

轧制 AZ31 镁合金板材(4mm) 动态压缩性能与失效行为

Dynamic Compressive Properties and Failure
Behaviour of Rolled AZ31 Magnesium
Alloy Sheet (4mm)

刘 正,董 阳,毛萍莉,于金程

(沈阳工业大学 材料科学与工程学院,沈阳 110870)

LIU Zheng,DONG Yang,MAO Ping-li,YU Jin-cheng

(School of Materials Science and Engineering,Shenyang

University of Technology,Shenyang 110870,China)

摘要: 为了研究轧制 AZ31 镁合金板材(4mm)在高应变速率下的动态力学性能和失效行为,采用分离式霍普金森压杆装置(SHPB)在室温下应变速率为 $500\sim 2600\text{s}^{-1}$ 范围内对其进行了动态压缩实验,并利用金相显微镜(OM)和扫描电镜(SM)对冲击后的试样进行了显微分析。探讨了轧制 AZ31 镁合金板材沿轧制方向(RD)、横向(TD)和法向(ND)的动态压缩性能和失效行为。结果表明:轧制 AZ31 镁合金 4mm 板材动态压缩性能存在各向异性。沿 RD 和 TD 方向压缩的动态性能相同,沿 ND 方向压缩的动态断裂强度最大。AZ31 镁合金 4mm 板材的动态压缩断裂机制为解理断裂。变形机制为沿 RD 和 TD 方向高速压缩时, $\{10\bar{1}2\}\langle 11\bar{2}0\rangle$ 拉伸孪晶参与变形;沿 ND 方向高速压缩时, $\{10\bar{1}1\}\langle 11\bar{2}0\rangle$ 压缩孪晶参与变形。

关键词: AZ31 镁合金;SHPB;高应变速率;动态力学性能;失效行为

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2015.02.010

中图分类号: TG146.2⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2015)02-0061-06

Abstract: To investigate the dynamic compressive properties and failure behaviour of the rolled AZ31 magnesium alloy sheet (4mm), the dynamic compressive test was carried out using split Hopkinson pressure bar(SHPB) at ambient temperature under the strain rates from 500s^{-1} to 2600s^{-1} . The compressed specimens were analyzed by metallographic microscope and scanning electron microscope. The dynamic compressive properties and failure behaviour of the rolled AZ31 magnesium alloy sheet (4mm) along rolling direction(RD), transverse direction(TD) and normal direction(ND) were discussed. The results show that the dynamic mechanical properties of the rolled AZ31 magnesium alloy sheet (4mm) exhibit strong anisotropy. The properties along RD and TD are similar while the dynamic strength along ND is the largest. The dynamic compressive fracture mechanism of the rolled AZ31 magnesium alloy sheet (4mm) is cleavage fracture. The deformation mechanism is that tensile twinning $\{10\bar{1}2\}\langle 11\bar{2}0\rangle$ are activated along RD and TD compression; compressive twinning $\{10\bar{1}1\}\langle 11\bar{2}0\rangle$ are activated along ND compression.

Key words: AZ31 magnesium alloy;SHPB;high strain rate;dynamic mechanical property;failure behavior

镁合金是目前实际应用中密度最低的金属结构材料,具有比强度和比刚度高、阻尼性和切削加工性好等优点,因而被广泛应用于汽车领域^[1,2]。其中 AZ31 镁合金的强度较高,延展性良好,可用来制造不同厚度的板材及形状复杂的锻件、模锻件及挤压件,是目前应用最广泛的变形镁合金^[3]。目前,国内外学者对 AZ31 镁合金成形技术进行了大量的研究,主要集中在

AZ31 板材制备^[4]、超塑性^[5,6]、热变形规律^[7-9]、动态再结晶和静态再结晶^[10-12]、温热冲压成形技术^[13-17]和数值模拟^[18]等方面。然而作为交通工具的结构材料,有必要对其在冲击载荷下的力学行为进行研究^[19]。因为在冲击载荷下,由于应变速率较高,塑性变形只在局部发生,变形很不均匀,这就使得动态力学行为与静态不同^[20,21]。到目前为止,国内外对 AZ31

镁合金板材在高应变速率下的研究报道很少。因此，本研究轧制 AZ31 镁合金板材(4mm)分离式 Hopkinson 高速压缩实验,探讨 AZ31 镁合金板材(4mm)沿不同方向在不同应变速率下的动态压缩力学性能和断裂机制,将为高速冲击载荷下 AZ31 镁合金板材的选用提供重要依据。

1 实验

实验测试材料是商用 AZ31 镁合金板材(4mm)。合金的名义化学成分(质量分数)为 Al 3%, Zn 1%, Mn 0.2%,其他为 Mg。为了研究其各向异性,Hopkinson 高速压缩的立方试样从 AZ31 镁合金 4mm 板材上沿轧制方向(RD)、横向(TD)和法向(ND)三个方

向截取,截取示意图如图 1 所示。试样尺寸为 3mm×3mm×4mm,试样照片如图 2(a)所示,沿 RD 方向压缩的试样断裂照片如图 2(b)所示。

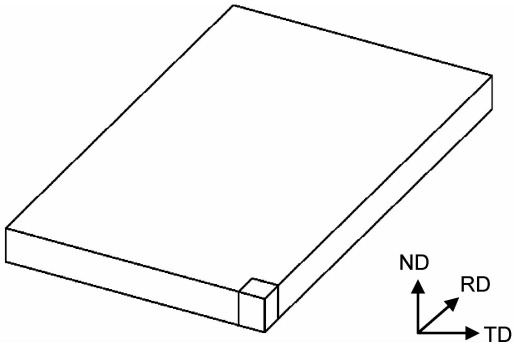


图 1 试样截取示意图

Fig.1 Schematic diagram of cutting specimens

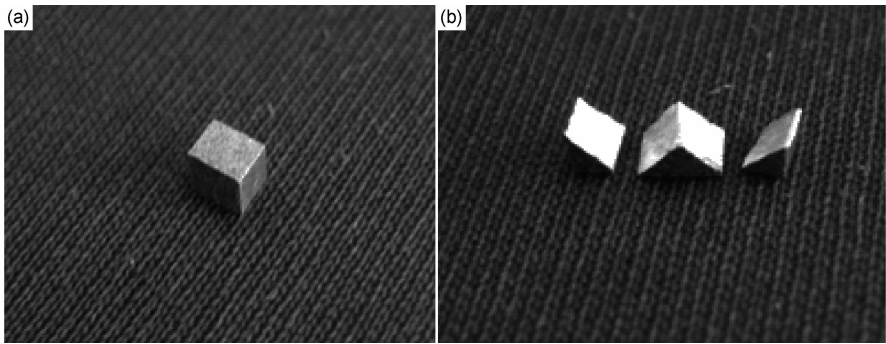


图 2 AZ31 镁合金板材(4mm)动态压缩试样照片

(a)压缩试样;(b)沿 RD 方向断裂试样

Fig.2 Photographs of AZ31 magnesium alloy sheet (4mm)

(a)specimen;(b)specimen after dynamic compression along RD

在室温下采用 SHPB 装置进行高速压缩实验,实验原理见文献^[22-24]。波导杆采用 $\phi 10\text{mm}\times 900\text{mm}$ 的弹簧钢杆,应变片型号为:BF120-1AA,电阻值: $120.0\Omega\pm 0.1\Omega$,灵敏系数: 2.11 ± 0.1 。实验的应变

率范围为 $500\sim 2600\text{s}^{-1}$ 。实验装置如图 3 所示。实验后对断裂的试样利用 SEM 进行断口形貌分析。并对断裂试样进行镶嵌、磨平、抛光、腐蚀后,再观察金相组织。

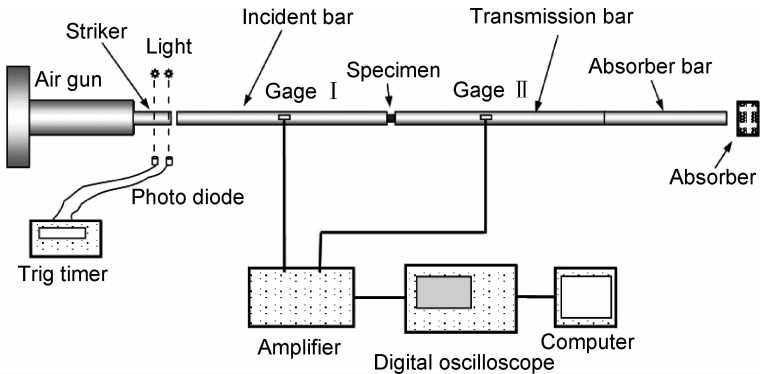


图 3 SHPB 实验装置图

Fig.3 Schematic view of SHPB system

2 实验结果

2.1 动态压缩力学性能

图 4 为轧制 AZ31 镁合金板材(4mm)的动态压缩真应力-真应变曲线。由图 4(a),(b),(c)可知,AZ31 镁合金板材(4mm)分别沿 RD,TD 和 ND 三个方向高速压缩时,沿 RD 和 TD 方向的动态压缩真应力-真应变曲线的初始部分均出现明显的转折台阶,呈现出明显的屈服现象;而沿 ND 方向的动态压缩真应力-真应

变曲线则没有转折台阶,呈现连续屈服的特征。随着应变速率的增大,沿 RD 和 TD 两个方向的曲线不断上移,表现出正应变速率强化效应;而沿 ND 方向的曲线则基本重合。沿 RD 方向高速压缩时,当应变速率达到 2100s^{-1} ,试样发生断裂,断裂强度为 245MPa;沿 TD 方向高速压缩,应变速率达到 2000s^{-1} 时,试样发生断裂,断裂强度为 230MPa;而沿 ND 方向高速压缩,应变速率达到 1250s^{-1} 时,试样发生断裂,断裂强度为 865MPa。

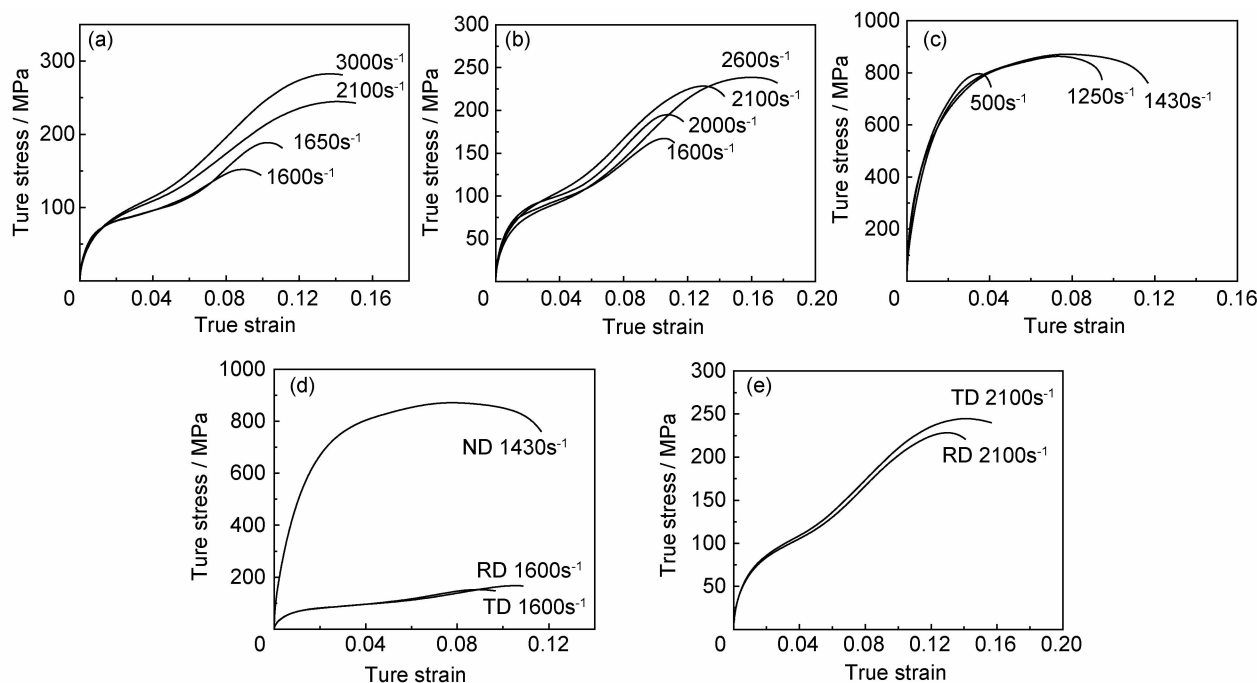


图 4 AZ31 镁合金板材(4mm)动态压缩真应力-真应变曲线

(a)RD;(b)TD;(c)ND;(d) 1600s^{-1} ;(e) 2100s^{-1}

Fig. 4 Dynamic compressive true stress-true strain curves of AZ31 magnesium alloy sheet (4mm)

(a)along RD;(b)along TD;(c)along ND;(d) 1600s^{-1} ;(e) 2100s^{-1}

由此可见,沿 RD 和 TD 两个方向高速压缩时,试样断裂的应变速率基本相同,断裂强度也相近,而与 ND 方向则大不相同。而当应变速率同为 2100s^{-1} 时,RD 和 TD 的动态压缩真应力-真应变曲线基本重合,如图 4(e)所示。图 4(d)为应变速率在 1600s^{-1} 时三个方向的动态压缩真应力-真应变曲线,可以明显看出,RD 和 TD 两个方向与 ND 方向的动态压缩性能存在明显的各向异性。上述结果表明,轧制 AZ31 镁合金板材(4mm)沿 ND 方向的动态断裂强度最大,RD 和 TD 能承受的应变速率大于 ND 方向,其动态压缩性能存在各向异性,RD 和 TD 方向的动态压缩力学性能相同,与 ND 方向的动态压缩力学性能明显不同。

2.2 动态压缩断口形貌

图 5 为 AZ31 镁合金板材(4mm)高速压缩后断裂

试样的断口形貌。从图 5 可以看出,RD 方向和 ND 方向的断口起伏平缓,出现大量的弯曲的撕裂棱和光滑平面,还有少量的较浅的舌状花样,表现出明显的解理断裂特征。而 TD 方向的断口则出现大量的明显高低错落的解理台阶形貌。由此可知,AZ31 镁合金板材(4mm)在动态压缩载荷下的断口机制为解理断裂,断口形貌对载荷方向敏感。

2.3 动态压缩金相组织

图 6 为 AZ31 镁合金板材(4mm)的金相组织照片。图 6(a-1)为 RD 方向原始金相组织,从图中可以看出,原始组织中已存在一定数量的孪晶,形成了一定宽度的孪晶条带,这些孪晶是在轧制变形过程中所形成的。经过高速压缩后,如图 6(a-2)所示,RD 方向组织中出现了许多细小的裂纹,这些裂纹沿着晶界和孪

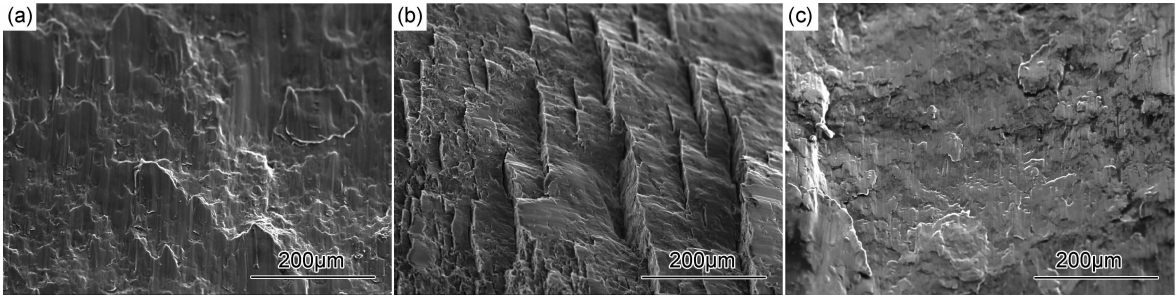


图 5 AZ31 镁合金板材(4mm)的动态压缩断口 SEM 图片

(a)RD 方向;(b)TD 方向;(c)ND 方向

Fig. 5 SEM fractographs of AZ31 magnesium alloy sheet (4mm) under dynamic compression

(a)along RD;(b)along TD;(c)along ND

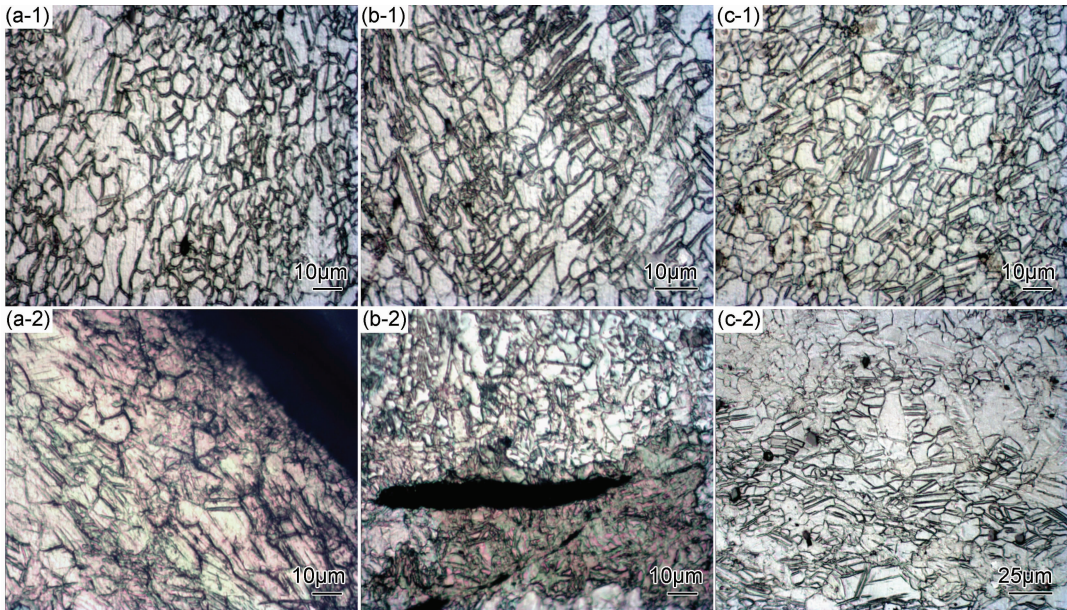


图 6 AZ31 镁合金板材(4mm)的原始(1)和动态压缩(2)的金相组织

(a)RD 方向;(b)TD 方向;(c)ND 方向

Fig. 6 Original (1) and dynamic compressive(2) microstructures of AZ31 magnesium alloy sheet (4mm)

(a)along RD;(b)along TD;(c)along ND

晶界扩展,并且相互连接。图 6(b-1)为 TD 方向原始金相组织,组织中存在晶粒尺寸为 $10\mu\text{m}$ 左右的等轴晶粒和晶粒尺寸为 $2\mu\text{m}$ 左右的细小再结晶晶粒。经过高速压缩后,如图 6(b-2)所示,TD 方向组织中出现裂纹,裂纹周围有明显融化的痕迹。这是由于绝热温升而引起热软化效应^[25],在高应变速率下,整个变形过程的时间是极短的,绝大部分(90%左右)的塑性功转化为热量并且来不及散失,热量集中使得局部组织发生融化现象。图 6(c-1)为 ND 方向原始金相组织,原始组织中已存在一定数量的孪晶和细小再结晶晶粒条带,原始组织中有少量的孪晶。经过高速压缩后,孪晶数量大幅增加,孪晶带明显变宽,如图 6(c-2)所示。

3 分析与讨论

3.1 变形机制

通常镁合金在挤压、轧制等塑性变形过程中易形成较强的(0002)基面织构^[26]。图 7 为 AZ31 镁合金板材(4mm)的织构极图。通过分析织构可以发现,AZ31 镁合金板材(4mm)在轧制过程中形成了强烈的基面平行于轧制方向的{0002}基面织构,使绝大部分晶粒的基面平行于轧制板面,c 轴与板面垂直,只有少量晶粒的取向向轧制方向略有偏散(c 轴向轧制方向倾斜),偏散角度在 10° 以内。再由织构分析结果,图 8 给出了 AZ31 镁合金板材(4mm)的动态压缩试样受力方向与 c 相对关系示意图,箭头表示受力方向。

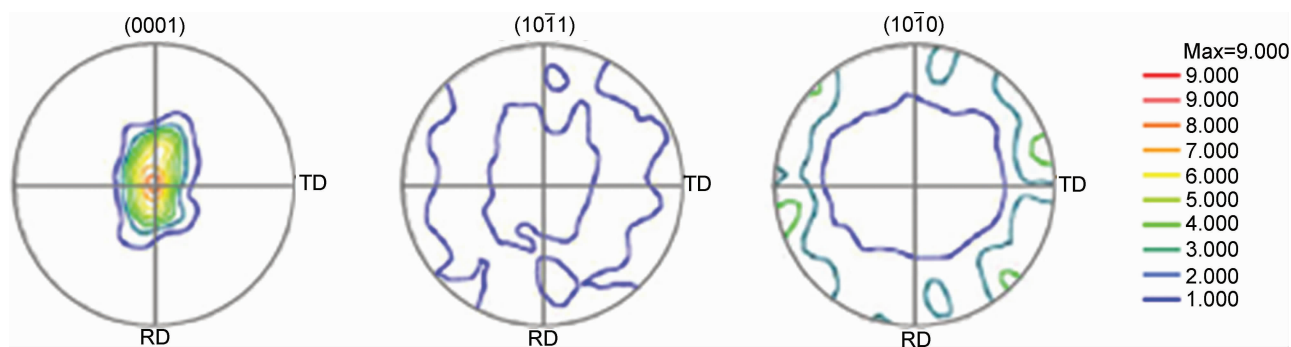


图 7 AZ31 镁合金板材(4mm)的织构极图

Fig. 7 Pole figure of AZ31 magnesium alloy sheet (4mm)

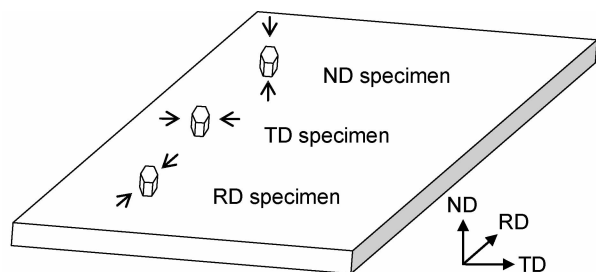


图 8 AZ31 镁合金板材(4mm)动态压缩试样受力

方向与 c 轴相对关系示意图Fig. 8 Schematic illustration of applied force of tensile samples of AZ31 magnesium alloy sheet (4mm) related to c axes

从图 8 可知, AZ31 镁合金板材(4mm)在沿 RD 和 TD 方向高速压缩时, 压应力方向与 c 轴垂直, c 轴受到的是拉应力, 所以 AZ31 镁合金板材(4mm)在 RD 和 TD 两个方向上动态力学性能差别不大。而沿 ND 方向高速压缩时, 压应力方向与 c 轴平行, c 轴受到的是拉应力。镁合金中孪晶的启动与其 c 轴方向所受应力状态密切相关。镁的轴比(c/a)为 1.624, 小于 $\sqrt{3}$, 拉伸孪晶 $\{10\bar{1}2\}\langle 11\bar{2}0\rangle$ 系只有在平行于 c 轴的方向存在拉力时才能启动; 压缩孪晶 $\{10\bar{1}1\}\langle 11\bar{2}0\rangle$ 只有在平行于 c 轴的方向存在压力时才能形成, 而且压缩孪晶的启动应力要比拉伸孪晶大得多。因此, 沿 RD 和 TD 方向高速压缩时, c 轴受拉应力, $\{10\bar{1}2\}\langle 11\bar{2}0\rangle$ 拉伸孪晶易于形成, 拉伸孪晶对塑性变形做出贡献, 沿 RD 和 TD 方向塑性变形能力强。而沿 ND 方向高速压缩时, c 轴受压应力, $\{10\bar{1}1\}\langle 11\bar{2}0\rangle$ 压缩孪晶的启动应力较大, 塑性变形受阻碍, 所以沿 ND 方向动态强度高于 RD 和 TD 方向。

3.2 断裂机制

通过本实验的断口形貌观察和金相组织分析可知, 高应变速率下 AZ31 镁合金板材(4mm)的动态压缩断裂机制为解理断裂。在高速压缩下, 一是局部组织受力集中, 晶粒与基体发生分离, 萌生裂纹, 裂纹再

沿晶界和孪晶界扩展; 二是局部组织由于高速压缩过程中的热软化作用, 在融化的组织中萌生裂纹, 导致材料失稳。

4 结论

(1) 轧制 AZ31 镁合金板材(4mm)动态压缩性能存在各向异性。沿 ND 方向的动态断裂强度最大, 沿 RD 和 TD 能承受的应变速率大于 ND 方向。

(2) 沿 RD 和 TD 方向高速压缩时, $\{10\bar{1}2\}\langle 11\bar{2}0\rangle$ 拉伸孪晶对塑性变形做出贡献; 沿 ND 方向高速压缩时, $\{10\bar{1}1\}\langle 11\bar{2}0\rangle$ 压缩孪晶的启动应力较大, 塑性变形受阻碍。

(3) 高应变速率下 AZ31 镁合金板材(4mm)的动态压缩断裂机制为解理断裂。

参考文献

- [1] 刘正, 王越, 王中光, 等. 镁基轻质材料的研究与应用[J]. 材料研究学报, 2000, 14(5):449—456.
LIU Z, WANG Y, WANG Z G, et al. Developing trends of research and application of magnesium alloys[J]. Chinese Journal of Material Research, 2000, 14(5):449—456.
- [2] 陈力禾, 赵慧杰, 刘正, 等. 镁合金压铸及其在汽车工业中的应用[J]. 铸造, 1999, (10):45—50.
CHEN L H, ZHAO H J, LIU Z, et al. Die casting of magnesium alloy and its application in automobile industry[J]. Foundry, 1999, (10):45—50.
- [3] 黎文献. 镁及镁合金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005. 97—102.
LI W X. Magnesium and Magnesium Alloy[M]. Changsha: Central South University Press, 2005. 97—102.
- [4] 张青来, 卢晨, 朱燕萍. 轧制方式对 AZ31 镁合金薄板组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(3):391—397.
ZHANG Q L, LU C, ZHU Y P. Effect of rolling method on microstructure and properties of AZ31 magnesium alloy thin sheet[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(3):391—397.
- [5] MUKAI T, WATANABE H, HIGASHI K. Application of superplasticity in commercial magnesium alloy for fabrication of

- structural components[J]. *Material Science and Technology*, 2000,16(11-12):1314-1319.
- [6] KIM W J, CHUNG S W, KUM D. Superplasticity in thin magnesium alloy sheets and deformation mechanism maps for magnesium alloys at elevated temperatures[J]. *Acta Mater*, 2001,49(20):3337-3345.
- [7] 李峰, 桑玉博, 赵立伟. 热变形对 AZ31 镁合金显微组织的影响[J]. *热加工工艺*, 2006,35(6):8-9.
LI F, SANG Y B, ZHAO L W. Influence of hot deformation on microstructure of AZ31 alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2006,35(6):8-9.
- [8] 吴远志, 严红革, 陈吉华, 等. AZ31 镁合金高应变速率多向锻造组织演变及力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2012,22(11):3000-3005.
WU Y Z, YAN H G, CHEN J H, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy fabricated by high strain rate triaxial-forging[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012,22(11):3000-3005.
- [9] 范永革, 汪凌云. 镁合金 AZ31B 的高温塑性变形及加工图[J]. *中国有色金属学报*, 2004,14(7):1068-1072.
FAN Y G, WANG L Y. Plastic deformation at elevated temperature and processing maps of magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004,14(7):1068-1072.
- [10] 刘晓霏, 严巍, 陈国学. AZ31B 镁合金塑性变形动态再结晶的实验研究[J]. *塑性工程学报*, 2005,12(3):10-13.
LIU X F, YAN W, CHEN G X. The experimental study on recrystallization of magnesium alloy AZ31B during plastic deformation[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2005,12(3):10-13.
- [11] 刘楚明, 刘子娟, 朱秀荣. 镁及镁合金动态再结晶研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2006,16(1):1-12.
LIU C M, LIU Z J, ZHU X R. Research and development progress of dynamic recrystallization in pure magnesium and its alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006,16(1):1-12.
- [12] 张凯锋, 尹德良, 韩文波. 热轧 AZ31 镁合金温变形中的微观组织演变[J]. *航空学报*, 2005,26(4):505-509.
ZHANG K F, YIN D L, HAN W B. Microstructure evolution in warm deformation of hot-rolled AZ31 Mg alloy[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005,26(4):505-509.
- [13] WATANABE H, TSUTSUI H, MUKAI T, et al. Deformation mechanisms in a coarse grained Mg-Al-Zn alloy at elevated temperatures[J]. *International Journal of Plasticity*, 2001,17(3):387-397.
- [14] LEE S, CHEN Y H, WANG J Y. Isothermal sheet formability of magnesium alloy AZ31 and AZ61[J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2002,124(1/2):19-24.
- [15] TOZAWA Y. Deep drawing of magnesium alloy sheets[J]. *Japan Inst Light Metals*, 2011,51(10):492-497.
- [16] DOEGE E, DRODER K. Processing of magnesium sheet metals by deep drawing and stretch forming[J]. *Mat Tech*, 1997,(7-8):19-23.
- [17] 张凯锋, 尹德良, 吴德忠. AZ31 镁合金板的热拉伸性能[J]. *中国有色金属学报*, 2003,13(6):1505-1509.
ZHANG K F, YIN D L, WU D Z. Deep drawability of AZ31 magnesium alloy sheets at elevated temperatures[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003,13(6):1505-1509.
- [18] 裴群峰, 李大永, 彭颖红. AZ31 镁合金板材温热冲压数值模拟与实验研究[J]. *中国有色金属学报*, 2006,16(4):580-585.
CHANG Q F, LI D Y, PENG Y H. Numerical simulation and experimental study of warm deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheet[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006,16(4):580-585.
- [19] 才鸿年, 谭成文, 王富耻, 等. 装甲用镁合金抗弹性能表征体系探讨[J]. *中国工程科学*, 2006,(2):30-33.
CAI H N, TAN C W, WANG F C, et al. The characterization system of the ballistic performance of armor magnesium alloys[J]. *Engineering Science*, 2006,(2):30-33.
- [20] MUKAI A, DAYAN D, PITCHURE D, et al. Dynamic mechanical analysis of pure Mg and AZ31 alloy[A]. *Magnesium Technology*[C]. Warrendale: Minerals, Metals & Materials, 2004.103-106.
- [21] KOICHI ISHIKAWA, HIROYUKI WATANABE, TOSHIJI MUKAI. High strain rate deformation behavior of an AZ91 magnesium alloy at elevated temperatures[J]. *Materials Letters*, 2005,59(12):1511-1515.
- [22] PARK S W, ZHOU M. Separation of elastic waves in split Hopkinson bars using one-point strain measurements[J]. *Experimental Mechanics*, 1999,39(4):287-294.
- [23] 宋力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J]. *爆炸与冲击*, 2005,25(4):368-373.
SONG L, HU S S. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005,25(4):368-373.
- [24] 宋博, 宋立, 胡时胜. SHPB 实验数据处理的解耦方法[J]. *爆炸与冲击*, 1998,18(2):167-171.
SONG B, SONG L, HU S S. Coupling solved method of SHPB experimental data processing[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1998,18(2):167-171.
- [25] 杨扬, 程信林. 绝热剪切的研究现状及发展趋势[J]. *中国有色金属学报*, 2002,12(3):402-407.
YANG Y, CHENG X L. Current status and trends in researches on adiabatic shearing[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002,12(3):402-407.
- [26] 陈振华, 夏伟军, 程永奇, 等. 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 Z H, XIA W J, CHENG Y Q, et al. Texture and anisotropy in magnesium alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005,15(1):1-11.

基金项目: 国家重点基础研究计划(973 计划)项目资助(2013CB632205); 辽宁省科学技术计划项目资助(201202160)

收稿日期: 2013-04-03; 修订日期: 2014-04-15

通讯作者: 刘正(1957-), 男, 教授, 博士, 主要从事高性能镁合金及其应用等方面的研究工作, 联系地址: 沈阳经济技术开发区沈辽西路 111 号(110870), E-mail: zliu4321@vip.sina.com