

引文：张鸿博，刘琰，阙永彬，等. 一种输气管道环焊缝缺陷自身高度精准预测模型[J]. 天然气工业，2022，42(7): 101-109.
ZHANG Hongbo, LIU Yan, QUE Yongbin, et al. A high-accuracy prediction model for self height of girth weld defect in gas pipelines[J].
Natural Gas Industry, 2022, 42(7): 101-109.

一种输气管道环焊缝缺陷自身高度精准预测模型

张鸿博¹ 刘琰¹ 阙永彬² 杨锋平¹ 莫润阳³

1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司 2. 国家石油天然气管网集团有限公司西部管道有限责任公司 3. 陕西师范大学

摘要：2015 年前，大部分管道环焊缝多采用半自动焊接，由于环境条件较为苛刻，出现焊接缺陷的几率较高，缺陷在服役中可能影响输气管道的安全运行。为精准评估输气管道环焊缝缺陷的自身高度，以常用规格的管道环焊缝为对象，制作含上表面、下表面及埋藏型缺陷试样，分别采用 PAUT、TOFD、TECA 及 FGI 等无损检测技术对缺陷进行无损检测及自身高度测量，然后再对缺陷逐一进行金相解剖分析并用激光共聚焦方法测量缺陷实际高度；以缺陷自身高度无损测量结果为自变量，以缺陷解剖测量的实际自身高度数据为因变量，通过数据增容、回归统计方法，建立了一种基于无损评定结果预估缺陷真实自身高度的理论模型，并用未参与建模的缺陷数据对模型预测效果进行检验。研究结果表明：①针对本研究预制的缺陷，TOFD 检测方法精度误差大多在 2 mm 内，PAUT 检测方法精度误差多大于 2 mm；②建立的基于组合式无损检测方法的管道环焊缝缺陷自身高度预测模型，对环焊缝缺陷自身高度的预测精度小于 1 mm，满足管道检测、适用性评价等需要。结论认为，应用本模型预测缺陷自身高度，减少了现有无损检测方法和检测工艺对检测精度的限制，不仅提高了缺陷自身高度数据的准确性，而且还提高了管道环焊缝适用性安全评价的可靠性，满足了输气管道环焊缝综合检测、安全评估及修复的需要。

关键词：输气管道；环焊缝；缺陷高度；无损定量；数据增容；回归分析；预测模型

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.07.011

A high-accuracy prediction model for self height of girth weld defect in gas pipelines

ZHANG Hongbo¹, LIU Yan¹, QUE Yongbin², YANG Fengping¹, MO Runyang³

(1. CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710077, China; 2. PipeChina West Pipeline Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830013, China; 3. Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Natural Gas Industry, Vol.42, No.7, p.101-109, 7/25/2022. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Before 2015, the girth welds in most pipelines were mostly realized by means of semiautomatic welding. And due to harsh environmental conditions, the occurrence probability of weld defects is higher and the defects may influence the safe operation of gas pipelines during the service. In order to accurately evaluate the self height of a girth weld defect in gas pipelines, this paper prepares the samples with upper surface, lower surface and buried defects by taking the pipeline girth weld of common specifications as the object. Nondestructive testing and self height measurement of defects are carried out by means of nondestructive testing technologies such as PAUT, TOFD, TECA and FGI, respectively. Then, the metallographic anatomy is performed on the defects one by one, and their actual height is measured by using the laser confocal method. Finally, a theoretical model for predicting the real self height of defects based on nondestructive evaluation results is established through data capacity increase and regression statistical methods by taking the nondestructive measurement result of self height as the independent variable and the anatomical measurement result as the dependent variable. In addition, the prediction effect of the model is verified by using the defect data, which is not involved in the modeling. And the following research results are obtained. First, for the defects prefabricated in this study, the accuracy error of TOFD testing method is mostly within 2 mm, while that of PAUT testing method is mostly greater than 2 mm. Second, when the proposed prediction model for self height of pipeline girth weld defects based on the combined nondestructive testing method is used to predict the self height of girth weld defects, the prediction accuracy is less than 1 mm, which meets the requirements of pipeline detection and applicability evaluation. In conclusion, the application of this model to predict the self height of defect reduces the limitations of existing nondestructive testing methods and testing processes on the inspection accuracy, improves the data accuracy of the self height of defect and the accuracy of the applicability and safety evaluation of pipeline girth weld, and meets the requirements of comprehensive detection, safety evaluation and pipeline girth weld repair.

Keywords: Gas pipeline; Girth weld; Defect height; Nondestructive quantification; Data capacity increase; Regression analysis; Prediction model

作者简介：张鸿博，1973 年生，高级工程师，硕士；主要从事石油管材及装备无损检测方面的研究工作。地址：（710077）陕西省西安市锦业二路 89 号。ORCID: 0000-0003-4111-2749。E-mail: zhanghongbo002@cnpc.com.cn

0 引言

截至 2020 年底,中国在役油气管道总里程已达到 $14.4 \times 10^4 \text{ km}^{[1]}$,管道环焊缝超过 $1\,000 \times 10^4$ 道。2015 年之前建设的大部分管道环焊缝多采用半自动焊接,焊接环境条件较为苛刻^[2-4],出现焊接缺陷的几率较高,缺陷在服役中可能发生扩展而造成灾难^[5-11]。如西气东输二线某段约 900 km 管线在 2014—2015 年间首次内检测,发现存在 13 000 多处环焊缝异常,经开挖无损检测确认多为焊缝超标缺陷^[12-13]。对于在役管道而言,由于巨大经济成本限制,不可能对所有超标缺陷进行维修或更换,由此对超标缺陷尺寸进行精准预测,使危害性较低的缺陷继续服役而修复少量危害性大的缺陷,是兼顾管道安全性和经济性的有效做法。缺陷尺寸尤其是缺陷的自身高度(缺陷在管体壁厚方向的延伸程度),使焊缝厚度减薄的同时形成应力集中,是评判含缺陷环焊缝是否能够安全服役的关键参数^[14]。

适用于油气管道焊接缺陷检测的无损检测技术有多种,包括常规的脉冲回波超声检测(UT)、射线检测(RT)、磁粉检测(MT),还有近年日益成熟的相控阵超声检测(PAUT)、超声衍射时差法检测(TOFD)、切向涡流阵列检测(TECA)及场梯度成像检测(FGI)等新技术。实践中需根据被检管道的材质、壁厚及缺陷类型等选择适合的检测方法^[15-18]。为了尽可能使缺陷不漏检、提高无损检测结果的可靠性,对一些重要环焊缝通常采用多种无损检测技术组合实施以期优势互补。刘晴岩^[19]研究了射线检测和超声检测两种常用无损检测技术测定未焊透缺陷自身高度的方法和测试过程,并对实物试验结果和误差进行了分析。田双等^[20]根据缺陷的产生部位、缺陷的性质、缺陷的方向,采用射线检测和超声波检测方法,对夹渣、未焊透、未熔合缺陷的识别方法和自身高度的测量进行研究,提出可综合运用射线检测技术和超声检测技术对缺陷进行识别和高度测量。采用多种技术组合对缺陷进行综合评估目前已经成为管道无损检测的趋势,但因技术特点的差异性,导致缺陷尺寸评定结果间往往存在差异,有时差异很大^[21-25]。若将缺陷解剖测量高度作为其实际高度,无损评定结果与实际高度往往也会不一致。以哪种检测方法定量结果作为依据对缺陷进行最终评判及焊缝适用性评价,非常关键。随着对产品损伤容限要求和产品质量评价研究的进一步发展,提高缺陷自身高度的定量精度成为无损检测应用中的难题之一^[26-29]。

笔者以输气管道环焊缝为研究对象,设计制作多规格不同缺陷试样,选择适宜的多种无损检测技术对缺陷高度进行无损评定,然后将这些缺陷解剖测量,以所获缺陷最大高度值作为缺陷的实际高度,再以这些数据为基础,通过 SPSS 软件进行统计回归,建立一个评估观测数据的函数以估计被测缺陷的实际高度^[30-31]。

1 环焊缝缺陷高度统计样本

1.1 环焊缝缺陷试样及缺陷高度组合无损定量

为充分反映管道环焊缝缺陷种类和特征,选取壁厚分别为 8.4 mm、14.6 mm、18.4 mm 和 30.8 mm 规格的典型输气管道,并从每种规格的钢管上割取管段,按照各类型焊接缺陷的产生机理并模仿其形成条件、焊接工艺和手法控制,预埋制作含有各类缺陷的对接环焊缝缺陷试样,缺陷按位置分为上表面、下表面及埋藏缺陷,其中上表面缺陷性质为裂纹,埋藏型缺陷为夹渣和层间未熔合,下表面缺陷为根部裂纹和未熔合,缺陷高度为 2 ~ 6 mm。

无损检测工艺及规程、检测方法的组合形式和应用程序、检测人员的技术水平等都直接关系到缺陷定量结果的可靠性。为尽可能对试样内的缺陷进行准确定量,无损检测方法尽可能选用现阶段应用最成熟、最适宜及最先进的技术。检测工艺与实际应用中的检测工艺完全相同。无损检测实施人员均为具有相应类别 II 级或以上资质的专业技术人员。为此,上表面裂纹深度分别采用切向涡流阵列(TECA)、场梯度成像(FGI)及超声衍射时差法(TOFD)3 种方法进行无损检测定量,当然考虑技术应用的局限性,比如《承压设备无损检测 第 10 部分:衍射时差法超声检测:NB/T 47013.10》规定,TOFD 仅适用于管壁厚度 $T \geq 12 \text{ mm}$ 试样检测,因而对 $T < 12 \text{ mm}$ 的样管该方法无法应用^[32]。对埋藏型缺陷(夹渣、未熔合),分别采用 PAUT 及 TOFD 进行无损检测定量;对下表面缺陷(未熔合、裂纹),分别采用 PAUT 及 TOFD 进行无损检查定量。

TECA 采用全功能 Ectane 涡流阵列检测设备(ECTANE-E128RNMI),FGI 采用 Lizard M8 多通道检测设备(LP801 笔式阵列探头),PAUT 使用 Flexscan32/64 检测设备,TOFD 使用 SONATEST VEO+32:128 检测设备。

上表面、埋藏型及下表面缺陷高度无损检测定量结果分别见表 1 ~ 3,表中“×”表示该方法在此种情况下失效。

表 1 上表面裂纹缺陷高度无损定量结果表 单位: mm				
编号	试样规格 (管径 × 壁厚)	TECA 检测结果	FGI 检测结果	TOFD 检测结果
1	Ø660×8.4	1.06	2.10	×
2		3.13	2.90	×
3	Ø1 016×14.6	2.03	2.10	5.10
4		3.03	3.40	7.20
5	Ø1 219×18.4	2.23	2.30	2.63
6		1.87	4.70	6.08
7	Ø1 422×30.8	1.56	5.60	6.30
8		1.07	3.40	7.11

表 2 埋藏型缺陷自身高度无损定量结果表 单位: mm				
编号	试样规格 (管径 × 壁厚)	缺陷类型	PAUT 检测结果	TOFD 检测结果
1	Ø660×8.4	层间未熔合	1.50	×
		夹渣	1.70	×
2	Ø660×8.4	层间未熔合	2.30	×
		夹渣	2.00	×
3	Ø1 016×14.6	层间未熔合	3.70	3.10
		夹渣	2.40	2.40
4	Ø1 219×18.4	层间未熔合	4.00	1.40
		夹渣	3.70	3.41
5	Ø1 219×18.4	层间未熔合	4.90	3.83
		夹渣	4.40	4.20
6	Ø1 219×18.4	层间未熔合	4.50	2.00
		夹渣	2.30	3.88
7	Ø1 422×30.8	层间未熔合	4.40	3.87
		夹渣	5.50	2.42
8	Ø1 422×30.8	层间未熔合	9.00	1.00
		夹渣	6.70	2.70

表 3 下表面缺陷自身高度无损定量结果表 单位: mm				
编号	试样规格 (管径 × 壁厚)	缺陷类型	PAUT 检测结果	TOFD 检测结果
1	Ø660×8.4	根未熔	3.00	×
		下表面裂纹	2.60	×
2	Ø660×8.4	根未熔	3.00	×
		下表面裂纹	2.50	×
3	Ø1 016×14.6	根未熔	3.70	4.60
		下表面裂纹	无	4.00
4	Ø1 016×14.6	根未熔	4.40	5.90
		下表面裂纹	4.40	5.40
5	Ø1 219×18.4	根未熔	4.90	3.38
		下表面裂纹	无	2.94
6	Ø1 219×18.4	根未熔	4.90	3.75
		下表面裂纹	4.90	4.85
7	Ø1 422×30.8	根未熔	9.20	4.80
		下表面裂纹	5.90	4.25
8	Ø1 422×30.8	根未熔	6.50	2.45
		下表面裂纹	6.50	4.76

表 4 上表面缺陷解剖高度表 单位: mm		
编号	试样规格 (管径 × 壁厚)	解剖最大值
1	Ø660×8.4	4.87
2	Ø660×8.4	5.42
3	Ø1 016×14.6	6.96
4	Ø1 016×14.6	8.04
5	Ø1 219×18.4	4.76
6	Ø1 219×18.4	8.26
7	Ø1 422×30.8	7.34
8	Ø1 422×30.8	8.55

1.2 缺陷解剖及金相测量实际高度

对以上环焊缝试样的缺陷部位使用线切割垂直于焊缝方向进行切割（4～5 mm/刀），制成金相分析试样，在金相显微镜下对每个缺陷沿壁厚方向的自身高度用激光共聚焦方法进行精确测量，以解剖最大值作为缺陷的实际高度。表 4～6 分别为表 1～3 中试样解剖后的缺陷高度的最大值，也即缺陷实际高度。表中字体标红的试样不参与统计分析及建模，而是作为后期模型预测精度检验使用。

环焊缝缺陷高度无损定量与解剖结果对比如图 1 所示，由图 1 可见，无论是上表面、下表面还是埋藏缺陷，不同无损检测方法对同一缺陷的高度定量结果间存在差异，并且无损定量结果与实际高度存在一定差异、有的甚至很大，如 TOFD 定量偏差大多在 2 mm 内，PAUT 定量偏差往往大于 2 mm。在依靠无损检测技术对环焊缝质量控制的过程中，缺陷高度到底该以谁为准，如何合理地对缺陷进行评定成为了组合检测应用中最大的问题，需要更加合理的方法对缺陷的实际高度进行评定。

表 5 埋藏缺陷解剖高度表 单位: mm

编号	试样规格 (管径 × 壁厚)	缺陷类型	解剖最大值
1	Ø660×8.4	层间未熔合	0.71
		夹渣	1.81
2	Ø660×8.4	层间未熔合	1.78
		夹渣	1.81
3	Ø1 016×14.6	层间未熔合	2.63
		夹渣	1.85
4	Ø1 219×18.4	层间未熔合	1.81
		夹渣	3.17
5	Ø1 219×18.4	层间未熔合	4.64
		夹渣	4.22
6	Ø1 219×18.4	层间未熔合	2.74
		夹渣	2.60
7	Ø1422×30.8	层间未熔合	2.99
		夹渣	2.03
8	Ø1 422×30.8	层间未熔合	4.88
		夹渣	4.57

表 6 下表面缺陷解剖高度表 单位: mm

编号	试样规格 (管径 × 壁厚)	缺陷类型	解剖最大值
1	Ø660×8.4	根未熔	1.66
		下表面裂纹	3.72
2	Ø660×8.4	根未熔	1.61
		下表面裂纹	4.29
3	Ø1 016×14.6	根未熔	6.53
		下表面裂纹	5.74
4	Ø1 016×14.6	根未熔	7.04
		下表面裂纹	7.21
5	Ø1 219×18.4	根未熔	3.17
		下表面裂纹	4.15
6	Ø1 219×18.4	根未熔	5.02
		下表面裂纹	5.97
7	Ø1 422×30.8	根未熔	4.28
		下表面裂纹	5.11
8	Ø1 422×30.8	根未熔	6.62
		下表面裂纹	6.34

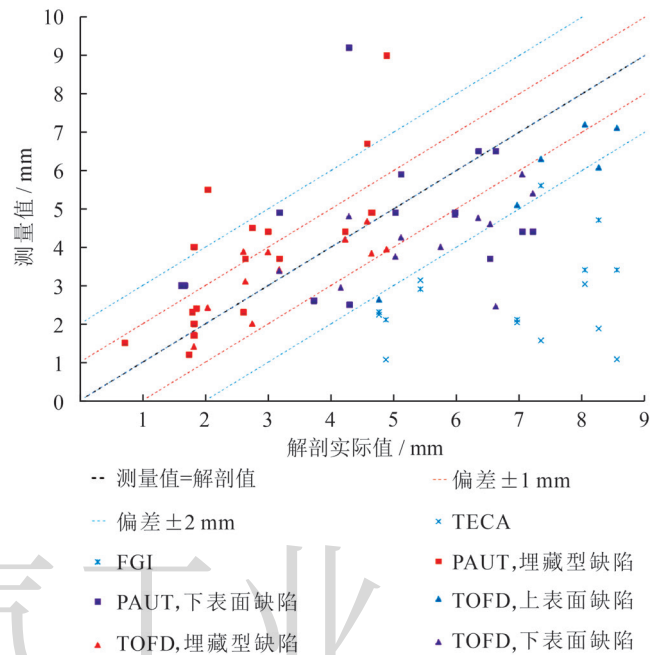


图 1 检测结果与解剖实测结果整体比对分析图

2 环焊缝缺陷自身高度估算数学建模

2.1 无损定量基础数据及数据增容

统计分析中, 首先要求检测数据可靠, 其次要求有海量数据, 最后还要求运用合适的统计分析方法。传统统计学立足于海量样本, 理论上当样本数趋于无穷大时各种建模和预测方法才能得到理论上的保证。然而, 实际中受输气管道实际状况、成本及时间等因素限制, 获取缺陷无损检测数据及解剖数据的数量极为有限, 尤其在对检测结果可靠性进行验证时, 解剖样本数量相对更少。为保证有限样本数量条件下统计建模的可靠性, 除了保证有限数据样本的质量外, 开发小样本条件下提高数学建模精度的方法尤为重要。数据增容是在神经网络和机器学习过程中, 当缺少海量数据时广泛采用的数据处理方法, 其本质是对已有数据按照一定的方法进行处理, 创造出更多新的数据, 防止过拟合, 从而提高统计模型的泛化能力和鲁棒性。

文中数据增容采用的方法是, 将各种无损定量数据在允许范围进行扰动以衍生新数据。其实质为通过对所得检测数据加入测量误差, 即将测量数据在所用技术的误差限度范围进行扰动, 对数据进行人工可控增容。具体方法为:

1) 自变量扩容: 对切向涡流阵列检测 (TECA) 和场梯度成像检测 (FGI) 方法, 按照 ASTM E3052

标准规定，TECA/FGI 测量结果的 $\pm 30\%$ 范围所有取值均合理^[33]；对超声衍射时差法检测（TOFD）方法，因其理论检测误差为 1 mm，所以 TOFD 取测量值 ± 1 mm 认为也是合理的；对相控阵超声检测（PAUT）方法，在其 ± 1 mm 范围内进行取值作为自变量。

2) 因变量扩容：取缺陷解剖测量值的最大值及其 ± 1 mm 内的随机取值作为因变量。针对环焊缝的上表面、埋藏、下表面共 3 种不同部位缺陷，分别选用不同的无损检测组合方法进行缺陷检测及定量，将检测结果作为回归分析的自变量，以这些缺陷的实际解剖结果作为因变量，建立各类缺陷线性、非线性回归模型，然后再用未参与建模试块的缺陷检测数据和解剖数据进行模型验证以确认其预测精度。由于各种无损检测方法各自适用性不同，对以上 3 种不同部位的缺陷适用的检测方法的个数及种类也就不同，有的部位只使用了一种，有的部位使用多种（如上表面缺陷使用了 TECA、FGI 等），因此回归分析中，

基于增强数据分别采用 SPSS 软件进行一元线性回归和多元线性回归，考虑到检验方法之间可能存在某些联系，又用了线性回归及非线性回归。

2.2 环焊缝缺陷自身高度估算模型

按照《承压设备无损检测 第 10 部分：衍射时差法超声检测：NB/T 47013.10》^[32] 规定，TOFD 仅适用于管壁厚度 $T \geq 12$ mm 试样检测，本工作对 $T < 12$ mm 采用 TECA、FGI 及 PAUT 方法检测，因此按 $T < 12$ mm 和 $T \geq 12$ mm 两种不同情况进行分段建模及合并建模。根据上述方法进行统计分析，可得不同检测条件下，对接环焊缝上表面、埋藏及下表面缺陷自身高度的预估数学模型分别见表 7 ~ 9， T 表示管壁厚度， x_1 表示 TECA 检测的深度结果， x_2 表示 FGI 检测的深度结果， x_3 表示 TOFD 检测的深度结果， x_4 表示 PAUT 检测的深度结果， y 表示最终深度估算值， h 表示缺陷自身高度极值。

表 7 上表面开口型缺陷深度估算模型表

使用条件	推荐的回归方程	备注
$T < 12$ mm	$y = 1.635x_2 + 1.359$	单参数（FGI）线性回归方程
$T \geq 12$ mm, $h \geq 5$ mm	$y = -0.056x_1 + 0.041x_2 + 0.763x_3$	线性回归方程
	$y = 0.777x_3 + 2.881$	不具备 FGI 或 TECA 检测条件时使用
$T \geq 12$ mm, $h < 5$ mm	$y = 1.635x_2 + 1.359$	单参数（FGI）线性回归方程

表 8 埋藏型缺陷自身高度估算模型表

使用条件	推荐的回归方程	备注
$T < 12$ mm	$y = 0.708x_4 + 0.203$	单参数（PAUT）线性回归方程
$T \geq 12$ mm	$y = 0.751x_3 + 0.270x_4 - 0.554$	线性回归方程

表 9 下表面开口型缺陷自身高度估算模型表

使用条件	推荐的回归方程	备注
$T < 12$ mm 根部未熔合	$y = 1.004x_4 - 1.369$	单参数（PAUT）线性回归方程
$T < 12$ mm 下表面裂纹	$y = 0.987x_4 + 1.161$	单参数（PAUT）线性回归方程
$T \geq 12$ mm, PAUT 与 TOFD 检测结果差值 $<$ PAUT 检测值	$y = 1.659x_3 - 0.389x_4 - 0.091$	线性回归方程 如果 PAUT 与 TOFD 检测结果差值 $\geq$ PAUT 检测值，则自身高度为二者中较大值

2.3 模型检验结果

对所构建的数学模型的有效性 & 预测精度进行检验，采用未参与统计分析 & 建模的试样或从管道现场发现的缺陷试样的解剖结果与相同条件（外径、厚度、检测方法等）下的理论预测结果进行对比，将

差值作为预测精度。

对上表面裂纹，用未参与建模的表 1 中 2 号和 5 号试样进行模型检验。两个试样组合无损定量及模型预测结果如表 10 所示，其中 2 号试样 $T < 12$ mm，适合用单参数（FGI）线性回归方程进行预测；5 号试

表 10 上表面裂纹深度预测模型验证结果表

单位: mm

编号	试块规格 (管径 × 壁厚)	TECA	FGI	TOFD	单参数线性预测值	解剖最大值	偏差
2	Ø660×8.4	3.13	2.90	×	6.10	5.42	0.68
5	Ø1 219×18.4	2.23	2.30	$h < 5$	5.12	4.76	0.36

样 $T > 12\text{ mm}$, TOFD 检测缺陷自身高度 $h < 5\text{ mm}$, 适用单参数 (FGI) 线性回归方程预测。对上表面裂纹深度预测的准确性进行检验, 将该两个试样用线切割垂直于焊缝方向进行切割做金相分析, 并对每个缺陷沿壁厚方向的高度用激光共聚焦显微镜 (OLS 4100) 测量, 图 2 为表 1 中 5 号样品解剖前、后及金相照片, 解剖所测缺陷高度为 4.76 mm , 与模型预测高度 5.12 mm 对比, 模型预测结果与实际高度

偏差为 0.36 mm , 类似地, 2 号样品预测与实际偏差为 0.68 mm , 两样品模型预测精度均在 1 mm 内, 可见上表面裂纹高度预测采用分段的线性回归模型效果较好。

对埋藏型缺陷, 用未参与建模的表 2 中 1 号和 4 号试样进行模型检验, 结果如表 11 所示。从表 11 可以看出, 埋藏型缺陷高度预测模型预测值与缺陷试样解剖实测结果, 预测误差分别为 0.56 mm 、 0.06 mm 、 -0.23 mm 、 -0.16 mm , 精度误差均小于 1 mm , 能够满足工程实际需要。对于 $T \geq 12\text{ mm}$ 的埋藏型缺陷, 如果经评估该环焊缝为高风险点, 则应使用组合无损检测方法检测。如果评估为普通风险点, 建议仅进行 TOFD 检测并以 TOFD 检测自身高度作为适用性评价的依据。

对下表面缺陷, 用表 3 中未参与建模的其他样品进行模型检验, 结果如表 12 所示。

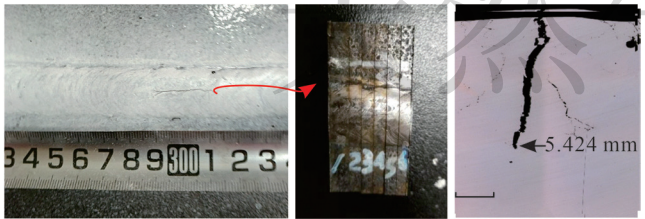


图 2 表 1 中 5 号试样裂纹解剖前、后及金相照片

表 11 埋藏型缺陷自身高度预测模型验证结果表

单位: mm

编号	试块规格 (管径 × 壁厚)	缺陷类型	PAUT 检测结果 (x_1)	TOFD 检测结果 (x_2)	合并线性预测值 (y)	解剖最大值	误差
1	Ø660×8.4	层间未熔合	1.50	/	1.27	0.71	0.56
		夹渣	1.70	/	1.41	1.81	0.06
4	Ø1 219×18.4	层间未熔合	4.00	1.40	1.58	1.81	- 0.23
		夹渣	3.70	3.41	3.01	3.17	- 0.16

表 12 下表面缺陷自身高度预测模型验证结果表

单位: mm

编号	试块规格 (管径 × 壁厚)	缺陷类型	线性预测值	非线性预测值	解剖最大值	线性预测误差	非线性预测误差
2	Ø660×8.4	根未熔	1.64	1.64	1.61	0.03	0.03
		下表面裂纹	3.63	3.62	4.29	- 0.66	- 0.67
3	Ø1 016×14.6	根未熔	6.10	6.20	6.53	- 0.43	- 0.33
		下表面裂纹	6.55	6.35	5.74	0.81	0.61
4	Ø1 016×14.6	根未熔	7.99	8.26	7.04	0.95	1.22
		下表面裂纹	7.16	7.36	7.21	- 0.05	0.15
5	Ø1 219×18.4	下表面裂纹	4.79	4.05	4.15	0.64	- 0.10
6	Ø1 219×18.4	根未熔	4.22	4.24	5.02	- 0.80	- 0.78
		下表面裂纹	6.05	6.17	5.97	0.08	0.20
8	Ø1 422×30.8	根未熔	1.45	1.63	6.62	- 5.17	- 4.99
		下表面裂纹	5.28	5.36	6.34	- 1.06	- 0.98

比较下表面缺陷自身高度两种估算模型预测值与6块试样解剖实测结果： $T < 12$ mm，线性模型对下表面缺陷的预测误差最大值为 -0.66 mm，非线性模型对下表面缺陷的预测误差最大值为 -0.67 mm，精度误差均小于 1 mm，相较而言线性模型效果更好； $T \geq 12$ mm，除8号试样外，合并线性模型对下表面缺陷的预测误差最大值为 0.95 mm，精度误差均 < 1 mm；8号试样下表面裂纹考虑到PAUT和TOFD检测结果取值位数误差，合并线性模型精度误差也 < 1 mm；8号试样根部未熔合缺陷合并线性模型对下表面缺陷的预测误差为 -5.17 mm，不满足精度误差 1 mm的要求，这是因为两种检测技术在方法和精度上偏差较大，TOFD检测自身高度时其上端点处缺陷开口往往较小，端点衍射波不明显，此时TOFD检测的缺陷深度变大，相应的缺陷自身高度会变小，而PAUT检测结果离散性较大。二者的检测结果差值大是线性模型预测误差大于 1 mm的原因。经对检测数据分析，PAUT与TOFD检测结果差值大于等于 100% 时，表明检测数据失效，故不适用于估算模型，此时建议直接采用PAUT与TOFD检测结果中较大者作为缺陷自身高度。 $T \geq 12$ mm，除8号试样根部未熔合缺陷外，合并非线性模型对下表面缺陷的预测误差最大值为 1.22 mm，不满足精度误差 1 mm的要求。因而，推荐使用的下表面缺陷自身高度估算模型如下：

$T < 12$ mm 的根部未熔合：

$$y = 1.004x - 1.369 \quad (1)$$

$T < 12$ mm 的下表面裂纹：

$$y = 0.987x - 1.161 \quad (2)$$

$T \geq 12$ mm 的任意下表面缺陷：

$$y = -0.389x_1 + 1.659x_2 - 0.091 \quad (3)$$

2.4 实际验证案例

某管道公司在2021年的管道缺陷开挖复拍复评过程中，发现一处 $\varnothing 914$ mm $\times$ 16 mm/17.5 mm环焊缝存在根部裂纹，TOFD检测自身高度为 5.95 mm，对该缺陷使用估算模型 $y = -0.389x_1 + 1.659x_2 - 0.091$ 进行计算得到自身高度为 7.47 mm（现场未进行PAUT检测，计算中将PAUT取与TOFD相同数值）。该处环焊缝换管处理后对该缺陷进行解剖，使用金相显微镜测量其实际高度为 7.33 mm（图3）。未使用估算模型时，检测值与实际高度的偏差为 -1.38 mm，结果为负偏差，负偏差使缺陷韧性比偏小，造成评价结果不保守或者不可接受缺陷变为可接受；模型

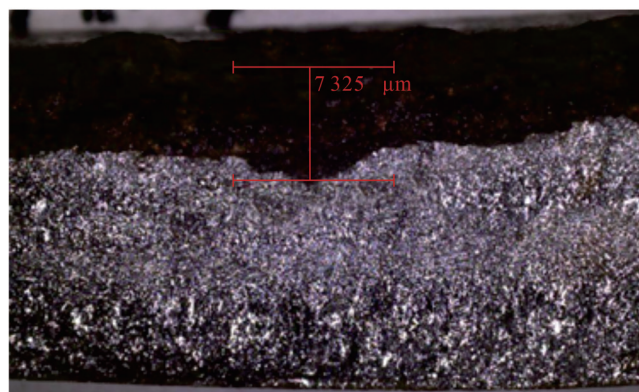


图3 根部裂纹金相照片

预测结果与实际高度的偏差为 0.14 mm，且结果为正偏差，有利于提高适用性评价的安全裕度。

3 结论

1) 针对在役输气管道常用4种规格，预制了24块试样共32个缺陷，采用TECA、FGI、PAUT、TOFD等4种方法组合进行了检测，并对其中15块试样进行了解剖验证，发现TOFD检测方法精度误差大多在 2 mm内，PAUT检测方法精度误差多大于 2 mm。

2) 基于检测及解剖数据，采用数据增容及回归分析，建立了基于组合式无损检测方法的管道环焊缝缺陷自身高度预测模型，模型经解剖和实际现场应用，精度可达 1 mm。

3) 应用本模型，可在一定精度范围预测环焊缝缺陷真实自身高度，减少了现有无损检测方法和检测工艺对检测精度的限制，提高了用于环焊缝适用性评价的缺陷自身高度数据的准确性，从而提高了管道安全评估的准确性，满足输气管道环焊缝综合检测、安全评估及修复的需要。

参 考 文 献

- [1] 李秋扬, 赵明华, 张斌, 等. 2020年全球油气管道建设现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2021, 40(12): 1330-1337.
LI Qiuyang, ZHAO Minghua, ZHANG Bin, et al. Current construction status and development trend of global oil and gas pipelines in 2020[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(12): 1330-1337.
- [2] 陆阳, 邵强, 隋永莉, 等. 大管径、高钢级天然气管道环焊缝焊接技术[J]. 天然气工业, 2020, 40(9): 114-122.
LU Yang, SHAO Qiang, SUI Yongli, et al. Girth welding technol-

- ogy for large-diameter high steel grade gas line pipes[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(9): 114-122.
- [3] 隋永莉, 王鹏宇. 中俄东线天然气管道黑河—长岭段环焊缝焊接工艺[J]. 油气储运, 2020, 39(9): 961-970.
- SUI Yongli, WANG Pengyu. Girth welding technology used in Heihe-Changling Section of China-Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(9): 961-970.
- [4] 张振永. 高钢级大口径天然气管道环焊缝安全提升设计关键[J]. 油气储运, 2020, 39(7): 740-748.
- ZHANG Zhenyong. Key factors for safety improvement design of girth weld in high-grade large diameter natural gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(7): 740-748.
- [5] 吴宏, 周剑琴. 国内大口径、高钢级管道焊接及焊缝检测技术现状[J]. 油气储运, 2017, 36(1): 21-27.
- WU Hong, ZHOU Jianqin. Current status of welding and weld testing technologies for large-diameter high-grade pipelines in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(1): 21-27.
- [6] 刘少柱, 徐葱葱, 李景昌, 等. 外径 1 422 mm、X80 高钢级输气管道的消磁技术[J]. 天然气工业, 2020, 40(9): 131-137.
- LIU Shaozhu, XU Congcong, LI Jingchang, et al. Degaussing technology for OD 1 422 mm X80 high steel grade gas line pipes[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(9): 131-137.
- [7] 吴锴, 张宏, 杨悦, 等. 考虑强度匹配的高钢级管道环焊缝断裂评估方法[J]. 油气储运, 2021, 40(9): 1008-1016.
- WU Kai, ZHANG Hong, YANG Yue, et al. Fracture assessment method for girth welds of high-grade steel pipelines considering strength matching[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(9): 1008-1016.
- [8] 邹斌, 杨锋平, 白鹤, 等. 在役 X80 输气管道环焊缝失效评估方法[J]. 油气储运, 2021, 40(8): 874-879.
- ZOU Bin, YANG Fengping, BAI He, et al. Method for assessing girth weld failure of X80 gas pipelines in service[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(8): 874-879.
- [9] 陈小伟, 张对红, 王旭. 油气管道环焊缝面临的主要问题及应对措施[J]. 油气储运, 2021, 40(9): 1072-1080.
- CHEN Xiaowei, ZHANG Duihong, WANG Xu. Main problems and countermeasures of girth welds of oil and gas pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(9): 1072-1080.
- [10] 帅健, 王旭, 张银辉, 等. 高钢级管道环焊缝主要特征及安全性评价[J]. 油气储运, 2020, 39(6): 623-631.
- SHUAI Jian, WANG Xu, ZHANG Yinui, et al. Main characteristics and safety assessment of girth welds in high grade steel pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(6): 623-631.
- [11] 李荣光, 张巍, 赵振, 等. 高钢级管道环焊缝缺陷修复技术探讨[J]. 油气储运, 2020, 39(3): 307-312.
- LI Rongguang, ZHANG Wei, ZHAO Zhen, et al. Discussion on repair technology of girth weld defects of high-grade steel pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(3): 307-312.
- [12] 代佳赞. 西二线天然气管道内腐蚀状况及剩余强度评估[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- DAI Jiayun. Internal corrosion status and residual strength evaluation of West East Gas Pipeline 2[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [13] 余东亮, 杨川, 吴东容, 等. X80 管道环焊缝缺陷钢质环氧套筒补强试验[J]. 油气储运, 2021, 40(9): 997-1007.
- YU Dongliang, YANG Chuan, WU Dongrong, et al. Reinforcement test of epoxy-filled steel sleeves for girth weld defects of X80 pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(9): 997-1007.
- [14] 杨辉, 王富祥, 陈健, 等. 油气管道环焊缝缺陷适用性评价现状与展望[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 135-139.
- YANG Hui, WANG Fuxiang, CHEN Jian, et al. Current status and prospect of fitness-for-service evaluation on the girth weld defects in oil and gas line pipes[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 135-139.
- [15] 卢泓方, 吴晓南, ISELEY T, 等. 国外天然气管道检测技术现状及启示[J]. 天然气工业, 2018, 38(2): 103-111.
- LU Hongfang, WU Xiaonan, ISELEY T, et al. The status quo of natural gas line pipe inspection technologies abroad and its implications for China[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(2): 103-111.
- [16] 迟大钊, 刚铁, 袁媛, 等. 面状缺陷超声 TOFD 法信号和图像的特征与识别[J]. 焊接学报, 2005, 26(11): 1-4.
- CHI Dazhao, GANG Tie, YUAN Yuan, et al. Characteristic and recognition of ultrasonic TOED signal and image for planar defect[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(11): 1-4.
- [17] 宋小春, 黄松岭, 赵伟. 天然气长输管道裂纹的无损检测方法[J]. 天然气工业, 2006, 26(7): 103-106.
- SONG Xiaochun, HUANG Songling, ZHAO Wei. Nondestructive testing technique for cracks in long-distance natural gas pipelines[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(7): 103-106.
- [18] 张宏, 吴锴, 刘啸奔, 等. 直径 1 422 mm X80 管道环焊接头应变能力数值模拟方法[J]. 油气储运, 2020, 39(2): 162-168.
- ZHANG Hong, WU Kai, LIU Xiaoben, et al. Numerical simulation method for strain capacity of girth welding joint on X80 pipeline with 1 422 mm diameter[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(2): 162-168.
- [19] 刘晴岩. 管道对接焊缝未焊透自身高度无损检测测定方法研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2000.
- LIU Qingyan. Study on nondestructive testing method of incomplete penetration height of pipeline butt weld[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2000.
- [20] 田双, 张转连. 在用工业管道焊接缺陷的识别和自身高度的

- 测量[J]. 管道技术与设备, 2012(2): 35-36.
- TIAN Shuang, ZHANG Zhuanlian. Identification and measurement of weld defects and self-height for in-service industrial tube[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2012(2): 35-36.
- [21] 周永春, 马健. TOFD技术与射线技术在焊接接头检测中的对比[J]. 无损探伤, 2013, 37(3): 19-24.
- ZHOU Yongchun, MA Jian. Comparison of TOFD technology and radiographic technology in welding joint inspection[J]. Non-destructive Testing Technology, 2013, 37(3): 19-24.
- [22] 吴红伟, 薛永盛. TOFD检测非超标缺陷的夸大[J]. 无损探伤, 2013, 37(2): 44-45.
- WU Hongwei, XUE Yongsheng. Exaggeration of non exceeding standard defects detected by TOFD[J]. Nondestructive Testing Technology, 2013, 37(2): 44-45.
- [23] 杨晋, 路智敏, 安文奇, 等. 缺陷焊缝超声相控阵检测实验研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2019, 38(5): 340-344.
- YANG Jin, LU Zhimin, AN Wenqi, et al. An experimental study of ultrasonic phased array detection of defective welds[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 38(5): 340-344.
- [24] 曹恩铭, 韩建荒, 张国福, 等. 压力管道对接环缝相控阵检测的可靠性分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2019, 39(6): 61-66.
- CAO Enming, HAN Jianhuang, ZHANG Guofu, et al. Reliability analysis of phased array ultrasonic testing for pressure pipe girth welds[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2019, 39(6): 61-66.
- [25] 谷青悦, 刘纯婧, 林智敏. 长输管道 PAUT 检测与 RT 检测效果对比实证研究[J]. 天然气与石油, 2019, 37(2): 28-33.
- GU Qingyue, LIU Chunjing, LIN Zhimin. Study on the comparison between PAUT and RT detection of long distance pipelines[J]. Natural Gas and Oil, 2019, 37(2): 28-33.
- [26] 洗国栋, 吕游. 输气管道环焊缝缺陷排查及处置措施研究[J]. 石油管材与仪器, 2020, 6(2): 42-45.
- XIAN Guodong, LYU You. Inspection and disposal of girth weld defects of oil and gas pipelines[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2020, 6(2): 42-45.
- [27] 杨锋平, 许彦, 曹国飞, 等. X80 管线钢环焊缝力学性能及缺陷成因分析[J]. 压力容器, 2020, 37(1): 68-73.
- YANG Fengping, XU Yan, CAO Guofei, et al. Analysis of key mechanical properties and defect causes of X80 girth weld[J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(1): 68-73.
- [28] 杨锋平, 张硕, 王明波, 等. 输气管道环焊缝缺陷检测评价方法研究[J]. 石油管材与仪器, 2019, 5(6): 11-15.
- YANG Fengping, ZHANG Shuo, WANG Mingbo, et al. Study on detection and evaluation method of girth weld defects in oil and gas pipeline[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2019, 5(6): 11-15.
- [29] 阙永彬, 刘琰, 徐春燕, 等. 基于超声全聚焦成像的输气管线焊接缺陷高度测量技术[J]. 压力容器, 2020, 37(8): 66-72.
- QUE Yongbin, LIU Yan, XU Chunyan, et al. Measurement of height of weld defects in gas pipeline by TFM[J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(8): 66-72.
- [30] 史慧敏, 刘琰, 莫润阳. 输送管对接焊缝缺陷高度回归预测[C]//2020'中国西部声学学术交流会论文集. 酒泉:《声学技术》编辑部, 2020: 269-272.
- SHI Huimin, LIU Yan, MO Runyang. Regression prediction of defect height in pipeline[C]//Proceedings of 2020' Western China Acoustic Academic Exchange Conference. Jiuquan: Editorial Department of *Acoustic Technology*, 2020: 269-272.
- [31] 徐春燕, 阙永彬, 刘琰, 等. 一种建立管道埋藏型缺陷自身高度预测模型的方法: CN202010718037.3[P]. 2020-12-08.
- XU Chunyan, QUE Yongbin, LIU Yan, et al. A method for establishing self height prediction model of pipeline buried defects: CN202010718037.3[P]. 2020-12-08.
- [32] 国家能源局. 承压设备无损检测 第10部分: 衍射时差法超声检测: NB/T 47013.10—2015[S]. 北京: 新华出版社, 2015.
- National Energy Administration. Nondestructive testing of pressure equipments Part 10: Ultrasonic time of flight diffraction technique: NB/T 47013.10-2015[S]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2015.
- [33] American Society of Testing Materials. Standard Practice for Examination of Carbon Steel Welds Using Eddy Current Array: ASTM E3052[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2016.

(修改回稿日期 2022-05-15 编辑 何明)



本文互动