表面形貌对砂轮磨削流体压力与润滑的影响

王立梅，王优强，张同钢，徐彩红

（青岛理工大学 机械工程学院，山东 青岛 266520）

摘 要：目的 从磨削液压力及润滑方面找到减少磨粒磨损、磨削热和降低工件表面粗糙度的方法。**方法** 基于实际情况，将砂轮突出的磨粒分布函数和工件在磨削之前存在的粗糙度函数等效为余弦函数，对陶瓷结合剂 CBN 砂轮磨削 45 号钢而产生的流体压力和膜厚进行了分析。**结果** 考虑砂轮和工件的表面粗糙度时，压力波动集中在中心区域，磨削区最大压力和最大膜厚明显增大。在考虑热效应的情况下，当两表面波长相等、幅值同时增大时，最大膜厚及平均膜厚增大，而幅值相等、波长增大时，润滑情况没有改善；当砂轮表面幅值波长相等且变大时，最大膜厚及平均膜厚增大，由此也可以得出当砂轮表面幅值波长不变，工件表面如此变化时结果相同；当两表面幅值和波长不相等且都成倍增大时，最大膜厚及平均膜厚增大。**结论** 膜厚增大利于润滑时，能降低磨削温度，减少磨削烧伤和热变形，降低工件磨削后的表面粗糙度，减少非工作磨粒的磨损，减少砂轮修正次数，延长砂轮寿命。但是膜厚不会无限增大，因为磨削区域并不封闭，在实际工程中可依据此理论来确定最优解，优化磨削过程。

关键词： 多重网格法；砂轮磨削；流体压力；润滑；表面粗糙度

中图分类号： TH117.2 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3660(2017)09-0245-07

DOI： 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.09.039

Effect of Surface Morphology on Pressure and Lubrication of Grinding Wheel

WANG Li-mei*, *WANG You-qiang*, *ZHANG Tong-gang*, *XU Cai-hong

(School of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266520, China)

ABSTRACT: The work aims to study find ways to reduce abrasive wear, grinding heat and lower the surface roughness of the workpiece from grinding fluid pressure and lubrication. This article based on the actual situation,The abrasive particle distribution function and the roughness function of the workpiece before grinding are equivalent to the cosine function, When the ceramic bonded CBN grinding wheel grinding No. 45 steel,the fluid pressure and film thickness are analyzed . The results show that considering the surface roughness of the grinding wheel and the workpiece, the pressure fluctuation is concentrated in the central area, the maximum pressure and the maximum thickness of the grinding area obviously increased. In the case of thermal effects: When the wavelength of two surfaces are equal and the amplitude of two surfaces increases simultaneously, the maximum film thickness and average film thickness increases. When the amplitude of two surfaces are equal and the wavelength of

收稿日期：2017-03-20；修订日期：2017-04-29

Received：2017-03-20；**Revised**：2017-04-29

基金项目： 国家自然科学基金资助项目（51575289）；山东省自然科学基金培养基金项目（2016ZRB01AJX）

Fund：Supported by the National Natural Science Foundation of China (51575289) and the Natural Science Foundation of Shandong Province (2016ZRB01AJX)

作者简介： 王立梅（1991—），女，硕士研究生，主要研究方向为砂轮磨削的摩擦磨损。

Biography：WANG Li-mei (1991—), Female, Master, Research focus: friction and wear of grinding wheel.

通讯作者： 王优强（1970—），男，博士，教授，主要研究方向为齿轮及轴承的弹流润滑研究。

Corresponding author：WANG You-qiang (1970—), Male, Doctor, Professor, Research focus: elastohydrodynamic lubrication of gears and bearings.

two surfaces increases simultaneously, the lubrication does not improve. When he amplitude of the grinding wheel surface is equal to the wavelength and increase simultaneously, the maximum film thickness and average film thickness increases, which can also be obtained when the wheel surface amplitude and wavelength constant, the workpiece surface change the same situation; when the two surface amplitude and wavelength are not equal and multiplied , the maximum film thickness and average film thickness increases to, the above three conditions, the increased film thickness which conducive to lubrication can lower the grinding temperature, reduce grinding burns ,thermal deformation and the workpiece roughness after grinding. It also can reduce the wear of non-working abrasive grains and the number of grinding wheel correction to extend the wheel life. But the film thickness will not increase indefinitely, because the grinding area is not closed, but the optimal solution can be based on this theory in the actual project to optimize the grinding process.

KEY WORDS: multigrid method; grinding wheel; workpiece fluid pressure; lubrication; surface roughness

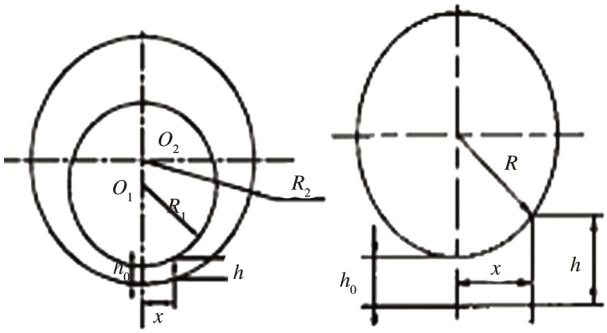
在世界高速发展的今天，随着机械制造业的飞速发展，人们对产品质量要求越来越高，要提高机械产品的质量，需要提高机械产品内部零件的质量，而零件加工表面的粗糙度对零件质量起着至关重要的作用。砂轮磨削作为零件最后的加工工序，对零件的加工质量有很大影响，磨削中的磨削液在磨削中起着冷却、润滑、冲洗等作用，它也会产生较大的流体压力[1]，影响工件的表面粗糙度和质量。砂轮和工件间的磨削液润滑作用较大时，可减少磨削热的产生，减少工件表面烧伤及磨粒磨损。所以本文研究了砂轮磨削时在砂轮与工件间的磨削液压力与润滑特性，对改善实际磨削过程，减小磨削后工件表面粗糙度，降低砂轮磨损率，降低生产成本具有一定意义。

目前对于磨削流体动压力[2-7]方面有很多学者在研究，其中葛培琪等[8]根据流体动压润滑理论，分析了平面磨削的流体动压效应，得出在磨削区域内工件和砂轮表面间会产生流体动压效应，这种效应对砂轮起到的泵吸作用能有效清洗砂轮与工件间的磨屑。李长河等[9]通过仿真研究了砂轮速度、砂轮与工件的最小间隙以及砂轮直径等因素对楔形区域磨料流体动压力的影响，结果表明，提高砂轮速度和减小平均最小间隙能增加流体动压力。李长河等[10]还利用平面磨床进行了磨料流体动压力的实验研究，并与仿真相对比，也得出了一致的结论。史恩秀[11]、江征风[12]等人都对液体动压力的分布进行了仿真分析，结果表明，液体动压力与砂轮转速、砂轮与工件间的间隙等参数有关。郑钧宜等[13]采用 k-ε 模型和 RNG k-ε 模型对磨削冷却液流场进行了数值模拟，结果表明：当雷诺数相同时，最小间隙增大，磨削流体动压力变大；当最小间隙相同时，雷诺数变大，磨削最大动压力增大。

目前很多学者研究时都将砂轮和工件两固体表面设为光滑表面[14]，虽然有一部分学者研究过粗糙度对磨削的影响[15]，但没有考虑砂轮和工件表面上存在不同粗糙度的情况及两者粗糙度耦合情况，而且忽略了压力与温度对流体黏度的影响，所以本文对此进行了探讨。

1 磨削模型及等效图

CBN 砂轮内圆磨削如图 1a 所示，因其在砂轮和工件接触轴向宽度远远大于砂轮和工件接触切向宽度，所以将其等效为无限长线接触模型[16]，如图 1b 所示。



a 砂轮内圆磨削图　　b 砂轮内圆磨削等效图

图 1　内圆磨削等效图

Fig.1 Equivalent diagram of internal grinding

磨削过程中，工作磨粒与工件接触，但还有很多非工作磨粒与工件不接触，而且在微观情况下间隙比较明显，磨削液在这些间隙中对工件进行冷却与润滑。由于磨削过程是一个复杂的过程，所以将磨削过程进行一定的简化，等效为图 1，R_1、R_2、R 分别为砂轮半径、工件半径和等效综合曲率半径，$R=1/R_1-1/R_2$，h_0 为砂轮与工件间的中心膜厚。

砂轮表面的磨粒分布比较复杂，很多学者在研究时会将砂轮磨粒的分布和高度看作正余弦函数或者瑞利函数分布，工件表面的粗糙度形貌一般也都用正余弦函数来表征，所以本文将二者表面形貌都等效为余弦函数[17-18]。两表面接触时，因两者的幅值、波长或接触点不同，而出现不同形式的流体压力及膜厚，所以本文主要研究了两表面不同粗糙度耦合情况下出现的流体压力及膜厚变化情况和由此所产生的影响。

2　数学模型

Reynolds 方程为：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left(\frac{\rho h^3}{\eta}\cdot\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}\right)=12U\frac{\mathrm{d}(\rho h)}{\mathrm{d}x} \tag{1}$$

式中：p 为流体压力（Pa）；U 为卷吸速度（m/s），$U=(U_1+U_2)/2$。

Reynolds 方程的边界条件：

$$\begin{cases}p(x_{\mathrm{in}})=p(x_{\mathrm{out}})=0\\ p(x)\geq 0\quad(x_{\mathrm{in}}<x<x_{\mathrm{out}})\end{cases} \tag{2}$$

其中，x_{in}=–4.6，x_{out}=1.4。

砂轮表面形貌和工件表面形貌可用正余弦函数模型近似，两固体表面的粗糙度函数为：

$$\begin{cases}S_{\mathrm{a}}(x)=A_{\mathrm{a}}\cos\left(\dfrac{2\pi}{L_{\mathrm{a}}}x\right)\\ S_{\mathrm{b}}(x)=A_{\mathrm{b}}\cos\left(\dfrac{2\pi}{L_{\mathrm{b}}}x\right)\end{cases} \tag{3}$$

$$h(x)=h_0+\frac{x^2}{2R}-\frac{2}{\pi E'}\int_{-\infty}^{x^*}p(x)\ln(x-s)^2\mathrm{d}s-S_{\mathrm{a}}(x)-S_{\mathrm{b}}(x) \tag{4}$$

$$\frac{1}{E'}=\frac{1}{2}\left(\frac{1-v_1^2}{E_1}+\frac{1-v_2^2}{E_2}\right) \tag{5}$$

式中：E' 为综合弹性模量（Pa）；E_1 为砂轮磨料的弹性模量（N/m^2）；E_2 为钢的弹性模量（N/m^2）；v_1 为砂轮磨料的泊松比；v_2 为钢的泊松比；$S_{\mathrm{a}}(x)$为砂轮表面粗糙度函数；$S_{\mathrm{b}}(x)$为工件钢表面粗糙度函数。

载荷方程为：

$$w=\int_{x_{\mathrm{in}}}^{x_{\mathrm{out}}}p\mathrm{d}x \tag{6}$$

黏度方程为：

$$\eta=\eta_0\exp\{(\ln\eta_0+9.67)[(5.1\times10^{-9}p+1)^{Z_0}\left(\frac{T-138}{T_0-138}\right)^{-S}-1]\} \tag{7}$$

式中：η_0 为磨削液的环境黏度（Pa·s）；T_0 为环境温度；S 为粘温系数，$S=\beta(T_0-138)/(\ln\eta_0+9.67)$；$Z_0$ 为粘压系数，$Z_0=\alpha/[5.1\times10^{-9}(\ln\eta_0+9.67)]$，其中 α 也叫粘压系数，β 也叫粘温系数。

密度方程为：

$$\rho=\rho_0[1+(0.6\times10^{-9}p)/(1+1.7\times10^{-9}p)-0.00065(T-T_0)] \tag{8}$$

式中：ρ_0 为磨削液环境密度（kg/m^3）。

温度控制方程-能量方程为：

$$c\left(\rho u\frac{\partial T}{\partial x}-q\frac{\partial T}{\partial z}\right)=k\frac{\partial^2T}{\partial z^2}-\frac{T}{\rho}\frac{\partial p}{\partial T}\left(u\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\eta\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2\right] \tag{9}$$

式中：T 为磨削液温度；ρ 为磨削液密度（kg/m^3）；c 为磨削液比热容（J/(kg·K)）；k 为磨削液导热率（W/(m·K)）。

热传导方程为：

$$\begin{cases}c_{\mathrm{a}}\rho_{\mathrm{a}}U_1(\partial T/\partial x)=k_{\mathrm{a}}\partial^2T/\partial z_1^2\\ c_{\mathrm{b}}\rho_{\mathrm{b}}U_2(\partial T/\partial x)=k_{\mathrm{b}}\partial^2T/\partial z_2^2\end{cases} \tag{10}$$

式中：c_{a}、c_{b} 为砂轮磨料与钢的比热容（J/(kg·K)）；ρ_{a}、ρ_{b} 为砂轮磨料与钢的密度（kg/m^3）；k_{a}、k_{b} 为砂轮磨料与钢的导热率（W/(m·K)）。

砂轮磨料热传导方程的温度边界条件：

$$\begin{cases}T(x_{\mathrm{in}},z_1)=T_0\\ T(x,-d)=T_0\end{cases} \tag{11}$$

工件钢热传导方程的温度边界条件：

$$\begin{cases}T(x_{\mathrm{in}},z_2)=T_0\\ T(x,d)=T_0\end{cases} \tag{12}$$

3　方程无量纲化

将上述方程无量纲化，定义无量纲参数如下：$\overline{w}=w/E'R$，$\overline{U}=\eta_0U/E'R$，$\overline{P}=p/p_{\mathrm{H}}$，$\overline{H}=h/h_0$，$\overline{\rho}=\rho/\rho_0$，$p_{\mathrm{H}}=\sqrt{WE'/(2\pi R)}$，$\overline{x}=x/b$，$\overline{\eta}=\eta/\eta_0$，$\overline{A}_{\mathrm{a}}=A_{\mathrm{a}}/h_0$，$\overline{A}_{\mathrm{b}}=A_{\mathrm{b}}/h_0$，$\overline{L}_{\mathrm{a}}=L_{\mathrm{a}}/b$，$\overline{L}_{\mathrm{b}}=L_{\mathrm{b}}/b$，$\overline{T}=T/T_0$，$\overline{z}=z/h$，$b=\sqrt{\dfrac{8wR}{\pi E'}}$，$\overline{h}=hR/b^2$。

求解压力 p 时采用多重网格法[19]，将压力网格分为 6 层，各层的节点数分别为 31、61、121、241、481、961，压力和载荷的收敛判据为 10^{-3}。求解弹性变形项采用多重网格积分法，求解温度 T 采用逐列扫描的方法。

4　结果分析

表 1 为砂轮磨料、工件钢和磨削液的物理性能参数。

表 1　砂轮磨料、钢和磨削液的物理性能参数表

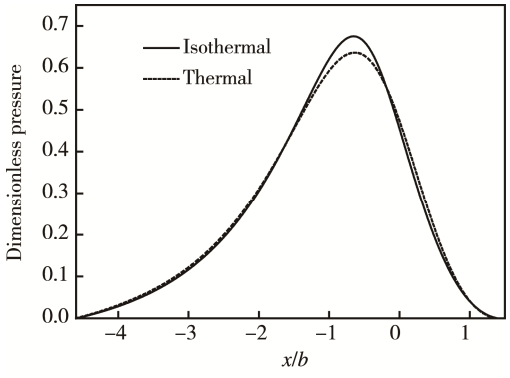
Tab.1 Physical parameters table of grinding wheel's abrasives, steel and grinding fluid

物理性能参数	CBN 砂轮磨料	钢	轻质石蜡油
密度/(kg·m^{-3})	3500	7850	850
比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	670	480	2800
热传导系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	1300	50.2	0.335

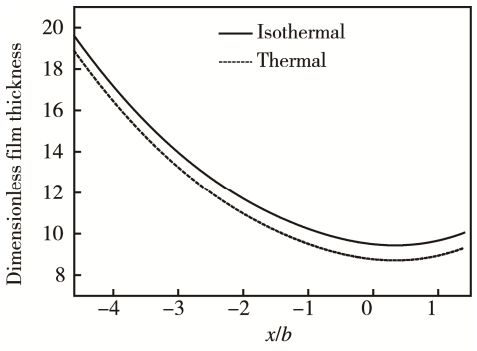
本文使用的参数为：砂轮半径 75 mm，工件半径 80 mm，综合曲率半径 1200 mm，砂轮转速 20 m/s，工件转速 120 r/min，CBN 磨料的弹性模量 720 GPa，泊松比 0.22，钢的弹性模量 210 GPa，泊松比 0.28，β=0.042 K^{-1}，η_0=0.05 Pa·s，α=2.0×10^{-8} m^2/N。

考虑不同因素对流体压力的影响，计算时使用的无量纲参数为：$\overline{U}=1.13\times10^{-12}$，$\overline{W}=1.0\times10^{-6}$。

图 2 是考虑温度对磨削液压力和膜厚的影响与不考虑温度对压力和膜厚的影响的对比图。从图 2 可以看出，考虑磨削的温度（热效应）影响时，磨削入口区和出口区的压力减小，最大压力增大，整体膜厚减小，最小膜厚相比等温时降低了 18.9%左右，可见温度对压力和膜厚的影响比较大。实际磨削过程中也有磨削热，所以应该考虑温度对磨削液压力及膜厚的影响。



a 温度对压力的影响



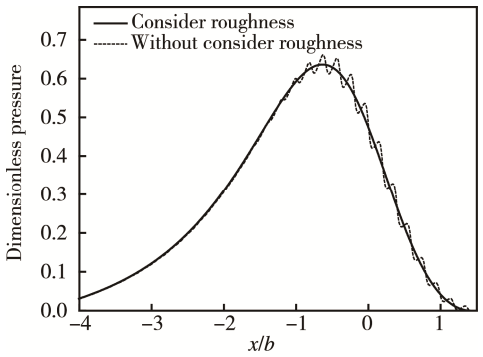
b 温度对膜厚的影响

图 2　温度对压力和膜厚的影响

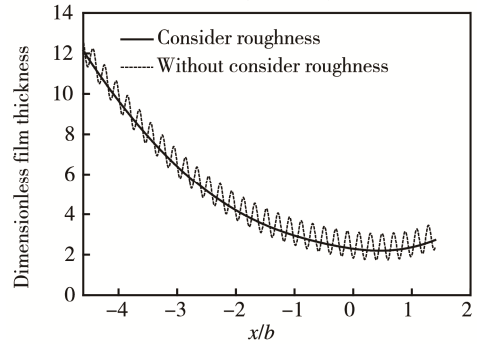
Fig.2 The effect of temperature on pressure distribution (a) and film thickness distribution (b)

图 3 是在热效应条件下，两表面的粗糙度幅值和波长相同且都为 1 μm 时和两表面都不考虑粗糙度时，砂轮和工件间磨削区域的磨削液压力和膜厚比较图。从图 3 可以看出，考虑砂轮和工件的表面粗糙度时，相比弹流，磨削区的压力峰值向左移动。这是由于磨削力相对较低，磨削速度相对较高，压力波动集中在中心区域，磨削区流体压力和膜厚出现了波动，这是由两固体表面的粗糙度引起的。但从 3 可以看出，当两表面的粗糙度函数相同时，压力和膜厚都呈现出余弦函数的变化特点，这样的压力及膜厚变化更接近实际，所以考虑砂轮和工件的粗糙度因素是很有必要的。

图 4 是考虑热效应和粗糙度，在两表面的粗糙度幅值（0.3、1、3 μm）和波长（1 μm）相同时，磨削



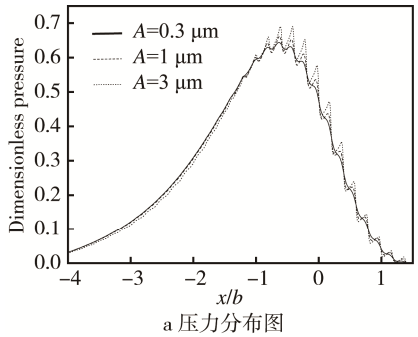
a 对压力的影响



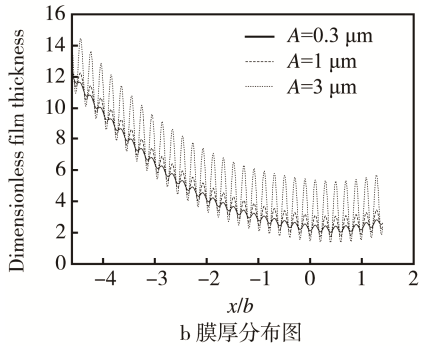
b 对膜厚的影响

图 3　粗糙度对压力和膜厚的影响

Fig.3 The effect of roughness on pressure distribution (a) and film thickness distribution (b)



a 压力分布图



b 膜厚分布图

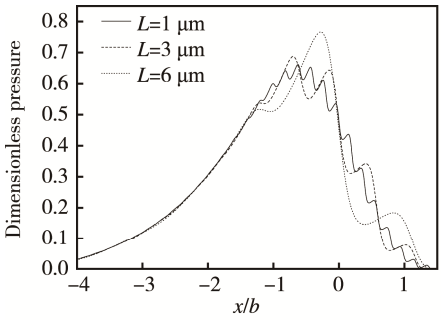
图 4　不同粗糙度幅值下的压力和膜厚分布图

Fig.4 The distribution of pressure (a) and film thickness (b) under different roughness amplitudes

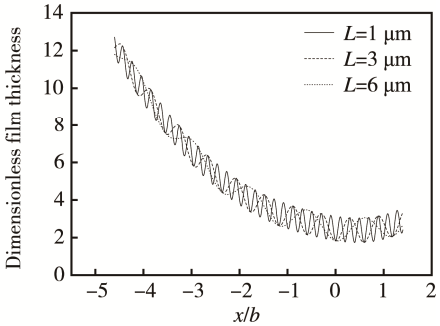
液压力和膜厚的对比图。从图 4 可以看出，两表面粗糙度幅值越大，最大流体压力越大，最大膜厚及平均膜厚越大。压力越大可能会影响磨削液通过的流量及加工精度，最大膜厚及平均膜厚变大有利于润滑，减少非工作磨粒的摩擦磨损，减少磨削温度，从而减少

磨削烧伤情况，压力波动集中于中心区域，压力与膜厚图都呈现出余弦函数的规律特点。

图 5 是考虑热效应和粗糙度，在两表面的粗糙度幅值（1 μm）和波长（1、3、6 μm）都相同时，磨削液压力和膜厚的对比图。从图 5 可以看出，随着粗糙度波长的增大，最大流体压力增大，可能影响磨削液的通过流量及加工精度，但是膜厚大小基本没变，所以其润滑特性没有改善，但压力和膜厚的波长随之增大，压力与膜厚图都呈现出余弦函数的规律。



a 压力分布图



b 膜厚分布图

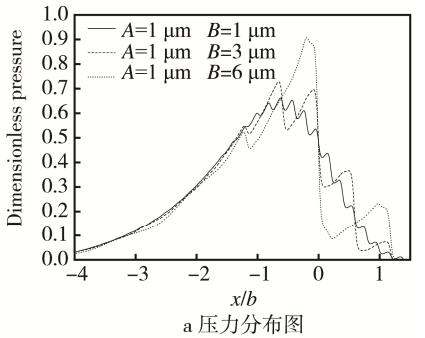
图 5　不同粗糙度波长下的压力和膜厚分布图

Fig.5 The distribution of pressure (a) and film thickness (b) under different roughness wavelength

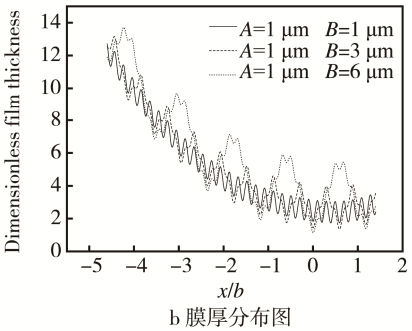
由图 4 和图 5 可知，当两表面的幅值趋于无限小、波长趋于无限长时，砂轮和工件的粗糙度接近光滑状态，而图中所表示的压力与膜厚变化也趋于平缓，慢慢地接近光滑状态时的流体压力和膜厚趋势，所以以上结果都符合实际情况。

图 6 是在考虑热效应和粗糙度时，当工件表面的粗糙度幅值和波长同为 1 μm，砂轮表面的幅值和波长相等且同为 1、3、6 μm 时的压力及膜厚对比图。从图 6 可以看出，砂轮表面幅值和波长相等且同时变化时的压力变化与两表面波长相等时的压力变化形状相似。由图 6a 可知，随着砂轮表面幅值、波长同时增大，最大压力增大，最大膜厚及平均膜厚也增大，润滑性能改善，非工作磨粒的磨损和磨削温度减少，从而减少磨削烧伤和热变形情况。但是图 6b 已不再是简单的余弦函数规律，还具有周期性。

图 7 是在考虑热效应和粗糙度时，砂轮和工件的粗糙度幅值和波长都不相等且成倍增加时的磨削液



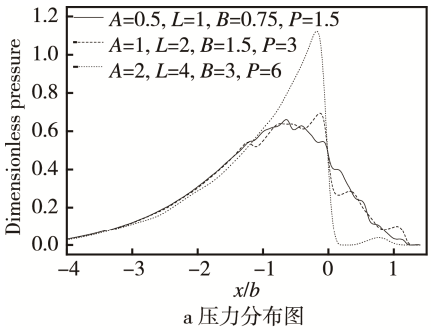
a 压力分布图



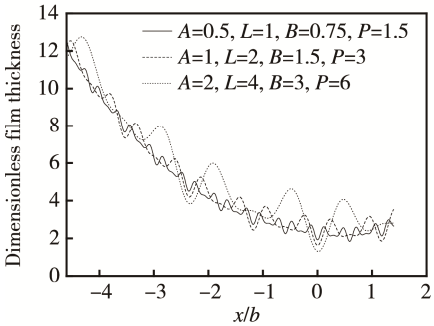
b 膜厚分布图

图 6　不同砂轮表面幅值、波长同时变化下的压力和膜厚分布图

Fig.6 The distribution of pressure (a) and film thickness (b) under different grinding wheel surface's amplitude and wavelength change



a 压力分布图



b 膜厚分布图

图 7　幅值和波长成倍增加下的压力和膜厚分布图

Fig.7 The distribution of pressure (a) and film thickness (b) under multiplying of the amplitude and wavelength

压力及膜厚对比图。从图 7 可以看出，当两表面的粗糙度幅值和波长成倍增大时，最大压力明显增大，没有余弦函数的特点，也没有规律性；最大膜厚及平均膜厚增大，没有余弦函数的特点，但具有周期性。膜厚的增大有利于润滑，减少磨粒的摩擦磨损，降低磨

削温度，增长砂轮的寿命，减少砂轮修整次数，降低生产成本。

5 结论

1）表面粗糙度对砂轮和工件间磨削液压力和润滑情况有很大的影响，不可忽略，两表面不同的粗糙度最后所引起的压力与膜厚也呈现出不一样的规律和特点。

2）除了两表面幅值相等、波长同时增大时膜厚的润滑情况没有改善，其他三种情况下膜厚的润滑都有所增大。膜厚增大利于润滑时，都能降低磨削温度，减少磨削烧伤和热变形，降低工件磨削后的表面粗糙度和热应力，减少非工作磨粒的磨损，减少砂轮修正次数，延长砂轮寿命，降低生产成本。但是膜厚不会无限增大，因为磨削区域并不封闭且粗糙度幅值和波长大小也不会无限增大，但在实际工程中可依据此来确定最优解，优化磨削过程。

3）由于磨削过程复杂，本文对砂轮磨削进行简化时忽略了磨削液的端泄，砂轮磨削的进给速度与转速相比较小，也忽略不计，所以在接下来的研究中将继续完善，使模型更加接近实际工况。

参考文献：

[1] 李长河, 修世超, 蔡光起. 微细游离磨粒借助流体动压力实现的超精密加工技术[J]. 机械设计与制造, 2005(12): 105-107.
LI Chang-he, XIU Shi-chao, CAI Guang-qi. Ultra Precision Machining Technology in Fine Loose Abrasive Using Fluid Hydrodynamic Pressure[J]. Machinery Design & Manufacture, 2005(12): 105-107.

[2] SCHUMACK M R. Analysis of Fluid Flow under a Grinding Wheel[J]. Journal of Engineering for Industry, 1991, 113(2): 190-197.

[3] LIU Zhen-chang, ABE S, NODA M. The Influence of Grinding Oil Viscosity on Grinding Heat and Burn Damage in Creep-feed Grinding[J]. Lubrication Engineering, 1995, 51: 669-672.

[4] HRYNIEWICZ P, SZERI A Z, JAHANMIR S. Application of Lubrication Theory to Fluid Flow in Grinding: Part II—Influence of Wheel and Workpiece Roughness[J]. Journal of Tribology, 2001, 123(1): 101-107.

[5] PATIR N, CHENG H S. An Average Flow Model for Determining Effects of Three-dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication[J]. Journal of Tribology, 1978, 100(1): 12-17.

[6] BRINKSMEIER E, HEINZEL C, WITTMANN M. Friction, Cooling and Lubrication in Grinding[J]. Annals of the CIRP, 1999, 48(2): 581-598.

[7] 张强, 李长河, 王胜. 砂轮/工件楔形区流体动压力的建模与实验验证[J]. 机械设计与制造, 2013(12): 60-62.
ZHANG Qiang, LI Chang-he, WANG Sheng. Hydrodynamic Pressure Modeling and Experimental Verification of Wedge-like Zone between the Wheel and Workpiece[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(12): 60-62.

[8] 葛培琪, 刘镇昌, 隋庆华. 磨削加工时磨削液的流体动压效应[J]. 润滑与密封, 2000(1): 26-28.
GE Pei-qi, LIU Zhen-chang, SUI Qing-hua. Girnding Fluid Hydrodynamic Aciton in Grinding[J]. Lubrication Engineering, 2000(1): 26-28.

[9] 李长河, 刘晓玲, 侯亚丽, 等. 磨削区磨料流体动压力仿真研究[J]. 润滑与密封, 2007(10): 59-61.
LI Chang-he, LIU Xiao-ling, HOU Ya-li, et al. Simulation Investigation on Hydrodynamic Slurry Pressure in Grinding Zone [J]. Lubrication Engineering, 2007(10): 59-61.

[10] 李长河, 修世超, 蔡光起. 砂轮约束磨粒喷射光整加工磨料流体动压力实验研究[J]. 工艺与检测, 2007(12): 71-73.
LI Chang-he, XIU Shi-chao, CAI Guang-qi. Experimental Investigation into Hydrodynamic Slurry Pressure of Finishing with Grinding Wheel as Restraint[J]. Technology and Test, 2007(12): 71-73.

[11] 史恩秀, TAWAKOLI T, VESALI A. 磨削参数对磨削区液体动压力的影响研究[J]. 机械科学与技术, 2013(9): 1303-1306.
SHI En-xiu, TAWAKOLI T, VESALI A. Effect of the Grinding Parameters on the Hydrodynamic Pressure in Grinding Contact Zone[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013(9): 1303-306.

[12] 江征风, 郑钧宜. 基于 Reynolds 方程的磨削流体动压特性的研究[J]. 润滑与密封, 2007(10): 43-45.
JIANG Zheng-feng, ZHENG Jun-yi. Hydrodynamic Pressure Study of Grinding Fluid Based on Reynolds Equation[J]. Lubrication Engineering, 2007(10): 43-45.

[13] 郑钧宜, 熊义君, 江征风. 大雷诺数磨削冷却液流场的数值模拟研究[J]. 润滑与密封, 2008(4): 56-58.
ZHENG Jun-yi, XIONG Yi-jun, JIANG Zheng-feng. Numerical Simulation Investigation of Grinding Fluidic Field with High Reynolds Number[J]. Lubrication Engineering, 2008(4): 56-58.

[14] 张强, 李长河, 王胜. 光滑表面磨削区流体动压力的建模与实验验证[J]. 组合机床与自动化加工技术,

2013(10): 24-27.
LI Qiang, LI Chang-he, WANG Sheng. Hydrodynamic Pressure Modeling and Experimental Verification of Grinding Zone between Smooth Surfaces[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013(10): 24-27.

[15] 商姗姗, 孟广耀, 李长河, 等. 磨削加工中磨削区流场的数值分析[J]. 润滑与密封, 2009, 34(8): 45-49.
SHANG Shan-shan, MENG Guang-yao, LI Chang-he, et al. Numerical Analysis of Grinding Fluid Field in Grinding[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(8): 45-49.

[16] 杨沛然. 流体润滑数值分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
YANG Pei-ran. Numerical Analysis of Fluid Lubrication[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998.

[17] 王优强, 卞荣. 连续波状粗糙度对直齿轮热弹流润滑的影响[J]. 机械工程学报, 2009(8): 112-118.
WANG You-qiang, BIAN Rong. Influence of Surface Roughness Wave on Thermal Elastohydrodynamic Lubrication of Involute Spur Gears[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009(8): 112-118.

[18] 高雷鸣, 姜明, 杨沛然. 表面横向粗糙峰对点接触热弹流润滑的影响[J]. 润滑与密封, 2004(1): 31-34.
GAO Lei-ming, JIANG Ming, YANG Pei-ran. Influence of a Transversely Oriented Surface Asperity on the Thermal EHL of Point Contacts[J]. Lubrication Engineering, 2004(1): 31-34.

[19] 温诗铸, 杨沛然. 弹性流体动力润滑[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
WEN Shi-zhu, YANG Pei-ran. Elastohydrodynamic Lubrication[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992.