

高速齿轮轴断齿原因分析

王长健

(四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 618000)

摘要: **目的** 材质为 17Cr2Ni2MoA 的风电齿轮箱高速齿轮轴, 同炉号共生产 5 件, 在安装装配后进行试车试验时其中 4 件均发现有断齿现象, 导致高速齿轮轴报废, 同时导致整个风电齿轮箱的安装调试工作停滞。故对该高速齿轮轴断齿原因进行分析, 以区分质量事故责任。**方法** 通过化学成分分析、齿面宏观外貌观察分析、宏观断口、宏观金相、微观金相、有效硬化层深度测试、扫描电镜试验分析等一系列的理化试验, 对该高速齿轮轴断齿原因进行分析。**结果** 该高速齿轮轴材质正常, 化学成分合格。齿轮轴齿部断口上有疲劳贝壳纹线, 齿轮断口为疲劳断口, 疲劳源在齿根。齿轮轴齿部表面渗碳热处理层组织正常, 晶粒度级别为 7 级, 合格; 齿轮轴齿根、齿面、齿顶表面渗碳热处理层的有效硬化层深度均过深, 不符合产品技术要求。齿轮轴断口微观形态呈疲劳辉纹, 未见明显的冶金缺陷。**结论** 该高速齿轮轴断齿性质为快速疲劳断裂, 其形成原因是齿根渗碳层深度过深所致。

关键词: 风电齿轮箱; 高速齿轮轴; 有效硬化层深度; 疲劳断裂; 表面渗碳热处理; 马氏体脆性

中图分类号: TG111.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)06-0192-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.06.029

Failure Analysis of High-speed Gear Shaft

WANG Chang-jian

(Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, China)

ABSTRACT: **Objective** Among the five pieces of 17Cr2Ni2Mo high-speed gear shaft of wind power generation speed-up gearbox, 4 pieces were found to have teeth broken phenomenon after assembling, leading to out of service of the high-speed gear shaft, and meanwhile resulted in stopping of installation and debugging. This work aimed to analyze the failure cause for the high-speed gear shaft, in order to identify the quality accident liability. **Methods** In this paper, comparative analysis was carried on the gear shaft to analyze the failure cause, including metallographic analysis, macrofractography, observation analysis of tooth surface, macroscopic examination, chemical analysis, effective hardening layer depth testing, SEM, and so forth. **Results** The high speed gear shaft's material was normal and its chemical composition was qualified. There were many fatigue shell ridges on the high speed gear shaft's fracture, indicating that the gear fracture was fatigue fracture, and the fatigue source originated from the root. The metallurgical structure for the surface carburizing heat treatment layer of the gear shaft was normal, and the grain size was Grade 7, which was also qualified. The effective hardening layer depth of carburizing layer at the root of tooth, tooth surface, tooth top was all too deep, which did not meet the technical requirements of the product. The micro morphology

收稿日期: 2016-01-18; 修订日期: 2016-04-21

Received: 2016-01-18; Revised: 2016-04-21

作者简介: 王长健 (1978—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 主要研究方向为大型铸锻件、机械冶金产品的金相分析、失效分析, 以及热处理工艺研究。

Biography: WANG Chang-jian (1978—), Male, Master of engineering, Senior engineer, Research focus: large castings and forgings, mechanical metallurgy products of metallographic analysis, failure analysis, and the heat treatment process.

of the fracture surface of the gear shaft was fatigue striation, and no obvious metallurgical defects were found. **Conclusion** The results showed that the failure type of the high-speed gear shaft was quick fatigue fracture, and its formation was caused by the excessive depth of carburizing layer at the root of tooth.

KEY WORDS: wind power generation speed-up gearbox; high speed gear shaft; effective hardening layer depth; fatigue fracture; surface carburizing heat treatment; Martensite brittleness

近年来中国的风电产业蓬勃发展, 2011 年全国新增装机容量 18 GW, 居世界第一, 但我国风机技术水平同欧美发达国家还存在明显的差距, 尤其是关键零部件的先进制造技术水平。风力发电机组一般安装在荒郊、野外、山口、海边等风能较大且周围无遮挡物之处, 发电机、齿轮箱等安装在机组塔架之上狭小的机舱内, 距地面几十米高, 常年受酷暑、严寒和极端温差的影响, 工作环境极其恶劣。据世界风力发电网数据, 齿轮箱失效占风电装备失效的 12%。因此高速齿轮箱系统作为整个风机系统的核心部件, 因使用环境极其复杂, 其关键零部件(高速齿轮轴、轴承)等制造技术水平是影响风机装备故障的主要因素^[1-2]。

材质为 17Cr2Ni2MoA 的 1.0 MW 风电齿轮箱高速齿轮轴, 质量为 71.6 kg, 共生产 5 件, 其中 4 件在安装装配后进行试车试验时发现断齿现象, 导致高速齿轮轴报废, 同时导致整个风电齿轮箱的安装调试工作停滞。该齿轮轴的生产工序流程为: 炼钢→锻造成坯→第一次机械加工(粗加工)→预备热处理(正回火热处理)→超声波探伤检验→第二次机械加工(半精加工)→渗碳淬火热处理→第三次机械加工(精加工)→安装装配→试车试验。为此, 本文通过化学成分分析、齿面宏观外貌观察分析、宏观断口、宏观金相、微观金相、有效硬化层深度测试、扫描电镜试验分析等一系列的理化试验, 对该高速齿轮轴断齿原因进行了分析。

1 试验方法

断裂高速齿轮轴原始形貌见图 1。对断裂高速齿轮轴断齿的断口面进行清洗, 观察断齿宏观断口形貌, 并对断齿的齿面进行观察分析。将断口碎片用扫描电镜进行断口微观形貌分析, 在断齿高速齿轮轴上切取两件横向宏观金相试片, 观察高速齿轮轴横向宏观金相组织形貌以及裂纹宏观形态。在宏观金相试片的裂纹处切取两件微观金相试样, 对裂

纹的微观形态进行分析, 对锻件齿面渗碳质量进行检验, 并对齿面、齿根、齿顶的有效硬化层深度进行测试。同时切取化学成分分析试样, 对高速齿轮轴进行化学成分分析。

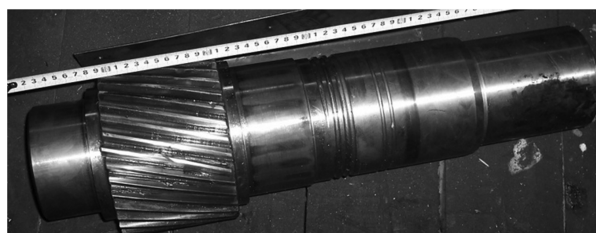


图 1 高速齿轮轴原始形貌

Fig.1 The high speed gear shaft's original morphology

2 检验结果

2.1 化学成分检验结果

按 ASTM E415—2008 碳素钢和低合金钢光学放射真空光谱测定分析的试验方法, 用德国 OBLF QSN750 型光电直读光谱仪进行高速齿轮轴化学成分分析, 分析结果见表 1。该高速齿轮轴化学成分均符合产品技术要求。

2.2 高速齿轮轴外观检查分析结果

经现场情况调查以及对断裂高速齿轮轴的外观形貌进行观察分析, 该高速轴断齿主要有三个特征: 断齿主要集中出现在高速齿轮轴某一相邻部位; 几乎所有断齿均起源于齿根; 其余未断齿上的裂纹大部分也起源于齿根。见图 2。

2.3 宏观断口形貌分析结果

对高速齿轮轴断齿碎片断口进行清洗后观察, 碎片断口宏观形态主要分为两种类型。第一种断口类型仅一块, 其断口形貌见图 3, 断裂源在齿根, 断裂源区光滑光亮, 断裂扩展区发现有较为明显的疲劳贝纹线, 约占整个断口面积的 60%, 瞬时断裂

表 1 高速齿轮轴化学成分 (质量分数)
Tab.1 Chemical composition of the high speed gear shaft %

| 测试元素 | C | Mn | Si | P | S | Cr | Ni |
|------|--------------|-------------|-------|-----------|---------|-------------|-------------|
| 测试结果 | 0.18 | 0.67 | 0.25 | 0.009 | 0.002 | 1.64 | 1.51 |
| 技术要求 | 0.15 ~ 0.21 | 0.50 ~ 0.90 | ≤0.40 | ≤0.015 | ≤0.005 | 1.50 ~ 1.80 | 1.40 ~ 1.70 |
| 测试元素 | Al | Cu | V | H | O | N | Mo |
| 测试结果 | 0.026 | 0.12 | 0.01 | ≤0.000 02 | 0.0013 | 0.0148 | 0.29 |
| 技术要求 | 0.015 ~ 0.04 | ≤0.3 | | ≤0.0002 | ≤0.0025 | ≤0.015 | 0.25 ~ 0.35 |



图 2 高速轴齿上的裂纹

Fig.2 Cracks on the teeth of high speed gear shaft

区呈较为粗糙的结晶状断口, 约占整个断口面积的 30%。其余碎片断口均为第二种断口类型, 其断口形貌见图 4, 为多源断裂, 断裂源主要位于齿面次表层, 同时整个断口面光滑明亮, 断裂扩展区也有较为明显的疲劳贝纹线。



图 3 碎片断口形貌

Fig.3 Fracture appearance of a debris

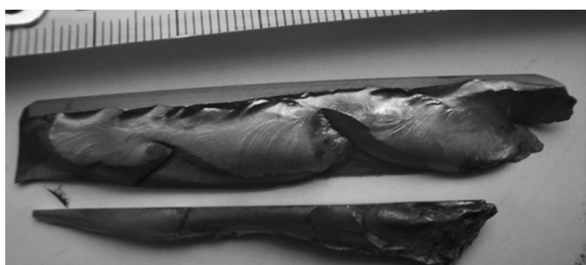


图 4 另一种碎片断口形貌

Fig.4 Fracture appearance of another debris

2.4 齿面观察分析结果

对图 3 中的第一种断口类型的断齿齿面进行观察, 发现齿面有明显的挤压痕迹, 见图 5, 对挤压痕迹在显微镜下观察, 挤压痕迹内有挤压凹坑和裂纹。

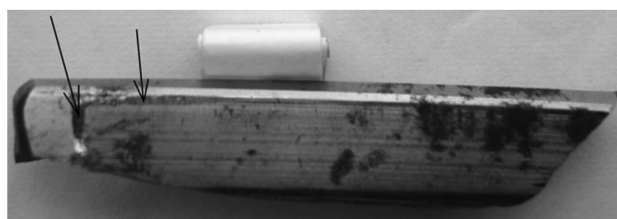


图 5 齿面上的挤压痕迹

Fig.5 Extrusion traces on the surface of the tooth

2.5 宏观金相检验结果

两件横向宏观金相试片经 50% (质量分数) 的盐酸水溶液热酸腐蚀后, 观察其宏观金相组织形貌。宏观金相组织心部均细致, 无明显的疏松以及偏析缺陷, 除部分断齿外, 齿部有裂纹。裂纹主要有两种类型, 第一种裂纹起源于齿根, 另一种裂纹起源于齿面节圆处。宏观金相组织形貌见图 6—7。

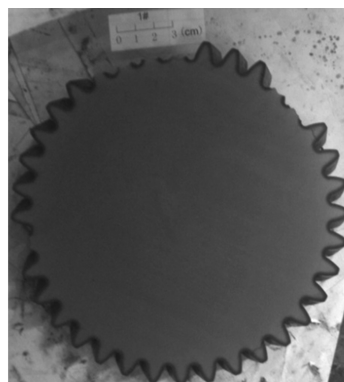


图 6 高速齿轮轴宏观金相组织形貌

Fig.6 Micro-structure of the high speed gear shaft

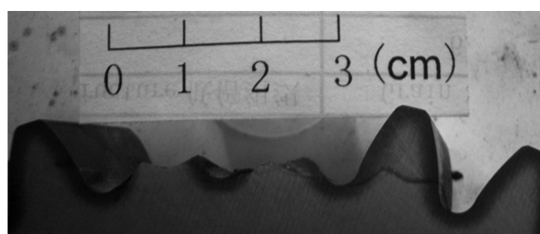


图 7 齿部裂纹形态
Fig.7 Crack of tooth

2.6 微观金相检验结果

磨制切取的两件微观金相试样, 未经腐蚀在德国徕卡 DMI5000 型光学金相显微镜下观察, 该高速齿轮轴非金属夹杂物极少, 按 ASTM E45—2013 标准^[3]进行评定, 各类非金属夹杂物级别均未超过 1.0 级。齿根处裂纹微观形貌见图 8, 裂纹两侧及附近均未见非金属夹杂物, 但裂纹内均有呈白亮色的球形物。试样经 4% (质量分数) 硝酸酒精溶液腐蚀后观察, 裂纹两侧未见氧化脱碳现象, 裂纹附近显微组织为回火马氏体, 裂纹内的白亮色球状物均不受腐蚀, 见图 9。按 JB 6141.3—1992 标准^[4]对高速齿轮轴齿面渗碳组织进行评定, 表层马氏体及残余奥氏体级别、表层碳化物级别、芯部铁素体组织级别均为 2 级, 符合产品的技术要求。按 ASTM E112—2012

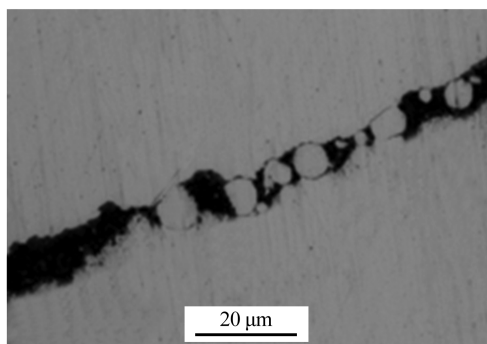


图 8 裂纹微观形貌
Fig.8 Microstructure of crack

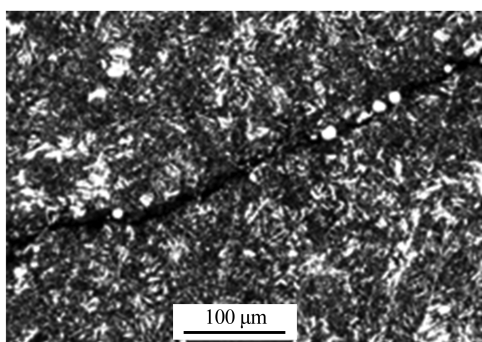


图 9 裂纹与显微组织
Fig.9 Crack and micro-structure

标准^[5]对高速齿轮轴的断齿部位进行晶粒度级别评定, 为 7 级, 也符合产品的技术要求。

2.7 有效硬化层深度测试结果

采用显微维氏硬度法, 按 ISO 2639—2002 标准, 加载载荷为 1 kg, 加载时间 12 s, 对断齿的齿顶、齿根、齿面渗碳层的有效硬化层深度进行检测, 齿顶有效硬化层深度为 1.79 mm, 齿根有效硬化层深度为 1.67 mm, 齿面有效硬化层深度为 1.60 mm, 均超过技术要求 0.8 ~ 1.3 mm, 其中齿根硬度分布图见图 10。

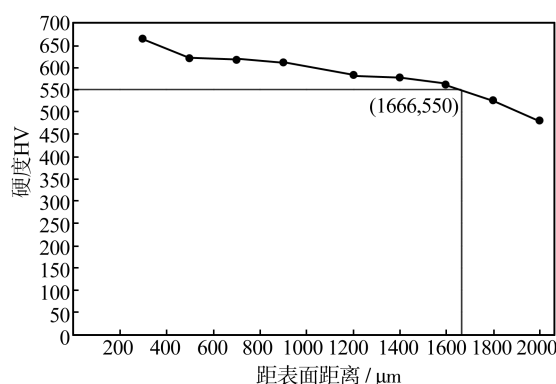


图 10 齿根硬度分布图
Fig.10 Tooth root's hardness distribution

2.8 扫描电镜分析结果

将第一种断口类型断齿碎片进行扫描电镜分析 (仪器为日本电子 JSM-5900LV 型扫描电镜), 断裂源区未见非金属夹杂物及疏松孔洞等缺陷, 断口扩展区发现有疲劳辉纹形态, 见图 11, 断裂瞬断区为准解理形貌。微观金相试样裂纹内的白色球状物微区成分与基体成分接近, 基本一致, 仅 Mo 元素有一定差异, 基体成分见图 12, 白色球状物微区成分见图 13。

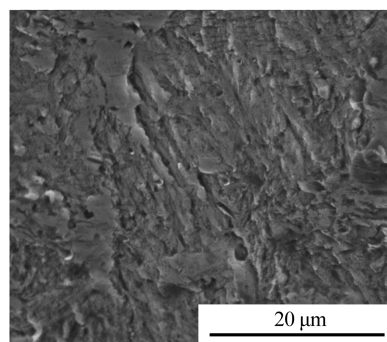


图 11 扩展区疲劳辉纹形态
Fig.11 Fatigue striation morphology of expansion region

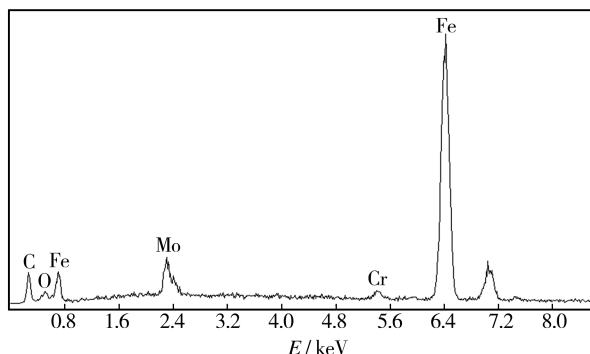


图 12 基体微区成分
Fig.12 Microanalysis of the matrix

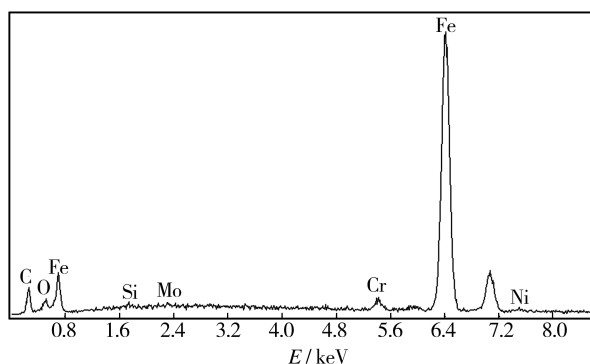


图 13 白亮区微区成分
Fig.13 Microanalysis of the white light area

3 讨论

从高速齿轮轴的使用时间来看,在试车时即已断齿,使用时间极短。从断齿的宏观断口形貌来看,无论是第一类齿部掉块,还是第二类齿部掉块,断面上存在明显的贝纹线,可以确定该高速齿轮轴是典型的快速疲劳断裂^[6-12]。

从高速齿轮轴的化学成分分析结果来看,该高速齿轮轴化学成分均合格,材质正常。从微观金相检验结果来看,高速齿轮轴非金属夹杂物较少;从宏观金相检验结果来看,该高速齿轮轴内部组织细密,未见明显的疏松,以及偏析、孔洞、白点等冶金缺陷。结果说明,该高速齿轮轴的冶金质量好,高速齿轮轴的快速疲劳断裂与高速齿轮轴的冶金质量无关。

该高速齿轮轴表面进行渗碳热处理,其目的是提高齿部表面含碳量,使得表面形成一层硬的、耐磨的硬化层,从而使齿部弯曲强度提高。表面渗碳硬化层深度过低,因齿面承受高的接触应力与弯曲应力,齿面容易发生磨损、点蚀、剥落等破坏。表面渗碳硬化层深度过高,则可能促使高速齿轮轴齿

顶破坏,齿根弯曲疲劳强度降低,工件热处理生产成本增加,生产周期增长。从金相检验结果来看,高速齿轮轴表面渗碳组织中的表层马氏体及残余奥氏体级别、表层碳化物级别、芯部铁素体组织级别均为2级,属正常现象。从有效硬化层深度测试结果来看,该高速齿轮轴表面渗碳层的有效硬化层过深,无论是齿面、齿顶还是齿根,均超过了产品技术条件的要求。渗碳层过深,特别是齿根渗碳层过深,将增大齿根的马氏体脆性,从而导致齿根所能承受的弯曲疲劳强度降低^[13-15]。而该高速齿轮轴在运行试车过程中,齿根部位所承受的弯曲应力最大^[13],当所承受的弯曲应力超过材料的弯曲疲劳强度时,必然在试车运行过程中齿根部位形成显微裂纹,从而沿齿根形成快速疲劳开裂,即形成第一类齿部掉块。事实表明,由于高速齿轮轴渗碳热处理时表面渗碳层深度过深导致齿根脆性增大,所能承受的弯曲应力减小,是导致高速轴形成快速疲劳断裂的关键原因。

当第一类齿部掉块形成后,高速齿轮轴在试车运行时,剩余未断的齿将承受所有的应力,因此,未断齿部的受力将明显增加,再加上未断齿自身齿根、齿面、齿顶的表面渗碳层深度过深,因此剩余未断齿的致裂因素是多重的,从而形成多源疲劳断裂,即第二类齿部掉块。在齿面的外貌检查过程中,发现有明显的挤压麻点、麻坑,这进一步证实第一类断齿后剩余未断齿的受力环境发生较大变化,齿面的受力明显增加所致。

从裂纹微观形态分析发现,裂纹内部有白色的球状物,疑似为工件内部的冶金缺陷,但从扫描电镜微区成分分析得知,白色球状物和基体成分一致,即白色球状物不是外来物,而是高速齿轮轴在疲劳断裂时残存在裂纹内部的基体物质,任何物质在形成时均遵从最小能量原则,因此白色球状物在高速齿轮轴疲劳开裂过程中形成球状是正常的。

4 结语

该高速齿轮轴断齿性质为快速疲劳断裂,其形成原因是高速齿轮轴渗碳热处理时齿根渗碳层深度过深所致。高速齿轮轴在热处理生产过程中,应严把热处理质量检验关,包括渗碳热处理组织检验和有效硬化层深度测试,测试不合格坚决不使用,以避免后期质量事故发生。

参考文献

- [1] 王辉, 李晓龙, 王罡, 等. 大型风电齿轮箱的失效问题及其设计制造技术的国内外现状分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(11): 1542—1549.
WANG Hui, LI Xiao-long, WANG Gang, et al. Research on Failure of Wind Turbine Gearbox and Recent Development of Its Design and Manufacturing Technologies[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(11): 1542—1549.
- [2] 王晶晶, 吴晓玲. 风电齿轮箱的发展及技术分析[J]. 机械传动, 2008, 32(6): 5—8.
WANG Jing-jing, WU Xiao-ling. Development and Technical Analysis of Wind Power Gearbox[J]. Mechanical Drive, 2008, 32(6): 5—8.
- [3] ASTM E45—2011, Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel[S].
- [4] JB 6141.3—1992, 重载齿轮渗碳金相检验[S].
JB 6141.3—1992, Metallographic Examination of Heavy Duty Gear Carburizing[S].
- [5] ASTM E112—2012, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size[S].
- [6] 王长健. ZS165-250 型减速机齿轮轴断齿原因分析[J]. 热加工工艺, 2015, 44(4): 242—246.
WANG Chang-jian. Failure Analysis on crack of ZS165-250 Gear Shaft Used in Reducer[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(4): 242—246.
- [7] 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—238.
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—238.
- [8] 朱波, 傅兴元. 减速机齿轮轴断裂分析[J]. 热处理, 2012, 27(3): 73—75.
ZHU Bo, FU Xing-yuan. Analysis on Cracking of Gear Shaft of Reducer[J]. Heat Treatment, 2012, 27(3): 73—75.
- [9] 王新社. 齿轮轴失效分析[J]. 金属热处理, 2007, 27(9): 54—56.
WANG Xin-she. Failure Analysis on Gear Shaft[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 27(9): 54—56.
- [10] 何玉林, 张波. 开沟机侧齿箱齿轮断齿分析[J]. 热加工工艺, 2009, 38(24): 188—190.
HE Yu-lin, ZHANG Bo. Cracking Analysis on Side Gear of Ditch Digger[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(24): 188—190.
- [11] 姜荣国, 王强, 李若辉, 等. 风电齿轮箱小齿轮断齿原因分析[C]//第二届中国风电后市场专题研讨会论文集. 呼和浩特: [出版者不详], 2015: 108—114.
JIANG Rong-guo, WANG Qiang, LI Ruo-hui, et al. Failure Analysis of the Cracked Gear in the Wind Power Gearbox[C]//Second China Wind Power after Market Seminar Papers. Hohhot: [s. n.], 2015: 108—114.
- [12] 王长健, 李继昌, 卫晨鸥. 风电增速机内齿圈断裂原因分析[J]. 大型铸锻件, 2012(5): 27—29.
WANG Chang-jian, LI Ji-cang, WEI Chen-ou. Analysis on Crack Reason of Inner Gear Ring[J]. Heavy Casting and Forging, 2012(5): 27—29.
- [13] 郭志德, 邵尔玉, 庞钧. 齿轮的失效分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
GUO Zhi-de, SHAO Er-yu, PANG Jun. Failure Analysis of Gear[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1992.
- [14] 王克胜, 路梦春. 渗碳齿轮最佳有效硬化层深度[J]. 矿山机械, 1994(2): 2—8.
WANG Ke-sheng, LU Meng-chun. Best Effective Hardening Layer Depth of Carburizing Gear[J]. Mining & Processing Equipment, 1994(2): 2—8.
- [15] 吴建平. 有效硬化层深度的控制、选择及测定[J]. 兵器材料科学与工程, 1990(4): 42—50.
WU Jian-ping. Control, Selection and Test of Effective Depth of Hardening Layer[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1990(4): 42—50.