

# 大型同向平行双螺杆挤出机齿轮箱细长花键轴加工工艺研究

周卫东, 袁爱仁, 张迎冲, 李庆东

(南京高精齿轮集团有限公司, 江苏 南京 211103)

**摘要:**近年来,随着中国制造业实力的提升,国产化大型挤压造粒机组已经在石化行业广泛使用。作为大型挤压造粒机组设计制造的最大难点,传动系统齿轮箱性能的优劣,已经成为限制该类机组性能提升的瓶颈。因此,其中核心部件——细长花键轴制造工艺的优化在整个齿轮箱制造中成为重点和难点。本文以齿轮箱细长花键轴为研究对象,从材料、热处理、机加工等方面,对细长花键轴整套加工工艺进行研究,旨在降低其变形风险并提高其加工效率,保证加工质量。相关成果对大型高扭矩挤压造粒机组齿轮箱研制具有重要意义。

**关键词:**细长花键轴;变形;材料;热处理;机加工

**中图分类号:** TQ330.67

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-797X(2025)10-0041-05

**DOI:** 10.13520/j.cnki.rpte.2025.10.009

细长花键轴是大型挤压造粒机组齿轮箱中传递扭矩的关键零部件,其加工精度和表面质量直接影响到齿轮箱的运行状态及使用寿命<sup>[1]</sup>。随着该类齿轮箱制造技术的发展及其性能要求的进一步提高,对细长花键轴的加工工艺提出了更高的挑战。对于长径比超大的细长花键轴来说,其加工难度更大<sup>[2]</sup>。本文介绍了一种长径比大于18的细长花键轴的整体加工工艺,从材料、热处理、机加工等多方面进行探究,旨在降低其变形风险并提高其加工效率,保证加工质量。

## 1 细长花键轴加工难点分析

图1是大型挤压造粒机齿轮箱的轴系布局方案,如图1所示,功率从输入轴输入后通过齿轮啮合将功率传递给长输出轴输出,长输出轴同时通过分合流轴系将功率分配给短输出轴。显然,细长花键轴在齿轮箱工作过程中始终承受着1/2的功率的扭矩。然而由于造粒机齿轮箱螺杆中心距的限制,导致细长花键轴的直径只能选取相对较小的值,即其需要在有限的截面下承受很大的扭矩( $> 350 \text{ kN}\cdot\text{m}$ )与轴向力( $> 2\,000 \text{ kN}$ )。因此,为了满足齿轮箱如此高的性能参数要求,细长花键轴的加工质量显得尤为重要。

该细长花键轴的零件简图如图2所示,其材料为CrNiMo合金钢,零件总长近3 500 mm,直径最小处

仅190 mm,零件两端均为花键,花键齿部需氮化处理。

经对图纸评审,该零件的加工难点有:

(1) 材料性能要求高:氢元素含量、氧元素含量、超声波探伤要求、非金属夹杂物、晶粒度要求级别均严于一般锻件;抗拉强度、屈服强度等机械性能要求高。

(2) 零件为细长轴,长径比大于18,调质热处理过程、车削与磨削机加工过程中极易发生变形。

(3) 零件超长,近3 500 mm,超出常规磨齿机的加工行程,导致花键磨削工序无法进行。

## 2 加工难点的解决方案

### 2.1 材料准备

由于材料各项性能要求高,普通的材料冶炼工艺无法满足,材料冶炼时需使用电渣重熔工艺。电渣重熔是一种可以有效降低较大夹杂物、显著提高材料纯净度的冶炼方法,该方法是将普通冶炼的电极坯料经过保护气氛电渣炉再次进行重熔,能有效降低大尺寸

**作者简介:**周卫东(1985-),男,本科,工程师,工艺技术高级经理,主要从事齿轮箱零部件加工制造的研究工作,为公司齿轮箱降本、大型零件关门加工、工业大型非标类工艺体系建立、工业大型非标类数字化创新及推广作出了贡献。

**项目编号:**工信部高质量发展专项项目(TC220A04W-4)

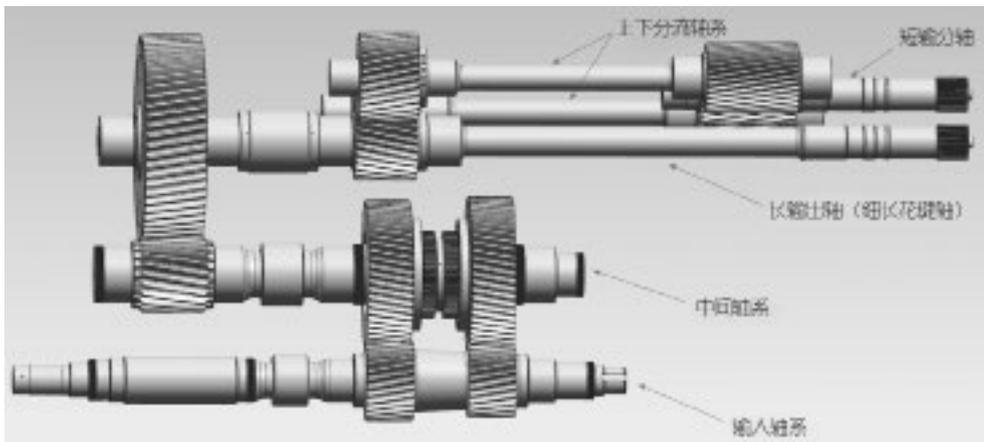


图 1 轴系布局方案

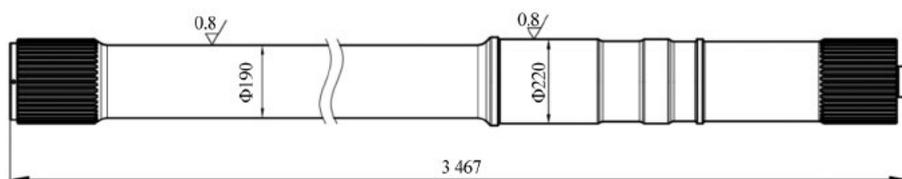


图 2 零件简图

夹杂物含量。使用电渣重熔工艺制备的钢锭进行锻造，其锻件经正火+回火预备热处理后，奥氏体晶粒度检验为 8.0 级（见图 3），组织为均匀的铁素体+贝氏体（见图 4），带状组织评级 3.0 级（见图 5），符合 ISO 6336-5 的 ME 级要求，其拉伸强度、屈服强度、硬度等物理性能更具优势。

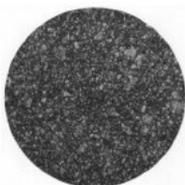


图 3 晶粒度



图 4 显微组织



图 5 带状组织

为验证材料机械性能，对零件本体进行取样，调质热处理后对其机械性能进行测试。在 25 °C 环境下，分别进行拉伸实验和夏比冲击试验，试验数据满足图纸要求。

## 2.2 变形控制

由于该零件为细长轴，长径比大于 18，调质热处理和机加工过程均需考虑变形的影响，并制定相应的控制措施。

### 2.2.1 热前粗加工

一方面为了防止热处理变形过大，导致热处理后精加工过程出现黑皮，另一方面为了减少热处理后的

切削量与切削刀次，同时为了减小半精加工过程导致的应力，需要将热前粗加工的余量控制在一个合理的值，确保同时满足以上要求。基于对企业中类似零件放量规则的数据参考，以及考虑该零件的特殊要求，决定整体放量为  $\Phi 250 \times 3687$  的一个圆棒，确保零件后续加工余量充足，且余量相对合理，不会造成过长的半精加工时间和由此产生的切削应力，如图 6 所示。



图 6 热前粗加工图

### 2.2.2 调质热处理

对于此类长径非常大的花键轴，调质热处理时易发生大变形且难以控制。常规的装炉方式是使用细钢筋缠绕零件，焊接固定于中间料杆上，并将零件底部焊接在工装上，如下图 7 所示。这种装炉方式零件变形风险大，因为热态时钢筋变形会导致零件倾斜或倾倒，造成零件磕碰或严重变形，且零件底部残留焊疤影响外观和局部性能。为解决上述问题，根据零件尺寸设计制作可拼接使用的扇形蜂窝状耐热热处理工装，该工装应用时上下两层同时使用，分别置于零件 1/3 高度及 2/3 高度处，可将细长轴固定于扇形蜂窝的圆孔中，这样不仅可以减轻零件的变形，还可避免因钢

筋变形导致的零件倾斜或倾倒风险，且无焊疤产生，原理图及实物图如图 8 所示。另外还可以同时装炉多根轴，增加装炉量，减少热处理资源浪费，降低成本。



图 7 花键轴热处理常规装炉方式

### 2.2.3 热后精加工

由于零件细长，在车削、磨削过程中若工艺策划不合理，均可能造成变形，最终无法达到图纸要求而导致零件报废。在车削过程中，由于部分区域单边余量较大，已达 30 mm，若连续直接车削至仅放磨量的尺寸，在此过程中由于切削应力、夹顶力的影响，极易导致零件弯曲变形，从而使得磨削过程中余量不足产生黑皮，为减轻切削应力与夹顶力对变形的影响，需设置两道车工序，分为半精车与精车，半精车主要

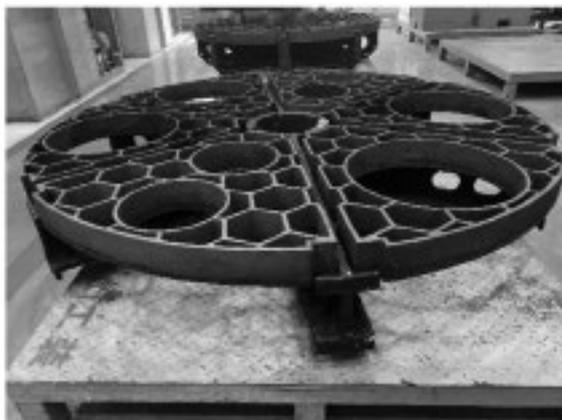
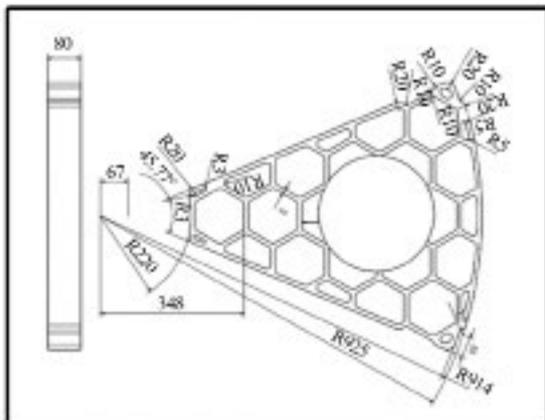


图 8 热处理工装原理图及实物图

内容为切削掉大部分加工余量，并留有精车余量单边 2 mm，确保在有一定变形的情况下不影响精车与放磨量。在两道车工序之间加一道去应力工序，将半精车产生的应力去除，降低零件变形风险。然后进行精车，将较高尺寸公差要求的轴颈或粗糙度要求  $\leq Ra1.6$  的轴颈精车并放磨量，待后续外圆磨工序磨至图纸尺寸。外圆磨工序过程中同样需要依据机床、砂轮，以及零件尺寸等相关影响因素采用合理的装夹方式，并严格控制校表过程与磨削参数，防止磨削过程产生变形。

### 2.3 花键磨削

细长花键轴的花键磨削，是齿部加工的最后一环，磨削精度决定了花键轴齿部精度能否满足图纸要求。花键磨削需要考虑多项因素，例如装夹、校表过程、砂轮选型、磨削参数控制等。由于本企业常规磨齿机磨削最大行程为 2 500 mm，而该细长花键轴长度已达近 3 500 mm，花键无法直接磨削，为解决该问题，设计了一个下沉接油工装，如图 9 所示，将该工装安装在机台下方，磨花键时将零件下沉至机床工作台下方的工装内，降低花键高度，如图 10 所示进行磨削，通过此工装解决了磨削行程不足与装夹问题。另外，为

了保证磨削质量，磨削前的校表过程非常重要，此零件需要严格校正两段已磨轴颈跳动  $\leq 0.015$  mm 的前提下才可以对花键进行磨削，磨削过程需要注意根据余量进行排刀，同时观察机床功率的变化，防止磨削烧伤。

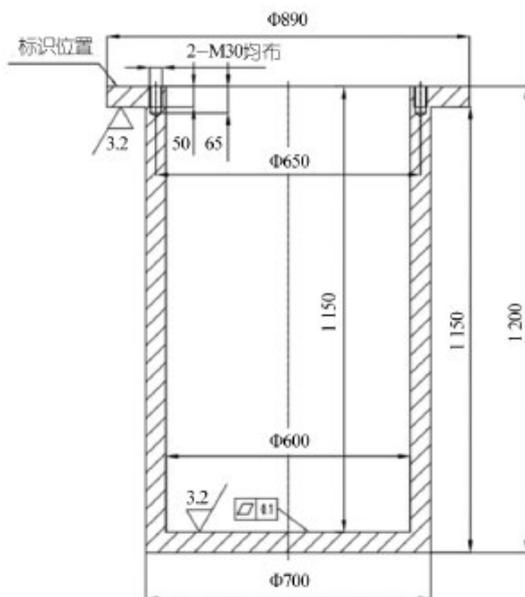


图 9 下沉接油工装



图 10 磨花键

### 3 加工工艺流程优化

对于一般花键轴零件，常规的工艺流程主要是：普通冶炼 → 锻造 → 锻后热处理 → 粗车 → 调质 → 精车 → 滚花键 → 齿部氮化 → 外圆磨 → 磨花键 → 磁粉探伤 → 入库，如果采用此常规工艺流程加工该细长花键轴，材料要求、尺寸及形位公差、齿部精度等几乎无法达到图纸要求，易导致零件报废。

根据上文中对细长花键轴加工重难点进行分析后，为了满足图纸要求，需要对常规的工艺流程进行优化，主要是在材料要求、车削变形控制、花键磨削加工与齿部精度控制等方面进行优化。为了达到图纸材料的要求，需要将常规的冶炼工艺改为电渣重熔冶炼工艺，可以使得材料的缺陷更少、非金属夹杂物含量更低、晶粒度级别更高；为了确认零件实物达到图纸机械性能的要求，在调质后对本体试样进行切割并检测，确保各项机械性能指标满足图纸要求方可进行下一步工序；为了控制热处理过程产生变形，设计扇形蜂窝状耐热工装，可以减轻花键轴的热处理变形，并增加装炉量，降低热处理成本；为了控制车削过程的变形，在精车工序前增加半精车工序和去应力工序，去除大部分余量，并释放加工应力，从而最大程度的减少最终精车和磨削过程中的可能出现的变形，降低报废率和需要重新矫直的返修率；为了实现花键磨削，

需要设计现场下沉工装，将轴下沉至工装内，降低花键高度，用于解决磨齿机磨削细长花键轴加工行程不足的问题；为了保证花键精度等级，需要严格控制校表过程与磨削参数，同时观察机床功率的变化，确保不会导致磨削烧伤的发生，在机床完成磨削后，需要将花键轴送至齿部计量仪计量齿部精度，确保入库前该花键轴齿部精度合格。虽然以上的控制措施会使得零件加工成本有一定量的上升，但是可以极大程度的保证零件的加工质量，确保合格率。

因此，最终确定该细长花键轴的加工工艺流程为：普通冶炼 → 电渣重熔 → 锻造 → 锻后热处理 → 粗车 → 调质 → 锯本体试样 → 线切割本体试样 → 检测试样机械性能 → 半精车 → 去应力 → 精车 → 滚花键 → 齿部氮化 → 外圆磨 → 磨花键 → 磁粉探伤 → 齿部计量仪检测 → 入库。按此工艺流程及过程控制方法加工后，花键轴的各项性能指标、尺寸及精度均可满足图纸要求，最终零件实物如图 11 所示。



图 11 细长花键轴成品实物图

### 4 结语

加工工艺流程的优劣直接影响零件的加工质量，对于长径比超大的细长轴类，由于变形等因素导致的零件报废尤为常见。本文通过改善材料的冶炼方式、增加去应力措施、设计制作专用磨花键工装，并通过严格控制校表过程与加工参数，以及增加多道检验工序来优化工艺流程方案，提升了零件的各项材料与机械性能，降低了热处理及机加工时的变形风险，并解决了由于零件超长无法磨削的问题，确保了该零件的加工质量，为后续同类细长花键轴零件的加工提供理论支撑及实践指导。

#### 参考文献：

- [1] 吴宗泽. 机械设计师手册 [M]. 北京：机械工业出版社，2002.
- [2] 盖永亮. 某薄壁细长外花键轴加工工艺研究 [J]. 新技术新工艺. 2016:3-5.

## Research on the machining process of slender spline shafts for gearboxes of large co-rotating parallel twin-screw extruders

Zhou Weidong, Yuan Airen, Zhang Yingchong, Li Qingdong

