

太阳轮节圆找正方法

张飞, 刘冰, 武少龙

重庆望江工业有限公司江苏分公司 重庆 400071

摘要: 针对风电齿轮箱太阳轮磨削量差的问题进行原因分析和工艺改进, 利用磨齿机辅助找正节圆, 从而优化磨削量, 避免因出现磨削台阶或齿面硬度不足而造成零件报废, 提高太阳轮磨齿质量。太阳轮节圆找正方法简单实用, 可广泛应用于渗碳淬火后用立式车床精车节圆的太阳轮。

关键词: 太阳轮; 渗碳淬火; 节圆; 磨齿; 磨削台阶

1 序言

由于太阳轮是风电齿轮箱的核心零件之一, 作为风电齿轮箱内的行星齿轮机构中心齿轮, 不仅受到多方面复杂载荷作用, 同时还起到精确传动和扭矩传递的作用, 因此对于太阳轮各部位的尺寸精度, 特别是对齿部和花键部位的精度、强度的要求较高。太阳轮齿宽长、模数大, 滚齿或铣齿采用镶片刀具易存在搭线误差, 且渗碳淬火变形大, 再加上精车节圆找正困难、设计优化变更加工螺旋角等原因, 导致磨削量差的问题突显, 严重时直接报废或产生磨削台阶, 而磨削台阶容易引发断齿, 从而造成齿轮失效。

针对太阳轮磨削量差的问题, 顾晓明等^[1]认为风电渗碳太阳轮采用重心朝上焊接悬挂以及空心体结构设计有利于减小热处理变形; 牟杏华等^[2]在滚齿时增加齿部鼓形, 利用反变形原理抵消热处理变形; 赵萍等^[3]分析了齿根假性磨削台阶的产生原因和消除假性磨削台阶的措施; 李泽军^[4]分析了磨削台阶形成的原因和负面影响, 并提出磨削台阶的预防和修整方法; 贺鹏^[5]分析了热处理前粗加工刀具凸角量的设计, 热处理后精加工刀具的超量计算、热处理变形等对磨削台阶的影响; 张立峰等^[6]研究了齿根过渡曲线连接不好产生台阶的原因与解决措施。上述成果虽然具有较好的效果, 可以应对常规状态下的太阳轮加工, 但是对于热处理变形大、精车节圆找正差以及设计变更加工螺旋角等各

种因素综合影响而导致磨削量极差的情况而言, 效果并不理想, 依旧存在报废的可能性。本文以某型号太阳轮为例, 提出一种新的太阳轮节圆找正方法, 应用于精加工工序, 可以有效优化磨削量, 解决磨削量差的问题, 从而避免产生磨削台阶, 提高太阳轮的质量并延长寿命。

2 太阳轮齿部参数及材料性能

图1所示太阳轮的齿数为33, 模数为18mm, 压力角为 22.5° , 螺旋角为 $6^\circ 8'$, 旋向为左旋, 齿宽为455mm, 齿根圆直径为551.912mm, 法向变位系数为0.14, 跨5齿公法线长度为248.625~248.712mm。热处理要求齿部渗碳淬火, 表面硬度58~62HRC, 心部硬度33~45HRC。零件材料

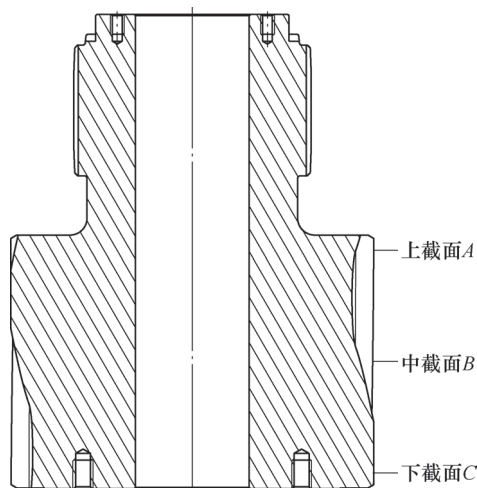


图1 太阳轮

18CrNiMo7-6是一种渗碳淬硬钢,具有高强度、高韧性、良好淬透性和耐蚀性,被广泛应用于重型装载传动领域^[7]。

3 方案的制定

根据太阳轮的结构特点,制定工艺流程为:粗车→钻削→滚齿→齿廓倒角→渗碳淬火→精车→加工中心加工→磨齿→滚花键→齿廓倒角→烧伤检测→磁粉探伤→检验。

根据多年生产经验,由于在太阳轮空心体结构设计以及滚齿时增加齿部鼓形,可以减小热处理变形,因此工艺设计时需要在粗车工序完成内孔车削,并且在滚齿工序增加鼓形,滚齿公法线长度 $W_s=(249.32\pm0.03)$ mm,鼓形量0.4mm。

4 存在的问题

按照上述工艺方案对太阳轮进行试制,磨齿时出现齿面磨削量差的问题。具体如下:太阳轮齿数为33,选取9个均布齿槽进行检测,检测位置如图1所示,分别为上截面A、中截面B和下截面C,使用耐尔斯磨齿机ZP12检测齿面磨削量分布情况,结果见表1。

表1 齿面磨削量分布 (单位: $\times 10^{-2}$ mm)

齿槽	第1槽		第2槽		第3槽		第4槽		第5槽		第6槽		第7槽		第8槽		第9槽	
	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右
上截面A	45	43	34	43	32	48	30	47	36	38	43	36	49	34	52	36	52	38
中截面B	39	39	41	29	46	35	39	50	42	49	37	47	39	42	46	40	46	38
下截面C	88	14	61	49	43	69	29	73	16	73	0	56	34	15	50	14	75	6

最大磨削量过大可能造成齿面硬度过低,同时导致磨削台阶严重,而磨削台阶会影响齿轮的齿根弯曲疲劳强度,降低产品质量和寿命。

5 原因分析

(1) 滚齿的影响 为了提高制齿效率,一般采用镶片刀具进行滚齿或铣齿加工,而刀具制造精度及刀片搭线误差会对磨削量产生影响^[8]。利用耐尔斯磨齿机ZP25对滚齿后的太阳轮进行精度检测,结果显示齿形出现了内凹现象,对单边磨削量产生约0.07mm的影响。

(2) 热处理的影响 参看文献[9],影响渗碳淬火齿轮变形的因素很多,主要包括齿轮的结构设

计,原材料质量、锻造质量、毛坯的预备热处理、机械加工(包括冷热配合)及渗碳淬火工艺等。由于影响齿轮变形的因素很多,而且其中很多因素彼此交互影响,难以控制,因此变形已成为齿轮制造中主要的技术难点之一。

由表1可知,在下截面C中的各个被检齿槽中,左齿面最小磨削量在第6槽,为0mm;右齿面最小磨削量在第9槽,为0.06mm。为了保证最小磨削量均匀,按常规方法计算可得出磨齿时的最小磨削量为 $(0+0.06)/2=0.03$ (mm),即左齿面最小磨削量与右齿面最小磨削量之和除以2,使左齿面和右齿面最小磨削量相等,均为0.03mm。而表1中左齿面最大磨削量在第1槽,为0.88mm;右齿面最大磨削量在第5槽,为0.73mm。当最小磨削量补偿后,使得第1槽的左齿面最大磨削量变为 $0.88+0.03=0.91$ (mm),第5槽右齿面的最大磨削量变成 $0.73-0.03=0.70$ (mm)。此时左齿面最大磨削量为0.91mm,右齿面最大磨削量为0.70mm,最小磨削量为0.03mm。若直接磨齿,就会存在以下问题。

1) 左齿面最大磨削量为0.91mm,而滚刀凸角为0.75mm,最大磨削量远大于太阳轮齿根过渡圆角,磨齿后必然出现磨削台阶。

2) 最小磨削量为0.03mm,最小磨削量不能保证齿面磨光,需要继续磨齿,但会导致公法线超差,同时也导致左齿面的最大磨削量0.91mm继续变大,加深磨削台阶。

计、原材料质量、锻造质量、毛坯的预备热处理、机械加工(包括冷热配合)及渗碳淬火工艺等。由于影响齿轮变形的因素很多,而且其中很多因素彼此交互影响,难以控制,因此变形已成为齿轮制造中主要的技术难点之一。

(3) 精车节圆找正的影响 根据太阳轮的结构特点,采用高精度立式车床进行车削加工,但节圆找正较为困难,找正结果较差。通过对找正数据进行分析发现,找正具有随机性,可对单边磨削量产生最大约0.2mm的影响。

(4) 螺旋角变更的影响 设计根据样机试制结果优化加工螺旋角,从 $6^{\circ} 6' 52''$ 改为 $6^{\circ} 8'$,即滚齿时加工螺旋角 $6^{\circ} 6' 52''$,磨齿时加工螺旋角

6° 8'。无论加工螺旋角增大或减小,磨削量均增加;加工螺旋角变化的绝对值越大,需要预留的磨削量越多^[10]。太阳轮齿宽455mm,因滚齿与磨齿加工螺旋角的差异,故理论上将对磨削量产生0.15mm的影响。

6 改进措施

针对上述原因,可以制定相应的改进措施,比如提高滚齿刀具及刀片制造精度、优化滚齿鼓形量、改进热处理工艺、提高精车节圆找正质量以及减小加工螺旋角变更量等。上述方法较为常规,效果并不理想,本文提供一种新的技术方案,可以有效解决磨削量差的问题。具体实施过程如下。

(1) 计算每个被检齿槽的齿面磨削量和 齿面磨削量和 = 左齿面磨削量 + 右齿面磨削量,例如:第1槽上截面A的齿面磨削量和 = 第1槽上截面A的左齿面磨削量0.45mm + 右齿面磨削量0.43mm = 0.88mm。计算所得齿面磨削量和分布结果见表2。

(2) 确认可调方位 根据齿面磨削量和的分布

状态确认可调方位,具体过程如下。

1) 计算每个检测截面中的磨削量差。磨削量差 = 齿面最大磨削量和 - 齿面最小磨削量和。本案例中,上截面A的磨削量差 = 齿面最大磨削量和(第9槽的0.90mm) - 齿面最小磨削量和(第5槽的0.74mm) = 0.16mm;同理可计算出中截面B的磨削量差 = 第5槽的0.91mm - 第2槽的0.70mm = 0.21mm;下截面C的磨削量差 = 第3槽的1.12mm - 第7槽的0.49mm = 0.63mm。

2) 确认调整截面。调整截面为在所有检测截面中磨削量差最大的截面。由于下截面C的磨削量差0.63mm明显大于上截面A的磨削量差0.16mm和中截面B的磨削量差0.21mm,说明下截面C的磨削量差最大,因此将下截面C作为调整截面。

3) 确认可调方位。可调方位为最小磨削量齿槽位置的相对侧,最小磨削量齿槽为调整截面内的具有齿面最小磨削量和所在的齿槽。为便于说明,将下截面C的所有齿面磨削量和标注在一个齿部轮廓俯视图上,如图2所示,将表1中的9个被测齿槽进行

表2 齿面磨削量和分布

(单位: $\times 10^{-2}$ mm)

齿槽	第1槽	第2槽	第3槽	第4槽	第5槽	第6槽	第7槽	第8槽	第9槽
齿面磨削量和(上截面A)	88	77	80	77	74	79	83	88	90
齿面磨削量和(中截面B)	78	70	81	89	91	84	81	86	84
齿面磨削量和(下截面C)	102	110	112	102	89	56	49	64	81

标号1~9,并在对应齿槽旁注明该齿槽下截面C的齿面磨削量和。由图2可知,最小磨削量齿槽为第7槽,可调方位则为齿槽7的相对侧。

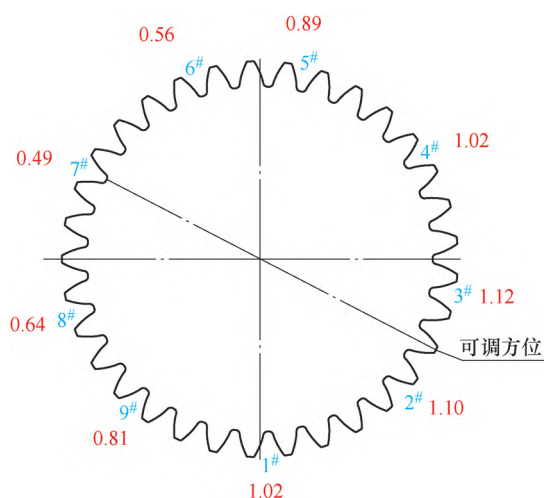


图2 下截面C的齿面磨削量和

(3) 计算可调距离 根据可调方位和齿面磨削量和的分布状态计算可调距离,计算过程如下。

1) 确认最大磨削量齿槽。最大磨削量齿槽为可调方位所在位置相距最近的两个被检齿槽。图2中与可调方位相距最近的两个被检齿槽为第2槽和第3槽,即可将第2槽和第3槽视为最大磨削量齿槽。

2) 确认平均磨削量。平均磨削量 = 最大磨削量齿槽的所有截面中左右两个齿面最小磨削量之和的一半。为了便于观察,将最大磨削量齿槽(第2槽和第3槽)以及最小磨削量齿槽(第7槽)的数据单独列出见表3。

最大磨削量齿槽(第2槽和第3槽)的所有截面中,两个最小的齿面磨削量分别为第3槽上截面A的左齿面磨削量0.32mm,第2槽中截面B的右齿面磨削量0.29mm,两者之和的一半为 $(0.32 + 0.29) / 2 = 0.305$ (mm),则平均磨削量可取值0.30mm。

表3 第2槽、第3槽和第7槽齿面磨削量分布

(单位: $\times 10^{-2}\text{mm}$)

齿槽	第2槽		第3槽		第7槽	
	左	右	左	右	左	右
上截面A	34	43	32	48	49	34
中截面B	41	29	46	35	39	42
下截面C	61	49	43	69	34	15

需要说明的是,本案例是基于操作人员检测9个齿槽磨削量的基础上进行分析,最小磨削量齿槽(第7槽)的相对侧齿槽处于第2齿槽和第3齿槽之间(见图2),由于磨齿机没有检测到该齿槽,因而进行磨削量求和计算得出平均磨削量。该方法并非固定不变,需根据检测齿槽所处具体位置进行分析,假设检测8个齿槽,则最小磨削量齿槽的相对侧齿槽会被直接检测到,此时该齿槽的最小磨削量(上、中、下截面中,左右齿面中磨削量最小值)就是平均磨削量。

3) 确认叠加余量。叠加余量 = (平均磨削量 - 最小磨削量齿槽所有截面中的齿面最小磨削量) / 2。

最小磨削量齿槽(第7槽)所有截面中的齿面最小磨削量为下截面C的右齿面0.15mm,则叠加余量 = $(0.30 - 0.15) / 2 = 0.075$ (mm),即需要将第2槽和第3槽的齿面磨削量减少0.075mm,第7槽的齿面磨削量增加0.075mm,将齿面磨削量大的第2槽和第3槽向齿面磨削量小的第7槽进行补偿,从而保证磨削量更均匀。

4) 计算可调距离。可调距离 = 叠加余量 / $\sin\alpha$,式中 α 为齿轮压力角。由于0.075mm是齿面磨削量,需要转化为径向可调距离,该太阳轮压力角为 22.5° ,因此可调距离 = 叠加余量 $0.075\text{mm} / \sin 22.5^\circ \approx 0.2\text{mm}$ 。

(4) 对节圆找正 根据可调方位和可调距离对太阳轮进行调整。在太阳轮可调方位所在齿槽的相对侧架设百分表,然后用铜棒对可调方位进行敲击,根据百分表的读数将太阳轮敲击移动0.2mm,至此完成磨齿前的找正操作,此时再用耐尔斯磨齿机ZP12重新检测各个被检齿槽的磨削量,找正后的磨削量见表4。

表4 找正后的磨削量

(单位: $\times 10^{-2}\text{mm}$)

齿槽	第1槽		第2槽		第3槽		第4槽		第5槽		第6槽		第7槽		第8槽		第9槽	
	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右
上截面A	40	39	34	23	44	14	60	3	79	-1	87	6	83	22	68	37	55	43
中截面B	34	34	43	7	59	1	70	7	85	10	81	19	72	33	61	43	49	42
下截面C	83	6	64	25	59	33	62	30	59	36	42	30	65	7	63	16	77	10

由表4可看出,磨削量分布发生了变化,左齿面最小磨削量在第1槽和第2槽均为0.34mm,右齿面最小磨削量在第5槽为-0.01mm,左齿面最大磨削量在第6槽为0.87mm,右齿面最大磨削量在第8槽和第9槽均为0.43mm,按照常规方法计算可得磨齿加工时的最小磨削量为 $(-0.01 + 0.34) / 2 = 0.165$ (mm),最小磨削量优化补偿后,第6槽左齿面最大磨削量变为 $0.87 - 0.165 = 0.705$ (mm),第8槽和第9槽右齿面最大磨削量变为 $0.43 + 0.165 = 0.595$ (mm)。

通过本方法对节圆找正后,左齿面最大磨削量0.705mm,右齿面最大磨削量0.595mm,最小磨削量0.165mm,既可以保证齿面磨光,又不会产生磨削台阶,磨削量情况明显好转。

(5) 利用磨齿机完成粗磨 将找正后的太阳轮夹持锁定,预留0.2mm的公法线余量进行磨齿。

(6) 车削 将粗磨后的太阳轮移至车床进行车

削。按照精车找正方法,将太阳轮以节圆为基准进行定位,由于太阳轮齿部已经粗磨,因此精车找正非常容易,重新车削外圆找正基准,从而将外圆找正基准修正到与齿轮节圆基准一致。

(7) 精磨 将精车后的太阳轮移至磨齿机完成精磨。太阳轮粗磨时留有0.2mm的公法线余量,同时外圆找正基准与齿轮节圆基准一致,此时找正外圆基准后精磨,完成太阳轮的磨齿加工。

7 结束语

本文针对太阳轮磨削量差的问题,采用理论分析与加工验证的方式,总结出一种新的太阳轮节圆找正方法。根据齿面磨削量分布状态,科学分析得出太阳轮具体可调方位和可调距离,从而将太阳轮磨削量大的方位向磨削量小的方位进行补偿优化,使得齿面磨削量得到优化,防止出现磨削台阶或齿面硬度不足造成太阳轮报废或断齿的情况。该太阳

轮节圆找正方法具有很强的创新性及实用性，可广泛应用于渗碳淬火后用立式车床精车节圆的太阳轮，对同类型的齿轮加工具有一定的借鉴意义。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 牟杏华, 程彦娜, 李春明. 基于滚齿修形补偿热畸变的工艺改进[J]. 金属加工 (冷加工), 2024 (6): 33-36.
- [3] 赵萍, 王曰辉, 张一坤, 等. 成形磨齿齿根假性磨削台阶研究[J]. 机械工程与自动化, 2023 (1): 201-202, 205.
- [4] 李泽军. 齿轮根部台阶修整方法研究与实践[J]. 内燃机与配件, 2020 (7): 114-115.
- [5] 贺鹏. 齿轮根部台阶问题与解决方案[J]. 汽车工艺师, 2019 (5): 51-56.
- [6] 张立峰, 赵萍. 渗碳淬火硬齿面齿轮制造难点的工艺研究[J]. 机械工程与自动化, 2007 (6): 173-174, 177.
- [7] 路峰, 李琦, 孙雪娇, 等. 18CrNiMo7-6风电齿轮钢的动态CCT曲线[J]. 金属热处理, 2024 (9): 86-91.
- [8] 姜荣飞, 王明镜, 樊凡, 等. 可转位镶片滚刀滚齿加工精度影响分析和优化[J]. 机械工程师, 2023 (2): 105-108.

- [9] 陈建光. 渗碳淬火齿轮变形控制的研究[J]. 机械传动, 2014 (5): 152-156.
- [10] 赵少甫, 许鸿翔, 陈生超, 等. 齿轮渗碳淬火变形与齿面磨削量的关系研究[J]. 机械传动, 2023 (12): 118-122.

MW 20250411

专家点评

文章采用理论分析与加工验证相结合的方式，总结出一种新型的太阳轮节圆找正方法。根据齿面磨削量分布状态进行方位调整和补偿优化，有效解决磨削量差的问题，具有很强的工艺创新性。

文章的亮点是太阳轮磨齿工艺和节圆找正方法，科学分析，因地制宜，调整补偿，均衡磨削量。先根据齿面磨削量总和的分布状态，确认可调方位，计算可调距离；再将粗磨后的太阳轮移至车床，以节圆为基准进行定位，重新车削太阳轮外圆找正基准，将其修正到与齿轮节圆基准一致，提高磨齿质量。为同类型渗碳淬火齿轮的后续加工提供了参考和借鉴。

《金属加工（冷加工）》“工匠故事”栏目征稿

为传承老一辈工匠的优良传统，彰显新时代工匠的拼搏精神，《金属加工（冷加工）》开设“工匠故事”栏目，文章内容以倡导和弘扬“工匠精神”为主题，以解决生产技术难题为主线，言之有物、物为所用，用多种形式来呈现和讲述创新技艺、传承工匠精神的匠心故事。

(1) 报道对象 在生产实践中作出突出贡献的高级技师、技能大师、劳模、技术大咖等均可为主要报道对象，可以写自己或写别人，以解决技术难题为主线。

(2) 主要内容 以融入技术的多种形式，记录那些具有倡导和弘扬“工匠精神”的行业人物及故事，突出言之有物、物为所用，以利传承与激励。

(3) 栏目格式 具体栏目格式请扫描二维码查看。

(4) 投稿网址 <http://www.mw1950.com/manuscript>

(5) 栏目联系 曹胜玉 13683585307 (同微信)

