

表面纳米化对高锰钢磨料磨损性能的影响

严伟林¹, 方亮¹, 孙琨¹, 许云华²

(1. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安建筑科技大学耐磨材料研究所, 710055, 西安)

摘要: 利用传统的喷丸技术,在高锰钢表面制备出了具有纳米晶结构特征的表层,并利用X射线衍射仪及高分辨透射电子显微镜表征了表面纳米晶的微观组织结构特征. 喷丸处理试样的表层晶粒细化至纳米量级,喷丸60 min试样的表面晶粒尺寸约为3~8 nm. 随着喷丸处理时间的增加,试样表面硬度增加,晶粒尺寸减小. 利用三体磨料磨损试验机检验了喷丸处理前、后试样的磨料磨损性能,结果表明:喷丸时间为2~30 min时,试样的耐磨性随着喷丸时间的增加而增加;喷丸30 min试样的耐磨性提高了72%;过长的喷丸时间导致试样产生微裂纹而使耐磨性下降. 晶粒细化和硬度提高使磨损机理发生改变,未喷丸处理试样的磨损主要为微观切削,而喷丸处理试样的磨损主要为疲劳剥落,磨损机理的改变使材料的耐磨性提高.

关键词: 高锰钢; 纳米晶; 喷丸; 磨料磨损

中图分类号: TG142.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)05-0611-05

Effect of Surface Nanocrystallization on Abrasive Wear Properties in Hadfield Steel

Yan Weilin¹, Fang Liang¹, Sun Kun¹, Xu Yunhua²

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Institute of Wear Resistant Materials, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: A nano scale grains surface layer on Hadfield steel was produced by shot peening treatment. The microstructure within the surface layer of the shot peening treated sample was examined by X-ray diffraction (XRD) and high-resolution transmission electron microscope (HREM). The grain size of 3-8 nm was obtained on the sample surface after 60 min shot peening. With increasing shooting duration, the grains were refined and hardness increased in the treated sample surface. For the three-body abrasive wear, wear resistance could be improved after shot peening when glass particles served as abrasives, especially, the wear resistance of treated surface can be increased by 72% for 30 min shot peening duration. Nanocrystallization and surface hardening change the wear mechanism, and a lot of micro-cracks due to excessive shot peening lead to a weakened wear resistance.

Keywords: Hadfield steel; nanocrystalline; shot peening; abrasive wear

采用强烈塑性变形的方法可以在金属材料中获得纳米晶组织. 实现强烈塑性变形的的方法基本上可分为两类:一类是使材料的整体产生强烈塑性变形的的方法,如高压扭转法、等通道角挤压法和反复弯曲

平直法等^[1-2],利用这些方法可制备出块体纳米晶材料,但由于制备工艺复杂、成本高和材料外形尺寸有限制等原因的制约,这些方法难以在工业上取得实际应用;另一类是只使材料表面发生强烈塑性变形

的方法,如超声波喷丸法^[3-4],利用这种方法可以在材料的表面制备出一定厚度的纳米晶组织,即实现表面纳米化. 研究人员发现,经超声波表面喷丸实现的低碳钢表面纳米化,有助于减轻低碳钢的疲劳磨损效应^[4]. 此外,据文献^[5-7]报道,在冲击磨损条件下,高锰钢表面也可形成纳米晶及非晶.

根据文献^[8-9]的研究,虽然预加工硬化能提高材料的硬度,但并不能提高其耐磨性. 也许在文献^[8-9]的试验中,预加工硬化的程度不够,才有预加工硬化不能提高耐磨性的结论. 可以设想,如果在磨损前能利用预加工硬化把材料的硬度提高到接近或相当于磨料的硬度,将有可能提高其耐磨性.

本文利用传统喷丸技术对高锰钢进行表面喷丸处理,用X射线衍射仪(XRD)和高分辨透射电子显微镜(HREM)来表征试样表层的显微结构,利用三体磨料磨损试验机研究试样喷丸处理前、后的磨损性能,并结合磨损形貌的扫描电镜(SEM)观察,分析其磨损机理.

1 试验方法

试验采用高锰钢,其化学成分的质量分数为:C 1.15%, Mn 12.5%, Si 0.90%, S 0.05%, P 0.09%,其余为Fe及少量其他残存元素. 试样经1 050℃加热并保温120 min后水淬,获得单相奥氏体组织,晶粒尺寸大约为100~200 μm. 试样的喷丸面尺寸为40 mm×75 mm,采用气动式S170R喷丸机进行喷丸处理,喷丸工艺的主要参数为:空气压力0.18 MPa,直径0.2 mm的ZG30铸钢球型弹丸,喷射角85°,喷射距离130 mm,弹丸流量7 kg/min,喷丸处理时间分别选取2、7、15、30、60和120 min.

采用X'Pert MPD RRO X射线衍射仪对试样表面的物相和结构进行分析,并利用Scherrer方程^[10],根据衍射线的宽化值近似计算晶粒尺寸. 利用JEM-3010型高分辨透射电子显微镜观测试样喷丸表层的微观组织,工作电压为300 kV,电镜试样采用离子减薄方法制备. 用MH-5显微硬度测量仪测试试样的显微硬度,施加的载荷为0.49 N,加载时间为10 s. 磨损试验装置采用三体磨料磨损试验机(见图1),1Cr18Ni9Ti材质轨道(硬度为HRC31),磨损试验载荷为12.2 N,试样的滑动速度为0.48 m/s,磨料为硬度HV 500、粒径250~400 μm的玻璃砂,试验时间为40 min. 磨痕形貌的观察在S-2700扫描电镜上进行,利用TR-profilometer轮廓仪测试磨损面的粗糙度,并利用JSM-6700F场

发射扫描电镜观察喷丸试样的形貌.

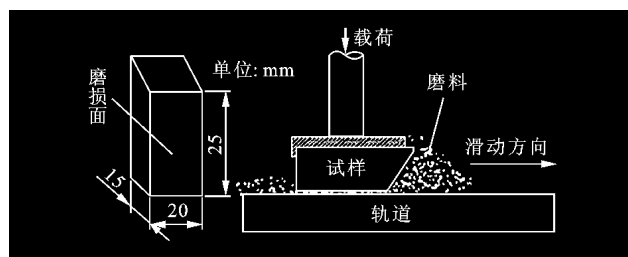


图1 三体磨料磨损试验装置示意图

2 试验结果

图2为喷丸处理前、后试样的XRD谱,可以看出组织仍为奥氏体,表明喷丸处理过程中没有发生马氏体转变. 另外,喷丸试样的Bragg衍射峰发生了明显宽化,从原理上讲衍射峰宽化是由晶粒细化和微观应变增大所引起的^[10]. 扣除微应变影响,计算得表层平均晶粒尺寸为11.1~17.4 nm. 这里需要指出的是,Scherrer法的计算值与实际值相比会有较大的误差,这是因为:X射线约有5 μm的穿透深度,反映的是距所测表面一定深度内平均的微观结构尺寸;塑性变形的非均匀性,也会影响到Scherrer法的精度. 但是,作为一种定性的辅助方法,该方法还是有一定参考价值的.

图3为喷丸试样横截面的光学显微组织照片,可见在表面以下约30 μm的深度范围内,变形的滑移线非常明显,说明已发生了严重的塑性变形.

图4为60 min喷丸试样表面和距离表面约20 μm深度处的TEM图像及相应的选区电子衍射(SAED)谱. 此时试样表面的晶粒尺寸已达到3~8 nm,而Scherrer法计算的数据与此有较大的误差. 测量表明,距离处理表面约20 μm深度处的晶粒尺寸为30~80 nm. 图5为2 min喷丸试样表面的TEM图像和相应的选区电子衍射谱,可测得试样表面的晶粒尺寸为30~40 nm.

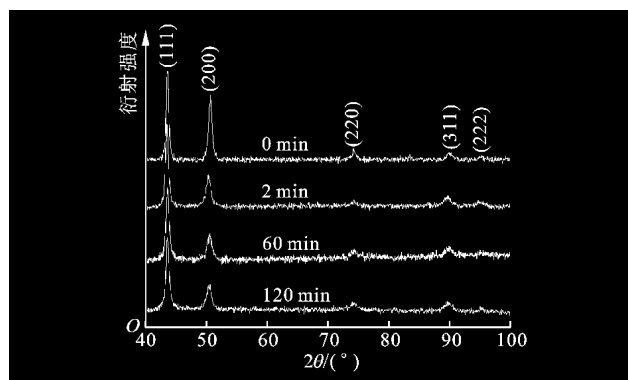


图2 表面喷丸处理前、后试样的X射线衍射谱

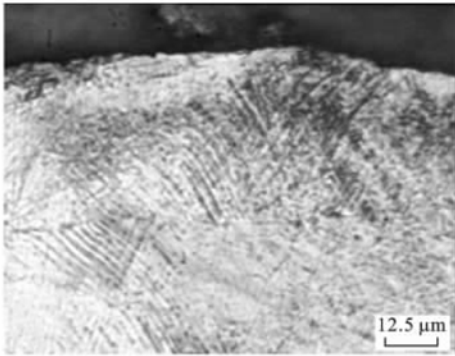
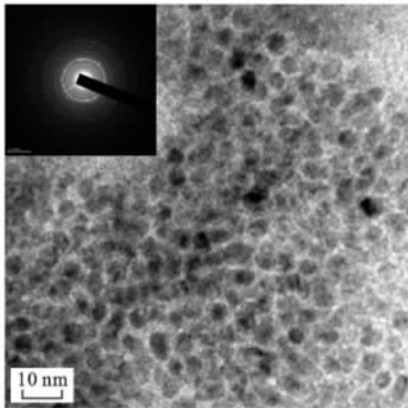
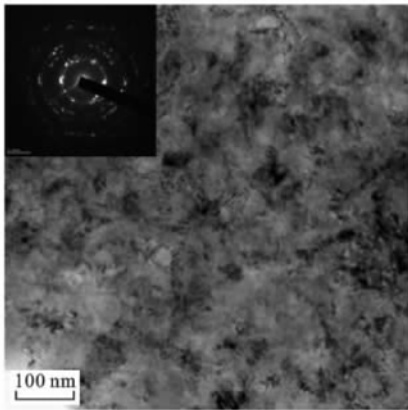


图 3 60 min 喷丸试样截面的金相组织



(a)试样表面



(b)距表面约 20 μm 深处

图 4 60 min 喷丸试样表面和距离表面约 20 μm 深处的 TEM 明场像和 SAED 谱

图 6 为喷丸处理前、后试样表面硬度的测量结果:试样起始硬度约为 HV256,硬度随喷丸时间的增加而提高,120 min 喷丸后,表面硬度增大到 HV774.图 7 所示为喷丸处理前、后试样耐磨性的变化:2~30 min 喷丸试样与未作喷丸处理的试样相比,耐磨性都有所增加,特别是 30 min 喷丸的试样,其耐磨性增加大约 72%;60 和 120 min 喷丸试样的耐磨性与未喷丸试样相比,却没有明显差别.图

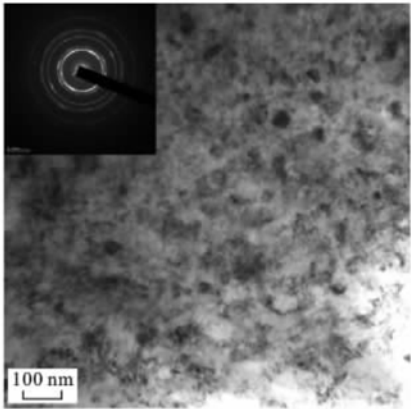


图 5 2 min 喷丸试样表面的 TEM 明场像和 SAED 谱

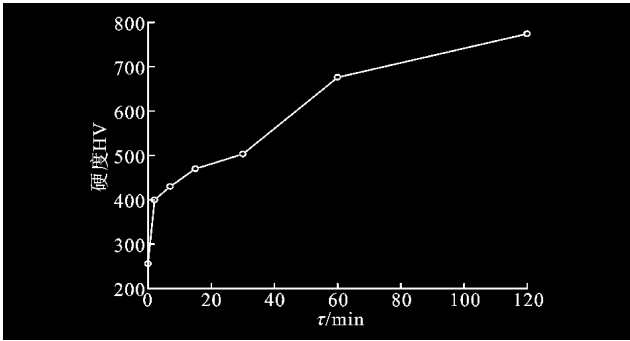


图 6 试样表面硬度随喷丸处理时间的变化

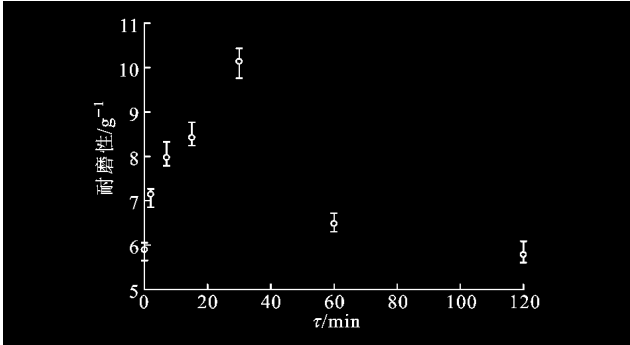


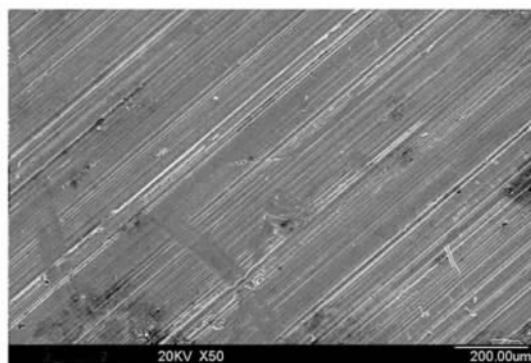
图 7 试样磨料磨损的耐磨性与喷丸处理时间的关系

8 所示为喷丸处理前、后试样经玻璃砂磨损后的磨损形貌,可以明显看出,未喷丸试样的磨损形貌主要为微观切削,而喷丸处理试样的磨损形貌没有较长的微观切削痕迹,以疲劳剥落为主,另外还有少量的短程犁沟塑变磨损.

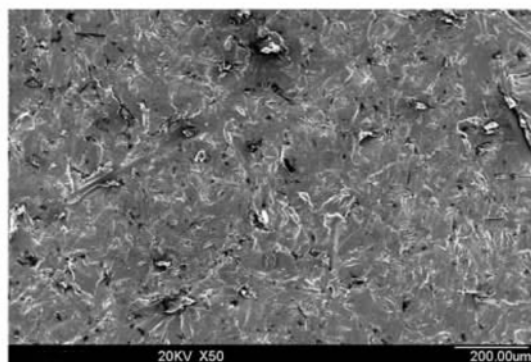
表 1 所示为玻璃砂磨损试样的表面粗糙度 R_a 数据(数据为取样长度内轮廓偏距的算术平均值),可以看出:2~60 min 喷丸试样在磨损试验后的 R_a 值均低于未喷丸处理试样的,而 120 min 喷丸试样的 R_a 值则正好相反.

表 1 玻璃砂磨损试样的表面粗糙度

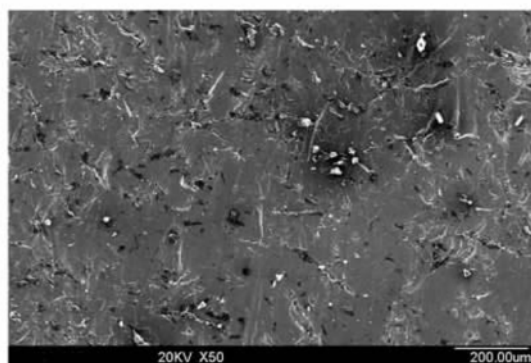
τ/min	0	2	7	15	30	60	120
$R_a/\mu\text{m}$	3.230	2.980	2.882	2.869	2.352	2.995	3.565



(a) 0 min



(b) 30 min



(c) 60 min

图8 试样喷丸处理前、后经玻璃砂磨损的表面形貌

3 讨论

试样的微观结构分析表明,高锰钢喷丸处理后在表面形成了纳米晶组织层,晶粒尺寸随着处理时间的增加而减小至纳米级,也就是说高锰钢实现了表面纳米化,这种表面纳米化与高速弹丸撞击试样时试样表面产生的强烈塑性变形有关^[1-7]。表面纳米化明显地提高了材料表层的硬度,硬度的提高可归因于晶粒细化和加工硬化效应的共同作用。由试样组织与性能的对应关系可看出,晶粒尺寸随试样处理时间的增加而减小,硬度逐渐提高,这种现象与传统的 Hall-Petch 关系一致^[11],也与其他超细晶材料

力学性能的研究结果相符^[12],表明晶粒细化是材料强化的主要原因。

试样在三体磨料磨损下的耐磨性变化可从两方面加以解释。一方面,未喷丸试样的硬度只有 HV250 左右,玻璃砂磨粒的硬度约为 HV500,磨粒的硬度比试验材料的硬度高很多,因而试样的磨损量较大,而喷丸试样表面的硬度为 HV400~774,接近或大于玻璃磨粒的硬度,由下面的 Rabinowicz 磨料磨损方程^[13],可说明硬度增加可以提高耐磨性

$$W = KN/H \quad (1)$$

式中: W 为单位滑动距离的磨损体积; N 为法向载荷; H 和 K 分别为材料的硬度和磨损系数。据文献^[14]报道,纳米晶镍的耐磨性明显高于粗晶镍的耐磨性。另一方面,未作喷丸处理的试样由于硬度较低,磨粒压入试样的深度较深,磨粒的运动方式将以滑动为主,从磨损形貌的 SEM 图也可看出,磨损主要由磨粒对材料的微观切削引起,而喷丸试样由于表层的晶粒细化和硬度提高,因此在随后的磨损过程中,玻璃磨粒压入试样的深度较浅,磨料的运动方式将以滚动为主,从磨损形貌的 SEM 图可以发现,试样表面的破坏主要源于疲劳剥落。

为说明喷丸处理试样由于晶粒细化和硬度增加而导致磨损机理发生改变,在此引用文献^[15]的塑变模型。假定磨粒为尺寸相等的球体并和粗糙表面理想塑性接触,图 9 所示为磨粒在磨损过程中的受力示意图,其中 N 为磨粒受到的正压力, F 为磨粒受到的摩擦力, Fh 为使磨粒滚动的力矩, Ne 为阻碍磨粒滚动的力矩。可以看出,上试样的表面硬度越低,则磨粒压入试样的深度就越大,使磨粒滚动的力矩 Fh 就越小,而阻碍其滚动的力矩就越大,从而使磨料越不容易滚动。因此,试样表面硬度越低,磨粒压入试样表面的深度越深,则磨粒相对试样表面发生滚动的概率也越小。因为未喷丸试样的表面硬度较低,所以在磨损过程中磨粒相对于试样表面的运动将以滑动为主,而滚动较少,磨粒的滑动对试样表面进行微观切削,因此未喷丸试样的磨损机理主要是微观切削。喷丸试样由于在表面形成了一定厚度的高强度、高硬度纳米晶层,试样表面的硬度接近或超过了玻璃砂磨粒的硬度,磨粒压入试样的深度较浅,使磨粒滚动的力矩增大,而阻碍磨粒滚动的力矩减小,因此在磨损过程中磨粒相对于试样表面的运动以滚动为主,滑动的概率很小。此外,喷丸试样纳米晶层的厚度至少有 $5 \mu\text{m}$ (X 射线穿透深度),而 R_a 的最大值为 $3.565 \mu\text{m}$,表明磨粒压入试样的深

度未超过试样纳米晶层的厚度,从而减小了表层纳米结构的磨损量。

尽管较长时间的喷丸处理使试样表面的晶粒更细、硬度更高,如 60 min 喷丸试样的晶粒比 2 min 喷丸试样的晶粒小得多,且硬度也高得多,但因存在裂纹(见图 10),其耐磨性并没有明显提高,120 min 喷丸试样的耐磨性比未喷丸试样的还差。

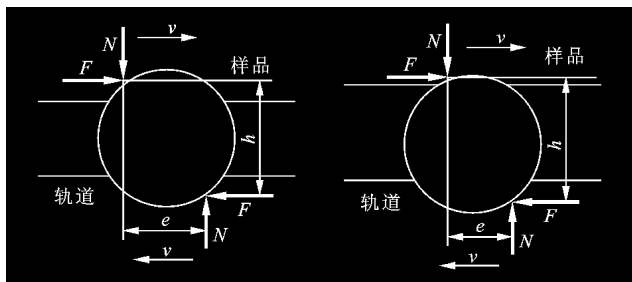


图9 磨粒在三体磨料磨损过程中的运动方式

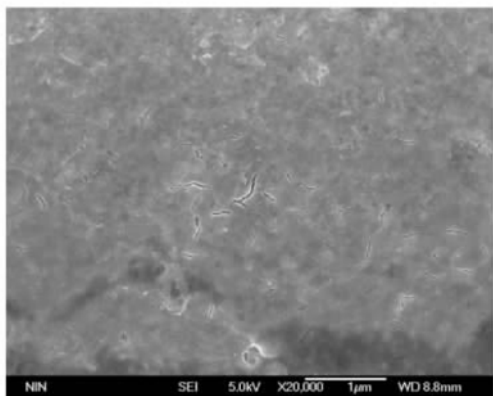


图10 60 min 喷丸试样横截面上的微裂纹

4 结 论

(1)利用传统喷丸技术可以在高锰钢表面获得一定厚度的纳米晶结构表层,试样表面的硬度随喷丸处理时间的增加而增加。

(2)在软磨料(如玻璃砂)磨损的条件下,2~30 min 喷丸试样的耐磨性有明显提高,尤其 30 min 喷丸试样的耐磨性提高了 72%。喷丸时间过长的试样由于产生了微裂纹而使耐磨性下降。高锰钢的表面纳米化使其磨损机理发生改变,未喷丸处理的试样主要为微观切削,而喷丸处理的试样主要由于疲劳剥落导致磨损,说明表面纳米化通过改变磨损机理提高了材料的耐磨性。

参考文献:

- [1] Valiev R Z, Islamgaliev R K, Alexandrov I V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation [J]. Prog Mater Sci, 2000, 45 (2): 103-189.
- [2] Huang J Y, Zhu Y T, Jiang H J, et al. Microstruc-

tures and dislocation configurations in nanostructured Cu processed by repetitive corrugation and straightening [J]. Acta Mater, 2001, 49 (9): 1497-1505.

- [3] Tao N R, Wang Z B, Tong W P, et al. An investigation of surface nanocrystallization mechanism in Fe by surface mechanical attrition treatment [J]. Acta Mater, 2002, 50 (18): 4603-4616.
- [4] Wang Z B, Tao N R, Li S, et al. Effect of surface nanocrystallization on friction and wear properties in low carbon steel [J]. Mater Sci Eng: A, 2003, 325 (1/2): 144-149.
- [5] 许云华,陈渝眉,熊建龙,等. 冲击载荷下应变诱导高锰钢表层组织纳米化机制 [J]. 金属学报, 2001, 37 (2): 165-170.
- Xu Yunhua, Chen Yumei, Xiong Jianlong, et al. Mechanism of strain-induced nanocrystallization of Hadfield steel under high energy impact load [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(2): 165-170.
- [6] Petrov Y N, Gavriljuk V G, Berns H, et al. Surface structure of stainless and Hadfield steel after impact wear [J]. Wear, 2006, 260 (6): 687-691.
- [7] Gavriljuk V G, Tyshchenko A I, Razumov O N, et al. Corrosion-resistant analogue of Hadfield steel [J]. Mater Sci Eng: A, 2006, 420 (1/2): 47-54.
- [8] Khrushchov M M M. Principles of abrasive wear [J]. Wear, 1974, 28 (1): 69-88.
- [9] Richardson R D C. The wear of metals by hard abrasives [J]. Wear, 1967, 10 (4): 291-309.
- [10] Klug H P, Alexander L E. X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials [M]. New York: Wiley, 1974: 661.
- [11] Farhat Z N, Ding Y, Northwood D O, et al. Effect of grain size on friction and wear of nanocrystalline aluminum [J]. Mater Sci Eng: A, 1996, 206 (2): 302-313.
- [12] Tang J S C, Koch, C C. The Hall-Petch relationship in nanocrystalline iron produced by ball milling [J]. Scripta Metall Mater, 1990, 24 (8): 1599-1604.
- [13] Rabinowicz E D. Friction and wear of materials [M]. New York: Wiley, 1965: 168.
- [14] Jeong D H, Gonzalez F, Palumbo G, et al. The effect of grain size on the wear properties of electrodeposited nanocrystalline nickel coatings [J]. Scripta Mater, 2001, 44 (3): 493-499.
- [15] Fang L, Kong X L, Su J Y, et al. Movement patterns of abrasive particles in three-body abrasion [J]. Wear, 1993, 162/164 (B): 782-789.

(编辑 葛赵青)