

一起 800 kV 罐式断路器液压机构工作缸断裂事故分析

李 岩, 吴国忠, 徐 贤, 包艳蓉

(宁夏电力公司电力科学研究院, 银川 750002)

摘要: 800 kV 断路器是保证 750 kV 输变电线路安全运行的重要开关设备。笔者针对一起 800 kV 双断口罐式断路器的液压机构工作缸断裂事故, 对断裂部位进行了强度校核计算及化学成分、显微组织、力学性能、制造工艺分析。认为生产厂家对液压工作缸进行再次超热处理, 使其产生铸态组织, 导致延伸率大幅下降, 是造成工作缸断裂的主要原因。

关键词: 双断口断路器; 罐式断路器; 液压机构; 断裂

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)04-0102-04

Analysis of a Fracture Fault of 800 kV Tank Circuit Breaker Hydraulic Working Cylinder

LI Yan, WU Guo-zhong, XU Xian, BAO Yan-rong

(Electric Power Research Institute of Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750002, China)

Abstract: 800 kV circuit breaker is an important switchgear to ensure the safe operation of 750 kV power transmission and transformation line. In this paper, an analysis is made into a fracture fault of 800 kV tank circuit breaker hydraulic working cylinder. By checking the strength and analyzing the chemical composition, microstructure, mechanical properties and the manufacturing process, it is found that the overheat treatment to the hydraulic working cylinder caused its cast microstructure. The cast microstructure lead to a decline in elongation, which may result in the fracture fault of the hydraulic working cylinder.

Key words: double-break circuit breaker; tank circuit breaker; hydraulic mechanism; fracture

0 引言

输电线路的功率输送能力与电压的平方成正比, 电压升高 1 倍, 输送能力将提高 4 倍^[1]。因此要大幅度提高线路的输电能力, 特别是提高远距离输电线路的输电能力, 就必须提高电网的电压等级。随着中国经济的发展, 西北地区原有的 330 kV 主网架及其线路走廊已无法满足电网发展及电力外送的需求。因此, 建设 750 kV 电网是西北地区乃至全国电网发展的迫切需求。750 kV 输变电线路所必需的 800 kV 高压断路器是保证电力系统安全运行的重要开关设备, 为中国经济的持续稳定发展提供了至关重要的电力保障。

2008 年之前, 国际上 800 kV 高压断路器仍为三断口或四断口断路器, 技术相对落后。2008 年 8 月中国自行研发的第 1 台 800 kV 双断口罐式断路

器在银川东 750 kV 变电站顺利投运, 填补了国际上 800 kV 双断口断路器的空白, 也为中国超高压电网的发展提供了产品技术保障。

800 kV 双断口罐式断路器应用于工程实践的时间不长, 几乎没有现成的运行经验借鉴, 没有成熟的检修维护技术, 因此积累相关的运行、事故经验很重要。据统计, 在断路器的各种故障中, 机械故障居于首位, 而且不少电气故障也是机械故障引发的^[2-6]。其中, 由于操动机构的机械故障引发的断路器故障占大多数, 对电力系统的安全运行构成极大的威胁^[7-10]。文中就一起 800 kV 双断口罐式断路器的液压机构断裂事故进行分析, 为 750 kV 电网的安全运行提供一定的参考依据。

2008 年 12 月 21 日, 宁夏某 750 kV 变电站的 1 台 800 kV 双断口罐式断路器的 B 相液压机构工作缸突然发生断裂。现场检查发现断裂部位位于液压机构工作缸大螺纹的根部, 见图 1。从运行次数及图 2

收稿日期: 2011-11-04; 修回日期: 2011-12-19

所示断口看,属低周疲劳断裂。断裂的液压机构工作缸选用的原材料为锻铝 2A50,为西南铝业公司专供。



图 1 断裂部位宏观照片

Fig. 1 Macrophoto of the fracture site



图 2 断口照片

Fig. 2 The fracture morphology

为了查找此次事故的根本原因,对工作缸断裂部位进行了强度校核计算,对断裂工作缸的化学成分、显微组织、力学性能和制造工艺进行了分析。

1 设计强度校核及分析

工作缸最小截面尺寸见图 3, 计算得最小截面积为 $S_{\min}=137 \text{ cm}^2$ 。

极端情况下工作缸受到的最大力 $F_{\max}$ (单位: N)为

$$F_{\max}=F_0+F_q=170\ 711+326\ 726=497\ 437 \quad (1)$$

式(1)中: F_0 为碟簧产生的拉力; F_q 为工作缸内液压油产生的压力。

由此得出工作缸最小截面的平均应力 σ_{nom} (单位: MPa)为

$$\sigma_{\text{nom}}=\frac{F_{\max}}{S_{\min}}=\frac{497\ 437}{137}=3\ 630.93=36.31 \quad (2)$$

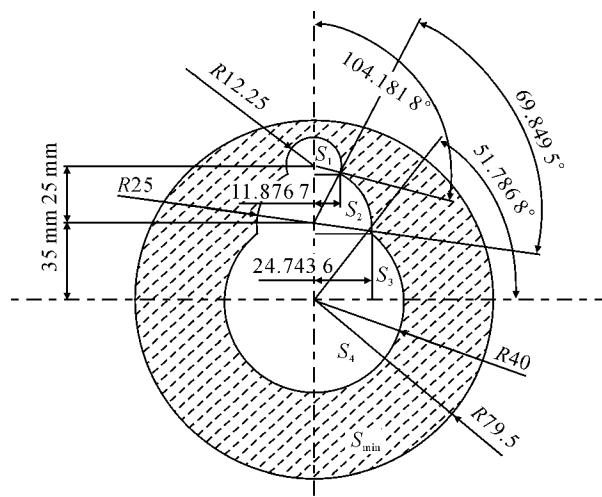
取应力集中系数 $K=2.8$, 得出工作缸最小截面的最大应力 $\sigma_{\max}$ (单位: MPa)为

$$\sigma_{\max}=K \cdot \sigma_{\text{nom}}=101.67 \quad (3)$$

锻铝 2A50 的抗拉强度 σ_b 为 362.6 MPa^[11], 安全系数 n 取 2.0^[12], 计算得工作缸的许用应力(单位: MPa)为

$$[\sigma]=\frac{\sigma_b}{n}=\frac{362.6}{2}=181.3 \quad (4)$$

由于 $\sigma_{\max} < [\sigma]$, 可见锻铝 2A50 能够满足设计的承载要求。



S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 $S_{\min}$ 单位为 mm^2 ; R 单位为 mm 。

图 3 工作缸的最小截面尺寸

Fig. 3 The minimum section dimensions of the working cylinder

2 化学成分分析

断裂工作缸的化学成分见表 1, 表 1 中的技术要求值参考文[13]。可见, 工作缸的化学成分符合 2A50 材料的技术要求。

表1 化学成分 (质量分数/%)

Tab. 1 The chemical composition (wt%)

成分	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	其他
检测值	2.10	0.61	0.58	0.18	0.80	-
2A50 材料的技	1.8~	0.4~	0.4~		0.7~	
术要求值	2.6	0.8	0.8	≤ 0.7	1.2	-

3 显微组织分析

断裂工作缸断口中心及边缘取样的金相组织分别见图 4、5^[14], 可见组织呈现铸态。工作缸的生产加工工艺为毛坯件 (原材料下料—锻造—粗车—固溶时效)—机加工—硬质阳极氧化, 正常组织为锻态, 见图 6、7^[14]。针对组织异常的情况, 就断裂工作缸的制造工艺过程进行了追溯。经调查确认, 机加工厂家对断裂工作缸的毛坯件进行机加工前的验收时, 认为毛坯件的硬度未达到要求, 自行再次进行了固溶时效处理, 但处理后没有做金相和强度试验。通过查阅机加工厂家对断裂工作缸毛坯件的再次固溶时效处理温度记录图表明, 淬火温度曲线的第 1 段温度接近 540 °C, 第 4 段曲线温度约为 560 °C, 其淬火温度已经接近和大于 550 °C, 接近于重熔了 1 次, 导致金相组织改变为类似铸态。

从制造工艺追溯中得知, 机加工厂家对工作缸的孔、台等形状的加工采用了电火花加工的方法。此方法加工的工件表面容易产生显微裂纹^[15]。鉴于

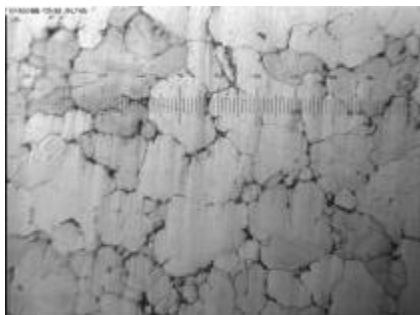


图4 断裂工作缸心部组织

Fig. 4 The microstructure of the center part of the broken working cylinder

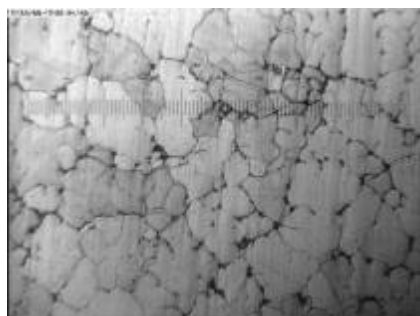


图5 断裂工作缸边缘组织

Fig. 5 The microstructure of the edge part of the broken working cylinder



图6 工作缸心部锻态组织

Fig. 6 The forging microstructure of the center part of the working cylinder

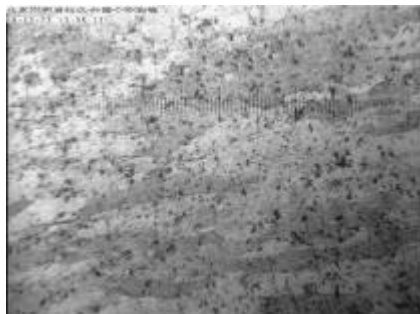


图7 工作缸边缘锻态组织

Fig. 7 The forging microstructure of the edge part of the working cylinder

这种情况,采用扫描电镜对断裂工作缸孔内壁和机加工前未再次热处理的工作缸孔内壁进行分析,扫描电镜照片分别见图8、9^[14]。由扫描电镜结果可见,

断裂工作缸的孔内壁存在沿晶微裂纹,按正常工艺制造的工作缸孔内壁未发现明显沿晶微裂纹。对于电火花加工工艺,不同材料对裂纹的敏感度不同,脉冲放电产生的爆发力更容易使脆性材料产生裂纹^[15]。断裂工作缸在机加工前再次热处理,使其组织呈现铸态,脆性增加,电火花加工时,表面更容易产生微裂纹;而机加工前未再次热处理的工作缸组织呈现锻态,塑性相对较好,电火花加工的孔内壁未发现明显沿晶微裂纹。电火花加工产生的微裂纹,会对工作缸的断裂起到促进作用。但铸态组织是使电火花加工产生微裂纹的主要原因。

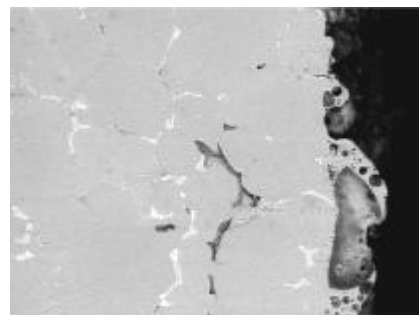


图8 断裂工作缸孔内壁电镜照片

Fig. 8 The SEM image of the inner surface of the broken working cylinder

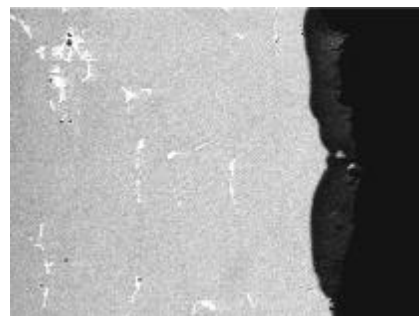


图9 未再次热处理的工作缸孔内壁电镜照片

Fig. 9 The SEM image of the inner surface of the no-reheat treatmented working cylinder

4 力学性能分析

断裂工作缸和机加工前未再次热处理的工作缸的力学性能检测结果见表2,表2中的技术要求值参考文[11]。从表2中可以看出,机加工前未再次热处理的工作缸的各项力学性能指标基本都符合2A50材料的技术要求,而断裂工作缸的硬度值符合技术要求,抗拉强度值低于技术要求下限值362.6 MPa,延伸率远低于技术要求下限值8%。从对断裂工作缸的显微组织分析中得出,机加工厂家对断裂工作缸毛坯件的再次超温热处理使得断裂工作缸材料的金相组织发生异常,呈现铸态,进而导致其延伸率下降至低于技术要求水平。

表2 力学性能试验结果

Tab. 2 The results of the mechanical properties

项目	布氏硬度/HB	抗拉强度/MPa	延伸率/%
断裂工作缸	心部 110/外缘 119	350/340/340	3/3/4
未再次热处理 的工作缸	心部 105/外缘 113	360/360/359	20/22/20
2A50 材料的 技术要求值	≥95	≥362.6	≥8

5 结论

通过对断裂工作缸的化学成分、显微组织、制造工艺及力学性能分析,得出 800 kV 双断口罐式断路器液压机构工作缸断裂的原因为,机加工厂家对工作缸的毛坯材料进行再次热处理,其加热温度过高造成材料接近重熔状态,致使产生了类似铸态的金相组织,进而导致工作缸材料的延伸率大幅下降,是造成工作缸断裂的主要原因。电火花加工产生微裂纹,对断裂起到了促进作用。

致谢:液压工作缸生产厂家承担了文中大量的试验与分析工作,谨致谢意!

参考文献:

- [1] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.
LIU Zhen-ya.UHV power grid[M]. Beijing:China Economic Publishing House,2005.
- [2] 徐国政,张节容,钱家骊.高压断路器原理和应用[M].北京:清华大学出版社,2000.
XU Guo-zheng,ZHANG Jie-rong,QIAN Jia-li.High-voltage circuit breaker:theory and application[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2000.
- [3] 高伟.浅谈 RMVS1 真空断路器的机械可靠性[J].上海电器技术,2005(4):30-32.
GAO Wei.Talk about the mechanical reliability of the vacuum breaker[J]. Shanghai Electric Appliance Technology, 2005(4):30-32.
- [4] 姚月娥,张挺,刘春,等.断路器在线机械状态的信息处理[J].高压电器,2004,40(2):107-108.
YAO Yue-e,ZHANG Ting,LIU Chun,et al.Data processing of on-line mechanical condition for circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2004,40(2):107-108.
- [5] 关永刚,黄瑜珑,钱家骊.基于振动信号的高压断路器机械故障诊断[J].高电压技术,2000,26(3):66-68.
GUAN Yong-gang,HUANG Yu-long,QIAN Jia-li.An overview on mechanical failure diagnosis technique for high voltage circuit breaker based on vibration signal[J]. High Voltage Engineering,2000,26(3):66-68.
- [6] 常广,张振乾,王毅.高压断路器机械故障振动诊断综述[J].高压电器,2011,47(8):85-90.
CHANG Guang,ZHANG Zhen-qian,WANG Yi.Review on mechanical fault diagnosis of high-voltage circuit breakers based on vibration diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2011,47(8):85-90.
- [7] 常广,王毅.高压断路器机械状态在线监测装置的研究[J].高压电器,2003,39(2):44-46.
CHANG Guang,WANG Yi.An on-line mechanical condition monitoring device for high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus,2003,39(2):44-46.
- [8] 石飞,林莘.真空断路器中关键零件机械可靠性计算与分析[J].电气制造,2006(8):34-36.
SHI Fei,LIN Xin.Mechanical reliability calculation and analysis for the key components in vacuum circuit breaker [J]. Electrical Manufacturing,2006(8):34-36.
- [9] 郭贤珊,李仲夫,陈轩恕.断路器操动机构在线监测参数的选择[J].高压电器,2002,38(1):24-26.
GUO Xian-shan,LI Zhong-fu,CHEN Xuan-shu.Selection on on-line monitoring parameters of circuit breakers operating mechanism[J]. High Voltage Apparatus,2002,38 (1):24-26.
- [10] 杨兰均,张伟政,王宝利,等.SPC 法检测高压断路器机械故障[J].高电压技术,1998,24(2):50-51.
YANG Lan-jun,ZHANG Wei-zheng,WANG Bao-li,et al.A method SPC of detecting mechanical failure of high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Engineering,1998,24(2): 50-51.
- [11] GB n223—1984.铝合金锻件[S].
GB n223—1984.Aluminum alloy forging[S].
- [12] 钟丽萍.机械基础[M].北京:北京大学出版社,2006.
ZHONG Li-ping.Mechanical basis[M]. Beijing:Beijing University Press,2006.
- [13] GB/T 3190—1996.变形铝及铝合金化学成分[S].
GB/T 3190—1996.Deformation aluminum and alloy chemistry component[S].
- [14] 西安西开高压电气股份有限公司.黄河变 800 kV 罐式断路器液压机构工作缸断裂情况原因分析[R].西安:西安西开高压电气股份有限公司理化室,2009.
Xi'an Shiky High Voltage Electric Co.,Ltd..Analysis of the fracture of 800 kV tank circuit breaker hydraulic working cylinder of the Yellow River Transformer Substation[R]. Xi'an:Physics and Chemical Laboratory of Xi'an Shiky High Voltage Electric Co.,Ltd.,2009.
- [15] 南欢.电火花加工变质层对模具成型表面的影响[J].模具制造,2006(7):70-73.
NAN Huan.The impact of EDM denatured layer on molding surface of die & mold[J]. Die & Mold Manufacture, 2006(7):70-73.

李岩(1971—),男,高级工程师,长期从事电网金属技术监督工作。