

# 激光温喷丸强化 Inconel718 镍基合金热腐蚀性能研究

郑 刚 孟宪凯\* 陈松玲 穆 丹 杨祥伟 盛 杰 周建忠

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 利用 SpitLight2000 型纳秒激光器对 Inconel718 镍基合金进行激光温喷丸(WLSP)强化实验,将 WLSP 强化试样置于 700 °C 混合熔盐(75%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+25%NaCl, 百分数指质量分数)中进行热腐蚀实验,对腐蚀前后的 WLSP 强化试样进行质量损失检测、X 射线衍射(XRD)分析以及腐蚀形貌观察,探索了 WLSP 改善 Inconel718 镍基合金耐热腐蚀性的机理。结果表明,腐蚀 10 h 与 25 h 后 260 °C-WLSP 试样的质量损失分别为未处理试样的 18.9% 与 17.9%。WLSP 热腐蚀 10 h 后试样表面的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧化膜未出现明显剥落,且没有 CrS、NiO 产物生成,说明 WLSP 处理后的试样表面没有受到 S 的侵蚀,故能有效抑制材料热腐蚀行为的发生,分析认为 WLSP 试样表面微观组织的晶粒细化及 γ' 相析出物能有效减缓 O、S 的侵入,进而有效提高 Inconel718 镍基合金的耐热腐蚀性能。

**关键词** 激光技术; 激光温喷丸; Inconel718 镍基合金; 热腐蚀; γ' 相析出

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0403005

## Research on Hot-Corrosion of Inconel718 Nickel-Based Alloy Treated by Warm Laser Shock Peening

Zheng Gang Meng Xiankai Chen Songling Mu Dan Yang Xiangwei  
Sheng Jie Zhou Jianzhong

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

**Abstract** A SpitLight2000 nanosecond laser is used to conduct warm laser shock peening (WLSP) experiment on Inconel718 nickel-based alloys. Thermal corrosion test is conducted on the WLSP-samples and untreated samples in mixed molten salt (75%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+25% NaCl, percentage mentioned above denotes mass fraction) at 700 °C. Then the mechanism of WLSP to improve the corrosion resistance of Inconel718 nickel-based alloys is researched by quality detection, X-ray diffraction (XRD) diffraction analysis and corrosion morphology observation. The results show that quality losses in 260 °C-WLSP-samples after 10 h and 25 h are 18.9% and 17.9% of that in untreated samples. In addition, after thermal corrosion for 10 h, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxidation doesn't peel obviously on the corrosion surface of WLSP-samples and thus CrS or NiO is not formed. It is indicated that WLSP-samples can prevent implantation of S and thus effectively suppresses thermal corrosion of materials. The reason is that WLSP can lead to grain refinement and γ' -phase precipitates, which effectively prevents invasion of O and S, and thus improves thermal corrosion resistance of Inconel718 nickel-based alloys.

**Key words** laser technology; warm laser shock peening; Inconel718 nickel-based alloys; hot-corrosion; γ' -phase precipitates

**OCIS codes** 160.3900; 120.6810; 140.3540; 220.4610

收稿日期: 2015-08-26; 收到修改稿日期: 2015-11-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(51175236, 51405204)、国家科技型中小企业技术创新基金(13C26213202029)、江苏省科技支撑项目(工业)(BE2013097)、江苏省自然科学基金(BK20141166)、中国博士后科学基金(2014T70477, 2013M540417)、高等学校博士学科点专项科研基金(20123227110022)、江苏大学高级人才启动基金(13JDG109)、江苏省研究生创新计划(KYLX15\_1056)、镇江市工业支撑项目(GY2013017)

**作者简介:** 郑 刚(1974—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事先进制造技术及其装备方面的研究。E-mail: stoneujs@163.com

\***通信联系人。** E-mail: mengdetiankong10@126.com

## 1 引言

镍基高温合金,例如 Inconel718,在高温条件下有良好的抗蠕变、抗疲劳、耐磨、耐蚀等性能,被广泛用于制造航空发动机和工业燃气轮机的关键热端部件,如涡轮叶片、整体叶盘和转轴等,其服役温度通常在 650~1100 °C<sup>[1-2]</sup>。为了保证工作的可靠性,必须考虑关键热端零部件材料的组织和性能在高温条件下的稳定性,特别是工业燃气轮机使用含 S 和 V 较高的燃料,燃油产生的 SO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>S 和 SO<sub>2</sub> 等强腐蚀性物质与空气中的氧和海洋大气中的 NaCl 作用易生成硫酸盐,从而对相应热部件产生剧烈的腐蚀。在高温条件下涂覆在合金表面的硫酸盐呈熔融状态,会加快合金的腐蚀速度。因此,研究硫酸盐对镍基合金的腐蚀机理,探索提高镍基合金抗热腐蚀性能的工艺方法,具有重要的科学意义和工程应用价值<sup>[3-5]</sup>。

研究表明,热力交变载荷作用下结构材料的失效行为大多是从表面开始,如疲劳失效、高温氧化、高温腐蚀等<sup>[6]</sup>,表面涂层和形变强化技术是提高材料表面性能的有效方法。其中,激光温喷丸技术(WLSP)作为一种新型的材料表面改性技术,结合了激光喷丸、动态应变时效及动态析出的综合作用,能在材料表层诱发位错增殖、晶粒细化以及纳米级颗粒析出,因而有效提高了结构材料性能在高温条件下的稳定性,延缓了残余压应力的高温释放速率,从而大幅改善结构零件的高温疲劳寿命<sup>[7-9]</sup>。目前,针对 WLSP 技术的研究主要集中在微观组织演变及其对疲劳性能和其表面耐磨性能的影响等方面,而结合 WLSP 强化技术研究镍基合金耐蚀性能方面的研究还鲜有报道。

本文以 Inconel718 镍基合金为研究对象,开展激光温喷丸实验及其相关测试,研究激光温喷丸工艺改善镍基合金的耐热腐蚀性能,从腐蚀重量、腐蚀产物以及腐蚀形貌等多个角度分析激光温喷丸的耐热腐蚀行为,探索激光温喷丸强化 Inconel718 镍基合金的耐热腐蚀机理。

## 2 实验方法

### 2.1 试样准备

实验材料选用 Inconel718 镍基高温合金板材,其在低温及中温下具有较好的综合机械性能,主要用于制造 650 °C 以下的涡轮盘、转子轴及叶片等,其化学成分如表 1 所示。实验试样经线切割加工而成,尺寸为 50 mm×15 mm×4 mm。所有试样待激光喷丸处理的表面均经过 240 # ~1000 # 的水砂纸打磨,采用颗粒直径为 0.5 μm 的抛光粉和抛光剂在金相试样磨抛机中进行抛光处理,抛光 2 h 至表面粗糙度为 0.05 μm。

表 1 Inconel718 镍基合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Inconel718 nickel-based alloys

Element	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Al
Mass fraction /%	0.058	0.149	0.165	0.001	0.011	52.50	19.25	0.44
Element	Cu	Ti	Mo	Fe	Nb+Ta	Co	B	
Mass fraction /%	0.044	1.10	2.98	bal	4.93	0.135	0.003	

### 2.2 WLSP 实验方法

激光温喷丸的技术原理图如图 1(a)所示。与室温激光喷丸相比,激光温喷丸工艺对基体材料进行加热,热力耦合作用诱导的动态应变时效及动态析出能有效改善金属或合金材料的微观组织,例如高位错密度及位错缠结、析出强化相等,进而获得更为优良的机械力学性能<sup>[7]</sup>。激光喷丸实验采用德国 InnoLas 公司生产的 SpitLight2000 型脉冲 Nd:YAG 固体激光器,激光能量选择 1.8 J,光斑直径取 2 mm,搭接率为 50%。采用黑胶带作为能量吸收层,硅油作为约束层,对试样中心 10 mm×8 mm 的矩形区域进行激光温喷丸处理,激光喷丸路径(LP)如图 1(b)所示。激光喷丸温度选择 20 °C 与 260 °C(260 °C 为 Inconel718 镍基高温合金的动态应变时效温度)。260 °C-WLSP 后的试样如图 1(c)所示,可以看到 WLSP 后黑胶带没有破损,烧蚀部分激光搭接明显。去除黑胶带后,试样表面由于强烈的塑性变形产生了微凹坑,如图 1(d)所示。

### 2.3 热腐蚀实验方法

为了增加腐蚀前后的质量变化,采用线切割取喷丸区域 10 mm×8 mm 作为腐蚀试样,先用酒精将试样清洗干净,然后在丙酮中进行超声波清洗去油污,吹干后放进干燥器内,静置 1 h 后称量各试样的原始质量。

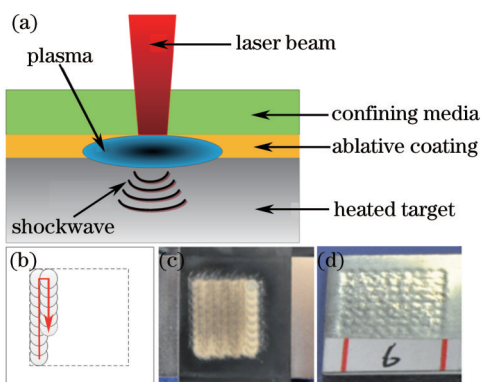


图1 激光温喷丸原理及试样。(a) 技术原理; (b) 激光喷丸路径; (c) 黑胶带未去前试样表面形貌; (d) 黑胶带去除后试样表面形貌

Fig.1 Schematic diagram and morphology of WLSP-samples. (a) Schematic diagram; (b) LP path; (c) surface topography of WLSP-samples with black tape; (d) surface topography of WLSP-samples without black tape

热腐蚀实验盐类选择  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ (质量分数为 75%)和  $\text{NaCl}$ (质量分数为 25%)的混合熔盐(熔点为  $620\text{ }^\circ\text{C}$ ), 腐蚀温度设定为  $700\text{ }^\circ\text{C}$ 。将试样分别放入坩埚中心位置, 并将盐加入坩埚, 淹没试样, 将装有试样的坩埚置于箱式电阻炉中灼烧, 总腐蚀时间为 30 h。每腐蚀 5 h 取出坩埚, 在空气中冷却至室温, 用蒸馏水煮沸 0.5 h, 将试样表面的混合硫酸盐清除, 烘干后称量各试样腐蚀后的质量。对热腐蚀 10 h 后试样表面的成分作 X 射线衍射(XRD)分析, 并用扫描式电子显微镜(SEM)对其表面形貌进行表征。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 腐蚀质量

未处理试样及  $260\text{ }^\circ\text{C}$ -WLSP 试样不同腐蚀时间后的质量损失如表 2 所示。热腐蚀 5 h 后,  $260\text{ }^\circ\text{C}$ -WLSP 和未处理试样的单位面积质量损失远低于  $1\text{ mg}/\text{cm}^2$ , 这主要是材料表面在腐蚀初期生成了  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  氧化膜。腐蚀 10 h 与 25 h 后,  $260\text{ }^\circ\text{C}$ -WLSP 试样单位面积的质量损失分别为未处理试样的 18.9% 与 17.9%, 说明未处理试样表面有腐蚀剥落行为, 而 WLSP 试样未出现明显剥落。30 h 后,  $260\text{ }^\circ\text{C}$ -WLSP 试样单位面积的质量损失为未处理试样的 30.5%, 说明 WLSP 和未处理试样表层消耗了大量 Cr 元素,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  氧化膜受到破坏, 因此均出现腐蚀剥落现象, 但未处理试样剥落现象更加突出。

表 2 不同腐蚀时间后试样单位面积的质量损失

Table 2 Mass losses of samples after different corrosion time

Sample	Mass loss of sample, $M$					
	5 h	10 h	15 h	20 h	25 h	30 h
Untreated	-0.19103	6.64044	10.73033	18.39887	28.07303	51.11798
WLSP	-0.19575	1.25280	2.35393	3.92452	5.02809	15.60377
$\frac{M_{\text{WLSP}}}{M_{\text{Untreated}}} \times 100\%$	102	18.9	21.9	21.3	17.9	30.5

#### 3.2 腐蚀表面形貌与成分分析

热腐蚀后未处理试样以及  $260\text{ }^\circ\text{C}$ -WLSP 处理试样表面的 XRD 谱如图 2 所示。未处理试样热腐蚀 10 h 后的表面产物主要为  $\gamma\text{-Ni}$ 、 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{NiO}$  和  $\text{CrS}$ , 且由于 S、O 的侵入, 未处理试样中  $\text{NiO}$  和  $\text{CrS}$  的衍射峰强度较高。 $260\text{ }^\circ\text{C}$ -WLSP 试样热腐蚀 10 h 后的表面产物和未处理试样基本一致, 但是表面产物中的  $\text{NiO}$  和  $\text{CrS}$  的衍射峰强度明显低于未处理试样, 且  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的衍射峰强度高于未处理试样, 这说明 WLSP 腐蚀表面的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  氧化膜未出现明显剥落, 阻碍了 S、O 的侵入, 因此没有  $\text{CrS}$  生成,  $\text{NiO}$  的含量也显著低于未喷丸试样。上述结果表明, WLSP 工艺能有效抑制材料热腐蚀行为的发生。

未处理试样与  $260\text{ }^\circ\text{C}$ -WLSP 试样热腐蚀 10 h 后的表面形貌分别如图 3 和图 4 所示。由图可知, 未处理试样表层粗糙疏松, 局部发生剥落, 并且发现因 S 元素沿晶界侵入而产生许多白色沉淀物<sup>[4-5]</sup>(图中黄色标记区域), 这主要是氧化膜被破坏而剥落所形成的, 与 XRD 结果一致。 $260\text{ }^\circ\text{C}$ -WLSP 试样腐蚀后的表面是致密

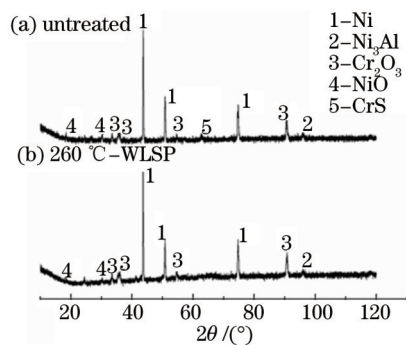


图2 腐蚀 10 h 后的 260 °C-WLSP 和未处理试样 XRD 谱

Fig.2 XRD spectra of 260 °C-WLSP-and untreated samples after 10 h corrosion

平坦的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  氧化层,由大量多边形颗粒组成。致密的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  氧化膜能有效地阻止 O、S 的浸入,进而提高了材料的表面抗热腐蚀性能。

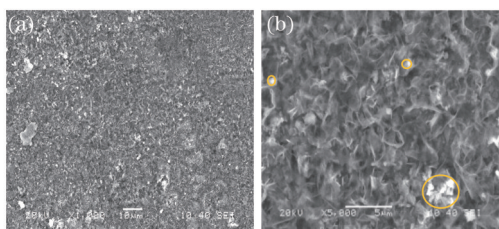


图3 未处理试样热腐蚀 10 h 后的表面形貌  
Fig.3 Surface morphology of untreated samples after 10 h hot corrosion

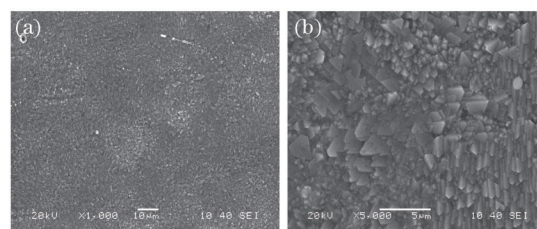


图4 260 °C-WLSP 试样热腐蚀 10 h 后表面形貌  
Fig.4 Surface morphology of 260 °C-WLSP-samples after 10 h hot corrosion

### 3.3 WLSP 提高材料抗热腐蚀的机理

Inconel718 镍基合金在热腐蚀期间,合金表面氧化和热腐蚀是同时发生的。Al 元素跟氧的亲合力较强,易于被氧化,但是 Inconel718 合金中 Al 的质量分数只有 0.44%,且难溶元素 Mo、Ta 降低了 Al 元素在合金中的迁移速度。另外,Inconel718 合金中 Cr 的质量分数高达 19.25%,根据元素选择性氧化规律,热腐蚀初期表面生成了以  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  为主的氧化膜。热腐蚀过程可以认为  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  氧化膜在硫酸盐热腐蚀中发生了碱性溶解:



故在 XRD 成分分析中,未处理试样腐蚀后的产物中有 NiO 和 CrS,导致氧化膜疏松不再具有保护性,疏松的氧化膜为 O、S 的浸入提供了通道,进而出现腐蚀剥落现象,腐蚀前后质量损失严重,且生成大量 CrS。

图 5 为未处理试样与 260 °C-WLSP 试样的显微组织,可以看出未处理试样的平均晶粒尺寸在 75  $\mu\text{m}$  左右,而 260 °C-WLSP 处理后试样表面的平均晶粒尺寸约为 30  $\mu\text{m}$ ,说明晶粒在激光喷丸诱导的塑性变形作用下明显细化。同时 260 °C-WLSP 诱导的高密度位错以及 Nb 的非平衡偏聚,导致了 WLSP 喷丸区  $\gamma''$  相的高密度析出<sup>[10]</sup>。

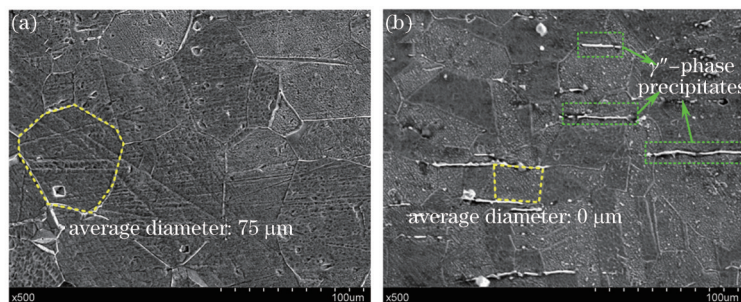


图5 试样的显微组织。(a) 未处理;(b) 260 °C-WLSP

Fig.5 Microstructure of the samples. (a) Untreated; (b) 260 °C-WLSP

图6为Inconel718镍基合金的腐蚀机理。Inconel718镍基合金的腐蚀过程主要依赖于O、S的侵入,因此其腐蚀速度主要是由O、S元素侵入的难易程度所决定的。未处理试样由于晶粒尺寸较大,使得O、S的侵入通道较为平直,通道长度较短,很容易从表面向深度方向渗透,如图6(a)所示,因此表面腐蚀速度较快。与未处理试样相比,260℃-WLSP试样的晶粒尺寸明显减小,晶界错综复杂,这使得O、S的侵入通道较为曲折,通道长度显著增加,如图6(b)所示。且在260℃-WLSP试样的晶界处散布着许多 $\gamma''$ 析出相,由于析出相较基体材料更为致密,有效阻滞了O、S的侵入通道,因此不利于O、S的侵入,如图6(b)中的A区域所示。综上所述,260℃-WLSP诱导的微观组织有效阻滞了O、S的侵入通道,降低了Inconel718镍基合金的腐蚀速度,抑制了 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 氧化膜的碱性溶解,因此有利于提高Inconel718镍基合金的抗热腐蚀性能。

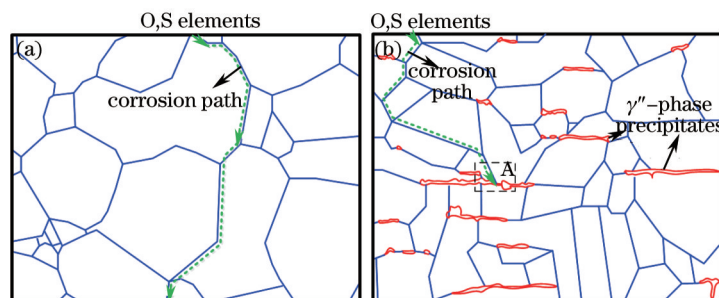


图6 Inconel718镍基合金的腐蚀机理。(a)未处理;(b)260℃-WLSP

Fig.6 Corrosion mechanism of Inconel718 nickel-based alloys. (a) Untreated; (b) 260 °C-WLSP

## 4 结 论

对Inconel718镍基合金材料进行了激光温喷丸强化实验,对比研究了260℃-WLSP试样和未处理试样在700℃硫酸钠盐中的热腐蚀行为,分析了激光温喷丸改善Inconel718镍基合金热腐蚀的机理,得到的主要结果如下:

1) 热腐蚀10 h与25 h后,260℃-WLSP试样的质量损失分别为未处理试样的18.9%与17.9%,表明260℃-WLSP显著提高了Inconel718镍基合金的耐热腐蚀性能。

2) 热腐蚀10 h后,260℃-WLSP产物中的NiO和CrS的衍射峰强度明显低于未处理试样,且 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 的衍射峰强度高于未处理试样,说明260℃-WLSP试样表面的 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 氧化膜未明显剥落,进而有效阻止了CrS与NiO生成。

3) 260℃-WLSP通过高应变率塑性变形使材料表面晶粒明显细化,平均晶粒尺寸比未处理试样降低了60%,错综复杂的晶界显著增加了热腐蚀过程中O、S元素侵入通道的长度。同时晶界处的 $\gamma''$ 相析出物阻止了O、S元素的侵入,抑制了 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 氧化膜的碱性溶解,有效提高了Inconel718镍基合金的抗热腐蚀性能。

## 参 考 文 献

- 1 Shi Changxu, Zhong Zengyong. China superalloy fifty years[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.  
师昌绪, 仲增埔. 中国高温合金五十年[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- 2 Guo Jianting. The current situation of application and development of superalloy in the field of energy industry[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(5): 513-527.  
郭建亭. 高温合金在能源工业领域中的应用现状与发展[J]. 金属学报, 2010, 46(5): 513-527.
- 3 Fu Hengzhi. Challenge and development trends to future aero-engine materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 1998, 18(4): 52-61.  
傅恒志. 未来航空发动机材料面临的挑战与发展趋向[J]. 航空材料学报, 1998, 18(4): 52-61.
- 4 Long Xiaoping. Mechanism of hot corrosion in high temperature parts of aeroengine[J]. Total Corrosion Control, 2003, 17(2): 9-13.  
隆小庆. 航空发动机高温部件热腐蚀机理的探讨[J]. 全面腐蚀控制, 2003, 17(2): 9-13.
- 5 Li Meishuan. High temperature corrosion of metals[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.  
李美栓. 金属的高温腐蚀[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- 6 Luo Sihai, He Weifeng, Zhou Liucheng, et al.. Effects of laser shock processing on high temperature fatigue properties and fracture

- morphologies of K403 nickel-based alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0903001.
- 7 罗思海, 何卫峰, 周留成, 等. 激光冲击对 K403 镍基合金高温疲劳性能和断口形貌的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903001.
- 8 C Ye, J C Gary. 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 Meng Xiankai, Zhou Jianzhong, Huang Shu, *et al.*. Molecular dynamics simulation of dislocation development in monocrystalline copper induced by warm laser peening[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0702003.
- 10 孟宪凯, 周建忠, 黄舒, 等. 激光温喷丸诱发单晶铜位错扩展的分子动力学模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0702003.
- 11 Zhou Jianzhong, Han Yuhang, Huang Shu, *et al.*. Effect of different process temperature on residual stress and nano-hardness of warm laser peened IN718 superalloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0703001.
- 12 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.
- 13 Cai Dayong, Nie Pulin, Shan Jiaping. Precipitation of phase and residual stress relaxation in shot peened Inconel718[J]. Nonferrous Metals, 2003, 55(3): 19-22.
- 14 蔡大勇, 聂璞林, 单佳萍. Inconel 718 合金喷丸层  $\gamma'$  相的析出及应力松弛[J]. 有色金属, 2003, 55(3): 19-22.
- 15 Lou Xueming, Sun Wenru, Guo Shouren. Hot corrosion behavior of In718 alloy and its effects on mechanical properties[J]. Metal Materials and Engineering, 2008, 37(2): 259-263.
- 16 娄学明, 孙文儒, 郭守仁. IN718 高温合金热腐蚀行为及其对力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(2): 259-263.

栏目编辑: 宋梅梅