

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.007

液动压悬浮抛光中磨粒与工件表面作用的数值模拟研究*

谢 重,朱胜伟

(浙江工业大学 机械工程学院,浙江 杭州 310014)

摘要:针对液动压悬浮抛光固-液两相流中固相磨粒与工件表面撞击的过程中,对磨粒以不同的速度和不同的角度撞击工件表面后残余应力沿工件深度方向的分布规律进行了研究,利用 ABAQUS 软件建立了单颗磨粒撞击工件表面的三维有限元模型。对磨粒流撞击工件表面时的速度场进行了输出,利用 PFC/3D 软件建立了磨粒流撞击工件表面的三维离散元模型。研究结果表明:随着撞击角度和速度的增大,在工件表层形成的压应力场会增大,沿深度方向残余应力值急剧下降,磨粒流中磨粒间的撞击对磨粒撞击工件表面的速度场影响不大。

关键词:有限元法;残余应力;离散元法;速度筛选

中图分类号:TH164;TG356.2⁺8

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)08-0851-05

Numerical simulation of hydrodynamic suspension polishing process using finite element and discrete element method

XIE Zhong, ZHU Sheng-wei

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of technology, Hangzhou 310014 China)

Abstract: Aiming at the process of particle impacting the workpiece involved in hydrodynamic suspension polishing, the distribution of the residual stress along the depth direction was studied with respect to the different impact velocity and impact angle. The three-dimensional finite element model that is to represent the single particle impact the surface of workpiece was constructed by using ABAQUS. The velocity field during particles impacting the surface of workpiece was calculated. The three-dimensional discrete element model of the particles impacting the surface of workpiece was developed by using PFC/3D. The results indicate that with the increasing of impact velocity and impact angle the pressure stress field was increased in the workpiece surface. The residual stress is decreased sharply along the depth direction and the largest residual stress in the workpiece surface. Considering the collision between abrasives in the fluid has not so big effect to the velocity field of particles impact the workpiece surface.

Key words: finite element method; residual stress; discrete element method; velocity distribution

0 引 言

随着当代科技的迅速发展和现代制造业的需求,原子级超光滑表面在微电子、光学、生物等领域具有广泛应用前景^[1-2],因此,对于获得原子级超光滑表面的加工技术的研究显得尤为重要。在液动压悬浮抛光加

工^[3]过程中,成百上千的磨粒撞击工件表面,引起工件内残余应力场的变化,而残余应力是表面完整性表征非常重要的一个因素,合适的表面残余应力状态有利于机器零件的疲劳寿命和抗化学腐蚀性的提高。

国内外很多学者进行了颗粒碰撞壁面表面的相关研究,其中,M·Junkar等^[4]提出了运用有限元法模拟

收稿日期:2016-11-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375457);浙江省自然科学基金资助项目(Y14E050057,LQ16E050011)

作者简介:谢重(1992-),湖南岳阳人,硕士研究生,主要从事精密及超精密加工技术领域方面的研究。E-mail:zx1992_ofyou@163.com

单颗粒撞击构件对构件造成的损坏;D·Griffin 等^[5]模拟了多个颗粒撞击壁面,研究了撞击后壁面的破损;计时鸣等^[6]研究了单个磨粒撞击靶材后的表面残余应力;凌祥等^[7]对弹丸垂直撞击工件过程进行了三维有限元模拟;李雁淮等^[8]研究了喷丸覆盖率对残余应力场的影响;洪滔等^[9]对喷丸强化过程进行了有限元和离散元的模拟。但在液动压悬浮抛光中并未对磨粒撞击工件后沿深度方向的残余应力分布规律进行深入研究,也未在考虑磨粒间的碰撞条件下对磨粒的速度场进行输出。

本研究对液动压悬浮抛光过程进行研究,建立单颗磨粒撞击工件表面的有限元模型,重点研究磨粒在不同速度和不同角度的撞击下工件表面沿深度方向残余应力的分布规律;建立磨粒流撞击工件表面的离散元模型,利用 PFC/3D 软件对磨粒进行速度筛选。

1 单颗磨粒撞击工件表面的有限元模拟

1.1 有限元模型建立

新型液动压悬浮抛光盘周向截面图如图 1 所示。

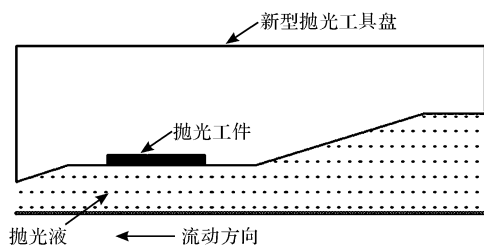


图 1 新型液动压悬浮抛光盘周向截面图

为了确定磨粒撞击工件表面的模型,本研究将其中抛光工件和磨粒提取出来,在 ABAQUS 中建模。为了计算方便,以待加工工件表面为研究对象,本研究选择较为简单的平板模型作为碰撞模型,由于该模型和边界条件看成是轴对称的,故可以取模型的一半进行模型分析^[10]。在实际的抛光中使用的磨粒直径大小为 $1\ \mu\text{m}$,考虑到单颗磨粒对工件表面碰撞效果的分析,笔者使用相似理论,将磨粒的体积进行适当的放大处理,便于对碰撞后的仿真结果进行更为直观的分析研究。本研究选取球形磨粒的粒径 D 为 $1\ \text{mm}$,对球体约束成刚体,工件平板尺寸为 $4D \times 8D \times 8D$ 。

单颗磨粒撞击工件的有限元网格模型如图 2 所示。

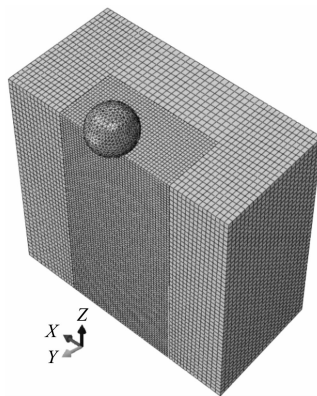


图 2 单颗磨粒撞击工件的有限元网格模型

笔者研究的是球体磨粒对塑性材料的碰撞问题,进行网格划分时,对磨粒采用四面体单元 C3D4,工件采用八节点六面体减缩积分单元 C3D8R,并对工件表面上的碰撞区域进行适当的网格加密处理。其中球体模型的元素数量为 11 647,工件模型的元素数量为 101 620。减缩积分单元可以在计算单元应变分量的平均值时有更加精确的均匀应变公式,且只在单元中心有个积分点,更利于求解。

工件的材料使用的是塑性材料铜,两相抛光液中的固相磨粒采用的是氧化铝,材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

材料	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / GPa	泊松比 ν
Al_2O_3	3 960	370	0.3
Cu	8 900	125	0.34

为减少计算时间,将磨粒考虑成刚性模型,忽略其自身的磨损。

液动压悬浮抛光系统中磨粒与工件表面之间的相互作用是属于接触问题,笔者研究所需要得到的是工件表面残余应力的大小,只需要考虑磨粒与工件表面接触的结果,故将接触属性设置为“surface-to-surface”(面对面接触),并设置磨粒为主接触面,工件为副接触面,应用库伦摩擦模型来阻止两接触面的相切运动,假设摩擦系数为 0.3。由于模型是一个对称的,故施加的是对称载荷,对工件壁面 XOZ 平面施加面对称约束边界,将工件底面设置为全约束以限制工件和磨粒之间存在切向运动。

磨粒与工件表面之间的接触力是通过磨粒的运动速度产生的,即磨粒以一定的速度和角度撞击工件表面,从而对工件表面施加冲击载荷。在 ABAQUS/Explicit 中对磨粒施加一定的初始速度以定义磨粒与工件之间的冲击载荷。液动压悬浮抛光中,抛光盘转速 ω 在 $500\ \text{r/min} \sim 1\ 500\ \text{r/min}$,根据圆周运动的规律可得线性速度 $v = r\omega$,则其速度范围为 $1.3\ \text{m/s} \sim 9.4\ \text{m/s}$ 。

为了便于分析比较,本节选取的磨粒的撞击速度为 3 m/s、6 m/s 和 9 m/s,接触过程中的能量损失对仿真结果无影响,为了简化复杂的求解过程,忽略磨粒与工件接触过程中的能量损失。

1.2 有限元计算结果及分析

1.2.1 不同撞击速度的影响

本研究将工件材料属性定义为塑性材料铜,以 3 个不同的速度垂直($\theta = 90^\circ$)撞击工件表面得到的横向残余应力 δ_y ,工件初始残余应力为 0,获得的横向残余应力沿厚度方向分布如图 3 所示。

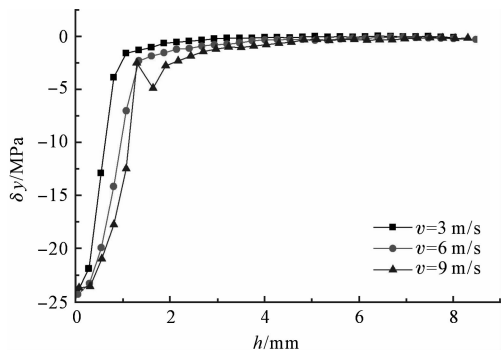


图3 不同速度撞击下沿深度方向残余应力分布

磨粒的碰撞速度是影响残余应力分布的一个重要因素,从图 3 中可以看出,其横向残余应力表现为压应力,不同撞击速度计算得到的残余应力分布规律基本相同;最大残余应力值在工件表层,沿深度方向残余应力值急剧下降,所以残余应力主要集中在工件表层区域。

1.2.2 不同撞击角度的影响

定义磨粒的入射角度 θ 如图 4 所示。

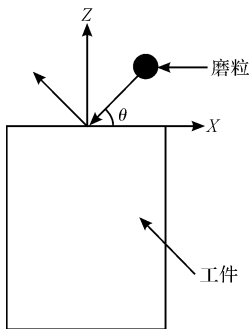


图4 磨粒以 θ 角撞击工件

考虑不同的入射角度对工件表面残余应力场的影响,本研究选取磨粒的速度为 9 m/s,比较磨粒分别以入射角度 30° 、 45° 、 60° 、 90° 对铜表面进行碰撞得到的横向残余应力 δ_y 沿厚度方向分布如图 5 所示。

结果表明,碰撞角度的变化会影响最大残余应力值,随着碰撞角度的增加,最大残余应力值增加,残余应力分布范围更广。然而,在实际液动压悬浮抛光中

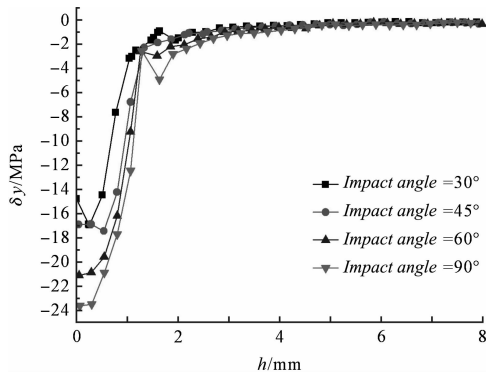


图5 不同角度撞击下沿深度方向残余应力分布

颗粒与工件撞击的角度小,在一定程度上能够减小工件表面的最大残余应力值。

2 磨粒流与工件撞击的离散元模拟

有限元法无法模拟大量磨粒对工件撞击的过程及磨粒之间的相互作用,而离散元法是专门解决非连续介质问题的数值模拟方法,近年来离散元法已成为颗粒运动及碰撞的数值模拟研究的通用方法。

2.1 离散单元法理论

本研究采用的离散元软件为 PFC 软件,其采用的离散元单元法理论是牛顿第二定律和力-位移定律,用这两个理论来分析颗粒的运动特性。牛顿第二定律分析颗粒因受到不同的作用力而引起的运动状态,力-位移定律用来分析颗粒之间的相互作用力和相对运动。其接触模型主要由 Hertz-Mindlin 接触、线性刚度接触、滑动接触等模型。本研究采用的是 Hertz-Mindlin 接触模型,用 Hertz^[11]理论计算法向的受力,同时采用 Mindlin 理论计算切向作用;然后运用牛顿第二定律建立起单元的运动方程,通过接触理论和牛顿第二定律的循环来实现离散元数值计算。离散元中的碰撞接触可以分为球-球接触和球-面接触。

球-球接触如图 6 所示。

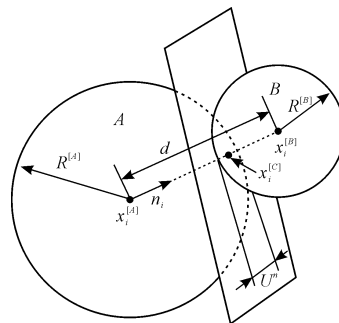


图6 球-球接触

对于 A、B 两个颗粒,半径分别为 R_A 和 R_B ,颗粒 A

的速度为 u_A , 颗粒 B 的速度为 u_B , 颗粒 A 与颗粒 B 之间的相对速度为 $\Delta_u = u_A - u_B$, 颗粒之间的法向力为:

$$F_n = (k_n \alpha^{\frac{3}{2}} + \eta_n \Delta_u) \quad (1)$$

式中: k_n —法向弹性系数, α —法向重叠量, η_n —法向阻尼系数, k_n 的计算方法如下:

$$k_n = \frac{4}{3} \left(\frac{1-v^2}{E_A} + \frac{1-v_B^2}{E_B} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{R_A + R_B}{R_A R_B} \right)^{-1/2} \quad (2)$$

式中: E_A, E_B —球 A 和球 B 的弹性模量; v_A, v_B —球 A 和球 B 的泊松比。

当球 A 和球 B 的材料相同, 半径一致时, k_n 为:

$$k_n = \frac{\sqrt{2RE}}{3(1-v^2)} \quad (3)$$

η_n 的计算方法如下:

$$\eta_n = 2 \sqrt{mk_n} \quad (4)$$

切向力计算公式:

$$F_s = -k_s \delta - \eta_s \Delta_{ts} \quad (5)$$

式中: Δ_{ts} —接触点的滑移速度, k_s —切向弹性系数, η_s —切向阻尼系数。

如果颗粒在接触的时候发生了相对滑动, 则切向力的计算方法如下:

$$F_s = \mu_f \cdot F_n \quad (6)$$

式中: μ_f —静摩擦系数, 计算公式为:

$$k_s = 8\alpha^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1-v_A^2}{G_A} + \frac{1-v_B^2}{G_B} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{R_A + R_B}{R_A R_B} \right)^{-1/2} \quad (7)$$

式中: G_A, G_B —球 A 和球 B 的剪切模量。

当球 A 和球 B 的材料相同, 半径一致时, k_s 为:

$$k_s = \frac{2\sqrt{2G}}{(2-v^2)} \alpha^{1/2} \quad (8)$$

η_s 的计算公式如下:

$$\eta_s = 2 \sqrt{mk_i} \quad (9)$$

对于球-面接触, 壁面的半径是无限大, 同时速度为零, 因此, 相比于球-球接触, 球-面接触比较简单。其接触模型如图 7 所示。

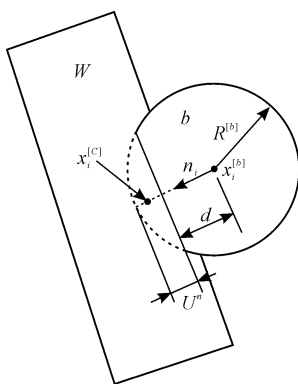


图 7 球-面接触

法向接触刚度系数为:

$$k_n = \frac{\sqrt{2R} \cdot G}{1-v} \sqrt{\alpha} \quad (10)$$

式中: G —球的剪切模量, v —球的泊松比, α —重叠量。

切向刚度系数为:

$$k_s = \frac{2[3 - (1-u)R]^{1/3}}{2-v} \cdot (G^2 \cdot F_n) \quad (11)$$

2.2 离散元模型建立

本研究应用 PFC 软件对磨粒流碰撞工件表面的过程进行模拟, 磨粒在工件上方某高度位置随机生成, 所有磨粒的直径都相同, 并都以同样的速度对表面进行碰撞, 磨粒的初始速度为 $v_0 = 25\sqrt{2}$ m/s, 角度 $\theta = 45^\circ$, 碰撞的离散元模型如图 8 所示, 定义摩擦系数为 0.3。

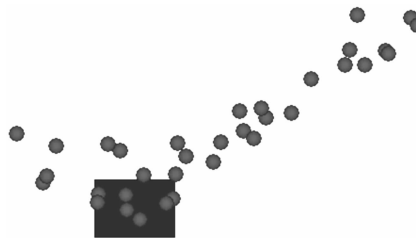


图 8 离散元模型

磨粒和工件的模型参数分别如表 2、表 3 所示。

表 2 磨粒模型参数

参数	值
直径 / μm	50
密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^3)$	6 970
泊松比	0.06
剪切模量 / GPa	1.86
速度 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_x = 0, V_y = 25, V_z = 25$

表 3 工件模型参数

参数	值
密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 700
泊松比	0.15
剪切模量 / GPa	157

2.3 离散元计算结果及分析

本研究利用上述离散元模型进行数值模拟, 获得磨粒撞击工件表面时的速度如图 9 所示。

横坐标是磨粒的 id 号, 纵坐标是速度。从图 9 中可以看出, 磨粒各个方向的速度分布范围比较大, 但 x 方向速度主要在 0 附近分布, z 方向的速度大小主要在 25 m/s 上下分布, 而磨粒 y 方向的速度相比较 x, z 方向的速度更加紊乱, 可知在磨粒运动过程中, 磨粒的相互碰撞主要影响 y 方向的速度。

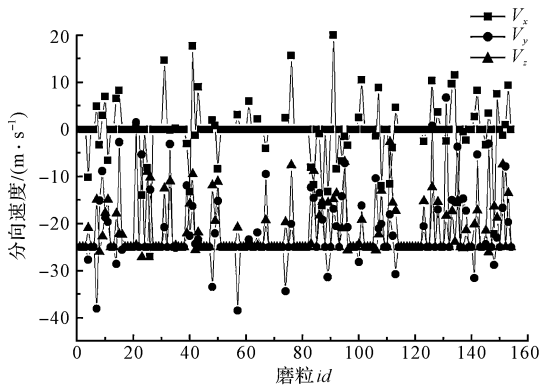
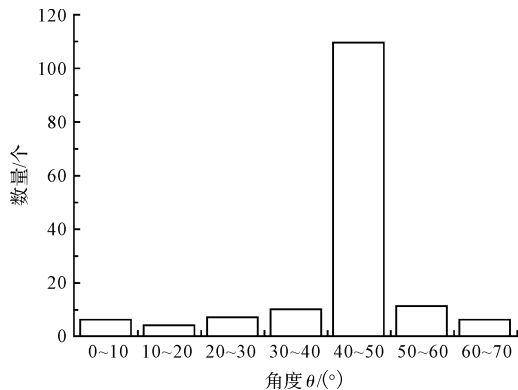


图9 磨粒撞击工件表面的速度分布

磨粒撞击工件的角度 θ 统计如图 10 所示。

图10 磨粒撞击工件的角度 θ 统计

在考虑磨粒间的碰撞后可以看出,磨粒与工件撞击角度分布在 $0^\circ \sim 70^\circ$ 之间,有部分磨粒在磨粒间的一次或多次碰撞下改变了初始撞击角度,占了 30% 左右。

4 结束语

本研究以液动压悬浮抛光为研究对象,基于有限元软件 ABAQUS 研究了流体抛光中磨粒碰撞工件表面的残余应力分布,通过不同磨粒的碰撞速度和碰撞角度,对工件进行碰撞数值模拟,并利用 PFC/3D 建立了磨粒撞击工件表面的三维离散元模型进行颗粒速度的筛选统计,获得如下结论:

(1) 磨粒撞击工件表面的角度和速度变化会影响工件沿深度方向的残余应力分布。随着撞击角度和速

度的增大,在工件表层形成的压应力场会增大。在不同撞击角度和速度下工件沿深度方向的压应力分布规律相似,且最大残余应力值位置在工件表层 ($Z = 0 \text{ mm}$),沿深度方向残余应力值急剧下降。

(2) 考虑磨粒流中磨粒与磨粒之间的碰撞后,会引起磨粒流的速度场变化,但是磨粒的撞击速度大小和角度的主要分布区域不变。

参考文献 (References):

- [1] 袁巨龙,王志伟,文东辉,等. 超精密加工现状综述[J]. 机械工程学报,2010,43(1):35-48.
- [2] 文东辉,周海峰,徐 钉,等. 超光滑表面加工技术研究进展[J]. 机电工程学报,2015,32(5):579-584.
- [3] 徐 钉,文东辉,朴钟宇. 液动压悬浮抛光盘的设计及抛光液动压分布研究[J]. 润滑与密封,2015,40(7):56-59.
- [4] JUNKAR M, JURISERVICE B, GRAH M. Finite element analysis of single particle impact in abrasive water jet machine[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2006,32(7):1095-1112.
- [5] GRIFFIN D, DAADBIN A, DATTA S. The development of a three-dimensional finite element model for solid particle element model for solid particle erosion on alumina [J]. **Wear**,2004,256(30):900-906.
- [6] 计时鸣,章 定,谭大鹏. 磨粒流加工中单颗磨粒冲击的有限元分析[J]. 农业工程学报,2012,28(51):68-73.
- [7] 凌 祥,彭薇薇,倪红芳. 喷丸三维残余应力场的有限元模拟[J]. 机械工程学报,2006,42(8):182-189.
- [8] 李雁淮,王 飞,吕 坚,徐可为. 单丸粒有限元模型和多丸粒模型的有限元模拟[J]. 西安交通大学学报,2007,41(3):348-352.
- [9] 洪 滔,王志伟,袁巨龙. 喷丸强化过程的有限元和离散元模拟[J]. 中国机械工程,2008,19(11):1321-1325.
- [10] 刘冬玉,周迪锋. 催化剂颗粒撞击壁面的有限元分析[J]. 机电工程学报,2014,31(3):342-345.
- [11] 刘安源,刘 石,潘忠刚. 振动给料机中固体颗粒物料运动规律的数值研究[J]. 中国科学院研究生院学报,2002,19(1):35-42.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

谢 重,朱胜伟. 液动压悬浮抛光中磨粒与工件表面作用的数值模拟研究[J]. 机电工程,2017,34(8):851-855.

XIE zhong, ZHU Sheng-wei. Numerical simulation of hydrodynamic suspension polishing process using finite element and discrete element method[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(8):851-855.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>