太赫兹喇叭芯模车削工艺研究①

张旭涛,曹　强,石　金
(中国空间技术研究院西安分院,西安　710000)

摘　要:太赫兹频段以其高分辨率和轻小型化等特点,在电子、信息、国防和航天领域拥有巨大的应用前景。以 448 GHz 太赫兹喇叭的芯模为研究对象,针对此类微细窄槽结构,进行加工工艺研究。通过装夹方式对受力的影响分析,优化加工过程中的装夹方式,减少径向切削力对同轴度和尺寸精度的影响;针对细微窄槽的加工,设计成型刀具,减少机床重复定位误差对窄槽精度影响;建立切削过程仿真模型优化切削参数,降低切削力,;优化走刀路径,加强切削系统的刚性,以减小变形。通过试切对工艺方案进行验证,完成了在直径 ϕ0.65 ~ ϕ3.52 mm 的锥形结构上均布宽 0.1±0.005 mm,单边深度 0.33 mm,间隔 0.2 mm,即中间隔片厚度 0.1 mm 的窄槽加工。从而解决此类高精度微细结构加工难题,为更高频段太赫兹喇叭加工提供工艺经验。

关键词:太赫兹;窄槽;仿真;切削参数
中图分类号:V747　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1674-7135(2021)06-0042-06
DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2021.06.007

Research on turning process of terahertz horn core mold

ZHANG Xutao, CAO Qiang, SHI Jin
(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an　710000, China)

Abstract: The terahertz frequency band has a great application prospect in the fields of electronics, information, national defense and aerospace because of its high resolution and miniaturization. In this paper, the mold of 448 GHz terahertz horn is taken as the research object. For this kind of micro narrow groove structure, the process is optimized. To reduce the influence of radial cutting force on coaxiality and dimensional accuracy, design the forming cutting tool for the processing of fine narrow groove, reduce the influence of repeated positioning error of machine tool on narrow groove accuracy; The simulation model of cutting process was established to optimize the cutting paramenters and reduce the cutting force. Optimize the tool path and strengthen the rigidity of the cutting system to reduce the deformation. The process scheme was verified by trial cutting, and the cone structure with diameter of ϕ0.65 ~ ϕ3.52 mm was completed with average width of 0.1±0.005 mm, unilateral depth of 0.33 mm and smell separation of 0.2 mm, this is the middle partition wall thickness of 0.1 mm narrow groove processing. so as to solve this kind of high-precision micro-structure processing problem, for higher frequency terahertz horm processing provides work.

Key words: terahertz; narrow groove; simulation; cutting parameter

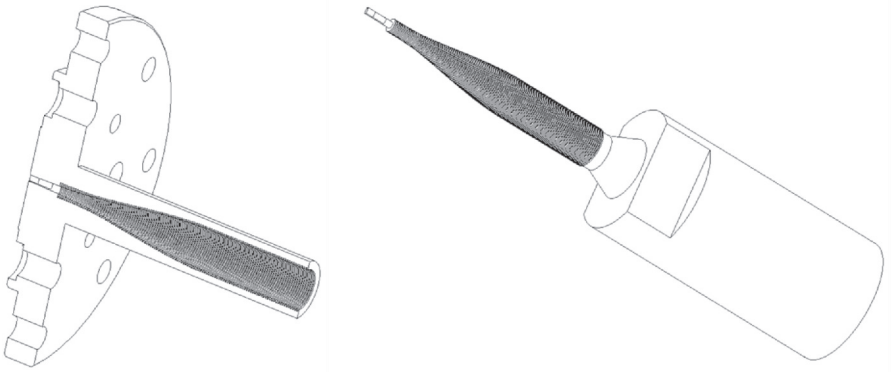
0　引言

太赫兹波处于 101 1 ~ 101 3 Hz 波段,介于微波和远红外之间,具有极高的研究和开发价值。太赫兹系统和器件具有高分辨率和轻小型化等优点,已经在天文探测、气象遥感、深空探测、高分辨率成像和物质分析等方面获得大量应用,并凸显有优势[1],由于波长短,光子能量低,该频段的器件对加工精度有着严苛的要求。

① **收稿日期**:2021-09-02;**修回日期**:2021-11-03。
作者简介:张旭涛(1994—),助理工程师,主要研究方向为机械精密加工。**E-mail**:180392609321@163.com

太赫兹喇叭为其典型零件,内腔为锥形波纹结构,均布 116 处窄槽,宽度 0.1±0.005 mm,中间隔片厚度 0.1±0.005 mm,最大直径 ϕ3.52 mm,在前端最小直径 ϕ0.65 mm 处分布最深环槽,单边深度 0.33 mm,同轴度 0.02 mm,喇叭模型如图 1(a)所示,传统的机械加工和电火花加工难以完成此产品的加工,只能采用电铸的方法。

电铸芯模为喇叭内腔的倒模,材料为铝合金 2A12-T4,其结构如图 1(b)所示。对此类微细窄槽均布结构的零件,从装夹方式、刀具、切削用量和走刀方式进行分析,通过试切和实际加工验证分析结果,从而解决此类零件的加工难题,为后续太赫兹频段载荷的研究提供基础。



(a)太赫兹喇叭模型　　(b)芯轴模型

(a)Terahertz speaker moder　　(b)Spindle modle

图 1　试件模型

Fig. 1　Specimen model

1　难点分析

1)芯模为锥形结构,前端刚性弱,容易产生颤振和变形,影响加工精度。车削窄槽时径向受力,在零件高速旋转时前端会出现摆动,影响同轴度,严重时会出现断裂。

2)芯模外圆均布 0.1 mm 的窄槽,精度要求±0.005 mm,尺寸不容易控制。相邻窄槽之间的隔片厚度 0.1 mm,在加工中容易出现隔片侧倾,影响窄槽精度。

2　工艺分析

2.1　装夹方式

传统车削锥形结构的装夹方式为:卡盘夹持,尾端用顶尖支撑(一夹一顶)。这种装夹方式,顶尖有轴向推力,工件轴向被限制,因为挤压的存在,加上车削窄槽时径向受力,轴向容易出现弯曲变形(如图 2 所示),因此这种方式不适用此类产品加工[2-3]。

优化装夹方式:一端用卡盘夹持,另一端完成前端 ϕ0.64 mm 圆的粗、精加后,在车床尾座上夹持专用工装作为扶料装置,夹持前端外圆,工装与零件之间控制较小的间隙,如图 3 所示,保证其 Z 方向自由,使零件不受轴向挤压力,同时限制 X、Y 方向自由度,避免前端由于自重和径向切削力的作用产生弯曲变形,在高速旋转的离心力作用下引起摆动,从而影响同轴度。

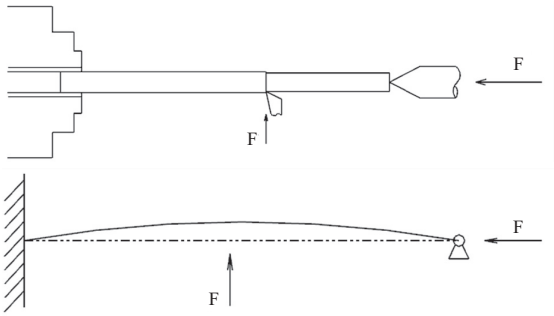


图 2　装夹方式及力学模型

Fig. 2　Clamping mode and mechanical mode

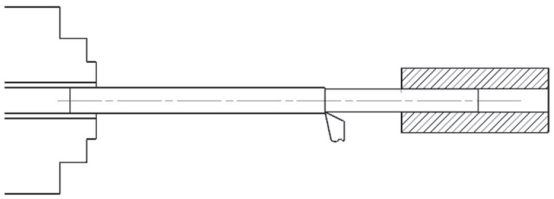


图 3　装夹方式

Fig. 3　Clamping mode

2.2 刀具设计

0.1 mm 窄槽精度要求±0.005 mm,加工中受机床定位精度、切削变形及切削热等因素影响,精度不易控制。为减少影响因素,在窄槽加工中选择一次成形,用刀具尺寸保证窄槽宽度,避免二次加工时受机床 Z 轴重复定位精度的影响。

由于窄槽加工时切屑和刀具的挤压作用会使窄槽两边的隔片向窄槽左右倾斜,导致槽宽尺寸变大,因此采用刀具宽度公差带设计为负差 $0.1^{0}_{-0.005°}$。

刀具材料选用硬质合金,牌号 GU25,YG 类硬质合金。刀具前角大小直接影响切削区的变形、切削力、温度,功率消耗等。增大前角,可以使被切削金属层的塑性变形程度减小,切削力明显减小,降低切削功率,降低温度,减小切削热。但是同时刀具强度相应减弱,为保证刀头有足够的刚性,刀具前角不能过大,因此采用前角为 4°的切槽刀[4]。

2.3 切削用量选择

针对窄槽切削过程建立力学建模,进行切削仿真,优化切削参数。在直角正交切削过程中,刀具和工件之间的相对运动是恒定的,假设工件的材料是均匀的,则在每一时刻,刀具切除材料的状态是相同的。从主运动的方向来看,在平行于基面的平面上,被切除的工件材料截面是一个矩形,根据有限元的离散思想,可以把工件看成许多这样的矩形截面片的叠加,也就相当于把工件外表面的切削层展开。同样的,在切削深度的方向上,只有一条切削刃参加切削,而且切削刃上的各个点都是等效的。因此可以把三维的六面体单元简化为具有一个厚度参数的四边形平面单元来处理,从而把比较复杂的三维问题转化为比较简单的二维平面问题(如图 4 所示)。在这个二维问题中由于刀具的硬度比工件的硬度高许多,所以在建模时,将刀具看做刚体,这与实际切削过程是相符的。刀具材料的变形按弹性计算,而工件材料的变形按弹塑性计算。工件和刀具之间的运动是相对的,而刀具在这里被假设为刚体。由于没有变形的影响,在场量的传递和转换中,刀具计算起来比工件简单的多。因此,在工件的下表面施加全约束,把工件的旋转运动转化为刀具沿着主运动方向的直线运动[5-8]。

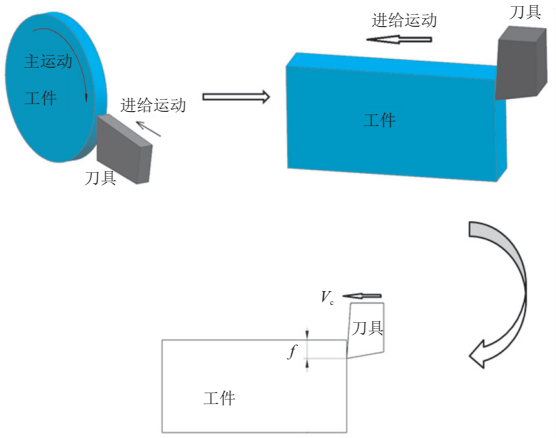


图 4 切削仿真建模

Fig. 4 Cutting simulation modeling

切削三要素中,窄槽加工中背吃刀量 A_P 为槽刀宽度,本次仿真槽刀宽度保持不变,只分析进给和切削速度。进给量 f 表示切削层厚度,切削速度 $V_C = \pi DS$。在实际切削过程中工件材料常常处在高温、大变形和大应变率的情况下发生弹塑型应变,因此综合考虑各因素(应变、应变率、热软化)对工件材料硬化硬力的影响,应用 Jonson-Cook 本构模型能很好的描述此过程,其数学表达式为[9]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)\left[1 + C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1 - C\ln\left(\frac{T - T_r}{T_M - T_r}\right)^m\right] \tag{1}$$

式(1)中,A 为准静态条件下的屈服强度;B 为应变硬化参数;ε 为等效塑性应变;n 为硬化指数;C 为应变率强化参数;$\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变率;$\dot{\varepsilon}_0$ 为材料的参考应变率;T_r 为温度系数,通常取 25 ℃;T_M 为材料熔点;m 为热软化参数。

刀具材料为硬质合金,其热力学性能如表 1 所列。

表 1 硬质合金热力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of cemented carbide

密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比	热膨胀系数/(10^{-6}·K^{-1})	热导率/(W·m^{-1}·K^{-1})	比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})
14 500	650	0.25	4.5	85	526

芯模材料为铝合金 2A12-T4,铝合金 Johnosn-Cook 本构模型参数如表 2 所列,热力学性能如表 3 所列。

表 2　铝合金 Johnosn-Cook 本构模型参数

Tab. 2　Johnosn-Cook constitutive model parameters of aluminum alloy

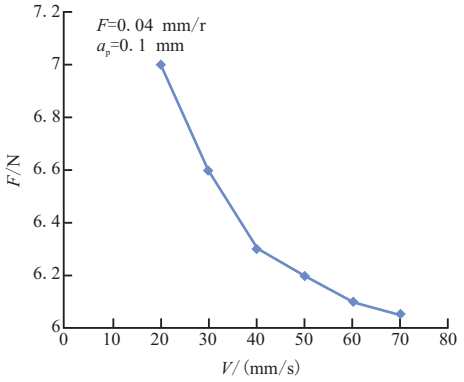
A/MPa	B/MPa	C	n	m
324.1	113.8	0.002	0.42	1.34

表 3　铝合金热力学性能

Tab. 3　Thermodynamic properties of aluminum alloy

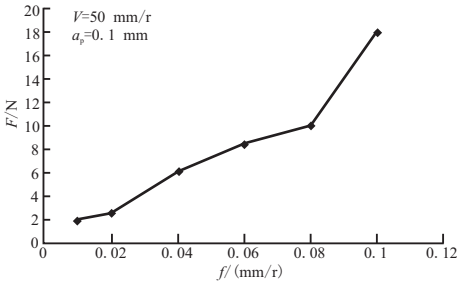
密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比	热膨胀系数/(10^{-6}·K^{-1})	热导率/(W·m^{-1}·K^{-1})	比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})
2 700	70	0.33	23.6	20.6	271.6

采用控制变量法,分别仿真切削速度和进给量对切削力的影响。进给从 0.02 mm/r 到 0.1 mm/r 变化,切削速度从 20 ~ 70 mm/s,得到如图 5 所示曲线图。



(a)切削力与切削速度关系

(a)Relationship between cutting force and cutting speed



(b)切削力与进给量关系

(b)Relation between cutting force and feed

图 5　切削力与切削用量关系

Fig. 5　Relationship between cutting force and cutting dosage

从图 5 中可以看出切削速度对切削力影响较小,在保持进给不变时,随着切削速度的增加,切削力随之减小,在 40 mm/s 之后切削力减小趋势明显变缓。进给量对切削力影响较大,进给量增大会使切削层高度增加,切削力随之增加,同时进给量减小随之加工效率降低,因此在保证较小切削力的同时选择高进给量。

在窄槽切削中,刀具和工件强度都比较弱,因此切削力尽可能小,由于窄槽加工切屑不易排出,散热困难,因此转速不易过高。采用切削速度 V_c:40 ~ 60 mm/s,进给 f:0.01 ~ 0.03 mm/r。

2.4　走刀方式

为保证加工前端时有足够的刚性,减小变形对尺寸精度的影响,对走刀方式进行优化。由于外形轮廓为不连续阶台,可采用分段式加工,在加工前端的窄槽时,后端提供足够的刚性,支撑窄槽加工时的径向受力,减小变形[10-13]。

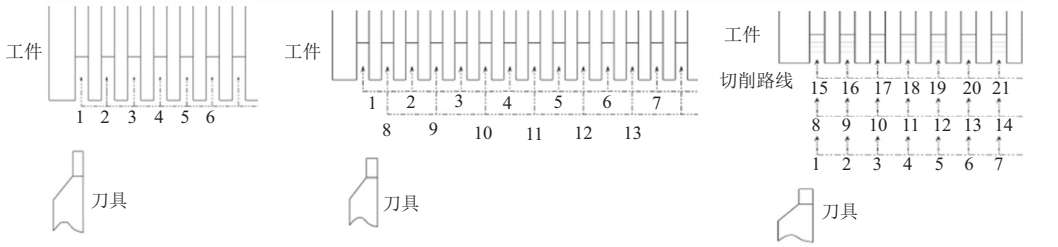
针对窄槽加工设计以下 3 种走刀方式:

1)顺序切槽。切削完成一个槽,顺序切削第二个,每个槽分层加工,如图 6 (a)所示。此走刀方式避免了机床 Z 轴重复定位误差对槽宽尺寸的影响。

2)间隔切槽。中间间隔一个槽切削,切削完成后再切削中间窄槽,每个槽分层加工,如图 6 (b)所示。此走刀方式主要考虑两窄槽中间隔片太薄强度低,顺序切槽时,窄槽一侧隔片已成形,而另一侧仍为实体毛坯,在切削过程中挤压力会导致已成形一侧倾斜,发生塑性变形影响加工精度。

3)径向分层,顺序切槽。窄槽直径方向分层,顺序切削完所有窄槽第一层,再切削第二层,如图 6 (c)所示。此走刀方式主要解决前两种的不足,但是此方式在返回加工第二层切削时受机床 Z 向重复定位误差影响,增加了窄槽宽度误差。

经分析,初步采用第一种方案顺序切槽方式进行试切,减少机床精度对窄槽的影响。



(a)顺序切槽
(a) Order grooving

(b)间隔切槽
(b) Interval fluting

(c)径向分层,顺序切槽
(c) Radial layering, spquential grooving

图 6 走刀方式

Fig. 6 Tool path

3 加工验证

3.1 切削试验

在肖布林 130 数控车床上验证切削仿真结论,并进行走刀方式试验,选择最优走刀方式,该车床 X 轴重复定位精度为 0.002 mm,Z 轴重复定位精度为 0.003 9 mm。首先测量切槽刀刀宽精度,实测尺寸为 0.095 mm,满足设计要求。在 ϕ10 棒料上试切窄槽,伸出 30 mm,排除轴的弱刚性变形对窄槽精度影响。分别对深度 0.35 mm、0.3 mm、0.25 mm、0.2 mm、0.15 mm、0.1 mm 窄槽进行分组试切,每组加工 10 处窄槽。

1)顺序切槽。在影像仪上检测发现,深度小于 0.2 mm 时,隔片高度低,强度较好,槽宽均在 0.096 ~ 0.099 mm 之间。当槽深大于 0.2 mm 时隔片向已加工一侧倾斜。

2)间隔切槽。检测发现,槽深大于 0.2 mm 的试件,中间窄槽明显变宽,与两侧窄槽相差 0.008 mm。

3)径向分层,顺序切槽。窄槽直径方向分层,顺序切削完所有窄槽第一层,再切削第二层。检测后,中间隔片无明显倾斜,各槽尺寸均匀,均在 0.096 ~ 0.103 mm 之间,满足设计要求。切削参数为 f=0.01 mm/r、V=50 mm/s,仿真分析可靠,样件如图 7 所示。与顺序切槽加工深度小于 0.2 mm 的结果相比较,尺寸明显偏大,此切削方试,在返回加工第二层时引入了机床 Z 向重复定位误差,增大了窄槽宽度。

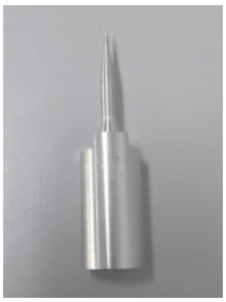
图 7 试验件

Fig. 7 Test piece

3.2 芯模加工

根据电铸芯模结构,毛坯采用 ϕ16 mm 棒料,将芯模按窄槽数量分为 29 组,分别加工。分段粗、精车外圆到尺寸后,按径向分层,顺序切槽,样件如图 8(a)所示。加工 10 组零件,检验重复加工的一致性。在线检测同轴度,用百分表检测零点头部和尾部同轴度,如图 8(b),同轴度为 0.016,满足设计要求。用影像仪测量窄槽尺寸如图 8(c)所示,116 处窄槽尺寸均在 0.095 ~ 0.103 mm 之间波动,满足设计要求。

此工艺方案可满足槽宽 0.1 mm,公差带大于 0.008 mm,单边深度小于等于 0.33 mm 的类似微细窄槽结构加工。

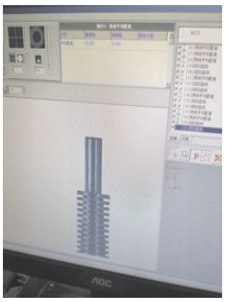


(a)芯模样件

(a)Mandrel

(b)在机同轴度测量

(b)Coaxiality measurement



(c)影像仪尺寸测量

(c)Image-instrument survey

图 8　芯模加工

Fig. 8　Core mold processing

4　结论

文章以太赫兹喇叭芯模为研究对象,针对此类微细窄槽结构的加工问题进行分析,并进行实际加工验证和结果分析,解决了此类产品结构的加工问题。

通过对装夹方式走刀路径分析,采用分段式车削加工方式,在加工前端时零件末端留有大量残余毛坯,提供足够的强度,保证整个加工系统有够的刚性,用一夹一扶的装夹方式,保证切削尾端时前端不出现摆动,解决弱刚性和摆动引起的同轴度超差问题。

通过对窄槽切削过程进行仿真,对窄槽加工路径进行优化并进行实际加工验证,得出微细窄槽加工方法:采用成型刀具。当窄槽深度度小于 0.2 mm 时,顺序切槽,避免机床重复定位误差对窄槽宽度的影响;当窄槽深度大于 0.2 mm 时,采用径向分层,顺序切槽,此方法应计算机床 Z 轴的重复定位误差对槽宽的影响。

参考文献:

[1] 雷红文,王虎,杨旭,等. 太赫兹技术空间应用进展分析与展望[J]. 空间电子技术,2017,14(2):1-7+12.

[2] 刘林林. 数控车床细长杆类零件的加工技巧[J]. 考试周刊,2014(A5):138.

[3] 沈志平. 细长轴的夹拉车削工艺[J]. 机械制造与自动化,2009,38(1):60-62.

[4] 周宇. 细长轴加工中刀具几何参数的选择[J]. 机械制造与自动化,2011,40(3):45-46.

[5] 岳彩旭. 硬态切削过程的有限元仿真与实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2010.

[6] 庞新福,杜茂华. 基于 ABAQUS 的二维直角切削加工有限元分析[J]. 工具技术,2008,42(2):39-42.

[7] 李玉平,周里群,吴义彬. 金属二维正交切削的有限元分析与刀具角度优化[J]. 精密制造与自动化,2012(3):13-16.

[8] 王素玉,艾兴,赵军,等. 正交切削区应力应变场的数值模拟[J]. 工具技术,2005,39(11):25-28.

[9] JOHNSON R,COOK W K. A constitutive model and data for metals subjected to large strains high strain rates and high temperatures[C]//The 7th International Symposium on Ballistics,1983:541-547.

[10] 杨方. 机械加工工艺基础[M]. 西安:西北工业大学出版社,2002.

[11] 李文超. 提高细长轴数控车削精度工艺方法的研究[D]. 成都:西华大学,2011.

[12] 王小翠,李蔚,侯志敏. 细长轴车削用量优化与加工变形误差补偿技术的研究[J]. 制造技术与机床,2007(10):85-88.

[13] 李桂华,费业泰,马修水. 细长轴加工误差补偿原理[J]. 农业机械学报,2006,37(6):131-133+167.