

作者简介: 桑波 (1979—), 男, 硕士研究生. E-mail: buger2008@163.com.

的流体动压效应研究报道甚少, M Bhagavat<sup>[2]</sup>运用有限元法求解了自由磨料线锯切片过程中切割区域的流体动压力及油膜厚度, 但没有给出膜厚方程的具体建立方法。本文作者通过自柔顺系数建立了油膜厚度方程, 运用有限差分法求解雷诺方程, 对自由磨料线锯切片过程中的流体动压效应进行了分析。

### 1 膜厚方程的建立

在线锯切片过程中, 硅晶体的轮廓可以被看作一段大曲率的圆弧。受力之前, 锯丝紧贴在硅晶体上。切割区入口处研磨液的冲击使锯丝与硅晶体之间形成径向间隙, 即最初的收敛楔, 研磨液进入切割区之后, 便满足了流体动压效应存在的条件, 由于此时膜厚较小, 产生的流体动压力大于锯丝径向载荷, 锯丝与硅晶体之间的径向间隙扩大, 油膜厚度增加, 流体动压力随之减小, 直至满足锯丝径向载荷平衡条件。

为了计算方便, 作以下假设: (1) 忽略研磨液的压粘效应及温度对研磨液粘度的影响; (2) 忽略研磨液的体积力; (3) 研磨液为牛顿流体; (4) 压力沿膜厚方向保持不变; (5) 锯丝截面始终保持圆形, 尺寸不发生变化; (6) 油膜厚度在锯丝截面方向保持不变, 即认为膜厚为一维变量。

基于上述分析和假设, 油膜厚度方程可以写为<sup>[2]</sup>:

$$h = hg + \Lambda \cdot F + h_{\text{ref}} \quad (1)$$

严格来讲, 锯丝受到分布力作用, 任意点的位移都应该考虑其它点的影响。但为了方便地写出膜厚表达式, 而且锯丝产生的位移很小, 各节点相互之间影响不大, 因此忽略了各节点的相互影响。公式 (1) 中各项的含义如下:

(1)  $hg$  为考虑切割区入口处研磨液的冲击

$$hg = \Lambda_1 \cdot F_1 \quad (2)$$

式中  $\Lambda_1$  为第一个节点对各节点的柔顺系数, 即各节点由于切割区入口处单位冲击力的作用而产生的位移。 $F_1$  为切割区入口处研磨液的冲击力。这里认为冲击力只作用在切割区入口边界处, 并将位移与力近似看作线性关系。

(2)  $\Lambda \cdot F$  为锯丝局部弹性位移, 其中  $\Lambda$  称作自柔顺系数, 即单位力作用在某点时, 该点所产生的位移。 $F$  为该点处使锯丝与硅晶体之间产生径向间隙的流体动压力。 $F$  由压力积分而来, 设  $x, y$  分别代表锯丝轴向和截面方向, 则:

$$F = \iint_{\Omega} p(x, y) \cdot g(y) dx dy \quad (3)$$

式中  $g(y)$  为映射函数, 它将本来沿锯丝圆周方向分布的压力合成到垂直方向上, 设压力与垂直方向夹

角为  $\alpha$ , 则:

$$g(y) = \cos \alpha \quad (4)$$

(3)  $h_{\text{ref}}$  为锯丝整体刚性位移,  $h_{\text{ref}}$  的大小由流体动压力和载荷共同决定。由于  $h_{\text{ref}}$  的变化间接影响到流体动压力的大小, 计算过程中通过调整它来满足载荷平衡条件。

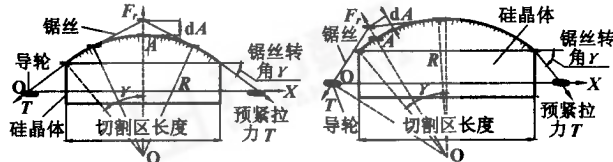


图2 力作用在中央区域附近

由于单位径向力作用在切割区域的不同位置时所引起的锯丝位移有差异, 因此在推导自柔顺系数过程中存在力作用在中央区域附近 (图2) 和力作用在边界区域 (图3)

2个几何模型<sup>[3]</sup>, 最终可得出自柔顺系数如图4所示 (将长度为0.1 mm的

图3 力作用在边界区域

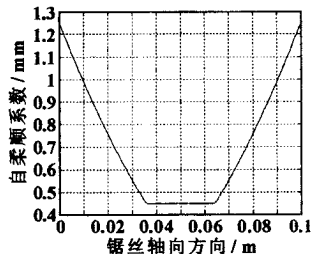


图4 各节点自柔顺系数 (锯丝转角  $2^\circ$ , 预紧拉力 20 N)

切割区划分为501个节点)。同时可以方便地求出  $\Lambda_1$ 。由图4可知, 自柔顺系数在中央区域附近比在边界区域小得多, 并且保持一个较小值。因为锯丝在切割区中央区域附近受径向力作用偏离硅晶体时, 2个支撑点都在圆弧上, 受圆弧的限制, 自柔顺系数较小, 圆弧的对称性又使它在一定范围内保持不变。当锯丝在切割区边界区域受径向力作用偏离硅晶体时, 一个支撑点在圆弧上, 另一个支撑点为导轮, 两支撑点距离较远, 因此锯丝自柔顺系数较大, 而且越靠近切割区边界, 自柔顺系数越大。

### 2 数值计算及结果分析

对于二维雷诺方程, 采用5点菱形差分格式将其离散化, 由超松弛迭代法可求得切割区流体动压力和油膜厚度, 如图5和图6所示。

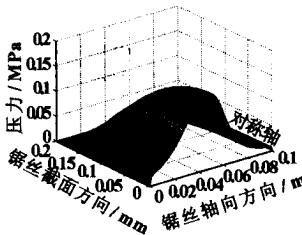


图5 流体动压力 (走丝速度 10 m/s, 锯丝转角  $2^\circ$ , 粘度  $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

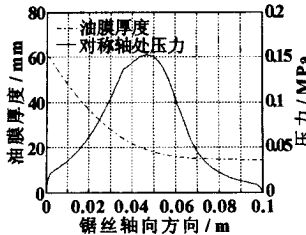


图6 油膜厚度及对称轴处压力 (走丝速度 10 m/s, 锯丝转角  $2^\circ$ , 粘度  $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

图5为切割区流体动压力分布曲线,沿锯丝中心线呈对称分布。图6为锯丝中心对称轴处的油膜厚度和流体动压力分布曲线。可见:(1)油膜厚度沿着锯丝轴向方向一直减小,由切割区入口处的 $61\text{ }\mu\text{m}$ 减小到出口处的 $14\text{ }\mu\text{m}$ 。主要有2个方面的原因,一是切割区入口处研磨液的冲击力影响。入口处冲击力的影响沿着锯丝轴向方向越来越小;二是锯丝自柔顺系数在切割区边界处比在切割区中央附近大得多(见图4)。在入口处附近,即使压力不大,也能引起锯丝较大的位移,因此膜厚较大,而在中央区域附近,虽然压力很大,但由于自柔顺系数很小,因此锯丝产生的位移不大,膜厚继续减小。在出口附近,虽然自柔顺系数较大,但压力已经有了明显的减小,因此锯丝产生的位移也很小,膜厚仍有小幅减小的趋势。(2)压力在切割区入口处迅速增加,形成收敛楔,产生流体动压效应,实现锯丝径向载荷平衡。(3)沿着锯丝轴向方向,在未达到切割区中央之前,压力有一个小的峰值,此时自柔顺系数最小,其变化率为零。(4)压力在切割区中央附近达到最大值 $0.15\text{ MPa}$ 左右。在切割区长度( $100\text{ mm}$ ),预紧拉力( $20\text{ N}$ )和锯丝转角( $2^\circ$ )3个工况参数保持不变,即自柔顺系数不变的情形下,改变其它工况参数,流体动压力峰值都在切割区中央附近。因为在切割区中央附近的自柔顺系数最小,并且保持不变,而油膜厚度持续减小。

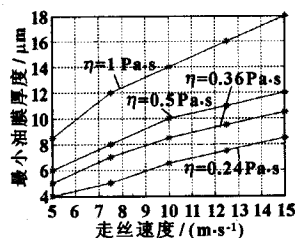


图7 走丝速度及研磨液粘度( $\eta$ )对最小油膜厚度的影响(锯丝转角 $2^\circ$ )

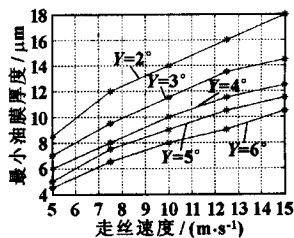


图8 走丝速度及锯丝转角对最小油膜厚度的影响(粘度 $1\text{ Pa}\cdot\text{s}$ )

图7和图8给出了走丝速度、研磨液粘度及锯丝转角对最小油膜厚度的影响。由图7可知,最小油膜

厚度随走丝速度的增加而增加,也随研磨液粘度的增加而增加。因为走丝速度及研磨液粘度的增加将使流体动压效应更加明显。图8表明,最小油膜厚度随锯丝转角的增加而减小,因为此时锯丝需要承受的径向载荷增加,为了满足载荷平衡的条件,导致油膜厚度的减小和流体动压力的增加。

### 3 结论

(1)在单晶硅自由磨料线锯切片过程中,切割区存在流体动压效应。

(2)引入自柔顺系数的概念,体现了锯丝各节点受径向力作用下所产生位移的差异,建立了锯丝切片加工过程的油膜厚度方程。

(3)最小油膜厚度随着走丝速度及研磨液粘度的增加而增加,随着锯丝转角的增加而减小。

### 参考文献

- [1] 康仁科,田业冰,郭东明,等.大直径硅片超精密磨削技术的研究与应用现状[J].金刚石与磨料磨具工程,2003(4):13-18.
- [2] Kang Renke, Tian Yebing, Guo Dongming, et al. Present Status of Research and Application in Ultra-precision Grinding Technology of Large-scale Silicon Wafers [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2003 (4): 13-18.
- [3] M Bhagavat, V Prasad, I Kao (PI). Elasto-Hydrodynamic Interaction in the Free Abrasive Wafer Slicing Using a Wiresaw: Modeling and Finite Element Analysis [J]. Journal of Tribology, 2000, 122 (4): 394-404.
- [4] Takaya Watanabe. Optimization Quartz Crystal Slicing Conditions Using Multi-Wire-Saw [C]. IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, 2002.
- [5] I Kao (PI), M Bhagavat, V Prasad, et al. Integrated Modeling of Wiresaw in Wafer Slicing [C]. The NSF Grantees Conference, 1998.
- [6] Songbin Wei, Imin Kao. Stiffness Analysis in Wiresaw Manufacturing Systems for Applications in Wafer Slicing [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Systems, 2004, 7 (1): 49-56.

(上接第80页)

Hu Danmei, Hao Muming, Wu Deli. Numerical Computation of Mechanical Seals of Spiral Groove in Upstream Pumping with Finite Element Method [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2002, 26 (6): 74-77.

[6] 徐万孚,刘雨川,刘云飞,等.不同端面几何结构气膜密封的刚度与自振稳定性[J].流体机械,2001,29(11):22-25.

封的刚度与自振稳定性[J].流体机械,2001,29(11):22-25.

Xun Wanfu, Liu Yuchuan, Liu Yunfei, et al. Stiffness and Stability of Self-excitation Oscillation with Different Face Profiles of Gas Seals [J]. Fluid Machinery, 2001, 29 (11): 22-25.