

涂层对麻花钻刀具钻削性能影响的仿真分析

张小石, 朱智勇, 姜黎明, 黄 勇, 侯冬冬

(重庆建设工业(集团)有限责任公司, 重庆 400054)

摘 要:研究麻花钻钻头涂层对钻削性能的重大意义, 刀具涂层很大程度上提高了刀具的抗磨损能力, 延长了刀具加工使用寿命。运用 advantEdge 软件对麻花钻加工钛合金建立有限元仿真模型, 通过仿真得到无涂层、TiAlN 涂层、TiN 涂层 3 种情况下刀具压力、应力、速度的云图。TiN 涂层刀具的钻削性能优异。研究了 3 种情况下加工孔的数量与钻头中间区域、外缘区域磨损量的关系分布规律。分别研究了 TiN 涂层膜厚 1、2、3 μm 3 种情况下加工孔的数量与钻头中间区域、外缘区域磨损量的关系。选用钻头中间区域、外缘区域磨损量对钻削性能进行评估。结果表明: TiAlN 涂层、TiN 涂层的刀具寿命分别是无涂层刀具的 2.2 倍和 4 倍; 钻头中间区域、外缘区域的磨损量与加工孔数量呈正相关分布, 3 μm TiN 涂层刀具寿命是 1 μm 涂层刀具的 2.75 倍。该研究为麻花钻涂层刀具设计提供了理论依据和优化方案。

关键词: 刀具涂层; 磨损量; advantEdge 仿真

中图分类号: TG713; TG529 文献标志码: A 文章编号: 1673-4602(2026)01-0068-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4602.2026.01.009

Simulation analysis of the effect of coating on the drilling performance of twist drill tool

ZHANG Xiaoshi, ZHU Zhiyong, JIANG Liming, HUANG Yong, HOU Dongdong
(Chongqing Jianshe Industry (Group) Co., Ltd., Chongqing 400054, China)

Abstract: It is of great significance to investigate the effect of twist drill bit coating on its drilling performance, which can greatly improve the anti-wear ability of the tool and prolong its service life. In this study, the advantEdge software was used to construct the finite element simulation model of twist drill machining titanium alloy. The cloud diagrams of tool pressure, stress and velocity for three kinds of coatings, which are no coating, TiAlN-coated and TiN-coated, were obtained by simulation. The results show that TiN-coated cutting tools have excellent drilling performance. The distribution law of the relationship between the number of machining holes and the middle areas of the drill bit and wear amount of outer areas was studied under three conditions. Meanwhile, the relationship between the number of machining holes and the middle areas of the drill bit and wear amount of outer areas was also explored under three conditions: the TiN coatings were 1, 2 and 3 μm respectively. Reliable standards were employed to evaluate the effect of the middle areas of the drill bit and

收稿日期: 2024-06-03

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, 主要从事兵器工程方面的研究。

E-mail: 2306834665@qq.com.

wear amount of outer areas on its performance in drilling inner holes. The results show that the service life of the tools with TiAlN coating and TiN coating is respectively 2.2 times and 4 times that of uncoated tools; The wear in the middle and outer edge areas of the drill bit is positively correlated with the number of machined holes. The service life of a 3 μm coated tool is more than 2.75 times that of a 1 μm coated tool. This study provides a theoretical basis and optimization scheme for the design of coated tools of twist drills.

Key words: tool coating; wear amount; advantEdge simulation

TC4 钛合金有着密度低、比强度高、抗冲击性优良、耐腐蚀、耐热、耐低温和无磁性等特点^[1],在兵器火炮、航天、航海、车辆等领域应用广泛。但由于钛合金导热性能差、亲和性高、弹性模量小等原因^[2],易造成刀具磨损严重、黏结性高、工件易变形等问题^[3-4]。因此研究钛合金的钻削性能有着重要意义。

肖茂华研究了镍基高温合金高速切削刀具的磨削性能^[5],得到了涂层能够在高温环境下提高刀具磨削性能的结论,其没有细化定量展开研究,给本文提供了研究思路;刘全太研究了 AlTiN 纳米混合涂层刀具在航空合金材料中的应用^[6],得到纳米混合涂层刀具可提高航空合金材料的加工性能的结论,但研究成果局限于航空材料领域,给本文刀具涂层选型提供思路;陈政文等探讨了 TiAlSiN、TiAlN 涂层刀具与无涂层刀具相比的钻削性能^[7],研究成果可以应用于本文,但没有进行不同厚度涂层的定量研究;赵甘霖等对 CrAlTiN 麻花钻 45 钢和 30CrMaSiA 材料进行了钻削试验^[8],研究成果有待于对不同厚度涂层刀具进行定量研究,给本文麻花钻涂层刀具结构的改进提供了思路。

目前涉及麻花钻涂层机理的研究很少,本文的创新点为分析了麻花钻涂层刀具切削性能的机理。分析无涂层、TiAlN 涂层、TiN 涂层 3 种情况下,加工孔的数量与钻头中间区域、外缘区域磨损量的分布规律,分别研究了 TiN 涂层膜厚 1、2、3 μm 3 种情况下加工孔的数量与钻头中间区域、外缘区域磨损量的关系,为麻花钻涂层刀具设计提供了理论依据和改进方向。

1 仿真模型建立

1.1 材料的本构方程

具体仿真中材料的分离判别依据是采用 ABAQUS 有限元分析中通用的 John-Cook 模型分离准则^[9-11]。

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

式中: A 、 B 、 C 、 n 、 m 为材料参数,如表 1 所示; 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^[12]。

1.2 材料的失效准则

ϵ_f 为当材料失效时的等效应力:

$$\epsilon_f = [d_1 + d_2(\epsilon_p)^{d_3}] \times (1 + d_4 \ln \frac{\epsilon_p}{\epsilon_0}) \times \left[1 - d_5 \left(\frac{T - T_0}{T_{\text{melt}} - T_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

式中: d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 为失效参数,如表 2 所示^[13]。

表 1 钛合金材料参数

A	B	C	n	m
875	793	0.01	0.386	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	0.014	3.87

advantEdge 软件在仿真时,不需要预先设置未加工层与加工层之间的变形分离线^[14],更符合实际加工工况,采用网格局部加密技术,避免网格的畸形变化,提高了仿真效率^[15]。

1.3 有限元仿真模型建立

毛坯工件尺寸设置为 $12\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, 刀具的几何参数: 直径 $\varphi 6\text{ mm}$ 、前角 25° 、顶角 135° 、螺旋角 33° 、最大钻削深度 8 mm 。机床主轴转速 3000 r/min , 每转进给量 0.5 mm/r 。网格划分后的有限元模型如图 1 所示。

1.4 有限元仿真过程

开始加工时, 刀具向下运动接触毛坯工件, 钻尖先与工件表面接触并开始挤压工件, 接着钻头横刃产生整体挤压, 工件在钻头挤压下发生弹性变形, 有应力出现趋势, 如图 2(a) 所示。随着刀具继续向下运动, 横刃与工件摩擦产生的热使工件先发生弹性变形, 然后工件晶粒被拉长发生塑性变形, 此时宏观组织已经发生变化, 但未产生切屑, 如图 2(b) 所示。刀具继续向下对工件产生挤压和剪切作用, 晶格发生变形, 材料发生滑移, 切屑形成。切屑呈梯形状, 由于梯形单元的叠加, 切屑出现弯曲, 如图 2(c) 所示。新产生的切屑推着原来的切屑在排屑槽里移动, 呈长卷曲形状, 如图 2(d) 所示。

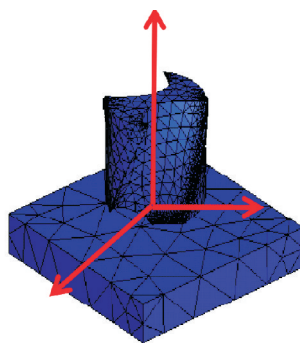


图 1 网格划分后的毛坯工件有限元模型

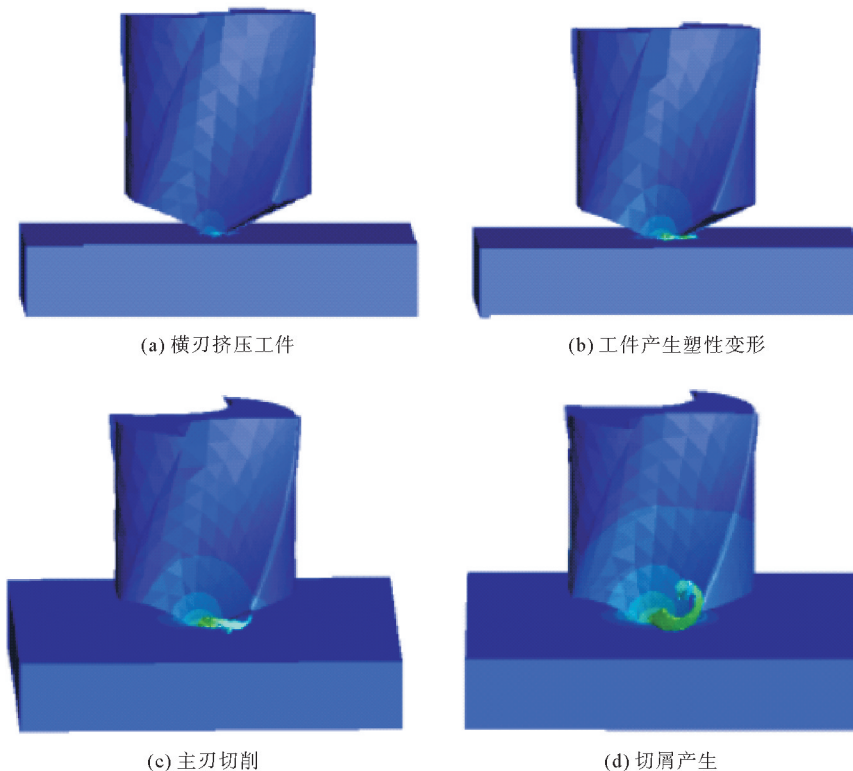


图 2 有限元模型仿真过程

2 结果分析

应力主要分布在横刃和切削刃, 与切削原理理论分析结果一致。由图 3 可知, 3 种刀具的应力分布大致相同, 但涂层刀具减小了钻头切削刃后刀面最大应力。仿真结果可以看出, 无涂层钻头红色部分区域最大, TiAlN 涂层和 TiN 涂层刀具应力大的区域较小, 应力明显小于无涂层刀具。可以看出 TiN 涂层刀具的红色区域最小, 排屑槽应力也得到改善。两种涂层有着较高的硬度和弹性模量, 抗冲击性能强, 可以缓解毛坯工件对刀具的冲击, 降低应力效果明显, 提高了刀具的钻削性能。在相同的加工参数下, 磨损主要与刀-屑之间的压力有关, 压力越大磨损越明显。涂层优良的摩擦性能改善了毛坯工件表面钻削的硬化情况, 减小了后刀面承受的压力。压力云图分布规律与应力云图分布规律相一致, 如图 4 所示。由图 5 可以

看出无涂层刀具速度最大的地方在横刃,涂层刀具速度最大处为切削刃,说明涂层改善了刀具速度的分布规律,由横刃向切削刃转化,TiN 涂层刀具蓝色低速部分明显高于 TiAlN 涂层的蓝色部分,说明 TiN 涂层刀具在加工过程中更稳定。TiAlN 涂层、TiN 涂层的刀具寿命分别是无涂层刀具的 2.2 倍和 4 倍。涂层刀具抑制前后刀面磨损,涂层的柱状微粒组织和纳米复合梯度结构,较低的热导率和摩擦系数,很大程度上提高了刀具的抗磨损能力,延长了刀具加工使用寿命,体现了涂层刀具的优良切削性能。

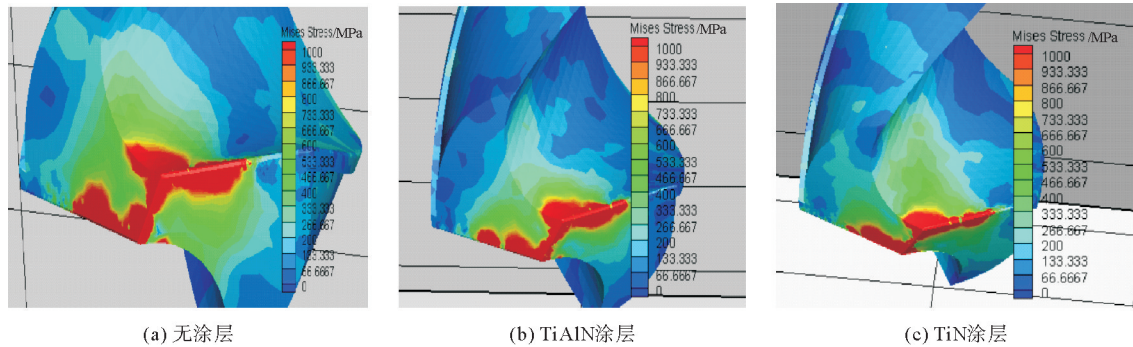


图 3 应力云图

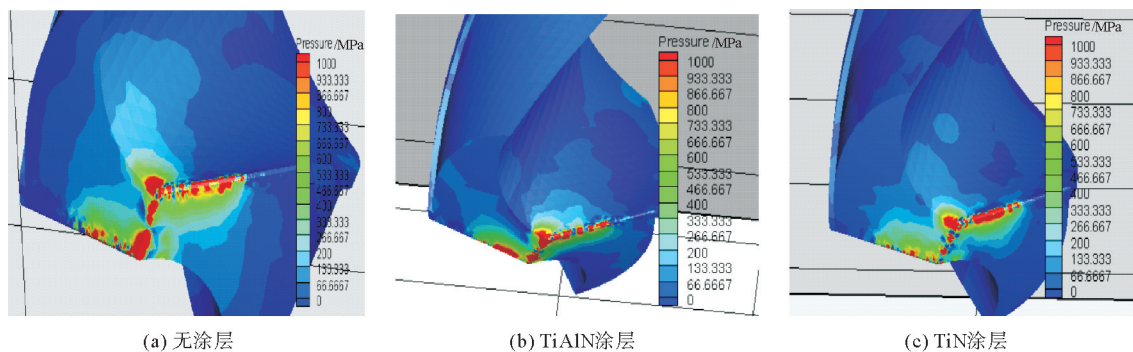


图 4 压力云图

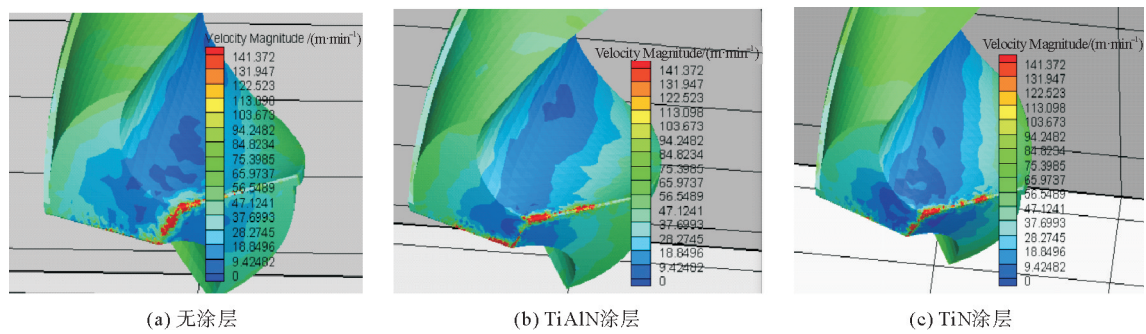


图 5 速度云图

分析刀具无涂层、TiAlN 涂层、TiN 涂层 3 种情况下加工孔的数量与钻头中间区域、外缘区域磨损量的分布规律。中间区域无涂层刀具在加工到 60 个孔时磨损量已经达到 0.2 mm, TiAlN 涂层刀具加工到 120 个孔时磨损量为 0.17 mm, TiN 涂层刀具加工到 220 个孔时磨损量为 0.14 mm, 如图 6(a) 所示。外缘区域无涂层刀具在加工到 60 个孔时磨损量已经达到 0.28 mm, TiAlN 涂层刀具加工到 120 个孔时磨损量为 0.29 mm, TiN 涂层刀具加工到 220 个孔时磨损量为 0.28 mm, 如图 6(b) 所示。

分别研究了 TiN 涂层膜厚 1、2、3 μm 3 种情况下加工孔的数量与钻头中间区域、外缘区域磨损量的关系。中间区域 1 μm 涂层刀具在加工到 80 个孔时磨损量已经达到 0.27 mm, 2 μm 涂层刀具加工到 140

个孔时磨损量为 0.16 mm, $3\ \mu\text{m}$ 涂层刀具加工到 220 个孔时磨损量为 0.14 mm, 如图 7(a) 所示。外缘区域 $1\ \mu\text{m}$ 涂层刀具在加工到 80 个孔时磨损量已经达到 0.32 mm, $2\ \mu\text{m}$ 涂层刀具加工到 140 个孔时磨损量为 0.16 mm, $3\ \mu\text{m}$ 涂层刀具加工到 220 个孔时磨损量为 0.28 mm, 如图 7(b) 所示。钻头中间区域、外缘区域的磨损量与加工孔数量呈正相关分布, $3\ \mu\text{m}$ TiN 涂层刀具寿命是 $1\ \mu\text{m}$ TiN 涂层刀具的 2.75 倍。

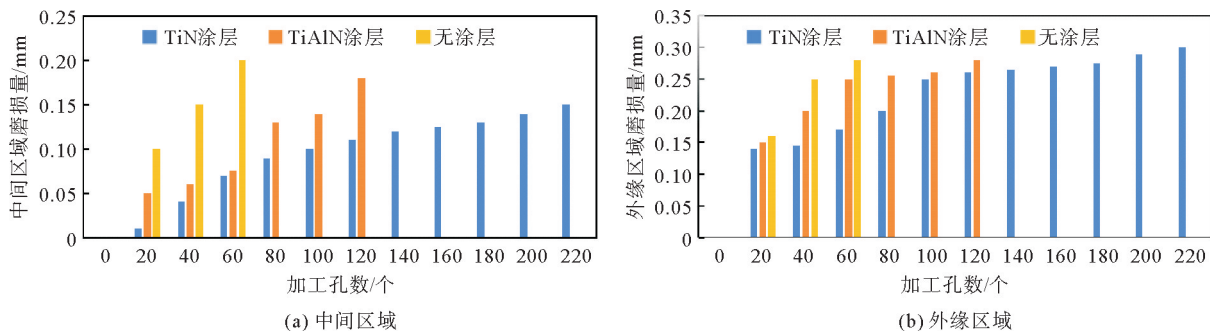


图6 有无涂层刀具磨损量与加工孔的关系

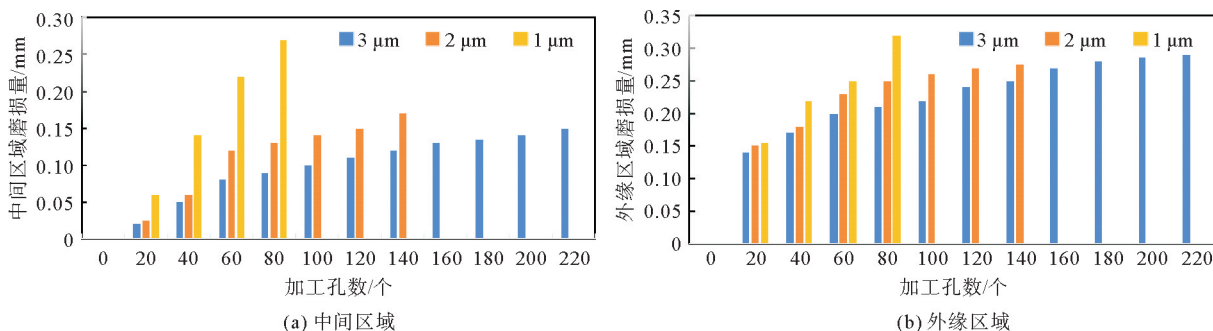


图7 不同厚度 TiN 涂层刀具磨损量与加工孔的关系

3 结论

1) 涂层刀具抑制前后刀面磨损效果明显,涂层的柱状微粒组织和纳米复合梯度结构,较低的热导率和摩擦系数,很大程度上提高了刀具的抗磨损能力,延长了刀具加工使用寿命,体现了涂层刀具具有优良钻削性能的机理。

2) 分析刀具无涂层、TiAlN 涂层、TiN 涂层 3 种情况加工孔的数量与钻头中间区域、外缘区域磨损量的关系分布规律;TiAlN 涂层、TiN 涂层的刀具寿命分别是无涂层刀具的 2.2 倍和 4 倍。分别研究了 TiN 涂层膜厚 1、2、 $3\ \mu\text{m}$ 3 种情况加工孔的数量与钻头中间区域、外缘区域的磨损量的关系,钻头中间区域、外缘区域的磨损量与加工孔数量呈正相关分布, $3\ \mu\text{m}$ TiN 涂层刀具寿命是 $1\ \mu\text{m}$ TiN 涂层刀具的 2.75 倍。

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] 曾滔. 大长径比麻花钻设计及其深孔加工应用研究[D]. 济南:山东大学,2022.
ZENG Tao. Design of twist drill with large length-diameter ratio and its application in deep hole machining[D]. Jinan:Shandong University,2022.
- [3] 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.
- [4] 刘战锋,韩晓兰. 典型难加工材料深孔加工技术[M]. 北京:科学出版社,2020.
LIU Zhanfeng,HAN Xiaolan. Deep hole machining technology of typical difficult-to-machine materials[M]. Beijing:Science Press,2020.

- [5] 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.
- [6] 刘全太. 17-4PH 超细长深孔加工工艺研究[D]. 西安:西安石油大学,2018.
LIU Quantai. A study on deep hole processing technology of 17-4PH[D]. Xi'an:Xi'an Shiyou University,2018.
- [7] 陈政文,商宏飞,徐建华,等. 基于切削力的 PVD 涂层刀具性能研究[J]. 工具技术,2012,46(10):15-17.
CHEN Zhengwen,SHANG Hongfei,XU Jianhua, et al. Research on the performance of PVD-Coated tools based on cutting force [J]. Tool Technology,2012,46(10):15-17.
- [8] 赵甘霖,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 Ganlin,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.
- [9] 张小石,张强,姜黎明,等. 基于 BTA 钻断屑机理对钻削性能影响的仿真研究[J]. 青岛理工大学学报,2025,46(4):150-156.
ZHANG Xiaoshi, ZHANG Qiang, JIANG Liming, et al. Simulation Study on the Influence of BTA Drilling Chip Breaking Mechanism on Drilling Performance [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2025,46 (4) : 150-156.
- [10] 李兴东,姜男,周新灵,等. 17-4PH 汽轮机叶片叶根磨削及铣削表面质量对比[J]. 工具技术,2018,52(1):30-33.
LI Xingdong,JIANG Nan,ZHOU Xinling, et al. Quality comparison of grinding surface and milling surface for 17-4PH turbine blade root[J]. Tool Engineering,2018,52(1):30-33.
- [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] 崔静,刘玲,夏海洋,等. 基于 VOF 法毫秒激光制孔过程数值研究及工艺优化[J]. 激光与红外,2022,52(2):210-216.
CUI Jing,LIU Ling,XIA Haiyang, et al. Numerical research and process optimization of laser hole-making process based on VOF method[J]. Laser & Infrared,2022,52(2):210-216.
- [15] 王峻. 现代深孔加工技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.
WANG Jun. Modern deep hole machining technology[M]. Harbin:Harbin Institute of Technology Press,2005.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)