

# 新型复合挤压工艺中温度对 AZ61 组织和性能的影响

Effects of Temperature in the New Compound Extrusion  
on Microstructures and Properties of AZ61

张丁非<sup>1,2</sup>, 耿青梅<sup>1</sup>, 杨绪盛<sup>1</sup>, 余大亮<sup>1</sup>, 潘复生<sup>1,2</sup>

(1 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045;

2 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044)

ZHANG Ding-fei<sup>1,2</sup>, GENG Qing-mei<sup>1</sup>, YANG Xu-sheng<sup>1</sup>,

YU Da-liang<sup>1</sup>, PAN Fu-sheng<sup>1,2</sup>

(1 College of Materials Science and Engineering, Chongqing University,

Chongqing 400045, China; 2 National Engineering Research Center for

Magnesium Alloys, Chongqing 400044, China)

**摘要:** 针对镁合金棒材的工业化制备和加工, 提出了一种新型的复合挤压方式, 将正挤压(Extrusion)和剪切(Shear)结合(简称 ES)。对经过不同温度下 ES 变形后 AZ61 镁合金棒材进行微观组织观察、硬度测试、室温拉伸性能测试及 SEM, 研究了 ES 变形工艺中变形温度对 AZ61 挤压棒材组织及性能的影响。结果表明: 温度由 380℃ 升至 400℃ 时, 动态再结晶进行得更充分, 组织为细小等轴晶粒, 但温度升至 440℃ 时, 晶粒出现长大; 三个温度下断口均呈现塑性断裂特征, 400℃ 时棒材的综合力学性能最好, 其抗拉强度为 296.7MPa, 屈服强度为 158.9MPa, 伸长率为 15.4%。

**关键词:** AZ61 镁合金; ES 变形; 微观组织; 力学性能

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2014.07.001

**中图分类号:** TG146.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4381(2014)07-0001-04

**Abstract:** A new composite extrusion (shorten ES) combining extrusion and shear was presented, for the industrial preparation and process of magnesium alloy rods. Microstructures, hardness test, tensile test and SEM experiments were used to investigate the effects of temperature on microstructure and properties of AZ61 magnesium alloy deformed by ES. The results show that, when the temperature increases from 380℃ to 400℃, dynamic recrystallization becomes more fully and more recrystallized grains are generated. But when the temperature rises to 440℃, grains grow up. The fractography shows ductile fracture characteristics under these three temperatures. And at the temperature of 400℃, the bars have the best comprehensive mechanical properties with tensile strength of 296.7MPa, yield strength of 158.9MPa and elongation of 15.4%.

**Key words:** AZ61 magnesium alloy; ES; microstructure; mechanical property

对于镁合金来说, 等通道角挤压(ECAP)可以通过多次挤压的应变累积, 获得细小的再结晶晶粒, 制备出超细晶结构材料, 提高材料性能<sup>[1-3]</sup>。但二次变形或多次变形需要多套模具的设计与制造, 增加了设计成本, 也会造成生产效率低下。故设计了经过压缩减径后即进行连续二次剪切的新复合挤压方式<sup>[4]</sup>, 将正挤压(Extrusion)和剪切(Shear)结合, 即 ES 挤压。根据经典的等通道挤压理论<sup>[5]</sup>, ES 变形方式是金属材料经过正挤压得到所需尺寸后, 经过一次等通道挤压(图1(a)), 再绕轴旋转 180°进行第二

次等通道挤压(图1(b)), 实际上是等通道挤压 C 路径的模式, 且通过两次挤压剪切后, 坯料外形不发生变化<sup>[5]</sup>。该种变形方式可以实现对材料的一次性变形, 使其同时获得挤压和剪切的效果, 以期得到较好的综合性能。

## 1 材料制备和实验方法

实验所用材料为镁合金商业铸锭 AZ61, 其成分如表 1 所示。

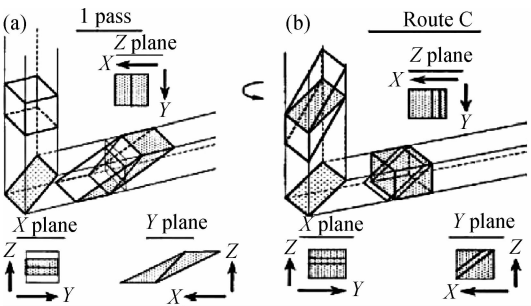


图 1 具有两个道次的等通道挤压的剪切模式<sup>[5]</sup>  
(a)一次等通道挤压;(b)二次等通道挤压  
Fig. 1 Shear mode of equal channel angular pressing with two consecutive passes<sup>[5]</sup> (a) 1 pass; (b) 2 pass(route C)

表 1 AZ61 镁合金的成分(质量分数/%)  
Table 1 Composition of AZ61 alloy (mass fraction/%)

Al	Zn	Mn	Mg
6.2	1.0	0.3	Bal

ES 模具实物图如图 2 所示。通道转角为 135°。

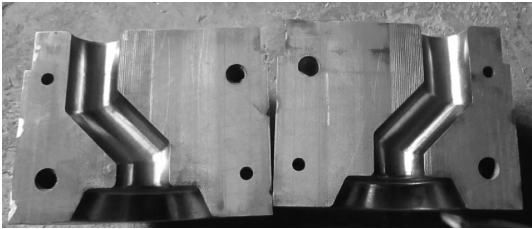


图 2 ES 内模实物图  
Fig. 2 Die of extrusion shear

待挤压试样加工尺寸  $\phi 80\text{mm} \times 170\text{mm}$ , 挤压比为 12, 挤压温度分别为 380, 400, 440℃。挤压前坯料在挤压温度下预热 2h, 模具、挤压筒和挤压垫须在低于挤压温度 20℃下预热 2h, 以抵消挤压时由于摩擦和变形引起的温升。在由国家镁合金工程技术研究中心提供的 XJ-500 T 卧式挤压机上, 对 AZ61 进行新型复合挤压方式进行挤压。

对挤压后样品进行金相分析、硬度测试以及拉伸断口扫描实验。金相腐蚀剂为苦味酸溶液(1mL 冰醋酸+1g 苦味酸+2mL 蒸馏水+20mL 酒精), 制得试样在激光共聚焦显微镜(型号: LEXT OLS4000 3D)下进行光学显微组织观察; 硬度测试所用仪器为 Micro-hardness Tester HV-1000 型显微硬度计, 加载载荷 50g, 加载时间 20s; 拉伸实验在新三思万能电子试验机 CMT-5150 上进行, 实验拉伸速率为 3mm/min, 在 VEGA3 TESCAN 扫描电子显微镜上进行断口形貌观察。

2 实验结果与分析

对三个温度挤压后的棒材进行了显微组织分析和力学性能测试, 获得了新型复合挤压中温度对镁合金挤压棒材组织和性能的影响规律。

2.1 组织分析

图 3 为 AZ61 镁合金在挤压比为 12, 加热温度为 380, 400, 440℃时, 经 ES 挤压剪切变形后试样显微组织。从图 3 中可以看出, 380℃时, 镁合金经过 ES 模具中两次转角的挤压、剪切变形后, 组织内部发生了动态再结晶, 形成细小的等轴晶; 但还可以看到组织内存在较大的晶粒, 这是因为再结晶进行的不够充分, 即不完全再结晶; 并且在该温度下, 组织内部第二相分布较多。变形温度提升为 400℃时, 试样组织(图 3(b))呈现均匀分布的细小等轴晶状, 晶粒尺寸由 380℃的 11.6 $\mu\text{m}$ 细化至 10.2 $\mu\text{m}$ , 该温度下试样经过复合挤压变形后发

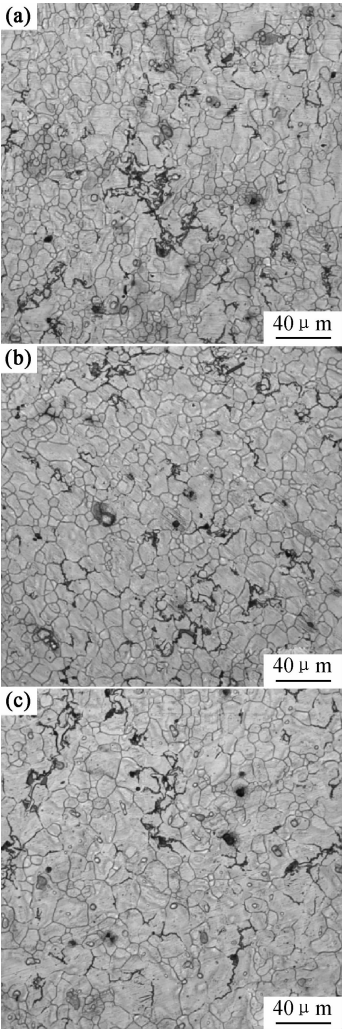


图 3 不同试样组织 (a)380℃;(b)400℃;(c)440℃  
Fig. 3 Microstructure of different samples  
(a)380℃;(b)400℃;(c)440℃

生了动态再结晶<sup>[6]</sup>；该温度下第二相有稍微减少。变形温度升高为 440℃时(图 3(c))，晶粒出现了明显长大趋势，晶粒尺寸为 16.5μm；因为变形温度高，有利于动态再结晶的进行，但晶界扩散和晶界迁移能力增强，引起晶粒长大；该温度下第二相依然存在。

图 4 展示了 ES 挤压前后第二相的分布变化情况。图 4(a)为铸态 AZ61 的低倍扫描图片，从方框标记处可以看到分布有较多的“骨骼状”第二相<sup>[6]</sup>。ES 变形后，“骨骼状”物质被吞噬，第二相分布变得相对均匀。图 4(b)为 380℃下变形后形貌，第二相相对铸态时变得细小分散，尚存在个别大颗粒状物质；图 4(c)显示 400℃条件下 ES 变形后，相对 380℃时第二相变得更弥散化，且更细小；440℃(图 4(d))时，第二相细小且弥散均匀，但由于变形温度的升高，溶解了部分第二相，宏观上显示相对 400℃时第二相减少。

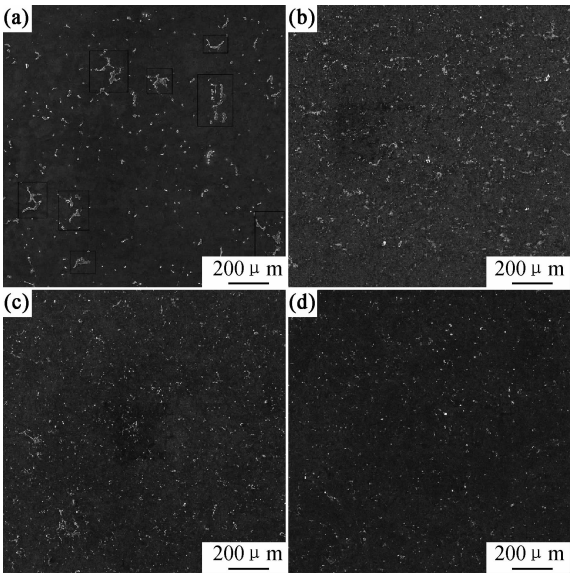


图 4 不同试样 SEM 形貌

(a) 铸态；(b) ES380℃；(c) ES400℃；(d) ES440℃

Fig. 4 SEM morphology of different samples

(a) as-cast；(b) ES380℃；(c) ES400℃；(d) ES440℃

2.2 综合性能分析

硬度测试时在每个试样上测 25 个点的硬度，取平均值，测试结果见表 2。

380℃和 400℃变形条件下，材料硬度值接近；当 ES 变形温度升至 440℃时，硬度值减小 6HV。从组织分析中可知，温度从 380℃升至 400℃时，材料经 ES 变形后动态再结晶进行得更充分，材料组织变得更加细小均匀。但 ES 变形过程中，加工硬化和动态再结晶共同作用，从硬度值结果可知，400℃下，加工硬化作用依然处于主导地位。440℃时，晶粒出现长大，硬度降低，性能下降。

表 2 中分布的铸态 AZ61 及经过 ES 变形后试样的室温拉伸性能显示，经过 ES 挤压剪切后，材料的屈服强度、抗拉强度及伸长率均得到明显提高。对于新型复合挤压，变形温度从 380℃升至 400℃时，其强度没有变化，伸长率有略微提高，从组织分析中也可看到，400℃时组织相对 380℃时较均匀。但温度升至 440℃时，屈服强度下降较多，抗拉强度和伸长率也有略微下降，这是由于晶粒长大引起的塑性降低。此外，在室温拉伸性能测试时，弥散分布的第二相可以作为应力集中点及裂纹源存在，促使材料断裂<sup>[7]</sup>；但细晶强化在镁合金性能变化中占了主导地位<sup>[8]</sup>。通过比较，AZ61 镁合金在 400℃时的 ES 变形综合性能较好。

表 2 AZ61 镁合金力学性能

Table 2 Mechanical properties of AZ61 magnesium alloy				
Sample	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation /%	Hardness (HV)
As-cast	69.0	182.1	7.7	—
ES380℃	158.2	295.6	14.4	68.2
ES400℃	158.9	296.7	15.4	68.9
ES440℃	146.5	294.6	13.9	63.2

2.3 断口形貌及分析

分别对铸态 AZ61 镁合金及经过 ES 变形的样品进行室温拉伸实验，其断口形貌如图 5。AZ61 镁合金铸态试样拉伸断裂处的撕裂岭和撕裂线都呈山脊状，背部比较尖锐，亮度较大，裂面中心部位亮度较低，为准解理断口，属于典型的脆性断裂。经过 ES 挤压剪切热变形后，断口的形貌变得不同。但在三个变形温度下，断口呈现相似的特征。图 5(b)，(c)的断口形貌中均有大量韧窝，韧窝边缘类似尖棱，故亮度较大，韧窝底部较平坦，图像亮度低，且少许韧窝的中心部有第二相小颗粒，属于韧性断裂。380℃ES 变形后，在断口中可看到韧窝边部和心部亮度差异较 400℃变形后大，因为韧窝深浅差异越大，亮度越高，这样的组织更不均匀。此外，Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>属于脆性化合物相，其形态分布对于断裂有影响，如果 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>相连续分布在晶界，会促使裂纹扩展进而引起脆断<sup>[9]</sup>。故铸态 AZ61 易脆断，而经过 ES 热变形后，断面韧窝分布较多且相对均匀，转向韧性断裂。铸态中的脆性化合物经过挤压剪切破碎及再结晶，分布均匀，故 400℃和 440℃条件下的断口中韧窝边缘和中心部位亮度对比度低于 380℃ES 变形后；但是在 440℃时，温度的升高使得晶粒长大，断口中韧窝较 400℃条件下的稍大。总之，ES 热变形使得晶粒细化，材料强度及韧性得到较大提高<sup>[10]</sup>。

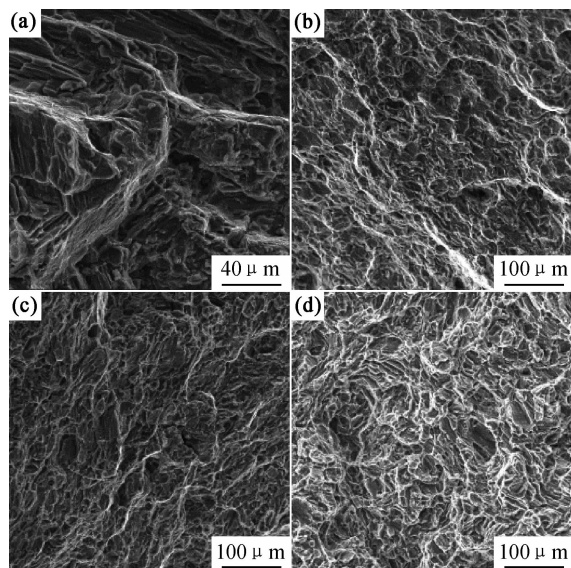


图 5 断口形貌 (a)铸态;(b)380℃;(c)400℃;(d)440℃

Fig. 5 Fractography of AZ61 magnesium alloy

(a)as-cast;(b)380℃;(c)400℃;(d)440℃

### 3 结论

(1)对铸态 AZ61 镁合金进行挤压比为 12 的新型复合挤压,380℃和 400℃均发生了不同程度的动态再结晶,400℃时组织由等轴细晶组成,440℃时,晶粒出现长大。

(2)AZ61 镁合金 ES 变形后,400℃时材料综合性能最好,其抗拉强度为 296.7MPa,屈服强度 158.9MPa,伸长率为 15.4%。

(3)铸态 AZ61 拉伸断口为典型的脆性断裂,三个温度下 ES 变形后,断口均呈现韧性断裂的特征。

#### 参考文献

- [1] LI B, JOSHI S, AZEVEDO K, et al. Dynamic testing at high strain rates of an ultrafine-grained magnesium alloy processed by ECAP [J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 517(1-2): 24-29.
- [2] HORITA Z, MATSUBARA K, MAKII K, et al. A two-step processing route for achieving a superplastic forming capability in dilute magnesium alloys [J]. Scripta Materialia, 2002, 47(4): 255-260.

- [3] YAMASHITA A, HORITA Z, LANGDON T G. Improving the mechanical properties of magnesium and a magnesium alloy through severe plastic deformation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 300(1-2): 142-147.
- [4] HU H J, ZHANG D F, ZHANG J P. Microstructures in an AZ31 magnesium alloy rod fabricated by a new SPD process based on physical simulator [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2010, (3): 478-483.
- [5] 陈振华, 夏伟军, 严红革, 等. 变形镁合金 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [6] XU S W, KAMADO S, MATSUMOTO N, et al. Recrystallization mechanism of as-cast AZ91 magnesium alloy during hot compressive deformation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 527(1-2): 52-60.
- [7] CHINO Y, SASSA K, MABUCHI M. Texture and stretch formability of a rolled Mg-Zn alloy containing dilute content of Y [J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 513-514: 394-400.
- [8] SHI B Q, CHEN R S, KE W. Effects of forging processing on the texture and tensile properties of ECAEed AZ80 magnesium alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 546: 323-327.
- [9] 张广俊, 龙思远, 曹凤红. AZ61 镁合金在不同挤压温度下的组织与力学性能 [J]. 特种铸造及有色合金, 2009, (3): 270-272. ZHANG G J, LONG S Y, CAO F H. Microstructures and mechanical properties of AZ61 magnesium alloy extruded at different temperatures [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2009, (3): 270-272.
- [10] 钟皓, 陈琪, 闫蕴琪, 等. AZ31 镁合金的热挤压组织与力学性能分析 [J]. 轻金属, 2007, (3): 52-55. ZHONG H, CHEN Q, YAN Y Q, et al. Analysis of microstructures and mechanical properties of hot extruded AZ31 magnesium alloy [J]. Light Metals, 2007, (3): 52-55.

**基金项目:**国家 973 重大基础研究项目(2013CB632200);国家十二科技支撑计划项目(2011BAE22B01-3);科技部国际合作项目(2010DFR50010);国家自然科学基金(51101176)

**收稿日期:**2013-03-27;**修订日期:**2013-11-20

**通讯作者:**张丁非(1963-),男,教授,博导,从事轻合金材料及加工技术研究,联系地址:重庆市沙坪坝区重庆大学材料科学与工程学院(400044) E-mail:zhangdingfei@cqu.edu.cn