

温度对激光喷丸强化 2024 航空铝合金 表面力学性能的影响

孟宪凯¹ 周建忠¹ 苏纯^{1,2} 黄舒¹ 盛杰¹ 陈寒松¹ 徐家乐¹

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

²常州工学院机械与车辆工程学院, 江苏 常州 213022

摘要 在不同温度下对 2024-T351 航空铝合金进行了激光喷丸(LP),研究了温度对其表面力学性能的影响规律,并结合微观组织分析得出了激光温喷丸(WLP)对 2024-T351 航空铝合金的强化机理。结果表明,激光喷丸 2024-T351 航空铝合金的显微硬度随喷丸温度的升高而增大,弥散强化效应使得 120 °C 激光温喷丸在 2024-T351 航空铝合金表面诱导的残余压应力幅值显著高于常温激光喷丸。

关键词 激光技术; 激光温喷丸; 显微硬度; 残余压应力

中图分类号 TN 249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1002003

Effect of Temperature on Surface Mechanical Property of 2024 Aluminum Alloy Treated by Laser Peening

Meng Xiankai¹ Zhou Jianzhong¹ Su Chun^{1,2} Huang Shu¹ Sheng Jie¹
Chen Hansong¹ Xu Jiale¹

¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

²School of Mechanical and Vehicle Engineering, Changzhou Institute of Technology,
Changzhou, Jiangsu 213022, China

Abstract Laser peening (LP) is conducted on aeronautical 2024-T351 aluminum alloy under different temperatures, and the influence law of temperature on its surface mechanical property is studied. In combination with the microstructure analysis, the strengthening mechanism of 2024-T351 aluminum alloy treated by warm laser peening (WLP) is revealed. The results indicate that the micro-hardness of aeronautical 2024-T351 aluminum alloy increases with the increment of peening temperature. The dispersion strengthening effect makes the amplitude of residual compressive stress induced by 120 °C-WLP much higher than that by room-temperature LP.

Key words laser technique; warm laser peening; micro-hardness; residual compressive stress

OCIS codes 140.3540; 160.3900; 120.6810; 220.4610

1 引言

2024-T351 航空铝合金具有较高的比强度及良好的加工塑性,广泛应用于各类飞机结构件和航空关键零部件的制造。飞机结构件与航空关键零部件通常在循环载荷工况下服役,疲劳断裂是其主要的失效形式。

收稿日期: 2016-05-28; 收到修改稿日期: 2016-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(51175236, 51575247, 51405204)、中国博士后科学基金(2014T70477, 2013M540417)、江苏省科技支撑项目(BE2013097)、江苏省自然科学基金(BK20141166)、江苏省研究生创新计划(KYLX15_1056)、江苏大学高级人才启动基金(13JDG109)

作者简介: 孟宪凯(1986—),男,博士研究生,主要从事激光冲击强化技术方面的研究。

E-mail: mengdetiankong10@126.com

导师简介: 周建忠(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造技术方面的研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

表面强化技术是目前常用的疲劳延寿技术之一,主要包括喷丸(SP)、深滚压(DR)以及激光喷丸(LP)等^[1-3]。LP 由于较高的残余压应力以及较低的表面粗糙度,在表面强化领域得到快速的应用^[4],而 SP、DR、LP 诱导的残余压应力场在高温或者交变载荷下并不稳定,容易出现应力松弛^[5]。

研究表明,热力耦合作用(TMCE)通过高温对材料应力应变过程以及微观组织产生复杂影响,可以显著提高残余压应力的稳定性,进而大幅提高材料的疲劳寿命^[6-7]。针对激光喷丸强化性能在高温和交变载荷作用下的释放问题, Ye 等^[8-10]提出了激光温喷丸(WLP)技术,将 LP 与 TMCE 的优势相结合,大幅提高了 LP 诱导残余压应力的稳定性和材料在循环载荷或者高温下的疲劳寿命。

本文以 2024-T351 航空铝合金为研究对象,研究温度对激光喷丸强化 2024-T351 航空铝合金表面力学性能的影响规律,并结合不同温度下激光喷丸强化 2024-T351 航空铝合金的晶粒分布以及位错形态,探索激光温喷丸对 2024-T351 航空铝合金的强化机理。

2 实验方法

2.1 实验材料及试样

实验材料选用厚度为 2 mm 的 2024-T351 航空铝合金板材,其化学成分以及典型机械性能见表 1、2。使用线切割机将 2024 铝合金板材切割成 20 mm×20 mm 的方形试样,然后打磨抛光至表面粗糙度小于等于 0.05 μm。

表 1 2024-T351 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 2024-T351 aluminum alloy(mass fraction, %)

Element	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
Content	3.5~4.5	0.5	0.5	0.3~0.9	0.2~1.8	0.25	0.10	0.15	Bal.

表 2 2024-T351 铝合金的典型机械性能

Table 2 Representative mechanical properties of 2024-T351 aluminum alloy

Mechanical property	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation /%	Shear strength /MPa
Value	470	325	20	285

2.2 激光喷丸实验

激光温喷丸实验的原理如图 1 所示^[9],其通过热力耦合作用诱导产生动态应变时效及动态析出,可以有效改善金属或合金材料的微观组织,进而获得更为优良的机械力学性能。采用 Nd:YAG 纳秒激光器对 2024-T351 铝合金试样表面进行激光喷丸强化。激光喷丸实验的工艺参数为:激光功率密度 5 GW/cm²,光斑直径 3 mm,喷丸区域 12 mm×12 mm,搭接率 50%。为了研究温度对激光喷丸 2024-T351 航空铝合金力学性能的影响,激光喷丸实验分别在常温(25 ℃)、80 ℃以及 120 ℃下进行。由于水的沸点较低,因此采用二甲基硅油作为激光喷丸实验的约束层,其型号及材料特性见表 3。吸收层是厚度为 120 μm 的铝箔。激光温喷丸实验中,硅油温度以及试样表面温度均使用温度传感器测量并通过控制器控制,温控精度为 ±0.1 ℃。经过室温激光喷丸(RT-LP)与激光温喷丸(WLP)后 2024-T351 航空铝合金的表面形貌分别如图 2 所示。

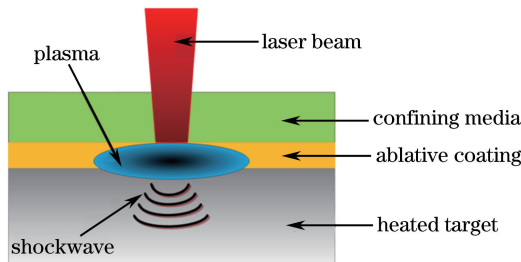


图 1 激光温喷丸原理图^[9]

Fig. 1 Schematic diagram of warm laser peening^[9]

表 3 PMX-200 二甲基硅油特性
Table 3 Characteristics of PMX-200 dimethicone

Element	Kinematic viscosity / (m ² ·s ⁻¹)	Density / (g·cm ⁻³)	Surface tension / (mN·M ⁻¹)	Closed-cup flash point / °C	Open-cup flash point / °C	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Content	10 ⁻⁵	0.96	20.8	>100	>250	0.134

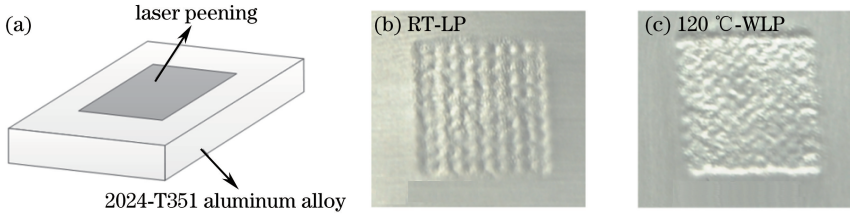


图 2 (a)2024-T351 铝合金试样经过(b)RT-LP 和(c)120 °C-WLP 处理后的喷丸区形貌

Fig. 2 Peening morphologies of (a) 2024-T351 aluminum alloy specimen by (b) RT-LP and (c) 120 °C-WLP

2.3 表面力学性能检测

使用显微硬度计沿深度方向测量激光喷丸前后 2024-T351 铝合金试样的显微硬度。在每个实验温度下测试两个试样共 4 块不同的喷丸区域,同时每个喷丸区域在同一深度测量三个位置,取同一深度下实验数据的平均值作为该深度下试样的显微硬度。显微硬度测量参数为:载荷 2000 N,保荷时间 10 s。

采用加拿大 Proto 公司生产的 iXRD 残余应力测定仪对激光喷丸前后 2024-T351 铝合金试样深度方向的残余应力进行检测,测试方案与显微硬度测试方案相同。深度方向的残余应力检测需采用电解抛光法逐层剥离表面材料,电解抛光电压为 10 V。电解液采用 V(H₂SO₄):V(H₃PO₄):V(CrO₃):V(H₂O) = 1:1:0.12:0.82 制备得到[V(·)为体积],其中 H₂SO₄ 密度为 1.7 g/cm³,H₃PO₄ 密度为 1.84 g/cm³。

分别使用光学显微镜与电子透射显微镜(TEM)观察激光喷丸前后 2024-T351 航空铝合金试样的晶粒状态以及微观组织,并在此基础上分析激光温喷丸对 2024-T351 航空铝合金的强化机理。最后运用能谱仪(EDS)测试分析了激光喷丸过程中产生的析出物相。

3 结果与分析

3.1 显微硬度

表面硬度是衡量材料表面质量的重要力学性能之一。不同温度下激光喷丸强化后 2024-T351 航空铝合金沿深度方向的显微硬度分布如图 3 所示。通过对比激光喷丸前后 2024-T351 航空铝合金的显微硬度可以看出,激光喷丸强化后材料表面硬度显著提高,经过常温激光喷丸的试样显微硬度比未喷丸试样提高了近 16.2%。同时还可以看出,经过激光喷丸诱导后材料的显微硬度随深度的增加而逐渐降低,说明激光喷丸对材料的强化作用随深度的增加而减弱,这一现象与 Montross^[11]的研究结果一致。

另一方面,通过对比不同温度下激光喷丸诱导的显微硬度可以发现,材料表面的显微硬度随喷丸温度的

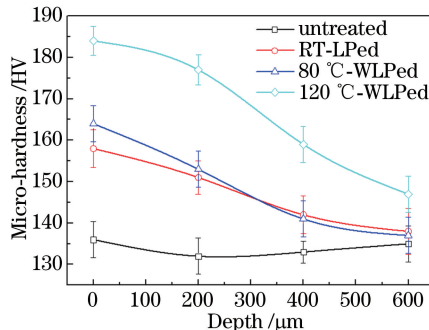


图 3 不同温度下激光喷丸强化 2024-T351 铝合金显微硬度分布

Fig. 3 Micro-hardness distribution of 2024-T351 aluminum alloy treated by laser peening at different temperatures

升高而增加。但当喷丸温度为 80 °C 时,激光温喷丸诱导的显微硬度与常温激光喷丸差异较小。当距离表层深度大于 300 μm 时,80 °C 激光温喷丸试样的显微硬度甚至略低于常温激光喷丸。激光冲击在试样表层诱导的位错密度较高,而较高的温度促进了位错攀移,进而有利于材料产生晶粒细化,因此材料表层的显微硬度随喷丸温度的升高而增加。但随着深度的增加,激光冲击诱导的位错密度降低,晶粒细化程度也随之降低,较高的温度通过动态回复使位错密度进一步下降,因此当深度大于 300 μm 时,80 °C 激光温喷丸试样的显微硬度略低于常温激光喷丸。120 °C 激光温喷丸试样表面以及深度方向的显微硬度较常温激光喷丸以及 80 °C 激光温喷丸均显著增加,其表面显微硬度比常温激光喷丸提高了近 16.5%,这与 120 °C 激光温喷丸诱导的动态析出有关^[12]。

3.2 残余应力场

材料表面的残余应力状态与材料的疲劳寿命有直接关系,通过改善表面残余应力状态可以有效抑制裂纹的萌生与扩展,进而大幅提高材料的使用寿命。图 4 为不同温度下激光喷丸强化后 2024-T351 航空铝合金沿深度方向的残余应力分布。结果表明,激光喷丸诱导的塑性应变会在材料表层产生高幅残余压应力,常温激光喷丸在材料表面诱导的残余压应力高达 -197 MPa,这有利于提高 2024-T351 航空铝合金的疲劳寿命^[13]。由图 4 还可以看出,激光喷丸诱导的残余压应力幅值(即残余压应力绝对值)随深度的增加而降低,这与文献^[14]的研究结果一致。与常温激光喷丸相比,80 °C 激光温喷丸试样在深度方向的残余压应力值有一定程度的下降,这与动态回复过程中的位错湮灭有关。当喷丸温度上升至 120 °C 时,2024-T351 铝合金表面以及内部的残余压应力幅值显著高于常温激光喷丸,其表面残余压应力提高了约 23.9%;同时残余压应力的影响深度也大幅增加。上述研究结果表明,温度对激光喷丸诱导的残余压应力幅值及其分布有显著影响。

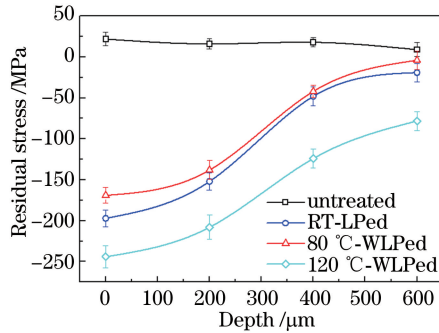


图 4 不同温度下激光喷丸强化 2024-T351 铝合金残余应力分布

Fig. 4 Residual stress distribution of 2024-T351 aluminum alloy treated by laser peening at different temperatures

3.3 微观组织及其强化机理

根据金属材料的热变形机制^[15],塑性变形初期的位错主要以弥散位错为主,且位错密度随塑性变形的增加而增大,如图 5(a)所示。当位错周围的塑性能超过位错攀移的能量阈值时,位错以攀移方式向低能量态转变,表现为弥散型位错逐渐趋于规则排列进而形成位错墙。为了降低塑性能,位错墙两端晶粒的相位差逐渐增大进而形成亚晶界,如图 5(b)所示。在塑性变形过程中,高温有利于位错攀移能量阈值的降低和亚晶界以及小角度晶界的形成。

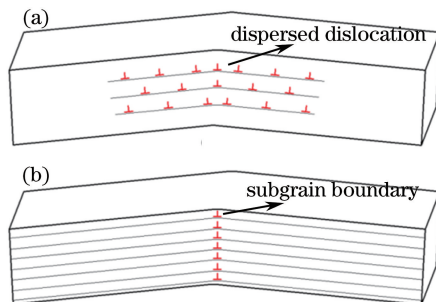


图 5 塑性变形诱导的 (a) 位错和 (b) 亚晶界^[15]

Fig. 5 (a) Dispersed dislocations and (b) subgrain boundaries induced by plastic strain^[15]

常温激光喷丸与 120 °C 激光温喷丸在 2024-T351 铝合金表面诱导的位错形态分别如图 6(a)、(b)所示,激光诱导的高幅冲击波压力使得材料表面以极高的应变率产生塑性变形。在常温下,塑性变形区域会产生大量图 6(a)所示的弥散位错以及位错胞。由图 5 所示的热变形机制,120 °C 激光温喷丸会促进位错攀移,表现为位错胞在热力耦合作用下被压缩而形成位错墙,如图 6(b)所示,当位错墙继续承受塑性变形时会产生动态再结晶而形成亚晶界甚至小角度晶界。

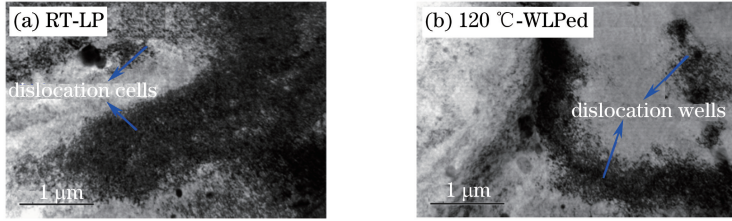


图 6 2024-T351 铝合金表面的位错形态。(a) RT-LP; (b) 120 °C-WLP

Fig. 6 Dislocation patterns on the surface of 2024-T351 aluminum alloy. (a) RT-LP; (b) 120 °C-WLP

未处理试样、常温激光喷丸以及 120 °C 激光温喷丸试样表面的晶粒分布状态如图 7 所示。使用 Image pro plus 图像分析软件对晶粒尺寸进行分析,可以得到未喷丸、常温激光喷丸以及 120 °C 激光温喷丸后 2024-T351 铝合金表面的平均晶粒直径分别为 85.6, 62.8, 43.2 μm。结果表明,激光喷丸后 2024-T351 铝合金的晶粒组织明显细化,常温激光喷丸试样的平均晶粒直径较未喷丸试样下降了 26.6%, 120 °C 激光温喷丸试样的平均晶粒直径较常温激光喷丸试样下降了 31.2%, 这说明温度促进了晶粒细化。根据 Hall-Petch 公式^[16]

$$H_v = H_{v0} + kd^{-1/2}, \quad (1)$$

式中 H_v 为材料硬度, H_{v0} 为与晶粒尺寸无关的材料硬度, k 为材料常数, d 为晶粒直径。从(1)式可以看出,材料的硬度 H_v 与晶粒直径 d 成反比。因为激光温喷丸可以有效促进晶粒细化,进而降低晶粒尺寸,因此可以获得更高的材料硬度,这与图 3 的结果一致。

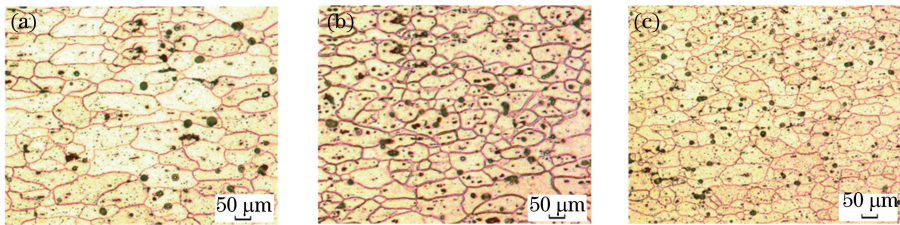


图 7 2024-T351 铝合金表面的晶粒分布状态。(a) Non-LP; (b) RT-LP; (c) 120 °C-WLP

Fig. 7 Grain distributions on the surface of 2024-T351 aluminum alloy. (a) Non-LP; (b) RT-LP; (c) 120 °C-WLP

由图 5 所示的热变形机制可知,动态再结晶过程需要较高的位错密度。激光喷丸在材料表面诱导的位错密度较大,且较高的温度有利于促进动态再结晶进而提高表面硬度,因此 80 °C 激光温喷丸试样表面硬度显著高于常温激光喷丸。随着材料深度的增加,激光喷丸诱导的位错密度逐渐降低,当位错周围的塑性能低于位错攀移的能量阈值时,材料不足以产生动态再结晶,且位错密度会因动态回复而降低,这会造成 80 °C 激光温喷丸试样的局部硬度与残余压应力降低。

120 °C 激光温喷丸试样的显微硬度值以及残余压应力值均明显大于常温激光喷丸,这种现象可归因于 120 °C 激光温喷丸诱导的动态析出。由于纳米析出物的出现,材料内部的位错密度显著增加,这会产生强烈的析出强化效应。析出物及其周围的位错形态如图 8(a)所示,析出物的 EDS 能谱如图 8(b)所示,其中 2θ 为衍射角。根据 EDS 能谱可以断定,120 °C 激光温喷丸过程中产生的析出物为纳米级 Al_2CuMg 析出相。尹美杰等^[17]研究发现, Al_2CuMg 析出相可以有效阻碍位错滑移进而形成位错塞积。由于 Al_2CuMg 析出相及其周围的位错,120 °C 激光温喷丸在促进动态再结晶的同时,晶粒内部的位错密度会有所增加,这是 120 °C 激光温喷丸试样显微硬度与残余压应力增加的主要原因。

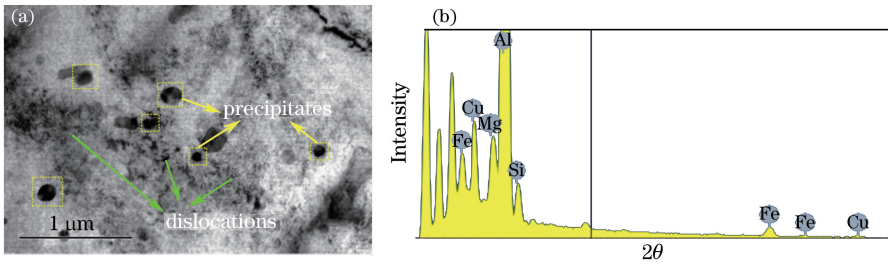


图 8 120 °C 激光温喷丸诱导的纳米析出物及位错。(a) TEM 图像;(b) EDS 能谱

Fig. 8 Nano-scaled precipitates and dislocations induced by 120 °C-WLP. (a) TEM image; (b) EDS image

4 结 论

以 2024-T351 航空铝合金为研究对象,通过实验研究了温度对激光喷丸试样显微硬度以及残余应力的影响规律。结合微观组织分析,获得了激光温喷丸 2024-T351 航空铝合金的强化机理。具体结论如下:1) 120 °C 激光温喷丸试样的显微硬度以及残余压应力值均显著高于常温激光喷丸以及 80 °C 激光温喷丸,这说明激光喷丸诱导的表面力学性能与基体温度有关。2) 激光喷丸 2024-T351 铝合金的显微硬度与材料的晶粒尺寸有关。120 °C 激光温喷丸通过动态再结晶显著降低了材料的晶粒尺寸,进而获得了更高的显微硬度。3) 激光喷丸诱导的残余压应力值与材料内的位错密度有关。当温度为 120 °C 时,热力耦合作用诱导的 Al₂CuMg 纳米析出相诱发了位错增殖,进而使材料内的位错密度大幅增加,这是残余压应力幅值增加的主要原因。

参 考 文 献

- 1 H-Gangaraj S M, Alvandi-Tabrizi Y, Farrahi G H, *et al.* Finite element analysis of shot-peening effect on fretting fatigue parameters[J]. Tribology International, 2011, 44(11): 1583-1588.
- 2 Shi M Q, Takayama Y, Ma C A, *et al.* Microstructure and texture evolution in titanium subjected to friction roll surface processing and subsequent annealing[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(11): 2616-2627.
- 3 Zhou Jianzhong, Zuo Lidang, Huang Shu, *et al.* Analysis on mechanical property of 6061-T6 aluminum alloy by laser shot peening based on strain rate[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0503003.
周建忠, 左立党, 黄舒, 等. 基于应变速率的激光喷丸强化 6061-T6 铝合金力学性能分析[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0503003.
- 4 Huang S, Zhou J Z, Sheng J, *et al.* Effects of laser peening with different coverage areas on fatigue crack growth properties of 6061-T6 aluminum alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 47: 292-299.
- 5 Juijerm P, Altenberger I, Scholtes B. Fatigue and residual stress relaxation of deep rolled differently aged aluminum alloy AA6110[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 426(1): 4-10.
- 6 Wick A, Schulze V, Vöhringer O. Effects of warm peening on fatigue life and relaxation behavior of residual stresses in AISI 4140 steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 293(1): 191-197.
- 7 Harada Y, Mori K. Effect of processing temperature on warm shot peening of spring steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162: 498-503.
- 8 Ye C, 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.
- 9 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.
- 10 Zhou J Z, Meng X K, Huang S, *et al.* Effects of warm laser peening at elevated temperature on the low-cycle Cross Mark fatigue behavior of Ti6Al4V alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 643: 86-95.
- 11 Montross C S, Brandt M, Swain M V. Self-limiting hardness changes in laser peened 6061-T6 aluminium[J]. Surface Engineering, 2001, 17(6): 477-482.
- 12 Liao Y L, Ye C, Kim B J, *et al.* Nucleation of highly dense nanoscale precipitates based on warm laser shock peening[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(6): 063518.
- 13 Dorman M, Toparli M B, Smyth N, *et al.* Effect of laser shock peening on residual stress and fatigue life of clad 2024

- aluminium sheet containing scribe defects[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 548: 142-151.
- 14 Yu Tianyu, Dai Fengze, Zhang Yongkang, *et al.* Simulation and experimental study on residual stress field of 2024 aluminum alloy induced by flat-top laser beam[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1003001.
余天宇, 戴峰泽, 张永康, 等. 平顶光束激光冲击 2024 铝合金诱导残余应力场的模拟与实验[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1003001.
- 15 Hull D, Bacon D J. Introduction to dislocations[M]. Ding Shushen, Li Qi, Transl. Beijing: Science Press, 1990: 199-204.
赫 尔, 培 根. 位错导论[M]. 丁树深, 李 齐, 译. 北京: 科学出版社, 1990: 199-204.
- 16 Zhou Jianzhong, Han Yuhang, Huang Shu, *et al.* Effect of different process temperatures on residual stress and nano-hardness of warm laser peened IN1718 superalloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0703001.
周建忠, 韩煜航, 黄 舒, 等. 不同工艺温度对 IN718 合金激光温喷丸后残余应力和纳米硬度的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0703001.
- 17 Yin Meijie, Chen Jianghua, Liu Chunhui. Effect of interrupted ageing on mechanical property and microstructure of AA2024 alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(12): 3271-3281.
尹美杰, 陈江华, 刘春辉. 中断时效处理对 AA2024 铝合金力学性能和显微结构的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(12): 3271-3281.