

风力发电机紧固螺栓断裂失效分析

周漪^{1,2}, 贺明强^{1,2}, 梅华生^{1,2}, 王长朋^{1,2}

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039;

2.重庆市环境腐蚀与防护工程技术研究中心, 重庆 400039)

摘要: 目的 研究风力发电机紧固螺栓断裂失效原因。方法 通过化学成分分析、力学性能分析、断口扫描分析、显微组织分析测试手段, 对风力发电机紧固螺栓失效原因进行分析。结果 断裂螺栓螺纹根部表面存在原始折叠缺陷, 为疲劳裂纹的萌生提供了有利条件; 同时, 螺栓头部、紧固垫圈及法兰盘之间存在装配异常情况, 外力作用下接触位置应力集中较大, 有利于疲劳裂纹的萌生及进一步扩展。结论 通过严格控制入厂螺栓质量, 同时定期检查在服役螺栓的使用状态, 及时更换存在安全隐患的螺栓, 有效杜绝了紧固螺栓断裂失效情况再次发生。

关键词: 螺栓; 失效分析; 折叠; 疲劳开裂

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.05.028

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2016)05-0170-06

Fracture Failure Analysis of Fastening Bolt on Wind Driven Generator

ZHOU Yi^{1,2}, HE Ming-qiang^{1,2}, MEI Hua-sheng^{1,2}, WANG Chang-peng^{1,2}

(1.Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China;

2.Chongqing Engineering Research Center for Environmental Corrosion and Protection, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: Objective To study the fracture failure reasons of fastening bolt present in a military used wind driven generator. **Methods** The fracture failure reasons of fastening bolt on a military used wind driven generator were analyzed by taking advantage of chemical composition analysis, mechanics property analysis, fracture scanning analysis as well as microstructure analysis and testing. **Results** The original folded defects at the bottom of fracture bolt thread provided a beneficial condition for the fatigue crack. Meanwhile, there were some abnormalities concerning assembly among the bolt head, fastening washer and flange plate. Hence the contacting area got higher centralized stress under the effect of the external force, making for generation and further expansion of fatigue fracture. **Conclusion** Strict quality control of incoming bolts, regular check of bolt in service condition, and timely replacement of bolt with potential safety hazards contribute to preventing the fastening bolt from fracture failure again.

KEY WORDS: bolts; failure analysis; fold; fatigue fracture

高强度紧固螺栓是风力发电机组的重要部件, 在使用过程中由于螺栓本身材质、加工成形

工艺、安装及使用环境等因素, 紧固螺栓在长期服役情况下, 经受外界较大循环载荷作用, 会发

收稿日期: 2016-08-06; 修订日期: 2016-08-14

Received: 2016-08-06; Revised: 2016-08-14

作者简介: 周漪(1983—), 女, 重庆人, 高级工程师, 主要研究方向为材料环境腐蚀与防护。

Biography: ZHOU Yi(1983—), Female, from Chongqing, Senior engineer, bachelor, Research focus: corrosion and protection of materials.

通讯作者: 王长朋(1985—), 男, 重庆人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为材料失效与分析。

Corresponding author: WANG Changpeng(1985—), Male, from Chongqing, Master, Engineer, Research focus: failure and analysis of materials.

生缓慢的、连续的塑性变形，从而使螺栓容易出现疲劳开裂^[1-2]。高强度螺栓指的是强度达 8.8 级及以上的螺栓，在实际工作中，它们要承受拉力、压力、剪切力、扭转力及摩擦力等外力的综合作用。螺栓连接零件的载荷不同，故应力状态不尽相同，因此制作紧固件的材料应具有高的强度和韧性，同时要求耐磨性好^[3-4]。对于风力发电机组而言，高强度螺栓作为机组转动部件的连接部件和密封部件，在机组正常运转过程中发挥了重要作用。

1 试验方法

螺栓材料为 35CrMo，型号为：M16 mm×60 mm，性能等级为 8.8 级，工艺为：退火—酸洗—磷皂化—拉拔—冷墩—搓丝—淬火—镀达克罗。螺栓由甘肃敦煌某风力发电厂提供，用于风力发电机组基座上，每个基座上安装 5 颗。使用约 4 个月后发现批量断裂，抽取 2 件断口保存较完整的 1#，2#断裂件和 3#，4#，5#，6#未断件进行分析。

利用 ICP 分析仪按照 GB/T 20125—2006 《低合金钢 多元素含量的测定 电感耦合等离子体原子发射光谱法》对螺栓进行化学成分分析，采用 WDW-5 型拉伸试验机按照 GB/T 228—2002 《金属材料室温拉伸试验方法》进行力学性能测试，采用 JB-300B 型冲击试验机按照 GB/T 229—2007

《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》进行冲击试验测试，采用 HR-150A 型洛氏硬度计按照 GB/T 230.1—2004 《金属洛氏硬度试验 第 1 部分：试验方法（A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T 标尺）》进行洛氏硬度分析，采用 Quanta200 环境扫描电镜对断口进行形貌扫描分析，采用 Observer.A1m 型倒置式金相显微镜按照 GB/T 13320—2007 《钢质模锻件金相组织评级图及评定方法》进行金相组织分析。

2 试验结果

2.1 宏观分析

螺栓所处环境气候干燥少雨，6 件螺栓样品外表面无明显腐蚀现象，断裂位置附近表面达克罗涂层完整，2 件断裂件螺栓断裂位置在距法兰盘约 35 mm 处，裂纹都是起始于螺纹根部，断口有典型的疲劳贝壳纹，最后断裂区有明显的剪切唇，都属于疲劳断裂^[2]。螺栓与法兰盘之间安装紧固垫圈，在螺栓头部表面存在较明显压痕，在法兰盘表面部分区域也存在明显挤压凹痕，应该是装配安装不当导致垫圈与螺栓及法兰盘之间存在异常挤压摩擦所致。两件断裂螺栓及法兰盘宏观形貌如图 1 所示。

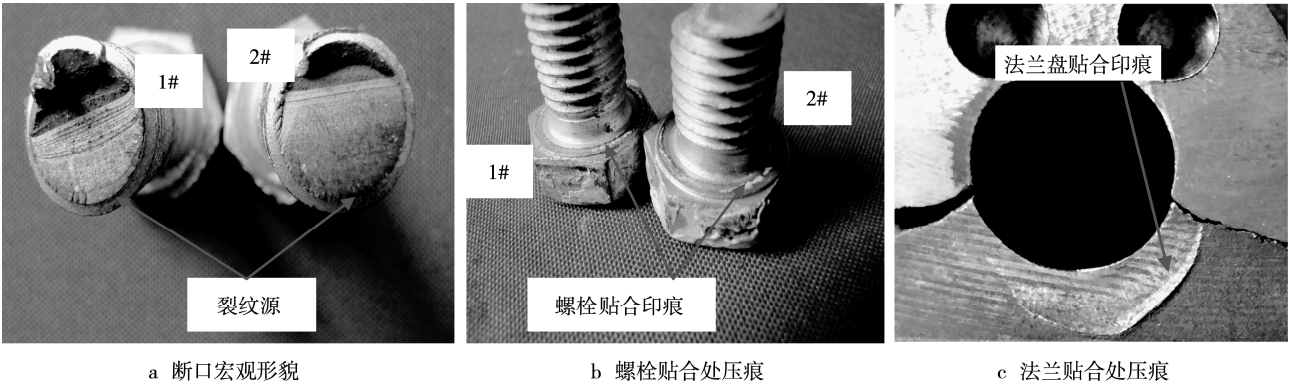


图 1 断裂螺栓及法兰盘宏观形貌

Fig.1 Microscopic of fracture bolt and flange

2.2 化学成分分析

在 1#断裂失效件上靠近断口处截取试样进行

化学成分分析，结果见表 1。由表 1 可知，样品化学成分符合 35CrMo 材料的标准要求。

表 1 1#样品化学成分测试结果

Table 1 1# sample chemical component test results

元素	C	S	Si	Mn	Cr	Mo	P
标准值	0.33 ~ 0.38	≤0.030	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.90	0.90 ~ 1.20	0.15 ~ 0.30	≤0.030
实测成分	0.37	0.006	0.24	0.68	0.96	0.21	0.013

2.3 力学性能分析

取同批 3#, 4#螺栓螺杆部分, 加工成标准拉伸样品进行拉伸试验, 测试结果见表 2。根据该 GB/T 5782—2000《六角头螺栓》, 螺栓的等级为 8.8 级, 螺栓的力学性能应该按照 GB/T 3098.1—2010《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》要求。由表 2 可知, 3#, 4#样品力学性能符合标准要求。

表 2 力学性能测试结果
Table 2 Mechanical performance testing results

样品编号	抗拉强度/MPa	规定塑性伸长强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%
3#	966	879	17.5	64
4#	963	872	17.0	61
标准要求值	≥800	≥640	≥12	≥52

同样取同批次的 5#, 6#螺栓在杆身部分加工成标准 V 形缺口的冲击试样进行冲击试验, 冲断后对平整样品进行洛氏硬度分析。由表 3 可知, 5#, 6#样品低温冲击功和洛氏硬度符合 GB/T 3098.1—2010《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》要求。

表 3 低温冲击及硬度测试结果
Table 3 Low-temperature impact and hardness test results

样品编号	冲击吸收能量(-40 ℃)/J	硬度 (HRC)
5#	43.0	30.0, 30.0, 30.5
6#	41.0	30.0, 31.0, 30.5
标准要求值	≥27	22 ~ 34

2.4 断口分析

1#, 2#螺栓断口特征基本一致, 现对 1#样品进行断口微观分析。1#样品裂纹在螺纹根部多个位置萌生, 裂纹源有裂纹扩展相遇形成的台阶纹, 断口主要为撕裂, 未发现有原始裂纹、非金属夹杂、折叠等原始缺陷, 如图 2 所示。1#样品扩展区约占整个断口面积的 70%, 断口为准解理断裂, 细疲劳纹间有疲劳台阶纹, 如图 3 所示。1#样品瞬间断裂区断口为韧窝的韧性断裂, 如图 4 所示。样品承受的名义应力影响疲劳裂纹扩展区和瞬断区的面积比例, 名义应力越大, 瞬间断裂区面积越大^[3], 1#样品瞬间断裂区约占 20%, 说明承受的名义应力并不大。

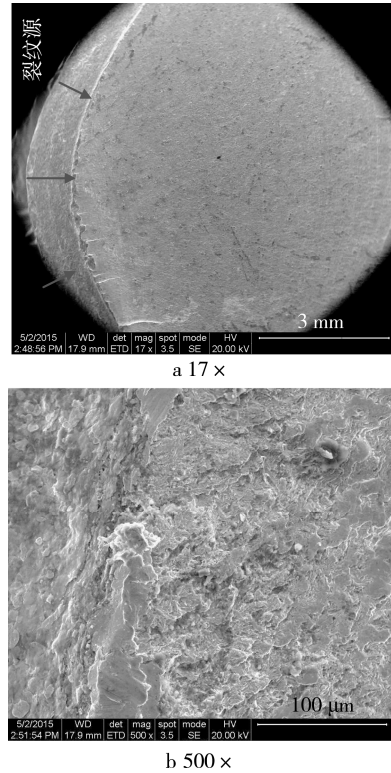


图 2 1#样品裂纹源微观形貌
Fig.2 Crack source microtopography of sample 1#

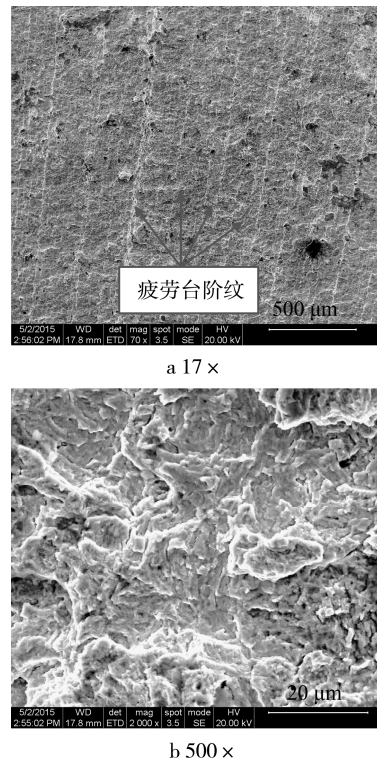


图 3 1#样品疲劳裂纹扩展区断口微观形貌
Fig.3 Fracture micro topography of fatigue crack expansion area of sample 1#

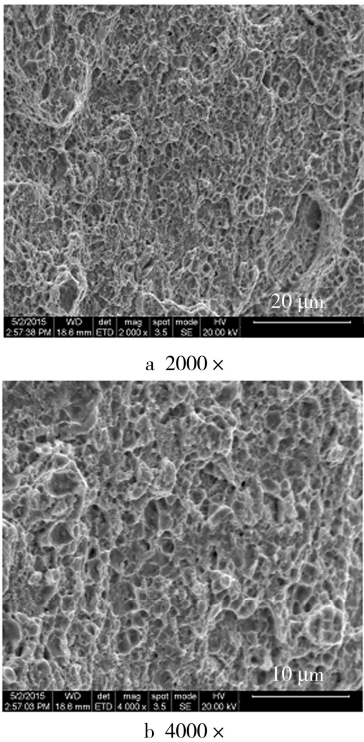


图 4 1#样品瞬间断裂区断口微观形貌

Fig.4 Fracture micro topography of instantaneous fracture area of sample 1#

2.5 金相分析

垂直于断口纵向剖开 1#螺栓进行非金属夹杂物评定、金相组织分析。在两件样品镶嵌后抛光态下观察其非金属夹杂物级别，根据 GB/T 10561—2005《钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法》进行评级，结果见表 4。

表 4 非金属夹杂物评定结果
Table 4 Non-metallic inclusion results

编号	A 类 (细系)	B 类 (细系)	C 类 (细系)	D 类 (细系)	DS 类
1#	0.5 级	0.5 级	0.5 级	1 级	0.5 级
2#	0.5 级	0.5 级	0.5 级	0.5 级	0.5 级

1#螺栓裂纹源处于螺纹根部，螺纹根部及螺纹节圆处表面存在明显折叠缺陷，如图 5 所示。断口附近金相组织为回火索氏体+弥散分布的细小碳化物，调质组织级别为 1 级，如图 6 所示。

3 分析与讨论

经化学成分分析，样品化学成分材料符合 35CrMo 要求；抽检的两件断裂螺栓金相组织

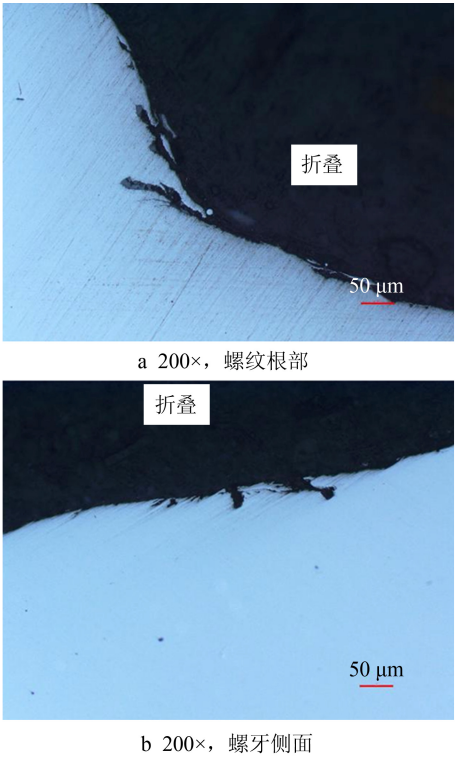


图 5 1#样品表面形态

Fig.5 1# metallographic structure

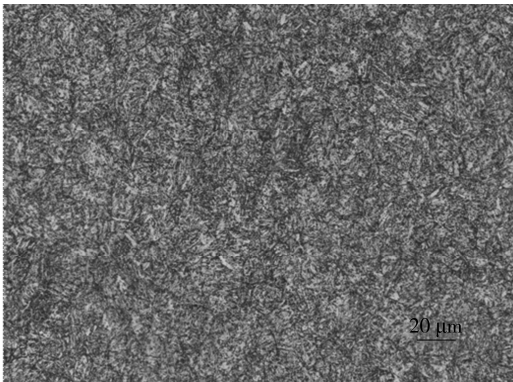


图 6 1#样品金相组织（500×）

Fig.6 1# metallographic structure core (500×)

未发现异常；3#，4#螺栓拉伸性能和 5#，6#螺栓冲击吸收能量及硬度符合 GB/T 3098.1—2010《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》要求。1#，2#裂纹在螺纹根部多处萌生，扩展区约占整个断口面积的 80%，细疲劳纹间有疲劳台阶纹。疲劳台阶纹是螺栓使用时应力幅发生了变化，受到循环冲击应力在断口上留下的痕迹^[5—6]。螺栓疲劳裂纹扩展区二次裂纹和撕裂棱不明显，断口疲劳贝壳纹较密集，属于低周疲劳^[7—8]。

疲劳断裂出现在承受波动应变或交变载荷构件中，所受最大应力未达到材料抗拉强度，甚至低于材料屈服点，断裂位置一般无明显塑性变形，属

于低应力断裂。疲劳断裂过程研究表明,疲劳寿命往往决定于疲劳裂纹的增大和扩展时间,并非决定于疲劳裂纹的产生,但是疲劳裂纹的产生为裂纹的扩展提供了条件^[9-13]。疲劳裂纹起始于零部件表面,零件的表面状态对疲劳强度会有较大影响,如表面粗糙度、表面机加刀痕、表面划伤、表面切削裂纹等。大量试验研究表明,表面粗糙度对零件疲劳强度至关重要,零件成形后,由于成形工艺、操作不当等原因,导致零件表面存在折叠、凹痕等缺陷。表面缺陷极易引起应力集中现象,尤其对高强度材料,表面稍有缺陷,往往成为较危险的尖锐缺口,外界循环载荷作用下成为疲劳源^[14-15]。

该案例中,螺栓头部和法兰盘之间的紧固垫圈装配不佳,导致与垫圈接触的螺栓头部和法兰盘表面均存在异常挤压痕迹。由于风力发电机通风系统在机组运行过程中会不可避免地引起上挡风板的振动,紧固螺栓和法兰盘装配不牢固的情况下,会造成连接螺栓出现松动,螺栓上的螺纹实际上就同缺口一样,应力集中系数较高。当与法兰盘发生异常配合时,在异常接触位置应力集中系数进一步提高,长期在此环境中服役容易导致疲劳断裂。另一方面,在断口形貌中可见,裂纹起始于螺纹根部。在金相组织分析中可见,在螺纹根部表面存在原始折叠缺陷,增大了螺纹表面的粗糙度。同时在螺纹根部应力集中较大,在较大的外界循环载荷作用下,表面折叠缺陷为疲劳裂纹的萌生提供了有利条件,裂纹在螺纹根部萌生并扩展。螺纹根部折叠的存在与滚齿成形控制有关,可能是由于滚轮使用次数过多或是超期服役,使得滚齿加工能力下降,可能造成螺纹折叠缺陷,此类缺陷样品可通过入厂检验进行排查。

螺栓的材料化学成分和力学性能符合标准要求。在断裂螺栓螺纹根部表面存在原始折叠缺陷,为疲劳裂纹的萌生提供了有利条件。同时,螺栓头部表面及法兰盘表面均存在较深压痕,说明两者之间垫圈装配异常,外力作用下接触面应力集中较大,有利于疲劳裂纹的萌生及进一步扩展。

4 结语

应加强螺栓采购入厂质量,提高螺栓入厂合格率,质量监督人员应了解其生产过程及质量保证体系,尤其对重要紧固螺栓进行100%超声探伤,排

除缺陷样件。定期检查在用紧固螺栓是否出现异常松动,装配过程中是否出现配合不良现象,并出具检查报告,确认在服役螺栓是否需要更换,提前排除安全隐患。

通过对入厂质量的严格把控及对在服役螺栓的一一检查,有效控制了不合格产品的流入使用,并及时排查更换了存在安全隐患的在服役螺栓,再未出现类似的失效事故。

参考文献:

- [1] 刘昌奎, 臧金鑫, 张兵. 30CrMnSiA 螺栓断裂原因分析[J]. 失效分析与预防, 2008(5): 143—145.
LIU Chang-kui, Zang Jin-xin, Zhang Bing. Analysis of 30CrMnSiA Bolt Fracture Reason[J]. Failure Analysis and Prevention, 2008(5): 143—145.
- [2] 曾勇. 新氢压缩机十字头连接螺栓失效分析[J]. 石油化工设备, 2011, 40(5): 156—158.
ZENG Yong. Failure Analysis of Crossing Connecting-rod Bolt for New Hydrogen Compressor[J]. Petrochemical Equipment, 2011, 40(5): 156—158.
- [3] 赵凯, 何玉怀, 刘新灵, 等. 刹车装置承压杯开裂原因分析[J]. 失效分析与预防, 2014(5): 289—294.
ZHAO Kai, HE Yu-huai, LIU Xin-ling, et al. Failure Analysis of Bearing Cups of Braking Unit[J]. Failure Analysis and Prevention, 2014(5): 289—294.
- [4] 孔祥军. 塔吊螺栓断裂原因分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(9): 1671—1815.
KONG Xiang-jun. Fracture Analysis of Bolt of Tower Crane[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(9): 1671—1815.
- [5] 王荣. 汽车螺栓断裂失效分析[J]. 理化检验: 物理分册, 2005, 20(10): 158—160.
WANG Rong. Failure Analysis of Vehicle Bolt[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2005, 20(10): 158—160.
- [6] 吴根林, 邓承伴, 尹晓霞, 等. 飞机起落架连接螺栓失效分析[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(10): 1000—1003.
WU Gen-lin, DENG Cheng-yang, YIN Xiao-xia, et al. Failure Analysis of Landing Gear Bolt Corrosion & Protection[J]. Corrosion and Prevention, 2015, 36(10): 1000—1003.
- [7] 徐文斌, 武庆, 连芳, 等. 差速器螺栓失效分析与对策[J]. 轻型汽车技术, 2011(Z2): 31—33.
XU Wen-bin, WU Qing, LIAN Fang, et al. Failure Analysis and Counterplan of Differential Mechanism Bolt[J]. Light Vehicles, 2011(Z2): 31—33.
- [8] 侯新华, 姜斌, 魏晓燕. D20 发动机连杆螺栓失效分析[J]. 金属热处理, 2015, 40(7): 200—203.
HOU Xin-hua, JIANG Bin, WEI Xiao-yan. Failure analysis of connecting rod bolt for D20 engine Heat Treatment of Metals[J]. Heat Treatment of Metal, 2015, 40(7): 200—203.

- [9] 李鹤林. 失效分析的任务、方法及其展望[J]. 理化检验: 物理分册, 2005, 41(1): 1—6.
LI He-lin. Task Method and Expectation of Failure Analysis[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2005, 41(1): 1—6.
- [10] 石祝竹, 莫煜. 扫描电镜(SEM)在失效分析中的应用[J]. 装备制造技术, 2011(11): 142—144
SHI Zhu-zhu, MO Yu. Application of Scanning Electron Microscope in Failure Analysis[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2011(11): 142—144
- [11] WANG Fang, SU Yan-jing, HE Jian-ying, et al. Investigation on Propagation Process of Electrically Induced Fatigue Cracking Using AFM[J]. Chinese Science Bulletin, 2005(19): 23—26.
- [12] 张建明, 宋斌. 传动轴失效分析[J]. 热处理技术与装备, 2011, 32(3): 57—59.
ZHANG Jian-ming, SONG Bin. Failure Analysis of the Transmission Shaft[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2011, 32(3): 57—59.
- [13] 秦会常, 杨守杰, 彭颀, 等. 某型火炮击针失效分析[J]. 精密成形工程, 2014, 6(2): 45—50.
QIN Hui-chang, YANG Shou-jie, PENG Ting, et al. Failure Analysis for the Artillery Pin[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(2): 45—50.
- [14] 赵凯, 何玉怀, 刘新灵, 等. 刹车装置承压杯开裂原因分析[J]. 失效分析与预防, 2014(5): 289—294.
ZHAO Kai, HE Yu-huai, LIU Xin-ling, et al. Failure Analysis of Bearing Cups of Braking Unit[J]. Failure Analysis and Prevention, 2014(5): 289—294.
- [15] 曹丽琴, 孙丽娜, 轩福贞, 等. 激光辅助氮化工艺中的开裂行为研究[J]. 表面技术, 2013, 42(6): 1—5.
CAO Li-qing, SUN Li-na, XUAN Fu-zhen, et al. Experimental Study on the Cracking Behavior in Laser-assisted Nitriding Process[J]. Surface Technology, 2013, 42(6): 1—5.