

## 激光在高速钢表面加工沟槽表面织构的实验研究

武 伟<sup>1</sup>, 陈桂明<sup>1</sup>, 赵 娜<sup>2</sup>, 樊博璇<sup>3</sup>

(1. 第二炮兵工程大学 装备管理系, 陕西 西安 710025; 2. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001; 3. 中国航天科技集团四院军事代表室, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 沟槽状表面织构广泛应用于机械密封、缸套活塞环等机械摩擦部件, 其性能取决于加工后的几何参数, 因此高效准确地加工出理想尺寸的织构显得尤为重要。运用不同的激光输出功率、重复频率和扫描速度在高速钢表面加工沟槽状表面织构, 设计了三水平三因素的全面实验, 系统研究了加工参数与沟槽织构几何参数的关系。结果显示: 随着激光重复频率的增加, 沟槽织构深度和宽度均呈现先略微增大后减小的趋势。扫描速度增大使沟槽织构深度先增加后减小, 而宽度均随着扫描速度的增大而变大。方差分析表明: 较之激光输出功率, 激光扫描速度、重复频率及其交互作用对织构加工深度和宽度的影响更显著。输出功率在 10~14 W 之间、重复频率在 20~30 kHz 之间、扫描速度 1 000 mm/s 左右时, 加工高速钢表面沟槽织构的质量较好。同时, 压痕实验证明, 在织构边缘区域硬度明显增加。

**关键词:** 沟槽状表面织构; 高速钢; 激光; 输出功率; 重复频率; 扫描速度; 硬度

**中图分类号:** TH117.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0206008

## Experimental study on the groove surface texture processed by laser on the surface of high-speed steel

Wu Wei<sup>1</sup>, Chen Guiming<sup>1</sup>, Zhao Na<sup>2</sup>, Fan Boxuan<sup>3</sup>

(1. Department of Equipment Management Engineering, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;

2. Baicheng Ordnance Test Center, Baicheng 137001, China; 3. The Military Representative Department

in the 4th Academy of CASTC, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** Groove surface texture was widely used in the frictional mechanical part, such as mechanical seal, cylinder liner and piston ring, whose performance depends on its geometric parameter of the texture. Therefore, it is important to process the surface texture efficiently with accurate geometric parameter. Groove surface textures were fabricated on high-speed steel by lasers with different output powers, repetition frequencies and scanning speeds. Comprehensive experiments with three levels and three factors were designed to study the relationships between texture topographies and the three processing parameters. The experimental results showed that the depth and width of the groove surface texture slightly increased firstly and then decreased with the rise of laser repetition frequency. Moreover, with the incensement of laser scanning speed, the depth of the groove surface texture increased firstly and then decreased, but the width of the groove surface texture continued to rise. Variance analysis showed that laser scanning speed and repetition frequency had more obvious influence on the width and depth of groove surface texture than

收稿日期: 2015-06-07; 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 科技创新团队资助项目(2014KCT-03); 军内科研项目

作者简介: 武伟(1987-), 男, 博士生, 主要从事激光表面改性、表面织构加工技术等相关研究。Email: foterlk@tom.com

导师简介: 陈桂明(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事装备维修保障及表面改性相关研究。Email: chengguiming@yahoo.com

the output power. High-quality groove surface texture would be processed on the high-speed steel by laser with the output power of 10W to 14W, the repetition frequency of 20kHz to 30kHz and the scanning speed of about 1000mm/s. Meanwhile, indentation testing indicated that the hardness on marginal area of surface texture markedly increased.

**Key words:** groove surface texture; high-speed steel; laser; output power; repetition frequency; scanning speed; hardness

## 0 引言

激光加工技术是近几十年来迅速发展起来的一门高新技术,由于它具有高密度、高精度等特点,能够快速、准确地对机械零部件进行特种加工与处理,在表面工程的相关领域得到了广泛的应用。随着激光技术的不断发展,其在机械零部件表面处理方面成效更为显著,主要研究及相关技术集中于激光相变硬化<sup>[1]</sup>、激光熔融<sup>[2]</sup>、激光表面冲击<sup>[3]</sup>及激光表面织构<sup>[4]</sup>等。激光表面织构是指使用激光的热性能使被加工件表面迅速烧蚀和汽化,形成预先设计好的表面图形的一种加工技术。激光表面织构的加工工艺主要受激光器的激光功率、扫描速度、脉冲频率、重复次数等参数的影响,此外,材料本身的性能(如反射率、晶体结构、熔点等)也影响表面织构的加工质量。参考文献[5]使用 CO<sub>2</sub> 激光器雕刻木板、大理石、有机玻璃三种非金属固体材料,研究了激光工艺参数对其雕刻表面形貌的影响,侧重于总结对不同材料激光雕刻的工艺参数,但是对雕刻的细微尺寸变化未做详细研究。

表面织构能够有效改善摩擦副的摩擦学性能,故其广泛应用于切削刀具、机械密封、轴承轴瓦、缸套活塞环等机械部件<sup>[6-8]</sup>。表面织构的形状可以多种多样,但是常见的主要是圆坑状和沟槽状两种,由于沟槽状织构能更大程度改变接触状态,应用更为广泛一些,参考文献[9]在使用激光在陶瓷表面制备了不同参数和形状的沟槽织构,通过与钢的对磨实验,发现在某些参数设计下具有较低的摩擦系数和较好的耐磨性。参考文献[10]研究了沟槽状表面织构的方向与摩擦方向的关系,发现织构深度 7 μm,垂直于摩擦滑动方向时,与光滑表面相比,摩擦系数降低 38.2%。可见,合理的沟槽状表面织构的参数设计,对零部件机械密封及摩擦学等方面的性能影响较

大。如何高效高质量地加工出沟槽状表面织构,又是实验科学研究及工程应用的重要环节,因此,文中选取应用较广泛的高速钢作为研究对象,探讨使用激光在其表面加工沟槽织构的工艺参数。

## 1 试验设计及准备

利用脉冲激光加工沟槽状表面织构的原理,就是通过一系列的脉冲间断性地照射到待加工试样表面,使工件的表层材料在瞬间发生溶化、汽化以去除材料。通过每个脉冲形成的微凹坑相连便形成了完整的沟槽织构,其加工原理如图 1 所示。图中箭头所指方向为激光的扫描方向,织构的长度  $L$  可通过激光扫描的距离控制,织构的宽度  $D$  可以通过平行多条光束控制。但是由于热效应、熔渣、重铸等原因,实际加工的表面织构的宽、深尺寸受到激光工艺参数的影响,主要有:激光输出功率、重复频率和扫描速度。基于此,按照激光输出功率分别为 10 W、14 W、18 W,重复频率分别为 20 kHz、30 kHz、40 kHz,扫描速度分别 500 mm/s、1 000 mm/s、2 000 mm/s,设计了三水平三因素的全面实验,共 27 组。为了更具有说服力,每组实验重复三次,共计 81 个实验。

实验具体过程为:高速钢加工成  $\Phi 24 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的圆饼,表面抛光至粗糙度小于 0.2,先后使用丙酮、酒精和去离子水各超声清洗试样 15 min 后,取出吹干待用。按试验安排,使用激光在该试样表面

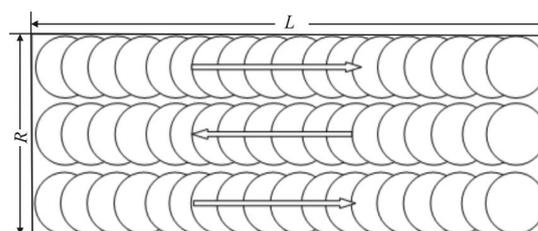


图 1 激光加工沟槽状表面织构的原理图

Fig.1 Schematic diagram of procession of groove surface texture by laser

加工沟槽结构,加工完成后再次使用丙酮、酒精和去离子水超声清洗,然后使用白光干涉三维表面形貌仪对结构三维形貌进行表征,画出其截面轮廓图并测量沟槽结构的深度和宽度,整理相关结果,分析有关规律及其机理。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 加工参数对表面结构形貌的影响

为了研究激光加工工艺对表面结构形貌的影响,需要对加工完成的结构进行形貌的表征。图 2 示出所加工沟槽状表面结构的三维形貌图,可以观察到在结构区域外边缘处,有明显的隆起部分,这是被烧蚀和气化的熔渣,在表面结构实际工程应用之前,还将通过抛光或研磨等手段将其去除,由于去除毛刺的过程会影响结构的尺寸大小,而此文重点在于研究制备工艺对尺寸的影响,故并未对激光结构后的试样进行去毛刺处理。图 3 为该三维形貌的横截面轮廓图,在平行于光滑表面的水平面上定义了表面结构的宽度(图中标注为  $140\ \mu\text{m}$ ),并以宽度为基准定义了表面结构的深度(图中标注为  $50\ \mu\text{m}$ )。最后对所有实验后的结构形貌均进行如图 2、图 3 的表征,

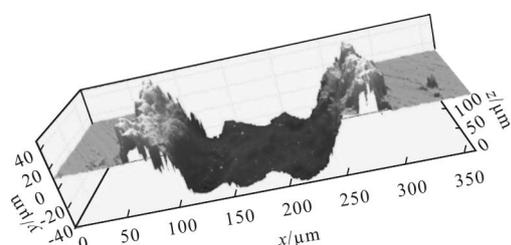


图 2 表面结构三维形貌图

Fig.2 Three-dimension topography of groove surface texture

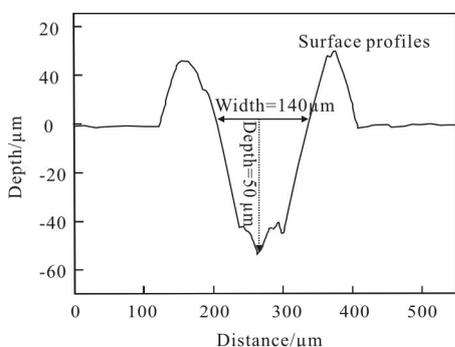


图 3 沟槽结构三维形貌的横截面轮廓图

Fig.3 Surface profile of cross-sectional about the three dimension topography of groove surface texture

测量其宽度和深度,从激光输出功率、重复频率、扫描速度等方面研究激光制备工艺对高速钢表面沟槽结构加工形状的影响。

#### 2.1.1 激光输出功率的影响

激光表面结构是通过高能量密度的激光束照射到被加工件表面,使工件表层材料在瞬间发生溶化、汽化,并形成微小的凹面造型。因此,当且仅当激光束的能量密度超过材料汽化阈值时,才能加工出预设的表面结构,但是能量密度过大又会引起表面材料的严重烧蚀和氧化,增加了表面加工的粗糙度。如何合理确定激光的输出功率以控制激光束的能量密度,达到理想的制备效果,需要对实验结果进行分析与探讨。

图 4 为扫描速度  $500\ \text{mm/s}$  时不同重复频率下,沟槽结构的深度(见图 4(a))和宽度见图 4(b)随激光输出功率变化的曲线,图中数据为三次重复实验的平均值并且添加了误差棒。从图中可以看出,重复频率  $40\ \text{kHz}$  时,沟槽的宽度和深度均有较大增加,而且随着激光输出功率的增加先减小后增大,较低重复频率时这种规律并不明显。激光的输出功率变大,光斑边缘区域的能量密度也会随之变大,烧蚀去除材料会变多,微凹槽结构的宽度和深度应该随之变大,但图 4 却出现了变小的现象,这是由于激光束的光斑直径是一定值,所以随着功率的增大凹槽深度和宽度增幅较小,当重复频率较高时,会在沟槽底部和边缘形成更多的熔渣堆积,并产生重铸,使其宽度和深度变小;随着输出功率的进一步增加凹槽深度和宽度又有所增加。同时从重复实验的误差棒来看  $40\ \text{kHz}$  时重复试验的误差较大,这也是由于重复频率较高时,所制备的沟槽熔渣过多较为粗糙所致。

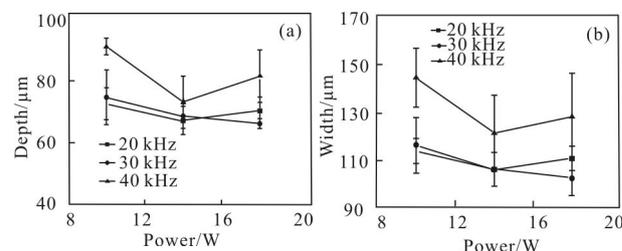


图 4 扫描速度  $500\ \text{mm/s}$  时不同重复频率下,沟槽结构深度、宽度随输出功率的变化

Fig.4 Under scanning speed of  $500\ \text{mm/s}$  and different repetition frequency, depth and width of groove surface texture versus output power

图 5 为激光扫描速度增加到 1 000 mm/s 后的试样表征结果,可见该速度增加后不同的重复频率下,输出功率增大使沟槽的深度(图 5(a))和宽度(图 5(b))略微上升但不显著。该速度进一步增加到如图 6 所示的 2 000 mm/s 后,沟槽深度(图 6(a))明显变浅,但宽度(图 6(b))较其他扫描速度无太大变化,同时较低的重复频率(20 kHz)能获得较大的沟槽宽度和深度。

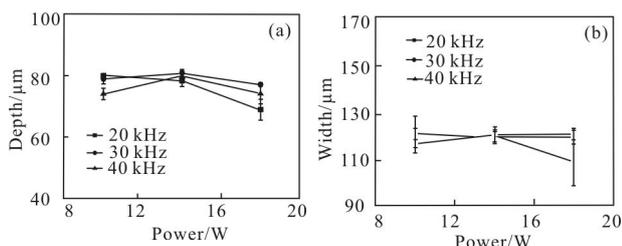


图 5 扫描速度 1000 mm/s 时不同重复频率下, 沟槽结构深度、宽度随输出功率的变化

Fig.5 Under scanning speed of 1000 mm/s and different repetition frequency, depth and width of groove surface texture versus output power

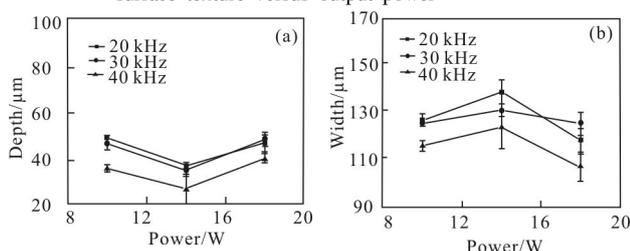


图 6 扫描速度 2000 mm/s 时不同重复频率下, 沟槽结构深度、宽度随输出功率的变化

Fig.6 Under scanning speed of 2000 mm/s and different repetition frequency, depth and width of groove surface texture versus output power

可见,表面沟槽状结构的加工形貌不仅受激光输出功率的影响,还要受制于扫描速度和重复频率的变化,当激光扫描速度为 1 000 mm/s 时,重复频率的影响较小而且多次试验的误差也较小,说明其加工质量较好。激光输出功率为 10 W 时,已经能够在高速钢材料表面加工出较深和较宽的沟槽状结构,因此在实际加工过程中,根据尺寸的需要选择功率在 10 W 至 14 W 之间即可,过小难以达到材料的汽化阈值,过大会因过度烧蚀而影响表面光洁度。

### 2.1.2 激光重复频率的影响

从 2.1.1 节的分析可知,激光重复频率对表面沟槽状结构的加工尺寸有较大影响,此节分析激光

重复频率对加工尺寸的影响及机理。当扫描速度为 1 000 mm/s 时,有较好的加工质量,图 7 给出了该扫描速度下,沟槽状结构的深度和宽度随重复频率的变化情况。从图中可以看出随着重复频率的增加,沟槽状结构的深度和宽度表现出相似的变化趋势。沟槽状结构的深度和宽度随着重复频率的增加呈现先略微增大后减小的趋势。这主要是因为随着重复频率的增加,单个激光脉冲能量基本不变,但光斑的重合度不断增大,所以凹槽的宽度和深度会略微增大,但也会在凹槽内产生越来越多的熔渣。由于沟槽的不断变深,在凹槽内产生的熔融金属也随之变多,这些熔融的金属便会在凹槽内发生重铸,从而使宽度不断减小,因此沟槽深度和宽度呈现先变大

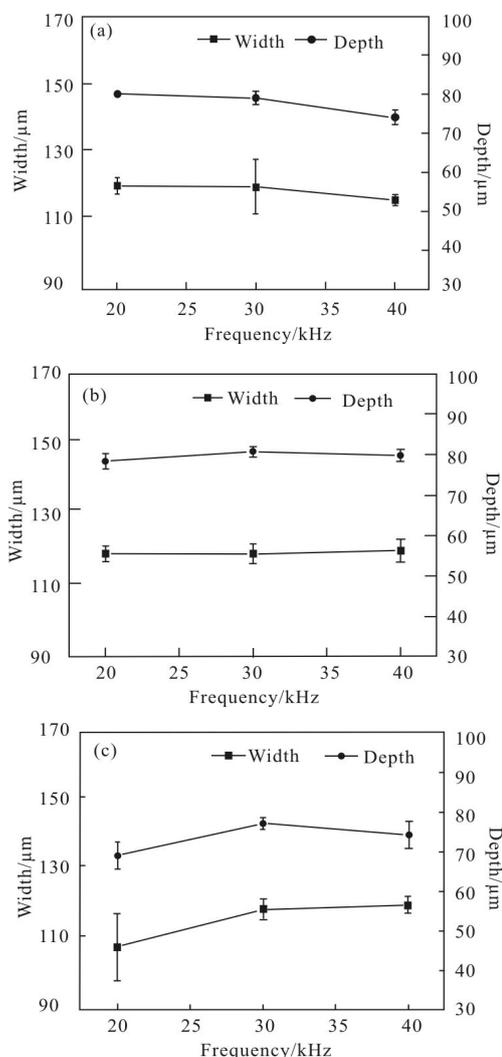


图 7 不同输出功率下沟槽结构深度和宽度随重复频率的变化

Fig.7 Under different laser output power, the change regulation of depth and width of groove surface texture

后变小的规律。当重复频率过小时,光斑重复度较小,加工的沟槽状织构可能存在不连续的情况,加工效果较差。重复频率过大时,随着频率的增加脉冲能量又会变小,而且光斑重合度过大,加工形貌也会不理想。从试验结果分析可以得出,激光的重复频率为 20 kHz 至 30 kHz 之间进行加工时,高速钢表面沟槽织构的形貌较好。

### 2.1.3 扫描速度的影响

激光扫描速度是决定微凹槽表面织构加工效率及加工效果的最主要因素之一。从提高加工效率的角度来说,应尽可能选择较大的扫描速度。此节主要讨论扫描速度对沟槽状表面织构加工质量和尺寸的影响。

如图 8 所示,在重复频率分别为 20 kHz、30 kHz 和 40 kHz 时,沟槽状织构的深度和宽度均呈现出相同的规律,即:深度随着扫描速度的增大先增加后减小,而宽度均随着扫描速度的增大而变大。这种变化主要是因为随着扫描速度的进一步增大,两个脉冲激光间距逐渐变大,光斑的重合度随之减小,因而沟槽织构的深度呈现出先增加或逐渐减小的趋势。如果扫描速度过小,两个脉冲激光间的距离较小,脉冲激光加工产生的熔渣会迅速堆积加工区域内,并会在该区域内产生重铸,加工质量差且效率低。而扫描速度过大,两个脉冲激光间距距离较大,沟槽织构将会呈现断断续续不连贯现象,甚至会呈现孤立的凹坑织构,因此对于高速钢来说,相对较好的扫描速度为 1 000 mm/s 左右。

从激光输出功率、重复频率、扫描速度等方面研究了激光制备工艺对高速钢表面沟槽状表面织构加工形状的影响,结果显示织构的尺寸是激光的三个加工参数共同作用的结果。在相同扫描速度下,重复频率不同时输出功率对沟槽织构的宽度和深度的影响具有相同规律,对于高速钢而言,根据加工尺寸的需求,调整输出功率在 10 W 至 14 W 之间时,能够达到较好的加工效果;随着重复频率的增加,沟槽状织构的深度和宽度呈现先略微增大而后减小的趋势,激光的重复频率为 20 kHz 至 30 kHz 之间进行加工时,高速钢表面沟槽状织构的形貌较好;随着扫描速度增加,沟槽状表面织构的深度随着扫描速度增大而减小,宽度随着扫描速度的增大而变大,合理的

选择扫描速度对于加工质量也至关重要,当扫描速度为 1 000 mm/s 左右时,加工的质量相对较好。

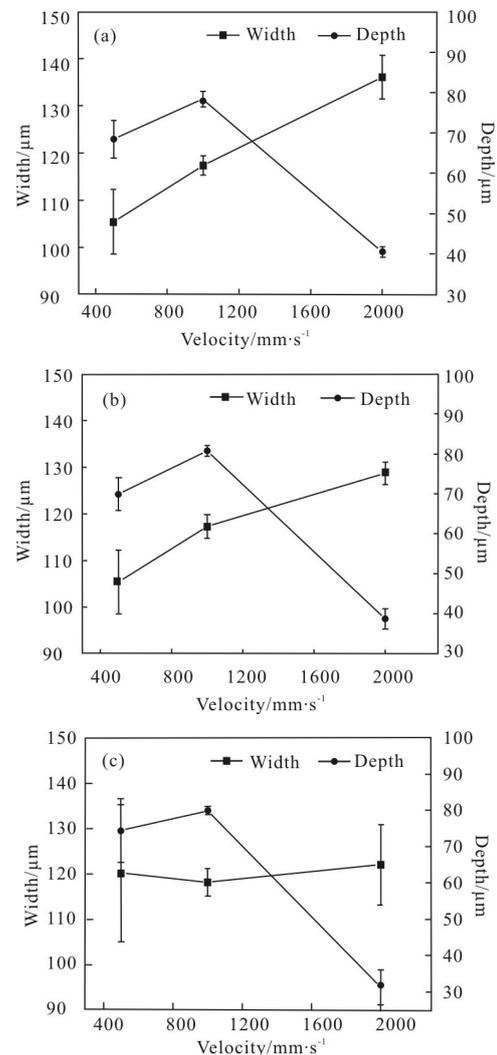


图 8 不同重复频率下沟槽织构深度和宽度随扫描速度的变化:(a) 重复频率 20 kHz, (b) 重复频率 30 kHz, (c) 重复频率 40 kHz

Fig.8 Under different laser repetition frequency, the change regulation of depth and width of groove surface texture: (a) 20 kHz repetition frequency, (b) 30 kHz repetition frequency, (c) 40 kHz repetition frequency

## 2.2 实验结果的方差分析

为了定量分析实验结果,将输出功率、重复频率、扫描速度作为三个因子,进行正交分析,因素水平见表 1。选用正交表  $L_{27}(3^3)$ ,进行方差分析的计算,实验具体安排及正交表设计见表 2。为了简化运算,选取三次实验的平均沟槽宽度为分析对象,运用表 2 的实验数据,进行一系列计算,最终得到如表 3 所示的关于沟槽织构宽度的方差分析结果。

**表 1 因数水平表**  
**Tab.1 Definition of factor levels**

Factors	Level		
	1	2	3
A:Output power/W	10	14	18
B:Repetition frequency/kHz	20	30	40
C:Scanning speed/mm·s <sup>-1</sup>	500	1 000	2 000

表 3 中,由于 AB 交互作用的离差平方和(34.5)较小,故将其与误差项进行合并使方程分析的第二

自由度增加为 12。由表 3 中的 F 和临界值的比较可知,因数 B、C、AC 交互、BC 交互,对沟槽织构宽度都有显著影响,从 F 值的大小可看出,因数 AC 交互作用最显著,其次依次为 C、BC、B。

按照相同的方法计算了三因素对沟槽织构深度的影响,其方差分析结果见表 4。从表中的 F 和临界值的比较可见,因数 C、AC 交互及 BC 交互,对沟槽织构深度都有显著影响,影响显著程度由大到小依次为:C、AC 交互、BC 交互。

**表 2 试验方案及沟槽织构平均宽度**  
**Tab.2 Experimental program and average width of groove surface texture**

Number	Sequence									Average width/ $\mu\text{m}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	11	
	A	B	(AB)1	(AB)2	C	(AC)1	(AC)2	(BC)1	(BC)2	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	112.75
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	118.4
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	124.85
4	1	2	2	2	1	1	1	2	3	105.4
5	1	2	2	2	2	2	2	3	1	117.35
6	1	2	2	2	3	3	3	1	2	136.1
7	1	3	3	3	1	1	1	3	2	109.9
8	1	3	3	3	2	2	2	2	3	106.95
9	1	3	3	3	3	3	3	2	1	116.7
10	2	1	2	3	1	2	3	1	1	115.15
11	2	1	2	3	2	3	1	2	2	118.2
12	2	1	2	3	3	1	2	3	3	123.3
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	105.35
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	117.3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	128.7
16	2	3	1	2	1	2	3	3	2	102.05
17	2	3	1	2	2	3	1	1	3	117
18	2	3	1	2	3	1	2	2	1	123
19	3	1	3	2	1	3	2	1	1	142
20	3	1	3	2	2	1	3	2	2	114
21	3	1	3	2	3	2	1	3	3	114
22	3	2	1	3	1	3	2	2	3	120
23	3	2	1	3	2	1	3	3	1	118
24	3	2	1	3	3	2	1	1	2	122
25	3	3	2	1	1	3	2	3	3	126
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	118
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	105

表 3 沟槽织构宽度的方差分析表  
Tab.3 Analysis table of variance about the width of groove surface texture

Sources of variance	Sum of squares	Degrees of freedom	Average quadratic sum	F value	Critical value	Significance
A	82.9	2	41.5	1.79		
B	196.4	2	98.2	4.23	$F_{0.05}(2,12)=3.88$	*
C	201.8	2	100.9	4.35		*
AB	34.5	4	8.6		$F_{0.05}(4,12)=3.26$	
AC	1121.1	4	280.3	12.08		**
BC	399.6	4	99.9	4.31		*
Error	185.8	8	23.2			
Total T	2222.2	26				

表 4 沟槽织构深度的方差分析表  
Tab.4 Analysis table of variance about the depth of groove surface texture

Sources of variance	Sum of squares	Degrees of freedom	Average quadratic sum	F value	Critical value	Significance
A	50.4	2	25.2	0.86		
B	165.1	2	82.6	2.83	$F_{0.05}(2,12)=3.88$	*
C	3246.6	2	1623.3	55.59		**
AB	100.3	4	20.1		$F_{0.05}(4,12)=3.26$	
AC	2504.2	4	626.1	21.44		**
	699.6	4	174.9	5.98		*
Error	699.6	8	29.2			
Total T	6766.2	26				

通过方差分析可见, 沟槽织构深度和宽度除受到三因素分别影响外还受其交互作用的影响, 在制备过程中控制激光扫描速度和重复频率对织构参数会产生更为显著的影响。

### 2.3 加工参数对织构区域附近材料硬度的影响

文献报道激光能够增加表面材料的硬度, 因此采用显微硬度计, 选取载荷 0.5 kg 压入时间 15 s 的测量条件, 通过压痕表征了沟槽状表面织构附近的硬度变化情况。如图 9 所示, 左边黑色部分为沟槽织构区域, 在距离该区域边缘 30 μm、90 μm 和 150 μm 处, 使用 136° 的方锥形金刚石压头压出压痕, 图 9 中用圆圈标出。从压痕的大小可见, 距离织构边缘最近处压痕最小, 其他两处压痕大小相当。这说明距离边缘 30 μm 处的硬度比原始硬度大很多, 从数值上来看, 其硬度约为 90 μm 和 150 μm 处的 6 倍, 同时可见这种硬化效果只在织构边缘很小范围内发生。这种硬化作用对提高机械强度有所帮助, 但对表面织构加工完成抛光和去毛刺处理带来了一定的困难。

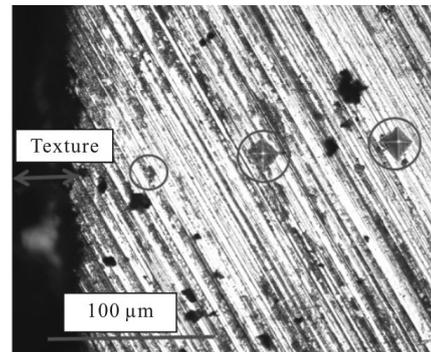


图 9 沟槽状表面织构附近区域的硬度变化  
Fig.9 Hardness variation on the related area of groove surface texture

## 3 结论

沟槽状表面织构具有降低摩擦系数、增加耐磨性、减小切削力、增加承载力等优势, 在机械密封、刀具等机械工业及摩擦学领域得到了广泛的应用, 因此, 使用激光高效快捷制备高质量沟槽状表面织构就显得非常重要。本文使用激光加工系统, 实验研究了激光输出功率、重复频率、扫描速度等制备工艺参数对高速钢表面沟槽织构加工形状的影响。初步得出了一下结果:

(1) 激光输出功率在超过材料汽化阈值后,对沟槽状表面织构加工深度和宽度的影响,由于受到重复频率和扫描速度的制约,表现的规律不明显。方差分析显示,激光扫描速度、重复频率及其交互作用对深度和宽度的影响更为显著。输出功率在 10~14 W 之间时,加工效果相对较好。

(2) 随着激光重复频率的增加,高速钢表面沟槽状织构的深度和宽度均呈现先略微增大后减小的趋势。主要是由于重复频率的增加,单个激光脉冲能量基本不变,但光斑的重合度不断增大,所以沟槽的宽度和深度会略微增大,但也会在凹槽内产生越来越多的熔渣,熔渣在加工区域重铸,会降低沟槽的宽度和深度。激光重复频率为 20~30 kHz 之间进行加工时,高速钢表面沟槽织构的形貌较好。

(3) 沟槽状织构深度随着扫描速度的增大先增加后减小,而宽度均随着扫描速度的增大而变大。当扫描速度为 1 000 mm/s 左右时,加工高速钢表面沟槽织构的质量相对较好。

(4) 在高速钢表面的激光加工沟槽状织构区边缘 30  $\mu\text{m}$  内,存在硬度增加区域,硬度能够达到未织构区域的 6 倍左右。

#### 参考文献:

- [1] Ye Yunxia, Fu Yonghong, Yang Guocheng, et al. Study on laser phase transformation hardening of HT250 by high speed axis flow CO<sub>2</sub> laser [J]. *Chinese Journey of Lasers*, 2001, A29(10): 945-910. (in Chinese)  
叶云霞,符永宏,杨国成,等.快速轴流 CO<sub>2</sub>激光器激光相变硬化处理 HT250 的研究 [J]. 中国激光, 2001, A29(10): 945-910.
- [2] Yang Yongqiang. Cladding of high speed steel by high power diode laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(3): 251-254. (in Chinese)
- 杨永强.大功率半导体激光熔覆高速钢研究[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(3): 251-254.
- [3] Kong Dejun, Zhou Chaozheng, Wu Yongzhong. Mechanism on residual stress of 304 stainless steel by laser shock processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 736-740. (in Chinese)  
孔德军,周朝政,吴永忠.304 不锈钢激光冲击处理后的残余应力产生机理 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 736-740.
- [4] Wang Hongjie, Guo Wengang, Dong Zhaohui, et al. Application of Laser etching technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 469-472. (in Chinese)  
王宏杰,郭文刚,董兆辉,等.激光刻蚀技术的应用[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(5): 469-472.
- [5] Cui Chengyun, Cui Xigui, Shi Guifeng. Surface morphology of non-metallic solid materials after laser carving [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3932-3936. (in Chinese)  
崔承云,崔熙贵,石贵峰.激光雕刻非金属固体材料的表面形貌[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3932-3936.
- [6] 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: 248-254.
- [7] Qiu Y, Khonsari M M. Experimental investigation of tribological performance of laser textured stainless steel rings [J]. *Tribology International*, 2011, 44: 635-644.
- [8] Brizmer V, Kligerman Y, Etsion I. A laser surface textured parallel thrust bearing [J]. *Tribology Transaction*, 2003, 46: 397-403.
- [9] Xing Y Q, Deng J X, Feng X T, et al. Effect of laser surface texturing on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiC ceramic sliding against steel under dry friction[J]. *Materials and Design*, 2013, 52: 234-245.
- [10] Yuan S H, Huang W, Wang X L. Orientation effects of micro-grooves on sliding surfaces [J]. *Tribology International*, 2011, 44: 1047-1054.