

激光冲击强化对电弧增材 2319 铝合金微观组织及残余应力的影响

孙汝剑, 朱颖, 李刘合, 郭伟*, 彭鹏

北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191

摘要 利用激光冲击强化(LSP)与电弧增材制造(WAAM)复合技术,改善增材构件微观组织及应力状态,并研究LSP前后WAAM 2319铝合金的微观组织、显微硬度以及深度方向残余应力分布。研究表明,LSP能够减小WAAM 2319铝合金的晶粒尺寸,优化残余应力分布。LSP后,增材构件的平均晶粒直径由冲击前的 $68.86\ \mu\text{m}$ 减小到 $34.32\ \mu\text{m}$,显微硬度由冲击前的 $67.8\ \text{HV}$ 增大到 $100.6\ \text{HV}$;残余压应力的最大值约为 $90\ \text{MPa}$,影响深度为 $0.65\ \text{mm}$ 。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; 电弧增材制造; 微观组织; 残余应力

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.011413

Effect of Laser Shock Peening on Microstructure and Residual Stress of Wire-Arc Additive Manufactured 2319 Aluminum Alloy

Sun Rujian, Zhu Ying, Li Liuhe, Guo Wei, Peng Peng

School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract The microstructure and stress state of the additive parts are improved by the combination of laser shock peening (LSP) and wire-arc additive manufacturing (WAAM) technologies. The microstructures, microhardness and residual stress distributions in the depth direction of 2319 aluminum alloys fabricated by WAAM before and after LSP are investigated. The research results show that LSP can significantly refine the grain size and improve the residual stress distribution of 2319 aluminum alloys fabricated by WAAM. After LSP, the average grain diameter of additive parts decreases from $68.86\ \mu\text{m}$ before LSP to $34.32\ \mu\text{m}$, and the microhardness increases from $67.8\ \text{HV}$ before LSP to $100.6\ \text{HV}$. The maximum residual compressive stress is about $90\ \text{MPa}$ and the influence depth is $0.65\ \text{mm}$.

Key words laser technique; laser shock peening; wire arc additive manufacturing; microstructure; residual stress

OCIS codes 140.3390; 350.5400; 240.6700

1 引言

铝合金具有密度低、比强度高、成形性能好及相对成本低等优势,被广泛应用于航空航天、生物器械、汽车制造、核能工业等领域^[1]。传统的铝合金加工方

式主要通过切削加工获得形状尺寸符合设计要求的零部件。增材制造在直接成形金属零件方面已逐渐成为研究热点,特别是在对昂贵金属零件的性能、精度、成本和周期有苛刻要求的航空航天、国防军工等领域^[2]。增材制造技术是根据CAD/CAM设计,采

收稿日期: 2017-08-15; 收到修改稿日期: 2017-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(11372019)、国家国际重大合作专项(2013DFR50590)、民用飞机专项科研项目(MJ-2016-F-16)

作者简介: 孙汝剑(1991—),男,博士研究生,主要从事航空钛合金激光冲击强化技术方面的研究。

E-mail: sunrujian@buaa.edu.cn

导师简介: 李刘合(1970—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事材料表面技术方面的研究。E-mail: liliuhe@buaa.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: gwei@buaa.edu.cn

用逐层累积的方法制造实体零件的技术,是一种材料累积的制造方法^[3]。电弧增材制造(WAAM)技术将焊接电弧作为热源,金属焊丝作为增材材料,通过送丝机构将焊丝以一定的速率送进,通过电弧产生的热量将焊丝熔化,然后按照预先设定的增材路径在选定的基板上由下而上层层堆积,直至形成零件^[4-5]。然而,增材制造过程容易出现晶粒大小难以控制、存在残余拉应力等问题^[4],这制约着增材制造技术的进一步推广应用。从保强等^[6-7]通过冷金属过渡工艺和调节纯氩保护气体流量的方法,减少甚至消除了增材结构内部气孔。Moat等^[8]研究了不同的增材制造工艺参数对残余应力的影响。Colegrove等^[9]通过先增材随后原位滚压的方法,减小了材料的残余应力峰值和晶粒大小。因此,针对增材制造过程中晶粒尺寸难以控制、存在残余拉应力等问题开展研究具有重要的意义。

激光冲击强化(LSP)是一种先进的表面改性技术,能够在材料表面诱导产生高幅值、大深度残余压应力,改善材料微观组织,提高材料抗疲劳、抗磨损和抗应力腐蚀等综合性能^[10-13]。国内外对不锈钢、铝合金和钛合金等常用金属材料的LSP已有一系列研究^[14]。Ye等^[15]发现,稳定的位错结构和残余应力是提升LSP不锈钢疲劳性能的关键。Hu等^[16]对不锈钢进行了大量的数值模拟研究。Lu等^[17]研究了铝合金LSP微观组织的演变机理。

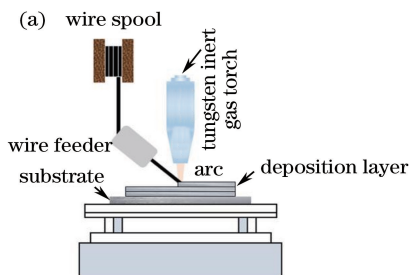
表1 2A12基板及2319焊丝主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Main chemical compositions of 2A12 substrate and 2319 welding wire (mass fraction, %)

| Material | Cu | Mn | Zr | Si | Mg | Zn | Ti | Al |
|-------------------|---------|---------|------|------|---------|------|-------|------|
| 2A12 substrate | 3.9-4.8 | 0.3-0.9 | ≤0.3 | ≤0.5 | 1.2-1.8 | ≤0.3 | ≤0.15 | Bal. |
| 2319 welding wire | 5.96 | 0.3 | 0.12 | 0.04 | - | 0.1 | 0.17 | Bal. |

2.2 WAAM

WAAM示意图如图1所示,将基板固定在焊接工作台上,通过焊枪直线移动并配合送丝机构匀速送入焊丝,在电弧的作用下焊丝熔化形成熔池,熔



Rubio-González等^[18]探究了LSP对铝合金疲劳裂纹扩展和断裂韧度的影响。孙浩等^[19-21]对航空用钛合金材料开展了大量的试验和数值模拟研究。在材料性能方面,李玉琴等^[22]研究了LSP对316L不锈钢焊接接头耐腐蚀性能的影响;李东霖等^[23]利用LSP提高了TC4钛合金抗外物打伤性能;刘月等^[24]指出,LSP能够显著提高TA2工业纯钛的塑性。但是,关于增材制造材料的LSP研究鲜有报道。目前,Kalentic等^[25]通过将LSP技术复合进增材制造工艺,提出了3D LSP技术。因此,研究LSP技术对增材制造材料微观组织及残余应力的影响具有重要意义。

本文采用LSP技术对WAAM 2319铝合金薄壁板进行了后处理,研究了微观组织的演变规律,探究了晶粒度变化以及位错孪晶产生机理。同时,对深度方向残余应力进行了测定,分析了残余应力产生的机理。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

采用直径为1.2 mm的2319铝合金焊丝作为填丝材料,厚度为12 mm的2A12铝合金作为WAAM基板,其主要化学成分见表1。采用碱性溶液清洗基板表面以去除油污,然后打磨去除基板表面的氧化膜并用丙酮擦拭干净。

池凝固后形成堆积层。当一层堆积完成后,升高焊枪,重复上一层操作,最终完成薄壁板的堆积。堆积薄壁板如图1(b)所示,堆积层数为90层,薄壁板高度约为106 mm。试验中WAAM工艺参数见表2。

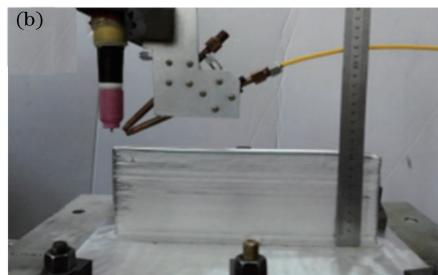


图1 (a) WAAM示意图;(b) WAAM试样

Fig. 1 (a) Schematic of WAAM; (b) specimen by WAAM

表2 WAAM工艺参数
Table 2 Process parameters of WAAM

| Parameter | Welder type | Tungsten electrode diameter /mm | Wire diameter /mm | Wire feeding speed / ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) | Shielding gas | Flow rate of shielding gas / ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) | Travel speed / ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) |
|-----------|----------------------------|---------------------------------|-------------------|---|---------------|---|---|
| Content | Tungsten inert gas welding | 3 | 1.2 | 1.5 | Ar | 15 | 0.3 |

2.3 LSP

薄壁板堆积完成后,双面铣成厚度为 3 mm 的薄板,清洗干净后用于 LSP 试验。采用中航工业北京航空制造工程研究所装备的 SGR-Extra-15 型 Nd:YAG 激光器进行试验,主要激光参数为:脉冲能量 15 J、波长 1064 nm、脉冲宽度 15 ns、重复频率 1 Hz、光斑直径 4 mm、光斑搭接率 50%。工件运动

采用外部机械手臂控制,首先将厚度为 100 μm 的 3M 专用铝箔作为吸收层粘贴在试样表面;采用去离子水作为约束层,水流的厚度控制在 1~2 mm;激光经全反镜和聚焦透镜聚焦在工件表面,形成圆形光斑。LSP 路径及试样如图 2 所示,冲击区域内横向和纵向搭接率均为 50%,冲击方式为双面冲击。

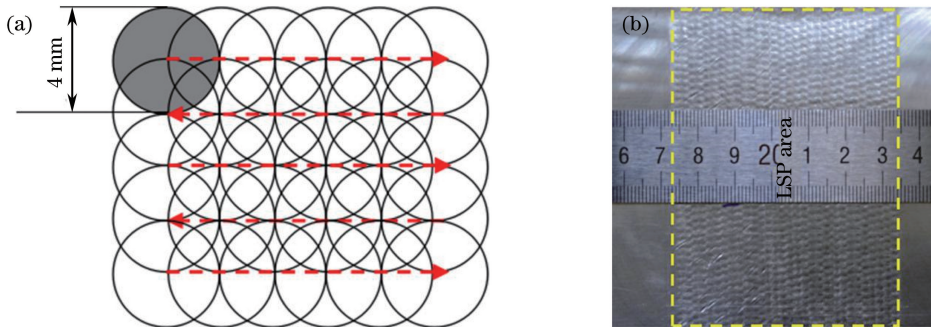


图2 LSP 试验。(a)冲击路径;(b)强化后试样

Fig. 2 LSP experiment. (a) Impact path; (b) specimen after LSP

2.4 测试及表征

采用德国 Zeiss 公司生产的 Axio-Scope-A1 型光学显微镜观察 LSP 前后材料微观组织,并通过其自带的晶粒度统计软件分析晶粒尺寸变化规律。观察前,采用砂纸打磨试样表面并机械抛光至表面无划痕,再用腐蚀剂进行腐蚀。采用日本 Jeol 公司生产的 JEM-2100 型透射电子显微镜 (TEM) 分析 LSP 前后的材料内部微观组织演变规律。采用上海恒一精密仪器有限公司生产的 FM-800 型显微维氏硬度计测量 LSP 前后材料微观硬度的变化:从试样顶部以 5 mm 为间距依次往下测量,第一个点位于试样顶部以下 5 mm 处,最后一个测量点位于试样顶部以下 75 mm 处。硬度测量的载荷为 200 g,保载时间为 10 s,同一试样测量三次取平均值。采用 PRISM 残余应力测试系统测定 LSP 前后试样深度方向残余应力的变化:选用一定直径的钻头在试样表面确定基准点,通过激光记录材料表面初始应变,当钻头钻到某一深度时,孔周围材料会同步出现一个新的应力平衡点,这个过程引起的表面微变形被记录并通过专业软件计算出残余应力数值。

3 试验结果

3.1 晶粒尺寸

光学显微镜下 LSP 前后增材制造 2319 铝合金微观组织形貌如图 3 所示。从图 3(a)可以观察到,LSP 前试样的晶粒较为粗大;在 WAAM 的过程中,当堆积后一层时,电弧热量对已堆积层会进行低温热处理,促使晶粒长大。从图 3(b)可以看出,LSP 后试样的晶粒尺寸明显减小。因为激光脉冲宽度很

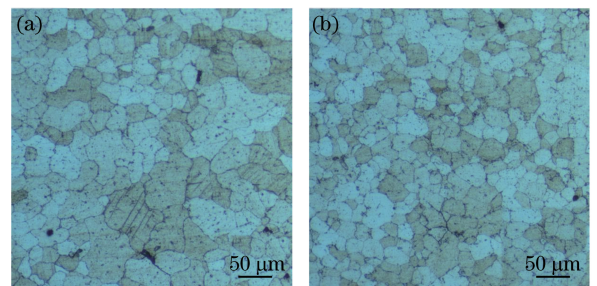


图3 晶粒微观组织。(a) LSP 前;(b) LSP 后

Fig. 3 Microstructures of grains.

(a) Before LSP; (b) after LSP

小,所以冲击过程中激光冲击波的力学性能占主导作用,激光冲击波在材料内部传递产生的大量位错或孪晶组织导致晶粒细化。

通过晶粒度分析软件随机统计图 3(a)、(b)中 50 个晶粒的尺寸,并按照从小到大的顺序依次排列,结果如图 4(a)所示。可以发现,LSP 后试样的晶粒平均直径由冲击前的 $68.86 \mu\text{m}$ 减小到 $34.32 \mu\text{m}$,减小了 50.2%。图 4(b)、(c)分别为 LSP 前后晶粒尺寸频率分布直方图,可以观察到,LSP 前试样中超过 30%的晶粒直径在 $60\sim 70 \mu\text{m}$ 之间,晶粒尺寸分布不均匀;LSP 后试样的晶粒尺寸大幅

减小,超过 90%以上的晶粒直径小于 $50 \mu\text{m}$,晶粒直径分布均匀。因此,LSP 能够使增材制造 2319 铝合金获得细化的晶粒和均匀的微观组织。

根据霍尔-佩奇公式^[26-27]可知,晶粒度对材料的性能有影响,其中对力学性能的影响最大。通常晶粒越细,阻碍滑移的晶界就越多,晶界面积也越大,屈服极限则越高。屈服强度 σ_s 与晶粒度 d 的关系为

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2}, \quad (1)$$

式中 σ_0 和 K 均为常数。由(1)式可知,材料的晶粒度越小,屈服强度就越大。因此,LSP 诱导的晶粒细化对材料强度的提升具有重要意义。

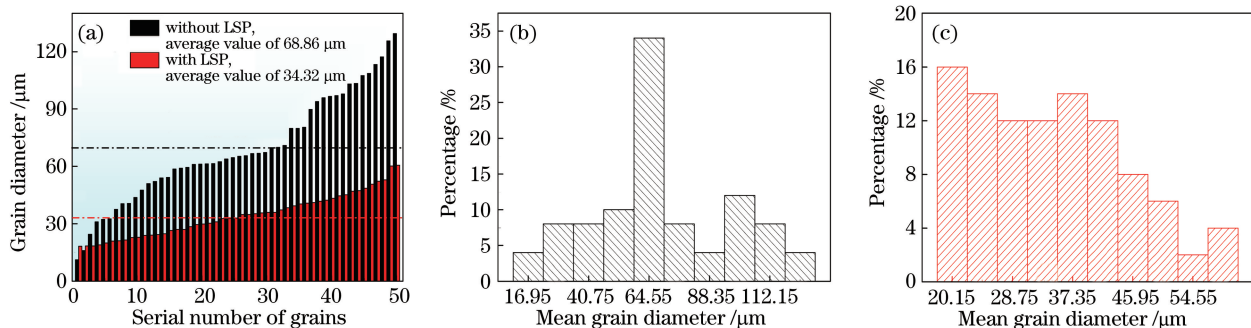


图 4 晶粒度软件分析结果。(a)晶粒尺寸;(b) LSP 前的晶粒尺寸分布;(c) LSP 后的晶粒尺寸分布

Fig. 4 Analysis results by grain size software.

(a) Grain size; (b) grain size distribution before LSP; (c) grain size distribution after LSP

3.2 TEM 分析

LSP 前后增材制造 2319 铝合金的 TEM 图像如图 5 所示,可以看出,LSP 前后增材制造 2319 铝合金的微观组织发生了明显的变化。在 LSP 前,如图 5(a)所示,未见明显的位错或者孪晶组织。这是由于增材制造过程中材料快速凝固而未受到约束作用,未发生明显塑性变形,故材料内部无明显的微观缺陷。在 LSP 后,如图 5(b)所示,可观察到明显的位错缠结和位错墙,同时可观察到机械孪晶组织。这是因为 LSP 是极高应变率下的材料非平衡动态响应过程,晶体内部产生位错,伴随着位错发生滑移、增殖、聚集、纠缠塞积,使得晶粒内部的位错密度增加,进而形成位错墙和位错缠结,并发展为位错胞和亚晶界,最终形成晶界。由于铝合金具有较高的层错能,滑移机制以位错为主,因此 LSP 后试样中形成了较多位错组织,机械孪晶组织相对较少。

3.3 显微硬度

LSP 前后 WAAM 2319 铝合金显微硬度的变化如图 6 所示。可以看出,LSP 前试样水平方向的平均硬度为 68.8 HV;LSP 后靠近冲击面的水平方向显微硬度提升到 100.6 HV,硬度增大了 31.6%。

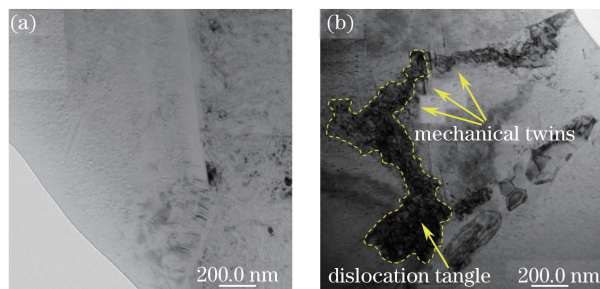


图 5 WAAM 2319 铝合金的 TEM 图像。

(a) LSP 前;(b) LSP 后

Fig. 5 TEM images of 2319 aluminum alloys by WAAM.

(a) Before LSP; (b) after LSP

LSP 前后试样上部显微硬度均略低于平均显微硬度,这是因为增材结构上部组织相对疏松,而内部组织由于低温热处理以及电弧力的作用相对更加致密,因而试样上部硬度略低于平均显微硬度。

材料的显微硬度 D_{HV} 与位错密度 ρ 的关系^[28-29]为

$$D_{\text{HV}} = D_{\text{HV}_0} + \alpha Gb\rho^{1/2}, \quad (2)$$

式中 D_{HV_0} 为基体的硬度; α 、 G 、 b 为与材料特性有关的常数。从 TEM 分析结果可知,LSP 在 WAAM 2319 铝合金内部诱导产生了大量高密度位错,使其显微硬度明显增大。

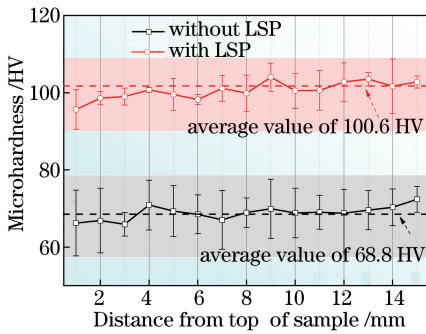


图6 WAAM 2319 铝合金的显微硬度

Fig. 6 Microhardness of 2319 aluminum alloys by WAAM

3.4 残余应力

LSP 前后 WAAM 2319 铝合金深度方向的残余应力分布如图 7 所示。LSP 前试样内部主要存在残余拉应力,最大残余拉应力位于距离表面 0.2 mm 处。残余拉应力的产生是由于非平衡状态下增材过程引起了材料内部收缩不均匀。LSP 后试样表层应力变为幅值约为 90 MPa 的残余压应力,并且残余应力影响层深度达到 0.65 mm。

在 LSP 过程中,材料的动态响应表现为材料的屈服滞后、强度极限提高的强化现象和延伸率降低的脆化现象。当冲击波压力小于 Hugoniot 弹性极限(HEL)时,材料发生完全弹性变形,卸载后材料能够恢复原始状态;当冲击波压力在 1 HEL 到 2 HEL 之间时,材料开始发生塑性变形,材料处于弹塑性变形阶段,卸载后材料留下部分永久塑性变形,产生残余应力;当冲击波压力大于 2 HEL 时,材料发生完全塑性变形,产生饱和残余应力^[20]。激光在材料表面诱导的等离子体冲击波向材料内部传递,冲击波瞬时压力超过 1 HEL 时,表层材料被压缩变形,同时伴随着表面材料的径向形变,冲击区域表面受到深度方向的压应力和径向的拉应力。随着冲击波峰值压力的减小,材料发生局部弹性回复,在径向和深度方向发生反向塑性变形,最终在径向和深度方向均产生压应力,材料表面整体表现为残余压应力。

4 结 论

LSP 对 WAAM 2319 铝合金有显著的晶粒细化作用,LSP 后平均晶粒尺寸由 68.86 μm 减小到 34.32 μm 。LSP 在 WAAM 2319 铝合金内部产生了高密度位错和少量机械孪晶,显微硬度由 68.8 HV 提高到 100.6 HV。同时,LSP 能够有效改善 WAAM 2319 铝合金内部残余应力情况。

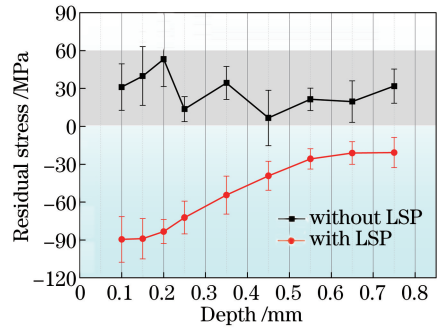


图7 WAAM 2319 铝合金深度方向的残余应力

Fig. 7 Residual stress in depth direction of 2319 aluminum alloys by WAAM

参 考 文 献

- [1] Heinz A, Haszler A, Keidel C, *et al.* Recent development in aluminium alloys for aerospace applications[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2000, 280(1): 102-107.
- [2] Zhang R. Research on the aluminum alloy arc additive manufacturing (3D printing) technology and process based on the CMT [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016.
张瑞. 基于 CMT 的铝合金电弧增材制造(3D 打印)技术及工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [3] Lu B H, Li D C. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology[J]. *Machine Building & Automation*, 2013, 42(4): 1-4.
卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. *机械制造与自动化*, 2013, 42(4): 1-4.
- [4] Szost B A, Terzi S, Martina F, *et al.* A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components[J]. *Materials & Design*, 2016, 89: 559-567.
- [5] Williams S W, Martina F, Addison A C, *et al.* Wire + arc additive manufacturing [J]. *Materials Science & Technology*, 2015(7): 641-647.
- [6] Cong B Q, Ding J L. Influence of CMT process on porosity of wire arc additive manufactured Al-Cu alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(12): 3149-3153.
从保强, 丁佳洛. CMT 工艺对 Al-Cu 合金电弧增材制造气孔的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43(12): 3149-3153.
- [7] Cong B Q, Ding J L, Williams S. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy [J]. *International*

- Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(9/10/11/12): 1593-1606.
- [8] Moat R J, Pinkerton A J, Li L, *et al.* Residual stresses in laser direct metal deposited Waspaloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 528(6): 2288-2298.
- [9] Colegrove P A, Coules H E, Fairman J, *et al.* Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(10): 1782-1791.
- [10] Montross C S, Wei T, Ye L, *et al.* Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: A review[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(10): 1021-1036.
- [11] Liao Y L, Ye C, Cheng G J. A review: Warm laser shock peening and related laser processing technique [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 15-24.
- [12] Li W, Li Y H, He W F, *et al.* Development and application of laser shock processing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(12): 15-19.
李伟, 李应红, 何卫锋, 等. 激光冲击强化技术的发展和应用[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 15-19.
- [13] Qiao H C, Gao Y, Zhao J B, *et al.* Research process of laser peening technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(7): 1744-1755.
乔红超, 高宇, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化技术的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(7): 1744-1755.
- [14] Ding K, Ye L. Laser shock peening: Performance and process simulation[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [15] Ye C H, Suslov S, Kim B J, *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.
- [16] Hu Y X, Yao Z Q, Hu J. 3-D FEM simulation of laser shock processing [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(3/4): 1426-1435.
- [17] 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.
- [18] Rubio-González C, Ocaña J L, Gomez-Rosas G, *et al.* Effect of laser shock processing on fatigue crack growth and fracture toughness of 6061-T6 aluminum alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2004, 386(1/2): 291-295.
- [19] Sun H, Zhu Y, Guo W, *et al.* Effect of laser shock peening on residual stress and microstructure of TC17 titanium alloy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041405.
孙浩, 朱颖, 郭伟, 等. 激光冲击强化对 TC17 钛合金残余应力及显微组织的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041405.
- [20] Sun R J, Zhu Y, Guo W, *et al.* Effect of laser shock processing on surface morphology and residual stress field of TC17 titanium alloy by FEM method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(1): 187-193.
孙汝剑, 朱颖, 郭伟, 等. 激光冲击强化对 TC17 表面形貌及残余应力场影响的有限元数值模拟研究 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24(1): 187-193.
- [21] Sun R J, Li L H, Zhu Y, *et al.* Dynamic response and residual stress fields of Ti6Al4V alloy under shock wave induced by laser shock peening [J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2017, 25(6): 065016.
- [22] Li Y Q, Meng C J, Wang X D, *et al.* Corrosion resistance property of 316L stainless steel welding joints treated by laser shock peening [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 061402.
李玉琴, 孟长军, 王学德, 等. 激光冲击强化 316L 不锈钢焊接接头的耐腐蚀性能[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 061402.
- [23] Li D L, He W F, You X, *et al.* Experimental research on improving fatigue strength of wounded TC4 titanium alloy by laser shock peening [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0702006.
李东霖, 何卫锋, 游熙, 等. 激光冲击强化提高外物打伤 TC4 钛合金疲劳强度的试验研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0702006.
- [24] Liu Y, Lu J Z, Luo K Y, *et al.* Effect of laser shock processing on tensile property and fracture morphology of CP-Ti under elevated temperature condition [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0902005.
刘月, 鲁金忠, 罗开玉, 等. 升温条件下激光冲击强化对工业纯钛拉伸性能和断口形貌的影响 [J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0902005.
- [25] Kalentics N, Boillat E, Peyre P, *et al.* 3D laser shock peening—A new method for the 3D control of residual stresses in selective laser melting [J].

- Materials & Design, 2017, 130: 350-356.
- [26] Hall E O. The deformation and ageing of mild steel: II characteristics of the Lüders deformation [C]. Cambridge: Proceedings of the Physical Society, 1951, 64(9): 742.
- [27] Petch N J. The cleavage strength of polycrystals [J]. The Journal of the Iron and Steel Institute, 1953, 173: 25-27.
- [28] Armstrong R W. 60 years of Hall-Petch: Past to present nano-scale connections [J]. Materials Transactions, 2014, 55(1): 2-12.
- [29] Lu J Z, Wu U, 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.