

# Cu 基粉末冶金材料表面表征与图像阈值接触分析

王延忠<sup>1</sup>, 魏彬<sup>1</sup>, 宁克焱<sup>2</sup>, 韩明<sup>2</sup>, 沈蓉<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 机械工程学院, 北京 100191;

2. 中国北方车辆研究所 车辆传动重点实验室, 北京 100072)

**摘要:** 目的 研究 Cu 基粉末冶金摩擦材料的微接触力学特性, 对该材料的表面形貌进行精确采集和合理表征。方法 通过镭射形貌仪采集表面形貌, 利用 MATLAB 对形貌点阵进行插值重构, 在 ANSYS 中获得接触分析的图像, 采用图像阈值分析和二值化处理。结果 分析得到了 Cu 基粉末冶金材料接触过程的真实接触面积与轮廓接触面积范围, 验证了不同接触区域的接触机理。结论 证明了摩擦副接触过程存在复杂的弹塑性接触区域, 不同机理所控制的接触区域所占的比例从 6% ~ 27% 不等。

**关键词:** 粉末冶金; 摩擦机理; 接触分析; 阈值分析; 二值化处理

中图分类号: TH117

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)01-0040-04

## Topology Acquisition and Contact Analysis of Image Threshold of Cu-based Sintered Material

WANG Yan-zhong<sup>1</sup>, WEI Bin<sup>1</sup>, NING Ke-yan<sup>2</sup>, HAN Ming<sup>2</sup>, SHEN Rong<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. National Key Laboratory of Vehicular Transmission, China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To obtain the micro contact mechanics characteristics of Cu-Based sintered material, the friction surface was collected and expressed precisely. **Methods** The collecting process was completed by laser profilometer. The data were interpolated and reconstructed in MATLAB. **Results** The contact properties were acquired by ANSYS. The pictures were analyzed by threshold and disposed by binary. **Conclusion** It implies that the complex elastic-plastic area existed in contact process. The boundary and solid contact area varied from 6% ~ 27%.

**KEY WORDS:** sintered materials; friction mechanism; threshold; binary

加工表面可能显示出各种加工过程的痕迹, 这些加工痕迹在表面计量学领域被称为粗糙表面形貌 (Rough Surface Topography), 又称为表面微观几何形态。关于粗糙面形貌表征的问题, 随着测量仪器不断发展, 数字模拟技术的研究也在不断深入。20 世纪 80 年代 Binnig G 和 Rohrer H 发明的 STM<sup>[1]</sup> 和 AFM<sup>[2]</sup>, 以及在此基础上发展的各种 SPM 技术使 3D 微观形

貌测量和分析进入了一个崭新的阶段。

使用传统微接触方法研究材料摩擦特性的方法始于 20 世纪 60 年代, 经典的统计分析微接触力学模型是 1966 年 Greenwood 与 Williamson<sup>[3]</sup> 共同提出的, 1970 年 Whitehouse 与 Archard 共同建立了同样基于统计学参数的 W-A 模型<sup>[4]</sup>。1988 年 Chang W R<sup>[5]</sup> 建立了基于高斯分布理论的摩擦系数模型 (CEB), 通过

收稿日期: 2013-07-08; 修订日期: 2013-08-18

Received: 2013-07-08; Revised: 2013-08-18

作者简介: 王延忠 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要的研究方向为摩擦润滑、航空密封材料等。

Biography: WANG Yan-zhong (1963—), Male, Professor, Doctoral tutor, Research focus: friction lubrication and air sealing materials.

对该模型施加载荷  $P$ , 利用 Hamilton 表达式<sup>[4]</sup>, 求出模型所能承受的最大剪切力  $Q$ , 进而求出该模型的静摩擦系数。1994 年 Roy S K<sup>[5]</sup> 等将粘附作用的影响加入 CEB 模型中, 分析了单一微凸峰所能承受的最大剪切载荷。2004 年 Lior Kogut<sup>[6-7]</sup> 对 CEB 模型进行了完善, 考虑了微凸峰半径和斜度的变化, 并对模型的摩擦系数进行了预测。随后, 分形模型的出现将接触分析推向了一个新的高度<sup>[8]</sup>。近些年, 随着商用软件的发展, 使得通过软件对真实形貌进行接触分析成为可能<sup>[9]</sup>, 国内学者也对表面接触进行了详细的研究。现阶段已经形成了与形貌相关的流体动力<sup>[10-11]</sup> 及摩擦磨损模型<sup>[12-13]</sup>, 涉及微接触特征以及摩擦理论的还相对较少。

文中通过对 Cu 基粉末冶金表面的形貌采集, 分析了 Cu 基粉末冶金材料接触过程的真实接触面积与轮廓接触面积范围, 验证了不同接触区域的接触机理, 证明了摩擦副在接触过程中存在复杂的弹塑性接触区域, 为表面接触特性分析提供了理论依据。

1 摩擦副表面形貌的采集与接触模型

表面特性的一个重要方面就是表面形貌, 它对相接触的两个表面的力学性能和摩擦磨损过程影响很大。即使看起来光滑的固体表面, 在显微镜下观察时, 也都像大地一样布满了峡谷、高岗和山岳。在两个名义平整表面相互接触的过程中, 可以将接触区域分为名义接触区域、轮廓接触区域以及真实接触区域<sup>[14]</sup>, 如图 1 所示。

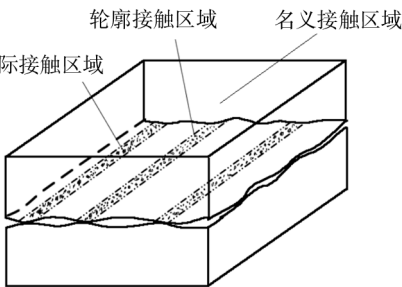


图 1 接触区域分类示意  
Fig. 1 Contact area classification

从微观角度看, 任何固体表面都具有不规则的几何形状。对于粉末冶金摩擦副, 表面的微细结构更为复杂<sup>[15]</sup>。使用镭射显微镜对粉末冶金样本进行表面形貌采集, 样本表观布氏硬度为 15 ~ 20HB, 表面粗糙度高于 6.3  $\mu\text{m}$ , 对摩钢片的硬度为 200 ~

225HB, 对摩钢片的粗糙度为 1.6 ~ 0.83  $\mu\text{m}$ 。采集的结果如图 2 所示。将部分粉末冶金样本采集的数据读入 Matlab 进行分析处理, 获得插值后表面形貌的图像(如图 3 所示)。

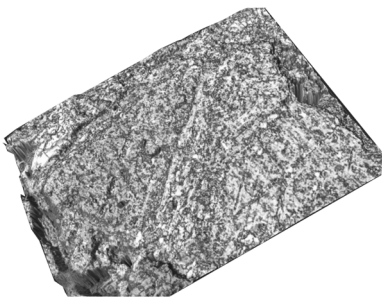


图 2 镭射显微镜下表面形貌  
Fig. 2 Laser surface morphology under the microscope

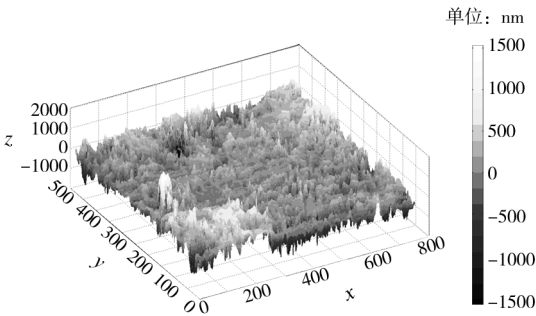


图 3 由采集数据获得的 MATLAB 三维表面  
Fig. 3 Three-dimensional surface obtained by MATLAB using the data collected

针对获得的数据点阵, 通过去除错误点、插值等处理后, 选取 0.1 mm $\times$ 0.1 mm 的区域作为研究对象, 将 MATLAB 拟合的曲面导入 ANSYS 进行接触分析。在 ANSYS 中通过 MODEL 操作将曲面封闭为实体, 建立封闭实体并对其划分网格, 表面网格要进行多次的细化, 如图 4 所示。其中, Cu 基粉末冶金的弹性模量为 208 GPa, 泊松比为 0.3。

对 ANSYS 生成的实体进行预应力接触分析, 如图 5 所示。由于摩钢片的硬度和刚度与铜基粉末冶金材料相比大很多, 所以在粉末冶金模型的接触表面建立刚性平面, 提前给出偏置。将平面中最高点的位移坐标作为刚性平面的位置坐标, 并作为固定约束(对其固定  $x, y, z$  方向的移动及转动自由度)。指定 Cu 基粉末冶金和刚性平面为一组接触对, 固定粉末冶金模型  $x$  和  $y$  方向上的平动自由度与转动自由度, 对粉末冶金底面施加 1 GPa 的法向( $z$  方向)载荷。

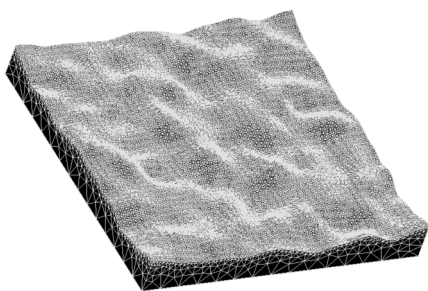


图4 MATLAB拟合曲面导入ANSYS的实体  
Fig.4 MATLAB fitting surface into ANSYS entities

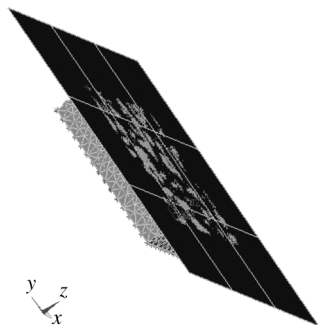


图5 MATLAB拟合  
Fig.5 The MATLAB simulation

## 2 计算结果和讨论

Cu基粉末冶金摩擦表面ANSYS正应力接触分析结果如图6所示。由于表面形貌的影响,接触应力存在着复杂的变化趋势,即使施加1 MPa的名义载荷,实际的局部 von misses 应力已经超过了20 MPa。理论研究表明,压力载荷会导致边界膜的破裂形成摩擦表面局部的固固接触<sup>[7]</sup>,采集的形貌图像也证明了在实际摩擦过程中,同时广泛存在着边界摩擦和固固摩擦区域。对于应力较大的区域,从机理分析可以得知,当摩擦副局部压力过大时,接触区域会出现边界膜破裂的现象,出现真实的固固接触。这种破裂受到工况及润滑冷却条件的影响,边界膜破裂的现象一般在大于名义接触压力1到2个数量级之间出现,而且边界膜成因复杂,在不同的接触压力区间会形成不同形式的边界薄膜。通过制定标尺,可以将接触压力大于10 MPa的区域进行阈值处理并进行二值化强调显示(如图7所示)。这种接触压力下边界膜基本破裂,是固固接触状态,通过像素分析,可以获得深色区域所占整个区域面积的比例,真实的固固接触区域约占总体区域的6%。若需要确定边界接触区域,可以将标尺范围限定到1 MPa,再通过图像阈值分析,获得

的吸附膜接触区域约占名义区域的26%(若排除固固接触面积则为20%),如图8所示。

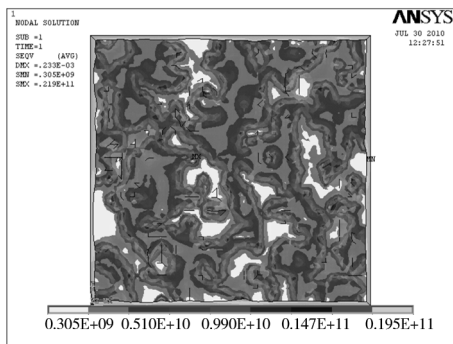


图6 接触分析应力  
Fig.6 Contact stress analysis

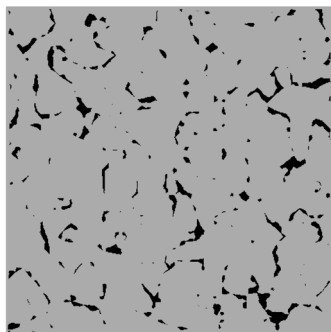


图7 图像二值化后的接触区域形貌  
Fig.7 The contact area of morphology after image binarization

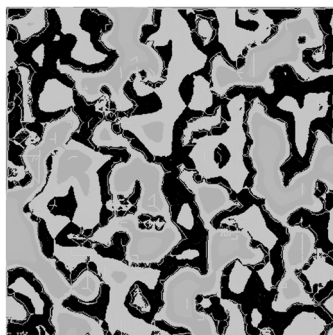


图8 边界接触面积示意  
Fig.8 Border contact area

## 3 结论

从Cu基粉末冶金元件的真实形貌特性出发,建立了基于ANSYS的微接触模型并获得其接触特性,提出了一种利用图像阈值处理获得接触特性的方法。该图像分析为摩擦过程机理分析提供了新的方向。通过对接触特性图像的分析,可以得到以下结论。

1) 粉末冶金摩擦表面的微形貌特征可以通过镭射形貌仪器进行准确的采集,通过 MATLAB 可以对原点阵进行插值、纠错和形貌重构。

2) 在真实接触时,两个名义平整表面相互接触的过程中,存在轮廓接触区域以及真实接触区域等复杂的弹塑性区域,其中边界接触区域与固固接触区域同时存在。

3) 在实际接触过程中,固固接触区域约占名义接触面积的6%,边界接触区域约占名义接触区域的20%。

4) 通过给定边界膜破裂时的临界值,可以通过接触图像二值分析,直观地分析不同接触机理条件下接触区域的分布情况。

## 参考文献

- [1] BINNIG G, ROHRER H, et al. Tunneling Through a Controllable Vacuum Gap[J]. Applied Physical Letters, 1981, 40:178—180.
- [2] BINNING G. Atomic Force Microscope[J]. Physical Review Letters, 1986, 56( 9 ):930—933.
- [3] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of Nominally Flat Surfaces[J]. Proc Roy Soc Lond, 1966, A295: 300—319.
- [4] WHITEHOUSE D J, ARCHARD J F. The Properties of Random Surface of Significance in Their Contact[J]. Proc Roy Soc Lond, 1970, A316:97—121.
- [5] CHANG W R, ETSION I, BOGY, D B. Static Friction Coefficient Model for Metallic Rough Surfaces[J]. ASME J Tribol, 1988, 110:57—63.
- [6] LIOR K, IZHAK E. A Static Friction Model for Elastic-plastic Contacting Rough Surfaces [J]. Transaction of the ASME, 2004, 126(1):34—40.
- [7] LIOR K, IZHAK E. A Semi-analytical Solution for the Sliding Inception of a Spherical Contact[J]. Journal of Tribology, 2003, 125(3):499—506.
- [8] MAJUMDAR A, BHUSHAN B. Fractal Model of Elastic-plastic Contact between Rough Surfaces[J]. ASME J Trib, 1991, 113(1):1—11.
- [9] WANG Yan-zhong, CHEN Yan-yan, HAN Xiao. Research of Simulation Technology in Low-stress Machining on Tooth Surface of Spiral Bevel Gears Used in Aviation Industry [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 86: 688—691.
- [10] WANG Yan-zhong, WEI Bin. Mixed-modal Disk Gas Squeeze Film Theoretical and Experimental Analysis[J]. International Journal of Modern Physics, 2013, 25(7):135—168.
- [11] 王延忠, 魏彬. 激光微造型表面流体动力润滑分析[J]. 润滑与密封, 2012, 37(12):1—4  
WANG Yan-zhong, WEI Bin. Hydrodynamic Lubrication Study on Micro-texture Structure Surface [J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(10):1—5.
- [12] 王延忠, 魏彬. 大功率重载摩擦元件磨损率的分形模拟方法[J]. 润滑与密封, 2012, 37(10):1—4.  
WANG Yan-zhong, WEI Bin. Fractal Wear Rate Prediction of Friction Elements with Heavy Duty [J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(10):1—5.
- [13] 汪家道, 陈大融. 规则凹坑表面形貌润滑研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(1):52—54.  
WANG Jia-dao, CHEN Da-rong. Study on Lubrication of Regular Concave Surface [J]. Tribology, 2003, 23(1):52—54.
- [14] WANG Yan-zhong, WEI Bin, WU Xiang-yu. Wet Friction-Elements Boundary Friction Mechanism and Friction Coefficient Prediction [J]. Tribology Industry, 2012, 34(4):198—205.
- [15] WANG Yan-zhong, WEI Bin. Friction Mechanism and Lock-up Friction Coefficient Prediction for Sinter Bronze Friction Materials [J]. Industrial Lubrication Tribology, 2014, 66(6):101—106.

(上接第20页)

- [17] 高加强, 刘磊, 沈彬, 等. 超细 SiC 对 Ni-P 化学合金镀层组织结构的影响[J]. 机械工程材料, 2006, 30(7):33—36.  
GAO Jia-qiang, LIU Lei, SHEN Bin, et al. Electroless Ni-P-SiC Composite Coatings with Superfine Particles [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(7):33—36.
- [18] ARCHARD J F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8):981—988.
- [19] 陈小华, 李德意, 李学谦, 等. 碳纳米管增强镍基复合镀

- 层的形貌及摩擦磨损行为研究[J]. 摩擦学学报, 2002, 22(1):6—9.  
CHEN Xiao-hua, LI De-yi, LI Xue-qian, et al. Morphology and Wear Behavior of Ni-Carbon Nanotube Composite Coating [J]. Tribology, 2002, 22(1):6—9.
- [20] FANG L, KONG X L, SU J Y, et al. Movement Patterns of Abrasive Particles in Three-body Abrasion [J]. Wear, 1993 (162/163/164) Part B:782—789.