

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2009.08.009

表面粗糙度对化学机械抛光工艺过程流动性能的影响*

魏红波¹ 谭援强² 高太元³ 李明军¹

(1湘潭大学数学与计算科学学院 湖南湘潭 411105; 2湘潭大学机械工程学院 湖南湘潭 411105;
3. 中国科学院力学研究所 北京 100085)

摘要: 采用随机中点位移法通过计算机模拟抛光垫和晶片的基于分形的粗糙表面, 构造了一种新的膜厚方程。在新膜厚方程的基础上分析了一般润滑方程及带离心项的润滑方程对化学机械抛光 (CMP) 过程中抛光液的压力分布以及无量纲载荷和转矩的影响。结果表明, 考虑抛光垫和晶片表面的粗糙程度的影响时, 抛光液的压力分布有一定的波动, 且压力最大值有所增大, 压力最小值有所减小; 此外无量纲载荷和转矩的数值也变小。

关键词: 化学机械抛光; 润滑方程; 粗糙表面; 分形

中图分类号: O35; O241.82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-0150 (2009) 8-033-6

Effect of Surface Roughness on Fluid Performance in the Chemical Mechanical Polishing Process

Wei Hongbo¹ Tan Yuanqiang² Gao Taiyuan³ Li Mingjun¹

(1. School of Mathematics and Computational Science, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China;
2. School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China;
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The rough surface was simulated based on the fractal of pad and wafer by using random midpoint displacement method via computer, and a modified film thickness equation was presented. Based on the modified film thickness, the effect of surface roughness on pressure distribution, dimensionless load and torque in the course of the chemical mechanical polishing (CMP) was analyzed by the general lubrication equation and the modified lubrication equation with centrifugal force. The results show that when considering the effect of the surface roughness of polished pad and wafer, the fluid pressure distribution has some fluctuation, the maximum pressure value is increased, the minimum pressure value is decreased, and the dimensionless load and torque are decreased.

Keywords: chemical mechanical polishing; lubrication equation; rough surfaces; fractal

化学机械抛光 (简称 CMP) 广泛应用于计算机硬盘片、硅晶片超光滑无损伤表面的加工。CMP 是目前唯一能够实现局部和全局平坦化的方法, 被认为是能兼顾表面粗糙度和表面平整度要求以及获得无损伤表面的最好工艺。CMP 过程的材料去除机制非常复杂, 在很大程度上它仍是一门黑箱技术, 需要经验或半经验的数据来优化过程中的各个参数以达到所需的抛光结果^[1]。

Nakamura等^[2]建立了一个简单的模型来分析在考虑了抛光液流体压力时的润滑条件。Sundararajan等^[3]对工件范围内的抛光液流动情况建立了二维润滑模型, 通过求解 Reynolds方程得出了抛光液膜厚和流体动压力。Park等^[4]扩展了 Runnels的研究工作, 他们考虑了工件在两个方向上的倾斜, 通过建立化学机械抛光工件时的流体动力学模型, 分析了抛光液的厚度和压力分布及接触应力等情况。张朝辉等^[5-6]、高太元等^[7]分别用多重网格方法和 Chebyshev加速超松弛法得到了流场的压力分布、无量纲载荷、转矩与抛光垫转速、转角、倾角的变化关系, 但在膜厚方程只是涉及到晶片的转角和倾角, 并且认为抛光垫和晶片表面都是绝对光滑的, 没有考虑抛光垫和晶片表面的粗糙度^[8]。Runnels等^[9]通过求解 Navier-Stokes方程

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (50675185); 教育部新世纪人才项目 (NCET06-0708)。

收稿日期: 2009-03-18

作者简介: 谭援强, 男, 博士生导师, 研究方向为超精密加工及其摩擦学。E-mail: tanyq@xtu.edu.cn.

讨论了润滑性能和磨损率问题。张朝辉等^[10]在二维流动模型基础上进一步考察抛光垫压缩特性、孔隙参数和晶片形状等参数对流动性能的影响。

分形理论已经被应用到工程粗糙表面形貌的研究中。目前国内外在粗糙表面接触、摩擦、磨损和磨屑分析等方面的研究中引入分形理论为解决难以处理或表达不准确的复杂摩擦学问题提供了新的行之有效的途径,对摩擦学理论的深入研究起到了一定的作用。本文作者考虑了晶片和抛光垫的表面粗糙度,利用分形技术构造了新膜厚方程,并将其应用于 CMP 过程中,分析了表面粗糙度对 CMP 过程抛光液的压力分布以及无量纲载荷和转矩的影响。基于分形的新膜厚方程,可进一步揭示抛光液膜厚的变化对 CMP 过程流场压力、无量纲载荷和转矩的影响,有助于进一步认识 CMP 机制。

1 基于分形的粗糙表面模拟

目前对工程粗糙表面的分形研究主要是基于对截面轮廓曲线的研究,一般主要采用 Weierstrass-Mandelbrot 分形函数(简称 WM 函数)模型和随机中点位移方法模拟表面轮廓^[11-12]。统计检验表明,这两种方法所得到的分形表面的高度都满足高斯分布。根据 Mandelbrot 分形理论,若将工程粗糙表面放大到适当尺寸,就会发现工程粗糙表面高度分布近似于地球表面的高山峡谷,而分形布朗运动则是描述加工表面形貌(高度分布)的一种合适的模型。这些物体表面的微观结构被广泛地应用于工程计算中,例如摩擦、润滑、密封、接触、导热等领域。

通常描述与高度特性相关的粗糙度的参数有:轮

廓算术平均偏差 R_a , 轮廓均方根偏差 R_q , 微观不平度高度 R_z 和轮廓最大高度 R_y 。基于分形的粗糙表面由标准方差 $stdev$ 和表面轮廓分形的维数 D_s 决定。 D_s 与 R_a 的线性关系并不十分明显。但一般来说, R_a 值小时, D_s 值则较大。这是因为 R_a 小时,表面的微观结构精细,短波长成分较多,因此 D_s 值较大。 D_s 与 R_a 可以反映轮廓的不同特征,参数不能互相替代^[13]。

采用常见的粗糙度 R_a , R_q , R_z , R_y 等来描述表面轮廓的不规则行为,具有简洁方便的优点,但因其所包含粗糙表面的信息有限,难以全面地体现粗糙表面的随机行为和细节特征。而基于分形的粗糙表面容易通过计算机来模拟,为研究与粗糙表面相关的问题提供了一种新途径。

Sum^[14] 测量了常用的聚亚氨酯 IC1000 抛光垫的一维轮廓的粗糙高度分布,如图 1 所示。

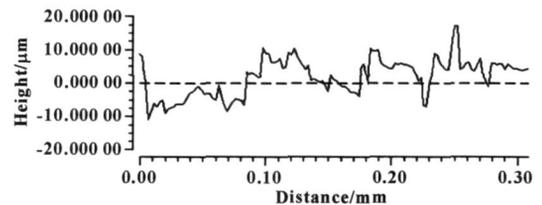


图 1 粗糙抛光垫的高度分布

Fig 1 Height distribution of rough polished pad

通过分形技术,应用随机中点位移法来模拟基于分形的粗糙表面。在模拟过程中的参数有反映粗糙表面的粗糙峰的高度的标准方差 $stdev$, 有反映粗糙表面粗糙程度的轮廓分形的维数 D_s 。图 2 和图 3 分别是抛光垫和晶片的粗糙表面轮廓的分形模拟结果。

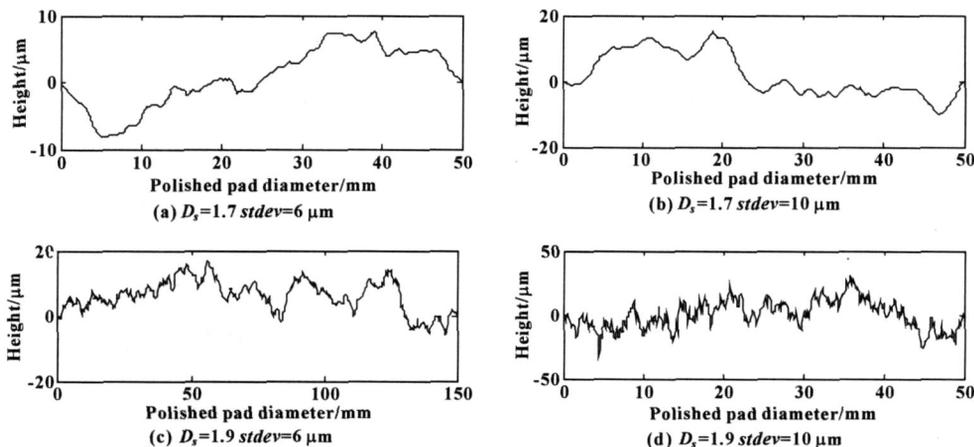


图 2 基于分形的抛光垫高度分布

Fig 2 Polished pad height distribution based on fractal

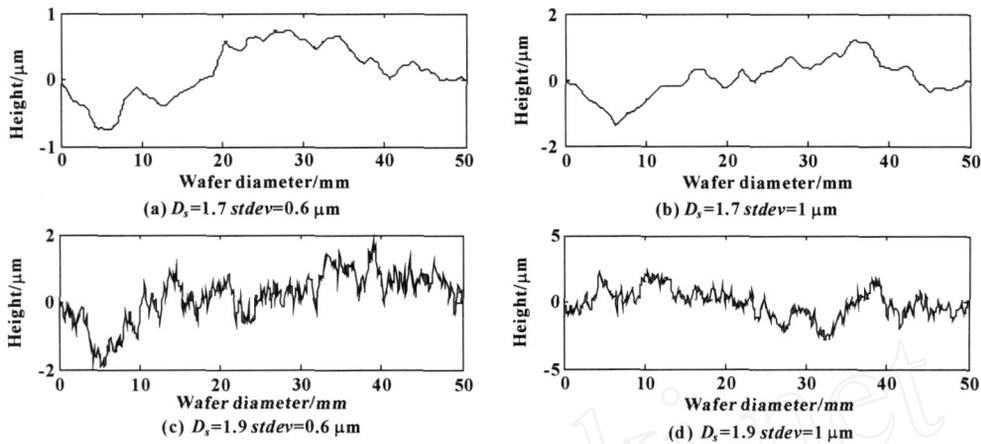


图 3 基于分形的晶片高度分布

Fig 3 Wafer height distribution based on fractal

从图 2 可以看出：当轮廓分形维数 D_s 相同时，标准方差 $stdev$ 为 $6 \mu\text{m}$ 的抛光垫高度分布明显比标准方差 $stdev$ 为 $10 \mu\text{m}$ 的高。当标准方差 $stdev$ 相同时，轮廓分形维数 D_s 为 1.9 的粗糙程度明显比轮廓分形维数 D_s 为 1.7 的粗糙。从图 3 的晶片高度分布可得出同样的结论，因此图 2、3 表明，可以选取不同的参数来构造具有不同粗糙程度的表面轮廓。

的粗糙峰，模拟的实际基于分形的新膜厚 \bar{h} 如图 4 所示。

2 考虑表面粗糙度的 CMP 润滑方程

2.1 新膜厚方程的建立

由于抛光垫和晶片都在高速旋转，为了模拟出粗糙表面的粗糙峰对压力分布的影响，采用上面的分形轮廓来构造出具有中心对称的分形曲面。首先利用分形技术分别产生抛光垫和晶片的基于分形的粗糙高度分布，然后将产生的分形粗糙高度分布和理想膜厚一起构成分形表述的膜厚。一般 CMP 过程中的无量纲的润滑方程的计算区域^[15]为： $r \in [0, 1]$ ， $\epsilon \in [0, 2]$ 。在计算网格上通过计算机数值模拟的抛光垫和晶片的粗糙峰分别记为 h_1 (图 2 (a), (b), (c), (d)) 和 h_2 (图 3 (a), (b), (c), (d))。由于是数值模拟的，所以 h 是网格点上的离散数据。对其进行无量纲化，得到 $\bar{h}_1 = h_1/h_{piv}$ ， $\bar{h}_2 = h_2/h_{piv}$ ，其中， h_{piv} 为晶片中心高度。

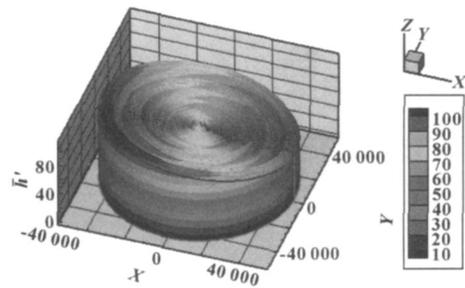


图 4 实际新膜厚的高度 \bar{h}

Fig 4 Height of new film thickness \bar{h}

其中：晶片半径 $r_0 = 50 \text{ mm}$ ，晶片中心高度 $h_{piv} = 80 \mu\text{m}$ ，转角 $\theta = 0.02^\circ$ ；倾角 $\phi = 0.018^\circ$ ；抛光垫的 $D_s = 1.9$ ， $stdev = 6 \mu\text{m}$ ，晶片的 $D_s = 1.9$ ， $stdev = 0.6 \mu\text{m}$ 。

2.2 润滑方程的建立

高太元等^[15]建立了带离心力项的润滑方程，并分析了离心力对抛光液压力分布以及无量纲载荷、转矩的影响。作者将新膜厚方程引入带离心力项的润滑方程，得到基于分形的新膜厚的带离心力项润滑方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\bar{m}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} \left[\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} \right] = D \sin \frac{\partial \bar{h}}{\partial r} + (D \cos \theta + \bar{r} + \bar{r}) \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + f(r, \bar{h}) \quad (3)$$

其中：

$$f(r, \bar{h}) = \frac{4\bar{h}_0^2}{p_0} \bar{m}^{-3} \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial r^2} - \frac{2\bar{h}_0^2}{p_0} \bar{m}^{-3} \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial r^2} + \frac{2\bar{h}_0}{p_0} \bar{h}^{-3} D \cos \theta \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial r^2} - \frac{2\bar{h}_0}{p_0} \frac{1}{r} \bar{h}^{-3} D^2 \cos^2 \theta \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial r^2} + \frac{6\bar{h}_0^2}{p_0} \bar{r} \bar{h}^{-2} \frac{\partial^2 \bar{h}}{\partial r^2} +$$

理想光滑的无量纲膜厚方程^[7]为：

$$\bar{h} = 1 - \frac{\bar{h}_0}{h_{piv}} \bar{r} \sin \theta \cos \phi - \frac{\bar{h}_0}{h_{piv}} \bar{r} \sin \theta \sin \phi \quad (1)$$

所以无量纲新膜厚方程为：

$$\bar{h} = \bar{h} - \bar{h}_1 + \bar{h}_2 \quad (2)$$

取 h_1 为图 2 (c) 的粗糙峰及 h_2 为图 3 (c)

$$\frac{12\bar{h}_0}{\rho_0} \bar{h}^{-2} D \cos^2 \bar{p} \frac{\partial \bar{h}}{\partial r} + \frac{6\bar{h}_0^2}{\rho_0} \bar{h}^{-2} D^2 \cos^2 \bar{p} \frac{\partial \bar{h}}{\partial r} - \frac{3\bar{h}_0^2}{\rho_0} \bar{r} \bar{h}^{-2} \frac{\partial \bar{h}}{\partial r} - \frac{6\bar{h}_0^2}{\rho_0} \bar{h}^{-2} D \sin^2 \bar{p} \frac{\partial \bar{h}}{\partial \theta} - \frac{3\bar{h}_0^2}{\rho_0} \frac{1}{\bar{r}} \bar{h}^{-2} D^2 \sin^2 \bar{p} \frac{\partial \bar{h}}{\partial \theta}$$

如果 $f(r, \theta) = 0$, 那么得到基于分形的新膜厚的不带离心力项润滑方程:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{r \bar{h}^3}{12} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} \right] = D \sin \bar{p} \bar{r} \frac{\partial \bar{h}}{\partial r} + (D \cos \bar{p} + \bar{r} + \bar{r}) \frac{\partial \bar{h}}{\partial \theta} \quad (4)$$

方程中的无量纲化参数:

$$\bar{h}_0 = \frac{h_0}{h_{pv}}, \quad \bar{r} = \frac{r}{r_0}, \quad \bar{h} = \bar{h} + \frac{\bar{h}_0}{h}, \quad \bar{p} = \frac{p}{p_0}, \quad \bar{D} = \frac{6}{p_0} \bar{p}^2,$$

$$D = \frac{d}{r_0}, \quad \bar{w} = \frac{w}{p}$$

式中: r_0 表示晶片半径; h_{pv} 表示晶片中心高度; p_0 表示参考压强 (通常为大气压强); \bar{p} , \bar{w} 分别表示转角和倾角; p , w 分别表示抛光垫和晶片的旋转速度; d 表示晶片和抛光垫的旋转中心距; ρ_0 表示抛光液的密度。

速度边界条件^[8]:

$$\begin{cases} z=0 & w_0 = d \sin \bar{p} & u_0 = (r + d \cos \bar{p}) \bar{p} \\ z=h & w_h = 0 & u_h = r \bar{w} \end{cases} \quad (5)$$

无量纲载荷与无量纲转矩由下列方程给出:

$$\bar{W}_f = \frac{1}{\rho_0} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \bar{p} r d\bar{r} d\bar{\theta} \quad \bar{M}_x = \frac{1}{\rho_0} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \bar{p} r^2 \sin \bar{d} \bar{r} d\bar{r} d\bar{\theta}$$

$$\bar{M}_y = \frac{1}{\rho_0} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \bar{p} r^2 \cos \bar{d} \bar{r} d\bar{r} d\bar{\theta}$$

其中: $W_f = p_0 \bar{W}_f$; $M_x = p_0 \bar{M}_x$; $M_y = p_0 \bar{M}_y$ 。

3 润滑方程求解

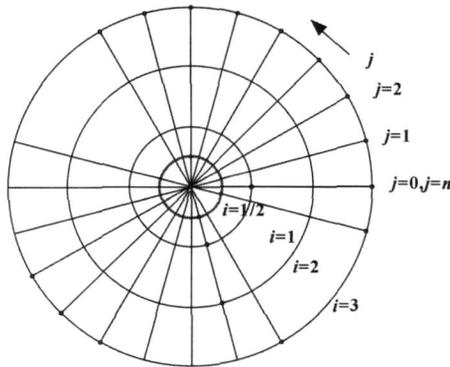


图 5 节点网格分布

Fig 5 Nodes distribution of the grid

采用具有二阶精度的五点中心差分格式对润滑方程 (3), (4) 进行离散。采用 Chebyshev 加速超松弛法^[16-17]求解离散后的代数方程组。计算区域为 $r \in [0, 1]$, $\theta \in [0, 2\pi]$ 。网格分布如图 5 所示, 在径向和周向均采用等距网格, 在周向上起点 ($j=0$) 和终点 ($j=n$) 重合。中心的压力由流量式^[17]求出:

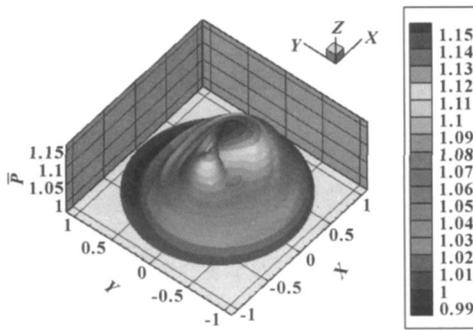
$$\bar{P}_{0,0} = \frac{\bar{h}_{1/2,j}^3 \bar{P}_{1,j} - D \bar{r} \sin \bar{p} \bar{h}_{1/2,j}}{\bar{h}_{1/2,j}^3}$$

4 数值结果讨论

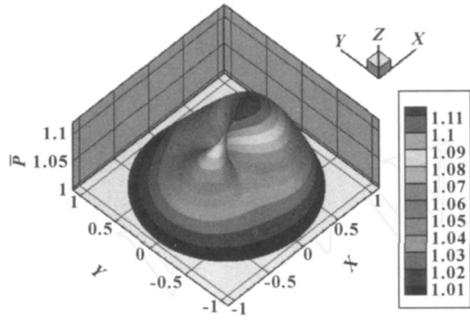
对如图 2, 3 所示的抛光垫和晶片的四组表面参数进行数值计算, 从四组表面参数计算的结果可知由于基于分形新膜厚的非光滑性, 导致了压力分布有一定的波动, 从而使得无量纲载荷和转矩的数值也有一定的变化, 但无量纲载荷和转矩随分形膜厚、转角、倾角的变化趋势仍然和一般膜厚方程下的一致。下面以第三组表面参数来比较考虑与不考虑表面粗糙度的计算结果。

数值计算中采用的参数数值: $w = 50$ mp, $p = 100$ mp, $h_{pv} = 80$ μ m, $\bar{p} = 0.02^\circ$, $\bar{w} = 0.018^\circ$, $\bar{D} = 0.00214$ Pa \cdot s, $p_0 = 101$ kPa, $d = 150$ mm, $r_0 = 50$ mm。

图 6 (a) 是初始压力 $p_0 = 101$ kPa 下, 带离心力项以及考虑表面粗糙度对应的三维无量纲压力分布图; 图 6 (b) 是初始压力 $p_0 = 101$ kPa 下, 带离心力项以及不考虑表面粗糙度对应的三维无量纲压力分布图。图 7 (a) 是初始压力 $p_0 = 101$ kPa 下, 不带离心力项以及考虑表面粗糙度对应的三维无量纲压力分布图; 图 7 (b) 是初始压力 $p_0 = 101$ kPa 下, 不带离心力项以及不考虑表面粗糙度对应的三维无量纲压力分布图。与高太元等^[8,15]在一般膜厚方程下带离心力项和不带离心力项的润滑方程得到的抛光液压力分布图比较可以看出: 由于分形膜厚的粗糙性, 导致了压力分布有一个小的波动, 并随着膜厚的局部增大 (减小) 而减小 (增大)。采用润滑方程 (3) (即考虑离心力) 计算得到的最大压力值由 $1.11p_0$ 增大到 $1.15p_0$, 最小压力值由 $1.01p_0$ 减小到 $0.99p_0$, 采用润滑方程 (4) (即不考虑离心力) 计算得到的最大压力值由 $1.085p_0$ 增大到 $1.11p_0$, 最小压力值由 $1.005p_0$ 减小到 $0.99p_0$, 但压力分布的整体趋势没有变化。



(a) 考虑表面粗糙度影响的压力分布

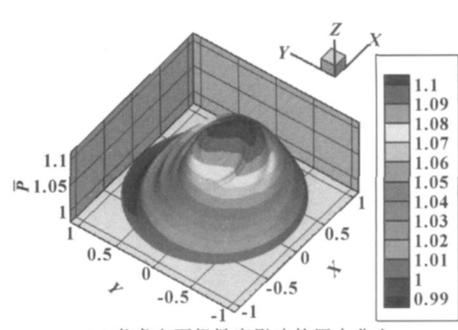


(b) 不考虑表面粗糙度影响的压力分布

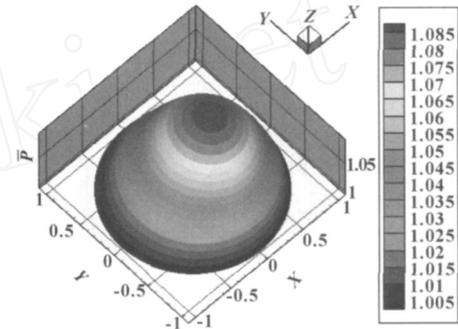
图 6 考虑离心力所对应的无量纲压力分布

Fig 6 Pressure distribution with considering centrifugal force (a) pressure distribution with considering roughness; (b) pressure distribution without considering roughness

图 8 为采用润滑方程 (3) (即考虑离心力时) 计算得到的分形膜厚 h 、转角、倾角 的变化对 \bar{W}_f , \bar{W}_x , \bar{W}_y 的影响。图 9 为采用润滑方程 (4) (即不考虑离心力时) 计算得到的分形膜厚 h 、转角、倾角 的变化对 \bar{W}_f , \bar{M}_x , \bar{M}_y 的影响。与高太元等^[8,15]在一般膜厚方程下带离心力项和不带离心力项的润滑方程得到的无量纲载荷和转矩随分形膜厚、转角、倾角



(a) 考虑表面粗糙度影响的压力分布



(b) 不考虑表面粗糙度影响的压力分布

图 7 不考虑离心力所对应的无量纲压力分布

Fig 7 Pressure distribution without considering centrifugal force (a) pressure distribution with considering roughness; (b) pressure distribution without considering roughness

的变化关系比较可以看出：由于基于分形新膜厚的粗糙性，导致了压力分布有一定的波动，从而使得无量纲载荷和转矩的数值都变小，但无量纲载荷和转矩随分形膜厚、转角、倾角的变化趋势仍然和一般膜厚方程下的一致。这说明具有一定粗糙程度的抛光垫和晶片表面对 CMP 过程中的无量纲载荷和转矩的变化有一定的影响。

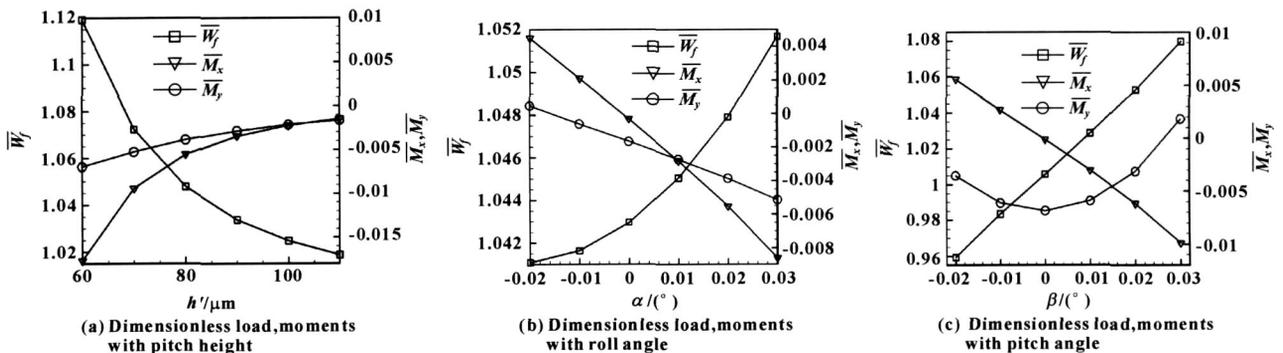


图 8 考虑离心力时的无量纲载荷和转矩变化

Fig 8 Dimensionless load, moments with considering centrifugal force

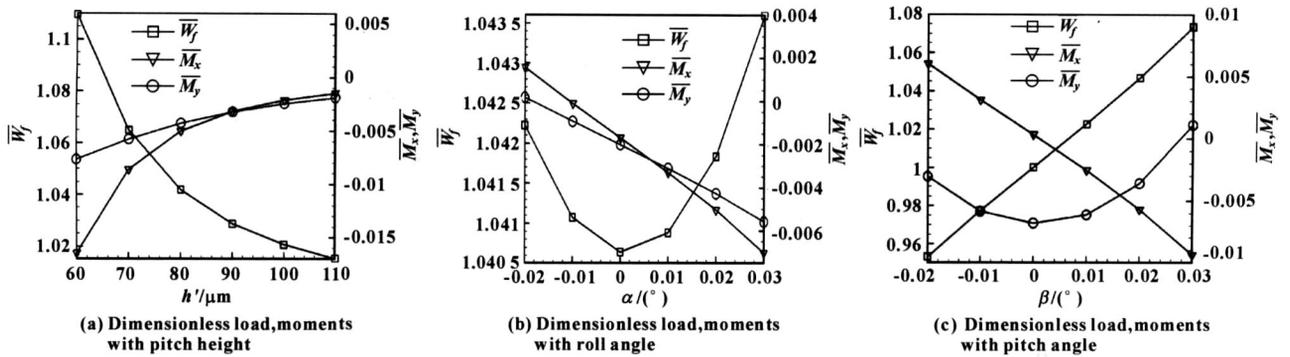


图 9 不考虑离心力时的无量纲载荷和转矩变化

Fig 9 Dimensionless load, moments without considering centrifugal force

5 结论

(1) 介绍了基于分形的粗糙表面的模拟方法, 基于一般膜厚的润滑方程, 构造了一种基于分形描述的新膜厚方程。

(2) 采用基于分形的新膜厚方程得到的, 抛光液的压力分布有一定的波动, 而且压力最大值有所增大, 压力最小值有所减小, 无量纲载荷和转矩随分形膜厚、转角、倾角变化的基本趋势没有变化, 但其数值大小要比一般膜厚方程的数值小。

参考文献

- [1] XU Jin, LUO Jianbin, LU Xinchun, et al Progress in Material Removal Mechanisms of Surface Polishing with Ultra Precision [J]. Chinese Sci Bulletin, 2004, 49(16): 1687 - 1693.
- [2] Nakamura T, Akamatsu K, Arakawa N. A bowl feed and double sides polishing for silicon wafer for VLSI [J]. Bull Japan Soc of Prec Eng, 1985, 19(2): 125 - 135.
- [3] Sundararajan S, Thakurta G D, Schwendeman D W, et al Two-dimensional wafer-scale mechanical planarization model based on lubrication theory and mass transport [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1999, 46(2): 761 - 766.
- [4] Cho C H, Park S S, Ahn Y. Three-dimensional wafer scale hydrodynamic modeling for chemical mechanical polishing [J]. Thin Solid Films, 2001, 389: 254 - 260.
- [5] 张朝辉, 雒建斌, 温诗铸. CMP 润滑方程的多重网格法求解 [J]. 自然科学进展, 2003, 13(11): 1224 - 1227. Zhang Chao-hui, Luo Jianbin, Wen Shizhu Multigrid technique incorporated algorithm for CMP lubrication equations [J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(11): 1224 - 1227.
- [6] 张朝辉, 雒建斌, 温诗铸. 化学机械抛光流动性能分析 [J]. 润滑与密封, 2004(4): 31 - 33. Zhang Chao-hui, Luo Jianbin, Wen Shizhu Analysis on Flow Properties of Chemical Mechanical Polishing Process [J]. Lubrication Engineering, 2004(4): 31 - 33.
- [7] 高太元, 李明军, 高智. CMP 润滑方程的 Chebyshev 加速超松弛法求解 [J]. 自然科学进展, 2007, 17(12): 1724 - 1728. Gao Taiyuan, Li Mingjun, Gao Zhi Chebyshev Acceleration Method with Successive Over-relaxation Technique For Lubrication Equations [J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(12): 1724 - 1728.
- [8] 葛世荣. 粗糙表面的分形特征与分形表达研究 [J]. 摩擦学学报, 1997, 17(1): 73 - 80. Ge Shirong The Fractal Behavior and Fractal Characterization of Rough Surfaces [J]. Tribology, 1997, 17(1): 73 - 80.
- [9] Runnels S R, Eyman L M. Tribology Analysis of Chemical-Mechanical Polishing [J]. J Electrochem Soc, 1994, 141(6): 1698 - 1701.
- [10] 张朝辉, 杜永平, 常秋英, 等. 化学机械抛光中抛光垫作用分析 [J]. 北京交通大学学报, 2007(1): 18 - 21. Zhang Chao-hui, Du Yongping, Chang Qiuying, et al Analysis on Pad Effects in Chemical Mechanical Polishing [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007(1): 18 - 21.
- [11] 陈辉, 胡元中, 王慧, 等. 粗糙表面分形特征的模拟及其表征 [J]. 机械工程学报, 2006, 42(9): 221 - 223. Chen Hui, Hu Yuanzhong, Wang Hu, et al Simulation and Characterization of fractal Rough Surfaces [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9): 221 - 223.
- [12] Mark Finlay, Keith A Blanton 用 C++ 设计二维、三维分形图形程序 [M]. 曹康, 等译. 北京: 科学出版社, 1995: 148 - 156.
- [13] 李成贵, 张国雄, 袁长良, 等. 分形维数与表面粗糙度参数的关系 [J]. 工具技术, 1997(12): 36 - 38. Li Chenggui, Zhang Guoxiong, Yuan Changliang, et al The Relationship between the Fractal Dimension and Surface Roughness Parameters [J]. Tool Engineering, 1997(12): 36 - 38.
- [14] Sum Huan N G Measurement and modeling of fluid pressures in chemical mechanical polishing [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2005: 89 - 121. (下转第 52 页)

布大量的带状结构, 存在较大的划痕和剥落痕迹, 表明其磨损方式主要是黏着转移和犁削磨损, 软碳填充 PTFE 复合材料磨损表面均出现犁削, 随着软碳含量的增加, 犁削现象减轻。可以看出, 当软碳质量分数为 15% 时, 复合材料的磨损表面出现了填料脱落现象, 这可能是由于没有采用偶联剂, 当软碳含量增大时, 与基体材料的结合强度降低, 造成了填充材料易脱落, 这也导致了其磨损量的增加。

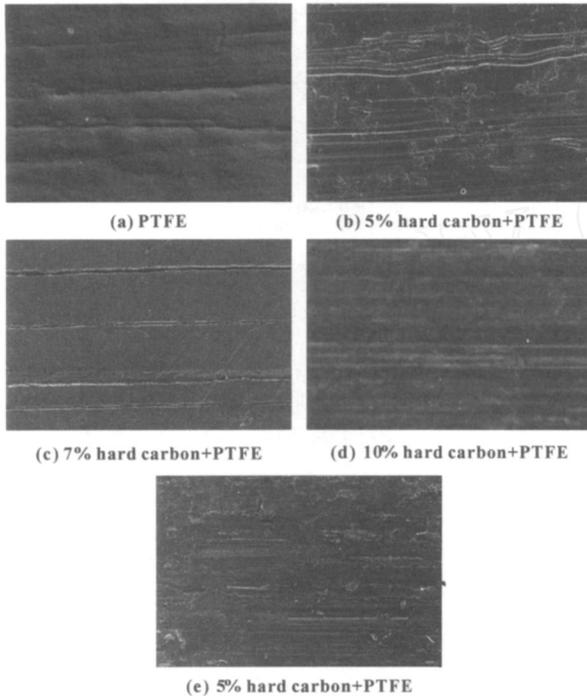


图 3 复合材料磨损表面的 SEM 照片

Fig 3 SEM images of worn surfaces of PTFE composites with soft carbon

3 结论

(1) 软碳填充 PTFE 能够提高材料的硬度和耐磨性。填充含量越高, 复合材料的硬度越大。填充质量分数超过 7% 时, 耐磨性变化不大, 甚至可能会降低。

(2) 随着软碳含量的增加, PTFE 复合材料的摩擦因数也增加, 载荷为 100 N 时, 摩擦因数随填料含

量的增加上升较快, 载荷超过 150 N 时, 摩擦因数变化较平缓。随着载荷的增加, 摩擦因数逐渐降低, 但载荷超过 150 N 后下降不显著。

(3) SEM 观察表明, 软碳填充 PTFE 复合材料磨损表面均出现犁削, 且随着软碳含量的增加, 犁削现象减轻, 说明软碳作为填料可以减轻和抑制 PTFE 的犁削和黏着磨损。

参考文献

- [1] Lee Jung Yeob, Lin Dae Soon. Tribological behavior of PTFE film with nanodiamond [J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 188/189: 833 - 839.
- [2] Friedrich K, Kargerkocsis J, Lu Z, et al. Effects of steel counterface roughness and temperature on the friction and wear of PE (E) K composites under dry sliding conditions [J]. Wear, 1991, 148: 235.
- [3] 关庆丰, 李晓宇, 李光玉, 等. 碳纤维增强摩擦阻材料的摩擦磨损特性研究 [J]. 摩擦学学报, 1999, 19(1): 87 - 90.
Guan Qingfeng, Li Xiaoyu, Li Guangyu, et al. The Friction and Wear Behaviors of Carbon Fiber Reinforced Antifriction Material [J]. Tribology, 1999, 19(1): 87 - 90.
- [4] 何春霞, 史丽萍. 碳黑、微珠粉填充 UHMWPE 摩擦学性能研究 [J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(4): 387 - 389.
HE Chunxia, SHI Liping. Tribology property of uhmwpe composites filled with carbon black and tiny glass powder [J]. Materials Science & Technology, 2005, 13(4): 387 - 389.
- [5] 何春霞, 万芳新, 张静, 等. 碳纳米管增强 PTFE 复合材料摩擦磨损性能研究 [J]. 润滑与密封, 2006, 31(12): 110 - 112.
He Chunxia, Wan Fangxin, Zhang Jing, et al. Friction and Wear Properties of PTFE Composites Filled with CNTs [J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(12): 110 - 112.
- [6] 万芳新, 何春霞, 黄晓鹏. 碳黑填充 PTFE 复合材料干摩擦磨损性能分析 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(12): 97 - 99.
Wan Fangxin, He Chunxia, Huang Xiaopeng. Dry Friction and Wear Properties of PTFE Composites Filled with Carbon Black [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(12): 97 - 99.
- [7] 万芳新, 何春霞, 黄晓鹏. 碳材料填充 PTFE 复合材料摩擦磨损性能 [J]. 润滑与密封, 2008, 33(9): 45 - 47.
Wan Fangxin, He Chunxia, Huang Xiaopeng. Friction and Wear Properties of PTFE Composites Filled with Carbon [J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(9): 45 - 47.

(上接第 38 页)

- [15] 高太元, 李明军, 胡利民, 等. CMP 流场的数值模拟及离心力影响分析 [J]. 力学学报, 2008, 40(6): 729 - 734.
Gao Taiyuan, Li Mingjun, Hu Limin, et al. Hydrodynamic simulation and the effect of centrifugal force for chemical mechan-

ical polishing process [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 40(6): 729 - 734.

- [16] 何光渝, 高永利. Visual Fortran 常用数值算法集 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 679 - 684.
- [17] 蔡大用. 数值代数 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1987: 140 - 148.