

退火对 AZ31 镁合金微观组织和力学各向异性的影响

李线绒^{1,2}, 米玉洁^{1,2}, 聂慧慧^{1,2}, 王韬略^{1,2}, 梁伟^{1,2}

(1. 太原理工大学, 山西 太原 030024)

(2. 先进镁基材料山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 对 AZ31 镁合金进行轧制并对轧制后的板材进行退火。采用 OM、SEM 及 EBSD 观察并分析了轧制及退火态镁合金的微观形貌及取向状态, 分析退火对各向异性的影响。结果表明: 轧制后镁合金存在着明显的各向异性, 经退火后, 镁合金不同取向的基面织构强度差异减小, 其抗拉强度、屈服强度尤其在延伸率方面的各向异性指数远小于轧制态下的各向异性指数, 说明退火可以改善镁合金的各向异性。

关键词: 镁合金; 各向异性; 退火

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)01-0320-05

目前, 镁合金在汽车、航天航空、3C 产品以及医疗等领域有着广泛的应用, 这是由于镁合金有着密度低、比强度和比刚度高的优势, 同时它导热导电性能优良, 屏蔽性好, 无毒^[1-3]。但它的两大缺点: 塑性及耐腐蚀性差, 限制了其进一步应用。镁合金为密排六方结构, 滑移系少^[4]。同时, 镁合金的晶粒在轧制过程中取向发生了变化, 形成了强烈的(0002)基面织构, 从而导致了其力学性能有明显的各向异性^[5]。镁合金的各向异性, 使镁合金在深冲过程出现严重制耳现象, 影响后续的镁合金板材的成形过程, 使镁合金的应用受到限制^[6]。

燕山大学的石保东等对镁合金的各向异性进行了一系列研究, 发现不同方向下镁合金屈服强度不同, RD 方向远小于 TD 方向, 并从织构方面解释其原因^[5]。重庆大学的 Liu Pei 研究了 AZ31 的各向异性以及断裂行为, 发现 RD 方向锥面滑移占主导作用^[7]。目前, 关于退火对镁合金各向异性的影响很少。本实验选用的 AZ31 镁合金, 是目前应用最为广泛的变形镁合金, 通过对比轧制态和退火态 AZ31 镁板的相关力学性能及表现形貌, 探究沿 RD, TD 以及 45° 方向下的力学性能和微观组织差异, 说明退火对各向异性的影响。

1 实验

实验选用变形镁合金 AZ31 板材为原始板材, 剪裁成大小为 60 mm×40 mm×2.75 mm。剪裁好的板材

经 300 °C, 1 h 退火后取出进行空冷。将退火后的板材 450 °C 预热 10 min 后, 在 BKD-130 轧机进行轧制, 压下量为 62%。将轧制后的板材放置在箱式电阻炉中并在 200 °C 下退火处理 1 h。

在 RD×TD 平面内分别沿 RD, TD 以及 45° 方向切割拉伸试样(见图 1)和用于观察金相的方形小样。将试样表面打磨至光亮, 用苦味酸腐蚀表面, 采用光学显微镜 (Leica DM2500) 观察微观组织。在 TESCAN-MIRA3 扫描电镜上进行 EBSD 实验, 使用 HKL Channel5 进行织构分析。采用 INSTRON5969 万能试验机在室温下采用位移加载模式进行单向拉伸试验, 设置拉伸速率为 0.5 mm/min, 并且每组试验重复 3 次保证数据的准确性。采用 TESCAN-MIRA3 扫描电镜进行断口分析。

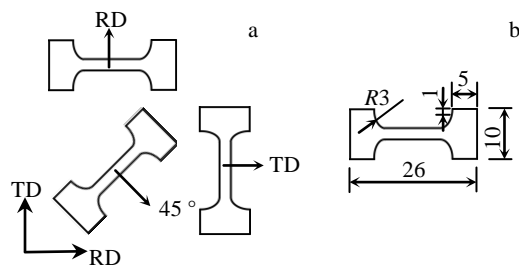


图 1 拉伸试样取样及尺寸图

Fig.1 Sampling of tensile specimen: (a) orientation scheme and (b) schematic description

收稿日期: 2019-01-22

基金项目: 山西省重大专项项目 (20181101008); 山西省应用基础面上青年基金项目 (201801D221101); 国家自然科学基金 (U1710254, 51175363、51274149); 山西能源学院院基金 (ZY-2017003)

作者简介: 李线绒, 女, 1978 年生, 博士, 太原理工大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024, E-mail: lixianrong022090@126.com

2 结果与讨论

2.1 微观组织分析

图 2 是 AZ31 镁合金不同方向不同状态的金相组织图。其中图 2a~2c 为轧制态, 图 2d~2f 为退火态。由图 2a~2c 可以看出轧制态下 RD、TD 及 45° 方向的组织有一定的差别。RD 方向的金相组织中, 晶粒分布不均匀, 既有板条状的大晶粒又有大量的细小晶粒。轧制过程中产生的高应变使晶体内部出现板条状大晶粒, 细小晶粒则是在轧制过程中发生的动态再结晶形成的。细小晶粒聚集在一起, 大致呈 45° 方向, 是由于轧制过程中产生的大变形而形成的剪切带, 裂纹容易出现在此处并聚合, 是金属断裂的先兆, 会使材料的承载力下降, 从而影响其力学性能^[8]。TD 方向镁合金的金相组织是由大量的板条状大晶粒和相对较少的细小晶粒组成, 细小晶粒分布在板条状的大晶粒之间, 板条状的大晶粒内部存在许多亚晶和孪晶(见图 2b)。与 RD 方向明显不同的是, TD 方向下, 板条状的大晶粒占主导作用, 细小晶粒的数量很少, 说明 TD 方向动态再结晶程度相对较低。45° 方向的金相组织是由许多的小晶粒以及板条状晶粒组成, 板条状的大晶粒中存在大量孪晶(见图 2c)。轧制后镁合金板材 RD 方向的延伸率大于 TD 方向的延伸率^[5], 各方向的应变程度不同, 因此在金相组织图中存在一定的差别。

图 2d~2f 是退火态下 AZ31 镁合金的金相组织图。RD 方向下退火态镁合金的组织(图 2d)与轧制态(图 2a)相比, 板条状的大晶粒变小, 小晶粒数量增加并且占绝大多数, 组织变得比较均匀。少部分的大晶粒仍然存在, 说明退火不充分。在退火过程中, 动态再结晶产生的细小晶粒会随着时间长大。在塑性变形较大的

地方会发生再结晶晶粒的形核过程, 退火时此处会发生再结晶, 所以退火后的镁合金板条状大晶粒会出现变小或消失的现象。TD 方向与 45° 方向退火后, 与 RD 方向类似, 其组织变均匀, 细小的等轴晶增加, 长条状的晶粒变小变少。与轧制态的金相组织图相比, 退火态 AZ31 镁合金不同方向的微观组织的差异性明显减小。说明 200 °C, 1 h 的退火可以使 AZ31 镁合金的各向异性减弱。

图 3 为 AZ31 镁合金在不同状态以及不同取向的(0002)极图。如图 3a 所示, RD 方向下有较强的(0002)基面织构。轧制过程中, 许多晶粒的 *c* 轴与受力方向平行, 导致基面以及柱面的 Schmid 因子很小, 晶粒之间的滑移难以启动, 孪生成为主要变形机制, 外力拉伸孪晶使晶粒的 *c* 轴与板材的法向平行, 最终形成了(0002)基面织构^[9]。在 TD 方向以及 45° 方向下, 它们仍然保持着基面织构, 但是它们的基面织构出现了两个较强的峰, 这可能是在轧制时滑移系的大量启动使基面发生倾斜引起的。将轧制态下 RD、TD 以及 45° 方向的极图进行对比, 可以发现在 RD 方向下其织构强度最大, 为 36.36, 45° 方向下的织构强度最小, 为 27.63, 两者之间的差距明显, 其值达 8.73。经过退火处理后, 基面织构减少, 不同方向的织构强度都有所下降。镁合金织构的形成由变形过程、再结晶以及晶粒长大决定, 织构强度会随着再结晶过程中晶粒的形核与长大而下降^[10], 因为再结晶区域的织构强度低于未发生再结晶区域的织构强度^[11,12]。很多文献也指出镁合金的织构强度会随着再结晶程度的增加而降低^[13,14]。图 2 中退火态镁板中存在更多细小晶粒, 说明退火过程中发生了再结晶, 使晶粒的 *c* 轴发生偏移从而使再结晶的晶粒取向分布弥散, 导致镁合金基面

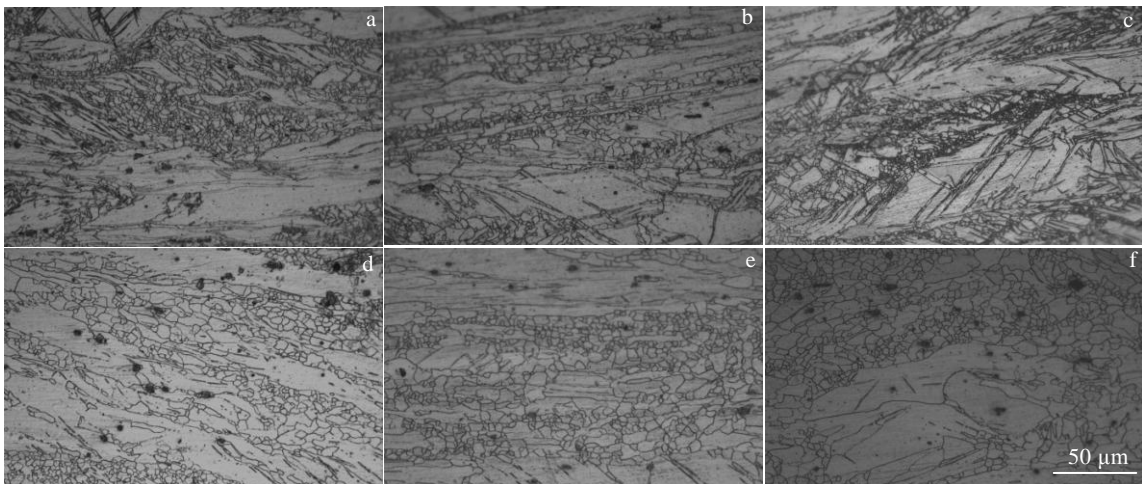


图 2 AZ31 镁合金的金相组织图

Fig.2 Optical microstructures of AZ31 Mg alloy: (a~c) rolled-Mg alloy; (d~f) annealed-Mg alloy; (a, d) RD; (b, e) TD; (c, f) 45°

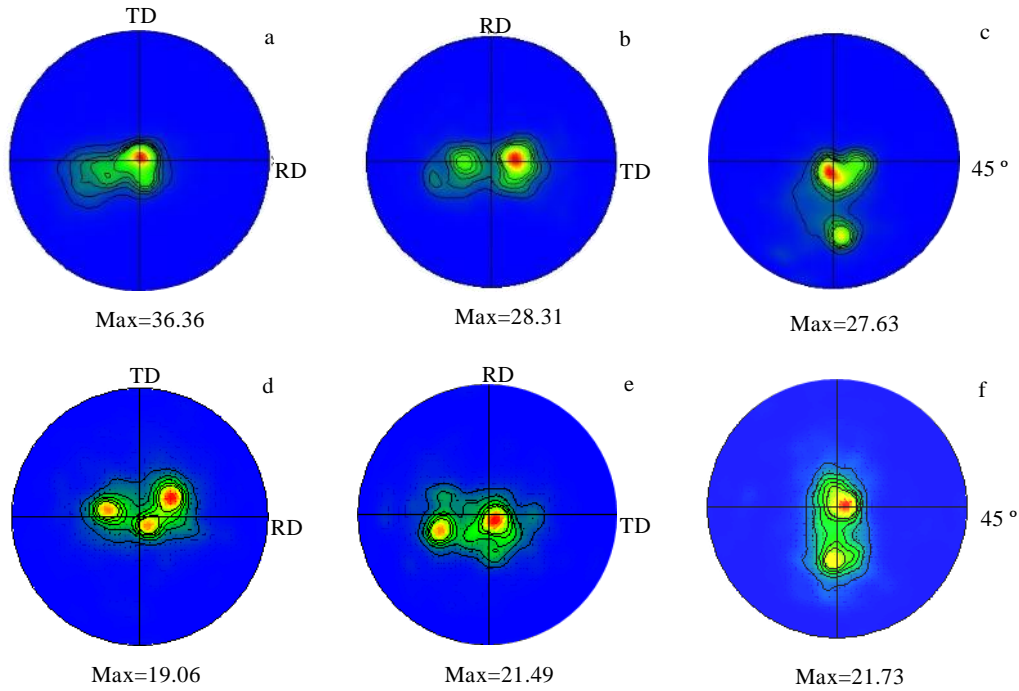


图 3 AZ31 镁合金的 (0002) 的极图

Fig.3 (0002) pole figures: (a~c) rolled-Mg alloy; (d~f) annealed-Mg alloy; (a, d) RD; (b, e) TD; (c, f) 45°

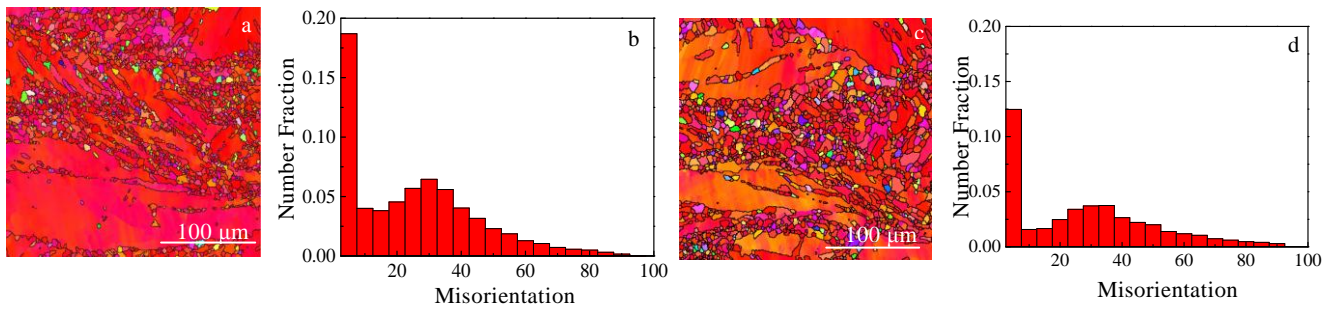


图 4 RD 方向 EBSD 图和晶界轧制态及退火态取向图

Fig.4 EBSD maps along RD (a, c) and distribution of grain boundary misorientation along RD (b, d): (a, b) rolled-Mg alloy; (c, d) annealed-Mg alloy

织构强度降低。图 4 为 RD 方向 EBSD 图与晶界差取向图，退火后，大角晶界($>15^\circ$)增多，小角晶界($2^\circ\sim 15^\circ$)减少，退火时发生再结晶，使织构强度降低。根据图 3d~3f 可知三者织构强度的大小大致相等，最强织构与最低织构的强度相差 2.07，退火明显改善了 AZ31 镁合金的各向异性。

2.2 力学性能以及断口形貌分析

图 5 为不同方向不同状态的 AZ31 镁合金的拉伸应力-应变曲线。表 1, 2 为相关性能数据。轧制态下，镁合金不同方向的拉伸曲线存在明显差异，TD 方向的抗拉强度、屈服强度都最高，分别为 316.58, 202.97 MPa。45°方向的延伸率最高为 14%(图 5a)。轧制后，镁合金

板材 RD 方向的屈服强度小于 TD 方向，说明在拉伸过程中部分晶粒的 c 轴向 RD 方向倾斜，极少数晶粒的 c 轴向 TD 方向倾斜，RD 方向的基面滑移处于有利取向进而容易被激活，从而造成了 RD 与 TD 方向下屈服强度的差异。退火后镁合金在 TD 和 45°方向的抗拉强度均有所下降，且其差异减小，RD 和 TD 方向的延伸率都有所增加，45°方向的延伸率基本不变，不同方向延伸率的差异明显减小(图 5b)。

图 6 是镁合金的拉伸断口图，其中 6a~6c 为轧制态，6d~6f 为退火态。由于断裂机制的不同，不同状态不同方向的镁合金断口形貌有着很大的差别。轧制态下 RD 和 TD 方向镁合金断口中存在着解离台阶和

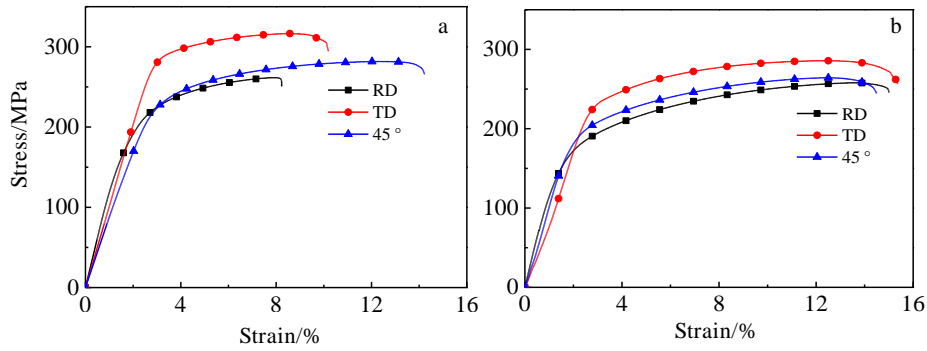


图 5 AZ31 镁合金的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of AZ31 Mg alloy: (a) rolled-Mg alloy and (b) annealed-Mg alloy

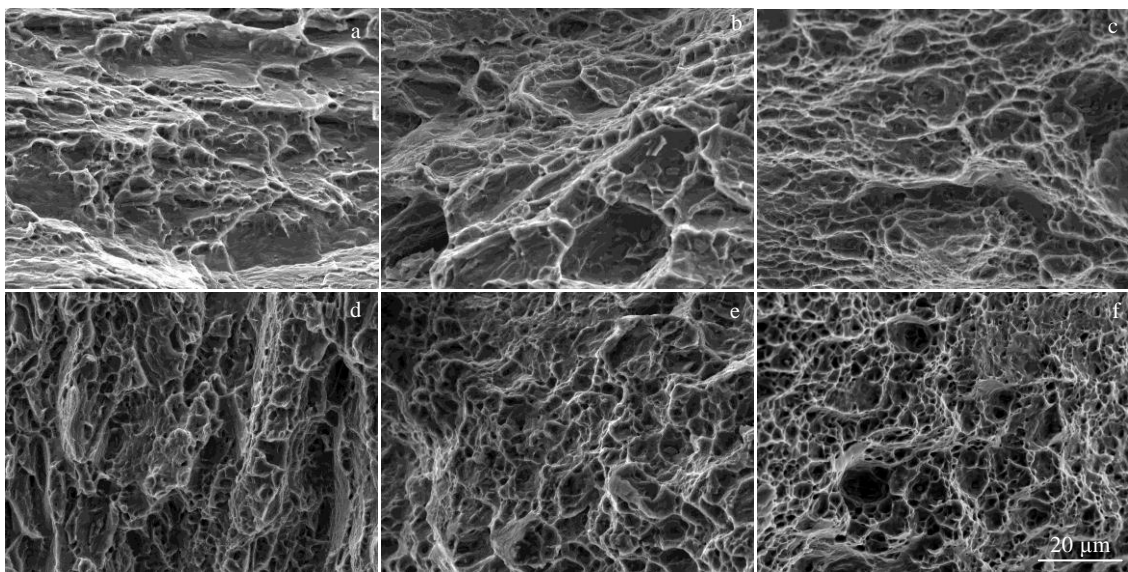


图 6 不同状态不同方向 AZ31 镁合金的断口

Fig.6 SEM images of the Mg alloy fracture: (a~c) rolled- Mg alloy; (d~f) annealed-Mg alloy; (a, d) RD; (b, e) TD; (c, f) 45°

表 1 轧制态镁合金不同取向的拉伸性能

Table 1 Tensile properties of rolled-Mg alloy in different orientations

Orientation	Ultimate tensile stress/MPa	Tensile yield stress/MPa	Elongation/%
RD	261.55	191.08	8.2
TD	316.58	202.97	10.2
45°	281.74	168.58	14

表 2 退火态镁合金不同取向的拉伸性能

Table 1 Tensile properties of annealed-Mg alloy in different orientations

Orientation	Ultimate tensile stress/MPa	Tensile yield stress/MPa	Elongation/%
RD	257.89	174.48	15.0
TD	285.72	174.48	15.3
45°	264.20	185.05	14.5

少量韧窝，其断裂主要表现为脆性断裂；45°方向镁合金断口韧窝变多变大，以塑性断裂为主。图 6d~6f 为退火态 AZ31 镁合金不同方向的拉伸断口图。不同方向断口中都存在大量的韧窝，其韧窝的数量和大小大致相同。根据断口形貌推断 3 个方向断裂都为塑性断裂。该结论与拉伸测试的实验现象相符，充分说明退火对各向异性的影响。

平面各向异性指数 (IPA) 能评估材料的各力学性能在不同方向的差异，说明其各向异性的情况，IPA 的表达式如公式(1)所示^[15]：

$$IPA = \frac{(2X_{max} - X_{mid} - X_{min})}{(2X_{max})} \quad (1)$$

公式(1)中，IPA 代表各向异性指数， X_{max} 、 X_{mid} 以及 X_{min} 分别代表抗拉强度或屈服强度或延伸率的最大值、中间值和最小值。根据上式和实验数据可以计算

出镁合金在轧制态以及退火态下和抗拉强度、屈服强度以及延伸率的各向异性指数。在轧制态下 AZ31 镁合金抗拉强度、屈服强度和延伸率的 IPA 分别为 14.19%、11.4% 和 34.28%。在退火态下 AZ31 镁合金抗拉强度、屈服强度和延伸率的 IPA 分别为 8.62%、5.7% 和 3.4%。轧制态镁板经退火后抗拉强度, 屈服强度以及延伸率的 IPA 分别下降了 5.56%, 5.7% 和 30.88%。轧制态镁板经退火后不同力学性能的各向异性得到缓解, 延伸率的各向异性指数下降程度明显大于强度各向异性的下降程度, 表明退火对延伸率各向异性的下降作用显著。AZ31 镁合金微观组织与力学性能的结果一致, 退火可以改善该镁合金的各向异性。

3 结 论

1) AZ31 镁合金经轧制后其微观组织在不同方向有明显差异, 退火后回复和再结晶使晶粒变得比较均匀, 其差异性明显减小。

2) AZ31 镁合金轧制变形后形成强烈的(0002)基面织构, 其强度 RD 方向最大, 为 36.36; 45° 方向最小, 为 27.63, 板材具有明显的各向异性。退火后, 不同方向的基面织构强度都下降且强度相近。

3) 轧制态镁合金各向异性指数(IPA)较大, TD 方向的抗拉强度与屈服强度最高; 退火后, 各向异性指数(IPA)下降。退火可以改善镁合金的各向异性, 在延伸率方面尤为显著。

参考文献 References

- [1] Aghion E, Bronfin B, Eliezer D. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2001, 117(3): 381
 [2] Macwan A, Jiang X Q, Li C *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 587: 344

- [3] Zhang Nan, Wang Wenxian, Cao Xiaoqing *et al. Materials and Design*[J], 2015, 65: 1100
 [4] Parisa Darvish Motevalli, Beitallah Eghbali. *Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 628: 135
 [5] Shi Baodong(石宝东), Peng Yan(彭 艳), Han Yu(韩 宇) *et al. Journal of Yanshan University*(燕山大学学报)[J], 2015(3): 221
 [6] Yang Chong(杨 冲), Peng Yan(彭 艳), Yang Shuo(杨 硕) *et al. Journal of Yanshan University*(燕山大学学报)[J], 2016, 40(2): 123
 [7] Liu Pei, Xin Yunchang, Liu Qing. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21(4): 880
 [8] Mao Pingli(毛萍莉), Liu Chao(刘 超), Liu Zheng(刘 正) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(5): 1181
 [9] Tang Weiqin(唐伟琴), Zhang Shaorui(张少睿), Fan Xiaohui(范晓慧) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(3): 371
 [10] Barnett M R, Sullivan A, Stanford N *et al. Scripta Materialia* [J], 2010, 63(7): 721
 [11] Du Y Z, Qiao X G, Zheng M Z *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 620: 164
 [12] Du Y Z, Qiao X G, Zheng M Y *et al. Materials & Design*[J], 2015, 85: 549
 [13] Li Weijian, Deng Kunkun, Zhang Xiao *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 677: 367
 [14] Tong L B, Zheng M Y, Cheng L R *et al. Materials Characterization*[J], 2015, 104: 66
 [15] Peng Jian, Zhou Chou, Wang Lijing *et al. Material and Heat Treatment*[J], 2010, 39(24): 15

Effect of Annealing on Microstructure and Mechanical Anisotropy of AZ31 Magnesium Alloy

Li Xianrong^{1,2}, Mi Yujie^{1,2}, Nie Huihui^{2,3}, Wang Taolve^{1,2}, Liang Wei^{1,2}

(1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Shanxi Key Laboratory of Advanced Magnesium-based Materials, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: AZ31 magnesium alloy was rolled and annealed after rolling. The microstructure and orientation of magnesium plate in as-rolled state and annealed state were studied, and the effect of annealing on anisotropy was analyzed. The results show that rolled magnesium alloys are anisotropic visibly and the difference of texture strength between different orientations of magnesium alloys decreases after annealing. The tensile strength, yield strength and elongation anisotropy index of annealed state magnesium plate are smaller than those of rolled-state magnesium, especially in elongation, which displays that annealing can improve the anisotropy of Mg alloys.

Key words: magnesium alloy; anisotropy; annealing

Corresponding author: Liang Wei, Ph. D., Professor, College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, E-mail: liangwei@tyut.edu.cn