感应淬火齿轮裂纹原因分析与预防

穆玉芹，吕金根，王孟，李中元
山推工程机械股份有限公司　山东济宁　272000

摘要：大型传动齿轮在传动过程中通常承受非常大的应力和冲击，这就需要赋予传动齿轮较高的加工精度、耐磨性及抗疲劳强度，为达到要求的性能，大型传动齿轮的热处理工艺常采用感应淬火工艺方式。针对传动齿轮出现的断齿问题展开讨论，并分析造成齿轮断齿的原因，避免再次出现断齿。

关键词：齿轮断齿；感应淬火；硬化层深度

1　序言

大型齿轮断齿的原因各异，既有原材料裂纹、锻造过程中裂纹、热处理过程裂纹诱导，又有齿轮加工过程裂纹、服役过程中失效裂纹。这些断齿宏观上很难区分裂纹产生的根源。本文对断齿齿轮进行了材料成分、宏观断口、显微金相组织等理化方面的检测，并结合热处理工艺分析了造成齿轮断齿的主要原因，通过改进措施，解决了齿轮断齿问题，以期对后续生产作业发挥指导性作用。

2　齿轮概况

大型传动齿轮材料为45钢，齿顶硬化层深度2.9~7.8mm，齿根硬化层要求≥1.5mm，表面硬度55~60HRC，基体硬度为229~277HBW，齿轮结构如图1所示。

该齿轮的主要工艺流程：下料→锻造→正火→粗车→精车→滚齿→感应淬火→回火→抛丸→精滚。感应淬火工序采用450kW超声频电源，功率80~90kW，频率8500~9500Hz，选择集中加热感应

度的工件，可以选择冷却能力较弱、浓度较高的PAG溶液，同时，也可以适当减小淬火冷却介质流出的量，来减缓冷却速度。在实际生产中，应每隔一段时间检测一次淬火冷却介质的浓度，防止淬火冷却介质因受到污染或长时间放置而使浓度发生变化。在本次试验中，选择浓度为15%的AQ251作为淬火冷却介质，冷却时间30s。

8　结束语

本文以船用柴油机中的凸轮轴为例，简要介绍了凸轮轴在感应热处理过程中几个重要工艺参数的选择，为同行日后做类似的感应热处理提供参考。在本文所采用的工艺参数下，凸轮轴感应淬硬层深可达6.2mm，硬度为62HRC，晶粒度达到7级，各项性能指标均满足要求。

随着工业的不断发展，自动化程度越来越高，相继出现了智能化的感应热处理设备，减少了人为操作的误差，确保了工艺参数的准确性，提高了加工效率，为企业加工高质量的产品奠定了基础。

参考文献：

[1] 雷军，张雷雷，马玉亮，等.柴油机凸轮轴可控气氛渗层的热处理模拟及验证[J].热加工工艺，2021，50（14）：155-158.
[2] 吴元徽.45钢曲轴轴劲中频淬火工艺[J].热处理技术与装备，2018，39（5）：15-16.
[3] 陶昆.感应热处理在内燃机气门杆端淬火中的应用[J].内燃机与配件，2020（3）：43-45.
[4] 张晓云，杨雪，于彦锋，等.柴油机凸轮轴感应淬火工艺研究[J].金属加工（热加工），2021（5）：35-37.

MW 20210807

器，加热后冷却介质采用水冷却，低温回火4h。

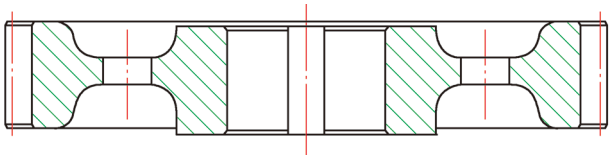
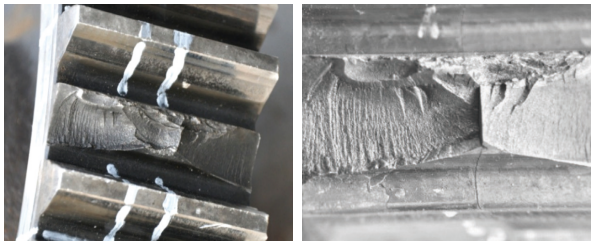


图1　传动齿轮结构示意

3　断齿齿轮分析

断齿齿轮宏观形貌如图2所示，下面主要从宏观和微观两个方面进行观察分析。



a）齿断形貌1　　b）断齿形貌2

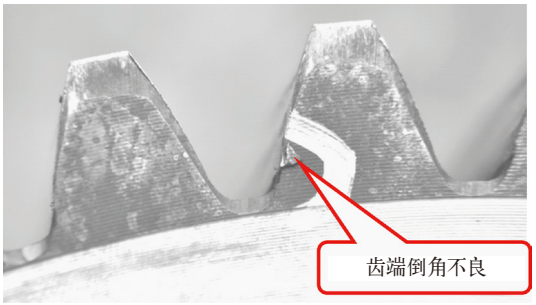
图2　齿轮断齿宏观形貌

3.1 宏观分析

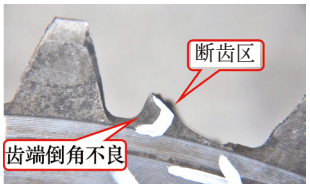
对齿轮宏观方面进行观察分析，发现该齿轮存在以下问题。

1）该齿轮齿根部倒角不良，未按照要求倒角，并有部分倒角处存在磕碰现象，如图3所示。

2）从齿轮齿部齿面磨损情况可以看出该齿轮存在偏磨现象，齿轮齿部一端异常磨损，而另一端未出现磨损现象（见图4），由此判断该齿轮可能存在

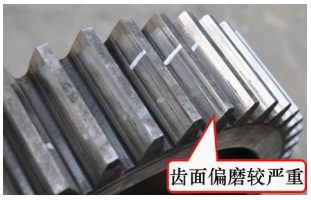


a）齿轮齿沟

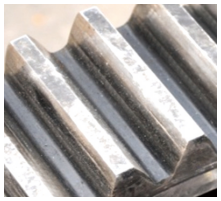


b）齿轮断齿区

图3　齿轮倒角不良



a）一端齿面磨损较严重

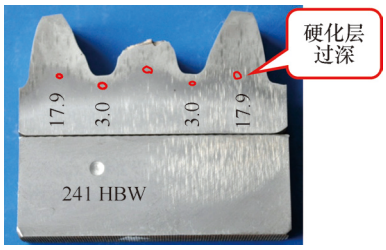


b）另一端未出现磨损现象

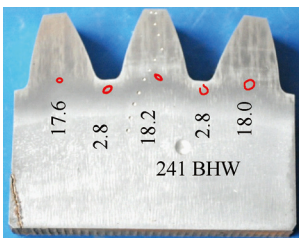
图4　齿轮偏载异常磨损

装配或齿轮齿向问题。经检测该齿轮齿形齿向均无问题，说明该齿轮装配存在问题。

3）对断齿齿轮进行剖切检测，分别在断齿位置和未出现问题区各取一个试样，对试样进行硬度检测。经检测齿轮的硬化层深度过深，齿顶部硬化层深度为17.9~18.2mm，大大超出工艺要求的2.9~7.8mm，整个齿部完全淬透；齿轮齿根部硬化层深度为2.9~3.0mm，满足≥1.5mm的要求，基体硬度为241HBW满足要求，检测位置如图5所示。



a）断齿部位硬化层



b）齿轮非断齿区硬化层

图5　硬化层深度检测

3.2 微观分析

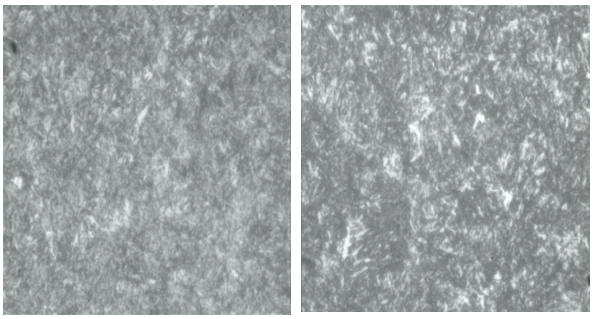
宏观检测后，我们对试样进行金相及扫描电镜分析，对试样的非金属夹杂物情况检测结果见表1。各种类型的非金属夹杂物均满足要求。

通过对齿轮硬化区、过渡区、心部的金相组织进行分析，硬化区组织为回火马氏体，晶粒度为9

表1　非金属夹杂物　　（级）

A类	B类	C类	D类
0	0.5	0	0.5

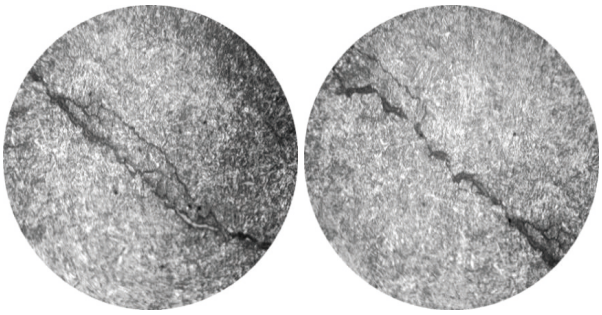
级；心部组织为回火索氏体+少量铁素体，晶粒度8级，如图6所示。所有金相组织结果均满足要求。



a）齿轮硬化区组织　　b）齿轮心部组织

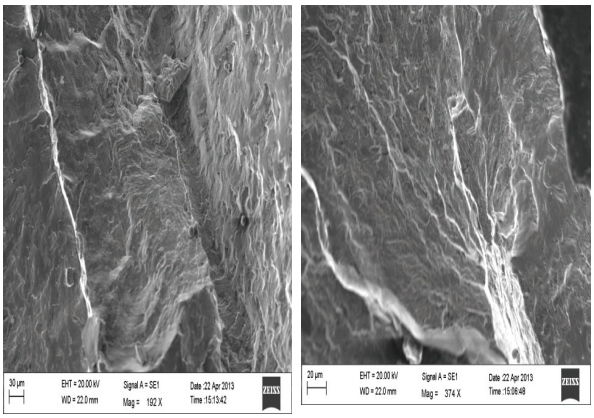
图6　金相组织（400×）

通过对断裂齿部进行金相分析和EVO 18型扫描电镜分析发现，齿断口处的形貌具有准解理断裂的特点，断口具有平坦的“类解理”小平面、微孔及撕裂棱组成的混合断裂（见图7~图9），由此判断齿轮断裂类型属于准解理断裂[1]。从图8、图9可以看出：该件断口处属于齿面碾压应力裂纹（剥落）。



a）断齿区裂纹形态　　b）非断齿区裂纹形态

图7　裂纹处的金相照片



a）断齿断口处撕裂棱　　b）断齿断口处微孔

图8　断齿断口处形貌

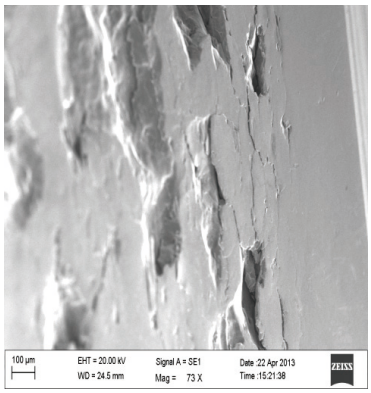


图9　齿面碾压应力裂纹形貌

4　预防与措施

1）针对硬化部淬火马氏体回火不良，导致齿面发生碾压应力裂纹，易形成断裂源问题，应该进行充分回火，必要时增加回火时间，以消除不均匀组织。

2）针对硬化层过深（齿部淬透）现象，工件在感应淬火时应该控制加热功率，减少加热时长，同时应该控制工件冷却速度。冷却速度过快，淬火烈度过大，组织转变剧烈，组织应力无法释放，表面压应力转化为拉应力，并在应力达到一定程度后造成表面裂纹。

3）齿轮齿端部在倒角加工时，不仅要严格按照工艺要求进行倒角，应避免倒角过大或者倒角过渡不圆滑，而且要注意倒角处发生磕碰现象，做好齿轮防护等工作。

4）加强装配过程控制，齿轮安装后检测安装基准面的端径跳动，控制在0.1mm以内，保证装配精度，避免偏载问题。

5　结束语

综上所述，造成传动齿轮断齿的原因是由多方面的综合因素引起的，在不断改进优化齿轮感应淬头工艺参数时，重点从加热功率、加热时间、冷却速率，以及回火时间与温度上进行调整、控制工艺，以减少或避免齿轮裂纹现象发生。

参考文献：

[1]　冯显磊，李炎，胡良波，等.推土机齿轮常见裂纹分析与预防[J]. 金属加工（热加工），2015（23）：58-61.

MW 20210807