● 材料失效分析 Material Failure Analysis ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.11.017

20CrMnTi 钢拖拉机动力输出轴的断裂失效分析

李欣然[1],李 英[2],宋一辰[2],李 平[2],李锋军[3]
(1. 河南理工大学 机械与动力工程学院,河南 焦作 454003; 2. 河南理工大学 材料科学与工程学院,河南 焦作 454003; 3. 中国一拖集团有限公司,河南 洛阳 471004)

摘 要:某拖拉机在田间旋耕作业时,其动力输出轴发生断裂现象。通过断口形貌、化学成分、金相组织与硬度等方面进行综合分析,以探索动力输出轴失效原因。结果表明,动力输出轴的化学成分、金相组织和硬度均符合技术要求,断口中有少量夹杂物;断裂位置为轴头花键和齿轮之间的变径光轴处,断口形貌呈现棘轮花样,为多源扭转疲劳断裂;裂纹源沿台阶方式在轴断面扩展,在交变扭转载荷的反复作用下,由于应力集中而导致断裂。

关键词:拖拉机;20CrMnTi 钢;动力输出轴;断裂失效分析

中图分类号: TG245 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)11-1074-03

Fracture Failure Analysis of 20CrMnTi Steel Tractor Power Output Shaft

LI Xinran[1], LI Ying[2], SONG Yichen[2], LI Ping[2], LI Fengjun[3]
(1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 3. China Yituo Group Co., Ltd., Luoyang 471004, China)

Abstract: The power output shaft of a tractor breaks when it was rotating in the field. The fracture morphology, chemical composition, metallographic structure and hardness were comprehensively analyzed to explore the failure reasons of the power output shaft. The results show that the chemical composition, microstructure and hardness of the power output shaft meet the technical requirements, and there are a few inclusions in the fracture. The fracture location is the tapering optical axis between the spline and the gear of the shaft head, and the fracture morphology presents a ratchet pattern. The multi-source torsional fatigue fracture is caused by the crack source spreading along the step mode in the shaft section. Under the repeated action of alternating torsional load, the fracture is caused by the stress concentration.

Key words: tractor; 20CrMnTi steel; power output shaft; failure analysis

我国作为一个农业大国,农业一直是国民经济的命脉,农业的发展进步很大程度上依靠农具及农业机械的推广应用[1]。动力输出轴作为拖拉机动力输出装置中的关键部件之一,拖拉机通过动力输出轴和皮带轮等部件将发动机的动力传递给配带的如旋耕机、播种机、脱粒机等作业机械,完成各种所要求的作业[2]。动力输出轴在作业过程中承受复杂的交变扭转和弯曲应力,常常出现疲劳裂纹和断裂现象,以及次生的故障和零件损坏[3-5],导致正常作业无法进行。因此,要求动力输出轴需具有很好的力学性能和使用性能。

某拖拉机在田间旋耕作业时,动力输出轴头花键和齿轮之间的光轴处发生断裂及油封渗油。本文通过对该动力输出轴进行断裂分析,探讨其失效原因。

1 宏观断口

图 1 为断裂的动力输出轴,可清晰观察到断口与零件轴线呈 45°夹角。宏观断口形貌如图 2 所示,可见断口呈现棘轮花样,属于典型的疲劳断裂,断口大部呈现银灰色的金属光泽,少部分呈现暗灰色,轴外侧 A 处可见有明显的外力挤压痕迹。表明拖拉机在旋耕作业时,在启动或转弯等某一瞬间,动力输出轴可能收到了大的扭转外力作用,引起应力集中而断裂。同时根据断口形貌可初步确定裂源区、扩展区和瞬断区。有多处疲劳源;扩展区呈螺旋台阶状,裂纹沿螺旋方向扩展,棘轮花样的每一瓣均可见年轮

收稿日期:2020-06-22
基金项目:国家自然科学基金(51275156);固体润滑国家重点实验室开放课题(LSL-1702);河南省高校基本科研业务费专项资金(NSFRF170502)
作者简介:李欣然(1999-),女,湖北十堰人,本科在读.研究方向:机械制造及自动化、失效分析等.电话:13103914691,E-mail:ranxinlee68@163.com.
通讯作者:李 平(1968-),湖北大悟人,博士,教授.研究方向:铸造技术、材料腐蚀、磨损和断裂理论及防护等方面的研究.电话:13849509905,E-mail:leeping68@163.com

图 1 断裂的动力输出轴
Fig.1 The broken power output shaft

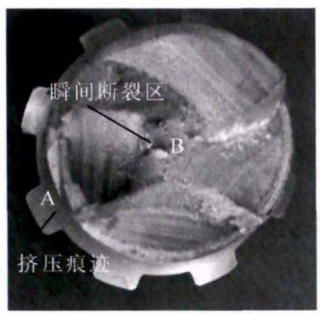

图 2 断口宏观形貌
Fig.2 Macro morphology of fracture of the power take-off shaft

条纹（海滩线）；瞬断区主要为棘轮花样之一瓣，少部分位于断口中央。从图 3 瞬断区轴中间部位 B 处扫描电镜形貌可以看出，断口区有很多大小不一的韧窝，中间有少量夹杂物，表明轴的断裂为韧性疲劳断裂。

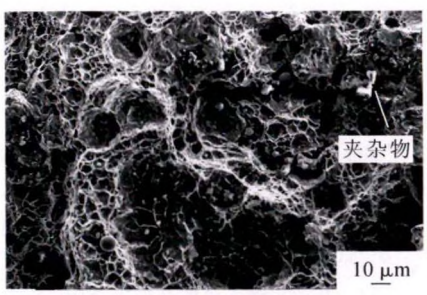

图 3 瞬断区 B 处微观形貌
Fig.3 Micro morphology of B area at transient breaking area

2 化学成分检测

动力输出轴的材料为 20CrMnTi 钢，经渗碳淬火后具有硬而耐磨的表面与坚韧的心部，在动力输出轴上切取部分材料作为光谱试样，轴向剖开压平后使用 Q8 型光电直读光谱仪按照 GB/T4336-2016《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（常规法）》检测动力输出轴的化学成分，并与 GB/T3077-1999《合金结构钢》中规定的 20CrMnTi 钢相比（表 1），C、Si、Mn、S、P、Cr、Ti 元素的含量均符合相应的技术要求。

3 金相检验

从断裂轴上截取金相试样，经过打磨抛光之后，用 4%硝酸酒精溶液进行腐蚀。图 4 为其金相组织照片，组织为回火索氏体，20CrMnTi 与轴钢调质处理组织相符。

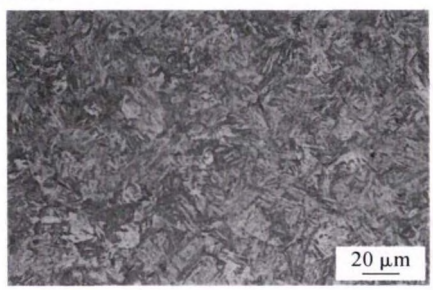

图 4 断裂轴的金相组织
Fig.4 Microstructure of the failed shaft

4 硬度检测

输出轴的热处理方法为调质后表面渗碳，采用洛氏硬度计对金相试样进行硬度检测。心部硬度检测部位为距光轴表面 8 mm 处，表面硬度检测部位为轴头花键部位，在光轴处用维氏硬度计检测轴表面有效硬化层深，即用 1 kg 的载荷进行测量，直至维氏硬度值为 550 HV1，结果见表 2。可见，断裂轴的硬度和金相组织等检测结果均符合技术要求。

5 分析与讨论

动力输出轴的制造工艺依次为：毛坯–正火–齿坯加工–磨校直基准–铣渐开线花键–铣矩形花键–

表1 动力输出轴的化学成分 *w* (%)
Tab.1 Chemical composition of fractured shaft

	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ti	Fe
断裂轴实际成分	0.20	0.31	0.89	0.027	0.021	1.03	0.056	余量
GB/T3077-1999	0.17~0.23	0.17~0.37	0.08~1.10	≤0.035	≤0.035	1.00~1.30	0.04~0.10	余量

表2 断裂轴的检测结果
Tab.2 Measurement result of fractured shaft

	硬度 HRC		金相组织			有效硬化层深 /mm
	表面	心部	碳化物	残余奥氏体	心部铁素体	
断裂轴	61.3 1 级	61.6 2 级	61.2	32.9	32.5	32.4
技术要求	1 级 58~64	1.35 31~44	1~5 级	1~6 级	1~4 级	1.15~1.50

感应淬火-磨外圆-成品检验。动力输出轴的材质为20CrMnTi 钢，力学性能要求为：抗拉强度 $\sigma_b \geqslant$ 1 080 MPa，屈服强度 $\sigma_s \geqslant$850 MPa，伸长率 10%，冲击功 $A_k \geqslant$55 J。动力输出轴断口的形貌分析证明，其失效机制为多源高周扭转疲劳断裂，断裂区位于轴头花键（外径为 48.0 mm）和齿轮（外径为 50.8 mm）之间的变径光轴处（直径为 37.0 mm），是轴运行过程中的薄弱部位，该位置为应力集中区域[6-8]。从上述分析可知，此动力输出轴采用中系列矩形花键，并采用 20CrMnTi 渗碳淬火进行处理，大大增强其表面硬度，零件的疲劳强度得到提升，同时轴内部仍具有较好的韧性。通过对其硬度和金相组织的检测分析，动力输出轴本身材质符合要求，说明热处理方面没有问题。

拖拉机在启动、转弯或者加速时，发动机的动力通过动力输出轴和皮带轮传递给旋耕机等作业机具，此时动力输出轴受到很大的瞬时应力，承受交变扭矩作用[9,10]，特别是启动作业时，启动扭矩可达平均工作扭矩的 46.5 倍[10]，因而对其使用性能要求极高。旋耕机等作业机具工作过程中，由于作业工况与环境的复杂性，动力输出轴在交变载荷的反复作用下，在输出轴的变径部位由于应力集中，萌生多个裂纹，多个裂纹逐渐扩展到一定程度在瞬断区交汇造成瞬间断裂。该动力输出轴断口形貌由多个裂纹源扩展在输出轴光轴瞬断区交汇形成。该动力输出轴的断裂可能是由于在启动或加速阶段，受到过大的瞬时扭转载荷的作用所引起。

6 结论

（1）拖拉机动力输出轴的断裂位置为轴头花键和齿轮之间的变径光轴处，在断口内发现夹杂物。

（2）动力输出轴断口形貌呈现棘轮花样，为多源扭转疲劳断裂。裂纹源在动力输出轴端面沿台阶方式旋转扩展，在拖拉机启动或加速阶段受到过大的瞬时载荷和交变扭转载荷的反复作用而发生断裂。

参考文献：

[1] 易良均. 拖拉机动力输出机构故障分析及基于有限元的结构改进[D]. 长春：吉林大学, 2016.
[2] 闫祥海，周志立，贾方. 拖拉机动力输出轴动态转矩载荷谱编制与验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19):74-81.
[3] 吕嫣. 750 拖拉机动力输出轴断裂分析及解决措施[J]. 装备制造技术，2015,7:164-165.
[4] 薛建中，张宾，李梅芹，等. 拖拉机动力输出轴断裂原因分析及结构改进[J]. 拖拉机与农用运输车, 2012, 39(1):45-46.
[5] 邢鹏飞，朱文娟，郭付友. 拖拉机动力输出轴改进设计[J]. 拖拉机与农用运输车, 2017, 44(6):55-56, 60.
[6] 徐凌云，吉静，郅惠博. 输出轴断裂原因 [J]. 金属热处理，2019，44(增刊)：38-40.
[7] 李娟，王军，李桂芹. 减速机输出轴断裂原因分析[J]. 金属热处理，2011(9)，36(增刊)：337-341.
[8] 张李锋，段江. 减速机输入轴断裂失效分析 [J]. 热加工工艺, 2019, 48(22):178-182.
[9] 张庆. 60HP 拖拉机动力输出轴断裂原因分析[J]. 金属加工（热加工），2014, 5:38-41.
[10] 杨永久. 拖拉机动力输出轴损坏原因分析与预防措施. 农机使用与维修, 2018, 7:69.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 280 元。

邮购咨询：李巧凤 029-83222071，技术咨询：13609155628