

预变形及退火对变形镁合金组织及性能影响研究进展

张昕宇¹ 李继军^{1,2} 丁 慧¹ 侯小虎³ 杨诗婷¹ 邢永明¹ 张丽华²

(1.内蒙古工业大学理学院; 2.上海海事大学文理学院; 3.内蒙古工业大学材料科学与工程学院)

摘 要 变形镁合金受限于成形工艺, 致使其室温成形性较差并且具有较强的各向异性。通过在不同变形条件进行预变形结合退火处理能够有效弱化镁合金织构从而改善镁合金的力学性能。总结并评述了 3 种预变形方式结合退火处理对镁合金微观组织与力学性能的影响, 并对未来的发展提出了建议。

关键词 预变形; 退火; 镁合金; 微观结构; 力学性能

中图分类号 TG146.22; TG156.93

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.2021.01.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Alloy by Pre-deformation and Annealing

Zhang Xinyu¹, Li Jijun^{1,2}, Ding Hui¹, Hou Xiaohu³, Yang Shiting¹, Xing Yongming¹, Zhang Lihua²

(1.College of Science, Inner Mongolia University of Technology; 2.College of Arts and Science, Shanghai

Maritime University; 3.College of Materials and Engineering, Inner Mongolia University of Technology)

Abstract: Deformed magnesium alloy is limited by metal forming process, resulting in poor formability at room temperature and strong anisotropy. By pre-deformation combined with annealing under different deformation conditions, the texture of magnesium alloy can be weakened effectively and the mechanical properties of magnesium alloy can be improved. The effects of three pre-deformation methods combined with annealing on microstructure and mechanical properties of magnesium alloys were reviewed, and future tendency was pointed out.

Key Words: Pre-deformation, Annealing, Magnesium Alloy, Microstructure, Mechanical Properties

镁合金由于具有比强度高、密度低等特点而被广泛应用于众多领域^[1~3]。与铸造镁合金相比, 变形镁合金具有更优异的力学性能, 应用前景更为广阔^[4]。但是变形镁合金通常通过一定温度下的成形工艺制造, 如轧制、挤压和锻造, 并且在成形过程中, 会发生动态再结晶, 新晶粒的形核和长大使镁合金的显微组织发生很大变化并产生强的基面织构。基面织构导致镁合金成形性差且存在各向异性^[5~7]。因此, 研究变形镁合金初始织构对其微观组织发展和变形机制的影响以及改善其塑性变形能力和力学性能, 对于拓展镁合金的应用范围具有积极意义。

大多数镁合金具有密排六方晶格结构, 其在室温下只有 1 个滑移面和 3 个滑移系, 因此塑性变形主要依赖于滑移和孪生协调动作^[8]。现有研究表明, 预变形能够有效弱化镁合金基面织构^[9~11], 在不同变形条件下, 如

变形处理类型^[12~14]、应变速率^[15], 对镁合金的塑性变形行为有着复杂的影响^[16]。退火处理可以细化晶粒以及产生静态再结晶, 消除或减少材料中存在的残余应力、成分不均匀、组织不稳定等缺陷, 从而提高镁合金的工艺性能以及使用性能^[17~20]。本课题从预压缩、预拉伸、预扭转 3 个预变形模式论述了目前利用预变形与退火处理调控变形镁合金微观组织及力学性能的研究进展。

1 预压缩及退火处理

变形镁合金主要的塑性变形机制为孪生变形, 当其受到沿垂直于 c 轴方向压应力时会发生拉伸孪生现象, 而压缩孪生的产生通常与平行于 c 轴的压应力有关^[21]。变形镁合金在加工中容易产生强的基面织构, 由于大多数晶粒的基面与加工方向平行^[22], 导致强烈

收稿日期: 2020-09-12; 修改稿收到日期: 2020-10-27
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41961052, 11762013, 11562016, 11762014, 12002174); 内蒙古自然科学基金资助项目(2018MS01013); 内蒙古工业大学大学生创新实验计划资助项目(2020093006)
第一作者简介: 张昕宇, 男, 1995 年出生, 硕士研究生, 呼和浩特(010051), E-mail: 873463238@qq.com
通信作者: 李继军, 男, 1977 年出生, 教授, 呼和浩特(010051), E-mail: jilijun_li@163.com
引用格式: 张昕宇, 李继军, 丁慧, 等. 预变形及退火对变形镁合金组织及性能影响研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(1): 26-31.
ZHANG X Y, LI J J, DING H, et al. Research progress in microstructure and mechanical properties of magnesium alloy by pre-deformation and annealing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(1): 26-31.

的力学性能各向异性和较差的成形性^[23,24],基面织构还会显著降低其加工性能。在沿镁合金热轧板材的轧制方向(RD)或横向(TD)压缩时将产生拉伸孪晶。在不破坏拉伸孪晶组织的前提下,通过退火处理,能够消除由于位错塞积造成的加工硬化,改善塑性变形能力。

LEE J U 等^[25]对热轧态 AZ31 镁合金沿 RD 方向压缩到 6.0% 的塑性应变,随后在 250 °C 下退火 1 h。通过预压缩引入 $\{10\bar{1}2\}$ 拉伸孪晶,形成轧制方向孪晶织构。由于随后的退火导致晶界和孪晶边界的迁移,产生了一种稳定的具有两种织构成分的晶粒结构:切线方向织构和轧制方向织构。这种织构通过激活 $\{10\bar{1}2\}$ 孪晶,促进基底滑移,有效地调节了试样弯曲时的外区拉伸变形,使弯曲成形性提高了约 41%。WANG L F 等^[24]在不同应变(1.58%、3.32%、5.38% 和 7.78%)下对 AZ31 镁合金进行了 TD 方向的预压缩变形,随后在 450 °C 下退火 2 h,通过在室温下压缩引入拉伸孪晶并通过退火诱导静态再结晶。发现由于拉伸孪晶的作用,晶粒的 c 轴从法向(ND)向横向(TD)倾斜,但是 TD 旋转织构由新的再结晶晶粒继承。随着预应变水平的增加,晶粒尺寸逐渐增大,屈服强度逐渐降低,Erishen 值(IE)从 2.83 mm 提高到 3.60、5.09、5.43 和 5.74 mm,分别增加了 27.2%、79.8%、91.8% 和 102.8%。

预压缩产生的拉伸孪晶组织在沿特定方向加载时会发生退孪生现象^[26]。LONG Z X 等^[27]对轧制态 AZ31 镁合金沿 TD 方向进行预压缩时发现,预压缩后的试样在 ND 方向压缩时,由于退孪生机制的发生导致屈服强度大幅降低,由初始板材的 176 MPa 降低至 46 MPa,退火后试样的屈服强度虽有所改善,但也仅提高至 65 MPa。退孪生无需形核,启动应力也极低,并且屈服机制从棱柱滑移到基底滑移的变化,导致以退孪生变形为主的塑性变形试样的屈服强度极低^[9,28]。单一拉伸孪晶结构并不能全面提高镁合金各个方向上的强度以及韧性,甚至还会显著弱化某一特定方向上的力学性能。

最近有研究发现,与单步压缩引起的单向拉伸孪晶相比,多步压缩诱导的多向拉伸孪晶可以进一步提高镁合金的拉伸性能^[10,29]。HE W J 等^[29]通过对轧制态 AZ31 镁合金经多向预压缩后(沿 TD 压缩后再沿 RD 压缩),在 260 °C 退火 1 h 后发现,在单向压缩后退火的镁合金试样中,许多晶粒的 c 轴与 TD 方向一致,而经多向压缩后的镁合金试样,其具有的两个预压缩步骤,导致有些 c 轴接近 TD,有些 c 轴接近 RD,见图 1。由于多向孪晶区的织构比单向孪晶区的织构更易于激活拉伸孪晶,因此与原试样相比,多向压缩后退火的试件,IE 提高了 50%。而在再结晶过程中,新晶粒的形核可

能优先发生在两个不同拉伸孪晶变体相交的位置^[30]。此外,孪晶-孪晶交叉点将形成包含镁合金中许多边界位错的边界^[31]。因此,这些孪晶-孪晶相交区通常具有较高的储能以促进再结晶晶粒的形核。CHENG W L 等^[10]采用两种多向预压缩方法(TD-RD 压缩以及 RD-TD 压缩),通过对 AZ31 镁合金板材进行预压缩处理引入拉伸孪晶和孪晶交叉点,并利用退火处理诱导后续的静态再结晶,比较了两种不同路径多向预压缩镁合金板材的拉伸性能。发现在 TD-RD 预压缩后,可以观察到孪晶片层和孪晶-孪晶交叉点,然而在 450 °C 退火 2 h 后,TD-RD 预压缩的镁合金试样在微观结构中未发现孪晶的等轴晶粒,这表明静态再结晶行为已经发生。大部分晶粒由 RD 向 ND 旋转,但仍有部分晶粒位于 RD 取向附近,由于晶粒的旋转,基底织构的最大强度减弱,IE 值增加到初始试样的 112.4%。因此,基底织构弱化比晶粒长大对改善镁合金板材的拉伸性能起着更重要的作用。

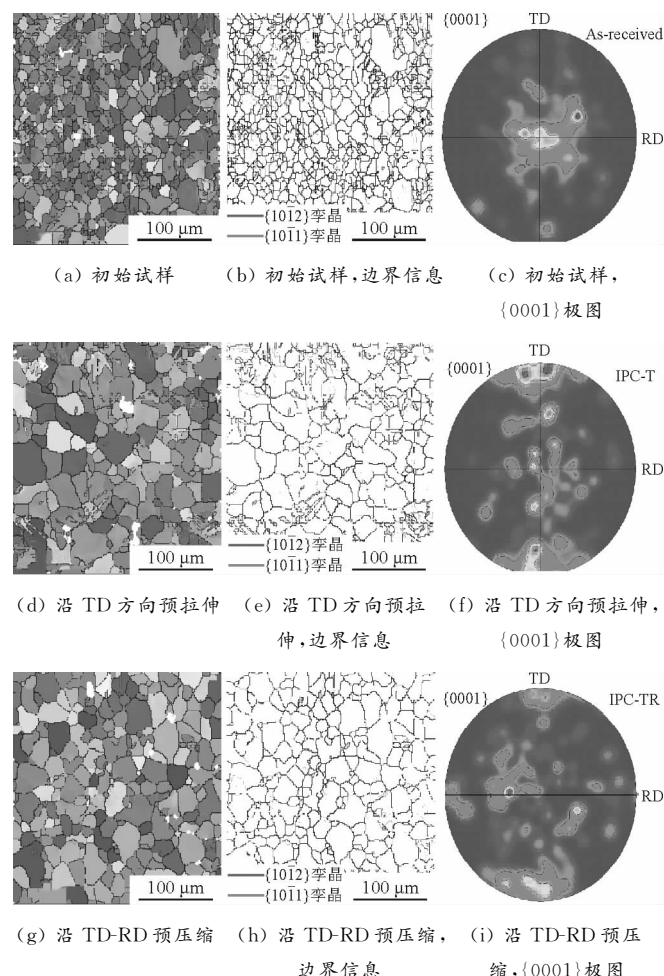


图 1 AZ31 镁合金压缩后通过 EBSD 测量的晶粒取向图、边界信息图和 $\{0001\}$ 极图^[29]

Fig.1 EBSD measurements showing the orientation maps, boundary information and $\{0001\}$ pole figures of AZ31 magnesium alloy

2 预拉伸与退火处理

预拉伸工艺大多是沿着板材轧制方向进行拉伸处理,预拉伸的试样晶粒显著粗化且基面织构强度降低,虽然粗大晶粒导致其伸长率降低,但由于粗大晶粒能够储存更多的位错,从而使试样具有更高的塑性变形能力^[32]。

HABIBNEJAD K M 等^[33]发现 AZ31 镁合金经不同应变预拉伸后的试样在退火处理中表现也不尽相同。应变较小的试样在低温短时退火中并没有发生再结晶和晶粒形状变化。随着退火温度以及退火时间增加,出现了一些异常的晶粒长大,并发生再结晶现象。相反,应变较大的试样可以在较短的退火时间激活再

结晶,并且退火温度越高,越早发生晶粒长大现象,平均晶粒尺寸也不断增大。较长时间的退火可以略微改善试样的伸长率,但较高的退火温度也会导致材料的伸长率显著降低。GUO F L 等^[34]对热轧态 AZ31 镁合金沿 TD 方向预拉伸和后续退火处理中发现,可以在伸长率略微降低的同时(13.0%降至 12.4%)使屈服强度提高 70 MPa。图 2 为 AZ31 镁合金的位错结构。可以看出,在沿 TD 方向的预拉伸及退火处理同样产生了许多位错壁(见图 2c)和低位错区域(见图 2b),位错密度较低区域可以减少新的复合位错与原位错在再拉伸过程中的相互作用,最终使试样具有较高的可塑性。因此预拉伸及退火处理制备的镁合金板材具有更高的塑性成形能力。

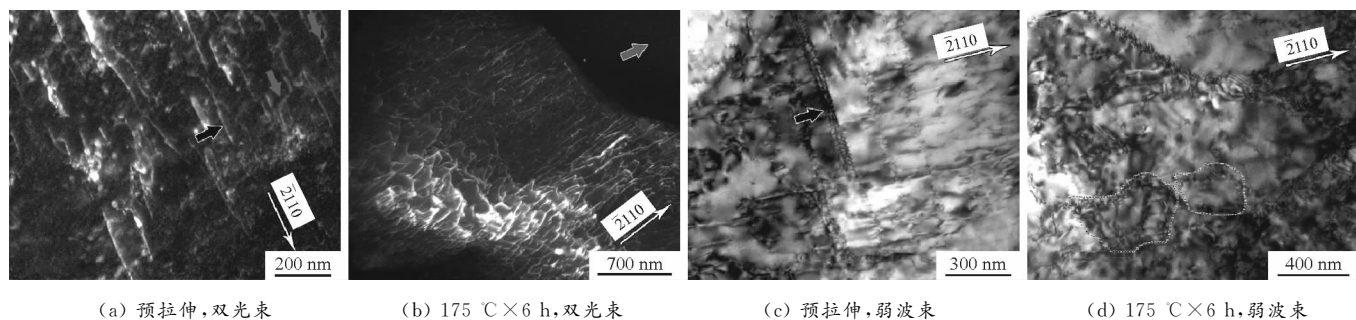


图 2 经预拉伸及 175 °C×6 h 退火后 AZ31 镁合金 TEM 位错结构^[34]

Fig.2 TEM images of dislocation structures in the sample pre-tensioned and annealed at 175 °C for 6 h^[34]

在变形镁合金中,沿 c 轴预拉伸可以产生拉伸孪晶^[11,35~38]。WANG L F 等^[39]对挤压态 AZ31 镁合金棒材沿挤压方向预拉伸 1%、3%、5%,随后在 200 °C 下退火 2 h。观察预拉伸及退火后试样的微观组织,没有发现孪晶,所有微观结构均由均匀的等轴晶组成。HE J 等^[40]发现,当预拉伸达到 7% 时,预拉伸试样产生一定数量的孪晶,主要是由于在拉伸过程中,沿挤压方向基面取向较弱的晶粒逐渐消失。孪晶可以重新定位晶粒的孪晶区并协调变形织构的结果,有助于织构的演变。在再结晶退火过程中,孪晶片层能促进再结晶形核,获得更均匀的晶粒,同时削弱了织构^[38~40]。因此,通过预拉伸及退火处理改善 AZ31 镁合金板材的塑性成形能力主要归因于静态再结晶和动态再结晶导致的晶粒长大以及织构弱化。

3 预扭转与退火处理

在变形镁合金中引入简单剪切应变是一种很有前景的织构控制方法^[41,42]。扭转是一种为试样提供简单剪切应变的有效途径^[43~46]。在拉伸或压缩过程中,主应力以及主应变在变形过程中不会改变其方向,然而,在扭转情况下,剪切应变的方向随着变形而改变,从而使杆件材料产生梯度应变,这种梯度应变在扭转和退火

过程中会引入梯度的组织分布。

王军等^[47]在室温下对轧制态 AZ31 镁合金棒材进行预扭转处理,随后在 300 °C 下退火 1 h,得到了组织从中心位置至边缘位置呈梯度分布的试样,且两个区域的微观结构中都存在拉伸孪晶。随着应变增大,在同一位置的孪晶体积分数越大,屈服强度也大幅提升,由初始的 125.3 MPa 增大到 192 MPa。研究还发现,260°扭转再经退火处理后,能够有效细化晶粒并弱化织构,在屈服强度和抗拉强度基本保持不变的条件下,其伸长率由初始态的 13.8% 提高到 25.9%,塑性约为初始试样的 2 倍。

SONG B 等^[48]也采用了类似的预处理技术,对挤压态 AZ31 镁合金进行了自由端扭转变形,在试样表面上产生 0.31 的剪切应变,随后在 200 °C 下退火 6 h,以及 300 °C 下退火 1 h。研究发现,预扭转可以产生较大的位错硬化效应,提高拉伸屈服强度,同时又能改变挤压织构,软化拉伸屈服强度。预扭至 252° 后,拉伸屈服强度由 171 MPa 显著提高到 234 MPa,静态韧性略有下降(由 42 MJ/m³ 下降到 41 MJ/m³)。退火处理后位错密度明显降低,位错硬化效应消失,但仍保留扭转变形织构,从而提高了塑性。随着退火温度升高,由于位错的不断去除,初始应变硬化速率逐渐降低,屈服强度

逐渐降低(分别为 172 和 153 MPa),静态韧性逐渐提高(分别为 48 和 50 MJ/m³)。

SONG B 等^[49]采用自由端扭转工艺制备了具有存储位错梯度分布的 AZ31 镁合金棒材。扭转试样在 200 ℃ 和 300 ℃ 下分别退火 6 h 和 1 h。研究发现,扭转变形可以在不损失强度和塑性的前提下消除屈服不对称性。扭转至 252° 时,压缩屈服应力/拉伸屈服应力(CYS/TYS)从 0.52 增加到 0.93。由于高剪切应变可以产生高的储能,提高{10 $\bar{1}$ 2}孪晶界的热迁移率,降低再结晶温度,促进形核,致使变形试样在 200 ℃ 退火后,中心位置保持变形组织,而其他位置发生静态再结晶;在 300 ℃ 退火后,所有位置均发生了静态再结晶现象,平均晶粒尺寸从中心到边缘逐渐减小,见图 3。虽保持扭转变形组织但产生再结晶现象,CYS/TYS 逐渐降低,随着退火温度升高到 300 ℃,CYS/TYS 呈持续下降趋势(降至 0.72)。因此扭转变形不但可以用来制造具有梯度结构的镁合金,还可以显著降低其各向异性^[48~51]。

在预扭转处理中应变路径效应对镁合金影响不大,但在扭转过程中,初始取向不同对镁合金微观组织的发展和扭转后的力学性能影响略有差异。WANG J 等^[52]采用挤压态 AZ31 镁合金棒材,制备了纵向平行和垂直于挤压(ED)方向的试样。经预扭转变形后其晶粒取向见图 4。研究发现,纵向平行挤压方向的 AZ31 镁合金试样扭转后,在横截面中出现大量的拉伸孪晶。纵向垂直于挤压方向的 AZ31 镁合金试样扭转后,横截面上产生许多压缩孪晶,而拉伸孪晶较少。两种试样在 300 ℃ 退火 1 h 后,垂直于挤压方向的扭转试样发生完全静态再结晶,而在平行于挤压方向的扭转试样的中心,仍然存在一些粗化的拉伸孪晶,仅在外部完全发生静态再结晶^[53]。虽微观组织不完全相同,但不同预扭转方式结合退火处理仍能够全面提高力学性能,特别是屈服强度和压缩延展性。压缩方向平行挤压方向的试样,预扭转退火后屈服强度由 60 MPa 提高至 95 MPa,压缩方向垂直于挤压方向的试样,预扭转退火后屈服强度由 110 MPa 提高至 123 MPa。此外,两种试样的压缩延展性

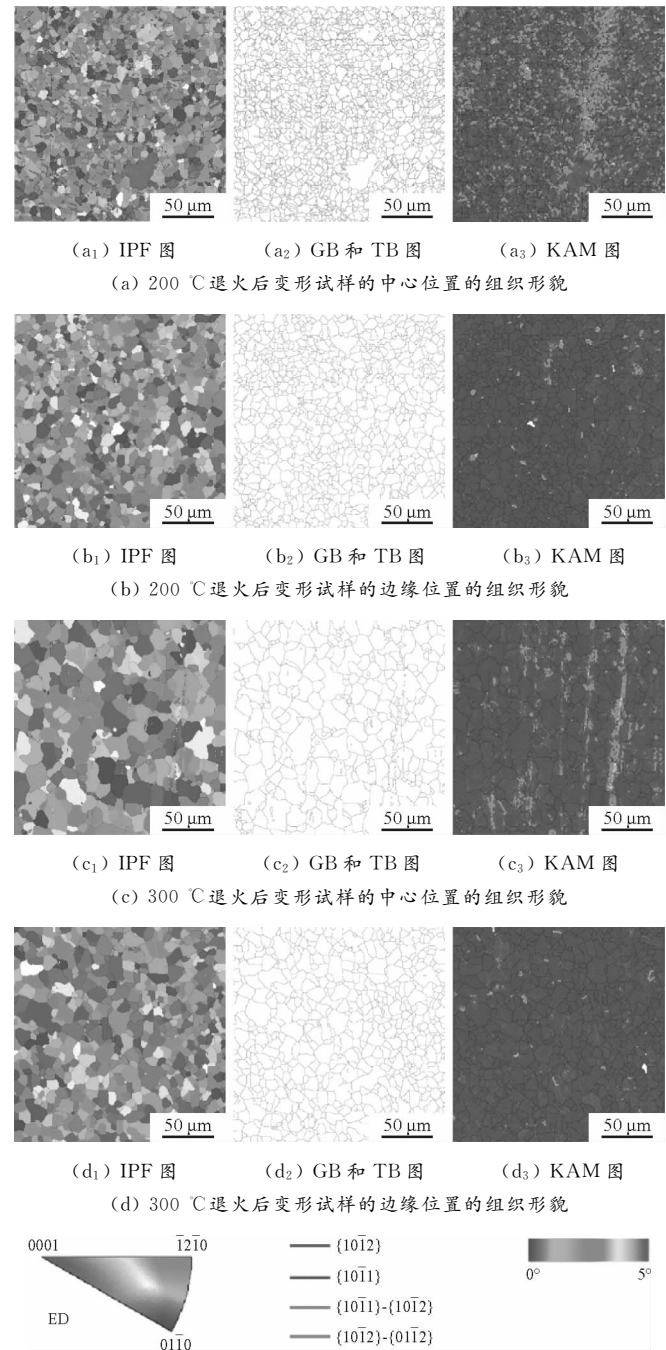


图 3 自由端扭转制备的 AZ31 镁合金不同试样的 EBSD 测量结果^[49]

Fig.3 EBSD maps of various samples of the AZ31 magnesium alloy^[49]

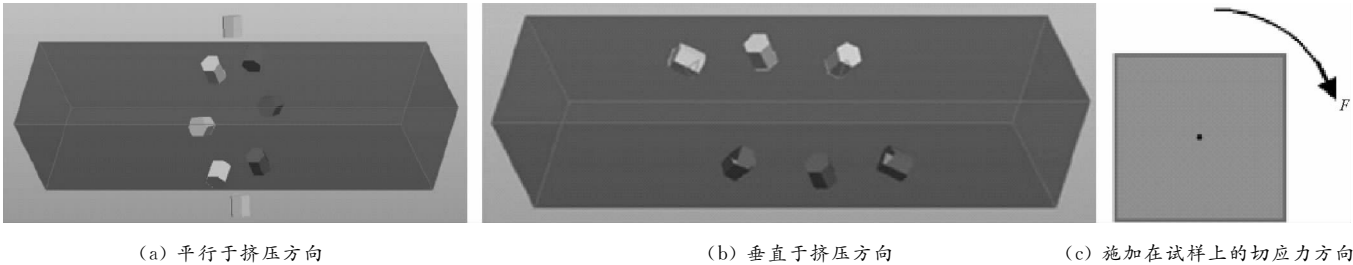


图 4 挤压态 AZ31 镁合金晶粒取向分布示意图^[52]

Fig.4 Schematic diagram of the grain orientation distribution in the extruded AZ31 magnesium alloy^[52]

在两个方向的压缩中都有所提高,对于纵向平行于挤压方向的预扭转试样退火后,在沿 ED 方向压缩时,延展性从 17.8% 增加到 25.4%。对于纵向垂直于挤压方向的预扭转试样退火后,在沿垂直于 ED 方向的压缩中,伸长率从 18.5% 增加到 29.4%。

4 结 语

预变形及退火处理可有效调控镁合金的组织 and 织构,从而改变镁合金的力学性能及塑性加工性能,具有广阔的应用前景。但是目前在此方向的研究尚不够系统和深入,且并没有得出较为实用可以推广的技术方案。现有的预变形与退火处理对镁合金微观结构及力学性能影响的研究中,以下几个方面值得思考。

(1) 利用预变形引入孪晶组织能够有效地改善变形镁合金轧制、挤压性能以及改善镁合金的各向异性,主要归因于晶粒细化以及织构弱化,但对于具体控制变形镁合金的变形条件,从而进一步确定镁合金中细小孪晶层的设计问题,需要研究。

(2) 退火处理能够使变形镁合金发生静态再结晶现象,但较长的退火时间会产生较大尺寸的晶粒,尚未系统地研究热变形后立即发生粗化的速率。

(3) 多向拉伸孪晶可以改善镁合金的微观组织及力学性能,因此可以开展 2 种或 3 种预变形方法结合后续退火处理对镁合金微观结构及力学性能影响的研究。

(4) 由于孪晶是层状结构,孪晶镁合金的晶粒形态与等轴晶粒镁合金的晶粒形态不同,然而到目前为止,屈服强度与孪晶结构之间的定量关系尚不清楚。

(5) 现有研究表明,镁合金通过退火处理能够抑制 $\{10\bar{1}2\}$ 孪晶对织构的影响^[53],但退火后孪晶结构稳定性的研究并没有引起足够的重视。

参 考 文 献

- [1] ZHANG F, HAO M, WANG F C, et al. Role of $\{10\bar{1}2\}$ twinning and detwinning in the shock hardening behavior of rolled Mg-3Al-1Zn alloy[J]. Scripta Materialia, 2012, 67(12): 951-954.
- [2] DUDAMELL N V, ULACIA I, GÁLVEZ F, et al. Twinning and grain subdivision during dynamic deformation of α -Mg AZ31 sheet alloy at room temperature[J]. Acta Mater., 2011, 59(18): 6 949-6 962.
- [3] SANDLOBES S, ZAEFFERER S, SCHESTAKOW I, et al. On the role of non-basal deformation mechanisms for the ductility of Mg and Mg-Y alloys[J]. Acta Materialia, 2011, 59(2): 429-439.
- [4] BETTLES C, GIBSON M. Current wrought magnesium alloys: Strengths and weaknesses[J]. Scripta Materialia, 2005, 57(5): 46-49.
- [5] JIANG S, LIU T, LU L, et al. Atomic motion in Mg-3Al-1Zn during twinning deformation[J]. Scripta Materialia, 2010, 62(8): 556-559.

- [6] KIM H L, BANG W K, CHANG Y W. Deformation behavior of as-rolled and strip-cast AZ31 magnesium alloy sheets[J]. Material Science & Engineering, 2011, A528(16-17): 5 356-5 365.
- [7] LV C, LIU T, LIU D, et al. Effect of heat treatment on tension-compression yield asymmetry of AZ80 magnesium alloy[J]. Materials & Design, 2012, 33(1): 529-533.
- [8] REED-HILL R E, ROBERTSON W D. The crystallographic characteristics of fracture in magnesium single crystals[J]. Acta Metallurgica, 1957, 5(12): 728-737.
- [9] PARK S H, HONG S G, LEE C S. Enhanced stretch formability of rolled Mg-3Al-1Zn alloy at room temperature by initial $\{10\bar{1}2\}$ twins[J]. Material Science & Engineering, 2013, A578(20): 271-276.
- [10] CHENG W L, WANG L, ZHANG H, et al. Enhanced stretch formability of AZ31 magnesium alloy thin sheet by pre-crossed twinning lamellas induced static recrystallizations[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 254: 302-309.
- [11] SONG B, XIN R, CHEN G, et al. Improving tensile and compressive properties of magnesium alloy plates by pre-cold rolling[J]. Scripta Materialia, 2012, 66(12): 1 061-1 064.
- [12] AGNEW S R, HORTON J A, LILLO T M, et al. Enhanced ductility in strongly textured magnesium produced by equal channel angular processing[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(3): 337-381.
- [13] CHINO Y, SASSA K, MABUCHI M. Enhancement of tensile ductility of magnesium alloy produced by torsion extrusion[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(4): 399-402.
- [14] ZHANG H, YAN Q Q, LI L X. Microstructures and tensile properties of AZ31 magnesium alloy by continuous extrusion forming process[J]. Materials Science and Engineering, 2008, A486(1-2): 295-299.
- [15] SAMMAN T A, GOTTSTEIN G. Deformation conditions and stability of the basal texture in magnesium[J]. Material Science Forum, 2007, 539: 3 401-3 406.
- [16] DAI Q W, ZHANG D F, CHEN X, et al. On the anisotropic deformation of AZ31 Mg alloy under compression[J]. Mater. Des., 2011, 32: 5 004-5 009.
- [17] DIEM W. Magnesium in different applications[J]. Auto Technology, 2001, 1(1): 40-41.
- [18] BISWAS S, DHINWAL S S, SUWA S. Room-temperature equal channel angular extrusion of pure magnesium[J]. Acta Mater., 2010, 58(9): 3 247-3 261.
- [19] HUANG X, SUZUK K, WATAZU A, et al. Improvement of formability of Mg-Al-Zn alloy sheet at low temperatures using differential speed rolling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 470(1-2): 263-268.
- [20] KIM W J, PARK J D, KIM W Y. Effect of differential speed rolling on microstructure and mechanical properties of an AZ91 magnesium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 460(1-2): 289-293.
- [21] BROWN R E. Magnesium and Its Alloys, Mechanical Engineers' Handbook[M]. England: Wiley, 1960.
- [22] KIM Y J, LEE J U, KIM S H, et al. Grain size effect on twinning and annealing behaviors of rolled magnesium alloy with bimodal

- structure[J]. *Materials Science & Engineering*, 2019, A754: 38-45.
- [23] OIKE J, OHYAMA R. Geometrical criterion for the activation of prismatic slip in AZ61 Mg alloy sheets deformed at room temperature[J]. *Acta Mater.*, 2005, 53: 1 963-1 972.
- [24] WANG L F, ZHANG Z Y, CAO M, et al. Effect of pre-strain levels and high temperature annealing on the formability of AZ31 Mg alloy thin sheet during stretch deformation[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(8): 86 595-86 599.
- [25] LEE J U, KIM S H, KIM Y J, et al. Improvement in bending formability of rolled magnesium alloy through precompression and subsequent annealing [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 787: 519-526.
- [26] PROUST G, CARLOS N. Modeling the effect of twinning and detwinning during strain-path changes of magnesium alloy AZ31[J]. *Int. J. Plast.*, 2009, 25(5): 861-870
- [27] LONG Z X, LIU T, HE J, et al. The effects of pre-strain and subsequent annealing on the yielding behavior in a rolled magnesium alloy AZ31[J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2015, 24(1): 16-23.
- [28] PARK S H, HONG S G, LEE C S. In-plane anisotropic deformation behavior of rolled Mg-3Al-1Zn alloy by initial $\{10\bar{1}2\}$ twins [J]. *Material Science and Engineering*, 2013, A570: 149-163.
- [29] HE W J, ZENG Q H, YU H H, et al. Improving the room temperature stretch formability of a Mg alloy thin sheet by pre-twinning[J]. *Materials Science & Engineering*, 2016, A655: 1-8.
- [30] JAIN A, AGENW S R. Modeling the temperature dependent effect of twinning on the behavior of magnesium alloy AZ31B sheet[J]. *Material Science and Engineering*, 2007, A462(1-2): 29-36.
- [31] YU Q, WANG J, JIANG Y, et al. Twin-twin interactions in magnesium[J]. *Acta Mater.*, 2014, 77: 28-42.
- [32] ZHANG H, HUANG G, W L, et al. Improved formability of Mg-3Al-1Zn alloy by pre-stretching and annealing [J]. *Scripta Materialia*, 2012, 67(5): 495-498.
- [33] HABIBNEJAD K M, JAIN M K, ZUROB H S, et al. Modelling of uniaxially pre-strained and annealed AZ31 magnesium sheet based on microstructural considerations[J]. *Acta Mater.*, 2016, 113: 155-169.
- [34] GUO F L, LUO X, XIN Y C, et al. Obtaining high strength and high plasticity in a Mg-3Al-1Zn plate using pre-tension and annealing treatments[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 704: 406-412.
- [35] GEHRMANN R, FROMMERT M M, GUNTER G. Texture effects on plastic deformation of magnesium[J]. *Materials Science and Engineering*, 2005, A395(1-2): 338-349.
- [36] HONG S G, PARK S H, LEE C S. Role of $\{10\bar{1}2\}$ twinning characteristics in the deformation behavior of a polycrystalline magnesium alloy[J]. *Acta Mater.*, 2010, 58(18): 5 873-5 885.
- [37] HE J J, JIANG B, ZHANG J, et al. Enhancement of mechanical properties and corrosion resistance of magnesium alloy sheet by pre-straining and annealing[J]. *Material Science & Engineering*, 2015, 647(28): 216-221.
- [38] 李萧, 杨平, 孟利, 等. AZ31 镁合金中拉伸孪晶静态再结晶的分析[J]. *金属学报*, 2010, 46(2): 147-154.
- [39] WANG L, HUANG G, QUAN Q, et al. The effect of twinning and detwinning on the mechanical property of AZ31 extruded magnesium alloy during strain-path changes[J]. *Materials & Design*, 2014, 63: 177-184.
- [40] HE J, JIANG B, YANG Q, et al. Influence of pre-hardening on microstructure evolution and mechanical behavior of AZ31 magnesium alloy sheet[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 621: 301-306.
- [41] ZHANG H, HUANG G S, WANG L F, et al. Improved ductility of magnesium alloys by a simple shear process followed by annealing[J]. *Scripta Materialia*, 2013, 69(1): 49-52.
- [42] KANG J Y, BACROIX B, BRENNER R. Evolution of microstructure and texture during planar simple shear of magnesium alloy[J]. *Scr. Mater.*, 2012, 66(9): 654-657.
- [43] ZHANG J X, YU Q, JIANG Y Y, et al. An experimental study of cyclic deformation of extruded AZ61A magnesium alloy[J]. *Int. J. Plast.*, 2011, 27: 768-787.
- [44] GUO X Q, WU W, WU P D, et al. On the swift effect and twinning in a rolled magnesium alloy under free-end torsion[J]. *Scr. Mater.*, 2013, 69: 319-322.
- [45] WANG H, WU Y, WU P D, et al. Numerical analysis of large strain simple shear and fixed-end torsion of HCP polycrystals[J]. *Comput. Mater. Con.*, 2010, 503: 1-30.
- [46] WU P D, WANG H, NEALE K W. On the large strain torsion of hcp polycrystals[J]. *Int. J. Appl. Mech.*, 2012 (4): 24-27.
- [47] 王军, 蒋莉萍, 肖振宇, 等. 扭转变形对 AZ31 镁合金组织及力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2016(23): 172-175.
- [48] SONG B, GUO N, XIN R L, et al. Strengthening and toughening of extruded magnesium alloy rods by combining pre-torsion deformation with subsequent annealing[J]. *Materials Science and Engineering*, 2016, A650: 300-304.
- [49] SONG B, PAN H, CHAI L, et al. Evolution of gradient microstructure in an extruded AZ31 rod during torsion and annealing and its effects on mechanical properties[J]. *Material Science & Engineering*, 2017, A689(24): 78-88.
- [50] GUO N, SONG B, GUO C F, et al. Improving tensile and compressive properties of magnesium alloy rods via a simple pre-torsion deformation[J]. *Mater. Des.*, 2015, 83: 270-275.
- [51] SONG B, ZHAO H, CHAI L, et al. Preparation and characterization of Mg alloy rods with gradient microstructure by torsion deformation[J]. *Met. Mater. Int.*, 2016(22): 887-896.
- [52] WANG J, ZHANG D X, LI Y, et al. Effect of initial orientation on the microstructure and mechanical properties of textured AZ31 Mg alloy during torsion and annealing[J]. *Mater. Des.*, 2015, 86 (5): 526-535.
- [53] PARK S H, LEE G H, HUH Y H, et al. Enhancing the effect of texture control using $\{10\bar{1}2\}$ twins by retarding detwinning activity in rolled Mg-3Al-1Zn alloy[J]. *Scr. Mater.*, 2013, 69: 797-800.

(编辑:张正贺)