

AZ31 镁合金激光冲击温成形实验研究

张青来¹ 吴铁丹¹ 张冰昕² 李兴成³ 邵 伟¹

¹江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013

²上海交通大学密西根学院, 上海 200240

³江苏理工学院机械工程学院, 江苏 常州 213001

摘要 为了研究超高应变速率激光冲击对 AZ31 镁合金温成形性能的影响, 采用钕玻璃脉冲激光器(脉冲宽度为 20 ns, 激光功率密度为 1.53 GW/cm²)进行 AZ31 镁合金薄板室温激光冲击成形(LSF)和 200 °C 时激光冲击温成形(WLSF)实验研究及模拟分析。结果表明: AZ31 交叉轧制薄板具有良好的超高应变速率 WLSF 能力, 可实现温成形和改性双重效应, 表层形成高幅残余压应力和高密度位错, WLSF 表面比 LSF 具有更稳定的残余压应力, 超高应变速率激光冲击和动态再结晶可能是纳米晶形成的主要原因, 并分析 LSF 和 WLSF 试样表面形貌和粗糙度以及表面残余应力分布。

关键词 材料; AZ31 镁合金; 激光冲击温成形; 残余应力; 微观结构

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/L0P42.0903002

Experimental Research of Warm Laser Shock Forming of AZ31 Magnesium Alloy

Zhang Qinglai¹ Wu Tiedan¹ Zhang Bingxin² Li Xingcheng³ Shao Wei¹

¹School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

²University of Michigan-Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

³School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou, Jiangsu 213000, China

Abstract In order to study the effects of laser shock with ultra-high strain rate on the warm forming properties of magnesium alloy, experimental research and simulation analysis of laser shock forming (LSF) and warm laser shock forming (WLSF) at 200 °C are carried out on AZ31 alloy sheets with Nd: glass laser with power density of 1.53 GW/cm² and pulse width of 20 ns. The results show that AZ31 alloy sheets have good WLSF ability with ultra-high strain rate and can achieve double effect of warm forming and modification. High value residual compressive stress and high density dislocations are generated on the surfaces of the samples. Residual compressive stress induced by WLSF is more stable than that induced by LSF. The laser shock with the ultra-high strain rate and dynamic recrystallization may contribute to the formation of nano-grains. Surface morphology and roughness and surface residual stress distribution of LSF and WLSF samples are also analyzed.

Key words materials; AZ31 alloy; warm laser shock forming; residual stress; microstructures

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850; 240.6700; 240.5770

1 引 言

激光冲击温成形(WLSF)是集材料改性强化和成形于一体的复合成形技术, 结合了板料温成形和激光冲击温强化(WLSP)的优点。Ye 等^[1-6]对 AA6061 和 AZ7075 铝合金及 AISI4140 结构钢进行 WLSP 基础研究, WLSP 可使合金发生动态时效, 产生比室温激光冲击强化(LSP)更多的纳米析出相、高密度位错和更稳定的残余压应力, 提高了材料的耐疲劳性能。AZ31 镁合金薄板具有良好的温拉深成形能力, 伴随着动态再结晶现

收稿日期: 2015-03-23; 收到修改稿日期: 2015-04-18

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、钛合金及激光加工技术等方面的研究。

E-mail: zhangql196210@163.com

象^[7-8]。关于镁合金 LSP、电化学性能和疲劳性能有较多报道^[9-12],但未见有关镁合金 WLSF 和 WLSF 及其超高应变速率下动态再结晶方面资料报道。

对 AZ31 镁合金薄板进行了 WLSF 实验和模拟,对比 LSP 研究和分析 WLSF 表面残余应力分布、表面形貌和透射电子显微镜(TEM)结构。

2 实 验

2.1 实验材料与实验方法

选用厚度为 0.4 mm 的 AZ31 镁合金交叉轧制薄板,消除应力退火处理制度:300 °C/30 min/AC。薄板微观组织和拉伸应力-应变曲线如图 1 所示。

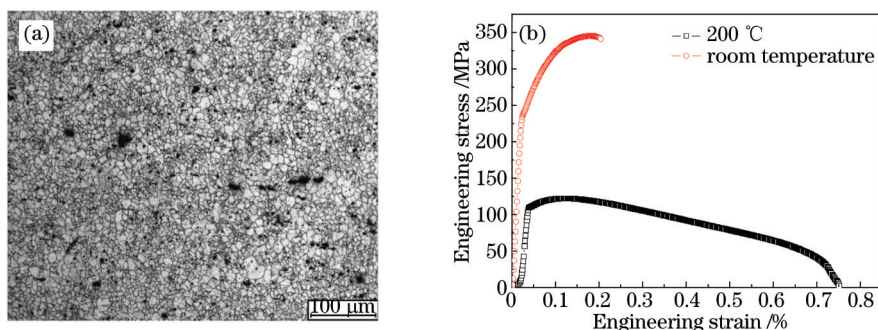


图 1 AZ31 镁合金交叉轧制薄板(a)金相组织及(b)拉伸应力-应变曲线

Fig.1 (a) Microstructure and (b) tensile stress-strain curves of AZ31 alloy cross-rolled sheets

在 WLSF 实验中采用 K9 光学玻璃和耐高温黑漆分别作为约束层和吸收层。利用自加工的冲裁模具,将薄板冲裁成直径为 38 mm 的圆片(以下称为靶材),然后用#1000 耐水砂纸进行表面抛光,以备激光冲击成形(LSF)用。

将 WLSF 用靶材固定在专用加热模具上,然后把靶材和模具一起加热到 200 °C,保温一定时间使模具受热均匀,将黑漆-吸收层均匀喷在镁合金靶材表面,然后把 K9 玻璃-约束层固定在靶材上。为了保证靶材温度均匀性,视靶材厚度控制保温 2~5 min,待靶材温度均匀后进行 WLSF 实验。为了保证激光脉冲能量吸收率,在实验过程中 K9 玻璃、高温黑漆与靶材材料之间不应存在间隙,以免影响脉冲能量吸收。WLSF 实验所用激光器参数:激光脉冲能量为 6 J,脉宽为 20 ns,波长为 1064 nm,光斑直径为 5 mm,功率密度为 1.53 GW/cm²。激光功率密度 I 计算公式为 $I = 4E/\pi\tau D^2$,式中 E 为激光脉冲能量, τ 为脉宽, D 为光斑直径。WLSF 过程示意图和样品照片分别如图 2 和 3 所示。

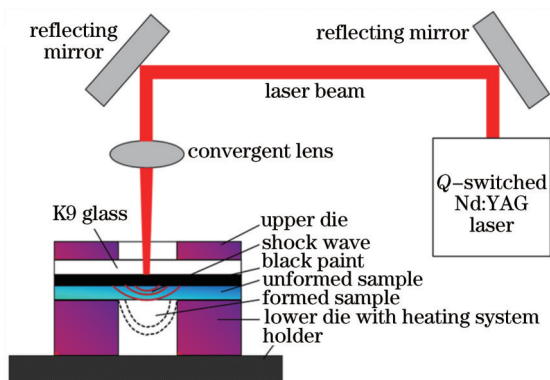


图 2 激光冲击温成形示意图

Fig.2 Sketch map of WLSF



图 3 激光冲击温成形样品照片

Fig.3 Photos of WLSF specimen

采用 X350A 型 X 射线应力测定仪测试激光冲击靶材的残余应力。采用 OLS4100 型激光扫描显微镜对 LSF 表面进行非接触式、无损和快速成像测量,拍摄精确的样品表面形貌图像。利用 LEICA DM2500M 型正置透反射光学显微镜和 JEOL JEM-2100 型高分辨 TEM 分别对镁合金微观组织和 TEM 结构进行观察和分析。

3 结果与分析

3.1 表面残余应力

激光冲击波诱导的表面残余压应力不仅可以平衡所承受的部分拉应力,抑制裂纹的产生,而且对裂纹尖端起到闭合作用,阻止微裂纹的扩展,可有效提高合金的断裂强度^[10]。为了更好地了解 WLSF 冲击凹坑表面残余应力分布情况,需要进行大量的测试工作,耗费更多时间和费用。对试样冲击区取 5 点测试残余应力,结合模拟结果讨论其残余应力分布。本模拟中运用 ABAQUS 软件、镁合金 Johnson-Cook 本构模型和应力-应变曲线对室温和 200 °C 下镁合金薄板 LSF 进行模拟,按相同实验条件选择模拟参数。

图 4(a)、(c)、(e)分别为 LSF 模拟成形云图、表面残余应力云图、表面残余应力与位移关系图。图 4(b)、(d)、(f)分别为 200 °C 时 WLSF 模拟成形云图、表面残余应力云图、表面残余应力与位移关系图。由图可观察到, AZ31 镁合金薄板具有良好的超高应变速率 WLSF 能力, LSF 和 WLSF 单次冲击凹坑形貌呈球形,实验和模拟结果区别在于成形深浅, WLSF 成形深度大于 LSF 深度,这是因为 200 °C 镁合金具有较低的屈服强度和良好的塑性[见图 1(b)]。

由图 4(c)~(f)还可见, WLSF 表面残余应力和大小呈不均匀分布, LSF 表面残余应力呈“V”型分布,其最大残余压应力(-158 MPa)出现在光斑中心,而 WLSF 表面残余应力却呈“W”型分布,最大残余压应力(-100 MPa)产生在光斑中心周围。因此,靶材表面在 LSF 同时,产生高幅值残余压应力,实现了成形与改性双重效应。

图 5 为 LSF 和 WLSF 试样的表面残余应力测试值。由图可知, LSF 和 WLSF 表面的最大残余压应力均出现在光斑中心,其值分别为 -150 ± 36 MPa 和 -120 ± 25 MPa。尽管 LSF 试样冲击区中心的表面残余压应力值大于 WLSF 值,但当远离光斑中心 0.4 mm 时, WLSF 冲击表面残余压应力值反而高于 LSF 值,说明 WLSF 冲击表面残余压应力比 LSF 冲击区更加稳定,即 WLSF 表面具有更稳定的残余压应力,与文献[1-5]中 WLSF 诱导的残余应力热稳定性实验结果相同。由图 4(f)模拟值和图 5 测试值可知, WLSF 试样测试的表面残余应力分布呈“V”型,区别于模拟时表面残余应力分布“W”型,这是因为 WLSF 比 LSF 更加复杂,不仅受到模拟参数、约

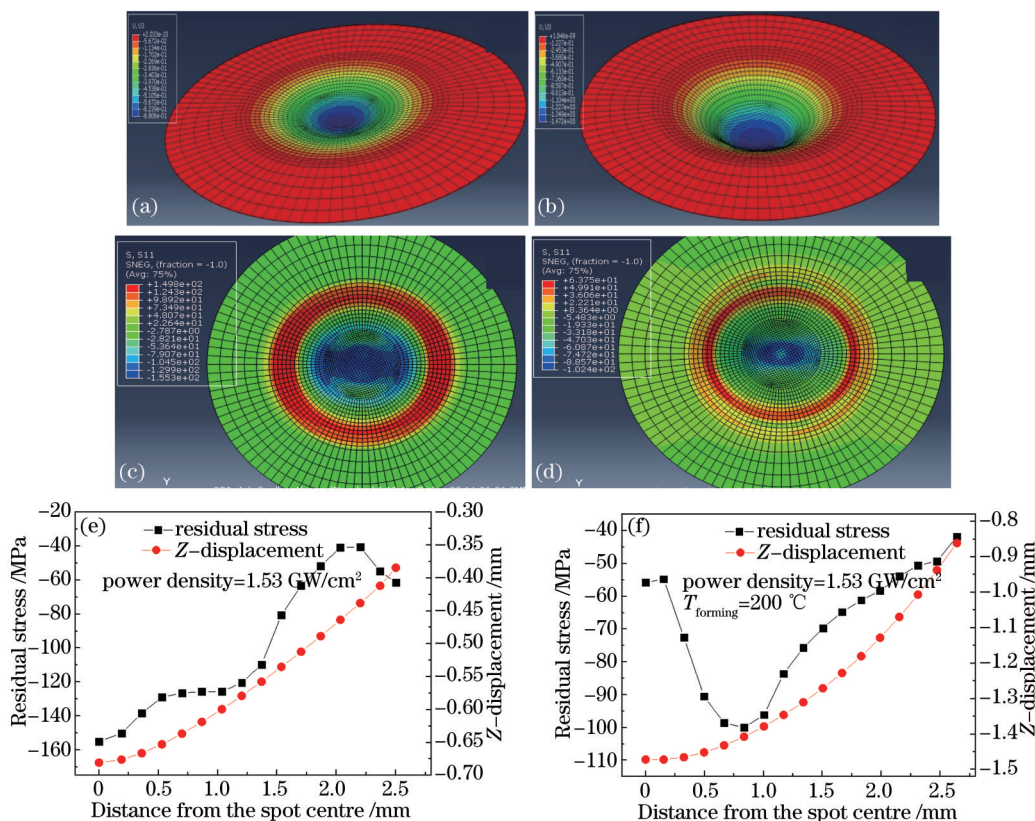


图 4 LSF 和 WLSF 模拟结果

Fig.4 Simulation results for WLSF and LSF

束层、吸收层和激光冲击参数,而且受靶材温度、再结晶软化等因素的影响。

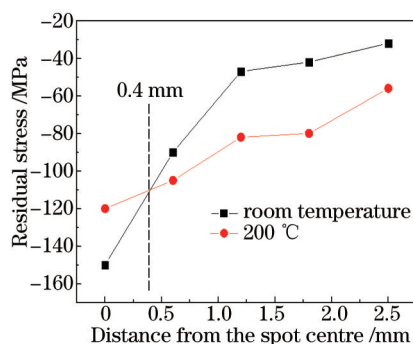


图 5 LSF 和 WLSF 表面残余应力测试值

Fig.5 Testing values of surface residual stress for LSF and WLSF

3.2 表面结构和粗糙度

图 6 为室温和 200 °C 时单光斑 LSF 试样的三维表面轮廓及其对应冲击区内截面深度轮廓曲线和不同部位的表面结构,图中 a、b、c 分别表示未冲击区、过渡区、光斑中心区。利用 OLS4100 型激光扫描显微镜对单光斑激光冲击区表面形貌进行观察和分析。

从图中可以看出,LSF 和 WLSF 试样未冲击区表面均显示出砂纸抛光留下的深沟槽形貌,平均表面粗糙度 R_a 约为 $0.34 \mu\text{m}$;LSF 和 WLSF 过渡区表面变得更加粗糙,其对应的平均表面粗糙度 R_a 分别约为 $5.79 \mu\text{m}$ 和 $4.25 \mu\text{m}$,这是由于脉冲能量分布不均匀和冷/热塑性变形共同造成的表面不均匀变形;激光冲击波作用的 LSF 和 WLSF 中心区产生了明显的塑性变形,其平均表面粗糙度 R_a 分别约为 $13.82 \mu\text{m}$ 和 $5.15 \mu\text{m}$ 。因此,激光冲击使成形表面变得粗糙,且 WLSF 试样表面粗糙度小于 LSF 试样表面粗糙度。

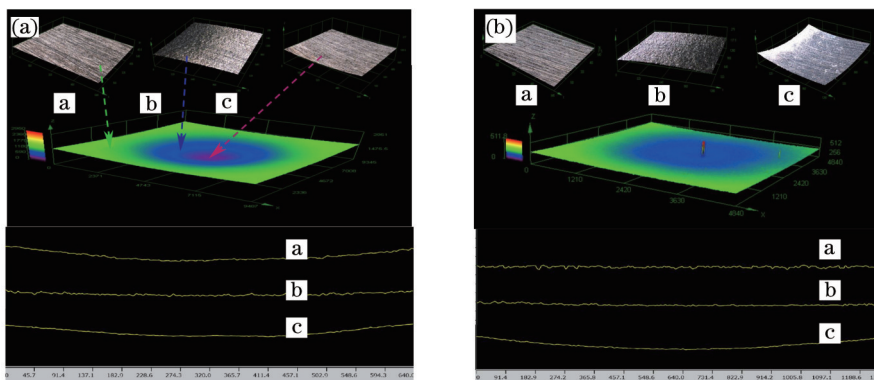


图 6 LSF 和 WLSF 试样三维表面轮廓和表面粗糙度。(a) 200 °C; (b) 室温

Fig.6 Three-dimensional-surface profiles and surface roughness of LSF and WLSF specimens. (a) 200 °C ; (b) room temperature

3.3 TEM 结构

图 7 为 200 °C 时 WLSF 试样强化层 AZ31 镁合金 TEM 结构。由图 7 可见,在超高应变速率激光冲击波的作用下,镁合金薄板发生了热塑性变形,强化层合金内部产生大量非均匀分布的高密度位错,以杂乱的缠绕方式相互交织一起,出现了高密度位错缠结,而且位错排列无方向性,多数发生在晶内,如图 7(a)和(b)所示;由 TEM 像和电子衍射(SAED)花样可知,衍射环呈断续状,衍射斑点呈圆弧状,表明表层内晶粒的细化明显,局部观察到晶界清晰的尺寸在 50 nm 左右的纳米晶,这是由于超高应变速率激光冲击和动态再结晶共同作用的结果,如图 7(c)和(d)所示。在图 7(a)中还观察到一些亚晶粒存在,这是因为激光冲击产生的位错缠结转变成小角度取向差的亚晶界而形成亚晶粒^[13]。关于 AZ31 镁合金在 200°C 和超高应变速率条件下是否来得及发生动态再结晶现象。镁合金发生动态再结晶主要原因:1) 镁合金滑移系较少,位错易塞积;2) 镁和镁合金层错能较低,滑移和攀移困难,动态回复速度慢;3) 镁合金晶界扩散速度较高。从理论上,动态再结晶性能依赖于合金层错能,而镁的层错能为 $78 \text{ mJ/m}^{2[14]}$,那么本实验中激光冲击所产生的高密度位错可进一步降低合金的热扩散激活能,可在超短时间内增加动态再结晶发生几率。Zhou 等^[15]认为,经 5 km/s 极高速冲击后

AM60B 镁合金形成的动态再结晶晶粒归结于冲击波、塑性变形和材料内储存的高应变能所引起的高温。根据参考文献[1], AISI 4140 钢在超高应变速率激光冲击温强化过程中发生了动态应变时效和动态析出现象。据此可以推断, AZ31 镁合金在 200 °C 下 WLSF 极短时间内会发生动态再结晶现象, 需要进一步实验证实和探讨。

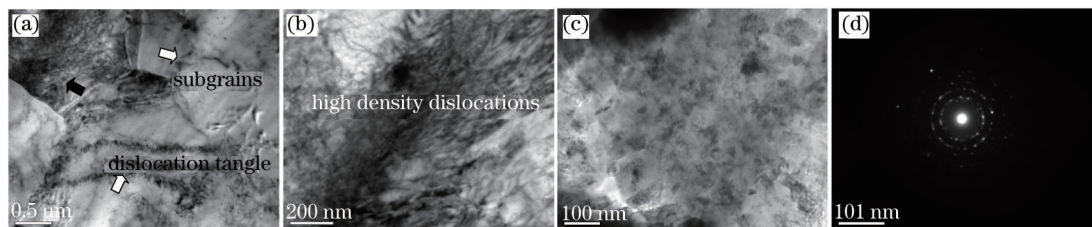


图7 WLSF 试样(a)~(c)TEM 结构和(d)SAED 花样

Fig.7 (a)~(c) TEM images and (d) SAED pattern of WLSF specimen

4 结 论

AZ31 交叉轧制薄板具有良好的超高应变速率 WLSF 性能, WLSF 冲击表面质量良好, 且 WLSF 表层具有比 LSF 表面更稳定的残余压应力, 激光冲击可诱导镁合金表层产生高幅值残余压应力和高密度位错, 而纳米晶可能是由于超高应变速率激光冲击细化和动态再结晶共同作用的结果, WLSF 可实现成形和改性双重效应。

参 考 文 献

- 1 Ye C, Sergey S, Bong J K, *et al.*. Fatigue performance improvement in AISI 4140 steel by dynamic strain aging and dynamic precipitation during warm laser shock peening[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(3): 1014–1025.
- 2 Ye C, Liao Y L, Gary J C. Warm laser shock peening driven nanostructures and their effects on fatigue performance in aluminum alloy 6160[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2010, 12(4): 290–297.
- 3 Ye C, Liao Y L, Suslov S, *et al.*. Ultrahigh dense and gradient nano-precipitates generated by warm laser shock peening for combination of high strength and ductility[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 609: 195–203.
- 4 Liao Y L, Ye C, Gao H, *et al.*. Dislocation pinning effects induced by nano-precipitates during warm laser shock peening: Dislocation dynamic simulation and experiments[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(2): 023518.
- 5 Liao Y L, Suslov S, Ye C, *et al.*. The mechanisms of thermal engineered laser shock peening for enhanced fatigue performance[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(13–14): 4997–5009.
- 6 Tani G, Orazi L, Fortunato A, *et al.*. Warm laser shock peening: New developments and process optimization[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2011, 60(13): 219–222.
- 7 Zhang H, Huang G S, Fan J F, *et al.*. Deep drawability and deformation behavior of AZ31 magnesium alloy sheets at 473 K[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 608(1): 234–241.
- 8 Zhang Qinglai, Hu Yongxue, Wang Lili. Stress-strain of uniaxial tension and recrystallization structures of AZ31B magnesium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(4): 678–681.
张青来, 胡永学, 王粒粒. AZ31B 镁合金拉伸应力-应变和再结晶组织[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(4): 678–681.
- 9 Zhang Qinglai, Hong Yanxin, Wang Rong, *et al.*. The effect of laser shock forming on the microstructure and residual stress of AZ31 magnesium alloy[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2014, 28(3): 166–172.
张青来, 洪妍鑫, 王 荣, 等. 激光冲击成形对 AZ31 镁合金微观结构和残余应力的影响[J]. *材料研究学报*, 2014, 8(3): 166–172.
- 10 Zhang Qinglai, Wu Tiedan, Qian Yang, *et al.*. Study on high cycle fatigue properties and laser shock processing of AZ91D-T6 cast magnesium alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1003008.
张青来, 吴铁丹, 钱 阳, 等. AZ91D-T6 铸造镁合金激光冲击强化和高周疲劳性能研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1003008.
- 11 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 Lasers*, 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.
- 12 Li X C, Zhang Y K, Chen J F, *et al.*. Effect of laser shock processing on stress corrosion cracking behaviour of AZ31 magnesium alloy at slow strain rate[J]. *Materials Science and Technology*, 2013, 29(5): 626–630.
- 13 Ge Maozhong, Xiang Jianyun, Zhang Yongkang. Surface nanocrystallization of AZ31B magnesium alloy induced by laser shock

- processing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(4): 856-861.
- 葛茂忠, 项建云, 张永康. 激光冲击处理诱导 AZ31B 镁合金表面纳米化[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(4): 856-861.
- 14 Zhang Xuefeng, Wu Guohua, Ding Wenjiang. Mechanical properties and microstructures of AZ31 magnesium alloy after high and low temperature treatment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(12): 2979-2986.
- 张学锋, 吴国华, 丁文江. 高低温处理条件下 AZ31 镁合金的力学性能与微观组织[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(12): 2979-2986.
- 15 Zou D L, Zhen L, Zhu Y, *et al.*. Deformed microstructure evolution in AM60B Mg alloy under hypervelocity impact at a velocity of 5 km/s [J]. Materials & Design, 2010, 31(8): 3708-3715.

栏目编辑: 张浩佳