汽车后桥齿轮断齿缺陷分析

高永强

郑州华威齿轮有限公司　河南郑州　452374

摘要：车辆在正常行驶时，底盘下部突然出现咔咔异响，车辆停驶。经拆解后发现，该后桥从动齿轮出现两处约6个轮齿打齿。通过扫描电镜对该失效齿轮进行断口宏观分析、金相检验、表面硬度、心部硬度及有效硬化层等的检验，分析认为该齿轮的断裂是由于主动、从动锥齿轮接触区未调整好，使主动锥齿轮大端受力过大，该齿面接触应力超过了材料的抗剪切屈服强度极限造成的。结果表明，齿轮副接触区未调整好，造成主动锥齿轮和从动锥齿轮啮合不良，使主动锥齿轮大端受力过大，该齿面接触应力超过了材料的抗剪切屈服强度极限，后续的齿轮副配对研磨时或装配时加强对齿轮副接触区的控制，保证主从动齿轮良好接触，避免该类事故的再次发生。

关键词：汽车后桥齿轮；轮齿打齿；齿轮接触区；接触应力；屈服强度；配对研磨；装配

目前，国内外汽车后桥齿轮主要的失效形式，如皮卡、货车的齿轮失效，50%以上是断齿，其中有一部分是由于车辆超载造成的，还有一部分是齿轮在制造或者在装主减总成时，由于齿轮副的安装尺寸误差或没有调整好安装距产生齿轮副啮合精度不好，从而造成车辆在行驶过程中出现打齿失效。但对齿轮失效的分析，多数限于分析材料及热处理指标等方面的原因，没有分析如渗碳层硬度梯度及装配等方面的原因。本文针对渗碳层硬度梯度及装配等方面进行分析，最终确定齿轮断齿失效的原因。

车辆在正常行驶时，底盘下部突然出现咔咔异响，车辆停驶。经拆解后发现，该后桥从动齿轮出现两处约6个轮齿打齿。该齿轮行驶里程为1152km，材料为20CrMnTiH，齿轮主要加工过程为：圆钢下料→锻造成型→等温正火→机械加工→渗碳→淬火→抛丸→研齿。轮齿齿面，表面渗碳，深度0.9～1.3mm，渗碳表面硬度58～64HRC，心部硬度32～45HRC。与相配齿轮配对检查着色印痕，要求印痕位置在齿宽方向中间偏小端，印痕长度为齿宽的40%～60%，印痕高度为齿高的50%以上，并要求配对研磨后在主、从动齿上刻上配对号。

通过对主动锥齿轮断口进行宏观和微观分析，确定其断裂的性质，对齿轮的金相检验、表面硬度、心部硬度及有效硬化层等的检验等，确定齿轮的断裂原因。

断齿缺陷及宏观特征

经对主动、从动锥齿轮观察发现，主动锥齿轮偏大端有挤压、掰齿的现象，掰齿的部位主要集中在主动锥齿轮的大端偏齿顶，并且靠近大端齿面的齿轮接触摩擦的痕迹较深。从动齿轮的损坏形式主要是断齿失效，并且齿轮工作面齿槽部位有挤压金属留下的痕迹。

失效部位检查

1.主动锥齿轮检查

由主动齿轮失效图片（见图1和图2）可以看出，主动锥齿轮在偏大端齿顶一侧有多个轮齿都有不同程度的齿顶断齿现象，并且靠近大端齿轮啮合摩擦痕迹较深，个别轮齿工作面还有硬物刮伤痕迹。

图1　主动齿轮及断裂部位宏观形貌

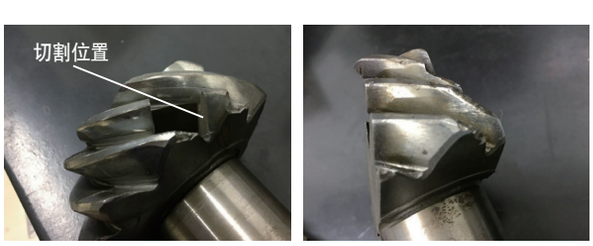


图2　主动齿轮切割部位及擦伤宏观形貌

2.从动锥齿轮检查

从图3和图4所示的断口可以看出，从动锥齿轮主要是断齿失效的形式，并且锥齿轮工作面齿根处和部分断齿表面上有碾压金属留下的痕迹，痕迹起始位置在锥齿轮的工作面一端。在断齿相邻的完整齿的工作面上有摩擦挤压的痕迹，并隐约看到接触区几乎覆盖整个工作面。

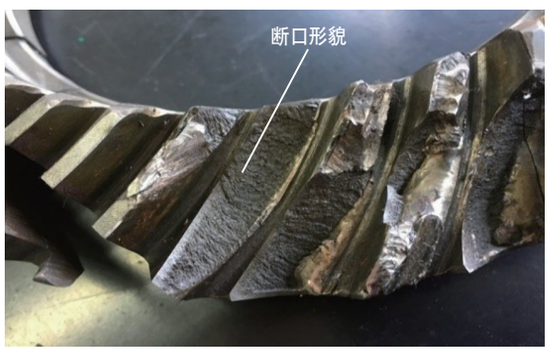


图3　从动齿轮及断裂部位宏观形貌

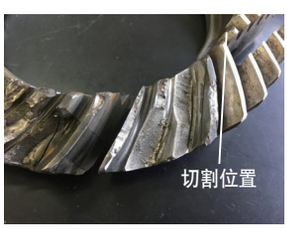


图4　从动齿轮切割部位及齿面挤伤宏观形貌

断口分析

将该失效的主、从动齿轮经超声波清洗后，利用扫描电镜对断口的断面形貌进行分析。

1.主动锥齿轮断口扫描电镜检测结果

通过对主动锥齿轮大端齿顶断口形貌进行检测发现：主动锥齿轮工作面有严重的挤压变形的痕迹，靠近轮齿表面为沿晶断裂并有连续裂纹，主要为撕裂和冰糖状沿晶的混合断裂，如图5所示；心部为韧窝断裂特征，沿晶脆断为主，如图6所示。

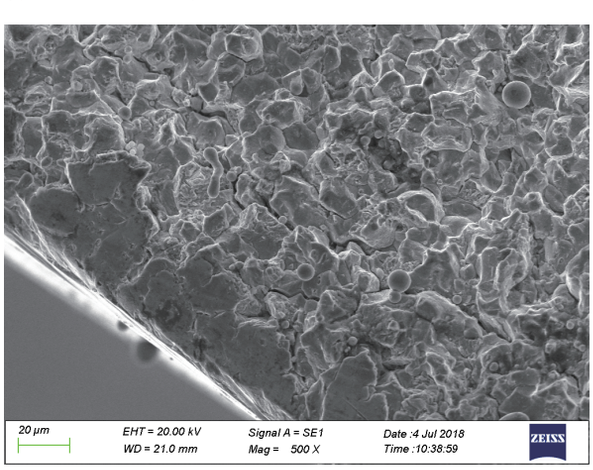


图5　工作面放大后形貌

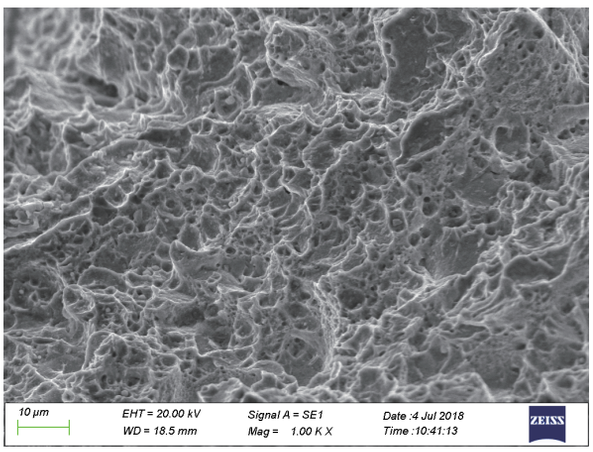


图6　心部断裂形貌

2.从动锥齿轮断口扫描电镜检测结果

通过对从动锥齿轮断口形貌进行检测分析发现：靠近啮出端齿根凹槽处有挤压的痕迹，断裂仍为沿晶断裂并有连续状的裂纹（见图7），心部为解理断裂的特征（见图8），说明该从动齿轮在断齿时受到较大的冲击力影响。从动锥齿轮靠近表面有MnS类夹杂物，如图9和图10所示，靠近从动齿轮啮入端的齿面受正常的沿齿面的齿轮传动力，靠近啮出端齿面除受正常的传动力以外，还有一个与之有夹角的力的双重折叠力的影响。

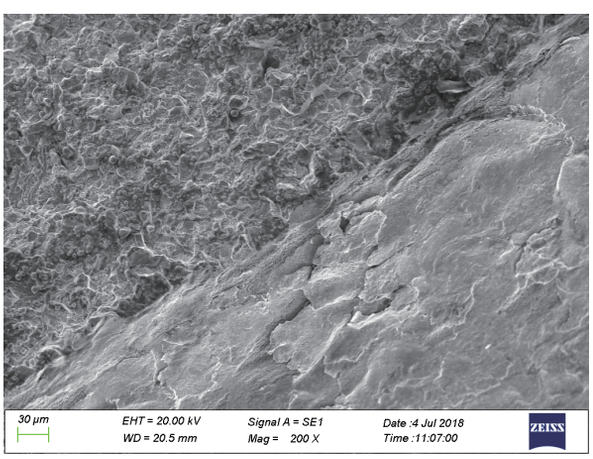


图7　齿根处受挤压特征

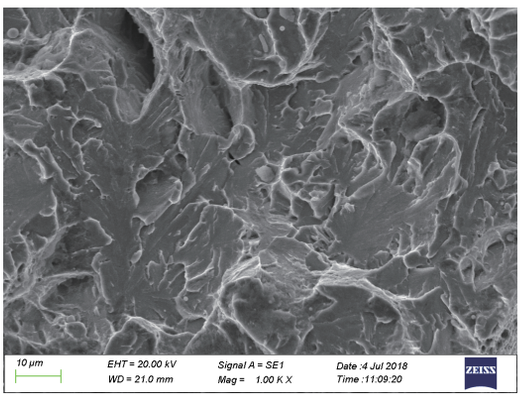


图8　心部解理断裂特征

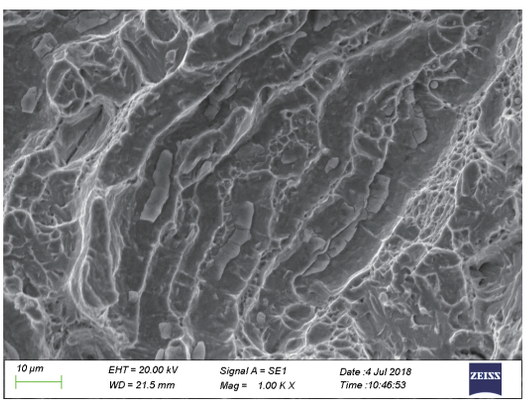


图9　靠近齿面MnS类夹杂物

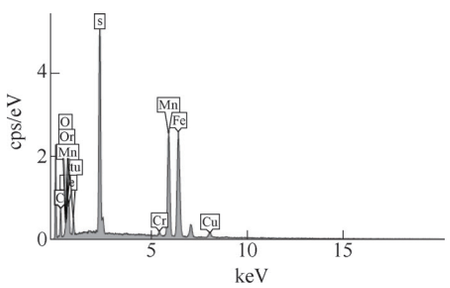


图10　能谱检查结果

原材料成分与金相

对失效的主、从动齿轮的金相和硬度分别进行检测分析。

1）主动锥齿轮化学成分检测，见表1。

表1　化学成分检测结果（质量分数）　（%）

成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti
试样	0.21	0.19	0.95	0.01	0.020	1.26	0.05
GB/T 3077—2015	0.17～0.23	0.17～0.37	0.80～1.1	≤0.020	≤0.035	0.80～1.10	0.04～0.10

2）主动锥齿轮内在质量检查，见表2。

表2　主动锥齿轮金相检验分析结果

检测项目	技术要求	检测结果	备注
碳化物级别	1-3级	1级	节圆
马氏体级别	1-4级	2级	节圆
残留奥氏体级别	1-4级	2级	节圆
齿面硬度/HRC	58～64	63.7	节圆
心部硬度/HRC	32～45	34.1	齿根圆与齿部中心线交点处
有效硬化层深度/mm	0.9～1.3	1.2	节圆
		0.8	齿根

3）主动锥齿轮金相检验。通过对主动锥齿轮进行化学成分和内在质量检测发现，主动锥齿轮材料符合GB3077—2015技术要求；齿轮热处理质量节圆处和齿根处有效硬化层深度分别为1.2mm和0.8mm，符合技术要求（节圆：0.9～1.3mm；齿根：0.75～1.15mm），合格（见图11和图12）。但是发现主动齿轮靠近齿顶部分有二次淬火和二次回火的现象，如图13所示。

4）从动锥齿轮化学成分检测结果见表3。

5）从动锥齿轮内在质量检测结果见表4。

6）从动锥齿轮金相检验结果如图14～图17所示。

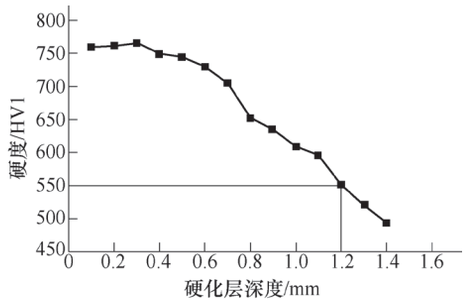


图11　主动齿轮节圆处硬度梯度曲线

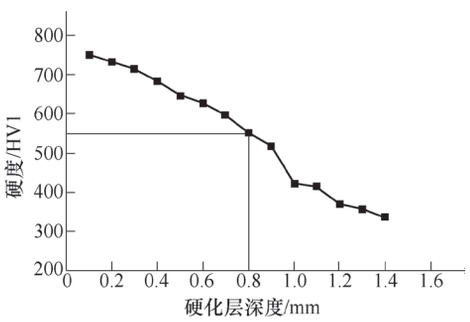


图12　主动齿轮齿根处硬度梯度曲线

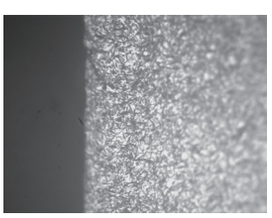


图13　轮齿齿顶金相组织（400X）

表3　化学成分检测结果（质量分数）　　（%）

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti
成分	0.20	0.19	0.97	0.02	0.020	1.17	0.06
GB/T 3077—2015	0.17～0.23	0.17～0.37	0.80～1.1	≤0.020	≤0.035	0.80～1.10	0.04～0.10

表4　金相检验分析结果

检测项目	技术要求	检测结果	备注
碳化物级别	1-3级	1级	节圆
马氏体级别	1-4级	2级	节圆
残留奥氏体级别	1-4级	2级	节圆
齿面硬度/HRC	58～64	63.7	节圆
心部硬度/HRC	32～45	33.7	
有效硬化层深度/mm	0.9～1.3	1.2	节圆
		1.0	齿根

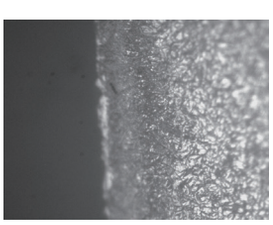


图14　齿顶金相组织（200X）

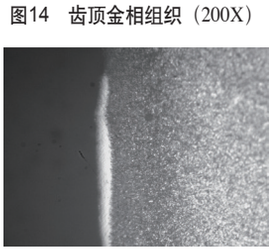


图15　齿顶金相组织（400X）

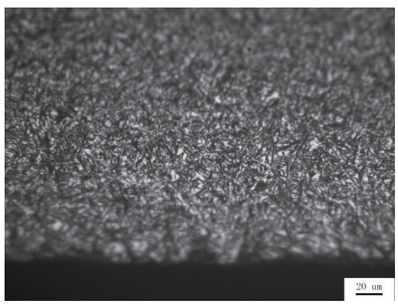


图16　节圆金相组织（200X）

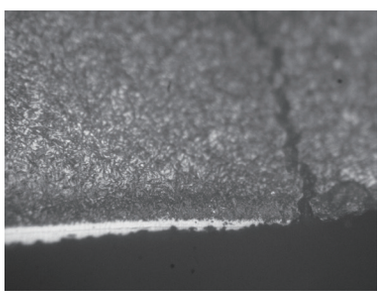
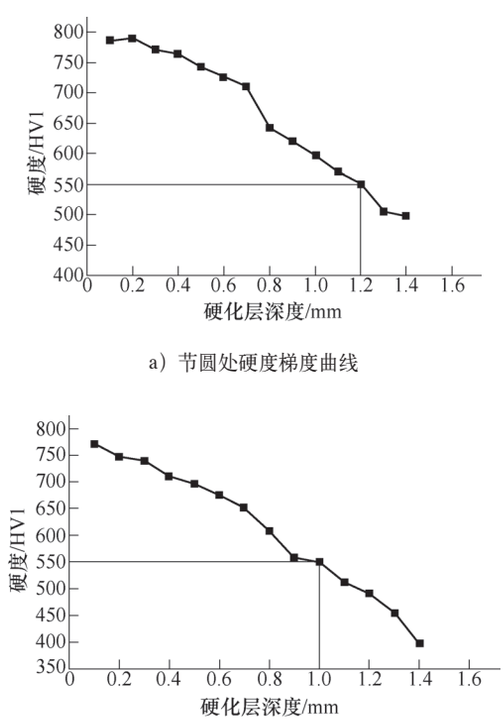


图17　齿根金相组织照片（400X）

7）从动锥齿轮硬度梯度检测曲线如图18所示。



a）节圆处硬度梯度曲线

b）齿根处硬度梯度曲线

图18　从动锥齿轮硬度梯度曲线

通过对从动锥齿轮进行化学成分和内在质量检测发现，从动锥齿轮材料符合GB3077-2015技术要求，合格；齿轮热处理质量节圆处和齿根处有效硬化层深度分别为1.2mm和1.0mm符合技术要求（节圆：0.9～1.3mm；齿根：0.75～1.15mm），金相组织也合格。

但在从动齿轮的接触区边缘有二次淬火和二次回火的白亮区，法向截面测定各区域硬度如下：外表面白亮区790HV0.3、789HV0.3（相当于63.5～64.0HRC）；白亮区内侧回火区576HV0.3、580HV0.3（相当于53.8～54.1HRC）；回火区内侧702HV0.3、709HV0.3（相当于60.2～60.7HRC）。

分析与讨论

经过对后桥主动锥齿轮和从动锥齿轮进行的一系列检查（包括接触区、断口形貌、化学成分、热处理质量等）发现，齿轮失效的主要原因是接触区未调整好，或虽调整好但未能保持造成的。

齿轮失效的过程如下：由于主、从动锥齿轮接触区未调整好，并且主动锥齿轮载荷偏大端，造成主动锥齿轮和从动锥齿轮啮合不良，使主动锥齿轮大端受力过大，该齿面接触应力超过了材料的剪切强度极限，齿面材料进入塑性状态。主、从动锥齿轮承载面一侧的白亮层正是这种过量变形导致温度升高，引发自淬火的结果。通过检测白亮区的硬度发现白亮层的硬度高63.5～64.0HRC，内应力大、脆性大、易剥落，形成齿轮的早期剥落失效。在受到冲击载荷的作用时，齿面剥落，并伴有裂纹的扩展最后引发齿轮发生随机断齿等恶性失效情况。

从动锥齿轮有效硬化层深度内有MnS类夹杂物，也是加速从动锥齿轮失效的一个原因。

结语

1）该齿轮副断裂为弯曲疲劳断裂，且轮齿发生弯曲疲劳断裂与主动锥齿轮大端受力过大有关。

2）装配时主齿安装距由于调整不当，导致齿轮啮合接触区偏离设计要求，出现啮合偏载，齿轮运转过程中齿面接触应力超过了材料的屈服强度极限。

3）严格控制差检壳的主从动齿轮安装位置的垂直度及偏置距误差，保证后桥主动、从动锥齿轮的安装位置。

4）提高材料的纯净度，最大限度地减少非金属夹杂物等影响因素。

（下转第57页）

从分析结果看出，加强圈加厚，对减壳接触面的滑动量影响很大。原因是加强圈和桥壳焊接在一起，而载荷作用于桥壳，由于桥壳和加强圈是主动变形，而减壳是被动变形，所以加强圈尺寸的影响比减壳尺寸影响大。

3）从图5可以看出，接触面上部大概45°位置滑动量最大，因此在此处打孔，并插入定位销，可以达到阻止滑动的目的，分析结果见表3。

表3　定位销对接触面间的滑动量的影响

	螺栓预紧力/N	Cslip接触面间的滑动/mm
现用结构	57 142	0.334
加定位销结构	57 142	0.105

由表3可以看出，加定位销大大降低了接触面的相对滑动量。定位销结构如图7所示。

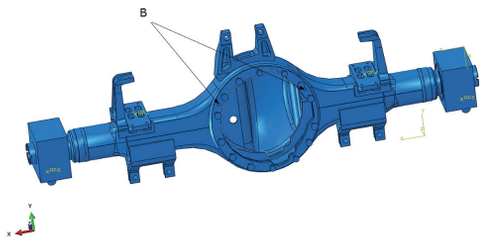


图7　定位销结构

结论

通过分析对比，可以看出，加定位销可以大大降低减壳接触面的滑动量，这个方案是首先推荐的。在保证安装尺寸不冲突的情况下，可以适当加厚加强圈的厚度，同样能减少减壳接触面滑动量。因为实际螺栓预紧力矩都是在标准范围内给定一个力矩范围，可以适当提高这个力矩范围。不推荐增加减壳法兰面厚度，既增加了质量，还对滑动量没影响。

这些都是针对减壳接触面漏油故障做的分析，实际还要考虑各种因素，比如强度、安装、工艺性等，因此综合考虑后，本文分析结果可以作为参考。

（上接第54页）

参考文献：

[1] 赵小波，张卫青，孙孟祥，等.接触区偏移对螺旋锥齿轮齿根弯曲强度的影响[J]. 机械强度，2013，35（6）：799-803.

[2] 张文博，刘怀举，朱才朝，等.夹杂物对齿轮接触疲劳性能影响的仿真分析[J]. 机械传动，2020，44（11）：14-20，52.

[3] 金林奎.汽车驱动桥齿轮失效分析初探[J].《金属加工》（热加工），2013（17）：23-25.

[4] 张红霞，杨明，位立刚.汽车后桥从动齿轮断齿和齿面损伤失效分析[J].热加工工艺，2011，44（2）：188-190.

[5] 高敏华.齿轮轴断齿失效分析[J]. 金属热处理，1994（9）：35-37.

[6] 杨峰.汽车齿轮断裂失效分析[J]. 金属热处理，2014，39（6）：155-157.

[7] 雷淑梅，匡同春，陈丽凤，等.20CrMnTi钢渗碳齿轮断齿失效分析[J]. 金属热处理，2009，34（10）：88-91.

[8] 陈武亮.机械设备安装质量对零件使用寿命的影响[J]. 工程机械，1997（10）：35-36.

[9] 杨浩天，万腾，赵强，等.齿轮传动合理使用与影响寿命因素分析[J]. 农机使用与维修，2017（11）：37.

[10]秦亮，高国庆，杜伟娟，等.汽车锥齿轮断齿原因分析[J]. 热加工工艺，2010，39（22）：196-198.

[11]匡立文，杨卫祥.汽车转向机小齿轮断齿失效分析[J]. 汽车实用技术，2018（7）：34-36.

[12]李颖，赵永刚.齿轮轮齿折断原因分析及其解决措施[J]. 农业机械，2007（2B）：85.

[13]陈国民. 论我国渗碳齿轮制造中若干问题(上) [J].机械工人（热加工），2007（10）：26-30.