

基于 BTA 钻断屑机理对钻削性能影响的仿真研究

张小石, 张 强, 姜黎明, 王宪升, 黄 勇, 侯冬冬

(重庆建设工业(集团)有限责任公司, 重庆 400054)

摘 要:针对 BTA 钻加工难断屑的问题,通过 ABAQUS 软件对 BTA 钻加工钛合金建立的有限元模型进行仿真分析,研究 BTA 错齿型刀具结构对钻削加工内孔分屑效果的判别依据。研究钻削速度、进给速度、钻削深度钻削三要素在钻削加工内孔时应力、温度的分布规律。得出结论:钻削加工内孔的性能排序为 BTA 错齿 V 型、BTA 错齿 VI 型、BTA 型。在主轴转速 2000 r/min、钻削深度 1.5 mm,进给速度由 30 mm/min 降到 10 mm/min 时,平均应力由 1.4×10^3 MPa 降到 1.2×10^3 MPa,降低了 14.29%,温度平稳在 110 °C。

关键词:BTA 钻;断屑机理;钻削性能

中图分类号: TG713

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)04-0150-07

Simulation study of the effect of chip breaking mechanism on the drilling performance of BTA drill

ZHANG Xiaoshi, ZHANG Qiang, JIANG Liming, WANG Xiansheng,
HUANG Yong, HOU Dongdong

(Chongqing Jianshe Industry (Group) Co., Ltd., Chongqing 400054, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of chip breaking in BTA drill machining, the finite element model was established by ABAQUS software to simulate and analyze the machining of titanium alloy by BTA drill, and the basis for discriminating the chip breaking effectiveness in hole drilling and machining by the drills of BTA side set type was investigated. The distribution laws of stress and temperature of hole drilling and machining under the influence of the three factors of drilling speed, feed speed and drilling depth are studied. It is concluded that the ranking of their performance in hole drilling and machining is V type of BTA side set type > VI type of BTA side set type > BTA type. When the spindle speed is 2000 r/min and the drilling depth is 1.5 mm, the feed speed reduced from 30 mm/min to 10 mm/min, the average stress decreases from 1.4×10^3 MPa to 1.2×10^3 MPa, reduced by 14.29%, and the temperature is stabilized at 110 °C.

Key words: BTA drill; chip breaking mechanism; drilling performance

钛合金具有导热性差、亲和力高、弹性模量小的特点。针对 BTA 钻加工钛合金难断屑,易造成刀具磨损严重、黏结性高、工件易变形等问题,对 BTA 钻加工钛合金建立了有限元模型,并进行仿真分析。

收稿日期: 2023-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(U2241233)

作者简介: 张小石(1987—),男,山西阳泉人。硕士,高级工程师,主要从事轻武器产品、工艺设计方面的研究。

E-mail: 2306834665@qq.com。

国内外学者在刀具钻削钛合金方面进行了深入研究,贺涛对钛合金小深孔钻削机理进行了仿真研究,对小深孔钻削机理进行了理论分析^[1],给本文提供了研究方向;魏鑫基于 AdvantEdge 对 BTA 深孔钻削进行了仿真与实验,提出了 BTA 钻的钻削三要素和轴向力的计算方法^[2],给本文的仿真提供了试验参数;王鹏飞基于 DEFORM-3D 对 BTA 钻深孔钻削过程进行了仿真分析,提出了 BTA 错齿刀具参数的选择及分屑依据^[3],给本文分析 BTA 钻断屑机理提供理论基础;肖茂华对镍基高温合金高速切削刀具磨损机理进行了研究,提出了高速切削时的工艺参数^[4],给本文研究提供了合适的工艺参数;姜铭等研究了钻头参数对钛合金薄壁件钻削力的影响^[5],给本文 BTA 钻头参数优化提供了参考思路;OEZKAYA 等研究了深孔加工过程中铁屑形成的机理^[6],为本文研究 BTA 钻的断屑机理提供了研究方向;GUBA 等研究了深孔加工铝件的辅助震动问题^[7],其变参数研究方法给本文的钻削三要素深入研究提供了思路。

目前涉及 BTA 钻断屑机理方面的研究很少,本文的创新点为给出了 BTA 错齿钻刀具分屑效果的判定依据,分析 BTA 钻在钻削加工时应力的分布规律,可得在 BTA 错齿 V 型、BTA 错齿 VI 型及 BTA 型中 BTA 错齿 V 型刀具的钻削性能最好。对 BTA 错齿 V 型刀具结构进行变钻削深度、变钻削速度、变进给速度的研究,研究成果为 BTA 型钻刀具的设计提供了理论依据和改进方向。

1 有限元模型的建立

1.1 几何模型的建立

在三维建模软件 NX8.0 中建立了刀具模型,研究了 BTA 型、BTA 错齿 V 型、BTA 错齿 VI 型 3 种刀具结构,如图 1 所示。BTA 错齿 V 型刀具直径 $\phi 6$ mm,毛坯 25 mm \times 25 mm \times 5 mm,加工模型如图 2 所示。

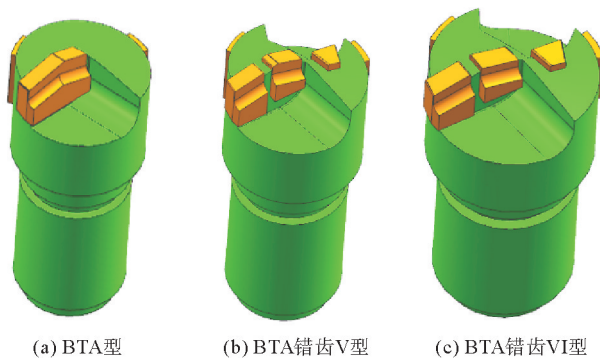


图1 BTA 刀具模型

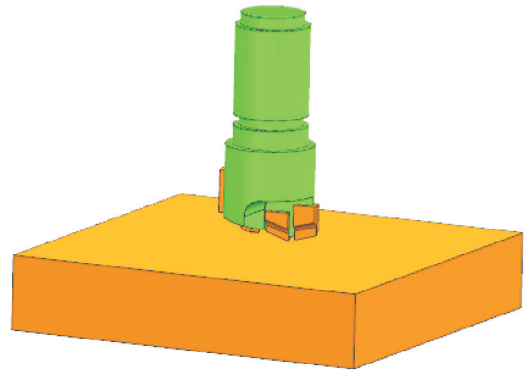


图2 BTA 错齿 V 型刀具加工模型

BTA 错齿钻断屑机理是采用中间刃先划出犁沟,外刃和中心刃分层断屑,以减小 BTA 型刀具在钻削时的应力分布;中间刃在轴向方向依次交替切入,在内刃与外刃转折处的钻尖处进行断屑。切屑越窄小,越有利于进一步折断变形。BTA 错齿 V 型钻: $a=0.125D$, $c=0.175D$, $d=0.2D$,其中, a 为中心刃宽度, c 为中间刃宽度, d 为外刃宽度, D 为钻头直径;BTA 错齿 VI 型钻: $a=0.1225D$, $c=0.15D$, $d=0.125D$;BTA 型为整体刀具。

1.2 BTA 错齿钻分屑状态的判别依据

通过刀刃示意(图 3)得出分屑状态的判别依据,图中 R 为刀具半径; ω_1 为刀片中心刃径向宽度, ω_2 为刀片中间刃径向宽度, ω_3 为刀片外刃径向宽度; α_1 为中心刃刀片倾角, α_2 为中间刃刀片倾角, α_3 为外刃刀片倾角,刀片方向左低右高为正,反之为负; h_{12} 为中心刃左刃尖相对中间刃右刃尖的滞后量; h_{23} 为中间刃右刃尖相对外刃左刃尖的滞后量。

用 Δ_{12} 、 Δ_{23} 分别表示中心刃刀片与中间刃刀片的径向覆盖宽度和中间刃刀片与外刃刀片的径向覆盖宽度。 c_{ij} 为前 $T/2$ 时刻中间刃刀片 j 经过该半平面时的刀尖位置相对于此时中心刃刀片 i 的钻削刃轴

向超前量,其中 $i=1,2;j=2,3$; f 为沿轴线移动的进给量^[8-10]。

$$\Delta_{12} = w_1 + \frac{w_2 - 1}{2} \tag{1}$$

$$\Delta_{23} = w_3 + \frac{w_2 - 1}{2} \tag{2}$$

$$c_{12} = -(h_{12} + \Delta_{12} \tan\alpha_1) - \frac{f}{2} \tag{3}$$

$$c_{23} = (h_{23} - \Delta_{23} \tan\alpha_2) - \frac{f}{2} \tag{4}$$

完全分屑状态下,各参数满足如下关系式:

$$c_{12} > 0 \tag{5}$$

$$c_{23} > 0 \tag{6}$$

将式(1)~(4)代入式(5)、式(6),经变换可得

$$\Delta_{12} > -\frac{f}{\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2} \tag{7}$$

$$\Delta_{23} > \frac{f}{\tan\alpha_2 + \tan\alpha_3} \tag{8}$$

式(7)和式(8)可以作为 BTA 错齿刀具分屑状态的判别依据。

2 有限元仿真模型的建立

2.1 有限元仿真材料模型的建立

仿真中材料的分离判别依据是 ABAQUS 有限元分析中通用的 John-Cook 模型分离准则^[11-15]。

$$\sigma_f = [A + B(\epsilon_p)^n] \times (1 + C \ln \frac{\epsilon_p}{\epsilon_0}) \times \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right]$$

$$\epsilon_f = [d_1 + d_2(\epsilon_p)^{d_3}] \times (1 + d_4 \ln \frac{\epsilon_p}{\epsilon_0}) \times \left[1 - d_5 \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right]$$

式中: σ_f 为等效应力; ϵ_p 为塑性应变; ϵ_0 为参考应变; T_0 为参考温度; T_{melt} 为熔化温度; A, B, C, n, m 为材料参数,如表 1 所示; ϵ_f 为材料失效时的等效应变; d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 为失效参数,如表 2 所示。

表 1 钛合金材料参数

A	B	C	n	m
875	793	0.01	0.38	0.71

表 2 钛合金失效参数

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
0.09	0.27	-0.48	0.01	3.87

2.2 分析步、网格、约束的添加

本文所选的分析步是温度应力的热-力耦合的动力学分析步。网格的划分采用主次矛盾关系的思想,钻削区域局部细化网格,如图 4 所示,具体做法是在钻削区域与非钻削区域采用模型分割的思想,在长方形毛坯中分出一个圆柱体,再在圆柱体的边缘进行单边布种细化网格,可以在有限的计算资源下发挥计算机的最大计算能力。约束的添加是通过点-刚体耦合的方法进行的,具体做法是建立一个参考坐标,把参考点与刀具有限元模型耦合起来,通过控制参考点旋转速度来控制主轴速度,从而控制进给速度(此时速度为一个常量)。实际钻削过程中,钻削进给速度不是恒定不变的,通过控制位移和时间的变化来控制进给速度,给改变进给速度的仿真提供了一个有效可行的办法。

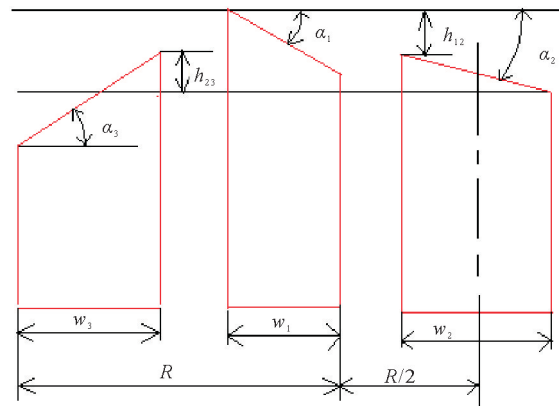


图 3 刀刃示意

3 仿真结果分析

通过对断屑机理进行研究可知,铁屑变形主要分为 2 种情况:①直接钻削引起的基础变形;②铁屑在移动、折弯变形中引起的附加变形。BTA 型刀具钻透毛坯时铁屑较厚,属于基本变形,对应的应力云图如图 5(a)所示;BTA 错齿 V 型刀具钻透毛坯时铁屑较薄,铁屑有明显卷曲现象,属于附加变形,对应的应力云图如图 6(b)所示;BTA 刀具钻穿毛坯时,毛坯钻孔沿孔边向外分布的应力云图变化圈较大,颜色较深,说明钻削过程受力变形较大,如图 5(b)所示;BTA 错齿 V 型刀具钻穿毛坯时毛坯钻孔沿孔边向外分布的应力云图变化圈较小且颜色较浅,如图 6(c)所示,说明 BTA 错齿 V 型刀具犁沟式分层断屑效果明显。

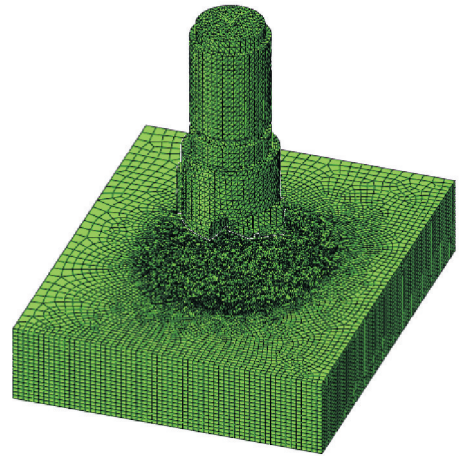
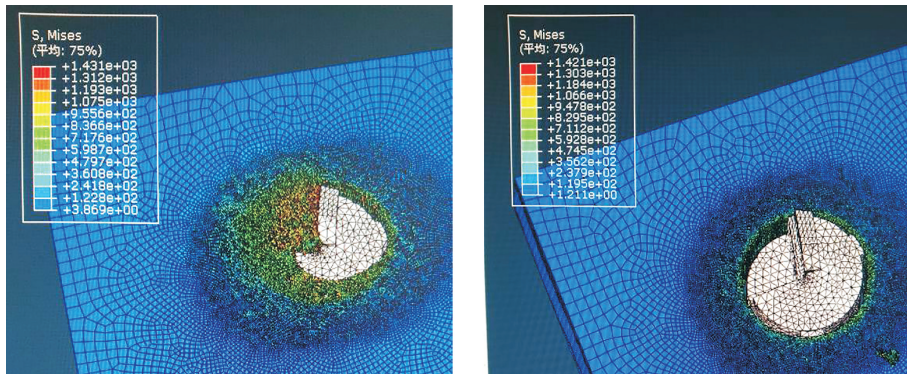


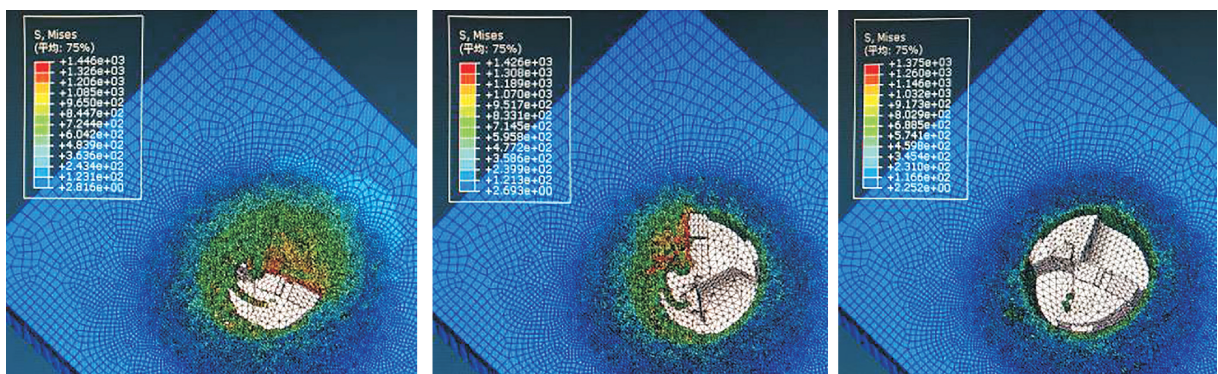
图 4 划分网格的有限元模型



(a) 钻头钻透毛坯

(b) 钻头钻穿毛坯

图 5 钻头钻削过程 BTA 型加工模型应力云图



(a) 钻尖钻透毛坯

(b) 钻头钻透毛坯

(c) 钻头钻穿毛坯

图 6 钻头钻削过程 BTA 错齿 V 型加工模型应力云图

从 BTA 钻钻削性能分析,BTA 错齿 V 型在钻尖钻透毛坯时有明显的分层现象,铁屑轴向分层层长,此时钻尖钻透毛坯应力云图如图 6(a)所示;BTA 错齿 VI 型在钻尖钻透毛坯时,铁屑是分块断裂的,分层效果不明显,钻尖钻透毛坯时应力云图如图 7(a)所示。BTA 错齿 V 型、BTA 错齿 VI 型钻头钻透毛坯时应力云图如图 6(b)、图 7(b)所示。钻穿毛坯(此时为钻头刀刃通过毛坯)时,BTA 错齿 V 型比

BTA 错齿 VI 型孔壁应力分布均匀, BTA 错齿 V 型、BTA 错齿 VI 型钻头钻穿毛坯时应力云图如图 6(c)、图 7(c)所示。综合分析, BTA 错齿 V 型比 BTA 错齿 VI 型钻削性能优良。

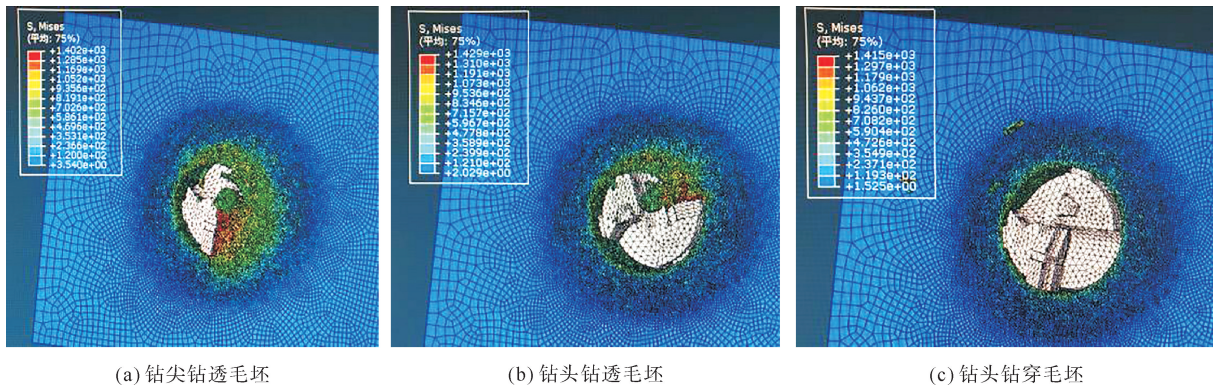


图7 钻头钻削过程 BTA 错齿 VI 型时加工模型应力云图

对 BTA 错齿 V 型刀具结构进行变钻削深度、变钻削速度、变进给速度的研究。钻孔从第 4 个分析步开始钻入毛坯, 第 18 个分析步时开始钻透毛坯, 20 个分析步时完全钻穿毛坯。图 8 为钻削速度为 37.68 m/min(主轴速度 2000 r/min)、进给速度为 30 mm/min, 钻削深度为 1、1.5、2 mm 时 BTA 错齿 V 型刀具应力和温度变化曲线。由图 8(a)可以看出钻削深度越大钻削时应力也越大, 由图 8(b)可以看出钻削深度为 1.5 mm 时温度上升较平稳, 钻削开始时温度为 20 °C, 结束时温度为 160 °C。

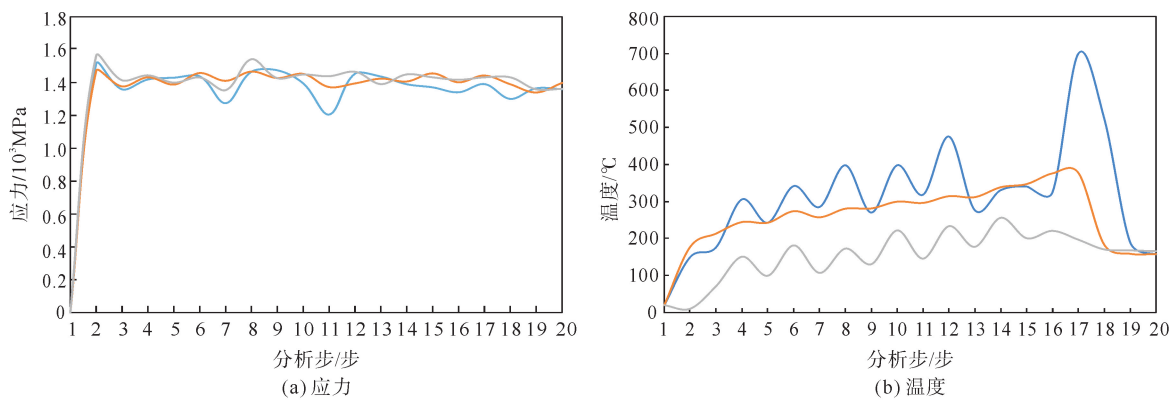


图8 变钻削深度时BTA错齿V型刀具应力、温度变化曲线

—2 mm; —1.5 mm; —1 mm

图 9 为钻削深度为 1.5 mm、进给速度为 30 mm/min, 钻削速度分别为 37.68 m/min(主轴速度 2000 r/min)、28.60 m/min(主轴速度 1500 r/min)、18.40 m/min(主轴速度 1000 r/min)时 BTA 错齿 V 型刀具应力、温度变化曲线。钻削速度为 37.68、28.60、18.40 m/min 时对应的最大应力分别为 1.467×10^3 、 1.508×10^3 、 1.523×10^3 MPa, 对应的最高点温度分别为 376.7、330.1、166.2 °C。由图 9 可知, 钻削速度对应力的分布影响相对集中, 呈负相关分布; 对温度的分布影响较大, 呈正相关分布。

图 10 为钻削深度为 1.5 mm、钻削速度为 37.68 m/min(主轴速度 2000 r/min), 进给速度为 30、20、10 mm/min 时 BTA 错齿 V 型刀具应力、温度变化曲线。由图 10(a)可知, 进给速度由 30 mm/min 降到 10 mm/min 时, 平均应力由 1.4×10^3 MPa 降到 1.2×10^3 MPa, 降低了 14.29%。由图 10(b)可知, 进给速度为 10 mm/min 时在第 13 个分析步(此时毛坯还没有被钻破)的温度已经稳定在 110 °C。

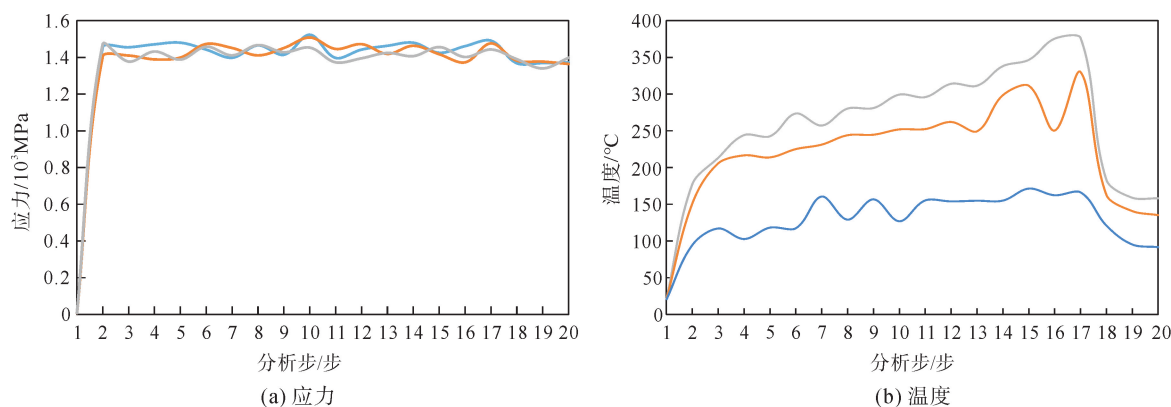


图9 变钻削速度时BTA错齿V型刀具应力、温度变化曲线

— 37.68 m/min(2000 r/min); — 28.60 m/min(1500 r/min); — 18.40 m/min(1000 r/min)

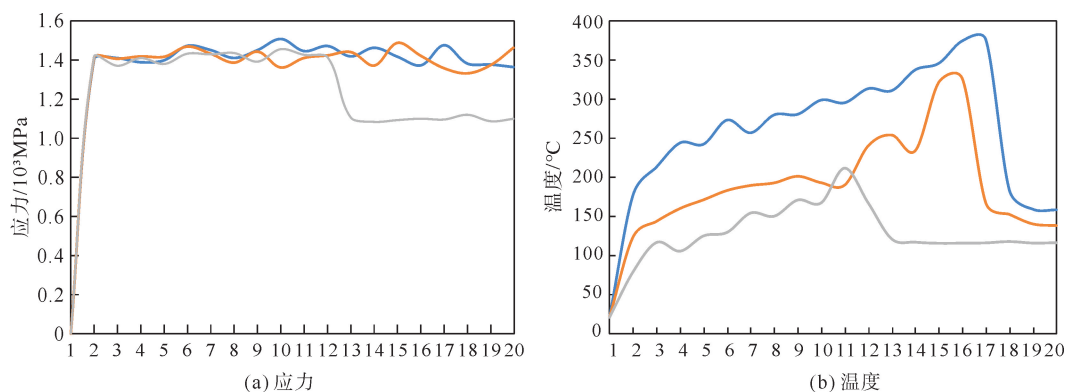


图10 变进给速度应力、温度变化曲线

— 30 mm/min; — 20 mm/min; — 10 mm/min

4 结论

1) 通过刀具参数化分析,定量给出了完全分屑状态下的表达式,可以作为BTA错齿刀具分屑状态的判别依据。

2) 通过对断屑机理进行研究可知,铁屑变形主要为2种情况:①直接钻削位移引起的基础变形;②铁屑在移动、折弯变形中引起的附加变形。BTA刀具钻穿毛坯时铁屑较厚,属于基础变形。BTA错齿V型刀具钻穿毛坯时铁屑较薄,铁屑有明显卷曲现象,属于附加变形。

3) BTA错齿V型比BTA错齿VI型刀具钻削性能优良,理论分析和仿真试验结果一致,可以将最终数据应用于以后的仿真计算,对BTA钻刀具结构的改进有一定的借鉴意义。

4) 钻削速度对应力的分布影响较小,随着钻削速度的增大钻削应力减小,呈负相关;对温度的分布影响较大,随着钻削速度的增大钻削温度增大,呈正相关。进给速度由30 mm/min降到10 mm/min时,平均应力由 1.4×10^3 MPa降到 1.2×10^3 MPa,降低了14.29%,温度平稳在110 °C,进给速度越小时,钻削时的应力、温度分布也越小。

参考文献(References):

- [1] 贺涛. 钛合金小深孔钻削机理仿真研究[D]. 太原:中北大学,2017.
HE Tao. Mechanism study of small deep hole drilling of titanium alloy[D]. Taiyuan:North University of China,2017.
- [2] 魏鑫. 基于AdvantEdge的BTA深孔钻削仿真与实验研究[D]. 西安:西安理工大学,2014.
WEI Xin. Simulation and experimental research of BTA deep hole drilling based on AdvantEdge[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology,2014.

- [3] 王鹏飞. 基于 DEFORM-3D 的 BTA 钻深孔钻削过程仿真分析[D]. 西安:西安理工大学,2017.
WANG Pengfei. Simulation analysis of deep-hole drilling process with bta drill based on DEFORM-3D[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology,2017.
- [4] 肖茂华. 镍基高温合金高速切削刀具磨损机理研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
XIAO Maohua. Studies on tool wear mechanism for the high speed machining of nickel-based superalloy[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2010.
- [5] 姜铭,黄树涛,于晓琳,等. 钻头参数对钛合金薄壁件钻削力的影响[J]. 兵器材料科学与工程,2020,43(6):12-16.
JIANG Ming, HUANG Shutao, YU Xiaolin, et al. Influence of bit parameters on drilling force of titanium alloy thin-walled parts[J]. Ordnance Material Science and Engineering,2020,43(6):12-16.
- [6] OEZKAYA E, MICHEL S, BIERMANN D. Chip formation simulation and analysis of the mechanical loads during micro single-lip deep hole drilling of Inconel 718 with varying cooling lubricant pressure[J]. Production Engineering,2021,15:299-309.
- [7] GUBA N, SCHUMSKI L, PAULSEN T, et al. Vibration-assisted deep hole drilling of the aluminum material AlMgSi0.5[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology,2022,36:57-66.
- [8] 王世清. 深孔加工技术[M]. 西安:西北工业大学出版社,2003.
WANG Shiqing. Deep hole machining technology[M]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press,2003.
- [9] 钱清,程寓,郑立辉. 基于最大稳定度的深孔加工枪钻结构参数优化[J]. 组合机床与自动化加工技术,2021(6):155-158.
QIAN Qing, CHENG Yu, ZHENG Lihui. Optimization of structural parameters of gun drilling for deep hole machining based on maximum stability[J]. Combined Machine Tool & Automatic Machining Technology,2021(6):155-158.
- [10] 赵甘露,冯平法,张建富. 钛合金超声振动钻削工艺特性仿真及试验研究[J]. 北京航空航天大学学报,2019,45(8):1597-1605.
ZHAO Ganlu, FENG Pingfa, ZHANG Jianfu. Simulation and experimental study on ultrasonic vibration drilling process characteristics of titanium alloy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2019,45(8):1597-1605.
- [11] 陈俐华,于大国,赵慧瑜. TC4 钛合金深孔钻削方式和轴向力研究[J]. 机床与液压,2023,51(7):153-157.
CHEN Lihua, YU Daguo, ZHAO Huiyu. Study on deep hole drilling mode and axial force of TC4 titanium alloy[J]. Machine Tool & Hydraulics,2023,51(7):153-157.
- [12] 吕娜. 基于 ABAQUS 有限元仿真的硬质合金刀具磨损机制研究[J]. 机床与液压,2021,49(4):164-168.
LV Na. Research on wear mechanism of cemented carbide tool based on abaqus finite element simulation[J]. Machine Tools & Hydraulics,2021,49(4):164-168.
- [13] 朱红霞,沈兴全,张利新. 准干式深孔钻削中温度场与刀具磨损的仿真研究[J]. 机械设计与制造,2014(2):193-195.
ZHU Hongxia, SHEN Xingquan, ZHANG Lixin. The simulation of temperature field and tool wear in the near-dry deep hole drilling[J]. Machinery Design & Manufacture,2014(2):193-195.
- [14] 景旭文,王楚辉,周宏根,等. 基于 Deform-3D 的 42CrMo 钢铣削仿真分析[J]. 工具技术,2018,52(2):71-75.
JING Xuwen, WANG Chuhui, ZHOU Honggen, et al. Milling simulation analysis of 42CrMo steel based on Deform-3D[J]. Tool Engineering,2018,52(2):71-75.
- [15] 张小粉,张宪坤,白瑀. 基于 DEFORM-3D 的深孔枪钻切屑成形机理分析[J]. 工具技术,2020,54(3):55-59.
ZHANG Xiaofen, ZHANG Xiankun, BAI Yu. Analysis of chip forming mechanism of deep hole gun drill based on DEFORM-3D[J]. Tool Engineering,2020,54(3):55-59.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)

(上接第 134 页)

- [13] 牛杰,叶连强,董小忠,等. 万向节轴承接触强度数值优化方法及试验验证[J]. 机械传动,2023,47(5):88-97.
NIU Jie, YE Lianqiang, DONG Xiaozhong, et al. Numerical optimization method and experimental verification of contact strength of U-joint bearings[J]. Journal of Mechanical Transmission,2023,47(5):88-97.
- [14] 宋有硕,马跃. 恶劣工况下越野车用等速万向节接触应力和保持架强度分析[J]. 机械强度,2022,44(1):162-168.
SONG Youshuo, MA Yue. Contact stress and cage strength analysis of constant velocity joint for off-road vehicle under bad working conditions[J]. Journal of Mechanical Strength,2022,44(1):162-168.
- [15] 闫公哲. 球笼式等速万向节受力及磨损仿真分析[D]. 上海:华东理工大学,2018.
YAN Gongzhe. Analysis of rzeppa universal joint force and wear simulation[D]. Shanghai:East China University of Science and Technology,2018.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)