

# 焊接接头的磁记忆检测

戈 浩<sup>1,2</sup>

(1. 浙江省特种设备科学研究院, 杭州 310020;  
2. 浙江省特种设备安全检测技术研究重点实验室, 杭州 310020)

**摘 要:** 通过对预制典型焊接缺陷的试板和在役压力管道进行磁记忆检测, 并将磁记忆检测和其他无损检测方法的检测结果进行对比, 表明焊接接头中的缺陷引起的应力集中会产生异常漏磁信号, 可以通过磁记忆技术检测出来。利用磁记忆技术不需要打磨, 检测快速、方便的特点, 先对焊接接头进行磁记忆检测, 再对存在异常信号的焊接接头进行常规无损检测, 该方法可以提高检测的针对性, 提高缺陷的检出率, 获得更好的检测效果。

**关键词:** 磁记忆; 焊接缺陷; 无损检测

中图分类号: TG115.28      文献标志码: A      文章编号: 1000-6656(2020)09-0006-06

## Metal magnetic memory testing of welding joint

GE Hao<sup>1,2</sup>

(1. Zhejiang Academy of Special Equipment Science, Hangzhou 310000, China;  
2. Key Laboratory of Special Equipment Safety Testing Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** The magnetic memory test of the prefabricated typical welding defects and the pressure pipes in use is carried out, and the results of the magnetic memory and other nondestructive testing methods are compared. It shows that the defects in the welding will cause stress concentration and produce abnormal magnetic flux leakage signals, which can be detected by magnetic memory technology. Magnetic memory testing is carried out on welding first, and then conventional non-destructive testing was carried out on welding with abnormal signals. It is expected to improve the “hit rate” of defect detection, and achieve a better detection effect by using the magnetic memory testing characterized by its fast and convenient operation and needing no grinding.

**Key words:** metal magnetic memory testing; welding defect; nondestructive testing

近几年国内发生了数起压力管道爆裂的安全事故, 推动了压力管道定期检验工作的全面开展。由于历史原因, 压力管道的制造和安装存在很多不足<sup>[1]</sup>, 而定期检验工期短、工作量大、要求高, 存在很多困难。

根据标准 TSG D 7005—2018《压力管道定期检验规则—工业管道》, 对压力管道焊接接头按照一定的抽查比例进行检测, 抽查的比例不高, 并且具有一定的盲目性和随机性。现实中, 定期检验有效期

内的压力管道出现失效的现象时有发生, 这往往是由于检测工作量大、检验工期短、现有的抽检方式导致有缺陷的焊接接头未被抽查造成的。

笔者开展了压力管道焊接接头的磁记忆检测技术研究, 在进行常规无损检测之前, 利用磁记忆技术不需要打磨、检测快速、方便的特点, 先对焊接接头进行磁记忆检测, 再对存在异常信号的焊接接头进行常规无损检测, 以提高检测的针对性, 提高缺陷的检出率, 减少打磨等辅助工作, 获得更好的检测效果。

### 1 磁记忆检测原理

磁记忆检测原理为, 处于地磁场环境下的铁制构件受工作载荷的作用, 其内部会发生具有磁致伸缩性质的磁畴组织定向的和不可逆的重新取向, 并

收稿日期: 2020-03-12

作者简介: 戈 浩(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事特种设备的相关检验及科研工作

通信作者: 戈 浩, gehao314@126.com

在应力与变形集中区形成最大的漏磁场  $H_p$  的变化,即磁场的切向分量  $H_p(x)$  具有最大值,而法向分量  $H_p(y)$  改变符号且具有零值点。这种磁状态的不可逆变化在工作载荷消除后继续保留。通过对漏磁场法向分量  $H_p(y)$  的测定,便可准确推断工件的应力集中部位<sup>[2]</sup>。

2 试板检测试验

设计了 2 块焊接试板,每块试板上制作 3 个典型焊接缺陷。1<sup>#</sup> 试板制作条孔、纵向裂纹、根部未焊透缺陷;2<sup>#</sup> 试板制作焊趾裂纹、内凹、未熔合缺陷。

对 2 块试板分别进行了 TOFD(超声波衍射时差法)、射线、相控阵超声、磁记忆检测,检测结果如图 3~10 所示。

在试板的正面和反面分别进行了 TOFD、磁记忆检测,并在试板的正面进行了相控阵超声检测。TOFD 检测采用的仪器型号为 ISONIC 2008,探头频率为 7.5 MHz,直径为 6 mm,入射角度为 60°,PCS(探头中心间距)为 39 mm,探头前沿为 8.5 mm;相控阵超声检测采用的仪器型号为 ISONIC 2009 DUET,探头阵元数量  $n=16$ ,频率  $f=7.5$  MHz,阵元间距  $p=0.5$  mm,阵元宽度  $e=0.4$  mm,阵元间隙  $g=0.1$  mm,楔块角度为 39°,相控阵超声检测时采用 CSK-IA 和 CSK-IIA-1 试块调节仪器和检测灵敏度,耦合补偿为 4 dB;磁记忆检测采用的仪器型号为 TSC-1M-4。

2.1 试板

2.1.1 1<sup>#</sup> 试板(UT04-T16-X)缺陷设计参数

1<sup>#</sup> 试板(UT04-T16-X)中设计了 3 个典型缺陷(条孔、纵向裂纹、根部未焊透),缺陷位置如图 1 所示,试板尺寸(长×宽×厚)为 350 mm×350 mm×16 mm,焊接方法为手工电弧焊,材料为 Q345R 钢,坡口型式为 X 型,焊缝宽度为 12~14 mm,焊缝余高为 0~2 mm。设计参数如表 1 所示。

表 1 1 <sup>#</sup> 试板(UT04-T16-X)缺陷设计参数 mm				
缺陷编号	缺陷性质	缺陷位置 (长度方向, 误差±5 mm)	缺陷位置 (偏离焊缝 中心)	缺陷位置 (深度方向, 误差±1 mm)
1	条孔	52~68	0	11~14
2	纵向裂纹	158~180	0	3~7
3	根部未焊透	273~291	0	7~9

2.1.2 2<sup>#</sup> 试板(UT03-T16-V)缺陷设计参数

2<sup>#</sup> (UT03-T16-V)中设计了 3 个典型缺陷(表面焊趾裂纹、内凹、坡口未熔合),缺陷位置如图 2 所示,

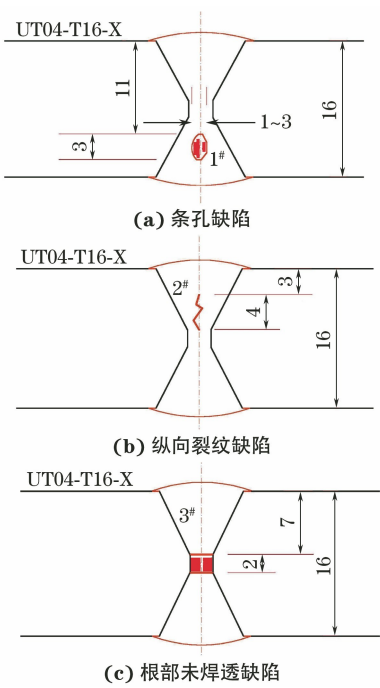


图 1 1<sup>#</sup> 试板焊缝截面缺陷位置示意

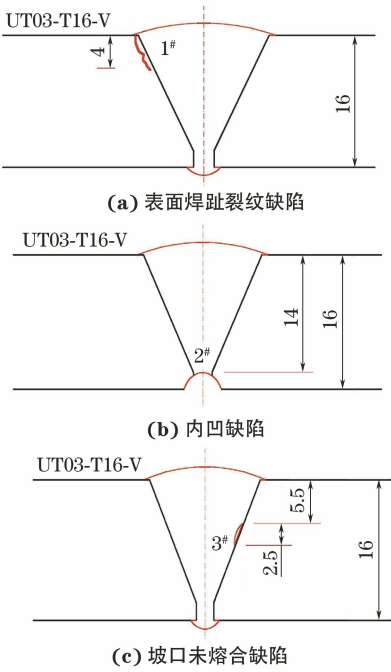


图 2 2<sup>#</sup> 试板焊缝截面缺陷位置示意

试板尺寸(长×宽×厚)为 350 mm×350 mm×16 mm,焊接方法为手工电弧焊,材料为 Q345R 钢,坡口型式为 V 型,焊缝宽度为 20~22 mm,焊缝余高为 0~2 mm。设计参数如表 2 所示。

2.2 检测结果

对 2 块试板分别进行了 TOFD、射线、相控阵超声、磁记忆检测,1<sup>#</sup> 试板(UT04-T16-X)各项检测结果如图 3~6 所示。

表 2 2# 试板(UT03-T16-V)缺陷设计参数

mm

缺陷编号	缺陷性质	缺陷位置(长度方向,误差±5 mm)	缺陷位置(偏离焊缝中心)	缺陷位置(深度方向,误差±1 mm)
1	表面焊趾裂纹	48~72	+9	0~4
2	内凹	169~187	0	14~16
3	坡口未熔合	291~306	-6	5.5~8

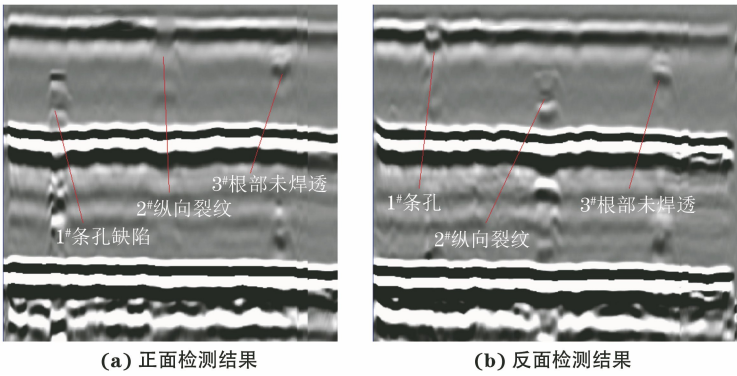


图 3 1# 试板(UT04-T16-X)TOFD 检测结果

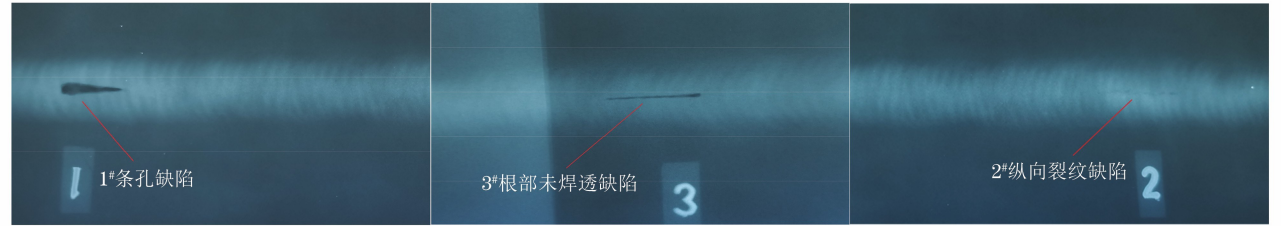


图 4 1# 试板(UT04-T16-X)射线检测底片

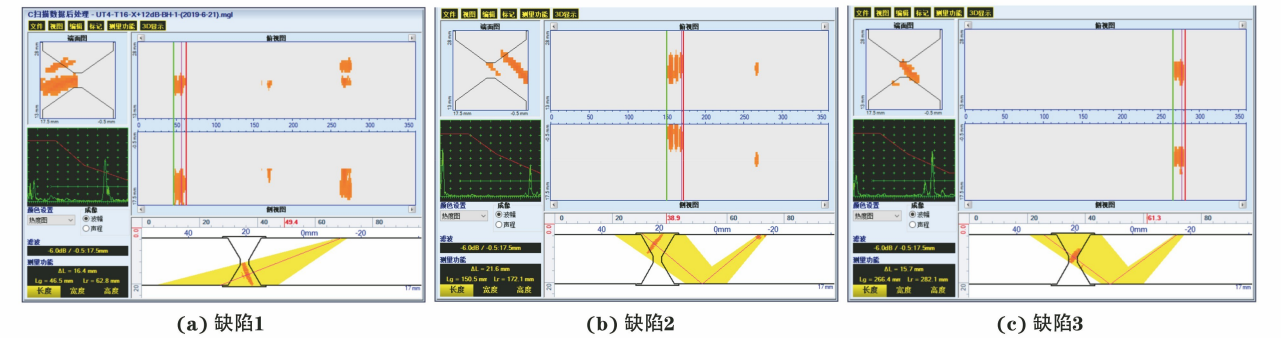


图 5 1# 试板(UT04-T16-X)相控阵超声检测结果

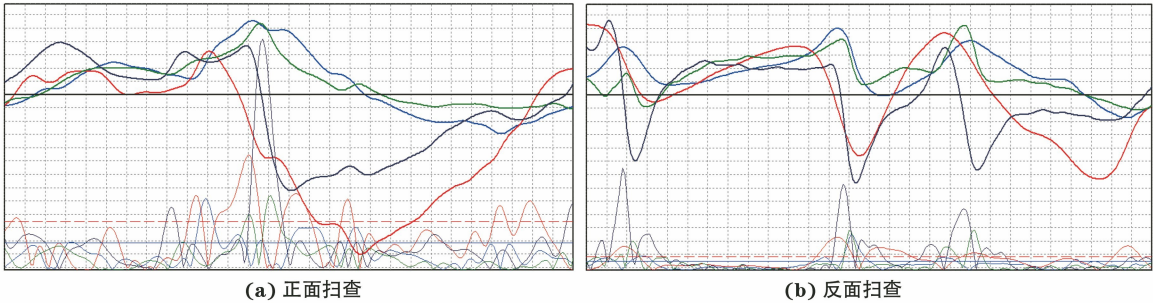


图 6 1# 试板(UT04-T16-X)磁记忆检测结果

2# 试板(UT03-T16-V)各项检测结果如图 7~10 所示。

各检测方法结果对比如表 3~5 所示,其中 \* 表示在试板反面检测得到的数据。

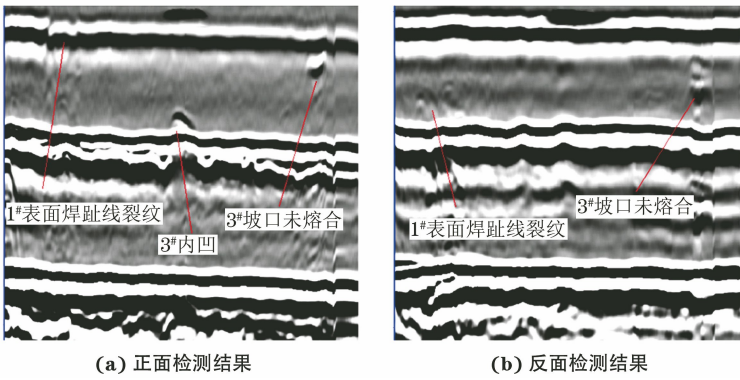


图 7 2# 试板(UT03-T16-V)TOFD 检测结果

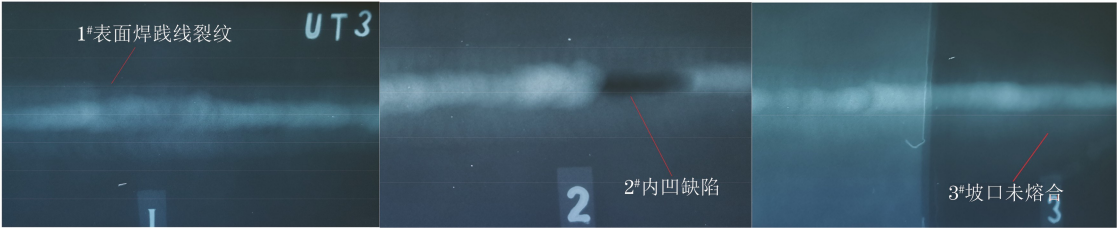


图 8 2# 试板(UT03-T16-V)射线检测底片

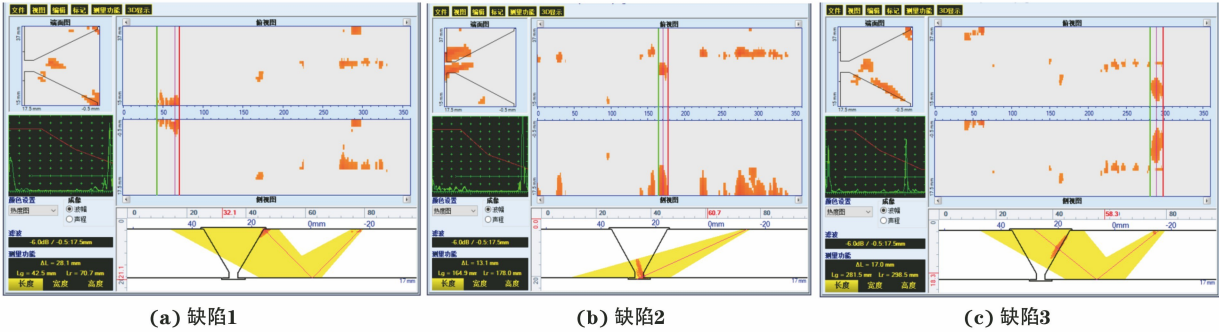


图 9 2# 试板(UT03-T16-V)相控阵超声检测结果

表 3 缺陷 1 各方法检测结果对比

缺陷 1 有关数据		位置/mm	深度/mm	性质	高度/mm	波幅
1# 试板 (UT04-T16-X)	设计值	52~68	11~14	条孔	3	—
	TOFD	46~61.3	12.2		3.6	—
	射线	46~61	—	条孔	—	—
	相控阵超声	46.5~62.8	13.1	—	—	DAC+2.7 dB
	磁记忆	40 附近 45~65 *		Hp-1、Hp-3“过零点” Hp-2、Hp-3、Hp-4“过零点”，磁场梯度>10 *		
2# 试板 (UT03-T16-V)	设计值	48~72	0~4	裂纹	4	—
	TOFD	42~69 *	13.3 *	—	3~4 *	—
	射线	43~69	—	裂纹	—	—
	相控阵超声	42.5~70.7	0.6	—	—	DAC+7.4 dB
	磁记忆	60 附近 40 附近 *		Hp-1、Hp-3“过零点”，磁场梯度>10 Hp-1、Hp-3、Hp-4“过零点” *		



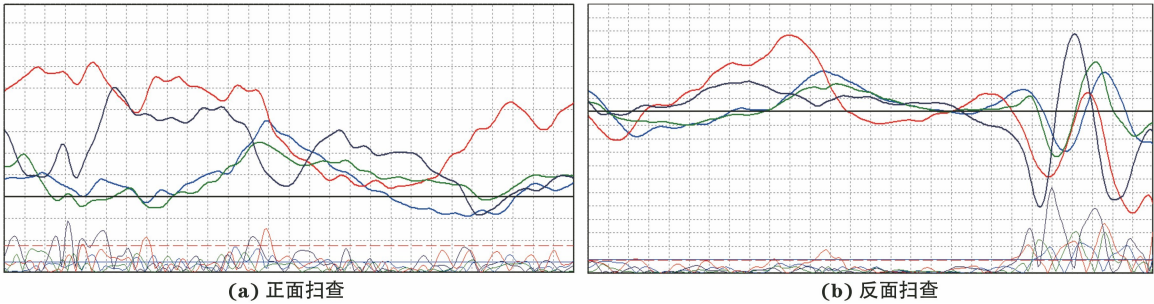


图 10 2<sup>#</sup>试板(UT03-T16-V)磁记忆检测结果

表 4 缺陷 2 各方法检测结果对比

缺陷 2 有关数据		位置/mm	深度/mm	性质	高度/mm	波幅
1 <sup>#</sup> 试板 (UT04-T16-X)	设计值	158~180	3~7	纵向裂纹	4	—
	TOFD	149~171.6 <sup>*</sup>	2.7 <sup>*</sup>	—	4.2 <sup>*</sup>	—
	射线	150~170	—	裂纹	—	—
	相控阵超声	150.5~172.1	3.2	—	—	DAC+0.8 dB
	磁记忆	140~160 150~180 <sup>*</sup>	Hp-2、Hp-4“过零点”,磁场梯度>10 Hp-2、Hp-4“过零点”,磁场梯度较大>10 <sup>*</sup>			
2 <sup>#</sup> 试板 (UT03-T16-V)	设计值	169~187	14~16	内凹	2	—
	TOFD	164~180.2	14.8	—	2.6	—
	射线	165~184	—	内凹	—	—
	相控阵超声	164.9~178.0	16.5	—	—	DAC+10.2 dB
	磁记忆	— 160 附近 <sup>*</sup>	—	—	—	— Hp-2“过零点” <sup>*</sup>

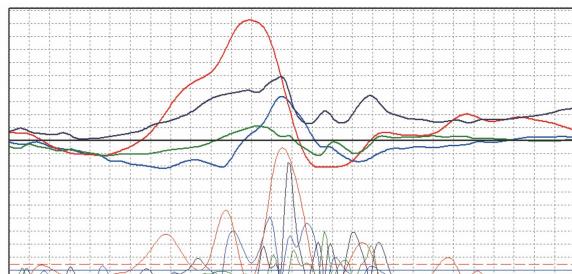
表 5 缺陷 3 各方法检测结果对比

缺陷 3 有关数据		位置/mm	深度/mm	性质	高度/mm	波幅
1 <sup>#</sup> 试板 (UT04-T16-X)	设计值	273~291	7~9	根部未焊透	2	—
	TOFD	265~283	7.2	—	—	—
	射线	266~286	—	未焊透	—	—
	相控阵超声	266.4~282.1	7.7	—	—	DAC+3.2 dB
	磁记忆	290 附近 275 附近 <sup>*</sup>	Hp-2“过零点”,磁场梯度>10 Hp-1、Hp-3“过零点” <sup>*</sup>			
2 <sup>#</sup> 试板 (UT03-T16-V)	设计值	281~296	5.5~8	坡口未熔合	2.5	—
	TOFD	282~296.4	9.8	—	2.8	—
	射线	290~295	—	坡口未熔合	—	—
	相控阵超声	281.5~298.5	6.2	—	—	DAC+4.9 dB
	磁记忆	280 附近 260~290	Hp-1、Hp-3、Hp-4“过零点” Hp-1、Hp-2、Hp-3、Hp-4“过零点”,磁场梯度>10 <sup>*</sup>			

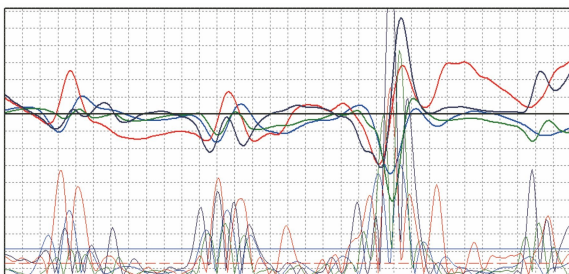
### 3 现场检测

某电厂动力管道定期检验时,在射线检测前对在役压力管道焊接接头进行了磁记忆检测,磁记忆检测发现有 2 个焊接接头存在明显异常信

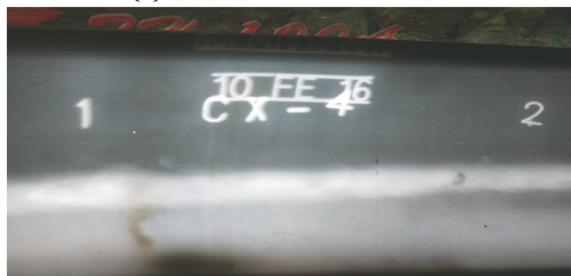
号。磁记忆和射线检测的结果如图 11 所示。其中焊接接头 CX-4 材料为 20G,设计温度和设计压力分别为 175 °C,3.8 MPa,焊接接头 HRM-5 材料为 20G,设计温度和设计压力分别为 350 °C,1.47 MPa。



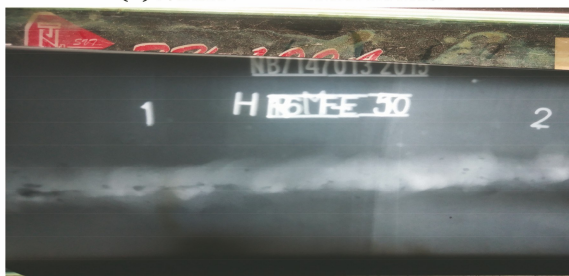
(a) 焊接接头CX-4磁记忆检测结果



(b) 焊接接头HRM-5磁记忆检测结果



(c) 焊接接头CX-4射线检测底片



(d) 焊接接头HRM-5射线检测底片

图 11 在役压力管道焊接接头检测结果

### 4 结果与分析

TOFD、射线、相控阵超声的检测结果和缺陷的设计参数保持了较好的一致性。

根据焊接试板的磁记忆检测结果,可以得出以下结论。

(1) 缺陷部位基本存在磁记忆异常信号特征。存在缺陷的位置(在试板正面检测时内凹缺陷未检测出来)都存在磁场法向分量“过零点”的现象,磁场梯度有的较大,有的较小;缺陷和磁记忆探头之间的距离对检测结果也有一定影响。#1 试板中缺陷 1(条孔)距离下表面较近,距离上表面较远,下表面的磁记忆检测效果更;#2 试板中缺陷 1(表面焊趾裂纹)在试板正面的检测结果比在试板反面的更明显;#1 试板缺陷 3(未焊透)距离上下表面的距离相同,磁记忆检测结果相差不大;磁记忆检测时在缺陷位置并不是所有通道都会出现“过零点”和磁场梯度较大的现象,这是因为传感器不同通道之间是有间距的,缺陷的漏磁场只能被部分通道检测到。

(2) 有些没有缺陷的部位,磁记忆检测也存在异常信号。在#1 试板正面检测时,位于 210 mm 附近,通道 1、通道 3 的检测结果(Hp-1、Hp-3)出现“过零点”现象,磁场强度梯度也较大,但是此区域没

有预制缺陷,其余检测方法也未检测到缺陷;在试板反面检测时,位于 215 mm 附近,通道 4 的检测结果(Hp-4)存在“过零点”现象,此处也没有预制缺陷。在#2 试板正面扫查时,在 169~187 mm 处,预制了内凹缺陷,各通道的检测结果没有“过零点”现象;反面扫查时,位于 210 mm 附近,检测结果出现“过零点”现象,但此区域并没有缺陷。

无缺陷部位出现磁记忆异常信号,可能是由于焊接残余应力、结构不连续等原因产生的漏磁场造成的。

(3) 磁记忆检测对缺陷的定位有一定的偏差,即磁记忆信号过零点以及磁场梯度较大的位置,与预制缺陷的位置有一定的偏差。这是由于漏磁最大值并不是在缺陷处,而是出现在缺陷引起的残余应力最大处附近。另外,目前的磁记忆只是定性检测,对缺陷的大小和严重性难以定量。

对在役压力管道焊接接头进行磁记忆检测,检测结果显示:焊接接头 CX-4 在 170~180 mm 处,通道 2、通道 3、通道 4 的磁记忆检测结果(Hp-2、Hp-3、Hp-4)存在“过零点”现象,同时磁场强度梯度值也较大,经射线检测发现该位置存在一个  $\phi 4$  mm 的圆形缺陷;焊接接头 HRM-5 的磁记忆检测信号

(下转第 54 页)

声场分布以及人工缺陷的响应规律,分析了横波声场在产品对比试块工件内的聚焦效果。结果显示,声场仿真下虽然存在少量的旁瓣和栅瓣,但大部分能量仍集中在声束主轴上,可获得较好的声场聚焦效果以及对不同位置、不同类型缺陷响应的清晰成像。

(3) 按标准设计制造了带人工缺陷的氢环境箱厚壁筒体产品对比试块。试验表明,所提出的基于曲面楔块耦合的相控阵超声周向检测方法对试块内外表面和内部缺陷均具有较高的检测灵敏度、检测精度和可靠性。该技术已成功应用于浙江大学 140 MPa 氢环境箱的定期检验。

### 参考文献:

[1] 郭伟灿,郑津洋. 超高压水晶釜和管道周向超声检测[J]. 压力容器, 2006, 23(10): 9-12.

[2] SONY B. Ultrasonic study for detection of inner diameter cracking in pipeline girth welds using creeping waves[J]. Pressure Vessels and Piping, 2003, 80(2): 139-146.

[3] 郑晖,林树青. 超声检测[M]. 北京: 新华出版社, 2008.

[4] 赵欣刚,郭伟灿,黄文大,等. 面积型缺陷方向性对垂

直接接触法超声检测可靠性的影响[J]. 压力容器, 2012, 29(7): 20-23.

[5] 郭伟灿. 超高压容器和管道周向超声检测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

[6] 周裕峰,沈功田. 压力容器无损检测—超高压容器的无损检测技术[J]. 无损检测, 2005, 27(4): 202-206.

[7] 施克仁,郭寓岷. 相控阵超声成像检测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.

[8] SCHMERR W. Fundamentals of ultrasonic phased arrays[M]. New York: Springer, 2015.

[9] TUMSYS O, JASIUNIENE E. The focusing of the ultrasonic phased array in the case of non-contact NDE methods[J]. Elektronika Ir. Elektrotechnika, 2014, 20(3): 44-47.

[10] MICHAEL D C, Moles. Introduction to phased array ultrasonic technology applications [M]. Quebec: Olympus, 2004.

[11] 涂春磊,邹建华,强天鹏,等. 对接焊缝相控阵超声检测可靠性的 CIVA 仿真与试验[J]. 无损检测, 2013, 35(11): 22-26.

[12] 姜学平,岳云飞,庄凤冬,等. 相控阵超声检测声场近场区长度的理论[J]. 无损检测, 2017, 39(10): 33-36.

(上接第 11 页)

存在多处“过零点”现象,其中有 4 处磁场梯度较大,经射线检测发现焊接接头中存在多处圆形缺陷,条形缺陷。另外,焊接接头 CX-4 和 HRM-5 的磁记忆检测结果中有些“过零点”的位置,射线检测并没有发现缺陷。

和焊接试板不同,工作温度和工作压力可能改变在役压力管道焊接接头的残余应力和应力集中状态分布,进而对磁记忆检测信号产生影响。闻庆松等<sup>[3]</sup>研究了温度对金属磁记忆检测的影响,发现达到试样材料的居里点之前,温度对磁记忆检测的影响不大。徐济进等<sup>[4]</sup>研究了水压试验(工作压力为 1.5 倍,15 MPa)前后焊接残余应力的变化,发现水压试验后,焊接接头的平均残余应力有所降低,分布更均匀,但焊缝区依然有较高的残余应力。在役压力管道的工作温度比居里点的温度低得多,工作压力比水压试验低得多,工作温度和工作压力对应力集中状态分布和磁记忆检测信号的影响应该是十分有限的。在用压力管道焊接接头中的缺陷仍然会引起应力集中,产生异常漏磁信号,所检测的在用压力管道和焊接试板磁记忆检测表现出类似的信号特

征,也说明了这一特点。

### 5 结语

在役压力管道和试板上的焊接缺陷(气孔、裂纹、未熔合、未焊透等)均会引起应力集中而产生漏磁信号,漏磁信号能通过磁记忆的方法检测出来。

磁记忆技术主要用于应力集中部位和应力集中程度的检测。压力管道定期检验时,可以先使用磁记忆技术定位出焊接接头的“薄弱区域”,再对存在“薄弱区域”的焊接接头进行针对性的常规无损检测。在相同的抽查比例和检测工作量下,可以提高缺陷的检出率,减少打磨等辅助工作,获得更好的检测效果。

### 参考文献:

[1] 沈功田,陶雪荣. 压力管道安全检测与评价技术研究[J]. 中国特种设备安全, 2015, 31(11): 1-5.

[2] 任吉林,郭冠华,宋凯,等. 金属磁记忆检测机理的探讨[J]. 无损检测, 2002, 24(1): 29-31.

[3] 闻庆松,李志农,曾文钧,等. 温度对金属磁记忆检测的影响[J]. 无损检测, 2018, 40(12): 27-30.

[4] 徐济进,陈立功,倪纯珍. 机械应力消除法对焊接残余应力的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 291-295.