

核电站用起吊三脚架锻件的磁粉检测工艺

王树昌, 刘恩凯, 施建辉, 张大勇

(阳江核电有限公司, 阳江 529500)

摘要: 起吊三脚架组件是三代核电一体化堆顶结构(IHP)系统中的重要受载荷部件。按照设计文件要求, 需要在机加工和载荷试验后对起吊三脚架各组件分别进行磁粉检测。其部件异型结构较多, 为了制定合理的磁粉检测工艺及选择相关检测设备, 需要对各个部件进行分析。文章根据相关标准要求, 通过进行参数计算和试验验证, 制定出符合检测标准的工艺规范, 经验证后其可以满足检测要求。该工艺规范目前已应用于工程实践中, 为三代核电国产化提供了质量保证。

关键词: IHP; 起吊三角架; 磁粉检测

中图分类号: TG115.28

文献标志码: B

文章编号: 1000-6656(2021)06-0074-05

Magnetic particle testing technology for lifting tripod forgings used in nuclear power plants

WANG Shuchang, LIU Enkai, SHI Jianhui, ZHANG Dayong

(Yangjiang Nuclear Power Company, Yangjiang 529500, China)

Abstract: The important load-bearing components in the Integrated Head Package (IHP) system are mainly the lifting tripods. According to the requirement of design document, each component of lifting tripod should be tested by magnetic particle after machining and loading test. Because there are many special-shaped parts, it is necessary to analyze each part to work out reasonable magnetic particle testing technology and select related testing equipment. In this paper, according to the standard test requirements, through parameter calculation and related test, the test process specifications in line with the test standards are worked out. The process code has been applied to the construction practice to provide quality assurance for the localization of the third generation nuclear power.

Key words: IHP; lifting tripod; magnetic particle testing

三代核电一体化堆顶结构(IHP)将堆顶屏蔽、防飞射物装置和反应堆压力容器顶盖起吊装置设计成不需拆除的一体化结构, 在反应堆换料期间既可简化换料操作, 又可以缩短停堆时间, 并减小人员所受的放射性剂量, 其安全性及经济性得到了显著提升。

IHP 结构属于核安全相关物项, 设计、制造及检测按照 ASME 标准执行。其中, 起吊三角架主要由 U 型夹销、吊耳、支杆、Y 型块、分度杆等部件组成, 其结构如图 1 所示。在大修换料期间, 可利用三角架组件将压力容器的顶盖和一体化堆顶组件一同

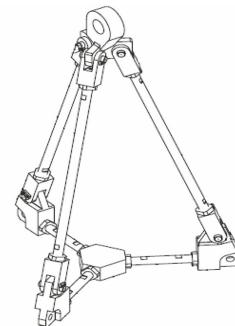


图 1 IHP 起吊三角架组件结构示意

吊起, 其最大载荷量为 800 t。按照设计文件要求, 需要在机加工后及载荷试验后分别对各部件进行表面磁粉检测^[1], 以保证现场使用安全。

起吊三脚架包括 18 个关键物项, 按照外形结构主要分为标准圆柱体型、板式结构和异型件等。各个类型部件 3D 模型如图 2 所示。

收稿日期: 2020-10-01

作者简介: 王树昌(1983—), 男, 工程师, 主要从事核电运行期间的在役检查项目管理及无损检测新技术的应用研究

通信作者: 刘恩凯, 352847097@qq.com

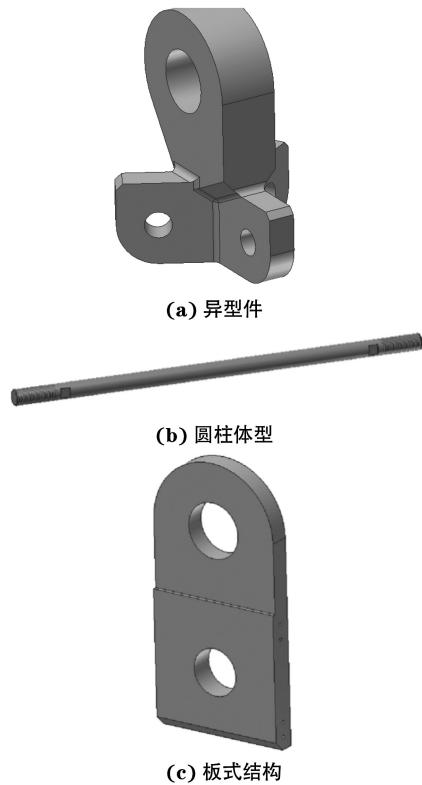


图 2 IHP 起吊三角架各类型部件 3D 模型

1 检测标准及磁粉检测工艺制定

1.1 检测标准分析

IHP 设计文件中规定,以上物项为核安全相关物项,要求最终机加后及载荷试验后,应按照 ASTM E 709—1995 或 ASTM A 275—1998 标准在两个方向上(互相垂直)进行 100 % 磁粉检测,验收标准为 ASME BPVC III NF(1998&2000 增补)分卷 NF-5340。其中验收要求中作了如下规定。

- (1) 零件有任何裂纹或者线性显示则拒收。
- (2) 有任何尺寸大于 5 mm 的圆形显示则拒收。
- (3) 在一条线上有 4 个或以上且边缘相距不大于 1.5 mm 的圆形显示则拒收。
- (4) 在受评定的显示区域中最严重的位置,任何一个表面积为 $4\ 000\ mm^2$ (该面积主要尺寸不超过 150 mm)的区域内有 10 个或者 10 个以上的圆形显示则拒收。

设计文件规定磁粉检测工艺参照标准 ASTM E 709—1995 或 ASTM A 275—1998。

其中,ASTM E 709—1995 标准适用于焊缝、原材料、锻件及最终材料等部件的磁粉检测,基本涵盖了各项部件的磁粉检测工艺要求,属于适用范围较为宽泛的标准。而 ASTM A 275—1998 标准主要适用

于钢锻件的磁粉检测,专用于锻件的磁粉检测工艺要求,该标准仅允许使用直流电或者整流电(全波或半波)作为磁化方式的电流源。

考虑到表面及近表面缺陷检测的深度以及标准的专项适用性,最终确认三角架组件锻件以 ASTM A 275—1998 标准作为检测技术工艺标准,采用直流或全波/半波整流电进行磁粉检测。

虽然在 ASTM A 275—1998 标准中也注明了 ASTM E 709—1995 标准可用于由钢锻件制造的机械部件的现场磁粉检测。但是在役阶段的检测,受空间、位置及现场实际情况的影响,使用交流磁轭法更为合适。

1.2 检测工艺制定

起吊三角架的检测部件结构复杂,尺寸大小不一,并且存在弧面、螺纹和盲孔等难以检测的部位;同时局部区域存在结构突变,容易形成非相关显示,影响检测结果的准确性。按照 ASTM A 275—1998 标准的要求,仅允许使用直流或全波/半波整流电进行磁化检测,该标准中规定的检测方法主要包括磁轭法、触头法、直接通电法、线圈法、中心导体法等。

1.2.1 圆柱形结构磁粉检测工艺

对于标准圆柱结构的检测,除了 016 号工件(起吊拉杆,长 7 670 mm)以外的所有部件都使用机床进行磁粉检测(进行纵向、周向磁化,一次性完成所有表面检测)。根据之前的实际检测试验,在电极上安装固定锁紧装置,可以在机床上对工件进行 360° 旋转,检测顺序为周向磁化-纵向磁化-退磁^[2]。

检测的各部件结构如图 3~5 所示。001 号工件为连接器上 U 型夹销(见图 3),选择周向磁化电流为 $1\ 168\sim4\ 380\ A$;纵向磁化电流为 $2\ 500\sim3\ 500\ A$;检测 2 次(以灵敏度试片为准)。005 号工件为下连接销(见图 4),选择周向磁化电流为 $1\ 200\sim4\ 380\ A$;纵向磁化电流为 $2\ 500\sim3\ 500\ A$;检测 2 次(以灵敏度试片为准)。007/018 号工件为三角架

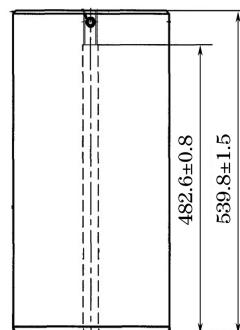


图 3 连接器上 U 型夹销结构示意

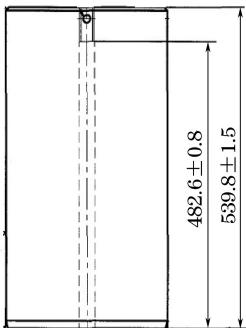


图 4 下连接销结构示意

U型夹销(见图 5),选择周向磁化电流为 1 500~2 500 A;纵向磁化电流为 3 200~5 000 A;检测 2 次(以灵敏度试片为准)。

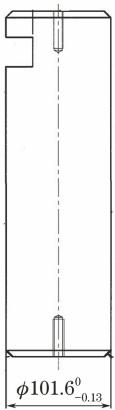


图 5 三角架 U 型夹销结构示意

起吊拉杆(编号 016, 长 7670 mm)的检测方法分为纵向磁化与周向磁化。检测轴向缺陷时, 使用可移动式小线圈进行分段纵向磁化。磁化电流为 1 600~3 600 A, 分段次数为 26 次, 磁场强度应满足灵敏度试片要求。起吊拉杆的纵向磁化检测方法如图 6 所示。

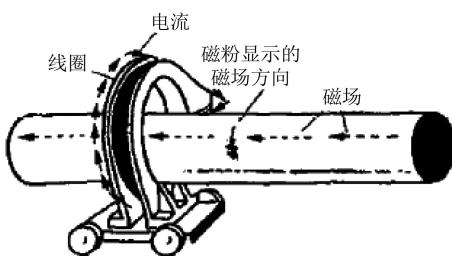


图 6 起吊拉杆(016)纵向磁化检测示意

检测轴向缺陷时,也可利用夹钳夹住工件的两端,进行轴向通电以周向磁化工件。为了避免接触处打火烧伤,应清除掉与电极接触部位的铁锈、油漆等杂质,且必须在磁化电流断电时进行夹持或松开操作。磁化电流不应过大,以免产生打火,如果一次性检测完,那么理论上电流的大小为 1 800~3 000 A。

为了避免较大电流产生打火现象,应将电流从 1 800 A 逐渐增大,直至磁场强度满足灵敏度试片要求。起吊拉杆的周向磁化检测示意如图 7 所示。

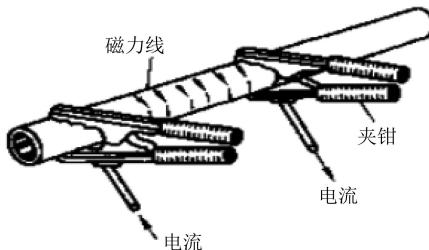


图 7 起吊拉杆(016)周向磁化检测示意

1.2.2 板式结构磁粉检测工艺

对板式结构的检测,原则上使用磁轭法、触头法。工件直接平放于地面上,翻转一次就可以完成所有面的检测。按照 ASTM A 275—1998 标准,需要使用直流磁轭进行检测,而触头法容易在机加工表面产生火花引起表面缺陷,因此放弃使用触头法。

按照 ASTM A 275—1998 标准,在对 IHP 起吊三角架锻件进行直流磁轭法检测时,发现进行 A1 灵敏度试片试验时,无法满足灵敏度要求。在 ASME BPVC V 卷—2001 第七章 T 776.2 节中也注明了除了厚度不大于 6 mm 的工件以外,在相等提升力下,对表面缺陷的检测使用交流磁轭法优于直流磁轭法。因此,直流磁轭法不能满足现场检测的需求。

为了能够实现板材部件两个方向的磁粉检测,最终确定采用线圈法对该部件进行检查,通过对缠绕在零件上的电缆线通电进行磁化,实现不同方向的缺陷检测,磁化电流最终以 A1 灵敏度试片清晰显示为准。

002 号部件连接器端板磁粉检测时,线圈横向缠绕的匝数为 3 匝,电流为 3 000~5 000 A,纵向缠绕的匝数为 2 匝,电流为 4 000~8 000 A,板式结构线圈法磁粉检测方法如图 8 所示。

1.2.3 异型结构磁粉检测工艺

针对于异型件的检测方法仍为线圈缠绕法,缠绕方向不同,检测缺陷的方向也不同,检测缺陷的方向应始终与电缆缠绕的方向一致。不同异型结构线圈法磁粉检测方法如图 9,10 所示。

2 检测设备参数制定

通过对三角架组件结构形式的分析,参照检测标准及上述检测工艺要求,总结出该类产品的磁粉检测设备特性应满足的要求如下所述。

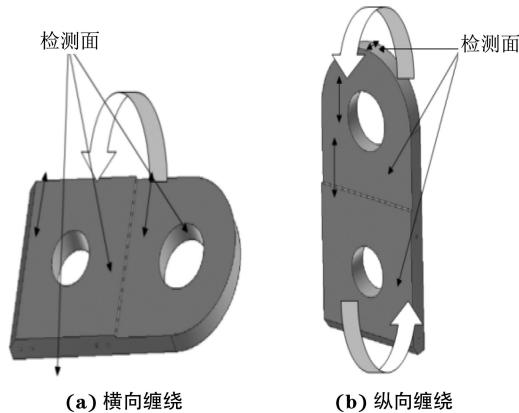


图 8 板式结构线圈法磁粉检测方法示意

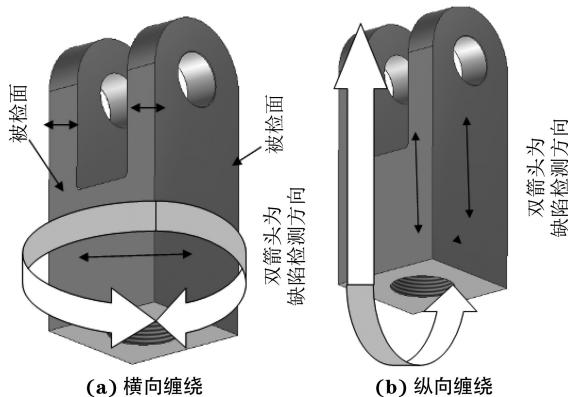


图 9 异型结构 A 线圈法磁粉检测方法示意

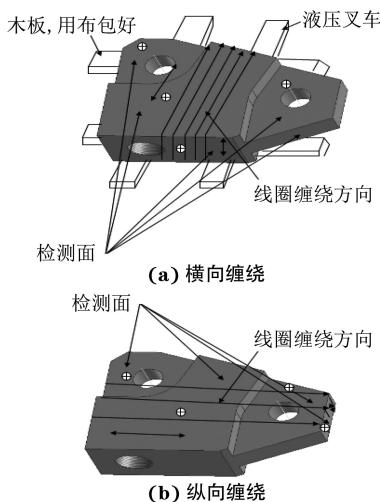


图 10 异型结构 B 线圈法磁粉检测方法示意

(1) 该设备主探伤机采用固定式机电分立型结构, 主要由直流电源控制柜、直流磁化电源、人机界面操作控制箱、交流磁化装置、电气控制系统、磁化及夹持装置、磁悬液及回收系统、紫外线灯等部件组成。

(2) 该设备由中央处理器对检测时的磁化电流、充电时间、充电次数、充电间隔、退磁电流等参数进行数字显示及控制。

(3) 该设备可以实现线圈法、直接通电法磁粉检测。电缆线圈直径不小于 800 mm, 可实现的棒材最大夹持长度为 6 m。通过电动或齿轮夹紧方式可以实现工件的固定, 并可实现工件的转动, 以 360° 观察工件。

(4) 具备磁悬液喷淋装置。固定式设备磁化电流(直流)为 0~12 000 A, 移动式设备磁化电流(直流)为 0~6 000 A。

3 检测步骤及注意事项

3.1 检测准备及过程

3.1.1 工机具准备

准备的工机具包括: CZQ-12000E 型和 CED-6000A 型交直流荧光磁粉探伤机、手电筒、卷尺(或钢板尺)、紫外线强度辐射照度计、特斯拉计、八脚试块(磁场指示器)、灵敏度试片、磁悬液浓度测定仪、紫外线防护设备、照度计、便携式黑光灯等。

设备用途如下。

(1) 照度计。进行荧光磁粉检测的暗室内, 可见光的强度应不大于 20 lx。

(2) 紫外线照度计。被检工件表面的紫外线照度应不低于 1 000 $\text{uw} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。

(3) 特斯拉计。标准规定(E 709)试件任何一点处的剩磁应不超过 0.3 mT。

(4) 八脚试块(磁场指示器)。其用于测定磁场的强度及方向。

(5) 手电筒。检测过程中, 便于照亮操作平台, 作为临时性光源。

(6) 磁悬液浓度测定仪。对于荧光磁粉, 建议在 100 ml 中的沉淀物体积为 0.1 ml~0.4 ml。

(7) 黑光灯。在黑暗中使缺陷显示出来, 使用前应至少预热 5 min, 建议每一班次只开关一次, 以免减少黑光灯的使用寿命。

3.1.2 零件准备

被检零件表面应清洁、干燥、无污染物, 特别是与磁极接触的两端, 需清理干净, 不能存在油漆、铁锈、氧化皮等杂质。

应提前根据被检件的几何形状及尺寸确定检测方法并计算检测数据参数。

应提前了解被检测工件的具体状态及外观情况, 考虑工件能否放置于机床上, 对工件两端的结构应作重点考虑。

注意螺纹与电极托盘是否接触, 以防对螺纹造

成损伤。

对于零件上的小孔等结构,必须使用有效的遮盖物(例如橡皮泥)进行覆盖,防止因接触磁悬液而对零件造成损伤。

3.1.3 设备准备及操作

检测前,应先开机试用,使用标准试块或自然缺陷试块进行检定,确保设备处于完好状态。根据计算好的参数及确定的检测方法,输入检测电流参数并实施检测。检查被检测工件夹持情况是否满足要求,应确保夹紧力足够。根据被检工件的长度,预先设置好两电极之间的长度及线圈的位置(卷尺测量)^[3]。

实际操作中,应将荧光磁悬液向被检工件喷淋,使其表面获得足够的磁悬液,然后在磁化通电开始的同时终止喷淋。直接接触通电法(轴向通电)的操作要领为使用直流或整流电流进行磁化,并应用磁场指示器来确定磁场强度是否恰当。

线圈法(周向通电)的操作要领为使用直流或整流电流进行磁化。所要求的磁场强度是以零件的长度和外径为基础,按照所采用的标准规范进行计算,被检零件每段长度不应超过线圈零件的直径,最终是否满足磁化要求以磁场指示器的显示为准^[4]。

4 结语

通过对技术规格文件及检验标准进行研究分析,制定了符合检测标准的磁粉检测工艺。受标准工艺要求及实际被检工件结构尺寸的影响,触头法

(上接第 18 页)

表 5 腐蚀坑灰度及深度数据

部位	腐蚀坑 灰度	背景 灰度	灰度差	腐蚀深度/ mm	误差范围/mm
母材 腐蚀坑	38 788	33 830	4 958	4.0	-0.63~+0.05
熔合线 腐蚀坑	49 657	43 955	5 702	4.6	-0.73~+0.06
焊缝 腐蚀坑	45 680	39 359	6 321	5.1	-0.81~+0.06

与工件厚度、射线能量、材料吸收系数、散射线、照射场、管内介质、腐蚀坑内容物等均有关;透照部位偏

及磁轭法不满足检测灵敏度要求,且机加工过程中其表面容易产生火花损伤,因此在该检测中不允许使用。

针对棒材标准结构件,可使用标准规定的线圈法和直接通电法进行磁粉检测。针对板材、异型结构件等复杂工件,应采用电缆缠绕的方式实现两个方向的磁粉检测。为满足现场实际检测需求,实际检测中使用 CZQ-12000E 型荧光磁粉探伤机以及 CED-6000A 型移动式磁粉探伤机。实际应用的结果表明,该套检测设备可以满足国产化三代核电 IHP 起吊三角架设备的磁粉检测工作,检测灵敏度满足标准要求。

该检测设备的研制及检测的成功实施,为三代核电 IHP 设备国产化过程的检测工作提供了有力的支撑,为后续相关设备的检测提供了一定参考。

参考文献:

- [1] 宋志哲. 磁粉检测[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2007.
- [2] 朱跃德,李守彬,马占云. AP1000 一体化堆顶三脚架组件磁粉检测设备与工艺研究[J]. 电站辅机,2014,35(3):12-16.
- [3] 贺树春. 铸锻件的磁粉检测和渗透检测[J]. 无损检测,2011,33(5):69-70.
- [4] 王海峰. 钢管端部交流磁化时的集肤效应[J]. 无损检测,2009,31(3):195-197.

离射线束中心的程度也会对透照厚度和射线透射率产生影响;受钢管曲率的影响图像各个部位的散射比也不同,在实际应用中只有综合考虑上述因素,才能提高管道腐蚀坑深度的测量精度。

参考文献:

- [1] 郭文明,陈宇亮. X 射线图像灰度值与透照厚度的定量关系[J]. 无损检测,2016,38(2):14-17.
- [2] 梁丽红. 射线数字成像检测教材(试用版)[M]. 北京:特种设备检验协会,2018.
- [3] 刘颖. 在役管线腐蚀故障图像识别方法研究[D]. 沈阳:东北大学,2008.