

船用齿轮箱输入轴组件加工变形控制

谢立湘^{1, 2}, 王彩¹, 袁仲谋^{1, 2}, 何熙时³, 黎超^{1, 2}

1. 株洲齿轮有限责任公司 湖南株洲 412000

2. 新能源动力与传动系统湖南省重点实验室 湖南株洲 412000

3. 株洲中车天力锻业有限公司 湖南株洲 412000

摘要: 分析了船用齿轮箱输入轴组件的制坯、薄壁件热处理变形控制方法, 以及电子束焊变形的控制方法, 为解决船用齿轮箱输入轴组件的制造难题, 提供了很好的解决方案。

关键词: 船用齿轮箱; 传动轴组件; 电子束焊

Deformation control in machining of marine gearbox input shaft assemblies

XIE Lixiang^{1, 2}, WANG Cai¹, YUAN Zhongmou^{1, 2}, HE Xishi³, LI Chao^{1, 2}

1. Zhuzhou Gear Co., Ltd., Zhuzhou 412000, Hunan, China

2. Hunan Province Key Laboratory of New Energy Power and Drive Systems, Zhuzhou 412000, Hunan, China

3. Zhuzhou CRRC Timly Forge Co., Ltd., Zhuzhou 412000, Hunan, China

Abstract: This paper analyzes the blank manufacturing, thin-walled part heat treatment deformation control methods, and electron beam welding deformation control methods of marine gearbox input shaft assemblies. It provides an effective solution to solve the manufacturing difficulties associated with marine gearbox input shaft assemblies.

Keywords: marine gearbox; drive shaft assembly; electron beam welding

1 序言

船用齿轮箱是一种用于船舶推进系统的重要零部件, 其通过齿轮传动, 将发动机的转速和扭矩传递给船舶的推进器, 从而将船舶推动。船用齿轮箱具有以下特点: 承受高扭矩的传输, 因此齿轮箱的设计需要考虑材料的强度和承载能力; 高效率传动和可靠性, 以确保船舶在长时间航行中的正常运行; 具备较高的功率传输能力; 具备良好的耐蚀性, 能够抵御海水等腐蚀介质的侵蚀, 并且需要具备良好的密封性能, 以防止润滑油泄漏。

主传动系统的船用齿轮箱, 其结构紧凑, 精度要求高, 零部件制造难度较大。进口船用齿轮箱,

噪声、疲劳寿命比国产的性能好。经拆解分析, 进口船用齿轮箱齿轮多采用剃齿工艺, 精度能达到6级。而国产船用齿轮箱齿轮多采用磨齿工艺, 这样虽然降低了噪声, 但同时也降低了疲劳寿命。国产船用齿轮箱制造的难题是传动齿轮组件, 其结构复杂, 且传动齿轮是薄壁件, 容易变形, 加工工艺性较差, 给设计和制造带来困难。

本文从控制热变形方面着手, 研究了传动齿轮组件的加工难题。

2 某型船用齿轮箱输入轴组件的结构

图1所示为某型船用齿轮箱的输入轴组件。输

入轴组件中外齿、内花键，其壁厚最小处在外齿齿根和花键齿根处，仅8.2mm，而最大外径只有150mm，属于薄壁件，容易变形。

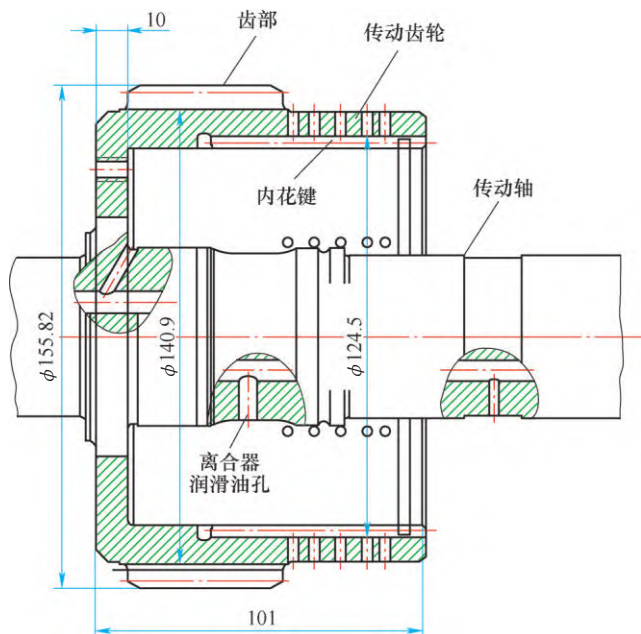


图1 输入轴组件

输入轴组件中的传动齿轮、传动轴，是独立的2个零件，通过电子束焊连接在一起。输入轴组件做成分体设计，比整体的更合理，这是因为分体设计具有如下优势。

1) 分体式设计比整体式的节省材料。图2所示为输入轴组件的整体式模锻坯，消耗材料重量21.3kg，图3所示为输入轴组件的分体式模锻坯，消耗材料重量合计19.9kg，分体式比整体式每件节省材料1.4kg^[1]。

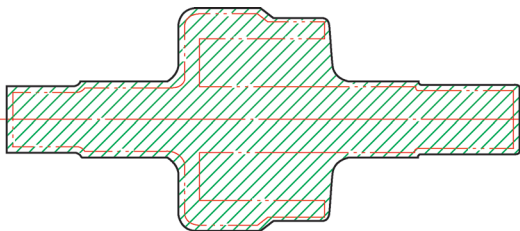
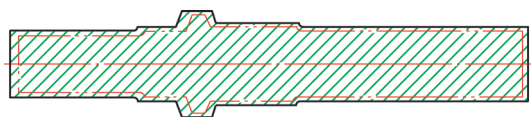
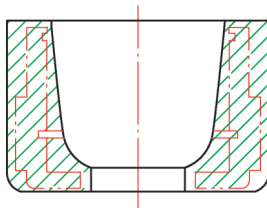


图2 整体式输入轴组件模锻坯

2) 分体式设计便于制造。若是整体式输入轴组件，则离合器润滑油孔不方便加工，且内花键和轴之间的间隙单边只有31mm，不方便焊接后输入轴外圆磨削。另外，花键长度达67mm，加工也比较困难。



a) 传动轴模锻坯



b) 传动齿轮模锻坯

图3 分体式输入轴组件模锻坯

3 分体式齿轮输入轴组件工艺分析

分体式输入轴组件的工艺路线一般有以下两种。

(1) 工艺路线一 ①传动轴下料→制坯→热前加工→热处理→热后加工。②传动齿轮下料→制坯→热前加工→热处理→磨齿。③传动轴和传动齿轮焊接。

(2) 工艺路线二 ①传动轴下料→制坯→热前加工→热处理→热后加工。②传动齿轮下料→制坯→热前加工→热处理→磨齿。③传动轴和传动齿轮焊接→磨齿。

两种工艺路线不同之处：在工艺路线一中，传动齿轮磨齿后再焊接，而在工艺路线二中，传动齿轮焊接后再磨齿。

两种工艺路线各有优缺点。工艺路线一的优点是齿轮齿面磨量相对少些，缺点是焊接热变形难以控制。工艺路线二的优点是热后磨齿可以修正热处理变形，缺点是磨齿余量大些，降低了齿面强度。

4 输入轴组件制造过程变形分析

根据工艺路线分析，输入轴组件在制造过程中，热变形主要产生在传动齿轮。传动齿轮是一种非对称结构的薄壁件，在成品前，要经过热处理和电子束焊工序，这两道工序容易使产品发生变形。

1) 热处理时，由于材料组织均匀性、加工过程中残余应力的释放、加热及淬火时产生的热应力、组织应力，以及工件自重等，均会使工件产生不均匀的塑性变形而造成形状畸变。其变形特点为：圆周方向变椭圆，长度方向变锥度。根据实际测量，

圆度达0.1~0.56mm, 锥度达0.05~0.31mm。

2) 电子束焊时, 首先加热内孔 I 处 (见图4) 至120℃, 然后套入输入轴, 再在 II 处进行电子束焊, 焊接产生的热量, 导致传动齿轮变形, 其变形特点为: 端面翘曲, 花键部位圆度、锥度变形, 圆度达0.05~0.15mm, 花键锥度达0.05mm。

以上两种热变形未呈现线性叠加现象。

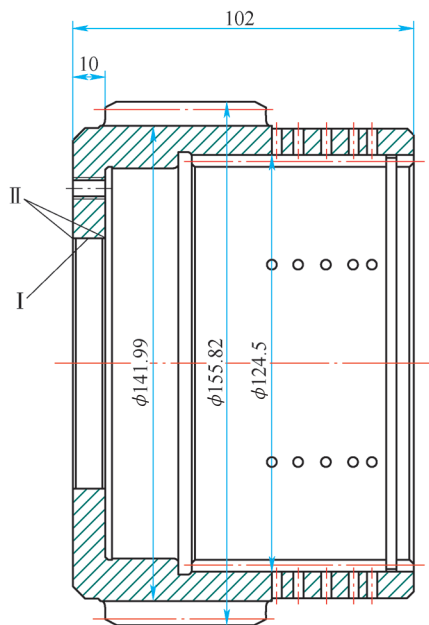


图4 传动齿轮结构

5 传动齿轮变形的影响

圆度和锥度变形的危害性非常大。

1) 降低传动齿轮的强度: 由于磨齿时齿面各点的磨量不一致, 导致砂轮异常磨损, 齿面产生过热烧伤和微裂纹。同时, 由于瞬间磨量不一致, 磨齿后齿面各点的表面硬度和硬化层深度也会不一致。齿面烧伤、微裂纹、硬度不均匀, 经过疲劳寿命试验验证, 当齿面磨量为0.1mm时, 磨齿齿轮疲劳强度将降低约15%。

由于齿面各点的硬度不一致, 齿轮高速转动时, 振动、噪声增大。

由于非正常振动, 因瞬间发热而导致传动效率降低。

2) 圆度和锥度变形影响内花键的精度: 内花键处装配摩擦片, 与主动齿轮配合, 摩擦片压紧后可以带动主动齿轮一起旋转, 花键的圆度和锥度变形会影响摩擦片左右滑动的平稳性, 影响摩擦片传动

主动齿轮的可靠性和效率。

因此, 控制热变形, 对提升产品性能就显得非常重要^[2]。

6 输入轴组件制造过程变形的控制

6.1 热处理变形的控制

传动齿轮有内外齿轮结构, 法向模数分别为2.507mm、3.0mm, 在渗碳淬火过程中, 会出现圆度和锥度变形, 为了控制变形量, 保证内外齿的精度等级, 需采取如下措施。

(1) 齿轮材料 由于原材料淬透性不同, 导致了淬透性带宽的不同, 渗碳淬火后的组织会出现异常, 变形也就不一样, 因此对该产品淬透性进行合理选取, 选用J9值为34~39HRC、J15值为30~35HRC的20MnCr5钢材, 带状组织≤2级, 晶粒度6~8级 (见图5)。

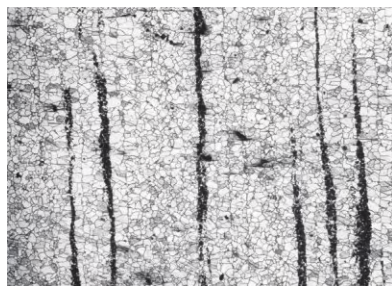


图5 钢材带状组织2级 (100×)

(2) 锻造正火 齿坯预备热处理组织的均匀性和稳定性对齿轮最终热处理变形的影响很大, 因为锻坯的各种原始组织的比热存在差异, 在加热、转变过程中产生的尺寸变化就不同。

锻造后采用等温正火, 基体组织为均匀分布的铁素体+珠光体 (F+P), 级别≤3级 (见图6)。正火硬度控制在156~190HBW, 且同一件产品的正火硬度散差≤8HBW。

(3) 去应力退火 粗车完工后, 增加一道去应

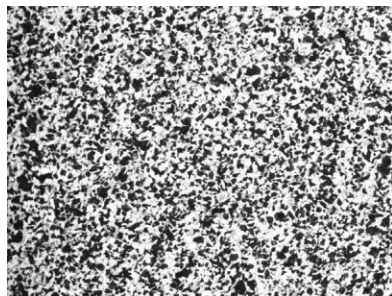


图6 正火组织2级 (100×)

力退火，消除机械加工的残余应力，减少后续热处理加热过程中，因残余应力释放而使各部位产生较大的应变。

将产品在高温回火炉进行去应力退火：温度 $(540 \pm 10)^\circ\text{C}$ ，保温4h，全程充氮气保护，流量 $1 \sim 2\text{m}^3/\text{h}$ ，随炉冷却至 420°C 以下，出炉空冷至室温。

(4) 低压真空渗碳+高压气淬 采用进口真空炉进行渗碳高压气淬，高压氮气 2MPa 气淬。试样检测满足图样要求：齿面硬度 60.1HRC 、 60.3HRC 、 60.6HRC ；心部硬度 31.7HRC 、 30.9HRC 、 31.1HRC ；硬化层 0.85mm ；残留奥氏体及马氏体3级（见图7）；碳化物1级；心部铁素体1级。真空渗碳气淬的零件变形均匀， M 值平均缩量 $\leq 0.06\text{mm}$ ，失圆 $\leq 0.02\text{mm}$ ，齿轮精度等级下降 < 1 级（ F_p 、 F_r 增量 $\leq 0.01\text{mm}$ ）。

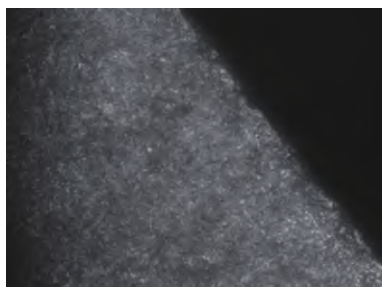


图7 渗碳淬火后金相组织3级（400×）

(5) 低温回火 在清洗后低温回火过程中，通过使用夹具来进一步限制变形量。图8所示为一种传动齿轮淬火后回火夹具。传动齿轮内孔与夹具A处配合，起径向定位作用，间隙 $0.01 \sim 0.02\text{mm}$ ，夹具B、C处起限制传动齿轮变形作用，间隙 $0.05 \sim 0.1\text{mm}$ 。使用这种夹具，可以控制传动齿轮热处理变形，圆度在 0.03mm 以内，花键锥度在 0.02mm 以内。

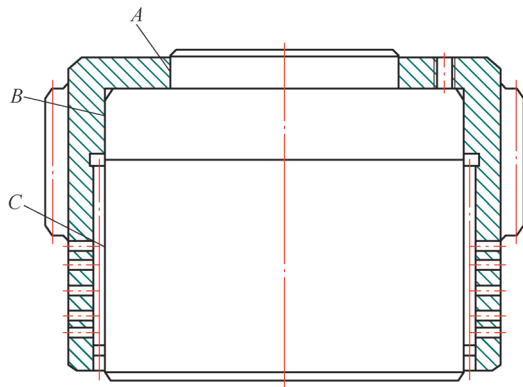


图8 传动齿轮淬火后回火夹具

6.2 电子束焊热变形的控制

电子束焊时产生的热量会导致传动齿轮与传动轴连接的幅板处产生变形，幅板外端往下翘曲，并带动传动齿轮的齿和花键往外翘曲。为控制其翘曲变形，设计的防变形夹具如图9所示。在电子束焊前，将传动齿轮装入定位座，然后放入胀套，从而胀紧产品外圈。操作中胀紧力不能太大，否则会导致传动齿轮变形，胀紧力在 $20 \sim 50\text{N}$ 即可^[3, 4]。

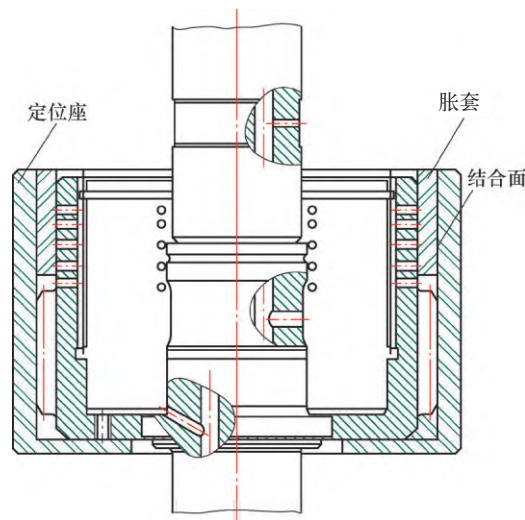


图9 电子束焊防变形夹具

7 结束语

热变形的控制方法比较多，本文从材料、锻造、热处理及夹具控制变形方面进行了探讨。这种方法简单易行，成本低。通过上述方法控制的传动齿轮产品热变形，可以控制在 0.05mm 以内，能满足焊接前完成输入轴和传动齿轮的所有加工、焊接后不再加工的要求，大大提升了输入轴组件的性能，降低了制造成本。

通过实施变形控制措施，船用齿轮箱噪声和疲劳寿命等各项性能指标，均达到图样设计要求。

参考文献：

- [1] 胡亚民，何怀波，车路长，等. 精锻模具图册[M]. 北京：机械工业出版社，2002.
- [2] 中国船级社. 钢质海船入级规范[S]. 北京：中国船级社，2023.
- [3] 魏哲，郭林秀. 正火加热时间对DH36船板钢组织和力学性能的影响[J]. 热处理，2022（4）：24-27.
- [4] 吕瑞明. 重型汽车变速箱齿轮材料及热处理工艺试验研究[D]. 长春：吉林大学，2011.