

# 激光冲击对中高温服役条件下镍基合金 K417 显微硬度的影响

任旭东 皇甫喆卓\* 阮亮 杨慧敏 占秋波

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 为研究中高温环境下的激光冲击强化效果,采用功率密度  $8.5 \text{ GW/cm}^2$ 、脉冲宽度  $10 \text{ ns}$  的强激光对 K417 镍基合金冲击改性,利用维氏硬度法测试其在  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $900 \text{ }^\circ\text{C}$  保温后的显微硬度值。结果表明中高温保温后,激光冲击硬化效果有所减弱,但不同温度下激光冲击区域的平均硬度均明显大于未冲击区域;深度方向硬度近似呈指数形式衰减,硬化层深度随温度的增加呈减小趋势;单个光斑径向硬度分布与激光空间分布特性导致的等离子体冲击波不均匀相关。研究表明在  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  以下,激光冲击有效提高了 K417 的综合性能指标。

**关键词** 激光技术;激光冲击;镍基高温合金 K417;中高温;显微硬度

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0703005

## Effects of Laser Shock Processing on Micro-Hardness of Ni-Based Superalloy K417 at Elevated Temperature

Ren Xudong Huangfu Yongzhuo Ruan Liang Yang Huimin Zhan Qiubo

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** In order to study the effect of laser shock processing (LSP) in high temperature environment, the K417 superalloy is treated by LSP with laser power density of  $8.5 \text{ GW/cm}^2$  and pulse width of  $10 \text{ ns}$ , and then the Vikers hardness of K417 is tested after heat treatment at  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectively. The results show that the hardening effect is weakened at elevated temperature, but the average hardness of LSP region is obviously higher than that of non-LSP region. With the temperature increasing, the thickness of the LSP hardened layer shows a decreasing trend and the hardness in the depth direction is fitted with exponential function approximately. The hardness distribution on a single laser spot is related to the laser shock wave's inequality which is induced by the laser spatial distribution. The research indicates that LSP can raise the K417 superalloy's comprehensive properties under  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Key words** laser technique; laser shock processing; Ni-based K417 superalloy; elevated temperature; micro-hardness

**OCIS codes** 140.3380; 140.3390; 140.3540

## 1 引 言

高温合金是制造现代航空航天发动机和各种工业燃气涡轮发动机的重要金属合金材料,在先进的航空发动机中,高温合金用量占材料总用量的  $40\% \sim 60\%$ <sup>[1]</sup>。K417 属于等轴晶铸造高温合金系列,工作温度  $700 \text{ }^\circ\text{C} \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,是一种低密度、高强

度的高温合金,主要用于航空发动机 WP13 的 I 级导向叶片和 WZ8、WJ9 的 II 级涡轮叶片等。

激光冲击处理(LSP)技术已被广泛认为是提高常温服役条件下构件抗疲劳、耐腐蚀、耐磨损性能的优秀方法<sup>[2~4]</sup>,但是已有报道对于激光冲击后材料高温服役下的力学性能的研究较少<sup>[5]</sup>。激光诱导的

**收稿日期**: 2012-02-04; **收到修改稿日期**: 2012-03-13

**基金项目**: 国家自然科学基金(50905080)、中国博士后基金(20100471385)和博士后特别资助基金(201104547)资助课题。

**作者简介**: 任旭东(1977—),男,博士,副教授,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: renxd@ujs.edu.cn

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

吉帕量级冲击波作用于工件形成的高幅值残余压应力,已有学者做了大量的理论、实验和有限元模拟研究<sup>[6~8]</sup>,高温下残余应力的释放也有学者给出了结论和预测模型<sup>[9]</sup>,但是针对激光冲击后不同中高温环境下显微硬度的变化规律,国内做专门研究的比较少<sup>[10]</sup>。硬度是材料在一个小体积范围内性能的综合物理量,对激光冲击后硬度进行系统的研究可以完善激光冲击强化效果的表征。本文对激光冲击后的材料进行加热保温处理,检测激光冲击单个光斑的显微硬度分布、激光连续搭接冲击区域的表面平均显微硬度随温度变化的规律和不同温度时深度方向显微硬度及硬化层深度变化情况,试图系统地

分析中高温环境下激光冲击对镍基合金显微硬度的影响。

## 2 实验过程

### 2.1 实验材料

实验材料选用铸造高温镍基合金 K417,该材料适宜制作高温转动件,主要用于航空发动机涡轮叶片、涡轮增压器转子叶轮、起动机整体涡轮和燃气涡轮等,其主要化学成分见表 1。用线切割法把棒状材料加工成块状试样,长宽为 24 mm×20 mm,厚度为 7 mm,取 4 块分别标号 1#、2#、3#、4#。

表 1 K417 镍基高温合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of K417 superalloy

Composition	Co	Cr	C	Mo	Al	Ti	Fe	V	Mn	Ni
Mass fraction / %	14.0~16.0	8.5~9.5	0.13~0.22	2.5~3.5	4.8~5.7	4.5~5.0	≤1.0	0.6~0.9	≤0.5	Other

### 2.2 激光冲击试验

激光冲击处理是利用高功率密度、短脉冲强激光冲击材料表面,金属材料表面的能量吸收涂层吸收激光能量而气化、电离,形成等离子体,等离子体受后续激光辐照,迅速积累能量,引发膨胀爆炸,激光维持的等离子体爆轰波向材料内部传播,形成冲击波。当冲击波的峰值压力超过材料的动态屈服强度时,材料表层发生了超高应变率的塑性变形,表层材料晶粒细化,位错密度显著增加,在表层产生了高幅值残余压应力,形成强化区,从而提高材料的抗疲劳性能、耐磨性、抗断裂性等机械性能<sup>[11]</sup>。其基本原理如图 1 所示。

17 GW/cm<sup>2</sup>。采用的激光冲击处理工艺参数为:脉冲宽度 10 ns,激光能量 6 J 和 8 J,选用厚度约为 2 mm 的流水层作为约束层,用 3M 公司 1600 型电工绝缘黑胶带作为能量吸收层,单面连续搭接冲击,激光光斑直径为 3 mm,搭接率为 50%。图 2 为试样的激光冲击区域及其激光扫描路径,冲击后的试样见图 3。

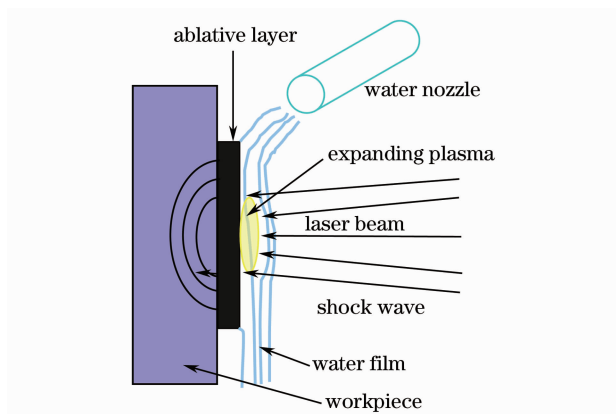


图 1 激光冲击强化原理图

Fig.1 Schematic of laser shock peening

本实验使用的脉冲激光器是法国研制的激光器 Nd:YAG-GAIA R,该激光器稳定性好,激光波长为 1064 nm,光斑直径 3~10 mm,最大功率密度达

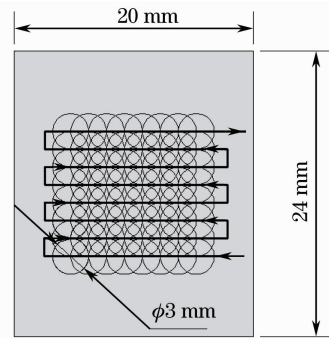


图 2 试样表面激光冲击区域搭接情况及其激光扫描路径图

Fig.2 Schematic of overlapping on the laser shock region and laser sweeping path

### 2.3 加热、保温处理

加热炉型号为 SX2-15-13,功率为 15 kW(±10%),额定温度为 1300 ℃。1#、2#、3# 试样分别加热到 700 ℃,800 ℃,900 ℃,保温 2 h,4# 试样不进行加热保温处理。

### 2.4 显微硬度测试方法

采用 HXD-1000TMSC/LCD 型显微维氏硬度计测其硬度,显微维氏硬度的测量原理是以规定的

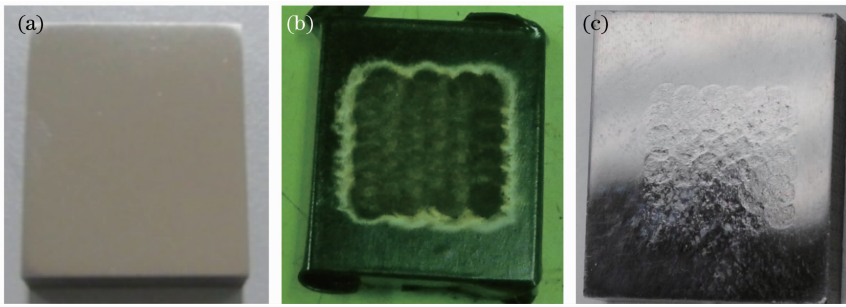


图3 K417块状试样激光冲击前后形貌。(a)激光冲击前抛光形貌;(b)能量吸收层烧蚀情况;(c)试样冲击后表面形貌图

Fig. 3 Morphology of K417 specimen surface. (a) Before LSP; (b) energy absorbing layer after LSP; (c) after LSP

试验力,将两相对面夹角为 $136^\circ$ 的正四棱锥体金刚石压头压入试样表面(如图4所示),保持规定时间后卸除试验力,测量压痕两对角线长度,通过计算或查表得到硬度值。显微维氏硬度值表达式为

$$H_V = \frac{2P}{d^2} \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (1)$$

式中 $P$ 为试验载荷, $d$ 为压痕两对角线长度 $d_1$ 和 $d_2$ 的算术平均值, $\alpha$ 为正方形四棱角锥体压头两相对面夹角(规定为 $136^\circ$ )。

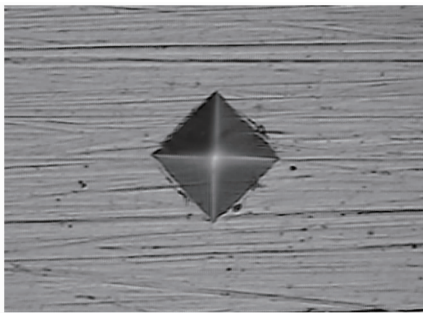


图4 试样表面压痕形态

Fig. 4 Topography of the indentation on the surface

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 显微硬度分布

测试4#样一个光斑直径上的硬度分布,每隔0.1 mm测一个点,测试结果如图5所示。

由图5可知合金经激光冲击后,硬度效应在靠近光斑中心处最高,同一光斑直径上随着距光斑中心距离的增大呈下降趋势,光斑边缘硬度值与基体相当,这是由于激光能量分布不均匀等因素造成的。激光具有光束空间分布特性,功率密度在空间一般呈高斯分布,

$$I(r) = I \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{R}\right), \quad (2)$$

Zhang等<sup>[12]</sup>认为产生的等离子体冲击波也具有这种特性,并给出了激光冲击波在光斑上的空间分布式:

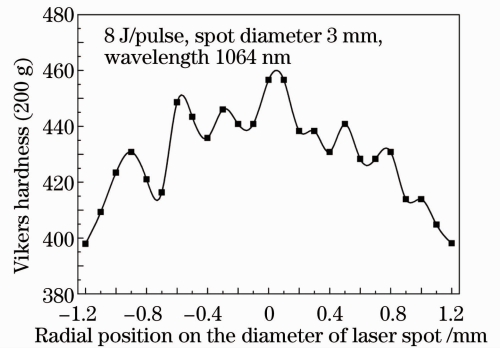


图5 激光光斑径向的硬度分布

Fig. 5 Hardness distribution on the radial direction of laser spot

$$P(r, t) = P(t) \exp\left(-\frac{r^2}{2R^2}\right), \quad (3)$$

式中 $R$ 为激光光斑半径值, $r$ 为距光斑中心的距离。激光功率密度和冲击波压力空间分布如图6所示。

光斑直径上的硬度分布并没有与冲击波一样呈现高斯分布,因为影响显微硬度的因素比较复杂,除了激光功率密度的分布特性引起的残余应力变化,还有材料表面的粗糙度及材料中存在的微观缺陷导致的原始硬度分布不均等。发现合金表面形成的微凹坑比铝箔上烧蚀半径小几百微米,说明激光在光斑周围冲击波压力比较小,塑性变形的程度不大或者不发生塑性变形。激光冲击整体硬化效果很不均匀,有必要对光斑边缘部位进行连续搭接工艺,这样不仅能够补充光斑外围冲击效果的不足,还能进行大面积工件的处理。

#### 3.2 不同温度处理后合金表面显微硬度

对激光冲击及不同温度下处理的试样表层进行显微维氏硬度测试,表征激光冲击的强化效果,分别将LSP+25℃、LSP+700℃、LSP+800℃、LSP+900℃试样受压面抛光后,在HXD-1000TMSC/LCD型维氏硬度计上进行压痕试验,载荷为200 g,保压时间为10 s,每种测试取5个点以上,最后的硬度取所有硬度值的算术平均值。

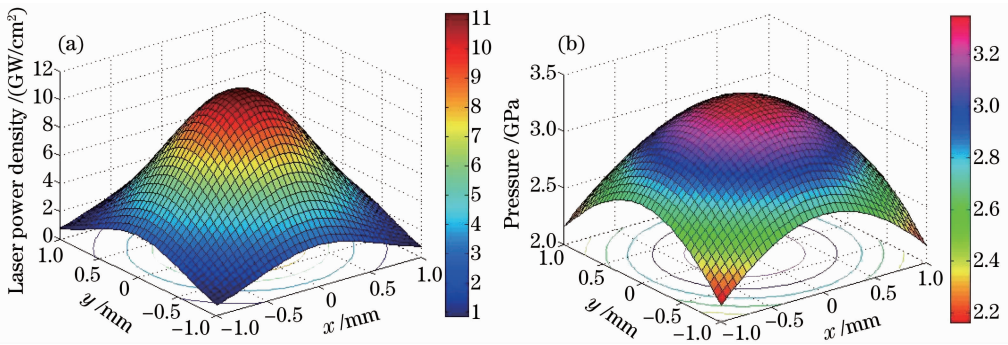


图 6 激光功率密度和冲击波峰压在光斑上的分布。(a)功率密度;(b)冲击波峰压

Fig. 6 Distributions of laser power density and laser shock pressure on the spot. (a) Laser power density; (b) laser shock pressure

如图 7、8 所示,在室温和 700 °C、800 °C、900 °C 保温情况下,激光冲击区域的平均硬度比基体的硬度均明显增加,机理是激光冲击诱导的强大冲击波使得合金表面产生微凹坑,发生高应变速率的塑性变形,表层晶粒尺寸变小,形成高密度的位错结构。室温下激光冲击处理硬化效果最显著,冲击后显微硬度提高了 37.9%;在中高温情况下,合金的硬度提高效果有所降低,与冲击前相比分别于 700 °C 时提高 7.6%、800 °C 时提高 5.6% 和 900 °C 时提高 8.8%,但激光冲击区域的平均硬度均明显大于未冲击区域,抗高温软化性能较好。激光冲击后,冲击区域金属的内能升高,处于热力学上的不稳定状态,如果升高温度,原子动能增加,就会产生向稳定状态的转变趋势,发生静态回复<sup>[13]</sup>,部分位错消失,晶粒将长大且原始铸态组织中的第二强化相将重新融入基体中,硬度将低于室温下的硬度,700 °C 时显微硬度由室温下的 HV536.7 降为 HV448.6。700 °C 到 800 °C 硬度有个上升的现象,主要是因为析出了较多的碳化物相<sup>[14,15]</sup>,900 °C 时融入基体的强化相越来越多,强化作用减弱,且温度的升高发生再结晶现象晶粒长大,硬度再次减小。铸造镍基合金中存在的疏松微孔影响材料的综合性能,激光冲击可以消除表面的部分疏松缺陷,使表面更加密实,提高了试样表面的硬度。K417 的工作温度低于 900 °C,注意到 700 °C、800 °C 和 900 °C 情况下,激光冲击区域的显微硬度均大于未冲击区域,说明激光冲击处理作为提高 K417 工作温度时的显微硬度的处理手段是有效的。

### 3.3 深度方向显微硬度

分别对 LSP+25 °C、LSP+700 °C、LSP+800 °C 和 LSP+900 °C 的试样进行深度方向的显微硬度测试,具体方法为:将试样沿激光冲击区域中心切割开,

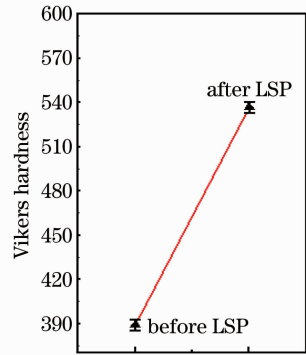


图 7 室温环境下激光冲击的硬化效果

Fig. 7 Hardening effect by laser shock peening

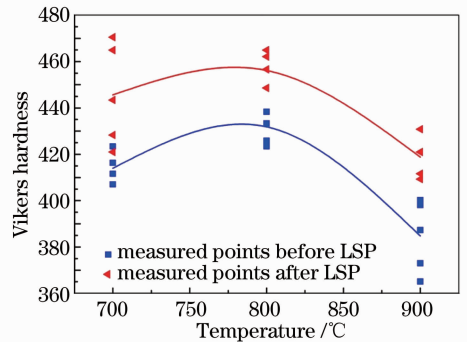


图 8 不同中高温下激光冲击前后硬度变化图

Fig. 8 Hardness variation after LSP at different temperatures

待纵截面磨光抛光之后测其显微硬度,由于无限接近表层的点不宜测量且误差比较大,所以从距表层 50 μm 处开始测量,深度间距为 50 μm,每个深度测量 5 个点,直到显微硬度保持一定数值或与激光未冲击区域硬度相当时停止测量。载荷为 200 g,保压时间为 10 s,测试结果如图 9 所示。

结果表明激光冲击引起的硬化效果随着深度的增加总体呈减小的趋势,不同温度下,最大显微硬度均出现在距表面 50 μm 处,分别为 25 °C 时 HV470.5、



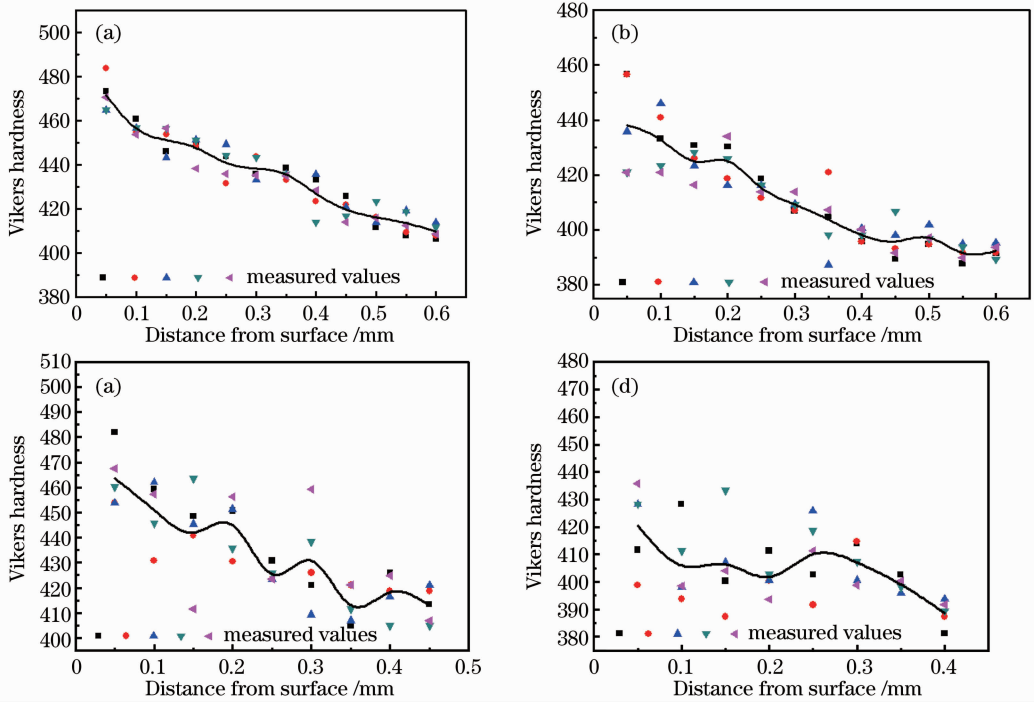


图 9 激光冲击区域显微硬度沿深度方向的变化。(a) 25 °C；(b) 700 °C；(c) 800 °C；(d) 900 °C

Fig. 9 Hardness in depth direction under different temperature. (a) 25 °C；(b) 700 °C；(c) 800 °C；(d) 900 °C

700 °C 时 HV438.2、800 °C 时 HV463.5、900 °C 时 HV420.5。在 700 °C~900 °C 范围内，硬化层深度随温度的增加而减小。25 °C 情况下，当深度达到 0.45 mm 后显微硬度值 HV419 只比远离激光冲击区域的显微硬度值 HV408.6 提高了 10.4，说明 0.45 mm 以下激光冲击波的影响已非常小，认为室温下激光冲击镍基高温合金 K417 的硬化影响层深度为 0.4~0.45 mm。700 °C 情况下，硬化层深度为 0.3~0.35 mm。800 °C 情况下，总趋势也是随深度的增加硬度值减小，但波动比较明显，在误差范围内，800 °C 时硬化层深度为 0.3~0.35 mm。900 °C 情况下，50 μm 处的硬度值最大，为 HV420.5，其他深度的硬度值在 HV388 到 HV413.2 变动，与基体的 HV394.8 相当，塑性变形回复程度比较大，可以认为硬化层明显消失。

激光冲击后具有一定深度的硬化层和深度方向硬度呈递减的现象，这主要与激光冲击波的传播与衰减相关。激光冲击后材料发生弹塑性变形，其弹性波波速  $C_e$  和塑性波波速  $C_p$  分别为<sup>[16]</sup>

$$C_e = \sqrt{\frac{1}{\rho_0} \frac{d\sigma_z}{d\epsilon_z}} = \sqrt{\frac{1}{\rho_0} \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{K+4/3G}{\rho_0}}, \quad (4)$$

$$C_p = \sqrt{\frac{1}{\rho_0} \frac{d\sigma_x}{d\epsilon_x}} = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}}, \quad (5)$$

式中  $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$  为材料的体积模量， $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  为材料的切变模量， $\rho_0$  为材料密度。K417 镍基合金密度为 7.8 g/cm<sup>3</sup>，泊松比  $\nu$  为 0.27，弹性模量  $E$  为 208 GPa，剪切模量  $G$  为 82 GPa，可以算出  $C_e = 1.82 \times 10^7$  mm/s， $C_p = 1.39 \times 10^7$  mm/s。

激光冲击后塑性变形深度可以表示为<sup>[17]</sup>

$$D = \frac{C_e C_p \tau}{C_e - C_p} \left( \frac{P - \sigma_H}{2\sigma_H} \right), \quad (6)$$

式中  $\sigma_H = \frac{1-\nu}{1-2\nu}(\sigma_Y - \sigma_0)$ ，为 Hugoniot 弹性极限， $\sigma_Y$  为动态屈服强度， $\sigma_0$  为金属表层初始应力，理想状态下为 0。 $\tau$  为冲击波的脉宽，一般为激光脉宽的 2 倍左右。K417 的静态屈服强度为 780 MPa，则  $\sigma_H = 1.86$  GPa。(6) 式中  $P$  可表示为

$$P = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0}, \quad (7)$$

式中  $\alpha$  是内能转化为热能的系数，一般取 0.1， $I_0$  是激光功率密度， $Z$  为靶材与水约束层的合成冲击波声阻抗，其值为  $\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_{\text{alloy}}} + \frac{1}{Z_{\text{water}}}$ ，实验中  $I_0$  为 8.49 GW/cm<sup>2</sup>， $Z_{\text{alloy}}$  为  $4.9 \times 10^6$  g·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>， $Z_{\text{water}}$  为  $0.165 \times 10^6$  g·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>，计算得到  $P = 2.91$  GPa，进而可以算出激光冲击后的塑性变形层深度  $D = 0.33$  mm，与实际测到的硬化层 0.4~

0.45 mm在同一数量级,在精度要求不高的情况下,该计算是有效的。

为试图寻求激光冲击后硬度随深度的变化规律,拟合室温、700 °C和 800 °C情况下深度方向硬度,900 °C因发生较大的静态塑性变形回复,硬化层已消失,不做考虑,发现采用指数衰减拟合效果很好,如图 10 所示。

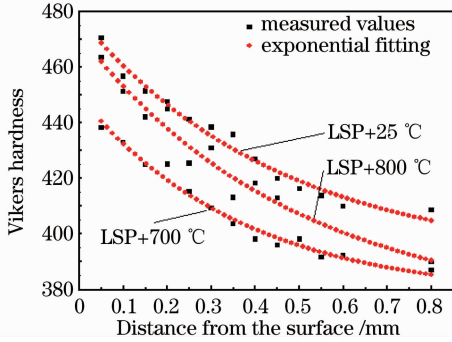


图 10 深度方向硬度指数衰减拟合

Fig. 10 Exponential fitting of microhardness in the depth direction

在距表层 0.8 mm 以内,激光冲击后的深度方向显微硬度变化满足一次指数方程。25 °C 时方程式为  $H_{V_{0.2}} = 88.2 \exp(-2.2x) + 389.6$ , 700 °C 时为  $H_{V_{0.2}} = 72.6 \exp(-2.7x) + 377$ , 800 °C 时为  $H_{V_{0.2}} = 100.8 \exp(-2x) + 370.8$ ,  $x$  为距表层的距离。张永康等<sup>[18,19]</sup>通过实验得出诱导的等离子体冲击波在工件内也是按指数形式衰减的,满足  $p = a \exp(-bx) + c$ ,  $a, b, c$  是与材料及实验情况相关的参数。合金表层的冲击波压力最大,随着距离的增加,应力波逐渐减弱,当峰值压力小于动态屈服强度时,不发生塑性变形,硬化效果消失。在一定条件下,硬度的变化值与冲击波的变化趋势是一致的,近似呈指数形式衰减。

## 4 结 论

激光冲击可以显著提高高温服役构件的显微硬度这一材料综合性能指标,室温下硬化效果最明显,随着温度的升高,由于塑形变形的静态回复和高温软化作用,使得激光冲击区域的硬度减小,但是明显大于激光未冲击区域,说明激光冲击硬化高温服役构件是有效的。单个光斑上硬度分布与激光功率密度分布引起的激光冲击波压力分布特性相关,光斑中心附近显微硬度值最大,深度方向的硬度符合指数形式衰减,室温下硬化深度在 0.45 mm 左右,与计算值相当,随着温度的增加,深度减小。

## 参 考 文 献

- Lin Lin. High Temperature Behavior of GH4169 Alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006
- 林琳. GH4169 合金高温压缩变形行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- Charles S. Montross, Tao Wei, Lin Ye. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. *International J. Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- Omar Hatamleh, Jed Lyons, Royce Forman. Laser and shot peening effects on fatigue crack growth in friction stir welded 7075-T7351 aluminum alloy joints[J]. *International J. Fatigue*, 2001, **29**(3): 412~434
- Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong *et al.*. Effects of laser shock processing on vibration fatigue properties of K417 material[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2197~2201
- 李伟, 何卫锋, 李应红等. 激光冲击强化对 K417 材料振动疲劳性能的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2197~2201
- X. D. Ren, D. W. Jiang, Y. K. Zhang *et al.*. Effects of laser shock processing on 00Cr12 mechanical properties in the temperature range from 25 °C to 600 °C[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2010, **257**(5): 1712~1715
- Wu Xianqian, Huang Chenguang, Song Hongwei. Parameters analysis of residual stress induced by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2632~2636
- 吴先前, 黄晨光, 宋宏伟. 激光冲击强化诱导的残余应力影响因素分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2632~2636
- Peng Weiwei, Ling Xiang. Residual stress field induced by laser peening: a finite element analysis[J]. *J. Aeronautical Materials*, 2006, **26**(6): 30~36
- 彭微微, 凌祥. 激光冲击残余应力场的有限元分析[J]. *航空材料学报*, 2006, **26**(6): 30~36
- Huang Shu, Zhou Jianzhong, Jiang Suqin. Dynamical analysis on stresses in metal caused by laser shot peening[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 256~258
- 黄舒, 周建忠, 蒋素琴. 激光连续喷丸强化过程中应力的动态分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 256~258
- Zhou Liucheng, Chen Donglin, Wang Cheng. Prediction of the residual stress relaxation in K417 material after laser processing[J]. *China Surface Engineering*, 2009, **22**(4): 57~60
- 周留成, 陈东林, 汪诚. K417 材料激光冲击强化残余应力松弛预测[J]. *中国表面工程*, 2009, **22**(4): 57~60
- Zhang Yongkang, Chen Jufang, Xu Renjun. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1068~1072
- 张永康, 陈菊芳, 许任军. AM50 镁合金激光冲击强化试验研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1068~1072
- Tang Yaxin, Zhang Yongkang, Zhang Hong *et al.*. Study on laser shock processing of aluminum alloys[J]. *Transactions of Metal Heat Treatment*, 1997, **18**(4): 22~26
- 唐亚新, 张永康, 张宏等. 铝合金激光冲击强化技术的研究[J]. *金属热处理学报*, 1997, **18**(4): 22~26
- Wenwu Zhang, Y. Lawrence Yao. Microscale laser shock processing-modeling, testing, and microstructure characterization[J]. *J. Manufacturing Processes*, 2001, **3**(2): 128~131
- Xu Yourong, Gao Fei. Substructure change during dynamic and static recovery[J]. *Iron and Steel*, 1988, **23**(11): 24~29
- 徐有容, 高飞. 热加工时动态及静态回复中亚结构的变化[J]. *钢铁*, 1988, **23**(11): 24~29
- Guo Yongan. Influence of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Nickel-Based Superalloys[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007
- 郭永安. 热处理对镍基高温合金组织和性能的影响[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007
- Xie Wenjiang, Zou Juntao, Zhao Yongqin. Effect of heat treatment on structures and hardness of K445 superalloys[J].

- Foundry Technology*, 2007, **28**(11): 1446~1448
- 谢文江, 邹军涛, 赵永芹. 热处理对 K445 高温合金组织及硬度的影响[J]. 铸造技术, 2007, **28**(11): 1446~1448
- 16 Hu Yongxiang, Yao Zhenqiang, Hu Jun. Numerical simulation of residual stress field for laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 846~851
- 胡永祥, 姚振强, 胡俊. 激光冲击强化残余应力场的数值仿真分析[J]. 中国激光, 2006, **33**(6): 846~851
- 17 P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien. Laser shock processing of aluminum alloys. Application to high cycle fatigue behaviour[J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 1996, **210**(1-2): 102~113
- 18 Zhang Yongkang, Yu Shuisheng, Yao Hongbing. Experimental study of shock waves induced by high-power pulsed laser in AZ31B magnesium alloy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(8): 5602~5604
- 张永康, 于水生, 姚红兵. 强脉冲激光在 AZ31B 镁合金中诱导冲击波的实验研究[J]. 物理学报, 2010, **59**(8): 5602~5604
- 19 Liao Peiyu, Wang Shengbo, Sheng Jingjing. Experiment study of high-power pulsed laser induced shock waves in Ti alloy target [J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(2): 109~112
- 廖培育, 王声波, 盛晶晶. 实验研究脉冲强激光在钛合金靶中诱导的冲击波[J]. 应用激光, 2007, **27**(2): 109~112

栏目编辑: 宋梅梅