

汽轮机高压内缸螺栓断裂失效分析

李红川

国家能源集团科学技术研究院有限公司成都分公司, 四川 成都 610000

[摘要]文中主要对汽轮机高压内缸螺栓断裂原因进行了分析研究。通过扫描电镜、力学试验、金相显微组织观察、光谱分析、硬度检测对材质为 20Cr1Mo1VNbTiB 的高温螺栓断口进行宏观、微观分析, 用显微镜对金相组织形貌进行了分析。试验结果发现, 螺栓断口表面平整且垂直于螺栓轴向, 呈现出疲劳断裂的特征。纵截面硬度值偏高、冲击韧性偏低。断裂的主要原因是螺栓在长期的高温高压作用下, 性能有所下降, 同时由于承受较高的预紧力, 引起疲劳裂纹萌生, 最终疲劳裂纹扩展形成破坏。

[关键词]汽轮机; 螺栓; 断裂

DOI: 10.33142/aem.v3i8.4725

中图分类号: TM621

文献标识码: A

Fracture Failure Analysis of Bolts in High Pressure Inner Cylinder of Steam Turbine

LI Hongchuan

Chengdu Branch of China Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract: This paper mainly analyzes and studies the causes of bolt fracture of high pressure inner cylinder of steam turbine. The fracture of high temperature bolt made of 20Cr1Mo1VNbTiB was analyzed macroscopically and microscopically by scanning electron microscope, mechanical test, metallographic microstructure observation, spectral analysis and hardness test. The test results show that the fracture surface of the bolt is flat and perpendicular to the axial direction of the bolt, showing the characteristics of fatigue fracture. The hardness value of longitudinal section is high and the impact toughness is low. The main reason for the fracture is that the performance of the bolt decreases under the action of long-term high temperature and high pressure. At the same time, due to bearing high preload, fatigue crack initiation is caused, and finally fatigue crack propagation is formed and damaged.

Keywords: steam turbine; bolt; crack

1 概况

汽轮机高压内缸螺栓属于汽轮机重要部件之一, 高压内缸在汽轮机运行中承受较大压力和温度, 同时又需要保证汽缸结合面有很好的严密性, 螺栓强度等级通常要求达到 10.9 级, 因此国内火电机组高压内缸多采用直径达到 M120 的法兰通孔螺栓。20Cr1Mo1VNbTiB 广泛的应用于我国火力发电机组高中压缸、高压主汽门、高压调门以、中压联合阀门及导气管螺栓等重要高温部件, 属于自主研发的低合金高强度钢。该材料含有的 Cr、Mo、V 等元素具有弥散和固溶强化作用, 含有的 Nb、Ti、B 等元素具有细晶强化的作用。随着我国火力发电机组运行小时数的增加, 一些投运时间较长的机组却经常发生螺栓断裂事故, 其中断裂螺栓的材料不乏 20Cr1Mo1VNbTiB 钢。

西南某电厂 2 号机组为亚临界 300MW 优化机型, 型号为 N300-16.7/537/57-4, 为一次中间再热两缸两排汽反动、凝汽式汽轮机。该机于 1998 年投产, 至 2019 年 A 修累计运行小时数 13.9 万小时。2019 年 8 月在检修过程中发现编号为内 12 的高压内缸螺栓发生断裂, 螺栓规格为 M120×4×1030mm, 材质为 20Cr1Mo1VNbTiB。

2 试验分析

2.1 断口宏观分析

螺栓的断口截面位置位于高压内缸螺栓靠上侧螺纹至下往上第 18 扣的横截面上, 如图 1 所示, 断口表面平整, 上部分呈现出氧化后的红褐色, 为旧断口, 是螺栓在运行中受到外界高温高压的影响造成的。断口下部有小部分银灰色的新断口, 是螺栓在拆卸的最终被扭断的。如图 2 所示, 旧断口的左上角呈疲劳条带状特征, 其余部位疲劳扩展区, 呈疲劳断裂特征。

2.2 化学成分试验

对断口切取 30mm×30mm×30mm 试样进行化学成分试验, 试验结果见表 1。



图1 螺栓断裂原图



图2 螺栓断口图

表1 螺栓化学成分

元素	C	Cr	Mo	V	Ni	Nb	Ti
含量	0.205	1.081	0.832	0.630	0.066	0.138	0.095
20Cr1Mo1VNbTiB 标准值	0.17-0.23	0.90-1.30	0.75-1.00	0.50-0.70	≤0.30	0.11-0.22	0.05-0.14

化学试验结果表明，螺栓材质满足 GB /T 20410-2006 中对 20Cr1Mo1VNbTiB 规定。

2.3 金相组织观察

在断裂螺栓的断口附近取样进行金相组织观察，采用线切割的方式取两块试样，将两块试样制成横截面试样和纵截面试样。采用机械抛光后，用 4% 的硝酸酒精腐蚀制成金相试样，在光学金相显微镜下观察金相显微组织形貌。在金相显微镜下，可观察到螺栓的金相组织为回火贝氏体组织，能观察到的组织呈羽毛状、条状。如图 3、图 4、图 5、图 6 所示。

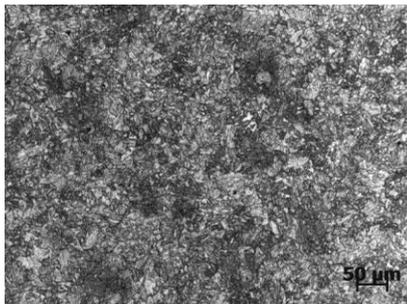


图3 横截面 (200X)

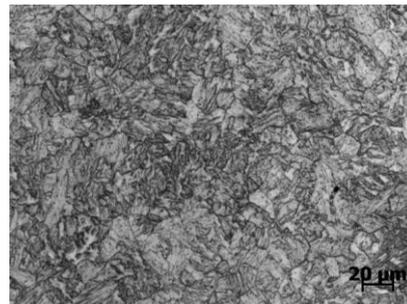


图4 横截面 (500X)

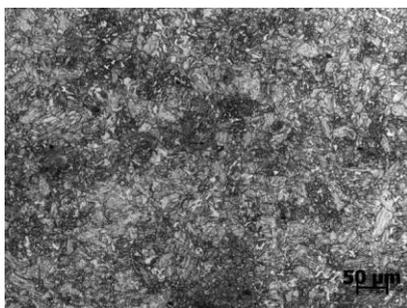


图5 纵截面 (200X)

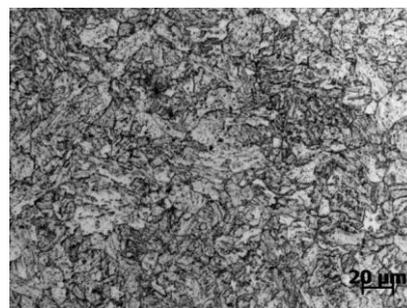


图6 纵截面 (500X)

2.4 硬度检测

对金相制样的两个试样进行硬度检测，采用台式数显布氏硬度计，型号为 HBS-3000，布氏硬度检测结果如表 2 所示。

表 2 布式硬度检测

测量值 (HBW 2.5/187.5)		
横截面	285	286
纵截面	323	328

从表 2 中可以看出, 断裂螺栓的纵截面硬度值偏高, 超过了 GB /T 20410-2006 对 20Cr1Mo1VNbTiB 材质的布式硬度值要求 (255-302HBW), 横截面硬度在标准范围之内。

2.5 常温冲击试验

对断裂螺沿着纵向取 10mm×10mm×55mm 的三个试样进行常温冲击试验, 采用美特斯冲击试验机, 型号为: ZBC2302-CE, 冲击试验结果如表 3 所示。

表 3 冲击试验

试样编号	冲击吸收功 A_k (J)	标准要求值 (J)
试样 1	12	≥39
试样 2	12	
试样 3	10	

从表 3 中可以看出, 断裂螺栓的纵向常温冲击吸收功 A_k (J) 小于 GB /T 20410-2006 标准中对 20Cr1Mo1VNbTiB 材质的规定值: 不小于 39J。

2.6 断口扫描电镜分析

采用蔡司 EV018 型扫描电镜对断裂螺栓疲劳裂源附近的断口进行显微形貌观察, 观察位置见图 7 所示。

疲劳裂源区附近氧化较严重, 断面可见球状氧化物及局部疲劳辉纹, 见图 8、图 9。



图 7 取样位置

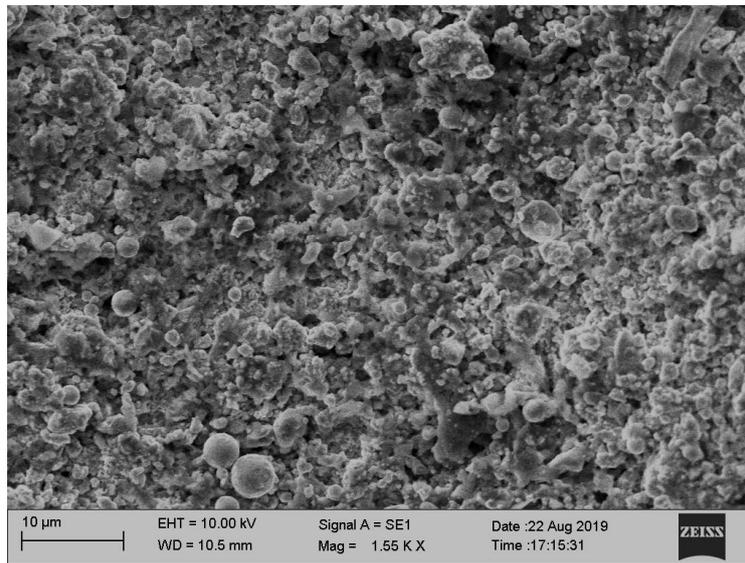


图8 裂纹源附近断口形貌

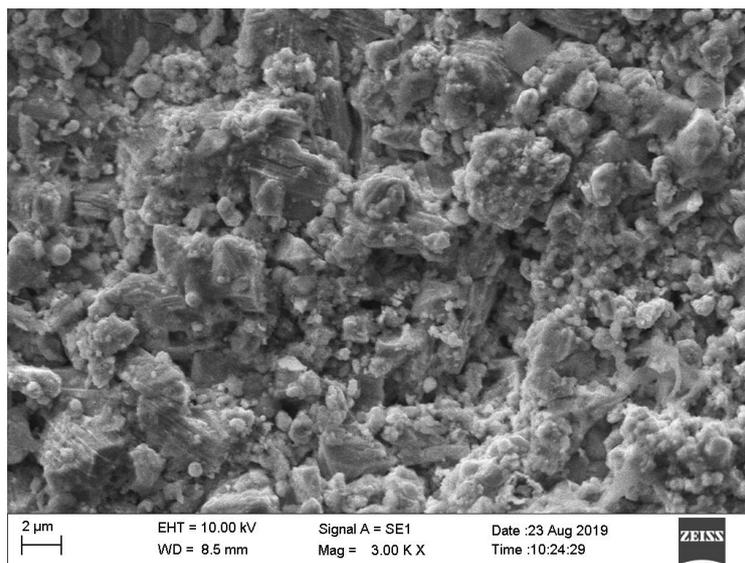


图9 疲劳辉纹形貌

3 分析结论

(1) 经对该断裂高中压缸螺栓金相化学成分分析,符合 GB /T 20410-2006 中对 20Cr1Mo1VNbTiB 规定,排除材质用错的情况。

(2) 螺栓断口表面平整且垂直于螺栓轴向,旧断口部分呈氧化后的红褐色,在扫描电镜下能看到明显的疲劳辉纹形貌,呈现出疲劳断裂的特征。

(3) 螺栓的纵截面硬度值高于标准规定值,冲击韧性低于标准规定值,说明螺栓的性能在长期的高温高压作用下,材料发生老化和蠕变,导致力学性能不断下降。

(4) 由于螺栓力学性能下降的原因,在汽轮机内缸螺栓承受较高的预紧力下,以及长期的交变载荷作用下,引起疲劳裂纹萌生,最终疲劳裂纹扩展形成破坏。

4 预防汽轮机高温螺栓失效的措施

(1) 在役机组停机大修期间,对高温螺栓进行硬度、超声波检验,对硬度值不合格的螺栓进行更换处理,对超声

波检测存在裂纹的螺栓及时更换。

(2) 对螺栓的超声波检测中,除传统的纵波直探头和横波斜探头检测螺栓杆部和丝扣外,须结合当前广泛推广的相控阵超声波检测技术,通过全聚焦技术,提高裂纹的检测率。

(3) 对新更换安装的螺栓进行百分之百光谱复查,并进行超声波、硬度检验,合格后方可安装。

(4) 在役机组在大修期间,必要时有针对性的对运行时间较长的螺栓,按批次抽取进行实验室取样力学检测,对该批次螺栓做好力学性能跟踪,以便于及时更换。

[参考文献]

- [1] 蔡文河,严苏星. 电站重要金属部件的失效及其监督[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
 - [2] 韩宇,安江英. 汽轮机高温螺栓的断裂特性分析[J]. 中国电力教育,2010,3(1):75-76.
 - [3] 龚静,何鹏飞,胡加瑞,谢亿,陈红冬. 法兰通孔螺栓断裂原因分析[J]. 湖南电力,2015,11(4):35-36.
 - [4] 闵江涛. 汽轮机检修中螺栓损坏原因分析及对策[J]. 内燃机与配件,2017,12(10):61-62.
 - [5] 奚杰峰,马延会. 国产20Cr1Mo1VNbTiB主汽门螺栓的失效机理研究[J]. Hot Working Technology,2015,14(2):68-69.
- 作者简介:李红川(1983.11-)男,华北电力大学,硕士研究生,金属材料专业,国家能源集团科学技术研究院有限公司成都分公司,金属专责,工程师,从事电站金属材料检验及失效分析。