

# 55号钢仿生非光滑表面高温耐磨性试验

杨卓娟 韩志武 任露泉

**【摘要】** 利用激光微细加工技术将根据仿生非光滑耐磨理论设计的仿生非光滑耐磨表面复制到55号钢模型试样上,在磨损试验机上进行影响凹坑形非光滑表面试样耐磨性多因素试验。采用试验优化设计技术中部分正交多项式回归设计试验方案,得出影响仿生非光滑凹坑表面耐磨性多因素回归方程。试验结果表明,各试验因素对耐磨性影响重要程度依次为温度、磨损时间、凹坑直径、转速和凹坑密度。最后对非光滑的耐磨机理进行初步分析。

**关键词:** 55号钢 仿生 非光滑 高温 耐磨性 试验

**中图分类号:** TH117; TB17 **文献标识码:** A

## Experiment on Wear Resistance of 55 Steel Bionic Non-smoothed Surfaces at High Temperature

Yang Zhuojuan<sup>1</sup> Han Zhiwu<sup>2</sup> Ren Luquan<sup>2</sup>

(1. Jilin Teachers Institute of Engineering and Technology, Changchun 130052, China

2. Jilin University, Changchun 130025, China)

### Abstract

The design of partial multinomial regression on wear resistance of specimen was performed according to the techniques of experimental designing optimization method. Test model specimens made of 55 steel with regular concaves were processed by laser texturing technology technique. Investigations into topographical and tribological features were conducted on MG-2000 wear and abrasion test machine. As one important test index, wear loss was taken to be detected by using partial polynomial regression plan, and three test factors of temperature (300 °C, 500 °C), running time (180 s, 300 s), rotating speed (400 r/min, 600 r/min), non-smooth concave unit size (150 μm, 200 μm, 250 μm, 300 μm) and unit distributing density (250 μm, 350 μm at line and row has been fixed) were selected to investigate the effects on the surface wear loss of 55 steel samples. Multi-factor linear regression equation was derived from test data. According to their importance sorts to test results, the factors are temperature, running time, non-smooth concave unit size, rotating speed, unit distributing density respectively. Main wear-resistance mechanism of the non-smooth concave surface was analyzed at last.

**Key words** 55 steel, Bionics, Non-smooth, High temperature, Wear resistance, Experiment

### 引言

1980年, Rohde首次提出用微观非光滑表面减小摩擦力的方法<sup>[1]</sup>。2001年, Ronen等用两个平行

平面模拟活塞环及气缸套系统, 研究结果表明非光滑表面形态参数对摩擦力有较大影响, 非光滑表面试样的平均摩擦力比光滑表面试样的平均摩擦力减小30%, 甚至更多<sup>[2]</sup>。吉林大学近年来的研究成果

收稿日期: 2008-01-28

杨卓娟 吉林工程技术师范学院机电工程分院 教授, 130052 长春市

韩志武 吉林大学生物与农业工程学院 教授 博士生导师, 130025 长春市

任露泉 吉林大学生物与农业工程学院 教授 博士生导师 中国科学院院士

表明,恰当的仿生非光滑表面的耐磨性优于光滑表面,且不同非光滑表面几何结构单元的形状与分布密度对耐磨性影响不同,并已做了一些试验研究常温下非光滑表面形态、尺寸及分布密度对机械零部件耐磨性的影响<sup>[3-6]</sup>。本文进一步研究在高温下非光滑尺寸及分布密度对耐磨性的影响程度。

## 1 试验方案

吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室前期研究表明,常温下凹坑形非光滑形态对耐磨性影响较大<sup>[5]</sup>,又因为凹坑形非光滑形态在机械零部件上易于加工,有利于改善机械零部件的润滑条件,所以本次试验选用凹坑形非光滑形态,根据仿生非光滑耐磨理论设计出凹坑直径及分布密度见表 1<sup>[7]</sup>。模型试样材料为 55 号钢,首先将其加工成圆柱试样( $\phi 6 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ),调质处理后在其一端面用 JHM-1GY-100B 激光数控加工机加工出非光滑形态,如图 1 所示。

因为试样采用细观非光滑尺度,需要用激光加工机加工,费用较高,所以采用部分正交多项式回归设计试验方案。

本试验选取 5 个试验因素: $z_1$  代表凹坑的直径,取 4 个水平; $z_2$  代表凹坑的行间距(图 1,列间距  $S_1$  固定为  $250 \mu\text{m}$ ),取 2 个水平; $z_3$ 、 $z_4$ 、 $z_5$  分别表示温度、时间和转速,均取 2 个水平。选用  $L_{16}(2^{15})$  正交表,用并列法将 1、2、3 列并为 4 水平列安排  $z_1$  因素, $z_2$  安排在第 4 列,则  $z_1$ 、 $z_2$  的交互项安排在 5、6、7 列,其余因素  $z_3$ 、 $z_4$ 、 $z_5$  分别安排在第 8、9、10 列。

本试验的目的是考查非光滑表面层在高温状态下的耐磨性,因此温度的取值非常重要,因为在工程实际中,对于一般工作条件下的机械零件,其工作温度大多低于  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,为此温度因素的 2 个水平取值为  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 。其他各因素所取水平见表 1 (外加载荷当作条件因素,经预试验定为  $30 \text{ N}$ )。

## 2 试验方法

摩擦磨损试验在 MG-2000 型销-盘式高速高温摩擦磨损试验机上进行,试样盘材料为 GCr15(直径为  $60 \text{ mm}$ 、厚  $10 \text{ mm}$ ),硬度 63HRC。试验在大气

表 1 因素水平

Tab. 1 Test factors and levels

水平	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$
1	150	250	300	180	400
2	200	350	500	300	600
3	250				
4	300				
$\Delta_j$	50	100	200	120	200
$\bar{z}_j$	225	300	400	240	500

表中: $\Delta_j$  为因素  $z_j$  的水平间隔, $\bar{z}_j$  为因素  $z_j$  的平均值。

及干摩擦条件下进行,每个试样销与盘对应磨损一次后,将试样盘用 600 号砂纸打磨光滑平整,再用水和酒精清洗干净。每组试验重复 3 次,试验结果取算术平均值。用 FA2004 型电子天平(精度  $0.1 \text{ mg}$ )称量试样磨损前后的质量,并以其质量差评价非光滑表面的耐磨性。

## 3 试验结果

试验结果见表 2,根据试验方案配列出计算格式见表 3,回归系数和统计检验亦在计算格式表中直接进行。由表 3 知,多项式  $X_2(z_1)$ ,  $X_3(z_1)$ ,  $X_1(z_1)X_1(z_2)$ ,  $X_2(z_1)X_1(z_2)$ ,  $X_3(z_1)X_1(z_2)$  的偏差平方和与其他项相比小得多,可以归入误差平方和。其中

表 2  $L_{16}(2^{15})$  试验方案及结果

Tab. 2  $L_{16}(2^{15})$  test plans and results

试验号	$z_1$ 直径 $/\mu\text{m}$	$z_2$ 间距 $/\mu\text{m}$	$z_3$ 温度 $/^\circ\text{C}$	$z_4$ 时间 $/\text{s}$	$z_5$ 转速 $/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$y_i$ 质量 差/ $\text{mg}$
1	150	250	300	180	400	7.88
2	150	250	500	300	600	15.56
3	150	350	300	180	400	8.37
4	150	350	500	300	600	16.08
5	200	250	300	180	600	8.26
6	200	250	500	300	400	13.96
7	200	350	300	180	600	8.78
8	200	350	500	300	400	14.44
9	250	250	300	300	400	8.36
10	250	250	500	180	600	12.69
11	250	350	300	300	400	8.87
12	250	350	500	180	600	13.16
13	300	250	300	300	600	9.01
14	300	250	500	180	400	11.06
15	300	350	300	300	600	9.23
16	300	350	500	180	400	11.51

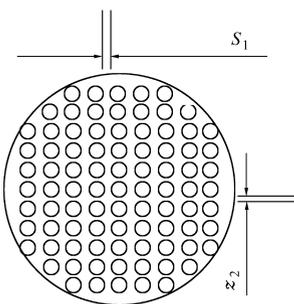


图 1 试样凹坑分布示意图

Fig. 1 A draws of concaves distribution of specimen

$$D_{aj} = \sum_{i=1}^N X_a^2(z_{ij}) \quad B_{aj} = \sum_{k=1}^b X_a(z_{kj}) Y_k$$

$$b_{aj} = B_{aj}/D_{aj} \quad S_{aj} = b_{aj} B_{aj}$$

根据表3的计算结果,忽略对磨损试验结果影响较小项,回归平方和及其自由度为

$$S_T = S_1 + S_4 + S_8 + S_9 + S_{10} = 6.4582 + 0.4727 + 102.5663 + 10.9065 + 4.8952 = 125.3$$

$$f_T = 15$$

总平方和及其自由度为

$$S = \sum_{i=1}^{16} y_i^2 - \frac{1}{16} \left( \sum_{i=1}^{16} y_i \right)^2 =$$

$$2078 - \frac{1}{16} \times 176.73^2 = 125.879 \quad f = 15$$

剩余平方和及其自由度为

$$S_R = S - S_T = 125.879 - 125.3 = 0.579$$

$$f_R = f - f_T = 10$$

对回归方程进行检验

$$F_T = \frac{S_T/f_T}{S_R/f_R} = 25.06/0.0579 = 432.82 > F_{0.01}(5, 10) = 5.64$$

回归方程的可信度为99%,回归方程可表达为

$$\bar{y} = 11.05 - 0.2841X_1(z_1) + 0.1719X_1(z_2) + 2.5379X_1(z_3) + 0.8256X_1(z_4) + 0.5531X_1(z_5) \quad (1)$$

$X_1(z_1)$ 、 $X_1(z_2)$ 、 $X_1(z_3)$ 、 $X_1(z_4)$ 、 $X_1(z_5)$ 均为正交多项式的一次项,其计算方法为

$$\psi_1(z) = \frac{z - \bar{z}}{\Delta} \quad X_j(z) = \lambda_j \psi_j(z)$$

$\lambda_j$ 为系数,可查表<sup>[8]</sup>。将 $X_1(z_1)$ 、 $X_1(z_2)$ 、 $X_1(z_3)$ 、 $X_1(z_4)$ 和 $X_1(z_5)$ 的值代入方程(1)中,可得回归方程

$$\bar{y} = -0.01136z_1 + 0.00344z_2 + 0.02538z_3 + 0.014z_4 + 0.005531z_5 - 3.644 \quad (2)$$

表3 试验计算格式( $y_i$ 表示非光滑试样的磨损量)

Tab.3 Test calculation formats( $y_i$  represents the wear loss of non-smooth specimen surfaces)

序号	$X_0$	$X_1(z_1)$	$X_2(z_1)$	$X_3(z_1)$	$X_1(z_2)$	$X_1(z_1)X_1(z_2)$	$X_2(z_1)X_1(z_2)$	$X_3(z_1)X_1(z_2)$	$X_1(z_3)$	$X_1(z_4)$	$X_1(z_5)$	$y_i/\text{mg}$	$y_i^2$
1	1	-3	1	-1	-1	3	-1	1	-1	-1	-1	7.88	62.1
2	1	-3	1	-1	-1	3	-1	1	1	1	1	15.56	242.1
3	1	-3	1	-1	1	-3	1	-1	-1	-1	-1	8.37	70.1
4	1	-3	1	-1	1	-3	1	-1	1	1	1	16.08	258.6
5	1	-1	-1	3	-1	1	1	-3	-1	-1	1	8.26	68.2
6	1	-1	-1	3	-1	1	1	-3	1	1	-1	13.96	194.9
7	1	-1	-1	3	1	-1	-1	3	-1	-1	1	8.78	77.1
8	1	-1	-1	3	1	-1	-1	3	1	1	-1	14.44	208.5
9	1	1	-1	-3	-1	-1	1	3	-1	1	-1	8.36	69.9
10	1	1	-1	-3	-1	-1	1	3	1	-1	1	12.69	161.0
11	1	1	-1	-3	1	1	-1	-3	-1	1	-1	8.87	78.7
12	1	1	-1	-3	1	1	-1	-3	1	-1	1	13.16	173.2
13	1	3	1	1	-1	-3	-1	-1	-1	1	1	9.01	81.2
14	1	3	1	1	-1	-3	-1	-1	1	-1	-1	11.06	122.3
15	1	3	1	1	1	3	1	1	-1	1	1	9.23	85.2
16	1	3	1	1	1	3	1	1	1	-1	-1	11.51	132.5
$D_{aj}$	16	80	16	80	16	80	16	80	16	16	16	177.2	2085.5
$B_{aj}$	177.2	-23.6	0.18	0	3.66	-1.04	-0.3	-0.28	39.7	13.8	8.32		
$b_{aj}$	11.1	-0.295	0.011	0	0.229	-0.013	-0.019	-0.004	2.481	0.863	0.52		
$S_{aj}$		6.962	0.002	0	0.837	0.014	0.0056	0.001	98.51	11.9	4.326		

从回归方程中可得试验条件下各因素对磨损量影响的重要程度顺序依次为温度、磨损时间、凹坑直径、转速、凹坑密度。试验条件下,凹坑直径对磨损量的影响较大,且随着凹坑直径的增大,磨损量减

小;凹坑密度对磨损量也有一定的影响,但其影响程度比凹坑直径要小得多。通过部分正交多项式进行回归设计,建立了非光滑凹坑单元体尺寸及凹坑密度等因素对耐磨性影响的经验公式。

## 4 耐磨机理的初步分析

金属的磨损机理十分复杂,它与应力状态、工作与润滑条件、表面形态、材料的组织结构与性能及环境与介质的化学作用等一系列因素有关。从基础理论方面看,涉及到接触力学、金属塑性变形及断裂、特殊条件下的相变、疲劳理论、表面物理及物理化学以及腐蚀问题等等,是一个多学科的复杂问题。在本次试验所选择的非光滑尺寸及分布密度范围内,在温度和凹坑间距等因素相同的情况下,凹坑直径越大,试样的耐磨性能越好的原因主要是:非光滑表面凹坑单元体对其周边形成的“阴影效应”,在一定程度上使增强体对基体起到了屏蔽与保护作用,凸起部分起到了支撑载荷、钝化磨屑、吸收能量的作用,从而调节了颗粒间的应力状态。凹坑直径越大,“阴影效应”越显著;同时非光滑形态结构单元体能

够产生有利于减小切向力的法向微振动,减小了磨屑与材料的接触面积和接触时间,因此,在磨损过程中可以减小或延迟粘着磨损程度,从而大大减轻磨屑对材料表面的划伤,且凹坑直径越大,法向微振动越明显。此外凹坑直径越大,凹坑内能“容纳”的空气和磨屑越多,从而在一定程度上减少了摩擦磨损界面上参与“犁削、切削”作用的磨屑数量,使得磨损量趋于减小。

## 5 结束语

通过部分正交多项式回归设计,分析了凹坑形非光滑单元体尺寸及凹坑密度等因素对 55 号钢耐磨性的影响,并对耐磨机理进行了初步分析,为今后研究非光滑凹坑表面形态机械零部件的高温耐磨性提供了试验依据及初步机理分析。

## 参 考 文 献

- 1 Rohde G, ligerman Y K, Etsion I. Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components[J]. Trib. Trans., 2002, 45(4): 444~449.
- 2 Ronen A, Etsion I, Kligerman Y. Friction-reducing surface-texturing in reciprocating automation components[J]. Trib. Trans., 2001, 44(3): 359~366.
- 3 任露泉,王再宙,韩志武. 仿生非光滑表面滑动摩擦磨损试验研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(2): 86~88.  
Ren Luquan, Wang Zaizhou, Han Zhiwu. Experimental research on sliding wear of bionic non-smoothed surface[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(2): 86~88. (in Chinese)
- 4 任露泉,王再宙,韩志武. 激光处理非光滑凹坑表面耐磨试验的均匀试验研究[J]. 材料科学与工程, 2002, 20(2): 214~216.  
Ren Luquan, Wang Zaizhou, Han Zhiwu. Research on wear resistance of concave non-smoothed surface with well-distribution design [J]. Materials Science & Engineering, 2002, 20(2): 214~216. (in Chinese)
- 5 王再宙,韩志武,任露泉. 激光处理非光滑凸包表面的耐磨性试验[J]. 吉林大学学报, 2002, 32(2): 45~48.  
Wang Zaizhou, Han Zhiwu, Ren Luquan. Research on wear resistance of non-smoothed surface with regular burrs[J]. Journal of Jilin University, 2002, 32(2): 45~48. (in Chinese)
- 6 邓宝清,任露泉,苏岩,等. 模拟活塞缸套摩擦副的仿生非光滑表面的摩擦学研究[J]. 吉林大学学报, 2004, 34(1): 79~84.  
Deng Baoqing, Ren Luquan, Su Yan, et al. Tribological study on bionically unsmoothed surface modeling piston-cylinder friction pair[J]. Journal of Jilin University, 2004, 34(1): 79~84. (in Chinese)
- 7 杨卓娟. 凹坑形仿生非光滑轧辊耐磨性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.  
Yang Zhuojuan. Research of wear-resistance on roller with biomimetical non-smooth concave surface[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- 8 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2001.