

驱动桥减速机构制造中的注意事项

□ 河北汇工机械设备有限公司/杨钟胜 马立晓



美国TEREX TR100矿用重型自卸车是国际上大型机械传动矿用汽车中的主导车型，同时也是大型机械传动矿用汽车典型的和最具有代表性的车型。该车经过40多年运行的实践由TEREX3311E转型升级而来。随后经过不断的改进，现已定型为TR100并正式生产和投放市场，已在全球很多国家的露天矿中以及大型水电工程得到广泛的应用，在国际上享有很高的知名度。

我公司对美国TEREX TR100矿用自卸车驱动桥进行了全面深入的研究，为我公司生产TR100驱动桥奠定了坚实的基础。

TR100驱动桥NGW行星轮系机构的组成

TR100矿用自卸车是典型的前桥转向、后桥驱动的结构。TR100驱动桥位于传动系的末端，主要由主减速器、差速器、半轴、轮边减速器和桥壳等组成。

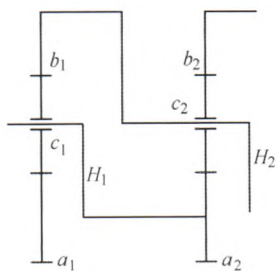
由于NGW行星齿轮传动具有体积小、质量轻、结构紧凑、传递功率及承载能力大的优点，因而在国内外大型重载矿用汽车轮边减速器中得到了广泛的应用。

单级NGW行星轮系减速机构主要由1个太阳轮、3个行星轮、1

个齿圈、1个行星架、3个行星轮轴、6个轴承等零件组成，是典型的具有1个内啮合（齿圈和行星轮的啮合）、1个外啮合（太阳轮和行星轮的啮合）和公用行星轮组成的NGW行星轮系。

双级NGW行星齿轮减速机构串联传动示意图如附图所示，传动齿轮的齿数见表1。

TR100驱动桥减速机构是由两个单级的NGW行星齿轮减速机构串联而成的典型结构。主减速器传动比为：2.16：1经串联后的轮边减速器传动比为13.75：1，总传动比高达29.7：1，串联的两个单级



双级NGW行星齿轮减速机构传动示意图

表 1

级别	一级			二级		
序号	代码	名称	齿数	代码	名称	齿数
1	Za1	太阳轮	24	Za2	太阳轮	23
2	Zb1	内齿圈	78	Zb2	内齿圈	69
3	Zc1	行星轮	27	Zc2	行星轮	23

NGW行星齿轮减速机构是大型矿用汽车在“减速机构”的设计中的必然发展趋势。

NGW行星轮系减速机构的特点

(1) 太阳轮和齿圈同时浮动。齿圈通过内花键和半轴套管的外花键连接并定位；太阳轮通过内花键和半轴轴端的外花键连接并通过轴端卡簧定位，齿圈和太阳轮均没有固定的径向支承而同时浮动，浮动效果好，噪声小，运转平稳、

均载效果好。为了增加浮动效果，齿圈的径向厚度尽量减薄，以增加柔性，这是现代矿用自卸车轮边减速器的发展趋势。太阳轮和齿圈同时浮动，主要用于高速重载传动。

(2) 结构紧凑，承载能力高。合理应用内啮合，充分利用内啮合承载能力高和内齿圈的空间容积，内啮合与外啮合相比中心距小，从而缩小了径向、轴向尺寸，使结构紧凑。凹齿面和凸齿面接触，齿面承载能力高、重合度大、滑动率小。

(3) 传动平稳，抗冲击和抗振动力强。采用的3个相同的行星轮均匀分布在太阳轮周围，从而使行星轮与行星架的惯性力相互平衡，同时也使参与啮合的齿数增多，所以NGW轮系传动平稳，抗冲击和抗振动力强，工作可靠。

(4) 在传递动力时可以进行功率分流。用3个完全相同的行星轮均匀分布在太阳轮周围来共同分担载荷，因而每个齿轮所受的载荷较小，相应齿轮的模数就可减小。

(5) 体积小，质量轻，结构简单。

(6) 单级NGW行星轮系可多级串联成传动比大的轮系。单级NGW行星轮系减速机构的传动比较小，但NGW型能多级串联成传动比大的轮系，这样便克服了单级传动比较小的缺点。如：TEREX3311E、TR100、SRT95车型驱动桥轮边减速器就是用了两个单级NGW串联而成传动比大的轮系。

减速机构主要零件的材料及热处理

TR100驱动桥主减速器、轮边减速器主要零件的材料及热处理见表2。

TR100驱动桥壳技术要求：有足够的强度和刚度，质量力求减轻，便于安装、拆卸和调整。其材料及热处理如下：驱动桥由后桥壳和两个半轴套管组成，共三个铸件，全部采用高强度优质合金铸钢ZG29MnMoNi浇铸而成。TR100驱动桥壳采用铸焊结合，后桥壳与半轴套管采用过盈配合与电焊焊接组合的方式连接。粗加工后的桥壳要进行人工时效或整体回火处理，待消除内应力后再进行精加工。

表 2

序号	零件名称	材料	毛坯种类	表面硬度	心部硬度	热处理状态
1	主动螺旋伞齿轮	20Cr2Ni4	锻件	58~62HRC	35~43HRC	渗碳淬火
2	从动螺旋伞齿轮	20Cr2Ni4	锻件	58~62HRC	35~43HRC	渗碳淬火+回火
3	半轴直齿伞齿轮	20CrNiMo	锻件	58~62HRC	35~40HRC	渗碳淬火+回火
4	直齿伞齿行星轴	20CrNiMo	锻件	58~62HRC	35~40HRC	渗碳淬火+回火
5	太阳轮	20Cr2Ni4A	锻件	58~62HRC	40~45HRC	毛坯去H退货+重结晶。调质+渗碳淬火+回火
6	行星轮	20Cr2Ni4A	锻件	58~62HRC	40~45HRC	
7	行星轮轴	GCr15SiMn	锻件	58~63HRC	38~45HRC	球化退火+淬火+冷处理+回火+稳定化
8	一级内齿圈	42CrMoA	锻件	620~680HV	300~340HB	调质+辉光离子氮化
9	二级内齿圈	40CrNiMo	锻件	54~59HRC	300~340HB	调质中频淬火
10	一级行星架	ZG35CrMo	铸件	240~280HB	240~280HB	退火+调质
11	二级行星架	QT600-3	铸件	240~280HB	240~280HB	人工时效调质
12	齿盘	ZG40Cr、ZG45	铸件	280~320HB	280~340HB	调质
13	(全浮式)半轴	40CrNiMo	锻件	54~58HRC	280~320HB	调质+中频淬火

驱动桥关键件加工中的注意事项

1. NGW型重载传动中对行星轮在设计和加工时的注意事项

行星轮的偏心对传动的质量影响最大,所以对齿轮径向圆跳动公差应严格要求。从有利于行星轮间载荷均匀分配出发,同一传动中各行星轮公法线实际尺寸应尽量相等。在实际生产中亦可按公法线实际尺寸进行选配分组,将公法线接近或相等的行星轮装配在一起,以提高齿轮的传动质量。

2. 关于NGW型重载传动中的齿轮精度等级

国内外同行公认,在NGW型重载传动中,齿轮精度在4~8级范围内,精度每提高一级,可使承载能力提高10%,噪声降低3dB(A),因此一般情况下,推荐低速重载行星齿轮传动的外齿轮精度不低于6级,内齿圈精度不低于7级,外齿及内齿全部由磨齿来保证精度。

3. 机加工中的注意事项

(1) 适当提高热处理前预切齿的精度是实现减少磨齿余量的一个重要途径。为了减小磨齿余量,预切齿轮的运动精度(周节累积误差)可比磨齿精度低1~2级,运动平稳性(齿形、基节)和接触精度(齿向)允许降低1级。

(2) 齿根表面机加工刀痕的危害和要求。齿根部位的机加工刀痕,对于渗碳淬火高硬度的表面即是危险的缺口,非常容易成为原始裂纹,而降低弯曲疲劳强度。齿根表面经机加工后,其表面粗糙度值 $R_a \leq 3.2 \mu\text{m}$ 。提高齿根圆齿槽部位

的表面粗糙度,可有效改善齿根的应力集中。

(3) 预切齿后齿面表面粗糙度的要求。齿面经预加工成形后,齿面的表面粗糙度值 $R_a=1.6 \sim 3.2 \mu\text{m}$,齿面上不允许有撕裂、啃齿和振纹等缺陷。尤其不允许有严重的撕裂,对于严重的撕裂就是通过磨齿也无法消除。某厂加工的齿轮因齿面有严重的撕裂、齿根有严重的加工刀痕,最终导致断齿而报废。

(4) 防止齿面严重撕裂。齿面严重撕裂的危害对渗碳淬火高硬度的表面严重撕裂部位易产生应力集中,诱发产生微细裂纹、降低疲劳强度。

4. 齿轮齿部的倒棱技术

倒棱的作用及必要性有以下几点:

(1) 降低齿轮啮合时的噪声。倒棱是沿轮齿端面的倒角,防止由于小的磕碰造成齿面凸起而产生噪声和损伤啮合齿面的一项重要措施。

(2) 提高啮合精度,减少啮合冲击。一对齿轮在啮合的过程中,一开始进入啮合时,由于加工和轮齿的变形,极易引起啮合冲击,所以使振动增大。

(3) 减小扒齿,延长齿轮使用寿命。大、小齿轮在运转时,如果不采用齿顶倒棱,则往往会出现小齿轮的齿顶扒大齿轮的齿根。这是因为大小齿轮齿顶的外圆一般比齿根要硬,而且此处的滑动速度较大,再加上安装时调整不当,所以在运转后往往出现大小齿轮的齿顶互相扒对方轮齿的齿根,极易划出沟痕类似于胶合,有时将小齿轮的

齿顶齿面也划出同样的沟痕,对齿轮的寿命产生严重的影响。

(4) 减少热处理时的应力集中。倒棱后消除齿顶及齿廓的尖角有以下好处:一是在齿轮的感应淬火中,中频尤其是高频加热在尖角处有产生过热的倾向。因此,齿轮轮齿必须在淬火前进行倒棱,以便在热处理过程中得到最佳的淬火效果;二是对硬齿面齿轮,渗碳前做适度的热前倒角(最好是圆角),在热处理渗碳过程中可避免防止轮齿尖角处氧化脱碳;三是减少淬火时的应力集中,以减少和消除热处理过程引起的淬火裂纹或开裂,这对于预防淬火开裂具有重要作用。

(5) 减小打齿的危险性。因为倒棱是沿整个齿形裸露部分的尖角进行,所以可避免疲劳的微裂纹源并减小应力集中,从而减小打齿的危险性。

(6) 在对硬齿面滚、刮、磨以及滚、刮工艺中,有利于刮刀切入,有效地避免打刀和刀刃崩缺。现代对重载硬齿面齿轮的加工不单纯依靠磨齿机磨齿来保证精度,国内、外不少企业已成功开展以刮代磨的工艺,不论外齿还是内齿均以硬质合金刀具对硬齿面进行刮削,由于硬齿面倒棱之后,有利于刀具的切入,可有效避免刀具打刀和崩刃。对于硬齿面开展以刮代磨的工艺,刮前对硬齿面进行倒棱,是十分重要和必须进行的一项工作。

(7) 轮齿倒棱后不仅外形美观,而且比较安全在齿轮的装配与调试中,手不易划伤。

5. 齿轮的喷丸强化技术

为了改善齿根表面的应力状态,同时把齿根表面在热处理过程

中形成的不良组织对性能的影响降低到最小程度，需对齿轮进行喷丸强化。因传动扭矩而使齿轮部位受到很大的交变弯曲应力，特别是齿根处要求有足够的强度。因此NGW型重载齿轮喷丸强化的重点是对齿根表面的强化。

齿轮喷丸强化的注意事项有以下7点：

(1) 对齿轮的无损检测（磁粉探伤和着色探伤）应在齿轮喷丸强化前进行，因为喷丸强化时表面的塑性流变会将细微裂纹掩盖起来。

(2) 较高的温度（232℃以上）会使残余压应力释放，削弱喷丸效果。据有关资料表明：西安交大何家文教授对这种压应力进行了专门研究，该压力随温度的上升而逐渐衰减，一般在400℃左右就衰减完毕。因此，所有的热处理工艺必须在喷丸之前完成。

(3) 一般来说，所有的机械加工也应在喷丸强化前完成。齿轮喷丸强化前应检查所有的加工项目，是否符合图样的要求，包括尺寸、几何公差、表面粗糙度等要求（含内、外圆角及抛光要求等）。

(4) 齿轮喷丸强化前应清除零件表面的灰尘、油污、腐蚀物等；除另有规定者外，也应去除零件的防护层。

(5) 如果在齿根部位存在明显的加工刀痕，就应施以足够的喷丸强度以产生足够的压应力深度来抵消刀痕的不利作用。喷丸时所用的弹丸粒直径，应小于齿根过渡圆角曲率半径的一半。

(6) 目前国外对齿轮的表面残余压应力要求为800~1200MPa，单纯靠渗碳淬火很难达

到，通过二次喷丸强化（也有称之为复合喷丸）就可以满足这一要求。喷丸强化所形成的残余压应力值，通过X射线衍射仪进行测定。

(7) 在图样中已注明不要求喷丸的部位，应加以保护、采取遮盖措施。

6.NGW型重载齿轮在磨齿中的注意事项

(1) 磨齿中只允许磨削渐开线的齿形部分。重载硬齿面齿轮在磨齿中，只允许磨削渐开线起始圆以上和渐开线终止圆以下的渐开线齿形部分。

(2) 磨齿中不允许磨削齿根圆齿槽部位。对于内齿圈的齿部不论是中频淬火还是渗碳淬火，不论是内齿还是外齿，在磨齿中不允许磨削齿根圆齿槽部位这一显著特点，已成为当代硬齿面重载齿轮在磨齿最为重要的标志和亮点。

(3) 磨齿中不允许磨削齿根圆齿槽部位。原因在于，第一，提高齿轮抗疲劳寿命及使用寿命。根据国内、外权威资料表明：对硬齿面重载齿轮来说，磨齿中不磨齿根圆齿槽部位的使用寿命为磨齿根圆齿槽部位的1.7~170倍，大大提高了齿轮的使用寿命。

第二，在磨齿中对齿根圆齿槽部位进行磨削，会把齿根圆齿槽部位经渗碳淬火后表面的一层淬硬层磨掉，因而降低了齿根圆齿槽部位的表面硬度，这样以来会大大降低齿轮的疲劳强度和弯曲强度。

第三，齿轮经强化喷丸后，最大的残余压应力值是位于齿面下约0.05~0.10mm处，其残余压应力可高达800~1200MPa。齿根圆齿槽部位一旦经过磨削，在齿根处形成

的残余压应力则荡然无存，将导致残余压应力变成拉应力，对齿轮抗疲劳长寿命方面带来严重的影响。

第四，从抗断齿能力来看，齿根处要有一定量的根切，齿根没有一定的根切量，磨齿时不可避免的在齿根产生凸台，这将造成严重的应力集中，对抗断齿能力影响很大，发生凸台是绝对不允许的。

第五，齿根圆齿槽部位狭小，散热能力差，以及过度曲线处余量大小变化大，砂轮工作条件差，在磨齿中容易产生磨削烧伤和磨削裂纹。

第六，齿根圆齿槽部位磨削条件差，砂轮外圆磨粒容易脱落和磨损，从而影响磨齿质量。

总之，不磨齿根圆齿槽部位可以显著的提高齿轮的疲劳强度和承载能力及使用寿命，避免磨齿损伤，提高磨齿质量，降低磨齿负荷，提高生产率。

7.齿轮的修形技术

重载齿轮特别是渗碳淬火后的齿轮，为了减少由于齿高方向受载变形所引起的啮合冲击，改善啮合过程中齿面载荷分配状况，必须进行齿廓修形，采用齿廓修形以减轻动载，同时为了达到沿齿宽载荷均匀分布，应进行齿向修形。

8.热处理中的注意事项

(1) 内氧化。内氧化是气体渗碳炉所固有的现象。内氧化使渗层表面硬度下降，出现残余拉应力，从而降低了齿轮的弯曲疲劳强度。内氧化层深小于0.013mm时对疲劳强度影响不大，当层深大于0.016mm时，齿轮的弯曲疲劳强度降低25%。

在加工中齿根表面内氧化直

接带来的影响有：在磨齿加工中，对磨齿部分出现的内氧化，通过磨齿可以去除，但齿根不磨，所以在齿根的内氧化就无法去除而得以保留，因此齿根的内氧化将直接威胁到齿轮弯曲疲劳强度和使用寿命。

内氧化的防治措施一般有：对齿根表面的内氧化可通过真正的强化喷丸，对齿根表面起到碾平压实和加工硬化的效果，减小内氧化层的厚度，减轻其危害性；钢中的硅有大的氧化势系数，是决定钢内氧化深度的重要因素之一，因此为了减小和控制内氧化的深度应采用尽可能低的硅含量，另外，钢中的锰是影响内氧化强度的重要因素，适当控制锰含量也是非常重要的；采用强力淬火（如采用高速淬火油和高速搅拌等）和渗碳后期通入少量氨等，可避免和减轻因内氧化等而导致的非马氏体组织的形成，从而减轻内氧化所引起的危害性；在条件允许的情况下，应优先采用真空渗碳，只有在真空（低压）下或以氮、氨分解气为载气并添加不含氧的乙炔、甲烷等渗碳剂的条件下，才能实现无内氧化的气体渗碳。

(2) 表面脱碳。齿轮齿面的表面脱碳将降低齿轮的弯曲疲劳强度和接触疲劳强度。在磨齿加工中，由于不磨齿根，所以在齿根的表面脱碳层就无法去除而得以保留，因此齿根表面脱碳将直接威胁到弯曲疲劳强度和使用寿命。因此，国外对表面脱碳的要求很严，美国在ANSI/AGMA2001标准规定：2级（相当国内的MQ级）、3级（相当国内的ME级），不允许表面脱碳，即使在500×显微镜下部分表面脱碳也不允许。

表面脱碳的防治措施有：对齿根的表面脱碳可通过真正的强化喷丸，对齿根表面起到碾平压实和加工硬化的效果，减小表面脱碳层的厚度和减轻其危害性；由于渗后出炉温度过高，炉子出现严重漏气，淬火时产生氧化，因此应防止炉子漏气，降低出炉温度，控制淬火时炉内气氛，盐浴炉淬火时应充分脱氧，对表面严重脱碳时可以补渗碳；在条件允许的情况下，应优先采用真空渗碳，只有在真空（低压）下或以氮、氨分解气为载气并添加不含氧的乙炔、甲烷等渗碳剂的条件下，才能实现无表面脱碳的气体渗碳。

(3) 表面非马氏体组织。齿根表面非马氏体组织形成的主要原因是由于在渗碳过程中，由于炉气中存在微量氧，并且氧可以沿奥氏体晶界渗入钢体，对Fe、Cr、Ni、Mo等元素发生氧化反应，而形成非马氏体组织，所以氧是产生非马氏体组织的主要根源。

齿轮表层含有5%的非马氏体（体积分数）组织时，弯曲疲劳极限降低10%，为了提高弯曲疲劳强度，尤其应减少齿根部位的非马氏体组织。

在磨齿加工中，由于不磨齿根，因此齿根表面的非马氏体组织得以保留下来，直接威胁到弯曲疲劳强度和使用寿命。齿根表面非马氏体的防治措施有：对齿根非马氏体组织通过强化喷丸，对齿根表面起到碾平压实和加工硬化的效果，减少表层非马氏体组织的同时，使齿根表面残余压应力增大，提高了齿轮运行中的耐磨性和抗疲劳性；通过稀土渗碳技术可以有效抑制非

马氏体组织的生成；由于升温排气不充分，炉子密封性能差、漏气，使表面合金元素氧化，淬火冷却速度低，因此应从设备和工艺操作上减少空气进入炉内，应适当提高淬火冷却速度；采用强力淬火（如采用高速淬火油和高速搅拌等）和渗碳后期通入少量氨等，可避免和减轻因内氧化等而导致的非马氏体组织的形成。

结语

通过对美国TEREX TR100矿用自卸车驱动桥全面深入的研究，为TR100驱动桥生产国产化奠定了坚实的基础。尤其是对TR100驱动桥关键件加工注意事项的总结，可以对同行起到借鉴作用。AUTO1950



杨钟胜

陕西西安人，1967年涉足重载齿轮的加工技术工作，至今在将近50年的技术生涯中与重载齿轮结下了不解之缘，现在河北汇工机械设备有限公司从事进口重载齿轮的国产化技术工作。先后在国内、外发表技术论文200多篇。

中国齿轮专业协会专家委员会委员、中国汽车工程学会矿用汽车分会专家委员会委员。先后主持起草中华人民共和国行业标准《重载齿轮渗碳热处理技术要求》、《车辆渗碳齿轮钢技术条件》。