

织构参数对高速钢激光条纹表面磨损量的影响

王燕琳¹, 王 姣², 吴剑钊², 牛威杨², 于爱兵²

(1. 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 应用激光加工技术, 在高速钢试件表面制备出条纹织构, 对高速钢条纹织构试件进行了销盘式摩擦磨损试验, 并测试了磨损量. 通过实验, 分析织构参数对高速钢激光加工条纹表面磨损量的影响规律. 通过对数学模型的拟合分析, 确定并建立了高速钢条纹试件表面磨损量的二阶数学模型. 根据该磨损量数学模型, 对条纹参数进行了优化. 研究表明, 织构参数对高速钢条纹表面磨损量的影响程度依次为高度、宽度和间距; 方差分析表明, 所建立的高速钢条纹表面磨损量与织构参数之间的数学模型是显著的. 同时确定了激光织构表面低磨损量的条纹参数取值范围, 得到了优化后的条纹织构参数.

关键词: 激光; 高速钢; 织构参数; 磨损

中图分类号: N249; TG178

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 05-0019-05

磨损是导致零件失效的主要原因之一, 零件的磨损通常会影响到机械设备的使用寿命. 应用表面技术, 在材料表面制备出凹坑、条纹以及网纹等规则的几何形貌, 即织构表面, 可以提高材料的表面耐磨性^[1-3]. 激光加工具有高效、易控制的优点, 在材料表面织构的制备中得到了广泛应用^[4-6]. 例如, 通过激光加工在 45[#] 钢表面制备 V 形凹槽织构, 在油润滑条件下能有效地减小表面摩擦因数, 特别是在载荷较低、速度较大的工况下, 织构表面的摩擦因数比无织构表面减小 64%^[7]. 齐烨等^[8] 在 45[#] 钢表面进行激光织构处理, 形成规则排列的圆形微坑阵列, 在干摩擦条件下, 激光加工的微坑织构试件具有良好的减摩效果.

织构的形状和尺寸等参数对织构表面的耐磨效果产生一定的影响^[2,8-9]. 目前, 多数相关研究以单因素实验为主, 分析每一个织构参数对激光织构表面耐磨性的影响^[10-11]. 但单因素实验需要的实验次数较多, 无法揭示织构参数之间的交互作用对激光织构表面磨损的影响, 而且不能建立磨损量的数学模型, 也不便对激光织构参数进行优化. 应用实验设计方法, 以较少的实验次数, 便可

以获得各实验因素对响应的影响规律, 判断因素之间是否存在交互作用^[12], 并建立相应的数学模型, 通过数学模型便可以完成参数优化. 高速钢主要用于制造切削刀具、模具、轧辊、锤头、磨球等耐磨零件, 上述零件在使用过程中通常存在材料的严重磨损现象.

鉴于高速钢材料在工程应用中的耐磨性需求, 本文以 W6Mo5Cr4V2 高速钢为例, 采用激光加工技术在高速钢试件表面制备出条纹织构. 应用 Box-Behnken 中心组合实验设计方法, 研究条纹参数对高速钢激光加工条纹表面磨损量的影响规律, 建立磨损量与条纹参数之间的数学模型, 并根据所建立的高速钢条纹试件的磨损量数学模型, 对高速钢试件的激光加工条纹参数进行优化.

1 实验材料与方法

试件选用 W6Mo5Cr4V2 高速钢坯料, 坯料先经过线切割加工, 再经过平面磨削加工, 最终获得试件, 其尺寸为 32 mm×22 mm×5 mm, 表面粗糙度 Ra 为 0.221 μm. 应用 YAG-W200B 型激光焊接机, 在试件表面加工出条纹织构, 设置脉冲激光的频

率为 15 Hz, 电流变化范围 70~280 A, 脉冲宽度变化范围 0.3~2.0 ms. 通过改变激光工艺参数, 制备出高速钢试件表面不同宽度、高度和间距的条纹. 用 KH-8700 型体视显微镜测量试件的条纹宽度、高度和间距.

在 SFT-2M 型销盘式摩擦磨损试验机上完成磨损实验. 磨损条件: 试件盘转速为 $500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 磨损载荷为 60 N, 磨损时间为 80 min, 对摩球为 Si_3N_4 陶瓷球, 直径为 5 mm. 磨损试验前后的试件用 KQ-50DB 型数控超声波清洗机清洗 15 min, 清洗剂为 95%酒精溶液. 清洗后试件在 101-00BS 型电热鼓风恒温干燥箱内干燥 30 min, 干燥箱温度设定为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. 用 FA2204B 型电子分析天平测量试件质量, 记录磨损前后的试件质量. 试验重复 2 次, 取均值.

激光加工试件的条纹参数包括条纹宽度、高度和间距, 选取这 3 个参数作为影响条纹结构表面磨损量的试验因素. 选用 Box-Beknhen 实验设计方法^[12]进行高速钢条纹试件的磨损实验. 实验因素与水平见表 1. 每组实验的试件条纹参数见表 2, 每组实验重复 3 次, 计算磨损量均值.

表 1 磨损实验因素和水平 μm

因素	水平		
	-1	0	1
宽度	500	700	900
高度	5	10	15
间距	1 000	1 250	1 500

表 2 高速钢激光加工条纹试件的磨损量

序号	宽度	高度	间距	磨损量/mg
1	-1	-1	0	1.75
2	-1	1	0	2.89
3	1	-1	0	2.17
4	1	1	0	3.62
5	0	-1	-1	1.45
6	0	-1	1	1.24
7	0	1	-1	1.95
8	0	1	1	2.40
9	-1	0	-1	1.27
10	1	0	-1	2.49
11	-1	0	1	1.20
12	1	0	1	2.39

续表

序号	宽度	高度	间距	磨损量/mg
13	0	0	0	1.82
14	0	0	0	1.89
15	0	0	0	1.70

2 结果与讨论

2.1 结构参数对磨损量的影响

对磨损实验结果进行方差分析, 结果见表 3. 图 1 为残差的正态概率图, 呈直线分布, 说明表 3 中的方差分析结果是可信的^[12].

表 3 方差分析结果

方差来源	自由度	平方和	均方	F 统计量	P
回归	9	5.9	0.66	9.47	0.011 7
<i>d</i>	1	1.58	1.58	22.89	0.005 0
<i>h</i>	1	2.26	2.26	32.62	0.002 3
<i>l</i>	1	6.125e-004	6.125e-004	8.850e-003	0.928 7
<i>dh</i>	1	0.024	0.024	0.35	0.581 3
<i>dl</i>	1	2.250e-004	2.250e-004	3.251e-003	0.956 7
<i>hl</i>	1	0.11	0.11	1.57	0.265 1
<i>d</i> ²	1	0.72	0.72	10.37	0.023 5
<i>h</i> ²	1	0.49	0.49	7.04	0.045 2
<i>l</i> ²	1	0.61	0.61	8.82	0.031 1
残差	5	0.35	0.069		
失拟项	3	0.33	0.11	11.83	0.079 0
纯误差	2	0.018	9.233e-003		
总和	14	6.25			

注: *d* 为宽度; *h* 为高度; *l* 为间距; *dh* 表示宽度与高度的交互作用; *dl* 表示宽度与间距的交互作用; *hl* 表示高度与间距的交互作用.

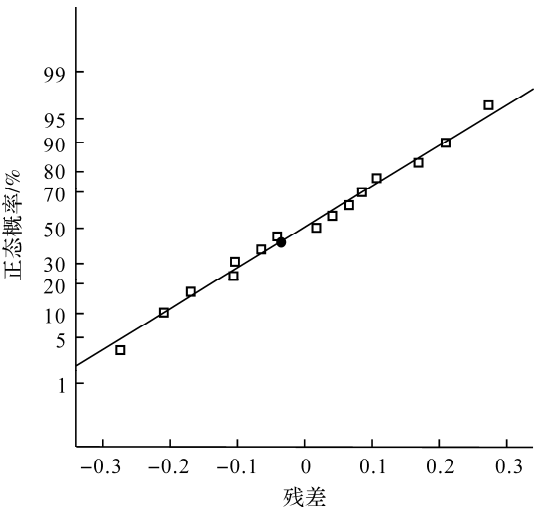
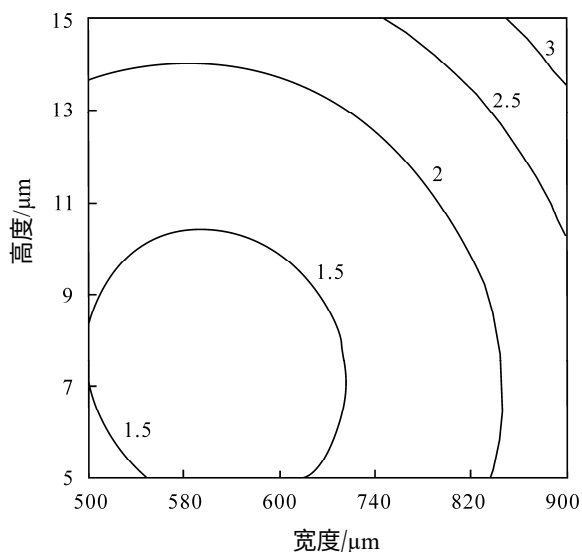


图 1 残差的正态概率

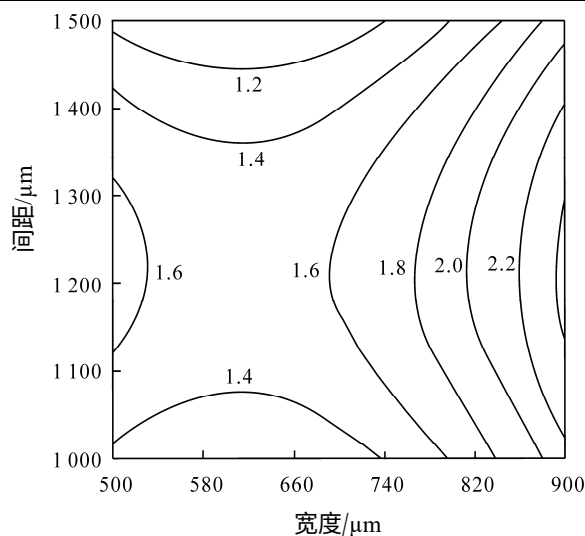
根据表 3, 分析条纹参数对高速钢激光加工条纹试件磨损量的影响. 通过查 F 分布表^[12]可以得到 $F_{0.01(1,5)}=16.26$. 在表 3 中, 条纹高度的统计量为 32.62, 表明条纹高度的取值对高速钢条纹试件磨损量的影响极显著($P<0.01$). 同样, 条纹参数宽度的统计量为 22.89, 条纹宽度对高速钢条纹试件磨损量的影响也极显著($P<0.01$). 条纹间距的统计量为 8.85×10^{-3} , 通过查 F 分布表^[12]得到 $F_{0.05(1,5)}=6.61$, 表明条纹间距对磨损量的影响不显著. 综上分析可得, 条纹参数对高速钢条纹试件磨损量的影响顺序为: 高度、宽度和间距.

表 3 中由于 dh 的 F 统计量 $0.35<F_{0.05(1,5)}=6.61$, 说明条纹宽度和高度之间的交互作用不显著, 表明宽度对磨损量的影响规律基本不受高度取值的影响, 反之亦然. 同理可得, 条纹宽度和间距之间, 高度与间距之间的交互作用也不显著.

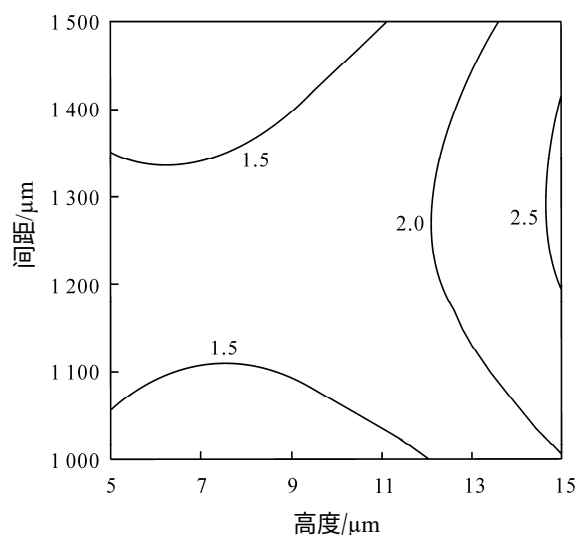
图 2 为条纹参数对高速钢激光加工试件磨损量影响的等高线图. 图 2(a)为试件磨损量随条纹宽度和高度变化的等高线图, 其中间距为 $1\ 068\ \mu\text{m}$. 从图 2(a)可以看出, 当条纹宽度小于 $740\ \mu\text{m}$, 高度小于 $11\ \mu\text{m}$ 时, 磨损量小于 $1.5\ \text{mg}$; 当条纹宽度和高度大于上述两值时, 磨损量会随着宽度和高度的增加而增大. 图 2(b)为磨损量随条纹宽度和间距变化的等高线图, 其中条纹高度 $h=6.49\ \mu\text{m}$. 从图 2(b)可以看出, 当条纹宽度小于 $780\ \mu\text{m}$, 间距 $1\ 450\ \mu\text{m}<l<1\ 500\ \mu\text{m}$ 时, 磨损量小于 $1.2\ \text{mg}$; 而随着宽



(a) 条纹宽度和高度



(b) 条纹宽度和间距



(c) 条纹高度和间距

图 2 条纹参数对磨损量影响的等高线

度($d>780\ \mu\text{m}$)的增加, 间距逐渐接近 $1\ 250\ \mu\text{m}$, 磨损量会逐渐增大. 同理, 图 2(c)为磨损量随条纹高度和间距变化的等高线图, 其中宽度为 $538\ \mu\text{m}$. 图 2(c)显示, 当条纹高度介于中、低水平之间, 而间距接近高水平或低水平时, 可获得较低的磨损量. 综上可得, 在本研究的参数范围内, 为获得较低的磨损量, 条纹参数可依据以下范围取值, 即宽度和高度介于中、低水平间取值, 而间距可接近低水平或高水平取值.

2.2 条纹结构参数的优化设计

先建立磨损量的数学模型, 然后通过数学模型优化出条纹参数. 为了更准确地建立磨损量的

数学模型, 用 Design Expert 统计软件对表 2 中数据进行拟合和比对, 以便选出最佳的数学模型, 拟合结果见表 4.

表 4 模型拟合结果

来源	模型 P	缺省项 P	调整后 R^2
线性模型	0.012 1	0.034 1	0.510 2
交互模型	0.922 7	0.024 2	0.363 8
二阶模型	0.017 4	0.079 0	0.844 9

从表 4 可以看出, 线性模型和二阶模型的 P 值均小于 0.05, 表明线性模型和二阶模型均显著, 但线性模型的缺省项 P 值小于 0.05, 说明线性模型存在缺项是显著的, 即该数学模型不能完整拟合实验数据. 而二阶模型的缺省项 P 值为 0.079, 大于 0.05, 说明二阶模型存在缺项是不显著的, 且其调整后的 R^2 为 0.844 9 大于线性模型的 R^2 值. 因此, 我们选用二阶模型作为高速钢条纹型结构表面磨损量的数学模型.

根据表 2 中的实验数据, 应用 Design Expert 软件进行回归拟合, 得到磨损量 y 与条纹参数之间的二阶数学模型为:

$$\begin{aligned}
 y = & -2.11229 + 1.3792 \times 10^{-2}d - 0.40367h + \\
 & 1.5087 \times 10^{-2}l + 1.10208 \times 10^{-5}d^2 + \\
 & 1.4533 \times 10^{-2}h^2 - 6.50667 \times 10^{-6}l^2 + \\
 & 7.75 \times 10^{-5}dh - 1.5 \times 10^{-7}dl + \\
 & 1.32 \times 10^{-4}hl, \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中: d 为宽度; h 为高度; l 为间距; dh 为宽度与高度的交互作用; dl 为宽度与间距的交互作用; hl 为高度与间距的交互作用.

根据表 3 可知, 数学模型的自由度为 9, 残差的自由度为 5. 查询 F 分布表^[12]可知, 当显著水平 $\alpha=0.01$ 时, $F_{0.01(9,5)}=10.16$; 当显著水平 $\alpha=0.025$ 时, $F_{0.025(9,5)}=6.68$. 在表 3 中, 数学模型 F 统计量的观测值为 $F_0=9.47$, 由于 $10.16 < 9.47 < 6.68$, 因此满足 $F_{0.025(9,5)} < F_0 < F_{0.01(9,5)}$, 表明式(1)给出的高速钢条纹表面磨损量数学模型是显著的, 式(1)的显著水平为 0.025, 可信度大于 97.5%.

根据建立的磨损量数学模型, 应用 Minitab 软件进行优化, 获得使磨损量最低时的条纹参数, 如图 3 所示. 优化后的条纹参数为: 宽度 $617 \mu\text{m}$, 高度 $5.404 \mu\text{m}$, 间距 $1500 \mu\text{m}$, 此时计算出的磨损量

为 0.9963 mg . 上述优化结果与前文中分析的条纹织构表面低磨损量的条纹参数取值范围相吻合, 即条纹宽度和高度介于中、低水平间取值, 而间距接近于高水平取值.

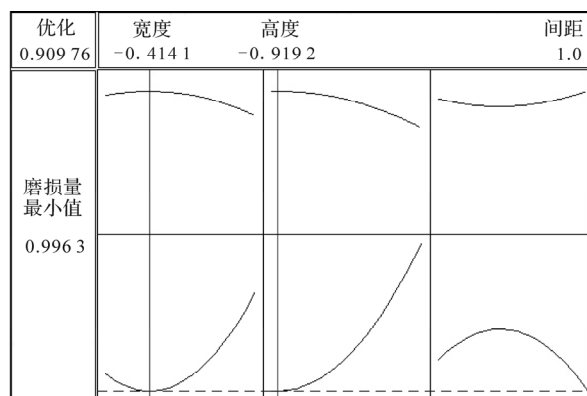


图 3 条纹参数优化结果

本文所建立的数学模型描述了高速钢激光加工条纹表面磨损量与条纹参数之间的函数关系, 以量的形式直观表示了条纹参数对磨损量的影响规律. 在设计和制造织构表面时, 如果应用磨损量的数学模型, 可以根据织构参数对磨损的影响规律, 得到最佳的条纹参数组合, 以获得较低的织构表面磨损.

3 结论

通过实验设计, 获得了条纹参数对高速钢条纹织构表面磨损量的影响程度, 条纹参数的排序依次为高度、宽度和间距, 各参数间不存在明显的交互作用. 通过实验设计, 获得了满足高速钢条纹织构表面低磨损量条件的条纹参数取值范围, 建立了高速钢激光条纹织构表面磨损量与条纹参数之间的数学模型, 该数学模型能够描述高速钢条纹织构表面磨损量与条纹参数之间的函数关系. 根据所建立的数学模型, 进行优化设计, 可以获得高速钢激光条纹织构表面磨损最低时的条纹织构参数.

参考文献:

- [1] IBATAN T, UDDIN M S, CHOWDHURY M A K. Recent development on surface texturing in enhancing tribological performance of bearing sliders[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 272:102-120.

- [2] 陈莉, 周宏, 赵宇, 等. 不同形态和间隔非光滑表面模具钢的磨损性能[J]. 机械工程学报, 2008, 44(3):173-176.
- [3] 马晨波, 朱华, 张文谦, 等. 往复条件下织构表面的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(1):50-55.
- [4] BAHARIN A F S, GHAZALI M J, WAHAB J A. Laser surface texturing and its contribution to friction and wear reduction: A brief review[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2016, 68(1):57-66.
- [5] ZHANG B Y, ZHANG Z H, LIANG Y H, et al. Effects of laser parameters on the geometrical characteristics of peg-shaped bionic coupling unit[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 64:184-194.
- [6] 符永宏, 杨巍, 张华伟, 等. 激光微造型凸轮副的摩擦磨损[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1):216-220.
- [7] 符永宏, 华希俊, 符昊, 等. 45#钢表面制备V形凹槽及其摩擦学特性[J]. 中国表面工程, 2014, 27(4):107-111.
- [8] 齐焱, 常秋英, 王斌, 等. 激光织构对干摩擦性能的影响及机理研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(2):200-205.
- [9] YU H, DENG H, HUANG W, et al. The effect of dimple shapes on friction of parallel surfaces[J]. Journal of Engineering Tribology, 2011, 225(8):693-703.
- [10] 王斌, 常秋英, 齐焱. 激光表面织构对不同材料干摩擦特性的影响[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(4):408-413.
- [11] 苏永生, 李亮, 何宁, 等. 激光加工硬质合金刀具表面微织构的试验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6):66-72.
- [12] MONTGOMERY D C. 实验设计与分析[M]. 6版. 傅钰生, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2009:60-62; 172-174; 367-369; 517-521.

Influence of texture parameters on wearing of laser stripe surface of high speed steel

WANG Yan-lin¹, WANG Jiao², WU Jian-zhao², NIU Wei-yang², YU Ai-bing²

(1.Faculty of Electrical Engineering & Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Textured stripes are fabricated on the surface of high speed steel samples with laser processing technology, and wearing experiments of the stripe textured surface of the samples are carried out in this research. Wearing mass loss of the samples is also measured. The influence of texture parameters on wearing mass loss is analyzed with Design of Experiment method. Second order wearing mathematic model between wearing mass loss and texture parameters is established with regression analysis method. Based on the wearing mathematic model, the texture parameters are optimized. The experimental results show that the level of influence of stripe parameters on wearing mass loss of samples is measured in descending order by stripe height, width and spacing. The analysis of variance for wearing mathematic model shows that the model is significantly accurate. And the ranges of stripe texture parameters are identified for low wearing mass loss of textured surface samples. The optimal stripe parameters are obtained as a result.

Key words: laser; high speed steel; texture parameter; wear

(责任编辑 史小丽)