

# 2A02 铝合金中强激光冲击诱导的位错组态分析

罗新民<sup>1</sup> 张静文<sup>1</sup> 马 辉<sup>1</sup> 张永康<sup>2</sup> 陈康敏<sup>1,3</sup> 任旭东<sup>2</sup> 罗开玉<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013  
<sup>2</sup> 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; <sup>3</sup> 江苏大学分析测试中心, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 利用输出波长为 1064 nm、脉冲宽度为 20 ns 的钕玻璃 YAG 激光器, 对 2A02 铝合金进行了表面冲击强化试验。测定了激光冲击后材料的表面硬度和残余应力, 用快速傅里叶逆变换 (IFFT) 方法分析了铝合金激光冲击诱导的晶内亚结构及其演变行为。结果表明, 激光冲击强化可使 2A02 铝合金表面硬度提高 50% 以上, 残余压应力达到 120 MPa 以上。微观组织的透射电镜 (TEM) 及 IFFT 分析结果表明, 激光冲击区域晶内位错组态丰富, 由刃位错和中心位错带等组成; 位错墙可细化晶粒; 位错偶极子聚集成激光冲击非平衡形变条件下纳米晶内亚结构特征构元。激光冲击诱发的晶格内复杂的位错组态和晶格畸变是表面硬度和残余应力提高的主因。

**关键词** 激光技术; 铝合金; 激光冲击; 微观组织; 快速傅里叶逆变换; 位错组态

**中图分类号** TN249; TG146.2<sup>+</sup>1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0714002

## Dislocation Configurations Induced by Laser Shock Processing of 2A02 Aluminum Alloy

Luo Xinmin<sup>1</sup> Zhang Jingwen<sup>1</sup> Ma Hui<sup>1</sup> Zhang Yongkang<sup>2</sup>

Chen Kangmin<sup>1,3</sup> Ren Xudong<sup>2</sup> Luo Kaiyu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China  
<sup>2</sup> School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China  
<sup>3</sup> Analysis and Test Center, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

**Abstract** Aluminum alloy 2A02 is shocked by using the Nd:YAG laser with 1064 nm output wavelength and 20 ns pulse width. The surface hardness and residual stress of sample are measured, and the sub-structure of grain and its evolution behavior induced by laser shock are analyzed via the inverse fast Fourier transform (IFFT) method. The experimental results indicate that the surface hardness of the laser-shocked material increases by 50%, and the residual compressive stress of the laser-shocked test material reaches above 120 MPa. The transmission electron microscopy (TEM) and IFFT analysis of microstructure demonstrate that there are different types of dislocation configurations in the laser shocked area, mainly including edge dislocations and central dislocation bands; and the dislocation walls refine the original grain. The dislocation dipole close-array becomes the characteristic element of the nanocrystalline under the non-equilibrium deformation condition endowed by laser shock. Therefore, the complex dislocation configurations and the crystal lattice distortion induced by laser shocking are important to the improvement of surface hardness and residual stress.

**Key words** laser technology; aluminum alloy; laser shock processing; microstructure; inverse fast Fourier transform (IFFT); dislocation configuration

**OCIS codes** 140.3530; 100.2960; 100.6640; 160.3900

## 1 引 言

金属和合金的塑性变形主要依靠位错的运动,

其力学性能也主要由位错行为决定。位错的观察与分析是深入理解金属晶体的塑性形变和强化行为、

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(50735001, 50905080)资助课题。

作者简介: 罗新民(1951—), 男, 教授, 主要从事金属材料表面工程及微结构与性能等方面的研究。

E-mail: luoxm@ujs.edu.cn

研究合金塑性变形机制和宏观力学性能必不可少的一部分,因为作为典型的耗散结构系统,位错组态与材料的受力状态、变形过程及宏观力学性能密切相关<sup>[1]</sup>。激光冲击是一种具有高压、高能、超快和超高应变率等显著特点的非传统材料表面强化技术,并具有微尺度累积加工的特点,材料局部受到多次的冲击塑性变形,而冷塑性变形本身又是远离热力学平衡的不可逆过程,在微观尺度上将引发大量的位错群,它们相互间还存在着强烈的交互作用和协同作用,从而导致位错的不均匀分布状态,及状态的失稳、分化和新的组态形成等一系列远离平衡状态的自组织现象<sup>[2~4]</sup>。这些现象有的将明显改变材料的性能<sup>[5]</sup>,有的则影响材料的可加工性,特别是在激光精密微加工工艺研究中,复杂的位错组态导致的材质和性能微观均匀性问题甚至可能影响到加工原理与加工效果<sup>[6,7]</sup>。目前国内外对激光冲击引起的材料微观组织演变的观察和分析报道多限于微米尺度,晶粒细化、晶内位错胞和宏观残余应力形成等现象已引起普遍重视<sup>[8~11]</sup>。针对电子材料,如硅单晶中激光冲击引起的位错运动及其对塑性变形的影响<sup>[12,13]</sup>,和对低层错能单晶金属晶内亚结构及其演化也已开展理论研究<sup>[14]</sup>,但对各向同性的多晶工程结构材料在激光冲击后引起的纳米微结构演变却鲜见报道。

利用激光冲击波对航空材料进行强化处理在我国是十分重要的研究领域<sup>[15,16]</sup>,电子显微镜分辨本领的日益提高,尤其是数字化图像技术有助于更方便地观察和分辨范性变形晶体内的位错组态和了解晶格变化。本文通过深入考察激光冲击航空形变铝合金 2A02 的微观组织、表面硬度和残余应力等的演化,研究激光冲击强化对 2A02 铝合金微观组织及其演变行为等的影响,以进一步探索激光冲击强化技术用于改善铝合金表面性能的原理和技术<sup>[17,18]</sup>。

## 2 试验材料与试验方法

### 2.1 试验材料

试验材料为耐热硬铝型航空铝合金 2A02。2000 系 Al-Cu-Mg 合金的主要元素是 Cu 和 Mg,时效热处理时以  $\theta'$ ,  $\theta'$  和  $\theta$  相的析出进行弥散强化;表 1 为其化学成分,表 2 为其主要力学性质。

### 2.2 试验过程

激光冲击试验使用波长为 1064 nm、脉冲能量不低于 35 J、脉冲宽度为 20 ns 的高重复率钕玻璃 YAG 激光器,所用光斑直径为 6 mm,冲击功率为

1.54 GW/cm<sup>2</sup>;用水作约束层<sup>[19]</sup>。

表 1 2A02 铝合金的化学成分

Table 1 Nominal chemical composition of aluminum alloy 2A02

Element	Mass fraction / %
Si	≤0.30
Cu	2.6~3.2
Mg	2.0~2.4
Zn	≤0.10
Mn	0.45~0.7
Ti	≤0.15
Fe	0.000~0.300
Al	Bal.

表 2 2A02 铝合金的力学性质

Table 2 Mechanical properties of aluminum alloy 2A02

Property	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\sigma_0$ / MPa	$\delta$ / %
Data	326	455	15.7

用于位错观察的透射电镜(TEM)薄膜试样采用线切割后,从基体一侧预减薄、再经凹坑减薄、最后用离子减薄的方法制备而成。用 JEM-2100 高分辨透射电镜(HREM)观察样品中的缺陷结构,拍摄析出物与基体的 HREM 高分辨像,用快速傅里叶逆变换(IFFT)获得傅里叶过滤像;用 HVS-1000 型数字显微硬度仪测试试样强化部位沿深度方向的硬度分布;用 X-350A 型 X 射线应力测定仪测量材料在激光冲击后的残余应力。图 1 为激光冲击试验系统。

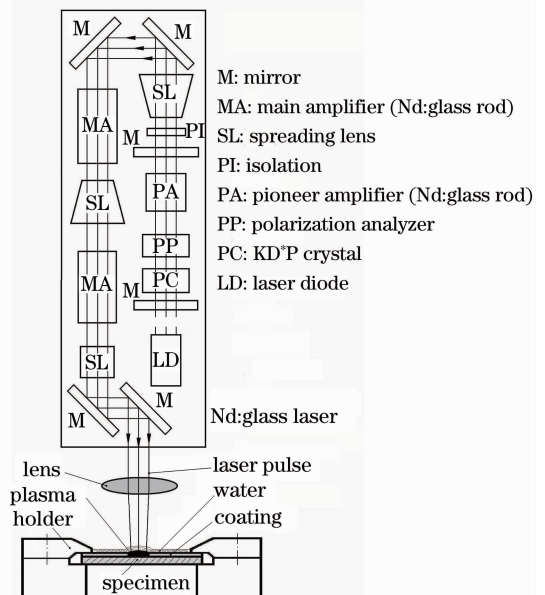


图 1 激光冲击试验装置示意图

Fig. 1 Illustration of the laser shock experimental setup

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 激光冲击对微观组织的影响

##### 3.1.1 激光冲击前的原始组织

图 2 为原材料 2A02 时效状态的 TEM 图像。晶粒细小均匀,第二相析出均匀弥散分布。由于材料处于亚稳平衡状态,加上大量析出物对位错的钉扎作用,除少数晶粒内隐约可见少量位错网络存在外,晶粒内很少能直接观察到位错。

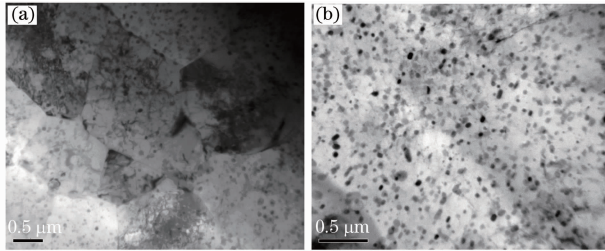


图 2 2A02 原材料的组织状态的 TEM 图像。(a)晶粒状态; (b)析出相的分布

Fig. 2 Microstructure TEM of 2A02 aluminum alloy. (a) Grain size; (b) precipitated particle's distribution

##### 3.1.2 激光冲击效果

图 3 为 2A02 铝合金激光冲击后的 TEM 图像。图 3(a)为激光冲击后 2A02 的微观组织,可观察到 2A02 激光冲击后晶粒明显细化,原始晶界难以辨别;图 3(b)为高倍 TEM 照片,可见 2A02 激光冲击后位错网络的明显增加。

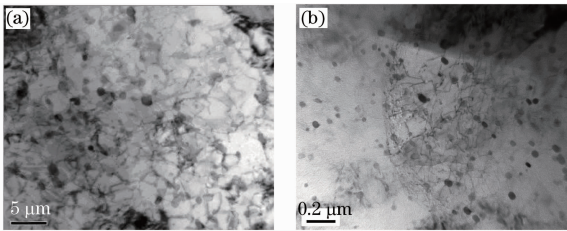


图 3 2A02 激光冲击后的(a)微观组织与 (b)位错网络的 TEM 图像

Fig. 3 Microstructure TEM of 2A02 aluminum alloy after laser shocking. (a) Microstructure; (b) dislocation networks

#### 3.2 表面硬度

图 4 所示为 2A02 铝合金激光冲击强度后表面硬度分布情况。2A02 的基体硬度值实测为 55 HV 左右,激光冲击后硬度提高了 30 HV 左右,硬化层深度约为 0.7 mm。表面硬度的提高及较深的硬化层分布说明激光冲击强化有利于改善材料的抗疲劳性能<sup>[20]</sup>。

#### 3.3 残余应力

图 5 所示为经激光冲击强化后试样表面的残余

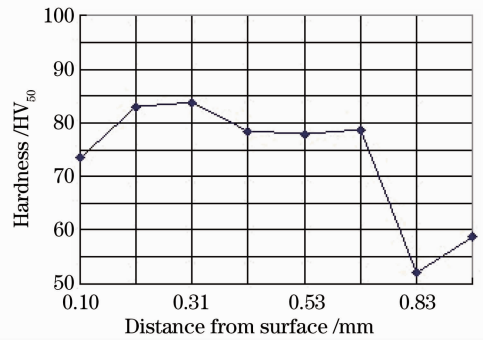


图 4 激光冲击强化后表面硬度分布

Fig. 4 Hardness distribution along the normal direction of laser shocked surface

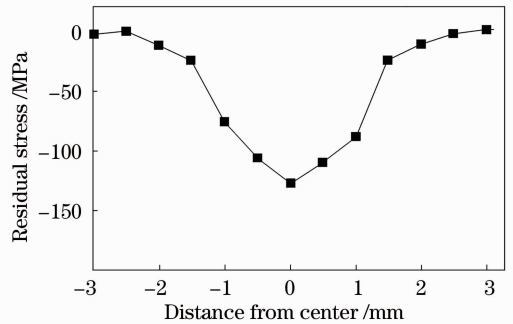


图 5 激光冲击强化表面残余应力分布

Fig. 5 Residual stress distribution on specimen's surface after laser shocking

应力分布,可见应力状态为高斯分布。残余压应力的存在可以有效抑制材料疲劳裂纹的产生并减缓裂纹扩展速率,明显提高材料的疲劳寿命。将有效残余压应力范围划至 $-50$  MPa 以上,相对于该铝合金的强度水平来说,足以影响其疲劳试验时试样表层的应力分布。

#### 3.4 激光冲击诱导的 2A02 铝合金晶内的位错组态

尽管激光冲击引起晶体的形变早已被研究,但仅有很少的研究结果简单、清楚地表征材料晶粒内的位错组态<sup>[21]</sup>。从 2A02 铝合金激光冲击后薄膜试样的 TEM 图像、HREM 图像及 IFFT 过滤清楚地揭示了铝合金晶内的位错组态,如图 6~9 所示。

图 6 为 2A02 铝合金激光冲击后观察到的晶粒内的位错组态形貌。图 6(a)所示为在晶界前沿形成位错网络和胞状位错缠结。层错能高的金属(如 Al, Fe)等,在外力作用下,当变形程度较高时,将出现明显的胞状组织,所以胞状组织实质上是多晶材料发生多滑移时的组织特征。此外,当晶粒受到激光冲击的外场力作用时,由于晶界和密集弥散分布的第二相的钉扎作用,位错运动受阻,易在析出物之间形成位错塞积,如图 6(b)所示。上述现象使晶粒

内部处于很高的应力状态,在宏观方面,合金就表现为高的残余应力。

图 7 为激光冲击后晶粒的 TEM 图像及其 IFFT 过滤像。图 7(a)所示为激光冲击诱发的位错塞积,因位错运动受阻于晶界和第二相,位错塞积形成的位错墙对晶粒的分割类似于多边化机制,使材料的实际晶粒分化细化至纳米量级,分割范围平均直径在 100 nm。图 7(b)为 HREM 的 IFFT 过滤像,图中云纹状阴影为缺陷密集区,包含许多扩展位错和中心位错带。IFFT 过滤像也清晰地揭示了晶内其它部位丰富多样的位错组态,主要由单个刃型位错(SD)和扩展位错(ED)组成,如图 8 所示,这样的一系列位错组态形成一对称倾侧晶界,将完整的晶粒分割为两个不同位向的亚晶粒。

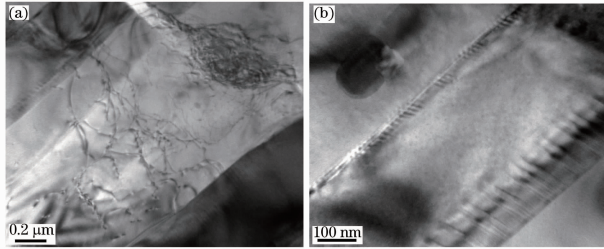


图 6 2A02 铝合金中激光冲击诱导的位错及其组态 (TEM)。(a)析出物前沿的位错网络和位错胞; (b)析出物之间的位错塞积

Fig. 6 Dislocation and its configurations of aluminum alloy 2A02 induced by laser shocking (TEM). (a) Dislocation network and dislocation cell of separated matters leading edge; (b) dislocation block in between the separated matters

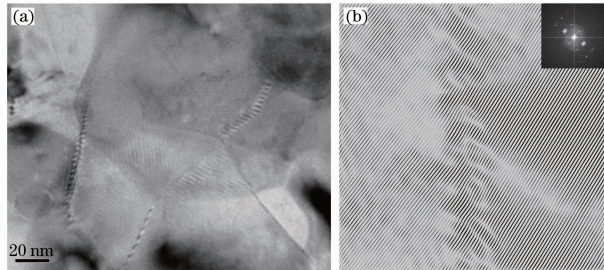


图 7 激光冲击 2A02 铝合金晶粒中的位错墙。(a)位错墙,TEM;(b)HREM 的 IFFT 过滤像

Fig. 7 Dislocation walls in the grains of aluminum alloy 2A02 after laser shocking. (a) Dislocation walls, TEM; (b) IFFT filtered image of HREM

位错组态与第二相密切相关,图 9 为析出物的高分辨像。图 9(a)左下方深色圆形物为一析出物( $Al_2CuMg$ )的 HREM 高分辨像。图 9(b)为该图像相应的 IFFT 过滤像。在图示情况下,两相原

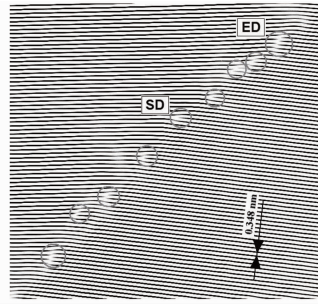


图 8 激光冲击 2A02 铝合金晶粒内位错组态 HREM 的 IFFT 过滤像

Fig. 8 IFFT filtered image of HREM of dislocation configurations of a grain in 2A02 aluminum alloy after laser shocking

子间距的失配度  $\delta = (a_a - a_b) / a_a = 10.8\%$ , 在 5%~25%之间,由此可知,析出物与基体为半共格关系。除界面原子不吻合处的刃型位错外,在基体晶粒内还可以观察到由于激光冲击诱发的晶格畸变和不同的位错组态现象。这是因为 Al-Cu-Mg 合金中的稳定沉淀相比较粗大和密集,与相对较软的  $\alpha$  相基体比较,具有大的刚度和强的钉扎作用,因而在承受激光冲击载荷时,必然在相界面处和基体晶粒内诱导大量位错。上述第二相与基体相之间晶格间距失配导致的半共格关系和产生的大量位错引起第三类内应力,造成晶格扭曲,导致形变区域的晶格条纹像不清晰甚至不完整,这种晶内应力在宏观上体现为表面硬度和残余压应力的提高。

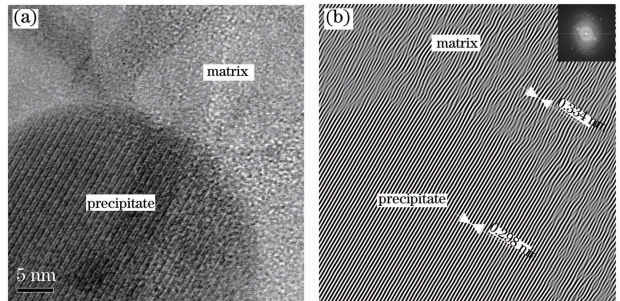


图 9 析出物的 HREM 像(a)及其 IFFT 过滤像(b)  
Fig. 9 HREM filtered image (a) of precipitate and its IFFT image (b)

由此可见,在激光冲击外场力的作用下,晶粒内部的变形程度与第二相界面性质有关。对半共格析出相而言,由于受到界面的牵制,除非被位错线切过,激光冲击的能量就主要消耗于与之保持半共格关系的基体组织,在其中形成各种微观缺陷,呈现为各种不同的位错组态。图 10 为从与半共格界面析出物相邻的基体组织的 HREM 图像经 IFFT 变换后显示的位错组态。由图可见,激光冲击外场力在基体中所诱

发的位错呈现多种组态,有的由于位错扩展形成中心位错带,并伴随空位现象[图 10(a)];有的在同一原子排上形成异号位错或层错[图 10(b)];有的由于刃位错的连续增殖,形成对称倾侧的小角度晶界,并造成周围原子排列的扭折和畸变[图 10(c)];有的在几个

原子间距内发生方向相反的异号位错组[图 10(d)]。

图 10 说明原来相对完整的晶体在激光冲击力作用下,晶内一些能量较高的原子将重新排列,同时,因受到多晶材料中周边不同位向晶粒运动的牵制,在晶粒内部诱发多种位错组态而加以应变。

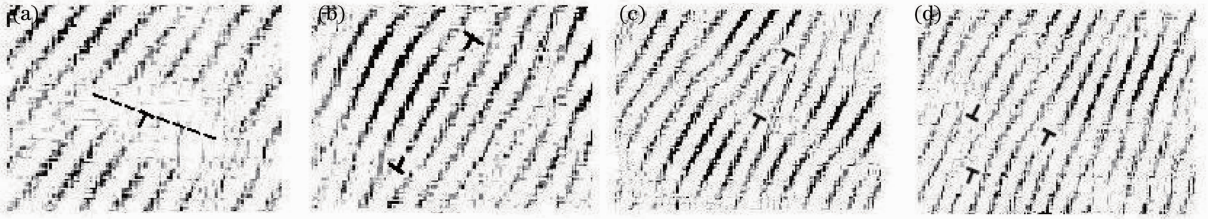


图 10 激光冲击 2A02 基体中的位错组态(HERM-IFFT)

Fig. 10 Dislocation configurations in the matrix of laser shocked 2A02 aluminum alloy HREM-IFFT

### 3.5 讨论

激光冲击属局部微加工,其最终性能是逐点加工效果的积累,由于激光冲击的应变屏蔽效应<sup>[22]</sup>,试样宏观体积不变并不意味着冲击时微观区域内的结构和密度不变;而且应注意到对于真实材料而言,晶粒内部本来都存在一定数量的结构空位而造成密度变量,这种原本的热缺陷空间与激光冲击产生的微结构改变在体积上应是动态平衡的,也就是说,位错与空位之间存在此消彼长的交互作用。所以,与应变屏蔽的宏观效应联合考虑,在激光冲击过程中,在冲击微区内,位错数量可以改变,但材料宏观体积和密度不变,这时,位错增量将与微区密度变化量取得平衡。

此外,从位错本身的性质来看,在外场力作用下,位错可以在晶体中移动位置,但自身的种类和特征在移动中并非保持不变;伯格矢量相反的两个位错移动到同一点,则会双双消失,或称“湮灭”,若没有与其它位错发生作用或移到晶体表面,那么任何单个位错都不会自行“消失”,即伯格矢量守恒。因此,在激光冲击应力波的作用下,新生位错一方面呈周期性地增殖,相关的研究有待深入进行;另一方面,当位错达到一定宽度时,晶体本身将自动调整到对原子排列影响较小的程度,如图 11 所示。图 11 右上角为 IFFT 揭示的一种特殊的位错组态,在位错滑移面左右原子排列的数量是完全相等的,并没有新的半原子面插入。这种情况可以视为微小区域内一系列紧靠在一起的异号位错组,这样既造成了晶格畸变,强化了金属,又达到了与外载荷能量相一致的应变,保持了晶格原子间的平衡。这可以看成是“应变屏蔽”的微观机理之一。

从材料在外场能量作用下的塑性变形的位错形

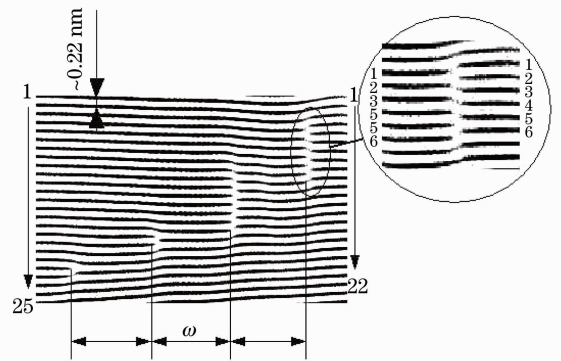


图 11 激光冲击诱导的周期扩展的位错组态 (IFFT)

Fig. 11 Cyclically extended dislocation configurations of aluminum alloy induced by laser shocking (IFFT image)

成及其相互作用方面来看,上述聚集在一起的异号位错组还可以看作刃型位错偶极子的运动结果<sup>[23]</sup>,如图 12 所示。位错偶极子是晶体材料中常见的微观缺陷。由于相互屏蔽,位错偶极子的能量和应力场均远小于单个位错,因此也更容易在材料应变过程中产生。在纳观条件下,位错偶极子对于激光冲击区晶格内的原子错配的补偿起着一定的作用;这

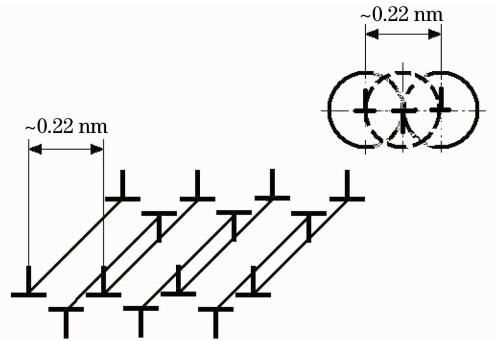


图 12 位错偶极子聚集的示意图

Fig. 12 Schematic illustration of aggregation of dislocation dipoles

种位错偶极子的形成与晶格参数和错配度及微观区域的能量相关<sup>[24]</sup>,可以视为高度非平衡应变条件下微观晶体的典型结构构元之一。

在多次激光冲击的循环形变作用下,材料内部位错不断增殖,应力也不断增强,位错偶极子很可能是材料内部协调这种不断增强的应力状态的自组织行为。它们处于亚稳状态,在结构和能量条件方面都还是不稳定的,极易受外部环境的影响而发生湮灭。根据变形金属的回复机制,温度的作用可能更加明显。若大量位错移出晶体表面,就产生了宏观的塑性变形。

## 4 结 论

激光冲击使 2A02 铝合金基体晶粒中诱发丰富的位错组态,包括中心位错带、异号位错组或层错,小角度晶界和位错偶极子等,位错墙分割所致亚晶粒的形成使基体晶粒细化至纳米级,增强了第二相颗粒的强化作用。激光冲击强化使 2A02 铝合金表面硬度提高 50%以上;残余压应力达到 120 MPa 以上。在激光冲击的外场力作用下,固溶强化 2A02 铝合金中弥散分布的第二相颗粒在应变过程中与基体保持半共格关系,对位错运动产生明显的阻碍作用,使新生位错在析出物前沿形成位错网络以及胞状位错缠结或位错塞积。激光冲击能量诱发晶内大量微观结构的自组织演变,位错偶极子聚集成为协调非平衡应变条件下纳米晶体应变的特征结构构元,连同丰富的位错组态,诱导的第三类内应力成为硬度和残余压应力提高的主要原因。

## 参 考 文 献

- 1 P. Li, S. X. Li, Z. G. Wang *et al.*. Fundamental factors on formation mechanism of dislocation arrangements in cyclically deformed fcc single crystals[J]. *Prog. Mater. Sci.*, 2011, **56**(3): 328~377
- 2 Zuo Tiechuan, Chen Hong. Green manufacture in 21 century — laser manufacturing technology and application [J]. *J. Mechanical Engineering*, 2009, **45**(10): 106~110  
左铁钊, 陈虹. 21 世纪的绿色制造——激光制造技术及应用 [J]. *机械工程学报*, 2009, **45**(10): 106~110
- 3 Luo Xinmin, Yuan Chunzhi, Ren Xudong *et al.*. Laser shock deforming and induced microstructure evolution of austenitic stainless steel sheet[J]. *Int. J. Mater. Struct. Integrity*, 2010, **4**(1): 87~98
- 4 Guo Naiguo, Luo Xinmin, Hua Yingqun. The effects of laser shock processing on microstructure and properties of metal[J]. *Materials Review*, 2006, **20**(6): 11~13  
郭乃国, 罗新民, 花银群. 激光冲击处理对金属微结构及其性能的影响[J]. *材料导报*, 2006, **20**(6): 10~13
- 5 Liu Yunyan, Cheng Chuanfu, Song Hongsheng *et al.*. Morphology analysis of ZnO:Ga thin films deposited by pulsed

- laser deposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0131003  
刘云燕, 程传福, 宋洪胜等. 激光溅射沉积制备的 ZnO:Ga 薄膜表面形貌分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0131003
- 6 Zhong Minlin, Liu Wenjin. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1653~1659  
钟敏霖, 刘文今. 国际激光材料加工研究的主导领域与热点[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1653~1659
- 7 Ma Guangyi, Wu Dongjiang, Niu Fangyong *et al.*. Influence of dislocation on the laser bending process of thin silicon[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 772~775  
马广义, 吴东江, 牛方勇等. 位错对薄硅片激光弯曲过程的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 772~775
- 8 G. Rosas, G. R. Gonzalez, J. L. Ocaña *et al.*. Laser shock processing of 6061-T6 Al alloy with 1064 nm and 532 nm wavelengths[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2010, **256**(20): 5828~5831
- 9 Zhang Xingquan, He Guangde, Qi Xiaoli *et al.*. Investigation on contact fatigue strength of gear affected by laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3187~3191  
张兴权, 何广德, 戚晓利等. 激光冲击强化对齿轮接触疲劳的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3187~3191
- 10 Zhang Jie, Gu Xiang, Zhu Le *et al.*. Numerical simulation of fatigue life of 7050 aluminum alloy processed by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3192~3195  
张洁, 顾祥, 祝乐等. 激光冲击强化后 7050 铝合金疲劳寿命的数值模拟[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3192~3195
- 11 Lu Jinzhong, Luo Kaiyu, Feng Aixin *et al.*. Micro-structural enhancement mechanism of LY2 aluminum alloy by means of a single laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2662~2666  
鲁金忠, 罗开玉, 冯爱新等. 激光单次冲击 LY2 铝合金微观强化机制研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2662~2666
- 12 G. J. Cheng, M. A. Shehadeh. Multiscale dislocation dynamics analyses of laser shock peening in silicon single crystals[J]. *Int. J. Plasticity*, 2006, **22**(12): 2171~2194
- 13 Wang Youneng, Vukelic Sinisa, Kysar Jeffrey *et al.*. Spatially resolved characterization of geometrically necessary dislocation dependent deformation in micro-scale laser shock peening [C]. Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC2008, 2009, **1**: 293~302
- 14 M. A. Meyers, M. S. Schneider, H. Jarmakani *et al.*. Deformation substructures and their transitions in laser shock-compressed copper-aluminum alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2008, **39**(2): 304~321
- 15 Wang Shengbo, Fan Yong, Wu Hongxing *et al.*. Research of strengthening 7050 aerial aluminum alloy structural material with laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 125~128  
王声波, 范勇, 吴鸿兴等. 7050 航空铝合金结构材料激光冲击强化处理研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 125~128
- 16 Zhou Lei, Li Yinghong, Wang Cheng *et al.*. Laser shock peening for LY2 alloy[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(8): 1780~1784  
周磊, 李应红, 汪诚等. LY2 铝合金激光冲击处理工艺[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(8): 1780~1784
- 17 J. Z. Lu, K. Y. Luo, Y. K. Zhang *et al.*. Grain refinement of LY2 aluminum alloy induced by ultra-high plastic strain during multiple laser shock processing impacts [J]. *Acta Materialia*, 2010, **58**(11): 3984~3994
- 18 Zhang Xingquan, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong, *et al.*. Characteristics of deformation of plate by laser peening under the elastic pre-loading condition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1095~1100  
张兴权, 张永康, 周建忠等. 弹性预加载下板料激光喷丸成形特

- 性[J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 1095~1100
- 19 Zhou Yijun, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong *et al.*. Study on properties of overlay in laser shock forming [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(6): 626~628  
周益军, 张永康, 周建忠 等. 激光冲击成形约束层性能的研究[J]. 激光技术, 2005, **29**(6): 626~628
- 20 Luo Xinmin, Zhang Jingwen, Zhao Guangzhi *et al.*. Effect of laser shock strengthening on fatigue behaviors of 2A02 aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3323~3328  
罗新民, 张静文, 赵广志 等. 激光冲击强化对 2A02 铝合金疲劳行为的影响[J]. 中国激光, 2009, **36**(12): 3323~3328
- 21 Wu Yichu, Zhang Xiaohong. Applications of positron annihilation technology for metals and alloys[J]. *Physics*, 2000, **29**(7): 401~405  
吴奕初, 张晓红. 正电子湮没技术在金属和合金研究中的应用进展[J]. 物理, 2000, **29**(7): 401~405
- 22 Luo Xinmin, Ma Hui, Zhang Jingwen *et al.*. “Strain-screening” and “constraint breakdown” in laser shock processing [J]. *Materials Review*, 2010, **20**(3): 11~15  
罗新民, 马 辉, 张静文 等. 激光冲击中的“应变屏蔽”和“约束击穿”[J]. 材料导报, 2010, **20**(3): 11~15
- 23 Sui Manling, Wang Yanbo, Cui Jingping *et al.*. In situ TEM/HRTEM investigations on deformation mechanisms in metals[J]. *J. Chinese Electron Microscopy Society*, 2010, **29**(3): 219~229  
隋曼龄, 王艳波, 崔静萍 等. 透射电镜原位拉伸研究金属材料形变机制[J]. 电子显微学报, 2010, **29**(3): 219~229
- 24 I. A. Ovid'ko, A. G. Sheinerman. Dislocation dipoles in nanocrystalline films [J]. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2001, **1**(2): 215~220