

CMP 流场的数值模拟及离心力影响分析¹⁾

高太元^{*†,2)} 李明军^{*} 胡利民^{**} 高智[†]

^{*}(湘潭大学数学与计算科学学院, 湘潭 411105)

[†](中国科学院力学研究所 LHD 实验室, 北京 100085)

^{**}(四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要 化学机械抛光 (chemical mechanical polishing, CMP) 是一项融合化学分解和机械力学的工艺, 其中包含了流体动力润滑的作用. 在已有润滑方程的基础上, 提出并分析了带有离心力项的润滑方程. 利用 Chebyshev 加速超松弛技术对有离心力项的润滑方程进行求解, 得到离心力对抛光液压力分布的影响. 数值模拟结果表明, 压力分布与不带离心力项的润滑方程得出的明显不同; 无量纲载荷和转矩随中心膜厚、转角、倾角、抛光垫旋转角速度等参数的变化趋势相同, 但数值相差较大, 抛光垫旋转角速度越大差别越大.

关键词 化学机械抛光, 离心力, 润滑方程, 压力分布, Chebyshev 加速超松弛技术

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2008)06-0729-06

引 言

20 世纪 90 年代兴起的新型化学机械抛光技术, 是机械磨削和化学腐蚀的组合技术, 它借助超微粒子的研磨作用以及抛光液的化学腐蚀作用在被研磨的介质表面上形成光洁平坦的表面^[1], CMP 技术从加工性能和速度上同时满足了芯片图形加工的要求, 是目前最好的实现全局平面化的工艺技术, 在集成电路、计算机磁头、硬磁盘等超精密表面加工领域得到了大量研究和广泛应用^[2].

数值计算 CMP 的应力偶模型可以克服实验和测试的局限, 在 CMP 机理研究中得到大量发展, 目前已成为一个活跃的领域. Runnels 等^[3] 在数值求解 Navier-Stokes 方程后研究了 CMP 的润滑特性和磨损率; Sundararajan 等^[4] 通过求解 Reynolds 方程得出了抛光液膜厚与流体压力分布的依赖关系; Park 等^[5] 通过建立化学机械抛光硅片时的流体力学模型, 分析了抛光液的厚度和压力分布以及接触应力; Cho 等^[6] 在三维尺度模型上对抛光液压力分布进行了数值模拟并分析了黏性系数对压力以及切除率的影响; 张朝辉等^[7~11] 利用多重网格法对润滑方程进行了求解, 并且分析了应力偶效应以及微极性; 高太元等^[12] 对利用 Chebyshev 加速超松

弛技术对由流体动力学方程组推出的润滑方程进行了数值求解.

本文通过分析流场效应, 利用柱坐标系下不可压缩流体力学 N-S 方程, 在已有润滑方程基础上, 通过添加离心力项, 得到带有离心力项的润滑方程. 利用 Chebyshev 加速超松弛技术进行求解, 给出了不同的压力分布以及载荷及转矩在不同参数下的变化情况, 同时比较了两种润滑方程下抛光垫旋转角速度对于载荷以及转矩的影响.

1 带离心力项的润滑方程推导

对柱坐标系下不可压缩运动方程组做如下假设:

旋转角速度较大时惯性力以离心力为主, 忽略离心力以外的惯性力; z 方向的压力梯度为 0; 稳态, $\frac{\partial u_1}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial u_2}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial u_3}{\partial t} = 0$, 其中 u_1, u_2, u_3 分别为 x, y, z 方向的速度分量; 无量纲化时润滑假设; 常密度 ρ , 黏性系数 η 为常数. 可得带有离心力项的运动方程组为

$$\frac{\partial p}{\partial r} - \rho \frac{u^2}{r} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (1a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} \frac{1}{r} + \rho \frac{wu}{r} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1b)$$

2007-09-12 收到第 1 稿, 2008-04-23 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (10676031, 50675185).

2) E-mail: gaotaiyuan@163.com

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (1c)$$

柱坐标下的连续方程

$$\frac{\partial(rw)}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial \varpi}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

其中, w, u, ϖ 分别为 r, θ, z 方向的速度分量, p 为流场中抛光液的压力.

速度边界条件为

$$\left. \begin{aligned} z = 0, w_0 = d \sin \theta \omega_P, u_0 = (r + d \cos \theta) \omega_P \\ z = h, w_h = 0, u_h = r \omega_W \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, ω_W, ω_P 表示晶片和抛光垫的旋转角速度; d 表示晶片 (wafer) 和抛光垫 (pad) 的旋转中心距; w_0, u_0 表示抛光垫表面 r, θ 方向的速度分量; h 代表抛光液膜厚; w_h, u_h 表示晶片表面 r, θ 方向的速度分量.

对方程组式 (1a) 沿坐标 z 积分, 由泰勒公式可得

$$w = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial r} z^2 - \frac{1}{2\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial r} - \rho \frac{u_0^2}{r} \right) zh + \frac{w_h - w_0}{h} z + w_0 - \frac{1}{\eta} \int_0^z \int_0^z \rho \frac{u^2}{r} dz^2 \quad (4)$$

同理对方程组式 (1b) 沿坐标 z 积分可得

$$u = \frac{1}{2\eta} \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} z^2 - \frac{1}{2\eta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho \frac{w_0 u_0}{r} \right) zh + \frac{u_h - u_0}{h} z + u_0 + \frac{1}{\eta} \int_0^z \int_0^z \rho \frac{uw}{r} dz^2 \quad (5)$$

将速度表达式 (4), (5) 代入连续方程 (2), 沿 z 坐标积分 ($z \in [0, h]$), 可以得到润滑方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left(rh^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = & \\ 6\eta \frac{\partial}{\partial r} [rh(w_0 + w_h)] + 6\eta \frac{\partial}{\partial \theta} [h(u_0 + u_h)] + & \\ \frac{\partial}{\partial r} (3h^3 u_0 \rho) - \frac{\partial}{\partial \theta} \left(3h^3 \frac{w_0 u_0}{r} \rho \right) - & \\ \frac{\partial}{\partial r} \left(12r \int_0^h \int_0^z \int_0^z \frac{\rho u^2}{r} dz^3 \right) + & \\ \frac{\partial}{\partial \theta} \left(12 \int_0^h \int_0^z \int_0^z \rho \frac{wu}{r} dz^3 \right) & \end{aligned} \quad (6)$$

对于方程 (6) 中的两项积分

$$\begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial r} \left(12r \int_0^h \int_0^z \int_0^z \frac{\rho u^2}{r} dz^3 \right) \\ + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(12 \int_0^h \int_0^z \int_0^z \rho \frac{wu}{r} dz^3 \right) \end{aligned}$$

我们考虑应用矩形积分公式来近似并作为源项, 可得

$$\begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial r} \left(12r \int_0^h \int_0^z \int_0^z \frac{\rho u^2}{r} dz^3 \right) = \\ -\frac{\partial}{\partial r} \left(h^3 \rho u_0^2 \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(h^3 \rho u_h^2 \right) \end{aligned} \quad (7a)$$

同理

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(12 \int_0^h \int_0^z \int_0^z \rho \frac{wu}{r} dz^3 \right) = \frac{\partial}{\partial \theta} \left(h^3 \rho \frac{w_0 u_0}{r} \right) \quad (7b)$$

将式 (7a), (7b) 代入方程 (6) 中, 化简可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left(rh^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = & \\ 6\eta \frac{\partial}{\partial r} [rh(w_0 + w_h)] + 6\eta \frac{\partial}{\partial \theta} [h(u_0 + u_h)] + & \\ \frac{\partial}{\partial r} (2h^3 u_0^2 \rho) - \frac{\partial}{\partial r} (h^3 u_h^2 \rho) - \frac{\partial}{\partial \theta} \left(2h^3 \frac{w_0 u_0}{r} \rho \right) & \end{aligned} \quad (8)$$

将速度边界条件 (3) 代入方程 (8) 中, 并引进无量纲化参量

$$\begin{aligned} \chi = \frac{r_0}{h_{\text{piv}}}, \bar{r} = \frac{r}{r_0}, \bar{h} = \frac{h}{h_{\text{piv}}}, \bar{p} = \frac{p}{p_0} \\ \Lambda = \frac{6\eta\omega_P}{p_0} \chi^2, D = \frac{d}{r_0}, \xi = \frac{\omega_W}{\omega_P} \end{aligned}$$

上述各参数和变量全部采用国际标准单位.

对方程 (8) 无量纲化, 化简可得带离心力项的无量纲化润滑方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}} \right) + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} \right) = & \\ \Lambda D \sin \theta \bar{r} \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{r}} + \Lambda (D \cos \theta + \bar{r} + \xi \bar{r}) \frac{\partial \bar{h}}{\partial \theta} + & \\ \frac{4r_0^2}{p_0} \bar{r} \bar{h}^3 \rho \omega_P^2 - \frac{2r_0^2}{p_0} \bar{r} \bar{h}^3 \rho \omega_W^2 + & \\ \frac{2r_0}{p_0} \bar{h}^3 \rho d \cos \theta \omega_P^2 - \frac{2}{p_0} \frac{1}{\bar{r}} \bar{h}^3 \rho d^2 \cos 2\theta \omega_P^2 + & \\ \frac{6r_0^2}{p_0} \bar{r}^2 \bar{h}^2 \rho \omega_P^2 \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{r}} + \frac{12r_0}{p_0} \bar{r} \bar{h}^2 \rho d \cos \theta \omega_P^2 \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{r}} + & \\ \frac{6}{p_0} \bar{h}^2 \rho d^2 \cos^2 \theta \omega_P^2 \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{r}} - \frac{3r_0^2}{p_0} \bar{r}^2 \bar{h}^2 \rho \omega_W^2 \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{r}} - & \\ \frac{6r_0}{p_0} \bar{h}^2 \rho d \sin \theta \omega_P^2 \frac{\partial \bar{h}}{\partial \theta} - \frac{3}{p_0} \frac{1}{\bar{r}} \bar{h}^2 \rho d^2 \sin 2\theta \omega_P^2 \frac{\partial \bar{h}}{\partial \theta} & \end{aligned} \quad (9)$$

以及无量纲膜厚方程

$$\bar{h} = 1 - \frac{r_0}{h_{\text{piv}}} \bar{r} \sin \alpha \cos \theta - \frac{r_0}{h_{\text{piv}}} \bar{r} \sin \beta \sin \theta \quad (10)$$

其中， r_0 表示晶片半径； h_{piv} 表示晶片中心膜厚； p_0 表示参考压强（通常为大气压）； α, β 分别表示转角 (roll angle) 和倾角 (pitch angle)，均为可变参量。其中，各参量上的“-”表示无量纲量。

无量纲载荷与无量纲转矩由下列方程给出

$$\begin{aligned} \bar{W}_f &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \bar{p} \bar{r} d\bar{r} d\theta \\ \bar{M}_x &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \bar{p} \bar{r}^2 \sin \theta d\bar{r} d\theta \\ \bar{M}_y &= -\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \bar{p} \bar{r}^2 \cos \theta d\bar{r} d\theta \end{aligned}$$

其中， $W_f = \pi p_0 r_0^2 \cdot \bar{W}_f$ ， $M_x = \pi p_0 r_0^3 \cdot \bar{M}_x$ ， $M_y = \pi p_0 r_0^3 \cdot \bar{M}_y$ 。 $\bar{W}_f, \bar{M}_x, \bar{M}_y$ 分别表示无量纲载荷及 x, y 方向的无量纲转矩。

2 润滑方程的求解

2.1 润滑方程的离散

对于包括中心点在内的各点，采用具有二阶精度的 5 点中心差分格式对润滑方程式 (9) 进行离散，可得

$$\begin{aligned} \frac{C_1 \bar{p}_{i+1,j} - C_2 \bar{p}_{i,j} + C_3 \bar{p}_{i-1,j}}{h_r^2} + \\ \frac{1}{\bar{r}_i} \frac{C_4 \bar{p}_{i,j+1} - C_5 \bar{p}_{i,j} + C_6 \bar{p}_{i,j-1}}{h_\theta^2} = f_{i,j} \end{aligned} \quad (11)$$

其中， h_r, h_θ 分别为径向和周向的网格剖分步长，

$$\begin{aligned} C_2 &= 2r_{i,j} \varepsilon_{i,j}, C_5 = 2\varepsilon_{i,j}, \varepsilon = \bar{h}^3 \\ \varepsilon_{i \pm \frac{1}{2},j} &= \frac{1}{2} (\varepsilon_{i \pm 1,j} + \varepsilon_{i,j}), \varepsilon_{i,j \pm \frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (\varepsilon_{i,j} + \varepsilon_{i,j \pm 1}) \\ C_1 &= \left\{ \frac{1}{2} \varepsilon_{i,j} h_r + r_{i,j} \left[\varepsilon_{i,j} + \frac{1}{2} (\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j} - \varepsilon_{i-\frac{1}{2},j}) \right] \right\} \\ C_3 &= \left\{ -\frac{1}{2} \varepsilon_{i,j} h_r + r_{i,j} \left[\varepsilon_{i,j} - \frac{1}{2} (\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j} - \varepsilon_{i-\frac{1}{2},j}) \right] \right\} \\ C_4 &= \varepsilon_{i,j} + \frac{1}{2} (\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2}} - \varepsilon_{i,j-\frac{1}{2}}) \\ C_6 &= \varepsilon_{i,j} - \frac{1}{2} (\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2}} - \varepsilon_{i,j-\frac{1}{2}}) \\ \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{r}} &= \frac{\bar{h}_{i+\frac{1}{2},j} - \bar{h}_{i-\frac{1}{2},j}}{h_r}, \quad \frac{\partial \bar{h}}{\partial \theta} = \frac{\bar{h}_{i,j+\frac{1}{2}} - \bar{h}_{i,j-\frac{1}{2}}}{h_\theta} \end{aligned}$$

$f_{i,j}$ 为式 (9) 的右端项。

2.2 中心点压力的确定

网格分布如图 1 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。中心的压力则由下式给出^[5]

$$\bar{P}_{0,0} = \frac{\sum \bar{h}_{\frac{1}{2},j}^3 \bar{P}_{1,j} - \Delta D \Delta \bar{r} \sum \sin \theta_j \bar{h}_{\frac{1}{2},j}}{\sum \bar{h}_{\frac{1}{2},j}^3} \quad (12)$$

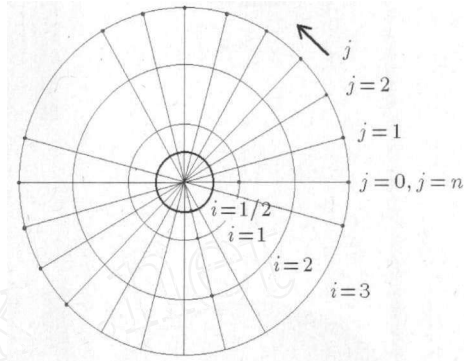


图 1 二维网格

Fig.1 2-D grid

2.3 超松弛迭代

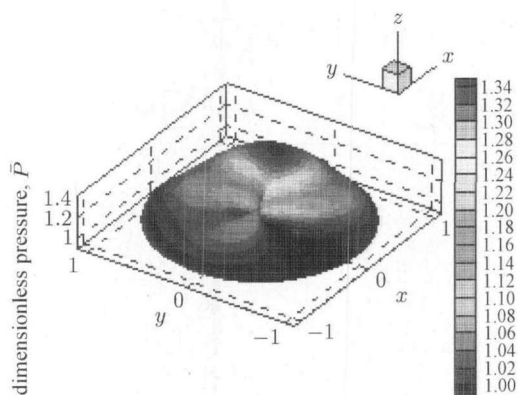
我们应用了 Chebyshev 加速超松弛技术^[12,13]，获得了满意的数值求解结果。本文仍然采用 Chebyshev 加速超松弛法对离散方程 (11) 进行数值求解。

3 数值结果讨论

对于未指明的参量，采用以下数值：

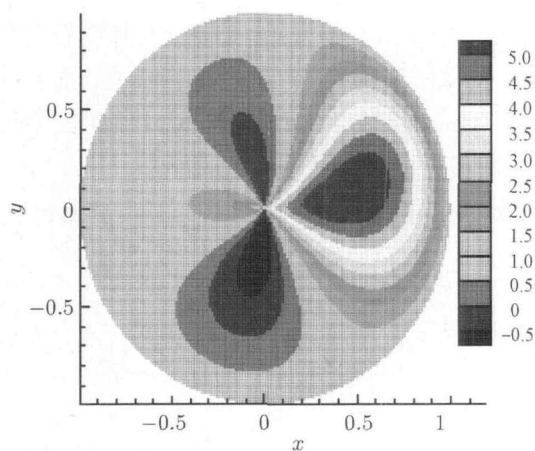
$\omega_W = 50 \text{ r/min}$ ， $\omega_P = 100 \text{ r/min}$ ， $h_{piv} = 80 \mu\text{m}$ ， $\alpha = 0.02^\circ$ ， $\beta = 0.018^\circ$ ， $\eta = 0.0214 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $P_0 = 101 \text{ kPa}$ ， $d = 150 \text{ mm}$ ， $r_0 = 50 \text{ mm}$ ， $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ 。

图 2 是在旋转角速度 $\omega_W = 50 \text{ r/min}$ ， $\omega_P = 100 \text{ r/min}$ 时本文通过求解计入离心力项的润滑方程得出的三维和二维压力分布图。图 3 是在旋转角速度为 $\omega_W = 150 \text{ r/min}$ ， $\omega_P = 300 \text{ r/min}$ 时的三维和二维压力分布图。与 Cho 等^[6] 通过求解不计入离心力项的润滑方程得出的抛光液压力分布比较，可以看出，加入离心力项以后，压力分布有明显不同，在中心附近产生压力涡，尤其是在旋转角速度增加到 $\omega_W = 150 \text{ r/min}$ ， $\omega_P = 300 \text{ r/min}$ 时，开始出现负压区，成对称分布。证明液体在抛光过程中如果旋转角速度过大容易被吸附于上、下抛光表层。负压区的液体即被吸附于上表层，正压区吸附于下表层。同时，我们也发现中心膜厚越小，旋转角速度影响也就越小，即晶片与抛光垫越紧密，离心力影响会越小。



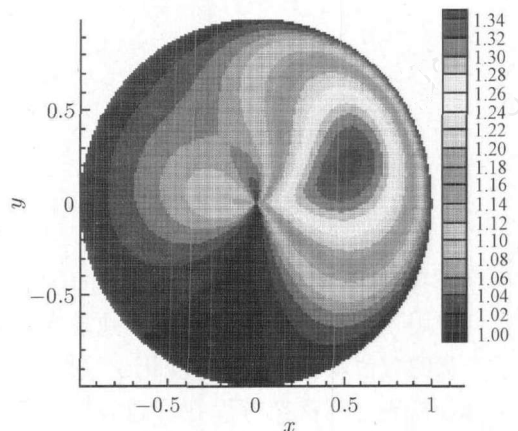
(a) 三维压力分布

(a) 3-D pressure distributions



(b) 二维压力分布

(b) Pressure distributions of slurry in contour plot



(b) 二维压力分布

(b) Pressure distributions of slurry in contour plot

图 2 三维 (a) 以及二维 (b) 压力分布图 ($P_0 = 101 \text{ kPa}$, $\omega_W = 50 \text{ r/min}$, $\omega_P = 100 \text{ r/min}$)

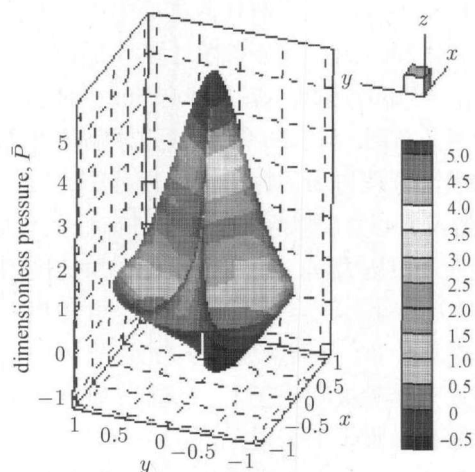
Fig.2 Pressure distributions of 3-D (a) and slurry in contour plot (b) ($P_0 = 101 \text{ kPa}$, $\omega_W = 50 \text{ r/min}$, $\omega_P = 100 \text{ r/min}$)

图 3 三维 (a) 以及二维 (b) 压力分布图 ($P_0 = 101 \text{ kPa}$, $\omega_W = 150 \text{ r/min}$, $\omega_P = 300 \text{ r/min}$)

Fig.3 Pressure distributions of 3-D (a) and slurry in contour plot (b) ($P_0 = 101 \text{ kPa}$, $\omega_W = 150 \text{ r/min}$, $\omega_P = 300 \text{ r/min}$)

图 4~ 图 6 表示计入离心力项以后模拟出的无量纲载荷和转矩与中心膜厚、转角、倾角的变化关系. 与不计入离心力项润滑方程的数值模拟结果^[12]比较, 可以发现, 变化趋势基本符合, 但是数值范围即影响程度增大.

图 7 分别表示不计入离心力项 (without CF, centrifugal force) 和计入离心力项 (with CF, centrifugal force) 两种润滑方程模拟出的无量纲载荷以及转矩随抛光垫旋转角速度的变化关系图. 实际工程中, 抛光垫的旋转角速度介于 $\omega_P = 50 \text{ r/min}$ 到



(a) 三维压力分布

(a) 3-D pressure distributions

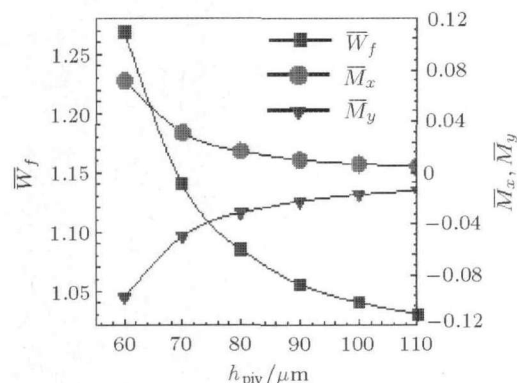


图 4 中心膜厚对无量纲载荷和转矩的影响 ($P_0 = 101 \text{ kPa}$, $\omega_W = 50 \text{ r/min}$, $\omega_P = 100 \text{ r/min}$)

Fig.4 Effects of standard nominal clearance on dimensionless load and moments ($P_0 = 101 \text{ kPa}$, $\omega_W = 50 \text{ r/min}$, $\omega_P = 100 \text{ r/min}$)

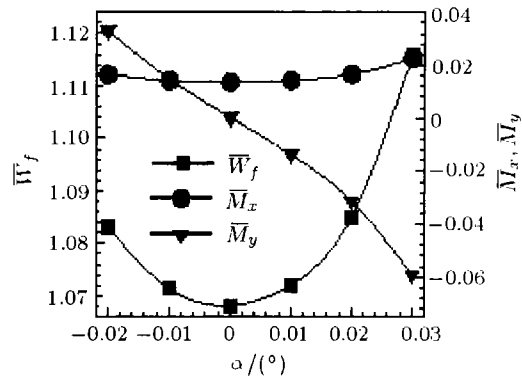


图 5 转角对无量纲载荷以及转矩的影响 ($P_0 = 101 \text{ kPa}$, $\omega_W = 50 \text{ r/min}$, $\omega_P = 100 \text{ r/min}$)
Fig.5 Effects of rolling angle on dimensionless load and moments ($P_0 = 101 \text{ kPa}$, $\omega_W = 50 \text{ r/min}$, $\omega_P = 100 \text{ r/min}$)

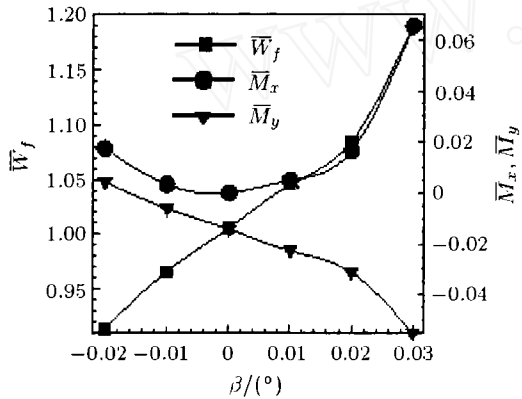
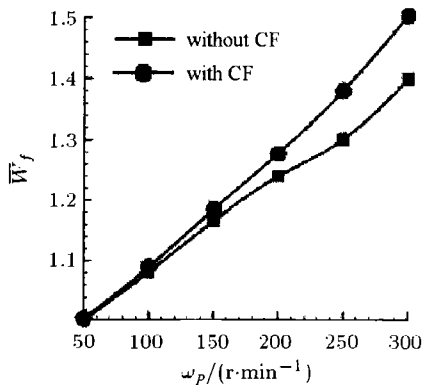
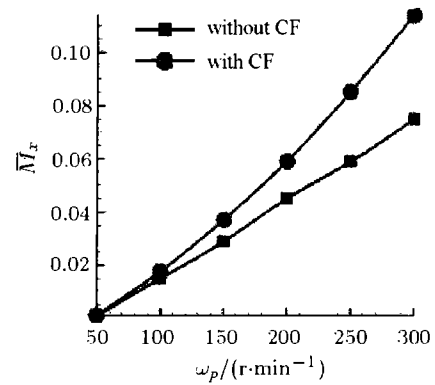


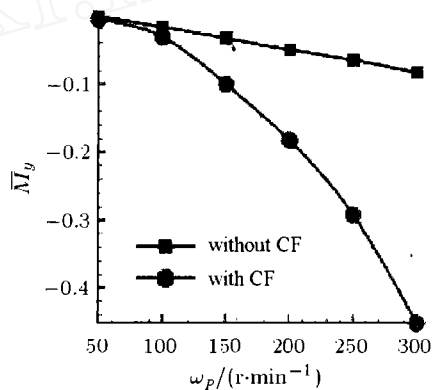
图 6 倾角对无量纲载荷以及转矩的影响 ($P_0 = 101 \text{ kPa}$, $\omega_W = 50 \text{ r/min}$, $\omega_P = 100 \text{ r/min}$)
Fig.6 Effects of pitch angle on dimensionless load and moments ($P_0 = 101 \text{ kPa}$, $\omega_W = 50 \text{ r/min}$, $\omega_P = 100 \text{ r/min}$)



(a) 两种润滑方程模拟出的抛光垫旋转速度对无量纲载荷的影响 ($P_0 = 101 \text{ kPa}$)
(a) Effects of pad angular velocity on dimensionless load under two Reynolds equations ($P_0 = 101 \text{ kPa}$)



(b) 两种润滑方程模拟出的抛光垫旋转速度对 x-方向无量纲转矩的影响 ($P_0 = 101 \text{ kPa}$)
(b) Effects of pad angular velocity on x-dimensionless moments under two Reynolds equations ($P_0 = 101 \text{ kPa}$)



(c) 两种润滑方程模拟出的抛光垫旋转速度对 y-方向无量纲转矩的影响 ($P_0 = 101 \text{ kPa}$)
(c) Effects of pad angular velocity on y-dimensionless moments under two Reynolds equations ($P_0 = 101 \text{ kPa}$)

图 7 两种润滑方程模拟出的抛光垫旋转速度对载荷以及转矩的影响 ($P_0 = 101 \text{ kPa}$)

Fig.7 Effects of pad angular velocity on dimensionless load and moments under two Reynolds equations ($P_0 = 101 \text{ kPa}$)

$\omega_P = 200 \text{ r/min}$ 之间^[14], 由图 7 可以看出, 加入离心力项后, 旋转角速度对于无量纲载荷以及转矩的影响程度增大. 由此可见, 加入离心力项以后的模拟结果具有一定的参考性.

4 结束语

本文在已有润滑方程基础上通过添加离心力项, 得出添加离心力项的润滑方程, 利用 Chebyshev 加速超松弛法进行了求解, 得出了离心力影响下的抛光液分布模型以及抛光垫旋转角速度对于无量纲载荷以及转矩的影响. 由于纳米级固体颗粒通常体积含量很小, 所以模型目前忽略了摩擦过程中抛光粒子的影响, 这也将是下一步的工作.

参 考 文 献

- 1 雷红, 雒建斌, 马俊杰. 化学机械抛光 (CMP) 技术的发展、应用及存在问题. 润滑与密封, 2002, 04: 73~76 (Lei Hong, Luo Jianbin, Ma Junjie. Advances and problems on chemical mechanical polishing. *Lubrication Engineering*, 2002, 04: 73~76 (in Chinese))
- 2 徐进, 雒建斌, 路新春等. 超精密表面抛光材料去除机理研究进展. 科学通报, 2004, 49(17): 1700~1705 (Xu Jin, Luo Jianbin, Lu Xinchun, et al. Investigation of the material removal mechanism in super-precision surface polishing. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(17): 1700~1705 (in Chinese))
- 3 Runnels SR, Eyman LM. Tribology analysis of chemical-mechanical polishing. *Journal of the Electrochemical Society*, 1994, 141(6): 1698~1701
- 4 Sundararajan S, Thakurta DG. Two-dimensional wafer-scale chemical-mechanical planarization models based on lubrication theory and mass transport. *Journal of the Electrochemical Society*, 1999, 146(2): 761~766
- 5 Park SS, Cho CH, Ahn Y. Hydrodynamic analysis of chemical mechanical polishing process. *Trib Intern*, 2000, 33(10): 723~730
- 6 Chul-Ho Cho, Sang-Shin Park, Yoomin Ahn. Three-dimensional wafer scale hydrodynamic modeling for chemical mechanical polishing. *Thin Solid Film*, 2001, 389(1-2): 254~260
- 7 张朝辉, 雒建斌, 温诗铸. CMP 润滑方程的多重网格法求解. 自然科学进展, 2003, 13(11): 1224~1227 (Zhang Chaohui, Luo Jianbin, Wen Shizhu. Multigrid technique incorporated algorithm for CMP lubrication equations. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(11): 1224~1227 (in Chinese))
- 8 Zhang CH, Luo JB, Wen SZ. Multigrid technique incorporated algorithm for CMP lubrication equations. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(3): 369~372
- 9 Xu J, Luo JB, Lu XC, et al. Atomic scale deformation in the solid surface induced by nanoparticle impacts. *Nanotechnology*, 2005, 16(6): 859~864
- 10 Lei H, Luo JB. CMP of hard disk substrate using a colloidal SiO₂ slurry: preliminary experimental investigation. *Wear*, 2004, 257 (5-6): 461~470
- 11 Zhang CH, Luo JB, Liu JQ, et al. Analysis on contact and flow features in CMP process. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(18): 2281~2286
- 12 高太元, 李明军, 高智. CMP 润滑方程的 Chebyshev 加速超松弛法求解. 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 CMP lubrication equations. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(12): 1724~1728 (in Chinese))
- 13 蔡大用. 数值代数. 北京: 清华大学出版社, 1987 (Cai Dayong. Numerical Algebra. Beijing: Tsinghua University Press, 1987 (in Chinese))
- 14 刘昌雄, 翟文杰. 圆平动化学机械研抛过程的流体动力性能分析. 润滑与密封, 2006, 07: 54~57 (Liu Changxiong, Zhai Wenjie. Hydrodynamic analysis of chemical mechanical polishing with circular translational moving. *Lubrication Engineering*, 2006, 07: 54~57 (in Chinese))

HYDRODYNAMIC SIMULATION AND THE EFFECT OF CENTRIFUGAL FORCE FOR CHEMICAL MECHANICAL POLISHING PROCESS¹⁾

Gao Taiyuan^{*,†,2)} Li Mingjun^{*} Hu Limin^{**} Gao Zhi[†]

^{*}(Department of Mathematics and Computational Science, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

[†](Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

^{**}(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract Chemical mechanical polishing process is a combination of chemical dissolution and mechanical action. The mechanical action of CMP involves hydrodynamic lubrication. In this paper, the modified Reynolds equation with centrifugal force is investigated and solved by means of Chebyshev acceleration method with successive over-relaxation algorithm, to obtain the effects of centrifugal force on the slurry pressure distributions. The numerical results show that it is markedly different for the pressure distribution and the same tendency for dimensionless resultant forces and moments along with standard nominal clearance, rolling angle, pitch angle and pad angular velocity, obtained from the Reynolds equations with and without centrifugal force terms, though the values of dimensionless resultant forces and moments are different, with the significant effect of the pad angular velocity.

Key words chemical mechanical polishing, centrifugal force, Reynolds equation, pressure distributions, Chebyshev acceleration method with successive over-relaxation technique

Received 12 September 2007, revised 23 April 2008.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10676031, 50675185).

2) E-mail: gaotaiyuan@163.com