

磨粒流动力光整加工接触区域压力研究*

Study on Hydrodynamic Pressure of Contact Zone on Abrasive Flow Dynamical Finishing Machining

南京航空航天大学机电学院 王婷婷 安鲁陵 庄曙东 付睿

[摘要] 本文介绍了磨粒流动力光整加工的原理, 基于 Navier-Stokes 方程和流体流动连续性方程, 建立了磨粒流动力光整加工中硬质合金棒与工件楔形接触区流体动压力的三维模型; 应用 Matlab 对接触区三维流体动压力进行求解, 结果表明: 流体动压力随硬质合金棒转速和磨粒流动力粘度的增大而增大, 随硬质合金棒与工件之间间隙的增大而减小。压力峰值发生在最小间隙区域, 当间隙逐渐变大时, 峰值区域逐渐前移并且变宽。在硬质合金棒浸入磨粒流深度方向, 除边缘处有侧泄外, 流体动压力相同。

关键词: 硬质合金棒 楔形接触区 流体动压力 数学模型

[ABSTRACT] The principle of abrasive flow dynamical finishing machining is introduced, and the three-dimensional hydrodynamic pressure model of wedge-like zone between cemented carbide cylinder and workpiece is established based on Navier-Stoke and continuity equation. The solution of three-dimensional hydrodynamic pressure shows that the hydrodynamic pressure is directly proportional to the velocity of cemented carbide cylinder and the dynamic viscosity of abrasive flow and inversely proportional to the minimum clearance between the cemented carbide cylinder and workpiece. And the peak pressure is generated just in the minimum clearance region. When the minimum clearance becomes bigger gradually, the peak pressure region is gradually wider and moving forward. It can also be concluded that the pressure distribution is uniform in the direction of depth of cemented carbide robust which immerse in the abrasive flow.

Keywords: Cemented carbide robust Wedge-like contact zone Hydrodynamic pressure Mathematical model

目前, 对于像模具、航空发动机叶轮、叶片等复杂结

构和自由曲面的航空零件表面质量要求很高, 在进行数控加工之后, 还需要进行表面光整加工。但相对于日渐成熟的数控加工技术, 光整加工技术还相对比较落后, 尤其是钛合金、高温合金等难加工材料经切削成的零件, 如航空发动机的叶片等, 仍多采用手工抛光的方法。手工抛光不仅存在加工效率低、产品一致性差、生产人员工作环境恶劣等问题, 对个人有很高的技能要求。一旦操作失误, 可能导致整个零件报废, 造成重大的经济损失, 因此, 很多学者提出了新的表面光整加工的方法。马季和芦亚萍、张军强^[1]等人提出将超声加工技术与磁力研磨技术相复合并对模具自由曲面进行超精加工。芦亚萍^[2]从超声磁粒复合研磨机理出发, 提出了超声磁粒复合研磨方法。大连理工大学的王晓明^[3]研究了脉冲电化学光整加工的机理。国防科技大学张学成^[4]等人还提出一种磁射流抛光方法。

近年来, 国内外学者又提出了磨粒流加工。磨粒流加工是指在一定压力作用下, 使含有磨料的半固态粘弹性介质反复流经工件的内外表面、边缘和孔道以达到去毛刺、倒棱、抛光和去除再铸层的方法。它既有对零件隐蔽部位的孔及型腔研磨抛光、倒圆角的作用, 又有对外表面各种复杂型面研磨抛光的能力。在 20 世纪 80 年代东北大学开始了磨粒流光整加工机理的研究。李长河^[5-6]等人提出用砂轮约束磨粒喷射精密光整加工表面的方法。谭元强、李艺^[7]应用有限元分析软件对磨粒流加工过程中磨粒流的流动形态进行了数值模拟, 研究压力特性对流体速度和颗粒相分布的影响。本文在借鉴前人研究基础上提出一种新的磨粒流光整加工的方法: 依靠磨粒-防锈乳化液等构成的磨粒流在圆柱工具和工件表面间产生的流体动力效应进行表面光整加工。在此方法中, 间隙较小, 一般为 0.025~0.2mm, 这样在间隙中的磨粒流就产生了动压力, 从而磨粒在流体压力场及速度场的作用下获得足够的能量, 快速地在硬质合金棒/工件接触区完成光整加工。这种方法的主要特点是控制高速转动的工具以一定的速度转动和沿一定的轨迹运动, 可以对零件表面可控地进行光整加工。正确认识接触区流体的速度和压力分布规律, 对我们在实际

* 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(NS 1010140)资助。

加工中进一步控制流场,获得更好的加工效果有着重要意义,故本文主要对其中的压力场进行研究。首先阐述磨粒流光整加工的基本原理,根据流体动压润滑理论建立工具/工件楔形接触区由磨料产生的流体动压力的数学模型,并用 Matlab 进行求解,得出流体动压力的分布曲线图,并分析影响流体动压力大小的因素。

1 磨粒流动力光整加工基本原理

磨粒流动力光整加工方法的基本思路是利用数控加工机床完成零件复杂表面的预加工和雕铣加工后,以同直径相同材料或更为耐磨的硬质合金圆柱棒代替铣刀,同时把零件浸入磨料混合液(一定粒度的抛光膏与机床切削液或乳化液的混合溶液)。启动机床,使得圆柱棒高速旋转,极其接近工件表面而不与其接触,使其间的流体产生动压力,压迫在此挤压区磨料混合液中的磨粒对零件表面进行微磨削加工。根据设定的数控程序,硬质合金棒按一定的速度旋转和按一定的轨迹运动,实现对零件表面可控地进行光整加工。该方法的原理如图 1 所示。

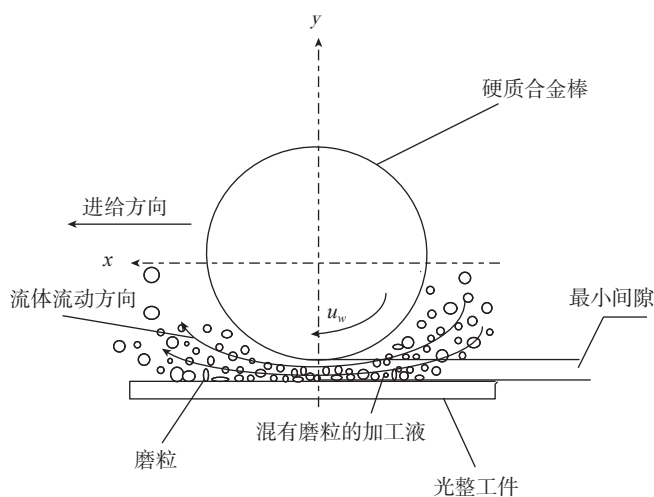


图1 磨粒流动力光整加工原理图

Fig.1 Principle of abrasive flow dynamical finishing machining

图 1 中, u_w 为硬质合金棒的速度,在工具与工件存在一定间隙时,由于磨料混合液的粘性作用,高速旋转的硬质合金棒将带动磨粒通过工具与零件表面的间隙,并有大量高速磨粒不断轰击零件表面,根据磨削原理,这些高速磨粒将在工件表面实现“滑擦-耕犁-切削”这一典型的磨削过程。在微观上,一方面,零件表面上的微凸体的最高点部分在高速磨粒的耕犁作用下,晶粒产生位错,位错的大量聚集将产生微孔隙,这些孔隙在不断的轰击力作用下,逐渐产生与工作表面平行的裂纹,当裂纹达到极限长度时微凸体的最高点部分就以薄瓣状脱落下来,形成磨粒,同时也使得微凸体的高度下降。

另一方面,在微凸体的最高点部分的下方,由于体积大于微凸体的最高点部分,磨粒的耕犁作用将不足以使其产生磨粒,但不断的轰击力,使其产生塑性变形。根据位错理论,此处的晶粒将更加紧密,并有部分晶粒被挤压至微凸体旁边的凹处,起到填平沟槽的作用,这样就较好的达到降低表面粗糙度的作用,达到光整加工的目的。

2 接触区压力场数学模型

在理论建模时常常忽略一些次要因素,做一些简化及假设。本文为研究硬质合金棒/工件楔形区流场,做了以下假设:流体是连续的、粘性的、不可压缩的牛顿流体;忽略温度和压力对流体粘度的影响;膜厚方向流体压力变化很小,相比其他方向,可以忽略不计;流体在间隙中的流动为层流,且不计其流动中的惯性效应。

根据以上的假设,对于粘度为 μ 的牛顿流体,剪切应力与速度梯度成正比,所以

$$\tau_{yx} = \mu \frac{\partial u}{\partial y}, \tau_{yz} = \mu \frac{\partial v}{\partial y}。$$

Navier-Stokes 方程可简化为:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} (\mu \frac{\partial u}{\partial y}) = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} (\mu \frac{\partial v}{\partial y}) = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}。 \quad (2)$$

因为沿膜厚方向流体压力变化很小,相比其他方向可以忽略,所以: $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$ 。

以上式中, u , v 分别为流体在 x 和 z 方向的速度; p 为流体在接触区形成的动压力; μ 为流体动力粘度。

公式(1)对 y 积分两次,取边界条件:

$$u|_{y=0} = 0, u|_{y=h} = u_w;$$

公式(2)对 y 积分两次,取边界条件:

$$v|_{y=0} = 0, v|_{y=h} = 0, \text{ 可得到:}$$

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} y(y-h) + \frac{u_w}{h} y, \quad (3)$$

$$v = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial z} y(y-h), \quad (4)$$

式中, u_w 为硬质合金棒的线速度, h 为硬质合金棒与工件表面之间的间隙, $h = h_0 + \frac{\lambda^2}{2R}$ 。

公式(3)和公式(4)对膜厚方向进行积分得:

$$q_x = -\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{h}{2} u_w, \quad (5)$$

$$q_y = -\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (6)$$

楔形区域流体流动的连续方程为:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

公式(7)中, q_x, q_y, q_z 分别是沿 x, y 和 z 方向的单位宽度流量。

将公式(5)和公式(6)代入公式(7)并化简可得硬质合金棒与工件楔形接触区流体压力场数学模型为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{h}{2} u_w \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0 \quad (8)$$

边界条件定义为:

$$p|_{x=a} = 0, -\frac{b}{2} \leq z \leq \frac{b}{2}; \quad p|_{z=\pm \frac{b}{2}} = 0, c \leq x \leq a,$$

出口处采用雷诺边界条件:

$$\frac{\partial p}{\partial x} |_{x=c} = p|_{x=c} = 0, -\frac{b}{2} \leq z \leq \frac{b}{2};$$

式中, a 为定解区域入口长度, c 为定解区域出口长度, b 为硬质合金棒浸入磨粒流中的深度。

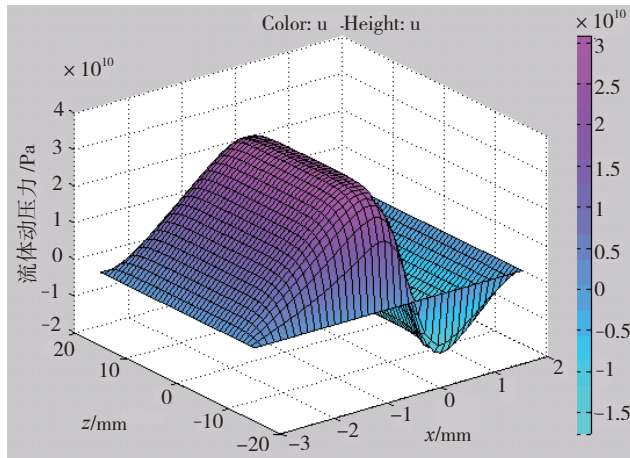
3 接触区压力场数值计算

接触区磨粒流动压力的大小不仅能反映出作用在硬质合金棒上的法向作用力的大小,而且能反映磨粒混合液供给的充足程度。在利用硬质合金棒约束磨粒流光整加工的过程中,动压力的大小要达到一定的压力范围,才能使光整加工正常进行。

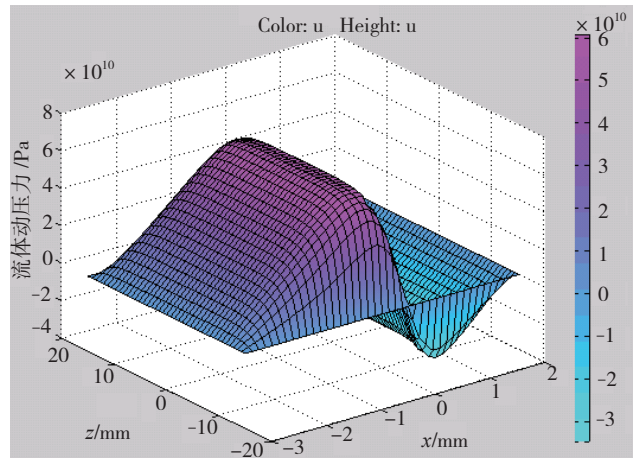
用 MATLAB 7.0 对所建立的压力场数学模型进行求解,可得出流体动压力的分布曲线图。公式(8)可以化简成:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{48u_w \mu R^2 x}{(2Rh_0 + x^2)^3} = \frac{48\pi n d \mu R^2 x}{(2Rh_0 + x^2)^3} \quad (9)$$

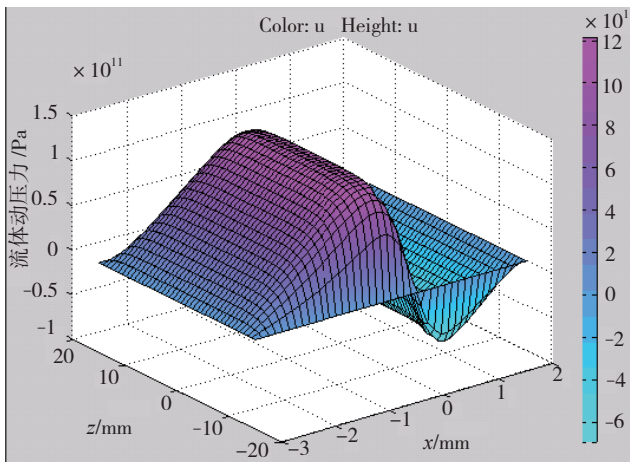
式中, n, d 分别为硬质合金棒的转速和直径。由公式(9)可以看出,硬质合金棒的直径 d , 转速 n , 流体的动力粘



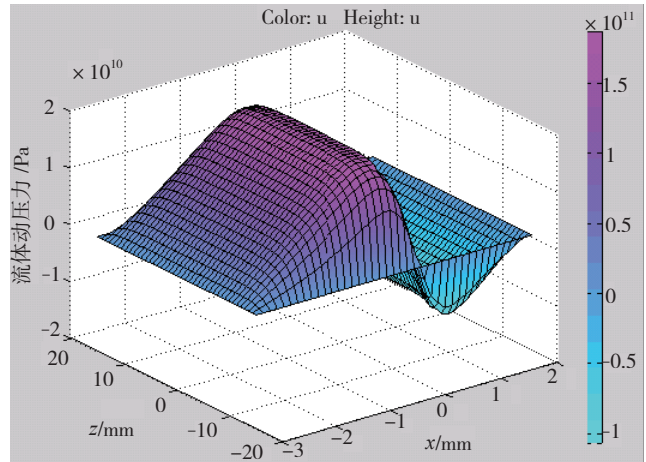
(a) $n=4800\text{r/min}$



(b) $n=9600\text{r/min}$



(c) $n=19200\text{r/min}$



(d) $n=30000\text{r/min}$

图2 流体动压力随硬质合金棒转速的变化规律

Fig.2 Change law of hydrodynamic pressure with rotational speed of cemented carbide cylinder

度 μ , 硬质合金棒与工件之间的间隙 h_0 是影响动压力的主要因素, 所以选择不同的参数组合来研究 d, n, μ, h_0 对动压力的影响。

(9) 式中方程为椭圆型偏微分方程, 用 Matlab 的偏微分方程工具箱 (PDE Toolbox) 求解。在求解中, 边界条件为 Dirichlet 条件, 方程选择 Elliptic, 其中

$$f = -\frac{48\pi n d \mu R^2 x}{(2R h_0 + x^2)^3}, \text{ 在不同的参数组合下, } f \text{ 值不同。}$$

3.1 硬质合金棒的转速对接触区流体动压力的影响

图 2 为在其他参数不变的情况下, 只改变砂轮圆周速度时流体动压力随硬度合金棒转速的变化规律图, 求解所取参数为: 硬质合金棒直径为 6mm, 浸入流体中的长度为 20mm, 磨粒流体动力粘度为 $0.05 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 硬质合金棒与工件之间的最小间隙为 0.05mm。

由模拟结果可以看出, 流体动压力随硬质合金棒转速的增大而增大, 在最小间隙之前的区域, 压力增大速

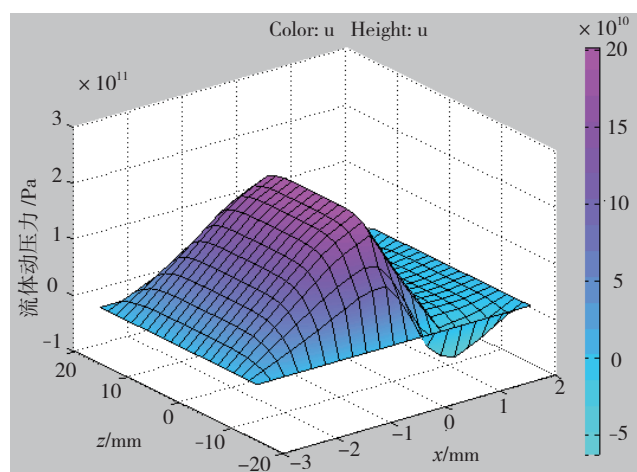
度比较快, 在接近最小间隙区域, 压力缓慢增加; 在最小间隙区域, 压力达到峰值, 在最小间隙之后区域; 压力迅速减小, 并出现负压。在硬质合金棒浸入磨粒流的深度方向上, 除了在边缘处有侧泄以外, 流体动压力相同。

3.2 硬质合金棒与工件最小间隙对接触区流体动压力的影响

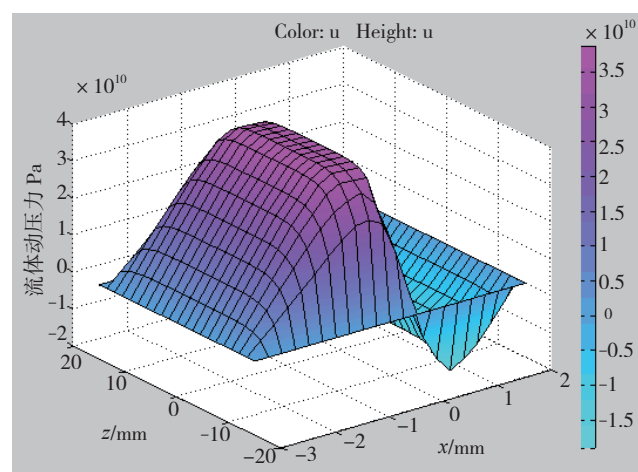
图 3 为在其他参数不变的情况下, 只改变最小间隙时流体动压力随 h_0 的变化规律图, 求解所取参数为: 硬质合金棒直径为 6mm, 浸入流体中的长度为 20mm, 磨粒流体动力粘度为 $0.05 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 硬质合金棒的转速为 19200r/min。

由模拟结果可以看出, 流体动压力随工具和工件之间间隙的增大而减小, 随着间隙的增大, 压力达到峰值的区域前移, 并且峰值区域变宽。

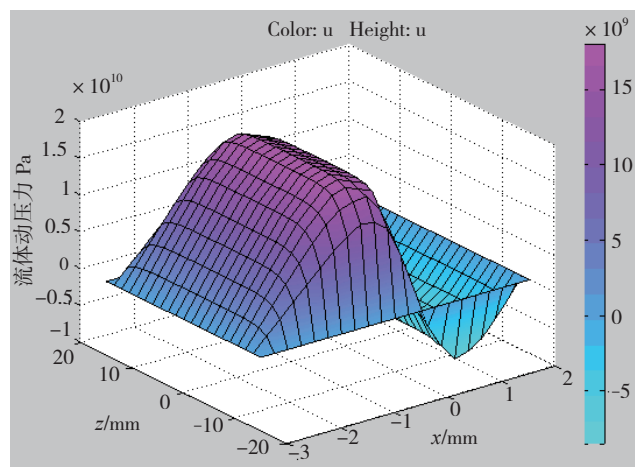
3.3 磨粒流的动力粘度对接触区动压力的影响



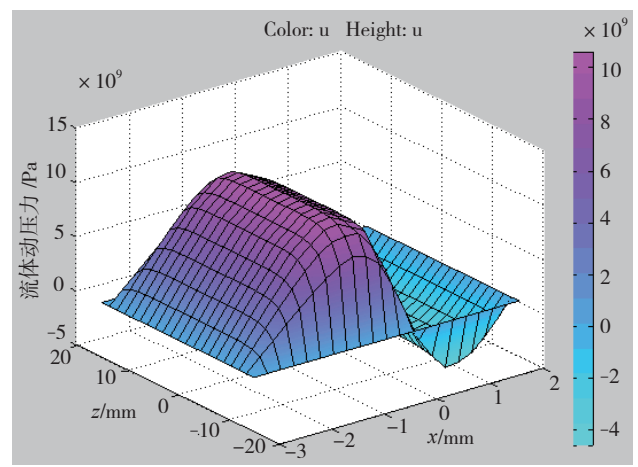
(a) $h_0 = 0.05 \text{ mm}$



(b) $h_0 = 0.1 \text{ mm}$



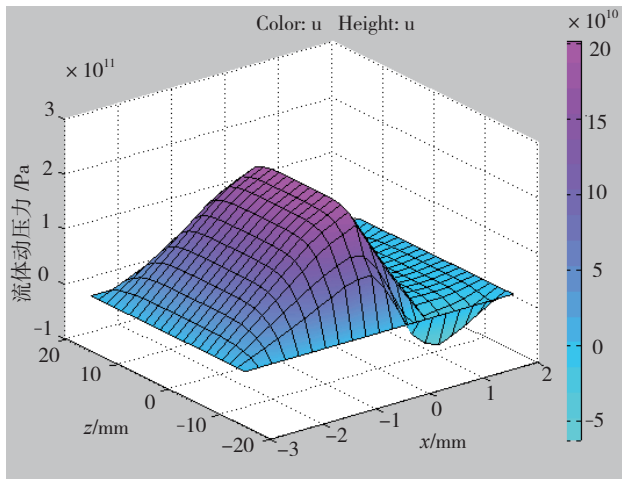
(c) $h_0 = 0.15 \text{ mm}$



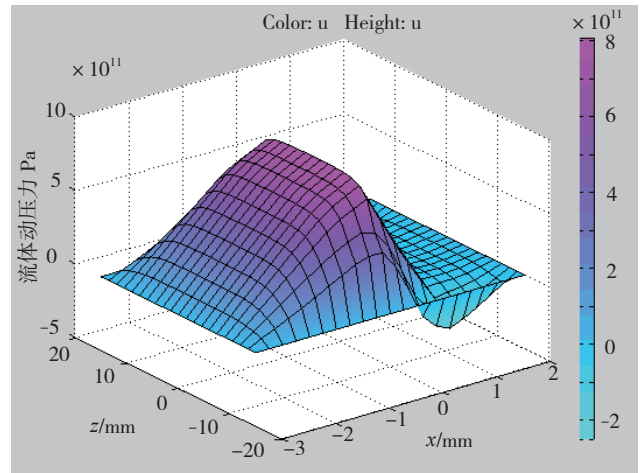
(d) $h_0 = 0.2 \text{ mm}$

图3 流体动压力随 h_0 的变化规律

Fig.3 Change law of hydrodynamic pressure with h_0



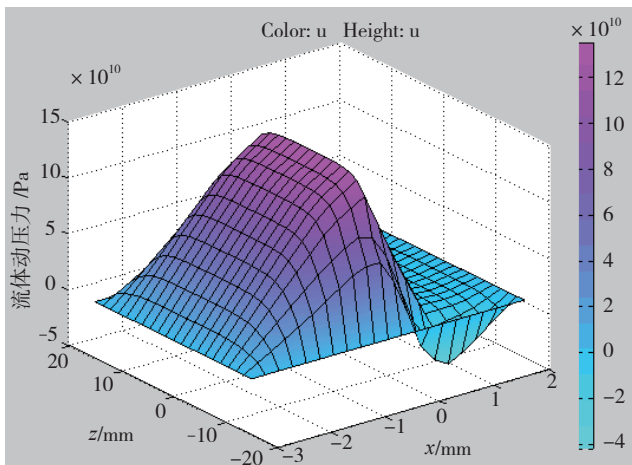
(a) $\mu = 0.05 \text{ Pa} \cdot \text{s}$



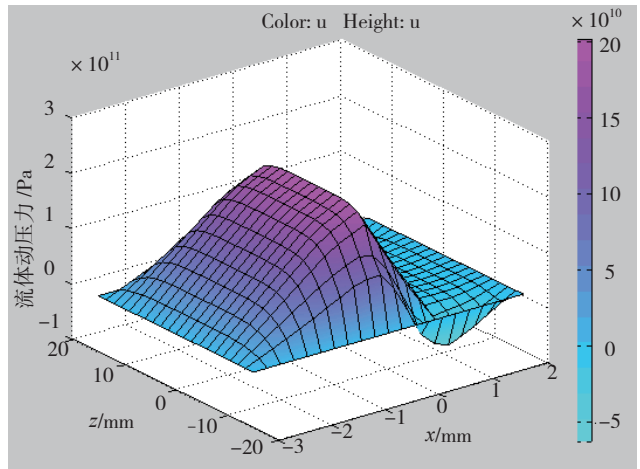
(b) $\mu = 0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

图4 流体动压力随磨粒流的动力粘度的变化规律

Fig.4 Change law of hydrodynamic pressure with dynamic viscosity of abrasive flow



(a) $d=4\text{mm}$



(b) $d=6\text{mm}$

图5 流体动压力随硬质合金棒直径的变化规律

Fig.5 Change law of hydrodynamic pressure with diameter of cemented carbide cylinder

图4为在其他参数不变的条件下,只改变磨粒流的动力粘度时流体动压力随磨粒流的动力粘度的变化规律图,求解所取参数为:硬质合金棒直径为6mm,浸入流体中的长度为20mm,硬质合金棒与工件之间的间隙为0.05mm,硬质合金棒的转速为19200r/min。

由模拟结果可以看出,磨粒流动力粘度对流体动压力的影响和硬质合金棒转速对流体动压力的影响规律相同。

3.4 硬质合金棒直径对接触区动压力的影响

图5为在其他参数不变的条件下,只改变硬质合金棒的直径流体动压力随硬质合金棒直径的变化规律图,求解所取参数为:浸入流体中的长度为20mm,硬质合

金棒与工件之间的间隙为0.05mm,磨粒流体动力粘度为0.05Pa·s,硬质合金棒的转速为19200r/min。

流体动压力随着硬质合金棒直径的增大而增大,硬质合金棒对流体动压力的影响规律和硬质合金棒转速对流体动压力的影响规律相同。

4 结论

(1) 硬质合金棒与工件楔形区满足产生流体动压力的条件,根据流体润滑理论的知识,由Navier-Stokes方程和流体流动的连续性方程,建立了磨粒流动力光整加工硬质合金棒与工件楔形区流体动压力的三维数学模型。

(下转第97页)

接研究报道较少,需要研究者对这种叠层复合材料进行广泛而深入的研究。

参考文献

- [1] 易剑,郝晓东,李焱. 微叠层材料及其制备工艺研究进展. 宇航材料工艺,2005,5:16-21.
- [2] Wadsworth J, Lesuer D R. Ancient and modern laminated composites— from the great pyramid of gizeh to Y2K. *Materials Characterization*, 2000 (45): 289-313.
- [3] 马李,孙跃,郝晓东. EB-PVD 工艺制备 Ti/Ti-Al 超薄多层复合材料的微观结构与性能研究. 北京:航空材料学报,2008,28(1): 5-8.
- [4] Bloyer D R, Rao K T, Ritchie R O. Resistance-curve toughening in ductile/ brittle layered structures: behavior in Nb/Nb3Al laminates. *Materials Science and Engineering A*, 1996, 216: 80-90.
- [5] Bloyer D R, Rao K T, Ritchie R O. Laminated Nb/Nb3Al composites: effect of layer thickness on fatigue and fracture behavior. *Materials Science and Engineering A*, 1997, 239-240: 393-398.
- [6] 王海龙,汪长安,张锐,等. ZrB₂ 基层状复合材料的制备与性能研究. 稀有金属材料与工程,2007,增刊 1:841-843.
- [7] 贾普荣,矫桂琼,何家文,等. 双金属板软化界面的止裂与分层机理. 机械科学与技术,2001,20(增刊):46-48.
- [8] Rohatgi A, Harach D J, Vecchio K S, et al. Resistance-curve and fracture behavior of Ti-Al₃Ti metallic-intermetallic laminate (MIL) composites. *Acta Materialia*, 2003, 51: 2933-2957.
- [9] 马李,孙跃,郝晓东,等. 电子束物理气相沉积工艺制备超薄高温结构材料的研究. 重庆:材料导报,2006,20(11):100-103.
- [10] 王瑞刚,潘伟,蒋蒙宁,等. 层状结构陶瓷材料结构和应用. 材料工程,2003(1):45-47.
- [11] 张佼,夏振海,尹怡民,等. Ni-Al 系金属/金属间化合物层状复合材料的扩散制备研究. 河北工业大学学报,1999,28(5):36-40.
- [12] Pickard S M, Zhang H, Ghosh A K. Interface shear properties and toughness of NiAl/Mo laminates. *Acta Mater*, 1997, 45(10): 4333-4350.
- [13] 钟敏霖,何金江,刘文今,等. 中国激光,2007,34(12):1694-1699.
- [14] Chung H L, Jiavi M H, Duffey T P, et al. NbAl₃/Al microlaminated thin films deposited by UV laser ablation. *Thin Solid Films*, 2001, 388: 101-106.
- [15] 介万奇, Kandalova E G, 张瑞杰,等. SHS 法制备 Al₃Ti/Al 复合材料的研究. 稀有金属材料与工程,2000,29(3):145-148.
- [16] Kim H Y, Chung D S, Hong S H. Reaction synthesis and microstructures of NiAl/Ni micro-laminated composites. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 396: 376-384.
- [17] Alman D E, Dogan C P, Hawk J A, et al. Processing, structure and properties of metal - intermetallic layered composites. *Materials Science and Engineering A*, 1995, 192/193: 624-632.
- [18] Chung D S, Enoki M, Kishi T. Microstructural analysis and mechanical properties of in situ Nb/Nb-aluminide layered materials. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2002, 3(2): 129-135.
- [19] Mara N A, Tamayo T, Sergueeva AV, et al. The effects of decreasing layer thickness on the high temperature mechanical behavior of Cu/Nb nanoscale multilayers. *Thin Solid Films*, 2007, 515: 3241-3245.

[20] 韩杰才,章德名,陈贵清,等. 用 EB-PVD 法制备 Ti-Al/Nb 层板复合材料的研究. 稀有金属材料与工程,2006,35(10):1665-1668.

[21] Ma L, Sun Y, Hao X. Preparation and performance of large-sized Ti/Ti-Al microlaminated composite. 稀有金属材料与工程,2008,37(2):325-329.

[22] Peng L M, Li H, Wang J H. Processing and mechanical behavior of laminated titanium-titanium tri-aluminide (Ti-Al₃Ti) composites. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 406: 308-318.

[23] 李亚江,夏春智, Puchkov U A, 等. Super-Ni/NiCr 叠层复合材料与 18-8 钢的焊接性. 哈尔滨:焊接学报,2010,31(2):13-16.

[24] 夏春智,李亚江, Puchkov U A, 等. Super-Ni 叠层复合材料与 18-8 钢 TIG 焊接头区的显微组织. 中国有色金属学报,2010,20(6):1149-1154.

(责编 日午)

(上接第 92 页)

(2) 对楔形接触区压力场数学模型进行求解,得到流体动压力的分布曲线图,分析结果可以得出:流体动压力随硬质合金棒转速的增大而增大,随硬质合金棒与工件之间间隙的增大而减小,随磨粒流动力粘度系数的增大而增大。压力峰值发生在最小间隙区域,当间隙逐渐变大时,峰值区域逐渐前移并且变宽。在硬质合金棒浸入磨粒流深度方向,除边缘处有侧泄外,流体动压力相同。

(3) 本文在推导压力场数学模型时做了一些简化,将磨粒流简化为牛顿流体,但在实际加工中,磨粒流体为非牛顿流体,而在真实的条件下分析所得结论能更好地反应流体速度和压力分布规律,因此在接下来的工作中会进一步去研究非牛顿流体方程。本文主要对压力场进行了研究,影响磨粒流加工效果的另一个重要因素——速度场有待于我们进一步去研究。

参考文献

- [1] 马季. 模具自由曲面超声磁力复合研磨机理及试验研究[D]. 吉林:吉林大学,2007.
- [2] 芦亚萍,张军强. 模具自由曲面的超声磁粒复合研磨研究. 电加工与模具,2007,3(13):59-62.
- [3] 王晓明. 脉冲电化学及其复合光整加工机理和表面特性的研究[D]. 大连:大连理工大学,2002.
- [4] 张学成,戴一帆,李圣怡. 磁射流抛光中磁场的分析与设计. 航空精密制造技术,2006,42(1):12-15.
- [5] 李长河,丁玉成,蔡光起,等. 砂轮约束磨粒喷射精密光整加工表面特性的实验研究. 制造技术与机床,2009(6):102-105.
- [6] 李长河. 砂轮约束磨粒喷射精密光整加工机理及表面特性的研究[D]. 沈阳:东北大学,2005.
- [7] 谭援强,李艺,Sheng Yong. 磨粒流加工的固液两相流模型及压力特性模拟. 中国机械工程,2001,12(9):1033-1036.

(责编 日午)