

压电超声换能器金属外壳切削工艺研究

李亚飞,董 姝,李瑞峰,鲜晓军,唐盘良,马晋毅

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘要:为满足金属导电物体探测的要求,采用机械方法切削压电超声换能器金属外壳以形成 0.10 mm 绝缘台阶。借助有限元仿真软件 ANSYS/LS DYNA 分析发现,径向切削过程中陶瓷片所受应力为 56.35 MPa,远小于轴向切削过程中陶瓷片所受应力 216.25 MPa,故在分段叠加切削过程中陶瓷片所受的应力变形明显更小。结合理论分析和切削试验制定了 3 次叠加径向进刀工艺,优化了金属残留毛刺去除方法,解决了切削过程中频发的换能器匹配透声端面损伤及其与压电陶瓷分层的问题,对于压电超声换能器的应用推广具有重要意义。

关键词:超声换能器;金属外壳;切削加工;有限元仿真

中图分类号: TN384; TN305 **文献标识码:** A

Research on the Cutting Process of Metallic Shell for Piezoelectric Ultrasonic Transducer

LI Yafei, DONG Shu, LI Ruifeng, XIAN Xiaojun, TANG Panliang, MA Jinyi

(The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: To ensure the effective detection of metal conductive objects, the end face of the transducer was machined mechanically to remove part of the shell and form a 0.10 mm insulating step. Finite element simulation using ANSYS/LS-DYNA revealed that the stress on the ceramic plate during radial cutting was 56.35 MPa, significantly lower than that encountered during axial cutting, which reached 216.25 MPa. Furthermore, both stress and deformation of the ceramic plate in the piecewise superimposed cutting process were markedly reduced. By combining theoretical analysis and cutting experiments, a three-time superimposed radial feed process was developed, and the removal method of metal residual burrs was optimized, addressing the frequent damage to the matching and transmitting end face of the transducer and delamination with piezoelectric ceramics during the cutting process. The results of this study have great significance for the application and promotion of piezoelectric ultrasonic transducers.

Key words: ultrasonic transducers; metal shell; cutting process; finite element simulation

0 引言

作为重要的无损检测器件,压电超声换能器的工作原理是利用压电材料的逆压电效应实现电声学信号之间的转化,被广泛应用于航空航天、核电能源、医学成像等国民经济领域^[1-4]。压电超声换能器是将电能转换成超声能量的基本装置,其基本结构主要由匹配透声材料、压电功能材料、背衬吸声材料及金属外壳等组成^[5-6]。

由于换能器的匹配透声层与金属外壳(通常是压电陶瓷功能层的负极端)处于一个平面,故常采用在传感器端面与被探测物体间添加绝缘透声层

(耦合剂、粘结胶等)的方式来保证超声能量的有效传输^[7-9]。在探测工作频率及激发电压较小的情况下,过厚的绝缘透声层将严重影响声波的传播。因此,对导电物体进行探测时需要利用切削去除部分金属外壳以确保与探测物体表面的绝缘间隙,避免后续应用过程中出现导通短路。

本文重点研究了机械加工去除压电超声换能器金属外壳以形成绝缘台阶的工艺。经过理论推演和切削试验,利用自动铣床实现换能器金属外壳的精准切削,解决了切削过程中频发的换能器匹配透声端面损伤及其与压电陶瓷分层的问题,提升了

金属外壳台阶加工的精度和成品率。

1 产品结构

本文研究的压电超声换能器前端匹配层 Al_2O_3 陶瓷片可减小负载与压电材料间声阻抗失配度,并保护压电材料免受外界的伤害。背衬层采用了环氧树脂与金属粉末的混合物,经室温固化得到高阻抗背衬层以起到吸收多余反射声波的作用。不同部分之间通过环氧树脂或导电银浆进行粘结,最后封装在不锈钢外壳内。不锈钢外壳可以减少测试过程中周围电磁波的电噪声干扰,固定各个组成部分并起到保护作用,最终得到标准的压电换能器,其结构如图1所示。

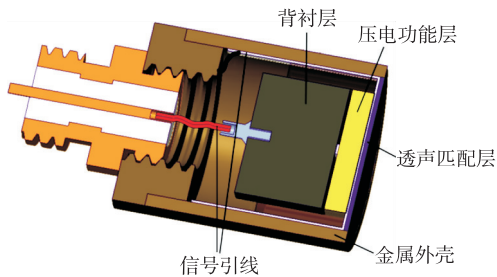


图1 压电换能器结构示意图

对导电物体进行探测时需要切削去除部分金属外壳以形成足够的台阶,进而确保与探测表面的绝缘间隙,避免后续应用过程中出现导通短路或者击穿。由于不锈钢外壳与陶瓷片为硬接触,陶瓷片较薄且为脆性材料,切削过程中过大的应力和变形会使匹配层陶瓷片产生崩边或裂纹,造成换能器失效或存在潜在的质量隐患,如图2所示。因此,选择合适的切削刀具以及切削参数是提高产品成品率和可靠性的关键^[10-11],也是本文研究的重点。

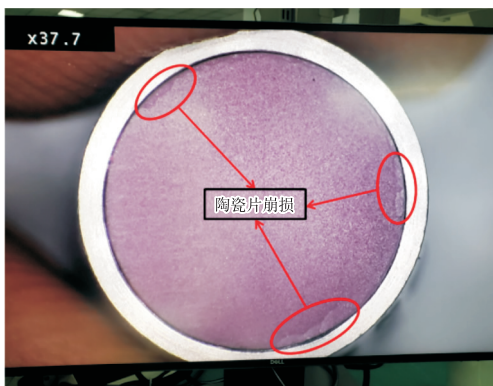


图2 切削后陶瓷片损坏

本款换能器的不锈钢外壳C为薄壁套筒结构,厚度为0.55 mm;前端匹配层 Al_2O_3 陶瓷片厚度为

0.2 mm。考虑到极端应用环境下换能器端部绝缘透声层的介质耐电压,确定换能器外壳加工尺寸轴向不小于0.09 mm,径向完全切削去除,其外形及加工尺寸如图3所示。

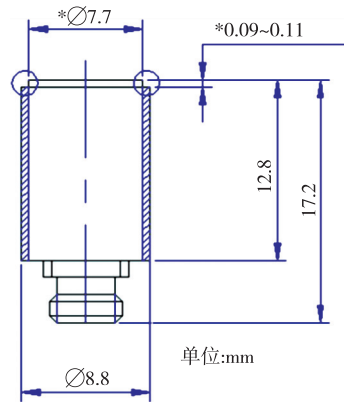


图3 换能器加工图

2 切削工艺分析

由于换能器外壳的壁厚较薄,刚性较差,较大的切削应力会带来更大的金属外壳形变以及工件振动,使陶瓷片受到挤压而产生损伤或破损。实现较小的切削力是金属外壳加工的关键。

切削厚度的变化引发动态切削力,根据切削力理论公式可得:

$$F(t) = k_c a_w a_c(t) \quad (1)$$

式中: k_c 为车削刚度系数; a_w 为切削宽度; $a_c(t)$ 为动态切削厚度。车削刚度系数由所加工材料和刀具的属性决定,而切削宽度和进刀量是影响切削力的最大因素。因此,合适的刀具和切削参数选择是解决超声换能器金属外壳切削过程中端面陶瓷片受力破损的关键。

2.1 切削刀具选择

刀具的选择需考虑刀具的材料、尺寸、形状等。根据零件的结构特点、材料特性、余量及表面粗糙度要求,选择合适的粗、精加工刀具。刀具的耐用度、工件加工精度和表面质量在很大程度上都取决于刀具材料及几何角度的合理选择。

在刀具角度的选择上,车端面和外圆时采用外圆车刀。考虑到不锈钢零件具有强度高,塑性大,加工时易发生硬化的特点,为获得锋利的刃口需采用较大的前角。刀具后角不宜过大,若后角过大,则使刀具的楔角减小,降低切削刃的强度,加速刀具的磨损。精加工时选择较小刀尖半径,可获得较高的表面质量。根据实践经验选择高温合金精车刀

片型号为 CCGT09T302-PM2 9605, 为正前角槽形刀片, 刀具前角 18° , 刀具后角 7° , 刀尖半径 0.1 mm , 如图 4 所示。



图 4 刀具图示

2.2 切削过程仿真

在实际外壳切削去除过程中有两条可供选择的途径: 轴向进刀和径向进刀。设置不同的进刀方式和切削参数会使换能器金属外壳产生不同的切削力, 进而给到端面陶瓷片的压力也不同。由于切削过程是工件材料在刀具的剪切挤压作用下产生弹性变形、塑性变形、应变硬化, 最后撕裂形成切屑的复杂过程^[12]。本文利用有限元软件 ANSYS/LS DYNA 进行金属切削过程的模拟仿真。

2.2.1 模型建立

金属切削作为机械加工的重要手段, 合理的建模是确保仿真结果准确度和效率的关键。对仿真模型进行简化处理, 设定陶瓷片和金属外壳体为刚性接触结构。通过对金属外壳和陶瓷基片进行分割处理来减少网格数量, 其中切削区域轴向厚度为 1 mm , 网格大小为 0.1 mm ; 刀具轴向厚度为 3 mm , 网格大小为 0.2 mm 。对金属外壳和刀具的接触面进行加密处理, 最终模型网格总数量为 $83\ 750$ 个。具体网格划分如图 5 所示。

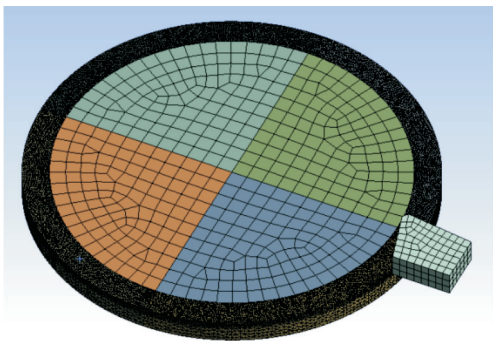


图 5 金属外壳和刀具装配模型

2.2.2 切削参数设置

结合实际及软件的特性进行材料定义和结构方程选取。切削刀具的材料为 YT15, 假设刀具为

严格的弹性材料, 其材料模型仅需定义材料密度、弹性模量和泊松比; 换能器金属外壳为 45 钢, 将其看作弹塑性体, 按照弹塑性变形进行计算。采用 Johnson-Cook 结构方程定义其材料特性, 详细参数设置如表 1 所示。

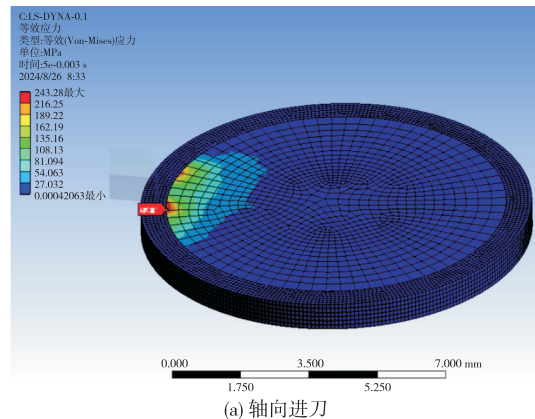
表 1 材料属性表

材料	45 钢	YT15
材料密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 850	11 500
弹性模量 E / GPa	210	530
泊松比 N	0.3	0.3
比热容 $C_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	452	/
熔点 T_m / K	1765	/
参考温度 T_r / K	298	/
初始屈服应力 A / MPa	497.75	/
硬化模量 B / MPa	647.15	/
硬化指数 N	0.393	/
强化参数 C	0.06	/
软化参数 M	0.626	/

在前处理设置中对金属外壳和陶瓷片施加绑定约束, 整体施加旋转载荷, 真实模拟实际工件转动。刀具与金属外壳有摩擦接触。接触特性中定义类型为侵蚀。设置从惩罚、主惩罚比例因子为 100。刀具进给量为轴向。分析设置中, 结束分析时间为 0.02 s 。

2.2.3 切削力分析

在考察实际加工条件并与工艺人员沟通后, 设定金属外壳旋转转速为 $1\ 600 \text{ r/min}$, 以单次完成切削, 轴向和径向两种方式进刀, 对切削过程陶瓷片所受应力进行仿真, 如图 6 所示。



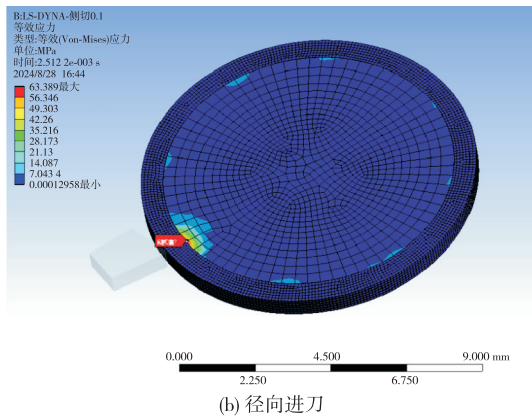


图6 不同进刀方式切削应力仿真云图

由图6可见,径向切削过程中陶瓷片所受应力极值为63.39 MPa,明显小于轴向切削过程中陶瓷片所受应力极值(为243.28 MPa),故选择径向进刀切削方式。由于上述仿真为单次完成切削,即以切削宽度0.1 mm完成切削。为进一步优化切削工艺,对不同切削宽度情况进行仿真,设定单次切削(切削宽度为0.1 mm)和叠加切削(切削宽度为0.05 mm),考察切削过程中陶瓷片受力形变情况,仿真结果如图7所示。

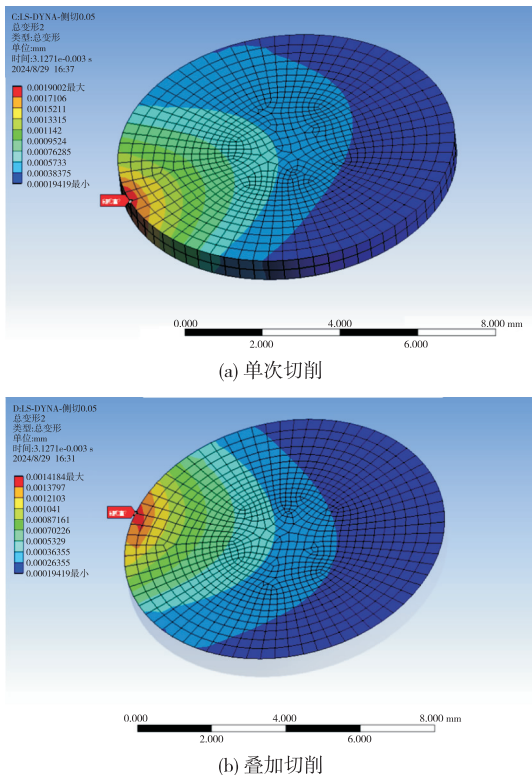


图7 切削过程中陶瓷片变形仿真云图

由图7可见,相对于单次切削,分段叠加切削过程中陶瓷片所受应力变形小,属于更优的切削工

艺。因此,在实际工艺制定过程中应考虑分段切削换能器金属外壳。

3 换能器装夹切削

结合上述仿真分析的结果,选择合理的切削工艺对换能器进行金属台阶切削加工,尽量减小切削应力对换能器端面陶瓷片的影响,同时开展试验验证。

3.1 产品装夹

零件加工需根据实际情况对引起变形的应力位置以及相关作用力进行全面考量和分析,并根据加工情形选用合适的夹具和装夹方式。本案例切削过程中采用 SCHAUBLIN 102-VM 精密机床作为加工平台,工件直接由三爪卡盘进行夹紧,夹持时换能器端部外露长度为5 mm。

加工前,检查换能器外观完好,无变形、锈蚀、划痕等缺陷。根据“十字法”在换能器匹配层陶瓷片上选取5点,采用台阶测高仪检测匹配层平面度应小于0.03 mm。将满足要求的换能器装夹在车床上,用百分表检验圆周跳动,圆周跳动应小于0.02 mm,否则应重新装夹以保证换能器装夹的同轴性,装夹后的换能器如图8所示。



图8 换能器装夹切削

3.2 切削过程

若要确保零件的最终质量能满足实际标准要求,则需制定和实施科学的工序工艺路线,并重点关注变形问题,同时遵循科学合理的原则提出具有针对性的解决办法。经过仿真分析,发现切削过程中最大切削力发生于切削刀刃与工件碰撞起始瞬间,后续切削力将迅速减小并处于稳定阶段。为避免碰刀时切削力导致严重金属变形而损伤陶瓷片,选择径向进刀方式,并分3次进给完成切削,以减小切削过程中的切削应力。

按图3要求车除换能器外壳端面金属层,以形成

所需要的绝缘台阶。设置机床车速为 1 600 r/min, 选用 1# 刀具($R=0.1$ mm), 轴向进给为 0.10 mm。切削分 3 次完成, 设定刀具第 1、2 次轴向进给切削量为 0.04 mm, 径向切削量为 0.525 mm。

3.3 毛刺处理

第 1、2 次切削完成后, 调慢机床转速至 210 r/min, 用油石打磨去除匹配层外缘金属残留。打磨去除金属残留后, 设置刀具第 3 次轴向进给量为 0.02 mm, 径向切削量为 0.5 mm, 并按照上述步骤加工打磨去除金属残留。加工完成后, 取下已加工换能器, 用压缩空气吹净金属粉屑, 并用无尘布蘸取洁净无水乙醇擦拭换能器表面。在 20X 以上体视显微镜下检查换能器加工后的金属台阶规整, 匹配层陶瓷片周边应无金属毛刺残留。若有金属残留(见图 9), 则需用手术刀片沿陶瓷片侧边旋转轻抛去除。

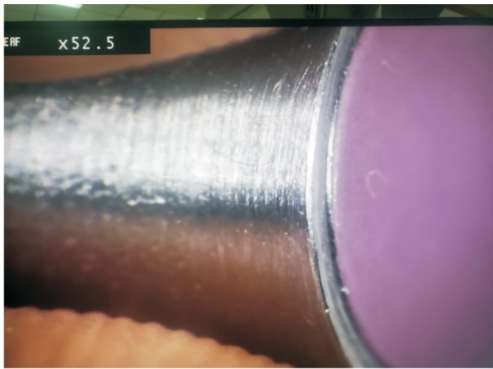


图 9 切削台阶金属残留

换能器端面外围金属层台阶无毛刺和金属多余物残留, 换能器端面无损伤, 且底部银层未暴露; 测量换能器端面外围金属台阶尺寸应在 0.09~0.11 mm。换能器加工完成, 自检合格后方可进行下一只换能器加工, 如图 10 所示。加工完成后, 用保护套保护换能器辐射端面。



图 10 合格金属台阶形貌

换能器加工完成后, 将器件辐射端面安装固定于金属平板上, 用绝缘测试仪测试传感器外壁与金属平板之间的绝缘电阻, 测试电压为 100 V, 要求绝缘电阻测试值不小于 50 M Ω , 保证了换能器金属外壳的绝缘耐受性。

4 结束语

为满足对金属导电物体探测适用性的需求, 采用机械切削方式去除换能器端面部分外壳以形成绝缘台阶。借助有限元软件仿真和切削试验相结合的方式, 对换能器切削过程中的刀具、进刀方式、切削量以及毛刺去除等工艺进行分析设计, 实现了换能器金属外壳的微量去除。该方案使机械加工金属外壳台阶具有较高的精度和成品率, 避免了切削过程中频发的换能器匹配透声端面损伤及其与压电陶瓷分层的问题, 满足极端应用环境下换能器端部绝缘透声层的介质耐电压要求, 对于压电超声换能器的应用推广具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王国良, 刘学良, 于法鹏, 等. 宽温域压电超声换能器研究进展[J]. 压电与声光, 2020, 42(6): 875-883.
WANG Guoliang, LIU Xueliang, YU Fapeng, et al. Research progress of piezoelectric ultrasonic transducer with wide temperature range [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(6): 875-883.
- [2] 周正干, 孙广开. 先进超声检测技术的研究应用进展[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 1-10.
ZHOU Zhenggan, SUN Guangkai. New progress of the study and application of advanced ultrasonic testing technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 1-10.
- [3] 田华. 新型超声换能器与辐射器的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2013.
- [4] 董方旭, 周鑫翊, 刘发付, 等. 压电空气耦合超声换能器制备优化及实验验证[J]. 压电与声光, 2022, 44(4): 552-556.
DONG Fangxu, ZHOU Xinyi, LIU Fafu, et al. Preparation optimization and experimental verification of piezoelectric air-coupled ultrasonic transducer [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022, 44(4): 552-556.
- [5] 孙志刚. 面向流量计量的超声波换能器特性仿真与测试分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

- [6] 王巨杉. 高性能单基元压电超声换能器的制备与声场特性研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2021.
- [7] 陈思. 压电换能器动态性能仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [8] 姚灵, 左富强, 王欣欣. 超声水表换能器综合性能指标的建立[J]. 测试技术学报, 2016, 30(3): 260-266.
YAO Ling, ZUO Fuqiang, WANG Xinxin. The exploration of establishment ultrasonic water meter transducer integrated performance index[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2016, 30(3): 260-266.
- [9] 鲜晓军, 赵天龙, 孙昕郝, 等. BS-PT 基高温压电超声换能器研究[J]. 压电与声光, 2022, 44(3): 431-434.
XIAN Xiaojun, ZHAO Tianlong, SUN Xinhao, et al. Study of the high temperature piezoelectric ultrasonic transducer based on BS-PT ceramics[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2022, 44(3): 431-434.
- [10] 杨样, 陈夷, 高位. 切削三要素对钛合金薄壁件变形的影响试验研究[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(5): 61-64.
YANG Yang, CHEN Yi, GAO Wei. Experimental study on influences of titanium of cutting three factors on the deformation alloy thin-walled parts[J]. Mechanical Research & Application, 2020, 33(5): 61-64.
- [11] 邓亚弟, 税妍, 向志杨, 等. 基于均匀试验法的干湿铣削 B65A-S 材料切削力对比分析[J]. 工具技术, 2022, 56(10): 114-116.
DENG Yadi, SHUI Yan, XIANG Zhiyang, et al. Comparative analysis of dry and wet milling B65A-S cutting force based on uniform test method[J]. Tool Engineering, 2022, 56(10): 114-116.
- [12] 周泽华. 金属切削原理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984.