

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.017

纵扭超声参数对钛合金铣削加工性能的影响实验

王力¹, 李峰²

(1. 湖北新产业技师学院(咸宁职业教育(集团)学校), 湖北 咸宁 437000;

2. 华中科技大学 机械工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 超声振动辅助机加工能够满足复杂外形结构零件的高质量需求。加入超声波辅助技术进行切削时可以有效提高切割区域的组织清除效果, 通过纵向和扭转超声振动来实现刀-屑载荷的转化, 大幅提高工艺过程的可控性。以钛合金 Ti-6Al-4V 为加工对象, 开展纵扭超声铣削实验, 采用正交方式分析纵扭超声参数对钛合金铣削加工性能的影响实验。研究结果表明: 随着纵向幅度的提高, 形成了波动性改变的特点和更大残余压应力; 提高纵-扭相位差时, 材料表层的残余压缩应力形成了更小波动幅度, 表现出先增加后降低变化。为获得最大表面残余压缩应力, 确定最佳超声参数为纵向振幅 6 μm 、频率 24 kHz、相位差 -30° 、扭转振幅 8 μm 。该研究有助于提高表面机加工质量。

关键词: 纵扭; 超声振动; 铣削; 参数优化; 残余应力; 实验验证

中图分类号: TB559 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)05-0090-04

Experimental Study on Influence of Ultrasonic Parameters of Longitudinal-torsion on Machining Properties of Titanium Alloy

WANG Li¹, LI Feng²

(1. Hubei New Industrial Technician College (Xianning Vocational Education (Group) School), Xianning 437000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Ultrasonic vibration assisting machining can meet the high quality requirements of complex structural parts, and when ultrasonic auxiliary technology being added for cutting, the tissue removal effect of the cutting area can be effectively improved, and the knife-chip load can be transformed through longitudinal and torsional ultrasonic vibration, which greatly improves the controllability of the process. The experiment of ultrasonic milling of titanium alloy Ti-6Al-4V was carried out, and the effect of ultrasonic parameters on milling performance of titanium alloy was analyzed by orthogonal method. The results show that with the increase of longitudinal amplitude, the characteristics of fluctuation change and greater residual compressive stress are formed. When the longitude-torsional phase difference is increased, the residual compressive stress on the surface surface of the material has a smaller fluctuation range, showing an increase at first and then a decrease. In order to obtain the maximum surface residual compressive stress, the optimal ultrasonic parameters were determined: longitudinal amplitude 6 μm , frequency 24 kHz, phase difference -30° , torsional amplitude 8 μm . This research is helpful for improving the quality of surface machining.

Keywords: longitudinal torsion; ultrasonic vibration; milling; parameter optimization, residual stress; test verification

0 引言

钛合金因具备多项优异特性, 包括比强度高、抗高温氧化性、耐化学腐蚀等, 故被广泛应用于航空航天器材、高精度机械设备、轻型设施等领域, 尤其是在高强度机械结构领域发挥了重要作用^[1-2]。对钛合金进行切削时, 受切削摩擦作用下的实际温度极高, 回弹变形较大, 严重影响了尺寸精度控制, 并且在加工过程中会出现较大残余应力, 严重降低了钛合金构件的服役寿命^[3-5], 因

此优化机加工工艺是提高钛合金切削质量的热点之一。

目前已有许多国内外学者对工件内部应力进行了大量研究, 获得了一些研究进展, 为提高构件的抗疲劳性能提供了重要支撑^[6-7]。在零件加工期间通过设置超声波振动作用, 可以显著降低切削温度和切削载荷, 因此得到较好的加工效果。在设备零件内设置残余压应力是一种非常重要的抗疲劳方法, 利用超声振动方式会产生显著高频振动, 可实现良好的分离效果, 从而产生较低的加

基金项目: 湖北省教育厅科学研究计划指导性项目 (B2018447)

第一作者简介: 王力 (1984—), 男, 湖北咸宁人, 讲师, 高级技师, 本科, 研究方向为机械专业教学、数控技术的应用、智能制造, xingye8318gr@163.com。

工负荷与温度^[8-9]。能够满足零件在压力作用下的加工,对于改善机械部件抗疲劳能力有显著效果^[10-11]。ZHOU等^[12]利用超声振动和磁磨技术相结合的方法,经试验发现,设定超声波振动参数可以大幅提高加工效率,还可以将残余拉伸应力转换成残余压应力,由此提高切削性能。王启涵等^[13]通过实验研究了超声振动下的钻孔壁结构特征与表面质量,并由此提出了一种基于超声波探头的3 mm 钻孔技术,通过对试件进行3 mm 钻孔实验,有效改善了试件的加工质量。周伟等^[14]对TiC4 板材进行了超声振动辅助钻削测试,结果发现超声波可以提高钻头的切削性能,更快完成断屑,达到了良好的加工性能,且易于在工业领域大规模推广。张世杰等^[15]对 CFRP/钛合金层合板进行了高、低频率组合振动钻削试验,发现超声振动可以显著减小钻削轴向作用力,最大限度减少对钛合金材料的损伤,并获得最佳的制孔质量。

本文以 Ti-6Al-4V 钛合金为研究对象,采用纵扭-超声-铣复合工艺与热-力-热耦合作用对模拟结果进行验证,本研究成果可以为提高 Ti-6Al-4V 材料抗疲劳性能奠定可靠的理论基础。

1 纵扭超声铣削原理

加入超声波辅助技术进行切削时可以有效提高切削区域的组织清除效果^[16],在切削过程中可以更好地提高各种尺寸和特种工业零件加工精度,尤其是在一些硬度较大的材料上表现出了更优加工能力,超声实验振动系统^[17]如图1所示。

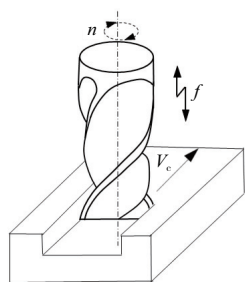


图1 超声实验振动系统

对切削加工过程施加超声振动,加工路径与传统铣削方式存在较大差异,且切削载荷、温度和残余应力都会发生较大变化。从超声波振动特征出发,本文建立了如下的纵向扭转超声波铣削方程^[18]:

$$\begin{cases} x(t) = v_f \cdot t + R_t \cdot \sin \omega_n \\ y(t) = R_t \cdot \cos \omega_n \\ z(t) = A_1 \sin 2\pi f t \end{cases} \quad (1)$$

式中: x, y, z 分别为空间3个方向的位移; f 为振动频率; R_t 为半径尺寸; ω_n 为转角; t 为铣削时间; v_f 为进给速度; A_1 为超声振幅。

根据式(1)对切割位移参数进行控制,通过模拟测试得到式(1)的各项参数^[19]。在刀具中施加纵向扭转超声波时能够清楚看到,工具与被加工部件产生了周期特征的作用,形成了连续接触和分离的运动状态。通过纵向和扭转超声振动实现刀具表面在三维运动过程中摩擦消除,实现刀-屑载荷的转化和切削力的有效传递,大幅提高工艺过程的可控性。

进行超声波振动铣削加工时,刀-工件的分离需要满足如下条件:当振动速率大于该方向的切割速度时,便会引起工件、刀具之间的脱离现象^[20]。

2 纵扭超声铣削模型测试

2.1 测试条件

本文以 VMC850E 三轴设备组成实验平台,采用图1方法,通过无线传送超声波一体化刀柄及硬质合金 TiAlN 刀具实现了钛合金 Ti-6Al-4V 的高效铣削加工。测试的现场情况如图2所示。本文设置的超声系统包括超声发生器、换能器、电源3部分。其中超声电源产生的激励频率为17 880 Hz,换能器端部安装了12 mm 外径的四刃铣刀,能够在 x, y 方向上形成11 μm 的振幅输出。

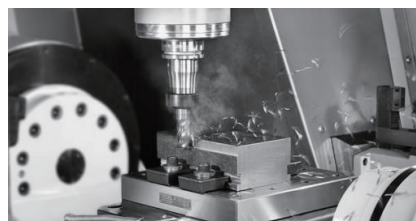


图2 测试现场

2.2 测试过程

采用 Kistler9257B 压电式三向力测量仪测定切削力,利用 K 型热电偶进行测温,获得了如图3所示的温度测试结果。

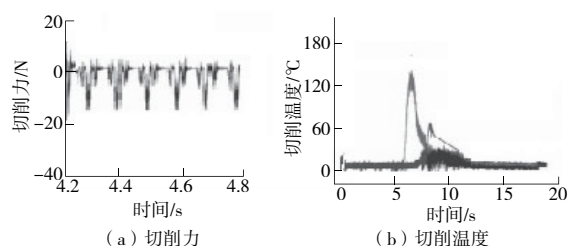


图3 切削力与温度测试结果

为研究表层应力,利用 PROTO-XRD 型 XRD 仪器对所有样品进行了衍射图谱测试,得到了各样品表面的受力状态,具体如表 1 所示,本实验对样品进行电解抛光处理后得到残余应力。

表 1 实验参数

项目	数值	项目	数值
电压/kV	23~29	电流/mA	22
晶面类型	Ti-213	滤波器材料	Ni
光圈尺寸/mm	1×5	衍射角/(°)	±15
弹性参数	11.825 4×10 ⁻⁶	法线倾角/(°)	110~175

3 超声参数对加工性能的影响

针对超声铣削加工中振幅、相位和频率等因素对加工结果的影响,本文提出了一种新型加工方法。在实验过程中,通过对声波测量结果的分析无法有效反映超声波对测量结果的影响。按照 3 因子 3 水平的试验方法获得如表 2 所示的参数。

表 2 超声指标对加工效果的影响

编号	振幅/ μm		频率/ kHz	相位差/ (°)	残余应力/MPa	
	纵向	扭转			表面	最大
1	2	2	16	-90	-46	-453
2	2	4	16	-90	-262	-511
3	2	6	16	-90	-96	-415
4	2	8	16	-90	-102	-365
5	4	2	16	-90	-85	-485
6	4	4	16	-90	-67	-516
7	4	6	16	-90	-132	-362
8	4	8	16	-90	-174	-489
9	6	2	16	-90	-152	-471
10	6	4	16	-90	-184	-562
11	6	6	16	-90	-142	-489
12	6	8	16	-90	-96	-485
13	8	2	16	-90	-78	-602
14	8	4	16	-90	-121	-142
15	8	6	16	-90	-152	-135
16	8	8	16	-90	-111	-346
17	2	2	24	-90	-162	-262
18	2	4	32	-90	-142	-341
19	2	6	40	-90	-116	-456
20	2	8	24	-30	-162	-362
21	4	2	32	-30	-174	-502
22	4	4	40	-30	-85	-268

表 2(续)

编号	振幅/ μm		频率/ kHz	相位差/ (°)	残余应力/MPa	
	纵向	扭转			表面	最大
23	4	6	24	30	-146	-364
24	4	8	32	30	-162	-382
25	6	2	40	30	-95	-511
26	6	4	24	90	-142	-482
27	6	6	32	90	-162	-472
28	6	8	40	90	-84	-325

根据表 2 的试验结果,可以得到图 4 所示的超声波与残余应力改变情况。

图 4(a) 测试结果表明,随着纵向幅度的提高,产生了一个残留压缩应力作用,并且形成了波动性改变的特点。当扭振幅度增大以及超声波频率提高后,在零件表面形成了更大残余压应力。提高纵-扭相位差时,材料表层的残余压缩应力形成了更小波动幅度。图 4(b) 是在设置更大振幅的情况下,发生了最大残余压缩应力降低的变化趋势,同时形成了波动变化的特征。随着振动频率的增加,产生的最大残余压缩应力幅值较大。随着纵-扭相位增大后,最大残余压应力表现出先增加后降低的趋势,这是由于各参量在相位差不同时具有周期性变化的特点,期望残余应力可以通过调整相位差来实现^[21]。

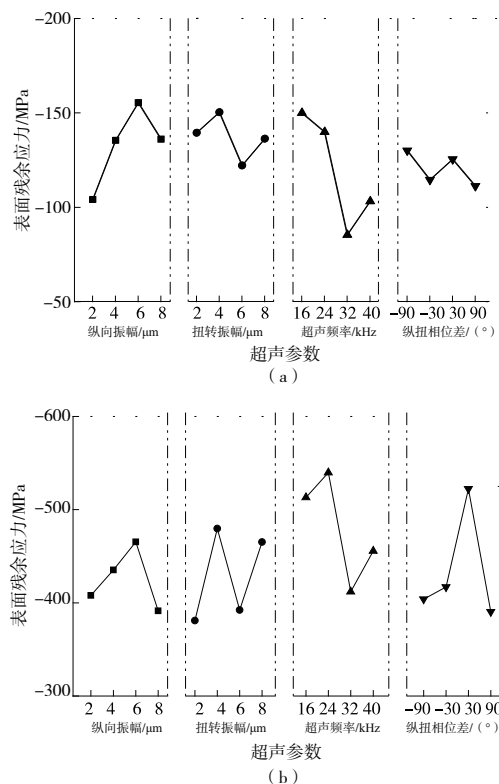


图 4 不同超声参数下的残余应力

本实验产生的残余应力如表3所示,扭振幅值和频率对表层残余应力的影响最明显,而对表层残余应力的影响程度最小。

表3 超声参数对残余应力的影响 单位: %

类别	参数			
	纵向振幅	扭转振幅	频率	相位差
表面残余应力	9.83	34.52	33.58	20.26
最大残余应力	19.90	9.41	26.18	40.14

通过对上述结果开展综合分析可知,要获得最大的表面残余压缩应力,需要将纵向振幅设置为6 μm ,频率为24 kHz,相位差为 -30° ,扭振幅度为8 μm 。

4 结语

本文开展纵扭超声振动辅助下铣削参数优化及残余应力分析,得到如下结论。

1) 随着纵向幅度的提高,形成了波动性改变的特点和更大残余压应力;提高纵-扭相位差时,材料表层的残余压缩应力形成了更小波动幅度,表现出先增加后降低的趋势。

2) 为获得最大表面残余压缩应力,确定最佳超声参数纵向振幅6 μm 、频率24 kHz、相位差 -30° 、扭转振幅8 μm 。

参考文献:

- [1] 张明军,陈烁,王鑫波,等. 纵扭超声辅助铣削 SiCp/Al 复合材料表面质量研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2024,43(5):96-107.
- [2] 牛秋林,戴福朋,荆露,等. 难加工材料纵扭超声振动辅助铣削加工研究进展[J]. 宇航材料工艺,2024,54(3):1-10.
- [3] 杨浩,谢晋,陈佳欣,等. 金刚石磨粒切削-滚压钛合金的干磨削系统控制[J]. 机械工程学报,2025,61(9):168-177.
- [4] 那春雨,姜增辉,刘玮,等. 钻削参数对钻削 TC4 小孔切削力的影响[J]. 制造技术与机床,2025(6):67-72.
- [5] 宋阳轩,汪振华,黄雷. 超声纵扭辅助铣削 TiAl 合金表面质量及刀具磨损研究[J]. 制造技术与机床,2024(2):31-37.
- [6] 张泽华,董志国,曹桂新,等. Ti6Al4V 分离型超声振动微钻削的钻削特性仿真与试验研究[J]. 工具技术,2023,57(9):64-68.

- [7] 陈亮. 基于二维超声振动的钛合金内孔镗削试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2022(9):108-111.
- [8] 陈守峰,王成勇,李伟秋,等. 超声振动铣削加工石墨材料去除机理与加工表面质量评价[J]. 机械工程学报,2024,60(9):86-96.
- [9] 周京国,张宇航,隋天一,等. 分离-接触特征对钛合金超声振动辅助铣削加工特性影响规律研究[J]. 机械工程学报,2024,60(9):97-113.
- [10] 贾雪冰,袁益楚,申博宇,等. 基于不同切削液对钛合金加工性能适配性评价研究[J]. 工具技术,2025,59(5):101-106.
- [11] 李靖,徐天昊,罗明. 压气机叶片高性能切削加工技术研究进展[J]. 机械工程学报,2025,61(9):23-45.
- [12] ZHOU K, CHEN Y, DU Z W, et al. Surface integrity of titanium part by ultrasonic magnetic abrasive finishing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2015,80(5):997-1005.
- [13] 王启涵,陈涛,叶俊鹏,等. CFRP 小孔钻削中超声振动对切削角度和孔壁质量的影响分析[J]. 机械设计与制造,2023(11):54-59,63.
- [14] 周伟,李涛,吴何畏,等. 车用 TiC4 板超声振动辅助钻削动力学及钻孔过程试验[J]. 中国工程机械学报,2022,20(4):320-324.
- [15] 张世杰,焦锋,李远霄,等. 碳纤维复合材料/钛合金叠层结构高低频复合振动钻削试验[J]. 机械设计与研究,2020,36(6):120-124,129.
- [16] 赵京鹤,刘宏岩,胡晶. 基于 BP 神经网络的超声振动钻削钻头磨损状态监测试验研究[J]. 机械设计与研究,2020,36(2):83-86.
- [17] 王晓亮,焦锋,戚嘉亮,等. 碳纤维增强复合材料纵扭复合超声振动钻削试验[J]. 机械设计与研究,2019,35(4):121-125.
- [18] 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.
- [19] 王奔,李展业,赵哲,等. 纵扭复合超声辅助拆卸螺纹副装置设计与研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2025(2):6-11.
- [20] 周天洋,陶征,赵丹. 纵扭复合型超声电机定子的非线性动力学特性研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2024,38(9):135-142.
- [21] 苏志朋,梁志强,李娟,等. 钛合金微槽超声螺线辅助铣磨加工试验研究[J]. 机械工程学报,2024,60(9):5-12.

收稿日期:2024-02-06