

文章编号: 0258-7025(2008)09-1409-06

# 激光共聚焦显微镜在磨损表面粗糙度表征中的应用

孙大乐<sup>1,2</sup> 吴 琼<sup>1\*</sup> 刘常升<sup>1</sup> 张 恒<sup>2</sup> 姚利松<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110004; <sup>2</sup> 宝山钢铁有限公司研究院, 上海 201900)

**摘要** 磨损是材料常见的表面失效现象,粗糙度是数字化描述材料磨损表面形貌特征的最常用参数。采用激光共聚焦显微镜(LSCM),通过调节物镜倍率、测量视场和过滤参数等,能够得到材料磨损表面的真实形貌,同时能够对磨损表面三维(3D)形貌特征进行精确数字化描述。对常见的粗糙度值 $0.5\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 磨损表面采用 $20\times$ 物镜扫描测量比较合适;粗糙度小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的磨损表面宜采用 $50\times$ 物镜;粗糙度大于 $2.5\ \mu\text{m}$ 宜采用 $10\times$ 物镜。对比较规则的磨损表面,采用 $1\sim 3$ 个物镜视场叠加扫描即可得到比较精确的粗糙度值;对于不太规则的磨损表面,则需要 $3\sim 5$ 个物镜视场叠加扫描。借助这一手段,采用上述优化参数对 Cr5 冷轧辊材料磨损各阶段试样表面形貌及粗糙度轮廓曲线进行表征、分析,效果较好。

**关键词** 光学设计与制造;磨损;粗糙度;激光共聚焦显微镜;表面形貌;数字化描述

**中图分类号** TH 117.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083509.1409

## Application of Laser Scanning Confocal Microscopy in Roughness Characterization of Worn Surface

Sun Dale<sup>1,2</sup> Wu Qiong<sup>1</sup> Liu Changsheng<sup>1</sup> Zhang Heng<sup>2</sup> Yao Lisong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China)  
<sup>2</sup> Technology Center, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

**Abstract** Wear is the most frequently surface failure of the materials, and roughness is the most commonly used parameter to describe the characteristics of the worn surface numerically. Laser scanning confocal microscopy (LSCM) was used to get the image of worn surface topography by adjusting the objective lens and measuring field of view and filter parameters, the accurate numerical description of the three-dimensional (3D) worn surface was obtained at the same time. For commonly roughness value between  $0.5$  and  $2.0\ \mu\text{m}$ , the  $20\times$  lens is the best choice, while for the larger or smaller roughness value,  $10\times$  and  $50\times$  lens should be used, respectively. For regular worn surface, the accurate roughness value can be obtained within  $1$  to  $3$  combined optical field, while for the irregular one, the combined number of optical field should be  $3$  to  $5$  or more. Based on this method, the worn surface topography of a Cr5 cold roll was well analyzed in different wear patterns.

**Key words** optical design and fabrication; wear; roughness; laser scanning confocal microscopy; surface topography; numerical characterization

## 1 引 言

磨损是一种常见的表面失效现象,磨损表面形貌直接反映设备材料的磨损、疲劳和腐蚀等特征行为。研究表明,相互接触的零件原始表面形貌可以

通过相对运动阻力的变化而影响磨损,磨损过程中所发生的表面形貌的变化又将影响到随后磨损阶段。此外,磨损表面形态又是摩擦磨损全过程的最终直接记录。因此,磨损表面形貌是判定磨损机制

收稿日期:2007-09-26;收到修改稿日期:2008-02-18

基金项目:宝钢集团重大科研项目(R05DSES220)资助课题。

作者简介:孙大乐(1965—),男,山东人,宝钢集团技术业务专家,教授级高级工程师,主要从事轧辊系列技术、设备失效分析与能力评价技术研究。E-mail:sundl@baosteel.com

\* 通信联系人。E-mail:qiong\_wu@yahoo.cn

最直接、最主要的判据<sup>[1]</sup>。

常用的磨损表面形貌观察手段有体视显微镜、扫描电镜,但不具备表面形貌特征的数字化描述功能;常用的粗糙度测量手段有干涉仪、粗糙度仪等,但是不能对磨损表面形貌进行观察。先进的磨损表面形貌分析、表征设备要求在观察到磨损表面形貌的同时能得到准确的表面形貌数据以便能进行进一步的分析。而激光共焦扫描显微镜(LSCM)的出现弥补了这一缺陷,同时具备磨损形貌观察以及数字化描述的功能,能方便、准确地对磨损表面形貌进行深入研究<sup>[2,3]</sup>。粗糙度是数字化描述磨损表面形貌特征的最常用参数,常用的粗糙度评定参数有轮廓

表 1 标准试样和车削试样粗糙度值

Table 1 Roughness of the standard specimens and turning specimens

Sample	Surfcom sample 1 <sup>#</sup>	Surfcom sample 2 <sup>#</sup>	Mahr sample 3 <sup>#</sup>	Turning sample 4 <sup>#</sup>	Turning sample 5 <sup>#</sup>
$R_a / \mu\text{m}$	0.39	3.17	2.60	0.83	1.40

### 3 结果与分析

激光共焦扫描显微镜早期用于生物领域<sup>[5,6]</sup>,随着不断的改进,目前在材料领域也得到了广泛的应用,成为介于光学显微镜和电子显微镜之间的微观测量手段。采用共轭焦点技术成像,相干性很好的激光作为激发光源。光源、被测样品及探测器处在彼此对应的共轭位置上,激光束从光源针孔射出,经过分光镜,再由扫描透镜聚焦于样品表面,对样品内焦平面上每一点进行扫描。然后反射的激光束经由入射光路直接返回到分光镜,经分光镜折射和探测透镜聚焦后,透过探测针孔(Detector Pinhole)由光电倍增管探测收集。在此过程中,只有来自样品焦平面上的光才能在探测针孔平面正确聚焦,从而穿过探测针孔而成像;焦平面以外区域射来的光线在探测针孔处是离焦的,被探测针孔滤除,不能被光电倍增管探测收集<sup>[7]</sup>。因此,用激光共焦扫描显微镜观察表面时,非观察点不能成像,从而克服了

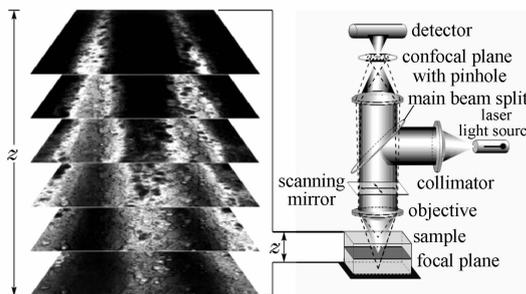


图 1 激光共焦扫描显微镜成像系统概图

Fig. 1 Schematic picture of LSCM system

算术平均偏差  $R_a$ , 微观不平度十点高度  $R_z$  以及均方根粗糙度  $R_q$  等<sup>[4]</sup>。本文采用 ZEISS LSM 5 Pascal 激光共聚焦显微镜,通过调节物镜和测量视场等参数以及过滤参数,对磨损表面粗糙度特征进行精确描述,在此基础上对不同磨损形态的磨损表面形貌进行分析。

## 2 试验材料和方法

试验采用粗糙度仪标准试样和车削试样,经 Mahr Perthometer M3 便携式粗糙度仪测量得到粗糙度值  $R_a$ 。如表 1 所示。

传统光学显微镜把被观察物体一定纵深范围的结构都加以成像的缺点,把物体分为若干光学断层,逐层扫描成像,层与层之间有高的纵深分辨率,这样成像图像清晰。图 1 所示为一个典型的激光共焦扫描显微镜系统的示意图。

### 3.1 粗糙度轮廓曲线

采用波长 488 nm 激光,选择合适的针孔直径,扫描磨损试样表面时得到一层一层的二维灰度图像,图像与图像在  $z$  轴方向上的间隔为选定的步长。用图像平滑和图像增强预处理这些断层扫描图像后,将这些图像存入一个图像堆栈中,按扫描顺序排序,然后用计算机图像处理技术来形成一个最大亮度图像和一个三维(3D)的高度编码图像,高度编码图像包含表面形貌的三维高度信息,如图 2 所示。图 2 为马尔(Mahr)标样。

得到精确的三维形貌及高度数据后,即可用计算机辅助图像分析技术来计算磨损表面的表面粗糙度参数。磨损表面的轮廓一般可分为三个范畴:几何偏差、波纹度以及粗糙度<sup>[8]</sup>。其中几何偏差为宏观误差,这种偏差往往不被认为是表面形貌的组成部分。可用 ZEISS Pascal 软件中的“plane-fit”功能将其影响消除。粗糙度和波纹度由于具有不同的空间频率,所以可以采用数字滤波技术将波纹度分离出来,得到磨损表面形貌的粗糙度曲线,常用的数字滤波技术有傅里叶变换和小波分析<sup>[9~12]</sup>。采用 ZEISS Pascal 软件中的傅里叶变换功能,截止波长

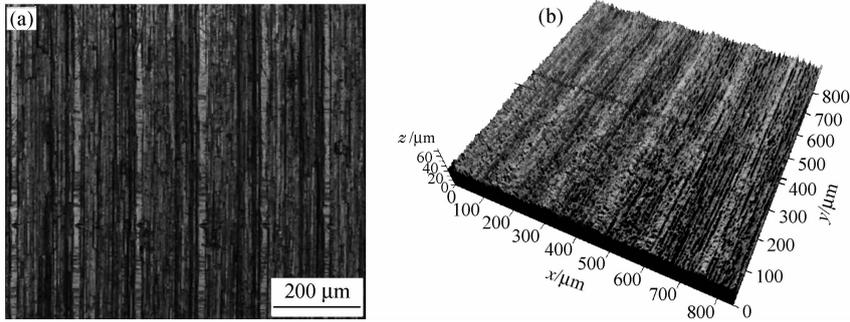


图2 Mahr 标样。(a) 最大亮度图像;(b) 三维表面形貌

Fig. 2 (a) Maximum brightness image and (b) 3D topography image of the Mahr standard specimen

为 $800\ \mu\text{m}$ <sup>[13]</sup>。图3为由激光共聚焦扫描得到的二维表面轮廓曲线以及采用傅里叶变换得到的粗糙度和波纹度曲线。

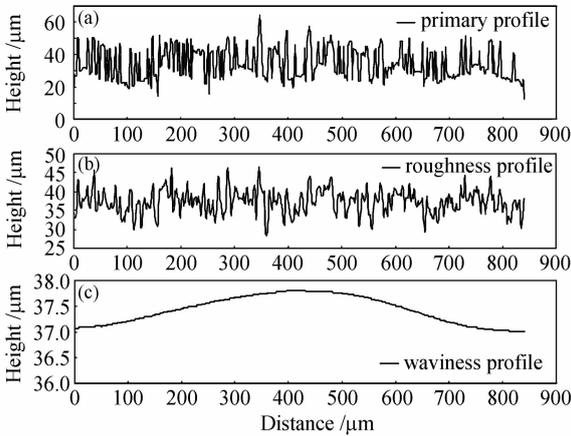


图3 Mahr 标样表面。(a) 轮廓线;(b) 粗糙度曲线;(c) 波纹度曲线

Fig. 3 (a) Primary profile, (b) roughness profile and (c) waviness profile of the Mahr standard specimen

表2 物镜主要参数

Table 2 Main parameters of the objective lens

Objective lens	Magnification	Numerical aperture	Area per optical field / $\mu\text{m}^2$
EC "Epiplan-Neofluar"	10×	0.25	~800×800
	20×	0.50	~400×400
	50×	0.80	~160×160

表3 不同物镜所测得的粗糙度值

Table 3 Roughness value measured by different objectives

Specimen	Standard sample/measured value by		10×	20×	50×
	Mahr perthometer		objective lens	objective lens	objective lens
1#	0.39		2.045	0.539	0.325
4#	0.83		2.548	0.724	0.383
5#	1.40		2.957	1.273	0.625
3#	2.60		2.549	1.896	1.465
2#	3.17		3.173	2.696	1.814

### 3.2 物镜的影响

由于磨损试样的表面粗糙度值范围很广,常见的在 $0.1\sim 5\ \mu\text{m}$ 范围内。考虑到不同物镜的工作距离及分辨率对应的粗糙度值测量精度有一定的范围,采用不同倍率的物镜进行粗糙度测量,得到每种倍率的物镜的最佳粗糙度测量范围。物镜基本参数如表2所示。

采用不同倍率物镜进行单个视场扫描并测量,得到粗糙度值如表3所示。与标准试样以及便携式粗糙度仪测得的粗糙度值进行比较发现,在粗糙度小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 范围内,20×物镜所测得的值偏高,50×物镜所测得的值偏低;在粗糙度 $0.5\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 范围内,20×物镜所测值略微偏低,而10×物镜和50×物镜所测值误差很大;在粗糙度大于 $2.5\ \mu\text{m}$ 范围内,10×物镜所测值能够较好地吻合标准值。误差分析如图4所示。因此,对常见的 $0.5\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 粗糙度值范围内磨损表面采用EC "Epiplan-Neofluar"20×物镜扫描测量比较合适。

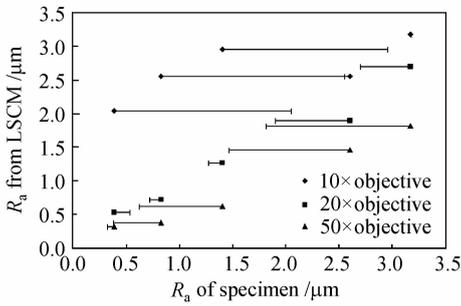


图4 不同镜头所测粗糙度值及与参考值的误差

Fig. 4 Roughness value measured by different objectives and the deviation value

### 3.3 视场范围的影响

对于标样以及车削试样,由于其较好的机加工工艺使得表面粗糙度值比较均匀,重复性很好,因此

表4 不同测量视场所测得的粗糙度值  $R_a$  ——标准及车削试样Table 4  $R_a$  value measured by different measure fields — standard specimens

Specimen	10×-1	10×-2	10×-3	20×-1	20×-2	20×-3	50×-1	50×-2	50×-3
1#				0.539	0.623	0.602	0.325	0.311	0.303
4#				0.724	0.818	0.837			
5#				1.273	1.384	1.371			
3#	2.549	2.454	2.483						
2#	3.173	3.188	3.19						

表5 不同测量视场所测得的粗糙度值——剧烈磨损试样

Table 5 Roughness value measured by different measure fields — severely worn samples

$R_a / \mu\text{m}$	Measured value by Mahr perthometer	Combined optical fields of LSCM / 20× objective lens				
		1×1	2×2	3×3	4×4	5×5
	1.12	0.805	0.884	0.951	1.081	1.135

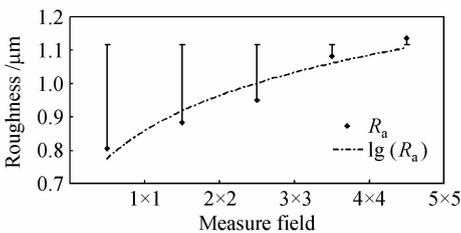


图5 不同测量视场所测粗糙度值及与参考值的误差

Fig. 5 Roughness value measured by different measure fields and the deviation value

### 3.4 激光共聚焦显微镜粗糙度测量的应用

采用优化的参数及激光共聚焦显微镜对Cr5冷轧辊材料磨损各阶段试样表面形貌及粗糙度轮廓曲线进行表征。试验采用68#机油润滑,摩擦副为GCr15材料。取磨损5 min, 1 h和2 h后的试样进行观察,分别对应于磨损过程中的3个阶段:轻微磨损期、稳定磨损期以及剧烈磨损期。其表面形貌及三维轮廓形貌如图6所示。

采用单个视场得到的粗糙度值与参考值已基本接近,如表4所示。而实际应用中由于磨损形貌的不规则性,单个视场较小区域得到的粗糙度值与参考值误差相对较大,因此需要进行多个视场的拼图处理。表5为用激光共聚焦进行多次拼图并测量得到的粗糙度值,与便携式粗糙度仪测得值进行比较。从图5可以看出,随着多次拼图,共聚焦测量范围的扩大,其所测值便趋近于便携式粗糙度仪测得值。所以,对比较规则的磨损表面,如稳定磨损阶段磨损表面,采用1~3个物镜视场叠加扫描即可得到比较精确的粗糙度值;对于不太规则的磨损表面,如剧烈磨损表面,则需要采用3~5个物镜视场叠加扫描才可以得到比较精确的粗糙度值。

图7为各阶段磨损表面的粗糙度轮廓曲线。在轻微磨损阶段,主要是磨损试样和摩擦副间的跑合,经跑合后材料表面的尖峰高度降低,峰顶半径增大,从而使接触面积增大,降低了磨损速率,此时磨损表面粗糙度为  $R_a = 0.646 \mu\text{m}$ 。稳定磨损阶段以磨损试样和摩擦副间的相互切削和磨粒磨损为主,表面形貌为切削导致的沟槽,磨损表面粗糙度为  $R_a = 0.476 \mu\text{m}$ ,略低于磨损初期的粗糙度,此时磨损率接近于常量,为轧辊材料的最佳工作期。剧烈磨损阶段发生黏着和部分剥落现象,表面轮廓呈严重的凸凹不平,磨损表面粗糙度达到  $R_a = 1.197 \mu\text{m}$ ,磨损加剧。

## 4 结 论

通过调节激光共聚焦显微镜的测量以及过滤参数,能够对磨损表面三维形貌特征进行精确的数字化描述。

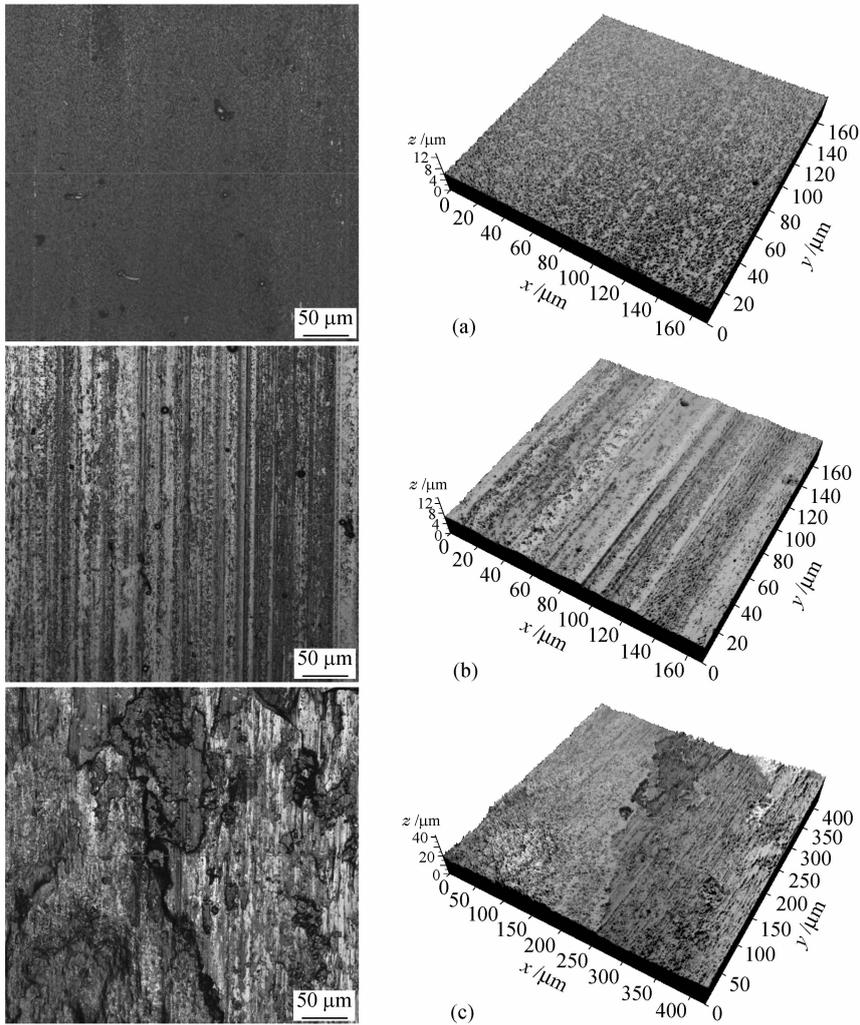


图 6 磨损表面图像及三维形貌。(a) 轻微磨损阶段; (b) 稳定磨损阶段; (c) 剧烈磨损阶段  
Fig. 6 Topography and three-dimensional LSCM images of the worn surface at (a) slightly wear, (b) stably wear, and (c) severely wear period

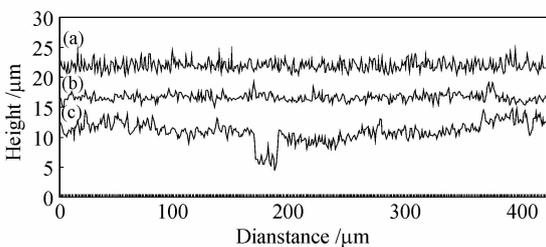


图 7 磨损粗糙度轮廓曲线。(a) 轻微磨损阶段;  
(b) 稳定磨损阶段; (c) 剧烈磨损阶段  
Fig. 7 Roughness profiles of the worn surface at (a) slightly wear, (b) stably wear, and (c) severely wear period

在常见的粗糙度值范围内,采用傅里叶变换,截止波长为 $800\ \mu\text{m}$ ,能够比较精确地将波纹度轮廓曲线分离出来,得到粗糙度轮廓曲线。

对常见的 $0.5\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 粗糙度值范围内磨损

表面采用 $20\times$ 物镜扫描测量比较合适;粗糙度小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的磨损表面采用 $20\times$ 和 $50\times$ 物镜均可,宜采用 $50\times$ 物镜;粗糙度大于 $2.5\ \mu\text{m}$ 宜采用 $10\times$ 物镜。

对比较规则的磨损表面,如稳定磨损阶段磨损表面,采用 $1\sim 3$ 个物镜视场叠加扫描即可得到比较精确的粗糙度值;对于不太规则的磨损表面,如剧烈磨损表面,采用 $3\sim 5$ 个物镜视场叠加扫描可以得到比较精确的粗糙度值。

采用优化的参数对 Cr5 冷轧辊材料磨损各阶段试样表面形貌及粗糙度轮廓曲线进行表征、分析,效果较好。

## 参 考 文 献

- 1 Liao Qianchu, Lan Fenlan. Analysis Technique and Application of SEM/Wear & Corrosion Resistance and Surface Technology

- of Materials Series [M]. Beijing: China Machine Press, 1990. 222~224
- 廖乾初, 蓝芬兰. 扫描电镜分析技术与应用/材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990. 222~224
- 2 D. N. Hanlon, I. Todd, E. Peekstok *et al.*. The application of laser scanning confocal microscopy to tribological research [J]. *Wear*, 2001, **251**(1):1159~1168
  - 3 Yuan Chengqing, Yan Xinping, Peng Zhongxiao. Numerical characterization of 3D worn surface topography using confocal laser scanning microscopy [J]. *Lubrication Engineering*, 2006, (12):33~36  
袁成清, 严新平, 彭中笑. 基于激光共焦扫描显微镜方法的磨损表面三维数字化描述[J]. *润滑与密封*, 2006, (12):33~36
  - 4 GB/T 1031-1995, Surface roughness parameters and their values [S]. 1995  
GB/T 1031-1995, 表面粗糙度参数及其数值[S]. 1995
  - 5 Fu Dongxiang, Chen Jiabi, Ma Junshan *et al.*. Two wavelength laser confocal scanning system for microarray and image processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1097~1103  
付东翔, 陈家璧, 马军山 等. 双波长激光共聚焦生物芯片检测与图像处理[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8):1097~1103
  - 6 Xing Da, Zhou Junchu, Yu Yanhua *et al.*. Imaging of green fluorescent proteins by using laser scanning confocal microscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(10):1439~1440  
邢 达, 周俊初, 于彦华 等. 利用激光共聚焦扫描显微镜的绿色荧光蛋白荧光成像[J]. *光学学报*, 1999, **19**(10):1439~1440
  - 7 Yuan Chengqing. Study of surface characteristics both of wear particles & wear components and their relationship in wear process [D]. Wuhan University of Technology, 2005. 25~27  
袁成清. 磨损过程中的磨粒表面和磨损表面特征及其相互关系研究[D]. 武汉理工大学, 2005. 25~27
  - 8 Liu Jiajun. The Wear Principles of the Materials and Their Wear Resistance [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993. 1~21  
刘家浚. 材料磨损原理及其耐磨性[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993. 1~21
  - 9 V. M. Huynh, Y. Fan. Surface-texture measurement and characterisation with applications to machine-tool monitoring [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1992, **7**(1):2~10
  - 10 S.-H. Lee, H. Zahouani, R. Caterini *et al.*. Morphological characterisation of engineered surfaces by wavelet transform [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1998, **38**(5-6):581~589
  - 11 P. Podsiadlo, G. W. Stachowiak. Fractal-wavelet based classification of tribological surfaces [J]. *Wear*, 2003, **254**(11):1189~1198
  - 12 Sun Jie, Yuan Yuehui, Wang Chuanyong. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in autofocusing criterion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1):35~39  
孙 杰, 袁跃辉, 王传永. 数字图像处理自动图像聚焦算法的分析和比较[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1):35~39
  - 13 L. Mummery. Surface Texture Analysis — The Handbook [M]. Germany: Hommelwerke, 1993. 13~22