20Cr1Mo1VNbTiB 高温螺栓断裂失效分析

吴红辉[1]，王韦[2]
（1. 广东电研锅炉压力容器检验中心有限公司，广州　510700；2. 东风天汽模（武汉）金属材料成型有限公司，武汉　430040）

摘　要：对某电厂汽轮机进行解体检修，发现 1 根材质为 20Cr1Mo1VNbTiB 的高温螺栓已断裂。采用断口分析、金相试验、常温力学性能试验及化学成分分析法分析其断裂原因。结果表明，螺杆表面密集的机械损伤所引起的应力集中是导致此次螺栓发生断裂的直接原因；同时，螺栓晶粒较粗大、碳化物在长期高温高压运行过程中析出、冲击韧性下降是螺栓发生解理脆性断裂的根本原因。

关键词：20Cr1Mo1VNbTiB；螺栓；应力集中；冲击韧性；解理脆性断裂
中图分类号：TG 142.73　　**文献标志码**：B　　**文章编号**：1674－1951（2018）10－0027－03

0　引言

汽轮机是火力发电机组的核心部件之一，其正常运行决定着机组的安全性、可靠性及经济高效性。汽轮机螺栓作为汽轮机的紧固件，在保证汽缸中分面汽密性上发挥着至关重要的作用[1-2]。为适应高温、高应力及蒸汽氧化腐蚀的工作环境，合金钢、12% Cr 铁素体不锈钢、高温合金钢等是制造汽轮机高温螺栓的主要材料。20Cr1Mo1VNbTiB 作为一种珠光体高温热强钢，具有较高的持久强度和抗松弛性能，且持久塑性好，热脆倾向小，缺口敏感性低，主要应用于制造工作温度低于 570 ℃ 的高温螺栓[3-4]。

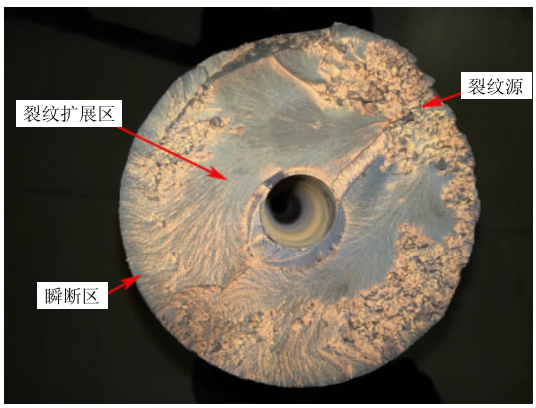
根据近年国内火电机组事故统计表明，汽轮机螺栓失效断裂导致电厂机组非计划停运的事故时有发生，造成较大经济损失[5-7]。本文针对某电厂汽轮机高压缸用 20Cr1Mo1VNbTiB 螺栓的断裂失效进行了探究，较全面地分析了其断裂原因及机理，并提出了相应预防措施，以避免同类事故的重复发生。

1　试验及结果

断裂螺栓规格为 M120 mm × 4 mm × 1 530 mm，断裂部位为距螺栓端部 570 mm 螺杆处，工作温度在 510 ℃左右，汽轮机累计运行时间约 140 000 h。试验借助金相显微镜、布氏硬度计、力学试验机、直读光谱仪及扫描电子显微镜，对其断裂原因及机理进行了分析。

1.1　断口分析

图 1 为断裂螺栓断口正面及侧面的宏观形貌。由图 1a 可知，螺栓断面整体较平整，稍有凹凸区域，螺杆无明显宏观塑性变形，沿断口纹理走向可判断出螺栓断裂过程中裂纹源区、扩展区和瞬断区 3 个区域。由图 1b 可知，断口裂纹源的侧表面存在较密集的机械损伤凹坑，系安装或拆卸过程中人为所致。由此可判断螺杆表面密集、点状机械损伤是造成该部位应力集中，螺栓形成裂纹源的外在诱因。



a 断口正面

b 断口侧面

图 1　螺栓断口宏观形貌

对该失效螺栓断口的裂纹源及裂纹扩展区取样，采用扫描电子显微镜（SEM）扫描，结果如图 2

收稿日期：2018－06－05；**修回日期**：2018－08－17

所示。由图 2a、图 2b 可以看出，这两个断裂区域均无明显韧窝，但存在近河流花样、短且弯曲的撕裂棱，呈准解理断裂形貌[8]；结合图 2c、图 2d 可以看出，断裂区域存在较明显的解理台阶。由此可判断螺栓断裂属于解理脆性断裂。

1.2　金相组织

于螺栓断口处及远离断口螺杆部位横截面分别取样，借助莱卡 DMI3000M 金相显微镜进行金相组织分析。试样分别标记为 #1，#2，金相照片如图 3 所示。由图可知，#1，#2 试样金相组织均为回火贝氏体，部分碳化物析出，#1 断口处可观察到明显的沿晶微裂纹。参照 DL/T 439—2006《火力发电厂高温紧固件技术导则》可知，#1，#2 试样晶粒度为 3 ~ 4 级，属于微观中等粗晶。

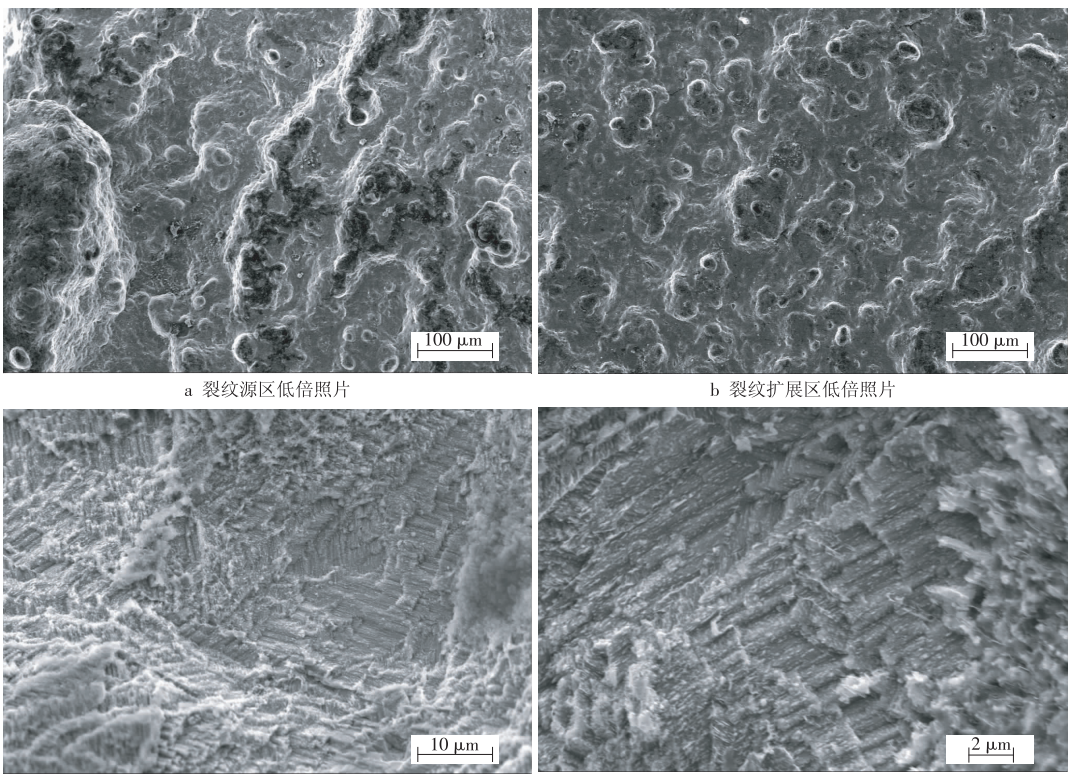
1.3　力学性能试验

1.3.1　硬度试验

采用 HB - 3000 布氏硬度计（HBW）分别对 #1，#2 试样进行硬度试验。参照 DL/T 439—2006《火力发电厂高温紧固件技术导则》中对 20Cr1Mo1VNbTiB 高温螺栓硬度的规定可知，远离断口的 #2 试样及断口附近的 #1 式样的多次布氏硬度测量值均在正常范围内，见表 1。

1.3.2　拉伸性能试验

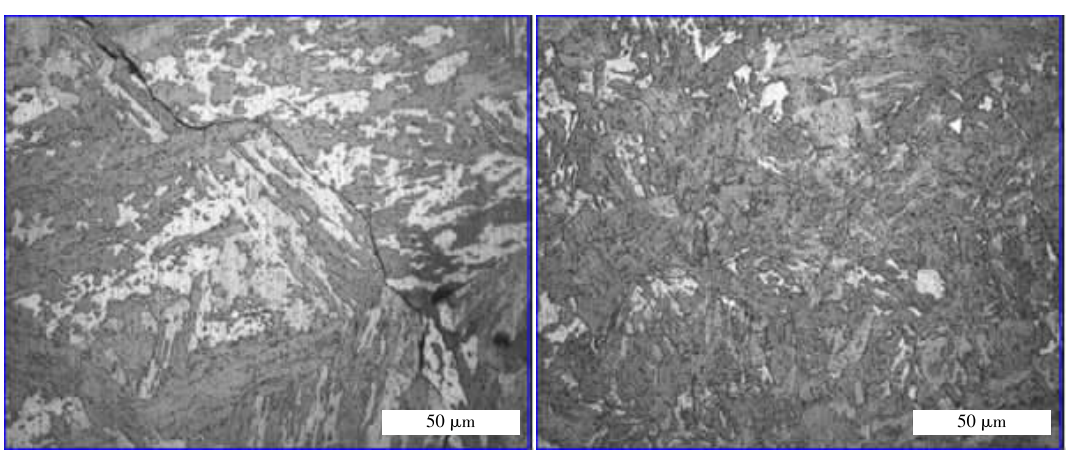
沿纵向对螺栓螺杆部分取样，标记为 #3 试样并



a 裂纹源区低倍照片　　b 裂纹扩展区低倍照片

c 裂纹源区高倍照片　　d 裂纹扩展区高倍照片

图 2　螺栓断口的 SEM 形貌



a 断口处 #1 试样　　b 远离断口处 #2 试样

图 3　金相组织

进行常温力学拉伸试验。参照 DL/T 439—2006《火力发电厂高温紧固件技术导则》中对 20Cr1Mo1VNbTiB 高温螺栓拉伸性能的规定可知,断裂螺栓常温拉伸性能满足技术要求,见表 2。

表 1　#1 及 #2 试样的布氏硬度　HBW

试样	布氏硬度值测量值			平均值	DL/T 439—2006 标准要求
	1	2	3		
#1	275	277	278	277	252 ~ 302
#2	272	278	282	277	

表 2　螺栓拉伸性能

项目	屈服强度 $R_{p0.2}$/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A/%	断面收缩率 Z/%
#3 试样	775	910	15.0	49.0
DL/T 439 — 2006 标准要求	≥735	≥834	≥12	≥45

1.3.3　冲击性能试验

于断裂螺栓的断口附近及远离断口位置取样,分别标记为 #4, #5 试样并进行冲击试验,试验结果见表 3。参照 DL/T 439—2006《火力发电厂高温紧固件技术导则》中对 20Cr1Mo1VNbTiB 材质高温螺栓冲击性能的规定,断裂螺栓冲击韧性偏低。结合金相组织分析可知,该螺栓金相组织析出部分碳化物、晶粒增大、冲击韧性下降,这是导致螺栓发生脆性断裂的内在原因。

表 3　螺栓冲击性能　J

试样	冲击功测量值			平均值	DL/T439—2006 标准要求
	1	2	3		
#4	34	23	37	31	≥39
#5	26	33	29	29	

1.4　化学成分分析

采用 GS1000 真空型直读发射光谱仪对断裂螺栓进行化学成分分析,并与 DL/T 439—2006《火力发电厂高温紧固件技术导则》规定的 20Cr1Mo1VNbTiB 高温螺栓标准化学成分进行对比,其结果见表 4。结果表明,断裂螺栓的化学成分符合要求,螺栓制造时选材无误。

2　分析与讨论

综合以上试验结果可知:该螺栓化学成分、硬度及常温拉伸性能均符合技术要求;金相组织为回火贝氏体,部分碳化物析出,晶粒度为 3 ~ 4 级,属于微观中等粗晶;螺栓断裂处位于距螺栓端部 570 mm 螺杆处,未见明显塑性变形,宏观断口可观察到裂纹源、裂纹扩展区及瞬断区,结合断口 SEM 形貌可知其属于解理脆性断裂;进一步对比发现近断口裂纹源一侧表面存在密集的机械损伤凹坑,可判断表面严重损伤导致该部位形成应力集中[9-11],进而诱导裂纹源的形成。螺栓金相组织表明晶粒相对较粗大,部分碳化物析出,使得材料的冲击韧性下降;同时由于长期工作于高温高压的环境中,在紧固应力、结构应力及热应力的综合作用下,裂纹源逐步扩展,最终发生解理脆性断裂[12-13]。

表 4　螺栓化学成分　%

化学成分	DL/T 439 —2006 标准要求	断裂螺栓
C	0.170 ~ 0.230	0.210
Si	0.400 ~ 0.600	0.470
Mn	0.40 ~ 0.650	0.490
Cr	0.900 ~ 1.300	1.070
Mo	0.750 ~ 1.000	0.850
V	0.500 ~ 0.700	0.600
Nb	0.110 ~ 0.220	0.180
Cu	≤0.250	0.120
Ti	0.050 ~ 0.140	0.083
Ni	≤0.300	0.025
B	0.001 ~ 0.005	0.003
P	≤0.025	0.017
S	≤0.025	0.012

3　结论

(1)在火电厂汽轮机解体检修过程,由于现场技术人员的暴力拆装致使螺栓表面机械损伤严重。该部位形成应力集中,从而产生了裂纹源,这是此次螺栓发生断裂的直接原因。

(2)螺栓晶粒较粗大,且长期服役于高温高压环境中,造成碳化物逐步析出、材料冲击韧性下降,容易发生脆性断裂,这是此次螺栓发生断裂的根本原因。

因此,火力发电厂在对运行汽轮机紧固件进行金属技术监督过程中,不仅要做好宏观、探伤、硬度、金相的检查,而且有必要抽取一定数量的螺栓进行冲击性能试验。

参考文献:

[1]任怀良. 亚临界汽轮机高温螺栓材料的选择[J]. 热力透平,2004,33(4):231 - 234.

[2]刘发,纪繁祥,彭建强. 汽轮机用高温螺栓材料的发展动向[J]. 机械工程师,2012(7):169 - 170.

[3]欧蓉. 浅析高温螺栓钢 20Cr1Mo1VNbTiB 粗晶现象及其控制[J]. 特钢技术,2005(2):17 - 19.

[4]张道钢,李金峰,王玉兴,等. 20Cr1Mo1VNbTiB 高温螺栓运行后性能变化及监督方法的探讨[J]. (下转第 32 页)

膜层。这样可以保护金属材质免遭介质腐蚀,有效延缓垢质的二次生成。在除垢剂中,含有乙酸、核酸等多种有机成分,乙酸的水溶性极低,对水中的碳酸氢钙和碳酸氢镁等,整合能力极强,黏度小,流动性强,排出方便。

另外,技术人员认为该除垢剂使用方法简单,满足生产实际的需要。它用水稀释使用,对于真空泵冷却器,适合采用浸泡加冲洗的方式清洗。通常,如果垢质坚硬,建议 1 000 kg 水至少用 50 kg 除垢剂稀释使用,最低剂量使用标准为 1 000 kg 水最少用 25 kg 除垢剂。根据估算,将 500 kg 水用 25 kg 除垢剂稀释,对冷却器壳侧进行浸泡。

2.2 清洗处理步骤

除垢剂原液 pH 值约为 2,用水稀释后除垢液剂 pH 试纸测定为 2 ~ 3。打开水环泵冷却器放水门,将存水排尽,拆除顶部喷嘴法兰,作为除垢液剂倒入口。

检查冷却器隔绝措施已完毕,倒入除垢液剂。浸泡液剂 2 h 后排放,发现有大量污水排出。为了彻底清除污垢,重新配制上述比例的除垢液剂进行浸泡。反复 2 次清洗后,排放液体中,浑浊物已基本清除,内管束基本可以见本色。

最后重新进行 pH 值测定,pH 值在 5 ~ 6 之间,认为已经清洗干净,没有污垢继续与除垢液剂反应。打开底部放水门,用凝结水进行冲洗,直至排放出干净的水,持续时间 10 min。撤出隔绝措施,恢复真空泵 14B 的安全措施。

2.3 效果检查

试转真空泵 14B,记录设备各项参数。其中管侧循环水温进水温度为 33.0 ℃,出水温度为 38.0 ℃。工作冷却水进水温度为 46 ℃,出水温度为 39.0 ℃。凝汽器真空度为 94.2 kPa。水环泵电机电流为 14.9 A,真空泵 14B 出力得到了满足。

3 结束语

在对水环泵冷却器进行清洗时,考虑到首次使用配方除垢剂,清洗经验不足,所以未将真空泵体参与到循环清洗过程中去。但是从结果来看,完全可以将真空泵工作水管路进行循环清洗,有可能取得更好的效果。总的来说,真空泵 14B 出力低异常现象分析及时,判断准确。设备缺陷消除后运行至今工况稳定。本文撰写的目的旨在突出设备异常的分析,提高隐患排查的能力和预防同类缺陷的能力,避免真空系统事故的发生。为了将类似问题消除于萌芽状态,班组技术人员还将举一反三,用ZJ - 821 除垢剂清洗我厂其他水环泵管式冷却器。所以本次消缺方法具有推广应用的前景,且该除垢剂成本低廉,具备推广使用的条件。

参考文献:

[1]许恒. 真空泵冷却水对凝汽器真空的影响分析及治理[J]. 广西电力,2012,35(3):36 - 37.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

金纬(1984—),男,江苏苏州人,工程师,从事汽轮机辅机检修工作,管阀检修、油务管理和电站化学设备检修技术研究方面的工作(E-mail:wei_jin3931@ chd. com. cn)。

(上接第 29 页)河北电力技术,1992(5):43 - 48.

[5]陈以超. 引进型 300 MW 汽轮机高温螺栓断裂问题探讨[J]. 华中电力,2002(3):61 - 63.

[6]范华. 超超临界汽轮机组高温螺栓用 12Cr 材料的国产化[C]//600/1 000 MW 超超临界机组新型钢国产化研讨会. 扬州:中国电机工程学会,2009:214 - 218.

[7]王增友. 20Cr1Mo1VNbTiB、25Cr2Mo1VA 钢热处理工艺总结[J]. 金属加工(热加工),2014(S2):149 - 151.

[8]钟群鹏,田永江. 失效分析基础知识[M]. 北京. 机械工业出版社,1990.

[9]马国林,孙永莹,乔立捷,等. 汽轮机高压主汽门螺栓断裂失效分析[J]. 华北电力大学学报,2009(3):104 - 108.

[10]胡洁梓,杨点中. 20Cr1Mo1VTiB 汽机主汽门螺栓断裂失效分析[J]. 宁夏电力,2013(01):48 - 50.

[11]乔立捷. 汽轮机螺栓的材料特性与失效研究[D]. 北京:华北电力大学,2009.

[12]周海波,朱晓勇,郑玉春,等. 45 钢螺栓断裂失效分析[J]. 金属热处理,2009,34(12):107.

[13]董宇. 汽轮机高压主汽门螺栓断裂失效分析[J]. 华电技术,2011(7):26 - 27 + 80.

(本文责编:陆华)

作者简介:

吴红辉(1985—),男,湖北麻城人,工程师,工学硕士,从事电力设备理化检验及失效分析技术工作(E-mail:hong-huiW207@ 163. com)。