

# 盘齿类齿轮变形特性分析与精度提升研究

赵文波 张忠乐 孟繁荣 宋玉玲 康宏华  
哈尔滨东安汽车动力股份有限公司 黑龙江 哈尔滨 150066

**摘要:** 针对某MT变速器盘齿类齿轮焊接总成焊后变形大、精度差等问题,开展全流程变形分析与精度提升研究。通过基准优化、焊接参数调整及热处理预补偿等工艺,将端面跳动由0.2~0.25mm降至0.07~0.1mm,满足设计要求。结合生产实际提出整体锻造、花键连接及自动化热处理产线升级等长期方案,从根源提升质量与效率。研究成果为薄壁复合齿轮高精度制造与工艺改进提供实践参考。

**关键词:** 盘齿类齿轮; 电子束焊接; 焊接变形; 热处理变形; 精度补偿; 工艺优化

## 引言

在汽车变速器向高效率、低噪声、高可靠性发展的背景下,盘齿类齿轮作为中重型商用车变速器关键零件,多采用本体与同步齿圈分体加工、电子束焊接集成结构。但批量生产中,受多重因素耦合影响,齿轮易出现精度超差问题,导致合格率偏低。目前相关研究多集中于单一环节变形控制,针对其复合工艺全流程变形规律及系统化精度提升方案的研究较少。本文以某MT型盘齿类齿轮为对象,梳理全工艺流程,定位误差源与变形机理,制定优化策略,为同类齿轮高精度制造提供参考。

## 1 过程研究与分析

### 1.1 结构与技术要求

本文研究对象为某MT型变速器盘齿类齿轮,材料采用20CrMnTiH渗碳合金钢,其渗碳淬火性能与强韧性良好,可满足中重型商用车变速器交变载荷使用需求。齿轮经渗碳淬火+低温回火处理后,齿面硬度达58~62HRC,芯部硬度控制在30~45HRC,兼顾表面耐磨性与芯部韧性。齿轮精度执行GB/T10095.1-2008标准,达7~8级,核心控制指标含内孔孔径、圆柱度等,其中焊后端面跳动 $\leq 0.1\text{mm}$ ,是制约合格的关键。该齿轮为盘套类复合结构,由齿轮本体与同步齿圈经过盈压装、电子束焊接而成。其制造难点在于,齿轮本体加工以自身内孔及端面为基准,而装配检测以同步齿圈内孔及端面为基准,基准不重合导致误差与焊接、热处理变形叠加,造成精度超差<sup>[1]</sup>。

### 1.2 过程分析

现场加工工艺流程分为外委加工、热前加工、热处理、热后加工四个阶段,共计12道工序。热前加工主要车外圆、端面及内孔、滚斜齿轮、倒棱去毛刺、剃齿(公法线长度至尺寸中差)、压装、焊接、探伤,除了车工用外圆及端面定位外,其余的用端面及内孔定位;热处理工序主要渗碳淬火和回火、喷丸等;热后工序主要包

括磨内孔、磨锥面及最终清洗、检验,磨内孔采用端面、齿顶定位,磨锥面采用端面和内孔定位。各工序定位基准与加工要求存在明显差异,基准转换频繁,是引发精度累积误差的重要原因。

### 1.3 各阶段工艺详解

#### 1.3.1 外委加工阶段

外委加工包括毛坯锻造、齿坯加工及正火处理,是保障后续加工精度的基础。齿坯加工在毛坯锻造后进行粗精车,遵循“先面后孔”原则,形成内孔与端面精基准,采用“内孔+端面”定位,符合基准重合原则以减少累积误差。正火作为预备热处理,可细化晶粒、改善组织、消除锻造缺陷与残余应力,降低硬度至HB160~200提升切削性能,为渗碳淬火奠定基础,还能替代退火提升批产效率。对于20CrMnTiH材质盘齿,“锻造→正火→机加工→渗碳淬火+低温回火”为最优路线,正火质量直接影响后续精度与服役性能<sup>[2]</sup>。

#### 1.3.2 热前齿加工阶段

该阶段包括精车、滚齿、倒棱、剃齿等工序,核心任务是完成齿形精加工,为装配焊接奠定精度基础。精车工序修正外委基准,内孔及锥面留磨余量0.25mm,确保定位基准的尺寸精度与形位公差;滚齿形成基本齿廓,留剃余量0.07mm,周节累计误差0.045mm,齿形齿向误差0.02mm;倒棱去毛刺需在剃齿前完成,避免锐边损伤刀具;剃齿作为精加工,进一步提升齿形精度与表面质量<sup>[3]</sup>。

#### 1.3.3 压装阶段

本阶段核心是实现盘齿类齿轮与同步齿圈的过盈配合(过盈量0.016~0.06mm),为焊接工序提供稳定装配基础。

作业前需确认压力机状态,清理夹具表面杂物,每班校准夹具端面跳动 $\leq 0.02\text{mm}$ 。压装参数需实时监控,压力控制在0.5~1.5MPa,压装时间3~8秒,换型或调整

后需做首件确认(表1)。压装后需检测间隙 $\leq 0.03\text{mm}$ 、端面尺寸 $19.3\text{mm}$ 、齿圈端面跳动 $\leq 0.05\text{mm}$ ,检验频次为每班首末件、换型首件及每100件抽检(表2)。

表1 压装参数控制表

参数	控制范围	要求说明
压力	0.5 ~ 1.5MPa	全程监控, 100%执行
压装时间	3 ~ 8秒	每件均需记录

表2 压装后检测项目控制表

检测项目	标准要求/mm	检测工具	检验频次
齿轮压装面与齿圈底面间隙	$\leq 0.03$	0.03mm塞尺	每班首末件、换型首件、每100件检测
齿轮定位端面与齿圈端面尺寸	19.3	千分尺/专用量具	同左
齿圈端面跳动	$\leq 0.05$	跳动测量仪+千分表	同左
齿轮与同步齿圈过盈量	0.016 ~ 0.06	-	同左

压装常见缺陷包括间隙超差、跳动超标、压装偏斜,多由基准污染、压力不足或夹具失效导致,易引发焊缝缺陷、焊接不牢靠等问题,需及时停机处理。

#### 1.3.4 焊接工序

本工序采用电子束焊接工艺,在高真空环境下通过高速电子束轰击工件表面实现熔化焊接。其优势为能量密度高、焊缝纯净、热影响区小、深宽比大、无需填充金属且生产效率高;缺点是设备复杂成本高、工件尺寸受限、生产节拍慢、易受磁场干扰,且对装配与表面清洁度要求高(对接间隙 $\leq 0.1\text{mm}$ )。焊接时,电子束集中于齿轮内侧焊缝,局部高温快速冷却产生残余拉应力,与压装挤压应力叠加,导致同步齿圈翘曲变形。同步齿圈为5~5.3mm薄片结构,且圆周有3处槽结构,增加焊缝长度加剧变形,造成齿圈跳动超差、内孔圆度偏差,影响后续磨削余量均匀性<sup>[4]</sup>。

#### 1.3.5 热处理阶段

采用渗碳淬火工艺提升齿面硬度与耐磨性,但焊接结构的残余应力易引发翘曲变形,实测内孔圆度变形量达0.18mm,严重影响后续定位精度。热处理对齿轮几何参数的影响规律见表3,其中齿顶变瘦约 $7\mu\text{m}$ 、鼓形量+ $4\mu\text{m}$ ,螺旋线呈八字形变化约 $15\mu\text{m}$ 、鼓形量 $-4\mu\text{m}$ ,周节累积误差受装夹方式影响显著。

表3 热处理对各几何参数的影响汇总表

参数	变形机理	变化趋势(实验数据)
公法线	相变前后体积差(珠光体 $\rightarrow$ 马氏体)	整体胀缩为主,周累变化小
渐开线	热应力与组织应力综合作用	齿顶变瘦(负向偏差 $\uparrow$ ),鼓形量+ $4\mu\text{m}$
螺旋线	结构、装夹、重力等多因素耦合	八字形变化(约 $15\mu\text{m}$ ),鼓形量 $-4\mu\text{m}$
周节累积误差	主要受装夹方式影响(串装箍圆)	重力导致周累增大

#### 1.3.6 热后加工工序

热后通过磨内孔、磨锥面修整基准,采用齿圈分度圆定心磨孔方式,最大限度降低齿圈相对于齿形的径向跳动,保障最终装配精度。

## 2 变形特性分析

### 2.1 定位基准分析

加工基准与装配基准不重合是盘齿类齿轮精度偏差的核心根源。齿轮本体滚齿、剃齿以自身内孔为基准,而压装、焊接及最终装配以同步齿圈内孔为基准,二者轴线存在0.02~0.05mm的偏移量,该偏移在压装与焊接后无法修正,形成永久性基准误差。该误差直接传递至齿形齿向精度,导致齿轮啮合特性变差、运行噪声升高、疲劳寿命下降。

产生基准偏移的主要原因:一是设计阶段未充分考虑制造工艺性,未统一加工与装配基准;二是压装工装缺乏自动对中功能,无法补偿零件加工偏差;三是焊前未设置端面跳动检测工位,超差零件直接流入焊接工序,造成误差放大。

### 2.2 焊接变形分析

焊接变形是盘齿类齿轮端面跳动超差的直接原因。电子束焊接热输入集中,焊缝区域快速熔冷产生的残余拉应力,与压装过盈挤压应力叠加,导致薄壁同步齿圈翘曲变形。工艺试验表明,焊接变形量与焊接电流、加速电压正相关,与焊接速度负相关。原常规参数(电流34mA、焊接时间15s)下,端面跳动达0.2~0.25mm,远超 $\leq 0.1\text{mm}$ 的要求;调整为电流28mA、焊接时间12s后,端面跳动降至0.07~0.09mm;引入小束流定位焊+正常束流二次焊接的封焊模式后,可抑制焊缝收缩,使焊后端面跳动稳定在0.07~0.1mm,精度变化量仅0.002~0.003mm,焊缝相关指标均满足要求。

### 2.3 热处理变形分析

渗碳淬火过程中,材料发生珠光体向马氏体的相变,伴随体积膨胀,同时热应力与组织应力共同作用,使齿轮齿形、齿向、周节累积误差产生规律性变形,具体表现如下。(1)齿形变形:齿顶变瘦约 $7\mu\text{m}$ ,齿形鼓形量增加 $4\mu\text{m}$ 。(2)齿向变形:螺旋线呈八字形变化,变形量约 $15\mu\text{m}$ ,鼓形量减小 $4\mu\text{m}$ ;(3)周节累积误差:受装炉方式影响显著,串装状态下齿轮自重会加剧周节累积误差增大。热处理变形无法完全消除,只能通过热前加工预补偿实现精度抵消,这是提升热后齿轮精度一致性的核心手段。

### 3 精度提升方案

#### 3.1 短期提升方案

##### 3.1.1 提升定位精度

加严定位面加工精度要求,将内孔与端面跳动由 $\leq 0.03\text{mm}$ 提升至 $\leq 0.02\text{mm}$ ;选用高精度数控车床完成基准面加工,建立工装定期校准机制,增加过程抽检频次,使基准转换误差降低约40%,从源头减少系统性偏差。

##### 3.1.2 优化焊接工序

(1)焊前管控:严格控制零件表面清洁度,保证夹具端面跳动与径向跳动 $\leq 0.05\text{mm}$ ,每周对焊接工装进行去磁处理,避免磁场干扰焊接精度。(2)参数优化:将焊接束流调整至 $25\sim 40\text{mA}$ ,焊接速度控制在 $15\sim 30\text{mm/s}$ ,降低焊接热输入。(3)工艺升级:采用封焊模式替代常规一次性焊接,通过定位焊固定装配位置,再进行正式焊接,最大限度抑制焊接变形。

##### 3.1.3 优化热处理工序

(1)齿形预补偿:热前剃齿时将齿向倾斜偏差增大 $5\sim 13\mu\text{m}$ ,鼓形量减小 $5\mu\text{m}$ ,抵消热处理后齿顶瘦化与鼓形量变化;(2)齿向预补偿:将螺旋线预加工为倒八字形,鼓形量增加 $2\mu\text{m}$ ,抵消热处理八字形变形;(3)装炉优化:盘齿类齿轮采用平装方式装炉,减少自重引发的周节累积误差,变形量可减小 $10\mu\text{m}$ 。

#### 3.2 长期提升方案

##### 3.2.1 设计结构优化

(1)整体锻造结构:对于齿圈大径小于齿轮齿根径的产品,直接采用整体锻造工艺,取消分体压装与焊接环节,从根源上消除焊接变形与基准误差;(2)花键连接结构:对于无法整体锻造的产品,采用渐开线花键连接替代焊接结构,保证齿轮本体与齿圈的同轴度,同时便于装配与后期维护。

##### 3.2.2 热处理产线升级

淘汰传统多用炉,引入自动化连续炉热处理生产线,

实现上料、加热、渗碳、淬火、下料全流程自动化控制,减少人工干预与装夹差异,大幅提升热处理变形一致性与生产效率,满足大批量高精度齿轮制造需求。

### 4 试验验证与效果分析

对短期措施进行试验验证,通过现场批量工艺验证,采用本文优化方案后,盘齿类齿轮关键精度指标得到显著改善:(1)焊后端面跳动由原 $0.2\sim 0.25\text{mm}$ 稳定控制在 $0.07\sim 0.1\text{mm}$ ,满足设计要求;(2)热处理后齿形、齿向精度一致性提升30%以上,内孔圆度变形量控制在 $0.05\text{mm}$ 以内;(3)产品一次合格率由原82%提升至90.5%,批产稳定性显著增强。(4)试验表明,优化焊接顺序、控制热输入、改进装夹及细化热处理冷却曲线等短期方案,可有效抑制焊接与热处理变形,使关键尺寸精度稳定性提升约18%,产品合格率由82.5%提升至93.7%。为突破瓶颈、达98.5%的行业领先水平,需实施长期结构改进:优化轮辐结构刚性与热对称性,引入梯度渗碳+低温回火工艺,升级热处理工装随形支撑与自适应压紧功能,构建跨工序变形预测-补偿闭环系统。该方案已完成可行性验证,预测误差 $< 0.015\text{mm}$ ,产线改造周期4个月内可控,工程落地性与规模化推广价值显著。

### 结论

(1)盘齿类齿轮精度偏差的核心诱因是加工与装配基准不重合,直接诱因是电子束焊接热应力变形,热处理组织应力与装夹方式导致的规律性变形是关键影响因素。(2)采用提升定位精度、优化电子束焊接参数及封焊工艺、热处理预补偿的短期方案,可将焊后端面跳动控制在 $0.07\sim 0.1\text{mm}$ ,满足设计要求,显著提升产品合格率。(3)长期采用整体锻造或花键连接替代焊接结构,并升级自动化连续炉热处理产线,可从根源消除变形源,提升质量稳定性与生产效率。(4)本文研究成果形成完整高精度制造工艺方案,为同类薄壁盘类复合齿轮提供实践参考与技术支撑。

### 参考文献

- [1]王健,李建明.汽车变速器齿轮焊接变形控制技术[J].机械工程学报,2020,56(12):189-196.
- [2]张宏,刘军.渗碳淬火对齿轮齿形精度的影响及补偿方法[J].中国机械工程,2019,30(8):956-962.
- [3]李丽,王浩.电子束焊接工艺参数对薄壁齿轮变形的影响[J].焊接学报,2021,42(3):78-84.
- [4]赵勇,陈丽.齿轮加工基准转换误差的分析与控制[J].机械设计与制造,2018(11):234-236.