

# TiAlN 涂层钻头钻削钛合金的实验研究

胡立湘 李鹏南 陈明 邱新义

(湖南科技大学机电工程学院,湘潭 411201)

**文 摘** 采用 TiAlN 涂层硬质合金麻花钻对钛合金 (TC4) 进行钻削试验,研究了切削用量对轴向力、加工孔壁表面粗糙度和切屑形态的影响。结果表明:轴向力随着进给量的增加而增加,轴向力随着转速的增加而减小。运用指数公式模型对轴向力实验结果进行回归分析,得到轴向力与转速以及进给量之间的关系式,并对该方程进行了检验验证误差均小于 7%;随着进给量的增加断屑能力逐渐增加,切屑长度逐渐变短。在低转速和进给量为 50 mm/min 时切屑形态为短螺旋形切屑,此时排屑和孔壁粗糙度均为最佳。

**关键词** 钛合金,切削用量,轴向力,回归分析,切屑形态,孔壁表面粗糙度

中图分类号:TH16

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.02.011

## Investigation on Drilling Performance of Titanium Alloy by TiAlN Coated Drills

HU Lixiang LI Pengnan CHEN Ming QIU Xinyi<sup>1</sup>

(College of Electronic and mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

**Abstract** The drilling on titanium alloy (TC4) performance of TiAlN coated carbide twist drill was investigated focusing on the influence of cutting parameter on drilling axial force, surface roughness of hole wall and chip shape. The results showed that drilling axial force increases with the increase of feed rate. Drilling axial force increase with the decrease of speed. The exponential formula models of drilling force were obtained through regression analysis method and the regulation of the drilling force about TC4 influenced by the feed and cutting speed was obtained. The error of the equation has been tested less than 7%. With the increase of feed rate, chip breakability increase and chip length get shorter gradually. When feed rate is 50mm/min and speed is low, chip morphology is short spiral chips, and chip removal and hole side roughness are the best.

**Key words** Titanium alloy, Cutting parameter, Drilling axial force, Regression analysis, Chip morphology, Surface roughness of hole wall

### 0 引言

钛合金是具有较大比强度的金属结构材料,并且具有耐腐蚀、耐低温和高温强度高特性<sup>[1]</sup>,目前已广泛运用<sup>[2]</sup>。通常钛合金按退火后的组织划分为: $\alpha$ 相钛合金, $\beta$ 相钛合金和 $\alpha+\beta$ 相钛合金。其中 $\alpha+\beta$ 相钛合金(如 TC4)的运用相比于 $\alpha$ 相钛合金和 $\beta$ 相钛合金更为广泛<sup>[3]</sup>。TC4 是双相组织合金,其有切屑变形小,切削温度较高,加工硬化现象较严重,弹性系数较小等加工特点,属于典型难加工材料<sup>[4]</sup>。以往众多专家学者在改善钛合金制孔质量方面做了很多工作。L. RUI 等<sup>[5]</sup>研究了不同加工深度下钻削力和

扭矩的变化趋势,结果表明随着钻削深度的增加,轴向力和扭矩逐渐增加。韩荣第等<sup>[6]</sup>,研究分析了钻头直径,钻削参数和钻头材料对钻削轴向力的影响,结果表明钻头直径对钻削轴向力影响最大,钻削参数对轴向力影响最小。M. SENTHILKUMAR<sup>[7]</sup>分析了钻削叠层板碳纤维复合材料-钛合金时切屑的形成原因,结果表明钻削时钛合金层主要形成中长带状切屑,不利于排屑。田卫军等<sup>[8]</sup>通过有限元仿真获得了钻削钛合金加工过程中钻削参数对钻削力和钻削温度的影响规律。向志杨等<sup>[9]</sup>对钛合金等难加工材料钻削断屑技术进行了系统的分析,并提出了振动钻

收稿日期:2015-09-13

基金项目:国家自然科学基金(51275168)

作者简介:胡立湘,1991 年出生,硕士研究生,研究方向为碳纤维复合材料-钛合金叠层板加工系列化刀具切削性能评价。E-mail: jiekougeqian@163.com

削断屑的方法。本文采用 TiAlN 涂层钻头钻削钛合金 TC4,对钻削过程中切削用量与钻削力、表面粗糙度、切屑形态之间的关系进行研究,并对切屑形态与孔壁粗糙度之间的关系进行分析研究。

## 1 试验

### 1.1 材料和刀具

工件材料为 Ti6Al4V,板厚为 10 mm,工件材料的力学性能为:抗弯强度为 1 058 MPa,屈服强度为 980 MPa,断后伸长率为 8%,断面收缩率为 39%。化学成分为:Al、V、Fe、C、O、N、H,分别占比 6.2%、4.3%、0.26%、0.02%、0.17%、0.02%、0.001%。实验所用刀具为株洲钻石公司生产的直径为 6 mm TiAlN 涂层钻头,该钻头为带 TiAlN 涂层的整体硬质合金麻花钻,刀具的几何参数为:螺旋角 25°、钻顶角 140°、横刃长度 0.08 mm、钻头直径 6 mm。

### 1.2 设备

钻削试验平台包括机床(KV800 数控床身铣床)、测力仪、垫板、夹具、计算机等。实验采用由 kistler 9253B23 三向压电式测力仪、5080 型电荷放大器、PCIM-DAS1602/16 数据采集卡和切削力采集软件 DynoWare 构成的测力系统同时测量  $x$ 、 $y$  和  $z$  三个方向的钻削力,采样频率设置为 8 kHz。切屑形态采用日本基恩士超景深三维显微系统(KEYENCE VHX-500FE)进行拍照观测。采用 MarSurf M300 表面结构测量仪进行孔内壁粗糙度测量。

### 1.3 试验方法

在进给速度分别为 10、30、50、70、90 mm/min,转速分别为 700、900、1 100 r/min 的参数下进行两次重复全面钻削实验,每钻削一组参数即换刀,钻孔间中心距为 10 mm,钻削力取二次试验的平均值。

## 2 结果和讨论

### 2.1 钻削轴向力的分析

#### 2.1.1 钻削轴向力与切削用量的关系

不同转速下钛合金钻削力随进给量变化规律如图 1 所示,转速越高轴向力越小,进给量越大轴向力越大。

在转速相同时,随着进给速度增大,轴向力明显上升。在 900 r/min 的转速下,进给速度为 10、30、50、70 mm/min 分别比 90 mm/min 的轴向力小了 35.2%、17.9%、8.6%、3.6%。这可能是由于以下两个原因造成:一是,钻削加工时,因为进给量  $v$  的增大,切削厚度  $h_D$  增大 [ $h_D = (v/2) \sin \Phi$ ] 故轴向力增大;二是,切削厚度  $h_D$  的增大,又导致切削变形系数减小,导致轴向力减小<sup>[9]</sup>;两种结果综合影响导致随着进给量的增加轴向力也增加。

在相同进给速度下,轴向力随转速增加而降低,宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第 2 期

在进给速度为 70 mm/min 下,转速 700、900 r/min 分别比 1 100 r/min 的轴向力大了 27.2%、9.7%。这可能是由于钛合金材料的热导率低,散热情况差,导致切削温度升高<sup>[7]</sup>,使得切屑粘结在切削刃上,导致排屑受阻,增大了轴向力。

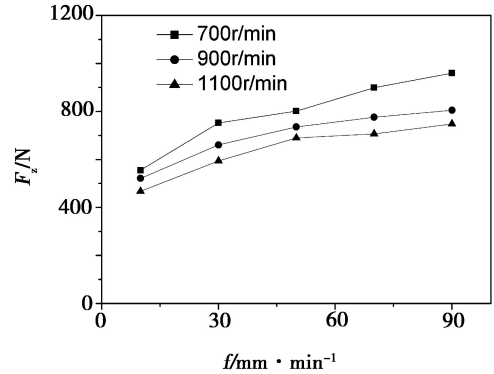


图 1 钻削钛合金轴向力变化规律

Fig. 1 Variation of drilling axial force with feed rate and cutting speed

#### 2.1.2 钻削轴向力预测模型及验证

##### 2.1.2.1 钻削力建模

采用回归分析方法,建立 TiAlN 涂层钻头钻削力经验公式。在加工材料和刀具几何参数确定的前提下,指数关系能够较好的预测切削力与切削参数之间复杂的关系,设钻削力经验公式的通用形式为<sup>[10]</sup>:

$$F_z = D \times n^i \times v^j \quad (1)$$

$$v = n \times f_r \quad (2)$$

式中, $D$ 为常数; $F_z$ 为轴向力; $n$ 为主轴转速; $v$ 为进给速度; $f_r$ 为每转进给量。

##### 2.1.2.2 钻削力的拟合公式

把选中的实验数据代入统计分析软件 Matlab 进行结果的拟合,得到钻削力模型系数。为了验证该理论模型预测值的准确性,试验安排进给量为 10 mm/min,转速为 700、900 和 1 100 r/min 的参数来校验理论值和实测值的符合度。

钻削力经验公式拟合得:

$$D = 9053.4, i = -0.4860, j = 0.2026$$

其表达式为:

$$F_z = 9053.4 \times n^{-0.2834} \times f_r^{0.2026} \quad (3)$$

从上式可以看出,钛合金的轴向力与转速和进给量都密切相关。

##### 2.1.2.3 钻削力公式的验证

表 1 为进给量为 10 mm/min,转速为 700、900 和 1 100 r/min 的参数下,轴向力的理论预测值与实测值比较分析表。可知,钛合金轴向钻削力的最大误差为 6.7%,轴向误差值均小于 7%,说明理论公式预测的轴向力同实验所得的轴向力较符合。

表1 理论预测值与实测值比较

Tab.1 Comparative analysis of theoretical predictions and measured values

进给速度 /mm·min <sup>-1</sup>	主轴转速 /r·min <sup>-1</sup>	TC4 轴向钻削力		
		实测值/N	理论值/N	误差/%
10	700	555.2	595.5	6.7
10	900	521.6	528.2	1.3
10	1100	467.9	479.0	2.3

## 2.2 切屑形态分析

钻削过程中切屑形态是评价其能否顺利钻削的最重要因素。如果钻削过程中切屑能够顺利排出,那么钻削将十分顺利。大多数韧性材料在钻削过程中切屑很难折断,从而形成连续性切屑。连续形切屑可以分为螺旋状和字符串状。如图2所示,螺旋形切屑的结构决定其绕自己的轴向上运动,但是这种运动仅仅是在钻削薄板时<sup>[6]</sup>。

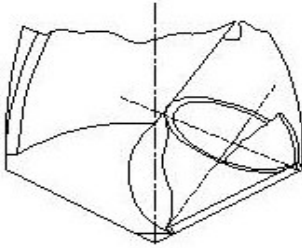


图2 切屑形成图

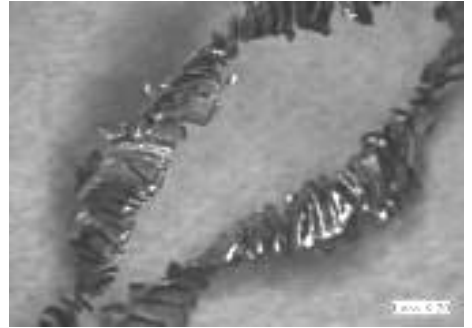
Fig.2 Chip formation

### 2.2.1 切削用量对切屑形态的影响

随着进给量增加切屑形态逐渐变化,转速对切屑形态的影响较小。图3为不同转速和进给量下切屑形态。当每转进给量为0.009~0.03 mm/r时,切屑绕成一团,此时切屑缠绕在钻头上。这是由于每转进给量太小,导致切屑的横截面积小(切屑的刚度随着切屑的横截面积增加而增加),切屑难以顺利断屑;当每转进给量为0.03~0.07 mm/r时,切屑为带状长屑,此时切屑堵塞螺旋槽,损害孔加工质量。这是由于进给量增加导致切屑横截面积增加,但由于切削温度随着进给量的增加而升高<sup>[7]</sup>,导致切屑开始粘结在切削刃上,阻塞切屑流动;当每转进给量为0.07~0.09 mm/r时,开始出现螺旋长屑,其余为带状长屑,切屑能较顺利排出。这是由于进给量增加导致切削厚度增加,刚开始时切屑顺利断屑,出现长螺旋状切屑,随着进给量的增加切削温度继续升高<sup>[7]</sup>,切削刃上粘结切屑增加,切屑出现堵塞,形成带状长屑;当每转进给量为0.09~0.12 mm/r时,螺旋短屑和带状短屑,切屑顺利排出。这是由于随着切屑横截面积的增加,断屑更加容易,使螺旋状切屑变短。切屑温度的升高导致切屑出现堵塞,形成带状短屑。



进给量 14 μm/r(10 mm/min);轴向力 555.2 N



进给量 43 μm/r(30 mm/min);轴向力 752.4 N



进给量 71 μm/r(50 mm/min);轴向力 801.9 N



进给量 100 μm/r(70 mm/min);轴向力 899.4 N



进给量 129 μm/r(90 mm/min);轴向力 960.0 N

(a) 转速 n=700 r/min



进给量  $11 \mu\text{m/r}$  ( $10 \text{ mm/min}$ ); 轴向力  $521.6 \text{ N}$



进给量  $33 \mu\text{m/r}$  ( $30 \text{ mm/min}$ ); 轴向力  $660.5 \text{ N}$



进给量  $56 \mu\text{m/r}$  ( $50 \text{ mm/min}$ ); 轴向力  $735.7 \text{ N}$



进给量  $78 \mu\text{m/r}$  ( $70 \text{ mm/min}$ ); 轴向力  $776.4 \text{ N}$

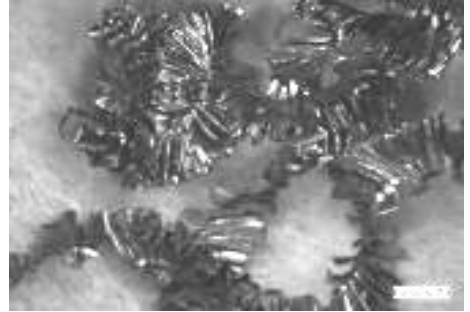


进给量  $100 \mu\text{m/r}$  ( $90 \text{ mm/min}$ ); 轴向力  $805.1 \text{ N}$

(b) 转速  $n=900 \text{ r/min}$



$9 \mu\text{m/r}$  ( $10 \text{ mm/min}$ ); 轴向力  $467.9 \text{ N}$



$27 \mu\text{m/r}$  ( $30 \text{ mm/min}$ ); 轴向力  $595.0 \text{ N}$



$45 \mu\text{m/r}$  ( $50 \text{ mm/min}$ ); 轴向力  $689.9 \text{ N}$



$64 \mu\text{m/r}$  ( $70 \text{ mm/min}$ ); 轴向力  $707.3 \text{ N}$



$82 \mu\text{m/r}$  ( $90 \text{ mm/min}$ ); 轴向力  $748.2 \text{ N}$

(c) 转速  $n=1100 \text{ r/min}$

图3 不同转速和进给量下切屑形态

Fig.3 Chip morphology under different feed rate and cutting speed

### 2.2.2 切削用量对孔内壁表面粗糙度的影响

已加工表面粗糙度对工件的使用性能有多方面影响,诸如:接触刚度、密封性、耐磨性、疲劳强度等。因此对已加工表面粗糙度应予以足够重视。影响已加工表面粗糙度的因素主要有两种:几何因素和非几何因素。由于在实际加工过程中非几何因素影响的已加工表面粗糙度通常比几何因素大的多,主要考虑非几何因素。非几何因素主要包括切屑对孔壁的刮伤、刀具磨损、切削液的使用等。本文主要考虑由加工参数导致的切屑形态的改变,从而导致孔壁表面粗糙度的变化。

图4为不同转速和不同进给量下孔壁表面粗糙度的柱状图。当进给量确定时,随着转速的增加孔壁表面粗糙度也增加。在进给量为10 mm/min时,转速为700 r/min相比转速为900和1100 r/min孔壁表面粗糙度小了34.1%和37.1%。这可能是由于当转速逐渐升高时,钻削摩擦力和钻头磨损势必增加导致钻削过程不稳定,因此孔壁表面粗糙度增加。在转速为900 r/min时,进给量为10 mm/min孔壁表面粗糙度分别比进给量为30 mm/min、进给量为50、70、90 mm/min大了42.0%、65.2%、45.4%、54.7%。这可能是由于以下两个原因造成:一是,进给量过小导致切屑不能自然断屑,使切屑过长,不易沿着螺旋槽排出从而堵塞螺旋槽,导致刮伤孔内壁。但是,当进给量过大时,切屑的横截面积过大(切屑的刚度随着切屑的横截面积增加而增加),切屑太硬又导致孔壁刮伤更严重;二是,进给速度过大会导致钻削过程不稳定,从而导致孔内壁表面粗糙度变差。两种因素综合影响导致随着进给量的增加孔壁表面粗糙度先减小后增加。在较低转速和进给量为50 mm/min时,孔壁粗糙度最佳。

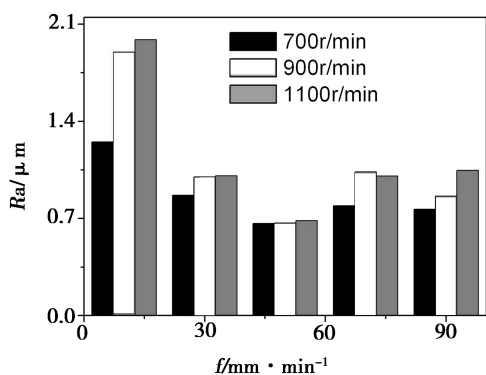


图4 钻削钛合金孔壁表面粗糙度柱状图

Fig.4 Titanium drill hole wall surface roughness histogram

### 3 结论

(1)钛合金的轴向钻削力随着转速增加而减小,在900 r/min的转速下,进给速度为10、30、50、70

mm/min分别比90 mm/min的轴向力小了35.2%、17.9%、8.6%、3.6%;随着进给量的增加而增加,在进给速度为70 mm/min下,转速700、900 r/min分别比1100 r/min的轴向力大27.2%、9.7%;通过回归分析可得到钻削轴向力的经验公式,误差均小于7%,根据上述拟合表达式,可对钻削轴向力进行预测。

(2)随着每转进给量增加切屑形态逐渐变化,当每转进给量为0.009~0.03 mm/r时,切屑绕成一团,当每转进给量为0.03~0.07 mm/r时,切屑为带状长屑,当每转进给量为0.07~0.09 mm/r时,开始出现螺旋长屑和带状长屑,当每转进给量为0.09~0.12 mm/r时,切屑为螺旋短屑和带状短屑。

(3)当进给量确定时,随着转速的增加孔壁表面粗糙度也增加。在进给量为10 mm/min时,转速为700 r/min相比转速为900和1100 r/min孔壁表面粗糙度小了34.1%和37.1%。在转速为900 r/min时,进给量为10 mm/min孔壁表面粗糙度分别比进给量为30、50、70 mm/min、进给量为90 mm/min大了42.0%、65.2%、45.4%、54.7%。在低转速和进给量为50 mm/min时,孔壁粗糙度最佳。

### 参考文献

- [1] 艾兴著.高速切削加工技术[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [2] 何宁.高速切削技术[M].上海:上海科学技术出版社,2012.
- [3] 倪沛彤,韩明臣.宇航飞行器紧固件用钛合金的发展[J].钛工业进展,2012,29(3):6-9.
- [4] 陈明.高速切削技术基础与应用[M].上海:上海科学技术出版社,2012.
- [5] RUI L,PARAG H. High-throughput drilling of titanium alloys[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture 2007,47: 63-74.
- [6] 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.
- [7] SENTHILKUMAR M. Study on tool wear and chip formation during drilling carbon fiber reinforced polymer(CFRP)/titanium alloy(Ti6Al4V) stacks:International conference on design and manufacturing, Icondm 2013, India[C]. Selection and peer-review under responsibility of the organizing and review committee of Icondm,2013.
- [8] 田卫军,李郁,何扣芳.钛合金钻削力和钻削温度仿真研究[J].机床与液压,2014,21(1):161-163.
- [9] 向志杨,邹平.钻削典型难加工材料的断屑技术研究[D].沈阳:东北大学,2009.
- [10] 李桂玉,李剑峰,孙杰,等.硬质合金钻头钻削碳纤维增强复合材料工艺[J].粉末冶金材料科学与工程,2010,15(6):580-585.