

文章编号 1004-924X(2016)增-0094-09

激光冲击强化高速钢 W9Cr3Mo4V 响应

樊玉杰^{1,2}, 郭二彬^{2*}, 戴毅斌², 崔鹏飞², 唐德业²

(1. 江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212000)

摘要: 为了研究激光冲击强化高速钢 W9Cr3Mo4V 材料的响应性能, 采用不同的激光能量、冲击次数对高速钢表面进行激光冲击强化处理。实验结果表明, 激光冲击区域产生圆形凹坑变形, 凹坑深度变形量随激光能量和冲击次数的增加而增大。激光冲击影响区域表面残余压应力, 并随着激光能量和冲击次数的增加而增加, 但冲击次数超过 3 次后, 最大残余压应力趋于饱和状态, 应力增幅并不明显。凹坑中心纳米硬度和弹性模量, 随着激光能量和冲击次数的增加而增大, 与基体相比, 最大分别增加了 15.04% 和 14.35%。受冲击波的力效应沿深度方向的影响, 冲击区域表层晶粒尺寸最小约 10 μm , 随着距离的增加, 晶粒尺寸逐渐增大。根据晶粒尺寸的变化情况, 将冲击影响区域分为 5 层: 严重塑性变形层、塑性变形层、轻微塑性变形层、过渡层和基体。激光冲击能有效细化高速钢 W9Cr3Mo4V 表层晶粒, 提高冲击区域表层的力学性能, 为激光冲击强化高速钢刀具提供指导。

关键词: 激光冲击; W9Cr3Mo4V 高速钢; 纳米硬度; 弹性模量; 残余应力; 微观组织

中图分类号: TN249; TG156.99 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0094

Response of laser shock on high speed steel W9Cr3Mo4V

FAN Yu-jie^{1,2}, GUO Er-bin^{2*}, DAI Yi-bin², CUI Peng-fei², TANG De-ye²

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of
Science and Technology, Zhenjiang 212000, China)

* Corresponding author, E-mail: 1124722629@qq.com

Abstract: The response properties of laser shock on high-speed steel W9Mo3Cr4V were studied experimentally by adopting different laser energies and shock frequencies. The experiment result indicates that the area under laser shock produces round pits, depth of which will increase as the laser energy and shock frequency increase. The surface residual stress exists in the surface of the impacted area under laser shock, and such residual stress increases as the laser energy and shock frequency increase; but the maximum residual stress will approach saturation after three times of shock, without obvious stress amplification. The nano-hardness and elasticity modulus in the pimple center increase as the laser energy and shock frequency increase, and compared with the matrix, the maximum increases for the nano-hardness and elasticity modulus are respectively 15.04% and 14.35%. Impacted by the force effect of shock wave along the depth direction, the grain size in laser shock impacted area is approximately 10 μm as a minimum, which increases with the increase of distance. According to the variation

收稿日期: 2016-05-29; 修订日期: 2016-06-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51405207); 中国博士后基金资助项目(No. 2014M561573); 江苏省博士后基金资助项目(No. 1301012B); 江苏省高校自然科学基金资助项目(No. 13KJB460007); 江苏省研究生创新计划(No. SJLX16_0454)

of grain sizes, the impacted area can be divided into 5 layers: severe plastic deformation layer, plastic deformation layer, slight plastic deformation layer, transition layer and the matrix. Laser shock can effectively refine surface layer grain of the high-speed steel W9Cr3Mo4V and improve the mechanical property in surface layer of the impacted area, thus providing guidance for the fabrication of laser shock strengthening high-speed steel tools.

Key words: laser shock; W9Cr3Mo4V steel; nano-hardness; elasticity modulus; residual stress; microstructure

1 引 言

高速钢材料是一种含较多 W、Mo、Cr、V 等合金元素的高合金工具钢,其含碳量约为 0.7%~1.05%,具有良好的韧性和成形性,常应用于车刀、丝锥、麻花钻、拉刀、铣刀等刀具^[1]。但是高速钢材料能承受的切削温度最高在 600 °C 左右,切削速度只能达到 20~40 m/min,故切削效率较低,加工淬硬钢和冷硬铸铁比较困难,而且高速钢还存在耐磨性、耐热性较差等缺陷,难以满足现代切削加工对刀具材料越来越高的要求。

目前,刀具表面处理的方法主要有渗元素法、电火花、激光热加工、机械强化、涂层技术等^[2-4]。国外学者 Kawasegi N 等人^[5]利用激光在刀具前刀面加工出微米和纳米沟槽结构,并对铝合金进行了车削加工,试验结果表明刀具表面结构产生的润滑膜有效减小了前刀面的摩擦。A. Sawka^[6]等人通过金属有机化合物化学气相沉淀法在硬质合金刀具表面制作一层 Al₂O₃ 涂层,研究显示刀具寿命和未处理相比得到大幅度提高。Shuho Koseki^[7]等人针对镍基 718 合金难切削的问题,采用物理气相沉积法在刀具表面制作一层 TiN 涂层,研究结果显示与未处理刀具相比,切削刃的耐磨损性得到了增强,寿命得到了提高。虽然现有技术在一定程度上能够提高刀具的耐磨性能,但同时也存在许多问题,如制作的涂层与基体结合不牢固、热效应等不良影响。

高速钢刀具作为机械加工中常用的关键基础件,既要有良好的减摩性能,以减小切削过程中的黏附力,保证切削力的稳定与加工件的表面质量;又要有良好的耐磨性能,以保证工件的尺寸精度和刀具的使用寿命。激光冲击技术为解决上述问题提供了很好的途径。激光冲击技术^[8]是利用高

能脉冲激光束作用在基体表面的吸收层,吸收层吸收能量形成等离子体爆炸产生冲击波作用在基体表面,具有操作简单、无热影响、强化效果明显等优点。Jie Sheng 等人^[9]在 ZCuSn10P1 合金表面进行激光冲击处理,发现凹坑中心处的纳米硬度最大,比基体表面提高了 75.82%。在润滑条件下激光冲击处理的试样表面摩擦系数均小于未处理的,凹坑密度为 10% 时,摩擦系数最小。A. Salimianrizi^[10]采用激光能量为 1.2 J、光斑直径为 1.5 mm 在 AL6061-T6 表面进行激光冲击强化处理。研究结果表明光斑搭接率越高,表面粗糙度越小。当搭接率为 30%,表面显微硬度达到最大,相对于未处理表面提高了 20.5%,最大影响层深度达 125 μm。Fairland^[11]等发现激光冲击可以将 7075 铝合金的屈服强度提高 30%,并且冲击区域的位错缠结亚结构也超过未冲击区域。目前,关于激光冲击强化刀具表面的研究还比较少,激光冲击强化高速钢刀具则几乎未见报道。

本文采用纳秒量级的高能脉冲激光器对高速钢 W9Mo3Cr4V 材料表面进行冲击处理,研究了激光冲击高速钢 W9Mo3Cr4V 材料的响应,对提高高速钢耐磨性能具有一定的指导作用。

2 试 验

2.1 试样准备

试样材料为 W9Cr3Mo4V 高速钢,化学成分及机械性能见表 1。试样尺寸为 20 mm×20 mm×4 mm,表面依次用 600#~1200# 的金相砂纸打磨,然后在抛光机上进行抛光处理,并用无水乙醇清洗后干燥。

2.2 激光冲击试验

激光冲击实验在西安天瑞达光电技术发展有限公司进行,采用型号为 SGR-60 的纳米固体激

表 1 W9Mo3Cr4V 高速钢的化学成分和机械性能

Tab. 1 Chemical composition and mechanical properties of high speed steel W9Mo3Cr4V

Composition	C	W	Mo	Cr	V
Percent (%)	0.77~0.85	8.5~9.5	2.7~3.3	3.6~4.2	1.3~1.6
Mechanical properties	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	E/GPa	ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	ν
	795.5	410	210	8300	0.29

光器,主要技术指标如下:脉冲波长为 1064/532 nm,脉宽 <15 ns,最大脉冲能量为 6 J,能量稳定性 $<\pm 1\%$,重复频率为 10 Hz。试验过程中,光斑直径为 2 mm,激光能量为 3,4,5,6 J,冲击次数为 1,3,5,7。

2.3 形貌测量

采用超景深三维显微镜 VHX1000C 测量凹坑的 3D 形貌、直径和深度。

2.4 残余应力

采用 X-350A 型 X 射线应力测量仪,测试方法采用侧倾固定 ψ 法,采用 $\text{CrK}\alpha$ 辐射,(211)衍射晶面,侧倾角 ψ 分别选取 $0^\circ, 24.2^\circ, 35.3^\circ, 45^\circ$,应力常数为 -318 MPa, 2θ 扫描起始角和终止角分别为 161° 和 152° ,设定 2θ 扫描步距为 0.1° ,计数时间为 0.5 s, X 光管电压为 20 kV,电流为 5 mA,准直管直径为 1 mm。测试时,每个点测试 3 次取平均值作为最终的残余应力值。

2.5 纳米硬度和弹性模量

采用 Agilent Nano Indenter G200 纳米力学测试系统测量激光冲击凹坑内的纳米硬度和弹性模量。以金刚石压针压入材料深度 $1 \mu\text{m}$ 为基准,最大压力保持时间为 10 s,整个加载周期为 275 s。

2.6 微观组织

将激光冲击后的试样用线切割的方法沿光斑中心剖开并镶嵌,对沿深度方向的截面进行打磨和抛光,采用 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀,腐蚀时间为 5 s。采用 AxioCam MRc5 金相显微镜观察晶粒。

3 结果与讨论

3.1 冲击变形

图 1 为激光能量为 3~6 J,冲击 1 次时的激光冲击凹坑试样及其三维形貌测量图。可以看出,材料表面经激光冲击后产生了圆形微凹坑。激光能量为 4 J 时,过光斑中心的最大变形量为 $20.81 \mu\text{m}$,微凹坑周围没有发生烧蚀现象,这说

明激光冲击为冷加工,对材料表面无热影响。

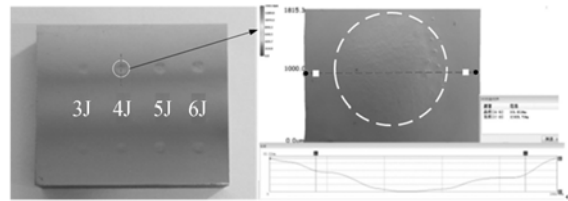


图 1 微凹坑形貌图

Fig. 1 Micro-topography of micro dimples

图 2 为不同激光能量和冲击次数下微凹坑的深度和直径变化。从图 2(a)中可以看出能量从 3 J 增大到 6 J,凹坑深度从 $15.12 \mu\text{m}$ 增加到 $26.58 \mu\text{m}$,其原因为光斑直径和激光器脉宽不变,功率密度随激光能量的增加而变大。根据激光诱导的冲击波峰值 P_{max} 和功率密度 I_0 的关系公式^[12]:

$$P_{\text{max}} = \sqrt{\frac{A(\gamma-1)I_0 Z_{t_0} Z_0 \rho}{(2\gamma-1)(K_0 Z_{c_0} + K_c Z_{t_0})}}, \quad (1)$$

式中: A 为吸收系数, γ 是等离子体绝热系数, Z_{t_0} 、 Z_{c_0} 分别为板材和约束层声阻抗, ρ 为等离子体密度。由式(1)可见,激光功率密度越大,产生的冲击波峰值压力越大,超过材料动态屈服强度值越多,表面塑性变形也越大,宏观表现为微凹坑深度的增加。微凹坑直径从 1.3 mm 增加到 1.45 mm,小于光斑直径,且微凹坑直径增幅较小,分析认为激光冲击波的压力服从高斯分布,靠近光斑边缘的冲击波压力未能使材料达到屈服强度,导致实际的有效光斑直径小于 2 mm。当激光能量增大时,曲线两端的冲击波压力略增大,使周围部分材料发生塑性变形,从而微凹坑直径有所变大。

图 2(b)为微凹坑深度和直径随冲击次数的变化。随着冲击次数的增加,凹坑深度逐渐增大,但增幅逐渐减少。当冲击次数从 1 次到 3 次,3 次到 5 次,5 次到 7 次时,凹坑深度分别增加了

8.24, 4.43, 1.2 μm。主要由于激光冲击后晶粒变细,屈服强度得到提高,不过随着冲击次数的不断增大,晶粒尺寸不能无限减小,同时受到上次冲击的晶粒细化和加工硬化的影响,冲击波在塑性变形区再次传播发生塑性变形更加困难^[13],所以凹坑深度的增长率变缓。

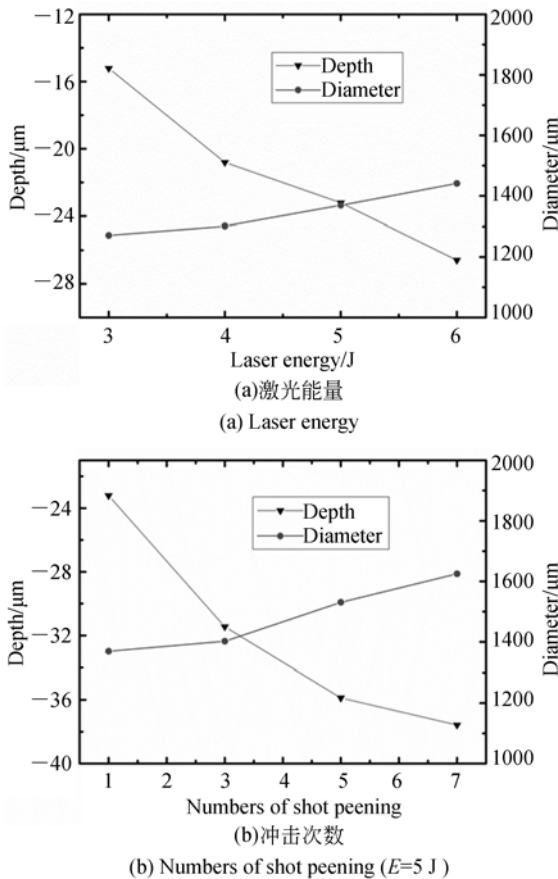


图 2 激光能量和冲击次数对凹坑变形的影响
Fig. 2 Diameter and depth of micro dimples under different energies and numbers of shot peening respectively

3.2 残余应力

对 W9Cr3Mo4V 高速钢进行激光冲击强化处理,会在表面产生圆凹坑状的塑性变形,如图 1 所示。当冲击波消失后,由于冲击周围材料反作用会在平行于冲击平面的平面内产生残余压应力。图 3 和表 2 为激光能量为 3 J,冲击次数为 1 的残余应力测试结果,而光滑表面的残余应力为 -60 MPa,材料经激光冲击工艺处理后,表面产生了 -179 MPa 的残余压应力。图 4 为冲击中心区域的残余压应力随激光能量和冲击次数的变化曲线。从图 4(a)可以看出残余压应力,随着激光

能量的增大增幅减小。分析认为激光能量越大,冲击波的峰值压力就越大;表层产生的残余压应力就越大,当冲击波的峰值压力达到一定程度时,表面残余压应力接近或达到饱和,增幅变小。图 4(b)为冲击次数对凹坑中心残余应力的影响曲线。冲击次数为 1,3,5,7 时,残余压应力分别为 -237, -312, -329, -342 MPa。随着冲击次数的增加,残余应力增幅逐渐减小。这主要是由于

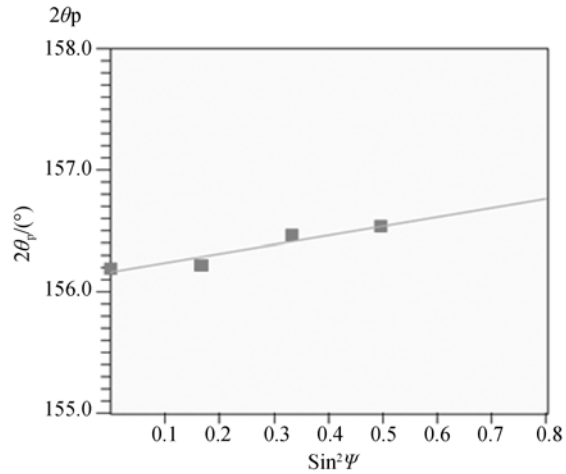
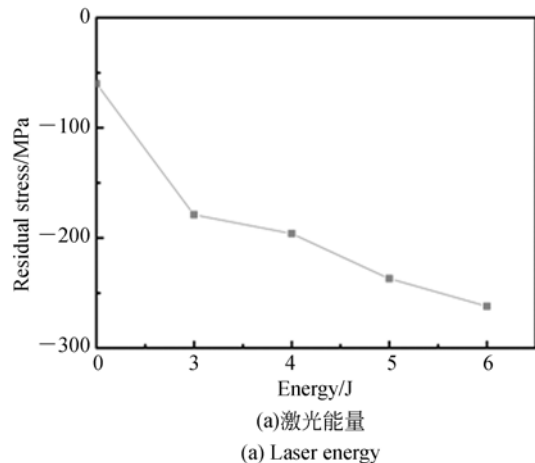


图 3 冲击表面残余应力测试(激光能量为 3 J,冲击 1 次)
Fig. 3 Test results of residual stress on test sample (E=3 J, n=1)

表 2 残余应力测试结果

Tab. 2 Test result of residual stress

$\Psi/(^\circ)$	$2\theta_p/(^\circ)$	峰值 计数	半高 宽度	积分 强度	积分 宽度	应力值 σ	误差 $\Delta\sigma$
0	156.200	41	5.04	374.0	9.12	-239 MPa	±27 MPa
24.2	156.218	36	4.62	359.6	9.99		
35.3	156.467	50	4.33	443.2	8.86		
45.0	156.534	50	3.81	431.8	8.64		



(a) Laser energy

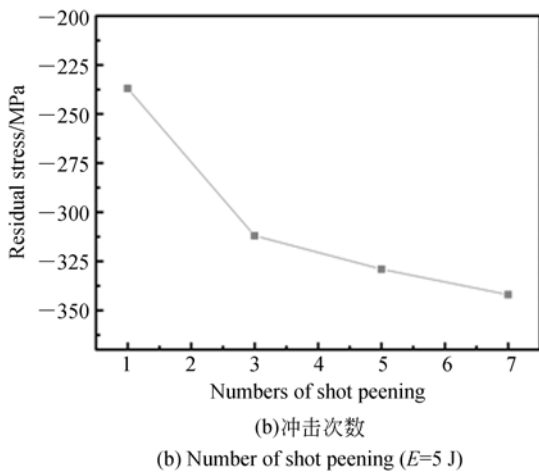


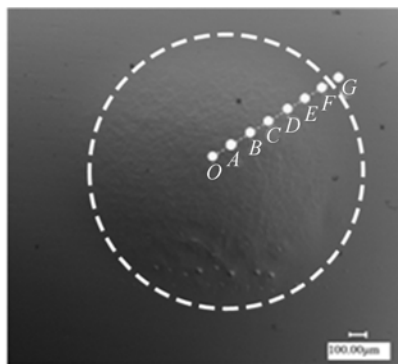
图 4 残余应力随激光能量和冲击次数的变化
Fig. 4 Residual stress on specimens surfaces with increase of laser energy and number of laser shock respectively

每经过一次激光冲击后,材料都被压实,在表层产生薄硬化层,在后续加载中,冲击波在通过此硬化层所形成的残余应力比上次大。随着材料塑性变形达到饱和,残余压应力的增幅逐渐减小,这与杜

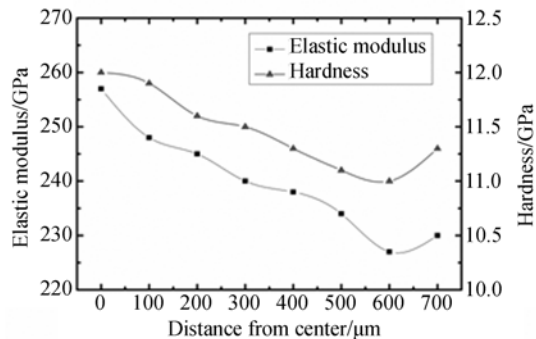
金星论文^[14]的研究结果一致。残余应力的增加能有效提高材料表面的硬度及位错密度,从而提高表面的强度^[15],因此提高零件表面残余压应力可以有效地提高摩擦性能。

3.3 纳米硬度和弹性模量

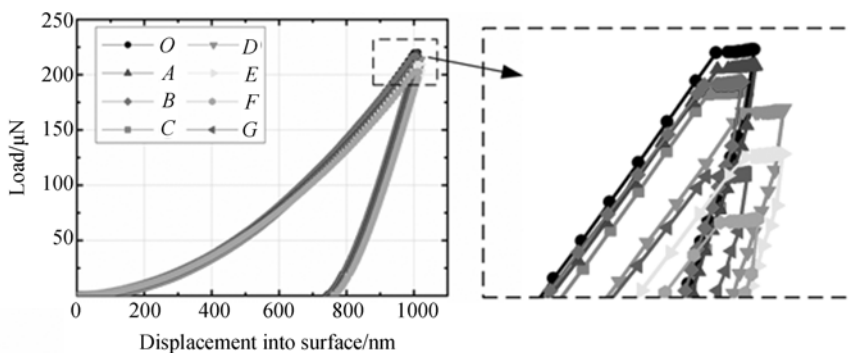
纳米压痕测试点如图 5(a)所示。冲击中心 O 点到 D 点,相邻两点之间的距离为 0.1 mm。图 5(c)为单点激光冲击 1 次,能量为 5 J 的沿凹坑半径方向的纳米压痕载荷位移曲线。采取相同的压入深度 1 μm 作为测试基准,不同参数下的加卸载曲线重合度较高。金刚石压头达到最大深度时所对应的载荷在数值上较相近,但纳米硬度是在纳米级别测量的,载荷变化在微米量级,因此载荷在数值上的变化不可忽略。从放大的峰值载荷可以看出,达到同样的压入深度,所需的最大载荷不同,载荷数值越大,表示此时的纳米硬度越大。从图 5(c)中显示随着测试点 O~F 距离凹坑中心距离越大,金刚石压头保压时的载荷也越大,说明纳米硬度和弹性模量也越大,而 G 点的保压载荷高于 F 点,说明基体 G 点的纳米硬度高于 F 点。



(a)测试点
(a) Test points



(b)沿凹坑半径方向纳米硬度和弹性模量的变化
(b) Nano-hardness and elastic modulus changes along diameter of dimple



(c)沿凹坑半径方向的纳米压痕加载-卸载曲线
(c) Nanoindentation loading and unloading curves of direction along radius of micro-dimples

图 5 纳米硬度及弹性模量的测试结果

Fig. 5 Test results of nano-hardness and elastic modulus

图 5(b)为能量为 5 J,冲击 1 次时纳米硬度和弹性模量沿凹坑直径方向的变化曲线。激光冲击处理后,微凹坑中心处的硬度最大,纳米硬度达到 12 GPa,与基体相比,硬度增加了 6.19%,弹性模量增加了 11.3%;随着距光斑中心距离的增加,纳米硬度减小,在距光斑中心 600 μm 处达到最小值。这是由于激光冲击区域的中心能量最集中,冲击波的压力最高,导致塑性变形最大,晶粒细化程度最高,硬度最大;在凹坑边缘产生了拉应力,导致此处的纳米硬度小于基体的纳米硬度,这与图 5(c)载荷-位移曲线的规律一致。

图 6 为基体及凹坑中心处纳米硬度及弹性模量随激光能量的变化曲线。可以看出,随着激光能量的增加,弹性模量和纳米硬度都逐渐增大,当激光能量为 6 J 时,凹坑中心的纳米硬度及弹性模量比未处理表面提高了 7.08% 和 13.04%。这是由于激光冲击后,试样表面发生了塑性变形,而产生塑性变形的根本原因是内部晶粒的位错滑移,随着激光能量的增加,冲击波压力越大,产生的塑性变形越大,材料的细化程度和位错密度就越高。根据纳米硬度 H 和位错密度 ρ 的关系式^[16]:

$$H = H_0 + aGb\sqrt{\rho}, \quad (2)$$

式中: H_0 , a , G , b 为与材料相关的常数, H_0 为理想状态下的纳米硬度, G 是剪切模量。可知位错密度越大,纳米硬度越大,所以纳米硬度随着激光能量的增大而增大。

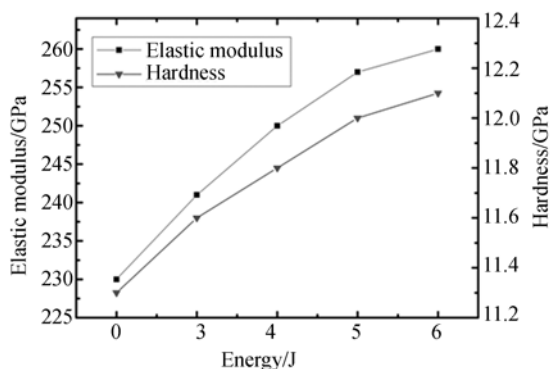


图 6 纳米硬度和弹性模量随激光能量的变化

Fig. 6 Variations of hardness and elastic modulus with laser energy

图 7 为激光能量为 5 J、光斑直径为 2 mm,不同冲击次数下纳米硬度和弹性模量的变化曲线。

可以看出,随着冲击次数的增加,纳米硬度较光滑平面分别增加了 6.19%、10.12%、13.27%、15.04%,弹性模量较光滑表面分别增加了 11.3%、13.04%、13.91%、14.35%。可以看出纳米硬度和弹性模量随着冲击次数的增加而增大,但增幅变小。这是由于材料经过多次激光冲击后,内部的晶粒不断地被细化,当冲击次数较多时,晶粒细化效果增幅减弱,材料硬度表现为增幅变缓。由残余应力测试结果可知,随着冲击次数的增加,表面残余应力的增加趋势逐渐减缓,导致纳米硬度也是相应的变化趋势。纳米硬度是材料的固有属性,与材料的内部结构相关,一般材料的弹性模量随其微孔洞增多呈线性下降^[17],冲击次数在一定程度上与激光能量具有相同的效应,会使材料内部结构更加致密,降低表层材料的孔隙率,从而提高弹性模量。增加弹性模量能有效地提高材料表面的刚度和表面抗损伤性能^[18],因此提高弹性模量可以有效地提高 W9 钢表面的摩擦性能。

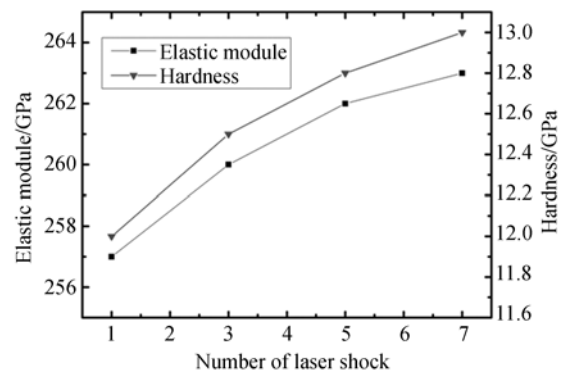


图 7 纳米硬度和弹性模量随冲击次数的变化

Fig. 7 Variations of nano-hardness and elastic modulus with numbers of laser shock ($E=5$ J)

3.4 激光冲击强化区域微观组织

图 8 为单点激光冲击 1 次,能量为 5 J 的冲击区域,用 ImaginJ 软件沿深度方向每隔 15 μm 测得的平均晶粒尺寸拟合而成的曲线。激光冲击后,W9 晶粒尺寸随着深度的增加逐渐增大,最后趋于平缓。从曲线图看出在距离表面 60 μm 区域内,晶粒尺寸约为 10 μm ;在距离表面 60~200 μm 的区域内,晶粒尺寸逐渐变大,最后维持在 20 μm 左右;当深度在 200~280 μm 的,晶粒尺寸从 20 μm 增加 30 μm ;当深度为 280~350 μm 时,晶粒尺寸变化趋于平缓,约为 35 μm 。根

据晶粒尺寸的变化趋势,沿深度方向划分为 4 个区域,如图 9 所示。距离表面 0~60 μm 为严重塑性变形层 (SPD layer),晶粒细化最严重,晶粒尺寸最小;60~200 μm 区域为塑性变形层 (MPD layer),晶粒细化程度有所减弱,但是晶界依然比较多;200~350 μm 区域为轻微塑性变形层 (MPD layer),当距离表面深度大于 350 μm 后为基体 (Substrate) 原本的组织,晶粒比较粗大,此区域几乎不受塑性变形的影响。分析是由于冲击波压力在材料内部传播时呈指数曲线衰减,在材料表层冲击波峰值压力最高,晶粒细化最明显;随着深度的增加,冲击波压力减小,晶粒细化程度减弱。当冲击波压力传播到某一深度小于材料的动态屈服强度时,对材料不能起到强化的作用,晶粒无细化。

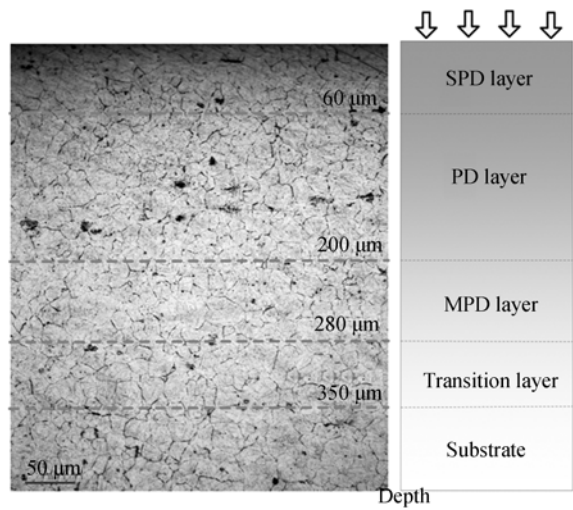


图 9 沿深度方向金相组织及变形层分布示意图
Fig. 9 Microstructure along depth direction and distribution of deformation layer

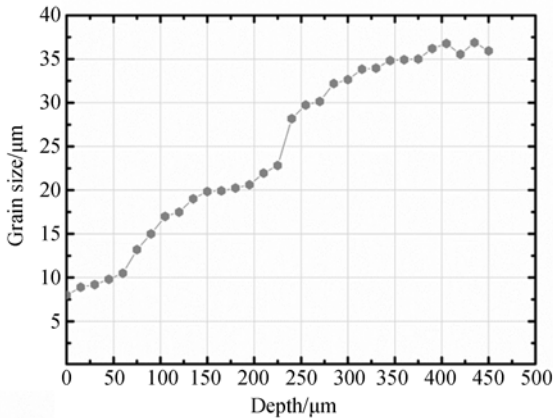


图 8 晶粒尺寸沿深度方向的变化

Fig. 8 Variation of grain size along depth direction

图 10 为距离冲击表面 80 μm 处,不同激光能量下晶粒尺寸的变化曲线。可以看出,晶粒尺寸随着激光能量的增加而减小。当激光为 3~5 J 时,晶粒尺寸约为 15 μm,处于塑性变形区;当激光能量为 6 J 时,晶粒尺寸约为 10 μm,处于严重塑性变形区,这也间接反映了激光能量大塑性影响深度大。

图 11 为激光能量为 5 J 时,距离表面 240 μm 时晶粒大小随冲击次数的变化曲线。可以看出,当冲击次数为 1 时,晶粒尺寸为 28 μm,处于轻微塑性变形层向基体过渡的阶段;当冲击次数从 3 次、5 次、增加到 7 次时,晶粒尺寸从 11 μm 减小到 10 μm,属于严重塑性变形区域,随着冲击次数的增加,晶粒细化效果并不明显。这是由于激光

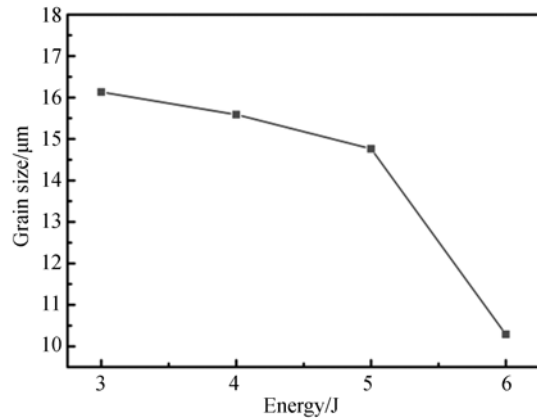


图 10 激光能量对晶粒尺寸的影响

Fig. 10 Grain size as a function of laser energy with Depth of 80 μm

冲击过程中材料内部的晶粒不断被细化,当晶粒细化程度趋于饱和状态时,冲击次数增加,晶粒尺寸不再减小。根据实验结果可知,W9 钢在冲击 3 次后,晶粒细化达到饱和状态,增加冲击次数,细化效果也不明显。

根据位错理论,理想位错和 Shockley 局部位错的剪切应力分别为^[19]:

$$\tau_N = \frac{2\alpha\mu b_N}{d}, \quad (3)$$

$$\tau_p = \frac{2\alpha\mu b_p}{d} + \frac{\gamma}{b_p}, \quad (4)$$

式中:α是反映位错长度和晶粒尺寸之间比例的位错特性参数,μ表示剪切模量,b_N和b_p分别为

理想位错和 Shockley 局部位错的 Burgers 矢量, γ 为层错能, d 为晶粒尺寸。由于激光冲击工艺处理后晶粒得到了细化, 剪切应力随之增大, 带来强化效果。因此细化晶粒能够有效地提高 W9 钢的耐磨性能。

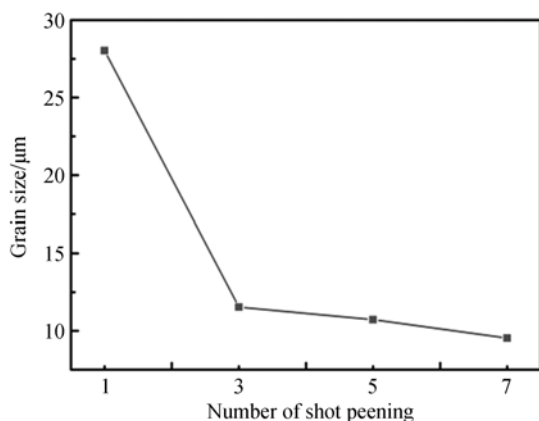


图 11 激冲击次数对晶粒尺寸的影响

Fig. 11 Effect of number of shot peening on grain size

4 结 论

本文采用激光冲击对高速钢表面进行冲击处理, 研究激光能量和冲击次数对表面形貌、残余应力、纳米硬度、微观组织的影响, 得到如下结论:

(1) 激光能量越大, 表面塑性变形越大。能量从 3 J 增大到 6 J, 凹坑深度从 15.12 μm 增加到

26.58 μm ; 凹坑深度随冲击次数的增加而增大, 受加工硬化的影响, 变形增量逐渐减少。

(2) 激光冲击能够引入有益的残余压应力。冲击中心区域的残余压应力随着激光能量和冲击次数的增加而增加。当冲击次数超过 3 次时, 残余应力变化趋势平缓; 随着冲击次数的进一步增加, 残余应力增幅减小。

(3) 单点冲击凹坑中心处的纳米硬度及弹性模量最大, 沿凹坑半径方向纳米硬度及弹性模量逐渐减小。受凹坑边缘残余拉应力的影响, 靠近凹坑边缘处的纳米硬度及弹性模量达到最小。凹坑中心的纳米硬度和弹性模量随着激光能量和冲击次数的增加而增大, 与基体相比, 最大分别增加了 15.04% 和 14.35%。

(4) 冲击影响区域内, 表层附近晶粒尺寸的细化效果明显, 晶粒尺寸最小, 沿深度方向逐渐增大。根据晶粒尺寸分为严重塑性变形层、塑性变形层、轻微塑性变形层、过渡层、基体 5 层。同一深度下, 能量越大, 冲击次数越多, 晶粒尺寸越小。当冲击次数超过 3 次时, 晶粒细化效果并不明显。

综上所述, 激光能量对冲击 W9Cr3Mo4V 各响应值的影响较大, 激光能量越大, 冲击强化效果越显著; 冲击次数对各响应值的作用明显, 但冲击次数超过 3 次后, 强化效果的增幅并不明显。因此, 在进行激光冲击强化高速钢 W9Cr3Mo4V 材料时, 冲击次数一般不超过 3 次。

参考文献:

- [1] 杨亚辉. 表面强化技术在金属切削刀具制造过程中的应用研究[J]. 机械制造, 2015, 53(11): 41-44.
YANG Y H. The application of surface strengthening technology in the process of metal cutting tool manufacturing[J]. *Machinery Manufacture*, 2015, 53(11): 41-44. (in Chinese)
- [2] 黄志花. 涂层刀具专利技术综述[J]. 科学与财富, 2015(11): 151-152.
HUANG ZH H. Reviewed of coated tools patent technology[J]. *Sciences & Wealth*, 2015(11): 151-152. (in Chinese)
- [3] 汪瑞军, 黄小鹏, 刘军, 等. 电火花表面强化技术国内外研究应用综述[C]. 第八届国际热喷涂研讨会 (ITSS' 2005) 暨第九届全国热喷涂年会 (CNTSC'

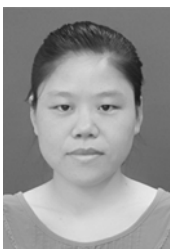
2005) 论文集, 2005: 86-91.

WANG R J, HUANG X O, LIU J, *et al.*. Review of Edm surface strengthening technology in domestic and overseas [C]. *ITSS' 2005 and CNTSC' 2005*, 2005: 86-91. (in Chinese)

- [4] 徐跃增. 高速钢刀具表面 PCVD 复合渗镀强化研究[J]. 铸造技术, 2015, 36(3): 666-668.
XU Y Z. Study on PCVD composite diffusion strengthening on high speed steel tool surface[J]. *Foundry Technology*, 2015, 36(3): 666-668. (in Chinese)
- [5] KAWASEGI N, SUGIMORI H, MORIMOTO H, *et al.*. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(3): 248-254.
- [6] SAWKA A, KWATERA A, WOZNICKI A. Ce-

- mented carbide cutting tools life with nanocrystalline Al_2O_3 layer deposited by MOCVD[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2016, 16(3): 351-364.
- [7] SHUHO K, KENICHI I, HIROSHI U. Damage of physical vapor deposition coatings of cutting tools during alloy 718 turning[J]. *Precision Engineering*, 2016, 44: 41-54.
- [8] 乔红超, 赵吉宾, 陆莹. 激光诱导冲击波应用技术研究现状[J]. *表面技术*, 2016, 45(1): 1-6, 48.
- QIAO H CH, ZHAO J B, LU Y. Current status of laser-induced shock wave application technology[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(1): 1-6, 48. (in Chinese)
- [9] SHENG J, ZHOU J Z, HUANG S. Characterization and tribological properties of micro-dent arrays produced by laser peening on ZCuSn10P1 alloy[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76: 1285-1295.
- [10] SALIMIANRIZI A, FOROOZMEHR E, BADROS-SAMAY M, *et al.*. Effect of laser shock peening on surface properties and residual stress of Al6061-T6 [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 77(2): 112-117.
- [11] FAIRLAND B P, WILCOX B A, GALLAGHER, *et al.*. Laser shock induced microstructural and mechanical property changes in 7075 aluminum [J]. *Appl. Phys.*, 1972, 43: 3893-3895.
- [12] BEETHE L, FABBRO R. Shock wave from a water-confined laser-generated plasma[J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, 82(6): 2826-2832.
- [13] 乔红超, 赵亦翔, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化对 TiAl 合金组织和性能的影响[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(7): 1767-1773.
- QIAO H CH, ZHAO Y X, ZHAO J B. Effect of laser peening on microstructures and properties of TiAl alloy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1767-1773. (in Chinese)
- [14] 杜金星, 柏云, 王匀. 激光冲击对热作模具钢残余应力场的影响规律研究[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(2): 134-137.
- DU J X, BAI Y, WANG Y. Research on influence regulations of laser shock processing on residual stress field of hot work tool steel[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(2): 134-137. (in Chinese)
- [15] LU J Z, LUO K Y, ZHANG Y K. Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel[J]. *Acta Mater.*, 2010, 58(16): 5354-5362.
- [16] CHU J P, RIGSBEE J M, BANAS G, *et al.*. Laser-shock processing effects on surface microstructure and mechanical properties of low carbon steel [J]. *Materials Science & Engineering*, 1999, 260(1): 260-268.
- [17] 樊玉杰, 周建忠, 黄舒, 等. 激光微喷丸强化纯铜表面的纳米压痕分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 230-234.
- FAN Y J, ZHOU J ZH, HUANG SH. Research on mechanical response of copper treated by micro laser shock peening using nanoindentation technique[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 230-234. (in Chinese)
- [18] LUO K Y, LU J Z, ZHANG Y K. Effects of laser shock processing on mechanical properties and micro-structure of ANSI 304 austenitic stainless steel [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2011, 528(13): 4783-4788.
- [19] GUTIERREZ-URRUTIA, ZAEFFERER S, RAABE D. The effect of grain size and grain orientation on deformation twinning in a Fe-22 wt. % Mn-0.6 wt. % C TWIP steel [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2010, 527(15): 3552-3560.

作者简介:



樊玉杰(1979—),女,河北唐山人,博士,副教授,硕士生导师,2007年、2011年于江苏大学分别获得硕士、博士学位,主要从事激光冲击金属材料表面改性方面的研究。Email: fanyujie1979@163.com

通讯作者:



郭二彬(1988—),男,安徽淮北人,硕士,主要从事医用钛合金激光微造型减磨润滑的研究。Email: 1124722629@qq.com