

金属板料激光冲击成形及其破裂行为研究

张青来¹ 王 荣¹ 洪妍鑫¹ 吴铁丹¹ 钱 阳¹ 张永康²

(¹ 江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013)
² 东南大学机械工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要 采用最大输出激光脉冲能量为 12.5 J 的 Thales Laser 激光器, 对比交叉轧制 AZ31 镁合金薄板和交叉冷轧钼带的激光冲击成形(LSF)特征, 对其破裂行为和微观结构进行分析和探讨。结果表明: 采用不同能量密度的激光束对镁合金薄板和钼带两种不同材料进行连续多次激光冲击, 实现了其高应变速率冷成形。AZ31 薄板和钼带 LSF 破裂均表现出厚度减薄形式, 而钼带 LSF 过程中发现层裂现象, AZ31 薄板 LSF 试样断口由韧性断裂和脆性断裂混合组成, 而钼带 LSF 试样属于脆性断裂。此外, 还讨论了两种金属板料的各向异性 and 应变速率对高能高应变速率 LSF 成形性能及其破裂行为的影响。

关键词 AZ31 薄板; 钼带; 激光冲击成形; 破裂方式; 微观结构

中图分类号 TN249; TG146.2+ **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0403010

Study on Laser Shock Forming and Fracture Behavior of Metal Sheet

Zhang Qinglai¹ Wang Rong¹ Hong Yanxin¹ Wu Tiedan¹

Qian Yang¹ Zhang Yongkang²

(¹ School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)
² School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract The cross-rolled AZ31 sheet and the cold-rolled molybdenum strip are shocked by the Thales Laser with the maximum output pulse energy of 12.5 J. Properties of these two laser shock forming (LSF) are compared and then fracture behavior and microstructure are analyzed and discussed. The results show that cold forming of AZ31 sheet and molybdenum strip with high strain rate is realized after continuously repeat laser shock under different energy densities. The LSF fracture behavior of AZ31 sheet and molybdenum strip both perform thickness thinning while a spallation phenomenon is observed during LSF of molybdenum strip. The fracture of AZ31 sheet is a mixture of ductile and brittle fracture, while that of molybdenum strip is the brittle fracture. In addition, the effect of these two metal sheet anisotropy and strain rate on the LSF formability with high energy, high strain rate and fracture behavior is discussed.

Key words AZ31 alloy sheet; Mo strip; laser shock forming; fracture pattern; microstructure

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850; 350.1820

1 引 言

激光冲击成形(LSF)是一种新兴的冷成形技术,是集材料改性强化和成形于一体的复合成形技术^[1-3]。由于激光的脉冲能量和光斑尺寸等参数精确可控,通过数控系统可实现多种材料多次冲击板料局部成形或整体成形,包括脆性材料的弯曲成形或微成形^[4-7]。AZ31 等镁合金激光冲击强化

(LSP)区产生大量位错与孪晶,晶粒细化,表面残余压应力和表面显微硬度得到提高,抗应力腐蚀及耐疲劳性能得到改善和表面周期性波纹现象^[8-11]。张青来等^[12-13]在纯钼带冷冲压成形、激光冲击强化和激光冲击微成形进行了基础研究。镁合金是密排六方结构,而纯钼具有体心立方结构,这两种材料在室温下的塑性变形能力均较差,可通过交叉轧制方

收稿日期: 2013-10-08; 收到修改稿日期: 2013-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(51175231)

作者简介: 张青来(1962—),男,博士,教授,主要从事镁合金、钛合金和激光加工技术等方面的研究。

E-mail: zhangql196210@163.com

式来改变材料的各向异性和深冲性能^[12,14-15]。AZ31 镁合金和纯铝在组织结构和成形性能方面是两种不同的材料,有必要通过该两种材料的 LSF 对比实验,来研究 LSF 前后材料结构性能及其影响,特别是高应变率下动态断裂过程比较复杂,其断裂行为有待探讨。

本文针对 AZ31 镁合金和纯铝两种材料,研究材料性质对激光冲击成形及其断裂方式的影响,探讨了镁合金薄板和铝带 LSF 断裂行为,为开发金属板料 LSF 技术提供理论依据和实验数据。

2 实 验

2.1 实验材料与实验方法

实验材料为厚度为 0.55 mm 的交叉轧制 AZ31 镁合金薄板和厚度为 0.22 mm 的交叉冷轧 Mo-1

铝带,其力学性能见发表论文^[12,14]。LSF 实验在江苏大学激光技术研究所的 Thales Laser 激光器上进行,其最大输出脉冲能量为 12.5 J、脉宽 10 ns、波长为 1.06 μm ,光斑直径选为 5 mm。在实验中选择三种不同能量密度 3.0 GW/cm^2 , 4.6 GW/cm^2 和 6.1 GW/cm^2 。在 LSF 过程中,AZ31 镁合金或铝带试样(或以下简称“靶材”)连同模具夹持在工作台上,用流动的水为约束层,选用厚度为 100 μm 的美国 3M 公司专用铝箔作为吸收层。图 1 为激光冲击成形实验装置和板料激光冲击形变受力示意图。

利用 LEICA DM2500M 型正置透反射光学显微镜和 JEOL JSEM-7001F 热场发射高分辨率电镜分别对实验材料的微观组织和断口形貌进行观察和分析。

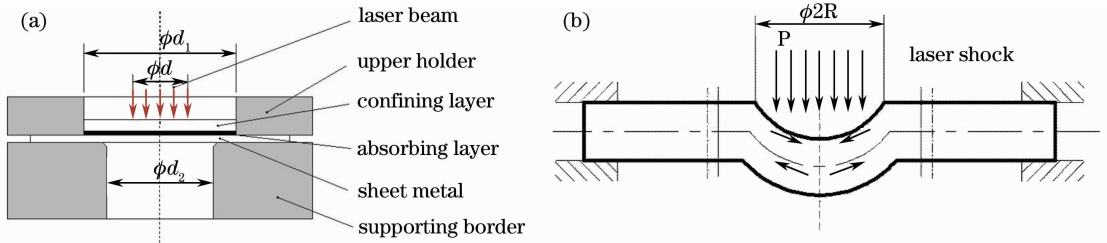


图 1 激光冲击成形装置和变形示意图。(a) 实验装置;(b) 受力示意图

Fig. 1 Schematic of testing apparatus and deformation for LSF. (a) Testing apparatus; (b) schematic force

3 结果与分析

3.1 微观组织及拉伸断口

图 2 所示为 AZ31 镁合金交叉轧制薄板的微观组织。由图 2 可见,消除应力退火后交叉轧制镁合金薄板有均匀分布的细小等轴晶组织,其晶粒尺寸为 2~5 μm ,内部含有孪晶和位错等。单向拉伸后

的横/纵断裂延伸率分别为 24% 和 26%,屈服强度分别为 112 MPa 和 175 MPa,其显微断口中有少许河流花样,属于解理脆性断裂;又由于塑性变形而产生大量的韧窝,韧窝细小且分布均匀,具有韧性断裂。因此,AZ31 镁合金薄板拉伸变形属于韧-脆性断裂机制。

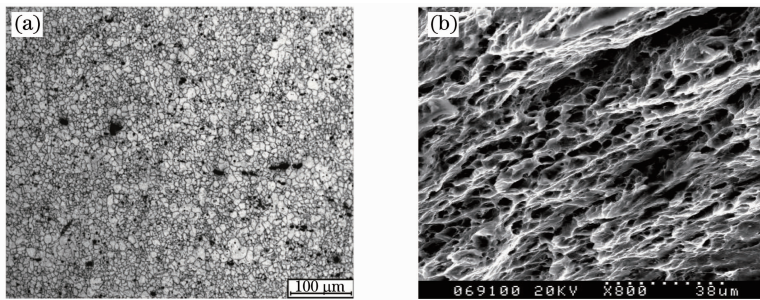


图 2 AZ31 镁合金薄板的微观组织。(a) 金相;(b) 拉伸断口

Fig. 2 Microstructures of AZ31 alloy sheet. (a) Optical microscope (OM); (b) tensile fracture

图 3 是交叉冷轧纯铝带的微观组织。可见,经退火后交叉冷轧铝带显微组织为排列紧凑的纤维状细长晶粒且相互搭接交错。试样单向拉伸后横/纵断裂

延伸率分别为 13% 和 11%,屈服强度分别为 660 MPa 和 680 MPa,拉伸断口表面色泽灰暗,由薄片层状结构组成呈薄层韧性断裂,且晶内显微裂纹相互搭接,

铝带具有较弱的各向异性和良好的力学性能^[12]。

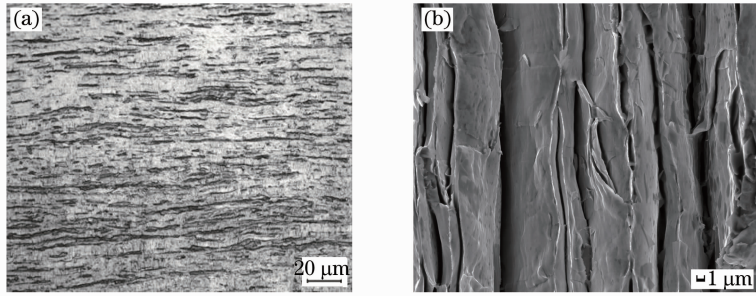


图3 纯钼带的微观组织。(a) 金相;(b) 拉伸断口

Fig. 3 Microstructures of pure Mo strip. (a) OM; (b) tensile fracture

3.2 LSF 和破裂方式

3.2.1 LSF 和减薄机制

工件最终的形状是由数次激光冲击累积而成,随着冲击次数的增加,LSF 的最大成形深度基本上呈线性增加。在激光能量密度较小时,冲击波产生的峰值压力不够大,不足以在厚度方向产生塑性变形,冲击区将发生弹性变形,其弯曲角非常小;随激光能量密度加大,当产生的峰值压力大于材料动态屈服强度时,冲击区发生塑性变形。

图4所示为不同激光能量密度时多次激光冲击金属板料 LSF 试样照片。由图4可观察到,在三种

激光能量密度连续冲击5~6次后,靶材外凸面累积拉应力值大于材料的抗拉强度极限,此时靶材达到塑性变形极限以致冲击中心区域被冲裂,且冲裂断口形状随靶材本身性质和激光能量密度不同而变化。当能量密度为 4.6 GW/cm^2 和4次冲击时,AZ31 镁合金薄板 LSF 最大成形深度可达到 4.0 mm ,其最薄处壁厚约为 0.15 mm ,最大减薄率达到28%左右;而 LSF 后钼带厚度从 0.22 mm 减薄到 0.198 mm ,最大减薄率约为10%。因此,镁合金薄板和钼带激光冲击成形属于壁厚减薄过程,但其宏观断口和微观断口形貌是各不相同的。

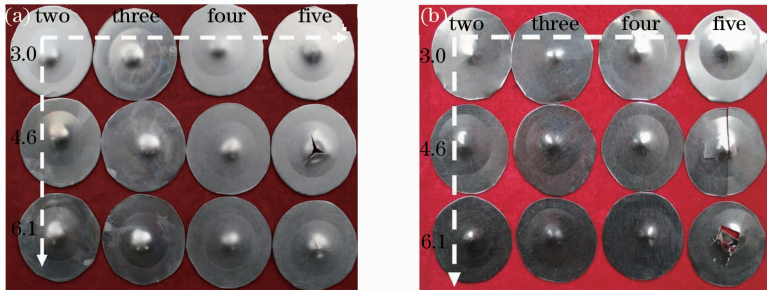


图4 金属板料激光冲击成形试样。(a) AZ31 镁合金;(b) 纯钼

Fig. 4 Laser shock forming samples of metal sheet. (a) AZ31 alloy; (b) pure Mo

图5所示为不同激光能量密度和连续冲击5次时镁合金 LSF 冲裂断口的宏观放大图片。由图5

可见,LSF 后镁合金宏观冲击断口形貌均表现为“三角裂口”,且其裂边均呈对称分布,未表现出各向

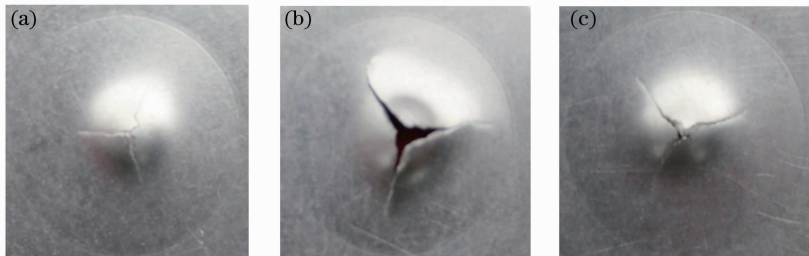


图5 不同能量密度和5次连续冲击后 AZ31 镁合金 LSF 试样冲击破裂宏观断口形貌。(a) 3.0 GW/cm^2 ; (b) 4.6 GW/cm^2 ; (c) 6.1 GW/cm^2

Fig. 5 Macrofracture morphologies of the impact ruptures after LSF by different energy densities and five impacts.

(a) 3.0 GW/cm^2 ; (b) 4.6 GW/cm^2 ; (c) 6.1 GW/cm^2

异性。激光能量密度为 3.0 GW/cm^2 时连续冲击 5 次后靶材表面出现微裂纹,即 LSF 极限值;随能量密度增加冲击破裂程度增大,其中能量密度为 4.6 GW/cm^2 时冲裂程度最大,此时吸收层吸收能量最多,冲击波产生的作用力最大。

图 6 是 LSF 后钼带冲裂断口的宏观放大图片。由图 6 可见,三种激光能量密度 (3.0 GW/cm^2 , 4.6 GW/cm^2 和 6.1 GW/cm^2) 连续冲击成形后钼带

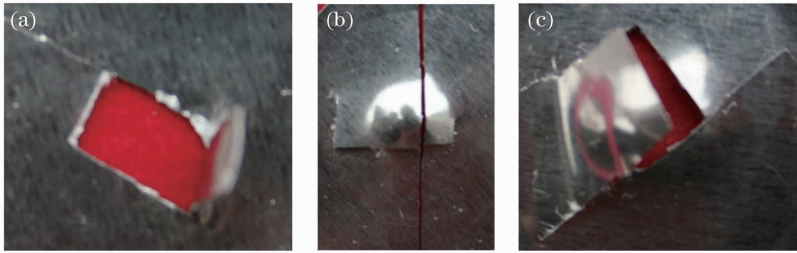


图 6 不同能量密度和 5 次连续冲击后纯钼 LSF 试样冲击破裂宏观断口形貌。(a) 3.0 GW/cm^2 ; (b) 4.6 GW/cm^2 ; (c) 6.1 GW/cm^2

Fig. 6 Macrofracture morphologies of the impact ruptures after LSF by different energy densities and five impacts.

(a) 3.0 GW/cm^2 ; (b) 4.6 GW/cm^2 ; (c) 6.1 GW/cm^2

由以上可得出,金属板料 LSF 破裂方式在很大程度上与材料本身性质、显微结构及其各向异性等密切相关。镁合金薄板和钼带均为交叉轧制靶材,在常规速率深冲成形过程中均表现出良好的成形能力,没有明显的各向异性,但钼带却能在高能高应变速率下激光冲击成形过程中表现出更明显的各向异性,受应变速率影响较大。

3.2.2 层裂机制

图 7 所示为 LSF 后钼带试样的完全层裂宏观形貌。在钼带 LSF 过程中发现了典型的表面层裂现象,当脉冲激光作用于钼带冲击区后,外凸面产生的拉伸波强度超过钼带的断裂强度,钼带就会沿波阵面方向发生损伤,以致拉裂出现典型的层裂片。纯钼层裂与作者^[16]在纯铝激光冲击强化实验中出现的层裂现象相吻合。高应变速率激光冲击层裂现



图 7 钼带 LSF 试样的完全层裂宏观形貌

Fig. 7 Macroscopic morphologies of the complete spallation after LSF of pure Mo strip

象产生的主要原因是由于脉冲强激光辐照靶材时产生的等离子体向外膨胀喷射,其反冲作用力产生一强冲击波进入靶材内部,使样品受到冲击加载。由于激光冲击载荷是以脉冲形式进行加载,强冲击波后将跟着一束稀疏波,当强冲击波到达靶材后表面时将反射形成一束稀疏波,这两束稀疏波相遇将会在靶材内产生拉伸应力。当该拉伸应力大于材料动态拉伸强度时,便引起拉伸损伤,发生层裂破坏甚至完全层裂。

3.3 LSF 试样微观断口

3.3.1 AZ31 镁合金

图 8 是激光能量密度为 6.1 GW/cm^2 和连续冲击 5 次时镁合金 LSF 试样的冲裂断口扫描电子显微镜(SEM)形貌。从图 8 可见,LSF 试样断口由韧性断裂和脆性断裂混合组成,这是由于钕玻璃激光器能量的高斯分布特征和冲击面所受到的冲击波作用力不均匀所致。在 LSF 过程中,在试样受激光冲击的内凹面,板材主要承受压缩变形;在其外凸面,主要承受拉伸变形,如图 1(b)所示。在经受激光冲击后,试样断口形貌和断裂机理明显地受到变形区应力状态的影响。拉伸变形区板材承受着拉应力,其断口特征表现为河流花样组成的解理断裂[如图 8(b)],其内部出现层裂纹[图 8(b)中箭头 C 和 D 所指位置],属于脆性断裂;而压缩变形区承受压应力,断口特征为不规则的深浅不一的韧窝,应变速率越

大, 韧窝深度越深, 应变率越小, 韧窝深度越浅, 应属于韧性断裂, 如图 8(c) 和 (d) 所示。由此得出, AZ31

镁合金 LSF 试样的冲裂断口属于韧性断裂和脆性断裂两种混合断裂。

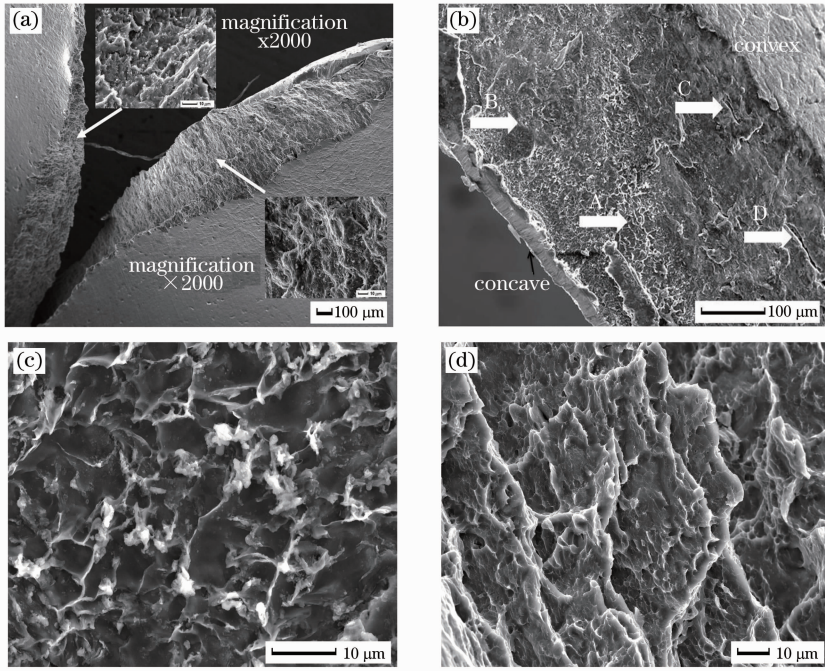


图 8 能量密度为 6.1 GW/cm^2 和连续冲击 5 次时 LSF 镁合金薄板冲击破裂微观断口形貌。

(a) $\times 300$; (b) $\times 450$; (c) B place in (b), $\times 2000$; (d) A place in (b), $\times 4000$

Fig. 8 Fracture morphologies of the impact ruptures of magnesium alloy sheet after LSF by laser energy density 6.1 GW/cm^2 and five impacts. (a) $\times 300$; (b) $\times 450$; (c) B place in (b), $\times 2000$; (d) A place in (b), $\times 4000$

3.3.2 钼带

图 9 所示为不同激光能量密度和连续冲击 5 次时纯钼带 LSF 试样的冲裂断口 SEM 形貌。从图可观察到, 在冲击变形区发现大量的显微裂纹: 一种是纤维裂纹, 即沿着钼纤维晶界且相互搭接交错; 另一种是冲击裂纹, 即钼纤维晶粒在激光冲击波的作用

下发生破裂, 其裂纹与钼纤维晶粒成一定角度排列。LSF 后钼带冲裂断口完全区别于拉伸断口形貌[见图 3(b)], 属于脆性断裂。因此, 钼带冲击区承受多次冲击波作用产生的拉伸应力大于材料抗拉强度极限值, 便产生层裂或厚度减薄现象。

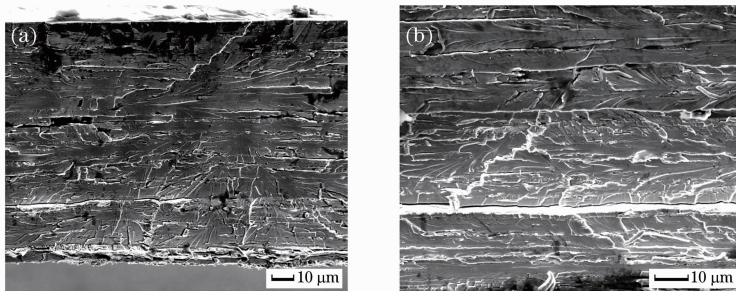


图 9 不同能量密度和连续冲击 5 次时 LSF 钼样冲击破裂微观断口形貌。(a) 4.6 GW/cm^2 ; (b) 6.1 GW/cm^2

Fig. 9 Fracture morphologies of the impact ruptures of Mo strip after LSF by different energy densities and five impacts.

(a) 4.6 GW/cm^2 ; (b) 6.1 GW/cm^2

4 结 论

1) 在三种激光能量密度条件下, 随着激光能量密度和连续冲击次数增加, AZ31 薄板和钼带 LSF

深度不断增加, 当冲击次数达到 5 次时, 冲击中心区域被冲裂。AZ31 薄板和钼带 LSF 破裂方式均表现出厚度减薄机制, 而在钼带的 LSF 过程中发现了层

裂现象。

2) AZ31 薄板 LSF 试样断口由韧性断裂和脆性断裂混合组成,呈分布对称的“三角裂口”;而钼带 LSF 试样断口属于脆性断裂,呈相邻裂边互相垂直的“垂直裂口”。

3) 交叉冷轧钼带在高能高应变速率下表现出明显的各向异性,而同为交叉轧制的 AZ31 薄板受应变速率影响较小。

参 考 文 献

- Zhang Qinglai, Chen Jun, Feng Tiantian, *et al.*. Property and microstructures of cold rolled molybdenum strip by laser shock processing[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2012, 19(5): 99-104.
张青来, 陈 骏, 冯甜甜, 等. 激光冲击冷轧钼带的微观结构和性能[J]. 材料研究学报, 2012, 19(5): 99-104.
- Ren Xudong, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong, *et al.*. Influence of laser parameters on laser shock forming of Ti-6Al-4V alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(11): 1850-1854.
任旭东, 张永康, 周建忠, 等. 激光参数对 Ti6Al4V 钛合金激光冲击成形的影响[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(11): 1850-1854.
- Yang Jianyang, Zuo Dunwen, Li Xiangfeng, *et al.*. Deformation and residual stresses of titanium alloy TA2 sheet after laser shock forming[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(s1): 31-35.
杨建阳, 左敦稳, 黎向锋, 等. 激光冲击成形 TA2 钛合金板的变形与残余应力[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(s1): 31-35.
- Ocana J L, Morales M, Porro J A, *et al.*. Laser shock microforming of thin metal sheets with ns lasers[J]. Physics Procedia, 2011, 12(2): 201-206.
- Marya M, Edwards G R. Study on the laser forming of near-alpha and metastable beta titanium alloy sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 108(3): 376-383.
- Ding Hua, Wang Yun, Cai Lan. Laser shock forming of aluminum sheet: finite element analysis and experimental study [J]. Applied Surface Science, 2010, 256(6): 1703-1707.
- Sagisaka Yoshihiro, Kamiya Masayoshi, Matsuda Minoru, *et al.*. Thin-sheet-metal bending by laser peen forming with femtosecond laser [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(15): 2304-2309.
- Zhang Yongkang, Chen Jufang, Xu Renjun. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy[J]. Chinese J Laser, 2008, 35(7): 1068-1072.
张永康, 陈菊芳, 许仁军. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究

- [J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1068-1072.
- Huang Shu, Zhou Jianzhong, Jiang Suqin, *et al.*. Study on strain hardening and fatigue fracture of AZ31B magnesium alloy after laser shot peening[J]. Chinese J Laser, 2011, 38(8): 0803002.
黄 舒, 周建忠, 蒋素琴, 等. AZ31B 镁合金激光喷丸后的形变强化及疲劳断口分析[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0803002.
- Ge Maozhong, Zhang Yongkang, Xiang Jianyun. Research on laser shock strengthening and stress corrosion cracking resistance of AZ31B magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2925-2930.
葛茂忠, 张永康, 项建云. AZ31B 镁合金激光冲击强化及抗应力腐蚀研究[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2925-2930.
- Zhang Yongkang, Pei Xu, Chen Jufang, *et al.*. Phenomenon and analysis of periodic ripple structure on magnesium alloy surface induced by laser shock processing[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2613-2619.
张永康, 裴 旭, 陈菊芳, 等. 脉冲激光冲击镁合金表面产生周期性波纹结构的现象及分析[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2613-2619.
- Zhang Qinglai, Li Min, Han Yinben, *et al.*. Study on cold deep drawing performance and microstructures of cross-rolled molybdenum strip[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(12): 205-208.
张青来, 李 敏, 韩寅奔, 等. 交叉轧制钼带冷深冲性能及微观组织研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(12): 205-208.
- Zhang Qinglai, Chen Jun, Han Weidong, *et al.*. *In-situ* research on microcracks of cross-rolling molybdenum strip in forming process[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(6): 186-190.
张青来, 陈 骏, 韩伟东, 等. 交叉轧制钼带成形过程显微裂纹的原位研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(6): 186-190.
- Zhang Qinglai, Lu Chen, Zhu Yanping, *et al.*. 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.
张青来, 卢 晨, 朱燕萍, 等. 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 Qinglai, Guo Hailing, Xiao Fugui, *et al.*. Influence of anisotropy of the magnesium alloy AZ31 sheets on warm negative incremental forming [J]. Journal of Material Processing Technology, 2009, 209(15-16): 5514-5520.
- Wang Yonggang, Boustie M, He Hongliang, *et al.*. Experimental study on mechanical behavior and tensile spallation of pure aluminium under laser shock loading[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(7): 965-970.
王永刚, Boustie M, 贺红亮, 等. 强激光辐照下纯铝的力学响应和层裂的实验测量与分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(7): 965-970.

栏目编辑:李志兰