

BTA 深孔钻削切屑变形与刀齿切削力分布规律仿真

师毓华 郑建明 侯晓莉 杨 罗 肖继明

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院,西安 710048)

文 摘 采用 ABAQUS 有限元分析软件,建立了错齿 BTA 钻头钻削环状工件单元切削仿真模型,以 45# 钢为工件材料,对错齿 BTA 钻头各刀齿切削不同直径的环状工件进行了模拟仿真,分析了钻削过程中错齿 BTA 钻头各个刀齿切屑的形成过程与变形特点,研究了环状单元切削力三分量随工件半径的受力分布规律。结果表明,错齿 BTA 钻头各刀齿切削力分量呈现出随半径增大而增大的非均匀分布规律,并且切削速度和进给量对切削力分布规律几乎没有影响。

关键词 错齿 BTA 钻头,切屑变形,切削力分布,有限元仿真

中图分类号: TG506

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.05.008

Simulation on Chip Deformation and Cutting Force Distribution Laws of Cutting Tooth for Staggered Teeth BTA Drill

SHI Yuhua ZHENG Jianming HOU Xiaoli YANG Luo XIAO Jiming

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract This paper adopts the FEM simulation software of ABAQUS to establish the drilling simulation models of annular workpiece unit with staggered teeth BTA drill. Taking 45-steel as the workpiece material, cutting the different diameter annular workpiece with each cutting tooth of staggered teeth BTA drill has been simulated based on the model. The chip formation process and deformation characteristics of each cutting tooth of staggered teeth BTA drill are analyzed. The distribution laws of the three components of cutting force with the radius of annular workpiece unit are studied. The results show that the cutting force components of each cutting tooth of staggered teeth BTA drill presents the non-uniform distribution law which is increasing with the radius increases. Besides, the cutting speed and feed rate have negligible impact on the cutting force distribution.

Key words Staggered teeth BTA drill, Chip deformation, Cutting force distribution, FEM simulation

0 引言

BTA 深孔钻削因其加工效率高、产品质量好以及加工性能稳定而成为目前广泛采用的一种深孔加工技术^[1]。BTA 深孔钻削采用内排屑自导向加工原理, BTA 钻头刀齿为非对称布置,因此,其刀齿受力及分布状态对钻头稳定性与自导性具有十分重要的影响^[2]。目前,国内外研究 BTA 深孔钻削理论与 BTA 钻头设计中,建立钻削力力学模型时,通常将刀齿受力状态简化为:(1)各力都分布在一个平面内;(2)刀齿受力沿半径方向均匀分布;(3)将钻削力分量和导向块上的摩擦力、正压力等均由分布力简化为集中力^[2-3]。然而,由于 BTA 钻头几何形状的特殊性和加工过程的复杂性使得其受力状态十分复杂,这种简化与刀齿实际受力

状态相比存在较大误差,从而给 BTA 钻头的最优化设计带来困难。Biermann^[4]在研究 BTA 钻头刀体结构优化时,对 BTA 钻头各刀齿受力分布随切削半径的变化规律进行了测试,结果表明,刀齿钻削力呈非均匀分布。国内关于 BTA 深孔钻削过程钻头刀齿受力分布的研究较少,王玲君等人^[3]应用 ANSYS 分析了深孔钻头内部应力应变的分布规律,分析得出三个钻齿所受应力较大;李建等人^[5]在利用有限元对 BTA 深孔钻削进行了仿真研究。BTA 深孔钻削的加工机理及钻头设计理论尚不完善。本文采用 ABAQUS 有限元分析软件,建立错齿 BTA 深孔钻削有限元仿真模型,通过数值模拟的方式研究 BTA 钻头各个刀齿切屑的形成过程及钻削力沿半径方向的分布规律,为 BTA 钻头的设

收稿日期:2014-07-16

基金项目:国家科技重大专项(2013ZX04009011);陕西省 13115 工程重点项目(2009ZDKG-25)

作者简介:师毓华,1987 年出生,硕士,研究方向为制造过程建模仿真与状态监测。E-mail:359887953@qq.com

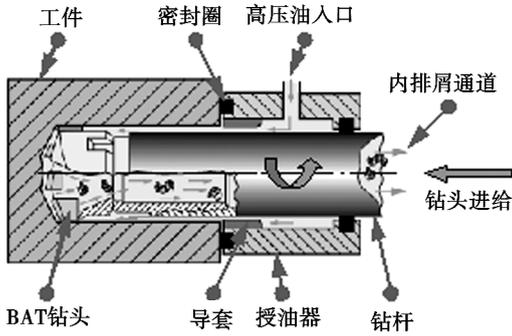
设计与优化提供参考。

1 BTA 深孔钻削原理及仿真

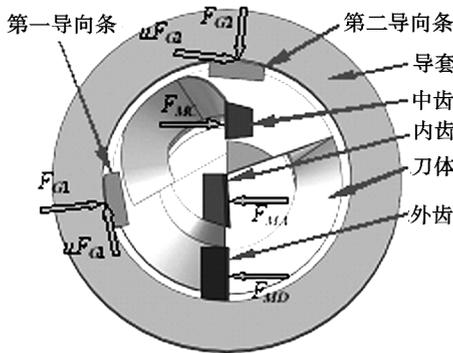
1.1 BTA 深孔钻削原理

BTA 深孔钻削工作原理见图 1(a)。BTA 深孔加工系统采用内排屑加工方式,钻头安装在中空 的钻杆上,钻头相对工件作高速旋转与进给的运动,高压切 削油通过授油器以及工件孔壁与钻杆外表面之间的 空隙进入切削区,完成钻头的冷却、润滑,并将钻削过 程产生的切屑经钻头排屑通道与钻杆内孔排出,从而 实现深孔的高效连续加工。

BTA 深孔钻削采用自导向加工方式,错齿 BTA 钻头的典型结构与工作原理见图 1(b)。



(a) BTA 深孔加工系统工作原理



(b) BTA 钻头结构与工作原理

图 1 BTA 深孔加工系统与错齿 BTA 钻头工作原理

Fig. 1 BTA deep-hole drilling system and staggered teeth BTA drill working principle

刀头通常设计成三个刀齿、两个导向条、两个排屑通道的错齿结构形式,三个刀齿呈非对称分布,两个导向条完成钻削力的平衡与钻头的自导向功能,BTA 钻头刀齿和导向条在空间的分布形式对钻削过程稳定性与钻头的工作性能具有重要影响。目前进行 BTA 钻头设计主要采用图 1(b)所示的受力模型,其中 3 个刀齿的受力及其分布规律直接决定钻头的设计结果,因此,建立正确刀齿受力模型是实现 BTA 钻头最优设计的关键。

1.2 错齿 BTA 钻头刀齿受力仿真方案

在 BTA 深孔钻削过程中,钻头受到轴向力和扭矩,通常无法直接获得刀齿切削力及其分布。为了获得各个刀齿切削力三向分力及其沿半径的分布规律,

将钻削直径为 20 mm 的孔演变成加工一个等径圆柱实体,并将其分解成 10 个壁厚为 1 mm 的环状工件单元(图 2),分别标记为 a、b、c、d、e、f、g、h、i、j,然后运用 ABAQUS 有限元仿真软件,对每个环形单元的钻削进行数值模拟。

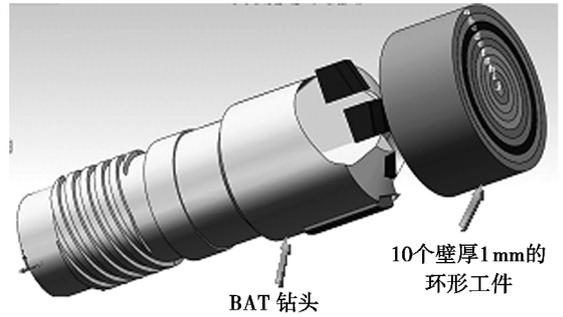


图 2 仿真研究方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of simulation research program

2 BTA 深孔钻削有限元仿真模型

2.1 BTA 深孔钻削几何模型与网格划分

在建立环状单元钻削模型时,将直径为 $\Phi 20$ mm 的错齿 BTA 钻头简化为如图 3 所示的三个刀齿,并将其设置为刚体,其中外齿主偏角为 18° 、中齿和内齿主偏角为 15° ,前角均为 0° 。工件几何形状与尺寸设置为 1 mm 宽、0.25 mm 厚的 30° 扇形,工件材料为 45# 钢。钻头和工件几何模型与装配关系见图 3。

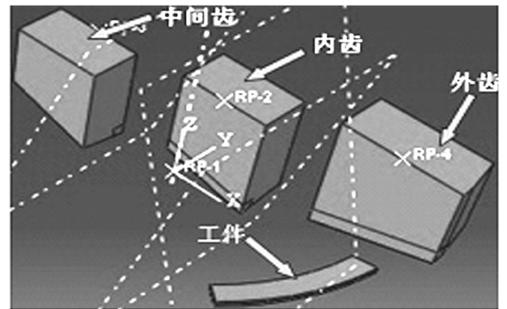


图 3 工件与 BTA 钻头刀齿几何模型

Fig. 3 Geometry model of workpiece and tooth of BTA drill

本文的钻削模型刀具设置为刚体,工件采用六面体网格。为了保证模拟精度的同时尽可能地减少计算量,将工件分成两部分进行网格划分,刀具与工件接触变形较大的区域网格划分较密,而工件变形较小的区域网格划分较疏一些(图 4)。

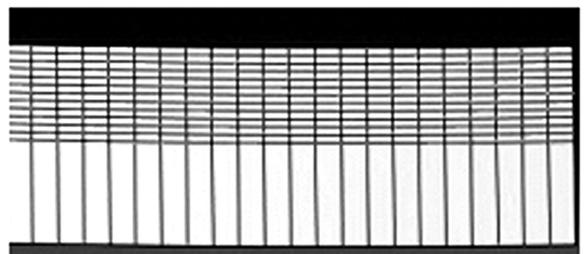


图 4 工件网格划分

Fig. 4 Workpiece meshing

2.2 材料本构模型

在切削过程有限元仿真模型中,工件材料本构模型是材料失效判定的依据。目前最常用的是 Johnson-Cook 模型,是一种适用于大应变、高应变速率、高温变形的材料本构模型^[6]。本文选择 Johnson-Cook 模型作为工件材料本构模型,其表达式为^[7-8]:

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

式中, σ 为真实应力(遵循 Von Mises 屈服准则), A 为材料在特定温度与应变率下的屈服应力, B 为应变硬化系数, ε 为等效塑性应变, n 为应变硬化指数, C 为应变率敏感系数, $\dot{\varepsilon}$ 为无量纲应变率, T^* 为同向温度, $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$, T_r 为参考热力学温度, T_m 为熔点热力学温度, m 为温度敏感系数。假设材料各向同性,式中 A, B, C, n 和 m 均可由实验得出。45# 钢的 Johnson-Cook 模型参数见表 1^[9]。

表 1 45# 钢材的 Johnson-Cook 模型参数^[9]

Tab. 1 Parameters of Johnson-Cook model for 45-steel

A	B	n	m	T_m/K	T_r/K
506	320	0.28	1.06	1723	298

2.3 切屑分离准则

金属切削仿真过程中,为了使切屑从工件上分离的过程更接近于实际状况,必须选择合适的分离准则。目前常用的分离准则主要有几何分离准则和物理分离准则。本文使用的失效准则是 Johnson-Cook 剪切失效法则,属于物理分离准则,通过判断单元的塑性应变值的大小来判断材料是否失效。该分离准则适用于金属大变形的仿真计算。Johnson-Cook 剪切失效模型建立的基础是单元积分点上的等效塑性应变值,当材料失效参数 D 超过 1 时,判定失效。当所有积分点材料都发生失效,则该单元就将从网格中被删除,实现切屑分离。失效参数 D 定义为^[6-8]:

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (2)$$

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*)(1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon})(1 + D_5 T^*) \quad (3)$$

式中, $\Delta\varepsilon$ 为失效塑性应变增量, ε_f 为失效应变, σ^* 为平均应力, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 是与材料的失效常数,可通过实验测得。

ε_f 是关于应变率、平均应力和 Johnson-Cook 硬化法则中定义的 T^* 的函数。表 2 为 45# 钢的 Johnson-Cook 剪切失效准则参数^[9]。

表 2 45# 钢的 Johnson-Cook 剪切失效参数^[9]

Tab. 2 Parameters of Johnson-Cook shear failure for 45 steel

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	T_m/K	T_r/K	reference strain rate
0.1	0.76	1.57	0.05	-0.84	1723	298	1

2.4 工件和切屑与刀具的接触关系

在刀具与工件作用过程中,有些单元格材料发生失效,从而脱离工件形成切屑并与前刀面产生接触,因此需要给刀具的前刀面与工件和切屑建立一个接触关系。在 ABAQUS 软件中,接触关系主要有通用接触、表面与表面接触、自接触等。本文选择通用接触和表面与表面接触,其中刀具和工件整体用通用接触定义,切屑节点表面与刀具前刀面用表面与表面接触定义。

在设定切屑和前刀面接触属性时,需要给二者设定一个摩擦因数,由于切屑层受到前刀面的挤压和摩擦,产生很大的应变和应变率,导致刀具与切屑之间的摩擦不再是单纯的滑动摩擦,切屑与前刀面之间会发生部分黏着现象,形成切削内部的剪切分离,因此切屑与前刀面之间通常为内摩擦。在模拟金属切削时,常采用修正的库仑摩擦定律:

$$\tau_c = \min(\mu\sigma_n, \tau_s) \quad (4)$$

式中, μ 为摩擦因数; σ_n 为接触面上的压力; τ_s 为软材料的临界剪切屈服强度。

由于加工过程中测量前刀面的应力特别困难,所以用实验测得的切削力和进给力计算平均摩擦因数的方法来获得切削加工时滑动区域的 μ , 为 0.3^[10]。

2.5 施加边界条件

为了便于通过仿真获得刀齿三向分力,在设置钻头与工件之间的运动关系时,对钻头施加全约束使之固定,工件设置为沿 z 轴旋转。由于建模过程中钻头设置为刚体单元,因此钻头的单元不参与实际仿真运算,即没有数据输出。为此,在钻头上设置一个参考点,将钻头上所有单元的自由度与该参考点相关联,并将实际的约束添加到该参考点上,从而输出结果可通过该节点获得。另外,由于 ABAQUS 中运动必须施加到某一点上,因此设置一个参考点与工件底面耦合,并将工件的运动添加到该节点。

3 BTA 钻削仿真结果与分析

3.1 切屑形成过程与变形规律

图 5 为运用上述仿真模型,在切削层厚度 0.1 mm、转速 800 r/min 条件下,对环状单元工件钻削过程进行仿真所获得切屑形成过程及其变形情况。

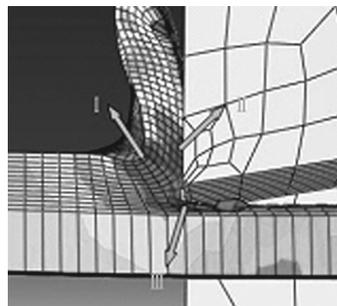


图 5 切屑形成过程仿真结果

Fig. 5 Simulation results of chips forming process

可以看出,仿真所获得的结果与实际加工过程所

获得切屑形态基本吻合,整个切削过程中,刀具与工件的接触与变形状态表现为三个典型的变形区,在第一变形区工件材料经过剧烈剪切滑移后从工件机体分离形成切屑;切屑底层与刀具前刀面接触的区域在正压力与摩擦力作用下再次发生塑性变形,形成第二

变形区,即前刀面挤压摩擦变形区;而在第三变形区,即在切屑与工件机体材料分离处,刀具后刀面与已加工表面之间的挤压摩擦变形表现不是很明显,与实际切削时存在一定差异。钻削过程中,从钻头外圆到中心,切削条件存在很大差异(图6)。

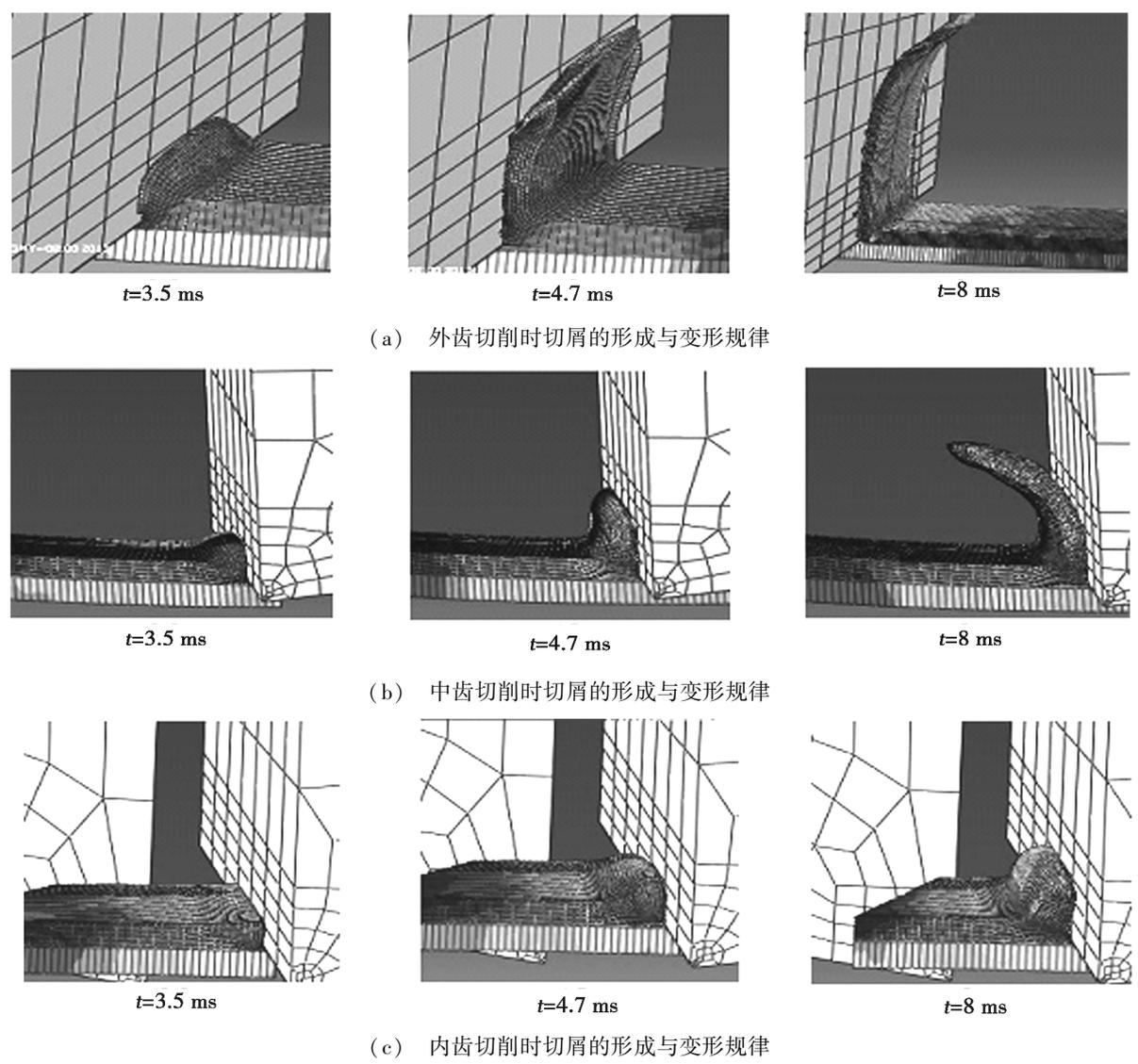


图6 BTA钻头不同刀齿切削环形试件切屑形成与变形规律

Fig.6 Chip formation process and deformation laws of different cutting tooth with staggered teeth BTA drill

从图6(a)外齿切削仿真结果可以看出,随着切削进行,工件材料与刀刃接触处应力不断增大,在第3.5 ms时开始发生塑性屈服,当屈服应力达到了切屑分离准则时,节点分离,开始形成切屑;随着切削继续,刀具前刀面与切屑接触面积不断增大,在第4.7 ms时切屑与前刀面分离;切屑开始发生弯曲,在8 ms时整个切屑形成过程基本完成。

刷,切屑形成困难,挤压变形愈加严重。

图6表明,在错齿BTA钻削过程中,由于各刀齿切削条件差异很大,导致切屑形态和变形程度也存在很大差异,因此在错齿BTA钻头的设计中,需区别对待各个刀齿的角度和材料性能,才能使BTA钻头各刀齿工作性能实现最优匹配。

3.2 错齿BTA钻头刀齿切削力沿半径分布规律

图7、图8为不同钻削条件下仿真所获得的错齿BTA钻头刀齿三向分力随半径的变化规律。可看出,不同条件下刀齿单位切削力随半径的变化趋势基本相同,均表现出随钻头半径增大而增大。这是因为不同工件半径的切削速度和曲率半径差异较大,而造成单位切削力呈非均匀分布。另外还可看出,工件转

从图6可以看出,随着工件半径的减小,切削速度与工件曲率半径逐渐减小,刀齿切削条件发生显著变化。外齿切削速度与工件曲率半径最大,刀齿切削条件较好,切屑形成容易,变形相对较小,切屑与刀具前刀面接触面积最大。随着切削速度与工件曲率半径的逐渐减小,刀齿切削条件逐渐变差,切屑变形加

速对单位切削力影响较小,随工件转速的增大,刀具三个方向的单位切削力呈微弱的上升趋势;切削层厚度对单位切削力影响较大,随着进给量的增大,刀具三个方向的单位切削力明显增大。总之,通过上述仿

真研究可以得出,在 BTA 钻削过程中,切削用量只对单位切削力大小产生影响,而不会对切削力随半径的分布规律产生影响。

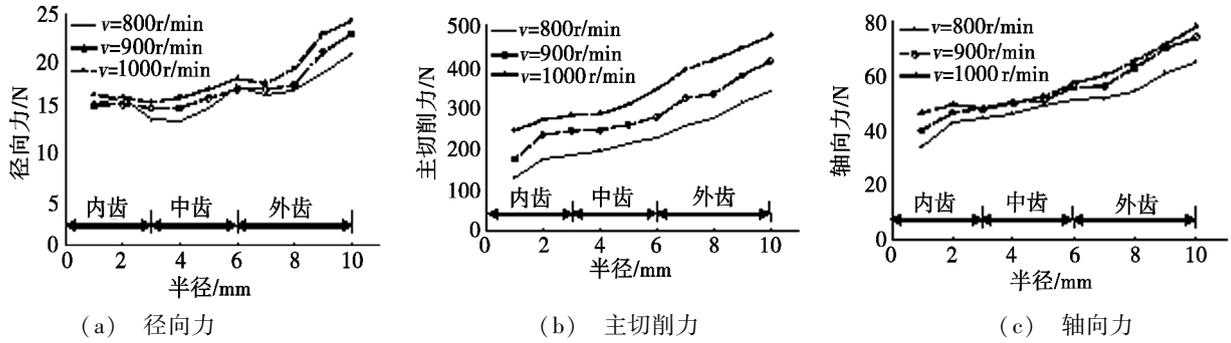


图7 不同转速三向分力沿环状工件单元半径分布规律

Fig. 7 Distribution laws of the three components of cutting force with annular workpiece unit radius in different speed

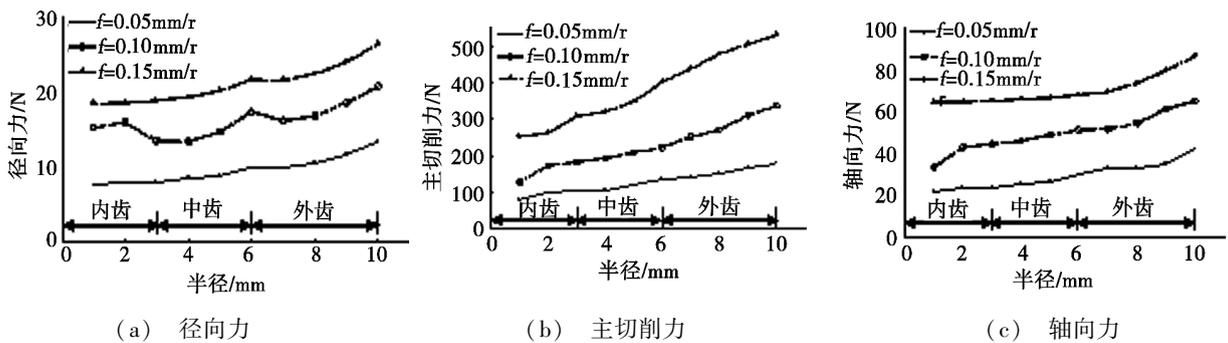


图8 不同进给量三向分力沿环状工件单元半径分布规律

Fig. 8 Distribution laws of the three components of cutting force with annular workpiece unit radius in different feed

4 结论

(1) 利用有限元软件 ABAQUS 建立了环状单元工件 BTA 钻削仿真模型,实现了错齿 BTA 钻头各个刀具切削过程动态仿真,获得了三个刀具切削过程切屑形成过程与变形规律,结果表明随着切削速度与工件曲率半径的逐渐减小,刀具切削条件逐渐变差,切屑变形加剧,切屑形成困难,挤压变形愈加严重。

(2) BTA 钻头各刀具单位切削力三分量随工件半径呈非均匀分布规律,均表现出随工件半径增大而增大的变化趋势,且切削用量只对单位切削力大小产生影响,不会对切削力随半径的分布规律产生影响。

(3) 切削速度对单位切削力影响相对较小,随工件转速的增大,刀具三向单位切削力呈微弱的上升趋势;切削层厚度对单位切削力影响较大,随着进给量的增大,刀具三向单位切削力明显增大。

参考文献

[1] Chin Jihhua, Hsieh Chiti, Lee Liwei. The shaft behavior of BTA deep hole drill tool[J]. International Journal of Mechanical Science, 1996, 38(5): 461-482

[2] Dirk Biermann, Alexei Sacharow, Klaus Wohlgemuth. Simulation of the BTA deep-hole drilling process[J]. Prod. Eng. Res. Devel., 2009(3): 339-346

[3] 王玲君,李桂华. 深孔钻头的受力及其数值模拟分析

[J]. 工具技术, 2011, 45(7): 29-31

[4] Biermann D, Kersting M, Kessler N. Process adapted structure optimization of deep hole drilling tools[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009(58): 89-92

[5] 李建,王彪,等. 深孔钻削的有限元仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2012(11): 19-21

[6] 蔡玉俊,段春争,李园园,等. 基于 ABAQUS 的高速切削切屑形成过程的有限元模拟[J]. 机械强度, 2009, 31(4): 693-696

[7] Dipti Samantary, Sumantra Mandal, Bhaduri A K A. Comparative study on johnson cook modified zerilli-armstrong and arrhenius-type constitutive models to predict elevated temperature flow behavior in modified 9Cr-1Mo steel[J]. Computational Materials Science, 2009, 47(2): 568-576

[8] 马德军. 材料弹性模量的仪器化压入测试方法[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(12): 2336-2343

[9] 陈刚,陈小伟,陈忠富,等. A3 钢钝头弹撞击 45 钢板破坏模式的数值分析[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(5): 390-397

[10] Liu C R, Guo Y B. Finite element analysis of the effect of sequential cuts and tool-chip friction on residual stresses in a machined layer[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42(6): 1069-1086

(编辑 吴坚)