

重载低速大型齿轮的破损分析 及提高寿命的途径

洛 阳 矿 山 机 器 厂 编

第 · 机 械 工 业 部 情 报 所

1 9 7 4 年 8 月

前 言

大型减速器是重型、矿山机械中不可缺少的组成部分。近年来，虽然大型减速器的质量有很大提高，但和别的部件比较起来，仍处于寿命低的状态。因而，每年大型减速器的备件需要量很大，不但严重占用大量大型设备生产时间，而且也是极大的浪费。

减速器普遍地达不到设计能力和设计的使用寿命，可能是由于设计计算的错误，也可能是使用中（或制造中）存在问题。

毛主席教导我们：“大家明白，不论做什么事，不懂得那件事的情形，它的性质，它和它以外的事情的关联，就不知道那件事的规律，就不知道如何去做，就不能做好那件事。”以及“你对于那个问题不能解决么？那末，你就去调查那个问题的现状和它的历史吧！你完全全调查明白了，你对那个问题就有解决的办法了。”我们为了寻求大型减速器寿命低的根源，从1963年开始，八年来，先后反复地在22个水泥厂、8个钢铁厂、20个煤矿对球磨机减速器、水泥窑减速器、轧机人字齿轮座、轧机主减速器、矿井卷扬机等，进行了用户访问、实地观察、取样分析，实际测量和破损分析等工作，其中包括有我国生产的，也有苏联、美国、丹麦、战前德国、东德、日本、捷克、波兰、比利时和加拿大等国制造的减速器。

在分析了大量的调查材料之后，又进行了半年多的试验室验证性试验，初步地找到了各种负荷特性的减速器寿命低的主因和次因，以及解决这些矛盾的主要措施。

“认识从实践始，经过实践得到了理论的认识，还须再回到实践去。”进一步的工业试验正在进行中。

本文中有些观点是直接反对当前设计的传统观点和经典计算公式，望能引起重视，共同研究。

在各次调查中，得到了使用单位的领导和工人同志的大力支持和帮助，在此深表感谢。

本文所列的调查材料是历次调查材料的汇总，其中包括：“水泥厂球磨机用大型减速器调查报告”、“ZD-60 减速器用户访问纪要”、“水泥磨减速器提高寿命和承载能力的途径”、

“矿井卷扬机减速器调查报告”、“轧钢机人字齿轮座和主减速器齿轮破损情况分析及其寿命提高的几点看法。”等。

虽然我们十年来对减速器进行了调查分析和试验工作，但对大型减速器只是有了一些肤浅的认识。文中若有错误之处，望批评指正。

目 录

前 言

(一) 减速器的寿命概况.....	(1)
(二) 齿轮破损形式及引起破损的主要原因.....	(2)
(三) 提高齿轮使用寿命的措施.....	(6)
(四) 齿轮设计中的几个问题.....	(8)
(五) 提高大型减速器齿轮承载能力的途径.....	(11)
附表 1 齿轮对试验结果统计表.....	(12)
附表 2 卷扬机减速器齿轮的几何参数、质量和使用状况...	(14)
附表 3 (1) 水泥磨、水泥窑减速器齿轮几何参 数和加工质量.....	(24)
附表 3 (2) 水泥磨、水泥窑减速器齿轮的材料和 热处理.....	(34)
附表 3 (3) 水泥磨、水泥窑减速器齿轮的设计负 荷、使用负荷、寿命和破损状况.....	(44)
附表 4 ZD-60减速器使用和损坏情况汇总.....	(64)
附表 5 (1) 轧钢机人字齿轮座和主减速器齿轮几 何参数及驱动设备数据.....	(66)
附表 5 (2) 轧钢机人字齿轮座和主减速器齿轮承 载负荷及使用情况.....	(76)
附表 5 (3) 轧钢机人字齿轮座和主减速器齿轮材 料及热处理.....	(90)
附表 5 (4) 同类型轧机比较.....	(102)

(一) 减速器的寿命概况

减速器的使用寿命应和使用条件结合起来考察,才能正确地反映出减速器的质量水平,单纯以使用年限来表达是不完整的,不真实的。

解放前我国使用的大型减速器全都是国外制造的,由于解放前生产力低,减速器的使用负荷和开动率很低,所以在衡量这些老减速器寿命和质量水平时,应该注意到这些情况。

所调查的各国制造的减速器使用寿命概况列于表1。

表1 各国减速器寿命比较

产地	轧钢机主减速器			轧钢机人字齿轮座			水泥磨减速器			卷扬机减速器		
	超负荷 20%左右	接近设计 负荷	低于设计 负荷20% 左右	超负荷 20%左右	接近设计 负荷	低于设计 负荷20% 左右	超负荷 20%左右	接近设计 负荷	低于设计 负荷20% 左右	超负荷 20%左右	接近设计 负荷	低于设计 负荷20% 左右
丹 麦								>25年	>30年			
战前德国						>23年		>20年	>20年		30年	
东 德				~9年	>4年	~9年		~6年				
日 本		≥4年(硬) >12年	4~12年					>15年				
苏 联	≥6年	9~13年	≥9年		>6年	5年(硬) ~9年					>10年在用 (有缺陷)	
捷 克								~6年				
美 国									~15年			
比利时										~20年	>20年	
加拿大											>9年在用 (有缺陷)	>10年
中 国		2~3年(硬) 7~8年	≥9年 (硬)		≤7年	~6年 (硬)			>6年 在用 (有缺陷)			>6年在用 (有缺陷)

注:没注明的寿命均是软齿面齿轮。

减速器的使用寿命和使用条件(包括负荷特性)之间有较密切关系。按行业来区分大致可作如下比较:

1. 运转负荷平稳,启动次数少,启动负荷不大,使用于重载连续运转的减速器(如球磨机、水泥窑等设备所用的减速器)。在正常情况下,目前质量水平最高的是丹麦制造的,可用30年以上,战前德国的可用20年以上。

2. 运转负荷平稳,启动次数频繁但启动负荷不大,略有冲击的重载减速器(如卷扬机、起重机等设备所用的减速器)。在正常情况下这类减速器质量水平最高的战前德国和比利时制造的可用20年以上。

3. 运转负荷不平稳,启动和冲击次数频繁,冲击负荷很大,如轧钢机的人字齿轮座和主减速器。目前我们所见到的各国制造的这种类型减速器,寿命都很低,最好的也只用10年左右,而且质量普遍很不稳定。

(二) 齿轮破损形式及引起破损的主要原因

齿轮在工作时, 承受二种应力, 因而也有二种应力状态下的破损形式:

一种是弯曲应力, 齿轮轮齿在承受弯曲应力下可能造成断齿, 包括疲劳断齿和脆性断齿。

另一种是接触应力, 齿轮齿面承受接触应力下可能造成齿面疲劳点蚀、剥落、塑变、磨损和擦伤等。

据我们调查材料认为, 目前大型减速器包括轧钢机齿轮座在内, 没有一个齿轮是由于冲击力而使轮齿脆断, 即使轮齿疲劳折断的现象也很少。表2列出了我们调查中所发现的断齿减速器及其断齿原因。可见目前大型减速器齿轮由于弯曲应力而破损的很少。

表2 断齿的减速器及其原因分析

使用单位	减速器名称	断齿部位	承载弯曲应力	齿轮热处理状况	寿命	断齿原因
太钢第一轧钢厂	φ650轧机人字齿轮座(战前德国)	中人字齿轮		调质 HB240	23年	掉入螺钉, 事故断齿
	φ650轧机主减速器(太钢产)	小齿轮		调质 HB217	2年	齿根疲劳裂纹
	φ650轧机主减速器(战前德国)	小齿轮		$\sigma_B 70 \sim 80$	13年	齿根疲劳裂纹
	φ650轧机主减速器(东德产)	小齿轮		$\sigma_B 85.5$	4年	齿根疲劳裂纹
太钢二轧厂	1200薄板轧机主减速器(太重产)	二轴小齿轮	$\sigma_m = 1070$ 公斤/厘米 ²	正火 HB190	2年3个月	齿根疲劳裂纹(负荷大, 强度低, 夹杂严重)
	1200薄板轧机主减速器(太重产)	一轴小齿轮	$\sigma_m = 1470$ 公斤/厘米 ²	正火 HB187	2年9个月	齿根疲劳裂纹(负荷大, 强度低, 夹杂沿晶界分布)
太钢四轧厂	1200薄板轧机主减速器(太重产)	二轴小齿轮		正火表淬 心部 HB197 表面 HV341	1年	齿根疲劳裂纹(齿根强度低)
大冶钢厂	φ500轧机主减速器(沈重产)	小齿轮	$\sigma_m = 326$ 公斤/厘米 ²	心部 HB228 表面 RC50	9年	一个牙半个齿折断(淬火裂纹)
鞍钢大型厂	φ800轧机人字齿轮座(苏联产)	中人字齿轮	$\sigma_m = 591$ 公斤/厘米 ²	包齿表淬	4年	一个牙600毫米长齿根疲劳裂纹(齿根拉应力大, 强度低)
鞍山水泥厂	日本2×1240	第二级大小齿轮		小轮 渗碳表面淬火 大轮调质	15年	严重铁素体带状偏析
本溪工农兵水泥厂	沈重2530	一级小轮		调质 HB240	4年	材料缺陷
大连水泥厂	丹麦2×1050	二级小轮		调质 HB230	27年	使用24年后反转三年启齿疲劳折断
抚顺水泥厂	800马力减速器(日本)	一级小轮		调质 HB212	20年	使用20年后反转使用疲劳折断
松江水泥厂	波兰1000马力减速器	大小齿轮		表面淬火	一年	淬火裂纹

大型减速器齿轮（包括开式齿轮对在内）的破损形式主要是受接触应力的作用引起。由接触应力而引起的齿面破损，在各种受力特性下表现出各种不同形式。

水泥窑和水泥磨的减速器齿轮的破损，是以齿面疲劳点蚀为主，其中包括早期疲劳点蚀和后期疲劳点蚀。当前我国生产的水泥设备减速器的使用寿命赶不上先进国家的水平，主要是出现早期疲劳点蚀，即在一、二年内齿面产生逐渐增多的疲劳点蚀，影响到传动的平稳，局部齿面负荷增加，降低了使用寿命。如图1所示。

丹麦等国的水泥设备减速器在使用15年之内，齿面不发生任何缺陷（包括疲劳点蚀），15年之后，有的就开始出现了疲劳点蚀，发展扩大，齿面跑合面破损，磨损加剧，如图2所示。

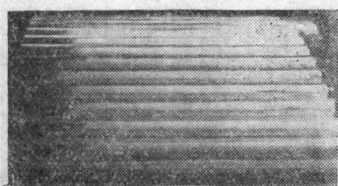


图1 广西水泥厂煤磨减速器
第二级大轮早期点蚀

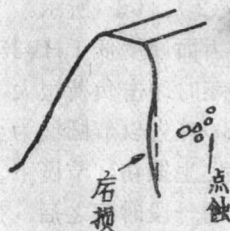


图2 大连水泥厂的丹麦
减速器二级小轮

对于水泥设备减速器来讲，齿面磨损不是主要的破损形式，我们测量上海水泥厂750水泥磨减速器齿轮（丹麦30年代产品）使用37年了，齿面只磨损0.07毫米。

矿井卷扬机减速器齿轮的破损，主要有二种破坏形式：一是磨损破坏，一是点蚀破坏。主要的、大量的还是点蚀破坏。

比利时减速器采用干油润滑，主要破损是磨损，兼有擦伤、点蚀及塑性变形。使用20年约磨损5~6毫米。

点蚀破坏也是这类减速器的主要形式，也有二种疲劳点蚀的形式：早期疲劳点蚀和后期疲劳点蚀。

早期疲劳点蚀普遍是矿井卷扬机减速器寿命降低的原因，我国生产的，苏联生产的，捷克生产的减速器，都是在使用1~2年之内产生大量早期疲劳点蚀，影响到使用寿命。例如抚顺西露天东大卷沈重厂给配的一对齿轮仅用60天就有大块点蚀出现。如图3所示。

由于齿轮制造和选用材料热处理不同，使用负荷情况不同，疲劳点蚀出现的早晚及点蚀的程度也各不相同。苏联CM3厂及我国制造的减速器齿轮，使用1~2年就开始点蚀；苏联HKM3厂制造的，用3~4年开始点蚀，战前德国的可用15~20年才发生点蚀。

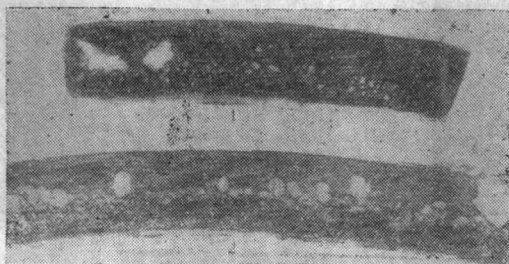


图3 抚顺西露天东大卷一号减速器沈重配制小齿轮齿面点蚀

SAS12/02

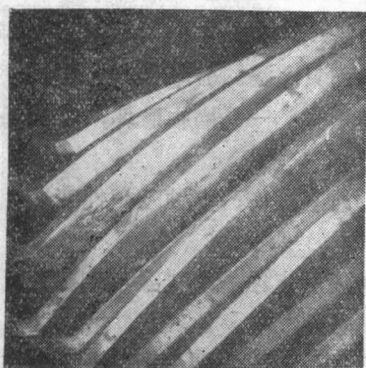
起重机的减速器齿轮的齿面破损形式相同于上述二种破损类型。

轧钢机人字齿轮座和主减速器齿轮的破损形式分为硬齿面和软齿面不同破损形式：

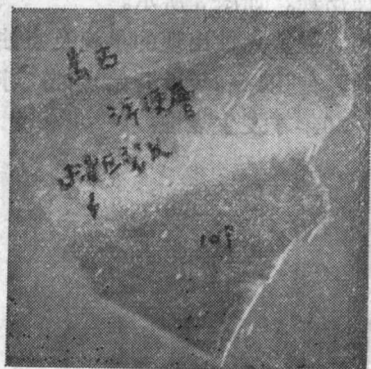
硬齿面（即齿面经过表面淬火）的破损形式为齿面剥落，在我们调查的70根轧机人字齿轮座齿轮中，有23根是硬齿面的，全部产生齿面剥落。在我们调查的60根轧机主减速器齿轮中，有18根是硬齿面的，大部分已产生齿面剥落。硬齿面齿轮表面剥落是一种疲劳破损，在一定的循环负荷下，表面淬硬层和心部交界的过渡层形成显微疲劳裂纹，并以平行于表面的方向扩展，扩展到一定程度，裂纹向齿表面延伸而形成齿面成块剥落。

图4（1）是鞍钢二轧厂2800轧机 $\phi 1000$ 人字齿轮座硬齿面齿轮齿面破损情况，从该齿轮齿面上取样显微分析发现，在离齿表面2.6毫米的淬火过渡层地带隐藏着二头不通外的内部裂纹，如图4（2）、（3）所示。

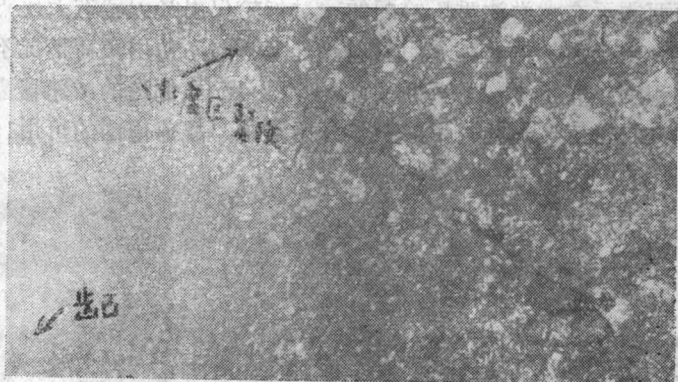
软齿面（即齿面硬度低于HB350）的破坏形式以塑变为主，同时存在着磨损、点蚀和擦伤。轧机咬入钢坯时冲击负荷很大，频率也高，当齿轮表面屈服强度低于这种冲击负荷时，齿轮用上不去不久，首先以节圆线为界，产生塑变滑移，主动轮齿向外滑移，齿顶鼓出，这种鼓起齿顶与齿根发生擦伤。节圆下塑变形成沟槽。被动轮也相应产生类似缺陷，不过滑移方向向内。齿轮使用一段时间之后，齿面也引起疲劳点蚀，在轧制负荷较高，齿面硬度较低时，点蚀产生较早，并扩展成片，磨损较重。



（1）齿面破损状况（左边是被动轮，右边是主动轮）



（2）过渡区隐存裂纹



（3）齿面金相组织 70×

图4 鞍钢半连轧2800人字齿轮座齿面剥落解剖

轧机软齿面破损状态如图 5 所示。

开式齿轮对（如轧机滚道伞齿轮、球磨机开式齿轮对等），的破损形式主要是磨损，其次是塑变（在齿面硬度特别低的情况下）。像鞍钢齐大山选矿厂球磨机开式齿轮对不到一年就磨损到不能使用程度。

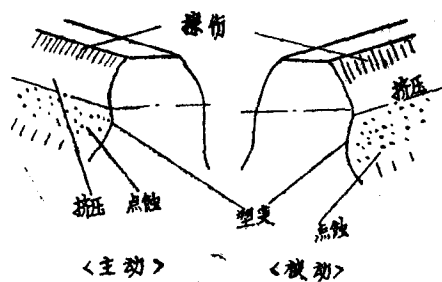


图 5 软齿面冲击负荷下齿面破损

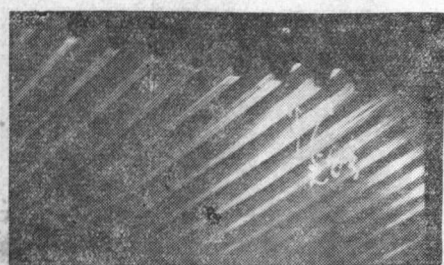
(三) 提高齿轮使用寿命的措施

水泥磨和矿井卷扬机减速器齿轮，早期疲劳点蚀是影响寿命的主要问题，引起早期疲劳点蚀的原因是齿轮对接触不良，包括齿长和齿高的接触率不够，造成齿面局部过载而引起点蚀。

有的齿轮对长度方面接触不够引起齿一侧超负荷，而另一侧不吃力，超负荷一侧承受几倍于疲劳强度的力，很快就引起了早期疲劳点蚀，如图 6（1）所示江油水泥厂使用的东德 Eg1120 减速器齿轮。

有的齿轮高度方面接触不够，节线处超负荷，造成早期点蚀，如图 6（2）所示的广西水泥厂使用的捷克制减速器。

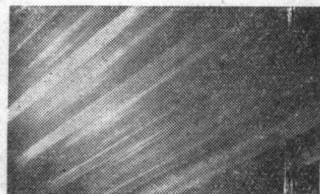
有的齿轮在整个齿面长度高度方面接触还比较好，但接触面呈星星点点接触，总的承载面积还是很不够，因而这些接触点处于过载下工作而造成早期点蚀。如图 6（3）所示的牡丹江水泥厂使用洛矿生产的 3310 减速器。



（1）长度接触不够引起点蚀



（2）高度接触不够引起点蚀



（3）零星接触引起点蚀

图 6

对于冲击负荷小的重载齿轮（水泥磨、矿井卷扬机）主要问题是消除早期点蚀，其措施：

（1）在提高齿轮的加工精度中应侧重于齿轮的接触精度，在装配后进行金刚砂或电火花跑合，能有效地解决这个问题。

齿面光洁度并不是影响寿命的因素。丹麦六十年代产品带来备件的齿面只有 $\nabla 3 \sim \nabla 4$ ，然而接触精度好，寿命仍很高。

（2）选择合理的齿轮齿面金相组织和齿轮对的硬度差。

丹麦减速器使用寿命能保证 30 年的主要一条是在于接触精度好，不产生早期点蚀，丹麦减速器在出厂时经过细致的金刚砂跑合，但这还不够。这只能保证星星点点的宏观接触，另外一点，它利用齿轮的金相组织中大块铁素体析出的有利微写塑变条件，使其齿面在开始使用时十分有利地跑合成全接触，而这种大块铁素体用 Si、Mn 元素加以强化，因而又不会轻易的引起疲劳点蚀。

调查中大量事实证明：采用正火或退火的大齿轮配调质小齿轮能有效地防止早期点蚀产生，这也是由于正火退火组织中有大块铁素体析出，有利于齿面微量塑变和塑变之后的形变

硬化，造成齿面全面接触，跑合成镜面状。

我们进行了半年的齿轮对比较试验（见附表1），也完全证实了这一点。

西欧早期采用的退火大齿轮，虽然也能起到防止早期点蚀的作用，但由于退火组织的强度太低，不能在较高的承载负荷下应用，丹麦等国则采用 SiMn 钢正大，硬度可达到 HB200，解决了这方面的不足。

近年来，国外很多学者在这方面有所研究，认为提高了齿轮对硬度差能提高承载能力，也有学者研究后认为，片状组织比球状组织有更高的接触应力（在相同硬度时），经过多次反复调查和试验后，我们认为，过大和过小硬度差均不利于承载能力提高，最好是在 HB70~120 之间。（软齿面齿轮对）。

（3）齿轮材料应选择具有接触疲劳性能高的材料，试验和调查材料证实，SiMn 钢作为齿轮材料要比过去使用的 NiCr 钢优越。

软齿面轧机减速器齿轮主要的破损形式是齿面严重塑变，这种严重塑变是由于轧机多次频繁的极大的冲击负荷引起的，这种负荷超过了齿面的屈服极限，因而，提高轧机减速器齿轮的寿命，主要是提高齿轮的屈服极限。例如大冶钢厂 850 轧机人字齿轮座，东德制造，由于其屈服极限较高，因而使用 9 年之后虽有塑变，但仍可使用多年，而同样负荷的鞍钢 650 轧机人字齿轮座，屈服极限较低，使用 6 年之后已有严重塑变，勉强在用，再有几年就要报废了。

接触精度对于轧机齿轮来讲，只要宏观上保证即可，微观上的接触用不着担心，几次轧制钢坯之后，就可以自己产生塑变来达到要求。

硬齿面轧机减速器齿轮的破损主要是在过渡区产生疲劳裂纹而齿面剥落。

形成疲劳裂纹的原因是在该区域承载的接触应力超过了该区域的疲劳极限，目前据我们调查所知，所有硬齿面轧机齿轮其承载能力均比一般软齿面低，远远低于设计要求，一般在 7000 公斤/厘米² 以下，（按 1954 年基茨斯扬计算公式）。例如，鞍钢二初轧 2800 轧机人字齿轮，从 1958 年投产以来，直到 1964 年，一直在低应力下使用（ $\sigma < 6300$ 公斤/厘米²），6 年中齿面良好，而最近二年，提高负荷之后，立即产生大块齿面剥落。

大型减速器硬齿面齿轮不同于小型齿轮，淬硬层到心部的过渡区是薄弱环节，而不是齿面的硬度。因此，只有提高过渡区的强度才能提高硬齿面的承载能力，由于过渡区的残余拉应力很难消除，过渡区本身强度取决于心部硬度，受到一定限制，因而，提高硬齿面齿轮承载能力可以加深淬硬层深度，使过渡区接触应力降低（由于齿面接触应力离表面越远应力就越小）到低于强度值。

(四) 齿轮设计中的几个问题

(1) 减速器结构上应能保证负荷的平稳, 消除对减速器的额外冲击负荷。否则, 减速器齿轮处于不正常的负荷条件下使用, 会严重地影响减速器寿命。丹麦中心驱动式减速器的结构中, 有弹簧轴承起到负荷平衡作用, 有利于消除额外负荷。有开式齿轮对的水泥磨减速器, 由于磨体传动不平稳, 有较大的冲击负荷自磨体传到减速器来, 引起减速器齿轮承受额外冲击负荷而破损, 这种齿面破损形式就类似于轧机减速器的形式, 是齿面严重塑变和一些磨损点蚀。例如镇江磷肥厂球磨机减速器受磨体振动, 使用三个月齿面就严重塑变。丹麦产同样设备, 它在磨体开式齿轮和减速器之间, 增设有一根较长的弹性传动轴, 并用较大的弹性联轴器联接, 消除了磨体方向传来的冲击负荷, 减速器使用正常, 重庆水泥厂采用的这类丹麦减速器使用34年齿轮无损, 与这种结构是有关系的。

(2) 齿轮的强度计算, 目前设计部门普遍采用1954年或1963年苏联基茨斯扬的公式, 个别也有采用苏联库茨计算公式或苏联М. С. Ильенко等齿轮、蜗杆、减速器的计算与设计的计算公式。

在这些齿轮强度计算公式中, 有以下几个问题须要商讨:

1. 齿轮的许用接触应力的公式:

在这些强度计算公式中许用接触应力的计算是依据大齿轮硬度或大小齿轮硬度平均值, (或以拉伸强度为依据)。

我们在调查中和以后的试验中, 均发现大型重载齿轮许用接触应力不单取决于硬度, 更不应单取决于大齿轮硬度, 而和大小齿轮的金相组织配合以及大小齿轮硬度差有关。

大齿轮硬度很高, 接近于小齿轮, 照上述强度计算公式应该有较高的承载能力, 但不然。如牡丹江水泥厂3310洛矿产减速器齿轮, 大齿轮硬度HB248~255, 小齿轮HB255~260, 使用2年之内齿面产生严重点蚀, 而战前德国克鲁伯工厂产生的相同型式减速器齿轮, 大齿轮HB179, 小齿轮HB220, 使用20多年 (和3310减速器使用负荷相同)。

这样的事实很多, 在我们试验中, 大小齿轮均采用HB290左右, 但在很低接触应力下就在小齿轮上产生大量点蚀。(这时的应力相当于按上述公式计算应力的60%)。

齿轮的传动除了接触压应力外, 尚有摩擦力的影响, 齿面的塑变硬化等也起了一定作用, 这些在许用应力公式中都没有考虑到。

实践中齿轮许用接触应力除硬度值影响外, 还应考虑齿面金相组织和硬度差值。

如何修改齿轮许用接触应力现用公式, 目前还缺乏定量数据。但至少用硬度的变化来改变许用接触应力的计算法是错误的。据我们试验和调查资料, 目前可以按下列三个等级的许用接触应力值 (应用基茨斯扬强度公式下同):

第一级 许用接触应力 ≤ 5200 公斤/厘米²

大齿轮HB190~220硅锰钢正火处理。

小齿轮HB260~290调质处理。

第二级 许用接触应力 ≤ 6200 公斤/厘米²

大齿轮 HB260~290调质处理。

小齿轮 HB250~280调质后再沿沟表面淬火 RC45~50。

第三级 许用接触应力 ≥ 6200 公斤/厘米²

大小齿轮均采用调质后表面淬火。

上述三级适用于重载大型负荷平稳减速器，对于冲击力大的轧机减速器齿轮，在许用接触应力 ≤ 8000 公斤/厘米² 时，可选用 $\sigma_s \geq 70$ 公斤/厘米² 的齿轮（大约 HB270~290），但使用中不能保证齿面不产生轻度破损，包括齿面塑变点蚀等。

2. 关于硬齿面淬硬层深度选择。

调查中发现，所有硬齿面齿轮寿命不长，远远低于设计负荷时就很快剥落。但计算公式（可按 240RC 公式计算）和试验室对滚试验都证实可以在较高负荷下工作。经我们分析认为，试验室对滚试验是在曲率半径较小的条件下，其破坏形式是在离表面很近的最大剪切应力区。曲率半径小的零件，接触应力自表面到里层降低得很快，因而淬硬层过渡区所承受的接触应力已很少。然而大型齿轮曲率半径大，硬化层过渡区承受的接触应力很大（由于接触应力自表面到里层降低得很少），如图 7 所示。

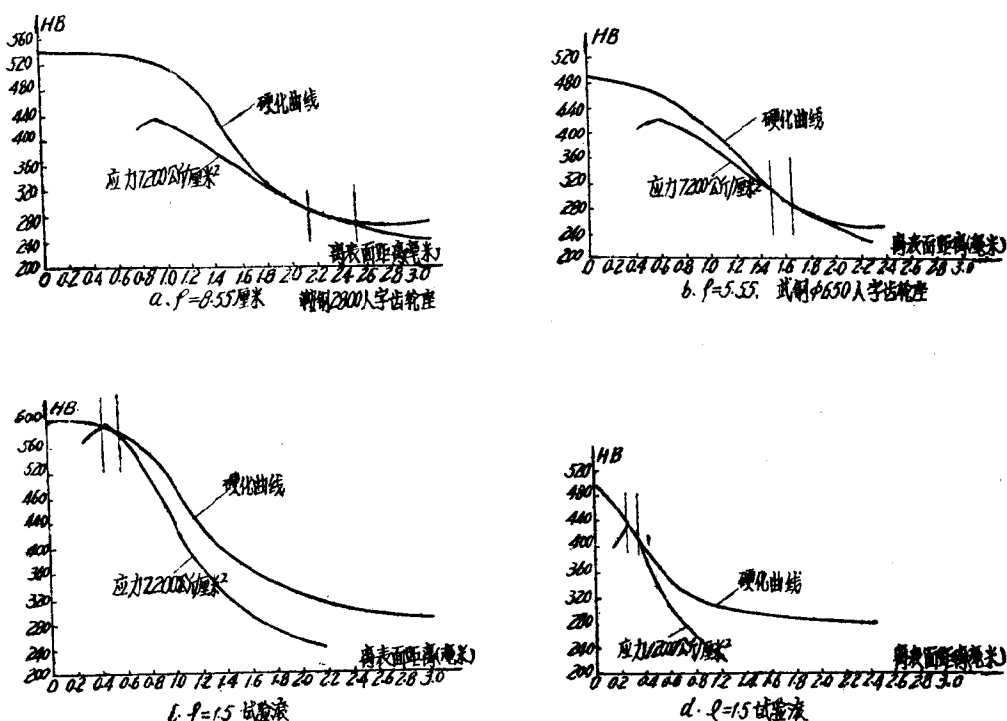


图 7 几种曲率半径实样的破损区域

加深淬硬层，使其过渡区承受的接触剪应力低于强度，才能提高大型硬齿面齿轮的承载能力。

过去对硬齿面齿轮的淬硬层深度理解的不够，单纯用 0.1~0.2 模数来选择。我们认为淬硬层深度直接关系到承载能力，它和曲率半径以及接触应力大小均有关系。根据调查资料和试验数据汇总分析，粗略的可按图 8 来表示其关系。

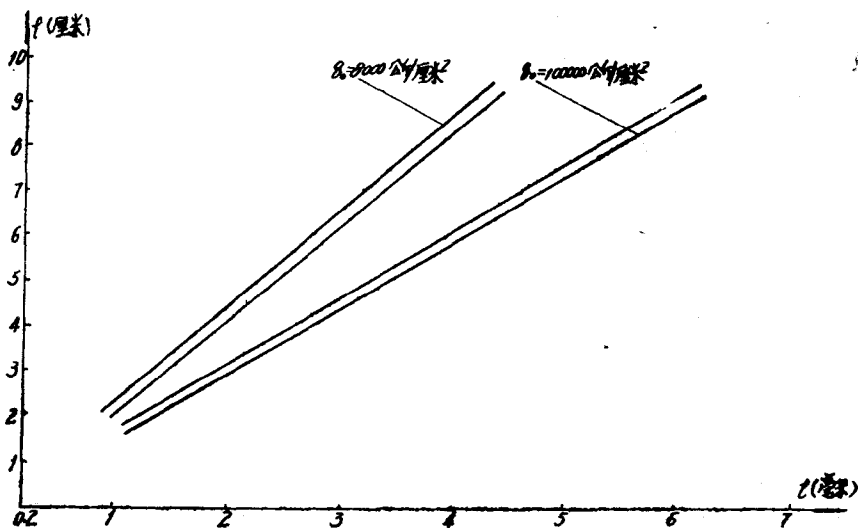


图8 淬硬层深度和接触应力及曲率半径的关系

3. 关于齿轮的机械性能要求。

齿轮机械性能是保证齿轮在工作期间不致因承受正常应力或估计到的可能额外应力而破损。

为保证具有足够的抵抗弯曲应力的能力，弯曲强度要满足设计要求。

为保证接触应力下的塑变，齿面应具有足够的屈服极限。

这些数据，可以用计算公式来求得。

据了解，目前大型减速器齿轮所承受的应力（包括轧机减速器等冲击力大的大型减速器），都是以强度为基础的应力，高的可塑性（ σ 和 ψ 值）和冲击韧性（ α 值）都是没有作用的。调查中发现有很低的 ψ 和 α 值的齿轮，同样在轧机齿轮上使用多年，我们选用 $\alpha = 3$ 公斤·米/厘米² 的低冲击值齿轮用于650轧机人字齿轮座，已使用半年未发现问题。这证明过去那种对轧机齿轮盲目追求高塑性和高韧性是没有根据的。

齿轮的受力，是以轮齿弯曲方向为主，因此，齿轮的机械性能是以横向性能才能真正代表轮齿受力状况。

我们认为， $\alpha_s \geq 3.5$ 公斤·米/厘米²， $\psi \geq 40\%$ ， $\sigma \geq 12\%$ ，足以满足齿轮要求。

强度的选择应注意在满足弯曲应力和接触塑性变形应力的要求下，不宜过份提高屈服极限，特别是一般平稳负荷下低接触应力的齿轮。因为低的 σ_s 值有利于齿面跑合。

(五) 提高大型减速器齿轮承载能力的途径

从调查的大量事实以及试验室试验证实,单纯用提高硬度(在软齿面范围内)来改善寿命和承载能力的办法是不对的,其效果适得其反。对于大型平稳负荷减速器,首先应考虑有利于接触跑合等因素,因而利用大齿轮正火(HB190~220)反而能提高承载能力和保证使用寿命。

更高的提高大型减速器齿轮承载能力的途径应该是采用表面硬化的硬齿面齿轮,据目前试验数据,硬齿面齿轮的承载能力至少可以达到7000公斤/厘米²以上。

但是,采用硬齿面齿轮必须注意以下几个问题:

(1) 其工艺参数必须能保证其承载能力的发挥,如调查中所分析的,防止大型齿轮的剥落,主要是要有足够的硬化层深度和心部硬度,尽量减少过渡区的残余拉应力。

(2) 采用硬齿面齿轮往往要损害齿的弯曲强度,因此,表面淬火层的形状应采用沿齿沟表面淬火的形式。

(3) 热处理工艺上应保证淬硬层均匀,无淬火裂纹等,在装配后,应进行跑合保证其齿高齿长的接触率。

表面淬火齿轮能较大地提高齿轮承载能力,但由于工艺上困难,往往有时不能发挥出其效果。如果在工艺上有困难时,可以先采用小齿轮表面淬火,大齿轮调质,因为小齿轮表面淬火工艺困难少些。这样的配合方式也可以将承载能力提高到6200公斤/厘米²以上。

附表1 齿轮对

接触应力 公斤/厘米 ²	甲组: 小轮——调质 HB286 大轮——正火 HB210							
	运转 方向	齿轮编号		破 损 状 况		运转 方向	齿轮编号	
		小轮	大轮	小 轮	大 轮		小轮	大轮
4000	减速	21	24	3.4×10^7 无损	3.9×10^6 一个齿有一个小点蚀 8.8×10^6 四个齿有一个小点蚀 1.65×10^7 仍无发展	增速	19	16
4400						增速	20	18
5000	减速	23D	29	3.7×10^7 无损	10^7 一个齿一个小点蚀 1.75×10^7 个别齿一个小点蚀	增速	24D	11
5400	减速	15	26	2.3×10^7 无损(少量塑变)	1.1×10^7 无损(少量塑变)	增速	17	17
						减速	14	13
5700						减速	14	13
6000	减速	15	26	2.85×10^7 无损	1.12×10^7 个别齿有一点蚀	增速	17	17
6100	增速	25	28	1.9×10^7 开始点蚀	0.77×10^7 个别齿点蚀 0.9×10^7 点蚀增多	减速	26	10
						增速	27	9
6300						增速	18	19
6600						增速	20	18
4200	减速	24 HB286	41 HB296	10^7 点蚀, 并逐渐增多 2.6×10^7 点蚀较多	1.36×10^7 无损	增速	14 23 HB286	22 15 HB241
5400								

试验结果统计表

乙组: 小轮——调质 HB286 大轮——调质 HB241		丙组: 小轮——调质后表面淬火 RC50 大轮——调质 HB286					
破 损 状 况		运转 方向	齿 轮 编 号		破 损 状 况		
小 轮	大 轮		小 轮	大 轮	小 轮	大 轮	
10 ⁷ 已有较多齿点蚀 3.3×10 ⁷ 点蚀稍有增加	0.5×10 ⁷ 个别齿点蚀						
1.1×10 ⁷ 个别齿有点蚀 2.34×10 ⁷ 无太大发展	0.53×10 ⁷ 个别齿有点触 0.9×10 ⁷ 点蚀有增加 1.12×10 ⁷ 点蚀又有增加	减 速	D	42	2.34×10 ⁷ 无损	1.12×10 ⁷ 无损	
2×10 ⁷ 个别齿有点蚀	0.96×10 ⁷ 个别齿有较大点蚀	减 速	6	45	3.7×10 ⁷ 无损	1.75×10 ⁷ 无损	
2×10 ⁷ 个别齿有个别点蚀	0.96×10 ⁷ 个别齿少量较大点蚀 1.1×10 ⁷ 变化不大						
1.75×10 ⁷ 少量点蚀 2.6×10 ⁷ 无大发展	0.83×10 ⁷ 少量点蚀 1.25×10 ⁷ 无大发展						
0.54×10 ⁷ 点蚀增加 断牙二个	2.6×10 ⁶ 点蚀增加						
2.34×10 ⁷ 点蚀增加	1.12×10 ⁷ 点蚀增加并有发展						
1.6×10 ⁷ 开始有点蚀 2.0×10 ⁷ 并无太大发展	0.77×10 ⁷ 少量点蚀 10 ⁷ 无太大发展						
1.6×10 ⁷ 开始有点蚀 1.85×10 ⁷ 无太大发展	0.77×10 ⁷ 有少量点蚀 0.95×10 ⁷ 无太大发展	减 速	7	43	2.0×10 ⁷ 无损	10 ⁷ 无损	
1.6×10 ⁷ 个别齿有点蚀 2.2×10 ⁷ 点蚀严重并发展 3.9×10 ⁷ 点蚀严重	0.64×10 ⁷ 有较严重点蚀 1.05×10 ⁷ 点蚀严重并在发展 1.85×10 ⁷ 点蚀严重断牙二个	减 速	DD	44	2.3×10 ⁷ 无损 10 ⁸ 无损 (齿面有塑变)	1.1×10 ⁷ 无损 5×10 ⁷ 少量塑变 (3×10 ⁷ 之后, 试验机有振动)	
0.77×10 ⁷ 点蚀并发展 1.6×10 ⁷ 严重点蚀	0.37×10 ⁷ 点蚀并发展 0.64×10 ⁷ 严重点蚀	减 速	D	42	1.48×10 ⁷ 无损	0.7×10 ⁷ 点蚀并有发展	
2.4×10 ⁷ 个别齿点蚀 3×10 ⁷ 点蚀发展不显	1.15×10 ⁷ 个别齿点蚀 1.45×10 ⁷ 点蚀发展不显	减 速	8 RC50	27 HB210 正火	2.3×10 ⁷ 良好	0.77×10 ⁷ 开始点蚀 1.15×10 ⁷ 点蚀严重	
		增 速	DDD RC50	HB241	2.2×10 ⁷ 良好	0.83×10 ⁷ 开断点蚀 1.1×10 ⁷ 点蚀较多	

附表2 卷扬机减速器齿轮

序号	使用单位	设备名称	制造厂	结构形式		齿轮类别	几何		
				传动简图	卷扬机规格		A	i	M ₁ /M ₂
1	赵各庄煤矿	BM-45ПЛA	苏 ГЗГМ	单级减速器		小齿轮	1198.27	9.65	12/13.24
2						大齿轮	1198.27	9.65	12/13.24
3	马家沟矿	ЦО-120	苏 CM3	双电机	2BM $\frac{3000}{1511}$ 2A	小齿轮	2×1200	11.5	8/9.125
4						大齿轮	2×1200		
5	阜新高德矿	ЦО-120	苏 CM3	双电机		小齿轮	2×1200	11.5	8/9.125
6						大齿轮			
7	平五矿	ЦО-180	苏 HKM3	双电机		小齿轮	2×1800	10.5	10/12
8						大齿轮	2×1800	10.5	
9	平七矿	ЦО-180	苏 HKM3	双电机		小齿轮	2×1800	11.5	10/12
10						大齿轮	2×1800		
11	平十矿	ЦО-180	苏 HKM3	双电机		小齿轮	2×1800	11.5	10/12
12						大齿轮	2×1800		
13	范各庄矿	ЦО-22	苏 HKM3	双电机		小齿轮	2×2200	10.59	12/14
14						大齿轮	2×2200		
15	龙凤矿	ЦО-22	苏 HKM3	双电机		小齿轮	2×2200	11.52	12/14
16						大齿轮	2×2200		
17	林西矿矸子山	ЦДЗ-115-30	苏 CM3	二级减速器		第一级小齿轮	450	5.7	
18						大齿轮			
19						第二级小齿轮	700	5.25	
20						大齿轮			
21	唐山矿六号井	ЦДЗ-150-115	苏 CM3	二级减速器		第一级小齿轮	600	2.175	
22						大齿轮			
23						第二级小齿轮	900	5.45	
24						大齿轮			
25	马家沟十一号井	ЦДЗ-150-115	苏 CM3	二级减速器		第一级小齿轮	600	3	
26						大齿轮			
27						第二级小齿轮	900	3.76	
28						大齿轮			
29	阜新五龙主井	ЦД4-200-20	苏 HKM3			第一级小齿轮	800	5	10/11.59
30						大齿轮			
31						第二级小齿轮	1200	4	14/16
32						大齿轮			