

文章编号:1000-582X(2010)10-037-05

变形条件对 AZ31 镁合金冷压缩过程中孪生的影响

刘天模^{a,b},袁晗琦^{a,b},彭天成^{a,b},刘建忠^{a,b}

(重庆大学 a. 材料科学与工程学院; b. 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400045)

摘要: 在新三思拉伸试验机 CMT-5150 上对均匀态 AZ31 镁合金进行室温压缩试验, 研究了在变形量分别为 5%、7.5%、10%、12.5%、15% 以及变形速率分别为 0.5、1、2、4 mm/min 时压缩变形组织中孪晶的形态与分布。结果表明: 在压缩变形初期, 只有少量晶粒内出现孪晶, 孪晶较宽; 而在压缩变形末期, 孪晶几乎分布于所有晶粒中, 且出现了细而长的孪晶。孪晶分数随变形程度的增大而上升。随着变形速率的增大, 孪晶形态变细, 且其密度增大, 试样的屈服强度和抗压强度都升高。

关键词: AZ31 镁合金; 变形量; 变形速率; 孪晶

中图分类号: TG146

文献标志码: A

Effect of deformation conditions on twinning of AZ31 magnesium alloy during compression test

LIU Tian-mo^{a,b}, YUAN Han-qi^{a,b}, PENG Tian-cheng^{a,b}, LIU Jian-zhong^{a,b}

(a. College of Materials Science and Engineering; b. National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Deformation twinning of homogenizing magnesium alloy AZ31 is respectively investigated by compression at room temperature with different deformation degrees from 5% to 15% and different deformation rates from 0.5 to 4mm/min. The results show that thick twins exist in a few amount of crystals at the beginning of the deformation. The thin-long twins and the thick twins appear at the end of the deformation, and they can be observed in almost all crystals. With increasing compressing rates, the yield strength, compression resistance fracture strength and density of twins increased, and twins become thin.

Key words: AZ31; deformation degrees; deformation rates; twinning

21 世纪, 人类科学技术的不断进步, 对人类生存环境产生极大污染, 在此情况之下, 走在世界发展前端的各个国家竭力开发新型材料。镁合金因储量丰富, 阻尼性与电磁屏蔽性能优越, 回收产生的污染较小等优点, 成为材料研究者关注的焦点^[1-3]。然而, 镁合金的密排六方结构却限制了镁合金常温塑性变形能力, 此时该材料只有基面 $\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ 两个独立滑移系^[4-6]。Von Mises 准则表明 5 个独

立滑移系是多晶材料发生无裂纹均匀变形的基本条件^[7]。由此看来, 室温镁合金塑性变形除常见的滑移方式外, 还借助于孪生的方式, 根据镁合金成分与变形条件的不同, 两种方式对材料的影响也不同。

近年来, 国内外专家学者均对镁合金孪生变形机理进行了探究^[8]。北京科技大学胡轶嵩等人针对镁合金孪生的过程, 利用取向成像技术测定试验应变量和试样的孪晶量之间的关联。Yasumasa Chino

收稿日期: 2010-04-20

基金项目: 国家 973 计划项目(2007CB613700)

作者简介: 刘天模(1953-), 男, 重庆大学教授, 博士, 主要研究方向为镁合金变形理论, (Tel)023-65102465; (E-mail)tmliu@cqu.edu.cn.

等研究发现温度的升高会使材料各向力学性能的差异缩小^[9]。M. R. Barnett 等人采用 EBSD, 研究晶粒尺寸在压缩变形中的影响如何^[10]。Libor Helis 等集中研究高温下^[11], 材料的织构演变。Lan Jiang 等^[12]同样采用 EBSD 方法, 研究 $\{10\bar{1}2\}$ 孪晶。

总的来说, 孪生与滑移的发生, 前提条件是达到相应的临界切应力。而孪生的临界切应力却大于后者。因此, 一般条件下, 多是发生滑移而非孪生, 仅在滑移难以发生时, 变形才以孪生方式进行。通过 AZ31 镁合金在室温下的压缩实验, 结合金相观察、应力应变曲线等分析手段, 讨论了冷压缩过程中孪生的产生和作用。

1 实验材料和方案

实验材料为 AZ31 镁合金, 具体名义成分如表 1 所示。从铸态坯料中线切割截取 $\Phi 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的圆柱体试样。进行压缩实验之前, 对试样进行 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 下保温 4 h 均匀化处理。均匀化后的试样, 在新三思拉伸试验机 CMT-5150 上进行室温压缩试验, 变形量分别为 5%、7.5%、10%、12.5%、15%, 变形速率为 2 mm/min; 再于不同的变形速率 0.5、1、2、4 mm/min 对每个试样压缩直到断裂。分别取圆柱体试样的横截面, 经打磨、抛光和腐蚀后, 在 ZEISS 金相显微镜下观察金相组织。所用腐蚀剂为: 苦味酸 5 g + 醋酸 5 g + 蒸馏水 10 mL + 乙醇 100 mL。运用 Photoshop 软件测量试样的孪晶量, 具体操作: 捕获孪晶像素数值, 以及相应的晶粒总的像素数值, 前者数值与后者数值相比, 即为实验所测孪晶量。

表 1 AZ31 镁合金的主要元素质量分数 (wt%)

元素	Al	Zn	Mn	Mg
质量分数%	2.7	0.8	0.23	Bal.

2 实验结果与分析

2.1 变形量对孪晶形貌和分数的影响

图 1(a) 可见, 均匀化处理后试样的组织特点: 晶粒大小较均匀, 平均晶粒尺寸约为 $200 \mu\text{m}$ 。材料基体枝晶经过均匀化工序后, 基本消失, 仔细观察研究发现, 少量颗粒状 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 第二相仍存在于其中。压缩变形量为 5% 时, 试样的组织情况如图 1(b), 经观察, 该图有一些较宽的孪晶分布在晶粒内部, 处于

一个晶粒内部的多条孪晶彼此平行。在压缩实验的进行中, 试样的变形程度在增加, 相应的孪晶数量也在上升。当压缩量增到 12.5% (图 1(e)), 晶粒内部布满孪晶, 这些孪晶形态是细而长的, 彼此之间互相交错。孪生的产生, 一是要达到相应的临界切应力, 二是晶粒位向要利于发生孪生。那么, 孪晶所在处必然是应力高度聚集处。若变形程度小, 则应力聚集少, 孪晶数量也较少。若变形程度增加, 晶界处的紧张状态加剧, 变形过程持续时间的延长也使部分晶粒位向改变, 改变的位向可能利于孪生发生, 由此原因, 压缩时间越长, 变形程度越大, 孪晶数量越多甚至布满晶粒^[13]。一般称原始孪晶内再产生的孪晶为二次孪晶。本实验中没有观察到明显的二次孪晶。

对镁合金孪生的研究, 首先提到它的分类, 通常常温变形后的孪晶分为 $\{10\bar{1}2\}$ 孪生和 $\{10\bar{1}1\}$ 孪生。已知孪晶的发生实质是晶体内部原子的切变过程, 不同的孪生过程导致孪晶之间分布的角度有所差别, 利用金相照片, 可估测晶粒内部孪晶之间的角度, 以推测孪生的种类^[14]。图 1(b)、(c) 中, 压缩程度较小时孪晶呈凸起状, 且较粗大, 此时, 孪晶间的夹角约 40° (如图 1(b)), 属于 $\{10\bar{1}2\}$ 孪晶; 图 1(d)、(e)、(f) 中孪晶形态为扁平状, 孪晶之间的夹角约为 80° (如图 1(d)), 属于 $\{10\bar{1}1\}$ 孪晶。Serra 等^[15] 运用原子标度计算机计算出 $\{10\bar{1}2\}$ 孪晶的位错芯较宽, 该类孪晶沿横向可动性强, 所以 $\{10\bar{1}2\}$ 孪晶呈凸起状; 相反, $\{10\bar{1}1\}$ 孪晶的位错芯很窄, 沿横向的可动性差, 所以该类孪晶更倾向于纵向生长, 呈扁平状。这是两种孪晶形态差异的原因。由上分析可知, 本实验中, 压缩变形量较小 (小于等于 7.5%) 时, 变形过程中 $\{10\bar{1}2\}$ 孪生占主导地位。而变形量大于 7.5% 时, 则是 $\{10\bar{1}1\}$ 孪生占主导。

以上对金相照片的观察, 只是定性分析孪晶数量的变化情况。为了进一步定量分析孪晶数量的变化, 引入孪晶分数这一概念, 其表示研究的组织中孪晶在整张照片中占的面积分数。以图 1 为研究对象, 运用 Photoshop 软件计量不同压缩变形量下, 孪晶的数量, 该结果应为几个分散的数值点。将分散的数值点做曲线并拟合, 得到孪晶分数随压缩应变量的变化规律, 如图 2 所示。可以看出, 孪晶数量的增长速率先由慢至快, 压缩变形程度一定后, 该速率又慢了下来。

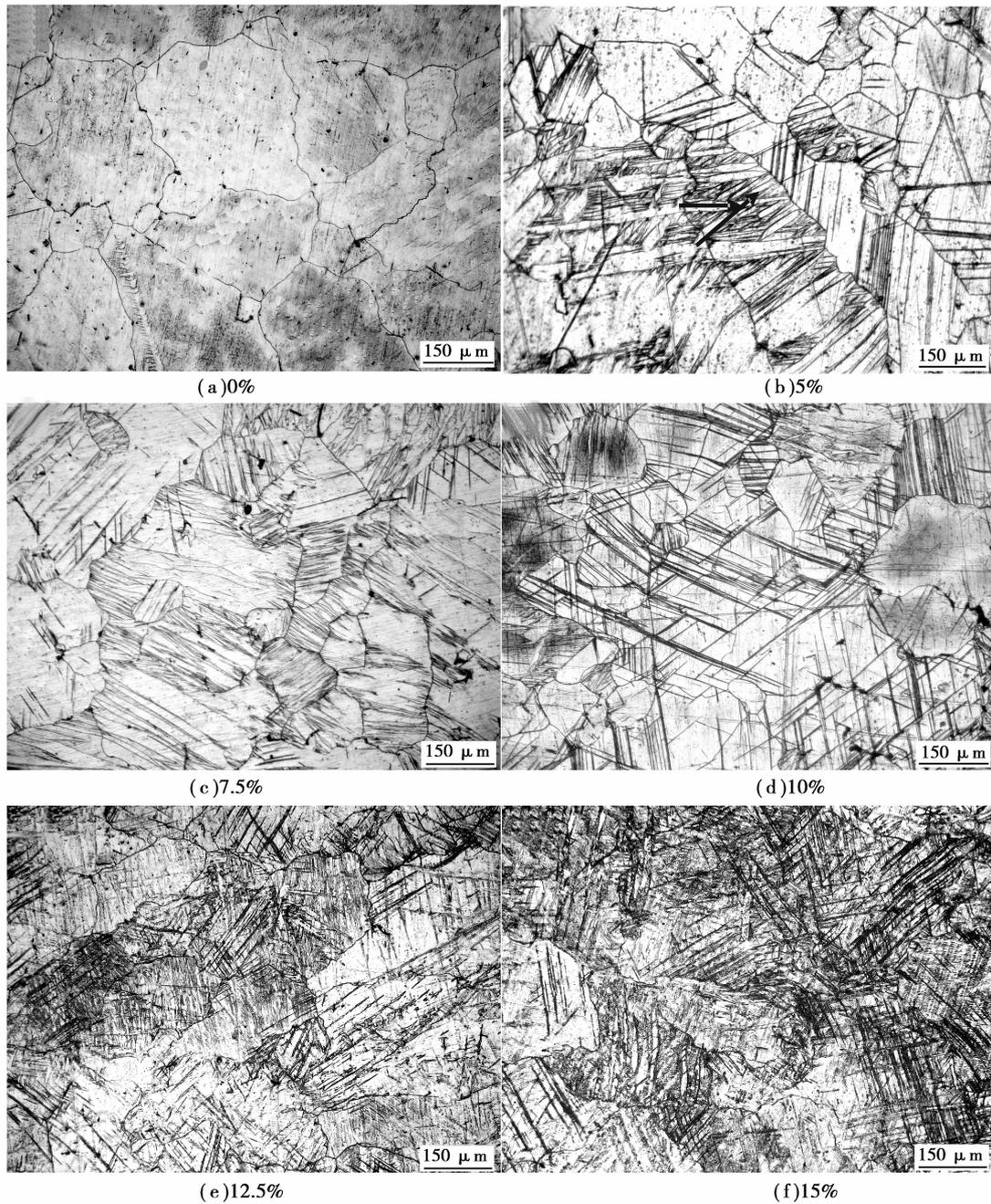


图 1 AZ31 镁合金压缩时不同变形量下的显微组织

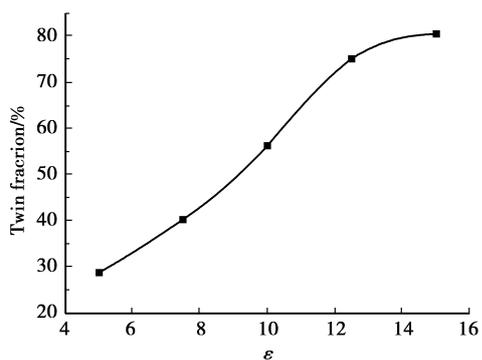


图 2 AZ31 镁合金孪晶分数随塑性应变量的变化

2.2 变形速率对孪晶组织的影响

变形速率是影响本实验孪晶的重要因素之一。图3(a)是实验用镁合金在 0.5 mm/min 下进行压缩后的金相照片。可见,该试样在极小的变形速率 0.5 mm/min 下,进行室温压缩变形,同样产生了为数不少的孪晶。比较图 3(b)、(c)可见,变形速率的提高,使变形孪晶形态趋于细小致密,相应的分布趋于均匀。变形速率对实验所用镁合金的孪生模式的影响不可忽略:若变形速率较低,单个晶粒内部产生的孪晶分布方向趋于一致,偶尔有少量孪晶发生相交;伴随变形速率的升高,单个晶粒内部呈现几组孪

晶相交的状态,而单一的组内孪晶则彼此平行。产生这现象的原因可能是:变形速率较慢时,仅有取向有利的那组孪晶产生,导致了同一晶粒内仅一组平行的孪晶,少有孪晶交错。据 2.1 对孪晶形态及分

类的阐述可知,变形速率较慢时以 $\{10\bar{1}2\}$ 孪晶为主,变形速率增快后,变形晶粒紧张度加剧,更倾向于形成 $\{10\bar{1}1\}$ 孪晶。

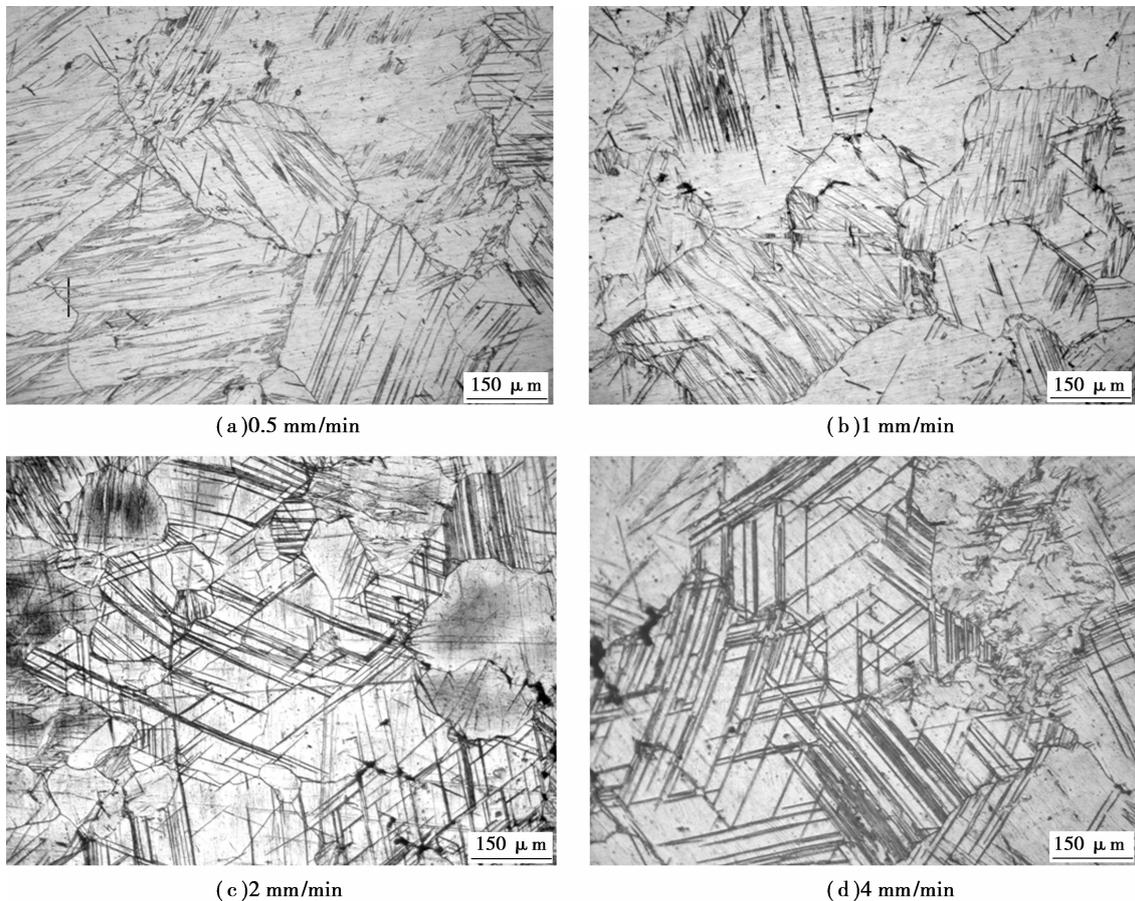


图 3 AZ31 镁合金压缩时不同变形速率下的显微组织

以上研究了变形程度、变形速率是如何影响实验中试样孪晶的分布与形态。总之,保持变形速率,而变形程度较小或降低变形速率,试样以 $\{10\bar{1}2\}$ 孪生为主要变形方式。保持变形速率,而变形程度较大或升高变形速率,试样以 $\{10\bar{1}1\}$ 孪生为主要变形方式。对镁合金大量研究发现, $\{10\bar{1}2\}$ 孪生因切变量最小成为理论上最容易产生的孪生, $\{10\bar{1}1\}$ 孪生切变量仅高于 $\{10\bar{1}2\}$ 孪生^[2]。若外加拉力是沿着 c 轴又或外加压力与 c 轴相垂直, $\{10\bar{1}2\}$ 孪生因其切变量最小,此时最易发生。可是晶粒会在孪生过程中进行翻转,据 Yasumasa Chino 等人^[16]测定这个翻转的角度约为 86° 。接近 90° 的翻转导致外加拉力与 c 轴相垂直又或外加压力沿着 c 轴,这样的改变恰好利用发生 $\{10\bar{1}1\}$ 孪生。另一方面,加之变形程度或应变速率的上升,致使压缩过程产生大量应变,应力的集聚,使局部能量上涨,孪生模式转

为 $\{10\bar{1}1\}$ 孪生。

2.3 变形速率对性能的影响

由图 4 可见,变形速率的提高,伴随着屈服强度与抗压强度同时升高,而断裂时刻相应的变形量无明显变化。对镁合金变形研究发现,变形速率极大程度影响了孪生与滑移两者的出现比例,变形速率极快的条件下,比如冲击载荷的实验条件下,大多数与镁合金结构相似(密排六方)材料只以孪生为其主要变形模式。Barnett 认为^[10],滑移被孪生取代的过程,滑移面上孪晶影响的是形变强化程度,该程度不受孪生所需应力的影响。通常情况下,变形速率的增加会使镁合金倾向于孪生变形,因为此时,各类滑移均受速度影响而来不及产生,导致材料局部位置应力分布集聚,进一步推动孪生。孪生取代滑移带来的是相应材料的强度上升。

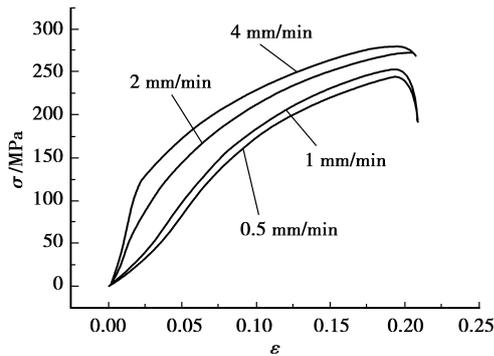


图 4 不同变形速率下的应力—应变曲线

3 结 论

1) 以 2 mm/min 的速率室温压缩时,变形量为 5%~7.5% 的试样中仅存在少量形态较宽、分布上彼此平行的孪晶。变形程度增大后,孪晶形态变得细且长,分布上彼此交错。

2) 实验中,变形量或变形速率升高的条件下,因晶粒转动、应力积聚等因素,试样以 $\{10\bar{1}2\}$ 孪生变为 $\{10\bar{1}1\}$ 孪生为主。

3) 随变形速率的升高,孪晶变得致密且彼此交错,材料的室温屈服强度与抗压强度均有提高,但是断裂时变形量未变化。

参考文献:

- [1] 刘正,张奎,曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [2] 陈振华,严红革,陈吉华,等. 镁合金[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [3] 宋孚群. 变形镁合金晶粒细化及热处理后组织和性能[J]. 金属成形工艺,2004,22(3):46-49.
SONG FU-QUN. Grain Refinement of Wrought Magnesium Alloy and Microstructures and Properties in Annealing States [J]. Metal Forming Technology, 2004,22(3):46-49.
- [4] MÁTHIS K, CHMELIK F, TROJAMOVÁ Z, et al. Investigation of some magnesium alloys by use of the acoustic emission technique[J]. Materials Science and Engineering,2004,387-389:331-335.
- [5] STAROSELSKY A, ANAND L. A constitutive model for hcp materials deforming by slip and twinning: application to magnesium alloy AZ31B [J]. International Journal of Plasticity,2003,19:1843-1864.
- [6] BOHLEN J, CHMELIC F. Orientation effects on acoustic emission during tensile deformation of hot rolled magnesium alloy AZ31[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2004,378:207-213.
- [7] 刘子利,丁文江,袁广银,等. 镁铝基耐热铸造镁合金的进展[J]. 机械工程材料,2001,25(11):1-4.
- LIU ZI-LI, DING WEN-JIANG, YUAN GUANG-YIN, et al. Survey of the Mg-Al Based Elevated Temperature Magnesium Casting Alloys[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2001,25(11):1-4.
- [8] 胡轶嵩,杨平,赵祖德,等. 利用取向成像研究镁合金的孪生过程[J]. 中国有色金属学报,2004,14(1):105-111.
HU YI-SONG, YANG PING, ZHAO ZU-DE, et al. Investigation of twinning process in magnesium alloy by means of orientation mapping[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004,14(1):105-111.
- [9] YASUMASA CHINO, KATSUYA KIMURA, MASATAKA HAKAMADA, et al. Mechanical anisotropy due to twinning in an extruded AZ31 Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2008, 485:311-317.
- [10] BARNETT M R, KESHAVARZ Z, BEER A G, et al. Influence of grain size on the compressive deformation of wrought Mg-3Al-1Zn[J]. Acta Materialia, 2004, 52:5093-5103.
- [11] LIBOR HELIS, Kazuto Okayasu, Hiroshi Fukutomi. Microstructure evolution and texture development during high-temperature uniaxial compression of magnesium alloy AZ31 [J]. Materials Science and Engineering, 2006, 430:98-103.
- [12] LAN JIANG, John J. Jonas, Alan A. Luo, et al. Influence of $\{10\bar{1}2\}$ extension twinning on the flow behavior of AZ31 Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2007,445-446:302-309.
- [13] MARK DENIS NAVE, MATTHEW ROBERT BARNETT. Microstructures and textures of pure magnesium deformed in plane-strain compression[J]. Scripta Materialia, 2004, 51:881-885.
- [14] 陈振华,杨春花. 镁合金塑性变形中孪生的研究[J]. 材料导报. 2006,20(8):107-133.
CHEN ZHEN-HUA, YANG CHUN-HUA. Investigation of the twinning in plastic deformation of magnesium alloy[J]. Materials Review. 2006,20(8):107-133.
- [15] SERRA A., BACON DJ PHIL. MAG A, 1991, 63:1001-1012.
- [16] YASUMASA CHINO, KATSUYA KIMURA, MAMORU MABUCHI. Twinning behaviour and deformation mechanisms of extruded AZ31 Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering 2008,486:481-488.

(编辑 张小强)