

磨粒流加工中单颗磨粒冲击的有限元分析

计时鸣, 章定, 谭大鹏*

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 杭州 310014)

摘要: 基于磨粒流已经形成了一些表面加工方法, 利用磨粒流与加工表面接触时的壁面效应, 形成磨粒对表面的微切削实现表面的光整加工。该文建立了可行的有限元模型, 采用 ANSYS 作为前处理器。磨粒流加工主要针对金属或合金等塑性材料, 以典型的 Ti-6Al-4V 材料为靶材, 建立相应 Johnson-Cook 弹塑性材料模型。经过 LS-DYNA 求解, 观察材料的破坏过程, 可发现磨粒包含了变形磨粒和切削磨粒。计算结果符合 Hashish 对于塑性材料的微切削理论, 磨粒以一定的角度撞击壁面时, 形成的微切削更大。磨粒量随着撞击速度的增加而增加, 磨粒率随着撞击次数和颗粒直径 ($<200\mu\text{m}$) 的增加而增加。

关键词: 磨粒, 磨粒, 有限元法, 塑性材料, 加工, Johnson-Cook

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.z1.012

中图分类号: S225.91⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-Supp.1-0068-06

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(增刊 1): 68-73.
Ji Shiming, Zhang Ding, Tan Dapeng. Finite element analysis of single-particle impact in abrasive flow machining[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(Supp.1): 68-73. (in Chinese with English abstract)

0 引言

当今材料、计算机、紧密零件的不断发展, 带动了制造技术整体的推进。特别以航天、航空工业为标志的高精技术密集行业, 出现了许多应用新材料, 新技术设计的各种零件, 精度更高, 重量更轻, 结构更复杂。而制造这些零件的高端工艺是一个很大的挑战, 使得光整工艺不断提高。磨粒流光整加工技术^[1]是在磨料水射流技术的基础上发展起来, 并将它应用于先进制造业, 集流体力学、表面技术于一体的一种新型精密加工技术。尤其在航天领域, 几乎所有大型飞机制造公司的发动机厂和维修厂都使用磨粒流光整工艺加工各种各样的零件。除了作为一种抛光手段, 磨粒流工艺还可以对那些形状公差、质量要求极其严格的零件进行微量磨削加工^[2]。随着现代制造技术微型化、密集化, 越来越多的零件结构呈现出封闭的无规则的同时有要求高质量表面的各种型腔、通道等。

基于磨粒流形成了一些表面加工方法, 例如挤压珩磨 (Abrasive Flow Machining)^[3]、磨粒水射流抛光 (Abrasive Water Jet Finishing)^[4]、磁射流抛光 (Magnetorheological Jet Polishing)^[5]、磁流变抛光

(Magnetorheological Finishing)^[6]、电流变液抛光 (Electrorheological Fluid Polishing)^[7]等。这些方法利用磨粒流与加工表面接触时的壁面效应, 形成磨粒对表面的微切削实现表面光整加工。

磨粒冲击的有限元分析为研究磨粒流的材料去除原理及微切削效应提供了基础, 越来越多的学者通过数值方法来描述磨粒流加工中磨粒的冲击行为^[8]。磨粒冲击的数值分析最初从 Alder^[9]、Shimizu^[10]和 Chen^[11]研究的 2D 模型开始, 2D 模型拥有比较精细的网格、计算的时间比较少。但是, 它必须要基于平面应变, 平面应力和轴对称等基本假设, 而且很难仿真多粒子的冲击效果。Woytowicz 和 Richman^[12]把 2D 模型扩展到 3D 模型; ElTobgy 和 Elbestawi^[13]建立了磨粒冲击有限元分析模型, 并总结了几种试验模型, 选择 Ti-6Al-4V 作为靶材, 建立了材料的 Johnson-Cook 本构模型与失效模型。

在此基础上本文建立了可行的 3D 有限元模型, 针对磨粒流加工中金属及合金等塑性材料, 采用相应的 Johnson-Cook 弹塑性材料模型, ESTS 侵蚀接触算法, 利用 LS-DYNA 建模及求解, 仿真磨粒对壁面的冲击行为。分析磨粒速度、入射角度、直径等参数对加工效果的影响, 将为磨粒流加工技术提供一定的参考意义。

2 塑性材料的微切削理论

在磨粒流技术中, Hutchings^[14]认为混在流体中的细小颗粒对表面不断冲击, 造成表面的材料去除。磨粒流技术主要用于金属、合金等塑性材料的表面光整加工, 塑性材料的材料去除主要是由于磨粒对表面的微切削和微切削作用, 图 1 所示为颗粒对塑性材料撞击的示意图。

收稿日期: 2011-07-09 修订日期: 2012-03-19

基金项目: 国家自然科学基金 (50875242)

作者简介: 计时鸣 (1957-), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为精密/超精密加工方面的研究。杭州 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 310014。

Email: jishiming@zjut.edu.cn

*通信作者: 谭大鹏, 男, 副教授, 主要研究方向为精密/超精密加工方面的研究。杭州 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 310014。Email: tandapeng@zjut.edu.cn

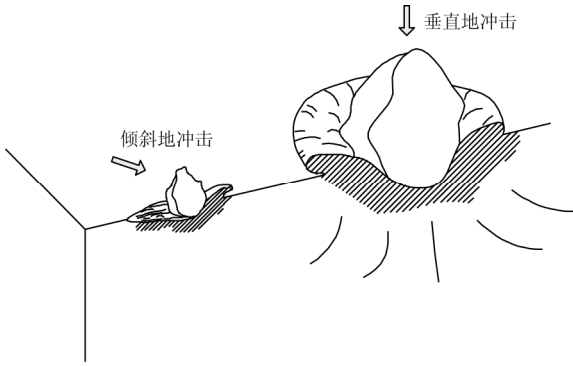


图 1 磨粒对塑性材料的冲击

Fig.1 Impact between particles and material surface

Finnie^[15]提出了刚性粒子对塑性材料的冲蚀磨损理论，单位时间单位面积内的质量磨损率 W ($\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) 的完整表达式可表示为

$$W_m = \sum_{i=1}^n \frac{E}{A} \quad (1)$$

式中， E 为无量纲量，表示磨损量； n 为单位时间内碰撞壁面的颗粒个数； A 为冲蚀面积， m^2 。

磨损量表达式为

$$E = c \frac{mv^2}{\psi\sigma_f K} f(\gamma) \quad (2)$$

式中， K 为随粒子形状改变而改变的参数（作用在粒子上的垂直力分量与水平力分量之比）； c 为有效冲击粒子比例； ψ 为切削长度与深度比； σ_f 为材料塑性流动应力， Pa ； v 为颗粒速度， m/s ； m 为颗粒质量， kg ； $f(\gamma)$ 为无量纲函数，表示碰撞角度的作用。

$$\begin{cases} f(\gamma) = (\sin 2\alpha - \frac{6}{K} \sin^2 \alpha) \rho, \alpha < \alpha_0 \\ f(\gamma) = \frac{\cos^2 \alpha}{6} \rho, \alpha > \alpha_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中， α 为颗粒碰撞角度， $^\circ$ ； α_0 为临界入射角度， $^\circ$ ； ρ 为壁面材料密度， kg/m^3 。

Hashish^[16]修正了 Finnie 磨损模型，改进了其中的速度指数，加入了粒子形状的影响，改进后的模型为

$$W = \frac{7}{\pi} \frac{m}{\rho} \left(\frac{v}{C_k} \right)^{2.5} \sin(2\alpha) \sqrt{\sin(\alpha)} \quad (4)$$

式中， $C_k = \sqrt{\frac{3\sigma_f R_f^{3/5}}{\rho}}$ ， R_f 是粒子的圆度因子，其余变量与 Finnie 模型相同。

Hashish 模型不需要有试验常数，使用起来更加方便，在考虑速度系数的同时包含了颗粒形状的影响，该模型适用于塑性材料低冲击角的磨损情况。

3 有限元分析方法

3.1 材料的本构模型

Johnson-Cook(J-C)材料模型是一种与应变率和绝热（忽略热传导）温度相关的经验型粘塑性本构模型，该模型适用于应变率大范围变化的问题和由塑性耗散导致的材料硬化引起的温度变化问题，能较好地描述金属材料的加工硬化效应、应变率效应和温度软化效应。

流动应力借用了液态成形金属流动的概念，表述变形过程中的应力。Johnson-Cook 材料模型将流动应力描述为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + c \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (5)$$

式中 A 、 B 分别为屈服应力常数，应变硬化常数； c 为应变率指数； ε 为等效塑性应变； $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲塑性应变率， $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考塑性应变率 $\dot{\varepsilon}_0 = 1\text{s}^{-1}$ ； T^* 为相应温度， K ， $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$ ， T_{room} 为室温， K ， T_{melt} 为融化温度， K 。

Johnson-Cook 材料损伤模型，是一种应变累积损伤模型，该模型考虑了应力三轴性、应变率和温度效应，J-C 模型定义单元损伤

$$D = \frac{\Delta\varepsilon_p}{\varepsilon_f} \quad (6)$$

式中， D 为损伤参数，初始时 $D=0$ ，当 $D=1$ 时，材料失效； $\Delta\varepsilon_p$ 为一个时间步的塑性应变增量； ε_f 为当前时间步的应力状态、应变率和温度下的破坏应变。

破坏应变 ε_f 描述为

$$\varepsilon_f = (d_1 + d_2 \exp d_3 \sigma^*) (1 + d_4 \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 + d_5 T^*) \quad (7)$$

式中， d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 为材料参数，表示材料的破坏系数； $\sigma^* = p/\sigma_{eff}$ ， p 为压力， Pa ， σ_{eff} 为等效应力， Pa 。J-C 失效模型考虑了应力状态、应变率和温度等影响因素，具有很大范围的适应性。第一部分反映材料破坏应变随应力三轴度的增大而减小，第二部分反映应变率对破坏应变的影响，第三部分反映温度的热软化效应对材料韧性的影响。

3.2 状态方程

当遇到高速的侵蚀问题时，Gruneisen 状态方程被用来仿真塑性材料的冲击波效应。当材料被压时，Gruneisen 状态方程定义压缩材料的压力如下

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \gamma_0/2)\mu - (a/2)\mu^2]}{[1 - (S-1)\mu]^2} + \gamma_0 E \quad (8)$$

式中， E 是初始内能， J ； C 是 $V_s - V_p$ （冲击波速度-质点速度）曲线的截距， km/s ； S 是 $V_s - V_p$ 曲线的斜率系数； γ_0 是 Gruneisen 常数； $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ ； ρ 是材料的初始密度， kg/m^3 ； ρ_0 是材料被压缩后的密度， kg/m^3 ； a 是 γ_0 和 μ 的一阶体积修正量。

3.3 有限元模型

利用 LS-DYNA 仿真颗粒的冲击过程，ANSYS 前处

理器进行建模。微粒与靶材采用实体四面体单元，中心碰撞区域的网格进行加密，减少单元删除对计算结果造成的影响，使计算更加的精确，实体的网格划分如图 2 所示，一共有 48 000 个有限元单元，其中 44 000 个为靶材单元。实体模型采用对称半模型进行分析，靶材尺寸为 $200\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ ，对称面设置 Y 方向的移动约束，四周设置非反射边界条件，底面设置 Z 方向的移动约束。颗粒直径为 $100\ \mu\text{m}$ ，设置 Y 方向的移动约束， X 、 Z 方向的旋转约束。

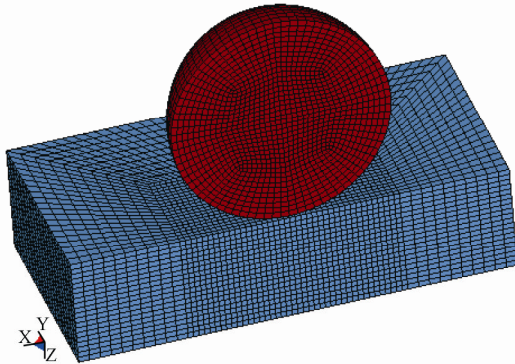


图 2 有限单元的网格
Fig.2 Finite element mesh

靶材材料为 Ti-6Al-4V，材料参数及 Johnson-Cook 模型参数如表 1 所示，冲击颗粒为石榴石，材料参数如表 2 所示，为减少计算时间，采用刚体模型。

表 1 Ti-6Al-4V 材料参数^[17]

Table 1 Material parameters of Ti-6Al-4V

材料属性	符号	Ti-6Al-4V
密度	$\rho(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	4428
弹性模量	$E(\text{GPa})$	110
泊松比	ν	0.31
J-C 屈服强度	$A(\text{Mpa})$	862
J-C 硬度系数	$B(\text{Mpa})$	331
J-C 应变硬化指数	n	0.34
J-C 应变率指数	c	0.012
J-C 软化指数	m	0.80
融化温度	$T_m(\text{K})$	1878
室温	$T_R(\text{K})$	300
比热	$C_p(\text{J/kgK})$	580
J-C 破坏系数	d_1	-0.09
J-C 破坏系数	d_2	0.27
J-C 破坏系数	d_3	0.48
J-C 破坏系数	d_4	0.014
J-C 破坏系数	d_5	3.87
弹性体积波动速度	$C(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	5.13
V_s - V_p 曲线斜率	S	1.028
Gruneisen 系数	γ_0	1.23

表 2 石榴石参数

Table 2 Material parameters of gamet

密度 ρ	弹性模量 $E(\text{GPa})$	泊松比 ν
4 000	248	0.27

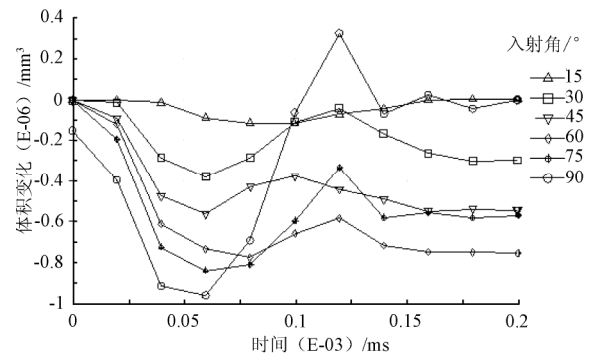
在建模的过程中，由于颗粒的运动速度非常大（高于 $100\ \text{m/s}$ ），模型的尺寸非常小，颗粒与靶材的接触时间非常短（小于 $1.0\ \mu\text{s}$ ），所以计算的稳定性是一个非常重要的问题。在计算过程中，计算的时间间隔至关重要，它主要取决于弹性模量 E ，材料密度 ρ ，有限单元尺寸，泊松比 ν 和应变率。也就是说，计算时间主要取决于有限单元的尺寸及质量。单位系统的选择必须满足计算时间间隔远小于颗粒与靶材的碰撞时间，只有这样仿真计算才会正常的运行，本文采用的单位系统为 $g\text{-mm}\text{-ms}$ ，分别为质量、长度和时间的单位。

接触算法采用 ESTS 侵蚀接触算法，当靶材在接触时发生材料失效，接触仍可在剩余的单元进行。

4 仿真结果分析

Bitter^[18]提出变形磨损理论，将磨损分为变形磨损和切削磨损，磨损与粒子冲击靶材的变形有关，粒子冲击平面靶的冲击应力 (σ) 小于靶材屈服应力 (σ_s) 时，靶材只发生弹性变形，当 $\sigma > \sigma_s$ 时，形成磨损，靶材产生弹性和塑性 2 种变形。

图 3 为不同入射角材料的体积变化随时间的变化，在此模型中只考虑单颗粒子的撞击，粒子的初始速度为 $155\ \text{m/s}$ 。前 $0.06\ \text{ms}$ 是粒子料表面，弹性变形的部分逐渐恢复，体积变大，但是磨损部分的材料会随着粒子离开，从图中可看出这发生在 $0.12\ \text{ms}$ 时，体积突然变小。 15° 和 90° 入射角，最后的体积没有变小，是由于材料没有产生磨损。其余的角度产生的磨损包含了塑性变形及微切削。



注：粒子的初始速度为 $155\ \text{m/s}$

图 3 不同入射角时材料体积随时间的变化

Fig.3 Variation of volume material with different injection angle

粒子入射轨迹与材料表面的夹角，被称为入射角。Bitter^[19]给出脆性材料的磨损率 W_d ($\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) 表达式

$$W_d = \begin{cases} \frac{M[v \sin \alpha - v_{el}]^2}{2\varepsilon_b}, & v \sin \alpha > v_{el} \\ 0, & v \sin \alpha < v_{el} \end{cases} \quad (9)$$

式中， M 为颗粒质量， kg ； v 为冲击速度， m/s ； α 为入射角度， $^\circ$ ； ε_b 为变形磨损因子； v_{el} 是临界速度， m/s 即使材料产生弹性变形极限的速度，可通过赫兹接触理论计算。也可通过冲击速度 v 与回弹速度 v_2 (m/s) 之间

的关系来计算

$$v_2 = \sqrt{2vv_{el} - v_{el}^2} \quad (10)$$

通过式 (9) 可看出对于脆性材料最大磨损率出现在 90° 入射角处。参考文献[15]中 Finnie 理论表明对于塑性材料粒子的倾斜入射会对材料表面造成更大的磨损。为比较倾斜入射和垂直入射对塑性材料造成的磨损，分别选取 45° 和 90° 入射角进行比较，如图 4 所示。a 部分的塑性应变明显比较小，但是已经产生了材料的去除，去除掉的部分也就是塑性应变最大的部分；b 部分撞击后凹坑比 a 部分要深很多，唇纹处留有很大的塑性应变，但是还没有造成材料的破坏。

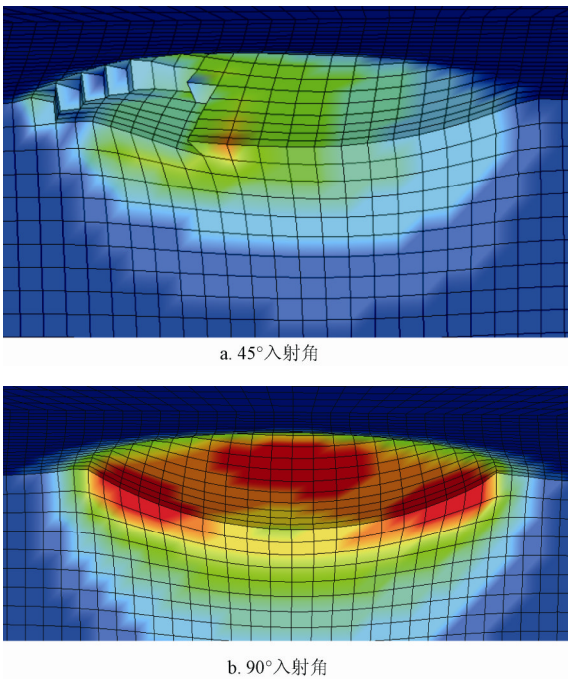
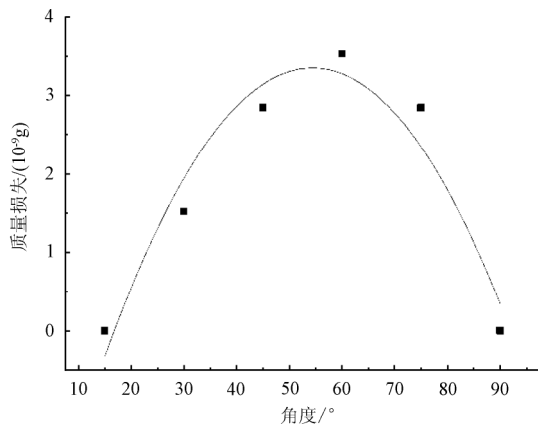


图 4 材料的破坏和塑性应变
Fig.4 Material destruction and its plastic strain

为进一步研究入射角对材料磨损的影响，绘制材料质量损失随粒子入射角的变化曲线，如图 5 所示。

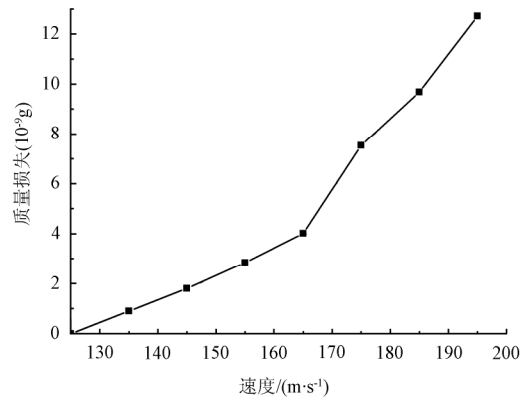


注：粒子的初始速度为 155m/s。

图 5 不同入射角造成的质量损失
Fig.5 Quality loss with different injection angle

可看出变化曲线是抛物线，入射角太低或太高都不会造成质量的损失，入射角为 50°~60° 时，质量的损失达到最大。其变化趋势与文献[16]中的 Hashish Model 的结果非常接近。结算结果的偏移，是由于所选用的微粒模型以球形代替，忽略了不规则形状在低角度冲击情况下可能存在的微切削。

对于材料的冲蚀，粒子速度是另一个重要的影响因素，图 6 为不同速度材料的质量损失，选择水平入射与垂直入射的中间值即 45° 入射角。从图中可知，当速度小于 125 m/s 时不会造成材料破坏，且在 125~165 m/s 的最初破坏阶段材料的破坏较小，之后随着速度的增加破坏迅速地增加。



注：入射角度为 45°

图 6 不同速度的质量损失
Fig.6 Quality loss with different velocity

一般用磨损率来描述颗粒对靶材的材料去除特性，

$$\text{磨损率 (mg/g)} = \frac{\text{靶材质量损失}}{\text{粒子质量}} \times 100\%$$

当冲击速度为 120 m/s，颗粒直径为 100 μm，对同一位置连续 6 次冲击，这样可观察材料的质量损失从无到慢慢增加的过程。材料的破坏及塑性应变如图 7 所示。

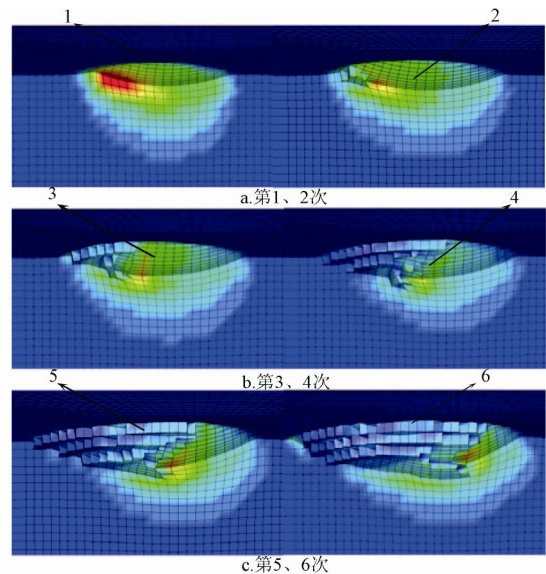
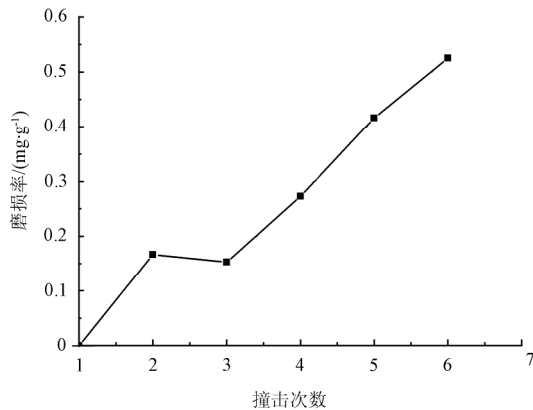


图 7 磨粒 6 次冲击材料的破坏
Fig.7 Material destruction with 6 times impact of particles

低速的初次撞击表面的材料不一定立即发生冲蚀, 它会使表面产生加工硬化, 在后来粒子的冲击下, 材料也会逐渐地被冲蚀掉。而逐渐被冲蚀的材料的是塑性应变已经比较大区域。

图 8 为磨损率随颗粒撞击次数的变化, 随着撞击次数的增加材料的磨损率也在逐渐增加。

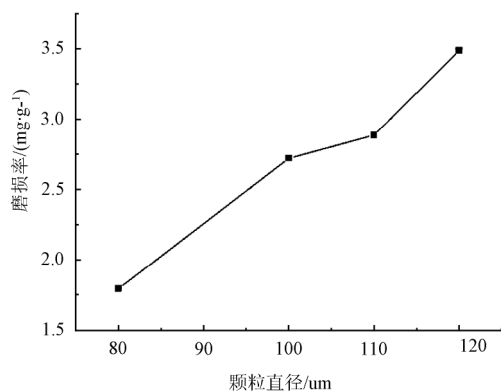


注: 粒子初始速度为 120m/s, 入射角度为 45°

图 8 磨损率随撞击次数的变化

Fig.8 Variation of wear rate with times of particle impact

Tilly^[20]通过试验测量发现, 当颗粒直径小于 200 μm 时, 磨损率随着颗粒直径的增加而增加, 但是当颗粒直径大于 200 μm 后, 磨损率基本趋于常数。Yerramreddy^[21]在他的试验研究中也发现了这样的规律, 当颗粒直径较大时, 由于粒子重量、动能和表面积的增加, 导致磨损率趋于稳定。图 9 为磨损率随颗粒直径的变化规律, 颗粒直径小于 120 μm , 冲击速度为 155 m/s。



注: 粒子初始速度为 155m/s, 入射角度为 45°

图 9 磨损率随颗粒直径的变化

Fig.9 Variation of wear rate with different diameter of particles

5 结论

采用 Johnson-Cook 材料模型、Gruneisen 状态方程, ESTS 侵蚀接触算法, 利用 LS-DYNA 建模及求解, 对仿真结果进行分析, 可得到以下结论:

1) 冲击应力大于材料的屈服应力时将产生磨损, 磨损包含了变形磨损和切削磨损。

2) 磨粒倾斜冲击壁面时形成的磨损量较大, 入射角太小或太大都不容易形成微切削, 计算结果接近 Hashish 模型的结果。当入射角相同时, 磨损量随着撞击速度的增加而增加。

3) 磨损率用来描述材料的去除特性, 它随着撞击次数的增加而增加, 当颗粒直径小于 200 μm 时, 磨损率随着颗粒直径的增加而增加。

由于网格粗细, 材料参数等问题的存在使计算结果有一定的偏差, 总体上来说 LS-DYNA 的仿真结果可以提供一定的参考价值。但是需要对脆性材料及弹性颗粒做进一步的研究。

[参 考 文 献]

- [1] Rhoades L J. Abrasive Flow Machining: a Case Study[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1991, 28(2): 107-116.
- [2] 计时鸣, 池永为, 谭大鹏, 等. 多种约束流道环境下地软性磨粒流流场特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 71-77. Ji Shiming, Chi Yongwei, Tan Dapeng, et al. Flow field characteristics of soft abrasive flow in multiform restraint flow passages[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 71-77. (in Chinese with English abstract)
- [3] 武利生, 李元宗. 磨料流加工研究进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2005, 145(1): 69-74. Wu Lisheng, Li Yuanzong. Progress of abrasive flow machining[J]. Diamond&Abrasive Engineering, 2005, 145(1): 69-74. (in Chinese with English abstract)
- [4] 方慧, 郭培基, 余景池, 等. 液体喷射抛光材料去除机理的研究[J]. 光学技术, 2004, 30(2): 15-17. Fang Hui, Guo Peiji, Yu Jingchi, et al. Research on material removal mechanism of fluid jet polishing[J]. Optical Technique, 2004, 30(2): 15-17. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张学成, 戴一帆, 李圣怡, 等. 磁射流抛光技术研究[J]. 机械设计与制造, 2007, 12(12): 114-116. Zhang Xuecheng, Dai Yifan, Li Shengyi, et al. Study on magnetorheological jet polishing technology[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007, 12(12): 114-116. (in Chinese with English abstract)
- [6] 孙希威, 张飞虎, 董申, 等. 磁流变抛光光学曲面的两级插补算法[J]. 光电工程, 2006, 33(2): 61-64. Sun Xiwei, Zhang Feihu, Dong Shen. Two-stage interpolated algorithm for magnetorheological finishing optical curved face[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(2): 61-64. (in Chinese with English abstract)
- [7] Kuriyagawa T, Saeki M, Syoji K, et al. Electrorheological fluid-assisted polishing for small three-dimensional parts[J]. Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 2002, 26(4): 370-380.
- [8] 吴晶华, 汤文成, 徐鸿翔, 等. 微磨粒冲蚀磨损的数值分析方法[J]. 润滑与密封, 2008, 33(9): 16-20.

- Wu Jinghua, Tang Wencheng, Xu Hongxiang, et al. Numerical Analysis of Abrasive Particles Erosive Wear[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(9): 16—20. (in Chinese with English abstract)
- [9] Adler W F. Water drop impact modeling[J]. Wear, 1995, 2(186): 341—351.
- [10] Shimizu K. FEM analysis of the dependency on impact angle during erosive wear[J]. Wear, 1999, 233—235: 157—159.
- [11] Chen Q, Li D Y. Computer simulation of solid particle erosion[J]. Wear, 2003, 254(3-4): 203—210.
- [12] Woytowicz P J, Richman R H. Modeling of damage from multiple impacts by spherical particles[J]. Wear, 1999, 233—235: 120—133.
- [13] ElTobgy M S, Elbestawi M A. Finite element modeling of erosive wear[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(11): 1337—1346.
- [14] Hutchings I M, Winter R E. Particle erosion of ductile metals: a mechanism of material removal[J]. Wear, 1974, 27(1): 121—128.
- [15] Finnie I. Erosion of surface by solid particles[J]. Wear, 1960, 3(2): 87—103.
- [16] Hashish M. Modified model for erosion[A]. Seventh International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact[C]. England: Cambridge, 1987, 461—480.
- [17] Wang Yufei, Yang Zhenguo. Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials[J]. wear, 2008, 265(5-6): 871—878.
- [18] Bitter J. A study of erosion phenomena, part I [J], Wear, 1963, 6(1): 5—21.
- [19] Bitter J. A study of erosion phenomena, part II [J], Wear, 1963, 6(3): 169—190.
- [20] Tilly G P. A two stage mechanism of ductile erosion[J]. Wear 1973, 23(1): 87—96.
- [21] Yerramareddy S, Bahadur S. Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties on the erosion of Ti-6Al-4V[J]. Wear, 1991, 142(2): 253—263.

Finite element analysis on single-particle impact in abrasive flow machining

Ji Shiming, Zhang Ding, Tan Dapeng*

(Key Laboratory of E&M, Zhejiang University of Technology, Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Several surface processing methods based on the abrasive flow were developed, taking advantage of wall effect between abrasives and processing surface to form the micro cutting, the surface machining was realized. A feasible finite element model was developed adopting ANSYS for the former processor. The abrasive flow was mainly used to process ductile material, such as metal and alloy. Take typical material of Ti-6Al-4V as target, Johnson-Cook elastic-plastic material model was established. Material failure process could be observed. The calculation results accord with Hashish model, the micro cutting was more obvious when abrasive particle impacting wall with certain injection angle. Wear increases with the impact speed increasing, and wear rate increases with impact numbers and particle diameter(<200 μm) increasing.

Key word: abrasive, wear of material, finite element method, ductile material, machining, johnson-cook