

DOI: 10.11973/wsje202004008

基于 X 射线计算机辅助成像技术的带料管道焊缝检测

毛国均¹, 柴军辉^{1,2}, 张子健², 张小龙², 吕钟杰², 薛秉康¹, 胡 健², 黄小江²

(1.宁波市特种设备检验研究院, 宁波 315048; 2.宁波市劳动安全技术服务公司, 宁波 315048)

摘要:采用便携式数字 CR 系统对某大型石化企业的 400 条压力管道进行了 X 射线计算机辅助成像检测(CR)。通过设置管道是否带料、采用不同射线源和是否考虑介质对透照的影响等三种情况的对比试验,验证了检测手段的可靠性及有效性。现场检测能发现管道对接焊缝的未焊透、未熔合、夹渣、气孔和裂纹等典型缺陷,并针对 CR 现场应用存在的一些问题进行了讨论,为 CR 技术在带料管道焊缝检测中的广泛应用奠定基础。

关键词: CR; 压力管道; 对接焊缝; 焊接缺陷

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2020)04-0036-06

Weld detection of pipeline with medium based on X-ray computed radiographic technology

MAO Guojun¹, CHAI Junhui^{1,2}, ZHANG Zijian², ZHANG Xiaolong², LÜ Zhongjie², XUE Bingkang¹,
HU Jian², HUANG Xiaojiang²

(1.Ningbo Special Equipment Inspection and Research Institute, Ningbo 315048, China;

2.Ningbo Labor Safety and Technology Services Company, Ningbo 315048, China)

Abstract: Using the portable digital CR system, the X-ray computer-aided image detection (CR) of 400 pressure pipelines in a large petrochemical enterprise was carried out. The reliability and effectiveness of the detection method are verified by the comparison test of whether the pipeline is equipped with medium, using different ray sources and considering the influence of the medium on the permeation. The typical defects of butt weld of pipeline, such as incomplete penetration, incomplete fusion, slag inclusion, air hole and crack, can be found in the field inspection. Some problems existing in the field application of CR are discussed, which lays a certain foundation for the wide application of CR technology in the inspection of weld seam of pipeline with medium.

Key words: CR; pressure pipeline; butt weld; welding defect

在石油化工等行业,装置中的介质一般都是通过压力管道输送的。由于长期在高压(部分还有高温)状态下运行,压力管道中如存在缺陷,容易发生泄漏甚至爆裂,且石油化工行业涉及的多为有毒有害易燃易爆介质,发生泄漏后极易造成二次事故而带来较大损失,故对带料管道缺陷隐患的在线检测

具有重要意义。随着计算机及电子技术的快速发展,X射线计算机辅助成像检测(CR)技术也得到了飞速发展,其优势不仅体现在无胶片的图像存储和传输上,而且具有大的宽容度、多种图像处理技术,以及检测结果的直观化,为在线检测及缺陷隐患问题的及时发现提供了有效的解决途径^[1-5]。

某大型石化企业在停工检修期间,罐区管道由于无法进行排料,相控阵超声等检测手段受检测面需打磨和高温影响的限制,不能有效开展检测,在此情况下,笔者采用 CR 技术对带料管道进行在线检测,待检管道信息如表 1 所示。

依据 NB/T 47013.14—2016《承压设备无损检

收稿日期: 2020-01-21

基金项目: 浙江省质监系统质量技术基础建设项目(20180119)

作者简介: 毛国均(1978—),男,硕士,高级工程师,主要从事承压类特种设备无损检测研究工作

通信作者: 柴军辉, cjh@nbanji.com

表1 待检管道信息

公称直径/mm	焊口数	物料	温度/℃
50~100	120	C4, C5, 丙烷, 燃料油, 润滑	常温, 50~270
150~300	265	油, 污油, 沥青, 重污油, 石	
350~450	15	脑油等	

测第14部分:《X射线计算机辅助成像检测》标准进行检测。标准中对于检测人员、检测设备和器材、检测技术等级、检测工艺文件、安全要求等都有详细规定;对于检测时机的规定为在焊后进行CR检测,有延迟裂纹的材料需要焊后24 h检测;对于检测区域的规定为焊缝金属+焊缝边缘5 mm的母材区域;对于表面的要求为CR检测前目视检测合格;对于射线能量的要求为CR检测宜选用较低的管电压;对于IP和金属屏的选择要求根据材料、透照厚度和管电压进行;对于透照方式的规定为优先选择单壁透照,透照方向应与工件表面法线重合,一次透照长度根据透照厚度比进行选取,其中小径管的CR检测要选择双壁双影透照方式,曝光量通过最小灰度值试验确定,CR检测需要选用单丝和双丝两种像质计等;最后还对数字图像质量中的对比灵敏度、分辨率、归一化信噪比进行了相关规定。

1 CR检测原理与工艺

1.1 检测原理

CR工作原理是用存储屏(IP板)记录射线影像,通过激光扫描使存储信号转变成光信号,再用光电倍增管将光信号转换成电信号,然后经A/D(模/数)转换后,输入计算机处理,成为高质量的数字图像。CR系统由成像板(IP)、激光扫描仪、显示器和系统专用软件等组成。CR系统的工作流程主要分4部分:信息采集、信息转换、信息处理、信息记录和存储。

1.2 硬件系统

CR系统采用美国锐珂工业的便携式数字CR系统,型号为HPX-PRO。

IP板采用锐珂IP成像板,锐珂IP成像板可以采用和常规X射线检测相同的透照方式,因此和常规X射线检测设备兼容。成像板通常有通用型(GP),高清型(HR),XL Blue三种型号。综合以上几种成像板的特点,结合实际所需,采用高清型(HR)IP板较为合适,其在有较高分辨率的同时有着较短的曝光时间,可提高检测效率。

根据透照厚度的不同,滤光板厚度在0.5~2 mm间选取,在整套CR系统中,铜滤光板优于钢滤光

板,钢滤光板优于铅滤光板,最后选取了铜滤光板。

射线源的选择:此次检测管道的公称通径(DN)为80~450 mm,厚度为4~14 mm,双壁透照厚度为8~28 mm,考虑到管道内均存在介质,介质密度在 $1 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,传统X射线机300 kV可透照范围为DN 200 mm以内管径(DN 200 mm管子壁厚为7 mm,考虑介质透照厚度约为40 mm),现场也存在狭小空间等影响因素。300 kV射线机最大穿透厚度约为40 mm,伽马源Ir192最大穿透厚度为100 mm,且设备可在狭小空间进行检测。综合上述因素,DN 200 mm及以下管径的数字射线检测,采用X射线机(丹东XXG3005)进行检测;DN 200 mm以上管径的数字射线检测,采用伽马源Ir192进行检测。空间狭小部分射线机无法放置,也需采用伽马源进行检测。

1.3 “带料”与“采用伽马射线”对灵敏度和信噪比的影响

(1) 带料

带料管道一般带有高温介质,射线能量穿过高温并且流动的介质到达IP板时会损失一部分能量,射线能量衰减遵循公式 $I = I_0 \exp(-\mu t)$ (式中: I 为穿透介质后的射线能量; I_0 为原射线能量; μ 为衰减系数; t 为材料厚度),在带料介质管道中,存在两种介质衰减,使得穿透介质后的射线强度明显降低,检测灵敏度降低。

对于CR检测,图像信噪比与IP板单位面积接收到的X射线光子数成正比,而带料管道单位面积接收到的X射线光子数少,因此图像信噪比低。

(2) 采用伽马射线

伽马源能量发散,IP板吸收得到的射线能量相当于散射线穿透介质后所剩的能量,固有不清亮度大;X射线机发射的射线能量集中且穿透能力可以通过射线机参数进行调节,固有不清亮度小。其次,IP板的磷光材料对于低能射线极其敏感,在 γ 源和高能射线照射时产生的散射线会对图像产生噪声影响,造成图像对比度下降。因此,CR采用伽马射线检测的灵敏度和信噪比均小于采用X射线机检测的。

1.4 检测工艺

不同管径、壁厚管道的CR检测工艺如表2所示。

单壁透照时,像质计横跨焊缝放在被检件区长度的1/4位置,细丝朝外,一般应置于源侧,当置于IP侧时,应在IP上加上“F”标志。双壁单影透照时,

表 2 CR 检测工艺

序号	直径/ mm	透照厚度/ mm	透照方式	焦距/ mm	像质计种类 及型号	像质计放置 位置	一次透照 长度/mm	管电压/ kV	管电流/ mA	曝光量/ (mA·min ⁻¹)	备注
1	300	17	双壁单影	450	线型:10 FE JB 双丝:GB/T23901	射线源侧	128	300	5	25	—
2	80	11	双壁双影	450	线型:10 FE JB 双丝:GB/T23901	射线源侧	—	190	5	7.5	—
3	100	12	双壁单影	320	线型:10 FE JB 双丝:GB/T23901	IP 侧	57	170	5	5	F
4	150	12	双壁单影	360	线型:10 FE JB 双丝:GB/T23901	IP 侧	88	170	5	7.5	F
5	200	12	双壁单影	420	线型:10 FE JB 双丝:GB/T23901	IP 侧	115	180	5	7.5	F
6	250	16	双壁单影	470	线型:10 FE JB 双丝:GB/T23901	IP 侧	108	200	5	10	F
7	300	17	双壁单影	520	线型:10 FE JB 双丝:GB/T23901	IP 侧	128	210	5	10	F
8	400	26	双壁单影	620	线型:10 FE JB 双丝:GB/T23901	IP 侧	128	260	5	15	F
9	450	28	双壁单影	670	线型:10 FE JB 双丝:GB/T23901	IP 侧	144	275	5	15	F

像质计横跨焊缝放在被检件区长度的 1/4 位置,细丝朝外,置于 IP 侧应在胶片上加上“F”标志。小径管透照时,金属丝垂直焊缝且横跨焊缝放置。

2 对比试验

针对所检管道的特点,进行以下对比试验,来验证检测手段的可靠性及有效性。

2.1 带料管道和不带料管道的对比

分别对 DN 219 mm×8 mm(公称直径×壁厚,下同)不带料管道和带料管道(带料采用油水混合悬液模拟)环焊缝利用 X 射线进行 CR 检测。其中图 1,2,3 分别为 DN 219 mm×8 mm 不带料管道的 X 射线 CR 检测结果图像(管电压为 180 kV,透照时间为 1.5 min);图 4,5,6 为 DN 219 mm×8 mm 带料管道的 X 射线 CR 检测结果图像(管电压为 200 kV,透照时间为 8 min)。

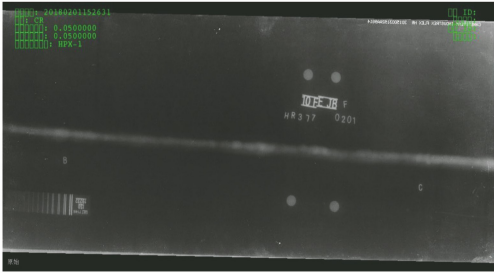


图 2 不带料管道的 X 射线 CR 检测结果(无缺陷)

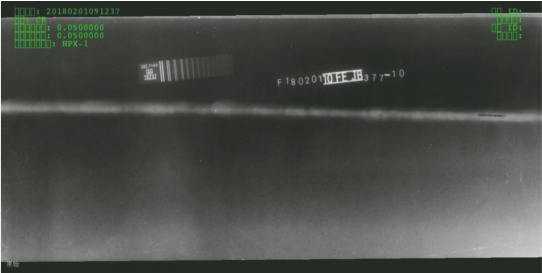


图 3 不带料管道的 X 射线 CR 检测结果(夹渣)

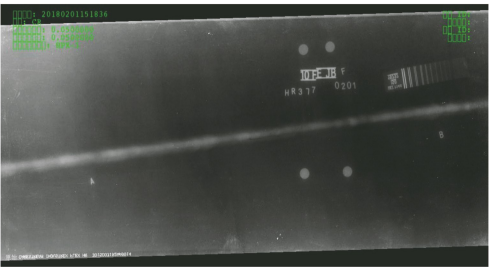


图 1 不带料管道的 X 射线 CR 检测结果(裂纹)

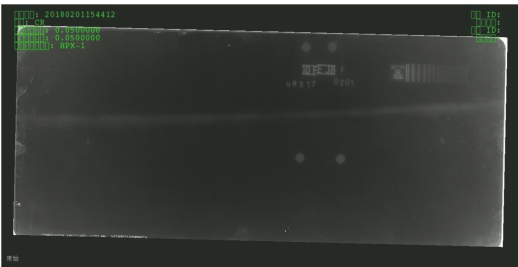


图 4 带料管道的 X 射线 CR 检测结果(裂纹一)

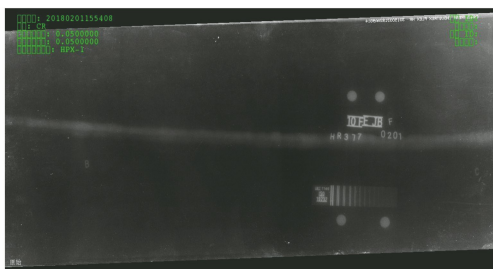


图5 带料管道的X射线CR检测结果(裂纹二)

从图1,3和图4,6中均能发现缺陷,缺陷类型为焊接制造缺陷中的裂纹、夹渣。原始图像中对比度较小,经过灰度拉伸后得到的图像能够清晰地看见缺陷位置及缺陷特点。

以上试验结果的对比如表3所示,从表中可以

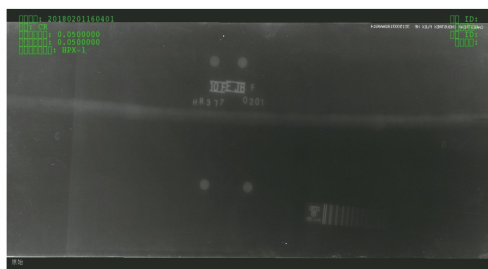


图6 带料管道的X射线CR检测结果(夹渣)

看到,利用X射线对带料管道进行CR检测,图像质量基本可以达到X射线CR检测AB级的要求,且缺陷均能良好地显示出来,检测结果与不带料管道的X射线CR检测结果相差无几,在长度方向有一定差异。

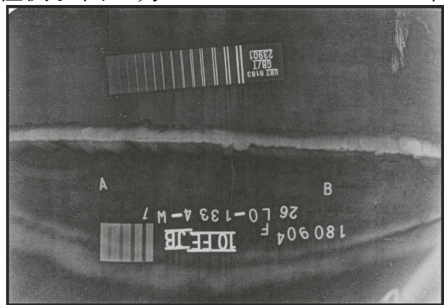
表3 带料管道和不带料管道的试验结果对比

试验类别	数字底片质量要求			缺陷分辨能力		
	像质指数(≥ 12)	分辨率($\geq D8$)	归一化信噪比(≥ 85)	缺陷性质	长度/mm	宽度/mm
X射线CR检测-不带料管道	12	D9	121.2	裂纹	25.0	0.3
X射线CR检测-带料管道	12	D8	90.3	裂纹	27.1	0.3
X射线CR检测-不带料管道	12	D9	123.4	夹渣	20.0	1.0
X射线CR检测-带料管道	12	D8	91.1	夹渣	21.9	1.1

经分析认为,带料管道环焊缝含缺陷图像质量影响因素主要为IP板带来的噪声、图像放大及介质引起的衰减。其中,影响平板探测器图像质量噪声的因素主要是光量子噪声,检测中通过连续帧叠加降噪的方法就能很好地抑制此类噪声。图像放大是隔热棉使得IP板与带料管道未完全贴紧而造成的,此时射线源侧的焊缝与IP板侧的焊缝到探测器的距离相差了管子的直径,从而使得射线源侧缺陷影像放大。

2.2 带料管道采用X射线检测和伽马射线检测的对比

分别对规格为DN 150 mm \times 6 mm, DN 200 mm \times 6 mm的带料管道环焊缝,利用X射线与 γ 射线进行CR检测。图7为DN 150 mm \times 6 mm带料管道

图7 带料管道DN 150 mm \times 6 mm的X射线CR检测结果

的X射线CR检测结果图像(管电压为180 kV,透照时间为6 min);图8为DN 150 mm \times 6 mm带料管道的 γ 射线CR检测结果图像(Se75, 50Ci, 6 min);图9为DN 200 mm \times 6 mm带料管道的X射线CR检测结果图像(管电压为200 kV,透照时间为8 min);

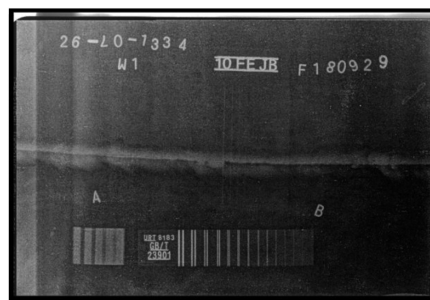
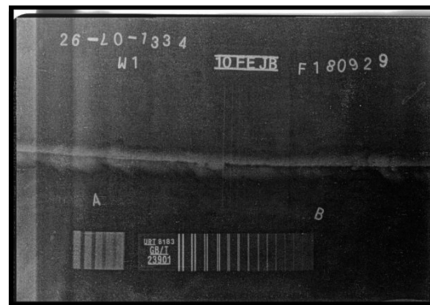
图8 带料管道DN 150 mm \times 6 mm的 γ 射线CR检测结果图9 带料管道DN 200 mm \times 6 mm的X射线CR检测结果

图10为DN 200 mm×6 mm带料管道的 γ 射线CR检测结果图像(Se75,50Ci,8 min)。

以上试验结果的对比如表4所示。从表4及图7,8中可以看出,采用X射线和 γ 射线对带料管道进行CR检测的图像质量要求均能满足标准要求,也均能发现宽度为1.5mm的未熔合缺陷,X射线CR检测单丝高于 γ 射线CR检测1个等级,X射线CR检测归一化信噪比高于 γ 射线CR检测的;从表4及图9,10的对比中可以发现,采用X射线和 γ 射线进行CR检测的图像质量均能满足标准要求,均能

发现直径为1 mm的气孔缺陷。



图10 带料管道DN 200 mm×6 mm的 γ 射线CR检测结果

表4 使用不同射线源检测带料管道的试验结果

试验类别	数字底片质量要求			缺陷分辨能力		
	像质指数(≥ 13)	分辨率($\geq D8$)	归一化信噪比(≥ 85)	缺陷性质	长度/mm	宽度/mm
X射线CR检测-带料管道DN 150 mm×6 mm	14	D10	137.7	未熔合	95	1.5
γ 射线CR检测-带料管道DN 150 mm×6 mm	13	D10	121.2	未熔合	95	1.5
X射线CR检测-带料管道DN 200 mm×6 mm	13	D10	130.9	气孔	1点	1.0
γ 射线CR检测-带料管道DN 200 mm×6 mm	13	D9	95.5	气孔	1点	1.0

2.3 带料管道考虑和不考虑介质对透照影响的对比

分别对DN 150 mm×6 mm,DN 200 mm×6 mm的带料管道环焊缝利用X射线进行CR检测,一组不考虑介质对透照的影响,另一组考虑介质对透照的影响。图11为DN 150 mm×6 mm带料管道不考虑介质对透照影响的X射线CR检测结果(管电压为170 kV,透照时间为1 min);图12为DN 150 mm×

6 mm带料管道考虑介质对透照影响的X射线CR检测结果(管电压为180 kV,透照时间为6 min);图13为DN 200 mm×6 mm带料管道不考虑介质对透照影响的X射线CR检测结果(管电压为190 kV,透照时间为1.5 min);图14为DN 200 mm×6 mm带料管道考虑介质对透照影响的X射线CR检测结果(管电压为200 kV,透照时间为9 min)。

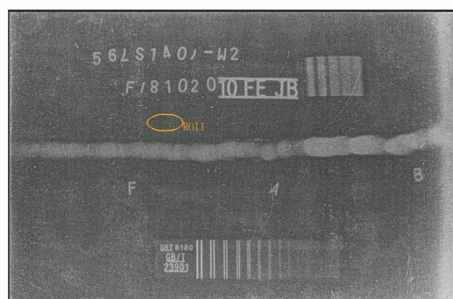


图11 DN 150 mm×6 mm带料管道未考虑介质对透照影响(170 kV,1 min)的X射线CR检测结果

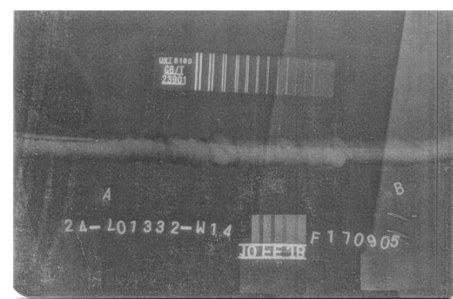


图13 DN 200 mm×6 mm带料管道未考虑介质对透照影响(190 kV,1.5 min)的X射线CR检测结果

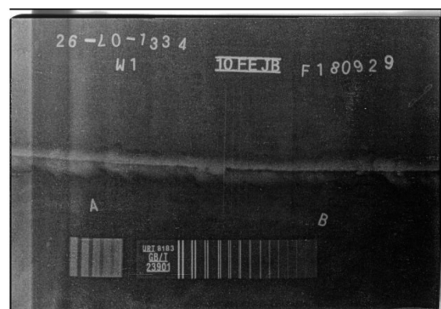


图12 DN 150 mm×6 mm带料管道考虑介质对透照影响(180 kV,6 min)的X射线CR检测结果

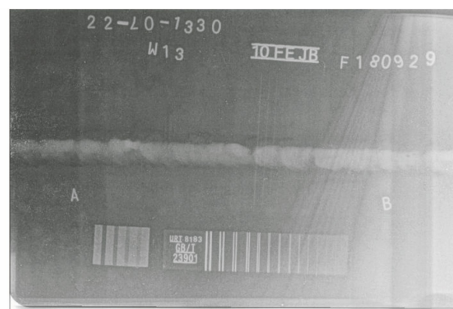


图14 DN 200 mm×6 mm带料管道考虑介质对透照影响(200 kV,9 min)的X射线CR检测结果

以上试验结果如表5所示,从表中可以看出,如果用未考虑介质对透照影响而选取的透照参数进行CR检测,获取的图像质量均达不到标准要求,即要求在现场实施CR检测时必须考虑介质对透照的影响。

表5 带料管道未考虑和考虑介质对透照影响的试验结果

带料管道 规格/mm	拍片条件	图像质量		
		像质指数	空间分辨率	归一化信噪比
DN 150×6	170 kV, 1 min	W11	D8	62.8
DN 150×6	180 kV, 6 min	W14	D10	137.7
DN 200×6	190 kV, 1.5 min	W11	D8	76.9
DN 200×6	200 kV, 9 min	W13	D10	130.9

3 现场检测

在对管道按检测工艺要求进行X射线检测时,初期检测效果良好,均能达到检测标准对数字射线的图像质量要求。在后期的检测过程中发现存在以下问题,需对检测工艺进行调整。

(1) 射线检测无法对DN 200 mm以上管道进行有效检测(射线机最大管电压为300 kV),DN 250 mm, DN 300 mm管道壁厚均在10 mm以上,加上管道内介质,实际穿透厚度大于56 mm(按衰减系数和密度折算),300 kV射线机产生的射线能力无法穿透管道进行有效拍片。

(2) 管道纵横交错,部分管道无法容纳射线机的摆放,无法进行完全透照检测,造成检测比例不足。

(3) DN 200 mm以上带料管道射线检测数字底片的质量参数未能达到标准要求,实际情况如表6所示。

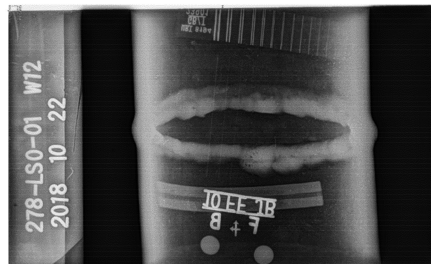
表6 DN200 mm以上带料管道实际检测结果与标准要求对比

带料管道 规格/mm	数字底片质量要求		
	像质指数标准 要求/实际	分辨率标准 要求/实际	最小归一化信噪比 标准要求/实际
DN 250×8	W11/W11	D9/D8	85/87.3
DN 300×10	W11/W8	D9/D6	85/43.5
DN 350×9.5	W11/W7	D9/D5	85/38.7
DN 400×13	W10/W7	D8/D5	85/40.6

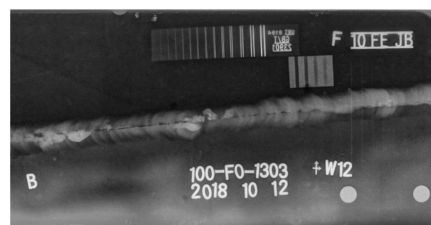
在检测DN200 mm以上带料管道时,数字底片质量虽不能达到目前检测质量要求,但也能发现一些较大的缺陷,如内凹、未熔合、未焊透等,如图15所示。



(a) DN 250 mm×8 mm管道的根部内凹缺陷



(b) DN 80 mm×5.5 mm管道的密集气孔缺陷



(c) DN 500 mm×9.5 mm管道的根部未焊透缺陷



(d) DN 250 mm×8 mm管道的坡口熔合缺陷

图15 典型缺陷的现场检测图像

4 结论

(1) 对带料压力管道采用射线计算机辅助成像检测,能够发现管道的内部缺陷,在管径不大于DN 200 mm(厚度为8 mm)时,能达到现行检测标准NB/T 47013.14—2016中AB级对像质质量的要求。

(2) 在管径大于DN 200 mm(壁厚为8 mm及以上)时,采用 γ 射线对带料管道进行检测,数字底片质量参数无法达到标准对管道不带料情况下的检测质量要求;随着管径的增加,管道内部介质对射线的衰减吸收变强,使得检测数字底片质量参数很难达到检测标准的要求;在对带料管道进行质量评定时不能排除介质的影响,应按其衰减系数和密度来计算实际透照壁厚,从而来评定数字底片的质量。

(下转第45页)

当反差增强剂厚度小于 $11\ \mu\text{m}$ 时,其对缺陷的检出率几乎无影响;当反差增强剂厚度达到 $22\ \mu\text{m}$ 时,检测缺陷深度逐渐减小;当反差增强剂厚度为 $38\ \mu\text{m}$ 时,尖端宽度为 $0.1\ \text{mm}$ 的模拟裂纹缺陷的检测深度为未喷涂反差增强剂时的 87.5% ,尖端宽度为 $0.5\ \text{mm}$ 的模拟条渣缺陷的检测深度为未喷涂反差增强剂时的 90% ,而尖端为 $\phi 1\ \text{mm}$ 的模拟条孔缺陷的检测深度为未喷涂反差增强剂时的 92% 。当反差增强剂厚度为 $122\ \mu\text{m}$ 时,尖端宽度为 $0.1\ \text{mm}$ 的模拟裂纹缺陷的检测深度为未喷涂反差增强剂时的 70.8% ,尖端宽度为 $0.5\ \text{mm}$ 的模拟条渣缺陷的检测深度为未喷涂反差增强剂时的 71.4% ;尖端为 $\phi 1\ \text{mm}$ 的模拟条孔缺陷的检测深度为未喷涂反差增强剂时的 71.4% 。

当反差增强剂厚度为 $223\ \mu\text{m}$ 时,尖端为 $\phi 1\ \text{mm}$ 的模拟条孔缺陷磁痕显示变得模糊;当反差增强剂厚度为 $544\ \mu\text{m}$ 时,宽度为 $0.5\ \text{mm}$ 的模拟条渣缺陷磁痕显示变得模糊;当反差增强剂厚度为 $646\ \mu\text{m}$ 时,宽度为 $0.1\ \text{mm}$ 的模拟裂纹缺陷磁痕显示变得模糊。

当反差增强剂厚度为 $544\ \mu\text{m}$ 时,尖端为 $\phi 1\ \text{mm}$

的模拟条孔缺陷磁粉不能检出;当反差增强剂厚度为 $646\ \mu\text{m}$ 时,宽度为 $0.5\ \text{mm}$ 的模拟条渣缺陷磁粉不能检出;当反差增强剂厚度为 $708\ \mu\text{m}$ 时,宽度为 $0.1\ \text{mm}$ 的模拟裂纹缺陷磁粉不能检出。

3 结语

(1) 未施加反差增强剂时,对于埋藏的条状缺陷,靠近检测面的缺陷越尖锐,检测深度越深;靠近检测面的缺陷越圆滑,检测深度越浅。

(2) 不同厚度的反差增强剂对磁粉检测会造成不同程度的影响。在检测工件表面仅施加一层反差增强剂(约 $11\ \mu\text{m}$)时,反差增强剂厚度对缺陷的检出影响较小。靠近检测面的缺陷越尖锐,施加反差增强剂的厚度对埋藏缺陷的检出影响越大。

(3) 埋藏缺陷尖端越圆滑,表面喷涂的反差剂越厚,磁粉越不易检出。

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,2010.
- [2] 候耀民.磁粉检测反差增强剂的施加环节[J].无损检测,2019,41(4):73-74.

(上接第41页)

(3) 使用射线计算机辅助成像技术检测带料管道焊缝,在实际应用中实施,一方面解决了传统射线检测技术检测效果差,甚至无法进行检测的问题,另一方面解决了常规检测技术给实际生产带来的停产停运或排料的麻烦,且能使管道缺陷结果显示客观化、易于判定,利于在役或超期服役带料管道的安全运行评价,具有重要的经济效益。但是在实际的检测应用中,高填充衰减系数介质(大管径内充满介质)对数字射线检测产生的影响是不可避免的。

(4) 当对设备进行在役检测时,CR检测技术在工作效率、检测图像后续分析处理和数据存储等方面具有较大优势,同时具有经济性、高效性、有效性等特点,因此在满足 NB/T 47013—2015《承压设备

无损检测》、管道容器检测规程的前提下,是可供选择的高效检测方法。

参考文献:

- [1] 张辉宇,张瑞轩.CR检测技术在长输管道上的应用[J].无损检测,2016,38(8):60-64.
- [2] 孙朝明,孙忠诚,曾祥照.数字射线成像中归一化信噪比指标的分析讨论[J].无损检测,2017,39(10):42-48.
- [3] 王彬,华雄飞,钟华,等.计算机射线照相(CR)分辨率对图像质量的影响[J].中国电力,2016,49(4):149-153.
- [4] 周锐.国内外X射线数字成像检测技术标准比对研究[D].太原:中北大学,2013.
- [5] 张万岭,张晓峰,林启峰.计算机射线成像(CR)系统及工业应用[J].无损探伤,2011,35(3):34-36.