基于 AdvantEdge 的钻尖结构对 TC4 钻削性能影响研究

李志慧[1],何云[1],赵锦章[2],任博远[2]

[1]华东理工大学机械与动力工程学院;[2] 国宏工具系统(无锡)股份有限公司

摘要: 钛合金作为一种典型的难加工材料,其弹性模量小、导热性差、比强度高,钻削时刀具极易磨损。针对该材料本文选取了四种不同钻尖结构的整体硬质合金麻花钻,基于 AdvantEdge 建立了有限元模型,分析了不同钻尖结构对切削力、切削温度及应力分布的影响,通过 TC4 钛合金钻削实验对比分析切削力、刀具磨损和钻头寿命,并验证仿真模型的可靠性;运用 ZEISS 扫描电子显微镜(SEM),深入分析四种钻头磨损形式和切屑锯齿化程度。结果表明:横刃较长的 D 型钻头磨损最小,寿命最长,但切削力最大,其他三种钻头横刃较短,强度偏弱,失效形式均为横刃处崩刃;C 型钻头的断屑和排屑性能更好,可以减少堵屑情况发生,提高刀具寿命。

关键词: 钻尖结构;TC4 钛合金;有限元;钻削性能

中图分类号: TG713.1;TG146.23;TG703 **文献标志码:** A **DOI**:10.3969/j.issn.1000-7008.2022.01.003

Research on the Influence of Drill Point Structure Based on AdvantEdge on TC4 Drilling Performance

Li Zhihui, He Yun, Zhao Jinzhang, Ren Boyuan

Abstract: Titanium alloy, as a typical difficult-to-machine material, has small elastic modulus, poor thermal conductivity and high specific strength, and cutting tools are easily worn while drilling. In this paper, four kinds of solid carbide twist drills with different drill tip structures are selected. Firstly, the finite element model is established based on AdvantEdge, and the influence of different drill tip structures on cutting force, cutting temperature and stress distribution is analyzed. Then, through TC4 titanium alloy drilling experiment, the cutting force, tool wear and bit life are compared and analyzed, and the reliability of the simulation model is verified. By using ZEISS scanning electron microscope (SEM), four kinds of bit wear forms and chip sawtooth degree are deeply analyzed. The results show that the D-type bit with longer chisel edge has the least wear and the longest service life, but the cutting force is the largest. The other three bits have shorter chisel edge and weak strength, and the failure mode is the collapse at the chisel edge. C-type drill bit has better chip breaking and removing performance, which can reduce the occurrence of chip blocking and improve the tool life.

Keywords: drill point structure; TC4 titanium alloy; finite element; drilling performance

1 引言

由 α+β 相组成的 Ti6Al4V 钛合金具有良好的机械性能,具有较高的比强度、较好的抗腐蚀性和耐热性等优点,被广泛应用于飞机结构、燃气轮机的核心部件[1]。但是 Ti6Al4V 在高温下会表现出高强度、高化学活性和低导热性等固有特性,使其成为较难加工的材料,加工过程中工件材料易与刀具材料产生化学反应,导致切削温度高、刀具磨损严重和加工效率低[2]。钻削加工作为一种难以实时观测的加工方式,因钻头通常在半封闭状态下切削,使得刀具与工件之间存在摩擦严重、切削温度高、排屑困难等问题。

韩荣第等[3]分析了加工不同材料时加工参数及钻头切削直径对切削力及扭矩的影响,建立了切削力及扭矩的经验公式。胡立湘等[4]通过钛合金钻削实验分析了加工参数对切削力、切屑形态和孔壁粗糙度的影响,并建立轴向钻削力经验公式;向志杨[5]对切屑折断原理进行了详细阐述,分析了改进钻头结构实现断屑的方法,并提出了轴向振动断屑

收稿日期: 2021 年 6 月

[17]苏静,郭伟国,曾志银,等. 超高强度钢 AF1410 塑性流动特性及其本构关系[J]. 固体力学学报,2012,33(3):265-272.

[18]牛阿慧. 基于 DEFORM-3D 的钛合金 TC4 切削残余应力分析[D]. 太原:太原科技大学,2013.

第一作者:于晓琳,副教授,沈阳理工大学机械工程学院,110159 沈阳市

First Author: Yu Xiaolin, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110159, China

法。S. Sharif 等[6]对比了钻削钛合金时涂层与未涂层刀具的后刀面磨损及失效形式、切屑形貌的差异；田卫军等[7]通过有限元仿真模拟了钻削过程中切削温度的变化，分析了钻头切削直径和加工参数对切削力和切削温度的影响；Zhaoju Zhu 等[8]通过钻削钛合金试验研究了切屑卷曲机理及切屑的三维形貌，并分析了不同切削参数对切屑长度和剪切角的影响。

由于麻花钻结构和钻削过程较复杂，国内外学者对钻削力、刀具磨损、切屑形貌及切削温度等进行了大量研究，但关于横刃结构对钛合金钻削性能影响的研究较少。本文选用四种不同钻尖结构的整体硬质合金麻花钻，通过有限元仿真和钻削实验对比分析钻削 TC4 钛合金过程中的切削力、前后刀面磨损、切削温度及切屑形貌，并对刀具综合切削性能进行评述，该研究将为实际生产加工提供一定的理论支撑，有助于刀具的合理选用。

2 有限元仿真

本文通过 AdvantEdge FEM 模拟仿真软件对钛合金进行模拟切削，并采集钻削力、温度和应力数据。通过 Soildworks 构建四种不同钻尖结构的钻头三维模型，导入 Third Ware AdvantEdge 仿真软件并定义边界条件，刀具材料为硬质合金，工件材料为 Ti6Al4V(TC4)，8mm×8mm×5mm 方形结构，材料物理性能见表 1。刀具及工件的网格由软件随切削的进行自动划分，网格划分后的有限元模型见图 1。有限元仿真切削参数与实际切削参数保持一致：转速 $n=2123\text{r/min}$，每转进给量 $f=0.12\text{mm/r}$，温度为 20℃。

TC4 钛合金材料由软件默认的 Power Law 本构模型构建，其函数表达式为

$$\sigma(\varepsilon^p,\dot{\varepsilon},T)=g(\varepsilon^p)\Gamma(\dot{\varepsilon})\Phi(T) \tag{1}$$

式中，$\sigma(\varepsilon^p,\dot{\varepsilon},T)$ 为材料的流动应力；$g(\varepsilon^p)$ 为应变强化函数；$\Gamma(\dot{\varepsilon})$ 为应变率效应函数；$\Phi(T)$ 为热软化函数；ε^p 为材料变形过程中的应变；$\dot{\varepsilon}$ 为材料变形过程中应变率；T 为材料变形过程中的温度。

表 1 钛合金 Ti6Al4V 的性能参数

参数	密度(g/cm³)	拉伸强度(MPa)	屈服强度(MPa)
数值	4.44	950	880
参数	断裂伸长率(%)	弹性模量(GPa)	泊松比
数值	14	113.8	0.342
参数	剪切模量(GPa)	剪切强度(MPa)	比热容(J/(g·℃))
数值	44	550	0.526
参数	导热系数(W/(m·K))	熔点(℃)	断裂韧性(MPa·m)
数值	6.7	1604～1660	75

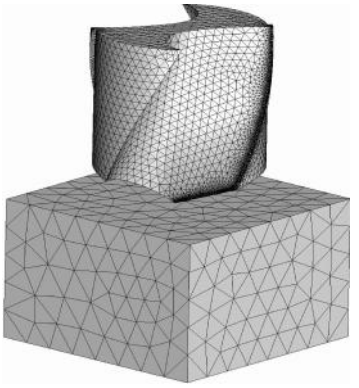


图 1 钻削 TC4 钛合金有限元模型

3 实验研究

3.1 实验设备

实验设备包括 DMG MORI NVD5000 立式加工中心、测力仪、采集器、放大器、转换器和工装夹具等(见图 2)。钻削实验测力系统由 Kistler9255C 压电式测力仪、5080 型电荷放大器、5697 型数据采集器和 DynoWare 测力仪软件构成。该系统可以实时测量 x,y,z 三个方向的钻削力和扭矩，采样频率为 2kHz。采用基恩士 KEYENCE VHX-6000 超景深显微系统和 ZEISS 扫描电子显微镜(SEM)对刀具磨损和切屑形貌进行宏观和微观分析。

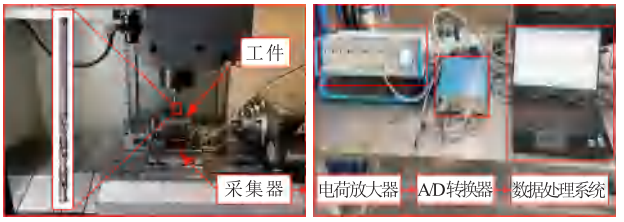


图 2 实验装置

3.2 实验刀具与材料

采用四种不同钻尖结构的整体硬质合金麻花钻进行实验，端面结构见图 3，刀具几何参数为切削直径 6mm，螺旋角 30°，钻尖角 140°，钻尖后角 10°，其它结构参数见表 2，四种钻尖端面结构见图 4。工件材料采用 100mm×100mm×40mm 的 TC4 钛合金。

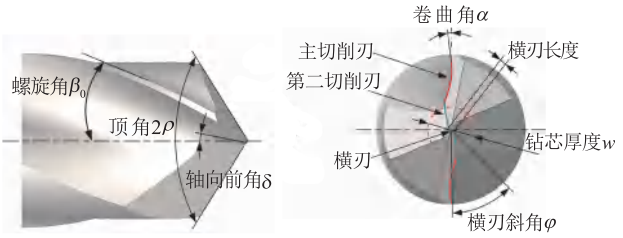
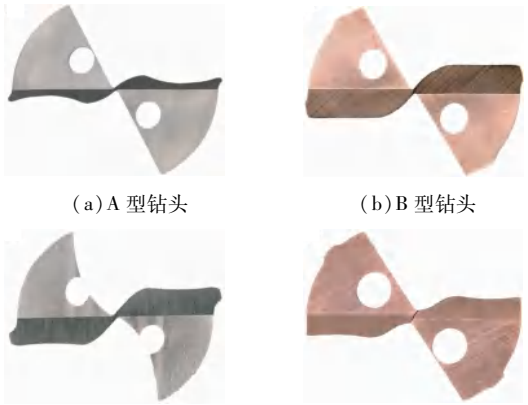


图 3 整体硬质合金麻花钻端面结构

表2 麻花钻结构参数表

型号	横刃长度(mm)	横刃斜角(°)	横刃前角(°)	卷曲角(°)
A	0.1	60	-6	15
B	0.2	50	3	-5
C	0.3	50	3	1
D	0.4	5°	-3	10



(a)A 型钻头 (b)B 型钻头

(c)C 型钻头 (d)D 型钻头

图4 四种不同钻尖端面结构

3.3 实验方法

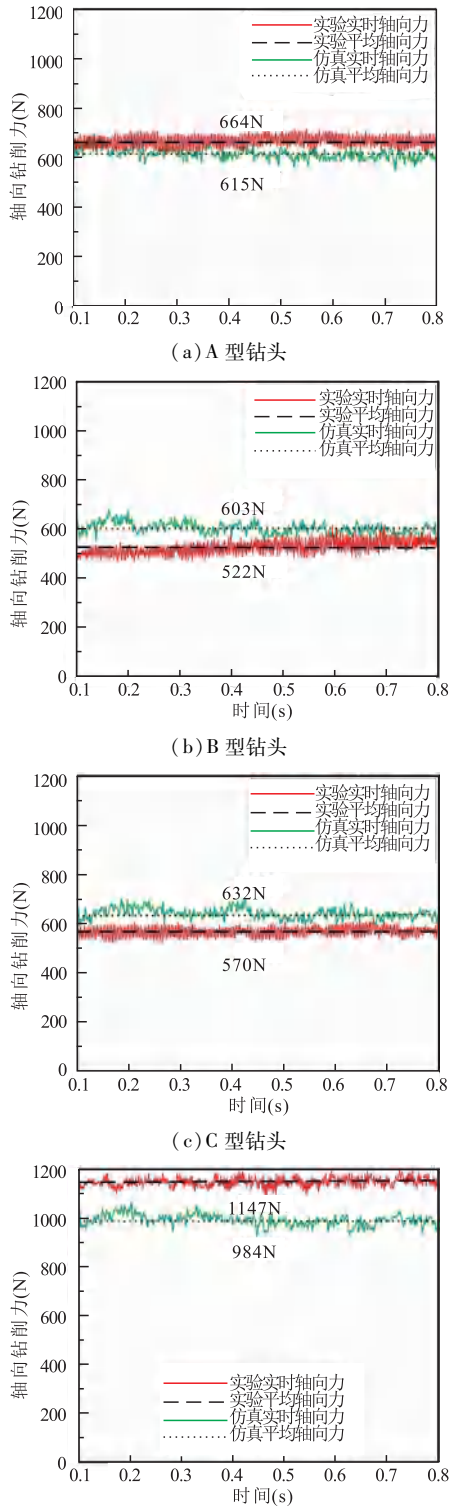
选用四种不同钻尖结构的硬质合金钻头,分别设为A、B、C、D。切削速度 $V_c=40\text{m/min}$(转速 $n=2123\text{r/min}$),进给量 $f=0.12\text{mm/r}$,钻削深度 $a_p=25\text{mm}$,采用乳化液内冷。切削力采集方式为每种钻尖结构连续钻削10个孔,测量其轴向切削力并收集切屑,刀具磨损分别于钻削至100,300,500,700,900孔时测量。

4 分析与讨论

4.1 钻削轴向力与扭矩分析

在钻削过程中,钻削轴向力通常被认为是由横刃挤压、主切削刃切削和刃带挤压切削综合作用的结果。相关实验研究表明,刃带产生的轴向切削力很小,大约占据切削力的5%~10%,主切削刃处产生的切削力约占据45%~50%,横刃产生的切削力约占据50%。在钻头几何参数相同的情况下,刀具刃口尚未磨钝时,钻削产生的轴向切削力差值主要是由横刃结构差异引起的。横刃几乎完全靠楔劈挤压切入材料,导致工件发生塑性变形,并在刀具旋转的作用下沿横刃两侧滑动,工件与刀具间的滑动所产生的摩擦力增大了钻头进给所需的轴向力,且由于钛合金的弹性模量低,弹性回弹大,加大了横刃切入所需轴向力,同时也增大了刃带与孔壁间的摩擦力矩。

图5为实验和仿真获得的钻削轴向力。可知,D型钻头的轴向力最大,A、B、C型钻头的轴向钻削力较D型钻头分别减小约42.1%,54.5%,50.3%。通过对比四种钻头的仿真轴向切削力,与实验轴向力分别相差7.3%,15.5%,10.8%,14.2%,该差值位于可接受的范围内,同时验证了有限元模型仿真的可靠性。



(a)A 型钻头

(b)B 型钻头

(c)C 型钻头

(d)D 型钻头

图5 实验与仿真轴向钻削力

横刃长度与横刃斜角有关,一般情况下横刃斜

角越小横刃长度越长。D 型钻头的横刃斜角较小，其横刃长度最长，刀具旋转时挤压区域最大，负前角的齿隙面也会增大进给时所需的轴向力，因而楔劈挤压力也最大。由图 5d 可知，D 型钻头的轴向切削力约是其它钻头的两倍。由于 A 型钻头横刃斜角较大，横刃长度偏短，并且横刃处为负前角，当横刃挤压进入工件材料时，负前角的齿隙面向下旋转进给会产生向下压的趋势，二者的相互作用导致切削轴向力增大。B 型和 C 型横刃结构钻头较 A 型钻头横刃长 0.1 ~0.2mm，从图 5 可以看出，其轴向力却比 A 型钻头小，这主要是由于 B 型和 C 型钻头横刃处均为正前角，切削锋利，当钻头向下进给时，工件与齿隙面之间的滑动摩擦力会减小，进而轴向切削力也会减小。

对比四种不同钻尖结构的切削力。当横刃较短时，横刃前角是影响轴向力的主要因素；当横刃较长时，横刃前角的影响减小，横刃长度为影响切削力的主要因素。

4.2 磨损与失效分析

(1)后刀面及横刃磨损

众多学者的研究表明，在钻削过程中，钻头外缘转角处最容易磨损且扩展速率最快[9]。图 6 为四种钻尖结构钻头磨损变化曲线，随着加工孔数的增加，切削刃外缘处后刀面的磨损量呈不断增加趋势。

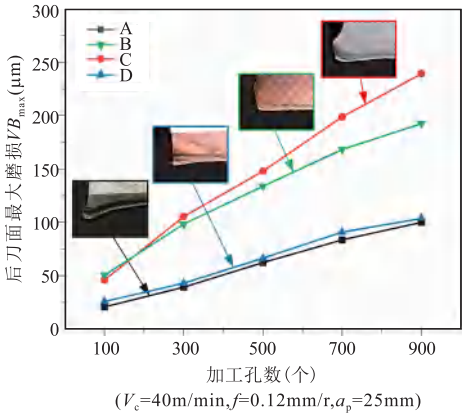


图 6 后刀面最大磨损量

由图 6 可以看出，C 型钻头的后刀面 VB_{max} 最大，其次为 B 型钻头，A 型和 D 型钻头 VB_{max} 相近且磨损较小。钻头主切削刃外缘在磨粒磨损、黏着磨损和化学磨损的综合作用下导致磨损宽度逐渐增加，其中磨损带沿切向方向有一条深色的烧伤带，外缘处最宽，越靠近中心越窄，热磨损是后刀面的主要磨损形式[9]。

图 7 为四种钻头的实验与仿真对比分析。可以看出，钻头外缘转角处的温度最高，后刀面温度沿垂直于主切削刃方向呈梯度下降。对比实验和仿真结果可以看出，钻头后刀面磨损主要是由刀具与工件之间的剪切变形而产生，以钻头温度与应力分布呈现。由于横刃靠近钻头的旋转中心，其切削线速度几乎为 0，主要靠挤压切入材料，材料受力变形并沿着径向和切向流动，进而被主切削刃切削，故会在侧隙面留下“S”形痕迹[10]。由于钛合金强度高、弹性模量低及回弹较大，横刃较短的 A 型钻头在钻削时极易因强度不够导致横刃崩刃而失效。B 型和 C 型钻头横刃长度有所加长，强度也有所提高，但是横刃处的前角比 A 型大，在一定程度上会削弱其强度，故 B 型和 C 型钻头横刃没有出现崩刃现象，而是在齿隙面处出现微小崩缺。D 型钻头的横刃较长，强度较大，相同切削参数下只在横刃两端发生了轻微磨损，而较大的接触面积使横刃附近的其他区域产生粘屑现象。

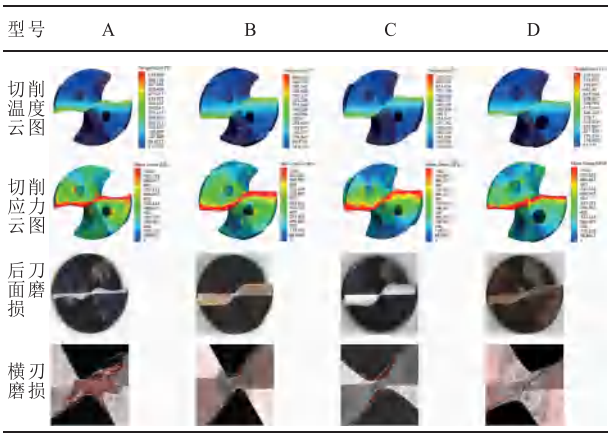


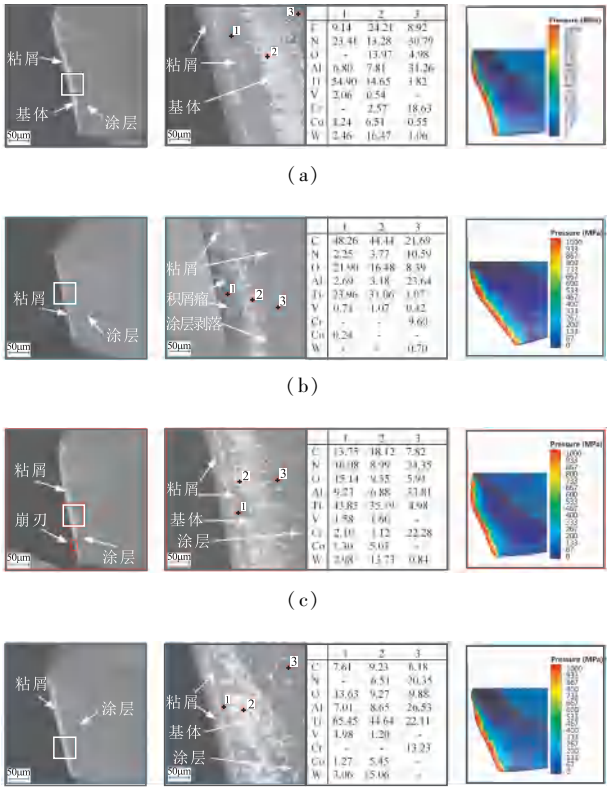
图 7 实验与仿真对比

(2)前刀面磨损

采用扫描电子显微镜分析四种钻头前刀面的磨损形貌(见图 8)。通过纵向对比四种钻头前刀面磨损，发现在切削刃附近均存在一定宽度的磨损带，该磨损带上靠近切削刃一侧粘有切屑，另一侧则与涂层相接。这是由于钻头进行切削时，切屑不断从前刀面流出，并在旋转和进给运动的共同作用下，与前刀面不断挤压和摩擦，导致切屑与工件接触处的涂层因摩擦而脱落。

从图中可以看出，钻头前刀面磨损在靠近钻尖中心处较窄，在主切削刃中心处最宽。在钻头旋转作用下，前刀面流出的切屑被卷曲成螺旋状，钻头向下的进给运动使螺旋状切屑沿着排屑槽向上排出，切屑与前刀面中间位置接触时间较长，摩擦较大，故

涂层剥落较宽。通过观察有限元仿真的前刀面可以发现,前刀面内切削刃附近存在一定宽度的高压力带,而切削刃中间区域压力面积最大,与实验钻头的前刀面磨损特征相符。



(a)

(b)

(c)

(d)

图 8 前刀面显微形貌

A 型钻头前刀面磨损较宽,涂层脱落面积较大,黏屑现象也较为严重,这主要与主切削刃的形状有关,其卷曲角最大,切削刃呈现出明显的内凹。B 型钻头钻削时,前刀面出现积屑瘤,这是因为切屑与前刀面的摩擦阻力较大,导致一部分切屑会滞留在前刀面处,高温高压作用下会黏附在前刀面上形成积屑瘤。C 型钻头主切削刃处存在小崩口,这是由于材料中存在杂质和硬质点。D 型钻头前刀面磨损与 C 型相似,主要表现为涂层脱落和粘屑,属于正常磨损。

4.3 切屑形态

H. Schulz 等[11]提出了一种量化锯齿切屑变形程度的的指标:G_s 值,该值越大,切屑的变形程度越大,其计算公式为

$$G_s = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \tag{2}$$

式中,H_1 和 H_2 分别为锯齿的齿顶和齿根高度,测量方法见图 9。

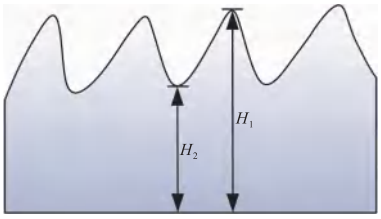
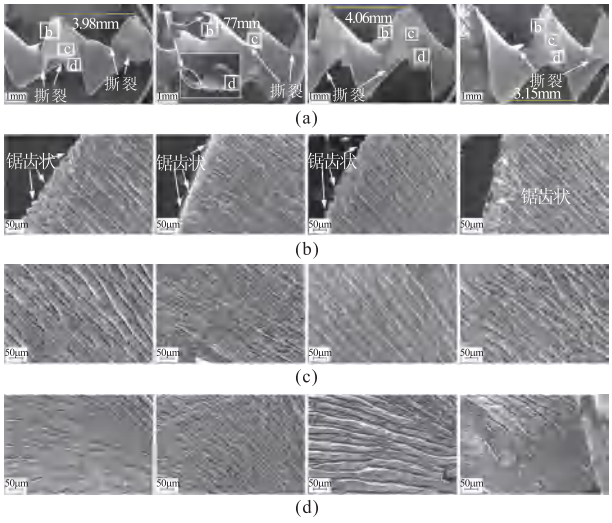


图 9 切屑锯齿高度测量方法

图 10 是在 $V_c = 40\text{m/min}$,$f = 0.12\text{mm/r}$ 下四种钻头切屑的微观形貌,由于主切削刃不同位置的切削速度和卷曲角不同,切屑也表现出不同的特征。

图 10a ~ 图 10d 分别是切屑整体图和自由表面不同位置的局部图。对比四种钻头螺旋切屑的螺距可知,C 型钻头的切屑螺距最长,B 型钻头的切屑螺距最短,A 型钻头与 C 型钻头螺距相近,D 型钻头切屑螺距长度位于 B 型钻头与 C 型钻头之间;B 型钻头钻削时存在堵屑情况,导致切屑之间相互挤压,螺距缩短,且切屑周边处出现小“针刺”,主要是钻削过程中堵屑导致一些不平衡的因素产生。同时,该钻头切屑撕裂情况也是最轻的,其撕裂长度基本与第二切削刃长度相同,故不易产生小碎屑;A 型钻头切屑撕裂最为严重,其次为 C 型和 D 型,故这三款钻头的断屑性能较 B 型钻头更好。



(a)

(b)

(c)

(d)

图 10 四种不同钻尖结构钻头钻削 TC4 的切屑微观形貌

四种切屑有一个共同的特点:切屑外缘呈锯齿状,中间和内侧呈鳞状或者层状结构[8]。这是因为切屑最外缘部分与钻头外缘转角处接触,此处的切削线速度和前角最大,在进给与旋转的共同作用下最外缘处产生的切屑沿前刀面不断卷曲,且卷曲程度随卷曲角的增大而增大。切屑最内侧部分靠近旋转中心,几乎完全是挤压状态,此处轴向前角偏小,线速度接近于 0,无法产生足够的应变来形成锯齿。

对比四种钻头切屑周边的锯齿化程度可以发现,A 型钻头与 D 型钻头切屑锯齿化较严重,C 型钻头其次,D 型钻头切屑锯齿化程度最小,但其齿距较小。这是因为 A 型钻头与 D 型钻头卷曲角较大,切屑卷曲更严重,B 型钻头卷曲角为负值,切削时形成的锯齿还存在被二次挤压的现象,导致形成的锯齿之间齿距较密。

A 型和 D 型钻头切屑自由表面呈鳞状结构,B 型和 C 型钻头切屑自由表面呈层状结构,这与切屑的流动速度和齿隙面角度有关。靠近钻头旋转中心,线速度很低,应变很小,切屑的 H_1 和 H_2 值接近,故锯齿化程度较低。A、D 型钻头横刃前角为负值,而 B、C 型钻头横刃前角为正值,负前角会使切削层受齿隙面的挤压变形更为严重,导致材料晶体剪切滑移变形增大,使得锯齿间的距离增加。在切削速度和横刃前角的综合作用下,切屑自由表面的中间位置和内侧呈现出鳞状结构或层状结构。

锯齿状切屑对切削过程有很大影响,锯齿越明显,切削力变化越大,刀具将不断承受交变载荷,极易发生损坏,刀具寿命降低,同时使已加工工件的表面粗糙度变差[5]。综合对比不同钻尖结构钻削 TC4 的切屑可以得出,C 型钻头的切屑较好,锯齿化程度较小,且螺旋切屑中每个单元的切屑更易断裂成碎屑,便于排出,减小堵屑对刀具和孔壁造成的损伤。

5 结语

本文对比了四种不同钻尖结构的钻头钻削 TC4 的切削性能,通过有限元仿真和实验对比,分析了切削力、前后刀面磨损、刀具寿命和切屑形貌。结果表明,四种钻头仿真钻削力与实验钻削力分别相差 7.3%,15.5%,10.8%,14.2%,具有较好的一致性。其中,前后刀面磨损与仿真应力、压力、温度云图存在对应关系,温度较高、应力和压力较大的位置磨损越严重。

(1)通过分析钻削力与钻尖结构的关系可知,横刃长度和轴向前角对钻削力有显著的影响。当横刃较短时,前角对切削力的影响较大;当横刃较长时,横刃长度为影响切削力大小的主要因素。

(2)通过对比分析钻头磨损发现,横刃是决定钻头寿命的关键部位,横刃较长的 D 型钻头,其寿命最长,磨损最小,但是切削力较大。因此在钻削 TC4 时,横刃选取 0.3 ~ 0.4mm,可以减小钻削力和提升刀具寿命。

(3)通过对比分析切屑的自由表面形貌和撕裂情况发现,C 型钻头锯齿化程度偏小、撕裂较大,易于形成碎屑,减少了堵屑情况的发生,有利于保护刀具和孔壁,故该钻头的综合断屑和排屑性能更好。

参考文献

[1]房晨,戴俊平. 麻花钻钻尖几何参数对 Ti6Al4V 钛合金钻削性能的影响[J]. 工具技术,2019,53(9):83 - 86.

[2]沈钰,白海清. 麻花钻几何参数对钛合金钻削性能的影响[J]. 工具技术,2018,52(4):99 - 103.

[3]韩荣第,吴健. 钛合金 TC4 的钻削力试验研究[J]. 工具技术,2009,43(1):25 - 27.

[4]胡立湘,李鹏南,陈明,等. TiAlN 涂层钻头钻削钛合金的实验研究[J]. 宇航材料工艺,2016,46(2):48 - 52.

[5]向志杨. 钻削典型难加工材料的断屑技术研究[D]. 沈阳:东北大学,2009.

[6]S Sharif, E A Rahim. Performance of coated and uncoated carbide tools when drilling titanium alloy Ti6Al4V[J]. Journal of Materials Processing Technology,2007,185(1):72 - 76.

[7]田卫军,李郁,何扣芳. TC4 钛合金钻削力和钻削温度仿真研究[J]. 机床与液压,2014,42(21):161 - 163.

[8]Zhaoju Zhu, Kai Guo, Jie Sun, et al. Evolution of 3D chip morphology and phase transformation in dry drilling Ti6Al4V alloys[J]. Journal of Manufacturing Processes,2018,34:531 - 539.

[9]王西彬,雷红. 麻花钻磨损特性的研究[J]. 工具技术,1999,34(3):11 - 14.

[10]张少文,李亮,何宁,等. 高速钢麻花钻的磨损试验研究[J]. 工具技术,2011,45(10):16 - 19.

[11]H Schulz, E Abele, A Sahm. Material aspects of chip formation in HSC machining[J]. CIRP Annals,2001,50(1):45 - 48.

第一作者:李志慧,硕士研究生,华东理工大学机械与动力工程学院,200237 上海市

First Author: Li Zhihui, Postgraduate, College of Mechanical and Power Engineering of East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

通信作者:何云,教授,华东理工大学机械与动力工程学院,200237 上海市

Corresponding Author: He Yun, Professor, College of Mechanical and Power Engineering of East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China