变速箱摩擦片断裂原因分析及改善措施

扫码了解更多

■ 李若国，张庆武，董道智

摘要：以某型号推土机的变速箱摩擦片出现的早期断裂为案例，对故障件的失效状态、断口的宏观和微观特征进行分析，推断摩擦片早期失效的原因，提出了预防热处理缺陷的有效措施。

关键词：摩擦片断裂；过热特征；晶粒粗大；预防措施

推土机主要在湿地、沙漠、矿山、大坝等野外工作，工况恶劣，具有负荷大、冲击强、持续工作时间长等特点。目前，推土机大多采用行星式动力换档变速箱，具有传递转矩大、传动比高、结构紧凑、输入和输出能实现同轴等优点。

摩擦片是离合器的关键零件，不仅要求摩擦复合材料黏结强度高、耐磨性好，而且要求芯板韧性好、耐冲击强。为此，摩擦片工艺过程复杂，芯板需要进行调质、淬火等热处理工序，技术要求高。

本文以摩擦片早期断裂故障为案例，通过对故障件失效形式、断口特征等方面的检查与分析，借助光谱元素测量仪、蔡司显微镜、显微硬度计等仪器，对故障件的化学成分、断口的微观特征、金相组织、硬度及硬化层等方面的检测，最终找到断裂的原因，然后通过芯板淬火工艺优化及对热处理过程的质量管控，排除该故障。

1. 故障信息

（1）工况信息　某型号推土机在内蒙古施工，主要用于太阳能热风发电站的基建工作，推平沙丘和沟壑，平均每天工作时间约14h。该车在工作1600h左右时，变速箱内部出现异响，服务人员检查发现变速箱内部摩擦片断裂。

（2）失效形式　故障件的断裂状态如图1所示，裂纹从摩擦片的花键根部呈放射状延至外沿，出现贯通性整体断裂，裂开的两部分断口吻合，无碎片、颗粒等脱落。从铜基摩擦材料的状态看，润滑油槽清晰，无明显的磨损、脱落、烧结等异常状态，由此判定，摩擦片断裂不是由于超负荷传递转矩造成的。

图1　摩擦片断裂形式

图2是断口的宏观状态，断口齐平，呈直线状态，并且无塑性变形，断面处的摩擦材料完好，无损失、脱落等状态。由此判定芯板断裂为脆性断裂。

由摩擦片的另一处故障点图3可看出，微裂纹起源于摩擦片的花键根部，工作时摩擦片不断地结合、分离，在旋转扭矩和交变应力的作用下，裂纹逐步增大

图2　断口宏观状态

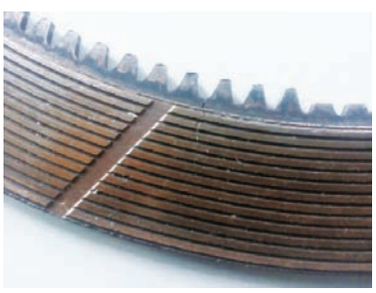


图3　摩擦片裂纹源

并逐渐向外延伸，直至出现整体性断裂。

2. 故障原因查找与分析

（1）材质化验　摩擦片芯板的材质是45钢，整体调质后，对花键的表面进行高频感应淬火。将摩擦材料在平面磨床上去除后，取试样如图4所示，依据国标《碳素钢和中低合金钢多元素含量的测定火花放电原子发射光谱法》（GB/T4336—2016）对芯板材质进行化验，结果如表1所示。

由表1可知：齿轮的化学成分C、Si、Mn、Cr等含量符合标准。由此推断，原材料合格，不是造成摩擦片早期断裂的主要因素。

（2）芯板硬度检验　将故障件在电火花切割机上取样，如图5所示。在温度20℃、湿度50%的条件下，根据国标《钢件渗碳淬火回火金相检验》（GB/T25744—2016）对硬度、淬硬层深度进行检查。花键的齿部硬度要求≥40HRC，实测54.8HRC，硬度合格。

用4%硝酸酒精溶液腐蚀试样，花键淬硬层要求4.5～9.0mm，实测6.0mm，淬硬层深度合格；齿根部淬硬层深度要求0.7～2.5mm，实测值为0.9mm。由此判定，花键的硬度和淬硬层深度等符合图样要求，不是造成摩擦片早期断裂的主要因素。

（3）非金属夹杂物检验　在4XC金相显微镜下检测非金属夹杂物的含量，如图6所示，依据《钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法》（GB/T 10561—2005），芯板中非金属夹杂物的含量如表2所示。从结果可看出，原材料中硫化物、氧化铝等非金属夹杂物含量符合技术要求，不是发生脆性断裂的主要原因。

（4）脱碳层深度检验　利用光学显微镜，观察故障件花键齿的脱碳层深度，如图7所示。采用测试5点计算平均值法，单侧脱碳层的深度为0.03～0.07mm，在技术要求≤0.1mm的范围内，没有严重的脱碳特征。

（5）原因分析　依据《金属显微组织检验方法》（GB/T13298—2015）对试样进行检验，微观组织形态如图8所示，花键的金相组织为回火马氏体，晶粒度8级，金相组织粗大，晶界变黑，有严重的沿晶裂纹，并且有过热的特征，摩擦片早期断裂是脆性过大引起的芯板脆性断裂。

通过故障件的生产批次号，对摩擦片的淬火工序进行追溯。作业基准书中，淬火温度要求845℃。根据操作者记录，在对加热炉进行设备检点时发现，温度显示仪表出现故障，仪表温度显示为设定温度845℃，而通过校核实际温度已达到950℃，远高于Ac_3温度，造成芯板过热，从而引起奥氏体晶粒粗化。粗

图4　摩擦片芯板材质化验取样

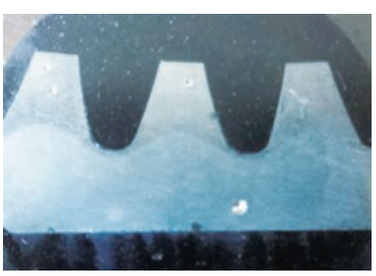


图5　摩擦片硬度及硬化层检查样块

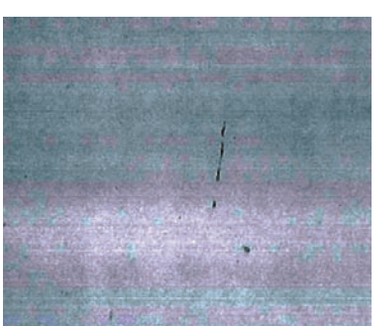


图6　非金属夹杂物（100×）

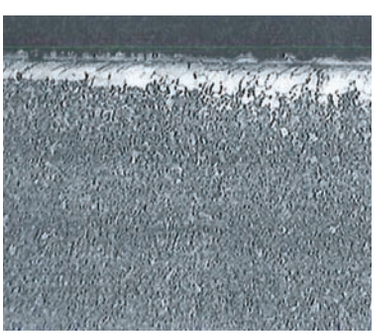


图7　脱碳层深度（100×）

表1　芯板化学成分（质量分数）　（%）

元素	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
标准值	0.42～0.50	0.17～0.37	0.50～0.80	≤0.035	≤0.035	≤0.25	≤0.030	≤0.25
测量值	0.420	0.250	0.650	0.009	0.012	0.015	0.009	0.018

表2　非金属夹杂物检测

非金属夹杂物	细系	粗系
A(硫化物类)	1.0	0.5
B(氧化铝类)	1.0	＜0.5
C(硅酸盐类)	＜0.5	＜0.5
D(环状氧化物)	1.0	＜0.5

大的奥氏体晶粒存在，导致芯板的强度和韧性降低，力学性能下降，脆性转变温度升高，在淬火时，由于芯板为薄片形状，花键根部应力集中，增加了淬火时裂纹的倾向，导致在花键根部出现微观裂纹。工作过程中承受交变应力和冲击力，经过一定时间后，造成摩擦片芯板的早期断裂。

3. 工艺改善及预防措施

（1）工艺改善　对库存的同批次淬火的芯板取样抽检，金相组织存在相同特征，为了避免装机后出现早期断裂的隐患，对同批次淬火处理的件进行标识、隔离。为了最大限度地降低生产成本，我们进行了反复试验，在不同的温度下，将摩擦片芯板进行退火、正火或高温回火，使粗大晶粒重新奥氏体化，晶粒得到细化。随后，再对芯板加热至Ac_3以上30～50℃进行淬火，经检验，淬火后金相组织马氏体细小均匀，晶粒度为马氏体4级，表面硬度56HRC，心部硬度37HRC，达到图样技术要求。通过样件试装及市场验证，工艺改善后，摩擦片的强度、韧性等力学性能提升，外部市场上再未出现芯板断裂故障。

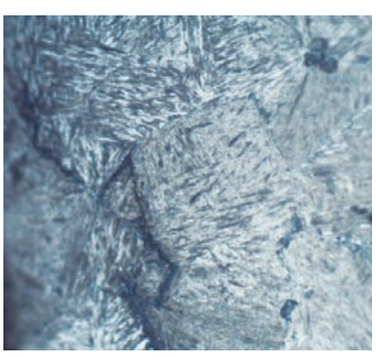
（2）预防措施　热处理工序是摩擦片生产过程中的关键和重要工序，同时它具有批量大的特点。为了最大限度地减少不合格品的出现，需要定期对设备进行检查，特别是温度显示仪、湿度仪表等仪表类部件。同时，对操纵人员的专业技能、人员变更、岗前培训等方面加强管理。另外，在热处理工序的工艺文件中将加热温度、保温时间、冷却方式等工艺参数进行完善和固化。

4. 结语

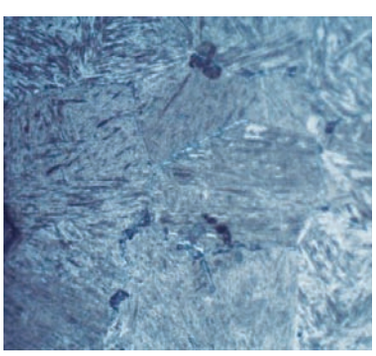
通过对摩擦片早期断裂故障的失效特征分析，并借助光谱元素测量仪、蔡司显微镜、显微硬度计等仪器，对化学成分、断口的微观特征、金相组织、硬度及硬化层等方面进行检测，确定花键的齿面金相组织晶粒粗大，存在过热特征，淬火时温度过高是造成故障的主要原因。

（1）在淬火工序中，因加热炉设备温度仪表失灵、传感器损坏等造成显示的参数与实际不符时，需要对该批工件进行金相组织、硬度等分析，对有异常特征如过烧特征、过热特征、欠热特征等应及时进行隔离，不能心存侥幸、盲目装机。针对不同的状况，通过反复试验如中间增加退火、正火或高温回火等进行改善和验证，达到技术要求后方能装机。

（2）热处理工序是机械零件的关键工序，具有批量化的特点。因此，提前预防热处理缺陷对于提高产品质量、降低不合格率和降低生产成本尤为重要。从人、机、料、法、环等方面要定期检验，对加热炉的温度仪表、操纵者专业技能、人员变动、岗前培训等方面的管理和监控尤其重要。



(a)



(b)

图8　齿部沿晶裂纹状态（500×）

参考文献：

[1] 李若国. 一种装载机用液力变速器的研究[D]. 济南：山东大学，2015：12-16.

[2] 陈吉祥，孙守猛，李若国. 推土机用薄片齿轮断裂分析及热处理工艺优化[J]. 工程机械与维修，2017(12)：94-95.

[3] 陆凌凯，曹欢玲，许小锋. 45钢正常温度淬火和过热、欠热淬火的组织硬度试验[J]. 科教导刊，2016（9）：44-45.

[4] 赵程，杨建民. 机械工程材料[M]. 北京：机械工业出版社，2003：77-80.

[5] 李若国，陈吉祥，孙守猛. 动力换档变速器齿轮失效分析及改善对策[J]. 工程机械，2018，49（2）：42-46.

作者简介：李若国、张庆武、董道智，山推工程机械股份有限公司。

MW 20180412