

超超临界火电机组 Inconel 783 螺栓的超声检测

曹云峰¹, 田尉建¹, 花喜阳¹, 张振华²

(1. 徐州电力试验中心, 徐州 221009; 2. 国华徐州发电有限公司, 徐州 221000)

摘要: 超超临界火电机组所采用的 Inconel 783 镍基合金螺栓多次出现断裂失效, 结合现场检测案例, 根据螺栓的形状、晶粒度、声速等影响因素, 对超声检测工艺进行调整并进行试验。试验结果表明, 所选取的检测工艺能有效地检测出螺栓裂纹, 对该类螺栓的超声检测具有一定借鉴意义。

关键词: Inconel 783 螺栓; 超声检测; 裂纹

中图分类号: TG115.28

文献标志码: B

文章编号: 1000-6656(2021)06-0062-04

Ultrasonic testing of Inconel 783 bolt for ultra-supercritical thermal power unit

CAO Yunfeng¹, TIAN Weijian¹, HUA Xiyang¹, ZHANG Zhenhua²

(1. Xuzhou Electric Power Testing Center, Xuzhou 221009, China;

2. Guohua Xuzhou Power Co., Ltd., Xuzhou 221000, China)

Abstract: The Inconel 783 nickel-based alloy bolts of ultra-supercritical thermal power unit have been fractured for many times. In this paper, combined with on-site testing cases, the shape, grain size and sound speed of the bolts are analyzed, and the optimum ultrasonic testing technology is selected and the test were carried out, the results showed that it can effectively detect the bolt crack, and has certain reference significance to the ultrasonic detection of this kind of bolt.

Key words: Inconel 783 bolt; ultrasonic testing; crack

国内超超临界火电机组现已大批量投产运行, 机组内的蒸汽温度和压力都有很大程度提高, 一批耐高温、高强度镍基高温合金材料(GH4145、Inconel 783 等)被广泛应用于火电机组螺栓的制造中。近年来, 国内数家电厂汽机中压主汽门、中调门的 Inconel 783 螺栓发生多起断裂事故, 造成机组非停, 严重影响了发电机组安全运行, 因此多家发电集团把 Inconel 783 螺栓断裂作为重大设备隐患进行治理。由于此类螺栓为不通孔中心结构, 几何形状复杂, 超声检测时仅采用一种工艺方法, 不能很好地

检测出裂纹等危害性缺陷, 笔者根据现场检测实际情况, 论述了几种有效的检测方法。

1 常见镍基合金螺栓参数

目前国内超超临界火电机组三大发电设备制造企业, 所采用的镍基合金螺栓材料主要有 Inconel 783、GH4145、R-26 等。文章主要针对 Inconel 783 材料螺栓进行分析讨论。

1.1 常见镍基合金螺栓材料及其参数

常见镍基合金螺栓材料及其参数如表 1 所示^[1]。

表 1 镍基螺栓材料及其参数

| 使用温度/℃ | 材料牌号 | 标准依据 | 合金组织 | 国外牌号 |
|--------|-------------|---------------|-------------|----------------|
| 650 | Inconel 783 | — | 奥氏体镍基高温合金 | R30783 |
| 677 | GH4145 | Q/YB04133-90Y | 奥氏体镍基高温合金 | InconelX-750 |
| 677 | R-26 | B/HJ418-20042 | 奥氏体镍铬钴基高温合金 | Refractoloy-26 |

收稿日期: 2020-11-23

作者简介: 曹云峰(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事火电厂的无损检测工作

通信作者: 曹云峰, 704498235@qq.com

1.2 Inconel 783 螺栓规格

常见 Inconel 783 螺栓规格有 M72 和 M90 两种, 均带有未打通中心孔。螺栓两端均为平面, 中间直段为光杆, 两侧变径过渡至螺纹区域, 螺纹根部与

光杆直径差一般不小于 3 mm。M72 螺栓实物及结构如图 1 所示。

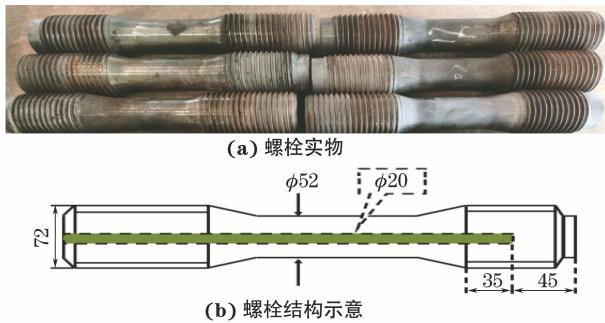


图 1 M72 螺栓实物及结构示意

1.3 Inconel 783 螺栓金相组织

对螺栓进行现场金相分析,其组织为奥氏体+ β (NiAl)相,一般晶粒度为 4~5 级。其金相组织显微图像如图 2 所示,对于晶粒度较粗大的螺栓,检测前应进行声速测定,测定方法见标准 DL/T 694—2012 附录 C,偏差值超过 $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时应作定位修正,探头频率为 2 MHz~2.5 MHz。

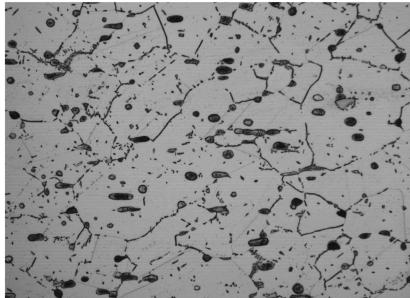


图 2 螺栓金相组织显微图像(400 \times)

2 超声检测工艺分析

对 Inconel 783 镍基合金螺栓开展超声检测工艺分析,依据电力行业标准 DL/T 694—2012 要求,应

结合螺栓外观形状、晶粒大小、声速等参数进行全面分析,选用小角度纵波、爬波、横波等方法对螺栓齿根、光杆及中心孔内外壁等位置进行全面检测。

2.1 小角度纵波法检测

当螺栓两端面平整规则,且有宽度大于 10 mm 的平面时应优先采用小角度纵波法。小角度纵波法可以对螺栓丝扣及螺栓本体进行有效检测。所选用的探头频率为 2.5 MHz, 折射角 β_L 为 $6^\circ \sim 12^\circ$, 根据螺栓端面面积确定晶片尺寸。探头折射角 β_L 的选择一般根据螺栓端面面积和本侧丝扣长度来综合考虑,以确保检测范围覆盖大部分螺栓丝扣。探头折射角 β_L 采用螺栓端面沿径向移动值 R 与丝扣长度进行正切函数计算得到(见图 3)^[2]。在实际探测时还应结合螺栓的规格来选择探头, M56~M72 螺栓宜选用的探头频率为 2.5 MHz, 折射角 β_L 为 $6^\circ \sim 8^\circ$, 晶片尺寸为 $9 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ (长×宽); M90 以上螺栓宜选用的探头频率为 2.5 MHz, 折射角 β_L 为 $8^\circ \sim 12^\circ$, 晶片尺寸为 $13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ (长×宽)。

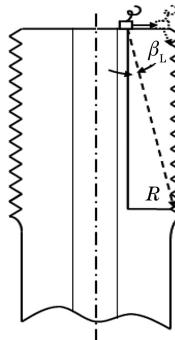


图 3 R 与 β_L 计算方法示意

常见规格螺栓折射角 β_L 与探头径向移动值 R 的关系如表 2 所示^[2]。

表 2 探头 β_L 与探头径向移动值 R 的关系

| 螺栓 规格 | 探头沿螺栓端面径向移动距离 R | | | 本侧螺栓丝扣长度 | 备注 |
|----------|---------------------|---------------------|----------------------|------------|------------------------------|
| | $\beta_L = 6^\circ$ | $\beta_L = 8^\circ$ | $\beta_L = 12^\circ$ | | |
| M56 | 7.4 | 9.8 | 14.9 | ≤ 70 | |
| M72 | 10.5 | 14.1 | 21.3 | ≤ 100 | 如带中心孔,螺栓端面径向 宽度不应小于 10 mm |
| M100 | 12.6 | 16.9 | 25.5 | ≤ 120 | |
| M140 | 15.8 | 21.1 | 31.9 | ≤ 150 | |

(1) 检测优点。其可以检测螺栓本侧、对侧螺纹及螺栓本体部分,方便快捷,且对螺栓晶粒大小不敏感,检测灵敏度高,缺陷指示长度测量和位置判定准确度高,能识别长度不小于 1 mm 的裂纹。

(2) 检测缺点。用该法实施检测时,螺栓两端

面需平整规则,或一个端面有宽度不小于 10 mm 的平面。

2.2 横波法检测

当螺栓端面较小或不平整规则时,应采用横波法检测。横波法可以对螺栓中心孔内壁、螺栓光杆

处表面、螺栓齿根等位置进行有效的检测。横波探头频率为 $2\text{ MHz} \sim 2.5\text{ MHz}$ ^[3], K 值一般选取 1.7。

(1) 检测优点。检测时, 用螺纹反射波来调整检测灵敏度, 选用 4~6 个螺纹波, 将螺纹反射波调到屏高的 60% 即可^[3]。该方法方便快捷无需试块。当螺栓某个螺纹反射波被遮挡时, 需判断识别是否有裂纹等缺陷。裂纹识别检测原理及波形如图 4 所示。

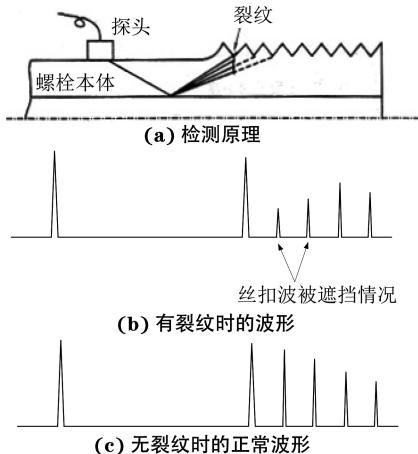


图 4 裂纹的横波法检测原理及波形

(2) 检测缺点。镍基高温合金螺栓晶粒粗大会带来噪声增大、螺纹波形态不规则、裂纹缺陷不易识别等问题。

2.3 爬波法检测

当螺栓晶粒粗大导致林状杂波较多而遮挡有效螺纹波, 不能使用横波检测时, 须采用爬波法检测。爬波法可以很好地避免晶粒对声波的散射衰减, 提高裂纹的检出率。但前提条件是, 螺栓齿根距光栓面高度应小于 1 mm。现场检测时采用并联式爬波探头, 频率为 $2.0\text{ MHz} \sim 2.5\text{ MHz}$, 检测直径不小于 140 mm 的螺栓选用 2 MHz 探头, 根据螺栓的规格选择探头晶片尺寸(宜与螺栓曲面吻合良好)。齿根与光栓高度差的关系示意如图 5 所示。裂纹的爬波法检测波形如图 6 所示。

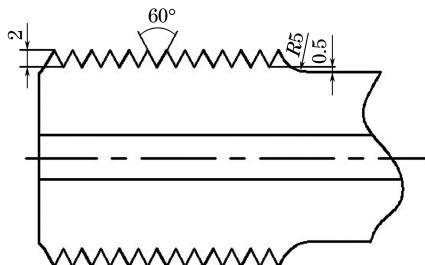


图 5 齿根与光栓面高度差关系示意

(1) 检测优点。该法检测时采用并联低频双晶

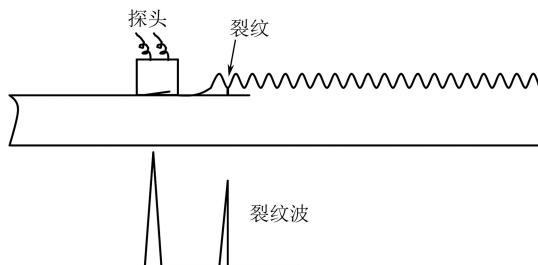


图 6 裂纹的爬波法检测波形

爬波探头, 始脉冲后无杂波, 减少了横波探头因始脉冲占宽对检测的干扰, 提高了信噪比和检测灵敏度, 缺陷波形明晰孤立, 指示长度测量方便准确^[3]。

(2) 检测缺点。不易区别受螺栓形状和规格影响而产生的伪缺陷信号, 包括固定位置信号、变形波等。探头晶片需与螺栓曲面吻合良好, 以避免裂纹检出率下降。

3 检测案例

某电厂 1 000 MW 超超临界火力发电机组停机检修时, 对汽轮机中压主汽门、调门螺栓(共计 88 个)进行超声检测, 螺栓材料为 Inconel 783, 规格为 $72\text{ mm} \times 330\text{ mm}$ 和 $90\text{ mm} \times 390\text{ mm}$ (螺纹直径 \times 长度)。

3.1 探头选择及灵敏度设定

(1) 小角度纵波法。探头频率为 2.5 MHz , 折射角 β_L 为 6° 和 8° , 晶片尺寸为 $9\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ (长 \times 宽), 以 LS-I 试块同声程 $\phi 1\text{ mm}-12\text{ dB}$ 作为检测灵敏度进行检测。

(2) 横波检测。探头频率为 2.5 MHz , K 值为 1.7, 晶片尺寸为 $13\text{ mm} \times 13\text{ mm}$ (长 \times 宽), 探头曲面吻合螺栓; 螺栓丝扣检测选用出现 4~6 个螺纹波 60% 波高, 光杆或孔内壁处检测选用 LS-1 试块同声程 $\phi 1\text{ mm}-6\text{ dB}$ 作为检测灵敏度进行检测。

(3) 爬波法检测。探头频率为 2.5 MHz , K 值为 1.7, 晶片尺寸 $14\text{ mm} \times 22\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高)、探头曲面吻合螺栓; 以 LS-II 试块深度 1 mm 模拟裂纹反射 80% 波高 -6 dB 作为检测灵敏度进行检测。

3.2 检测结果

采用 3 种检测工艺方法进行超声检测, 共发现 10 个螺栓有长度大于 1 mm 的裂纹, 不同部位裂纹的检出情况如表 3 所示。

实际检测时发现, 由于螺栓的结构特点, 螺栓光杆与丝扣结合位置有一定高度差, 横波和爬波法对裂纹的检出效果不明显, 而小角度纵波检测对缺陷

表 3 3 种工艺方法对不同部位裂纹的检出情况

| 工艺方法 | 缺陷检出情况 | | |
|-------|-----------------|----------------|-----------------|
| | 螺栓丝扣根部 (6 根) | 光杆内壁处 (1 根) | 丝扣对应内壁 (3 根) |
| 横波检测 | 否 | 能 | 否 |
| 爬波检测 | 否 | 否 | 否 |
| 小角度纵波 | 能 | 能 | 能 |

定位准确, 能有效区分螺栓丝扣和中心孔内壁处裂纹回波, 裂纹反射当量值高, 易于发现裂纹。3 种方法的检测原理如图 7 所示。对发现的螺栓丝扣裂纹进行着色渗透检测, 裂纹显示如图 8 所示, 裂纹反射波形如图 9 所示, 内壁裂纹波形及解剖后的螺栓实物如图 10 所示。

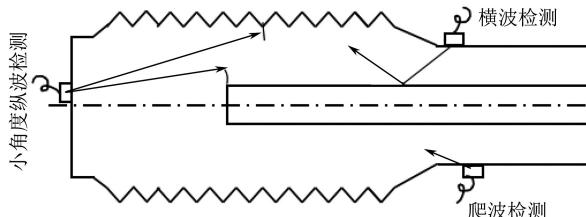


图 7 3 种方法的检测原理示意



图 8 Inconel 783 螺栓丝扣处裂纹显示

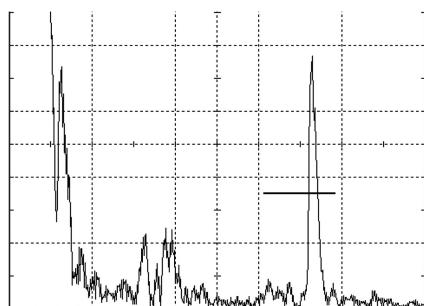
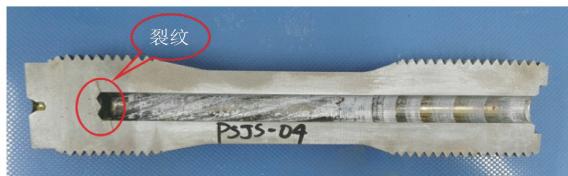


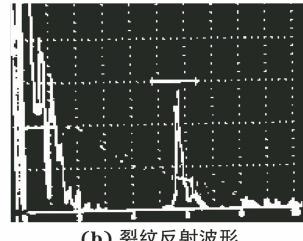
图 9 螺栓裂纹反射波形

4 结论

通过渗透检测和解剖复验手段对发现裂纹的螺栓进行验证, 得出超声检测结果与实际裂纹形状



(a) 解剖后螺栓实物



(b) 裂纹反射波形

图 10 Inconel 783 螺栓内壁裂纹波形及解剖后实物

完全一致的结论。小角度纵波法能有效发现螺栓中的裂纹, 检出率优于横波和爬波法的, 定位和定量准确, 在现场工作中易于掌握和使用。实际检测时, 裂纹可能有分叉走向, 受限于探头主声束角度, 有些缺陷不易检出, 此时需要适当转动探头, 使主声束与裂纹面垂直, 确保小裂纹不漏检。

当螺栓端面平整, 一端或两端有直径大于 10 mm 平面能放置探头的情况下, 均应优先选择小角度纵波检测法。小角度纵波法受材料粗晶影响小, 晶界散射损失少, 能准确发现 1 mm 以上的裂纹。

两端面不能进行小角度纵波法检测时, 可采用 K 为 1.7 的横波探头进行检测; 当螺栓晶粒较粗大, 螺纹波不明显, 且螺栓齿根与光栓面高度差小于 1 mm 时应选用爬波法检测。

Inconel 783 螺栓高温运行 1 万 h 以上时可能会发生螺栓断裂失效现象, 裂纹多集中于中心孔底部盲孔位置和螺栓光杆与螺纹变径区域, 此区域应力集中明显, 是该类螺栓重点检测位置^[4]。

参考文献:

- [1] 王维东, 魏忠瑞, 韩玉峰, 等. 镍基高温合金紧固螺栓的超声波探伤工艺 [J]. 无损检测, 2014, 36(5): 49-51.
- [2] 曹云峰, 花喜阳, 田尉建, 等. 镍基合金螺栓超声检测的典型案例 [J]. 无损检测, 2016, 38(11): 79-82.
- [3] 刘叙笔, 马君鹏, 吕博, 等. 小径管相控阵超声检测的缺陷信号识别方法 [J]. 无损检测, 2019, 41(5): 22-27.
- [4] 蔡晖. 发电厂与电网超声检测技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.