

基于滚齿修形补偿热畸变的工艺改进

牟杏华, 程彦娜, 李春明

常州天山重工机械有限公司 江苏常州 213032

摘要: 针对太阳轮齿部磨削余量与表面硬度不均匀的问题, 对齿部变化的数据进行分析, 通过工艺试验, 在滚齿时增加齿部修形, 补偿热处理过程产生的畸变, 从而提升产品质量, 延长产品使用寿命。

关键词: 太阳轮; 滚齿修形; 补偿; 畸变; 硬度; 均匀

1 序言

我公司在小批量生产某风电齿轮箱太阳轮时发现, 因热处理变形导致工件磨齿后, 在齿部两端齿根部位有微量台阶, 齿宽中部因余量不足有黑皮, 导致最终产品公法线超差。部分工件因变形太大, 齿宽中部余量严重不足, 公法线超差太多, 只能报废。该质量问题直接导致产品合格率严重下降, 影响产品准时交付, 使得生产成本大大增加。经分析, 这种变形方式会导致齿部磨削余量不均匀, 磨齿后齿面有效硬化层深度和齿面硬度不均匀, 从而降低齿轮的接触强度、承载能力, 齿根微量台阶会影响齿轮疲劳强度, 最终降低齿轮的使用寿命。

李春玲等^[1]以风电齿轮箱的太阳轮为研究对象, 基于随机载荷作用下的机械零部件动态可靠性模型, 对风电齿轮箱太阳轮的可靠度和失效率进行分析与计算, 给出风电齿轮箱太阳轮可靠度和失效率随时间变化的曲线; 徐辉等^[2]探讨了太阳轮热处理工艺, 通过对设备和热处理气源的优化改进, 验证并固化热处理工艺; 顾晓明等^[3]通过改变热处理的装夹方式和工件热处理前的结构, 减少太阳轮的弯曲变形。上述成果均没有涉及到通过滚齿修形补偿热处理畸变的方法。本文以某型号太阳轮轴为例, 研究滚齿修形对于热处理变形的影响规律, 最终提高产品的质量及使用寿命。

2 改进前工艺及变形情况

某型号太阳轮结构如图1所示, 材料为18CrNiMo7-6钢, 模数 $m_n=15\text{mm}$, 齿数 $Z=24$, 压力

角 $\alpha=25^\circ$, 齿宽 $B=388\text{mm}$, 公法线 W_4 为 $163.468\sim 163.546\text{mm}$ 。齿部渗碳淬火要求齿面硬度为 $58\sim 62\text{HRC}$, 齿面有效硬化层深度为 $2.5\sim 3.0\text{mm}$ 。

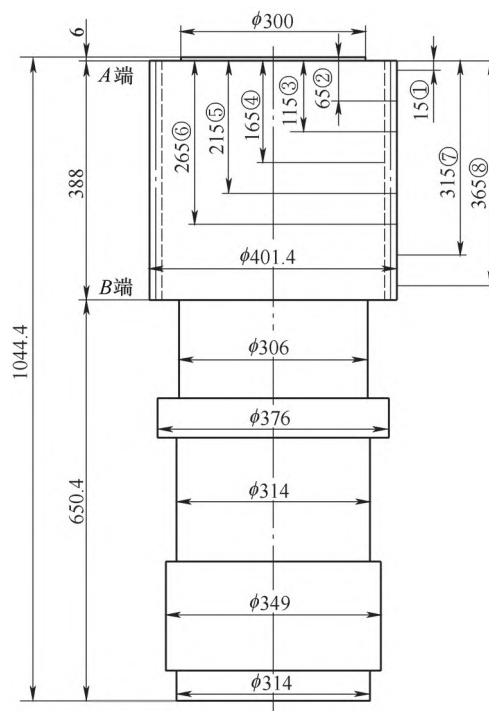


图1 太阳轮结构示意图

产品工艺路线: 锻造→锻后热处理→粗车→超声波探伤→半精车→滚齿→热处理→精车→超声波探伤→钻深孔→磨外圆→滚花键→磨齿→检验。

此为轴类零件, 编制滚齿工艺时, 滚齿公法线 $W_4=164.16\text{mm}$, 留量为 $\Delta W=0.66\text{mm}$, 其余滚齿参数均按原设计参数执行。滚齿刀具选用凸角留磨滚刀, 使磨齿后不出现磨削台阶。热处理工艺要求齿

面硬度58~62HRC，渗碳层深度3.2~3.7mm。

按该工艺加工的产品，热处理后进行了公法线数据检测（齿宽方向从上至下每15mm测量一周，每周均布测量3个点），数据汇总统计见表1。太阳轮从轴端至表1中第②点位置，即从轴端起65mm长度范围内有较大的胀大，其余部位热处理后均呈收缩状态。尤其在齿部上端（表1中第①点位置，即距离齿端15mm处）胀大比较明显，公法线3点平均值比热处理前胀大0.19mm；而在中下部（表1中第⑤点位置，即距离齿端215mm处），公法线3点平均值比热处理前缩小0.29mm，单边收缩量约为0.15mm，产生凹心。从第②点至第⑤点公法线收缩量逐渐增大，从第⑤点至第⑧点公法线收缩量逐渐减小，最高点与最低点公法线之差达到0.51mm，单

表1 工艺改进前热处理后公法线实际测量值
(单位：mm)

测量位置	圆周方向点1	圆周方向点2	圆周方向点3
15①	164.35	164.34	164.35
65②	164.20	164.22	164.23
115③	164.04	164.04	164.04
165④	163.94	163.93	163.91
215⑤	163.89	163.88	163.84
265⑥	163.95	163.92	163.90
315⑦	164.05	164.03	164.00
365⑧	164.14	164.11	164.10

边相差0.26mm。
磨齿前对两齿面的对中余量进行检测，结果见表2。

表2 工艺改进前磨齿对中余量
(单位：10μm)

对中	位置		1		2		3		4	
4-3-3	齿	齿	左齿	右齿	左齿	右齿	左齿	右齿	左齿	右齿
对中记录	上	里	40	30	27	56	49	48	72	24
		中	42	33	29	58	53	53	75	30
		外	38	25	29	51	55	49	75	27
	中	里	13	8	2	23	13	19	21	11
		中	5	6	-5	20	7	18	17	8
		外	-2	-5	-8	11	3	7	12	0
	下	里	17	48	20	54	34	38	36	33
		中	13	46	16	53	29	38	23	26
		外	6	37	12	43	24	32	23	21

从测量数据得出的变形趋势与工件磨齿后齿面状态吻合，齿轴从轴端至第②点约65mm处齿根部位出现磨削台阶，从第②点至第⑤点位置，齿面余量逐渐缩小，第⑤点处齿面余量最小，导致齿面留有黑皮，无法磨出。

3 热处理变形产生的原因及影响分析

工件的热处理变形主要是由热处理应力造成的。工件的结构形状、原材料质量、热处理前的加工状态、工件的自重以及工件在炉中加热和冷却时的支承或夹持不当等因素也会引起变形。

3.1 热处理变形产生的主要原因

从文献[4]中归纳的工件在热应力与组织应力作用下的几种典型工件的外形和尺寸变化模型可知：

① 由于太阳轮轴属杆件，控制截面相对较小，组织应力占据主导作用，因此产生马鞍形变形，根据变形模型主要表现为齿宽中部收缩，两端略胀大。② 两端略胀大的原因为端部热容量小，相对齿宽中部可以产生更多的马氏体组织，由于马氏体比容大，所以两端相对齿宽中部胀大。

3.2 主要影响分析

1) 磨齿后渗碳层深度不均匀。按最低点磨出，在两侧端部的渗碳层深比中间部位浅0.26mm。
2) 齿面硬度不均匀。根据磨齿余量分配记录，在齿宽中部节圆处的磨量为0.1mm，端部个别点余量为0.6mm，根据热处理后的硬度梯度图（见图2）可以看出，0.1mm处硬度为680HV（59.2HRC），

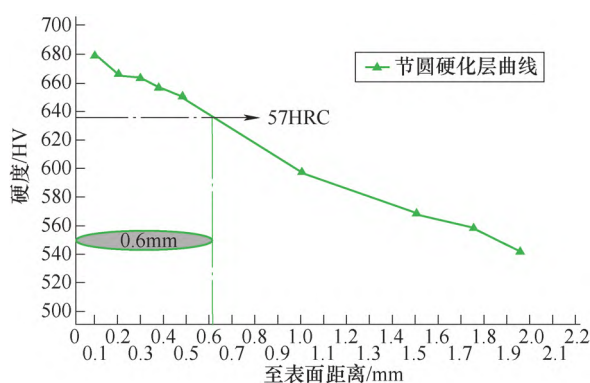


图2 硬度梯度图

0.6mm处硬度为57HRC，磨量大的部位硬度不符合要求。

4 改进方案及分析

4.1 改进方案

1) 太阳轮齿部端面增加工艺轴头，增大端部热容量，减小胀大量。

2) 增加热处理前滚齿公法线留量，保证各部有磨削余量。

3) 利用数控滚齿机，在滚齿时增加齿部鼓形，利用反变形原理抵消热处理变形。

4.2 方案分析

(1) 方案1 在轴端面增加工艺头，可以相应减小热处理变形，但增加了原材料采购成本，后续还需切除工艺头，增加了生产成本，生产效率降低。

(2) 方案2 为行业内通用的工艺方法，增加留磨量，保证余量最小部位能够磨出，但此方法加剧了端部齿根台阶、渗碳层不均及硬度不均的问题。

(3) 方案3 利用了现有机床的先进功能，在滚齿时增加齿部鼓形抵消热处理变形。滚齿的生产效率、生产成本均无影响。通过此方法使工件表面磨削余量均匀、渗碳层深度均匀，有效提升磨齿效率及产品的使用寿命。

通过上述方案的比较，决定采用方案3作为改进方案。

5 改进方案的实施

根据前期的数据统计及变形趋势分析，太阳轮热处理后在第⑤点距端面215mm处，为收缩量最大处，单边公法线缩小约0.15mm，由于考虑到端部胀大约0.1mm，因此将鼓形量设置为0.15mm，补偿

热处理后的收缩量。工件齿宽为388mm，215mm位置不在齿宽中部，但由于机床鼓形程序设置只能以对称鼓形编制，因此工艺按430mm齿宽来设计鼓形量，保证对称鼓形。滚齿修形如图3所示。

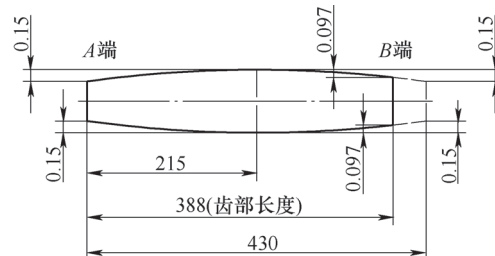


图3 滚齿修形示意

按照图3所示的修形进行滚齿之后，测量实际的滚齿公法线尺寸，整理后数据见表3。

表3 工艺改进后热处理前公法线实际测量值

(单位: mm)

测量位置	圆周方向点1	圆周方向点2	圆周方向点3
15①	164.19	164.20	164.19
65②	164.22	164.23	164.23
115③	164.26	164.26	164.25
165④	164.29	164.29	164.29
215⑤	164.33	164.33	164.33
265⑥	164.28	164.29	164.29
315⑦	164.24	164.24	164.24
365⑧	164.19	164.20	164.20

6 工艺改进效果

根据改进后的工艺加工的产品，对热处理后的公法线进行了测量跟踪，数据采集点同改进前，公法线实测值见表4。

表4 工艺改进后热处理后公法线实际测量值

(单位: mm)

测量位置	圆周方向点1	圆周方向点2	圆周方向点3
15①	164.14	164.17	164.18
65②	164.12	164.15	164.14
115③	164.08	164.13	164.12
165④	164.07	164.11	164.10
215⑤	164.05	164.10	164.07
265⑥	164.04	164.09	164.06
315⑦	164.06	164.10	164.08
365⑧	164.08	164.10	164.09

热处理前太阳轮的鼓形量达到了工艺要求，经热处理后，热处理前齿中部鼓形量弥补了热处理后收缩量，齿两端与中部公法线基本趋于一致。

由表4数据可以看出，最高点与最低点公法线差

值为0.14mm，单边0.07mm，从第④点开始逐渐一致，但在第①点至第③点还是有些许胀大。

磨齿前对两齿面的余量进行检测，齿部余量比改进前更均匀。工艺改进后磨齿对中余量见表5。

表5 工艺改进后磨齿对中余量

(单位: 10 μ m)

对中	位置		1		2		3		4	
4-3-3	齿	齿	左齿	右齿	左齿	右齿	左齿	右齿	左齿	右齿
对中记录	上	里	36	24	35	40	39	40	41	22
		中	37	26	34	38	37	35	38	26
		外	36	27	35	36	38	30	36	30
	中	里	33	32	31	33	33	26	25	28
		中	25	25	21	27	20	20	18	16
		外	22	21	16	24	18	16	17	20
	下	里	28	31	23	32	28	33	28	29
		中	28	27	18	30	22	29	21	28
		外	25	22	20	28	19	23	18	25

进行工艺试验的太阳轮轴磨齿结束后，未发现齿面余量太小磨不出的情况，齿端处齿根磨削台阶也未出现，且齿面硬度均匀。

7 结束语

本文针对太阳轮齿部的磨削余量和表面硬度不均匀问题，对齿部变化的数据进行分析，在数控滚齿工序增加齿部鼓形，补偿热处理过程产生的畸变，通过调整工艺方案，取得以下效果。

1) 热处理后齿面磨削余量均匀，磨量差约为0.1mm，工件齿面全部磨出，未产生齿根台阶，磨齿后的齿面渗碳层深度均匀。

2) 齿面硬度均匀。从硬度梯度图（见图2）可以看出，距齿面深度0.15mm处硬度为666HV（58.5HRC），0.3mm处硬度为660HV（58.2HRC），符合设计要求，产品使用寿命提高。

3) 磨齿效率有效提升，加工时间由原来的3.6h，缩短为2.6h，效率提升38%。

该工艺方案已广泛应用于其他轴类齿轮，尤其是细长轴，齿宽300mm以上的工件，大幅提高了产品质量。

参考文献：

[1] 李春玲，刘波，许洁，等. 风电齿轮箱太阳轮的动态可靠度分析[J]. 兰州理工大学学报，2013，39

(5)：28-31.

[2] 徐辉，薛婷婷. 太阳轮热处理工艺探讨[J]. 金属加工（热加工），2011（17）：18-19.

[3] 顾晓明，姜维杰. 风电渗碳花键太阳轮变形控制研究[J]. 金属加工（热加工），2014（11）：31-33.

[4] 夏立芳. 金属热处理工艺学[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2008.

MW 20240301

专家点评

文章针对太阳轮齿部磨削余量与表面硬度不均匀的问题，对齿部变化的数据进行分析，通过工艺试验，采用滚齿修形的方法来抵消热处理变形，提高产品质量。

文章的重点是滚齿修形补偿方法，创新思路，另辟蹊径，通过调整工艺方案，在数控滚齿时增加齿部鼓形，利用反变形原理抵消热处理变形，达到了预期的效果。