

激光冲击 7050-T7451 铝合金表面的 X 射线衍射图谱与微结构的相关性

曹宇鹏^{1,3,4}, 陈浩天¹, 冯爱新^{2,3}, 周锐¹, 花国然^{1*}, 蒋苏州¹

¹南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019;

²温州大学机电工程学院, 浙江 温州 325035;

³江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

⁴南京大学南通材料工程技术研究院, 江苏 南通 226019

摘要 采用脉冲激光对 7050-T7451 铝合金表面进行了激光冲击强化处理。利用 X 射线衍射仪(XRD)和场发射式透射电镜(TEM), 获得了试样表面衍射图谱和微观组织形貌, 建立了激光冲击强化 7050-T7451 铝合金表面的微结构响应模型。结果表明, 当激光功率密度为 $1.83 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 试样表面发生了过饱和固溶体的失稳分解; 当激光功率密度为 $2.34 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 试样表面的晶粒尺寸增大; 当激光功率密度为 $2.85 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 试样表面产生了纳米晶。激光冲击强化 7050-T7451 铝合金表面的 XRD 图谱与 TEM 分析结果具有一致性。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; 7050-T7451 铝合金; X 射线衍射; 微结构

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0502003

Correlation Between X-Ray Diffraction Pattern and Microstructure of Laser Shock Processed 7050-T7451 Aluminum Alloy Surface

Cao Yupeng^{1,3,4}, Chen Haotian¹, Feng Aixin^{2,3}, Zhou Rui¹, Hua Guoran¹, Jiang Suzhou¹

¹School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China;

²School of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China;

³School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

⁴Nantong Institute of Materials Engineering and Technology, Nanjing University, Nantong, Jiangsu 226019, China

Abstract Pulsed laser shocks are adopted to conduct a shock penning processing on the surface of 7050-T7451 aluminum alloys, and the diffraction pattern and microstructure of specimen surface are obtained by the X-ray diffractometer (XRD) and the field emission transmission electron microscope (TEM). A microstructure response model of the laser shock processed 7050-T7451 aluminum alloy surface is established. The results indicate that, when the laser power density is $1.83 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, the destabilization decomposition of supersaturated solid solution occurs; when the laser power density is $2.34 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, the grain size increases; when the laser power density is $2.85 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, nanocrystals are produced on the specimen surface. The XRD pattern and the TEM analysis results of laser shock processed 7050-T7451 aluminum alloy surface are of consistency.

Key words laser technique; laser shock processing; 7050-T7451 aluminum alloy; X-ray diffraction; microstructure

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 040.7480

收稿日期: 2017-10-23; 收到修改稿日期: 2017-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(51505236)、2016 年度江苏省高校“青蓝工程”、南通市应用基础研究项目(GY12016001)、南通大学研究生科研创新计划(YKC16028)

作者简介: 曹宇鹏(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事激光加工检测技术方面的研究。E-mail: cyp19812004@ntu.edu.cn

导师简介: 冯爱新(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工与检测技术方面的研究。

E-mail: aixfeng@126.com

* 通信联系人。E-mail: huagr@ntu.edu.cn

1 引 言

激光冲击强化(LSP)技术是将高能脉冲激光束加载到涂覆有吸收层的金属表面,形成的等离子体在约束层的作用下诱导产生力学效应,从而提高金属材料表面硬度、强度、耐磨性、耐腐蚀性等性能^[1-3]。激光加载材料表面形成的等离子体爆轰波强度大,冲击压力在材料表面的作用时间极短,材料表面微结构的动态变化过程无法直接观察,只能借助透射电镜(TEM)对激光冲击强化后材料表面的微结构进行观察。通过TEM可以对激光冲击铝合金、镁合金以及钛合金的表面微结构进行分析^[4-6],X射线衍射仪(XRD)也被广泛应用于金属材料的研究中^[7-8],但对于激光冲击强化金属材料表面的XRD图谱与微结构相关性的研究鲜有报道。

7050-T7451 铝合金是重要的航空铝合金,被广泛应用于固定翼飞机上^[4]。本文采用脉冲激光对7050-T7451 铝合金表面进行了激光冲击强化,利用XRD和TEM对铝合金表面进行了检测,研究了铝合金表面XRD图谱和微结构的相关性,并建立了激光冲击强化7050-T7451 铝合金表面微结构响应模型,为激光冲击强化金属材料的工艺优化提供了实验依据。

2 实验方案

采用7050-T7451 铝合金作为实验材料,该合金具有高强度及良好的耐腐蚀性和裂纹扩展性等优异性能^[9-10],其主要化学成分见表1。使用线切割方式获得尺寸为50 mm×50 mm×5.5 mm的试样,并将样品沿厚度方向打磨至5 mm,用乙醇清洗并冷风风干。采用10 mm×10 mm×150 μm的3M铝膜作为吸收层并将其紧密贴合于试样表面,以去离子水作为约束层。

激光冲击强化实验使用法国THALES公司生产的Gaia-R系YAG固体激光器,光斑直径为3 mm,波长为1064 nm,脉宽为10 ns,搭接率为50%;激光能量选择1.6,2.6,3.6,4.6,5.6 J,对应的激光功率密度分别为0.81,1.32,1.83,2.34,2.85 GW·cm⁻²。

表1 7050-T7451 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 7050-T7451 aluminum alloys (mass fraction, %)

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
Value	0.12	0.15	2.0-2.6	0.1	1.9-2.6	5.6-6.7

激光冲击强化后的试样经乙醇超声清洗后风干,利用日本理学公司生产的Ultima IV型X射线衍射仪进行试样的XRD图谱测定;采用美国FEI公司生产的Tecnai G2 F20场发射高分辨透射电子显微镜观察试样的微结构。TEM测试样品的制备方法:先用线切割方式将冲击区域分割成5 mm×5 mm×5 mm,试样背面用砂纸打磨至100 μm,将试样研磨成直径约为4 mm的薄片,将该薄片粘贴在3 mm的有孔铝环上进行离子减薄。

3 实验结果

3.1 XRD 分析

不同激光功率密度下冲击强化7050-T7451 铝合金的XRD图谱如图1所示。对图1所示的特征衍射晶面(200)和(220)的半峰全宽(FWHM)进行提取,其与激光功率密度的关系曲线分别如图2(a)、(c)所示。由图2(a)、(c)可知,随着激光功率密度的增大,XRD图谱的FWHM呈宽化趋势,但当激光功率密度为1.83 GW·cm⁻²时,FWHM曲线出现拐点;当激光功率密度达到2.34 GW·cm⁻²时,FWHM又随着激光功率密度的增大发生宽化。根据谢乐公式,有

$$D = \frac{0.89\lambda}{\beta_{2\theta} \cos \theta}, \quad (1)$$

式中D为晶粒尺寸,λ为入射线波长,β_{2θ}为对应衍射晶面的FWHM,θ为入射角。由(1)式得到不同衍射晶面的平均晶粒尺寸,如图2(b)、(d)所示。从图2(b)、(d)可知,随着激光功率密度的增大,晶粒尺寸逐步减小,但当激光功率密度为1.83 GW·cm⁻²时,晶粒尺寸呈增大的趋势;当激光功率密度增大至2.34 GW·cm⁻²时,晶粒

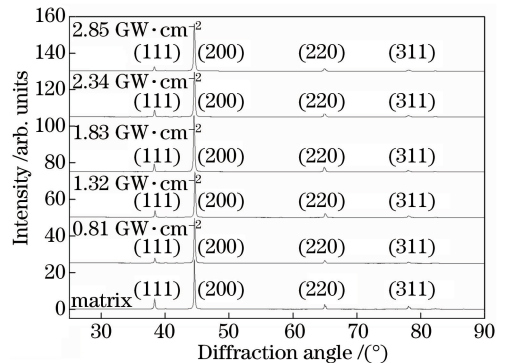


图1 不同激光功率密度下冲击强化7050-T7451 铝合金的XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of laser shock processed 7050-T7451 aluminum alloys under different laser power densities

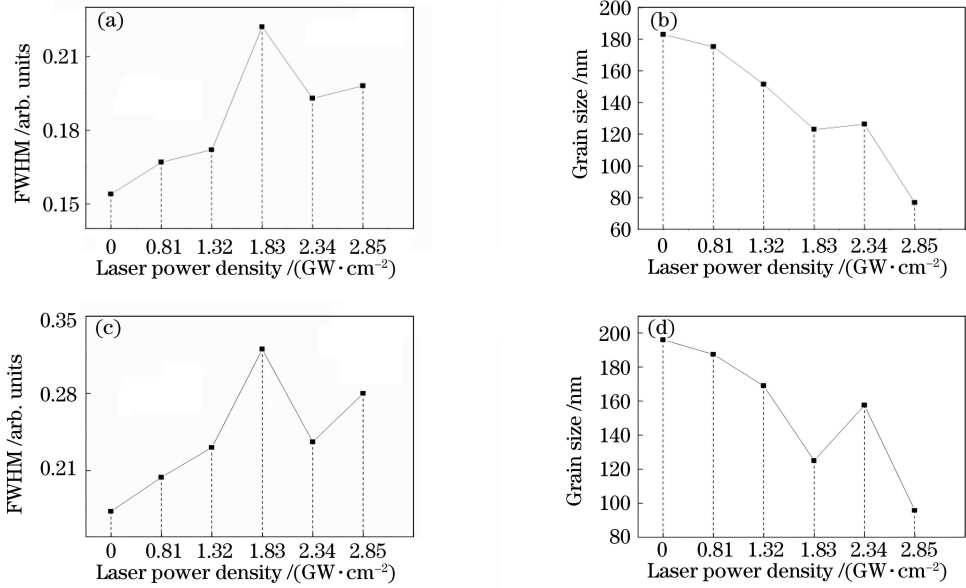


图 2 不同参数随激光功率密度的变化。

(a) (200)面, FWHM; (b) (200)面, 晶粒尺寸; (c) (220)面, FWHM; (d) (220)面, 晶粒尺寸
 Fig. 2 Different parameters versus laser power density. (a) (200) plane, FWHM;
 (b) (200) plane, grain size; (c) (220) plane, FWHM; (d) (220) plane, grain size

尺寸达到最大,而后再次随着激光功率密度的增大而减小;当激光功率密度为 2.85 GW·cm⁻²时,相干衍射平均晶粒尺寸在衍射方向上达到 100 nm 以下,表面出现纳米晶^[11]。

3.2 激光冲击强化 7050-T7451 铝合金表面微观组织演变

3.2.1 7050-T7451 铝合金原始组织

7050-T7451 铝合金原始组织的 TEM 像如图 3 所示。可以看到,试样表面组织中有少量第二相析出,由于衬度的关系,部分析出相在图中不可见。从析出相可以看出,铝合金原始晶界分明,晶粒尺寸较大,位错无法被观察到。

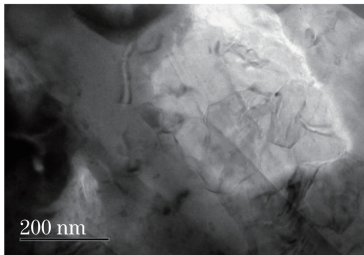


图 3 7050-T7451 铝合金原始基体表面的 TEM 像
 Fig. 3 TEM image of original matrix surface of 7050-T7451 aluminum alloy

3.2.2 激光冲击强化后 7050-T7451 铝合金表面的结构形貌

不同激光功率密度下冲击强化 7050-T7451 铝

合金的 TEM 像如图 4、5 所示。随着激光功率密度的增大,试样表面组织分布趋向均匀,晶粒尺寸逐步稳定。由图 4(a)~(c)可知,当激光功率密度不大于 1.83 GW·cm⁻²时,起始晶粒较为粗大,随着激光功率密度的增大,晶粒尺寸不断减小。当激光功率密度为 2.34 GW·cm⁻²时,晶粒的尺寸开始增大,如图 4(d)所示;当激光功率密度达到 2.85 GW·cm⁻²时,晶粒的尺寸再次减小,7050-T7451 铝合金表面在极端的塑性变形下产生了剧烈的位错生长和晶粒细化现象,晶粒的平均尺寸约为 100 nm,如图 5(a)所示。图 5(b)所示为 7050-T7451 铝合金试样的选区电子衍射,在 2.85 GW·cm⁻²激光功率密度下,电子衍射图样呈同心圆,说明晶粒在不同衬度上取向相同,属于典型的纳米晶形态。

4 分析与讨论

4.1 由 XRD 图谱所得晶粒尺寸与 TEM 下晶粒尺寸的对比

通过谢乐公式对激光冲击强化 7050-T7451 铝合金进行 XRD 图谱分析,发现 7050-T7451 铝合金为面心立方结构,晶粒尺寸为 80~200 nm。观察图 4、5 可知,当激光功率密度较小时,晶粒尺寸为 300~800 nm,而由 XRD 图谱所得晶粒尺寸小于

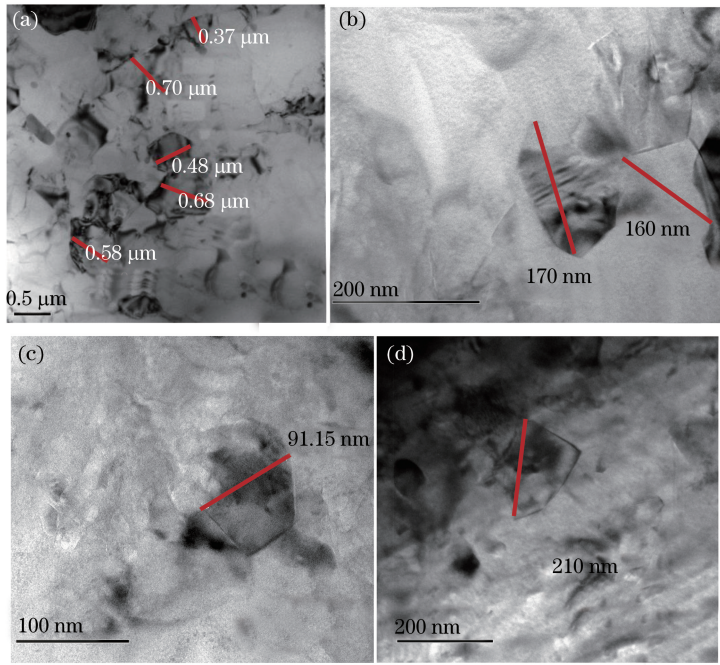


图 4 不同激光功率密度冲击强化后 7050-T7451 铝合金的表面 TEM 像。(a) $0.81 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$; (b) $1.32 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$; (c) $1.83 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$; (d) $2.34 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$

Fig. 4 TEM images of shock processed 7050-T7451 aluminum alloy surface under different laser power densities. (a) $0.81 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$; (b) $1.32 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$; (c) $1.83 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$; (d) $2.34 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$

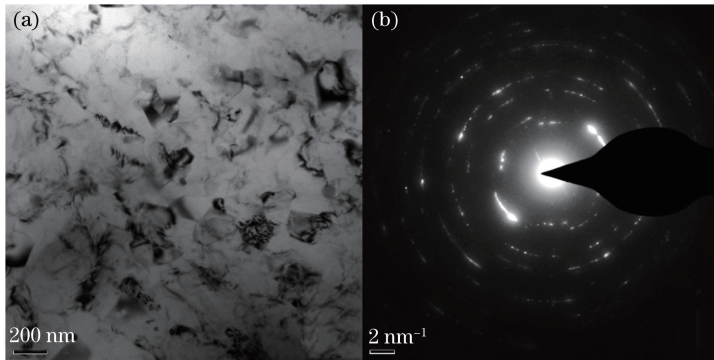


图 5 激光功率密度为 $2.85 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时的 7050-T7451 铝合金表面。(a) TEM 像; (b) 电子衍射图

Fig. 5 7050-T7451 aluminum alloy surface when laser power density is $2.85 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$.

(a) TEM image; (b) electron diffraction pattern

200 nm, 两者尺寸结果不一致。这是因为由 XRD 图谱测得的相干衍射平均晶粒尺寸中包括由位错、滑移、攀移形成的多边形结构的位错胞尺寸, 而 TEM 观察到的是亚晶的尺寸结构, 所以 TEM 观察的晶粒尺寸大于由 XRD 图谱测试的。随着激光功率密度的增大, 由 XRD 图谱测得的晶粒尺寸和 TEM 观察的尺寸呈一致性。这是因为在极端的塑性变形下, 7050-T7451 铝合金产生了晶粒细化现象, 在外来载荷的作用下亚晶粒动态再结晶演变成大角晶界, 新晶粒形成^[12]。

4.2 7050-T7451 铝合金的失稳分解过程

7050-T7451 铝合金是典型的 Al-Zn-Mg 合金, 其

原子偏聚区呈球状, 析出相为片状的 η' 相, 完成脱溶后, 平衡析出相为 $\eta(\text{MgZn}_2)$ 。激光冲击强化具有高压、超快、超高应变率等特征, 在高压作用下, 塑性应变能转化为热能。在激光冲击过程中, 7050-T7451 铝合金处于亚稳定状态, 极易发生失稳分解, 在固溶体中产生浓度梯度, 此时, 固溶体的点阵常数和化学键发生变化, 其吉布斯能 ΔG 的变化^[13] 为

$$\Delta G = \frac{1}{2} [G(C_0 + \Delta C) + G(C_0 - \Delta C)] - G(C_0), \quad (2)$$

式中 C_0 为均匀系统的平均浓度, $G(C_0)$ 为摩尔吉布斯能, ΔC 为系统受激光冲击后的浓度变化量。

将 $G(C_0 + \Delta C)$ 和 $G(C_0 - \Delta C)$ 用三阶泰勒公式展开, 可得

$$G(C_0 + \Delta C) = G(C_0) + \Delta C G'(C_0) + \frac{(\Delta C)^2}{2} G^{(2)}(C_0) + \frac{(\Delta C)^3}{6} G^{(3)}(C_0), \quad (3)$$

$$G(C_0 - \Delta C) = G(C_0) - \Delta C G'(C_0) + \frac{(\Delta C)^2}{2} G^{(2)}(C_0) - \frac{(\Delta C)^3}{6} G^{(3)}(C_0), \quad (4)$$

因此, 有

$$\Delta G = \frac{1}{2!} (\Delta C)^2 G^{(2)}(C_0) + \frac{1}{4!} (\Delta C)^4 G^{(4)}(C_0) + \dots, \quad (5)$$

式中 G' 、 $G^{(2)}$ 、 $G^{(3)}$ 、 $G^{(4)}$ 分别为系统吉布斯能的一阶、二阶、三阶、四阶导数, $(\Delta C)^2$ 、 $(\Delta C)^3$ 、 $(\Delta C)^4$ 分别为 ΔC 的平方、三次方、四次方。

由(5)式可得, 当 $G^{(2)}(C_0) > 0$ 时, 成分发生变化的系统的吉布斯能增大; 当 $G^{(2)}(C_0) < 0$ 时, 成分的变化导致系统的吉布斯能减小。激光冲击强化后材料温度上升, 导致各相的吉布斯能增大; 在激光冲击强化导致晶粒失稳分解的后期, 7050-T7451 铝合金处于亚平衡状态, 但分散的颗粒使系统的界面能较大, 同时保持着较大的吉布斯能。每个原子的界面能越多, 其化学势就越高, 处于平衡态母相中的溶质原子浓度也越高, 故两颗粒之间出现了浓度梯度。细小脱溶物溶入粗大的颗粒中发生晶粒粗化, 这种晶粒粗化现象被称为 Ostwald 熟化现象^[13]。

通过 XRD 图谱分析可知, 当激光功率密度为 $1.83 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, FWHM 的增大趋势终止, 曲线到达拐点; 当激光功率密度为 $2.34 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 试样表面发生晶粒粗化现象, TEM 像中观察到典型的 Ostwald 熟化现象, 如图 6 所示。晶粒 C 的尺寸较为粗大, 在发生失稳分解的后期, 片状 η 相晶粒 A、B 逐渐分解并向晶粒 C 方向移动, 逐渐溶入晶粒 C, 导致晶粒 C 的尺寸进一步增大。这与通过 XRD 图谱所得的相干衍射平均晶粒尺寸的变化情况一致。由此可知, $2.34 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 激光冲击强化 7050-T7451 铝合金表面, 铝合金发生失稳分解, 进而产生 Ostwald 熟化现象。

由图 2 可知, 当激光功率密度不大于 $1.83 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, XRD 图谱的 FWHM 呈宽化趋势, 晶粒尺寸逐步减小。由图 4(a)~(c) 可知, 形核晶粒本身较为粗大, 晶粒尺寸虽然随着激光功率密度的增大而不断减小, 且存在一定的细小尺寸晶粒,

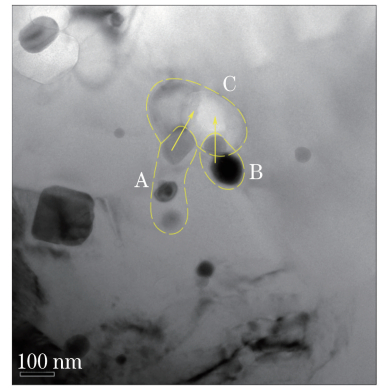


图 6 激光功率密度为 $2.34 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时 7050-T7451 铝合金表面的 Ostwald 熟化现象

Fig. 6 Ostwald ripening phenomenon on surface of 7050-T7451 aluminum alloy when laser power density is $2.34 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$

但试样的 TEM 像未观察到 Ostwald 熟化现象。由此可知, 界面能不足以支撑细小晶粒完成迁移。由 XRD 图谱分析可知, 当激光功率密度达到 $2.85 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 相干衍射平均晶粒尺寸小于 100 nm , 在图 5 所示试样 TEM 像中也观察到纳米晶。当以极高激光功率密度冲击材料表面时, 铝合金在极端的塑性变形下产生了剧烈的位错生长和晶粒细化现象, 铝合金表面出现纳米晶, 结晶时形成较为细小且均匀的晶粒; 细小的脱溶物溶入较粗大的颗粒中是产生 Ostwald 熟化现象的前提^[13], 细小且均匀的纳米晶不满足 Ostwald 熟化的条件, 因此, 晶粒尺寸保持稳定, 由 XRD 图谱所得晶粒尺寸与由 TEM 像观测的晶粒尺寸具有较好的一致性。

4.3 激光冲击强化 7050-T7451 铝合金表面的微结构响应模型

鲁金忠^[12] 提出了激光冲击强化 LY2 铝合金晶粒的细化模型。齐元昊等^[14] 给出了 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织的粗化的过程。罗新民等^[15] 分析了激光冲击铝合金产生的位错种类和特征。在激光冲击强化过程中, 位错在金属表面上重排并生长, 部分原始晶格界线消失^[16]; 部分弹性位错能在位错上被新相形核抵消, 使晶体缺陷的形核功减小, 与均质形核相比晶核更易形成, 故冲击后快速生长形成的位错和原有晶界易于形核, 在激光冲击强化中 η' 相和 α -Al 相呈半共格关系, 形核优先级远高于共格^[17]。

激光冲击强化 7050-T7451 铝合金表面的微结构响应模型示意图如图 7。在试样初步形核完成后, 晶粒过于分散且尺寸粗大, 形成了相对平衡的物相, 但系统具有较大的界面能。为减小系统的界面

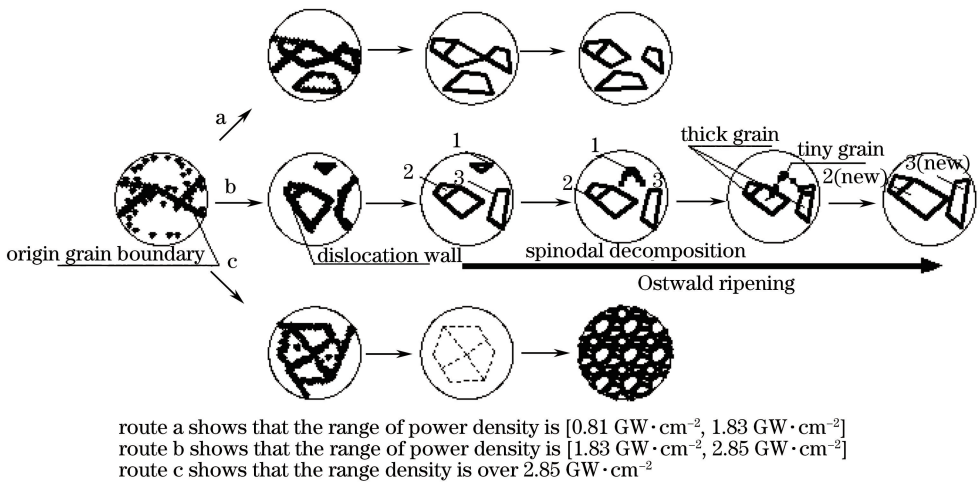


图 7 激光冲击强化 7050-T7451 铝合金表面的微结构响应模型

Fig. 7 Microstructure response model of laser shock processed 7050-T7451 aluminum alloy surface

能,一部分细小晶粒沿浓度梯度向较大的晶粒方向移动并融合成新的颗粒,发生 Ostwald 熟化现象,该现象由激光冲击强化后材料形核的晶粒大小决定,形核过程分为三种状态。状态 a,即材料表面会形成较为稀疏的位错,且形核晶粒本身较为粗大,随着激光能量的增大其晶粒尺寸不断减小,虽然存在一定细小尺寸的晶粒,但界面能不足以支撑细小晶粒完成迁移;不大于 $1.83 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的激光功率密度满足状态 a 条件。当激光功率密度增大到 $2.34 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,系统处于状态 b,相邻晶粒尺寸差异较大,界面能较大,细小晶粒 1 失稳分解,向相邻的粗大晶粒 2、3 方向移动,随后与晶粒 2、3 融合形成新的晶粒,细小晶粒 1 消失;在状态 b 时,细小晶粒逐渐分解消失,粗大晶粒的尺寸进一步增大,表明材料表面产生了 Ostwald 熟化现象。当激光功率密度继续增大至 $2.85 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,系统处于状态 c,材料表面受到强激光冲击后,极端塑性变形导致剧烈的位错生长和晶粒细化,产生细小且均匀的纳米晶,不满足迁移条件。

5 结 论

通过研究不同激光功率密度下 7050-T7451 铝合金表面 XRD 图谱与微结构之间的关系,得出以下结论。

- 1) 同一衍射晶面的 FWHM 随激光功率密度的增大发生宽化现象。
- 2) 7050-T7451 铝合金经过不同激光功率密度的冲击强化后产生了晶粒细化现象。
- 3) 随着激光功率密度的增大,由 TEM 观测的晶粒尺寸与由 XRD 图谱所得晶粒尺寸具有较好的

一致性。

4) 建立了激光冲击强化 7050-T7451 铝合金的微结构响应模型,分三种状态阐述了激光冲击强化 7050-T7451 铝合金微观组织的演变机制。

参 考 文 献

- [1] Luo K Y, Zhou Y, Lu J Z, *et al.* Influence of laser shock peening on microstructure and property of cladding layer of 316L stainless steel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402005.
罗开玉, 周阳, 鲁金忠, 等. 激光冲击强化对 316L 不锈钢熔覆层微观结构和性能的影响 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402005.
- [2] Cao Y P, Zhou D C, Feng A X, *et al.* Simulation and experiment of transmission mechanism on laser shock wave loading 690 high-strength steel sheet [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1102010.
曹宇鹏, 周东呈, 冯爱新, 等. 激光冲击波加载 690 高强薄板传播机制的模拟与实验 [J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1102010.
- [3] Cao Y P, Xu Y, Feng A X, *et al.* Experimental study of residual stress formation mechanism of 7050 aluminum alloy sheet by laser shock processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0702008.
曹宇鹏, 徐影, 冯爱新, 等. 激光冲击强化 7050 铝合金薄板表面残余应力形成机制的实验研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0702008.
- [4] Li K, Xiong J J, Ma S J, *et al.* Temperature effect on crack propagation properties of aluminum alloys in aircraft [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(4): 761-768.
李矿, 熊峻江, 马少俊, 等. 航空铝合金系列材料裂纹扩展性能的温度效应 [J]. 北京航空航天大学学

- 报, 2017, 43(4): 761-768.
- [5] Ge M Z, Xiang J Y, Zhang Y K. Effect of laser shock processing on resistance to stress corrosion cracking of tungsten inert-gas welded AZ31B magnesium alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(12): 1203007.
葛茂忠, 项建云, 张永康. 激光冲击处理对 AZ31B 镁合金焊接件抗应力腐蚀的影响 [J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1203007.
- [6] Zhou J Z, Wei D H, Huang S, *et al.* Microscale laser shock peening on TiN coatings [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(11): 2679-2684.
周建忠, 卫登辉, 黄舒, 等. 微尺度激光喷丸强化 TiN 涂层的表面性能 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2679-2684.
- [7] Ge M Z, Xiang J Y, Zhang Y K. 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.
- [8] Zhang Q L, Zhao B, Zhang B X, *et al.* Effect of multiple-laser shock processing on microstructure and residual stress of Θ P866 martensitic stainless steel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1102009.
张青来, 赵博, 张冰昕, 等. 多次激光冲击强化对 Θ P866 马氏体不锈钢组织及残余应力的影响 [J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1102009.
- [9] Zhong Z L. Surface integrity and corrosion resistance in high speed milling aluminum alloy 7050-T7451 [D]. Jinan: Shandong University, 2015: 15-23.
仲照琳. 高速铣削铝合金 7050-T7451 表面质量及耐腐蚀性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2015: 15-23.
- [10] Rohatgi A, Soulam A, Stephens E V, *et al.* An investigation of enhanced formability in AA5182-O Al during high-rate free-forming at room-temperature: Quantification of deformation history [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(3): 722-732.
- [11] Wan Z Y, Fan J Z, Tian X F, *et al.* Bulk nanocrystalline Al-Zn-Mg-Cu series aluminum alloy prepared by cryomilling [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2005, 29(6): 827-831.
万志永, 樊建中, 田晓风, 等. 低温球磨法制备块体纳米晶 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金 [J]. 稀有金属, 2005, 29(6): 827-831.
- [12] Lu J Z. Investigation of laser shock processing on the mechanical properties and micro-plastic deformation mechanism of LY2 aluminum alloy [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010.
鲁金忠. 激光冲击强化铝合金力学性能及微观塑性变形机理研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
- [13] Sun Z Y, Liu C M. Diffusion and phase transformation in alloys [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2002.
孙振岩, 刘春明. 合金中的扩散与相变 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2002.
- [14] Qi Y H, Yang G Y, Zhang L L, *et al.* Study on the microstructure coarsening of Al-Zn-Mg-Cu alloy during semi-solid isothermal heat-treatment [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(3): 413-417.
齐元昊, 杨光昱, 张丽丽, 等. Al-Zn-Mg-Cu 合金半固态等温组织粗化研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(3): 413-417.
- [15] Luo X M, Wang X, Chen K M, *et al.* Effect of dislocation and its motion on surface modification of aero-aluminum alloy by laser shock processing [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(9): 160-166.
罗新民, 王翔, 陈康敏, 等. 位错及其运动在航空铝合金激光冲击表面改性中的作用 [J]. 材料热处理学报, 2013, 34(9): 160-166.
- [16] Luo X M, Wang X, Chen K M, *et al.* Surface layer high-entropy structure and anti-corrosion performance of aero-aluminum alloy induced by laser shock processing [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(1): 57-66.
罗新民, 王翔, 陈康敏, 等. 激光冲击诱导的航空铝合金表层高熵结构及其抗蚀性 [J]. 金属学报, 2015, 51(1): 57-66.
- [17] Luo X M, Zhang J W, Ma H, *et al.* Dislocation configurations induced by laser shock processing of 2A02 aluminum alloy [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0714002.
罗新民, 张静文, 马辉, 等. 2A02 铝合金中强激光冲击诱导的位错组态分析 [J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0714002.