

# 大规格齿轮双键槽高效加工工艺研究与应用

李文桥 梁海强

秦川机床工具集团股份有限公司 陕西 宝鸡 721009

**摘要:** 针对外径 800mm~1400mm、内孔 100mm~300mm 的大规格齿轮双键槽加工场景,受零件尺寸限制无法采用拉削工艺,普通线切割效率偏低、传统插床装夹复杂、对操作技能要求高且加工周期长。以减速箱双键槽齿轮为研究对象,分析传统工艺与线切割工艺的局限,提出基于高精度数控键槽加工设备的高效加工方案,通过专用定位工装、成型插刀与数控转台实现双键槽一体化加工,并完成工艺参数优化。现场应用表明,新工艺将单件加工时间由 8~10 小时缩短至 1.5 小时,加工效率提升 5.3 倍以上,键槽对称度稳定控制在 0.033mm,满足 JS9 级精度及对称度 0.05mm 设计要求,有效打通生产瓶颈,保障整机装配与交付周期。

**关键词:** 大规格齿轮; 双键槽; 数控插削; 专用工装; 工艺优化; 加工效率

## 引言

在重型机械传动部件制造中,大规格齿轮双键槽是扭矩传递的关键结构,其加工精度与效率直接影响整机装配质量与交付周期。对于外径 800mm~1400mm、内孔 100mm~300mm 的大规格齿轮,受结构尺寸与加工空间限制,常规拉床拉削工艺无法应用;普通线切割虽可保证一定精度,但加工速度慢、电极丝损耗大,更适用于小规格精密件,难以支撑批量生产;传统插床加工沿用“粗插留量—单槽精插—翻转 180°—另一槽精插”流程,存在装夹校正耗时、工步繁琐、冲程速度低、刚性不足易让刀等问题,单件加工长达 8 小时,且高度依赖操作人员技能,成为齿轮生产的典型瓶颈工序。

为解决大规格齿轮双键槽加工效率低、精度稳定性差的行业难题,本文以锚铰机减速箱双键槽齿轮为工程对象,对比分析传统插床与线切割工艺的短板,构建以高精度数控键槽加工设备为核心的高效加工体系,配套专用定位工装、成型刀具与数控转台,优化切削参数并开展批量验证,形成稳定可靠的高效加工工艺,可为同类大规格重载零件键槽加工提供参考<sup>[1]</sup>。

## 1 传统加工工艺瓶颈分析

研究对象为锚铰机减速箱双键槽齿轮,键槽精度等级 JS9,对称度要求  $\leq 0.05\text{mm}$ 。生产中先后采用普通线切割与 B5032 插床加工,均难以满足高效批量生产需求,核心瓶颈如下。

### 1.1 普通线切割工艺的应用短板

线切割依靠电极丝放电蚀除材料,精度可控但效率先天不足:一是切削速度低,面对大余量键槽加工时,单次蚀除量小,单件耗时动辄数十小时,远低于机械切削;二是电极丝损耗快,需频繁停机更换,增加辅助时

间与生产成本;三是大规格齿轮装夹定位困难,加工稳定性不足,仅适合小批量、小规格精密键槽,无法作为主流工艺。

### 1.2 传统插床加工的核心瓶颈

B5032 插床加工效率略高于线切割,但仍存在四项突出问题:一是通用工装装夹校正耗时久,需反复找正,定位一致性差;二是粗精插工步复杂,刀次多、衔接繁琐,无效时间占比高;三是滑枕冲程速度仅 5000mm/min,切削深度 0.05mm,材料去除率低;四是机床刚性不足,切削易让刀,为保证精度必须压低切削参数,进一步限制效率,且精度波动较大<sup>[2]</sup>。

## 2 高效加工方案拟定

针对传统工艺瓶颈,确定以高精度数控键槽加工设备为核心,集成数控转台、专用定位工装与成型插刀,实现双键槽一次装夹、一体化高效加工,方案优势如下:

专用定位工装快速定心,省去反复校正时间;  
成型插刀直接精插成型,取消粗插工步,简化流程;  
设备冲程速度更高,可实现小吃刀、快进给,大幅提升切削效率;  
机床刚性优异,切削过程稳定,避免让刀,兼顾精度与效率。

## 3 工艺改进措施实施

### 3.1 专用定位衬套设计与加工

专用定位衬套为快速装夹与高精度定位的核心部件,采用开口结构,内孔与设备导程杆精密配合,外壁与工件内孔间隙配合,保证工件与设备同轴度。衬套选用高强度合金材料,按粗车—热处理—精磨路线制造,精磨阶段一次装夹完成内外圆磨削,确保内外圆同轴度  $\leq 0.005\text{mm}$ ,从工装层面保证键槽对称度基础。

### 3.2 配套设备与刀具配置

在数控键槽加工设备配置高精度数控转台，实现 180° 自动精准分度，加工完一键槽后自动转位，无需人工调整，保证双键槽周向位置精度<sup>[3]</sup>。依据键槽宽度、深度与精度要求，定制专用成型插刀，切削刃经精密刃磨，可直接精插成型，满足尺寸精度与 Ra3.2μm 表面粗糙度要求。现场配备键槽塞规、高精度卡尺及三坐标测量仪，实现尺寸快速检测与对称度、位置度精密评定。

### 3.3 加工工艺参数优化

结合设备性能与零件要求，优化确定切削参数：切削深度 0.03mm，冲程速度设置在合理区间，采用“一次装夹—精插第一键槽—数控转台 180° 转位—精插第二键槽—去毛刺”的流程，加工刀次由传统 10 次缩减至 2 次，流程显著简化。

## 4 试切验证与结果分析

### 4.1 试切件与试切方案

为验证新工艺方案的可行性与稳定性，选用报废的同规格齿轮零件作为试切件，按照设计的工装、刀具及工艺参数，在某专用数控键槽加工机床上开展试切试验。

试切核心要求：以零件内孔为定位基准，涂蓝油面向下装夹在专用定位衬套上，一次装夹完成两个键槽的精插加工，键槽宽度 38.1±0.23mm，深度 184.4±0.5mm，表面粗糙度 Ra3.2μm，对称度 ≤ 0.05mm，位置度 ≤ 0.10mm。加工完成后，按要求填写工序尺寸记录表，并由操作工送三坐标测量室检测键槽对称度及位置度。

本次试切同时对比了同规格试切件的普通线切割加工耗时，结果显示线切割工艺完成单个试切件双键槽加工需耗时超 8 小时，远高于新工艺的加工耗时，初步验

证了新工艺的效率优势。

### 4.2 检测项目

为全面验证试切件加工精度，具体检测项目、量具及要求如下：

- 键槽宽度：采用专用键槽塞规测，要求 38.1±0.23mm；
- 键槽深度：采用高精度游标卡尺检测，要求 184.4±0.5mm；
- 键槽位置度：采用三坐标测量仪检测，要求 ≤ 0.10mm；
- 键槽对称度：采用三坐标测量仪检测，要求 ≤ 0.05mm。

### 4.3 试切检测结果

试切件经三坐标测量仪检测，核心精度指标均满足设计要求，具体检测结果如下：

- 键槽左侧面平行度：0.0105mm，无超差；
- 键槽右侧面平行度：0.0321mm，无超差；
- 键槽对称度：0.0328mm，小于 0.05mm 的设计要求，精度满足且留有余量；
- 键槽宽度、深度及位置度均在公差范围内，表面粗糙度 Ra3.2μm 达标。

试切结果表明，所设计的专用工装、定制刀具及优化的工艺参数均能满足大规格齿轮双键槽的加工精度要求，新工艺方案具备可行性。

## 5 实践加工效果对比

为量化分析新工艺的改进效果，将数控键槽加工机床与传统 B5032 插床、普通线切割工艺的加工效率、精度进行多维度对比，具体结果如表 1 所示。

表1 不同工艺加工双键槽效果对比

对比项目	线切割工艺	传统 B5032 插床	数控键槽加工机床
加工原理	电极丝放电腐蚀	机械插削	高精度数控机械插削
单件加工时间 (h/件)	≥ 6	8	1.5
加工核心优势	精度较好	机械切削效率略高于线切割	精度优、切削效率高、辅助时间短
加工核心短板	效率极低、耗材损耗大	装夹久、工步繁、刚性差	需定制专用工装 / 刀具
键槽对称度 (mm)	≤ 0.04	0.035	0.033

由表 1 可知，新工艺相较普通线切割工艺，单件加工时间从 6 小时以上缩短至 1.5 小时，加工效率提升 4 倍以上，且精度与线切割工艺持平；相较传统 B5032 插床，在保证加工精度略有提升的前提下，将加工刀次从 10 次缩减至 2 次，单件加工时间从 8 小时缩短至 1.5 小时，加工效率提升 5.3 倍以上。同时新工艺加工过程中无

需经验丰富的老师傅操作，普通操作工经简单培训即可完成，大幅降低了对操作人员的技能要求，实现了加工过程的标准化、规范化，相较线切割工艺和传统插床工艺，更适用于大规格齿轮双键槽的批量生产。

## 6 工艺适用范围总结

针对大规格齿轮双键槽加工难题，普通线切割效率

低、耗材大,传统插床装夹繁琐、效率与稳定性不足,均难以满足批量生产需求。本文通过引入高精度数控键槽加工设备、设计专用定位工装、定制成型插刀、配置数控转台并优化切削参数,形成一体化高效加工工艺。专用定位衬套实现快速定心,成型插刀实现一刀精插,数控转台保证分度精度,流程大幅简化。

工程应用表明,新工艺较传统插床效率提升 5.3 倍以上,较线切割提升 4 倍以上,对称度稳定控制在 0.033mm,满足 JS9 级与对称度 0.05mm 要求,有效解决生产瓶颈。该工艺适用于内孔  $\Phi 85\text{mm}\sim\Phi 300\text{mm}$  的大规格零件键槽加工,可为同类重型传动部件高效精密加工提供标准化方案。

后续可针对不同材料、不同规格键槽开展参数优化,提升刀具寿命与工艺适应性,并探索数控插削与线切割的工艺协同,进一步拓展重型零件精密高效加工路径。

## 7 结论

本文针对大规格齿轮双键槽加工中,普通线切割工艺效率极低、传统插床加工效率不足且精度稳定性差的问题,开展工艺改进研究,通过引入数控专用加工设备、设计专用定位工装、定制成型刀具及优化工艺参数,形成了高效的加工工艺方案,得出以下结论:

大规格齿轮双键槽加工受形体限制无法采用拉床工艺,普通线切割工艺因放电加工原理存在效率极低、耗材损耗大的先天短板,传统 B5032 插床加工因装夹校正时间长、工步繁琐、机床参数受限及刚性不足导致效率偏低,两类工艺均无法满足批量生产需求;

设计的专用定位衬套可实现工件的快速装夹与精确定位,定制成型插刀实现键槽一刀精插成型,配套数控

转台保证双键槽分度精度,三者结合大幅简化了加工工艺,缩短了辅助时间和切削时间,该工艺从加工原理和流程设计上,均实现了对普通线切割工艺的效率超越;

新工艺兼具精度与效率优势,相较普通线切割工艺,单件加工效率提升 4 倍以上,相较传统插床加工效率提升 5.3 倍以上,且键槽对称度稳定控制在 0.033mm,满足 JS9 级精度及对称度 0.05mm 的设计要求,有效解决了该工序的生产瓶颈,保障了整机装配交付周期;

明确了该数控加工工艺的适用范围,为  $\Phi 85\sim\Phi 200\text{mm}$  内孔、 $\leq 50\text{mm}$  键槽宽度的大规格零件键槽加工提供了标准化工艺方案,同时明确其与普通线切割工艺的互补应用场景,具有较高的工程应用价值。

后续可在此基础上,进一步开展不同材料、不同规格键槽的加工工艺研究,优化刀具寿命和加工参数,扩大该工艺的适用范围,同时探索数控加工与线切割工艺的协同应用模式,为重型机械零件的高效、精密加工提供更多技术支持。

## 参考文献

- [1] 范梅梅,沈学勤.极限配合与技术测量(第 5 版)[M].北京:高等教育出版社,2023:15-48,96-120.(十四五职业教育国家规划教材,适配论文中 JS9 级公差、对称度 0.05mm 等公差配合与几何精度设计要求)
- [2] 王先逵.机械制造工艺学(第 4 版)[M].北京:机械工业出版社,2021:189-210,286-305.(适配论文中键槽加工工艺路线优化、粗精加工工步设计等核心内容)
- [3] 孟少农.机械加工工艺手册[M].北京:机械工业出版社,2020:320-345,412-430.(适配论文中大规格零件装夹定位、机床工艺参数匹配等工程应用内容)。