

文章编号 1004-924X(2025)11-1761-10

石英预制棒深孔加工测力夹具设计及实验研究

孙晓欢, 王 丰, 池广伟, 官 虎*

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院

精密测试技术及仪器全国重点实验室, 天津 300072)

摘要:在熊猫保偏光纤生产中,石英预制棒的深孔加工质量至关重要,但其硬脆特性导致加工时刀具易过度磨损,工件易断裂。考虑到预制棒安装结构的特殊性以及切削力与刀具磨损状态之间的密切关系,设计并实现了一种石英预制棒深孔加工力在线测量系统。该系统利用钻孔过程中以轴向力为主导的特点,提出了基于双导轨设计屏蔽倾覆力矩和其他方向力的方法,利用单向压电测力传感器实现了低成本实时的切削力测量。为了验证系统的有效性,进行了多组实验,使用不同磨损状态的刀具进行石英预制棒深孔加工,并分析了切削力随刀具磨损状态加剧而呈现的变化趋势。实验结果表明,在使用直径为 12.8 mm 的刀具对熊猫保偏光纤预制棒进行加工过程中,当切削力在 150 N 附近时,纤芯容易发生断裂。

关键词:深孔加工;石英预制棒;切削力;在线测量

中图分类号:TG75;TG501.3 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253311.1761

CSTR:32169.14.OPE.20253311.1761

Design and experimental study of force measuring fixture for deep hole machining of quartz prefabricated rods

SUN Xiaohuan, WANG Feng, CHI Guangwei, GONG Hu*

(College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University,
Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: gonghu@tju.edu.cn

Abstract: An online measurement system for the deep hole machining force of quartz prefabricated rods has been designed and implemented, addressing the unique characteristics of the rods' mounting structure and the critical relationship between cutting force and tool wear. Leveraging the drilling process dominated by axial force, a double-guide design was employed to isolate the tilting moment and other directional forces, enabling low-cost, real-time cutting force measurement through a unidirectional piezoelectric force sensor. To validate the system's effectiveness, multiple experiments were conducted on quartz prefabricated rods using tools exhibiting varying degrees of wear, and the correlation between cutting force and tool wear progression was analyzed. Experimental results on Panda bias-preserving fiber prefabricated rods indicate that the core is susceptible to fracture when machined with a 12.8 mm diameter tool at cutting forces

收稿日期:2025-01-30;修订日期:2025-03-27.

基金项目:国防基础科研计划资助项目(No. JCKY2021110B46)

approaching 150 N.

Key words: deep hole processing; quartz prefabricated rod; cutting force; online measurement

1 引言

玻璃、陶瓷、激光晶体等硬脆材料在航空航天、电子通信、生物医学和光学等行业中发挥着关键作用^[1-2]。其中,石英玻璃是光通信领域不可缺少的材料。由于石英玻璃等硬脆材料具有高强度、高硬度和高脆性的特性,加工过程面临诸多挑战,如刀具易磨损、材料去除速度慢、加工表面质量降低和工件易产生裂纹等问题^[3-4]。在包含应力棒的光纤预制棒生产过程中,需要对实心的石英玻璃棒进行预应力深孔加工,而预应力深孔的直线度和表面质量会影响光纤的性能。在深孔加工中,相对较长的刀具悬伸会降低加工过程的稳定性,易导致加工中断问题,这不仅可能严重影响工件的加工质量,甚至可能导致工件报废。刀具的过度磨损是引发加工中断的主要原因之一^[5],它对孔径、圆度和表面粗糙度等质量指标均产生重要影响^[6]。

刀具状态监测是一种常用的加工过程刀具磨损状态检测方法,通常使用直接或间接的方式获取刀具磨损特征。间接方式通过测量切削力、振动、切削热和电流等多种信号来反映加工状态,不需要停机而影响加工效率。其中,切削力信号能够有效反映刀具的状态,在加工状态测量中具有明显优势^[7-8],研究人员针对切削力和刀具状态之间的关系进行了相关研究。Zhu等提出了一种用于铣削加工的刀具磨损模型,通过分析切削力与刀具磨损间的关系,准确预测了切削力和刀具寿命的关系^[9]。Rizal等通过安装在刀架表面的两通道应变仪测量切削力信号,对车削加工过程的切削力和刀具磨损状态进行分析,发现刀具侧面磨损量与进给力成正相关^[10]。Sanchez等通过分析钛合金干式加工过程中的切削力,采用间接测量法对刀具磨损进行了详细分析。通过探究切屑的几何形状与切削力和刀具磨损间的关系,确定了最佳切削条件^[11]。

关于孔加工中切削力与加工状态之间的关系研究,刘强等通过建立电压和切削力之间的相

关性来获得切削力,分析了钻孔杆的作用力和传感器的输出功率,并建立了基于多分量测力仪(Kistler 9139AA)的监测实验平台,该切削力监测系统具有良好的兼容性、精度高和良好的动态特性^[12]。董国军等在对高强度钢 18Cr2Ni4WA 进行超声波椭圆振动钻孔时,采用测力仪(Kistler 9257B)测量钻削力,结果表明,提高励磁电压可以有效降低切削力和表面粗糙度,提高钻孔过程的稳定性^[13]。TAMURA 等使用测力仪(Kistler 9272)测量碳钢深孔钻孔过程的切削力,根据切削刃随刀具磨损的几何变化对切削过程进行了研究。结果表明,当刀具磨损增加时,切屑随着边缘形状的变化而径向流动,切屑的堵塞导致切削力产生较大的振荡^[14]。Han 等针对深孔钻孔中由于钻屑和孔槽之间产生的压力过大而导致刀具钻头断裂的问题,建立模型并在不同切削参数下采用测力仪(Kistler 9123C)测量切削力和扭矩对切屑疏散力系数进行了校准^[15]。梁家斌等则通过测力仪(Kistler 9257)对高强度钢 42CrMo 进行深孔枪钻孔加工实验,发现切削力随切削速度的增大而变化^[16]。

测力在工艺研究中是一种常见且有效的手段,通常采用商用三向测力仪进行。然而,商用测力仪存在成本高、操作复杂等问题,这限制了其在实际生产过程中的应用。目前,它们主要用于工艺规律的实验研究。同时,常规商用测力仪因尺寸特性和安装限制,并不适用于深孔加工现场。因此,针对石英预制棒深孔加工,有必要开发一种低成本、高效的实时力监测系统。考虑到石英预制棒深孔加工过程中所施加的力主要集中于刀具轴向,而其他方向的力影响较小,为了简化测量系统设计并降低成本,本文采用单向力传感器来构建测力系统。为了屏蔽其他方向力和力矩的干扰,设计并实现了一种基于双导轨结构的测力夹具。基于该夹具,通过石英预制棒深孔加工实验分析切削力的不同表现,验证了该测力方案的可行性。

2 石英预制棒深孔加工切削力在线监测系统

2.1 系统的总体构成

石英预制棒深孔加工状态在线监测系统的主要组成部分如图 1 所示,其主体是含有单向压电力传感器的夹具结构。系统硬件部分还包含电荷放大器和数据采集卡,电荷放大器将压电传

感器产生的电荷信号转换为可测量的电压信号,并实现对微小信号的放大和处理,数据采集卡将放大后的信号转化为数字信号供上位机 LabVIEW 程序分析处理。采集程序如图 2 所示,其功能包含实时切削力波形显示、小波降噪处理、切削力信号均值计算、频谱可视化、阈值报警和数据保存等模块,帮助加工人员及时了解当前的测量状态。一旦数据超出预设范围,系统会自动触发报警,提醒加工人员及时采取措施。

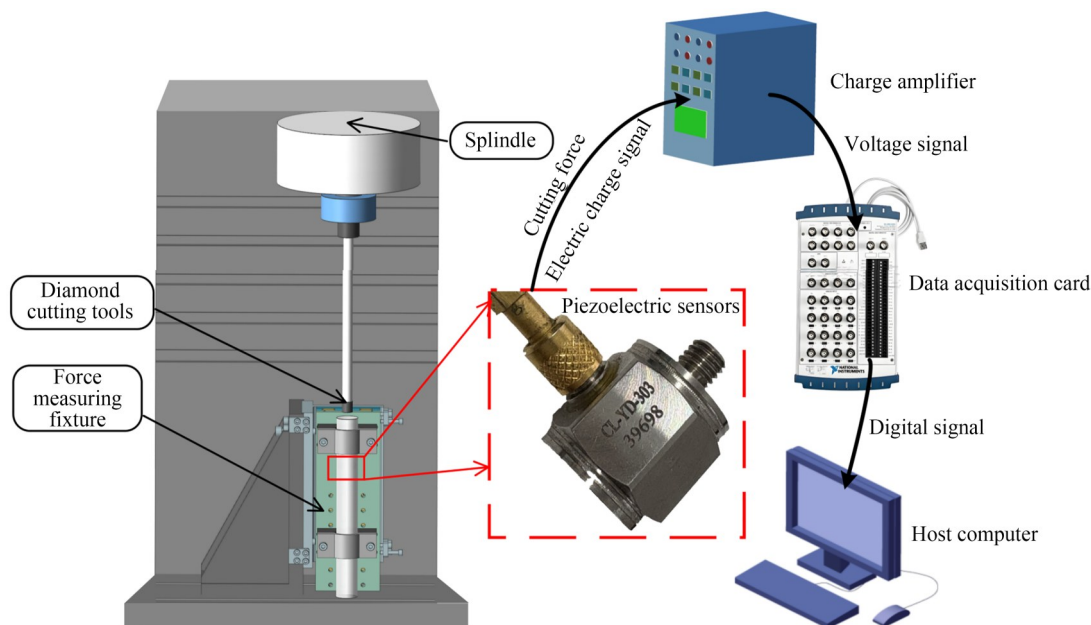


图 1 石英预制棒深孔加工切削力在线测量系统

Fig. 1 Online measuring system for cutting force in deep hole machining of quartz prefabricated bar

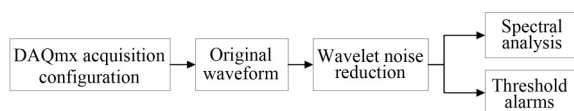


图 2 LabVIEW 上位机采集程序框图

Fig. 2 Block diagram of acquisition program for LabVIEW host computer

2.2 基于双导轨的测力夹具结构设计

根据石英预制棒的常用规格,本文设计的夹具系统能够夹持的石英预制棒长度不超过 300 mm,直径不超过 60 mm。根据经验,不难估计深孔加工轴向切削力大致在几十牛顿到几百牛顿之间。由于压电传感器刚性大、测量误差小、灵敏度高,并且结构紧凑,便于安装,适用于多种情况下动态力的测量,所以系统测力传感器采用单向压电传感器。这里选择 CL-YD303 型号的压

电传感器,如图 3 所示,传感器测力范围可达 $\pm 2\,000\text{ N}$,灵敏度为 4 pc/N ,测量重复性和线性度均小于 $1\% \text{ F}\cdot\text{S}$,满足轴向力测量需求。

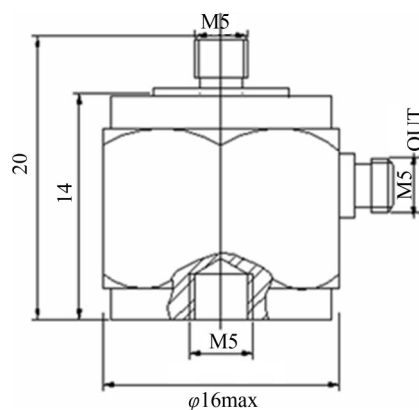


图 3 CL-YD303 压电传感器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of CL-YD303 piezoelectric sensor

依据传感器的安装尺寸对夹具进行设计,总体结构如图 4(a)所示。图 4(b)为传感器安装示意图,为了准确测量传感器受力面的轴向力,需确保传感器受力面保持水平稳定,这通过使用调整块和调节块来实现。调整块的上表面设有安放传感器的凹槽,并且传感器通过螺钉固定在调整块的上部。压电传感器用于测量动态力,将其固定则无法准确测量力的变化,所以在调节块内部设有无螺纹的开孔,使得传感器的受力面与调节块保持直接接触但不固定,从而将工件的轴向切削力作用于传感器上表面。轴向定位装置用于屏蔽非轴向力和力矩的干扰,其结构如图 4(c)所示,采用两根高精度平行直线导轨对传感器进行约束。将调整块和滑块固定,而传感器、调节

块和导轨固定形成一个整体。导轨固定于导轨固定板的内侧面,导轨上的滑块则固定于导轨调整板内侧面。加工过程中,切削力通过导轨调整块把压力传递给传感器,由于平行导轨有效屏蔽了非轴向力和力矩的干扰,传感器仅能接收到轴向切削力。图 4(d)为工件固定装置,由 V 型架、异形压板和导轨调整板组成。V 型架和异形压板配合使用形成环抱石英预制棒工件的结构,增强工件位置的稳定性。异形压板采用尼龙材料,以避免传统机械夹具因夹紧力过大而损伤石英玻璃表面的问题。如图 4(a)所示,调整与安装部分由固定座、调整架,以及一些固定块和调整块组成,解决夹具与机床的安装问题。

在加工过程中,传感器所承受的载荷不仅

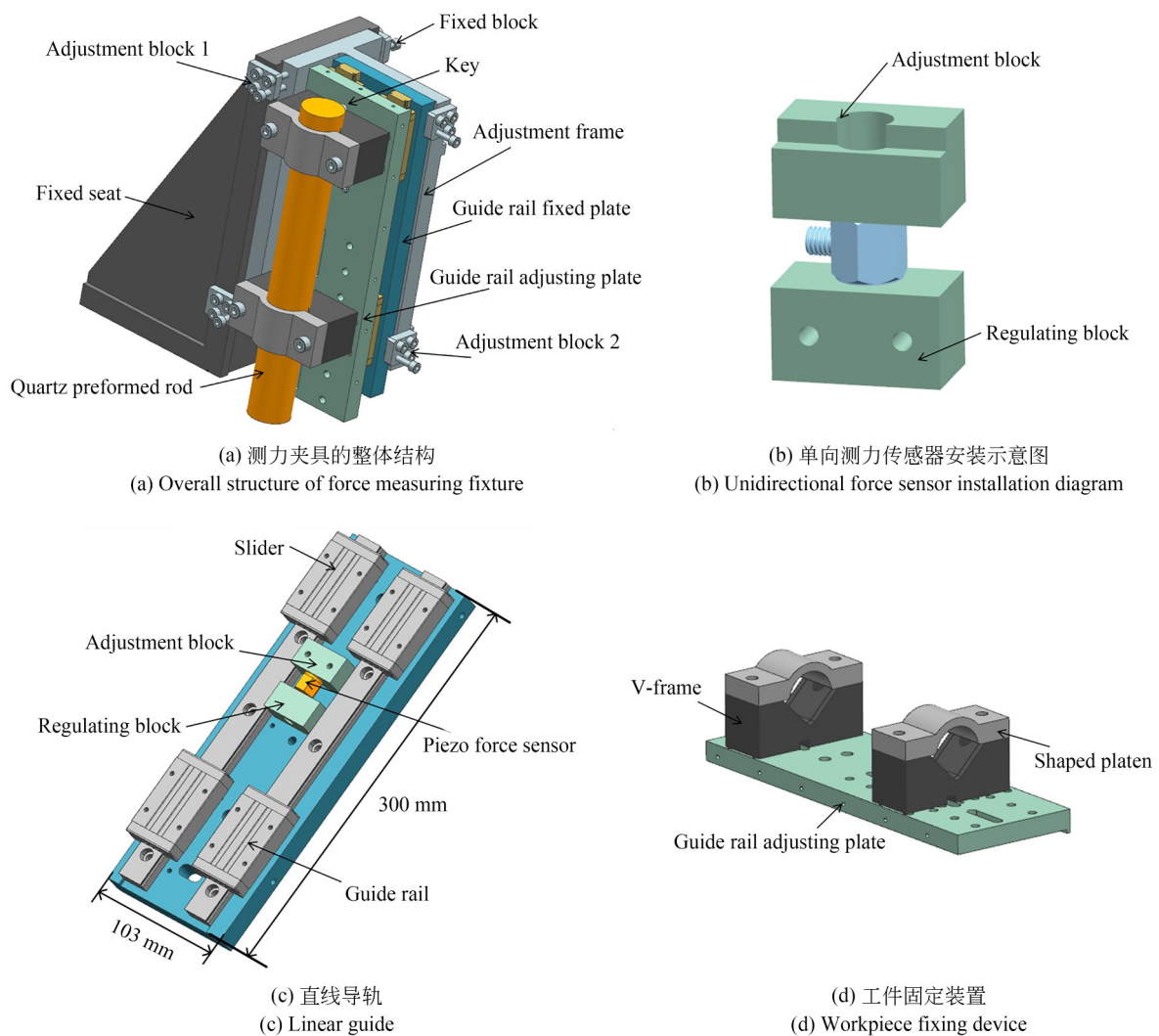


图 4 测力夹具结构

Fig. 4 Structure of force measuring fixture

包括切削力,还包括其在夹具中所承载的质量。因此,需要进行质量计算。夹具的设计要求传感器承担多个部件,包括调整块、导轨调整板、V型架和异形压板。经过计算,这些部件的总质量约为 70 N,而石英预制棒工件的最大质量可达 18.7 N。所选用的传感器量程为 2 000 N,远高于部件质量与切削力之和,这充分验证了传感器选型及夹具设计的合理性。

3 实 验

3.1 实验设计

为了验证测力夹具的有效性,本文设计了多组深孔加工实验。实验是在数控加工中心上进行的,如图 5 所示,除了测力夹具外,还有电荷放大器(型号为 YE5850B),数据采集卡(NI 公司,USB-6259)以及自主开发的旋转超声加工系统。实验工件为直径为 38.9 mm,长度为 298.7 mm 的石英棒,主要的力学性能如表 1 所示。图 6 为

中空的金金刚石刀具。

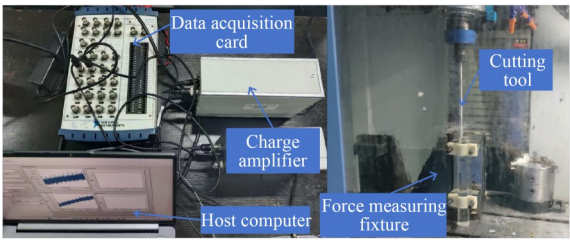


图 5 石英预制棒深孔加工实验装置

Fig. 5 Experimental setup for deep hole machining of quartz prefabricated rods

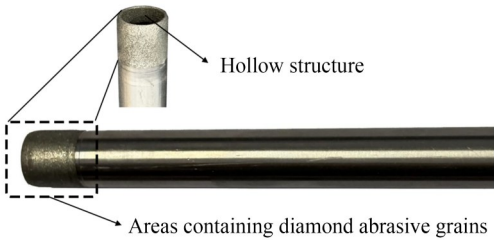


图 6 金刚石中空刀具

Fig. 6 Diamond hollow tool

表 1 石英玻璃棒的主要力学性能
Tab. 1 Main mechanical properties of quartz glass rod

Compressive strength/MPa	Impact strength/MPa	Flexural strength/MPa	Hardness/Mohs
800—1000	0.108	60—70	5—7

在实验中,使用 3 种不同磨损状态的刀具,分别为新刀具、轻度磨损刀具和严重磨损刀具。轻度磨损的刀具已加工了 40 min,严重磨损的刀具已加工了 3 个小时。图 7 展示了使用 Sensofar 变

焦显微镜拍摄的金刚石磨粒照片。在新刀具的显微图像(7(a))中,可以观察到许多的黑色区域。这是因为尖锐的磨粒在显微镜下难以完全被光线照亮,所以在变焦镜头下呈现未被充分曝

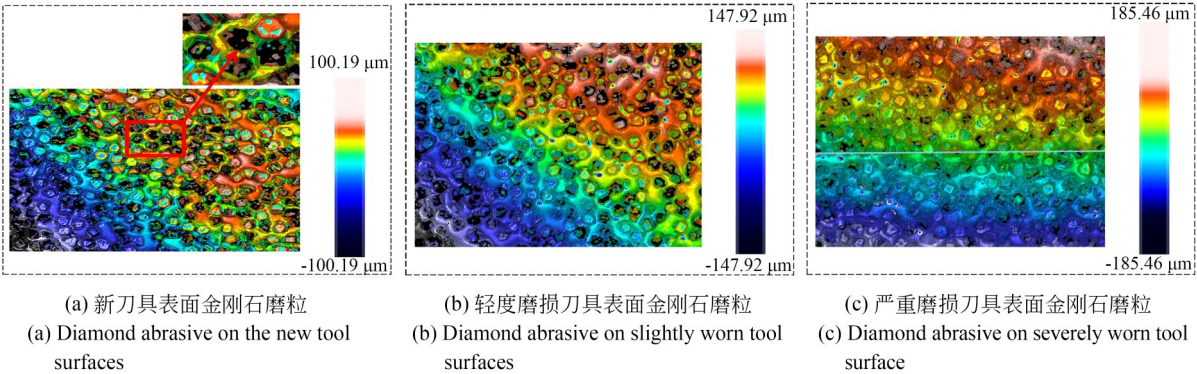


图 7 金刚石中空刀具的变焦显微镜图像

Fig. 7 Zoom microscope images of diamond hollow tool

光的黑色区域,这表明新刀具上有许多较为尖锐的磨粒。随着刀具磨损程度的增加,尖锐磨粒的比例逐渐减少,而被磨平的部分增多。轻度磨损刀具磨粒的磨损程度较轻;而重度磨损刀具的大部分磨粒已经被磨平,在变焦显微镜图像上表现为只剩下少量的黑色空洞,代表着刀具表面已较为平坦。

使用这 3 种不同磨损状态的刀具,在相同的工艺参数下分别进行了钻孔实验,钻孔直径为 12.8 mm,深度为 200 mm,实验参数如表 2 所示。

表 2 深孔加工实验参数

Tab. 2 Experimental parameter for deep hole machining

Experiment number	Rotation speed/ ($r \cdot \min^{-1}$)	Feed rate/ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	Tool state
1	2 400	14	New
2	2 400	14	Light wear
3	2 400	14	Severe wear

3.2 轴向切削力信号分析

为了分析不同磨损程度的刀具对切削力的影响,在钻孔实验过程中实时采集轴向切削力信号。由于噪声的存在,需要对实验中采集的切削力数据进行前期降噪处理,以保证后续分析的可靠性和准确性。本文选用小波降噪处理切削力信号,小波降噪具有多尺度分析能力和良好的时频局部化特性,能在有效去除噪声的同时保留信号的细节。在小波基和分解级数分别选择 Coif3 和 4 时,降噪信号具有较高的信噪比。切削力信号降噪前后对比如图 8 所示,信号的质量显著提升。

“进给-回退-进给”的加工方式使得轴向切削力的时域波形呈现出方波信号的特征。加工主轴的转速为 2 400 r/min,对应的旋转频率为 40 Hz,观察到信号存在一个周期性波动,其频率约为 20 Hz,为主轴旋转频率的一半,因此,信号的周期性波动可能与刀具的振动或者偏心转动有关。为探究不同刀具磨损状态下石英预制棒深孔加工过程中切削力的变化,使用轴向进给时的平均切削力代表切削状态,每进给 20

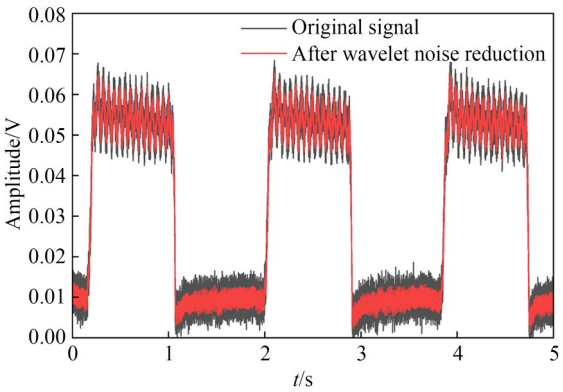


图 8 切削力信号前处理

Fig. 8 Cutting force signal pre-processing

mm 计算一次平均切削力,结果如表 3 和图 9 所示。3 组实验的平均切削力均随钻孔深度的增加而增长。并且在同一钻孔深度时,严重磨损的刀具加工产生的轴向切削力远大于其他两种刀具加工产生的轴向切削力,表明刀具磨损程度的增加会导致石英预制棒深孔加工轴向切削力的增大。使用线性拟合描述各个状态下切削力的变化趋势,参数 k 表征拟合直线的斜率。在使用新刀具进行加工的初期阶段, k 值较大,即切削力增长速率较快,这是由于新刀具磨粒比较锋利,尖部磨损较快;随着刀具进入正常磨损阶段,切削力增长速率减缓。重度磨损刀具的

表 3 不同钻孔深度下的平均切削力

Tab. 3 Average cutting force at different drilling depths (N)

Drilling depth/mm	Experiment 1	Experiment 2	Experiment 3
0	25.362	77.404	263.500
20	38.115	82.525	287.970
40	48.545	86.360	291.840
60	52.479	88.182	297.700
80	55.354	93.271	299.990
100	60.933	102.927	304.900
120	63.833	107.519	311.150
140	68.283	113.847	315.650
160	73.210	115.888	319.900
180	77.316	118.911	325.950
200	81.413	120.303	331.080

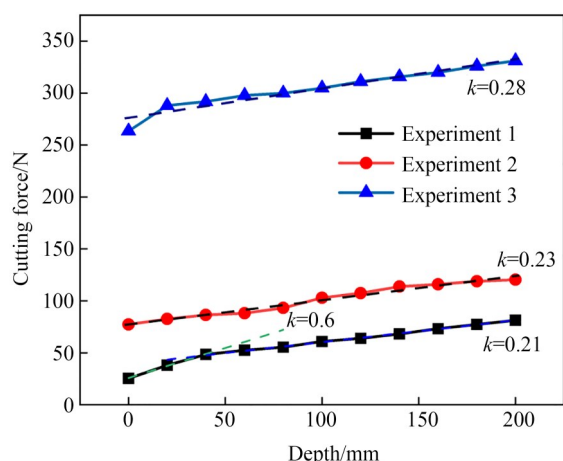


图 9 平均切削力与钻孔深度的关系

Fig. 9 Relationship between average cutting force and drilling depth

切削力变化曲线的斜率高于新刀具和轻度磨损刀具曲线的斜率,这可能是因为随着刀具磨损,金刚石磨粒越来越平,导致切削力的上升速率有所提高。

3.3 切削力信号频域分析

为了研究不同刀具磨损程度对切削力信号频谱特性的影响,需要分别对不同状态下的切削力进行快速傅里叶变换。在比较不同磨损程度的刀具在同一钻孔深度下的频谱特征时,分别选取了实验一、实验二和实验三在钻孔深度 40, 80, 120, 160 mm 处的切削力信号进行频谱分析。为了防止直流分量过大影响其他分量,对信号进行去直流处理,结果如图 10 所示。

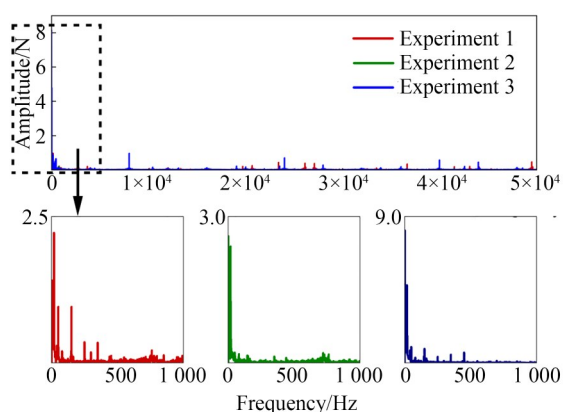
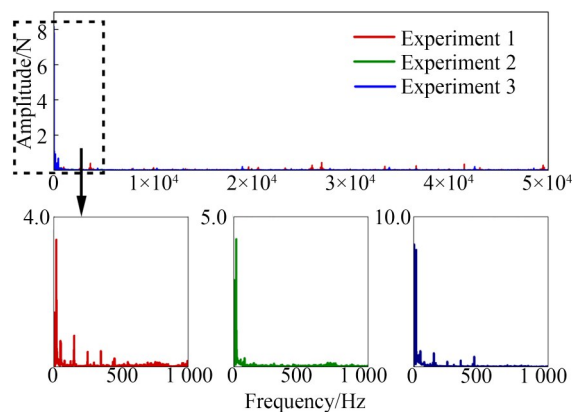
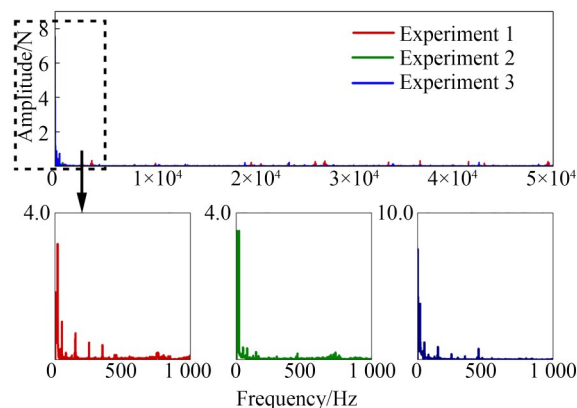
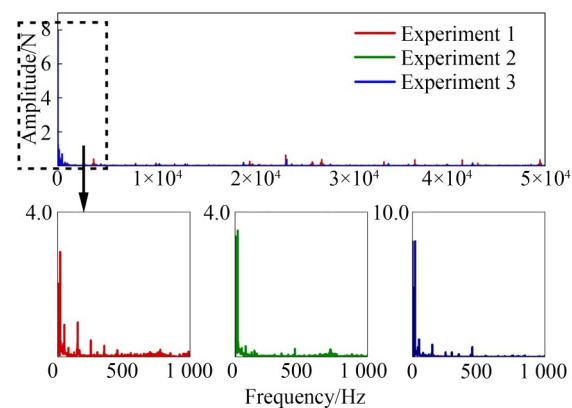
(a) 钻孔深度 40 mm
(a) Drilling depth of 40 mm(b) 钻孔深度 80 mm
(b) Drilling depth of 80 mm(c) 钻孔深度 120 mm
(c) Drilling depth of 120 mm(d) 钻孔深度 160 mm
(d) Drilling depth of 160 mm

图 10 实验一、实验二和实验三的切削力信号频谱

Fig. 10 Spectra of cutting force signals from experiment 1, 2 and 3

实验采用 100 kHz 的采样频率,依据奈奎斯特-香农采样定理,系统可无失真采集的最高信号频率为 50 kHz。如图 10 所示,上半部分为系统采集的 50 kHz 内完整的频谱信息,但在 1 kHz 以上的相对高频区域未发现与刀具磨损状态显著相关的有效特征;下半部分展示了 0~1 kHz 频段的频谱信息。在这一频段中,重度磨损的刀具的频谱幅值明显高于轻度磨损的刀具,后者又高于新刀具。实验一在 40 mm 深度处 20 Hz 频率的幅值为 2.2 N,实验二中为 2.8 N,在实验三中为 8 N。由于信号已经进行了去均值处理,信号低频分量则反映加工过程中切削力的低频振动特征。这种低频信号的明显差距可能是因为刀具磨损会降低材料的去除效率,导致切削力增大,新刀具的切削过程相对稳定,产生的切削力波动较小,频谱特征较为平滑;而随着磨损程度的增加,刀具金刚石磨粒的锐度下降,刀具在切削过程中更加不稳定,切削力波动显著增加,频谱特征的低频部分显示出更高的峰值。切削力信号的这一低频特征可以用来监测刀具的磨损状态,从而避免加工工件的损坏。

3.4 表面粗糙度与切削力的关系

加工完成后,得到芯棒和石英预制棒深孔,图 11 为将芯棒取出后的石英预制棒横截面。由于玻璃芯棒的表面粗糙度和孔是一致的,使用白光干涉仪对实验一、实验二和实验三深孔加工得到的玻璃芯棒进行表面测量,以

探究不同磨损程度刀具对玻璃芯棒表面质量的影响。

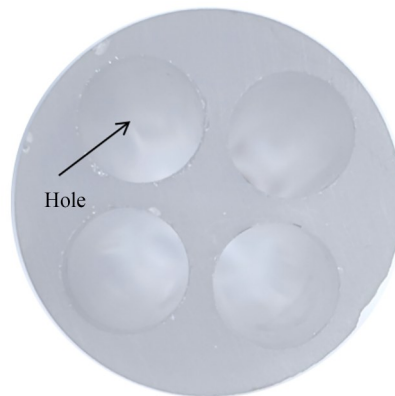


图 11 加工完成后石英预制棒横截面

Fig. 11 Cross section of quartz precast bar after machining

在每一个玻璃芯棒每隔 20 mm 的位置进行表面粗糙度测量,为了减少随机误差的影响,对每个位置随机选取 4 个点进行形貌测量并计算平均粗糙度值(R_a)。图 12 为每根玻璃芯棒在钻孔深度 20 mm 处的三维表面形貌,图 13 展示了 3 种刀具状态下不同深度位置(每隔 20 mm)测量的切削力与表面粗糙度之间的关系。由图可知,表面粗糙度随着切削力的增加而提高,这一趋势在重度磨损刀具情况下尤其明显。磨损导致刀具切削性能的下降,从而增大了加工过程中产生的表面不规则性,加工出的深孔表面质量显著下降。

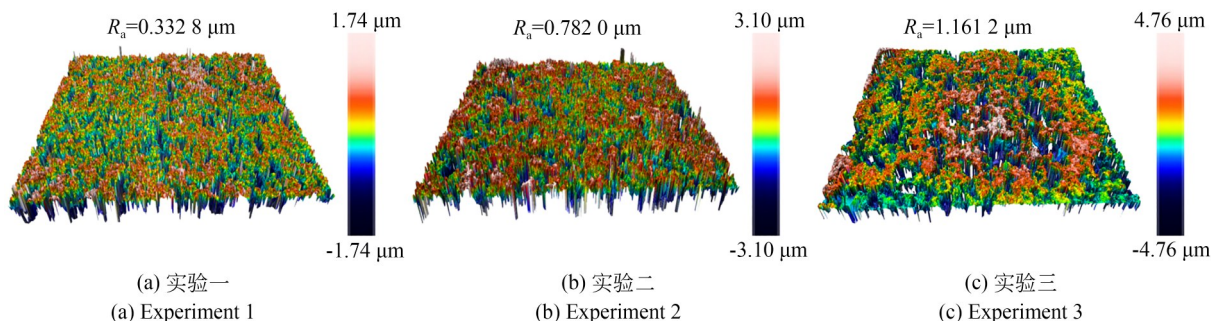


图 12 不同磨损程度刀具下玻璃芯棒的表面形貌

Fig. 12 Surface morphology of glass mandrel under tool with different wear degrees

为了检验测力夹具在熊猫保偏光纤深孔加工过程中的有效性,采用直径为 12.8 mm 的刀具

进行钻孔生产实验。结果发现,当切削力在 150 N 附近时纤芯容易产生断裂,如图 14 所示,验证

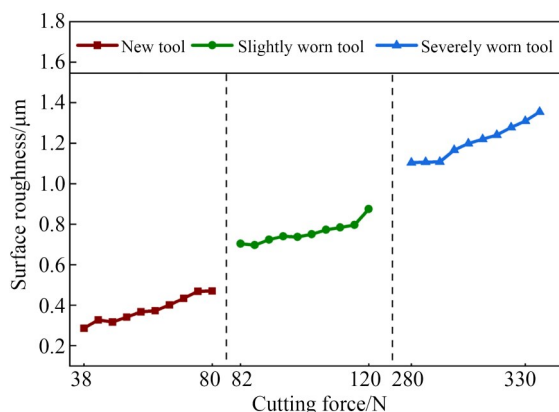


图 13 三种刀具状态表面粗糙度随切削力的变化

Fig. 13 Variation of surface roughness of three tool states with cutting force

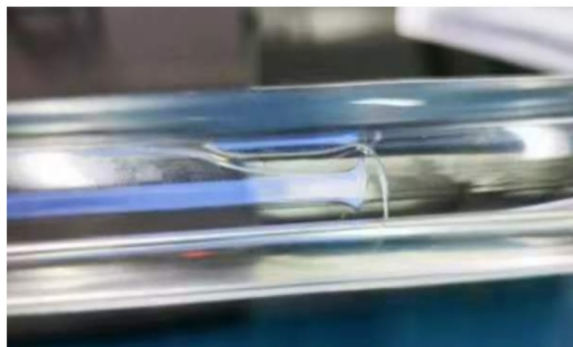


图 14 熊猫保偏光纤内部断裂

Fig. 14 Internal fracture of panda polarizing fiber

参考文献:

- [1] YOU K Y, YAN G P, LUO X C, *et al.* Advances in laser assisted machining of hard and brittle materials[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 58: 677-692.
- [2] 李秋怡, 周天丰, 周佳, 等. 光刻胶掩膜材料超光滑表面切削[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(13): 1909-1921.
LI Q Y, ZHOU T F, ZHOU J, *et al.* Ultra-precision cutting of photoresist mask for ultra-smooth surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31 (13): 1909-1921. (in Chinese)
- [3] 陈肖, 柯金洋, 余中迪, 等. 单晶硅激光辅助超精密切削工艺优化与表面特性[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(1): 99-108.
CHEN X, KE J Y, SHE ZH D, *et al.* Optimiza-

了使用该测力系统对切削力进行监测以防止更大加工损失的有效性与必要性。

4 结 论

为了在石英预制棒深孔加工过程中有效避免因切削力过大而导致的损失,本文提出了一种基于双导轨结构的轴向切削力测量方案,确保工件在加工过程中仅具备一个轴向自由度,并在该方向上布置了单向压电测力传感器,有效屏蔽了其他方向所产生的力和倾覆力矩的干扰。同时,搭建了实验平台并进行了不同刀具磨损状态下的加工实验。结果表明,随着刀具磨损加剧,轴向切削力呈上升趋势,且增长速率有所提升,切削力信号中低频成分的幅值显著增大。针对熊猫保偏光纤预制棒的钻孔实验结果显示,当切削力在 150 N 附近时纤芯容易产生断裂,验证了该测力夹具在预测纤芯断裂风险方面的有效性。

作者贡献声明:

孙晓欢:实验设计,数据分析,论文审核与编辑;

池广伟:实验研究,数据收集。

王丰:论文审核;

宫虎:测量方法的提出,论文构思和撰写。

- tion of process parameters and surface characteristics in laser-assisted ultra-precision cutting of monocrystalline silicon[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31 (1): 99-108. (in Chinese)
- [4] NAKANO T, KORESAWA H, NARAHARA H. Tool condition monitoring method by anomaly segmentation of time-frequency images using acoustic emission in small hole drilling[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2023, 17(3): JAMDSM0034.
- [5] BINALI R, KUNTOĞLU M, PIMENOV D Y, *et al.* Advance monitoring of hole machining operations *via* intelligent measurement systems: a critical review and future trends[J]. *Measurement*, 2022, 201: 111757.
- [6] LU B, LUO Y M. A dynamic condition-based maintenance policy for heterogeneous-wearing tools

- with considering product quality deterioration[J]. *International Journal of Production Research*, 2024, 62(19): 7096-7113.
- [7] ASTAKHOV V P. The mechanisms of bell mouth formation in gundrilling when the drill rotates and the workpiece is stationary. Part 2: the second stage of drill entrance[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42(10): 1145-1152.
- [8] DEMIR Z. Investigate the fluctuation size in thrust force and chip morphology in drilling [J]. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2018, 14(4): 385-397.
- [9] ZHU K P, ZHANG Y. A generic tool wear model and its application to force modeling and wear monitoring in high speed milling[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 115: 147-161.
- [10] RIZAL M, GHANI J A, NUAWI M Z, *et al.* The application of I-kazTM-based method for tool wear monitoring using cutting force signal[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 68: 461-468.
- [11] SANCHEZ Y, TRUJILLO F J, SEVILLA L, *et al.* Indirect monitoring method of tool wear using the analysis of cutting force during dry machining of Ti alloys[J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 13: 623-630.
- [12] LIU Q, GAO D Y, JIA R H, *et al.* Investigating the cutting force monitoring system in the boring process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(5): 3703-3715.
- [13] DONG G J, WANG L, LI C, *et al.* Investigation on ultrasonic elliptical vibration boring of deep holes with large depth-diameter ratio for high-strength steel 18Cr₂Ni₄WA [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108(5): 1527-1539.
- [14] TAMURA S, MATSUMURA T. Cutting process in non-step drilling of deep hole with tool wear progress[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2024, 18(4): JAMDSM0045.
- [15] HAN C, ZHANG D H, LUO M, *et al.* Chip evacuation force modelling for deep hole drilling with twist drills[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98(9): 3091-3103.
- [16] LIANG J B, JIAO L, YAN P, *et al.* Research on deep-hole drilling of high-strength steel using slender Gun drill [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2022, 23(8): 853-868.

作者简介:



孙晓欢(2000—),女,河北邢台人,硕士研究生,2022年于天津大学获得学士学位,主要从事超声加工、嵌入式系统开发等工作。E-mail: 15030986939@163.com

通讯作者:



宫虎(1974—),男,安徽淮南人,副教授,博士生导师,主要从事超声加工、机器人集成制造、超精密加工和五轴加工等方面的研究。E-mail: gonghu@tju.edu.cn