

引用格式: CAO Yu-peng, YANG Cong, SHI Wei-dong, *et al.* Experimental Study on Dislocation Configuration and Grain Refinement of 690 High Strength Steel Treated by Laser Shock Processing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(4):0414004
曹宇鹏, 杨聪, 施卫东, 等. 激光冲击 690 高强钢位错组态与晶粒细化的实验研究[J]. 光子学报, 2020, **49**(4):0414004

激光冲击 690 高强钢位错组态与晶粒细化的实验研究

曹宇鹏^{1,3,4,5}, 杨聪¹, 施卫东^{1,5}, 花国然¹, 李彬², 李荣⁴

(1 南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019)

(2 南通理工学院 机械工程学院, 江苏 南通 226002)

(3 香港理工大学 机械工程系, 香港 100077)

(4 南通中远海运船务工程有限公司, 江苏 南通 226006)

(5 江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘要:为研究激光冲击材料内部位错组态和晶粒细化的关系,用脉冲激光对 690 高强钢试样进行了冲击强化处理,采用扫描电镜和透射电镜分别获得了冲击后试样的扫描电子显微像和透射电子显微像、高分辨电子显微像,并对高分辨电子显微像进行快速傅里叶逆变换,从位错组态角度建立了激光冲击 690 高强钢晶粒细化模型.结果表明,690 高强钢试样经功率密度为 5.09 GW/cm² 的激光冲击加载后,其材料内部位错增殖、表层晶粒细化,截面晶粒尺寸大小分布在 80~200 nm;析出相与基体保持半共格关系,基体中分布着众多刃型位错、位错偶以及扩展位错等缺陷,其中位错偶是由带割阶的螺型位错运动形成;通过由位错、扩展位错、空位等构成的几何位错界面扩展交汇把原始大晶粒分割成细小晶粒;激光冲击 690 高强钢晶粒细化模型可以描述激光冲击 690 高强钢位错运动主导的晶粒细化过程.

关键词:激光光学;激光冲击强化;位错组态;690 高强钢;晶粒细化

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20204904.0414004

Experimental Study on Dislocation Configuration and Grain Refinement of 690 High Strength Steel Treated by Laser Shock Processing

CAO Yu-peng^{1,3,4,5}, YANG Cong¹, SHI Wei-dong^{1,5}, HUA Guo-ran¹, LI Bin², LI Rong⁴

(1 School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China)

(2 School of Mechanical Engineering, Nantong Institute of Technology, Nantong, Jiangsu 226002, China)

(3 Department of Mechanical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 100077, China)

(4 Nantong COSCO Shipyard Co.Ltd, Nantong, Jiangsu 226006, China)

(5 Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: In order to study the relationship between dislocation configuration and grain refinement in materials treated by laser shock processing, 690 high-strength steel was impact-strengthened by pulsed laser. The scanning electron microscopy, transmission electron microscopy and high resolution

基金项目:国家自然科学基金(Nos.51505236,51979138),中国博士后科学基金面上项目(No.2019M651931),江苏省 3D 打印装备及应用技术重点建设实验室开放基金项目(No.2018KFKT10),国家重点研发计划(No.2019YFB2005300),国家高技术船舶科研项目(No.工信部装函[2019]360号)

第一作者:曹宇鹏(1981-),男,博士后,主要研究方向为激光诱导表面纳米化、水泵激光空化强化技术.Email:yupeng.cao@polyu.edu.hk

导师(通讯作者):施卫东(1964-),男,研究员,博士,主要研究方向为流体机械理论及海洋工程技术.Email:wdshi@ntu.edu.cn

收稿日期:2019-12-20; **录用日期:**2020-02-09

<http://www.photon.ac.cn>

transmission electron microscopy images of the sample treated by laser shock processing were obtained using scanning electron microscopy and transmission electron microscopy. The inverse fast Fourier transform was performed on the high resolution transmission electron microscopy image, and a grain refinement model of 690 high strength steel treated by laser shock processing was established from the perspective of dislocation configuration. The results show that after the 690 high-strength steel was loaded by laser shock with a power density of 5.09 GW/cm^2 , the internal dislocations of the material are proliferated and the surface grains are refined, with grain size ranging between 80 nm and 200 nm (cross section). The precipitation phase maintains a semi-coherent relationship with the matrix, and many defects such as edge dislocations, dislocation couples and extended dislocations are distributed in the matrix, among which the dislocation couples are formed by the screw dislocation motion with cut order. The geometrical dislocation interfaces' extension and intersection divides the original large crystal grains into fine grains, which consists of dislocations, extended dislocations, vacancies, etc. The grain refinement model of 690 high strength steel treated by laser shock processing can describe the grain refinement process dominated by the dislocation movement of 690 high strength steel.

Key words: Laser optics; Laser shock processing; Dislocation configuration; 690 high strength steel; Grain refinement

OCIS Codes: 140.3390; 160.3900; 100.2960

0 引言

材料宏观塑性变形可通过位错的运动实现,位错在运动过程中会与第二相粒子、晶界等组织发生交互作用,使材料的力学性能提升^[1-3].激光冲击强化(Laser Shock Processing, LSP)作为一种全新的表面改性手段,通过高能激光束辐照吸收层产生高压等离子体诱导产生冲击波,利用冲击波改变材料表层微结构达到表面改性的目的^[4-7].在激光冲击波作用下,材料内部位错源不断发射新生位错,高速运动的新生位错会引起原有组态的改变,对材料的宏观力学性能产生显著影响^[8-9].近些年,国内外学者主要致力于激光冲击前后材料的微观结构演变及强化机理研究,建立了不锈钢、铝合金等材料的强化机制^[10-14],但是较少采用位错组态的手段研究冲击后材料表面具体的缺陷类型及其与晶粒细化之间的联系。

690 高强钢是重要的海工用钢,采用激光冲击强化技术提高 690 高强钢综合机械性能,是海工装备桩腿表面强化与延寿的重要途径.本文采用脉冲激光对 690 高强钢试样进行冲击强化处理,借助扫描电镜和透射电镜分别获取冲击后材料的截面扫描电子显微像(Scanning Electron Microscopy, SEM)和表面透射电子显微像(Transmission Electron Microscopy, TEM)、高分辨电子显微像(High Resolution Transmission Electron Microscopy, HRTEM),并对 HRTEM 像进行快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT),探究材料中析出相与基体的界面关系、缺陷类型以及位错组态分布和晶粒细化的多尺度关系,并从位错组态角度建立激光冲击 690 高强钢晶粒细化模型.激光冲击诱导位错强化、细晶强化将增强金属材料表层的硬度、屈服强度、抗疲劳能力等性能^[15-17],为提升以 690 高强钢为原材料制造的海工装备关键零部件的使用寿命及工艺优化提供理论基础。

1 实验方案设计

1.1 实验材料及冲击实验

实验材料为美制 690 高强钢,该钢具有良好的耐腐蚀性、抗层状撕裂等性能^[18-20],其主要成分与机械性能见表 1,其中 σ_b 表示抗拉强度, σ_s 表示屈服极限.按照 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的规格使用线切割割取 690 高强钢试样,并使用 240-1200# 水砂纸依次打磨试样表面,随后用无水乙醇清洗并冷风风干.采用 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$ 铝箔作为吸收层贴合于试样表面,以去离子水作为约束层。

表 1 690 高强钢化学成分与机械性能

Table 1 Chemical composites of 690 high-strength steel and mechanical capacity

Chemical composites(mass fraction/%)				Mechanical capacity	
C	Si	Mn	Cr	σ_b/MPa	σ_s/MPa
≤ 1.72	≤ 0.45	≤ 1.24	≤ 0.74	≥ 690	835

690 高强钢冲击强化实验使用 YAG 固体激光器 (Gaia-R 系列, THALES 公司, 法国), 波长为 1 064 nm, 脉宽为 10 ns, 能量为 10 J (功率密度 5.09 GW/cm^2), 光斑直径为 5 mm, 搭接率为 70%。

1.2 微观组织观测

沿截面方向割取尺寸大小为 $5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的 690 高强钢试样薄片, 腐蚀后用场发射扫描电子显微镜 (SU8020, HITACHI, 日本) 观测冲击后试样深度方向上的微观组织结构。通过线切割、手工打磨、凹坑研磨及离子减薄制成 690 高强钢 TEM 薄膜样品, 使用场发射高分辨透射电子显微镜 (Tecnai G2 F20, FEI 公司, 美国) 获取试样冲击区域表面的形貌像 (TEM 形貌像) 及高分辨电子显微像 (HRTEM 像), 并对试样的 HRTEM 像进行处理获取傅里叶过滤像。

2 实验结果与分析

2.1 激光冲击 690 高强钢截面组织分析

图 1(a)、(b) 均为功率密度 5.09 GW/cm^2 的激光冲击强化后 690 高强钢试样截面组织的 SEM 像, 其中图 1(b) 为图 1(a) 中矩形框区域的局部放大像。根据不同区域晶粒尺度特点, 沿深度方向将激光冲击后的 690 高强钢试样的截面划分为晶粒显著细化层、晶粒细化过渡层和原始组织, 即图 1(a) 中 A、B、C 区域。观察图 1(a)、(b) 可知, 晶粒显著细化层、晶粒细化过渡层的区域边界与部分晶粒形貌经腐蚀后清晰可见; 690 高强钢表层发生晶粒细化现象, 其表层截面的晶粒尺寸分布在 $80 \sim 200 \text{ nm}$ 之间, 且沿着深度方向晶粒尺寸不断增大, 直至达到原始组织中的晶粒尺寸。

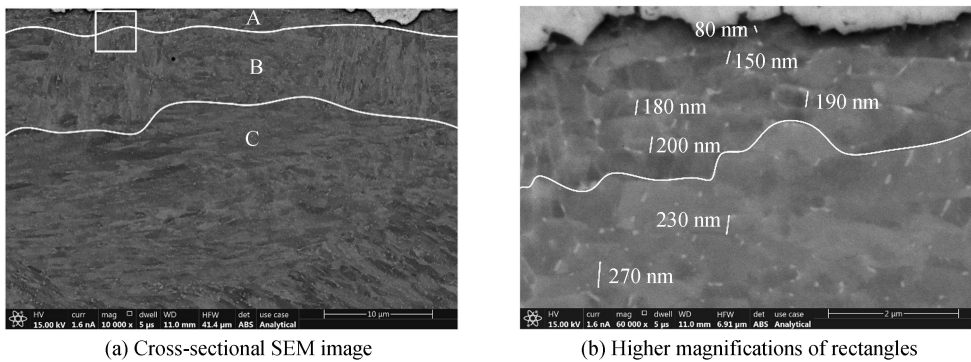


图 1 功率密度 5.09 GW/cm^2 下 690 高强钢 SEM 像

Fig.1 SEM image of 690 high strength steel with power density of 5.09 GW/cm^2

2.2 激光冲击 690 高强钢表层微结构分析

2.2.1 690 高强钢基体 TEM 形貌像分析

图 2 为未经处理的 690 高强钢基体组织的 TEM 形貌像, 由图可知, 690 高强钢基体组织是由铁素体和渗碳体叠加而成的复相组织, 亦称片状珠光体。珠光体中明显可见板条状铁素体和薄层渗碳体呈平行排列状, 其间距大约分布在 $150 \sim 450 \text{ nm}$ 之间, 位错线在其中少量分布且隐约可见。

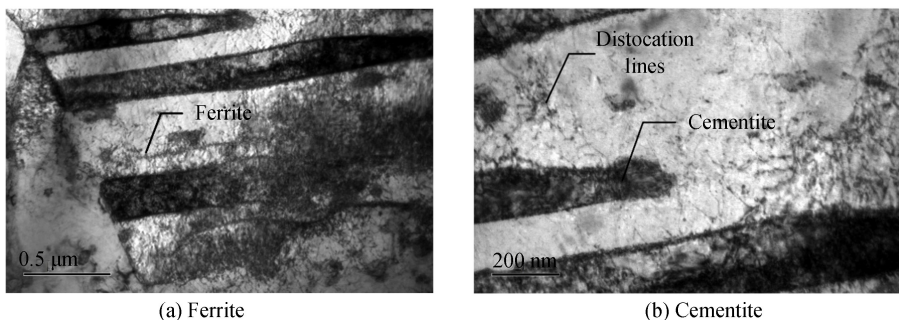


图 2 690 高强钢基体组织 TEM 形貌像

Fig.2 TEM image of 690 high-strength steel matrix

2.2.2 激光冲击 690 高强钢 TEM 形貌像分析

图 3 为功率密度 5.09 GW/cm^2 的激光冲击强化后 690 高强钢试样的 TEM 形貌像.通过对比分析 690 高强钢激光冲击前后 TEM 形貌像可知,690 高强钢试样经激光冲击加载后,表层晶粒明显细化,如图 3(a)所示;材料内部产生大量位错,高密度位错区域的位错相互缠结;由于受到晶界阻碍,位错还会大量聚集在晶界周围,如图 3(b)所示;激光冲击除了使位错大量增殖,与原始组织相比还多了许多细小析出相,如图 3(c)所示.以上现象表明激光冲击诱导的位错运动使 690 高强钢的微观组织结构发生明显改变,根据该领域的大量研究^[15-17]结果可推知通过位错强化、细晶强化可以实现 690 高强钢试样的表面改性.

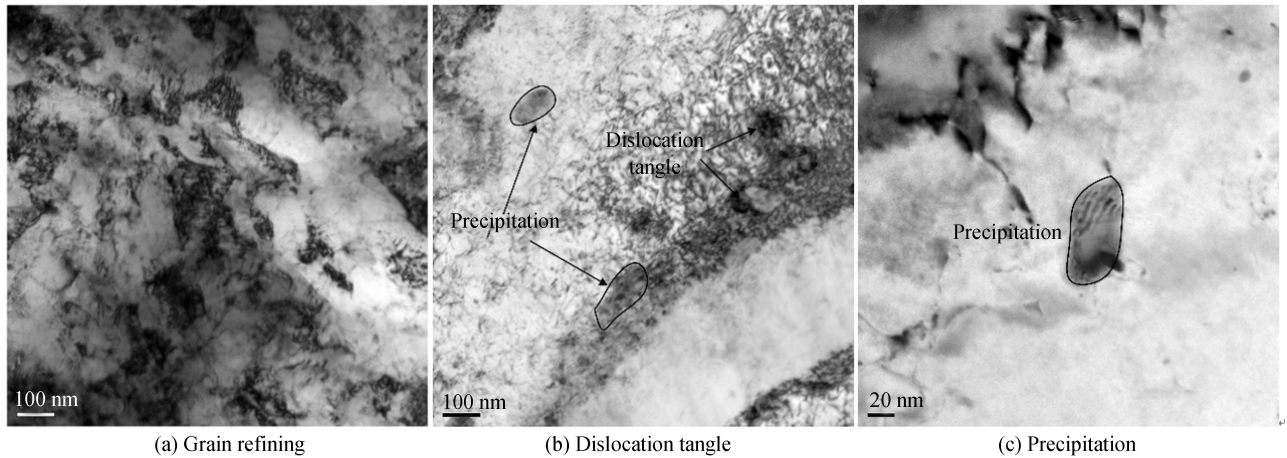


图 3 功率密度 5.09 GW/cm^2 下 690 高强钢的 TEM 形貌像

Fig.3 TEM image of 690 high strength steel with power density of 5.09 GW/cm^2

2.3 激光冲击 690 高强钢内部位错组态研究

2.3.1 激光冲击 690 高强钢析出相与基体界面关系分析

图 4(a)为析出相区域的 HRTEM 像,图 4(b)为该像对应的 IFFT 过滤像.原子排列紧密程度是图像反差的来源^[21-22],观察图 4(a),析出相内部衬度基本一致,可推知析出相内部原子排列有序,晶内缺陷较少,同时观察到析出相的边界比较模糊;进一步观察基体和析出相区域的晶格条纹,可看到晶格条纹方向在析出相的边界处发生改变,原方向与现方向之间夹角为 5° ,激光冲击产生的位错使此处的晶格发生畸变或者扭折;基体区域衬度变化明显,可推知基体组织内包含众多晶体缺陷,且晶体缺陷导致原子排列间距发生变化.观察图 4(b),经 IFFT 变换后析出相的边界清晰可见,位错在内部少量分布,即内部缺陷较少;基体区域遍布着白色絮状阴影,该阴影区为缺陷密集区,可能包含众多扩展位错、位错偶及空位等.析出粒子在力学性能上属于硬相,钉扎作用较强,激光冲击波的能量主要消耗于相对较软的基体及两相界面,当激光冲击波能量还有剩余时才会作用于析出相,因此,相比于基体组织析出相内部缺陷较少.IFFT 过滤像分析结果与其高倍像具有较好的对应关系.

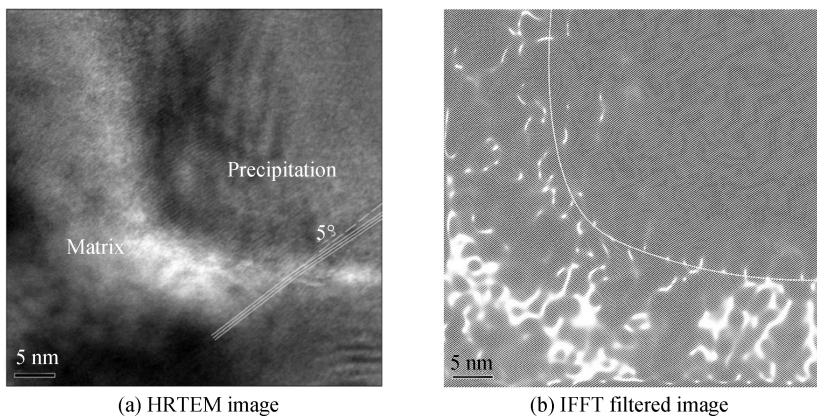


图 4 析出相的 HRTEM 像和对应的 IFFT 过滤像

Fig.4 HRTEM image and corresponding IFFT filtered image of the precipitated phase

采集图 4 中析出相、基体以及基体缺陷处 IFFT 过滤像的周期信号的线强度分布,如图 5 所示,其中横坐标峰间隔代表原子间距,纵坐标为线强度大小,对比图 5(a)、(b)可知,析出相、基体原子间距和线强度分布比较平均,但是析出相处的线强度明显大于基体处,这和区域的元素、原子排列等有关^[23-24].由图谱可计算出析出相和基体处的原子间距分别为 0.212 3 nm、0.199 1 nm.错配度计算公式为

$$\delta = \frac{a_\alpha - a_\beta}{a_\alpha} \quad (1)$$

式中, a_α 、 a_β 分别为两侧物相的原子间距,且 $a_\alpha > a_\beta$.由式(1)可知,此时错配度 $\delta = 6.2\%$;错配度在 $5\% \sim 25\%$ 之间,表明在应变过程中析出相与基体保持半共格关系^[25];析出相与基体组织的点阵参数相差较小,激光冲击波加载过程中在两相界面上位错移入造成点阵畸变使其形成半共格界面.图 5(c)是基体缺陷处周期信号的线强度分布,其中波谷处代表缺陷区;与基体相比,基体缺陷处不仅线强度降低,而且原子间距增大至 0.254 nm,原子畸变程度达到 27.6%,表明激光冲击诱导产生大量增殖的位错,破坏了原子正常排列导致晶格产生畸变.

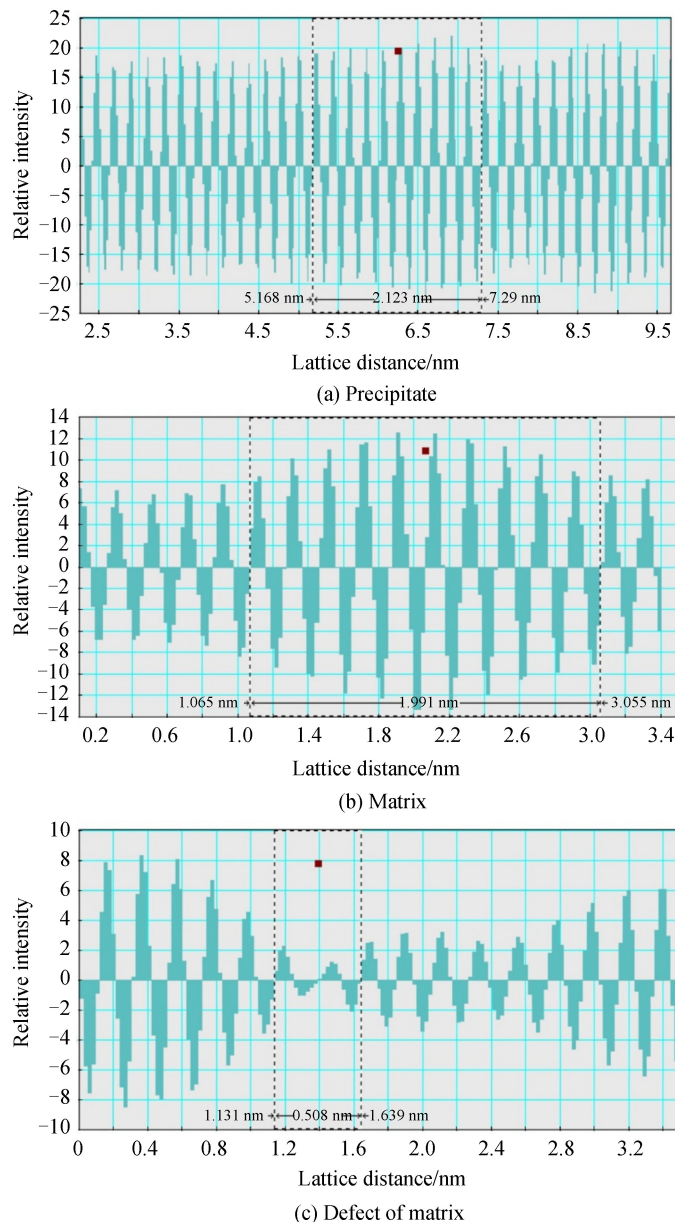


图 5 线强度分布

Fig.5 Line intensity distribution

2.3.2 激光冲击 690 高强钢基体位错组态分布

金属塑性变形主要依靠位错运动和孪晶变形两种方式实现,而 690 高强钢层错能很高孪晶在其中不易产生^[26],故激光冲击 690 高强钢表面塑性变形主要依靠位错运动.激光冲击属于冷加工范畴,690 高强钢在其作用下产生大量的位错.晶体中的位错只能终止于晶界,或露头于材料表面,或与其他位错相互连接^[27],结合彼此间的几何条件和能量条件,在激光冲击加载时,材料内部高速运动的位错发生分解、合并等位错反应,当柏氏矢量相反的两个位错相互靠近时,会因相互吸引而“湮灭”^[25].部分区域因搭接率的影响受到多次激光冲击加载,原有位错与新生位错间也会发生相互作用.基体组织与析出粒子相比较软,其通过变形卸载了大部分的冲击波能量,导致基体组织内部晶体缺陷云集,呈现多种组态分布.

图 6 为激光冲击后的 690 高强钢试样基体组织的 HRTEM 像.由图可知,基体区域衬度明显变化,表明基体内部包含众多晶体缺陷.通过对图 6(a)、(b)进行 IFFT 处理,获得了基体组织内不同缺陷的特征像,如图 7 所示.图 7(a)为原子剪切,在激光冲击波作用下,原子发生剪切位移造成部分晶格畸变;图 7(b)为单个刃型位错;图 7(c)为层错,因 690 高强钢层错能较高,该晶体缺陷在基体中也有少量分布;图 7(d)分别是同一原子排上、两三个原子排上形成的异号位错(亦称位错偶),它们具有平行但方向相反的柏氏矢量,当它们距离较近时,极易发生湮灭,该组态在激光冲击后的基体中大量分布;图 7(e)是几个原子排内因位错扩展生成的中心位错带并伴随着条状空位片;图 7(f)这种位错组态是由同一原子排上的位错偶极子连续排列形成,与扩展位错不同,其左右两侧原子面数量相等,既保持晶格原子之间平衡又造成晶格畸变,提升材料表面的强化效果,该类组态的大量分布还可认为是激光冲击材料表面应变小甚至应变屏蔽的微观解释之一.

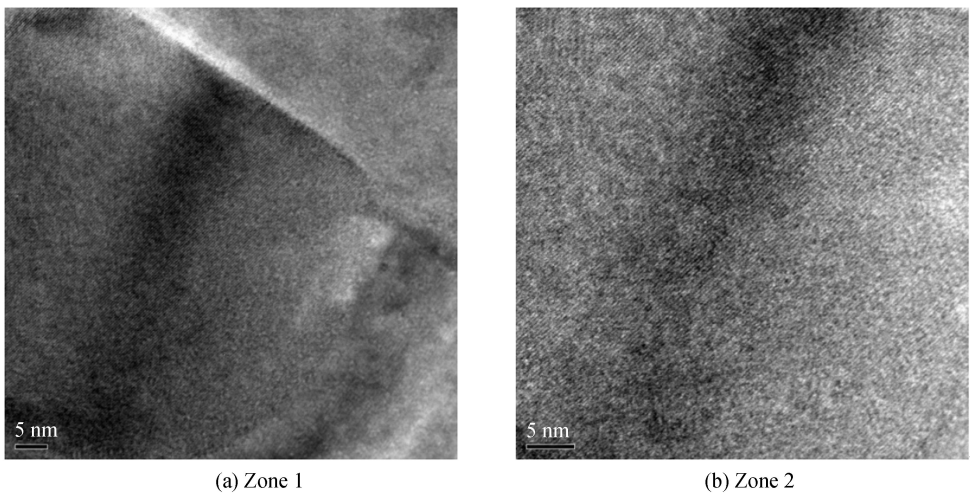
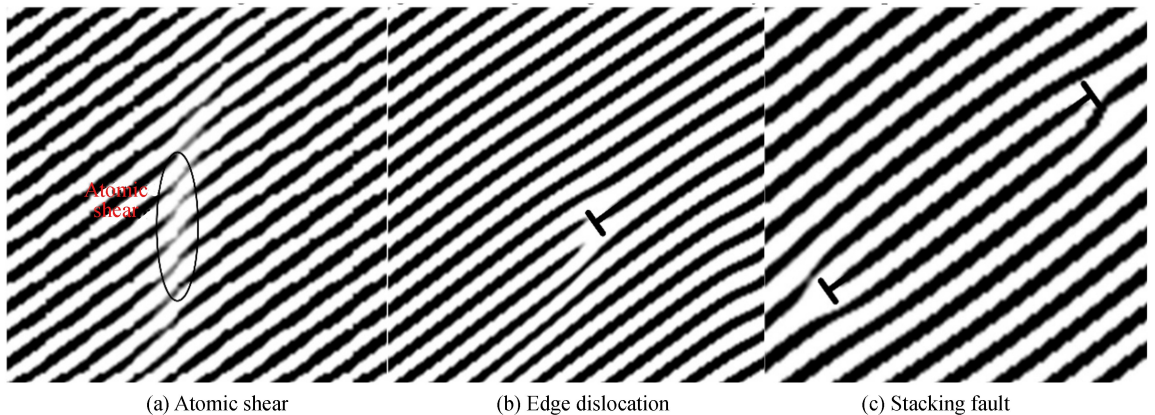


图 6 激光冲击 690 高强钢基体组织的 HRTEM 像
Fig.6 HRTEM image of 690 high strength steel matrix by laser shock processing



(a) Atomic shear

(b) Edge dislocation

(c) Stacking fault

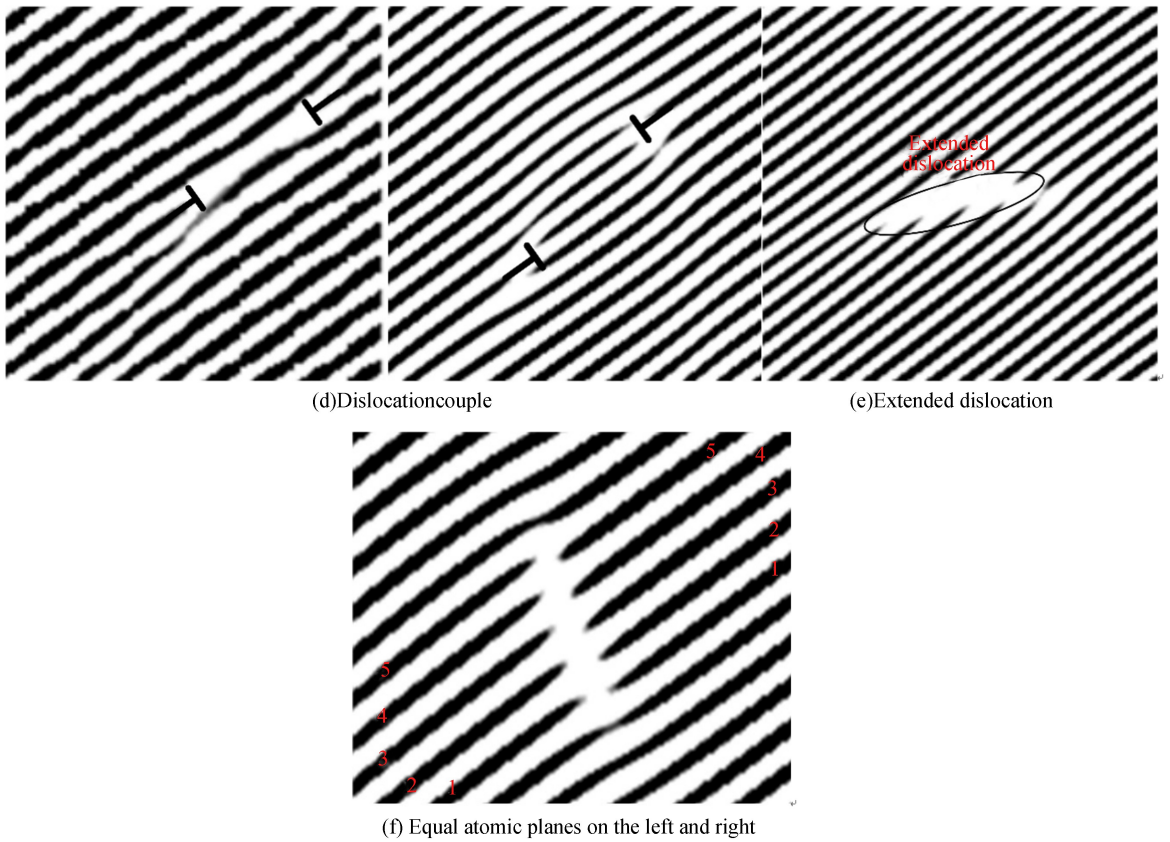


图 7 激光冲击 690 高强钢基体位错组态分布

Fig.7 Dislocation configurations in the matrix of laser shocked 690 high strength steel

位错偶极子是金属材料冷加工过程中常见的晶体缺陷,众多位错偶极子聚集对材料宏观性能的影响不容忽视^[28-29],该缺陷的形成与带割阶的螺型位错运动有关,如图 8 所示.当割阶的高度 MN 仅为几个原子间距时,螺型位错 XY 会在强大的外切应力作用下,拖着割阶 MN 一起运动并在移动路径上留下一系列点缺陷,如图 8(a)所示.当割阶的高度 MN 达到 20 nm 及以上,此段割阶因长度较长相当于钉扎于此,割阶上下两部分的位错线距离远、彼此间影响较小;两端位错是以割阶所在的直线为旋转轴分别在滑移面上转动,如图 8(b)所示.当割阶高度 MN 在两者范围内,位错线 XY 很难带着割阶 MN 前行,受割阶影响的部分位错线会在外加应力作用下呈弯曲状;随着位错的不断移动,在滑移面上留下一组拉长的异号位错线(也称位错偶),且该位错线的方向与其柏氏矢量垂直,可看作刃型偶极子聚集形成,如图 8(c)所示.激光冲击使 690 高

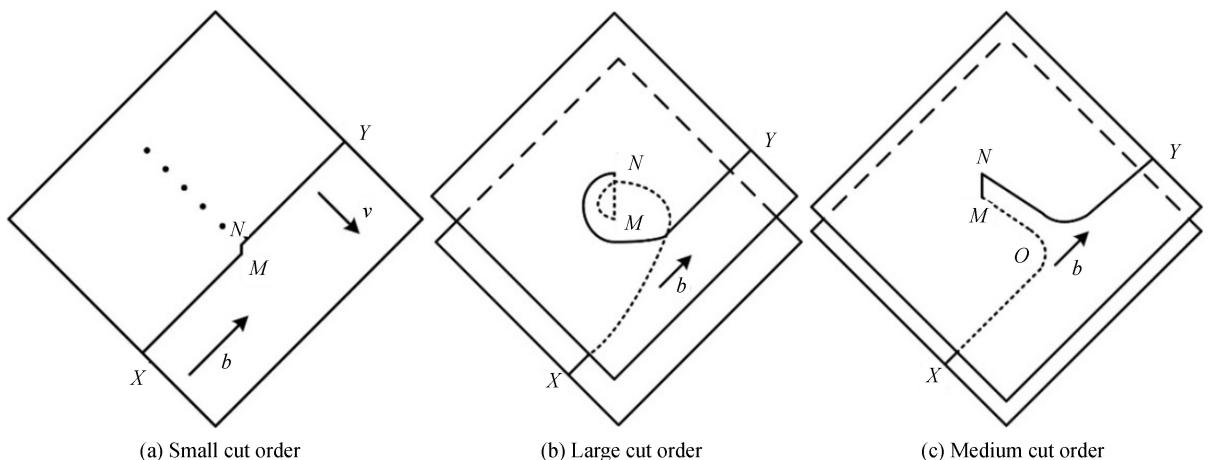


图 8 不同割阶高度下螺型位错运动示意图

Fig.8 Schematic diagram of screw dislocation motion at different cutting heights

强钢试样内部位错增殖,位错偶极子在其中成对分布,材料中位于同一原子排或两三个原子排的位错偶,其具体特征如图 7(d)所示.

2.3.3 激光冲击 690 高强钢位错组态与晶粒细化研究

激光冲击强化属于冷加工技术范畴,其依靠爆轰波的力学效应改善材料的表面性能,现有技术手段尚未检测到冲击过程中材料内部温度变化,而 690 高强钢的再结晶温度通常处于 $(0.6\sim 0.8)T_m$ 间(T_m 为材料的熔点);经过固溶处理后的 690 高强钢内部晶粒间元素成分、组织结构及能量分布等比较相近^[30],但是在不同区域内原子所处环境仍会存有差异,在强激光冲击作用下,差异区域的原子无法在极短时间内实现再结晶过程中的扩散转移过程;同时,仅依靠内部固态杂质质点和晶界非均质形核也很难说明原始晶粒中众多细小晶粒生成的原因.故强激光冲击加载下 690 高强钢表层众多细小的晶粒可能由原始粗大晶粒瞬时自组织分化形成.

由于搭接率的影响,690 高强钢经功率密度为 5.09 GW/cm^2 的激光冲击加载后不同区域的晶粒尺寸各异,其表层不同区域的 TEM 形貌像及选区电子衍射如图 9 所示.由图 9(a)可知,此观测区域内 690 高强钢在强激光加载下表层形成的晶粒尺寸大多处于 150 nm 以上;而由图 9(b)可知,此观测区域内 690 高强钢的晶粒尺寸大小不一致,部分区域的晶粒尺寸基本处于 100 nm 以下,对该选区做电子衍射,电子衍射图呈同心圆形状,如图 9(c)所示,表明该选区晶粒为纳米晶.

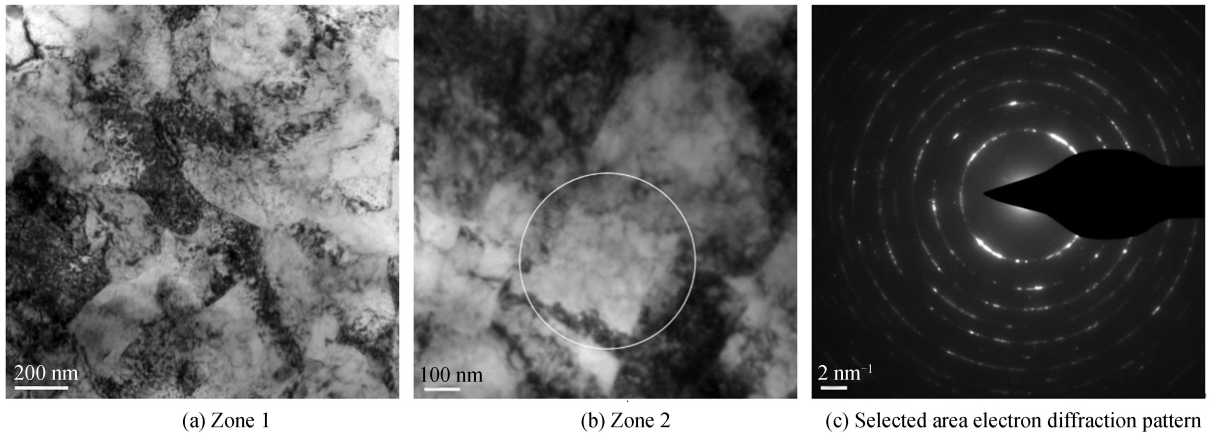
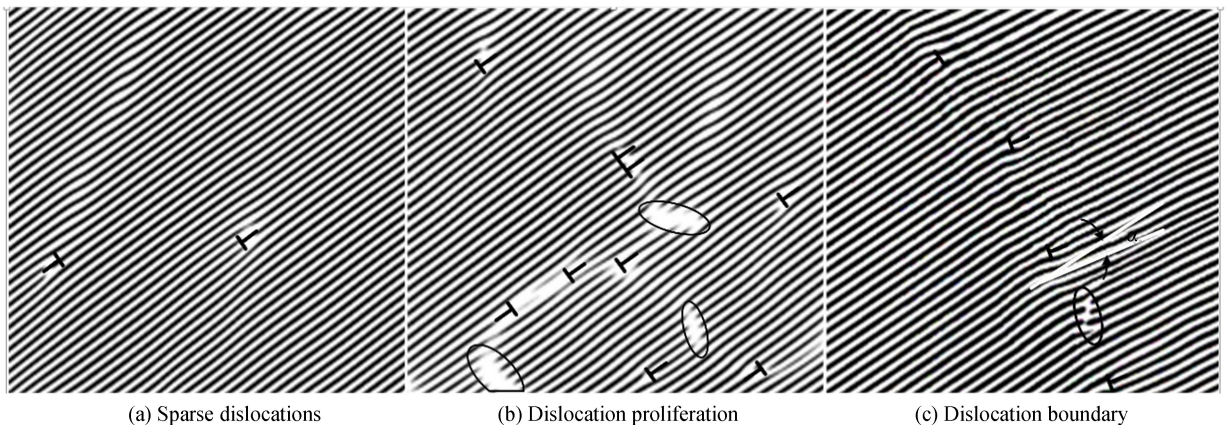
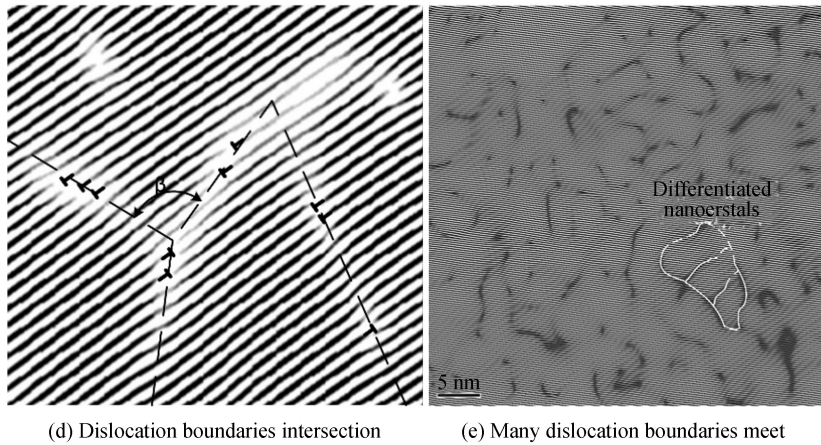


图 9 激光冲击 690 高强钢表层不同区域 TEM 形貌像及选区电子衍射花样
Fig.9 TEM image and selective electron diffraction pattern of different regions of the surface of 690 high-strength steel by laser shock

通过对图 9(a)、(b)不同晶粒尺寸区域的高倍像以及未经处理的 690 高强钢原始组织的高倍像进行 IFFT 处理,观察激光冲击 690 高强钢 IFFT 过滤像,通过对比研究位错变化特征(具体特征如图 10 所示),探究激光冲击 690 高强钢位错主导的晶粒细化过程.未经处理的 690 高强钢原始组织内部缺陷较少,其位错特征为位错稀疏且离散分布,见图 10(a).随着高功率密度的激光多次冲击加载,观察图 9(a)690 高强钢晶粒较大区域高倍像的 IFFT 过滤像的位错变化特征,与图 10(a)对比可知:冲击区域位错密度增长并伴随着众





(d) Dislocation boundaries intersection

(e) Many dislocation boundaries meet

图 10 强激光多次冲击 690 高强钢表面 IFFT 过滤像的位错变化特征

Fig.10 Dislocation change characteristics of IFFT filtered image on the surface of 690 high-strength steel by multiple strong laser shock

多条状空位片生成,如图 10(b).观察图 9(b)690 高强钢晶粒稍小区域高倍像的 IFFT 过滤像的位错变化特征,与图 10(b)对比可知:因塑性变形,690 高强钢内部除了产生一些任意分布的位错外,根据晶内特定的约束条件和几何条件^[31],约束能力较强的部分区域的位错、扩展位错、空位等构成几何位错界面,把原始粗大晶粒分割成两个不同取向的亚晶,如图 10(c).观察图 9(b)690 高强钢出现纳米晶区域高倍像的 IFFT 过滤像的位错变化特征,在外来载荷作用下晶界取向差进一步增大将导致晶界特性逐渐改变直到大角度晶界形成^[32],与图 10(c)对比可知:不同方向上的位错界面扩展交汇至一点,彼此间构成大角度晶界,晶粒得到进一步细化,如图 10(d);690 高强钢纳米晶区域高倍像的 IFFT 过滤像,见图 10(e),可以观察到几何位错界面逐渐扩展到整个晶粒,将形成众多细小晶粒,可推知该区域细小晶粒是由原始粗大晶粒自组织分化而成.

在实验方案设计所述约束条件下,根据观察所得激光冲击 690 高强钢位错变化特征及其扩展交汇致使晶粒细化的过程,并结合鲁金忠、罗新民关于激光冲击加载下位错形态演变细化 LY2 铝合金原始晶粒、分割

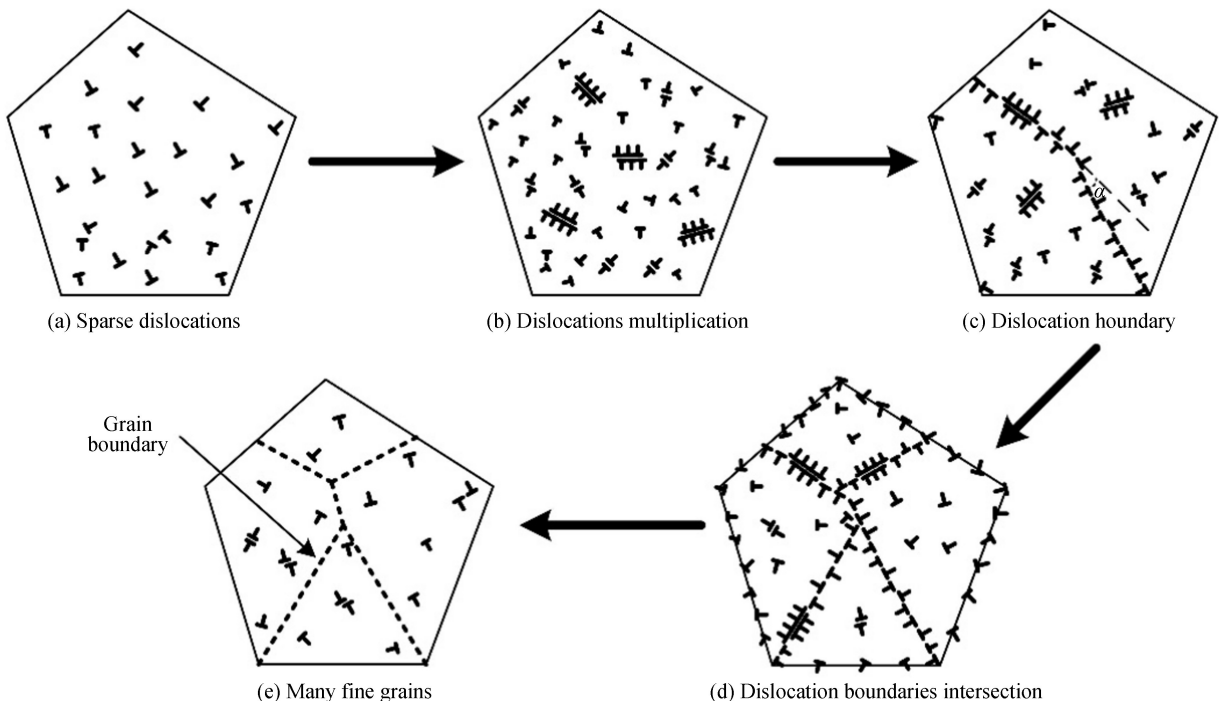


图 11 激光冲击 690 高强钢位错运动主导的晶粒细化模型

Fig.11 Grain refinement mechanism dominated by dislocation movement of 690 high-strength steel by laser shock

2A02 铝合金粗大微区等研究成果^[31,33],建立激光冲击 690 高强钢位错运动主导的晶粒细化模型如图 11 所示。未经处理的 690 高强钢原始组织内部缺陷较少,位错稀疏且离散分布,如图 11(a)所示;随着高功率密度的激光冲击加载,在晶粒尺寸大于 200 nm 的冲击区域出现众多位错、扩展位错、空位片等,如图 11(b)所示;在晶粒尺寸为 200~100 nm 时,其变形量达到一定程度,约束能力较强的部分区域的位错、扩展位错、空位片等构成几何位错界面,把原始粗大晶粒分割成两个不同取向的亚晶,如图 11(c)所示;强激光冲击波诱导材料超高应变率作用下,当晶粒尺寸小于 100 nm 时,晶界取向差进一步增大导致晶界特性逐渐改变,不同方向上的位错界面扩展交汇至一点,构成大角度晶界,如图 11(d)所示;同时,当晶粒尺寸小于 100 nm 时,在几何位错界面逐渐扩展作用下存在亚晶界逐渐发展形成众多细小晶粒的现象,原始粗大晶粒自组织分化成细小晶粒,如图 11(e)所示。

3 结论

研究了激光冲击 690 高强钢位错组态与晶粒细化机制,结果表明:

1)690 高强钢经激光冲击后,材料表层晶粒细化,其表层截面晶粒尺寸大小分布在 80~200 nm 之间。

2)690 高强钢在激光冲击诱导的应变过程中析出相与基体保持半共格关系;基体内部产生大量的晶体缺陷,主要包括单个刃型位错、扩展位错以及位错偶等,其中位错偶极子的形成与带割阶的螺型位错运动密切相关;位错、扩展位错、空位等构成的几何位错界面扩展交汇把原始粗大晶粒分割成细小晶粒;构建了激光冲击 690 高强钢位错运动主导的晶粒细化模型,该模型可以描述位错运动主导的晶粒细化过程。

3)激光冲击加载下 690 高强钢表层出现了位错缠结、位错增殖、几何位错界面、位错界面扩展交汇等多种位错组态,通过位错强化、位错诱导的细晶强化可实现 690 高强钢试样的表面改性,但关于激光冲击加载下 690 高强钢晶内几何位错界面形成所需的约束条件和几何条件仍需进一步探究。

参考文献

- [1] LU Ying, ZHAO Ji-bin, QIAO Hong-chao. Research on laser impact strengthening process and strengthening mechanism of TiAlalloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(10):1003013.
陆莹,赵吉宾,乔红超. TiAl 合金激光冲击强化工艺探索及强化机制研究[J].中国激光, 2014, **41**(10):1003013.
- [2] LI Kang, FU Xue-song, LI Zhi-qiang, *et al.* Effect of wet shot peening on fatigue fracture mechanism of TC4 alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, **46**(10): 3068-3072.
李康,付雪松,李志强,等. 湿喷丸强化对 TC4 合金疲劳断裂机制的影响[J].稀有金属材料与工程, 2017, **46**(10):3068-3072.
- [3] LIAO Y, CHENG G J. Controlled precipitation by thermal engineered laser shock peening and its effect on dislocation pinning: Multiscale dislocation dynamics simulation and experiments[J]. *Acta Materialia*, 2013, **61**(6):1957-1967.
- [4] TRDAN U, SKARBA M, PORRO J A, *et al.* Application of massive laser shock processing for improvement of mechanical and tribological properties[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, **342**:1-11.
- [5] CAO Yu-peng, ZHOU Dong-cheng, FENG Ai-xin, *et al.* Mechanism of laser shock 7050 aluminum alloy sheet specimens forming residual stress holes[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(11):1102003.
曹宇鹏,周东呈,冯爱新,等. 激光冲击 7050 铝合金薄板试样形成残余应力洞的机制[J].中国激光, 2016, **43**(11):1102003.
- [6] LUO Kai-yu, ZHOU Yang, LU Jin-zhong, *et al.* Influence of laser shock peening on microstructure and properties of 316L stainless steel cladding layer[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.
- [7] KATTOURA M, MANNAVA S R, DONG Q, *et al.* Effect of laser shock peening on residual stress, microstructure and fatigue behavior of ATI 718Plus alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, **102**: 121-134.
- [8] LUO Xin-ming, WANG Xiang, CHEN Kang-min, *et al.* Role of dislocations and their motions in laser impact surface modification of aerospace aluminum alloys[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.
- [9] CHEN L, REN X D, ZHOU W F, *et al.* Evolution of microstructure and grain refinement mechanism of pure nickel induced by laser shock peening[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, **728**:20-29.
- [10] LU Ying, ZHAO Ji-bin, QIAO Hong-chao, *et al.* Study on the laser shock temperature strengthening mechanism of TC17 titanium alloy[J]. *Surface Technology*, 2018, **47**(2): 1-7.
陆莹,赵吉宾,乔红超,等. TC17 钛合金激光冲击温强化机制的研究[J].表面技术, 2018, **47**(2):1-7.

- [11] LU J Z, DENG W W, LUO K Y, *et al.* Surface EBSD analysis and strengthening mechanism of AISI304 stainless steel subjected to massive LSP treatment with different pulse energies[J]. *Materials Characterization*, 2017, **125**: 99-107.
- [12] XU Shi-dong, REN Xu-dong, ZHOU Wang-feng, *et al.* Study on laser shock cell-crystal refinement and dislocation strengthening mechanism of GH2036 alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(1):0103001.
徐士东,任旭东,周王凡,等.GH2036 合金激光冲击胞-晶细化与位错强化机理研究[J].中国激光,2016,**43**(1):0103001.
- [13] PRABHAKARAN S, KUMAR H G P, KALAINATHAN S, *et al.* Laser shock peening modified surface texturing, microstructure and mechanical properties of graphene dispersion strengthened aluminium nanocomposites[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2019, **14**:127-137.
- [14] LU J Z, WU L J, SUN G F, *et al.* Microstructural response and grain refinement mechanism of commercially pure titanium subjected to multiple laser shock peening impacts[J]. *Acta Materialia*, 2017, **127**:252-266.
- [15] SUN Ru-jian, LI Liu-he, ZHU Ying, *et al.* Effect of laser shock peening on microstructure and tensile properties of TC17 titanium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, **48**(2): 491-499.
孙汝剑,李刘合,朱颖,等.激光冲击强化对 TC17 钛合金微观组织及拉伸性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2019, **48**(2):491-499.
- [16] HUANG S, ZHU Y, GUO W, *et al.* Effects of laser shock processing on fatigue performance of Ti-17 titanium alloy [J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2016, **36**(3):1-9.
- [17] WANG J T, ZHANG Y K, CHEN J F, *et al.* Effect of laser shock peening on the high-temperature fatigue performance of 7075 aluminum alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 704:459-468.
- [18] WU W, HAO W K, LIU Z Y. Corrosion behavior of E690 high-strength steel in alternating wet-dry marine environment with different pH values[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, **24**(12): 4636-4646.
- [19] CAO Yu-peng, ZHOU Dong-cheng, FENG Ai-xin, *et al.* Simulation and experiment of laser shock wave loading mechanism of 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 高强度钢薄板传播机制的模拟与实验[J].中国激光,2016, **43**(11): 1102010.
- [20] MA Hong-chi, DU Cui-wei, LIU Zhi-yong, *et al.* Study on stress corrosion behavior of E690 high strength steel in SO₂ polluted marine atmosphere[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, **52**(3): 331-340.
马宏驰,杜翠薇,刘智勇,等.E690 高强度钢在 SO₂ 污染海洋大气环境中的应力腐蚀行为研究[J].金属学报,2016, **52**(3): 331-340.
- [21] LUO Xin-ming, ZHANG Jing-wen, MA Hui, *et al.* Analysis of vacancy phenomenon in aluminum alloy induced by strong laser shock[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2012(1): 8-14.
罗新民,张静文,马辉等.强激光冲击诱导铝合金中的空位现象分析[J].材料热处理学报,2012(1):8-14.
- [22] WEN Bo-yun. Study on transmission electron microscopic image contrast of material microstructure[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2014.
文博云.材料微结构的透射电子显微像衬度研究[D].长沙:湖南师范大学,2014.
- [23] SUN Xu-dong, ZHOU Ming, QIN Lu-chang. Electron diffraction analysis of graphene structure and Debye temperature factor[J]. *Journal of Electron Microscopy Society*, 2013, **32**(3): 206-210.
孙旭东,周明,秦禄昌,石墨烯结构与德拜温度因子的电子衍射分析[J].电子显微学报,2013, **32**(3):206-210.
- [24] SUN Rui-tao, HAN Ming, YU Zhong-hui, *et al.* The relative intensity of single crystal electron diffraction[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2009, **28**(2): 175-179.
孙瑞涛,韩明,于忠辉,等.单晶电子衍射的相对强度[J].电子显微学报,2009, **28**(2):175-179.
- [25] LUO Xin-ming, ZHANG Jing-wen, MA Hui, *et al.* Analysis of dislocation configuration induced by strong laser shock in 2A02 aluminum alloy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 166-172.
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):166-172.
- [26] HUANG Xiao-ying, HOU Yao-yong, LI Li. Electronic diffraction analysis principle and spectrum[M]. Jinan: Science and Technology Press, 2000.
黄孝瑛,侯耀永,李理.电子衍射分析原理与图谱[M].济南:科学技术出版社,2000.
- [27] HU Geng-xiang, CAI Xun, RONG Yong-hua. Foundation of materials science[M]. Shanghai: Shanghai University Press, 2000.
胡赓祥,蔡珣,戎咏华.材料科学基础[M].上海:上海大学出版社,2000.
- [28] WANG Hai-rong, LIU You-wen, FANG Qi-hong. Elastic interference of screw dislocation dipole and interface rigid line [J]. *Engineering Mechanics*, 2007(11): 53-56.
王海容,刘又文,方棋洪.螺型位错偶极子与界面刚性线的弹性干涉[J].工程力学,2007(11):53-56.
- [29] FENG Hui, SONG Hao-peng, LIU You-wen, *et al.* Electron-elastic interference effects of screw dislocation dipole and arc-shaped interface crack in piezoelectric materials[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, **29**(1): 249-256.
冯慧,宋豪鹏,刘又文,等.压电材料中螺型位错偶极子与圆弧形界面裂纹的电弹干涉效应[J].工程力学,2012, **29**(1):

249-256.

- [30] LUO Xin-ming, MA Hui, ZHANG Jing-wen, *et al.* Surface nano-crystallization of austenitic stainless steel induced by laser shock[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(6):0603028.
罗新民,马辉,张静文,等.激光冲击诱导的奥氏体不锈钢表层纳晶化[J].中国激光,2011,**38**(6):0603028.
- [31] LUO Xin-ming, CHEN Kang-min, ZHANG Jing-wen, *et al.* Dislocation mechanism of laser impact surface modification of pure Al and aluminum alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, **49**(6): 667-674.
罗新民,陈康敏,张静文,等.纯 Al 和铝合金激光冲击表面改性的位错机制[J].金属学报,2013,**49**(6):667-674.
- [32] WEN M, LIU G, GU J F, *et al.* Dislocation evolution in titanium during surface severe plastic deformation[J]. *Applied Surface Science*, 2009, **255**(12): 6097-6102.
- [33] LU J Z, LUO K Y, ZHANG Y K, *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.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos.51505236,51979138), China Postdoctoral Science Foundation (No. 2019M651931), Open Fund Project for Key Laboratory Construction of 3D Printing Equipment and Application Technology in Jiangsu Province (No.2018KFKT10), National Key Research and Development Project of China (No.2019YFB2005300), National High-Tech Ship Scientific Research Project of China (No.MIIT[2019]360)