

AZ31 镁合金的织构对其力学性能的影响

唐伟琴, 张少睿, 范晓慧, 李大永, 彭颖红

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 利用电子背散射衍射(EBSD)取向成像技术, 分析 AZ31 镁合金热挤压棒材和轧制薄板的织构特点; 对具有不同初始织构的镁合金棒材和薄板进行力学性能分析, 并从织构角度分析棒材的拉压不对称性和薄板的力学各向异性。结果表明: 挤压镁合金棒材具有主要以(0001)基面平行于挤压方向的基面纤维织构, 存在严重的拉压不对称性, 其原因在于压缩时的主要变形方式为 $\{10\bar{1}2\}<10\bar{1}1>$ 孪生; 热轧镁合金薄板具有主要以(0001)基面平行于轧面的强板织构, 具有显著的力学性能各向异性, 其原因在于拉伸时不同方向的基面滑移 Schmid 因子不同。

关键词: AZ31 镁合金; 织构; 力学性能

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

Texture and its effect on mechanical properties of AZ31 magnesium alloy

TANG Wei-qin, ZHANG Shao-rui, FAN Xiao-hui, LI Da-yong, PENG Ying-hong

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The textures of both as-extruded rod and as-rolled sheet of AZ31 magnesium alloys were investigated by the electron back scattering diffraction (EBSD) technique. The influences of the initial textures on the mechanical properties in two different magnesium alloy behaviors, extruded rod and rolled sheet, were examined. The tensile-compressive asymmetry of extruded rod and mechanical anisotropy of rolled sheet were studied in the sight of texture. The EBSD results show that the major texture of as-extruded AZ31 rod is the fiber texture with (0001) basal plane parallel to the extrusion direction (ED), while the major texture of as-rolled AZ31 sheet is the basal texture with (0001) basal plane parallel to the rolling surface. The mechanical property tests show that the activity of $\{10\bar{1}2\}<10\bar{1}1>$ twinning during compression exerts significant effect on the tensile-compressive yield stress and elongation rate in an asymmetrical way. The different Schmid factors of basal slip systems in different directions lead to the in-plane anisotropy during tension.

Key words: AZ31 magnesium alloys; texture; mechanical property

镁合金具有低密度、高强度、易回收等优点, 近年来作为轻质结构材料被逐渐应用于汽车、交通、电子及其他民用产品等领域^[1]。变形镁合金通常通过挤压、轧制、锻造等变形方式来改善合金的结构, 提高镁合金的性能, 但镁合金在变形后会在合金内产生择优取向即织构。大量研究表明^[2-9], 镁合金织构的存在对镁合金的性能有着显著影响。因此, 研究镁合金在

变形过程中产生的织构, 明确织构产生的原因及织构对合金性能的影响, 就可以对镁合金的变形加工提供理论依据, 达到控制织构的目的, 用以改善合金的性能以适应结构件的使用要求。

传统研究织构的方法主要有 X 射线衍射分析和中子衍射分析, 它们得到的是材料宏观上的晶体择优取向的平均结果。而新兴的电子背散射衍射技术(EBSD)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50821003); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB708611); 教育部新世纪优秀人才计划资助项目(NCET-07-0545); 上海市科委资助项目(07XD14016)

收稿日期: 2009-04-14; **修订日期:** 2009-12-08

通信作者: 彭颖红, 教授, 博士; 电话: 021-34206312; E-mail: yhpeng@sjtu.edu.cn

能在得到材料宏观择优取向的同时,得到单个晶粒的取向以及相邻晶粒的取向差异^[10],为镁合金织构研究提供一种有力的手段。

目前,关于镁合金棒材和板材在加工过程中织构的演化规律及其对力学性能影响的研究日益增多。尹树明等^[11]对 AZ31D 镁合金挤压棒材的拉压不对称性以及拉伸和压缩变形过程中的组织演化进行系统研究及分析。汪凌云等^[12]对 AZ31B 板材在加工过程中织构的演变规律以及对板材力学性能各向异性的影响进行了研究。CHINO 等^[13]对 AZ31 挤压棒材在不同温度下进行了单向拉伸和压缩实验研究,并以 $\{10\bar{1}2\}$ $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ 孪生为因素分析拉压不对称性。BOHLEN 等^[14]通过对 6 种镁合金板材分别进行 3 个不同方向(轧向、横向、45°)的单向拉伸性能研究,得出镁合金板材力学性能各向异性的结论,并从织构角度分析其各向异性。由此可见,织构的存在及对力学性能的影响已成为热点。

在此,本文作者以热挤压 AZ31 镁合金棒材和热轧 AZ31 镁合金薄板为对象,通过 EBSD 分析技术,分析在塑性变形过程中形成的织构;通过对挤压棒材的室温单向拉伸和单向压缩性能测试,得出镁合金拉压不对称性的结论,并从织构角度分析其机理;通过对轧制薄板沿 3 个不同方向的室温单向拉伸实验,研究镁合金的各向异性性能。

1 实验

实验材料为 $d100\text{ mm}$ 的 AZ31 镁合金铸锭和厚度为 0.99 mm 的 AZ31 镁合金轧制薄板,主要成分如表 1 所列。将铸锭分别挤压成挤压比为 6.25:1 和 25:1 的圆棒,挤压工艺参数:挤压筒温度 $440\text{ }^{\circ}\text{C}$,模具温度 $410\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 AZ31 镁合金的化学成分

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

Al	Zn	Mn	Si	Ni	Fe	Mg
3.01	0.9	0.5	0.04	0.005	0.005	Bal.

用电火花切割出铸锭、挤压棒和轧制板上用于测量织构的样品,用 AC-2 电解液进行电解抛光,在 Zeiss Suppa 55 场发射扫描电镜上进行 EBSD 实验,所用 EBSD 附件为丹麦 HKL 公司的 Channel 5.0。

将挤压比为 25:1 的棒材加工成标准拉伸、压缩样品,加载方向均为挤压方向;在轧制板材上分别沿着与轧向(RD)成 0° 、 45° 和 90° 的 3 个方向切割拉伸样品。室温拉伸、压缩实验在 Zwick T₁-FR020TN.A50 型电子万能材料实验机上完成,初始加载速度为 0.5 mm/min ;当材料拉伸至 $R_{p0.2}$ 时,加载速度提升为 2.5 mm/min 。

2 结果与分析

2.1 镁合金的织构组分和演变规律

2.1.1 纤维织构

图 1 所示为 AZ31 镁合金的铸态组织。由图 1 可看出,铸态镁合金初始取向比较散漫,平均晶粒尺寸为 $135.58\text{ }\mu\text{m}$ 。

图 2 所示为挤压比为 6.25:1 的平行于挤压方向的组织。由图 2 可以看出,挤压样品基本上为沿挤压轴向的细长条晶两侧分布的等轴细晶的混晶组织,平均晶粒尺寸为 $8.28\text{ }\mu\text{m}$,而细晶粒仅为 $5\text{ }\mu\text{m}$,大晶粒则达到 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。由此可知,在热挤压过程中出现再结晶。图 2(a)的取向成像图则表明,挤压后 AZ31 镁合金的择优取向,图中每种颜色代表一个晶体学取向,颜色相近则晶粒的取向相近。由图 2(b)得知,挤压后大部分晶粒的(0001)基面平行于挤压方向。

图 3 所示为挤压比为 25:1 的平行于挤压方向的组织。由图 3 可看出,挤压样品仍旧为沿细长条晶两侧分布的等轴细晶的混晶组织,平均晶粒尺寸为 $7.41\text{ }\mu\text{m}$ 。与挤压比为 6.25:1 的相比,织构漫散度更小,主要织构的晶粒取向沿挤压方向(ED)的漫散度在 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的范围内,而沿横向(TD)的漫散度则在 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的范围内。

由以上分析可以得出,随着挤压比的增大,镁合金逐渐形成纤维织构,即{0001}晶面和 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 晶向平行于挤压轴,合金的晶粒得到细化。

图 4 所示为挤压态镁合金在垂直于挤压方向上的取向极图,其基面织构明显低于与挤压方向平行的截面上的织构(如图 3 所示)。由此可见,对于挤压变形,大部分晶粒的基面平行于挤压方向,很少有晶粒的基面垂直于挤压方向。

2.1.2 板织构

图 5 所示为 0.99 mm 厚的 AZ31 镁合金轧制薄板的组织。由图 5 可看出,此薄板组织为均一的等轴晶,其基本特征为(0001)基面平行于轧板表面, $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 晶

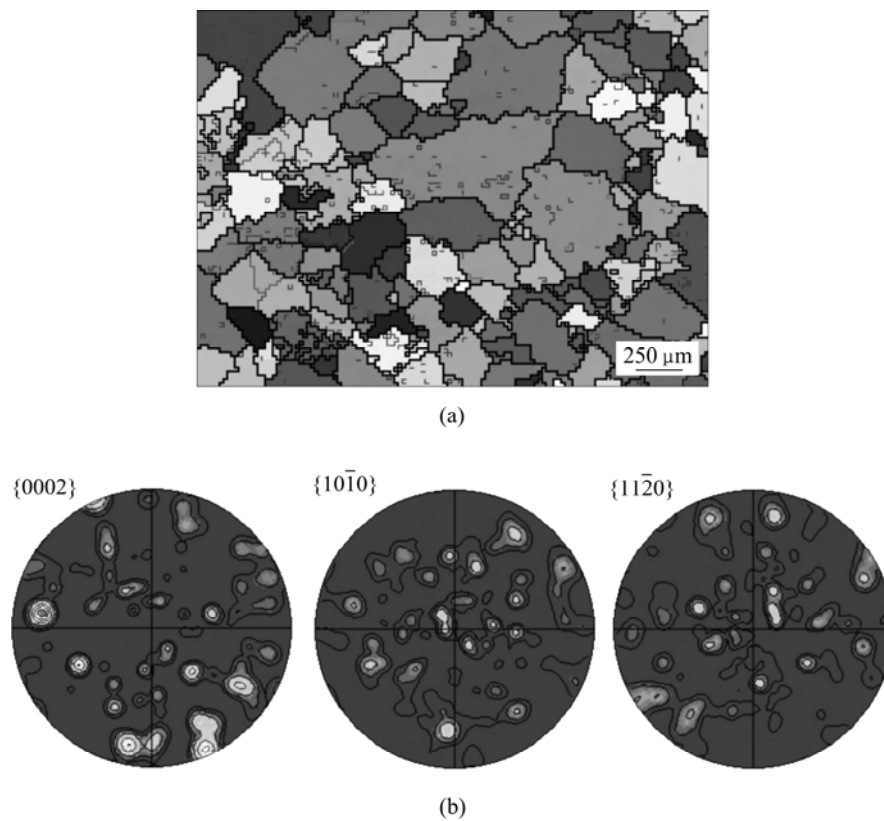


图 1 铸态 AZ31 镁合金的取向成像图和取向极图

Fig.1 Orientation map (a) and $\{0002\}$, $\{10\bar{1}0\}$ and $\{11\bar{2}0\}$ pole figures (b) of as-cast AZ31 magnesium alloy

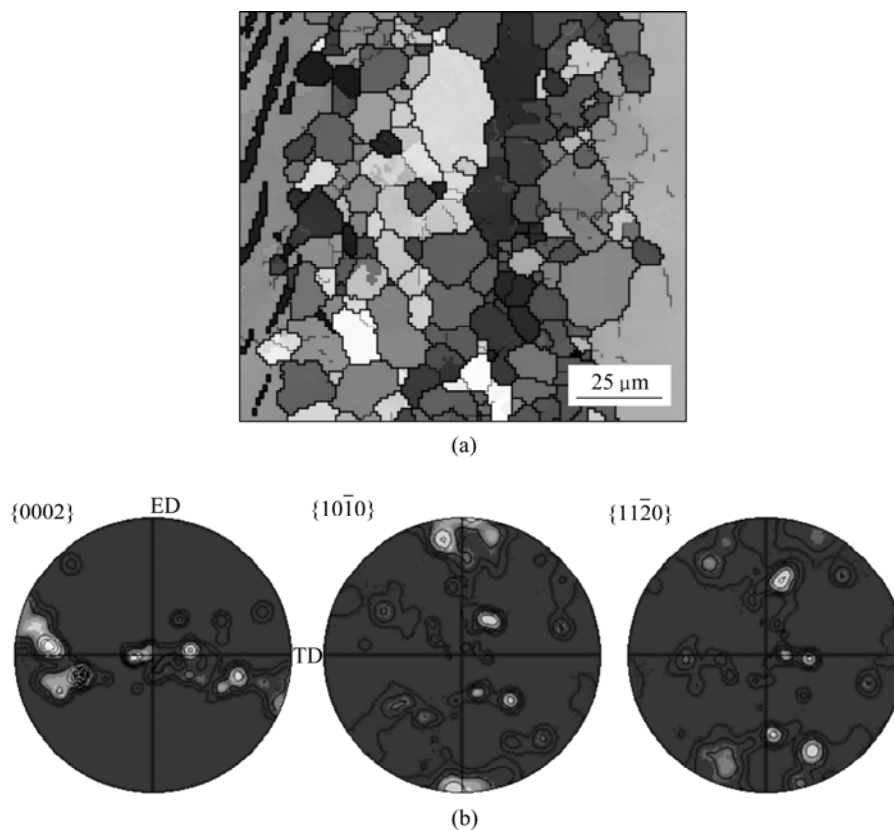


图 2 热挤压 AZ31 镁合金的取向成像图和取向极图(挤压比为 6.25:1)

Fig.2 Orientation map (a) and $\{0002\}$, $\{10\bar{1}0\}$ and $\{11\bar{2}0\}$ pole figures (b) of extruded AZ31 magnesium alloy with extrusion ratio of 6.25:1

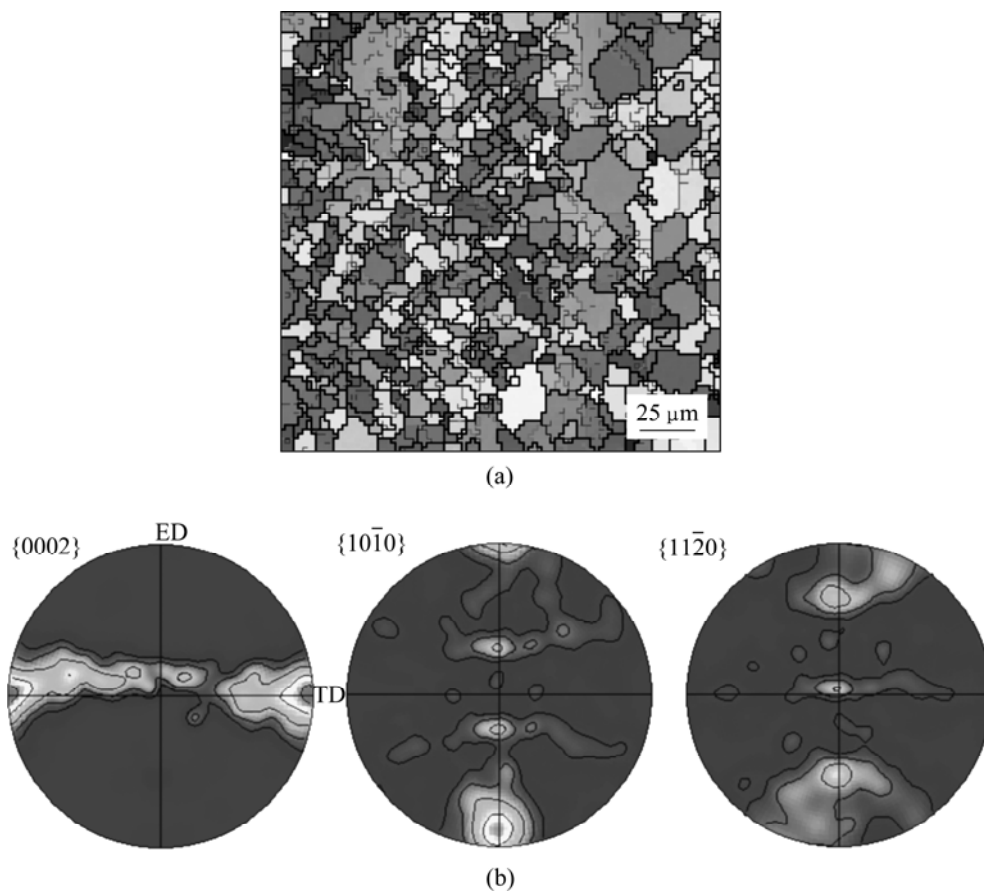


图 3 热挤压 AZ31 镁合金的取向成像图取向极图(挤压比为 25:1)

Fig.3 Orientation map (a) and $\{0002\}$, $\{10\bar{1}0\}$ and $\{11\bar{2}0\}$ pole figures (b) of extruded AZ31 magnesium alloy with extrusion ratio of 25:1

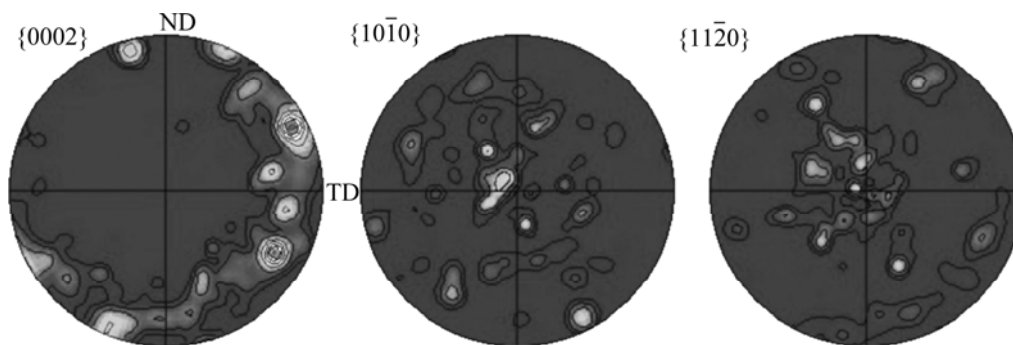


图 4 热挤压 AZ31 镁合金垂直于挤压方向的取向极图

Fig.4 $\{0002\}$, $\{10\bar{1}0\}$ and $\{11\bar{2}0\}$ pole figures of extruded AZ31 magnesium alloy perpendicular to ED

向平行于轧向。在 $\{0002\}$ 极图中,基面法向沿轧板轧向偏转一定角度。形成这种强的基面织构的原因是:在薄板轧制过程中,大部分晶粒的 c 轴与外力夹角小于 25° ,甚至平行于外力方向,即基面和棱柱面的Schmid因子很小,导致滑移模式难以启动,孪生便成为最主要的塑性变形机制。拉伸孪生 $\{10\bar{1}2\}$ 的结果是

使晶粒的 c 轴平行于轧板法向,从而形成强的基面织构。

2.2 织构对 AZ31 镁合金力学性能的影响

2.2.1 拉伸与压缩不对称性

为了确定织构对挤压 AZ31 镁合金力学性能的影响

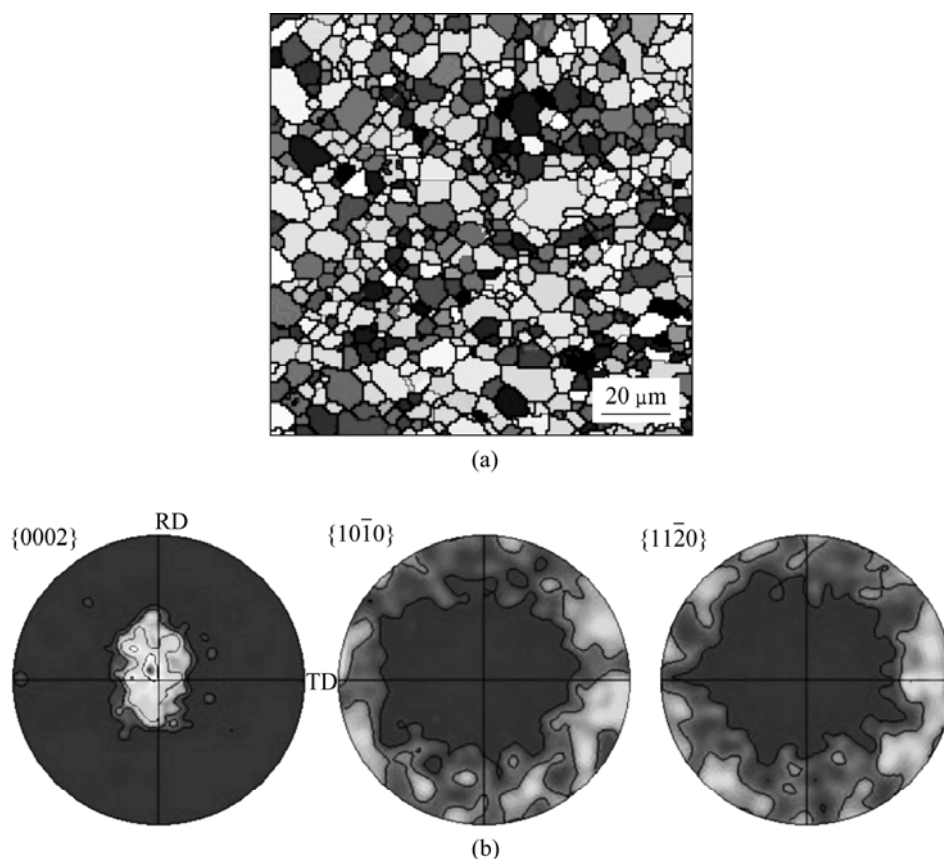


图 5 轧制 AZ31 镁合金薄板的取向成像图和取向极图

Fig.5 Orientation map (a) and $\{0002\}$, $\{10\bar{1}0\}$ and $\{11\bar{2}0\}$ pole figures (b) of as-rolled AZ31 magnesium alloy

响, 对挤压棒沿挤压方向分别进行室温单向拉伸和单向压缩测试, 其应力—应变曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出, 拉伸、压缩屈服表现出明显的不对称性, 拉伸屈服强度约为压缩屈服强度的 2 倍。拉伸屈服后硬化呈现一定的单调性, 而压缩曲线则可分为 3 个阶段: 1) 当应力很小时发生屈服(大约为拉伸时的一半), 接着以较小的硬化率继续塑性变形; 2) 硬化率变大, 应力以较快的速度增长; 3) 硬化率降低。

可从材料的织构来解释拉压不对称性。AZ31 镁合金的轴比(c/a)为 1.624, 根据文献[15], 当 c/a 小于 $\sqrt{3}$ 时, 只有存在沿 c 轴方向的拉应力或垂直于 c 轴方向的压应力分量, $\{10\bar{1}2\}$ 孪生才能发生。由图 3 所示的 AZ31 挤压棒材的极图可以看出, 大多数晶粒的 $\{0001\}$ 基面和 $\{10\bar{1}0\}$ 晶向平行于挤压方向。这种取向使得加载方向与大多数晶粒的 c 轴垂直, 因此, 只有在压缩变形时才能发生 $\{10\bar{1}2\}$ 孪晶。YI 等^[16]认为在拉伸初期以基面 $\langle a \rangle$ 滑移为主, 而 $\{10\bar{1}2\}$ 孪生是压缩时的主要变形方式, 而且基面 $\langle a \rangle$ 滑移的临界分切应力远高于孪生变形, 因此, 单向拉伸的屈服应力远大于单向压缩的。尹树明等^[11]认为, 柱面 $\langle a \rangle$ 滑移是拉伸时的主

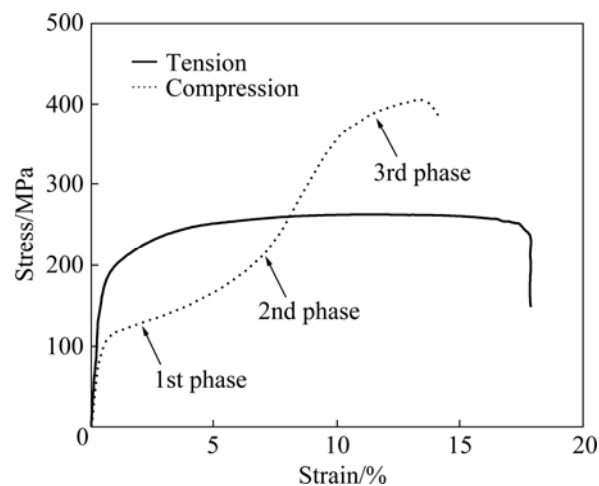


图 6 AZ31 镁合金挤压棒材的单向拉伸、压缩应力—应变曲线

Fig.6 Stress—strain curves in uniaxial tension and compression of magnesium alloy at room temperature

要变形方式, $\{10\bar{1}2\}$ 孪生是压缩时的主要变形方式, 从而导致拉压不对称性。

对于压缩曲线的 3 个阶段,尹树明等^[11]通过分析变形过程中的组织演化得出如下结论:第 1 阶段,主要以 $\{10\bar{1}2\}$ 一次孪生为主,随着孪生的增加,材料不断硬化,随着一次孪生逐渐饱和,硬化速率也逐渐减慢;第 2 阶段,位错急剧增加,并与 $\{10\bar{1}2\}$ 孪晶及二次孪晶的相互作用增强,阻碍位错的运动,使得硬化速率迅速提高;第 3 阶段,位错进一步增加,孪晶与滑移的相互作用增强呈上凸状,硬化速率减慢。YI 等^[16]则认为第 3 阶段硬化速率的减慢是由于 $\langle c+a \rangle$ 滑移开动的。

2.2.2 拉伸各向异性

随机取向的多晶体在宏观上具有各向同性的力学性能,一旦呈现织构,将表现出各向异性。为了确定织构对轧制 AZ31 镁合金薄板力学性能的影响,分别在轧板上沿 3 个方向上截取拉伸试样,以获得不同的初始织构。

表 2 所列轧制镁合金板材沿 3 个不同方向的力学性能,镁板表现出明显的各向异性。对比各个方向的性能指标可以得出:45°方向的屈服强度比其他 2 个方向的屈服强度都低,而其伸长率最大。各向异性主要是由晶体学织构所引起的。对于镁合金,只有存在沿 c 轴方向的拉应力或垂直于 c 轴方向的压应力分量, $\{10\bar{1}2\}$ 孪生才能发生,而 AZ31 镁合金板材的大部分晶粒的 c 轴垂直于板面,当沿着选取的 3 个方向分别拉伸时, $\{10\bar{1}2\}$ 孪生都不能启动,室温下的主要变形方式仅为基面滑移。在 AZ31 镁合金轧板中主要为 (0001) 基面织构,且基面法向部分偏向 45°方向,而大部分晶粒基面法向与 RD 方向夹角的漫散度为 5°~14°,与 TD 方向夹角的漫散度为 0°~5°,如图 5(b) 中 $\{0002\}$ 极图所示。当镁合金分别沿 3 个方向拉伸变形时,45°方向上的基面 Schmid 因子最大,基面滑移系最易启动,其次为 RD 方向,因而,45°方向的屈服强度最低,TD 方向最高;伸长率沿 TD 方向最低,沿 45°方向最高。

表 2 AZ31 镁合金轧制薄板不同取向的拉伸性能
Table 2 Tensile properties of AZ31 magnesium sheet in different orientations

Orientation/(°)	Tensile yield stress/MPa	Ultimate tensile stress/MPa	Elongation/%
0	197.08	269.21	19.98
45	189.22	262.47	27.37
90	210.55	269.47	15.82

3 结论

- 1) AZ31 镁合金棒材在挤压过程中形成纤维织构,其主要织构组分为 $\{0001\} \langle 10\bar{1}0 \rangle$ 平行于挤压方向。
- 2) 轧制 AZ31 镁合金板材形成强的基面织构,其主要织构组分为 $\{0001\} \langle 10\bar{1}0 \rangle$ 平行于轧制方向,其他织构组分相对较弱。
- 3) AZ31 镁合金在挤压、轧制等塑性变形过程中形成强的基面织构,导致严重的拉压不对称性和较强的塑性各向异性。

REFERENCES

[1] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
CHEN Zhen-hua. Wrought magnesium alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[2] KAISER F, LETZIG D, BOHLEN J, STYCINSKI A, HARTIG C, KAINER K U. Anisotropic properties of magnesium sheet AZ31[J]. Materials Science Forum, 2003, 419/422: 315-320.

[3] WU S K, CHOU T S, WANG J Y. The deformation texture in AZ31B magnesium alloy[J]. Materials Science Forum, 2003, 419/422: 527-532.

[4] KIM W J, JEONG H G. Mechanical properties and texture evolution in ECAP processed AZ61 Mg alloys[J]. Materials Science Forum, 2003, 419/422: 201-206.

[5] MABUCHI M, CHINO Y, IWASAKI H. The grain size and texture dependence of tensile properties in extruded Mg-9Al-Zn [J]. Materials Transactions, 2001, 42(7): 1182-1189.

[6] WANG Y N, HUANG J C. Texture analysis in hexagonal materials[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 81: 11-26.

[7] 陈振华, 夏伟军, 程永奇, 傅定发. 镁合金织构与各向异性[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(1): 1-11.
CHEN Zhen-hua, XIA Wei-jun, CHEN Yong-qi, FU Ding-fa. Texture and anisotropy in magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(1): 1-11.

[8] 余 琨, 芮守泰, 王日初, 彭超群, 薛新颖. AZ31 镁合金挤压薄板织构及力学各向异性[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(12): 2127-2131.
YU Kun, RUI Shou-tai, WANG Ri-chu, PENG Chao-qun, XUE Xin-ying. Texture and mechanical anisotropy of AZ31 extruded sheets[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18 (12): 2127-2131.

[9] 尹志民, 何振波, 杨 进, 聂 波. 铝-镁-钕合金板材晶粒结

- 构、组织和力学性能平面各向异性[J]. 轻合金加工技术, 2007, 35(5): 48–52.
- YIN Zhi-min, HE Zhen-bo, YANG Jin, NIE Bo. Grain structure, texture and planar anisotropy of Al-Mg-Sc alloy plate[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2007, 35(5): 48–52.
- [10] 毛卫民. 金属材料的晶体学结构与各向异性[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- MAO Wei-min. Crystallography textures and anisotropy in metals[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [11] 尹树明, 吴世丁, 李守新. 粗晶镁合金 AZ31D 的拉压不对称性和组织演化[J]. 材料研究学报, 2007, 21(增刊): 38–42.
- YIN Shu-ming, WU Shi-ding, LI Shou-xin. Tensile-compressive yield asymmetry and microstructure evolution during deformation of coarse-grained AZ31D magnesium alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2007, 21(s): 38–42.
- [12] 汪凌云, 范永革, 黄光杰, 黄光胜, 潘复生, 刘正宏. AZ31B 镁合金板材的组织[J]. 材料研究学报, 2004, 18 (5): 466–470.
- WANG Lin-yun, FAN Yong-ge, HUANG Guang-jie, HUANG Guang-sheng, PAN Fu-sheng, LIU Zheng-hong. Texture of AZ31B magnesium alloy sheets[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2004, 18(5): 466–470.
- [13] CHINO Y, KIMURA K, HAKAMADA M, MABUCHI M. Mechanical anisotropy due to twinning in an extruded AZ31 Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 485(1/2): 311–317.
- [14] BOHLEN J, NURNBERG M R, SENN J W, LETZIG D, AGNEW S R. The texture and anisotropy of magnesium-zinc-rare earth alloy sheets[J]. Acta Materialia, 2007, 55: 2101–2112.
- [15] 赖祖涵. 金属的晶体缺陷与力学性质[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
- LAI Zu-han. Crystal defect and mechanical property of metals [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988.
- [16] YI S B, DAVIES C H J, BROKMEIER H G, BOLMARO R E, KAINER K U, HOMEYER J. Deformation and texture evolution in AZ31 magnesium alloy during uniaxial loading[J]. Acta Material, 2006, 54: 549–562.

(编辑 杨 华)