

# 表面纳米化对 316L 不锈钢干摩擦性能的影响

杨诗婷, 邢永明, 姜爱峰, 郎风超, 李继军

(内蒙古工业大学 理学院, 呼和浩特 010051)

**摘要:** **目的** 研究表面纳米化 316L 不锈钢干摩擦磨损性能, 以获得合理的喷丸时间, 提高 316L 不锈钢的使用寿命。 **方法** 采用普通喷丸强化方法对 316L 不锈钢进行表面纳米化处理, 利用洛氏硬度计测量了纳米化前后材料表面洛氏硬度; 利用激光共聚焦显微镜观察了纳米化前后材料表面三维形貌, 测量了材料表面的粗糙度; 利用扫描电子显微镜观察了表面纳米化处理后横截面的金相组织; 利用材料表面性能综合测试仪在干摩擦条件下进行了摩擦磨损实验, 测量了材料的摩擦系数; 利用扫描电子显微镜观察了磨痕表面形貌, 分析了材料的磨损机理。 **结果** 与未纳米化试样相比, 喷丸时间为 15 min 时, 表面硬度提高 9.7%, 而表面粗糙度降低 17.6%, 干摩擦系数降低 17.3%; 喷丸时间为 30 min 时, 表面硬度提高 34.1%, 粗糙度降低 35.1%, 干摩擦系数降低 28.8%。未纳米化试样呈现典型的粘着磨损和磨粒磨损机制, 而纳米化处理后试样则主要呈现疲劳磨损和磨粒磨损机制。 **结论** 表面纳米化处理后试样表面硬度随处理时间的增加而增加, 粗糙度随处理时间的增加而降低, 干摩擦系数随处理时间的增加而减小。喷丸处理时间较短时以疲劳磨损为主, 处理时间较长时以磨粒磨损为主。

**关键词:** 表面纳米化; 316L 不锈钢; 干摩擦; 粗糙度; 摩擦系数; 磨损机理

**中图分类号:** TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)10-0070-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.10.011

## Effects of Surface Nanocrystallization on Dry Friction Properties of 316L Stainless Steel

YANG Shi-ting, XING Yong-ming, Jiang Ai-feng, LANG Feng-chao, LI Ji-jun

(School of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**ABSTRACT:** The work aims to obtain a reasonable shot blasting time and improve the service life of 316L stainless steel by studying dry friction and wear properties of 316L stainless steel subject to surface nanocrystallization. Normal shot peening method was used to apply surface nanocrystallization treatment to 316L stainless steel. The surface Rockwell hardness for nanocrystallized and un-nanocrystallized samples was measured by Rockwell hardness meter. Three-dimensional morphology of nanocrystallized and un-nanocrystallized samples was observed by laser confocal microscope. The surface roughness was also

收稿日期: 2016-03-26; 修订日期: 2016-06-09

Received: 2016-03-26; Revised: 2016-06-09

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20121514130001); 国家自然科学基金项目 (11562016); 内蒙古自然科学基金 (2013MS0107); 内蒙古工业大学校基金 (x201415)

Fund: Supported by Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20121514130001), Supported by the National Natural Science Foundation of China (11562016), Inner Mongolia Natural Science Foundation (2013MS010), Supported by Foundation of Inner Mongol University of Technology (x201415)

作者简介: 杨诗婷 (1981—), 女, 博士研究生, 从事喷丸强化及冲击效应研究。

Biography: YANG Shi-ting (1981—), Female, Doctor student, Research focus: shot peening and impact effect.

通讯作者: 邢永明 (1959—), 男, 博士, 教授, 主要研究实验细观力学。

Corresponding author: XING Yong-ming (1959—), Male, Doctor, Professor, Research focus: micro-experimental mechanics.

measured. The cross-sectional metallographic structure of samples after nanocrystallization was observed by scanning electron microscope. Friction coefficient of the material was measured by taking advantage of friction and wear experiment with a surface performance general-purpose tester under dry friction conditions. The grinding surface morphology was observed by scanning electron microscope and wear mechanism of the material was discussed as well. Compared with un-nanocrystallized samples, after shot blasting for 15 min, surface hardness of nanocrystallized samples increased by 9.7%, surface roughness reduced by 17.6% and dry friction coefficient reduced by 17.3%. After shot peening for 30 min, the surface hardness increased by 34.1%, surface roughness reduced by 35.1% and dry friction coefficient reduced by 28.8%. Un-nanocrystallized samples mainly showed fatigue wear and abrasive wear mechanism. In conclusion, the sample surface hardness after surface nanocrystallization increases with the increase of treatment time while both roughness and dry friction coefficient decrease with the increase of treatment time. The wear mechanism in a short shot peening is mainly fatigue wear, and that in a long shot peening is mainly abrasive wear.

**KEY WORDS:** surface nanocrystallization; 316L stainless steel; dry friction; roughness; friction coefficient; wear mechanism

表面纳米化可提高材料表面性能而不改变其化学组成, 其中喷丸强化是一种使用广泛的材料表面纳米化处理方法, 可有效提高材料的强度、硬度、耐磨性、耐腐蚀性、疲劳寿命等<sup>[1]</sup>。摩擦磨损性能是材料的重要使用性能之一, 研究纳米化材料的摩擦磨损性能是推进这种材料实用化不可或缺的工作。表面纳米化钢的摩擦磨损性能有很大提高<sup>[2-8]</sup>, 这主要归因于纳米化材料表面的纳米晶层和梯度组织<sup>[9]</sup>。不同摩擦条件产生的磨损机理有很大差别。一些学者对不同摩擦条件下表面纳米化材料的磨损机理进行了研究<sup>[10-18]</sup>。刘莉莉等<sup>[10]</sup>研究了 45# 钢表面纳米化晶层的高温磨损特性, 发现不同温度区间耐磨性能有所差别。黄舒等<sup>[13]</sup>研究了激光喷丸强化对 Ti13Nb13Zr 生物合金在 NaCl 溶液和 Hank's 溶液中摩擦性能的影响, 发现无论在 NaCl 溶液还是在 Hank's 溶液中, 激光喷丸强化材料的摩擦系数普遍降低, 未喷丸试样呈现典型的接触疲劳磨损和擦伤磨损机制, 而喷丸试样则主要呈现磨粒磨损和粘着磨损机制; Slobodan Mitrovic 等<sup>[15]</sup>对喷丸强化 36CrNiMo4 和 36NiCrMo16 合金钢在干摩擦和油润滑摩擦下的磨损行为进行了研究, 发现两种材料在干摩擦和油润滑摩擦时, 均以磨粒磨损和粘着磨损为主, 而干摩擦还伴有疲劳裂纹的产生。目前关于表面纳米化 316L 不锈钢干摩擦性能的报道较少。

本文将对 316L 不锈钢进行表面纳米化处理, 采用激光共聚焦显微镜观察表面纳米化前后试样表面三维形貌, 测量试样表面粗糙度。然后采用材料表面性能综合测试仪对处理前后试样在干摩擦

条件下进行往复滑动摩擦试验, 分析喷丸时间对表面纳米化后材料硬度、磨损量、摩擦系数的影响; 利用扫描电子显微镜观察磨痕表面形貌, 分析纳米化前后材料表面的磨损机理。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试件材料为 316L 不锈钢, 其主要化学成分(以质量分数计)为: Cr 16%~18%、Mo 1.8%~2.5%、Mn 2.0%、Si 1.0%、C 0.03%、S 0.03%、P 0.035%、Ni 12%~15%。用线切割法加工试样为  $\phi 80$  mm $\times$ 5 mm 的圆片。实验所用弹丸为高纯氧化锆珠, 其化学成分(以质量分数计)为: ZrO<sub>2</sub> 94.8%, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5 $\pm$ 0.2)%, 弹丸直径为 2.4 mm。氧化锆珠具有极好的韧性和耐冲击性, 在高速运转中不碎裂。

### 1.2 方法

实验前先将试件表面车削抛光至表面粗糙度  $R_a=11.98$   $\mu$ m, 并且用丙酮超声波清洗去污试件表面和弹丸。采用普通喷丸强化技术对 316L 不锈钢试样表面进行纳米化处理, 所用设备为成都晶纳格科技有限公司生产的 SNC-1 型金属材料表面纳米化试验机。弹丸直径为 2.4 mm、振动频率为 50 Hz, 喷丸时间分别选为 15、20、30 min。利用 QUNTA FEG650 扫描电子显微镜观察处理样品横截面的金相组织, 王水腐蚀 15 s。

摩擦磨损实验采用 CFT-1 型材料表面性能综

合测试仪,通过球-盘接触形式在直线往复运动条件下于室温进行干摩擦实验,偶件选用 $\phi 3$  mm的GCr15钢球,其洛氏硬度为HRC56,滑动速度为15 mm/s,单向滑动行程为5 mm,法向载荷为50 N,摩擦时间为10 min。试验前试样均用无水乙醇经超声波清洗并烘干。通过测量磨痕截面面积和磨痕长度,根据公式(1)可计算试件表面的体积磨损量,图1表示磨痕截面示意图。摩擦后采用QUNNTA FEG650扫描电子显微镜观察磨痕的表面磨损形貌,分析其磨损机理。为了直接测量喷丸表面纳米化后试样表面原始硬度,采用HR-150DT洛氏硬度计测量材料的表面硬度;采用激光共聚焦显微镜观察表面纳米化前后材料表面的三维形貌,测量材料表面的粗糙度。

$$w_v = S_N \times L \quad (1)$$

式中:  $S_N$  为磨痕截面面积( $\text{mm}^2$ );  $L$  为磨痕长度(mm)。

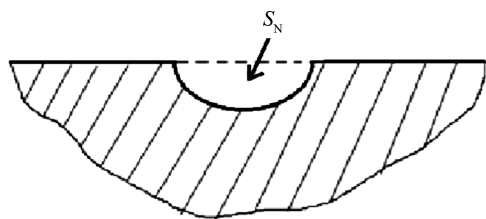


图1 磨痕截面示意图  
Fig.1 Sketch of attrition mark section

## 2 结果与讨论

### 2.1 表面纳米化处理后材料表面三维形貌

材料表面纳米化前后的三维形貌如图2所示,可见经表面纳米化处理后试样表面三维形貌发生显著变化。未纳米化试样表面形貌不均匀,经过车削抛光后会有明显的划痕,经测量,316L不锈钢车削抛光后的粗糙度为 $11.98 \mu\text{m}$ ;喷丸处理15 min后试样表面形貌变得均匀,划痕明显消失,粗糙度变为 $9.875 \mu\text{m}$ ,比未纳米化处理时降低了17.6%;喷丸处理30 min后,试样表面形貌更加均匀,粗糙度降为 $7.775 \mu\text{m}$ ,比未纳米化时降低了35.1%。说明对于原始表面较粗糙的试样,经表面纳米化处理过程后,试样表面的粗糙度明显降低。这是因为粗糙表面在表面纳米化处理过程中,通过大量弹丸的反复撞击,使试样表面的划痕被弹坑取代,撞击

时间越长,弹坑分布越均匀,所以表面形貌越均匀。同时粗糙表面硬度随喷丸处理时间的增加不断提高,使得弹丸撞击试样表面产生的弹坑尺寸越来越小,因而随喷丸处理时间的增加,试样表面粗糙度不断降低。

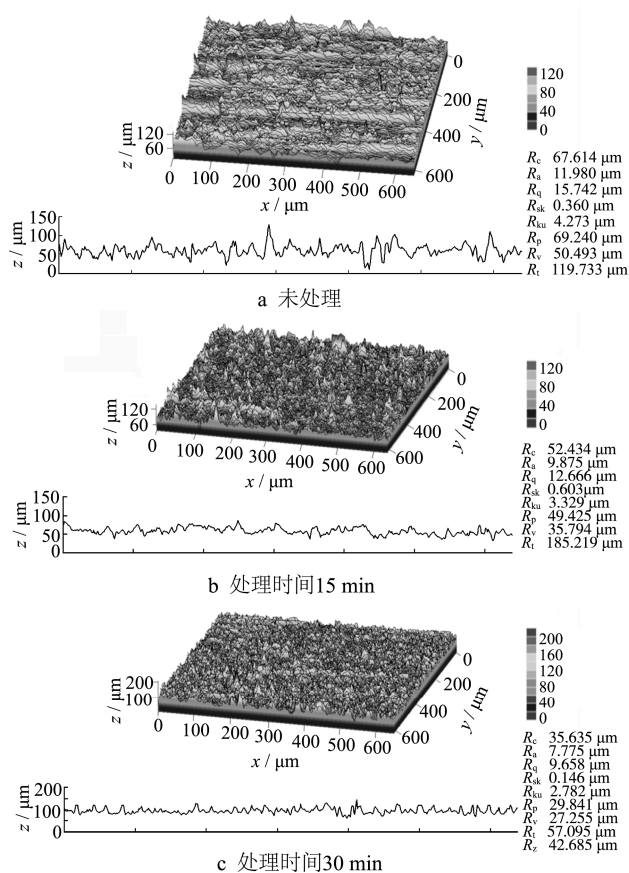


图2 表面纳米化前后材料表面的三维形貌图

Fig.2 The three-dimensional topography of material surface before and after nanocrystallization: a) unpeened, b)  $t=15$  min, c)  $t=30$  min

### 2.2 表面结构及硬度

对316L不锈钢喷丸表面纳米化工艺的效果在文献中已有介绍,TEM像及选区电子衍射花样的结果都证明表面层晶粒已细化为纳米晶,呈等轴状且取向随机<sup>[19]</sup>。图3为喷丸30 min时,316L不锈钢表面纳米化后样品横截面的金相组织,可以看出,由于大量弹丸反复撞击产生严重塑性变形而形成纳米层,在纳米层下方形成过渡层,纳米层和过渡层之间没有明显的界面。与基体相比,纳米层的晶粒尺寸明显细化。

弹丸直径为2.4 mm,振动频率为50 Hz,喷丸时间为15、20、30 min时,未纳米化试样和纳米化试样的表面洛氏硬度如图4所示。未纳米化试样

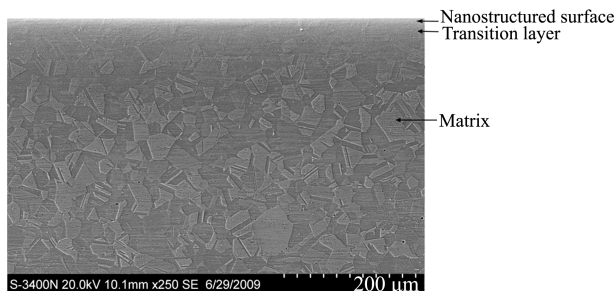


图 3 表面纳米化处理后样品横截面金相组织

Fig.3 Optical observation of the cross-sectional microstructures of samples after nanocrystallization

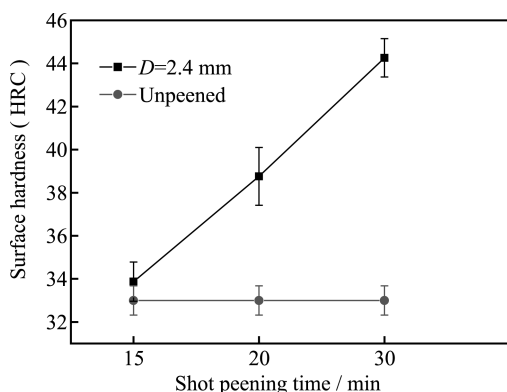


图 4 纳米化前后材料表面硬度分布

Fig. 4 The material surface hardness distribution before and after nanocrystallization

的表面洛氏硬度为 HRC33, 喷丸处理 15 min 时, 表面洛氏硬度为 HRC36.2, 与未纳米化试样相比, 表面硬度值提高了 9.7%; 喷丸时间为 20 min 时, 表面洛氏硬度为 HRC39.76, 与未纳米化相比, 表面硬度值提高了 20.5%; 喷丸时间 30 min 时, 表面洛氏硬度为 HRC44.26, 与未纳米化相比, 表面硬度提高了 34.1%。说明表面纳米化处理可以提高试件表面的硬度, 且随着处理时间的增加, 材料表层的洛氏硬度不断增大。这是因为表面纳米化处理时大量弹丸反复撞击试件表面, 使金属表面产生凹坑, 冲击表层区域晶粒得以细化, 从而强化不锈钢冲击区域, 提高了材料表面的硬度。

### 2.3 磨损量和摩擦系数

通过测量磨痕截面面积和磨痕长度, 根据公式 (1) 可计算试件表面的体积磨损量。图 5 对比了纳米化试样和未纳米化试样的体积磨损量。由图 5 可知, 未纳米化试样在 10 min 的干摩擦时间内的体积磨损量为  $1.08 \text{ mm}^3$ , 明显大于纳米化处理后试样的体积磨损量。而表面纳米化试样的体积磨损量

与喷丸处理时间有关, 纳米化试样的体积磨损量随处理时间的增加而减小。这间接说明喷丸处理时间越长, 弹丸反复撞击金属表面的次数越多, 强化效果越好。这是因为多次撞击产生的复合强化效应使材料表层的位错绕和位错墙更复杂, 组织结构更加致密。但是, 这并不是说随着喷丸时间的无限延长, 表面纳米化效应会无限增强。根据 Peyre<sup>[20]</sup>的研究结果显示, 随着冲击次数的增加, 金属表层的严重塑性变形层和塑性变形层的深度的增长速率减小, 喷丸表面纳米化处理时间存在一个临界值, 当超出这个临界值时, 随着处理时间的增加, 强化效应将不再继续。

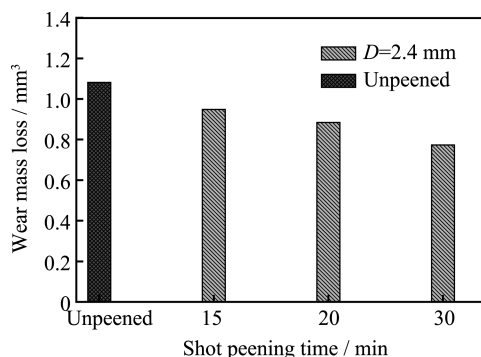


图 5 纳米化前后材料表面的磨损量

Fig. 5 The wear mass of sample before and after nanocrystallization

图 6 为未纳米化和不同喷丸时间下试样表面的摩擦系数变化曲线。可以看出, 摩擦时间为 2~4 min 时, 摩擦系数变化较稳定, 可以用这段时间内摩擦系数的算数平均值来作为摩擦系数的表征值。未纳米化试样表面的摩擦系数为 0.52; 喷丸时间为 15 min 时, 材料表面的摩擦系数为 0.43, 与未纳米化试样相比, 摩擦系数降低了 17.3%; 喷丸时间为 20 min 时, 材料表面的摩擦系数为 0.45, 与未纳米化试样相比, 摩擦系数降低了 13.5%; 喷丸时间为 30 min 时, 材料表面的摩擦系数为 0.37, 与未纳米化试样相比, 摩擦系数降低了 28.8%。可见, 未纳米化试样表面的摩擦系数明显大于纳米化处理后试样表面的摩擦系数。说明原始试样表面较粗糙时, 表面纳米化处理可以降低材料表面的摩擦系数, 增加材料的耐磨性。摩擦系数降低的主要原因有两方面: 一是试件表面粗糙度降低, 对应的体积磨损量降低, 磨屑堆积减少, 摩擦力波动能量减弱, 摩擦系数自激振动减弱<sup>[21]</sup>, 摩擦系数降低; 二是表面纳米化产生的晶粒细化和加工硬化等综合作用,

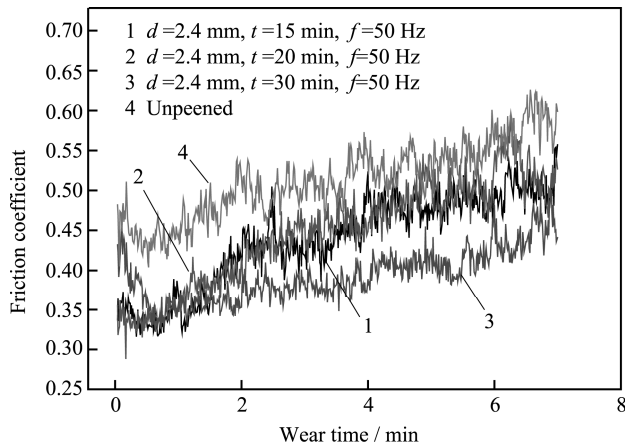


图6 未纳米化试样和纳米化试样的摩擦系数随时间的变化曲线

Fig.6 Friction coefficient of sample before and after nanocrystallization

使材料表面硬度提高,摩擦系数降低,增加耐磨性。

## 2.4 微观磨损机制

图7分别为未喷丸纳米化处理、喷丸时间15 min

和30 min时,试样摩擦表面放大500倍和5000倍的SEM照片。由图7a可以看到,其表面附带密集的粘着痕迹,粘着物尺寸较大,这是粘着磨损的典型特征。出现粘着磨损的主要原因是因为未喷丸时基体硬度相对较低,对磨钢球的硬度高,所以较软的基体材料不断粘附到钢球上形成磨屑和粘着块。另外,表面沿滑动磨损方向形成许多彼此平行、宽且深的犁沟,同时表面存在白色斑点状硬质颗粒,颗粒尺寸较大且数量不多,说明表面还存在磨粒磨损。图7b为图7a中方框位置放大5000倍时的微观形貌图,可以看出,未纳米化时脱落片层物分层较多,且出现较大块的磨屑。这是由于未纳米化时表面粗糙度较大,硬度较低,耐磨性较差。图7c为喷丸时间为15 min时磨痕表面放大500倍时的形貌图,可以看出,其磨痕表面出现众多裂纹并伴有明显的由疲劳剥落形成的凹坑,出现典型的接触疲劳磨损。出现疲劳磨损的主要原因为喷丸时间较短时,残余压应力的深度较浅<sup>[22]</sup>,疲劳抗力较弱,

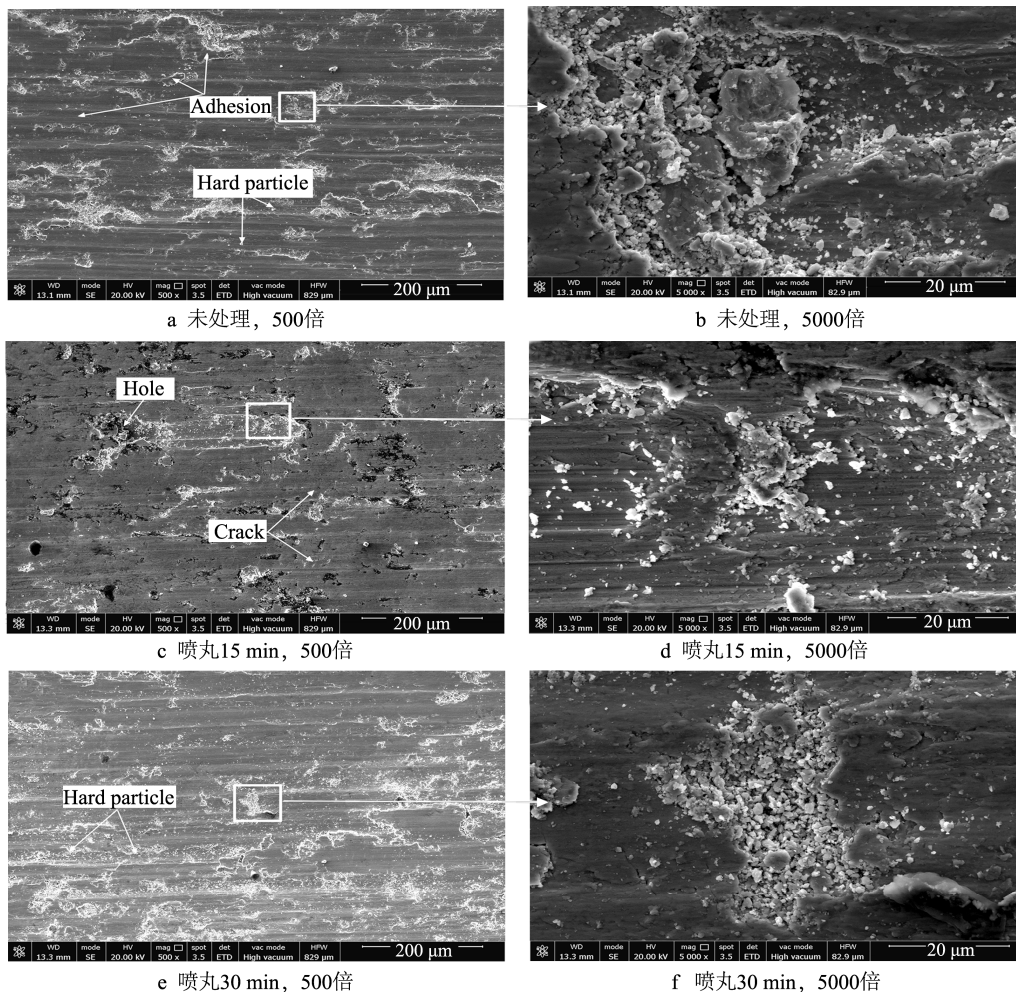


图7 摩擦表面的SEM图

Fig.7 SEM images of wear scar

从而出现疲劳剥落现象。图 7d 为图 7c 方框位置放大 5000 倍时的形貌图, 可以看出, 磨屑数量明显减少, 且磨屑尺寸较均匀, 无大块磨屑出现, 脱落片层物减少。说明喷丸处理 15 min 时, 试件表面的耐磨性增加。图 7e 为喷丸处理 30 min 后试件表面磨痕放大 500 倍的形貌图, 可以看出, 表面出现很多小且均匀的硬质颗粒, 且沿滑动磨损方向形成细而浅的梨沟, 磨损机制以磨粒磨损为主。磨粒磨损主要是由于磨损过程中对磨偶件的硬度较 316L 不锈钢的硬度高, 相对滑动时将不锈钢表面的部分金属推到磨球前方, 或把材料挤到与运动方向垂直的两侧, 此时从表面掉落并形成游离的坚硬颗粒, 在滑动力的作用下, 在表面形成梨沟。图中梨沟的深度较浅且宽度较窄, 梨沟之间距离较大, 说明磨粒尺寸较小且材料的磨损状态较平稳。试样喷丸处理 30 min 后, 表面疲劳剥落现象较少, 这是因为随着喷丸处理时间的增加, 材料表面压缩残余应力层的深度增加<sup>[22]</sup>, 一定程度上增加了试样的疲劳抗力。图 7f 为图 7e 中方框位置放大 5000 倍时的微观形貌图, 可以看出, 脱落物减少, 且磨屑为均匀的小颗粒。这是因为随着喷丸处理时间的增加, 材料表面形成高强度和高硬度的纳米晶层, 由于纳米层微粒尺寸减小, 所以磨损过程中产生的磨屑尺寸减小, 且没有大块脱落, 这也是纳米化材料耐磨性增加的原因之一。

### 3 结论

1) 表面纳米化处理后试样表层洛氏硬度明显提高, 而粗糙度显著降低。喷丸时间为 15 min 时, 表面硬度提高 9.7%, 而表面粗糙度降低 17.6%; 喷丸时间为 30 min 时, 表面硬度提高 34.1%, 粗糙度降低 35.1%。表面纳米化处理后试样表面体积磨损量显著降低, 且随喷丸时间的增加体积磨损量逐渐减小。

2) 原始试样的表面较粗糙时, 表面纳米化处理可以降低材料表面的摩擦系数, 增加材料的耐磨性。未纳米化时, 材料表面的摩擦系数为 0.52; 喷丸时间为 15 min 和 20 min 时, 摩擦系数分别为 0.43 和 0.45, 且变化规律相近; 当喷丸时间增加到 30 min 时, 摩擦系数降低为 0.37。

3) 未纳米化试样磨痕表面出现典型的粘着磨

损和磨粒磨损。喷丸处理 15 min 时试样磨痕表面出现典型的疲劳磨损, 喷丸处理 30 min 时试样磨痕的磨损机制以磨粒磨损为主。

### 参考文献

- [1] LU K, LU J. Surface Nanocrystallization (SNC) of Metallic Materials—presentation of the Concept behind a New Approach[J]. Journal of Materials Science & Technology, 1999, 15(3): 193—197.
- [2] WANG Z B, TONG N R, LI S, et al. Effect of Surface Nanocrystallization on Friction and Wear Properties in Low Carbon Steel[J]. Materials Science & Engineering A, 2003, 352(s1/2): 144—149.
- [3] MA G Z, XU B S, WANG H D, et al. Effect of Surface Nanocrystallization on the Tribological Properties of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel[J]. Materials Letters, 2011, 65(9): 1268—1271.
- [4] SHE D, YUE W, FU Z, et al. The Effect of Nitriding Temperature on Hardness and Microstructure of Die Steel Pre-treated by Ultrasonic Cold Forging Technology[J]. Materials & Design, 2013, 49(49): 392—399.
- [5] PRAKASH N A, GNANAMOORTHY R, KAMARAJ M. Friction and Wear Behavior of Surface Nanocrystallized Aluminium Alloy under Dry Sliding Condition[J]. Materials Science & Engineering B, 2010, 168(168): 176—181.
- [6] 李国宾, 关德林, 张明星. 表面纳米化中碳钢在干摩擦条件下的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学报, 2008, 28(1): 39—43.  
LI Guo-bin, GUAN De-lin, ZHANG Ming-xing. Friction and Wear Properties of Medium Carbon Steel by Means of Surface Nanocrystallization in Dry Sliding[J]. Tribology, 2008, 28(1): 39—43.
- [7] 刘阳, 吕晓仁, 刘刚, 等. Q235 钢高能喷丸纳米化表面的摩擦磨损行为[J]. 摩擦学报, 2010, 30(5): 472—478.  
LIU Yang, Lyu Xiao-ren, LIU Gang, et al. Wear Behavior of Nanocrystallization Surface of Q235 Steel by High Energy Peening[J]. Tribology, 2010, 30(5): 472—478.
- [8] 张兴权, 何广德, 汪世益, 等. 激光喷丸强化对调质 40Cr 钢组织及耐磨性的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(5): 138—142.  
ZHANG Xing-quan, HE Guang-de, WANG Shi-yi, et al. Effect of Laser Shot Peening on Microstructure and Wear Resistance of Quenched and Tempered 40Cr Steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(5): 138—142.
- [9] LU K, LU J. Nanostructured Surface Layer on Metallic Materials Induced by Surface Mechanical Attrition Treatment[J]. Materials Science & Engineering A, 2004, 357—377(1): 38—45.
- [10] 刘莉莉, 麦永津, 揭晓华, 等. 45#钢表面纳米化晶层的

- 高温磨损特性[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(3): 285—290.
- LIU Li-li, MAI Yong-jin, Jie Xiao-hua, et al. The Sliding Wear Behavior of Nano-crystalline Surface Layer on 45# Steel at Elevated Temperature[J]. Tribology, 2010, 30(3): 285—290.
- [11] 杨哲, 杨浩鹏, 吴晓春, 等. H13 钢双保温固体渗硼高温磨损机理[J]. 材料研究学报, 2014, 28(3): 220—226.
- YANG Zhe, YANG Hao-peng, WU Xiao-chun, et al. Friction and Wear Mechanism at Elevated Temperature of H13 Steel with a Duplex Pack Boriding Treatment[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2014, 28(3): 220—226.
- [12] 刘道新, 何家文. 经不同表面改性处理的钛合金的微动疲劳和微动磨损行为对比研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 2(1): 13—17.
- LIU Dao-xin, HE Jia-wen. Comparative Study on the Fretting Fatigue and Fretting Wear Behaviors of Titanium Alloy Subject to Various Surface Modifications[J]. Tribology, 2008, 28(1): 39—43.
- [13] 黄舒, 周建忠, 盛杰, 等. 激光喷丸强化对 Ti13Nb13Zr 生物合金摩擦性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(12): 3154—3158.
- HUANG Shu, ZHOU Jian-zhong, SHENG Jie, et al. Effect of Laser Shock Processing on Friction and Wear Properties of Ti13Nb13Zr Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(12): 3154—3158.
- [14] WANG Y Y, YUE W, SHE D S, et al. Effect of Surface Nanocrystallization on Tribological Properties of 316L Stainless Steel under MoDTC/ZDDP Lubrication[J]. Tribology International, 2014, 79 (11): 42—51.
- [15] SLOBODAN M, DRAGAN A, FATIMA Z, et al. Friction and Wear Behavior of Shot Peened Surfaces of 36CrNiMo4 and 36NiCrMo16 Alloyed Steels under Dry and Lubricated Contact Conditions[J]. Applied Surface Science, 2014, 290(1): 223—232.
- [16] ZHANG Y S, HAN Z, WANG K, et al. Friction and Wear Behaviors of Nanocrystalline Surface Layer of Pure Copper[J]. Wear, 2006, 260(9/10): 942—948.
- [17] LV X R, WANG S G, LIU Y, et al. Effect of Nanocrystallization on Tribological Behaviors of Ingotiron[J]. Wear, 2008, 264(7/8): 535—541.
- [18] BA D M, MA S N, MENG F J, et al. Friction and Behaviors of Nanocrystalline Surface Layer of Chrome-silicon Alloy Steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 202(2): 254—260.
- [19] 吕爱强, 刘春明, 刘刚. 表面机械研磨 316L 不锈钢诱导表层纳米化[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2004, 25(9): 848—850.
- LYU Ai-qiang, LIU Chun-ming, LIU Gang. Surface Nanocrystallization of 316L Stainless Steel Induced by Surface Mechanical Attrition Treatment[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2004, 25(9): 848—850.
- [20] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser Shock Processing of Aluminium Alloys Application to High Cycle Fatigue Behavior[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 210(s1/s2): 102—113.
- [21] 王安宇, 莫继良, 王正国, 等. 喷砂表面处理控制滑动摩擦尖叫噪声[J]. 中国表面工程, 2013, 26(4): 44—49.
- WANG An-yu, MO Ji-liang, WANG Zhen-guo, et al. Controlling Friction-induced Squeal by Surface Sandblasting Treatment[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(4): 44—49.
- [22] 赵艳丽, 王强, 杨庆祥, 等. 喷丸工艺参数对 A-100 高强度钢残余应力场的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(8): 10—13.
- ZHAO Yan-li, WANG Qiang, YANG Qing-xiang, et al. Effect of Shot Peening Parameters on Residual Stress Fields of A-100 High Strength Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(8): 10—13.