

# 激光表面织构化对 45 钢摩擦磨损性能的影响

李亚军<sup>1</sup>, 逢显娟<sup>1a</sup>, 孙乐民<sup>1</sup>, 牛一旭<sup>1a</sup>, 张永振<sup>1a</sup>

(1.河南科技大学 a.高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室  
b.材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** **目的** 研究表面织构对 45 钢干摩擦和乏油状态下摩擦磨损性能的影响。**方法** 用激光加工的方法在 45 钢表面加工出不同面密度的凹坑织构, 在 UMT-2 型多功能摩擦磨损试验机上以球-盘副考察凹坑密度在干摩擦和乏油条件下对 45 钢摩擦磨损性能的影响。**结果** 在干摩擦条件下, 织构密度在 4% 时, 摩擦配副的摩擦系数最小, 稳定摩擦系数为 0.56。随着织构密度的增大, 摩擦系数也逐渐增大, 当织构密度增大至 16.2% 时, 配副摩擦系数最大, 稳定摩擦系数为 0.72。在乏油条件下, 织构密度在 4% 时, 摩擦系数为 0.39, 小于未织构试样摩擦配副。凹坑密度增大后, 其摩擦系数大于未织构试样, 但是均在 0.43 左右。在干摩擦和乏油条件下, 织构化试样的磨损率都小于未织构试样, 并且随着织构密度的增大, 磨损率先减小后增加, 织构密度在 8.1% 时, 抗磨效果最好。**结论** 表面织构能收集磨粒, 储存润滑油, 从而起到良好的减磨作用。

**关键词:** 45 钢; 激光织构化; 摩擦磨损; 织构密度; 干摩擦; 乏油

**中图分类号:** TG115.5+8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)08-0147-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.021

## Effects of Laser Surface Texturing on Friction and Wear Properties of 45 Steel

LI Ya-jun<sup>1</sup>, PANG Xian-juan<sup>1a</sup>, SUN Le-min<sup>1</sup>, NIU Yi-xu<sup>1a</sup>, ZHANG Yong-zhen<sup>1a</sup>

(1.a.National and Local Joint Engineering Laboratory for High-end Bearing Tribology and Application,  
b.School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effects of surface texture on wear behavior and mechanism of 45 steel under dry friction and starved lubrication condition. The dimple textures with different densities were produced on the surface of 45 steel by laser processing. Ball-on-disk was used on UMT-2 multifunctional friction wear testing machine to study the influence of dimple density on the friction and wear properties of 45 steel under the condition of dry friction and starved lubrication. When the texture density in dry friction was 4%, the friction coefficient of friction pairs was the minimum and the stable friction coefficient reached 0.56. The friction coefficient increased as the texture density rose. As the texture density increased to 16.2%, the friction coefficient reached the maximum and the stable friction coefficient reached 0.72. Under the starved lubrication condition, when the texture density was 4%, the friction coefficient was 0.39 that was smaller than that of non-textured ones. When

收稿日期: 2018-03-15; 修订日期: 2018-05-21

**Received:** 2018-03-15; **Revised:** 2018-05-21

**基金项目:** 国家自然科学基金(U1404504); 固体润滑国家重点实验室开放课题(LSL-1710); 河南省科技厅工业攻关项目(182102210291)

**Fund:** Supported by National Natural Science Foundation of China (U1404504), the Open Foundation of State Key Laboratory of Solid Lubrication (LSL-1710) and the Project of the Department of Science and Technology of Henan Province (182102210291)

**作者简介:** 李亚军(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为材料摩擦学。

**Biography:** LI Ya-jun (1990—), Male, Master, Research focus: material tribology.

**通讯作者:** 逢显娟(1981—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为材料摩擦学及表面工程。

**Corresponding author:** PANG Xian-juan (1981—), Female, Associate professor, Ph. D., Research focus: material tribology and surface engineering.

the dimple density increased, the friction coefficient was larger than that of non-textured ones, but all the values were around 0.43. Under dry friction and starved lubrication conditions, the wear rate of textured samples was smaller than that of non-textured ones. The wear rate firstly decreased and then increased with the increase of the texture density. When the texture density was 8.1%, the anti-wear effect was the optimum. The surface texture can collect abrasive particles and store lubricant, thus providing good anti-friction effects.

**KEY WORDS:** 45 steel; laser texturing; friction and wear; texture density; dry friction; starved lubrication condition

大量的工程实践和现代仿生学研究表明,摩擦副的表面形貌对材料的摩擦磨损性能有显著的影响。摩擦副的表面并非越光滑越好,将材料表面加工成一定形状的表面微结构可以有效地改善材料的摩擦磨损性能<sup>[1-2]</sup>。近年来,人们对表面织构在减摩、减阻、降噪等方面的作用做了大量工作并取得了良好的成效<sup>[3-6]</sup>。目前,表面织构的加工方法有很多种,其中主要包括离子刻蚀、表面喷丸处理、机械刻蚀、化学刻蚀以及激光加工等<sup>[7-9]</sup>。与其他方法相比,激光加工技术具有效率高、精度高、无污染等特点而被广泛应用。

表面织构在干摩擦和油润滑条件下的作用机理有所不同<sup>[10-11]</sup>,而乏油下的机理更复杂。胡天昌等<sup>[12]</sup>通过栓-盘摩擦磨损试验研究了激光织构化对 45 钢干摩擦性能的影响,发现较大的织构密度及较大的孔径更有利于减摩抗磨,认为凹坑在摩擦过程中起到捕获磨屑的作用,减小了磨粒磨损,从而提高材料耐磨性。齐焯等<sup>[13]</sup>在环的表面加工出不同密度的织构,采用环-块式摩擦副研究了织构密度对材料摩擦磨损性能的影响,发现织构内及边缘硬度提高,织构密度小于 20%时,密度越大,减摩效果越明显,认为织构凹坑的存在改变了试件的应力分布,从而有利于缓解上试件的磨损。宋起飞等<sup>[14]</sup>在铸铁汽车制动盘毂材料表面制备出具有规则分布的凹坑、条纹和网格等微结构,并研究其摩擦磨损性能,发现织构化试样的摩擦系数和耐磨性均有所提高,而网格状织构具有最优的减磨效果。马晨波等<sup>[15]</sup>在富油条件下研究不同织构密度对材料摩擦学性能的影响发现,表面织构使摩擦副更易进入流体润滑,但同等工况下,表面织构的存在不一定降低摩擦系数。纪敬虎等<sup>[16]</sup>在 45 钢表面制备 V 形凹坑,发现了油润滑下 V 形槽能降低试样的摩擦系数, V 形槽角度和边长越大,摩擦系数越小。

然而,实际工况中,作为典型的摩擦副,如轴承、齿轮等核心基础零部件,在运转过程中可能出现乏油的情况。例如,许多处于高速运转油润滑条件下的传动齿轮在一些紧急工况下,由于供油不足使得润滑油膜厚度急剧下降,整个传动系统的温度场平衡遭到破坏,齿面温度迅速升高,此时油膜压力分布趋于 Hertz 接触状态,导致齿轮齿面出现胶合、点蚀等现象,甚至齿轮传动瞬间失效,造成严重的经济损失。再如直升机变速箱,在工作过程中,特别在意外情况下,因润滑不畅导致其处于乏油润滑的紧急状态,如采取措施不及时将造成极大的人员及财产损失<sup>[17]</sup>。在航空航

天领域,在漏油的情况下,直升机传动系统不能在正常润滑条件下工作,会进入乏油润滑阶段,并最终进入无油润滑阶段<sup>[18]</sup>。另一方面,随着科学技术的快速发展和服役条件的苛刻化(高温、高速、重载、载流等),大量摩擦副的润滑环境被突破,采用干摩擦副已成为许多工况的被迫选择。因此,研究乏油及干摩擦条件下金属摩擦副的摩擦磨损行为具有较高的理论意义和实际价值。

本文利用激光加工技术在常用工程材料 45 钢表面制备了不同密度的表面织构,研究其在干摩擦和乏油条件下对材料摩擦磨损性能的影响。采用球-盘接触的方式,在 UMT-2 型摩擦磨损试验机上进行往复试验;采用三维形貌仪和扫描电镜表征磨损形貌,分析织构对磨损性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 试验材料及微凹坑的加工

激光加工试样的基材为 45 钢(下试样),其尺寸为  $\phi 30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。用砂纸对试样表面进行打磨,并在抛光机上进行抛光至粗糙度  $Ra 0.2 \mu\text{m}$ ,然后用丙酮在超声波中清洗。激光加工采用苏州德龙激光股份有限公司生产的 FPS31 型紫外激光精细微加工设备,激光器波长 355 nm,平均功率 7 W,脉宽小于 25 ns。加工参数为:脉冲频率 30 kHz,扫描速度 1 mm/s,输出功率 4.9 W。

织构密度  $S_p$  的计算公式为  $S_p = \frac{\pi r^2}{(L+d)^2}$ , 其中:

$r$  为凹坑半径,  $L$  为凹坑间距,  $d$  为凹坑直径。用激光加工的方法在试样表面制备出 4 种不同凹坑密度的表面织构,通过改变凹坑间距,保证织构密度相同,表面织构微坑尺寸及分布见表 1。采用三维轮廓仪对

表 1 表面织构化微坑尺寸及分布  
Tab.1 Dimension and distribution of dimples on textured samples

Shape	Diameter ( $d$ )/ $\mu\text{m}$	Dimples area density ( $S_p$ )/%	Dimples spacing ( $L$ )/ $\mu\text{m}$	Depth / $\mu\text{m}$
Dimples	90	4	306	32~35
		8.1	190	
		12.1	138	
		16.2	108	

其形貌进行表征, 图 1 为织构密度为 12.1% 时的三维形貌, 从中可以看出, 激光加工出了较为规整的微结构, 凹坑深度约为 35  $\mu\text{m}$ 。

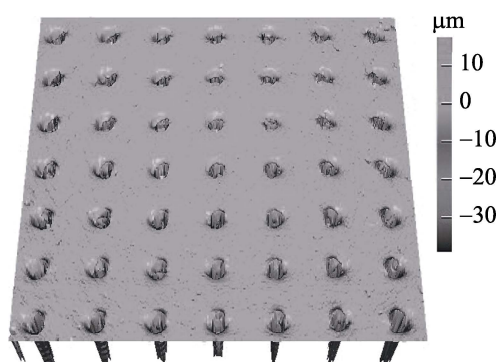


图 1 表面织构的三维形貌

Fig.1 3D topographies of surface texture

## 1.2 摩擦磨损试验

摩擦磨损试验在 UMT-2 型多功能摩擦磨损试验机上进行, 摩擦副接触方式为球-盘式。上试样为直径 6 mm 的 GGr15 钢球, 下试样为织构化和未织构的 45 钢样块。干摩擦的试验条件为: 载荷 10 N, 滑动速度 8 mm/s, 试验时间 20 min, 往复行程 8 mm。乏油摩擦为在试样表面加 0.1  $\mu\text{L}$  的润滑油(润滑油采用 PAO4 基础油, 黏度为 16.9 mPa·s), 其他参数不变。采用 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜和 NANO-FOCUS 三维轮廓仪对试样表面的磨痕形貌进行分析。

## 2 结果及分析

### 2.1 激光织构化对试样表面硬度的影响

利用 MH-3 型数字显微硬度仪对试样的表面硬

度进行测量(加载 25 g, 保载 10 s), 发现织构化区域的硬度约为 162.4HV, 而未织构化区域的硬度约为 166.8HV, 对比可知, 试样激光加工前后的硬度差别不大。分析其原因是激光在材料表面作用的时间很短, 并且加工后用细砂纸打磨并在抛光机上抛光。

### 2.2 织构密度对摩擦系数的影响

图 2 和图 3 分别是干摩擦和乏油条件下织构面与未织构面摩擦系数随时间的变化曲线, 图 4 是两种条件下的平均摩擦系数。从图 2 和图 4 中可知, 未织构试样的摩擦系数为 0.71, 织构密度为 4% 时的摩擦系数最小, 约为 0.56。随着织构密度的增大, 试样的摩擦系数也随之增大, 当织构密度达到 16.2% 时, 织构化试样的摩擦系数大于未织构试样, 约为 0.72。干摩擦条件下, 凹坑的存在能够收集磨屑, 而未织构试样与钢球对磨时易发生粘着磨损, 因此具有较大摩擦系数。在微坑直径相同的情况下, 织构密度小意味着微

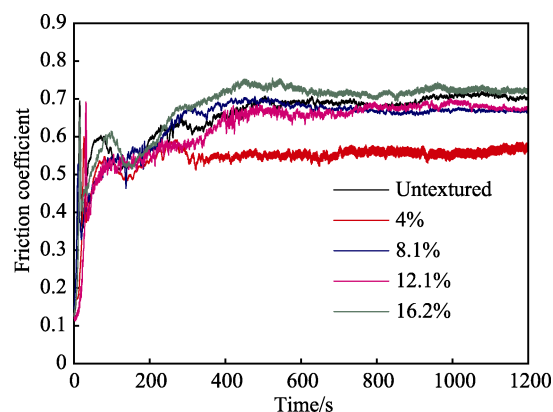


图 2 干摩擦下不同织构密度试样的摩擦系数曲线  
Fig.2 Curve for friction coefficient of different texture densities under dry friction

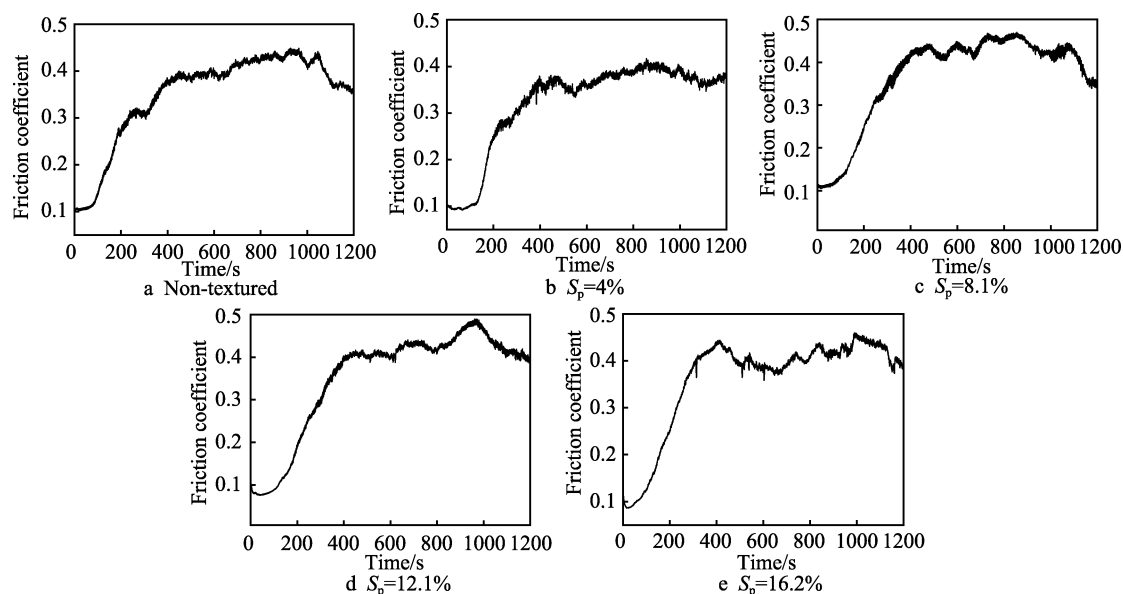


图 3 乏油下不同织构密度试样的摩擦系数曲线

Fig.3 Curve for friction coefficient of different texture densities under starved lubrication condition

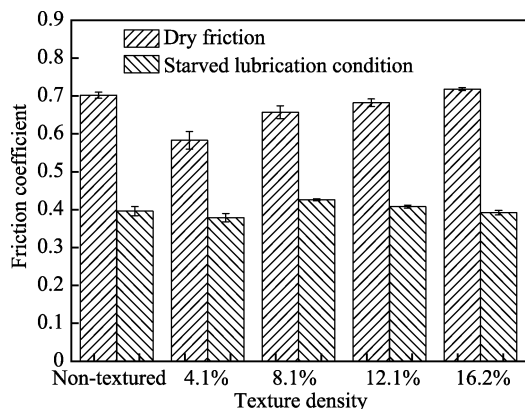


图4 不同织构密度试样在干摩擦和乏油条件下的摩擦系数

Fig.4 Friction coefficient of different texture densities under dry friction and starved lubrication condition

坑间距增大。由于间距增大，摩擦副表面的粗糙度降低，使得摩擦力矩变小，从而表现出较低的摩擦系数。

从图3和图4中可知，在乏油条件下，未织构试样与钢球对磨时的摩擦系数为0.42；织构密度为4%的试样的摩擦系数小于未织构试样，为0.39；当密度增大到8.1%时，摩擦系数达到最大，为0.45。织构密度继续增大，试样的摩擦系数反而减小。织构密度为12.1%时，摩擦系数为0.43；密度为16.2%时，摩擦系数为0.41；这两种密度下织构对摩擦系数的影响并不明显。这说明在乏油条件下，织构密度对摩擦系数的影响较为复杂，织构的存在不一定会减小摩擦系数。造成这一现象的原因是：在乏油条件下，不仅要

考虑织构对接触状态的影响，还有凹坑“储油器”内少量的润滑油，二者都对摩擦系数有影响。试验采用球-盘接触方式，摩擦副接触区域很小，在同一凹坑直径下，织构密度越大，其间距也小，试验过程中摩擦副接触表面的凹坑数量多，织构对接触状态及“储油器”的影响越复杂。

从图2和图3中可以看到，干摩擦下，摩擦系数从实验开始时就迅速升高；而乏油条件下，在试验开始约100 s内，摩擦系数为0.1左右，之后才逐渐上升。这可能因为试验开始前，用液枪滴加了0.1  $\mu\text{L}$ 的润滑油，试验开始时，摩擦副接触区域小，此时润滑油充足，可以形成润滑膜；随着试验的进行，接触面积增大，润滑油也在损耗，可能在100 s时润滑膜损坏，摩擦系数急剧增大。

从图4中可知，干摩擦和乏油状态下，织构密度为4%的摩擦系数最小，而乏油状态下，织构密度为8.1%的摩擦系数最大。其原因可能是干摩擦下，凹坑的存在能收集磨屑，减小粘着，从而起到减摩作用。在微坑直径相同的情况下，织构密度减小意味着微坑间距增大。由于间距增大，光滑面积与凹坑的面积比例增大，使得摩擦力矩变小，因此在织构密度为4%时具有较低的摩擦系数。乏油条件下，与干摩擦相比，织构的存在不仅能收集磨粒，还能储存润滑油，织构密度越大，表面越粗糙。而此时磨痕上凹坑数量增多，凹坑中的润滑油又能起到减小摩擦系数的作用，两者的综合作用使摩擦系数在织构密度4%时最小，8.1%时最大。

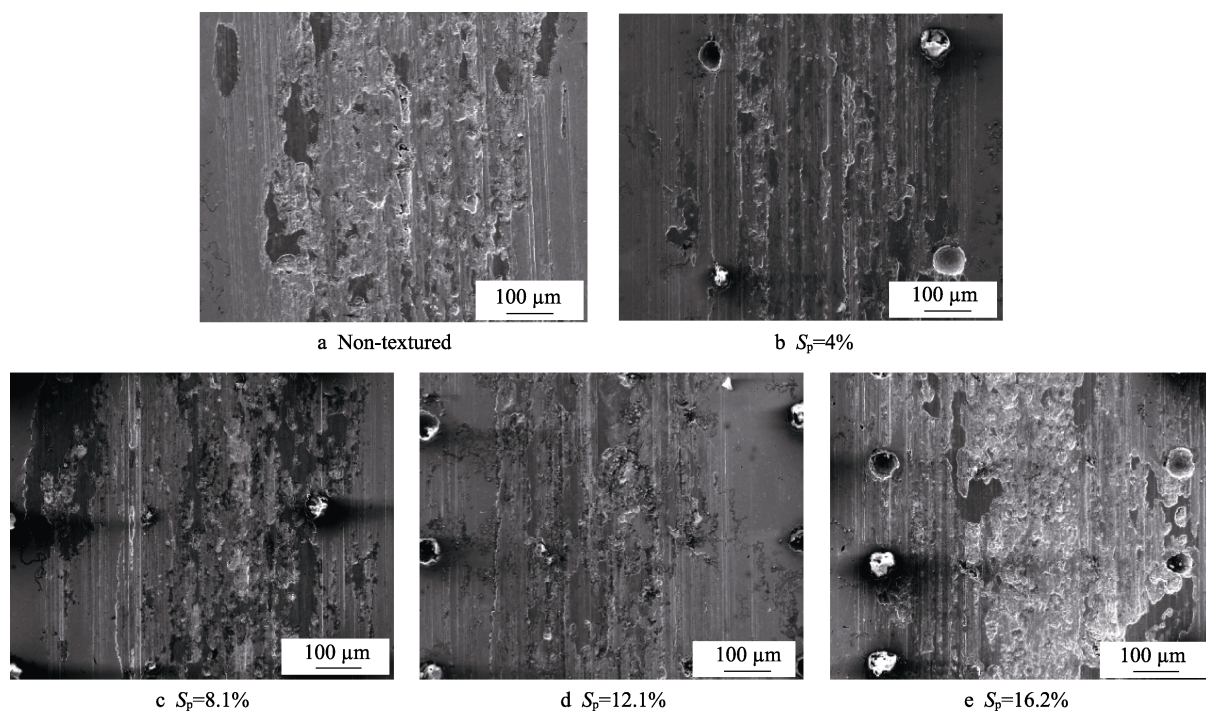


图5 干摩擦条件下磨痕的微观形貌

Fig.5 SEM micrographs of worn morphologies under dry friction



## 2.3 磨痕形貌及磨损机理分析

图 5 是干摩擦条件下磨痕的微观形貌。可以看出, 试样的磨损主要表现为磨粒磨损和粘着磨损, 未织构试样和织构密度为 16.2% 的试样材料剥落严重, 剥落坑明显, 而其他织构化试样材料剥落较少, 主要为磨粒磨损, 粘着磨损很轻。

图 6 是磨痕的三维形貌。干摩擦时, 钢-钢对磨过程中发生严重的粘着磨损, 可以看到磨痕呈现沟槽状, 磨痕的深度最大, 但没有超过  $10\text{ }\mu\text{m}$ , 而凹坑的深度则大于  $30\text{ }\mu\text{m}$ , 图 5 所示织构化试样磨痕上的凹坑均已经被磨屑所覆盖, 无法清晰地看到, 这说明凹坑能收集磨屑。在干摩擦条件下, 表面织构能够储存

和容纳磨屑, 减轻由于磨屑的犁沟作用而产生的摩擦磨损。此外, 当摩擦表面接触时, 真实接触只发生在一些离散的点或微小的面积上, 使名义接触面上的真实接触概率趋于平均, 进而改善材料微观表面的支撑能力, 从而提高了抗磨性<sup>[19]</sup>。

图 7 是乏油条件下磨痕的微观形貌, 可以看出, 织构化试样与钢球对磨时, 磨损机理以磨粒磨损为主, 而未织构试样摩擦过程中同时存在着磨粒磨损和粘着磨损。无织构和织构密度 4% 时, 试样的磨痕上有大量材料剥落, 剥落坑比较明显; 而密度增大到 8.1% 时, 磨痕上的剥落坑几乎消失, 试样的磨损主要是磨粒磨损; 织构密度增大至 16.2% 时, 试样的磨损再次加剧。图 8 是图 7d 中 A 区域的放大图, 从中可

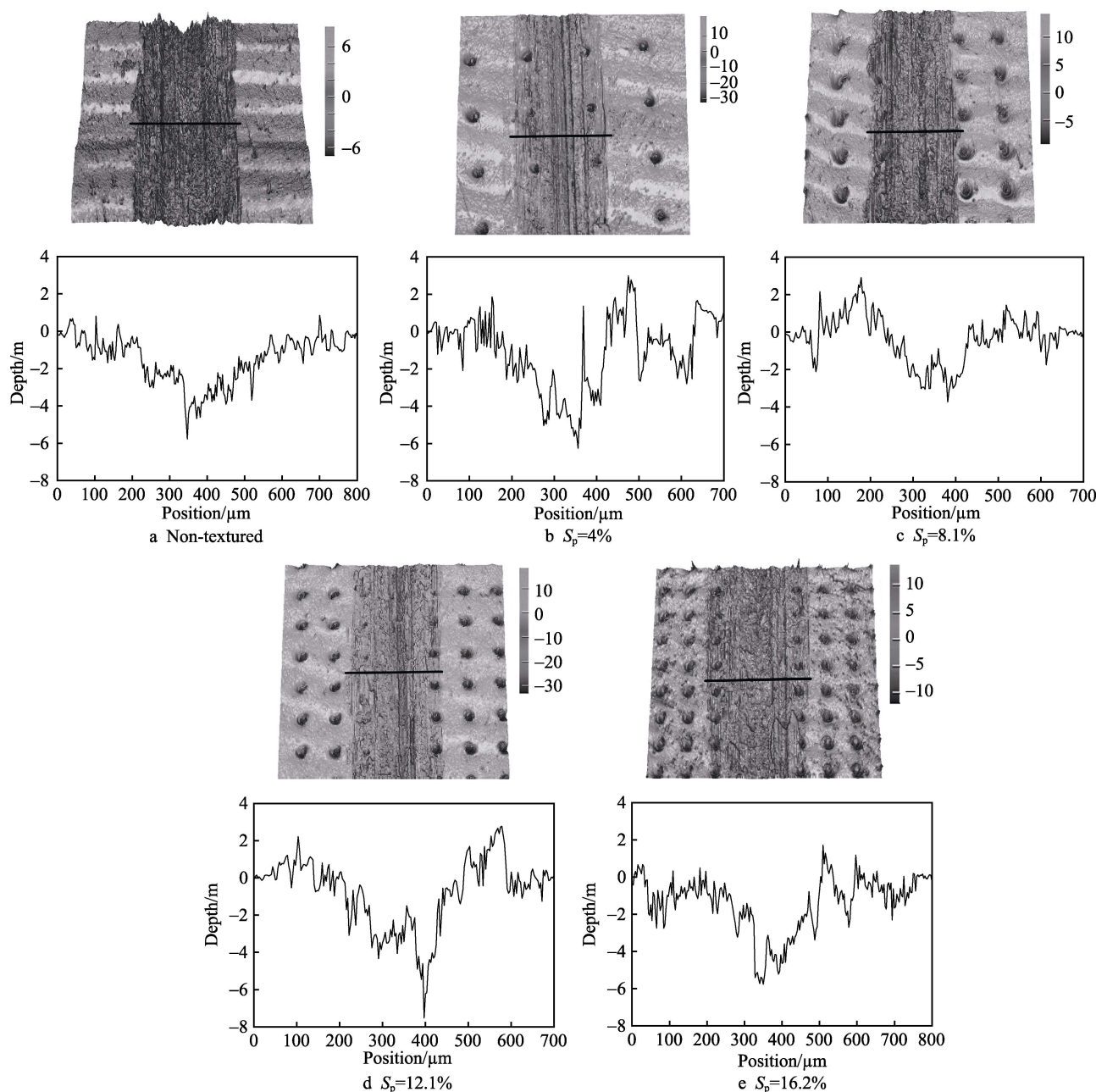


图 6 干摩擦条件下磨痕的三维形貌

Fig.6 3D topographies of worn morphologies under dry friction

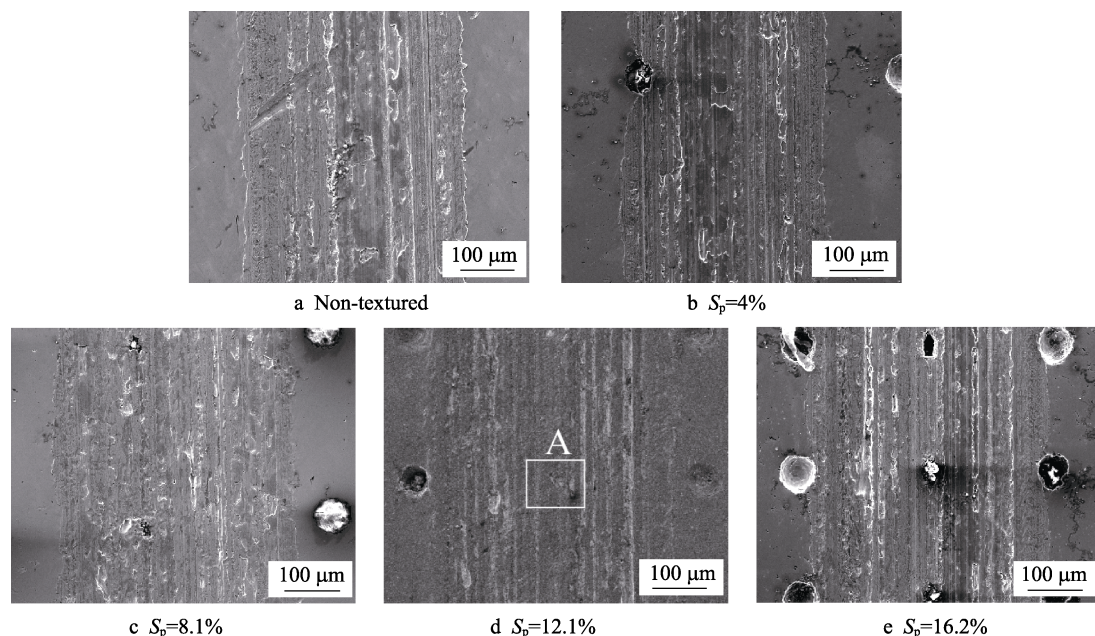


图7 乏油条件下磨痕的微观形貌

Fig.7 SEM micrographs of worn morphologies under starved lubrication condition

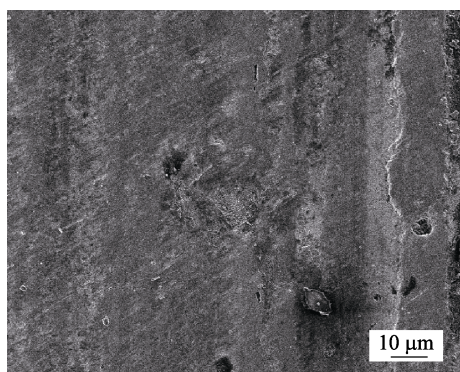


图8 图7d中A区域的放大图

Fig.8 Magnification of position A in Fig.7d

知, 凹坑能收集磨屑, 从而起到减磨作用。

图9是磨痕的三维形貌图。在乏油条件下, 未织构面与钢球对磨时, 粘着磨损严重, 因而导致磨痕上边缘堆积大量的磨屑。此外, 可以发现, 织构密度为16.2%时, 试样磨痕深度大的犁沟总是在两个凹坑之间, 而凹坑及凹坑边缘处的磨痕深度较浅。这是因为随着试样表面的磨损, 凹坑的体积缩小使凹坑中存储的油液被挤出, 形成挤压膜, 从而起到减磨作用。

## 2.4 干摩擦和乏油条件下磨损率分析

图10是不同织构密度下干摩擦和乏油条件下磨损率的对比。可以看出, 干摩擦和乏油条件下, 织构化试样的磨损率均小于未织构试样, 织构的存在能起到提高材料摩擦磨损性能的作用。两种不同工况下, 织构化试样的磨损率随织构密度的增大, 先减小后增大, 这说明存在一个最优的织构密度, 使得织构的减磨作用达到最大。与干摩擦相比, 乏油润滑的磨损率

在织构密度为8.1%时降到最小值, 之后随着织构密度的增大, 变化不大, 而干摩擦下的磨损率则明显的上升趋势。当试样的磨损率降到最低值时, 与无织构试样相比, 干摩擦条件下的磨损率降低了53.2%, 乏油润滑下降了62.6%。干摩擦和乏油下, 均为织构密度为8.1%时减磨效果最好。这可能因为干摩擦下主要为粘着磨损和磨粒磨损, 未织构试样摩擦副真实接触面积较大, 容易发生粘着磨损。织构密度小, 磨痕上凹坑数量少, 易发生材料粘着; 而织构密度增大, 虽然磨痕上凹坑数量增多, 但凹坑被磨屑充满, 并且粗糙度增大, 产生较多磨粒而加剧磨损, 因此织构密度为8.1%时, 磨损率最小。乏油条件下, 凹坑不仅能收集磨粒, 还可以提供润滑油, 从而减轻材料表面的粘着。织构密度较小时, 凹坑储油及收集磨粒的作用小, 织构的减磨效果不好; 织构密度增大, 磨痕上凹坑数量增多, 能提供更多的润滑油, 但此时并没有形成完整的润滑油膜, 并且织构密度的增大使得粗糙度也增大, 加剧磨损, 因而织构密度为8.1%时减磨效果最好。

对比图4和图10中摩擦系数和磨损率变化趋势可知, 干摩擦条件下, 织构密度较小时, 织构化试样的摩擦系数和磨损率均小于未织构试样。但当织构密度为16.2%时, 摩擦系数大于未织构试样, 而磨损率却小于未织构试样, 这说明试样表面织构化后减磨的真正原因是凹坑的存在, 而非摩擦系数的减小。乏油条件下, 织构化试样的磨损率均小于未织构试样, 但摩擦系数与磨损率的变化趋势并不一致, 且有的织构化试样的摩擦系数还高于未织构试样, 因此织构化试样减磨的原因不是摩擦系数小。综上所述, 45钢表面织构化提高抗磨性的真正原因在于凹坑的存在。



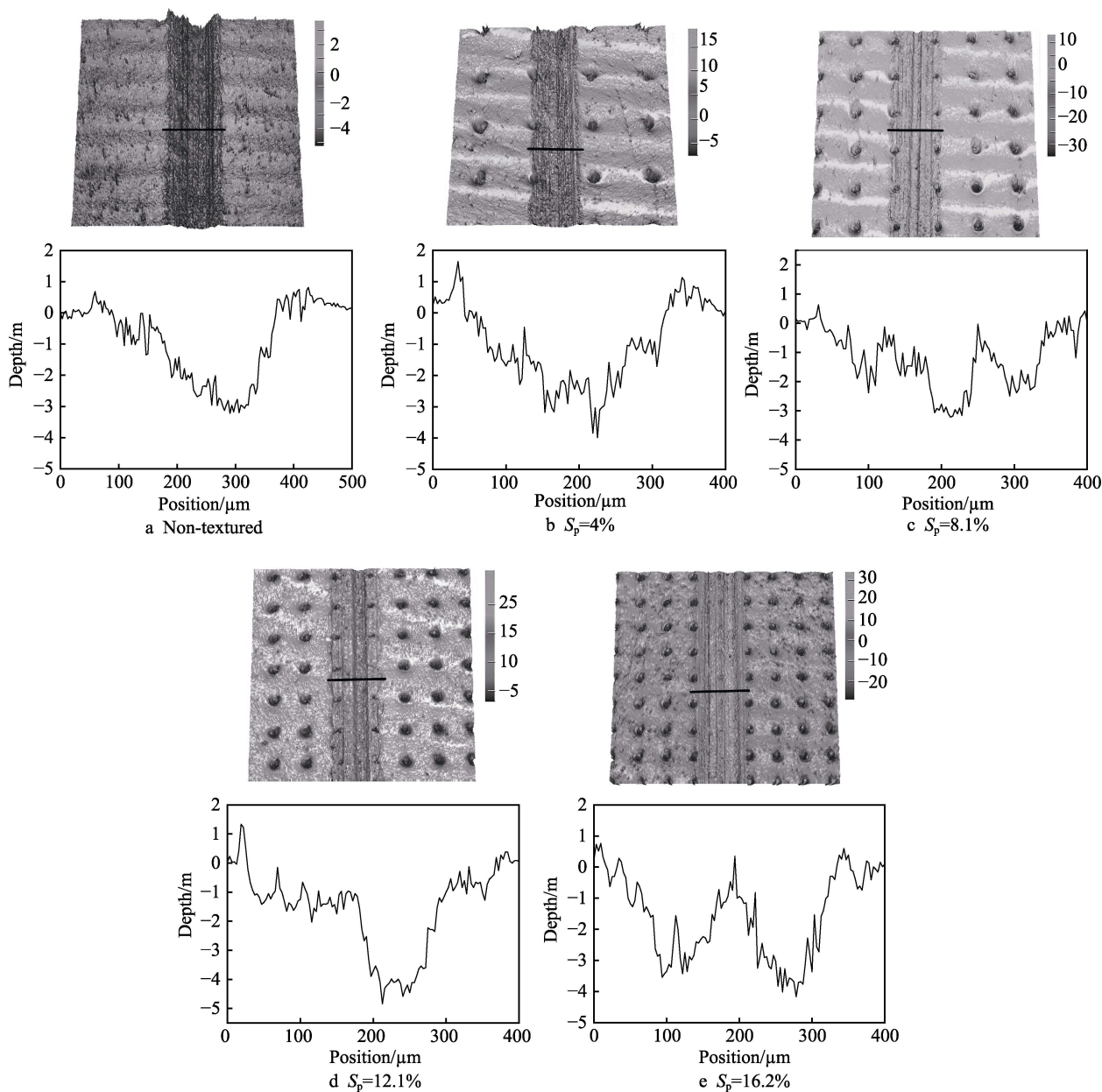
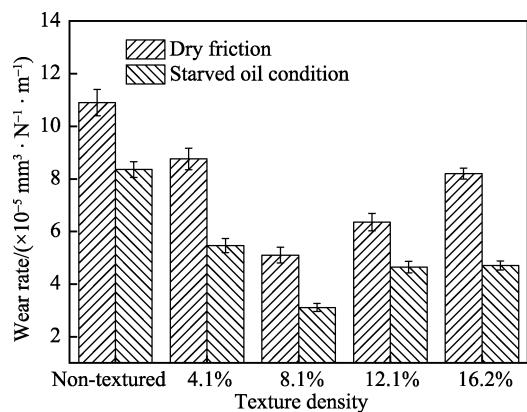


图 9 乏油下磨痕的三维形貌

Fig.9 3D topographies of worn morphologies under starved lubrication condition

图 10 不同织构密度试样在干摩擦和乏油条件下的磨损率  
Fig.10 Wear rate of different texture densities under dry friction and starved lubrication condition

### 3 结论

1) 干摩擦条件下, 随着织构密度的增大, 试样的摩擦系数增大, 织构密度达到 16.2% 时, 摩擦系数大于无织构试样, 磨损机理是磨粒磨损和粘着磨损。凹坑织构能够收集磨屑, 起到一定的减摩作用。

2) 乏油条件下, 随着织构密度的增大, 摩擦系数先增大再减小, 但是与未织构试样差别不大, 磨损机理主要是磨粒磨损。主要原因是织构对接触状态及“储油器”的共同影响。

3) 干摩擦和乏油条件下, 织构化试样的磨损率与无织构试样相比均降低。织构化试样的磨损率均随着织构密度的增大, 先降低后增大, 织构密度均在

8.1%时减磨效果最明显。45 钢表面织构化提高抗磨性的真正原因在于凹坑的存在。

#### 参考文献:

- [1] 张玉周. 表面织构化改善摩擦学性能研究综述[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2013, 32(1): 64-67, 70.  
ZHANG Yu-zhou. A review of the improvement of the tribological properties of surface texture[J]. Journal of Chengdu University (natural science edition), 2013, 32(1): 64-67, 70.
- [2] 万轶, 熊党生. 激光表面织构化改善摩擦学性能的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(6): 603-607.  
WAN Yi, XIONG Dang-sheng. Study of laser surface texturing for improving tribological properties[J]. Tribology, 2006, 26(6): 603-607.
- [3] ETSION I. State of the art in laser surface texturing[J]. Journal of tribology transactions of the ASME, 2005, 127: 248-253.
- [4] 韩中领, 汪家道, 陈大融. 凹坑表面形貌在面接触润滑状态下的减阻研究[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(1): 10-16.  
HAN Zhong-ling, WANG Jia-dao, CHEN Da-rong. Drag reduction by dimples on surfaces in plane-plane contact lubrication[J]. Tribology, 2009, 29(1): 10-16.
- [5] 汪久根, 陈仕洪. Koch 雪花表面织构设计与高铁空气摩擦噪声分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(7): 78-83.  
WANG Jiu-gen, CHEN Shi-hong. Bionic design of Koch snowflake surface texture and its effects on air frictional noise of high speed train[J]. Journal of mechanical engineering, 2014, 50(7): 78-83.
- [6] 盖小红, 莫继良, 刘铭倩, 等. 织构化表面处理抑制界面摩擦尖叫噪声[J]. 中国表面工程, 2015, 28(3): 102-107.  
GE Xiao-hong, MO Ji-liang, LIU Ming-qian, et al. Suppressing friction-induced squeal noise at interface by surface texturing[J]. China surface engineering, 2015, 28(3): 102-107.
- [7] WAKUDA M, YAMAUCHI Y, KANZAKI S, et al. Effect of work piece properties on machinability in abrasive jet machining of ceramic materials[J]. Precision engineering, 2002, 26(2): 193-198.
- [8] 历建全, 朱华. 表面织构及其对摩擦学性能的影响[J]. 润滑与密封, 2009, 34(2): 94-98.  
LI Jian-quan, ZHU Hua. Surface texture and its influence on tribological properties[J]. Lubrication engineering, 2009, 34(2): 94-98.
- [9] 闫利文. 微机械制造工艺及其应用[J]. 现代制造工程, 2004(3): 83-85.  
YAN Li-wen. Micromechanical fabrication processes and applications[J]. Modern manufacturing engineering, 2004(3): 83-85.
- [10] PETTERSSON U, JACOBSON S. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts[J]. Tribology international, 2003, 36: 857-864.
- [11] ITO H, KANEDA K, YUHTA T, et al. Reduction of polyethylene wear by concave dimples on the frictional surface in artificial hip joints[J]. Journal of arthroplasty, 2000, 15(3): 332-338.
- [12] 胡天昌, 胡丽天, 丁奇. 45#钢表面激光织构化及其干摩擦特性研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(1): 46-52.  
HU Tian-chang, HU Li-tian, DING Qi. Tribological properties of laser textured surfaces of 45# steel under dry friction[J]. Tribology, 2010, 30(1): 46-52.
- [13] 齐焯, 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.  
QI Ye, CHANG Qiu-ying, WANG Bin, et al. Research on tribological behavior of laser surface textured under dry sliding[J]. Acta armamentarii, 2015, 26(2): 200-205.
- [14] 宋起飞, 周宏, 李跃, 等. 仿生非光滑表面铸铁材料的常温摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(1): 24-27.  
SONG Qi-fei, ZHOU Hong, LI Yue, et al. Friction and wear properties of cast-iron material with bionic non-smooth surface under normal temperature[J]. Tribology, 2006, 26(1): 24-27.
- [15] 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.  
MA Chen-bo, ZHU Hua, ZHANG Wen-qian, et al. Tribology property of textured surface under reciprocating motion[J]. Tribology, 2011, 31(1): 50-55.
- [16] 纪敬虎, 符永宏, 华希俊, 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.  
JI Jing-hu, FU Yong-hong, HUA Xi-jun, et al. Tribological properties of 45 steel surface with V grooves[J]. China surface engineering, 2014, 27(4): 107-111.
- [17] 邵飞先. 乏油条件仿生耦合齿轮材料的摩擦磨损行为[D]. 长春: 吉林大学, 2015.  
SHAO Fei-xian. Friction and wear behavior of bionic coupling gear material under starved lubrication conditions[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [18] 丁有永. 乏/无油润滑航空齿轮传动的磨损及温度场分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.  
DING You-yong. Research on wear and temperature field of aeronautic gear drive under starved lubrication and dry friction[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [19] 秦襄培, 陈汉新. HMWPE 人造表面织构摩擦学研究[J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(12): 63-66.  
QIN Guo-pei, Chen Han-xin. Study on tribological performance of UHMWPE texture surface[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2009, 31(12): 63-66.