LETZIG D, et al. Hydrostatic extrusion of commercial magnesium alloys at 100 °C and its influence on grain refinement and mechanical properties [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 424: 223—229.
- [11] 路君, 靳丽, 董杰, 等. 等通道角挤压变形 AZ31 镁合金的变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(3): 424—432.  
LU J, JIN L, DONG J, et al. Deformation behaviors of AZ31 magnesium alloy by equal channel angular extrusion [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(3): 424—432.
- [12] BOHLEN J, DOBRON P, SWIOSTEK J, et al. On the influence of the grain size and solute content on the AE response of magnesium alloys tested in tension and compression [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 462: 302—306.
- [13] ION S E, HUNPHREYS F J, WHITE S H. Dynamic recrystallisation and the development of microstructure during the high temperature deformation of magnesium [J]. Acta Materialia, 1982, 30(12), 1909—1912.
- [14] 崔中圻. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 169—181.
- [15] KAINER K U, DAVIES C H J, XIONG F, et al. Magnesium Alloys and Their Applications [M]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2003. 433—438.
- [16] MABUCHI M, CHINO Y, IWASAKI H, et al. The grain size and texture dependence of tensile properties in extruded Mg-9Al-1Zn [J]. Materials Transactions, 2001, 42(7): 1182—1189.
- [17] 刘天模, 刘建忠, 卢立伟, 等. 双向双通道变通径挤压 AZ31 镁

containing GdCl<sub>3</sub> on recycling Mg-Gd-Y-Zr scraps [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2008, 18(S1): 292—298.

- [49] 王玮. Mg-10Gd-3Y-0.5Zr 合金复合净化行为研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [50] WANG J, YANG Y S, TONG W H. Effect of purification treatment on corrosion resistance of Mg-Gd-Y-Zr alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21: 949—954.
- [51] 王先飞, 熊守美. 熔态 AZ91D 合金在含 SO<sub>2</sub> 的保护气氛中的保护膜特征[J]. 金属学报, 2010, 46(12): 1529—1533.  
WANG X F, XIONG S M. Characterization of the surface film formed on molten AZ91D magnesium alloy protected by SO<sub>2</sub> mixtures[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(12): 1529—1533.

**基金项目:** 南京工程学院科研基金项目 (YKJ201104); 江苏省 (国家级) 大学生科技创新项目 (2012JSSPITP1968); 南京工程学院创新基金项目 (CKJB201204)

**收稿日期:** 2012-03-28; **修订日期:** 2013-04-08

**作者简介:** 杨少锋 (1977—), 男, 博士, 讲师, 从事专业: 金属功能材料及金属基复合材料, 联系地址: 南京江宁科学园弘景大道 1 号南京工程学院 (211167), E-mail: yangshf@njit.edu.cn

合金的显微组织及变形行为 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(9): 1657—1664.

- LIU T M, LIU J Z, LU L W, et al. Microstructure and deformation behavior of dual-directional extruded AZ31 magnesium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(9): 1657—1664.
- [18] CHEN Y J, WANG Q D, ROVEN H J, et al. Network-shaped fine grained microstructure and high ductility of magnesium alloy fabricated by cyclic extrusion compression [J]. Scripta Materialia, 2008, 58(4): 311—314.
- [19] BARNETT M R, KESHAVARZ Z, BEER A G, et al. Influence of grain size on the compressive deformation of wrought Mg-3Al-1Zn [J]. Acta Materialia, 2004, 52(17): 5093—5103.
- [20] BARNETT M R, NAVE M D, BETTLES C J. Deformation microstructures and textures of some cold rolled Mg alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 386: 205—211.

**基金项目:** 国家科技支撑计划课题 (2011BAE22B04); 新世纪优秀人才支持计划资助 (NCET-11-0554)

**收稿日期:** 2012-04-27; **修订日期:** 2012-09-25

**作者简介:** 汪清 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事镁铝合金等轻金属方面的研究工作, E-mail: wqctgu0119@126.com

**通讯作者:** 王敬丰 (1971—), 男, 教授, 从事镁合金材料方面的研究工作, 联系地址: 重庆大学材料科学与工程学院 (400030), E-mail: jing-fengwang@163.com