

17CrNiMo6 齿轮轴断裂原因分析及改进

李妍缘¹, 赵兴明², 赵东辉¹

(1. 郑州电力高等专科学校, 郑州 450004; 2. 郑州电力机械厂, 郑州 450000)

摘要: **目的** 研究常用的减速机高速工作中, 材料为 17CrNiMo6 齿轮轴断齿现象的原因以及改进措施。**方法** 通过化学成分分析、硬度检测、显微组织分析等方法, 研究分析 17CrNiMo6 齿轮轴断齿现象的原因, 并根据产生断齿的原因提出改进措施。**结果** 17CrNiMo6 齿轮轴断裂为疲劳断裂, 断齿的主要因素为调制热处理工艺不当、非金属杂物超标产生应力集中现象等。**结论** 通过改进热处理工艺、优化结构设计、提高加工精度等措施可改善 17CrNiMo6 齿轮轴的断齿现象。

关键词: 17CrNiMo6; 断裂; 应力集中; 包装设备

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)07-0039-04

Cause for Fracture of 17CrNiMo6 Gear Shaft and its Improvement

LI Yan-yuan¹, ZHAO Xing-ming², ZHAO Dong-hui¹

(1. Zhengzhou Electric Power College, Zhengzhou 450004, China; 2. Zhengzhou Electric Power Machinery Factory, Zhengzhou 450000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the causes for the tooth breaking of 17CrNiMo6 gear shaft in the high-speed work of the commonly used reducer and the improvement measures. The causes for the tooth breaking of 17CrNiMo6 gear shaft were studied and analyzed by means of chemical composition analysis, hardness test, microstructure analysis and other methods. The improvement measures were proposed according to the causes for tooth breaking. The results showed that the factors such as the fatigue fracture, the improper preparation of heat treatment process and the stress concentration caused by nonmetallic debris that exceeded the standard were the main causes for the tooth breaking of 17CrNiMo6 gear shaft. By improving the heat treatment process, optimizing the structure design, improving the processing accuracy and other measures, the tooth breaking of 17CrNiMo6 gear shaft can be improved.

KEY WORDS: 17CrNiMo6; fracture; stress concentration; packaging equipment

常用于包装设备、印刷机械装备、电力设备里的一级齿轮减速器是由相互平行的 2 根轴上连接齿轮产生啮合关系而减速的, 高速级轴结构多为齿轮轴。根据减速机齿轮轴的有关技术资料显示, 该轴采用 17CrNiMo6 重载齿轮钢材料制成。此种材料属于低碳低合金渗碳高强度钢, 常用于机械设备的核心部位, 经过渗碳、淬火及低温回火等热处理工艺, 并新增了几种合金材质, 以提高齿轮轴的耐磨性、表面硬度, 且心部韧性好、抗冲击、伸长率良好, 因此多用于高速、重载、有冲击载荷的环境, 应用广泛, 是一种性能优良的重载齿轮高强度钢^[1-3]。

在实际生产运行过程中, 发现某包装设备的减速器箱体中的高速齿轮轴容易出现断齿现象。齿轮轴的常用加工工艺流程一般为: 下料、锻造、首次正火、粗加工、再次正火、精加工、渗碳淬火、磨削等。相关研究表明不同设备也会遇到齿轮的断齿现象, 如黄建斌^[4]研究了 18CrNiMo7-6 钢锥齿轮轴纵裂原因分析, 发现在实际选材中应注意适当调整其合金元素含量, 热处理冷却工艺应注意采用较慢的冷却速度, 否则其高淬透性会带来淬火开裂的不良后果; 卫戩^[5]分析了 42CrMo 钢齿轮轴断齿的原因, 发现原热处理工艺不合理会导致齿轮根部未淬火、硬度分布不均、根

收稿日期: 2017-02-27

基金项目: 郑州电力高等专科学校科研项目 (ZEPCKY2016-08)

作者简介: 李妍缘 (1979—), 女, 硕士, 郑州电力高等专科学校讲师, 主要研究方向为机械设计及自动化。

部存在残余拉应力及块状铁素体,同时齿轮根部加工不良,滚齿刀痕明显是导致齿轮断齿的主要原因;雷旻^[6]研究了减速机高速齿轮轴的断裂失效,发现其断裂方式为多源疲劳脆性断裂,其主裂纹源萌生于高速轴键槽的受力侧,表面硬度低、屈服强度低、无有效的表面强化硬化层是导致齿轮轴发生早期疲劳破坏的主要原因。文中从原材料成分、热处理工艺等方面对该齿轮的断齿现象进行研究分析,并根据分析结果提出解决方案,改善断齿现象,以提高齿轮轴的使用寿命。

1 分析

利用 HRS-150 洛氏硬度计对齿轮表面进行硬度检测,测量参照 JB/T 6395—2010。在齿轮轴的断齿处取芯部金相试样,分析其渗层组织和评价夹杂物等级。测试过程中参照 JB/T 6141.3—1992《重载齿轮渗碳金相检验》和 GB/T 10561—2005《钢中非金属夹杂物显微评定方法》。

1.1 洛氏硬度检测

对齿轮轴断齿表面进行清洗、抛光,然后随机无规则地选取 5 个位置进行检测,检测数值分别为 55.5HRC, 56.2HRC, 55.8HRC, 55.7HRC, 56.3HRC, 其平均值为 55.9HRC。JB/T 6395—2010 要求为 55~62HRC。

1.2 成分分析

对齿轮断齿处的材料进行化学成分分析,检测结果见表 1,可知断齿处材料的化学成分符合标准要求。

表 1 断齿处合金成分分析结果(质量分数)

Tab.1 Broken teeth alloy composition analysis results %

元素	JB/T 6395—2010 要求	试样		
		测点 1	测点 2	测点 3
Si	$0.15 \leq C \leq 0.4$	0.26	0.36	0.35
Cr	$1.5 \leq Cr \leq 1.8$	1.73	1.77	1.71
Ni	$1.4 \leq Ni \leq 1.7$	1.42	1.43	1.52
Mo	$0.25 \leq Mo \leq 0.35$	0.27	0.27	0.28
Mn	$0.4 \leq Mn \leq 0.6$	0.46	0.52	0.51

1.3 金相分析

断裂齿轮心部金相组织见图 1,可以看出心部为回火马氏体和少量针状铁素体^[7]。分析其金相组织,观察发现该齿轮材料中含有非金属夹杂物。根据 GB/T 10561—2005 评定为 D 类球状氧化物,杂物等级为 3 级,夹杂物含量超标。

1.4 断齿处宏观分析

齿轮断裂部位宏观照片和断齿处显微镜宏观照

片见图 2,可清晰看出轮齿的断裂位置,裂纹起源于轮齿上靠近啮合的齿根处,裂纹沿啮合面向下延伸进而发生断裂。观察图 2b,发现在断裂处裂纹产生区纹路表面略平缓,断裂位置在距离上表面 5.2 mm 以内。裂纹延展区内贝纹线趋于平缓。瞬间断裂区为椭圆形,在裂源的对面,纤维状的断裂口^[8]说明减速器主轴受扭转弯曲应力作用,应力集中部位在啮合面次表层。断裂口处瞬间断裂区域较小、形状略圆,大约占全部断口面积的 1/7,表明齿轮轴整体受力较小,属于典型性高循环疲劳断裂。疲劳裂纹扩展区推进的贝纹线标志着交变应力在齿轮部件的断口处留下的痕迹。断齿表面由于反复受到挤压和摩擦,使得该区域较为光滑,甚至呈细瓷状。由此可知,疲劳源于齿

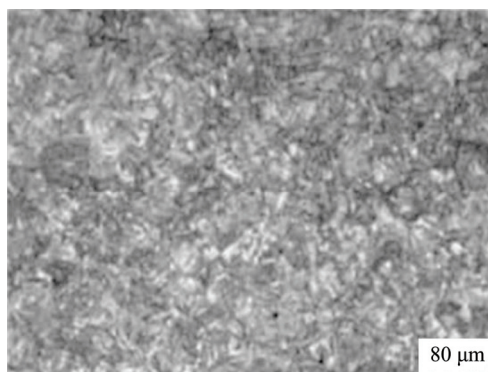
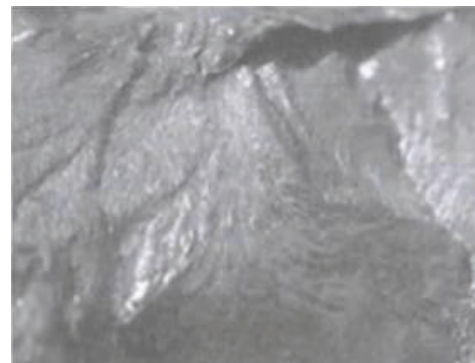


图 1 断裂齿轮心部金相组织
Fig.1 The microstructure of fracture core



a 断裂部位宏观照片



b 断齿处显微镜照片

图 2 齿轮断裂照片
Fig.2 The broken gear photos

根处, 疲劳源位置有多条细小的台阶条纹, 说明疲劳源处出现了应力集中现象。此外, 断齿面疲劳区域还有河流形状的台阶条纹, 这种条纹通常因受到高应力作用而产生^[9]。

齿轮齿面间的相互结合受力作用属于接触传递扭矩, 高循环疲劳裂纹的产生与材料内部组织的抗弯和抗剪强度等因素有关。因为基体中切断抗力较弱相的存在, 例如铁素体, 在外界剪切应力的不断作用下会发生相对滑移变形, 进而产生裂纹^[4]。研究发现, 在金属合金组织中由于铁素体具有较小的屈服强度, 易萌生微裂纹, 但是在微裂纹产生前, 通常先发生滑移或者塑性变形。再者, 从图2金相组织中发现材料含有少量针状铁素体, 铁素体在塑性变形过程中产生的微裂纹不一定全部与主裂纹交汇, 会降低整个主应力面的应力承受度。由于组织中铁素体的存在, 特别是晶界位置处的铁素体会加速金属合金材料的断裂^[10]。裂纹尖端塑性区附近和扩展区的沿晶区断裂位置组织略显粗大, 非沿晶区断裂位置组织的较细小, 说明两部位间组织均有较明显的差异。

2 齿轮断齿原因分析

从表1中可看出其硬度符合要求, 从表2分析结果看, 断裂齿轮面的化学成分也没超出标准规定。从图2可看出, 材料的显微组织结果基本符合要求, 说明渗碳过程中材料的碳势基本稳定, 但在组织中发现有非金属夹杂物, 轮齿在受到剪切应力的作用下, 在材料内部非金属夹杂物处会产生应力集中现象。当轮齿受到的应力超过剪切强度时, 就会在此处产生应力疲劳点, 并逐渐裂化成纹; 加工过程中如果轮齿加工不够圆滑, 也容易引起应力集中现象, 在循环运转过程中成为疲劳点, 也会促使疲劳断裂的产生; 从金相组织图中发现存在少量抗屈服强度较弱的铁素体, 当受到循环外应力作用时, 铁素体会发生滑移, 从而产生裂纹, 或者发生塑性变形, 降低主应力面的应力承受程度, 加速材料的断裂^[5,11]。

对于机械传动系统, 常要求结构系统的固有频率远离某一频率或避开某一频率, 避免谐振现象的产生^[12-13]。大量对于齿轮受力分析的研究表明, 齿轮啮合位置的应力主要集中在啮合位面内表层^[14-16], 该部位是促使裂纹加剧发展的主要因素。上述几种影响因素的共同作用会导致轮齿在高速循环运转过程中产生疲劳裂纹, 并进一步扩展, 最终断裂。

3 改进措施

在加工工艺不变的情况下, 换用纯度高的原材料, 消除因为原材料中的非金属杂质引起的应力集中现象。调整齿轮淬火工艺, 会提高齿轮淬硬层的厚度,

并且减少组织中铁素体的含量, 克服因为铁素体滑移或者塑性变形引发的裂纹或者降低应力面承受强度。对材料的化学成分含量进行调整, 由于齿轮有效截面较小, 较易发生整体渗透, 造成内应力过大, 所以可以适量减小C, Cr等元素的含量, 降低齿轮整体的淬透性^[17]。通过提高加工精度降低轮齿表面的粗糙度, 并增大接触贴合面, 减小应力集中造成的局部疲劳, 同时在机械本体结构允许的条件下, 尽可能增大齿轮轴轴承段的圆角过渡^[18-19]。改进热处理工艺, 通过查阅资料、理论分析和试验, 确定该材料的热处理方式: 正火温度为950℃, 保温50min, 空冷; 退火温度为680℃, 保温180min, 炉冷; 末端温度为860℃, 保温50min, 水冷。在800~950℃的范围内淬火, 经190℃回火后晶粒度达到7+8级^[17]。通过对齿轮进行喷丸处理, 其表层组织上会造成亚晶细化, 提高位错密度, 引入宏观残余压应力等, 使材料表面产生形变硬化层。另外, 齿轮加工切削过程产生的刀痕也会在钢丸的强烈冲击下变得更加圆滑, 提高齿轮根部强度和疲劳抗力^[20-22]。经改进后, 齿轮的总体力学性能良好, 断齿现象得到改善, 可在包装设备中取得稳定、耐用的效果。

4 结语

减速器高速齿轮轴出现断齿现象的主要原因是原材料存在非金属杂质, 以及热处理工艺不当, 造成组织中含有抗屈服强度较弱的铁素体等, 在轮齿高速循环运转过程产生疲劳裂纹并进一步扩展为断裂, 致使出现断齿现象。加工精度和轮齿设计可能是出现断齿的重要因素, 可通过提高加工精度和优化齿轮结构设计来提高齿轮的使用寿命。通过优化热处理工艺参数来改善材料组织结构, 从根本上解决材料的总体性能。平时精准地对减速器进行机械检修、安装, 减小因为安装或者检修造成的机械内部原件重心偏移、齿面接触面积不够大、重合度低、受力不均匀等人为影响因素。

参考文献:

- [1] 姚一维. 17CrNiMo6 钢齿轮的渗碳处理[J]. 机械工人(热加工), 1999(4): 34.
YAO Yi-wei. Carburizing Treatment of 17CrNiMo6 Steel Gear[J]. Machinist Metal Forming, 1999(4): 34.
- [2] 范美芳, 顾家蓓. 热处理工艺对齿轮性能改变的作用[J]. 广东技术师范学院学报(自然科学版), 2010, 31(6): 42—43.
FAN Mei-fang, GU Jia-qian. Effect of Heat Treatment Process on Gear Change[J]. Journal of Guangdong Polytechnic Normal University (Science and Technology), 2010, 31(6): 42—43.
- [3] 刘俊祥, 王京晖, 李俏, 等. 18CrNiMo7-6 和

- 20CrNi2Mo 钢高温渗碳工艺的研究与应用[J]. 金属热处理, 2013, 38(10): 66—69.
- LIU Jun-xiang, WANG Jing-hui, LI Qiao, et al. Study and Application of High Temperature Carburizing Process for 18CrNiMo7-6 and 20CrNi2Mo steels[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(10): 66—69.
- [4] 黄建斌. 18CrNiMo7-6 钢锥齿轮轴纵裂原因分析[J]. 金属热处理, 2015, 40(9): 219—221.
- HUANG Jian-bin. Longitudinal Cracking Analysis of 18CrNiMo7-6 Steel Bevel Gear Shaft [J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(9): 219—221.
- [5] 卫戮. 42CrMo 钢齿轮轴断齿原因分析[J]. 价值工程, 2013(23): 66—68.
- WEI Tao. Tooth Breaking Reason Analysis of 42CrMo Steel Gear-axle[J]. Value Engineering, 2013(23): 66—68.
- [6] 雷旻, 梁益龙, 万明攀, 等. 减速机高速齿轮轴断裂失效分析[J]. 金属热处理, 2007, 32(S1): 234—237.
- LEI Min, LIANG Yi-long, WAN Ming-pan, et al. Failure Analysis on the High-speed Gear Shaft of a Reducer[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(S1): 234—237.
- [7] 桂立丰. 机械工程材料测试手册 (物理金相卷) [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1999: 101—187.
- GUI Li-feng. Handbook of Mechanical Engineering Materials Testing (Physical Metallurgical Rolls)[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1999: 101—187.
- [8] 李妍缘, 赵兴明, 郭宏亮. 高速齿轮轴失效原因分析[J]. 机械传动, 2009(5): 79—80.
- LI Yan-yuan, ZHAO Xing-ming, GUO Hong-lai. Failure Analysis on Gear Shaft[J]. Mechanical Transmission, 2009(5): 79—80.
- [9] 崔约贤, 王长利. 金属断口分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998: 35—86.
- CUI Yue-xian, WANG Chang-li. Fracture Analysis of Metals[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998: 35—86.
- [10] 傅志强, 潘宏伟, 陈广志, 等. 40CrNiMo 钢齿轮轴断裂原因分析[J]. 金属热处理, 2011, 36(9): 376—378.
- FU Zhi-qiang, PAN Hong-wei, CHEN Guang-zhi, et al. Failure Analysis of 40CrNiMo Steel Gear Shaft[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(9): 376—378.
- [11] 韩兰兰. 乘用车变速器输出轴断裂分析及优化设计[D]. 赣州: 江西理工大学, 2013.
- HAN Lan-lan. Passenger Car Transmission Output Shaft Rupture Analysis and Optimization Design[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2013.
- [12] 吴斌方, 袁博, 严明霞, 等. 基于 UG 和 ANSYS 软件的瓦楞辊振动与模态分析[J]. 包装工程, 2013, 34(3): 55—58.
- WU Bin-fang, YUAN Bo, YAN Ming-xia, et al. Vibration and Modal Analysis of Corrugated Roller Based on UG and ANSYS Software[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3): 55—58.
- [13] 许曼, 丁毅. 基于 Ansys 的模切机机架结构性能分析及优化设计[J]. 包装工程, 2010, 31(15): 73—74.
- XU Man, DING Yi. Structure Property Analysis and Optimal Design of Die-cutting Machine's Housing Based on Ansys[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(15): 73—74.
- [14] 马利娥, 吴志勇, 武吉梅, 等. 凹版印刷机导向辊的挠曲变形分析及结构优化[J]. 包装工程, 2014, 35(13): 100—104.
- MA Li-e, WU Zhi-yong, WU Ji-mei, et al. Flexural Deflection Analysis and Structure Optimization of Guide Roller in Gravure Printing Machine[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13): 100—104.
- [15] 章佳丽, 武吉梅, 高波, 等. 印刷机偏心滚子轴承接触应力与变形仿真分析[J]. 包装工程, 2015, 36(19): 97—102.
- ZHANG Jia-li, WU Ji-mei, GAO Bo, et al. Simulation Analysis of Contact Stress and Deformation for the Eccentric Roller Bearing in Printing Press[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(19): 97—102.
- [16] 马成习. 基于 Pro/E 的包机槽轮机构建模及运动仿真[J]. 包装工程, 2008, 29(2): 36—37.
- MA Cheng-xi. Charter Flight Slot Wheel Mechanism Modeling and Movement Simulation Based on Pro/E[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 36—37.
- [17] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 268—273.
- CUI Zhong-qi, TAN Yao-chun. Metallography and Heat Treatment[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 268—273.
- [18] 章刚, 刘军, 刘永寿, 等. 表面粗糙度对表面应力集中系数和疲劳寿命影响分析[J]. 机械强度, 2010, 32(1): 110—115.
- ZHANG Gang, LIU Jun, LIU Yong-tao, et al. Effect of Roughness on Surface Stress Concentration Factor and Fatigue Life[J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(1): 110—115.
- [19] 李惠珍, 杨松林, 袁兆成, 等. 曲轴圆角的优化设计[J]. 内燃机工程, 1991, 12(2): 72—76.
- LI Hui-zheng, YANG Song-lin, YUAN Zhao-cheng, et al. Optimum Design of Crankshaft Fillets[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 1991, 12(2): 72—76.
- [20] 倪兆荣, 盛继生, 吴雄彪, 等. 喷丸处理对汽车变速箱齿轮疲劳强度影响的研究[J]. 机械传动, 2003, 27(1): 39—41.
- NI Zhao-rong, SHENG Ji-sheng, WU Xiong-biao, et al. Effect of Shot Peening on Fatigue Strength of Transmission Gear Research[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2003, 27(1): 39—41.
- [21] 隋福楼, 鞠育平, 于淑敏, 等. 渗碳齿轮的喷丸强化机理[J]. 汽车工程, 2001, 23(3): 214—216.
- SUI Fu-lou, JU Yu-ping, YU Shu-min, et al. Mechanism of Shot Peening for Cemented Gear[J]. Automotive Engineering, 2001, 23(3): 214—216.
- [22] 黄俊杰, 刘飞涛, 姜超, 等. 某变速箱齿轮断齿分析[J]. 机械传动, 2015, 39(12): 175—178.
- HUANG Jun-jie, LIU Fei-tao, JIANG Chao, et al. Analysis of a Transmiss Gear Tooth Break[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39(12): 175—178.