

核电工程中液体渗透检测的质量控制及显像结果评判差异性

马新朝^{1,2}

(1. 中国核电工程有限公司, 北京 100840; 2. 北京四达贝克斯工程监理有限公司, 石家庄 050019)

摘 要: 针对核电工程中的液体渗透检测, 从检测的关键控制点如组合渗透检测材料的选择, 检测工件的表面状态, 低温、高温条件下检测工艺的修正, 检测结果的评判时机等方面提出了质量控制要求, 针对不同检测单位及检测人员对于检测评判结果的差异性进行了分析, 提出了控制检测时机、加强检测过程控制、针对显示结果需要分清相关显示的重要意义, 便于判定缺陷的形状和性质, 对密集性的小缺陷应注意分析缺陷性质等解决减小差异的基本措施, 并对检测时发现的不一致现象进行了归零处理的意见和建议, 有助于提高检测效率减小差异, 从而推进技术进步和规范检测。

关键词: 核电工程; 液体渗透检测; 显像结果; 差异性

中图分类号: TB302.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2014)09-0085-05

Quality Control of the Liquid Penetration Test on Nuclear Power Projects and Difference Analysis on the Imaging Results Evaluation

MA Xin-chao^{1,2}

(1. CNNC China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China;
2. Beijing Starbecs Engineering Management Co., Ltd., Shijiazhuang 050019, China)

Abstract: For the liquid penetration inspection of nuclear power project, the paper shows us the detection principle, key control points such as the choice of penetrant materials, the surface condition of the work-piece, correction and detection technology in low temperature as well as in high temperature, and the time when the requirements for quality control test results evaluation can be put forward, etc. In view of the differences in the results evaluation, the differences of detection units and test personnel were analyzed. The paper put forward the control of the detection time, the strengthening the process control as well as the detection results. The paper also points out that it is significant to distinguish corresponding displays in order to easily determine the shape and nature of defect. For densely displayed small defects, the defect properties should be clearly understood to reduce the difference. As for the inconsistent phenomenon found on the detection, return-to-zero processing opinion is suggested. The above-mentioned measures can help to improve the detection efficiency and to reduce differences, so as to promote technological progress and specification testing.

Keywords: Nuclear power project; Liquid penetrant inspection; Imaging result; Difference

收稿日期: 2013-10-26

作者简介: 马新朝(1974—), 男, 高级工程师, 研究员, 国家注册监理工程师/设备监理工程师/安全工程师, 主要研究核电安装焊接工艺及新技术、无损检测(RT、UT)技术、理化检测, 核电监理及施工管理新理论。

液体渗透检测主要应用到核电施工中的主管道坡口检验, 厚壁管的层间检验, 役前不锈钢管的焊缝质量检查, 阀门及中子通量管、CRDM等重要物项的检查, 从材料检查到过程控制以及施工后检查均用到, 合理选用渗透材料、规范操作步骤、正确评定结果对于核电施工具有重要的意义。

1 液体渗透检测原理

液体渗透检测的优点是可以检测试件表面开口性缺陷,如裂纹、气孔,具有较高的灵敏度,且操作简单、快速,检测费用低,适用性广;液体渗透检测的局限性是只能检测表面开口的缺陷,对被污染物堵塞或经过表面处理(如喷丸、研磨、酸洗钝化等)开口被封闭的缺陷不能检测;液体渗透检测因为只能检测表面缺陷,难以确定缺陷的深度,很难对缺陷进行全面评价。

2 液体渗透检测的关键控制点

2.1 组合渗透材料的选择

渗透剂是一种含有染料或荧光的具有很强渗透力的并容易被显像剂吸附出来的溶液。渗透剂是渗透检测中最关键的材料,直接影响渗透检测的灵敏度;显像剂是液体渗透检测中另一关键材料,它需要能将缺陷中的渗透液通过毛细作用吸附出来,将形成的缺陷在被检工件表面扩展,放大到肉眼足以观察,并提供与缺陷有较大反差的背景。

在检测过程中要控制同一批号材料的对应性,以便保证其组合性能的稳定性。液体渗透检测的三种材料在使用中应相互匹配。在使用中要采用同一生产厂家的配套产品,不同厂家的混用可能各种材料都符合要求,但是之间不能相混匹配。

2.2 检测时的表面状态控制

渗透探伤前,应对受检工件表面进行打磨或抛光,去除影响渗透操作和评判的锈蚀、飞溅物、金属细屑或细末、砂末等可能堵塞缺陷等杂物,以保证渗透液对零件表面的润湿,并减少虚假显示的出现。在这个环节一般情况还应略微向四周扩大15~20 mm的检测范围。在清洗过程中也要注意不要将白布上的线、毛线芯等钩挂到工件上,这些杂物也会影响检测显示。

2.2.1 低温条件下

被检工件温度在 $-2^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ 的渗透检测称为低温环境条件下的渗透检测。此条件下空气中的水汽在工件表面容易形成水膜或结成冰,被检工件的开口缺陷内部充满了水或冰,从而堵塞了表面开口缺陷,如果不采取相应的技术处理,也是影响渗透检测的缺陷检测出之一。一般可以采用热吹风机对工件表面进行加热干燥处理,促使水气蒸发,以减小工件自身因低温带来的影响。

2.2.2 高温条件下

被检工件温度在 $52^{\circ}\text{C}\sim 65^{\circ}\text{C}$ 的渗透检测称为高温环境条件下的渗透检测。核电工程在室外的高温检测主要集中在南亚如巴基斯坦等国家如C-2、C-3/4核电工程的建设过程中。将高温状态下的工作转换为标准规定范围内的工艺参数应用。

2.3 检测过程的控制

渗透检测时对主要工艺参数的控制是检测质量的关键控制点,主要是在低温及高温条件下的控制。在正常温度(标准温度)下,渗透检测的渗透时间一般不低于10 min,显像时间一般不少于7 min。

2.3.1 检测组合材料

随着环境温度的降低,渗透剂的黏度变大,流动变差,渗透能力下降,显像剂不能均匀的分散于工件表面,难以形成薄而均匀的显示层,毛细现象也较缓慢,影响了吸附作用,难以显示缺陷痕迹,需要足够长的渗透时间和显像时间。所以,低温条件下渗透检测的工艺参数选择正确与否,也将导致影响渗透检测的结果。低温会使试件的表面缺陷的开口变窄,使渗透剂渗入困难或增加渗入时间;低温条件下的渗透检测,需要适当增加渗透时间和显像时间,增加的时间应依据灵敏度检测试验的结果而确定。

针对上述情况,可以采用低于 50°C 的热水对渗透剂和显像剂加热,使其温度升高至 $20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$,以增加喷罐内压力,降低渗透剂黏度,提高渗透能力,并使显像剂细微颗粒成均匀喷雾状,这样基本消除因温度低给渗透检测带来的不利影响。

高温环境下,渗透剂及显像剂在喷涂过程中蒸发快,挥发快,容易形成雾状,由于其活性大,渗透及显像时间会缩短,组合材料的正确使用也会影响检测结果的评判。

2.3.2 工艺参数的试验鉴定及修正

渗透工艺参数的确定需要用检测前工艺对比试验来确定,按照基本的工艺参数,将铝合金淬火裂纹试块(A型试块)和所有使用材料都调整到预定温度后,将拟采用的检测方法及标准方法进行对比,比较两种方法所显示的迹痕,当两处显示的迹痕基本相同时,则对所采用的方法进行了鉴定。

2.3.2.1 低温条件下检测工艺的修正

在低温条件下,工艺参数选择要适当的延长相应的渗透及显像时间,如对某检测工艺修正如下:

在 -2°C 工况下,渗透时间为15 min,显像时间为12 min,比原标准工艺均有所加大,原工艺为渗透时间为10 min,显像时间为8 min,经过加热唤醒渗透剂和显像剂的状况下,检测缺陷显示痕迹与标准试块缺陷显示痕迹清晰,均能有效地显示缺陷,渗透检测灵敏度能满足标准如JB/T 4730.5—2005及核电液体渗透技术条件的要求检测工艺修正后可以满足此温度条件下的检测工作。

在检测工艺改进的同时,也是对检测工艺的再次验证,可验证显像剂喷涂雾化效果,是否呈水状,难以形成薄而均匀显示层,缺陷显示较模糊、不清晰等现象,显像剂能否均匀地分散于试块表面上。

2.3.2.2 高温条件下检测工艺的修正

高温条件下的渗透检测,需要适当减小渗透时间及和显像时间,如时间太长,往往会产生渗透液及显像液干涸而影响对结果的评判。

显像是关键的控制环节:显像的过程是用显像剂将缺陷处的渗透液吸附到工件表面,产生清晰可见的缺陷图像。在进行显像剂的喷涂操作中,不能一次喷的太厚,应多次均匀的喷涂到工件上,显像剂的厚度不能太厚,太厚时容易在检测过程中出现卷皮/起皮现象。

高温条件的下渗透检测主要是对工件的降温及渗透检测工艺参数进行修正。

2.4 显像时机的控制

在渗透检测的显像环节,正确把握显像时机是准确判定显示的关键环节。在产品焊后渗透检测要正确把握显像的判定时机,对于检测灵敏度要求不同的材料,要在检测工艺卡中规定的显像时间内正确把握。如奥氏体不锈钢在役检查时对于应力腐蚀裂纹、结晶热裂纹的检查,其显像时间要适当的延长;对于检测较厚工件中的大尺寸表面缺陷时,需要适当提高渗透及显像时间,以保证有足够的渗透液完全浸润并及时显像;对于尺寸较薄的一些构件,要检出裂纹等贯穿性缺陷,要在显像时间影像初起时进行判断,以免产生对重要缺陷的误判;同时,针对铸件、锻件及焊接件要根据不同的显像时间综合控制。

核电工程主要是对低合金钢及不锈钢的检测。检测时机主要分布在产品的焊后检验,役前检验、在役检验及存在差异判定时的第三方验证。因此,同一个工件,在检测时会出现对检测结果评判的各种差异。

3 检测及评判的差异性分析

在渗透检测结果的评判过程中,是一个综合的过程,一方面要充分理解标准,另一方面是检测经验和能力的体现。

通常对于渗透检测时发现的各类结果存在差异性的原因,分析总结如下:

(1) 组合渗透材料选择的不同,不同材料所显示颜色的区别(色差的原因)的影响对于结果的判定也存在一定的影响,是造成差异的一种解释。无论是选择船牌,核工牌或是 APPDX 等组合渗透检测材料,其主要的选择控制点是要满足检测灵敏度的要求,即能检出缺陷是主控项目。对于此类差异的解决,主要进行检测方法及检测灵敏度的验证鉴定即可,通过鉴定结果可以判定是否可用。

(2) 对于可记录缺陷如缺陷的尺寸均小于0.5 mm的缺陷,缺陷重复性的检出率是比较差,存在随机性,没有重复性,随渗透检测的次数及工件的表面状态的影响而不同;而对于较大尺寸的缺陷,则具有很大的重复性,可适于多次检测。

(3) 检验结果与渗透检测检验人员的检测经验及操作手法的差异性而不同;如清洗或擦洗,工作表面的处理状态和要求程度的不同;或评定时所用工具如放大镜检查对评判结果的影响。

(4) 检测时的环境的不同也是造成评判结果差异的一个原因,如光照强度的影响等。

(5) 对于标准、技术条件的理解不同也是评判差异性的另一个主要原因。

(6) 对于渗透检测时产品上的显示分类(相关显示,非相关显示和虚假显示)未正确区分是造成评判结果差异。

3.1 正确区分在渗透检测产品上的显示分类

渗透检测中通常将检测所得显示分为相关显示、非相关显示和虚假显示。相关显示是由缺陷(裂纹、气孔、夹杂、折叠、分层等缺陷)引起的痕迹显示;非相关显示是指由加工工艺或工件外部原因等因素、工件的结构等原因、与工件缺陷无关等因素而引起的显示,如定位时的样冲孔,刻痕、标记等;虚假显示是指由于渗透检验时操作不当,渗透剂污染或表面未清洗干净而残留的渗透剂、清洗剂等所引起的显示。

非相关显示的形成原因可归纳如表1所示。

表1 渗透检测产品上的非相关显示形成原因

原因分类	表现形式	缺陷位置	备注
加工工艺因素	如焊接飞溅、装配压痕、铆接印记、磨光机打磨,砂纸及锉刀修磨,未焊接的搭接部位等	焊接区域、配合及装配区域、检测区域周边等	肉眼可发现
工件结构外形	键槽、花键及装配结合的缝隙处	工件的几何不连续处	肉眼可发现
工件表面状态	机械损伤、划伤、刻痕、凹痕、毛刺或松散的氧化皮、污染物等杂物吸附	工件表面	肉眼可发现

正确区分相关显示是做好检测结果评定的基础,也是有效引导后续对缺陷的准确处理,减小误判及产生各类纠纷的重要环节。

3.2 充分理解检测标准

缺陷显示一般是根据显示的形状、尺寸和分布状态来进行评判,评判标准按照相应的质量验收标准进行。

核电工程中液体渗透检测的验收标准依据 RCC-M 中 S7363 条,以铸件坡口一级合格的验收标准为例。在这个标准里待焊表面的要求如下:除特殊规定外,只考虑大于 2 mm 的显示。符合以下其中一条为不合格:线性显示;大于 4 mm 的非线性显示;3 个或 3 个以上排成一条直线的显示,且间距小于 3 mm;以最不利的方式选择最大边长不大于 20 cm 的 100 cm² 的矩形表面内,显示数量为 5 个或 5 个以上。

从标准规定来看,只有当缺陷显示的最大边长大于 2 mm 时才进行判定。实际上应该是当缺陷显示大于 2 mm 时对缺陷进行记录,为记录缺陷,如显示满足其余的条目的任何一条则应判定为不合格。

3.2.1 关于线性显示

标准中定义的线性显示为缺陷显示的长度和宽度的比值大于 3。在实际的判定过程中,许多检查人员对于有些非相关显示判定为缺陷或判定为线性显示;或将部分连续咬边或焊缝边缘区域判定为线性显示。

在缺陷判定时应密切注意缺陷显示的过程,因为有些细小的裂纹会由于显示的时间的变长而变得长宽比小于 3,成为圆形显示。在显示刚出来的时候,由于毛细作用,渗透液是沿着缺陷边缘出现的,故缺陷的形状在显示的第一时间观察并作出初步判断是有很必要的。假设一个表面裂纹的宽度为 0.32 mm,长度 1 mm,深度为 0.5 mm,随显示时

间变化为由窄至宽。

当裂纹长度较小,且接近于 3 的比值时,只有在缺陷显示的最初始才能准确显示缺陷形状。由于在施工中判定缺陷显示长度和宽度的测量仪器的最小刻度为毫米,如果最后进行测量不能准确判断实际情况,容易出现将线性显示判定为圆形显示。裂纹的特点和危害在于有尖锐的缺口,引起较高的应力集中,而使得裂纹进行扩展,导致整个结构破坏,是否是裂纹主要取决于根部的形状,如图 1 所示。

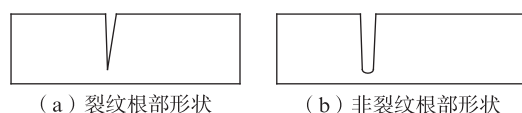


图1 缺陷的根部形貌

所以,当出现微小的裂纹时容易误判,要求渗透检测操作和评判人员应及时关注显示过程,并持严谨的态度进行分析和确认,不能轻易依据是否最终显示大于 2 mm 来判断缺陷性质。

3.2.2 关于圆形显示

缺陷长宽比小于 3 的显示为圆形显示。渗透检测时,缺陷迹痕的形貌随时间的延长会发生变化:迹痕宽度随着显像时间的延长会变宽;迹痕的长度随着显像时间的延长会变长。焊缝的火口裂纹,开始时呈星形放射状裂纹形貌,但随着显像时间的延长,会变成圆形显示;当细小的圆形显示在多次检测时特有的堵塞问题,会大大影响圆形显示的正确显示,从而影响检测结果。

3.2.3 关于显示数量

以最不利的方式选择最大边长不大于 20 cm 的 100 cm² 的矩形表面内,显示数量为 5 个或 5 个以上。假设最终显示 2 mm 以下的缺陷不进行考虑,那么我们依据标准的第 2 条和第 3 条,采用计算和作图的方法在 100 cm² 的范围内可以允许多少显示。

则每个能够存在的最大缺陷长度为 4 mm,宽度为 1.4 mm,按照每个缺陷间距小于 3 mm 的要求,每个缺陷所占面积为 $(4+1.5) \times (1.4+1.5) = 15.95 \text{ mm}^2$ 的时候是满足要求的,那么 100 cm² 中所能够容纳的最多缺陷显示数量为 $10\,000 \div 15.95 \approx 627$ 。

按照标准中注释 2 的要求,连续长度超过 20 mm 的应对缺陷进行分析,假设分析出缺陷是 1 mm 的气孔,那么也是不可以判定为合格的。按照假设缺陷大小作图,则就会表面出现类似筛子一样感觉的情况。

很明显,这样的金属表面是不能够满足施工要求的,即使实际情况中不会出现这样的结果,但即使是出现三十分之一的数量也是有可能的。故当 100 cm^2 的范围内只要是出现超过 5 个或更多的密集性显示则应该对缺陷进行性质确定,并分析原因,不得轻易放过。此问题仍适用于“RCCM M3301 对锻件的渗透检验标准:任何尺寸等于或大于 1 mm 的痕迹须予以记录。凡呈现以下痕迹的缺陷不予验收:线性痕迹;尺寸超过 3 mm 的非线性状痕迹;边缘间距小于 3 mm 的 3 个或 3 个以上线状排列的痕迹;在 100 cm^2 矩形表面上有 5 个或 5 个以上的密集痕迹;该矩形选自痕迹最严重的部位,其长边长不得超过 20 cm 。”的要求。

通常,一些检测人员认为小于 1 mm 的痕迹往往不予记录,这其实是不正确的,如密集显示的处理问题,此问题需要记录并按数量的多少进行处理或返修。

3.3 关于缺陷检出率

渗透检测检出开口缺陷的检出率,主要取决于表面开口缺陷的开口宽度,其次取决于深度及长度。当表面开口缺陷的开口宽度尺寸,窄到与渗透剂中染料分子尺寸同数量级时,渗透检测中的染料分子不能进行缺陷中,缺陷显示将受到极大限制。渗透检测的最高灵敏度,结果是 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

被检工件的表面状况及形态会影响渗透检测的缺陷检出情况,在检查时要认真做好对于焊缝及待检表面的打磨及清理,及时清除非相关显示及虚假显示。

4 解决差异性的措施

工程施工中无论是焊后或是役前或是在役,对焊缝的渗透检测主要目的是查出工件的缺陷,不同单位的检测结果会有不同,因此,正确分析了检测结果评判的差异性后,在充分掌握渗透检测原理的基础上,对所检缺陷的性质会有一个直观的判定,此类缺陷的存在不会对材料的结构及机械性能造成很大的影响,因此会明确一个处理方向——对此缺陷的清除,可进

行有限打磨以去除显示,但应采取措施限制材料打磨去除量,一般必须小于 0.5 mm 和壁厚的 5% 。

解决差异性的具体方法如下:① 熟悉检测时所用的标准并确保检测人员均持证检测并具备至少 4 年的检测工作经验,持证在有效期内进行连续操作。② 保证检测时的检测条件满足标准及技术条件的规定,重点对检测结果存在差异性的部位要做好表面状态的处理。③ 按照已批准的检测方案及工艺参数进行检测或第三方验证检测。④ 在现场操作前先对检测方法及灵敏度的进行验证鉴定,合格后开始现场作业。⑤ 正确把握检测及缺陷的评判时机,不同单位的渗透检测人员在检测时相互见证检测评定过程,正确评判。⑥ 按“过程有记录,完工有报告,报告有结论”的工作方法进行资料管理。⑦ 做好缺陷尺寸、数量、显示位置等特征的对照性影像及评价记录。⑧ 对于缺陷清除后的统一检测,各方现场见证。

5 结论

液体渗透检测作为一个对管道和材料进行表面检测的手段,每个操作步骤都会影响评定结果,应对每一个步骤都认真进行。

对于检测发现的密集性的缺陷要进行分析并综合判定,不要轻易放过。同时,要做好对于线性显示的正确判断。

超出标准规定的温度范围外的渗透检测,最重要的是要做好低温/高温条件下检测工艺方法的鉴定验证、检测工艺参数的修订及灵敏度测定。

对渗透检测结果差异性的分析,一是对所检测物项的质量状态得到充分了解;二是要让安装单位、在役检测单位、第三方检测及核电业主得到正确的观点和结论;第三,通过检测以便采取相应的技术措施对缺陷进行清除;第四,无论检测结果是否具有差异性,后续均要对缺陷进行清除和再复检,从而保证产品符合相关技术条件的要求或缺陷。

摘 要 撰 写

摘要是以提供文献内容梗概为目的,不加评论和补充解释,简明、确切地论述文献重要内容的短文,因此,必须符合拥有与论文同等的主要信息的原则。摘要可包括研究工作的主要对象和范围,以及具有情报价值的其它

重要信息,内容不应空洞、过简,应具备四个要素,即研究目的、方法、结果和结论,其中,后两个是最重要的。中文摘要一般为 200 字左右,如需要可以略多;英文摘要内容应与中文摘要一致。