

基于改进 JH-2 模型的氟金云母本构关系 开发与模拟

马廉洁¹, 于学荞², 韩智斌², 潘 帅²

(1. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

2. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 基于 JH-2 理论模型, 建立了针对脆性材料有限元仿真改进的 JH-2 离散化模型, 以此为本构模型对 DEFORM 软件的用户端模块进行了二次开发并对工程陶瓷的切削力进行了仿真分析. 通过氟金云母车削试验, 对比了 JH-2 离散化模型和 J-C 理想化模型的仿真效果, 分析了切削速度、进给速度和切削深度三种工艺参数对切削力仿真的影响并验证了 JH-2 模型的准确性和可靠性. 试验结果表明, 切削力仿真值与试验值变化趋势相同且精度良好, 相比于 J-C 理想化模型, JH-2 离散化模型模拟的脆性材料加工形貌更符合实际情况. 因此, 在针对工程陶瓷的有限元研究中, 改进的 JH-2 离散化模型相对于 J-C 模型在理论分析和仿真预测上均具有显著优势.

关键词: JH-2 模型; 脆性材料; DEFORM 软件; 二次开发; 工艺参数

中图分类号: TH 161

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2024)06-0837-07

Development and Simulation of Constitutive Relationship of Fluorophlogopite Based on Improved JH-2 Model

MA Lian-jie¹, YU Xue-qiao², HAN Zhi-bin², PAN Shuai²

(1. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China;

2. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: MA Lian-jie, E-mail: bcmlj1025@163.com)

Abstract: Based on the JH-2 theoretical model, an improved JH-2 discrete model for the finite element simulation of brittle materials is established, which is used to redevelop the client module of DEFORM software as a constitutive model. And the cutting force of engineering ceramics is simulated and analyzed. Through the fluorophlogopite turning test, the simulation effects of the JH-2 discrete model and J-C idealized model are compared. The effects of three process parameters, namely cutting speed, feed speed and cutting depth, on the cutting force simulation are analyzed. And the accuracy and reliability of the JH-2 model are verified. The test results show that the variation trend of the simulation value of cutting force is the same as that of the test value, and the precision is good. Compared with the J-C idealized model, the machining morphology of brittle materials simulated by the JH-2 discrete model is more consistent with the actual situation. Therefore, in the finite element research of engineering ceramics, the improved JH-2 discrete model has significant advantages over the J-C model in theoretical analysis and simulation prediction.

Key words: JH-2 model; brittle material; DEFORM software; secondary development; process parameter

工程陶瓷具有耐高温、耐腐蚀、高强度等特性, 被广泛应用于航天材料和先进医疗制造领

域^[1]. 与金属不同, 作为典型的难加工硬脆材料, 工程陶瓷的加工难度与成本较高, 有限元仿真精

收稿日期: 2023-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975113); 河北省自然科学基金项目(E2018501078).

作者简介: 马廉洁(1970-), 男, 内蒙古赤峰人, 东北大学教授, 博士生导师.

度也因缺少理论模型而受限,因此充分了解工程陶瓷材料的本构关系和断裂机理有很大意义. DEFORM-3D 作为一款集成大量材料数据与本构关系的有限元仿真软件,在材料制造模拟方面处理功能强大且操作灵活^[2],对工程陶瓷材料加工机理研究有重大作用,虽针对硬脆材料的本构关系暂未收录,但支持用户自主开发.

目前关于工程陶瓷材料本构模型及 DEFORM 软件二次开发等方面,国内外学者已经开展了诸多研究. Johnson 等^[3-4]针对多种材料设计了扭转拉伸等力学试验,建立了用于描述材料损伤断裂的 Johnson-Cook 模型(J-C),后根据脆性材料断裂特性提出了改进的 Johnson-Holmquist II 模型(JH-2),补充了损伤劣化积累理论. Baranowski 等^[5]采用理论分析、实验和数值模拟相结合的方法,确定了岩石类硬脆材料的 JH-2 本构模型参数. Seshadri 等^[6]利用切削试验和有限元方法,结合 J-C 模型预测了铝合金的切削力. 文献[7-11]通过 J-C 本构模型修正、遗传算法优化及有限元模拟,研究了不同工艺参数对氟金云母陶瓷车削力的影响规律,从能量角度出发,基于脆性固体断裂力学,分析了陶瓷材料的微观断裂机理,验证了材料的去除方式为脆性断裂,且有两种断裂模式:大规模应力断裂和小规模应力断裂;并结合刀具-工件干涉原理和陶瓷材料车削实验,探究了刀具与工件车削过程中的干涉关系,建立了可加工陶瓷车削表面粗糙度理论模型. Liu 等^[12]从应力角度分析了裂纹扩展路径及裂纹发展的 3 个阶段,研究了裂纹系统的能量,提出了更适合脆性材料的脆性断裂能. Shibata 等^[13]通过单晶硅的金刚石车削实验,定性描述延脆转变临界条件的车削机理. Tamizharasan 等^[14]基于田口实验和仿真分析,评估了切削加工刀具几何形状对后刀面磨损、表面粗糙度和切削力性能的影响. Wu 等^[15]通过热压缩试验,借助 DEFORM-3D 软件进行本构方程和动态再结晶模型的二次开发,完成了碳钢材料的微观组织模拟.

陶瓷材料切削加工本构关系复杂,为改善陶瓷材料的加工效率和经济性,提高陶瓷材料的仿真精度具有实际意义. 本文通过 DEFORM 平台实现对改进的 JH-2 离散化模型的开发与仿真,并对比 J-C 理想化模型,获得了切削速度、进给速度和切削深度对不同本构关系下的氟金云母陶瓷切削力仿真数据的影响规律,研究 JH-2 模型和 J-C 模型在脆性材料切削仿真中的适用性,通

过车削试验验证仿真结果的可靠性和精度.

1 JH-2 本构模型的离散化改进

1.1 JH-2 理论模型

氟金云母陶瓷作为一种典型的脆性材料,适用的本构模型有很多,其中 JH-2 理论模型是专用于描述脆性材料断裂行为的应力-应变模型^[16-18],包含脆性材料的弹性变形过程、塑性软化过程和脆性断裂过程,可以从理论上详细描述脆性材料的去除规律. JH-2 理论模型包括强度模型(式(1))、劣化过程的损伤模型(式(2))和静水压力-体积应变状态方程(式(3)).

$$\left. \begin{aligned} \sigma^* &= \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*), \\ \sigma_i^* &= A(P^* + T^*)^N \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right), \\ \sigma_f^* &= B(P^*)^M \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中: σ^* 为材料当前标准化等效应力,无量纲数; σ_i^* 为材料初始状态下标准化完整等效应力,无量纲数; σ_f^* 为材料破碎后标准化断裂等效应力,无量纲数;材料实际 Mises 等效应力 σ 一般有: $\sigma = \sigma^* \cdot \sigma_{\text{HEL}}$, σ_{HEL} 为 Hugoniot 弹性极限应力,取值 1.20 GPa; D 为损伤因子 ($0 \leq D \leq 1$), 初始状态下 $D=0$; A, N, B, M, C 为材料常数,可通过材料断裂等实验获得,取值分别为 0.94, 0.62, 0.33, 0.8, 0.005; P^* 为标准化静水压力,无量纲数, $P^* = P/P_{\text{HEL}}$, P 为材料实际静水压力, P_{HEL} 为 Hugoniot 弹性极限静水压力,取值 1.46 GPa; T^* 为最大标准化净拉伸强度,无量纲数,取值 0.137; $\dot{\varepsilon}$ 为实际应变率; $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$, 为参考应变率.

$$\left. \begin{aligned} D &= \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f}, \\ \varepsilon_p^f &= D_1 (P^* + T^*)^{D_2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中: $\Delta \varepsilon_p$ 表示单位时间内材料的等效塑性应变增量; ε_p^f 为等效塑性断裂应变; D_1, D_2 为材料参数,取值 0.053 和 0.85.

$$\left. \begin{aligned} P &= K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3, \\ K_1 &= \frac{E}{3(1-2\nu)}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中: K_1 为初始体积模量,为 44.6 GPa; K_2, K_3 为体积应变系数,均为 0; μ 为体积应变; E 为弹性模量,取值 66.9 GPa; ν 为泊松比,取值 0.25.

式(1)描述了脆性材料逐渐软化至断裂的完整去除周期,分为未损伤阶段、劣化阶段和完全

断裂阶段,如图 1a 所示;式(2)提出的损伤因子揭示了材料软化源于应变在一个损伤周期内的累积效应,如图 1b 所示;式(3)将外在的静水压力引起应力变化转化为内部体应变累积应力,利用材料属性解释了载荷与应力变化的关系。

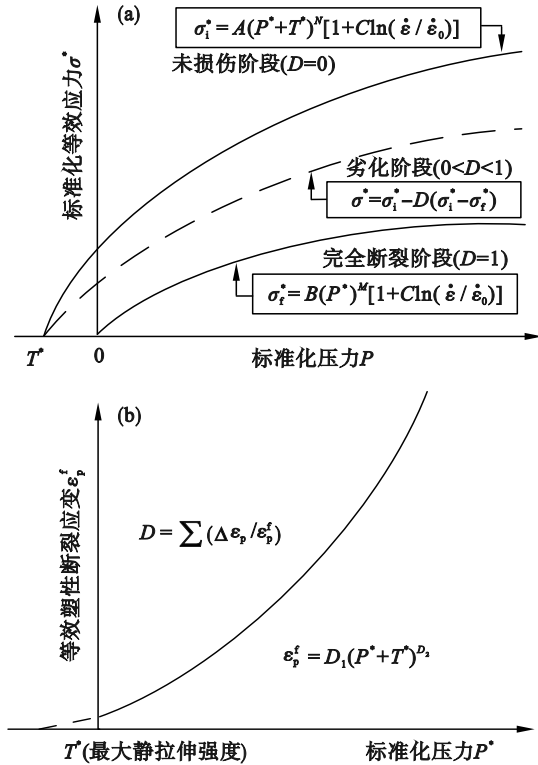


图 1 JH-2 模型具体说明

Fig. 1 Specific description of the JH-2 model
(a)—JH-2 强度模型; (b)—JH-2 损伤模型。

1.2 JH-2 模型的离散化改进

在有限元仿真中,标准化静水压力 P^* 是材料体积应变 μ 的高阶函数,往往无法给定合理的迭代初始条件和边界条件,需要将其转化为仿真适用的强度量。DEFORM-3D 中,线应变 ε 是必需的初始变量,需要在 JH-2 模型的开发中重新引入,因此考虑将 JH-2 理论模型(式(3))中的体积应变 μ 转化为线应变 ε ,实现对 JH-2 理论模型的离散化改进。

在切削过程中,取任一单元体(边长为 a),如图 2 所示,因其体积小,故应变不发生在棱上,取顶点 H 发生应变,在受外力作用后从 H 点移动到 H' 点。

线应变为

$$\varepsilon = \lim_{z \rightarrow 0} \frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta a}{a}. \quad (4)$$

应变 z 方向上任意截面满足长度为 a 的悬臂梁挠度曲线,其方程为

$$z(x) = \frac{\Delta a}{2a^3} x^2(3a+x). \quad (5)$$

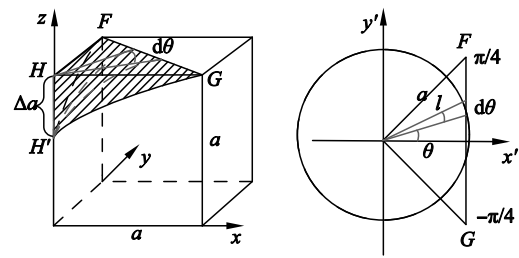


图 2 体积应变与线应变关系

Fig. 2 Relationship between volumetric strain and linear strain

为计算应变体积,取一体积微元 dV ,计算得

$$dV = \frac{d\theta}{2\pi} \int_0^l z(l) \cdot 2\pi r dr = \frac{\Delta a \cdot l^2}{10} d\theta. \quad (6)$$

其中, $l = \frac{\sqrt{2}a}{2\cos\theta}$, 为 θ 位置悬臂梁长度。

以悬臂梁长度为变量,对曲线方程沿 GF 方向积分可得体积应变:

$$\mu = \lim_{v \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{V} = \frac{\int_{-\pi/4}^{\pi/4} \frac{\Delta a}{10} l^2 d\theta}{a^3} = \frac{\Delta a}{10a}. \quad (7)$$

因此体积应变与任一极小单元体线应变关系为

$$\mu = \frac{\varepsilon}{10}. \quad (8)$$

在描述实际物体受外力发生应变时,往往用最大线应变表示,而实际外力应由平均应力计算,为得到仿真过程中受力区域的切削力,需用单元面积上的平均应变表示最大线应变.假设一表面受载荷后的凹坑截面边缘线为简支梁挠度曲线,简支梁边长为 b ,应变如图 3 所示,简支梁挠度-载荷分布如图 4 所示。

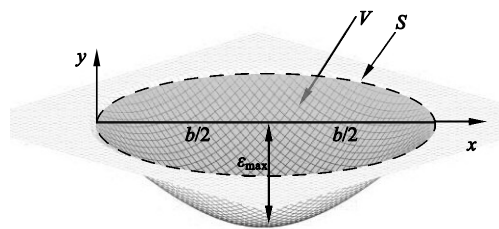


图 3 任一表面受载形变简图

Fig. 3 Deformation diagram of each surface under load

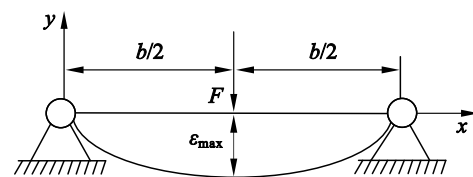


图 4 简支梁挠度-载荷分布示意图

Fig. 4 Diagram of deflection load distribution of the simply supported beam

图中: V 表示整个应变发生区域的体积; S 表示应变发生区域的面积.

挠曲线公式为

$$y = \frac{\varepsilon_{\max}}{b^3} (4x^3 - 3b^2x). \quad (9)$$

应变发生区域体积 V 和面积 S 可通过式(10)求得.

$$\left. \begin{aligned} V &= 2\pi \cdot \int_0^{\frac{b}{2}} y \left(\frac{b}{2} - x \right) dx = \frac{9}{80} \pi \varepsilon_{\max} b^2, \\ S &= \frac{\pi b^2}{4}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由曲线方程积分得最大线应变与平均应变关系为

$$\bar{\varepsilon} = \frac{V}{S} = \frac{9}{20} \varepsilon_{\max}. \quad (11)$$

将式(2), 式(3), 式(8), 式(11)代入式(1)得改进的 JH-2 离散化仿真模型为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_i - D(\sigma_i - \sigma_f) \cdot \sigma_{\text{HEL}}, 0 < D < 1; \\ \sigma_i &= A \left(\frac{9K_1 \varepsilon}{200P_{\text{HEL}}} + T^* \right)^N (1 + C \ln \dot{\varepsilon}) \sigma_{\text{HEL}}, D = 0; \\ \sigma_f &= B \left(\frac{9K_1 \varepsilon}{200P_{\text{HEL}}} \right)^M (1 + C \ln \dot{\varepsilon}) \cdot \sigma_{\text{HEL}}, D = 1. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

1.3 J-C 理想化模型

现阶段诸多学者将 JH-2 理论模型应用于脆性材料仿真, 为降低实验难度, 往往忽略 JH-2 模型中的劣化过程, 直接将完全断裂阶段视为脆性材料完整的去除阶段, 故可用 J-C 本构模型的极限状态模拟 JH-2 模型, 见式(13):

$$\sigma = (A' + B' \varepsilon^{N'}) (1 + C' \ln \dot{\varepsilon}) \left(1 - \left(\frac{t - t_{\text{room}}}{t_{\text{melt}} - t_{\text{room}}} \right)^{M'} \right). \quad (13)$$

其中: t 表示温度; t_{melt} 为材料熔点温度; t_{room} 为室温; $A'=0.001$, $B'=670$, $N'=0.475$, $C'=C$, $M'=1$ 均为材料常数.

J-C 模型作为塑性材料的本构模型, 进行极限处理后在脆性材料仿真中仍可保持较高的仿真精度. 由于陶瓷材料的硬脆性, 加工过程中材料弹性变形阶段极短, 并迅速发生塑性软化, 很快达到断裂状态, 因此断裂阶段可直接作为陶瓷材料去除的有效阶段. 在针对脆性材料的有限元仿真研究中, 由于 J-C 本构模型形式简单、理想化程度高, DEFORM-3D 中现已搭载了该模型, 不需要用户自行开发, 现阶段大多数学者往往直接使用该模型, 通过修改模型参数将其近似为脆性材料 JH-2 理论模型的完全断裂阶段^[10]. 如此理想化虽在数值上具有一定的可靠性, 但无法模拟脆性材料裂纹扩展导致材料软化的动态行为, 不足

以反映材料的完整变形特征. 而改进的 JH-2 离散化模型还原了脆性材料加工的详细过程, 相比于 J-C 理想化模型, 其在脆性材料仿真中具有显著优势.

2 基于 DEFORM 软件的二次开发与对照试验设计

2.1 基于 DEFORM 软件的二次开发

DEFORM 软件针对切削加工设有独立的仿真模块, 用于模拟材料成形过程的宏观变形行为和数值分析, 并提供用户程序, 可实现自定义模型的开发. 在前处理阶段写入自主开发的改进 JH-2 离散化模型, 以定义脆性材料属性和切屑分离准则, 开发流程如图 5 所示.

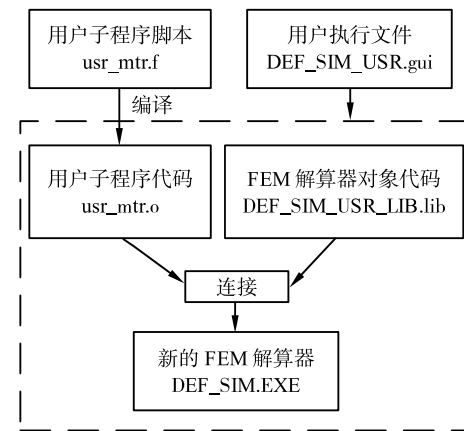


图 5 前处理二次开发流程

Fig. 5 Pre-processing secondary development process

用户程序开发步骤如下:

- 1) 借助 Fortran 语言启动 DEFORM 用户执行文件;
- 2) 在子程序脚本中编译源程序代码, 封装 JH-2 离散化模型, 搭建 FEM 引擎;
- 3) 生成新的 FEM 解算器文件代替源文件;
- 4) 在前处理中加载流动应力子系统, 完成 JH-2 离散化模型的二次开发.

基于 DEFORM 软件的二次开发, 进行氟金云母陶瓷车削过程仿真, 对比加工中不同本构模型对切削力变化的影响, 仿真试验条件如表 1 所示, 表中 v_c 为切削速度, v_f 为进给速度, a_p 为切削深度.

2.2 试验

设计氟金云母陶瓷车削加工试验验证仿真结果的可靠性. 采用 CA6140 车床进行干式切削加工, 工件材料为氟金云母陶瓷, 其主要成分为 $R_2O-MgO-Al_2O_3-SiO_2-F$ 体系, 棒料直径为 30 mm,

使用 YDC-III 87 型三向测力仪监测试验切削力,单因素试验条件如表 1 所示,试验中选用激光共聚焦显微镜观测材料切屑形貌特征.

表 1 有限元仿真试验条件
Table 1 Finite element simulation test conditions

组号	v_c	v_f	a_p
	$m \cdot s^{-1}$	$mm \cdot r^{-1}$	mm
1~13	0.63~1.26	0.08	0.1
14~24	0.94	0.05~0.15	0.1
25~35	0.94	0.08	0.05~0.15

3 工艺参数对切削力的影响

3.1 切削速度对切削力的影响

随着切削速度 v_c 的增加,切削力呈减小趋势,如图 6 所示, JH-2 离散化模型的预测结果与试验相近, J-C 理想化模型略有偏差. 在实际加工中, 根据能量守恒原理, 切削速度越快, 所需的切削力越小, 因此切削力随着切削速度的增加而减小. 当切削速度较小时, 切削力大, 轴向切削层厚度大, 材料去除率高, 去除方式为脆性断裂, 而 J-C 模型主要表征塑性材料的延性去除行为, 因此得到的切削力偏差较大.

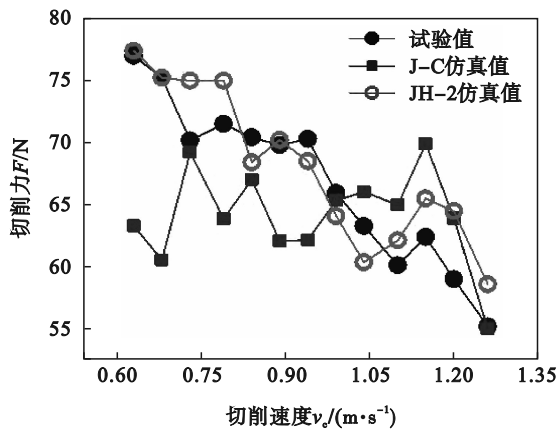


图 6 切削速度对切削力的影响

Fig. 6 Influence of cutting speed on cutting force

3.2 进给速度对切削力的影响

切削力随进给速度的变化趋势如图 7 所示, 进给速度 v_f 增大时, 切削力增大. 当 v_f 增大时, 材料去除率增加, 切屑层厚度增加, 切削力增大. JH-2 离散化模型和 J-C 理想化模型的预测结果与试验趋势相同, 仿真精度均良好.

3.3 切削深度对切削力的影响

切削深度对切削力的影响如图 8 所示, 增大切削深度 a_p , 切削力显著增大, JH-2 离散化模型与 J-C 理想化模型的预测结果相近且与试验趋势

一致. 当 a_p 增大时, 单位时间内材料去除体积增大, 断裂吸收的能量增加, 主轴需提供的功率增大, 切削力增大. 当切削深度小于 0.08 mm 时, JH-2 仿真值均大于试验值, 这是由于仿真中切削深度较小时, 材料的变形较小, 应变累加需要一定时间, 导致应力处于未完全断裂阶段时间较长, 而实际加工中, 陶瓷材料破碎速度非常快, 极短时间达到完全断裂阶段, 根据图 1a 可知, 未完全断裂阶段应力远大于完全断裂阶段, 因此仿真计算中, 切削深度较小时切削力预测值偏大. 切削深度大于 0.14 mm 时, 试验值相比于仿真结果偏大, 是由于切削深度较大时, 刀具与工件接触剧烈, 刀尖迅速磨损, 甚至崩碎, 导致切削力增大. 同时刀具与工件间的冲击载荷增大, 陶瓷材料内部晶体间结构变化, 出现滑移和位错等, 使晶隙变小, 裂纹由沿晶隙间扩展变为部分从晶体间穿过, 导致切削力增大.

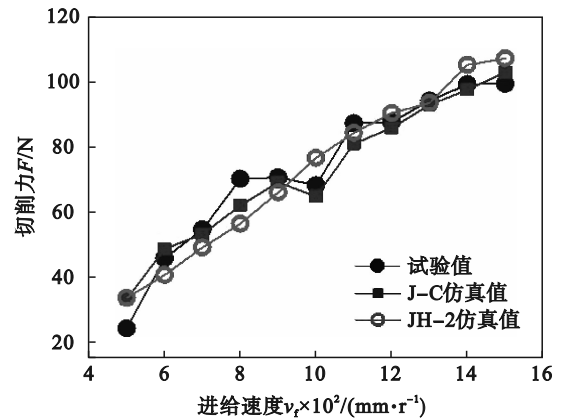


图 7 进给速度对切削力的影响

Fig. 7 Influence of feed speed on cutting force

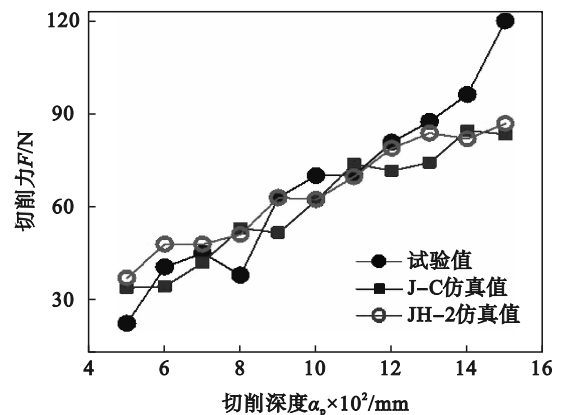


图 8 切削深度对切削力的影响

Fig. 8 Influence of cutting depth on cutting force

3.4 两种本构模型的仿真结果对比

分析上述试验现象可知, 与试验值相比, 改进的 JH-2 离散化模型和 J-C 理想化模型的仿真结果趋势相同且精度良好, 其中 JH-2 模型的仿

真值总是略高于J-C模型,这是由于JH-2模型考虑了材料损伤劣化效应,即材料未损伤阶段和劣化阶段完整复现了材料的损伤全过程,而仿真计算中材料的未损伤应力大于断裂应力,故得到JH-2模型切削力略大于J-C模型。

综上所述,JH-2离散化模型和J-C理想化模型在数值预测上均精度良好,但加工形貌上有很大区别。如图9a所示,J-C原为分析塑性材料断裂去除的本构模型,经过理想化处理后作为切屑分离标准,所得切屑仍为连续条片状。如图9b所示,采用JH-2模型(式(12)),裂纹从切削中心向四周扩展,材料与刀具接触后立即崩碎,加工表面边缘呈锯齿状。实际加工中,陶瓷材料弹、塑性差,主要去除方式为脆性断裂,裂纹随机扩展使陶瓷破碎形成粉末状切屑,如图10所示。对比仿真和试验结果,JH-2模型更符合脆性材料实际加工状态,证明了JH-2离散化模型的合理性,尤其针对脆性材料去除机理以及裂纹扩展研究,JH-2模型可以完整复现加工过程表面形貌,如凹坑与裂纹等,而J-C模型是完全失效不可用的,这意味着JH-2模型对研究脆性材料的表面创成机理,改善工艺参数具有重要意义,仿真具有显著优势。

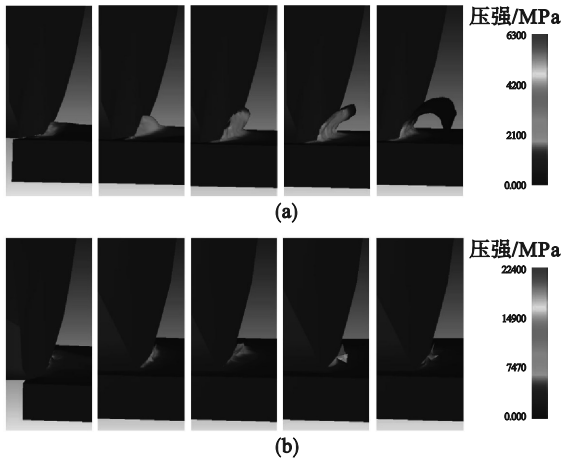


图9 切屑形貌对比

Fig. 9 Chip morphology comparison

- (a)— $a_p=0.06$ mm时J-C本构模型仿真过程;
(b)— $a_p=0.06$ mm时JH-2本构模型仿真过程

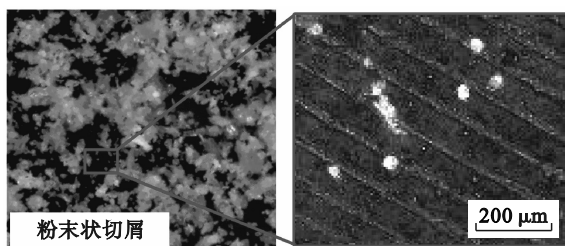


图10 氟金云母陶瓷切屑形貌

Fig. 10 Morphology of fluorophlogopite ceramic chips

4 结 论

1) 利用应力-应变关系得到了改进的JH-2离散化本构模型,包含了材料损伤劣化的3个阶段,明显反映脆性材料加工特性,相比于J-C理想化模型具有理论优势。

2) 试验结果表明,切削速度对仿真值影响不大,进给速度和切削深度对仿真切削力影响较大,预测结果与试验值趋势相符,JH-2模型和J-C模型对于切削力数值均保持较高精度且JH-2模型更优。

3) J-C模型仿真切屑呈条片状,JH-2模型切屑脆性断裂明显,符合脆性材料加工粉末状切屑形貌,验证了JH-2模型的合理性,JH-2模型对脆性材料表面创成机理研究具有显著优势。

参考文献:

- [1] Ma L J, Cai C Y, Tan Y Q, et al. Theoretical model of transverse and longitudinal surface roughness and study on brittle-ductile transition mechanism for turning fluorophlogopite ceramic [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 150: 715-726.
- [2] Yıldız A, Kurt A, Yağmur S. Finite element simulation of drilling operation and theoretical analysis of drill stresses with the DEFORM-3D [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2020, 104: 102153.
- [3] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21 (1): 31-48.
- [4] Johnson G R, Holmquist T J. An improved computational constitutive model for brittle materials [C]//AIP Conference Proceedings. Colorado: Springs, 1994: 981-984.
- [5] Baranowski P, Kuciewicz M, Gieleta R, et al. Fracture and fragmentation of dolomite rock using the JH-2 constitutive model: parameter determination, experiments and simulations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 140: 103543.
- [6] Seshadri R, Naveen I, Srinivasan S, et al. Finite element simulation of the orthogonal machining process with Al 2024 T351 aerospace alloy [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 64: 1454-1463.
- [7] Ma L J, Yu A, Chen J Q. Theoretical model of cutting force in turning the lithium disilicate glass-ceramic [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(9/10/11/12): 4355-4366.
- [8] 陈景强, 马廉洁, 孟博, 等. 氟金云母表面形成机理及表面粗糙度理论模型 [J]. *中国机械工程*, 2020, 31(24): 2918-2923. (Chen Jing-qiang, Ma Lian-jie, Meng Bo, et al. Surface formation mechanism and surface roughness theoretical model of fluorophlogopite [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(24): 2918-2923.)
- [9] Ma L J, Gong Y D, Chen X H. Study on surface roughness model and surface forming mechanism of ceramics in quick point grinding [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 77: 82-92.

(下转第 849 页)