

箱体内部密集细长窄缝导轨加工工艺

郭召

西安大医集团股份有限公司 陕西西安 710018

摘要：以高硬度模具钢箱体内部加工为例，对电火花线切割加工密集细长窄缝进行研究，结合零件结构特征，分析工艺难点，制定工艺路线，通过对样品进行加工验证，效果良好，满足了工程应用要求。

关键词：线切割；电火花；导轨；细长窄缝；工艺研究；加工验证

1 序言

多叶光栅是医用直线加速器的关键核心部件，包含上百片独立运动的叶片（见图1），叶片安装在箱体中，独立运动形成所需的复杂射野形状。叶片箱体是承载叶片的关键零件，箱体内部密布细长窄缝导轨，对叶片进行独立支撑、导向。箱体窄缝导轨的加工精度影响叶片运动的灵活性及独立性，影响叶片和箱体导轨配合的磨损程度。本文以叶片箱体为研究对象，对箱体内部密集细长窄缝导轨的加工工艺进行研究，分析工艺难点，制定工艺路线，并对样品进行加工验证。

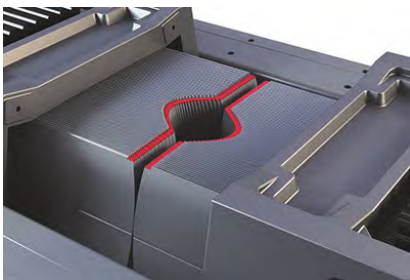


图1 多叶光栅叶片及箱体

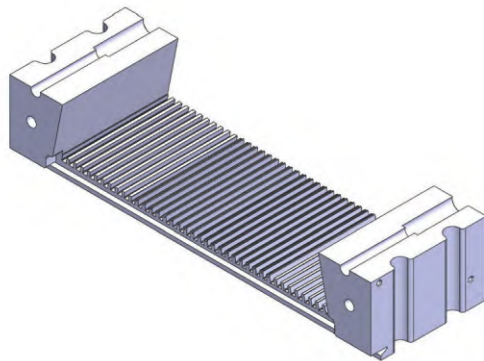
2 零件结构及工艺难点分析

叶片箱体采用模具钢制成，为了在和钨合金叶片配合过程中磨损尽可能小，对材质进行了淬硬处理，通常硬度达到60~65HRC。图2所示为叶片箱体内部窄缝导轨结构，窄缝导轨最小宽度<1mm，相邻最小间距<1mm，导轨宽度的尺寸精度要求±0.01mm，位置度要求±0.01mm，表面粗糙度值

$Ra < 1.6\mu m$ 。窄缝导轨密集布置在箱体内侧，尺寸小、硬度高，进刀空间狭小，常规铣削加工难以实现。每道窄缝有严格的尺寸精度、轮廓精度、位置精度及直线度要求，加工窄缝数量众多，连续加工过程的刀具磨损、机床进给系统的累积误差都会影响零件精度。箱体材料去除量大，加工残余应力大，窄缝导轨区域易因应力变形而导致精度下降。窄缝导轨有内凹拐角特征，加工过程中刀具要不断在小行程范围内反复调整方向，加工过程易产生抖动，影响加工精度及表面质量。



a) 正视图



b) 剖视图

图2 叶片箱体内部窄缝导轨结构

3 电火花线切割加工的基本原理及要求

电火花线切割加工属于特种加工，其基本原理是利用连续移动的细金属电极丝（通常为铜丝或钼丝）与工件之间产生脉冲性的火花放电，产生的高温通常达到 $8000\sim 12000^{\circ}\text{C}$ ，足以熔化甚至气化金属表层材料，从而实现对金属工件的切割。电极丝和工件相对运动，使整个切割过程能够在金属表面上形成所需的形状^[1]。

图3所示为线切割机床加工基本原理，其中 a 为电极丝直径， b 为火花间隙。从动送线轮、电极丝收集轮及导向单元使电极丝和工作台保证在正确的几何位置上。工件（和工作台连接）和电极丝之间构成脉冲电源回路，通常将工件端设为负极。电极丝和工件的加工区域保证所需放电间隙，在脉冲电源作用下产生脉冲放电，在电火花高温作用下，零件表层材料熔化去除，在切削液作用下剥离加工区域，切削液同时起到避免零件表面烧伤及电极丝氧化的作用。

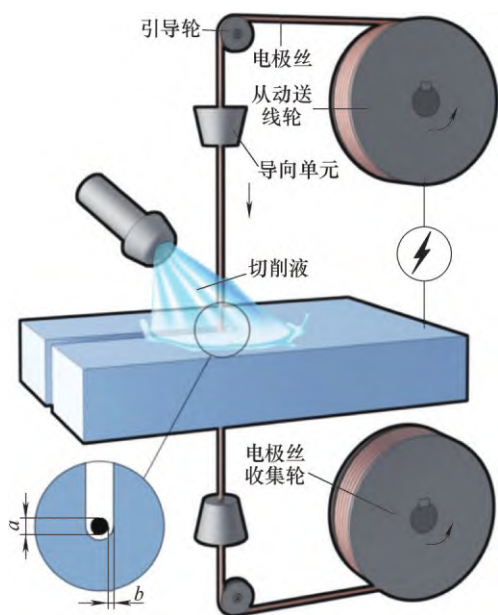


图3 线切割机床加工基本原理示意

图4所示为线切割加工材料的去除过程，即一个脉冲放电过程，电极丝和金属零件处于正确的位置关系后，施加脉冲电压，图4a所示为施加脉冲电压后，电极丝和切割零件表面形成放电间隙，极间电解质（切削液）被击穿形成放电通道；图4b所示为脉冲放电形成高温，将金属熔化气化，在金属表面形成微熔融放电凹坑，此时金属熔化物会部分熔

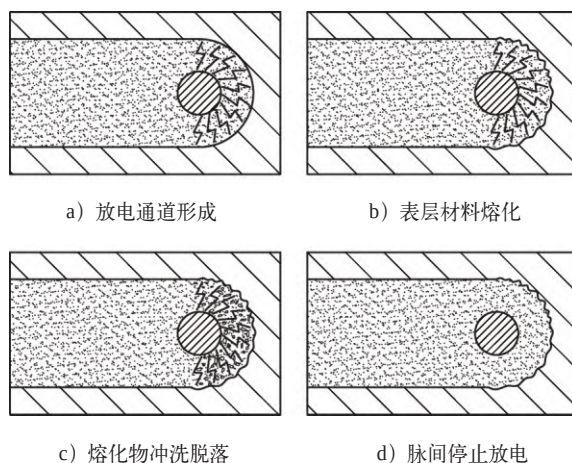


图4 线切割加工材料的去除过程

化，附着在加工表面；图4c所示为在切削液冲洗及放电爆炸力作用下，熔化物剥落抛出；图4d所示为脉间时极间停止放电，冷却介质恢复绝缘强度，一次完整的放电切割过程结束。在脉冲电源作用下不断重复上述过程，实现金属零件的连续切割。箱体内部密集细长窄缝导轨因尺寸精度高，且相互之间有严格位置关系要求，故电火花线切割是最有效的加工方式。

线切割通常细分为慢走丝、中走丝和快走丝^[2]，现将3种线切割方式工艺参数进行比较（见表1）。对于追求加工效率，常规精度要求或开粗加工时，以快走丝为主。当要求高的加工精度和表面质量时，以慢走丝为主。中走丝结合了慢走丝和快走丝的特点，在追求效率同时兼顾一定精度的工况下得到了广泛应用。本文研究的密集细长窄缝导轨加工拟采用慢走丝加工。

表1 3种线切割工艺参数比较

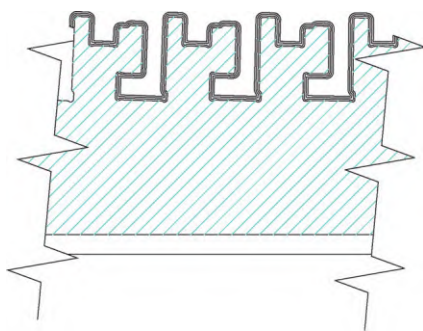
线切割方式	走丝速度/(m/s)	切割速度/(mm ² /min)	常用电极丝	表面粗糙度值 $Ra/\mu\text{m}$	精度范围/mm
慢走丝	0.01~0.25	140~260	铜丝	0.8~1.6	± 0.001
中走丝	1~12	50~180	钼丝	1.6~3.2	± 0.01
快走丝	8~10	70~90	钼丝、钨丝	1.6~3.2	± 0.03

4 箱体线切割工艺难点及加工策略

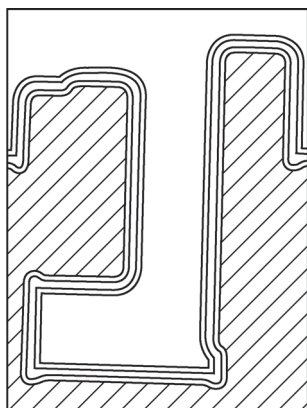
箱体内容缝导轨共计有120个，形状各有差异，需要一次装夹连续加工，加工过程的误差累积对窄缝导轨的相对位置精度有影响。窄缝导轨包含了拐角、圆角等特征，在进给过程中，电极丝转角跟

随不良会导致形状误差产生,拐角处也容易产生尖端放电,导致材料去除不均匀。箱体内部切割面积多、去除材料多,产生的加工残余应力大,需要考虑应力的消除,由于线切割加工技术属于非接触加工,无宏观切削力,因此可以有效减少切削应力^[3]。

采用慢走丝线切割工艺,通过多次切割精整逐步提高加工精度及表面质量,降低加工应力^[4]。图5所示为针对箱体窄缝导轨拟定的分次切割路径,第一遍切割出所有特征形状,相当于对窄缝导轨的粗加工;第二遍减少进给量,进行一遍精加工,对误差进一步修正;第三遍进一步减少进给量,对表面进行光整,提高加工精度及表面质量,去除烧伤等变质层。针对误差累积问题,可以考虑在工件上设置多个起割点,通过在不同位置开始切割,可以有效减少误差的累积效应,提高加工精度。也可以考虑在加工程序中进行误差补偿,本文研究的箱体加工拟采用误差补偿的方式。



a) 窄缝导轨连续切割路径



b) 单个导轨槽切割路径

图5 分步切割路径示意

5 零件试制验证

5.1 零件加工及精度检验

毛坯采用锻件,外部特征在加工中心上完成加

工,内部方锥形通孔采用快走丝去除以降低应力,进行一次去应力热处理,喷砂后,对外部所有轮廓面再进行一次精加工,随后进行内部密集导轨槽的线切割加工(见图6)。采用慢走丝进行加工,箱体用压板固定在工作台上,保证和工作台紧密接触,导电良好,整体浸入水基切削液,电极丝为铜丝,线径0.2mm。粗加工一遍完成所有导轨槽的形状加工,精加工一遍对所有导轨槽形状进行精整,最后再光整一遍,提升表面质量。一个箱体全部导轨槽加工耗时约30h。



图6 箱体窄缝导轨槽的线切割加工

对加工完毕的箱体在三坐标测量机上进行检测(见图7), $\phi 0.5\text{mm}$ 的红宝石测头对窄缝导轨槽口的尺寸精度、位置精度进行检测,尺寸精度及位置精度均满足要求,验证了工艺的可行性。

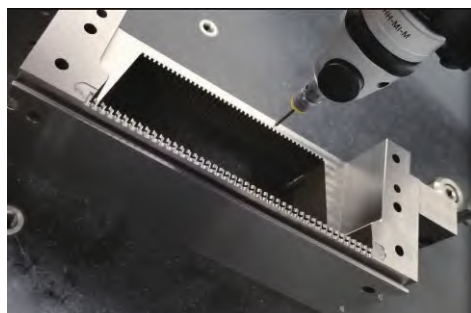
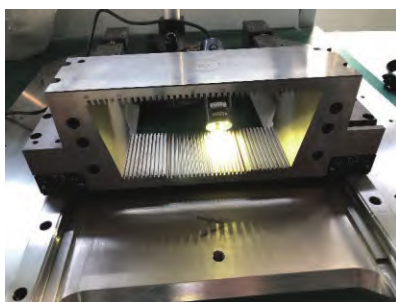


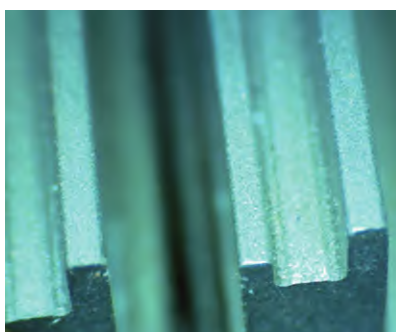
图7 箱体导轨槽的三坐标检测

5.2 窄缝导轨表面质量测量

在三坐标测量机上用微型探针只能对导轨槽口的尺寸精度、位置精度进行测量,无法对导轨内部进行测量。采用放大倍率为200倍的光学放大镜对箱体窄缝导轨表面进行检测(见图8),观察表面质量。通过放大图片观测,导轨内侧表面无烧伤、色差等异常现象,导轨端槽口位置锋利,后续需要进一步优化工艺,考虑孔口处的钝化。



a) 箱体窄缝形貌检测方法示意



b) 箱体窄缝导轨放大图

图8 箱体窄缝导轨微观形貌检测

5.3 和叶片配合的效果检测

将叶片和箱体组装后进行测试（见图9），叶片在箱体内部滑动顺畅，手感无明显卡滞。用超灵敏推拉力计对叶片在箱体内部的推力进行测试，推力



a) 推拉力检测



b) 非接触检查

图9 箱体导轨配合质量测试

和理论计算值在同一量级。用非接触方法检验叶片导轨和箱体窄缝导轨，接触均匀。在后续的集成测试中，电动机驱动叶片运动，驱动电流平稳。充分验证了所加工的窄缝导轨满足工程应用要求。

6 结束语

通过对电火花线切割工艺进行归纳整理，结合箱体内部窄缝导轨的结构特征，分析加工工艺难点，制定工艺路线，对样品进行加工验证，效果良好，满足了工程应用要求。实践证明，对于高硬度导电金属材料，线切割是一种有效的加工方案，尤其是微细小的窄缝特征，常规的铣削加工难以满足要求，应用线切割工艺，采用多次切割、逐步精整、控制放电参数和选择切割点等工艺措施，可以有效提升密集槽的加工精度。

参考文献：

- [1] 张帅，吕汝金，刘建伟，等. 电火花线切割加工工艺参数对工艺指标影响的研究[J]. 桂林电子科技大学学报，2022（6）：431-436.
- [2] 王克通，赵鹏鹏，肖磊. 浅谈线切割机床中走丝与慢走丝[J]. 河南科技，2019（35）：62-64.
- [3] 张禹. 电火花线切割多次切割拐角工艺参数研究[D]. 太原：太原理工大学，2019.
- [4] 何海程. 高速往复走丝电火花线切割高效多次切割的研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2020.

MW 20240612

专家点评

该文以叶片箱体为研究对象，对箱体内部密集细长窄缝导轨的线切割加工进行难点分析和工艺改进，制定工艺路线，选择样品进行试制加工和质量验证，取得了很好的效果。

文章图文清晰，主题明确，结构严谨。亮点是箱体内部密集细长窄缝导轨的电加工方法和误差补偿方式，通过对电火花线切割工艺进行归纳整理，根据窄缝特征，采用多次切割，逐步精整，精确控制放电参数，以及选择多处切割点等工艺改进措施，有效提升密集槽的加工精度，对类似零件的加工具有一定的借鉴作用。