

■青岛青特众力车桥有限公司/刘书隆 高长宏

等高齿弧齿锥齿轮加工工艺研究

随着我国公路条件的改善及物流行业对车辆性能要求的变化,重型载货汽车车桥齿轮正向着高载荷、大转矩、轻量化、低噪声、宽速比、长寿命和低成本的方向发展。而单级减速的等高齿弧齿锥齿轮因为传动效率高、承载能力大、成本低、油耗少而成为当今重型汽车后桥齿轮的发展趋势。

我公司为此开发了各种系列的小速比、大转矩的弧齿锥齿轮,以我公司469型号为例,相应的延伸速比有8:37、9:37、10:37、11:37、12:37、13:37等。随着主动齿轮齿数的增加,在保证输出转矩不变的前提下,输入转矩随之增加,这对主动齿轮的强度有了更高的要求。因此,在齿轮材料选取时,从材料性能、制造成本、原材料价格等方面综合考虑,主、从动齿轮均采用22CrMoH。

毛坯质量控制

22CrMoH属于Cr—Mo系高强度齿轮钢,相当于日本牌号SCM822H,化学成分见表1。C元素与合金元素含量偏高,其淬透性和带状组织不易控制。在奥氏体化条件一定的条件下,淬透性取决于钢的含碳量和合金化程度。合金元素偏析产生的枝晶偏析,以及碳元素分布的不均匀,在连铸坯轧制和热处理后分别形成一次带状和二次带状。

表1 22CrMoH钢的化学成分质数分数 (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu
0.19~0.25	0.17~0.37	0.55~0.9	≤0.03	≤0.035	0.85~1.35	0.35~0.45	≤0.3

为保证齿轮表面的耐磨性和抗疲劳强度,心部有

高的综合力学性能和抗冲击能力,齿根有高的抗弯曲疲劳的能力,需要严格控制毛坯质量。由于各钢厂原材料、冶炼工艺、合金成分添加量等的不同,所以生产22CrMoH材料性能存在很大差异。

选用时,应充分考虑其淬透性、渗碳层塑性、回火尺寸稳定性、过热敏感性、防变形开裂倾向、高的冲击韧性等,并对其化学成分、含氧量、夹杂物、低倍组织、晶粒大小、淬透性和带状组织等进行严格控制。

- 1) 22CrMoH钢的化学成分应符合表1中的要求。
- 2) 含氧量≤0.001 5%。
- 3) 非金属夹杂物按GB10561中JK分级标准检验,达到A≤2.5, B≤2, C≤1, D≤1。
- 4) 晶粒度按YB/T5148标准,经930℃×6h渗碳后空冷,奥氏体晶粒度按YB/T5148标准评定不低于五级。
- 5) 钢的淬透性试验按GB/T225标准中有关规定执行。对原材料进行910℃±10℃正火后,在925℃±5℃进行端淬试验,端淬硬度33~38HRC,同炉钢中最大离散值不得大于4HRC。
- 6) 低倍组织按GB/T3077标准中有关规定执行,按GB/T1979标准检验。一般疏松、中心疏松和偏析均不得大于三级。
- 7) 带状组织按GB/T13299标准不大于三级。

弧齿锥齿轮分类及加工

1.弧齿锥齿轮分类及现状

汽车驱动桥弧齿锥齿轮设计主要采用两种齿制:等高齿和收缩齿,也称为奥利康齿制和格里森齿制。目

前，收缩齿在国内广泛使用，主要是因为收缩齿的接触区敏感性低，在加工及装配误差比较大的情况下，仍能够满足接触区和噪声的要求，符合中国的国情。

随着国际技术交流的日益广泛，国外先进技术和自动化设备的引进，加工精度和装配精度完全能够满足产品要求。等高齿在国外已经广泛应用，近几年在国内迅速发展，并得到很多齿轮生产厂和主机厂的认可。原因主要有：一是国外铣齿设备大量引进，尤其是德国奥利康和美国格里森设备的引入，六轴联动，线速度达200m/min，全工序加工，效率高；二是干切技术的发展，采用国产材料、国产刀具及涂层，完全能够满足生产和质量要求，成本低，现场干净整洁；三是与五刀法相比，采用两台设备的生产线布局，现场井然有序，减少运输浪费；四是仅采用热后研齿法，即保证低噪声的要求。但是等高齿也有其缺点：其接触区敏感性太高，在相关件加工精度和装配精度无法保证的情况下，需要反复调整，装配效率降低；无法磨齿，传动精度低，不适合在传动精度要求高的设备上使用。

2.弧齿锥齿轮数字化闭环系统

目前，世界上生产全套弧齿锥齿轮数字化闭环系统的机床厂家主要有两家：德国克林贝格－奥利康公司和美国格里森公司。其设备均可实现等高齿、收缩齿的加工转换；均可开发有针对自身设备的齿轮设计、机床加工、测量软件，即KIMOS和Gleason软件；均可实现数字化闭环系统的设计、加工和测量。

采用这两种软件进行设计时，只需要输入转矩、齿数、节圆直径、中点螺旋角、压力角、偏置距和安装距等参数即可实现齿轮的设计，通过Ease off对齿长方向接触区位置、齿高方向接触区位置、齿长方向鼓形量、齿高方向鼓形量、内对角变量等进行调整。同时，通过对一些给定参数的修正，实现相互转化，从而加工出完全匹配的产品。为达到对主动齿轮和从动齿轮相同强度或者相同寿命的要求，采用KIMOS或Gleason软件对中重载汽车驱动桥弧齿锥齿轮进行设计时，往往进行等强度或等寿命计算。

我公司生产的弧齿锥齿轮，采用Gleason软件进行等寿命设计，并与KIMOS软件相互转化；采用美国格里森凤凰Ⅱ代600HC铣齿机，全工序端面滚切法，干切等高齿；采用德国克林贝格P65检测中心，进行齿

轮精度检测、齿形误差测量和反调修正参数输出；采用奥利康B27磨刀机及CS200装刀机，保证刀具磨削精度及刀具组装精度，从而保证齿轮加工精度在三级以内；将世界上两大齿轮机床生产商的设备完美融合，实现产品无障碍转换，形成加工（磨削）→测量→反调→再加工（再磨削）的产品加工、刀具磨削的闭环生产系统，并实时传送数据，完全实现生产线的数字化、自动化和信息化，减少人为误差的产生。

3.干切技术

干切技术的出现是弧齿锥齿轮加工的一大创新，能大幅提高生产效率，降低生产成本、优化生产环境、实现零污染。但干切技术在降低生产成本方面，必须充分考虑材料、刀具和涂层等成本因素，使之符合中国的国情。经我公司试验，材料硬度及硬度均匀性严重影响刀具的使用寿命。硬度偏高，导致刀具磨损速率增加；材料内的硬点，导致刀具瞬间崩刃。毛坯经过锻造之后，全部采用等温正火工艺，并保证硬度在160~180HBW，单件硬度偏差在5HBW以内。采用国产硬质合金刀具及氮铝化钛涂层，刀具寿命明显提高。

以469从动齿轮为例，单次磨刀后涂层，加工周期12min，线速度200m/min，平均可加工150件以上。生产成本完全可以接受，有效解决了国外设备和技术水土不服的问题。

热处理及压淬工艺

1.热处理工艺

我公司产品热处理技术条件如下：有效硬化层1.7~2.1mm；表面硬度58~63HRC；心部硬度33~45HRC；残余奥氏体级别≤4级；马氏体级别≤4级；碳化物级别≤4级；非马氏体组织深度0.02mm。

我公司采用爱协林双排推盘式渗碳直淬、压淬全自动生产线。共有75个料盘位，单盘额定载重300kg，淬火油温70℃±10℃。具体工艺见表2。

表2 469双排连续渗碳炉工艺

区域		1区	2区	3区	4区	5区	
	预氧化	加热	强渗	高温扩散	低温扩散	压淬保温	回火
温度/℃	450	890	920	900	860	860	190
碳势 (%)			1.1	0.9	0.8	0.8	
周期/min	35						

其中主动齿轮采用直接淬火工艺；从动齿轮外径为469mm，厚度仅为62mm，要求淬火后大端面平面度 $\leq 0.1\text{mm}$ ，采用直接淬火的方式无法保证平面度要求，必须采用压淬工艺。压淬在格里森537PCM型淬火压床上实现。

2. 影响热处理变形的因素及压淬控制

在热处理渗碳工艺越来越成熟的今天，全自动热处理生产线得到广泛应用。在材料控制得当的情况下，有效硬化层、金相组织、硬度等技术要求完全可以控制在合理的范围内，惟有热处理变形不可避免。由于偏析而出现的淬透性和带状组织问题，常规的检验不容易发现，是影响热处理变形的主要因素。合理的淬透性带和带状组织控制，并选用合理的压淬工艺，对减少变形有很大的帮助。

由于22CrMoH材料淬透性较高，在淬火过程中，心部体积膨胀较大，内应力较大，变形趋势大。这就需要压淬工艺进行不断调整，以求达到满意的平面度要求。压床调整主要从以下四个方面入手：

(1) 提高淬火温度 温度越高，材料塑性越好。但是淬火温度有一定的限度，必须保证热处理技术要求合格。而且淬火温度超过一定范围后，心部硬度会提高；淬火后表面残余奥氏体量增多；淬火变形趋势大。所以应综合考虑各方面因素来提高淬火温度。

(2) 延长外压环保压时间 当外压环压住工件后，如果保压时间短，工件会自由收缩。在第一阶段和第二阶段，增加保压时间，减少脉冲次数。

(3) 合理调节喷油量 第一阶段，快速淬火或淬火油的快速流动能降低工件温度，使其迅速发生转变。值得注意的是，通过对持续时间和油流量的灵活选择应用，可使快速淬火获得满意的表面硬度和因缓慢淬火而减小变形两者兼得。第二阶段减小喷油量。减慢流速，使工件各横截面的温度相等，这样，在连续冷却进行马氏体转变时使其内应力较小，同时获得适当的心部硬度。第三阶段增大喷油量。加速淬火油流动，这时工件已完成转变，旨在使工件冷却，便于操作。

(4) 合理调整内、外压模压力 压力淬火目的是为限制工件，抵消工件的转变应力，而不是重新定形达到最终形状。所以内、外模的压力应取最小值，能矫正零件即可。

热处理变形规律

齿轮在热处理过程中，齿部也会发生相应的变形，包括齿长方向和齿廓方向，从而导致齿轮精度丧失、接触区偏移、噪声增大。由于齿数较多，必须保证其变形规律的一致性。对于弧齿锥齿轮，无论是等高齿制还是收缩齿制，齿部变形都遵循一般的热处理齿部变形规律，即热处理淬火后，弧齿锥齿轮中点螺旋角变小，齿长方向有伸直的趋势。变形导致主、从动锥齿轮接触区的变化，即从动齿轮正车面接触区有偏大端的趋势，反车面接触区有偏小端的趋势。热处理后接触区如图1所示（e表示大端，i表示小端）。

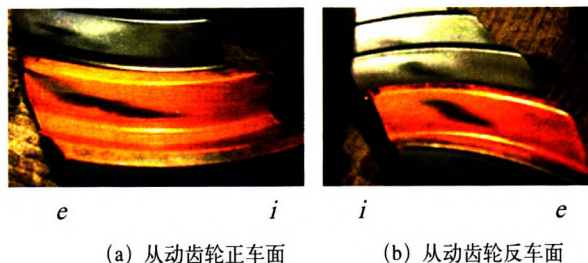


图1 热处理后齿面接触区

热处理后，正车面接触区由中间偏向大端，反车面接触区由大端偏向小端。因此，在设计过程中，就应该考虑热处理变形的规律问题，进行一定的偏移补偿。从图1中可以看出，齿轮接触区为典型的内对角形式，这对增强弯曲强度极为有利。

齿轮精度检测及接触区修正

为反映出齿部变形的大小与方向，测量齿轮精度，采用常规的测量手段不容易分辨。我公司采用德国克林贝格P65测量中心，对齿轮的精度及拓扑进行测量。测量结果表明，虽然铣齿精度可以保证三级以内，但是由于热处理变形的存在，齿轮精度丧失严重，仅能保证八级以内。这就会出现成批量的齿轮接触区不良或者噪声偏大的情况。通过试验研究，采用研齿机进行全齿面研齿，对降低噪声有很大的帮助。在低音环境下，采用分贝仪测量，研齿后噪声降低2~3dB，保证噪声在80dB以内。但研齿对接触区的修正作用很小，对齿轮精度的提高也很有限。

当接触区变化在可接受范围内时，可通过调整主动齿轮安装距进行修正，即在装配时调整垫片的厚度。当接触区变化太大，安装距调整仍无法保证时，可采用单独重新设计，并单独加工主动齿轮或从动齿

轮，热处理后，使之与成品件配对。通过合理的接触区补偿，可实现接触区的修正。

拓扑技术

在接触区修正的过程中，单独的热前齿轮无法与单独的热后齿轮进行滚检，因此无法保证齿轮质量和接触区的要求。拓扑技术可以有效解决这个问题，并能测量出齿部的变形偏差。拓扑图显示的是实际齿面与理论齿面之间的偏差，可以看出热处理变形的基本规律：中点螺旋角变小，从动齿轮反车面接触区有偏小端的趋势。同时，在铣齿过程中，只要保证所加工齿轮拓扑图的质量，实际接触区就能无限接近设计的接触区。

金相组织

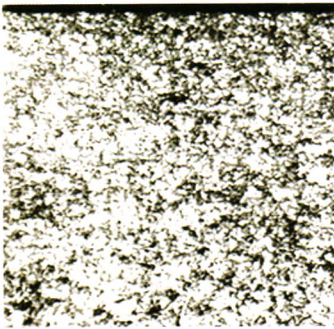
采用全自动显微硬度计对有效硬化层深度、金相组织级别、硬度、非马氏体组织深度等进行测量。在相同工艺条件下，对五组试样进行检验，结果见表3。

表3 热处理检验结果

试样 编号	有效硬 化层深 度/mm	表面 硬度 /HRC	心部 硬度 /HRC	残余奥 氏体级 别	马氏 体级 别	碳化 物级 别	非马氏 体组织 深度/mm
1	1.95	61	40	3	3	1	0.018
2	2.00	61	41	2	2	1	0.019
3	1.98	62	39	3	3	1	0.020
4	1.93	61	40	2	2	1	0.020
5	2.02	60	42	4	4	1	0.021

由表3可以看出，齿轮表面均存在非马氏体组织，这种非马氏体组织由内氧化造成。在渗碳的介质气氛中，存在一定的“氧势”（主要来自CO₂和O₂）；在可控的渗碳气氛中，除了碳向钢中扩散以外，气氛中的“氧”也向钢中扩散。钢中的合金元素，如Cr、Mn、Si等，比Fe更容易氧化。因此，表面层发生氧化后，造成氧化物周围的该合金元素“贫化”，致使奥氏体的稳定性（淬透性）下降，在“渗碳—直接淬火”的工艺下，出现索氏体一类非马氏体组织，即黑色组织，使表层硬度下降；黑色组织的出现还会改变渗碳层的内应力分布，显著影响钢的疲劳寿命和耐磨性。

残余奥氏体、马氏体、碳化物级别根据QC/T 262—1999《汽车渗碳齿轮金相检验》标准规定进行检验。采用金相组织比较法，分别如图2、图3所示。

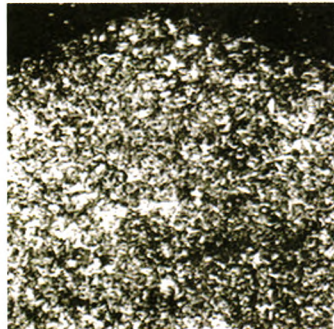


(a) 标准残余奥氏体、马氏体2级

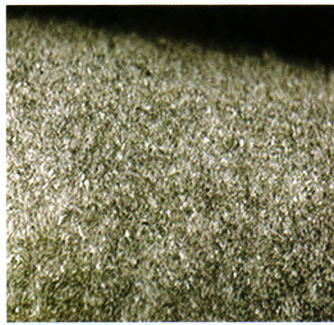


(b) 实际残余奥氏体、马氏体2级

图2 标准与实际的残余奥氏体、马氏体级别比较



(a) 标准碳化物1级



(b) 实际碳化物1级

图3 标准与实际碳化物级别比较

强化喷丸

齿轮渗碳淬火后，在冷却初期表面为拉应力，心部为压应力；冷却最终则是表面为压应力，心部为拉应力。最大的残余压应力不在渗碳层的最外层，而存在于

渗碳层表面以里约50%~60%的深度处，此处碳浓度<0.5%。残余压应力降低裂纹的扩展速率，形成非扩展裂纹，将疲劳源移至表下萌生。因此，对于大多数零件来说，引入残余压应力对材料的疲劳性能有益。但此残余压应力偏小，仅有-200~-100MPa，为了得到高的残余应力场，生产中通常采用喷丸处理提高其表面的残余压应力，通常能达到-800~-700MPa左右，而国外产品的内部残余压应力达到-1000MPa。

喷丸强化是高速运动的弹丸流喷射材料表面并使其表层发生塑性变形的过程，形成表面硬化层，深度为0.1~0.8mm，改善金属材料的抗疲劳性能，并改善摩擦学性能。喷丸处理会导致材料的表层发生变化，包括：引入高的表面残余压应力，改善表面粗糙度，提高硬度，残余奥氏体发生孪晶马氏体相变，形成细化组织结构，减少表面非马氏体组织。

我公司采用全自动数控喷丸机，采用φ0.6mm钢丝切丸，圆度G3，硬度55~59HRC。保证覆盖率300%，弧高值0.5~0.6A。喷丸前后残余应力值、硬度值、非马组织深度见表4。

表4 喷丸前后残余应力值、硬度值

试样 序号	距表面0.1mm处 硬度/HV		表面残余压应力 /MPa		非马组织深度 /mm	
	喷丸前	喷丸后	喷丸前	喷丸后	喷丸前	喷丸后
1	655	740	-124.1	-840.3	0.028	0.020
2	680	743	-119.4	-860.5	0.021	0.018
3	662	713	-206.3	-887.0	0.025	0.019

从表4可以看出，喷丸后，距表面0.1mm处硬度及残余压应力值明显提高。强力喷丸能够减少表面非马氏体组织，但不能完全去除，效果也不是很理想。所以针对非马氏体组织，采用物理方式无法有效解决，应该从材料、工艺、气氛、设备等方面入手解决。

台架试验

469型号齿轮应用于13t商用车中后驱动桥上，设计最大输出转矩45 000N·m。为验证469系列齿轮设计的正确性和工艺的可行性，以及喷丸强化的效果，对各速比的产品进行整体台架试验。台架试验在国家CNAS认证重点实验室进行，根据标准QC/T533-1999《汽车驱动桥台架试验方法》，在最大输出转矩为45 000N·m、输入转速150r/min、油温80℃的条件下，通过五次台架试验，具体试验数据见表5。

表5 469型号各速比齿轮台架试验寿命

型号速比	输入转矩/N·m	循环次数/万次
469 (9:37)	10 949	70.2
469 (9:37)	10 949	48.3
469 (10:37)	12 162	35.2
469 (11:37)	13 378	50.4
469 (12:37)	14 596	47.5

由表5可以看出，随着速比的减小，主动齿轮输入转矩变大，这就要求主动齿轮的抗疲劳强度更高。469型号各速比齿轮的台架试验循环次数最高达70万次，最低寿命不低于35万次，试验数据遵循对数正态分布（或韦布尔分布），完全满足QC/T 534-1999《汽车驱动桥台架试验评价指标》和CGMA3001.B01-2009《重型汽车驱动桥弧齿锥齿轮技术条件》的准入条件。

结语

在弧齿锥齿轮的设计与生产过程中，低效率、易污染的五刀法加工方式逐步被全工序法（也称两刀法）代替。国内大型的齿轮加工企业，如东风、株齿、一汽、重汽等企业的齿轮生产部门，纷纷引进德国奥比利康和美国格里森的数字化闭环齿轮生产系统。该系统大大简化了设计步骤，缩短了新产品的研发周期，使生产过程实现了数字化、自动化、信息化。

刀具成本严重影响齿轮的加工成本。国产化是解决这一问题的关键。经过近几年的探索和实践，材料、刀具、夹具等逐步实现国产化，产品工艺日臻成熟。为更好地节约成本，在两种软件的基础上，逐渐开发出适合中国国情的一刀多用技术、少组刀加工技术和刀盘互换技术等。

热处理变形无法避免，通过合理的热处理工艺参数调整，可以尽量减少变形。采用全齿面研齿技术、拓扑技术对变形进行修正和补偿，保证良好的接触区和低噪声要求。

合理控制齿轮硬度，保证表面硬度在61HRC左右、心部硬度在40HRC左右，能显著提高齿轮疲劳寿命；齿轮表面 w_c 控制在0.8%左右，减少残余奥氏体量，保证其级别在四级以内，含量10%~20%；采用强化喷丸，使齿轮表面存在高的残余压应力，对抑制微裂纹扩展，提高齿轮齿根弯曲疲劳强度和齿面接触疲劳强度有明显效果。通过台架试验，证明以上方法行之有效。

关键词：

驱动桥 弧齿锥齿轮 工艺 精度

(收稿日期20121110)