

DOI: 10.11973/jxgccl202112017

某火电厂高速渗碳齿轮轮齿断裂原因

彭波¹, 张斌², 张传正¹, 宋子博¹, 韩哲文¹, 李玲², 王智春¹

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045; 2. 北京华科同和科技有限公司, 北京 102200)

摘要: 某火电厂给水泵耦合器二级从动渗碳齿轮多处轮齿发生断裂。通过宏/微观形貌观察、化学成分检测、金相检验以及力学性能测试等方法分析了轮齿断裂原因。结果表明: 轮齿齿面处渗碳层表面硬度不足, 耐磨性能和抗疲劳性能较差, 在接触应力长期反复作用下, 轮齿齿面表层金属剥落形成麻坑, 同时齿轮组织中存在白点缺陷, 材料的综合力学性能不足; 在齿轮高速转动过程中, 齿面受接触应力作用, 裂纹在剥落麻坑周围应力集中处萌生并迅速扩展, 导致轮齿发生脆性断裂。

关键词: 高速齿轮; 渗碳层; 剥落麻坑; 白点缺陷; 脆性断裂

中图分类号: TG142.4

文献标志码: B

文章编号: 1000-3738(2021)12-0093-06

Fracture Cause of High-Speed Carburized Gear Tooth in a Thermal Power Plant

PENG Bo¹, ZHANG Bin², ZHANG Chuangzheng¹, SONG Zibo¹, HAN Zhewen¹, LI Ling², WANG Zhichun¹

(1. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China;

2. Beijing Huake Tonghe Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: Several gear teeth of a secondary driven carburized gear for a feed water pump coupler in a thermal power plant were broken. The fracture cause of gear teeth was analyzed by macro and micro morphology observation, chemical composition measuring, metallographic inspection and mechanical property testing. The results show that the surface hardness of the carburized layer of the gear tooth flank was insufficient, and the wear resistance and fatigue resistance were poor. The surface metal of the gear tooth flank peeled off to form spalling pits under long-term repeated contact stresses. Meanwhile flake defects existed in the microstructure of the gear. The comprehensive mechanical properties of the material were inadequate. During the high-speed rotation of the gear, the tooth flank was subjected to contact stresses, and cracks were initiated at stress concentration areas around the spalling pits and expanded rapidly, resulting in the brittle fracture of the gear teeth.

Key words: high-speed gear; carburized layer; spalling pit; flake defect; brittle fracture

0 引言

高速齿轮作为机械装备的关键基础零部件之一, 广泛应用于能源电力、煤炭化工、交通运输等行业^[1-3]。某火力发电厂1号机组1A给水泵耦合器二级从动齿轮多处轮齿发生断裂。根据设计图纸和有关技术资料, 该二级从动齿轮为人字齿轮, 采用单个的制造方法生产, 精度为国标四级, 选用20CrMnMo钢锻造而成, 并进行锻后热处理, 粗加工后进行消应力处理, 半精加工后进行渗碳淬火处理, 渗碳层厚度要求在0.9~1.3 mm, 渗碳层硬度要

求在56~65 HRC。在工作过程中, 齿轮所用润滑介质为32号汽轮机油, 工作温度约为80℃, 工作压力约为0.24 MPa, 额定转速为5 000 r·min⁻¹, 累计运行时间约为1.6×10⁴ h。作者通过宏观形貌观察、化学成分分析、力学性能测试、显微组织和断口微观形貌观察等方法对齿轮失效原因进行了分析, 并提出相关预防措施。

1 理化检验及结果

1.1 宏观形貌

由图1可知, 该失效齿轮共有7处轮齿发生断裂, 其中6个断齿连续分布(将该断齿区域标记为A区, 断齿从下往上依次编号A1~A6), 与A区间隔3个完好轮齿的位置存在一个单独的断齿(该区域标

收稿日期: 2021-03-03; 修订日期: 2021-11-23

作者简介: 彭波(1992—), 男, 湖南常德人, 工程师, 硕士

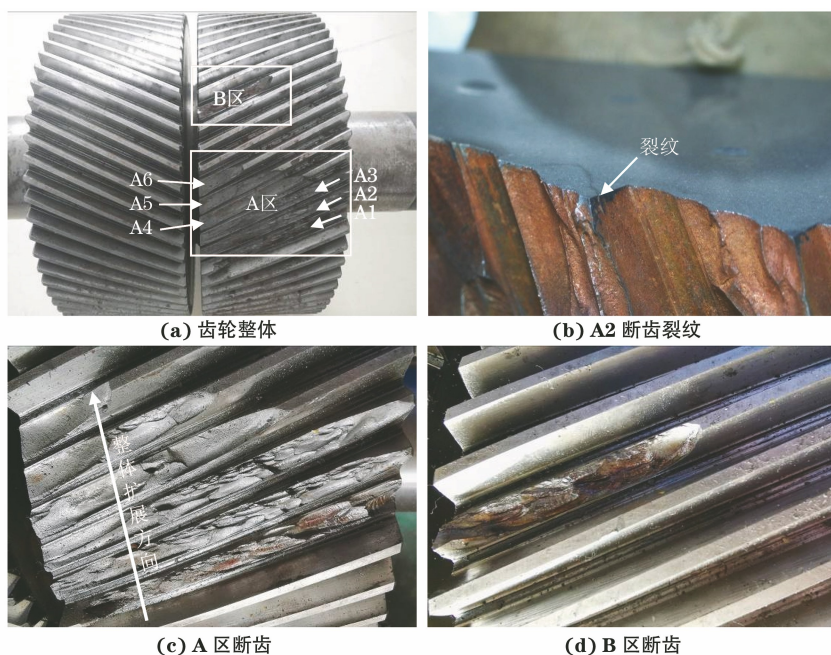


图1 齿轮及断裂轮齿的宏观形貌

Fig.1 Macromorphology of gear and broken teeth: (a) entire gear; (b) crack of A2 broken tooth; (c) broken teeth in zone A and (d) broken tooth in zone B

记为B区,断齿编号为B1);所有断齿断口均未发生明显的宏观塑性变形,断裂位置都位于齿根附近;A区中A1断齿断口锈蚀严重,因氧化而呈红棕色,其余5个轮齿断口呈亮灰色,推断A区轮齿的整体断裂趋势为从A1轮齿依次到A6轮齿;B1断齿断口也发生了一定程度的锈蚀。观察单个断齿发现:A1、A2、A3、B1轮齿断口呈多源起裂特征,裂纹扩展形成

台阶,断口较粗糙且起伏较大,同时在A2断齿表面有明显裂纹;A4、A5、A6轮齿断口较平齐,裂纹扩展区较平坦。综上推测,轮齿属于典型的脆性断裂^[4]。

采用OLYMPUS SZ61型体视显微镜观察A2断齿、完好轮齿齿根及附近区域形貌。由图2可以看出:A2断齿齿面及齿根处存在明显裂纹,裂纹起源于齿根附近区域外表面;断齿和完好轮齿的根部

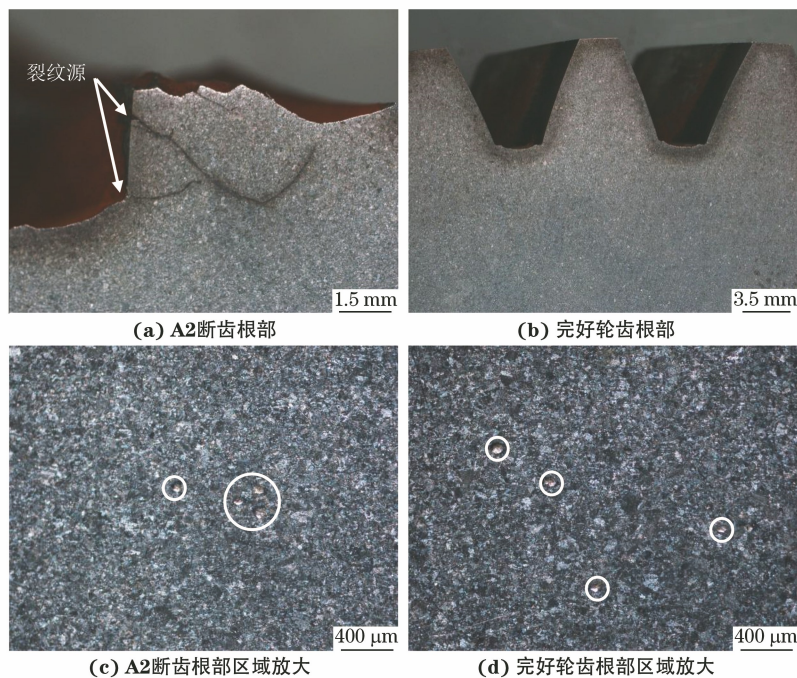


图2 A2断齿和完好轮齿根部低倍形貌及局部放大形貌

Fig.2 Low magnification morphology (a-b) and partially enlarged morphology (c-d) at roots of A2 broken tooth (a, c) and intact tooth (b, d)

过渡均较圆滑,无严重的残留加工刀痕,但在轮齿根部向内的区域均发现了椭圆形斑点,疑似白点缺陷。

1.2 化学成分

在断齿根部区域取样,采用 Oxford FM Pro 型

台式直读光谱仪进行化学成分分析,取 5 次测试结果的平均值。由表 1 可知,该齿轮的化学成分满足 JB/T 6395—2010 中 20CrMnMo 钢锻件的成分要求。

表 1 失效齿轮的化学成分

Table 1 Chemical composition of failed gear

条件	质量分数							%
	C	S	P	Cr	Mo	Mn	Si	
实测值	0.177	0.017 0	0.029 5	1.19	0.261	1.14	0.250	余
标准值	0.17~0.23	≤0.030	≤0.030	1.10~1.40	0.20~0.30	0.90~1.20	0.17~0.37	余

1.3 显微组织

在 A1、A2、A3 断齿断口附近区域截取金相试样,其纵截面经研磨、抛光后,采用 Leica DMI5000M 型光学显微镜观察夹杂物形貌。不同断齿断口组织中的夹杂物形貌相似,呈灰色条状,其端部较圆滑,如图 3 所示,根据 GB/T 10561—2005 中 A 法判定为 A2 类夹杂物。

将取自 A1、A2、A3 断齿附近的金相试样横截面机械打磨、抛光后,用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀,在光学显微镜下观察裂纹形貌和显微组织。由图 4 可知,A2 断齿齿根处的裂纹由齿面向内部扩展,以穿晶扩展为主,裂纹附近的显微组织为针状或

板条马氏体。

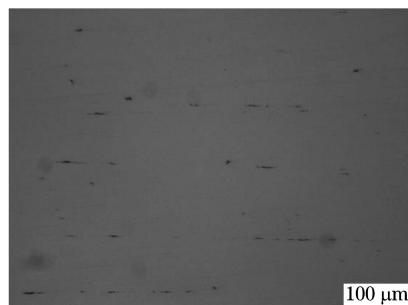


图 3 断齿断口处纵截面夹杂物形貌

Fig. 3 Inclusion morphology on longitudinal section at fracture of broken tooth

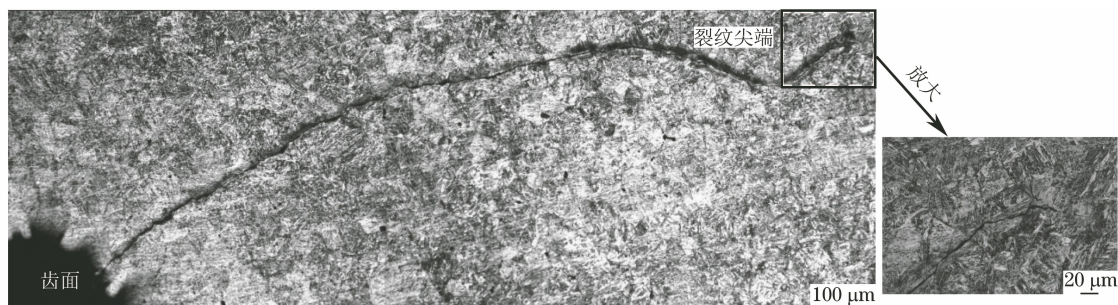


图 4 A2 断齿齿根处裂纹微观形貌

Fig. 4 Micromorphology of cracks at A2 broken tooth root

A1、A2、A3 断齿处的显微组织相同,以其中一个断齿组织为例进行说明。由图 5 可知:断齿附近横截面和完好轮齿横截面的显微组织均为针状回火马氏体,局部区域存在银白色斑点,形状为近似圆形或椭圆形,部分斑点内可见夹杂物或孔洞,且伴有短小不连续的丝状裂纹,符合白点缺陷的微观特征;完好轮齿附近横截面近表面处显微组织为回火马氏体,呈针状或板条状,断齿远离断口的心部显微组织为相对粗大的板条马氏体。综上,该齿轮的显微组织中存在明显的白点缺陷,加工制造质量较差。

1.4 力学性能

根据 GB/T 230.1—2018,在 A4 断齿未被破坏区

域的齿顶和齿面处取样,冷镶嵌后,采用 TH301 型洛氏硬度计进行表面 C 标尺的洛氏硬度试验,初始载荷为 98.07 N,总载荷为 1 471 N,保载时间为 4 s,取 5 次试验平均值作为测试结果。根据 GB/T 228.1—2010 和 GB/T 229—2007,在断齿区域附近沿齿轮轴向分别取拉伸试样和冲击试样。拉伸试样为直径 5 mm 的圆形横截面试样,标距为 25 mm;冲击试样尺寸为 55 mm×10 mm×10 mm,缺口为夏比 U 型,缺口深度为 2 mm。使用 QUASAR 10 型力学试验机进行室温拉伸试验,屈服前拉伸速度为 1.2 mm·min⁻¹,屈服后为 12 mm·min⁻¹,测 3 个试样取平均值;使用 NI300C 型冲击试验机进行室温冲击试验。

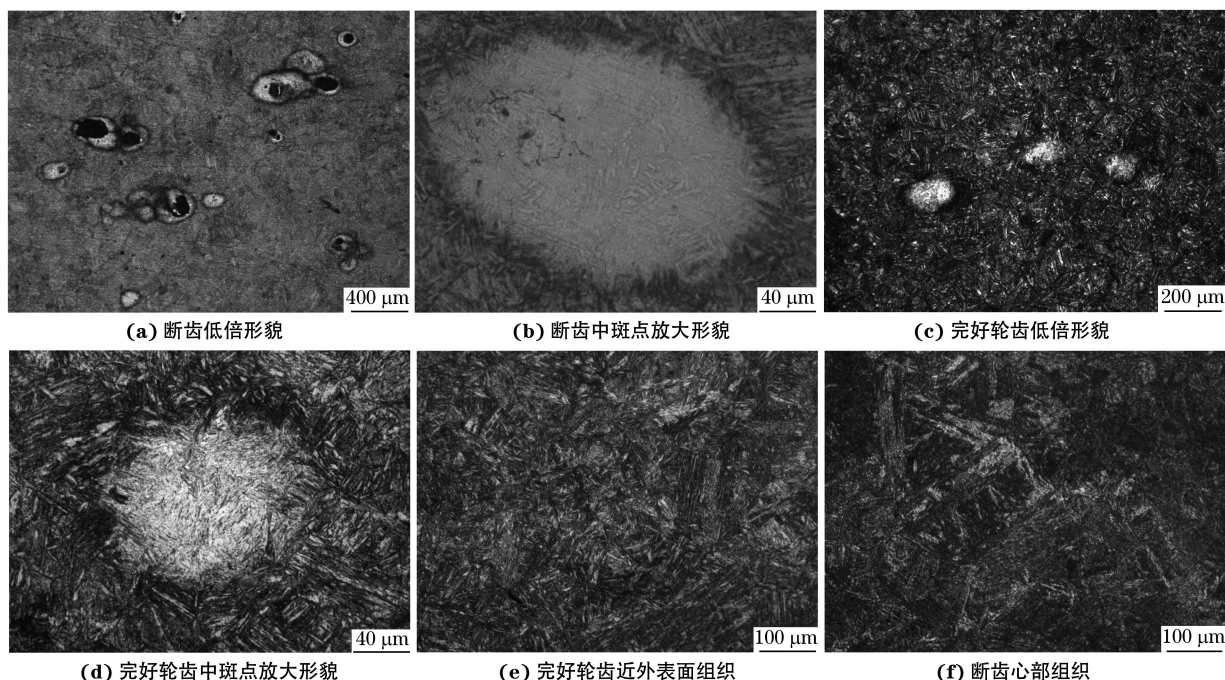


图5 断齿和完好轮齿横截面显微组织

Fig.5 Microstructures on cross section of broken tooth (a, b, f) and intact tooth (c, d, e):(a, c) low magnification morphology; (b, d) enlarged view of spots; (e) microstructure near outer surface and (f) microstructure at core

由表2可知:该齿轮的抗拉强度、屈服强度、断面收缩率和冲击吸收功均不满足 JB/T 6395—2010 中 20CrMnMo 钢的要求;轮齿渗碳层表面硬度不均

匀,齿面表面(即渗碳层)的硬度略低于标准要求,齿顶表面硬度满足要求。可见,该齿轮的综合力学性能较差。

表2 失效齿轮的力学性能

Table 2 Mechanical properties of failed gear

项目	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	断后伸长率/ %	断面收缩率/ %	冲击吸收功/ J	洛氏硬度/HRC	
						齿面	齿顶
测试结果	1 056	762	11.5	41.7	32,31,33	54.5	56.4
标准要求	$\geq 1\ 175$	≥ 885	≥ 10	≥ 45	≥ 55	渗碳层硬度在 56~65 HRC	

1.5 断口微观形貌及微区成分

采用 ZEISS EVO 18 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察断齿齿面及断口、拉伸和冲击断口微观形貌,使用附带的能谱仪 (EDS) 进行微区成分分析。由于 A1、A2、A3 和 B1 断齿的断口形貌基本相似,以 A1 断齿断口微观形貌为例进行说明。

由图6可以看出:A1断齿断口的裂纹源位于轮齿表面,裂纹源区附近齿面表层金属发生片状剥落进而形成大量麻坑,剥落麻坑在齿面上分散分布,局部呈断续条状;断口上存在明显的二次裂纹和解理台阶,裂纹由齿面向内部扩展,最终断裂区位于裂纹源对侧齿面的齿根区域;断口上无明显的塑性变形,整体呈脆性断裂特征。由图7可知,冲击断口和拉伸断口均存在明显的河流花样,为解理断口,均属于脆性断裂,同时拉伸断口局部存在夹杂物,EDS分

析结果表明该夹杂物为硫化物。

2 断裂原因分析

由上述检验结果可知,所有断齿断口均无明显宏观塑性变形,断裂位置位于齿根附近。A1、A2、A3 和 B1 断齿呈多源起裂特征,裂纹扩展形成台阶,断口较粗糙;A4、A5、A6 断齿断口较平齐,裂纹扩展区较平坦。轮齿均发生了典型的脆性断裂。为了提高表面硬度,从而提高表面耐磨性、抗弯曲疲劳性能和抗接触疲劳性能^[5],齿轮表面均进行了渗碳淬火处理。断齿齿面渗碳层硬度低于设计技术资料的要求,齿面的耐磨性和抗疲劳性能较差。A1、A2、A3 和 B1 断齿裂纹源处齿面及断口边缘存在大量因齿面表层金属剥落而形成的麻坑。产生这些麻坑的原因是:在齿轮高速转动啮合过程中,啮合

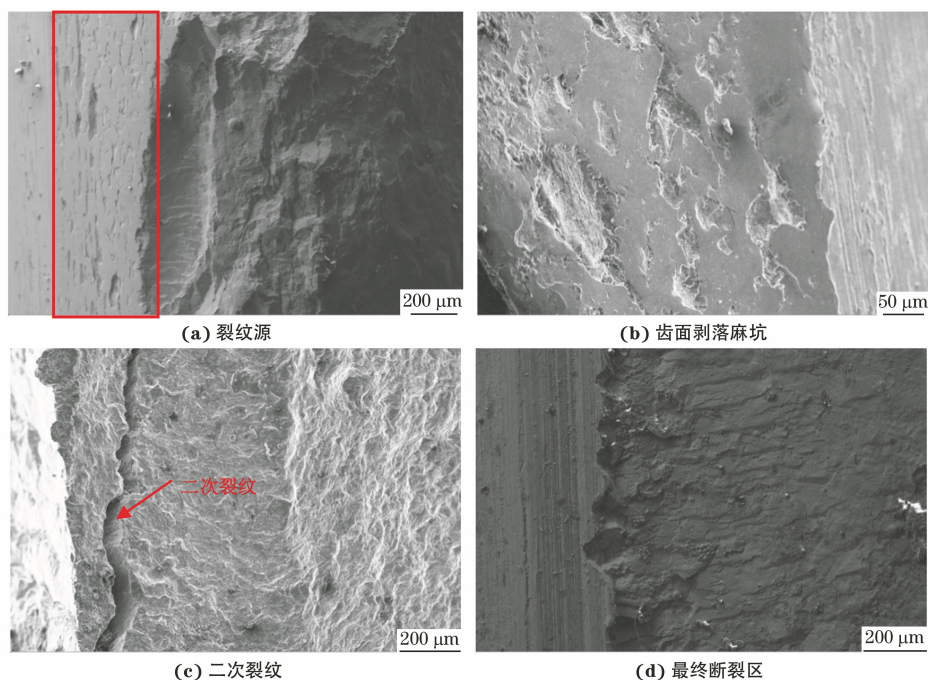


图6 A1断齿齿面及断口SEM形貌

Fig.6 SEM morphology of tooth flank and fracture of A1 broken tooth: (a) crack source; (b) spalling pits on tooth flank; (c) secondary crack and (d) final fracture zone

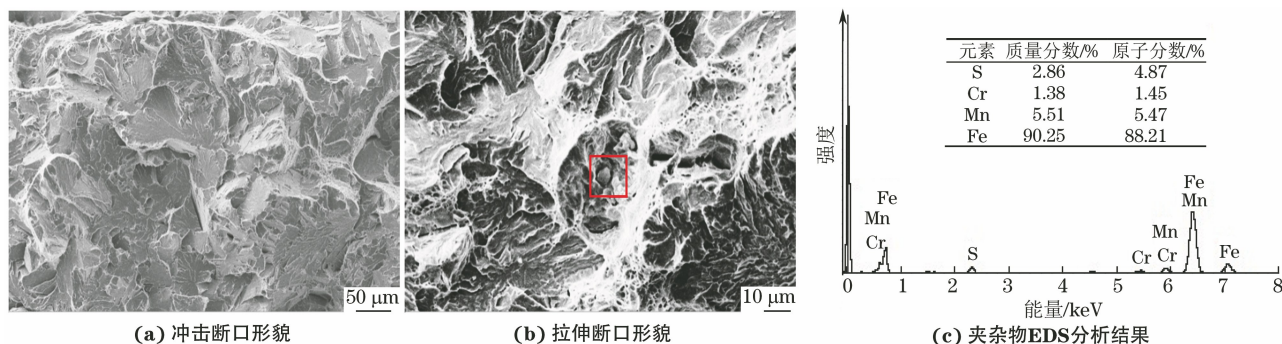


图7 冲击断口和拉伸断口SEM形貌及拉伸断口夹杂物EDS分析结果

Fig.7 SEM morphology of impact fracture (a) and tensile fracture (b) and EDS analysis results of inclusion on tensile fracture surface (c)

接触面处会产生循环变化的接触应力,在接触应力作用下,硬度较低的齿面表层薄弱区域萌生疲劳微裂纹,微裂纹扩展使得齿面表层金属剥落,进而形成剥落麻坑^[6-8]。结合断口边缘剥落麻坑的位置和裂纹扩展方向,可推断断裂轮齿的裂纹起源于齿面的剥落麻坑附近,裂纹由齿面的剥落麻坑处向轮齿内部扩展,当裂纹扩展至对侧齿面时,轮齿断裂。

齿轮的化学成分符合标准要求,完好轮齿的显微组织为回火马氏体,断齿断口附近的显微组织为针状或板条马氏体,远离断口的心部区域组织为板条马氏体。在断齿和完好轮齿横截面区域局部均存在圆形或椭圆形的白点缺陷,制造质量不符合JB/T 6395—2010标准要求。白点缺陷的存在会降低材料的强度、韧性和疲劳性能^[9]。齿轮基体中存在条

状夹杂物,夹杂物的存在会破坏钢材的连续性,使得其在锻造变形过程中产生微观缺陷,为氢原子聚集提供条件,增加产生白点缺陷的概率^[10-11]。齿轮的抗拉强度、屈服强度、断面收缩率、冲击吸收功均低于标准要求,尤其是冲击吸收功低于标准要求下限值约40%,其综合力学性能较差。

综上所述,该齿轮齿面处渗碳层硬度不足,耐磨性和抗疲劳性能较差,在轮齿之间长期接触应力的作用下,齿面表层金属剥落形成麻坑,同时齿轮显微组织中存在白点缺陷,齿轮材料的强度和韧性较差,综合力学性能不足;在齿轮高速转动过程中,其轮齿齿面受接触应力作用,在剥落麻坑处产生应力集中^[12],裂纹在应力集中处萌生并迅速向轮齿内部扩展,最终导致轮齿脆性断裂。

3 结论及建议

(1) 该高速渗碳齿轮齿面处渗碳层硬度不足,在接触应力的长期反复作用下,齿面表层金属剥落形成麻坑;齿轮制造质量不佳,内部存在白点缺陷,导致综合力学性能不足。在齿轮啮合过程中的接触应力作用下,齿面剥落麻坑处产生应力集中而萌生裂纹,裂纹迅速扩展导致轮齿断裂。

(2) 为了防止类似事故再次发生,应严格控制锻件齿轮的制造质量和表面热处理工艺,避免白点、裂纹等缺陷的产生,同时确保渗碳层的各项性能指标满足相关技术要求;提高表面加工精度,降低齿面粗糙度,提高齿轮之间的装配和安装精度,保证齿轮之间有良好的接触精度,避免因局部负荷过载造成齿面表层金属早期剥落进而形成麻坑;选择适合齿轮实际运行工况的润滑介质等。

参考文献:

- [1] 吴鲁纪,耿福震. 高速齿轮传动技术与装置综述[J]. 机械传动, 2019,43(11):172-175.
WU L J, GENG F Z. Overview of high speed gear transmission technology and equipment [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(11): 172-175.
- [2] 邢志伟,孙银生,邓晓丽,等. 电动机车牵引齿轮设计概述[J]. 机械传动, 2011,35(11):41-44.
XING Z W, SUN Y S, DENG X L, et al. Survey on traction gear design of electric locomotive [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2011, 35(11): 41-44.
- [3] 陈进熹. 轻型高速船用齿轮箱发展现状研究[J]. 船舶工程, 2017,39(6):28-32.
CHEN J X. Development and research of situation of light high-speed marine gearbox[J]. Ship Engineering, 2017, 39(6): 28-32.
- [4] 钟群鹏,赵子华. 断口学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
ZHONG Q P, ZHAO Z H. Fractography [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [5] 高金柱,顾敏,王爱香,等. 常用典型齿轮钢渗碳层的组织与性能[J]. 机械工程材料, 2012,36(2):49-51.
GAO J Z, GU M, WANG A X, et al. Microstructure and property of carbonization layer in common and typical gear steels[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012, 36(2): 49-51.
- [6] 姜荣国,王强,李若辉,等. 风电齿轮箱小齿轮齿面剥落原因分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016,28(2):154-159.
JIANG R G, WANG Q, LI R H, et al. Failure analysis of flakes fell from small gear surface in wind power gearbox [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2016, 28(2): 154-159.
- [7] 马小明,伍裴修. 大功率风力发电机增速齿轮断裂原因分析[J]. 机械工程材料, 2011,35(7):93-95.
MA X M, WU N X. Failure analysis on boost gear of A large capacity wind power generator [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2011, 35(7): 93-95.
- [8] 马爱庆. 减速器齿轮发生点蚀的分析[J]. 煤炭技术, 2006, 25(2):22-24.
MA A Q. Stop-down gear has pitting analysis [J]. Coal Technology, 2006, 25(2): 22-24.
- [9] 孙秀荣,刘贵才. 对钢中白点缺陷的讨论及扫描电镜观察[J]. 物理测试, 2016,34(1):39-42.
SUN X R, LIU G C. Discussion and SEM observation of flakes in steels [J]. Physics Examination and Testing, 2016, 34(1): 39-42.
- [10] 牛立群,许敬月,杨德生,等. 42CrMo 钢锻件的白点研究[J]. 大型铸锻件, 2017(3):30-32.
NIU L Q, XU J Y, YANG D S, et al. Study on flake of 42CrMo steel forgings [J]. Heavy Castings and Forgings, 2017 (3): 30-32.
- [11] 刘庆兰,程里,王春莉. 大型输出齿轮轴断齿分析[J]. 理化检验(物理分册), 2007,43(3):156-158.
LIU Q L, CHENG L, WANG C L. Gear teeth broken analysis of heavy-duty output gear axle [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2007, 43(3): 156-158.
- [12] 林锋,王威,李剑敏,等. 疲劳点蚀下风电齿轮箱斜齿轮可靠度计算[J]. 机械传动, 2018,42(9):61-65.
LIN F, WANG W, LI J M, et al. Calculation of the reliability of helical gear in wind turbine gearbox under fatigue pitting [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42(9): 61-65.

欢迎来稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告