

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.01.021

风电机组增速箱制造技术与进展

宣安光¹, 朱才朝²

(1.杭州前进齿轮箱集团股份有限公司,杭州 311203;2.重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:增速齿轮箱作为风力发电设备的核心部件,其制造质量是保证机组整体性能的关键。风电机组增速箱制造是一个涉及多学科的综合性技术,应充分利用现有技术条件,深入研究工艺基础理论,完善工艺控制方法,促进新技术、新工艺、新材料的应用,真正实现数字化精益制造。文章针对风电机组增速箱结构特点和使用工况,结合工程生产实践,总结风电齿轮箱的工艺技术要求 and 特点;分析风电齿轮箱齿轮、箱体及行星架等关键零部件的制造技术现状及存在的问题,提出提高加工效率和控制热处理变形的措施,最后介绍风电齿轮箱测试技术。文章对指导风电增速箱制造具有一定工程应用价值。

关键词:风电机组增速箱;工艺技术;热处理变形;加工;测试

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2015)01-0155-06

Research and developments of manufacturing technology on wind turbine gearbox

XUAN Anguang¹, ZHU Caichao²

(1.Hangzhou Advance Gearbox Group Co., Ltd., Hangzhou 311203, P.R.China;

2.The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: The manufacturing quality and technology of gearbox, which is a core component, is the key guarantee for the superior performance of wind turbine. Wind turbine gearbox manufacturing is a comprehensiveness technique involved multiple disciplines. To realize the digital lean manufacturing, the in-depth research on the fundamental process theory and the process control method should be carried out by taking full advantage of the existing techniques. Also, some new technologies, new processes and new materials should be investigated and applied. By considering the structural features and the actual operational condition for wind turbine gearbox and combining production practices, the requirements and characteristics of the process techniques are summarized. The research state, existing problems, applications and development tendency of high-performance wind turbine gear manufacturing, housing manufacturing and planet carrier manufacturing are analyzed. Then some methods are proposed to improve the manufacturing efficiency and control the heat treatment deformation. Finally, the test techniques for wind turbine are introduced. It has project practical significance for the manufacturing of wind turbine gearboxes.

Key words: wind turbine gearbox; processing engineering; heat treatment distortion; manufacturing; testing

收稿日期:2014-11-20

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2012BAA01B05)。

Supported by National Key Technology Support Program (2012BAA01B05).

作者简介:宣安光(1944-),男,教授级高级工程师,主要研究方向为风力发电机组齿轮传动装置设计与制造,
(E-mail)xuananguang@163.com。

近年来,随着风力发电设备的单机容量的快速增长,与之配套的增速齿轮箱也在向大型化、高功率密度、高性能、高可靠性的方向发展^[1-4]。风力发电机组主传动齿轮箱位于风轮和发电机之间,是一种在无规律变向载荷和瞬间强冲击载荷作用下工作的重载齿轮增速传动装置。很显然,在狭小的机舱空间内减小部件的外形尺寸和减轻重量十分重要,在满足可靠性和预期寿命的前提下,使齿轮箱结构尽量简化并且重量最轻,以追求所谓的“高功率密度”指标。因此,根据机组提供的参数,按照最佳传动方案优化设计,选择稳定可靠的结构和具有良好力学特性以及在环境极端温差下仍然保持稳定的材料,配备完善的润滑、冷却和监控系统,是齿轮箱设计制造的必要前提条件。

齿轮箱上的动负荷取决于输入端(风轮)、输出端(发电机)的特性和主、从动部件(轴和联轴器)的质量、刚度和阻尼值、机舱的布置形式、控制和制动方式以及特殊的外部工作环境等因素。风电机组不可能像在地面那样具有牢固的机座基础,整个传动系的动力匹配和扭转振动的因素总是集中反映在某个薄弱环节上,这个环节常常是机组中的齿轮箱^[5]。风机机组实际运行过程中,风况复杂多变,由突变载荷引起的机组变形也异常复杂,这给风电齿轮箱的正常运行增添了不确定因素^[6-8]。

与普通应用的工业传动装置不同,风电机组齿轮箱一旦产生内部主要承载件的故障,就得从机舱中拆卸到地面解体修复,会花费巨大的人力物力。因而对风电齿轮箱的制造质量提出了异乎寻常的要求,这些要求为一般工业传动设备所不能相比。制造厂除了严把设计关以外,对完善工艺设施和深入工艺基础和关键零件工艺技术的研究做了大量的工作,促进了该产业的进展。

1 风电齿轮增速箱工艺特点

1.1 特定产品要求具有完备的工艺条件

风力发电机组常用的齿轮增速箱传动形式有平行轴圆柱齿轮多级传动、行星和平行轴齿轮传动、行星差动齿轮和平行轴齿轮传动,以及功率分流混合传动等。主要的动力传递构件有轴、盘形齿轮、内齿圈、齿轮轴、花键轴、行星架、箱体等。这些零件应具有足够的强度,能承受风力发电机组各种工况下,特别是在恶劣环境中的动、静载荷以及冲击载荷的作用,满足机组长寿命运转的需要。

风电机组齿轮增速箱工艺基础涉及材料和热处理、机械设计与制造、可靠性与动态仿真、数字分析、噪声与振动等学科,涉足风电机组增速箱制造的企业应具备齿轮工业生产实践和技术应用的功底,特别是要具有足够的工艺装备和丰厚的制造经验。

在制造工艺方面应加强材料、热处理及加工工艺的研究。齿轮的承载能力是由外部载荷条件和内部制造条件如材料质量和工艺过程决定的,因此,必须对齿轮的设计计算和制造工艺提出严格的要求,并采取切实有效的质量控制措施来达到预订目标,从原材料、毛坯、检验、加工、装配、试验等一系列程序入手,环环相扣,不放过任何细节。为此,只有建立在坚实的大工业生产的基础和完备的技术平台之上,才能实现风电齿轮箱质量稳定并符合主机配套要求。

1.2 加工全过程控制

对整个制造过程进行极其严格的控制,这包括原材料控制、热处理和机加工的工艺衔接、提高精度、清洁度的控制等。在齿轮箱装配完成后,出厂前的负荷试验是必不可少的环节。在工厂的试验台架上,通过施加额定负荷和一定比例的超载负荷,对齿轮箱的运转、噪声、温度、速度、振动、润滑、齿轮和轴承的工作状态等完成一系列的测试。在重要的部位安装相应的传感器和测试仪器检测,获取参数值。在试验中根据检测信号的异常程度即可判断运转是否正常;产品各项技术指标是否满足设计要求;并依据正确判断及时排除故障。

齿轮箱失效的主要形式是轮齿折断和齿面点蚀、剥落等^[9-10]。除了自身的结构和设计制造因素外,机组的动力学结构和特殊的使用条件也会加速齿轮的失效进程。由于运转中齿轮箱是变工况的,在齿轮受风载频繁变化冲击时,齿轮的微动磨损超过了一般设计的预期,往往使用2~3年就出现齿轮点蚀,这种失效与接触精度和硬化表层物理冶金因素有关。对付点蚀,要保证齿轮的疲劳强度和加工精度,所有能用的上的措施都采用也不为过,这包括原材料控制、热处理和机加工的控制与协调、适当提高齿面精度和粗糙度、严格控制齿面烧伤等。

另外,应充分注意增速传动与减速传动的区别,变位系数的选择应有利于降低滑差率,应根据载荷情况

作必要的齿形和齿向修形,齿轮采用优质 CrNi 合金钢材料锻件、热后磨齿,按 ISO 6336—5(GB/T3480—5)《齿轮强度和材料质量》最高级别 ME 的要求来控制热处理质量。箱体类零件则采用综合性能较好的球墨铸铁材料,用高性能高精度的数控设备加工,并在加工工序中对其采取必要的热处理、去应力处理、探伤和防止变形等措施。

1.3 工艺相对集中,采用多功能高精设备加工

在工艺实践中,根据增速箱不同结构和精度要求采用不同的工艺,选择相应的设备。针对风电机组结构型式多样化、中小批量的特点,编制工艺时较多采用工艺相对集中的方式,相应的高端设备亦以多刀、多工位和多功能的型式出现。例如,在大型镗铣加工中心上对箱体进行加工,通过一次安装,即可完成主要的平面和孔加工。对于直径超过 2 m 的轴承孔,应用数控插补以铣削代替普通的镗孔工艺,效果较好;也可以采用高强度的铝合金与钢制接口组成的板式镗头,兼顾减轻刀排重量、刚性和灵活性的需求,加工孔可达直径 3 500 mm,精度 IT5、粗糙度 Ra 0.6 的要求,同时还能实现大直径套车和背镗等加工工序。

在加工行星架、大齿圈等大型圆柱形工件并且具有高精度分度要求孔系时常使用车铣镗复合机床,一次安装将主要平面和圆柱面车出后即利用工作台分度,镗削行星轴孔和连接用的销孔。

磨齿加工多采用高端的成形磨齿机,用大气孔砂轮双面磨削,在加工区配以大流量的冷却液,机床利用数字电子模拟和自适应控制技术,配备高精度的随机测量机构,测量结果随时反馈至主机进行参数调整,大大提高加工精度和生产效率。

对大型齿轮零件热处理,采用先进的计算机精确控制气氛和浓度的高性能的井式炉,应用缓冲渗碳和循环加热渗碳工艺,充分保证齿轮表面和心部温度分布均匀,减小变形的产生。

测量技术与制造水平的提高同步发展。生产中应用的齿轮测量中心和三坐标测量中心多要求为实验室型,测量分辨率在 0.1 μm 以上,具有很高的测量精度,使计算、加工、调整、测量、数据反馈等在数控系统中实现一体化运作。

2 齿轮制造技术研究

增速箱中齿轮是设备投资最多且加工难度最大的重要零件。齿轮超高的强度和精度要求,除了应用高端齿轮加工机床外,还要求在传统的制造工艺基础上增加许多关键的保证措施。为了满足行星齿轮均载要求,同组齿轮的加工精度尽可能一致。对齿轮加工过程的稳定性及微小变形的控制非常复杂,稍有不慎就会留下质量隐患,业界不乏有许多因齿轮过早出现失效、因材料缺陷出现裂纹等不得不召回返修的例子,足以留下深刻教训。

齿轮精度标准规定了 13 个精度等级,其中 0 级最高,12 级最低。根据资料介绍^[11],制造精度相差一级,齿轮承载能力相差 20%~30%,噪声相差 2.5~3 dB,制造成本相差 60%~80%。所以根据不同的要求选取合适的精度很重要。在风电设备中,通常采用优质低碳合金钢制造的渗碳淬火并磨齿的外齿轮精度不低于 5 级 GB/T10095;内齿轮采用相同的工艺或氮化工艺,精度也不应低于 6 级 GB/T10095。齿轮的工作齿面和基准面亦应具有相应的表面粗糙度要求。

对齿轮毛坯的控制,主要在于原材料纯净度和淬透性带宽的控制。齿轮用钢要求用真空脱气精炼工艺,严格控制氧含量和氢含量(分别为十几个 PPM 和几个 PPM),淬透带宽控制在 10 HRC 以下。毛坯锻造必须严加控制偏析和带状组织,并尽可能提高其锻造比至 2~2.5。在锻造后进行预热处理获得均匀细小的组织,消除锻造残余应力,减小后续热处理变形,改善机加工性能。为此,宜采用等温退火,将齿坯加热奥氏体化后,迅速冷却到珠光体相变区域内等温处理,直至相变结束后再风冷,能防止带状组织增生,使齿坯组织和硬度均匀。

齿轮切齿加工除了传统的滚、插工艺外,铣齿工艺应用也相当普遍。采用定制的机夹式齿轮铣刀,经粗精铣完成齿形的切削加工,这对于直径较大的内、外齿圈来说,功效比插齿提高数倍。

齿轮渗碳钢随机试样用于测定齿面和心部的性能,渗碳淬火后的性能除与心部性能有关外,还受渗碳层深度梯度、碳含量与金相组织、内应力的分布等因素的影响。

齿轮的心部硬度、钢材的化学成分和面层碳含量都影响弯曲强度。在渗碳层深度一定的情况下,适当提高心部硬度,会增加齿轮的抗弯强度。

要采取一切措施减小热处理变形,防止磨削烧伤、裂纹等缺陷。对于齿轮热处理变形控制常采用以下一些措施:

- 1) 采用保证淬透性钢,根据齿轮类别采用不同的淬透性带宽;
- 2) 齿轮毛坯的预备热处理应尽量保证达到组织和硬度均匀性;

3) 改善齿轮渗碳加热条件,加热时采用预热、阶梯升温方式,或采用去应力退火后带温入渗碳炉升温,并合理装夹工件以尽量减小齿轮各部位在加热时的温差。

齿圈类零件直径大、壁薄,热处理变形更难控制,除了以上措施外,利用模具加压淬火也能部分控制变形,但必须具备大型模具制造和相应的淬火压床等条件。另外也可采用其他热处理方法,如感应加热淬火、激光淬火等工艺,但这些工艺没有常规工艺成熟,尚需经历大量的试验,获取必要的经验数据。采用渗氮工艺可减小齿圈的变形,对于采用渗氮钢制造的齿圈是推荐选择的工艺,但处理后齿面硬化层深度和心部硬度比不上渗碳淬火工艺。

在真空条件下的低压渗碳工艺具有时间短、无污染和无热辐射等特点,通过实时调节真空度大小来控制碳势,确保齿轮各个部分充分均匀渗碳,也能有效控制零件变形。

齿轮热后工艺采用磨齿,可达到精度3级和粗糙度Ra 0.4以上的要求,同时可以进行齿形修缘和齿向修鼓形度和螺旋线修正等工序,满足设计对降低噪声和提高传动性能的要求。磨齿时应避免产生烧伤和裂纹,产生烧伤和裂纹一般与材料、热处理、磨齿工艺有关。磨齿后可采用专门的仪器检测齿面是否存在烧伤的软点,烧伤程度则须通过溶液浸润试验确定。

计算机数字分析技术在现代成形磨齿机上得到极大地体现,在机床上可通过电子探头迅速确定零件所处位置,自动转换加工坐标,自动找正对齿,并且通过探头获知热处理变形程度,认定最大变形位置作为始磨点,自动分配加工循环。所配备的自动测量装置能将结果反馈到控制系统用以调整加工用量。在磨头上可以装两个成形砂轮,其中一个用于粗磨,切除大部分余量,另一个则用作精磨,用于保证成件的精度。设备的高端性能为结合精益生产管理,为实现数字化、信息化加工创造了条件。

对齿面进行喷丸处理,可以使齿根处产生较大的残余压应力,同时又能使加工刀痕或热处理表面缺陷压平,从而提高齿轮的弯曲疲劳强度.特别对于渗碳淬火齿轮,效果尤为显著,据有关资料介绍可提高强度1~2倍。

对于齿面喷丸工序是在热处理和磨齿之后或是在磨齿之前,有两种意见^[12-16]:一种认为应在磨齿前,此时喷丸的既清除热处理后齿表面残留的氧化皮又强化了齿根;另一种意见认为热后喷丸经磨齿将齿表面的强化层去掉了,齿面得不到强化,因此应在磨后处理,并且还能在齿面产生一些微小的鱼鳞状圆坑,有利于啮合面间储油润滑。实践中体会到,对于前者,如能有效控制热处理变形,减小磨削余量,也会留下一些强化效果;对于后者,倘若采用相对软一些的丸粒,例如塑料丸,效果也不错,只是稍许降低齿面粗糙度。目前这两种喷丸工艺都有应用,只是限于条件,较少进行量化的试验论证。

3 箱体和行星架加工

箱体是齿轮箱的重要部件,它承受来自风轮的作用力和齿轮传动时产生的反力,必须具有足够的刚性去承受力和力矩的作用,防止变形,保证传动质量。箱体的设计应按照风电机组动力传动的布局安排、加工和装配条件、便于检查和维护等要求来进行。应注意轴承支承和机座支承的不同方向的反力及其相对值,选取合适的支承结构和壁厚,增设必要的加强筋。筋的位置须与引起箱体变形的作用力的方向相一致。设计工装时也要注意采取防止箱体夹压变形的措施。

箱体的应力情况十分复杂且分布不均,只有采用现代计算方法,如有限元、断裂力学等方法辅以模拟实际工况的光弹实验,才能较为准确地计算出应力分布的状况。利用计算机辅助设计,可以获得与实际应力十分接近的结果。

采用铸铁箱体可发挥其减振性,易于切削加工等特点,适于批量生产。风力发电齿轮箱箱体类零件的材料球墨铸铁,常用的牌号如QT400-18。

单件、小批生产时,为了节省模具费用,也可采用焊接或焊接与铸造相结合的箱体。为减小机械加工过程和使用中的变形,防止出现裂纹,无论是铸造或是焊接箱体均应进行退火、时效处理,以消除内应力。

毛坯为铸件,其铸造方法视铸件精度和生产批量而定。单件小批生产多用木模手工造型,毛坯精度低,加工余量大。大批生产常用金属模机器造型,毛坯精度较高,加工余量可适当减小。

为了消除铸造时形成的内应力,减少变形,保证其加工精度的稳定性,毛坯铸造后要安排人工时效处理。精度要求高或形状复杂的箱体还应在粗加工后进行人工时效处理,以消除粗加工造成的内应力,进一步提高加工精度的稳定性。

行星架是行星机构中结构较为复杂的零件,承受力矩最大,要求足够的强度与刚度,受载变形要小。通常采用整体双壁式结构,常用铸造材料有 QT700-2、ZG310-570、ZG340-640、ZG40Cr 等。如行星架与输入轴合为一体,且与风轮主轴间用收缩套联接,则材料取合金铸钢为宜,如 ZG34CrNiMO 等,既有较高的强度、冲击韧性及弹性,又有较好的铸造性能。行星架一般需做动、静平衡试验,表面进行喷砂处理。

行星孔加工时,为了保证齿侧间隙,接触精度和行星轮的均载,必须严格控制行星孔的尺寸公差与形位公差。

风力发电齿轮箱的行星架要承受来自叶片和主轴的冲击载荷,为了保证其有足够的强度,铸件必须经超声波探伤,内部不得有气孔、夹渣等缺陷。行星架的主要检验项目有:材料化学成份、机械性能、超声波探伤、锻件质量、金相组织、磁粉探伤、气孔及表面缺陷检验、动平衡试验、静平衡试验等。

4 齿轮箱测试

样机试验可以在齿轮箱试验台上进行(电气或机械背对背封闭试验台),目的是验证设计阶段应用的假设与边界条件以及检验制造质量。在样机试验中,至少分 4 步将力矩增加到额定值,然后齿轮箱以额定力矩运转,直至油池和轴承部位达到稳定温度。测定的参数包括:用应变仪测量载荷分布、用应变仪测量每个载荷等级下行星级的载荷分布、每个载荷等级的温度、振动与噪音。在样机试验之后,须拆开齿轮箱对各种零部件的状况进行评估。

样机阶段要安排型式试验和强化试验,必要时还要进行破坏性试验和极端工况下的载荷试验。试验目的都是为了认证产品的设计和制造是否合乎实际要求,相关技术参数是否到达指标规定。

受条件限制,试验台上不可能任意加大试验负荷,通常在满载试验后进行的超载负荷在一倍额定负荷之内。为了考验齿轮箱各个部分的强度和稳定性,常常采用变速变负荷的试验替代强化试验。

由于风力发电的特殊性,试验台模拟风电机组的实际运行工况尚有难度。因此风电机组的运行可靠性不再仅仅根据单个零件的强度进行评估,而需要通过对整个传动系统的动态特性进行模拟以评估和提高整机的可靠性。在这些模拟中,通常复杂的传动系统被简化成“弹性体-质量”系统。为了进行整体动态特性的模拟,有必要建立详细的传动链模型,例如利用多体系统或者混合系统^[17-18]。

5 结 论

1) 增速齿轮箱作为传统风力发电设备的核心部件,其制造质量是保证机组性能的关键。随着精益化制造技术的发展,对风电齿轮箱制造中的新技术、新工艺和新材料应用提出了越来越高的要求。经过近年来的高速发展,企业引进了大量高端设备,为进一步提高工艺水平打下基础,应充分利用现有有利条件,增加制造技术研发投入,深入开展关键课题研究,切实取得成效。

2) 风电增速箱制造技术是一个涉及多学科的综合技术,并且只有在机组中使用才能显示出其优良性能和生命周期。产品高性价比是制造者追求的最终目标,开展工艺研究、完善制造工艺系统控制理论和方法、及时总结和积累制造经验,充实信息数据库用以指导生产实践才最具意义。

参考文献:

- [1] 王辉,李晓龙,王罡.大型风电齿轮箱的失效问题及其设计制造技术的国内外现状分析[J].中国机械工程,2013(11):1542-1549.
- WANG Hui,LI Xiaolong,WANG Gang,et al.Research on failure of wind turbine gearbox and recent development of its design and manufacturing technologies[J].China Mechanical Engineering,2013(11):1542-1549.

- [2] 刘忠明,段守敏,王长路.风力发电齿轮箱设计制造技术的发展与展望[J].机械传动,2006,30(6):1-6.
LIU Zhongming, DUAN Shoumin, WANG Changlu. Development and prospect of the wind turbine gearbox design and manufacturing technology[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2006, 30(6): 1-6.
- [3] 徐进.我国风力发电设备制造业发展战略[J].可再生能源,2009,27(4):93-96.
XU Jin. Development strategy for wind power equipment manufacturing industry in China [J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(4): 93-96.
- [4] 张立勇,王长路,刘法根.风力发电及风电齿轮箱概述[J].机械传动,2008,32(6):1-4.
ZHANG Liyong, WANG Changlu, LIU Fagen. Summary on development status of wind power and gearbox for wind turbine[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2008, 32(6): 1-4.
- [5] 宣安光.对风力发电机组机械传动技术的探讨[J].电气制造,2010(3):29-35.
XUAN Anguang. Study on the mechanical transmission technique of the wind turbine[J]. Electric Manufacture, 2010(3): 29-35.
- [6] 朱才朝,陈爽,马飞,等.轮齿修形对兆瓦级风电齿轮箱动态特性影响[J].振动与冲击,2013(7):123-128.
ZHU Caichao, CHEN Shuang, MA Fei, et al. Effect of gear teeth modification on dynamic characteristics of a megawatt level wind turbine gearbox[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013(7): 123-128.
- [7] 徐向阳.柔性销轴式风电齿轮箱动力学研究[D].重庆大学,2012.
- [8] 秦大同,邢子坤,王建宏.基于动力学和可靠性的风力发电齿轮传动系统参数优化设计[J].机械工程学报,2008(7):24-31.
QIN Datong, XING Zikun, WANG Jianhong. Optimization design of system parameters of the gear transmission of wind turbine based on dynamics and reliability[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008(7): 24-31.
- [9] Laplante M. Carburizing wind-turbine gears[J]. Gear Solutions, 2009(5): 32-37.
- [10] Crabtree C J, Feng Y, Tavner P J. Detecting incipient wind turbine gearbox failure: a signal analysis method for on-line condition monitoring[C]//Proceedings of the Scientific Track of the European Wind Energy Conference, 2010: 154-156.
- [11] Niemann G, Winter H. Maschinenelemente II[M]. 2nd. Springer, 1989.
- [12] Van Ingelgem Y, Vandendael I, Van den Broek D, et al. Influence of laser surface hardening on the corrosion resistance of martensitic stainless steel[J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(27): 7796-7801.
- [13] Eleiche A M, Megahed M M, Abd-Allah N M. The shot-peening effect on the HCF behavior of high-strength martensitic steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1): 502-508.
- [14] 陈毅. 20CrMnMo 齿轮齿根残余应力理论及试验研究[D].重庆大学,2013.
- [15] 杨庆祥,赵言辉,许志强,等.渗碳及渗碳喷丸齿轮轮齿弯曲疲劳极限的定量分析[J].机械工程学报,2004(7):34-40.
YANG Qingxiang, ZHAO Yanhui, XU Zhiqiang, et al. Quantitative analyses on bending fatigue limits of teeth of carburized and shot-peened gear specimens[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004(7): 34-40.
- [16] 隋福楼,鞠育平,于淑敏,等.渗碳齿轮的喷丸强化机理[J].汽车工程,2001(3):214-216, 213.
CHEN Fulou, JU Yuping, YU Shumin, et al. Mechanism of slot peening for cemented[J]. Automotive Engineering, 2001(3): 214-216, 213.
- [17] 徐向阳,朱才朝,刘怀举,等.柔性销轴式风电齿轮箱行星传动均载研究[J].机械工程学报,2014,50(11):43-49.
XU Xiangyang, ZHU Caichao, LIU Huaiju, et al. Load sharing research of planetary gear transmission system of wind turbine gearbox with flexible pins[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11): 43-49.
- [18] Zhu C, Chen S, Liu H, et al. Dynamic analysis of the drive train of a wind turbine based upon the measured load spectrum[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(6): 2033-2040.