

超声振动辅助钻削 HR-2 抗氢钢深小孔刀具磨损与表面质量研究

蒋凯宁¹ 王佳勋² 张园² 徐飞飞² 刘文浩¹ 董志刚¹

(1. 大连理工大学 高性能精密制造全国重点实验室, 大连 116024)

(2. 中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 绵阳 621900)

摘要: 针对 HR-2 抗氢钢深小孔钻削加工中表面质量降低、麻花钻磨损严重的问题, 通过热力耦合有限元仿真与深小孔钻削试验相结合的方法, 研究深小孔加工中刀具磨损、钻削温度和加工表面质量的变化趋势, 对比超声振动辅助钻削(Ultrasonic Vibration Assisted Drilling, UVAD)和常规钻削(Conventional Drilling, CD)2种加工方式, 分析超声振动对表面质量差、刀具磨损严重等问题的改善作用。结果表明, 随着钻削深度增大, 刀具横刃和切削刃热量积累显著增大, 逐渐发生涂层剥落、刃口钝化、崩刃等问题, 同时, 加工孔表面切削热累积导致温度升高, 加工表面出现材料涂抹、碎屑黏附、斜向划痕等问题, 使表面质量下降和表面粗糙度增大。UVAD 相较于 CD, 有效降低了钻削温度, 有助于减少刀具磨损, 保持切削刃的完整性, 同时降低了加工表面粗糙度, 最终提高了加工表面质量。

关键词: 抗氢钢; 深小孔; 超声振动辅助钻削; 有限元仿真; 刀具磨损; 表面质量

中图分类号: TG527 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.09.010

0 引言

HR-2 抗氢钢作为新一代高性能特种合金材料, 因其具备优异的高强度、抗氢脆性及高温稳定性, 在涉氢工业领域展现出显著优势, 广泛应用于航空航天、发动机燃料管路等极端工况部件^[1]。此类部件常需加工直径小于 3 mm、深径比大于 10 的深小孔, 以满足流体传输、冷却通道等功能需求。

近年来, 钻削仿真技术取得了显著进展。有限元模型和解析模型是 2 种主要的仿真方法。有限元模型通过模拟材料变形、热传导和应力分布, 能够较准确地预测钻削力、转矩和温度等参数, 余芬等^[2]利用 Abaqus 有限元软件建立了碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)钻削拉伸仿真模型, 探究了刀具转速、钻削进给量和钻头顶角对 CFRP 层合板钻削后拉伸剩余强度的影响。解析模型则基于力学和热力学原理, 通过简化假设推导出钻削力的解析表达式, 适用于快速预测和参数优化^[3-4]。

研究表明, 实际加工过程中刀具磨损主要受切削力、温度和材料特性的影响^[5]。WANG 等^[6]通过试验研究了高耐磨陶瓷微钻加工玻璃纤维增强材料(Glass Fiber Reinforced Plastics, GFRP)时的刀具磨损和磨损机制, 发现在动态载荷下, 切削刃边缘出现了磨粒磨

损和圆钝化, 且随着每齿进给量增大, 横刃由磨粒磨损逐渐过渡为黏着磨损。HR-2 抗氢钢因其高硬度和低热导率, 加工过程中易产生严重刀具磨损和表面加工质量低下的情况。在常规材料的深小孔钻削加工中, 可以通过加入切削液达到改善表面质量和延长刀具寿命的目的^[7-8], 但切削液中的极性分子可能渗入加工表面的微裂纹或晶界, 形成氢吸附活性位点, 在服役环境中优先吸附环境氢, 加速氢原子向材料内部的扩散和富集, 最终导致抗氢钢材料抗氢性能的降低和关键零部件氢脆敏感性的提升^[9-10]。因此, 为保证 HR-2 抗氢钢的抗氢性能, 深小孔钻削过程中应避免使用冷却液。

国内外学者提出在钻削过程中引入超声振动, 通过在钻削刀具轴向进给方向上叠加频率大于 15 kHz 的高频振动, 将刀具的高速旋转、轴向进给与高频振动结合成切削运动, 从而实现降低钻削力和转矩^[11]、延长麻花钻的使用寿命^[12]、并提高孔表面的质量的目标^[13]。目前超声振动辅助钻削(Ultrasonic Vibration Assisted Drilling, UVAD)技术已广泛应用于难加工材料。隗雨欣等^[14]通过开展 1J22 软磁合金钻削试验发现, 超声振动作用可以改善排屑条件从而有效提高晶粒细化、加工硬化等表面完整性指标。LIAO 等^[15]研究超声振动钻孔镍基高温合金材料时振幅和频率对钻孔性能的影响

收稿日期: 2025-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(52405517, 52475498)

作者简介: 蒋凯宁, 男, 2001 年生, 浙江宁波人, 在读硕士研究生; 主要研究方向为高性能精密、超精密加工; E-mail: jkn_dut@163.com。

董志刚(通信作者), 男, 1980 年生, 内蒙古赤峰人, 博士, 教授, 博士研究生导师; 主要研究方向为硬脆材料精密、超精密加工、多机器人融合智能制造、集成电路芯片超精密加工; E-mail: dongzg@dlut.edu.cn。

引用格式: 蒋凯宁, 王佳勋, 张园, 等. 超声振动辅助钻削 HR-2 抗氢钢深小孔刀具磨损与表面质量研究[J]. 机械强度, 2025, 47(9): 113-121.

JIANG Kaining, WANG Jiayun, ZHANG Yuan, et al. Research on tool wear and surface quality of ultrasonic vibration assisted drilling HR-2 hydrogen resistant steel deep small holes[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(9): 113-121.

响,结果显示,小超声振幅和高超声振动频率可以有效提高刀具寿命并降低切屑尺寸。王春浩等^[16]建立了CFRP/TC4合金叠层的切削刃轴向力模型,分析发现横刃挤压深度改变是纵扭超声振动有效降低轴向力的主要原因,且轴向力与TC4毛刺、CFRP孔壁的损伤程度有关。孙婷等^[17]开展了针对C₄/SiC复合材料的常规钻削(Conventional Drilling, CD)和UVAD等不同加工条件的对比试验,结果显示,引入超声振动可以有效抑制孔出口缺陷,施加切削液有利于降温排屑并改善加工质量。闫帆^[18]利用有限元仿真软件Abaqus,构建Al基体、SiC颗粒以及Cohesive内聚力模型的本构参数,建立SiCp/Al复合材料的三维切削仿真模型,研究表明,超声辅助加工可以减少切屑堆积、提高加工表面平整度、降低SiC颗粒去除时对基体的损伤。然而,现有研究多集中于常规材料小深径比钻削加工,对HR-2抗氢钢的深小孔钻削加工研究较少,且缺乏在深小孔加工中对刀具磨损动态过程的精确分析。

HR-2抗氢钢深小孔钻削过程中,切屑在狭长孔道内易形成螺旋状堆积,引发排屑不畅甚至刀具断裂^[19]。钻削加工区热量积聚显著,局部高温会加剧刀具磨损并导致工件表面加工质量下降^[20]。此外,刀具与孔壁持续摩擦导致刃口快速钝化,也将直接影响孔壁粗糙度与尺寸精度^[21]。现有研究多聚焦于常规孔加工参数优化,而对深小孔动态钻削过程中热力耦合效应与刀具渐进磨损的关联机制缺乏系统性解析,制约了高精度抗氢钢构件的可靠制造。

因此,本研究旨在建立HR-2抗氢钢深小孔钻削的仿真模型,并通过试验验证模型的准确性,揭示超声振动对刀具磨损及表面质量的影响规律。首先,基于有限元方法构建HR-2抗氢钢深小孔钻削有限元仿真模型,实现UVAD和CD这2种不同加工方式的热力耦合仿真。然后,开展HR-2抗氢钢深小孔UVAD和CD对比试验,研究引入超声振动对刀具磨损、加工表面形貌及粗糙度的影响。

1 试验方法

1.1 有限元仿真模型构建

利用Abaqus 2025有限元仿真软件模拟HR-2抗氢钢深小孔钻削过程。有限元仿真模型主要由麻花钻刀具和工件2个部件装配而成。麻花钻刀具及工件的几何结构如图1所示,麻花钻顶角为120°,螺旋角为30°,直径为2 mm;工件为圆柱体,直径为3 mm,长度为20 mm。

本文所研究的麻花钻刀具材料为硬质合金,工件材料为HR-2抗氢钢,其基本力学参数如表1所示。

抗氢钢深小孔钻削过程中,材料持续处于高温、高应变、高应变率的状态,Johnson-Cook(J-C)本构关

系同时涵盖了塑性应变、变形速率以及热软化效应的的作用,适用于Abaqus高速切削仿真。因此本文选用J-C本构模型,即

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} (1 + [\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}]^m)) \quad (1)$$

式中, σ 为等效流动应力;第1项为应变硬化项,其中 A 为初始材料屈服应力; B 为材料应变强化常数; ε 为等效塑性应变; n 为应变强化系数;第2项为应变速率项,其中 C 为应变率强化系数; $\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考等效塑性应变率;第3项为热软化项,其中 T 为材料变形温度; T_{melt} 为材料熔化温度; T_{room} 为室温(293 K); m 为热软化系数。HR-2抗氢钢J-C本构参数如表2所示。

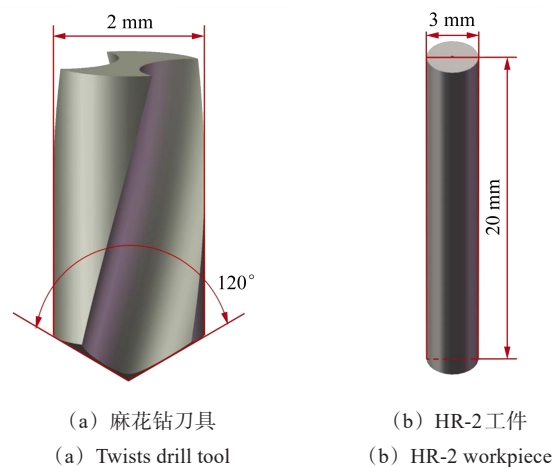


图1 刀具及工件建模示意图

Fig. 1 Diagram of tool and workpiece modeling

表1 材料基本力学参数

Tab. 1 Basic mechanical parameters of materials

参数 Parameter	硬质合金 Cemented carbide	HR-2 钢 HR-2 steel
密度 Density/(g/cm ³)	14	7.85
弹性模量 Elastic modulus/GPa	640	206
泊松比 Poisson ratio	0.22	0.3
热传导率 Thermal conductivity/[W/(m·K)]	75	20
热膨胀系数 Coefficient of thermal expansion/°C ⁻¹	5×10 ⁻⁶	1.1×10 ⁻⁵
比热容 Specific heat capacity/[J/(kg·K)]	300	465

表2 HR-2抗氢钢J-C本构参数

Tab. 2 J-C constitutive parameters of HR-2 hydrogen resistant steel

参数 Parameter	A /MPa	B /MPa	n	C	m
值 Value	553	601	0.234	0.02	0.8

J-C损伤是基于累计损伤准则来判断材料是否满足损伤初始条件,当与等效塑性应变累积相关的状态变量等于1时,模型中材料单元积分点达到初始失效准则,单元开始出现损伤。J-C损伤符合金属结构损

伤的研究,因此本研究采用 J-C 损伤模型来定义材料的初始损伤,为

$$\bar{\varepsilon}_d^p = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \frac{P}{\bar{\sigma}})] (1 + D_4 \ln \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}_d^p}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0^p}) (1 + D_5 \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}) \quad (2)$$

式中, $\bar{\varepsilon}_d^p$ 为等效损伤应变, 三项分别表示应变、应变率、温度对材料应变的影响; P 为静水压力; $\bar{\sigma}$ 为 von-Mises 的等效应力; $D_1 \sim D_5$ 为材料损伤参数。表 3 列出了 HR-2 抗氢钢的 J-C 损伤参数。

表 3 HR-2 抗氢钢 J-C 损伤参数

参数 Parameter	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
值 Value	0.06	3.30	-1.96	0.001 8	0.58

对部件进行高质量网格划分可以有效提高仿真计算的精度和效率,图 2 展示了 HR-2 抗氢钢深小孔钻削有限元模型的网格划分情况。在钻削仿真过程中,刀具设置为刚体,全局网格尺寸为 0.3 mm,部件共有 1 013 个网格,网格类型为 C3D4T;工件设置为变形体,沿径向划分直径为 2.2 mm 的圆形接触区和直径为 2.2~3 mm 的环形非接触区,纵向网格尺寸为 0.03 mm。工件接触区在刀具的作用下发生材料去除,为提高计算精度需要进行网格细化,沿径向网格尺寸设为 0.02~0.04 mm;工件非接触区不直接与刀具发生接触,因此可以适当粗化网格以提高计算效率,则沿径向网格尺寸为 0.04~0.2 mm。工件部件轴向均匀网格尺寸为 0.03 mm,最终工件接触区网格数量为 2 004 660 个,非接触区网格数量为 229 104 个,网格类型为 C3D8RT。

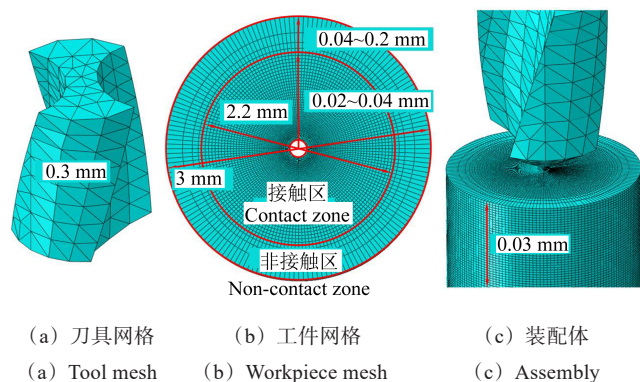


图 2 有限元模型网格划分
Fig. 2 Mesh division of finite element model

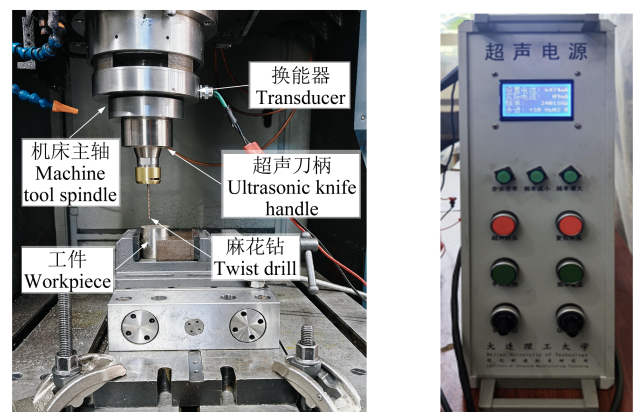
实际钻削过程中工件保持固定,麻花钻绕轴线高速旋转的同时不断向下进给,超声振动的引入使麻花钻在旋转进给的基础上增加了轴向高频振动。因此,在 Abaqus 有限元仿真软件中对工件圆柱表面和底面施加完全固定,对麻花钻施加旋转位移载荷,载荷参数中

进给速度为 500 mm/min, 旋转速度为 3 141 rad/s; 超声振动参数中振动频率为 20 kHz, 振动幅值为 4 μm 。

选取刀具几何表面和工件接触区网格表面建立通用接触,切向行为的罚函数中摩擦因数为 0.3,法向行为中定义为“硬”接触,刀具与工件接触摩擦产生的热量分配为 80% 传入工件表面,20% 传入刀具表面,磨损系数为 1×10^{-7} 。

1.2 试验方案设计

HR-2 抗氢钢深小孔钻削试验在 UVAD 试验系统上进行,试验采用的 UVAD 系统结构如图 3(a) 所示。系统包括数控机床、电能传输装置、换能器、超声刀柄、钻削刀具等。图 3(b) 为超声电源,可输出超声频率为 1~50 kHz,最大输出功率为 200 W。试验所用的 UVAD 系统谐振频率为 29 kHz,波形为正弦波形,经功率计测得加工过程中输出功率约为 170 W。为了研究 HR-2 抗氢钢深小孔钻削不同钻削深度时刀具磨损状态和孔壁粗糙度的影响规律,利用超景深显微镜观测刀具前后刀面及切削刃的磨损状态;抗氢钢工件先利用线切割机 and 金刚石线锯机切开,再利用 3D 表面光学轮廓仪对工件内孔壁加工表面进行三维几何形貌检测。



(a) 超声振动钻削装置 (b) 超声电源
(a) Ultrasonic vibration drilling device (b) Ultrasonic power

图 3 超声振动钻削试验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic vibration drilling test system

深小孔钻削试验采用的是由成都邦普切削刀具股份有限公司生产的 TiAlN 涂层不锈钢干切钻头 ($D_2 \times 45L_1 \times D_4 \times 81L$ -GHSL1.5 $\times 30^\circ$), 顶角为 140° , 螺旋角为 30° 。为保证孔壁加工表面的高洁净度,钻削过程中采用干式啄钻的加工方式,加工参数为主轴转速 $n=1\ 000$ r/min;进给速度 $f=10$ mm/min;单次进刀量 0.1 mm。超声参数为振动频率为 29 kHz;振动幅值 $A_0=4$ μm 。钻削深度分别为 10、20、30、40 mm 时,利用超景深显微镜和扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 观测刀具的磨损状态,并对磨损区

域进行能谱分析(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)。基于3D表面光学轮廓仪获取孔壁三维表面形貌特征及粗糙度数据。

2 结果与分析

HR-2抗氢钢深小孔钻削热力耦合仿真时,如图4所示。分别在工件孔壁内表面和刀具横刃、切削刃上设置路径,提取路径上的Mises应力、温度、磨损量等指标,获取深小孔钻削过程中刀具磨损状态、切削温度的变化趋势。通过对比UVAD和CD这2种钻削方式下的仿真结果,分析深小孔钻削中引入超声振动的影响规律。为了检验深小孔钻削有限元仿真结果的准确性,开展HR-2抗氢钢深小孔钻削试验,根据试验结果对有限元结果进行验证。

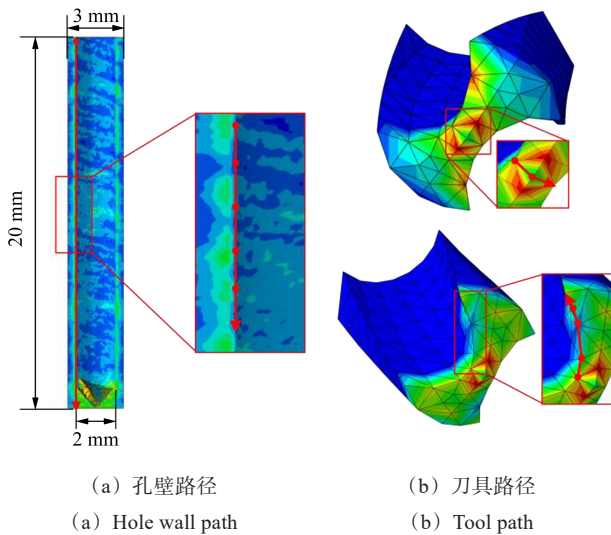


图4 有限元仿真结果路径设置

Fig. 4 Path setting for finite element simulation results

2.1 工件应力场、温度场有限元仿真

沿孔壁路径提取Mises应力、温度和等效塑性应变的结果如图5所示。钻削过程中刀具去除工件材料从而形成加工孔表面,接触阶段刀具瞬时挤压导致局部高塑性变形,同时产生大量摩擦热;离开阶段工件材料弹性变形持续恢复,叠加热应力形成残余应力和等效塑性应变(Plastic Equivalent Strain, PEEQ)峰值。随着钻削不断深入工件材料,切削热量积累导致沿钻削方向孔壁温度逐渐增大。相比于CD,UVAD降低了入口处的Mises应力,提高了出口处的应力,但是两者整体的应力值区别较小。施加高频超声振动后孔壁上温度值显著降低,等效塑性应变曲线波动幅值降低,表明引入超声振动可以有效降低切削热并改善散热条件,同时降低工件材料塑性流动从而提高孔壁加工质量。

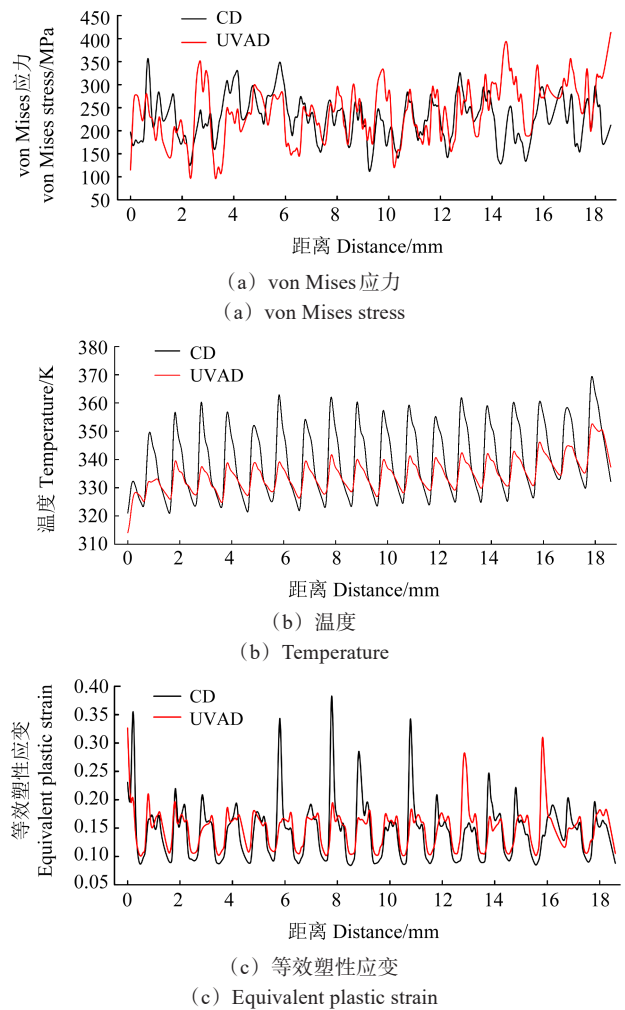


图5 孔壁路径提取结果

Fig. 5 Extraction results of hole wall path

2.2 刀具温度场、磨损量有限元仿真及试验

CD和UVAD这2种加工方式下刀具钻削区域的温度场分布特征如图6所示。由图6可知,CD加工时,切削温度的最高聚集点位于主切削刃与副切削刃过渡的刀尖圆弧段,对于UVAD加工时,最高温度出现在麻花钻钻尖部位。钻削过程中钻尖及横刃主要起挤压和定位作用,切削刃起剪切并去除材料作用。CD加工时,切削刃随着半径增大切削速度逐渐增大,单位时间内需要与更多的工件材料发生剪切摩擦,从而产生大量切削热,因此温度高于钻尖部位。引入超声振动将连续切削变为断续切削,减少了切削刃与工件摩擦的次数,从而降低了切削刃的温度,但钻尖部位在轴向挤压的基础上增加了高频的振动冲击,致使钻尖区域产生的热量增大。

提取麻花钻横刃和主切削刃沿刀具运动路径的温度及磨损量参数,如图7所示。由图7可知,随钻孔深度加深,横刃和主切削刃上的温度和磨损量均不断增大。引入超声振动对于横刃和主切削刃的磨损量的改善作用较为显著。UVAD可以有效降低主切削刃的温度尤其是在钻削初期对切削热的改善,但由于深

小孔钻削时累积的切削热和恶劣的散热条件,钻削后期 2 种钻削方式主切削刃温度差异较小。

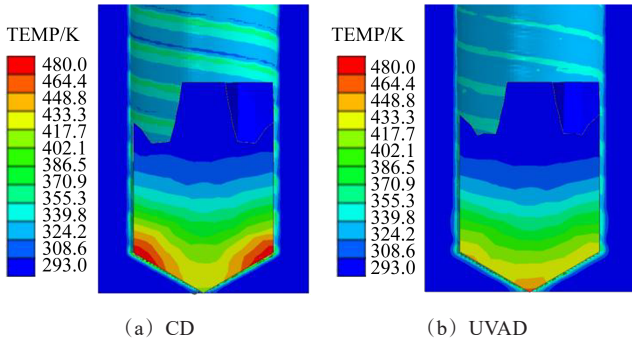
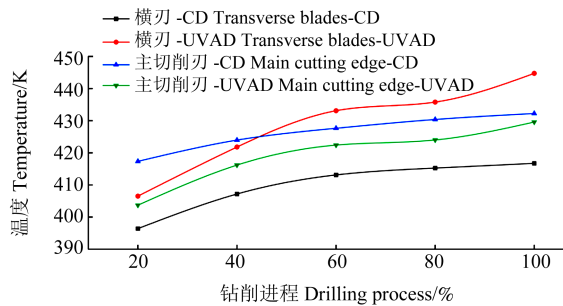


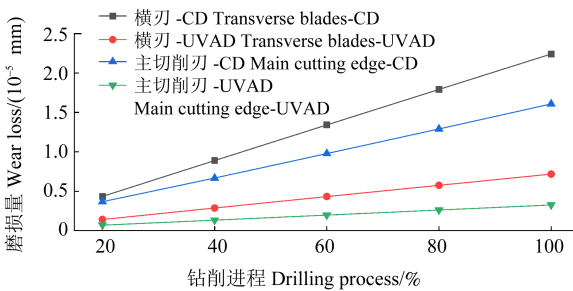
图 6 钻削区域温度云图

Fig. 6 Temperature cloud map of drilling area



(a) 温度

(a) Temperature



(b) 磨损量

(b) Wear loss

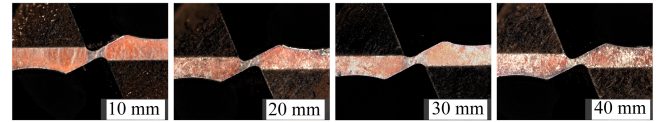
图 7 刀具路径提取结果

Fig. 7 Extraction results of tool path

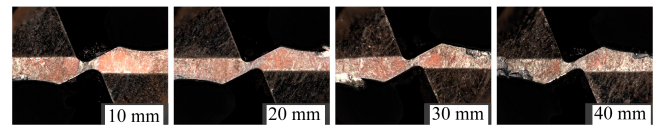
图 8 展示了深小孔加工过程中,UVAD 与 CD 在不同深度时刀具横刃磨损特征的对比结果。通过超景深显微镜软件内置的面积测量功能获得横刃磨损面积随钻削进程的变化规律,如图 9 所示。由图 8 可知,刀具后刀面及横刃上覆盖的 TiAlN 涂层为棕黄色区域,在深小孔的钻削过程中横刃上的涂层逐渐磨损并露出涂层下的银白色刀具基体。由图 9 可知,在深小孔钻削初期横刃磨损最快,随着钻削深度的增大,横刃上的磨损面积逐渐增大且增大速度逐渐降低,引入超声振动后可以有效减缓横刃磨损。

图 10 展示了刀具后刀面与主切削刃的磨损特征。由图 10 可知,后刀面涂层上出现沿着刀具旋转速度走向的划痕,划痕下为银白色的刀具基体;主切削刃外沿存在约 30~50 μm 的不规则剥落坑。随着钻削深度增大,后刀面的涂层划痕和刃口钝化、崩刃现象愈加

明显。钻削深度 40 mm 处可以观察到刃口后刀面附着条状凸起物,即刀具材料剥落导致刃口完整性急剧降低。施加超声振动使切削过程从连续接触变为间歇接触,减少了钻削产生的热量,降低涂层和基体热膨胀差异引发的剪切应力,后刀面边缘阶梯状断裂转为平滑过渡,有效减少主切削刃外沿的剥落面积,改善刃口完整性。



(a) UVAD



(b) CD

图 8 不同钻削深度横刃磨损状态

Fig. 8 Wear status of transverse blades at different drilling depths

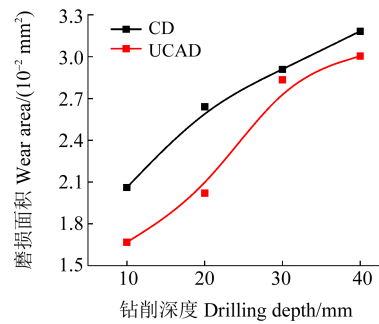
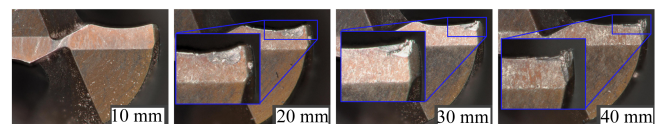
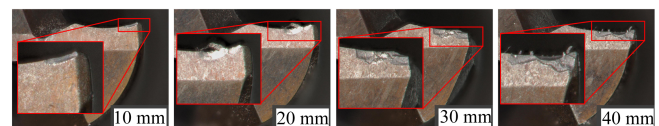


图 9 横刃磨损面积变化示意图

Fig. 9 Diagram of the wear area of the transverse blade



(a) UVAD



(b) CD

图 10 不同钻削深度后刀面及主切削刃磨损状态

Fig. 10 Wear status of the cutting surface and main cutting edge at different drilling depths

刀具前刀面及副切削刃的磨损形态结果如图 11 所示。由图 11 可知,CD 加工时,前刀面涂层沿着排屑路线发生磨损,随着刀具钻削深入,涂层逐渐剥落;副切削刃上出现均匀磨损带,带宽随着钻削深度增大而增加;钻削深度 30 mm 时,在切削刃后方出现约 150 μm × 30 μm 的剥落坑,坑内有多处平行于切削方向的划痕;钻削深度 40 mm 时,切削刃崩缺,基本丧失几何完整性;UVAD 切削刃仍保持较好的完整性。以上结论均表明,随着钻削深度的增大,刀具磨损量逐渐增加,

UVAD相较于CD可以有效降低刀具磨损,保持切削刃完整性,证明了有限元仿真结果的准确性和有效性。

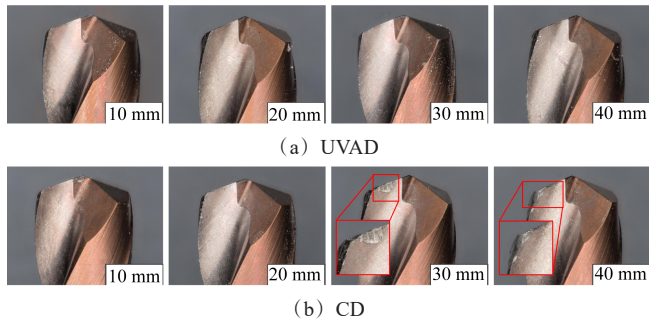


图 11 不同钻削深度前刀面及副切削刃磨损状态

Fig. 11 Wear status of front cutting surface and secondary cutting edge at different drilling depths

图 12 展示了 CD 加工后不同钻削深度主切削刃的 SEM 观测图。由图 12 可知,钻削深度 10~20 mm 时,刀具表面形成黏结物,并存在明显黏结-剥落的痕迹。主切削刃磨损区域呈现出沟槽状划痕,刃尖钝化并产生微裂纹并蔓延至基体与涂层边界。以上观测结果表明,钻削初期切削温度相对较低,刀具主要在硬质颗粒的机械作用下发生磨损,刀具磨损以磨粒磨损和黏着磨损为主。

图 13 为图 12(d) 中刀具 CD 加工 40 mm 深度时的 EDS 分析结果图。由图 13 可知,刀具磨损区域无 Ti 元素,表面 TiAlN 涂层已完全磨损,暴露出以 WC 和 Co 为主要元素的刀具材料。月牙洼状磨损坑内出现 Fe、Cr、Ni 等元素,证明 HR-2 抗氢钢工件材料中的元素扩

散至刀具主切削刃磨损表面。此外,EDS 分析在磨损表面检测到明显的 O 元素富集,结合图 12(d) SEM 观测结果可见氧化物层及其破碎、剥落的形貌。由此表明,钻削中后期,随着钻削深度增加,加工区域散热条件恶化,切削热急剧积累导致温度显著升高,高温下工件材料向刀具的元素扩散和刀具自身与环境氧反应形成脆性氧化物层后剥离是导致材料流失的重要机制,刀具磨损形式由前期的机械磨损转变为以扩散磨损、氧化磨损为主的高温磨损。

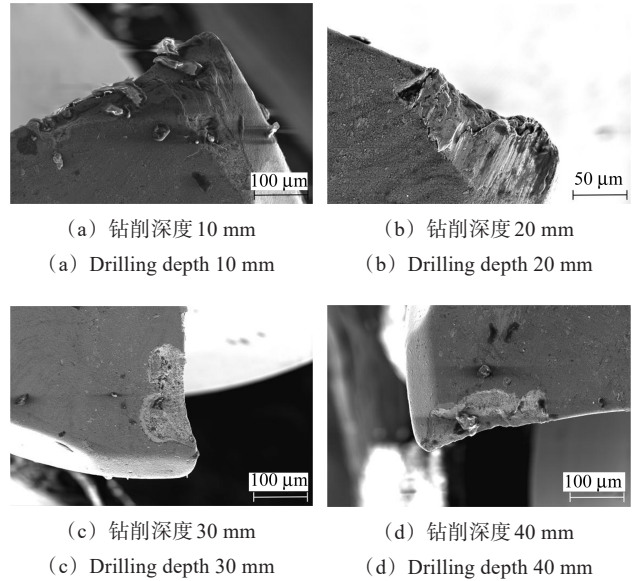


图 12 不同钻削深度主切削刃 SEM 观测图
Fig. 12 SEM observation of main cutting edges with different drilling depths

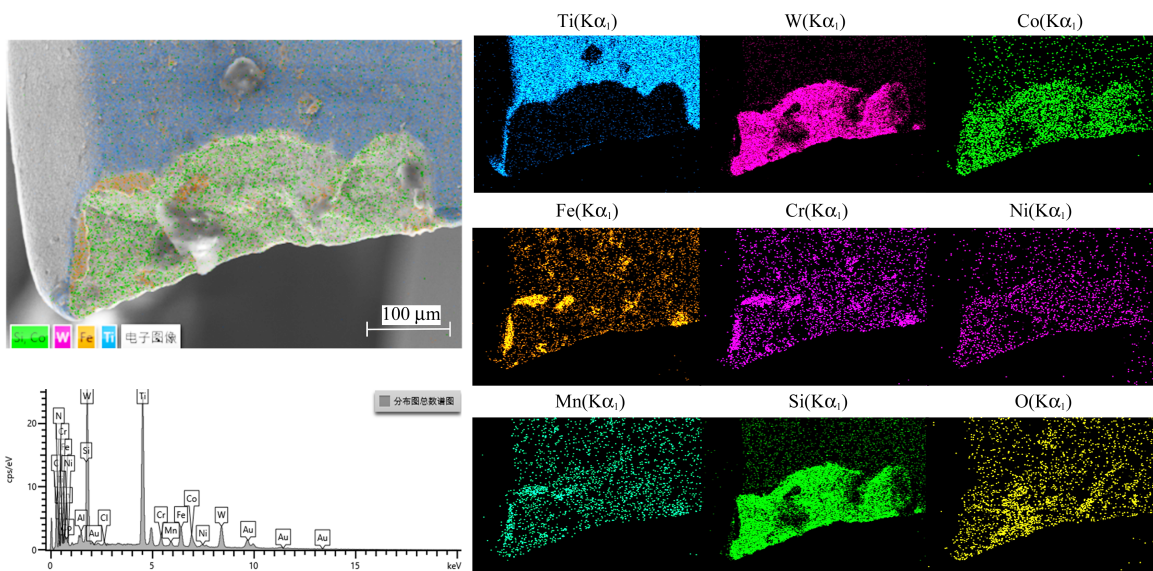


图 13 CD 加工 40 mm 深度时刀具 EDS 分析结果

Fig. 13 EDS analysis results of conventional drilling tools at a depth of 40 mm

2.3 加工表面三维形貌及表面粗糙度

加工孔加工表面三维形貌观测结果如图 14(a) 所示,沿孔轴向存在等间距蓝色凹陷带,反映啄钻过程的周期性载荷冲击。由于抗氢钢深小孔干式钻削

过程中温度较高,由热软化效应和机械挤压引起塑性侧向流动效应和材料涂抹现象,因此能够在孔壁上观测到沿孔周向(钻头旋转方向)分布的带状隆起区,如图 14(b)、图 14(c)所示。钻削时产生的碎屑随着钻头

旋转进给被碾压在孔壁上,由于高温的作用,碎屑在加工表面上发生微焊接从而出现了碎屑黏结的现象,如图 14(d)所示。此外,高温还会导致工件材料软化,促进碎屑划擦加工表面,导致加工表面上出现硬质颗粒犁削的痕迹,如图 14(e)所示。

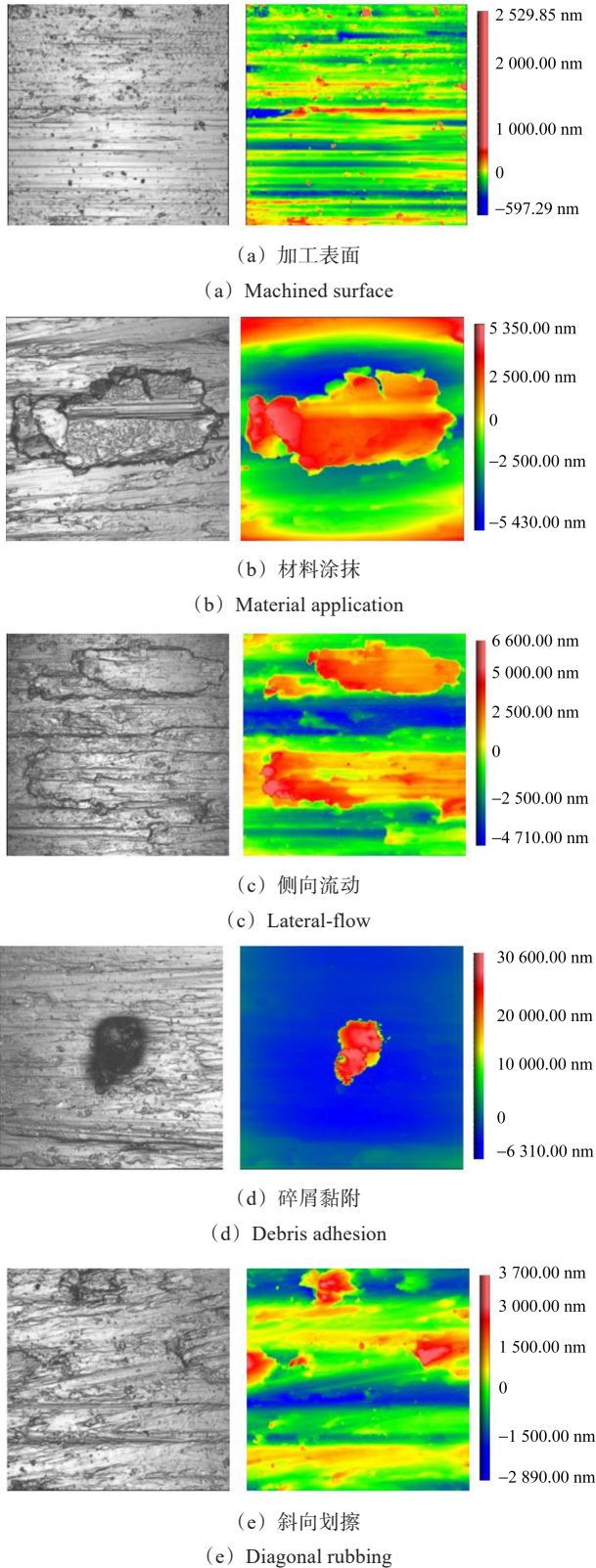


图 14 抗氢钢深小孔钻削加工表面特征

Fig. 14 Surface characteristics of deep and small hole drilling of hydrogen resistant steel

通过在不同深度处测量多组加工表面粗糙度,得到如图 15 所示 UVAD 和 CD 表面粗糙度随钻削深度增加的变化示意图。由图 15 可知,2 种钻削方式的孔壁粗糙度均随着钻削深度的增大而增大,引入超声振动后有效降低了粗糙度。进一步观测 2 种钻削方式后深小孔不同深度处孔壁的表面形貌,结果如图 16 所示。对于 2 种钻削方式,随着钻削深度的增加,不规则隆起区域面积占比增大,材料涂抹和侧向流动的痕迹更明显,发生更多的碎屑黏结。超声振动的引入优化了断屑排屑机制,碎屑黏结密度相比于 CD 有一定程度的降低。此外,断续切削有效降低切削温度,改善散热条件,从而抑制了材料软化和塑性流动;麻花钻轴向振动和旋转进给的复合运动改变了切屑运动规律,减少划痕叠加效应,从而降低了表面粗糙度。

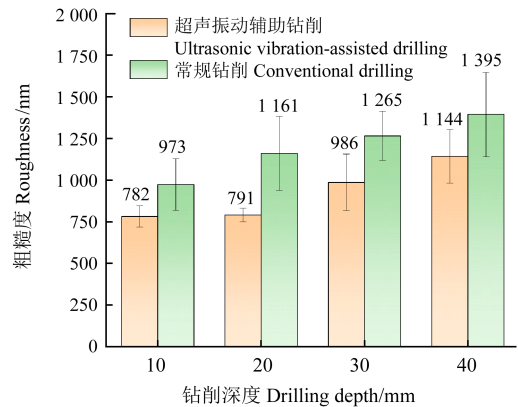


图 15 孔壁表面粗糙度变化示意图

Fig. 15 Schematic diagram of surface roughness of hole wall

3 结论

本研究旨在通过热力耦合有限元仿真和钻削试验相结合的方法探究 HR-2 抗氢钢深小孔钻削过程中刀具磨损特征和加工表面形貌与质量的变化趋势,对比 CD 和 UVAD 这 2 种加工方式,分析引入超声振动对加工表面质量差、刀具磨损严重等问题的改善作用,得出的主要结论如下:

1) 加工表面沿钻削深度的切削热积累导致孔壁温度逐渐增大。UVAD 相较于 CD,有效地降低了孔壁温度值和等效塑性应变曲线幅值,证明 UVAD 能够减少切削热并同时降低工件材料塑性流动。

2) 引入超声振动将深小孔钻削过程中的连续切削变为断续切削,有效减少了刀具热量积累,改善了刀具磨损。试验结果显示,随着钻削深度的增大,CD 刀具出现涂层剥落、刃口钝化崩刃等现象,但 UVAD 仍保持切削刃较高的完整性。

3) 深小孔钻削过程中,加工区域散热条件随钻削深度增大而逐渐恶化,刀具磨损类型逐渐由以磨粒磨损、黏着磨损为主的机械磨损转变为以氧化磨损、扩散磨损为主的高温磨损。

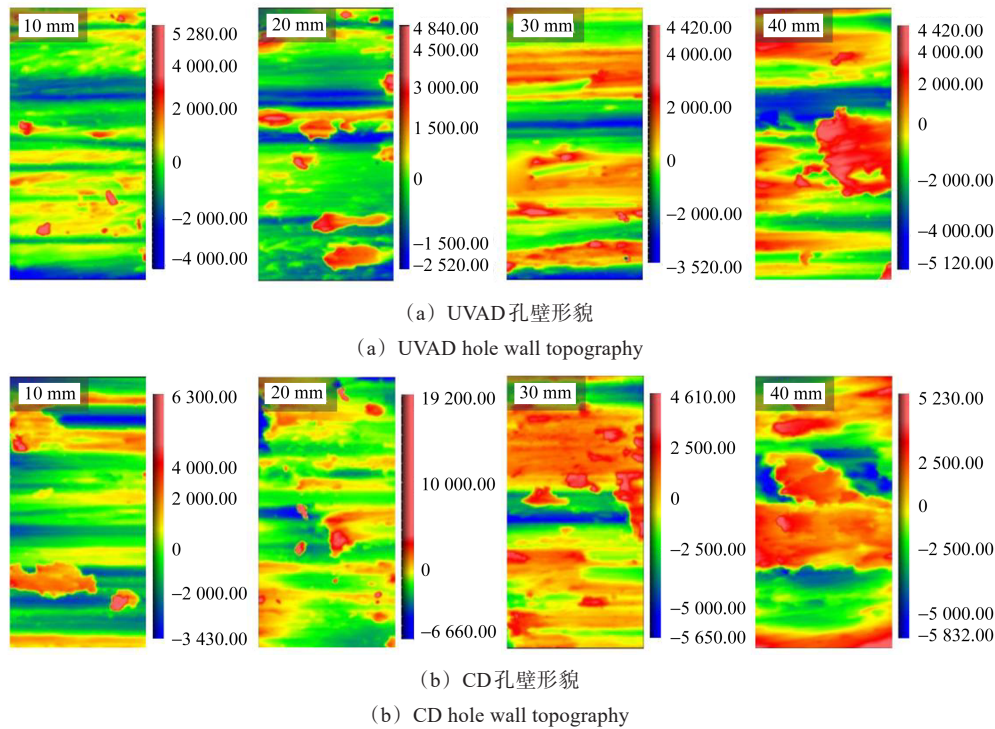


图 16 2种钻削方式深小孔孔壁形貌

Fig. 16 Two drilling methods for deep and small hole wall topography

4)深小孔加工孔壁内存在材料涂抹、磨粒黏结等问题,导致表面质量随着钻削深度的增大而恶化,UVAD抑制了材料软化和塑性流动,减少了碎屑黏结,从而有效降低了加工表面粗糙度,提高了加工表面质量。

参考文献 (References)

- [1] 常艳红. 氘对HR2抗氢钢室温力学性能和组织结构的影响[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2011:1-2.
CHANG Yanhong. The effect of deuterium on the room temperature mechanical properties and microstructure of HR2 hydrogen resistant steel [D]. Mianyang: Chinese Academy of Engineering Physics,2011:1-2. (In Chinese)
- [2] 余芬,崔乃葳,何振鹏,等. 碳纤维复合材料层合板钻削后拉伸剩余强度研究[J]. 机械强度,2024,46(3):588-594.
YU Fen, CUI Naiwei, HE Zhenpeng, et al. Study on residual tensile strength of carbon fiber composite laminates after drilling [J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46 (3) : 588-594. (In Chinese)
- [3] 王昕. 振动钻削新钻削力模型及定、变参数振动钻削的研究[D]. 长春:吉林大学,2004:39-58.
WANG Xin. Study on new drilling force model of vibration drilling and vibration drilling with invariable parameter and variable parameter[D]. Changchun: Jilin University, 2004: 39-58. (In Chinese)
- [4] CHANG S S F, BONE G M. Thrust force model for vibration-assisted drilling of aluminum 6061-T6[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2009,49(14):1070-1076.
- [5] ULLEN N B. Characterization of machinability of sintered steel foams having different porosities during drilling operations [J]. Machining Science and Technology,2021,25(4):527-557.
- [6] WANG Y S, ZOU B, YIN G G. Wear mechanisms of Ti(C7N3)-based cermet micro-drill and machining quality during ultra-high speed micro-drilling multi-layered PCB consisting of copper foil and glass fiber reinforced plastics [J]. Ceramics International, 2019,45(18):24578-24593.
- [7] LI R, HEGDE P, SHIH A J. High-throughput drilling of titanium alloys [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2007,47(1):63-74.
- [8] JAYAL A D, BALAJI A K, SESEK R, et al. Machining performance and health effects of cutting fluid application in drilling of A390.0 cast aluminum alloy [J]. Journal of Manufacturing Processes,2007,9(2):137-146.
- [9] SUN Y W, CHEN J Z, LIU J. Investigation into hydrogen diffusion and susceptibility of hydrogen embrittlement of high strength 0Cr₁₆Ni₅Mo steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, International,2015,22(10):961-968.
- [10] LI X F, ZHANG J, SHEN S C, et al. Effect of tempering temperature and inclusions on hydrogen-assisted fracture behaviors of a low alloy steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017,682:359-369.
- [11] SUN Z F, GENG D X, GUO H L, et al. Introducing transversal vibration in twist drilling: material removal mechanisms and surface integrity [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024,325:118296.
- [12] THIRUMALAI KUMARAN S, KO T J, LI C P, et al. Rotary ultrasonic machining of woven CFRP composite in a cryogenic environment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 698: 984-993.

- [13] 张园,康仁科,刘津廷,等. 超声振动辅助钻削技术综述[J]. 机械工程学报,2017,53(19):33-44.
ZHANG Yuan, KANG Renke, LIU Jinting, et al. Review of ultrasonic vibration assisted drilling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19):33-44. (In Chinese)
- [14] 魏雨欣,宋洪侠,张园,等. 超声辅助钻削 1J22 软磁合金表面完整性研究[J]. 机械工程学报,2025,61(1):345-359.
WEI Yuxin, SONG Hongxia, ZHANG Yuan, et al. Surface integrity of ultrasonic assisted drilling soft magnetic alloy 1J22[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(1):345-359. (In Chinese)
- [15] LIAO Y S, CHEN Y C, LIN H M. Feasibility study of the ultrasonic vibration assisted drilling of Inconel superalloy [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(12/13):1988-1996.
- [16] 王春浩,李鹏南,邱新义,等. 纵扭超声辅助钻削 CFRP/TC4 叠层结构的轴向力理论建模[J]. 机械工程学报,2025,61(7):210-219.
WANG Chunhao, LI Pengnan, QIU Xinyi, et al. Prediction of thrust force of CFRP/TC4 stacks structures in longitudinal torsional ultrasonic assisted drilling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(7):210-219. (In Chinese)
- [17] 孙婷,解丽静,姜佳明,等. C₇/SiC 复合材料超声振动辅助小孔钻削试验研究[J]. 工具技术,2025,59(6):28-33.
SUN Ting, XIE Lijing, JIANG Jiaming, et al. Experimental study on ultrasonic vibration assisted small hole drilling of C₇/SiC composites [J]. Tool Engineering, 2025, 59(6):28-33. (In Chinese)
- [18] 闫帆. SiCp/Al 复合材料超声辅助钻削研究[D]. 太原:太原科技大学,2024:19-28.
YAN Fan. Research on ultrasonic assisted drilling of SiCp/Al composites [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2024:19-28. (In Chinese)
- [19] MATHEW N T, VIJAYARAGHAVAN L. High-throughput dry drilling of titanium aluminide [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2017, 32(2):199-208.
- [20] 李辉,高峰,李艳. 硬质合金钻头绿色钻削镍基高温合金的试验研究[J]. 机械强度,2023,45(1):76-83.
LI Hui, GAO Feng, LI Yan. Experimental study on green drilling nickel-base superalloy with carbide bit[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(1):76-83. (In Chinese)
- [21] EL-KHABEERY M M, SALEH S M, RAMADAN M R. Some observations of surface integrity of deep drilling holes [J]. Wear, 1991, 142(2):331-349.

Research on tool wear and surface quality of ultrasonic vibration assisted drilling HR-2 hydrogen resistant steel deep small holes

JIANG Kaining¹ WANG Jiaxun² ZHANG Yuan² XU Feifei² LIU Wenhao¹ DONG Zhigang¹

(1. State Key Laboratory of High-Performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(2. Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In response to the problems of reduced surface quality and severe twist drill wear in HR-2 hydrogen resistant steel deep small holes drilling, integrated thermal coupling finite element simulation with experimental investigations of deep small holes drilling to analyze the variations in tool wear, drilling temperature, and the quality of the machined surface during the process of machining deep small holes. The improvement effect of introducing ultrasonic vibration on poor surface quality and severe tool drilling wear was analyzed by comparing ultrasonic vibration assisted drilling (UVAD) and conventional drilling (CD). The results show that as the drilling depth increases, the heat accumulation of the tool's transverse and cutting edges significantly increases, gradually leading to problems such as coating peeling, edge passivation and chipping. Concurrently, the accumulation of cutting heat on the surface of the machined hole causes temperature rise, resulting in material coating, debris adhesion, oblique scratching and other problems on the machined surface, resulting in a deterioration of surface quality and an elevation in surface roughness. Compared to CD, the UVAD effectively reduces drilling temperature, helps to reduce tool wear and maintain cutting edge integrity, while suppressing the increase in surface roughness during machining, ultimately improving surface quality.

Key words: Hydrogen resistant steel; Deep small holes; Ultrasonic vibration assisted drilling; Finite element simulation; Tool wear; Surface quality

Corresponding author: DONG Zhigang, E-mail: dongzg@dlut.edu.cn

Fund: National Natural Science Foundation of China (52405517, 52475498)

Received: 2025-06-16