

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.003

用于钛合金通孔攻丝的丝锥参数优化设计

李辰泽^{1,2}, 余浩东³, 梁铖³, 杨瑞², 李文生^{1,2}, 黎向锋³

(1. 天津市紧固连接技术企业重点实验室, 天津 300399;

2. 航天精工股份有限公司, 天津 300399;

3. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 针对钛合金小直径 MJ 螺纹攻丝易造成刀具磨损快、攻丝转矩大等问题, 在标准丝锥结构设计基础上, 利用 ABAQUS 有限元仿真软件对钛合金攻丝过程进行仿真模拟。采用单因素和正交设计方法, 以最大转矩为指标, 研究丝锥锥角、前角、后角、刃倾角以及主轴转速对攻丝过程的影响规律, 优化丝锥结构参数和工艺参数。研究得到最优方案为丝锥刃倾角 9°、丝锥前角 13°、丝锥后角 4°、主轴转速 420 r/min, 转矩值、推力等显著下降。

关键词: TC4; 丝锥; 攻丝; 参数优化; ABAQUS

中图分类号: TG62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)04-0017-04

Optimum Design of Tap Parameters for Titanium Alloy Through Hole Tapping

LI Chenze^{1,2}, YU Haodong³, LIANG Cheng³, YANG Rui², LI Wensheng^{1,2}, LI Xiangfeng³

(1. Tianjin Key Laboratory of Fastening Technology, Tianjin 300399, China;

2. Aerospace Precision Industry Co., Ltd., Tianjin 300399, China;

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Concerning the fast tool wear and high tapping torque in tapping process of titanium alloy with small diameter MJ thread, the ABAQUS finite element simulation software is used to simulate the process based on the design of standard tap structure. With the maximum torque taken as the index, the effects of tap Angle, front Angle, back Angle, edge Angle and spindle speed on tapping process are studied by single factor and orthogonal design method, and tap structure parameters and process parameters are optimized, by which the optimal scheme is obtained with the tap edge Angle being 9°, the tap front Angle 13°, the tap back Angle 4°, the spindle speed 420 r/min, and the torque value and thrust are significantly reduced.

Keywords: TC4; tap; tapping; parameter optimization; ABAQUS

0 引言

钛合金(TC4)比强度高、耐腐蚀性及抗疲劳性能好^[1-2], 广泛应用于航空航天领域。由于其较低的弹性模量和热导率, 攻丝过程中工件材料回弹大, 散热性差。相较于其他切削工艺, 其刀具磨损、排屑困难现象更为显著。目前, 大多数丝锥厂家生产的主要是 M 螺纹丝锥, 因此, 建立 MJ 小直径螺纹攻丝过程的三维有限元模型, 优化丝锥的结构参数和攻丝过程的工艺参数, 提高丝锥耐用度和 MJ 螺纹牙型质量, 为企业高效稳定生产奠定技术基础。

自锁螺母具有防振、可重复使用等优点, 在航空航天领域中被广泛使用。航空航天螺纹连接多采用具有更高连接强度和抗冲击性能的米制螺

纹(MJ 螺纹)。米制螺纹增大了牙底圆弧半径, 减少了应力集中; 在相同直径下, 其抗拉强度大于普通 M 螺纹抗拉强度^[3]。国内外学者对丝锥结构和工艺参数优化做了许多研究。通过直槽丝锥干攻丝实验, 研究了切削锥和主轴转速对轴向中径差的影响^[4]。文献[5-7]利用 Juwop/W 软件、CNC 螺旋槽磨沟机与 SP2000 轮廓仪以及 Matlab 软件对螺旋槽丝锥结构参数优化, 进而提高丝锥的使用寿命。文献[8-9]为了解决螺尖丝锥在攻丝过程中转矩值大易折断报废的问题, 优化了丝锥刃倾槽和切削锥的结构参数, 文献[10]选取合适的丝锥材质和涂层。文献[11]探究实验和仿真模拟的转矩值, 在攻丝过程中直槽丝锥相较于螺旋槽丝锥承受着更高载荷。文献[12]改变切削参数和刃口半径可以建立良好的塑性变形深度

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U20A20293); 天津市紧固连接技术企业重点实验室项目(TKLF2022-01-B-02)

第一作者简介: 李辰泽(2000—), 男, 天津蓟县人, 本科, 研究方向为内螺纹加工, 1822082256@qq.com。

与力学性能(断裂韧性和屈服强度)的映射关系。文献[13]建立了一种新型刀柄加工内螺纹的仿真模型。文献[14]仿真结果表明:所提出的刀柄不仅降低了最大应力,而且相较于传统切削形成的内螺纹稳定性更高。基于物理气相沉积(PVD)技术的涂层在TiAlN涂层最有利情况下使刀具寿命增加了一倍。

因此,对小直径MJ螺纹攻丝的丝锥结构和工艺参数优化还需要进一步研究。本文在直槽丝锥和螺尖丝锥三维模型和完成攻丝过程有限元模型的建立与验证的基础上,对螺尖丝锥攻丝过程的影响因素进行单因素试验和正交设计分析,以获得优化的丝锥结构参数和攻丝工艺参数。

1 直槽丝锥和螺尖丝锥的攻丝过程有限元模型建立及验证

1.1 丝锥的三维模型建立

在SolidWorks软件中建立两种丝锥三维模型,具体建模过程依次为毛胚体、MJ螺纹牙型、螺纹铲背和形成切削锥、容屑槽形状、后刀面铲磨及刀柄设计;螺尖丝锥在建模过程中增加将直槽转变为刃倾槽的设计,如图1所示。丝锥牙型尺寸按标准MJ6的内螺纹要求。

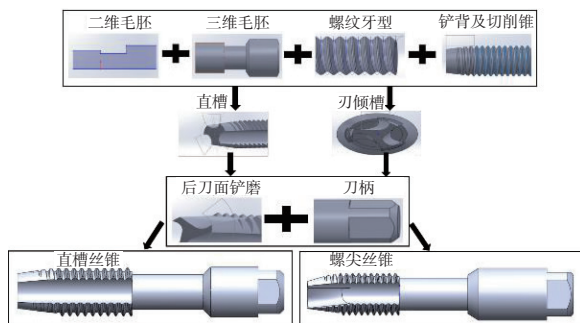


图1 直槽丝锥和螺尖丝锥三维建模过程

1.2 攻丝过程有限元模型建立及验证

ABAQUS软件作为目前国内主流的切削仿真类软件之一,因其具有强大的非线性求解功能,从而适合求解攻丝这类大变形、非线性模型。采用ABAQUS建立有限元模型的步骤包括部件创建、材料分配、装配设置、输出设定、网格划分、接触设置、载荷定义、提交模拟以及后处理分析。

在攻丝过程中,刀具切削齿是载荷主要作用位置,因此是研究重点。文献[15]在Deform 3D软件中对完整工件模型进行攻丝模拟大概需要4 320 h。选取刀具局部模型,并在丝锥切削齿部

分后的每侧刀齿多加一个校准齿,可切削出完整内螺纹牙型,如图2所示。本文初始选择高度 $1.2P$ 的工件模拟。

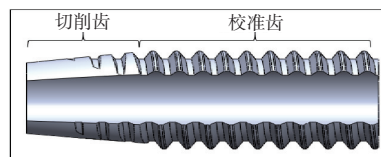


图2 刀具简图

为了保证牙型质量和提升仿真效率,探究在高度一定时,得到不同圆心角工件的仿真结果。最终选取圆心角为 15° 及高度为 $1.2P$ 的工件进行仿真计算,由此获得的内螺纹牙型质量高、表面光滑,且能避免工件出现表面缺陷问题,如图3所示。

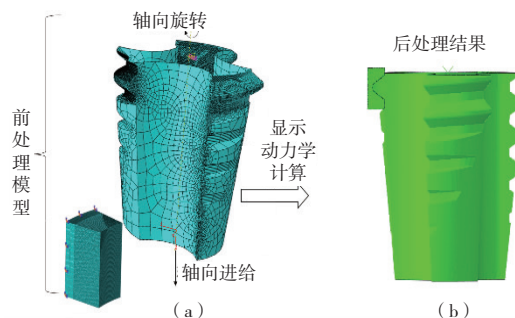


图3 攻丝过程模型建立及牙型结果

攻丝实验结果与模拟结果对比如图4所示,图4(a)是实际自动攻丝机床上加工时产生的细长切屑,与图4(b)在ABAQUS仿真软件中得到的切屑形态吻合。将实际加工产品的内螺纹金相(图4(c))与模拟得到的内螺纹牙型(图4(d))对比发现仿真获得的内螺纹牙型完整,无明显痕迹裂纹,表面质量好,牙底处有光滑圆弧过渡且与实际自动攻丝后内螺纹牙型形貌基本一致。通过对比切屑形态和内螺纹牙型验证了攻丝有限元仿真模型的有效性。



(a) 实际生成切屑



(b) 模拟生成切屑

2 攻丝试验单因素方案设计

攻丝过程主要受刀具结构以及丝锥转速的影

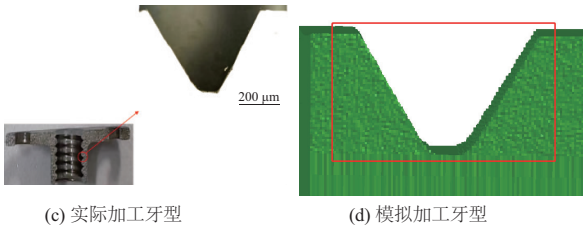
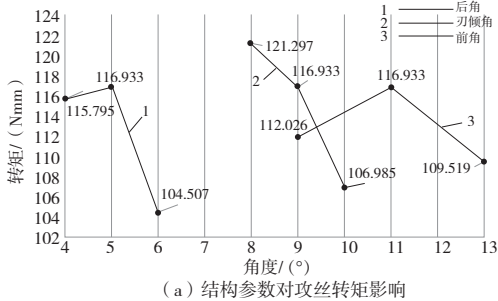


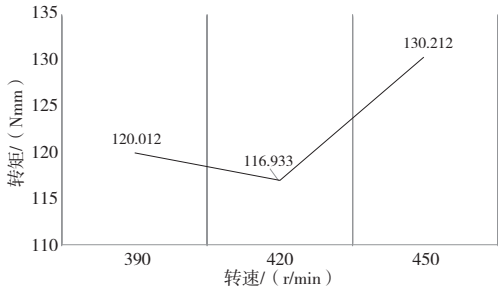
图 4 攻丝实验结果与模拟结果对比

响较大。选取攻丝过程的最大转矩值作为优化性能指标,对螺尖丝锥影响因素(锥角 8.5°;刃倾角 8°、9°、10°;前角 9°、11°、13°;后角 4°、5°、6°;转速 390 r/min、420 r/min、450 r/min)进行单因素分析。

如图 5 所示,在试验所选范围内,随着后角增大,攻丝转矩值呈现先缓慢增大后迅速减小,螺尖丝锥攻丝时,在保证一定刀具强度下,可选择较大后角切削。随着刃倾角增大,转矩值逐渐降低,由于刃倾角越大,致使实际工作前角增大,切削刃更锋利,更有利于切削。随着前角增大,转矩值呈现先增大后减小的趋势。随着转速升高,攻丝转矩先减小后逐渐增大,且增大阶段变化更快,故实际生产时,应选择适中的攻丝主轴转速。



(a) 结构参数对攻丝转矩影响



(b) 转速对攻丝转矩影响

图 5 螺尖丝锥在不同攻丝条件下的转矩曲线图

3 螺尖丝锥攻丝试验正交方案设计

3.1 正交方案设计

因攻丝时影响攻丝转矩的因素较多,且各因素之间交叉影响关系复杂,利用正交试验方法得到的因素组合更可靠且节省时间成本。本文以对

攻丝过程影响较大的 4 个参数即刃倾角、前角、后角以及主轴转速为自变量,以最大转矩值为试验指标。因素水平如表 1 所示。

表 1 因素水平表

水平	刃倾角/(°)	前角/(°)	后角/(°)	转速/(r/min)
1	8	9	4	390
2	9	11	5	420
3	10	13	6	450

按上述正交试验方案,选用 L9 正交实验表,结果如表 2 所示。

表 2 攻丝转矩正交试验表

试验号	刃倾角/(°)	前角/(°)	后角/(°)	转速/(r/min)	最大转矩/(Nmm)	最大轴向力/N
1	8	9	4	390	102.380	38.896
2	8	11	5	420	121.297	45.984
3	8	13	6	450	115.092	43.792
4	9	9	5	450	109.401	40.930
5	9	11	6	390	125.391	56.194
6	9	13	4	420	100.467	38.080
7	10	9	6	420	122.160	46.223
8	10	11	4	450	119.452	44.950
9	10	13	5	390	116.606	44.522

3.2 极差分析

利用极差分析方法对表 2 结果分析,求得试验的主次因素、优水平、优搭配,这种方法也称 R 法。如表 3 所示。其中 K1、K2、K3 分别为每个因素的水平,和 $\overline{K1}$ 、 $\overline{K2}$ 、 $\overline{K3}$ 为 K1、K2、K3 的平均值;R 为 K1、K2、K3 的极差值,极差值越大,则该因素影响程度越大。

表 3 极差分析表

参数	刃倾角(A)	前角(B)	后角(C)	转速(D)
K1	338.769	333.941	322.299	344.377
K2	335.259	366.140	347.304	343.924
K3	358.218	332.165	362.643	343.945
$\overline{K1}$	112.923	111.314	107.433	114.792
$\overline{K2}$	111.753	122.047	115.768	114.641
$\overline{K3}$	119.406	110.722	120.881	114.648
R	7.653	11.325	13.448	0.151
因素主次	CBAD			
最优方案	C1B3A2D2			

从表3可知,螺尖丝锥加工钛合金的攻丝性能影响大小因素依次为后角>前角>刃倾角>转速。

攻丝过程中,为提高丝锥寿命和螺纹牙型质量,力求降低最大攻丝转矩值,故应选择4个因素(丝锥刃倾角、丝锥前角、丝锥后角、主轴转速)中最小值对应的水平。因此最优方案为丝锥刃倾角 9° 、丝锥前角 13° 、丝锥后角 4° 、主轴转速 420 r/min 。

4 结语

1) 基于 ABAQUS 软件建立并验证了 MJ 螺纹攻丝过程有限元仿真模型,探讨直槽丝锥和螺尖丝锥的结构参数和攻丝工艺参数对最大攻丝转矩的影响规律。

2) 利用正交实验法和极差法综合分析各因素对攻丝过程的综合影响,得到螺尖丝锥攻钛合金时影响因素主次顺序为:丝锥后角、丝锥前角、丝锥刃倾角、主轴转速。最优方案为丝锥后角 4° 、丝锥前角 13° 、丝锥刃倾角 9° 、主轴转速 420 r/min 。

3) MJ 小直径螺纹丝锥结构参数和攻丝工艺参数的优化,为企业螺母的高效生产奠定了基础。

参考文献:

- [1] SHOKRANI A, AL-SAMARRAI I, NEWMAN S T. Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 43: 229-243.
- [2] SHOKRANI A, DHOKIA V, NEWMAN S T. Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 21: 172-179.
- [3] 李永,张昆. MJ 螺纹与普通螺纹强度试验与分析[J]. 科技风, 2011(21): 63-64.
- [4] 任杰,李婷婷,孟宇,等. 切削锥长度和主轴转速对干攻丝中径差的影响[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(1): 61-64.

- [5] 高盈佳,刘海涛,薛锴. 螺旋槽丝锥槽型优化设计[J]. 工具技术, 2017, 51(5): 81-84.
- [6] 肖琦,董向阳,王树林,等. 螺旋槽丝锥槽型参数优化及其攻丝过程分析[J]. 工具技术, 2019, 53(12): 63-66.
- [7] 尹辉俊,金剑,杨平辉. 基于 MATLAB 的大螺距螺旋槽丝锥优化设计[J]. 煤矿机械, 2012, 33(2): 38-39.
- [8] 刘海涛,符国建. C70S6 材料连杆用螺尖丝锥的优化设计与应用[J]. 工具技术, 2020, 54(11): 66-69.
- [9] 王宗伟,董向阳,王树林,等. 螺尖丝锥槽型几何参数对攻丝的影响[J]. 工具技术, 2020, 54(1): 73-76.
- [10] 林欧,赵文昌. 硬孔攻丝用高性能先端丝锥的设计及应用[J]. 工具技术, 2020, 54(5): 41-43.
- [11] OEZKAYA E, BIERMANN D. Development of a geometrical torque prediction method (GTPM) to automatically determine the relative torque for different tapping tools and diameters[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1): 1465-1479.
- [12] LI B X, ZHANG S, SUN Y J, et al. On the correlation between processing parameters, plastic deformation, and mechanical property in hard machining of H13 steel[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2024, 238(1/2): 85-94.
- [13] FERNÁNDEZ-LUCIO P, GIL DEL VAL A, PLAZA S, et al. Threading holder based on axial metal cylinder pins to reduce tap risk during reversion instant[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 66: 845-859.
- [14] GIL DEL VAL A, VEIGA F, PEREIRA O, et al. Threading performance of different coatings for high speed steel tapping[J]. Coatings, 2020, 10(5): 464.
- [15] OEZKAYA E, BIERMANN D. Segmented and mathematical model for 3D FEM tapping simulation to predict the relative torque before tool production[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017 (128/129): 695-708.

收稿日期: 2023-10-20