

山地小口径管道的非接触式磁力检测

张少春¹, 庞洪晨¹, 廖柯熹², 朱洪东², 何腾蛟², 乔实¹, 李云飞¹

(1. 山东省天然气管道有限责任公司, 济南 250101; 2. 西南石油大学 石油与天然气工程学院, 成都 610500)

摘要:为了验证非接触式磁力检测技术的有效性,对山地小口径天然气长输管道进行弱磁检测,得到管道上方3个方向的磁感应强度梯度 $\partial B_x, \partial B_y, \partial B_z$,通过定性和定量分析识别出了磁异常管段,并确定了其应力风险等级。开挖后,利用金属磁记忆检测技术和超声测厚技术对非接触式磁力检测的结果进行了验证。工程应用结果表明,在非开挖条件下,非接触式磁力检测技术能够有效识别山地小口径管道的应力集中位置并分析其损伤等级,提高了管道的检测效率,是一种科学、有效的检测方法。

关键词:山地小口径管道;非接触式磁力检测;金属磁记忆;超声检测

中图分类号: TG174; TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2021)02-0016-05

Non-contact magnetic detection of mountain small-diameter pipelines

ZHANG Shaochun¹, PANG Hongchen¹, LIAO Kexi², ZHU Hongdong², HE Tengjiao², QIAO Shi¹, LI Yunfei¹

(1. Shandong Natural Gas Pipeline Co., Ltd., Jinan 250101, China;

2. School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: In order to verify the effectiveness of the non-contact magnetic detection of the small-caliber natural gas long-distance pipeline in the mountain area, magnetic induction intensity gradients $\partial B_x, \partial B_y, \partial B_z$ in the three directions above the pipeline were obtained. The stress risk level was determined, and the results of non-contact magnetic testing were verified by excavation using metal magnetic memory testing technology and ultrasonic thickness measurement technology. Engineering application result shows that under non-excavation conditions, non-contact magnetic detection technology can effectively identify the stress concentration location of mountain small-diameter pipeline and analyze its damage level, improving pipeline inspection efficiency. Therefore, it is a scientific and effective detection method.

Key words: mountain small caliber pipeline; non-contact magnetic detection; metal magnetic memory; ultrasonic testing

随着经济的不断发展,国家对石油及天然气等能源产品的需求在不断增加,油气管道的建设也备受重视。我国地形的复杂性以及对能源需求的多样性,使得山地小口径管道成为了油气资源输送的重要载体。在传输介质、土壤、机械损伤、温差等因素的影响下,管道容易产生腐蚀、疲劳、开裂等缺陷^[1],

因此,山地小口径管道的安全检测对保证管道正常运行和能源供应至关重要。

对管道进行有效检测是避免管道发生事故及对管道完整性管理的重要手段^[2]。传统的无损检测方法包括超声检测、涡流检测、漏磁检测、磁粉检测等^[3],这些方法虽然能有效检测出管道表面的宏观缺陷,但无法识别出微观缺陷。DUBOV^[4]提出了基于金属磁记忆检测理论的管道诊断方法,该方法可以检测出管道的微观缺陷,但由于该方法自身的局限性,无法对埋地管道进行有效检测。

目前,研究人员应用传统无损检测技术对油气管道进行了内外检测,并取得了良好效果^[5-9];众多

收稿日期:2020-08-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674212)

作者简介:张少春(1978—),男,工程师,主要从事长输天然气管道管理工作

通信作者:朱洪东,291074213@qq.com

学者把金属磁记忆检测技术运用到实际工程中, 获得了管道缺陷处的磁异常信号^[10-13]; 国外学者利用非接触式磁力检测技术对埋地管道进行了检测, 有效识别出了缺陷位置^[14-15], 但是关于山地小口径管道非接触式磁力检测技术的应用研究较少。山地小口径管道埋深变化大, 地表上方磁信号较弱, 非接触式磁力检测技术是否有效不得而知。文章采用非接触式磁力检测技术对某山地小口径管道进行检测, 检测出损伤管段并确定其相应的损伤等级; 采用金属磁记忆检测和超声检测法验证了该技术的检测结果, 证实了该技术可应用于山地小口径管道的检测。

1 非接触式磁力检测

1.1 检测原理和特点

埋地管道在地磁场和应力载荷的共同作用下, 管道内部磁畴的取向会发生改变, 致使管道的磁化率发生改变, 进而在管外周围形成一个漏磁场^[15], 管道应力状态的变化会使应力集中位置处的漏磁场发生畸变(见图1), 即该磁场能够反映管道的应力状态。非接触式磁力检测技术通过对漏磁场磁特征信号的检测和分析来确定管道的应力集中区域, 同时根据漏磁场的变化程度来分析管道应力的危险程度。

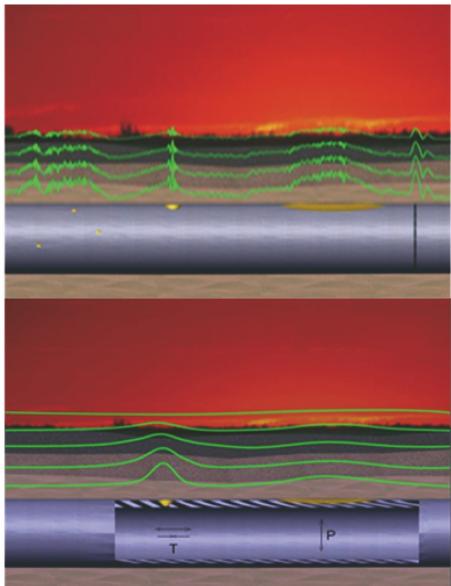


图1 管道缺陷处产生的漏磁场畸变示意

与传统管道检测技术相比, 非接触式磁力检测技术具有以下特点。

- (1) 不需要额外的磁化设备。非接触式磁力检测技术利用地磁场和应力作用实现管道的磁化。
- (2) 可实现管道缺陷的早期诊断。研究表明, 应力集中是大多数缺陷产生的原因, 基于对应力集

中的非接触式磁力检测技术可预防事故的发生。

(3) 不需要提前处理。管道表面的防腐层和保温层对磁信号无影响, 无需对检测表面进行处理。

(4) 操作简单, 检测速度快。非接触式磁力检测仪的操作非常简单, 检测速度可达到 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 可实现大规模检测。

(5) 不受管道形状和尺寸的限制。非接触式磁力检测技术是一种外检测技术, 不受管道内径和形状的影响, 可实现管道设备的 100% 检测, 为管道的完整性管理提供数据支撑。

1.2 检测方法

操作人员使用非接触式磁力检测仪在管道上方沿着管道轴向进行检测, 获取管道上方的磁场矢量数据(见图2, 图中 D 为管外径)。当管道出现应力集中时, 管道磁场将发生明显变化, 即出现磁异常信号。在检测过程中, 对每条管段的检测起终点、标示桩、金属干扰物、磁异常位置进行记录。完成现场的磁力层析数据的采集后, 将检测数据输入检测软件进行分析处理并形成检测结果, 对检测数据进行计算和分析, 得到管道损伤等级指标 F (无量纲), 用以评估管道应力状态和风险等级。

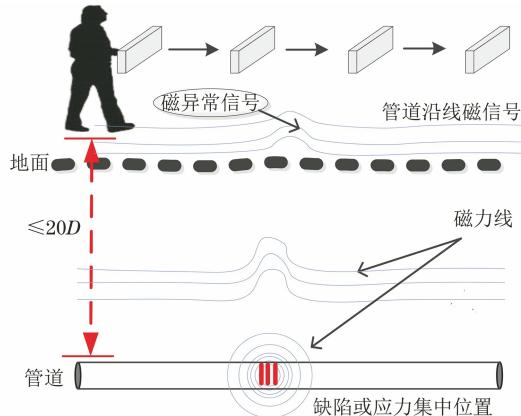


图2 非接触式磁力检测技术实施示意

非接触式磁力检测仪记录的数据为管道上方磁感应强度的 3 个分量 $\mathbf{B}_x, \mathbf{B}_y, \mathbf{B}_z$ 沿水平方向的梯度 $\partial \mathbf{B}_x, \partial \mathbf{B}_y, \partial \mathbf{B}_z$ 。通过式(1)计算得到梯度模量 G_M 。

$$G_M = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\partial \mathbf{B}_x}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{B}_y}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{B}_z}{\partial x}\right)^2} \quad (1)$$

1.3 管道损伤等级划分标准

对于含有损伤的管段, 依据损伤等级指标 F 确定其损伤等级。 F 由式(2)计算得到。

$$F = \exp(-AG_M) \quad (2)$$

式中: A 为修正系数; G_M 为梯度模量。

根据 F 可将管道损伤程度划分为 3 个等级: I

级为高风险;Ⅱ级为中风险;Ⅲ级为低风险。管道损伤等级划分及处理建议如表1所示。

表1 管道损伤等级划分及处理建议

F	损伤等级	安全状况	处理建议
$0 < F \leq 0.2$	I	高风险	立即修复
$0.2 < F \leq 0.26$	II	中风险	计划修复
$0.6 < F \leq 1.0$	III	低风险	定期检测

1.4 检测工具

现场检测使用管道应力非接触三维磁场梯度检测(PMDT)仪,型号为Grad-03-500,其结构如图3所示。该装置主要由3部分组成,第一部分为磁传感器探头,设置在探测器的两端,两传感器之间的距离为0.5 m;第二部分为显示与控制部分,其中显示仪显示探头测得的2点数据的差值,包括3个方向的磁感应强度分量以及沿x轴方向的梯度模量的差值;第三部分为电源,为设备提供可靠稳定的输出电流。

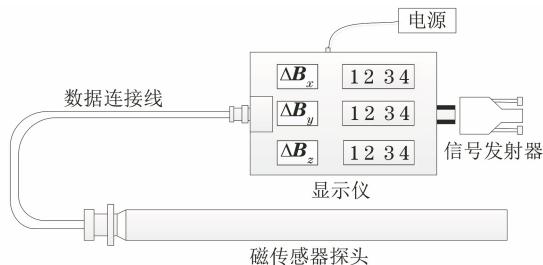


图3 PMDT 仪结构示意

1.5 检测条件

非接触式磁力检测技术的检测条件如表2所示。

表2 非接触式磁力检测技术的检测条件

项目	检测条件
管道磁性	必须具有铁磁性
管道壁厚测量范围/mm	大于1
管外径(D)的范围/mm	$55 \leq D \leq 3000$
检测速度/ $m \cdot s^{-1}$	低于0.5
管道最大压力	无限制
管道最小压力	无限制
最小转弯半径无限制	无限制
最小内径	无限制
设备和管道间距允许距离/mm	$20D$
异常位置的精确度/m	± 1.5

PMDT检测技术虽然可高效率、低成本地实现管道缺陷的准确定位,及早发现管道隐患,但也具有一定的局限性,其主要适用范围有:①被检测管道必须具有铁磁性;②不存在并行(同沟敷设)、交叉

的单条管道;③待检测管道埋深应不大于20倍管径;④沿线无高压线、电气化铁路、铁质构件等;⑤管道在过去两年内进行过漏磁检测,会对该技术的检测准确性有影响;⑥环境中不存在其他磁信号干扰;⑦对于已穿孔管道无法识别。

2 现场应用

2.1 管道概况

对某山地小口径埋地长输管道进行非接触式磁力检测,确定管道的应力集中位置并评估管道的应力状态,检测管道长为930 m。该管道投产运行时间为13 a,管材类型为L325螺旋缝埋弧焊钢管,焊缝种类包括环焊缝和螺旋焊缝,规格为 $\phi 355.6 \text{ mm} \times 5.6 \text{ mm}$ (外径×壁厚),管道运行压力为3.9 MPa,输送介质为天然气,设计输送量为 $5.03 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,管道采用3层PE(聚乙烯)外防腐层+强制电流保护和牺牲阳极保护的联合保护方式进行防腐。管道敷设环境大部分位于山区,沿线山地起伏大,管道口径小,管道上方磁信号较弱。

2.2 检测流程

非接触式磁力检测技术在现场的应用分为4个阶段:现场踏勘;路由检测;非接触式磁力检测;开挖验证。首先进行基础资料收集与管道踏勘,收集被检管道的基础资料,包括管道运行参数、设计资料、竣工资料以及防腐资料等,对管道的基本情况进行分析,制定适用于现场的检测方法,勘察被检管道沿线的环境情况,结合情况制定出相应的检测方案;其次进行管道路由确定,利用PCM(埋地管道防腐层状况检测系统)检测目标管道的走向和埋深,对管道路由进行定位;然后进行非接触式磁力检测与分析,检测人员沿着目标管道的路由采用非接触式磁记忆检测仪对管道正上方空间磁场数据进行采集,根据国标GB/T 35090—2018,计算管道沿线F的分布,判断管道安全状态并识别出管道应力集中位置;最后进行开挖验证,根据非接触式磁力检测结果,对应力集中严重管段进行开挖,并采取其他的无损检测方法(金属磁记忆检测、超声测厚等)进一步检测,验证非接触式磁力检测的结果。

2.3 非接触式磁力检测结果分析

检测里程共计930 m,分3段进行检测。得到检测管道上方空间磁感应强度梯度的分布(见图4)。该地区的大地磁感应强度为0.63 μT,最大磁感应强度梯度为 $15.635 \mu T \cdot m^{-1}$ 。共发现6处管段信

号有明显波动, 在这 6 处管段的磁感应强度梯度 x 方向出现波峰、 z 方向出现波谷, 其其绝对值均高于 $5 \mu\text{T}\cdot\text{m}^{-1}$, 存在明显应力集中, 尤其是 2# 和 6# 磁

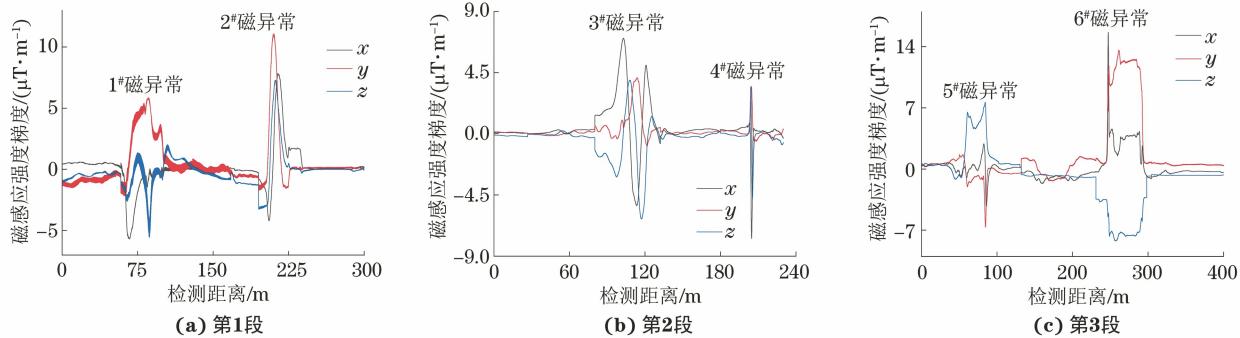


图 4 检测管段上方磁感应强度梯度分布

根据国标 GB/T 35090—2018, 基于非接触式磁力检测结果和管道的设计运行参数, 计算得到磁异常管段的损伤等级指标 F (见图 5), 评估管段应力状态并确定管段应力风险等级。经计算分析, 在 6 处磁异常管段中, 4 处为Ⅲ级风险, 2 处为Ⅱ级风险, 根据磁信号特征可以初步判断, 这 2 处应力集中发生在管道环焊缝位置。确定的 6 处磁异常管段的各特征参数见表 3。

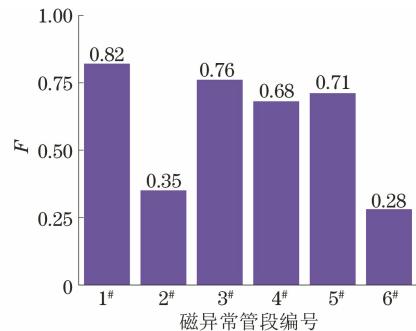


图 5 各磁异常管段损伤等级指标

表 3 磁异常管段的各特征参数

损伤管段编号	起点位置/m	终点位置/m	管段长度/m	磁感应强度梯度绝对值的最大值/($\mu\text{T}\cdot\text{m}^{-1}$)	F	损伤等级
1#	58	111	53	5.835	0.82	Ⅲ
2#	212	236	24	11.073	0.35	Ⅱ
3#	406	446	40	7.018	0.76	Ⅲ
4#	501	513	12	7.812	0.68	Ⅲ
5#	568	628	60	7.517	0.71	Ⅲ
6#	758	793	35	15.635	0.28	Ⅱ

2.4 开挖验证

为验证非接触式磁力检测结果的准确性, 对应力风险最大的 6# 处管段开挖进行金属磁记忆检测和超声测厚检测。开挖后发现, 该管段存在环焊缝, 采用 TSC-2M-8 型金属磁记忆检测仪对其进行各个时钟方向的轴向检测, 确定应力集中位置; 通过超声波测厚仪测量应力集中位置的剩余壁厚, 完成进一步验证。

2.4.1 金属磁记忆检测

金属磁记忆检测的工作原理在于管体的应力分布发生改变会影响表面磁场的分布, 通过测量管道表面磁场 H_p 的分布, 实现管道的应力状况检测。

异常信号处的磁感应强度梯度大于 $10 \mu\text{T}\cdot\text{m}^{-1}$, 可以初步判断为应力集中较为严重的管段。

管道应力集中区磁记忆信号分布如图 6 所示, 应力集中区的法向磁场强度分量 $H_p(y)$ 出现过零点现象, 且切向磁场强度分量 $H_p(x)$ 达到极大值。 H_p 计算公式为

$$H_p = \frac{\lambda_H}{\mu_0} \Delta\sigma \quad (3)$$

式中: λ_H 为磁弹性效应的不可逆分量; μ_0 为真空磁导率; $\Delta\sigma$ 为周期性外加载荷。

利用磁记忆检测仪对 6# 管段环焊缝进行不同时钟方向的轴向检测, 根据检测结果, 在其环焊缝 12 点钟方向的磁信号变化最为明显, 故选择 12 点钟方向的检测信号(见图 7)进行分析。该管段磁信号具有

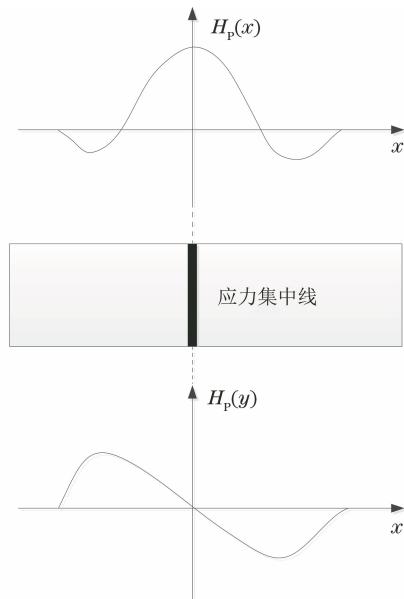


图 6 管道应力集中区磁记忆信号分布

以下特征:磁场强度法向分量过零点,磁场强度梯度存在最大值;在距检测起点 300 mm 和 1 100 mm 位置,磁信号出现小幅度波动,是由环焊缝热影响区分布不均匀引起的局部应力集中造成的; H_{p-2} 和 H_{p-4} 通道的磁信号均在距检测起点 700 mm 左右的位置(环焊缝附近)处出现峰值 $3\text{ }128 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-1}$,在该位置对应的磁场梯度信号 dH/dx 为 $230 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,远远大于应力正常水平下的梯度值,说明此处应力集中较为严重。根据目前已有的磁信号特征识别方法^[16],可以初步定性判断该段管道焊缝周围存在局部腐蚀缺陷,腐蚀程度需进一步检测。

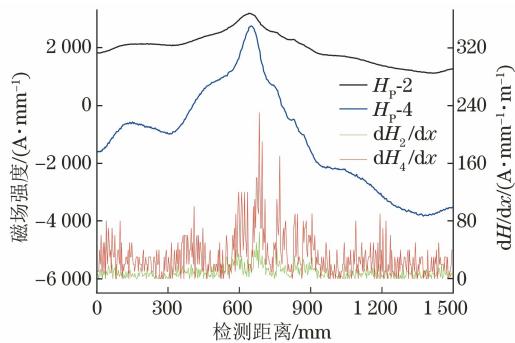


图 7 6# 管段金属磁记忆检测 12 点钟方向的磁信号

2.4.2 超声测厚

采用超声波测厚仪测量 6# 管段焊缝附近管道的剩余壁厚,沿管道环向一周 12 个方向进行测量,共测量 4 个圆周,焊缝左右各 2 个,圆周测量间隔为 1 cm,共测量 48 次,测量结果如图 8 所示。最小剩余壁厚为 3.6 mm,位于焊缝左端 1 cm 圆周上 6 点钟方向处,壁厚损失率达 35.7%,管道磁异常评价

为Ⅱ级,符合磁异常评价的金属损失比例^[17],表明非接触式磁力检测结果具有可靠性。

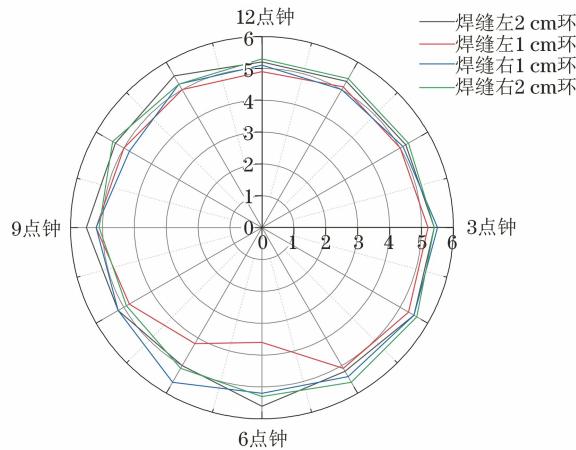


图 8 管道圆周壁厚测量结果

3 结语

利用非接触式磁力检测技术对山地小口径管道进行应力集中检测,识别出了 6 个磁异常管段,对高风险管段(6#)进行开挖,利用金属磁记忆检测技术和超声测厚技术对非接触式磁力检测结果进行了验证。金属磁记忆检测仪和超声波测厚仪的检测结果与非接触式磁力检测仪的检测结果一致,验证了非接触式磁力检测方法的可行性。山地小口径管道的磁信号较弱,开展非接触式磁力检测仍可有效检测出管道应力集中位置和应力集中程度,说明非接触式磁力检测技术是一种科学有效的检测方法。

参考文献:

- [1] LEE O S, CHOI S S. Effect of circular cavity on maximum equivalent stress and stress and stress intensity at a crack in buried pipeline [J]. KSME International Journal, 1999, 13(4): 350-357.
- [2] 刘轩, 韩伟. 非接触式磁力检测技术[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(2): 120-121.
- [3] 汪永康, 刘杰, 刘明, 等. 石油管道内缺陷无损检测技术的研究现状[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(9): 929-934.
- [4] DUBOV A A. A study of metal properties using the method of magnetic memory[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1997, 39(9): 401-405.
- [5] 林明强. 压力管道焊缝磁粉检测技术研究[J]. 化工设计通讯, 2016, 42(11): 26.
- [6] 侯怀书, 任慧霞. 金属管道对接焊缝超声检测缺陷类型识别研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(21): 143-146.

(下转第 89 页)

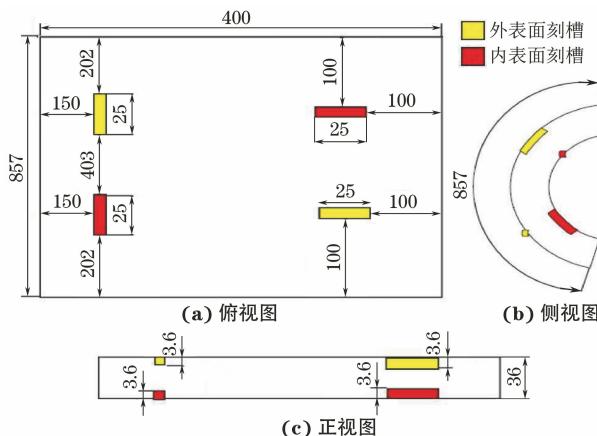


图 1 校准试块结构示意

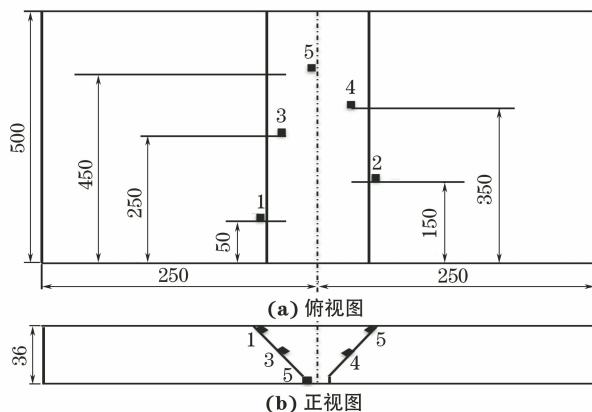


图 2 演示试块结构示意

为多个检测区域，则每个区域应至少有 1 个缺陷。

现场进行相控阵演示应依据标准和程序文件进行，重要的是演示试块的准备，在国内可以委托工厂加工，在国外，多数需要在项目现场焊接完成后送到当地工厂加工，完全依据标准允许的缺陷长度和高度去加工试块，超过标准允许的范围会被现场 AI 拒收。

现场应根据待检钢印焊口的规格，编制相应的扫查计划，然后在符合条件的试块上进行演示。相控阵演示过程应重点注意扫查时中心偏置距离的改变。依据标准，扫查计划改变时还需要进行重新演示。项目现场一般可用 1 块演示试块覆盖多种规格的焊口。根据预先制作的扫查计划进行检测，不能完全检出演示试块上的缺陷时，必须调整扫查计划，或者根据待检焊口规格重新加工演示试块，直到能检出全部缺陷。

相控阵演示结束后，出具演示报告。根据标准要求，对拒收缺陷的信号进行定性检测，记录其信号类型（表面缺陷或者近表面缺陷）及缺陷的位置和长度。

1.3 缺陷评判标准

现场钢印焊口分为 2 个部分，其中一部分为本体管道，依据标准 ASME SEC I 要求，本体管道焊缝厚度为 6~13 mm 时，其验收标准为 code case 2816；厚度大于 13 mm 时，依据 ASME SEC I 附录 E 进行验收；本体外部管道依据 ASME B31.1 进行验收。对于厚度为 6~13 mm 的焊缝，当用相控阵超声技术代替射线检测技术进行检测时，应将 code case 2816 的相关内容加入到相控阵程序文件中。

2 结语

依据标准，项目为 ASME 钢印项目并进行相控阵超声检测时，应重点考虑演示试块的准备和及现场演示规程。介绍了演示试块的准备和规程演示中需要注意的事项及缺陷评判标准，为顺利高效地完成现场相控阵超声检测的相关工作提供参考。

(上接第 20 页)

- [7] 刘想. 基于 X 射线图像的输油管道焊缝缺陷检测与识别[D]. 成都：电子科技大学，2016.
- [8] 杨理践，耿浩，高松巍. 长输油气管道漏磁内检测技术[J]. 仪器仪表学报，2016, 37(8):1736-1746.
- [9] 杨理践，郭晓婷，高松巍. 管道内表面缺陷的涡流检测方法[J]. 仪表技术与传感器，2014(10):78-81.
- [10] 许亚星. 磁记忆技术在焊缝检测中的应用研究[D]. 兰州：兰州理工大学，2014.
- [11] 祖瑞丽. 基于金属磁记忆对焊缝质量的评价研究[D]. 南昌：南昌航空大学，2018.
- [12] 鲁欣萌. 金属磁记忆检测系统的研究与设计[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2015.
- [13] 龙媛媛，谭晓林，刘丽，等. 金属磁记忆检测技术用于

长输管道应力检测[J]. 油气田地面工程，2013, 32(4):28-29.

- [14] DUBOV A A, KOLOKOLNIKOV S M. Non-contact magnetometric diagnostics of potentially hazardous sections of buried and insulated pipelines susceptible to failure[J]. Welding in the World, 2017, 61(1):107-115.
- [15] 任吉林. 金属磁记忆检测技术[M]. 北京：中国电力出版社，2000.
- [16] 范振中. 金属磁记忆检测特征值的提取与应用[D]. 南昌：南昌航空大学，2008.
- [17] 焦杨. 非接触式磁记忆检测技术在埋地管道上的应用[J]. 全面腐蚀控制，2017, 31(11):23-25.