

## 热轧工艺对AZ31镁合金组织和性能的影响

吴健旗<sup>1</sup>, 颜永松<sup>1</sup>, 陈强<sup>2</sup>, 吴桂林<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 西南技术工程研究所, 重庆 400039)

**摘要:** **目的** 研究大变形量热轧、累积叠轧和普通热轧3种不同加工工艺及后续热处理对AZ31镁合金的组织及室温力学性能的影响。**方法** 将均匀化处理后的AZ31原始样品采用大变形热轧、累积叠轧和普通热轧3种不同加工工艺制备成板材,并进行了后续热处理。利用EBSD技术和力学性能测试,解释了其组织和性能的关系。**结果** 剧烈塑性变形工艺及适宜的热处理工艺,可使AZ31镁合金保持高强度的同时还兼顾优良的室温延伸率。大变形量热轧工艺制备的AZ31镁合金板材的细晶组织及室温拉伸性能,可与累积叠轧等传统剧烈塑性变形工艺相媲美,屈服强度达到289 MPa,延伸率为7%。**结论** 与普通热轧工艺制得的AZ31镁合金板材相比,大变形量热轧工艺及累积叠轧工艺制得的板材具有更高的强度和塑性。剧烈塑性变形镁合金在低温退火后获得的混晶组织,具有优良的综合力学性能,强度比形变态样品略低,而塑性与完全退火样品相同甚至更好。

**关键词:** AZ31 镁合金; 显微组织; 力学性能

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.01.010

**中图分类号:** TG113.25; TG113.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2016)01-0054-05

## Effects of Hot Rolling Processes on Microstructure and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy

WU Jian-qi<sup>1</sup>, YAN Yong-song<sup>1</sup>, CHEN Qiang<sup>2</sup>, WU Gui-lin<sup>1</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** The aim of this work was to investigate the effects of three different hot rolling processes and subsequent annealing on microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy. AZ31 sheets were fabricated by large strain hot rolling (LSHR), accumulative roll-bonding (ARB) and normal hot rolling and subsequent annealing. Tensile test were conducted on the samples with different states. The EBSD and optical microscope were used to analyze the relationship between microstructure and mechanical properties of the samples. The results showed that excellent mechanical properties can be achieved by serve plastic deformation process and a suitable heat treatment. LSHR was proved a dependable method to produce ultra-fine microstructure as well as ARB, the yield stress and elongation of LSHRed samples are 298 MPa and 7%, respectively. The mechanical properties of samples produced by LSHR are much better than the samples produced by normal hot rolling. The samples after serve plastic deformation and low temperature annealing has excellent mechanical properties, the strength of the sample is slightly lower than the deformed samples, and ductility is similar to fully annealed sample the or even better.

**KEY WORDS:** AZ31 alloy; microstructure; mechanical properties

收稿日期: 2015-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(51374110); 广东省自然科学基金研究团队项目(2015A030312003)

作者简介: 健旗(1991—), 男, 吉林四平人, 硕士生, 主要研究方向为形变镁合金组织及力学性能,

通讯作者: 吴桂林(1975—), 男, 河南信阳人, 教授, 主要研究方向为金属材料的塑性变形与再结晶机理。

镁合金因其密度小、比强度高、抗震性好等优点,有望成为 21 世纪重要的商用轻质结构材料,在汽车、3C、航空航天、国防军工等领域具有良好的应用前景<sup>[1]</sup>。目前,大量镁合金产品主要通过铸造的生产方式获得,因为铸态组织缺陷的影响,通过挤压、轧制、锻造等工艺生产出的变形镁合金比铸造镁合金具有更好的力学性能。研制与开发变形镁合金产品,制定变形镁合金生产的新工艺,是国际镁协会(IMA)提出的开发镁合金产品的一项长远目标<sup>[2]</sup>。大多数镁合金是密排六方结构,常温下可开动的滑移系较少,在形变过程中容易产生变形孪晶和基面织构,阻止镁合金的进一步变形<sup>[3]</sup>。较低的塑性和较差室温加工能力给板带轧制造成了很大困难<sup>[4-6]</sup>。近年来的研究表明,改善镁合金室温力学性能的主要途径是细化晶粒、弱化织构和改善组织均匀性。剧烈塑性变形工艺因其能显著改善材料的组织结构,细化晶粒,而被应用到提升镁合金力学性能的研究中来,包括累积叠轧、等通道角挤压、高压扭转等工艺<sup>[7-9]</sup>,其中累积叠轧工艺(ARB)被认为是最适合投入工业生产的剧烈塑性变形工艺,Valle、詹美燕等人已经对累积叠轧制备 AZ 系列镁合金有一定研究<sup>[10-11]</sup>。与此同时,另一种剧烈塑性变形工艺受到越来越多的关注,即大变形量热轧工艺(LSHR)。相比于累积叠轧工艺,大变形量热轧样品准备和轧制工序简单,成本低,如果所制备样品的力学性能与累积叠轧等大塑性变形工艺相同,大变形量热轧将具有更大优势。Perez-Prado 发现大变形量热轧可以显著提高镁合金强度<sup>[12]</sup>,Xu,Guo 等人先后研究了大变形量热轧中轧制温度和速度对镁合金性能的影响<sup>[13-14]</sup>。目前还没有系统比较累积叠轧和大变形量工艺对镁合金组织及性能影响的研究。

1 实验

实验原材料为热轧态 AZ31 镁合金板材,为了进一步加工变形,消除内部组织缺陷和残余应力,对原材料进行均匀化处理,温度 400 ℃,时间为 3 h。本实验采用 3 种轧制工艺来制备镁合金板材,轧辊直径为 230 mm,轧辊速度为 0.4 m/min,轧辊未经加热,每道次轧制前样品均需要 400 ℃预热 8 min。第 1 种工艺是累积叠轧法,先将均匀化后的材料用线切割机切成 1 mm 厚的板材,经过抛光和脱脂,用铁丝将 2 块板材固定在一起,材料在预热后进行叠轧,每道次变形量为 50%,共轧制两道次,轧后板材为 1 mm 厚。第 2 种工艺为大变形量热轧,先将均匀化处理后的材料用线

切割机切成 4 mm 厚的板材,轧制前预热,材料经两道次轧为 1 mm 厚,每道次变形量 50%。第 3 种工艺为普通热轧工艺(NR),作为前 2 种大塑性变形工艺的对比,采用 4 mm 板材,经过 13 道次轧制,每道次变形量为 10%,制成 1 mm 厚板材。轧制参数如表 1 所示。将不同工艺轧制后的板材进行不同温度等温退火,退火温度为 180,250,400 ℃。

表 1 3 种轧制工艺参数  
Table 1 Parameters of three different hot rolling processes

| 工艺     | 变形量/% | 轧制步骤                                                      |
|--------|-------|-----------------------------------------------------------|
| 累积叠轧   | 75    | 50%+400 ℃保温 8 min+50%                                     |
| 大变形量热轧 | 75    | 50%+400 ℃保温 8 min+50%<br>10%(共 13 道次,每道次中间 400 ℃保温 8 min) |
| 普通热轧   | 75    |                                                           |

利用蔡司扫描电镜和电子背散射(EBSD)探头获得退火样品的显微组织和晶体学信息。制备 EBSD 样品的方法为先机械抛光再电解抛光,电解液选用 AC2 溶液。利用光学显微镜观察形变态样品的显微组织,选用苦味酸作为金相腐蚀剂。拉伸测试为室温恒定速率测试,应变速率为  $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,拉伸方向与样品轧制方向平行,拉伸样宽度为 5 mm,标距为 10 mm,对每个状态的样品,都进行 3 次以上重复测试。

2 结果及分析

2.1 均匀化处理后显微组织及织构

图 1 为通过 EBSD 获得的原始材料均匀化处理后的显微组织及织构。从图 1a 可知,经过 400 ℃恒温退火 3 h 后,样品已从热轧态形变状态转为再结晶状态,晶粒均为等轴状再结晶晶粒且分布均匀。通过截线法测得平均晶粒尺寸为 10.6 μm。图 1b 显示均匀化后的样品织构仍然是基面织构,即{0002}面与样品轧制面平行。

2.2 累积叠轧及退火过程中组织结构的演变

由于镁合金原子质量较小,且形变态样品中晶粒细小,位错密度高,很难获得大区域高质量的 EBSD 数据,故本实验中形变态样品的显微组织通过光镜观察得到,而退火态样品及晶体取向是通过 EBSD 获得。图 2a 为累积叠轧 AZ31 板材形变态的显微组织,从图 2 中可看到板材的结合面以及清晰的金属流线。金属流线的产生与变形过程中发生的动态再结

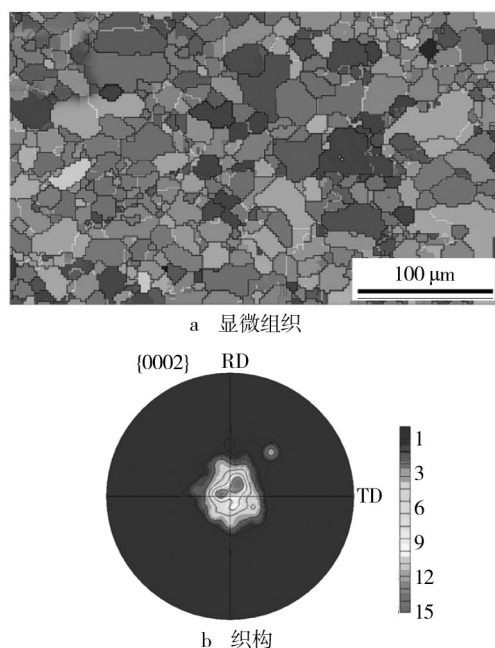


图1 均匀化处理后显微组织(a)及织构(b)

Fig.1 Microstructure and texture after homogenization treatment

晶有关,相对于面心立方结构金属来说,镁合金更容易发生动态再结晶,这是因为镁合金滑移系非常有限,且层错能较低,晶界扩散速度较快,使得亚晶界上堆积的位错能够被这些晶界吸收,加快了动态再结晶的过程<sup>[15]</sup>。在剧烈的塑性变形过程中,AZ31板材在内部发生了动态再结晶,密集的金属流线由细小的动态再结晶晶粒(平均晶粒尺寸为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右)组成。在累积叠轧板材的显微组织中还可以发现一些长条状的晶粒,为未发生再结晶的形变态晶粒。经过轧制变形后,板材组织得到显著细化。图2b为累积叠轧板材在 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火1h后的显微组织,其中白色线条表示小角度晶界,黑色线条表示大角度晶界。由图2b可以看出,经过 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火,平均晶粒尺寸有所增加,平均晶粒尺寸约为 $3.4\text{ }\mu\text{m}$ ,形变态晶粒发生回复基本消失,早期变形形成的条状再结晶组织与回复组织形成了层状的混晶组织。累积叠轧板材在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火1h后的显微组织如图2c所示,层状结构消失,晶粒发生了明显的粗化,平均晶粒尺寸为 $5.8\text{ }\mu\text{m}$ ,晶粒全部为等轴状的再结晶晶粒且分布均匀,说明样品经过 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火1h后,已经完全再结晶。

### 2.3 大变形量热轧及退火过程中组织结构的演变

图3为大变形量热轧样品的显微组织,与累积叠轧样品显微组织类似,经过轧制变形后,板材组织得到显著细化,组织由等轴状的动态再结晶晶粒和长条

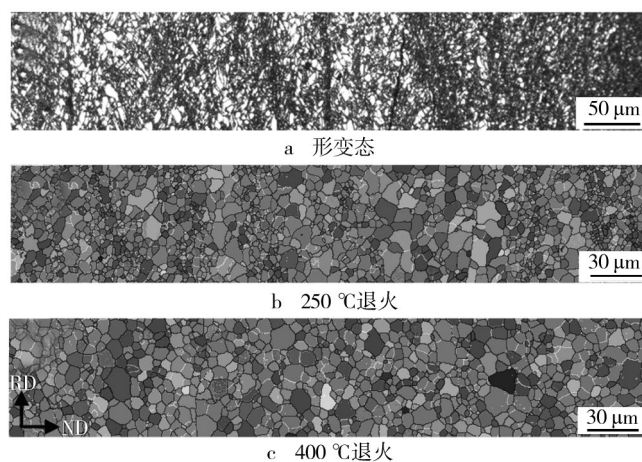


图2 累积叠轧AZ31板材的显微组织

Fig.2 The microstructure of the ARBed sample

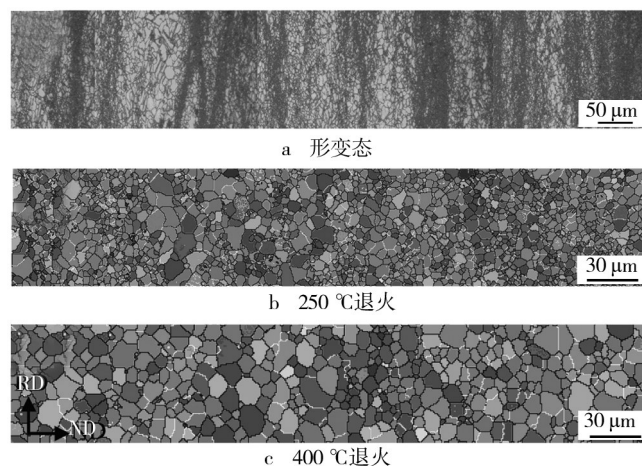


图3 大变形量热轧AZ31板材的显微组织

Fig.3 The microstructure of the LSHRed sample

状变形晶粒构成。经过 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火1h后,形变组织基本消失,样品由回复组织和再结晶组织组成,并且形成了层状混晶组织结构,平均晶粒尺寸为 $3.2\text{ }\mu\text{m}$ 。大变形量热轧样品在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火1h后为完全再结晶状态,平均晶粒尺寸为 $6.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

### 2.4 普通热轧及退火过程中组织结构的演变

图4a为普通热轧板材的显微组织,与前2种工艺得到的板材相比,其显微组织有明显不同,组织虽得到细化但平均晶粒尺寸比前两者大。组织中也存在金属流线,但密度较低。造成这些差异的主要原因在于工艺的不同,累积叠轧和大变形量热轧工艺均只用2个道次使样品达到75%的变形量,第1道次和第2道次之间样品在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温炉中预热8min。而普通轧制用了13个道次使样品达到75%的变形量,每道次变形量为10%,在进行下一道次轧制前样品同样在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火8min。每道次较小的变形量和多次的中

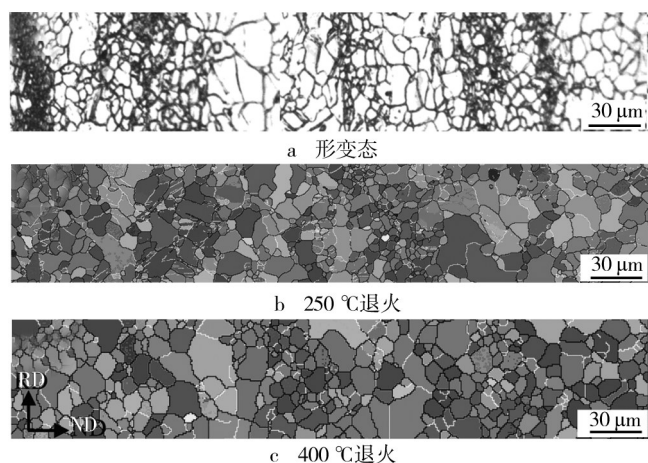


图4 普通热轧AZ31板材的显微组织

Fig.4 The microstructure of the NRed sample

间退火使得 AZ31 板材变形比较均匀,未发生大量的动态再结晶,晶粒细化效果相对较差。由于每道次变形量小,普通热轧的 AZ31 板材虽然总压下量与前两者相同,但实际有效应变及变形储存能较低,在退火时再结晶驱动力低,需要更高的退火温度和更长的退火时间完成再结晶过程。如图 4b 所示,普通热轧样品在 250 °C 退火 1 h 后,平均晶粒尺寸为 6 μm,组织中仍存在大量的小角度晶界和形变组织。在 400 °C 退火 1 h 后,普通热轧样品与累积叠轧和大变形量热轧样品经过 250 °C 退火 1 h 后的组织类似,呈现层状的混晶组织,平均晶粒尺寸为 8.5 μm。

## 2.5 室温力学性能

经不同加工工艺及热处理之后 AZ31 合金板材的室温拉伸力学性能如图 5 所示。可以看出,经过 75% 变形量的轧制, AZ31 合金板材的抗拉强度和屈服强度得到极大提高,根据 Hall-patch 公式  $\sigma_y = \sigma_0 + k\epsilon^{1/2}$  可知,镁合金作为密排六方结构,其  $k$  值为 280~320 MPa·m<sup>-1/2</sup>,是一般立方结构金属的数倍,故细化晶粒对镁合金强度提高效果更显著<sup>[16-17]</sup>。累积叠轧板材在 180 °C 退火 1 h 后,屈服强度降为 240 MPa,而延伸率为 20%;在 250 °C 退火 1 h 后,抗拉强度为 281 MPa,屈服强度为 203 MPa,延伸率达到 26%;400 °C 退火后完全再结晶状态的样品,抗拉强度和屈服强度降低为 272 MPa 和 181 MPa,塑性也有所降低,为 19%。大变形量热轧板材的抗拉强度和屈服强度,无论是形变态还是退火态都比累积叠轧稍高,形变态样品的抗拉强度为 340 MPa,屈服强度达到 298 MPa;经过 250 °C 退火 1 h 后,样品屈服强度为 213 MPa,而延伸率达到 20%;400 °C 退火后的大变形量热轧样品延伸率稍有

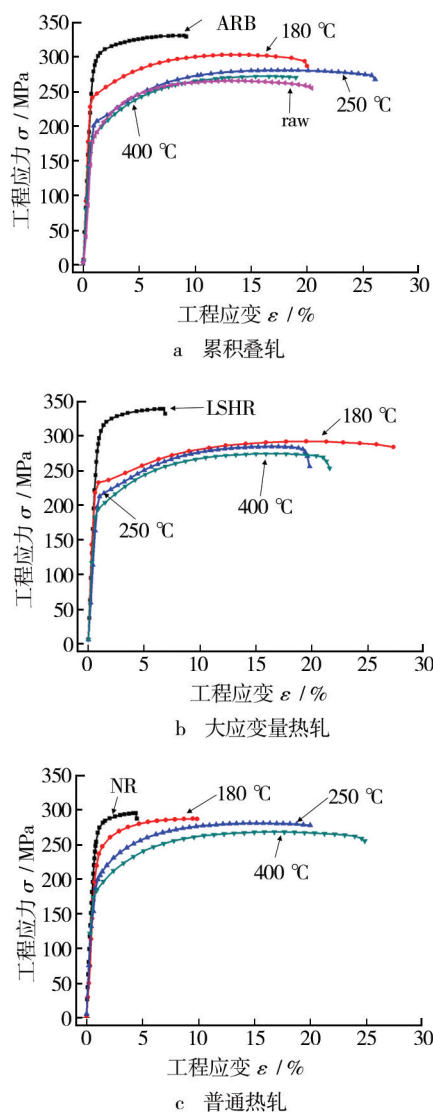


图5 板材的应力-应变曲线

Fig.5 Engineering stress-engineering strain curves of sheets

增加,屈服强度则降为 190 MPa。相对于前 2 种剧烈塑性变形工艺制备的板材,普通热轧板材由于累积应变较小,导致其强度较低。在经过 250 °C 退火后,普通热轧板材的再结晶程度没有大塑性变形板材的再结晶程度高,即使屈服强度只有 172 MPa,塑性(20%)也低于相同状态的累积叠轧工艺板材(26%)。经过 400 °C 退火 1 h 后,普通热轧板材进一步再结晶,抗拉强度从 280 MPa 降低至 268 MPa,屈服强度略有降低,而其塑性提升到 25%。

相比于普通热轧样品的拉伸力学性能,剧烈塑性变形样品有明显的优势,值得一提的是,对于大塑性变形 AZ31 板材,低温退火态样品的强度比形变态样品的强度稍低,而塑性大大提高,甚至要优于完全再结晶状态的样品的塑性。研究发现,晶粒大小对镁合金塑性有显著影响,Liang 等人的研究表明,通过挤压

制得的晶粒尺寸为 $2\ \mu\text{m}$ 的镁合金更容易发生非基面滑移和孪生,有利于塑性变形<sup>[18]</sup>。Koike等人发现镁合金晶界处更容易发生非基面滑移,而细晶镁合金存在大量的晶界,利于非基面滑移的产生,使得细晶镁合金的塑性得到了提高。另外,在累积叠轧、大变形量热轧样品经过 $250\ ^\circ\text{C}$ 退火,及普通热轧样品经过 $400\ ^\circ\text{C}$ 退火后的组织中,均发现了层状混晶组织,而这三者的塑性都达到20%以上,特别是累积叠轧板材的层状混晶组织比完全退火态样品塑性更好。层状的混晶组织或许能提供给镁金额外的塑性。

### 3 结论

1) 剧烈塑性变形工艺和普通热轧工艺均可改善镁合金的力学性能,抗拉强度和屈服强度都有明显提高,变形后适宜的热处理工艺可使AZ31镁合金保持高强度的同时还可兼顾优良的室温延伸率。

2) 大变形量热轧工艺制备的AZ31镁合金板材的细晶组织及室温拉伸性能,可与累积叠轧等传统剧烈塑性变形工艺相媲美。与普通热轧工艺制得的AZ31镁合金板材相比,大变形量热轧工艺及累积叠轧工艺制得的板材具有更高的强度和塑性。

3) 剧烈塑性变形镁合金在低温退火后获得的混晶组织具有优良的综合力学性能,强度比形变态样品略低,而塑性与完全退火样品相同甚至更好。

#### 参考文献:

- [1] 符韵,沈蕾芳,项运良,等. Mg-5Gd-4Y-0.3Zr合金组织和力学性能研究[J]. 精密成形工程, 2015, 7(5): 130—134.  
FU Yun, SHEN Lei-fang, XIANG Yun-liang, et al. Micro-structure and Mechanical Properties of Mg-5Gd-4Y-0.3Zr [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(5): 130—134.
- [2] 余琨,黎文献,李瑞松. 变形镁合金材料的研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2001, 29(7): 6—11.  
YU Kun, LI Wen-xian, LI Rui-song. The Research and Developments of Wrought Magnesium Alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2001, 29(7): 6—11.
- [3] 王尔德. 镁合金塑型加工产业技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2014, 6(6): 22—30.  
WANG Er-de. Recent Researches in Industrial Plasticity Processing of Magnesium Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(6): 22—30.
- [4] GUO W, WANG Q, YE B, et al. Enhanced Microstructure Homogeneity and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy by Repetitive Upsetting[J]. Materials Science & Engineering A, 2012, 540: 115—122.
- [5] GALL S, COELHO R S, MULLER S, et al. Mechanical Properties and Forming Behavior of Extruded AZ31 and ME21 Magnesium Alloy Sheets[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 579: 180—187.
- [6] ZHANG Hua, JIN Wei, FAN Jian-feng, et al. Grain Refining and Improving Mechanical Properties of a Warm Rolled AZ31 Alloy Plate[J]. Materials Letters, 2014, 135: 31—34.
- [7] MOSTAED E, FABRIZI A, D DELASEGA, et al. Micro-structure, Mechanical Behavior and Low Temperature Superplasticity of ECAP Processed ZM21 Mg Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 638: 267—276.
- [8] WU Jian-qi, HUANG Shuai, WANG Yu-hui, et al. Micro-structure and Mechanical Properties of ARB Processed Mg-3% Gd Alloy[J]. IOP Conference Series—Materials Science and Engineering, 2015, 89: 012052.
- [9] TSUJI N, SAITO Y, LEE S H, et al. ARB (accumulative roll-bonding) and Other New Techniques to Produce Bulk Ultrafine Grained Materials[J]. Advanced Engineering Materials, 2003, 5(5): 338—344.
- [10] VALLE J, PRER-PRADO M, RUANO O. Accumulative Roll Bonding of a Mg-based AZ61 Alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 410: 353—357.
- [11] ZHAN Mei-yan, LI Yuan-yuan, CHEN Wei-ping. Improving Mechanical Properties of Mg-Al-Zn Alloy Sheets Through Accumulative Roll-bonding[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2008, 18: 309—314.
- [12] PEREZ-PRADO M, VALLE J, RUANO O. Achieving High Strength in Commercial Mg Cast Alloys Through Large Strain Rolling[J]. Materials Letters, 2005, 59: 3299—3303.
- [13] XU C, ZHENG M, WU K, et al. Influence of Rolling Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Gd-Y-Zn-Zr Alloy Sheets[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 559: 615—622.
- [14] GUO F, ZHANG D, YANG X, et al. Influence of Rolling Speed on Microstructure and Mechanical Properties of AZ31 Mg Alloy Rolled by Large Strain Hot Rolling[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 607: 383—389.
- [15] XIN Yun-chang, ZHOU Hua, YU Hui-hui, et al. Controlling the Recrystallization Behavior of a Mg-3Al-1Zn Alloy Containing Extension Twins[J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 622: 178—183.
- [16] 尹雪雁, 于建民, 张治民. Mg-13Gd-4Y-0.5Zr 镁合金多向锻造组织和性能研究[J]. 精密成形工程, 2014, 6(6): 68—73.  
YIN Xue-yan, YU Jian-min, ZHANG Zhi-min. Microstructure and Performance of Mg-13Gd-4Y-0.5Zr Magnesium Alloy under Multidirectional Forging[J]. Journal of Netshape

(下转第83页)

- Morphology of Phases in Ti-6Al-4V alloy[C]//Titanium 80-Science and Technology. Fourth International Conference on Titanium, Kyoto, Japan, 1980:1555—1561.
- [4] 孙新军. 钛合金片层组织的等轴化规律及超细晶钛合金超塑性的研究[D]. 北京:清华大学, 1999.
- SUN Xin-jun. Research on Globularization Mechanism of Titanium Alloy with Lamellar and Superfine Grained Titanium Alloy on Superplastic[D]. Beijing:Tsinghua University, 1999.
- [5] 陈慧琴, 曹春晓, 郭灵, 等. TC11钛合金片层组织热变形球化机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(3):421—425.
- CHEN Hui-qin, CAO Chun-xiao, GUO Ling, et al. Globularization Mechanisms during Hot Deformation Processes of TC11 Alloy with Lamellar Structure[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(3):421—425.
- [6] 宋鸿武. TC11钛合金片层组织两相区变形机理的研究及应用[D]. 沈阳:中国科学院, 2009.
- SONG Hong-wu. Research on Subtransus Deformation Mechanisms of TC11 Alloy with a Lamellar Structure and Its Application[D]. Shenyang: Chinese Academy of Science, 2009.
- [7] WEISS I, FROES F H, EYLON D, et al. Modification of Alpha Morphology in Ti-6Al-4V by Thermomechanical Processing[J]. Metallurgical Transactions A, 1986, 17(11):1935—1947.
- [8] SESHACHARYULU T, MEDEIROS S C, MORGAN J T, et al. Hot Deformation Mechanisms in ELI Grade Ti-6Al-4V[J]. Scripta Materialia, 1999, 41(3):283—288.
- [9] SESHACHARYULU T, MEDEIROS S C, MORGAN J T, et al. Hot Deformation and Microstructural Damage Mechanisms in Extra-low Interstitial (ELI) Grade Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 279:289—299.
- [10] 赖运金. 钛合金片状组织演变机制与球化动力学研究[D]. 西安:西北工业大学, 2007.
- LAI Yun-jin. Study on Microstructural Evolution of Lamellar Structure and Globularization Kinetics of Titanium Alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [11] SEMIAYIN S L, SEETHARAMAN V, WEISS I. Flow Behavior and Globularization Kinetics during Hot Working of Ti-6Al-4V with a Colony Alpha Microstructure[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 263:257—271.
- [12] PRASAD Y V R K. Recent Advances in the Science of Mechanical Processing[J]. Indian Journal of Technology, 1990, 28:435—451.
- [13] 俞汉清, 陈金德. 金属塑性成形原理[M]. 北京:机械工业出版社, 1999.
- YU Han-qing, CHEN Jin-de. Metal Plastic Forming Principle[M]. Beijing:China Machinery Industry Press, 1999.
- [14] 董显娟. 片状TA15钛合金 $\alpha + \beta$ 相区塑性变形特性及等轴化行为研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.
- DONG Xian-juan. Research on Plastic Deformation Characteristics and Globularization Behavior of TA15 Titanium Alloy with Lamellar Microstructure in Alpha and Beta Phase Field[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [15] 周军. Ti-17钛合金片状组织球化规律研究[D]. 西安:西北工业大学, 2005.
- ZHOU Jun. Study on Globularization Mechanism of Lamellar Microstructure in Ti-17 Titanium Alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
- nealing[J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 528:6694—6701.
- [18] LIANG S J, LIU Z Y, WANG E D. Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Al-Zn Alloy Deformed by Cold Extrusion[J]. Materials Letters, 2008, 62:3051—3054.

(上接第58页)

Forming Engineering, 2014, 6(6):68—73.

- [17] MIAO Qing, HU Liang-xi, WANG Guo-jun, et al. Fabrication of Excellent Mechanical Properties AZ31 Magnesium Alloy Sheets by Conventional Rolling and Subsequent An-