

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.217

# 金属油气管道腐蚀的 $\beta$ 射线检测方法

朱子齐<sup>a,b</sup>, 王晓静<sup>a,b</sup>, 雍静<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a.电气工程学院; b.输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

**摘要:**利用放射性物质衰变释放的粒子流在穿越不同厚度的屏蔽材料时,粒子输运过程和能量衰减程度不同的特性,提出通过检测管中 $\beta$ 放射源产生的 $\beta$ 粒子在管道外部形成的能量沉积,对架空金属油气管道的腐蚀状态进行在线无损检测的方法。分析了 $\beta$ 粒子在穿越不同厚度的钢铁屏蔽材料后光子和电子流量与其能量分布的差异与特性,模拟试验 $\beta$ 放射源投入管道后衰变产生的 $\beta$ 粒子从内部穿透出不同腐蚀程度的金属管壁进入外部NaI粒子探测器的粒子输运结果,最后通过方差分析研究腐蚀厚度和面积对射线探测法的灵敏性影响。研究表明:射线探测法对腐蚀厚度的检测灵敏性强,该方法能够有效检测出厚度超过管道壁厚40%以上的腐蚀破损。

**关键词:**金属管道;管道腐蚀; $\beta$ 粒子;腐蚀检测;能量沉积

中图分类号:TE88

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2021)05-078-09

## Metallic gas and oil pipeline corrosion detection method by $\beta$ ray detection

ZHU Ziqi<sup>a,b</sup>, WANG Xiaojing<sup>a,b</sup>, YONG Jing<sup>a,b</sup>

(a. School of Electrical Engineering; b. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** The particle transport process and the degree of energy attenuation are different when the particle flow released by the decay of the radioactive source crosses the shielding materials of different thickness. Making use of this feature, a method that measures  $\beta$  particle's energy deposition caused by internal  $\beta$  radioactive source at outer side of the pipeline was proposed to realize online nondestructive corrosion detection for aerial metallic oil and gas pipeline. The differences and characteristics of photon, electron flux and their energy distribution when  $\beta$  particles passed through steel shielding materials of different thickness were analyzed. After  $\beta$  radioactive source was devoted into the pipeline, the transport results of  $\beta$  particles generated by the decay which penetrate the metallic pipeline walls with normal and different corrosive degrees and eventually enter the NaI particle detectors were tested. Variance analysis was carried out to compare whether the thickness or area was more sensitive to this method. The results show that the ray detection method has strong sensitivity to the detection of corrosion thickness. This method can effectively detect corrosion damage with thickness exceeding 40% of the wall thickness of the pipeline.

**Keywords:** steal pipeline; pipeline corrosion;  $\beta$  particle; corrosion detection; energy deposition

收稿日期:2019-09-06 网络出版日期:2019-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777021)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51777021).

作者简介:朱子齐(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为油气管道交流感应分析和无损检测技术,(E-mail)20134057@cqu.edu.cn。

通讯作者:雍静,女,教授,博士生导师,主要从事油气管道交流感应分析和评估研究,(E-mail)yongjing@cqu.edu.cn。

管道运输系统是目前石油、天然气等一次能源的主要运输方式。由于油、气资源易燃易爆的特性,油气管道腐蚀、泄漏带来的社会安全和环境污染问题一直以来得到广泛关注。

对油气输运管道泄漏检测的方法已有大量研究,从最早期的人工分段巡线方法<sup>[1]</sup>和气体收集法<sup>[2]</sup>,到现在使用传感器和自动化工业器件的检漏方法,管道的泄漏检测效率和准确率不断得到提高。利用对管道泄漏敏感的多类物理特征或运行参数,如流量、温度、声波等<sup>[3-5]</sup>,也发展出多种现代化管道泄漏检测方法。但这些方法均属于事后检测,只能检测出已经发生的泄漏事故,不能有效地对潜在危险起到预警作用<sup>[6]</sup>。

绝大多数泄漏都是长期腐蚀造成的,对管道腐蚀程度进行检测,及时排除潜在危险,能有效降低油气泄漏造成的损失。外腐蚀直接评价技术(ECDA, external corrosion direct assessment)是一套对管道腐蚀情况进行科学检测和评价的方法。自2002年起,美国和中国先后开始建立ECDA相关技术标准,ECDA常用的评估方法包括密间隔电位法和交流电流衰减法等电气方法<sup>[7-9]</sup>。但是电气方法无法检测管道内壁的腐蚀状况,同时也容易受环境中电磁干扰的影响,出现误判和漏检<sup>[10-11]</sup>。

在管道无损检测技术中,射线探伤是一类应用相对广泛且成熟的检测技术。运用射线在穿透物质时能量转化成热能和其他光学能引起射线不同程度能量衰减的原理,在光学介质上形成工件的透视图像以实现无损探伤<sup>[12]</sup>。射线能量衰减的特性还应用于工件测厚,文献<sup>[13]</sup>运用 $\gamma$ 射线透射法,采用<sup>137</sup>Cs $\gamma$ 放射源和NaI(Tl)闪烁探测器对新疆克拉玛依油田输油管道的油垢进行了测厚研究。但是对于已投入使用的油气管道,受限于探测设备和使用环境,在不开挖、不停运的条件下难以实现管道无损探伤。

论文针对油气管道腐蚀检测的问题,提出一种基于 $\beta$ 射线的金属油气管道腐蚀检测方法。根据放射性射线在穿越不同厚度的屏蔽介质时粒子的输运和能量衰减程度的不同,利用粒子探测技术检测管道金属壁厚度变化的状况,以达到对服役中管道不开挖、不停运地进行腐蚀检测的目的。

## 1 检测方法基本原理

图1为采用射线探测法检测管道腐蚀的示意图。检测对象为一段架空金属油气输运管道,由多组粒子探测器所构成的环形探测器阵列设置在管道外侧,并能沿着管道轴线方向自由移动;经工艺加工能够发生衰变释放出射线的放射性物质,从被检测管段首端的管道增压泵投入管道中,使其能够随着管中油气介质一同运动;管道外侧的环形探测器则进行检测,接收放射源释放出的放射性能量;根据检测装置接受的放射性能量大小及分布,判断管道的腐蚀程度。该方法对管道的内壁、外壁腐蚀检测均有效。

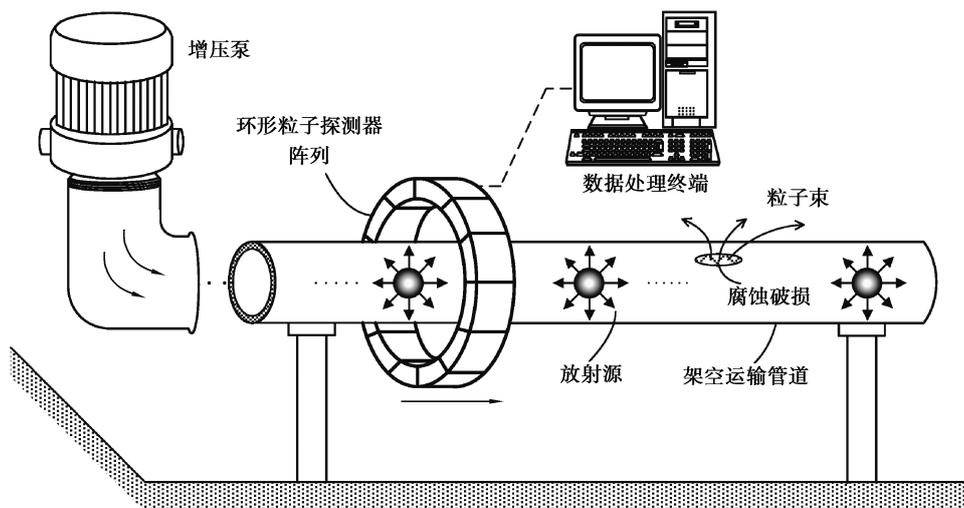


图1 管道腐蚀的射线探测法

Fig. 1 Ray detection method for pipeline corrosion detection

放射性物质在管中运动的过程中发生衰变释放出射线,当管壁结构完好无损,放射性物质适量时,射线能量仅少量穿透管壁;而当管壁某一位置发生腐蚀时,局部管壁减薄,屏蔽能力减弱,射线能量则大量穿透出管道。

环形粒子探测器阵列检测的放射性指标为射线在探测器内形成的能量沉积,穿透管壁的射线能量越高,在粒子探测器中形成的能量沉积越大,反之越小。通过与管道无损情况下测得的能量沉积比较,可以判断放射性能量穿透管壁的情况,进而判断管道是否发生腐蚀。环形探测器上的每组粒子探测器能独立记录同一位置不同角度的能量沉积结果,不同角度的粒子探测器所获得的能量沉积的差异可以用于定位管道腐蚀发生的角度位置,实现对服役中架空金属油气输运管道的腐蚀状态检测和定位。

## 2 $\beta$ 粒子输运物理过程及特点

射线探测法检测管道腐蚀利用了放射性物质衰变释放射线和射线能量衰减的特性。放射性射线是原子核由一种能态转变为另一种能态的过程中释放出的微观粒子流。放射性物质在自然状态下具有不稳定的特点,需要通过能量跃迁或者退激形成相对稳定的结构,衰变过程中一般以波或者粒子流的形式向外界辐射能量。 $\beta$  粒子是放射性核素发生  $\beta$  衰变时,自发释放出的一类带电粒子,典型的  $\beta$  衰变过程可以表述为



式中: ${}^A_Z X$  为能够发生  $\beta$  衰变的母核; ${}^{A}_{Z+1} Y$  为经过衰变后形成的子核; $e^{-}$  称为  $\beta^{-}$  粒子或电子; $\tilde{\nu}_e$  为衰变过程中产生的反中微子。

$\beta$  衰变是质子数改变而核子数不变的自发核衰变过程,衰变过程中原子核自发地发射出  $\beta$  粒子形成相对稳定的原子结构。 $\beta$  粒子的本质是高速运动的电子,其形成的粒子束流构成了  $\beta$  射线,具有低电离能高穿透能力的特性,在介质中的射程因其初始能量不同而存在差异,空气中的射程一般能达到数米以上<sup>[14]</sup>。一定初始能量的  $\beta$  射线在特定介质中的射程可根据射程比例的关系式(2)进行计算<sup>[15]</sup>。

$$(Z/M_A)_a \cdot \rho_a \cdot R_{\max,a} = (Z/M_A)_b \cdot \rho_b \cdot R_{\max,b}, \quad (2)$$

式中: $R_{\max,a}$  和  $R_{\max,b}$  分别为  $\beta$  射线在材料  $a$  和材料  $b$  中的最大射程,cm; $(Z/M_A)_a$  和  $(Z/M_A)_b$  分别为材料  $a$  和材料  $b$  的有效原子序数与有效原子质量之比; $\rho_a$  和  $\rho_b$  分别为材料  $a$  和材料  $b$  的密度, $g/cm^3$ 。实践中通过查表等方法,已知  $\beta$  射线在某种材料中的最大射程,利用射程比例关系求得其在另一材料中的最大射程。

$\beta$  粒子在输运过程中穿透物质时需考虑韧致辐射影响,如图 2 所示。

宏观层面  $\beta$  粒子运动受阻与其他物质发生碰撞时,微观层面  $\beta$  粒子进入阻碍物质的原子核库伦场,其速度降低, $\beta$  粒子的动能转变为光子能量,根据动能守恒定律

$$p_0 = p_e + k + q, \quad (3)$$

式中: $p_0$  为入射电子的动能; $p_e$  为出射电子的动能; $k$  为发射光子的动能; $q$  为原子核激发后的能量。从外部来看就是阻碍物吸收  $\beta$  粒子释放出光子和较低能量电子的过程<sup>[16-17]</sup>。因此  $\beta$  粒子在穿越不同厚度的阻碍物时,由于韧致辐射的影响程度不同,造成出射粒子的能量分布不同。

如图 3 所示为使用 MCNP5 程序包计算得到的初始能量 7 MeV 的  $\beta$  放射源在穿透不同厚度  $\delta$  的钢铁材料后,由于韧致辐射影响程度的不同,形成的电子流量和光子流量分布与其能量的关系。

从电子能量分布曲线可以发现,一定初始能量的  $\beta$  粒子穿越阻碍物的厚度越大,韧致辐射越显著, $\beta$  粒子损失越严重,能够进入粒子探测器的  $\beta$  粒子数量越少且能量越低;反之若穿越阻碍物的厚度越小,韧致辐射相对较弱,有更多的中能量  $\beta$  粒子穿越障碍物进入粒子探测器,并且当较多的  $\beta$  粒子进入粒子探测器时,还会在粒子探测器的金属外壳上发生微弱的韧致辐射,造成进入粒子探测器的光子数量进一步提升,如光子能量分布曲线。随着屏蔽物质厚度的减少,韧致辐射的影响程度逐渐加强,因此穿越屏蔽物后的电子和光子的

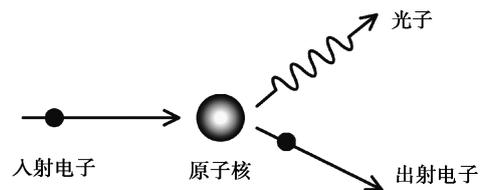


图 2 电子-光子韧致辐射基本过程  
Fig. 2 The elementary process of electron-nucleus bremsstrahlung

能量分布对屏蔽物厚度具有敏感性,进而可以从能量分布的相关结果来反推屏蔽物的厚度状态。对于管道腐蚀检测的问题,因为腐蚀导致管壁减薄,腐蚀程度与放射性粒子能量沉积呈现出正相关性,故可用粒子能量沉积结果来检测腐蚀程度。

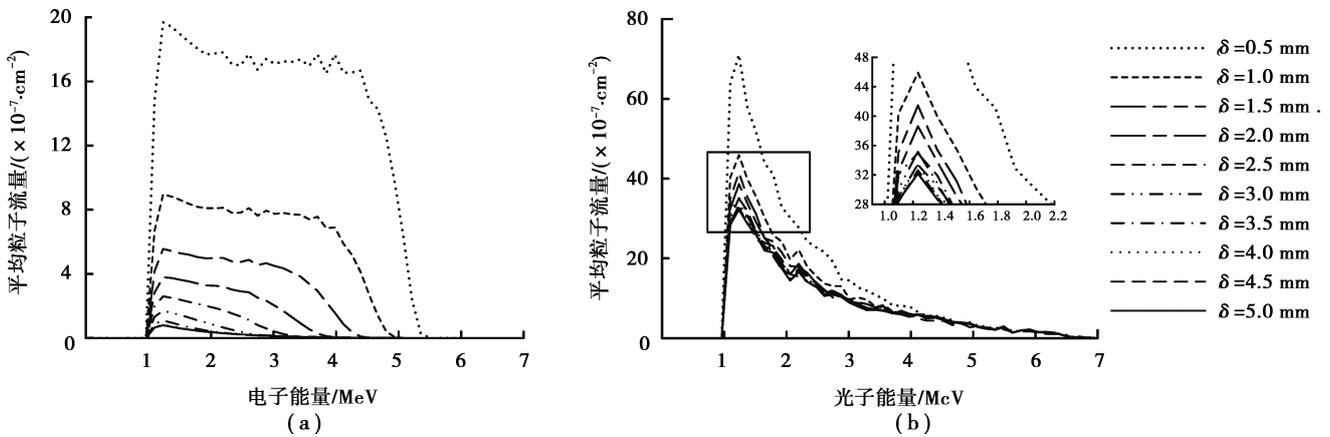


图 3 粒子能量分布于钢铁材料厚度  $\delta$  关系

Fig. 3 Relationship between particle energy and thickness of steel material

### 3 金属管道腐蚀检测模拟

#### 3.1 金属管道参数

选取 DN300 型无缝钢管为研究对象,研究腐蚀程度与粒子能量沉积的关系。图 4 所示为粒子探测器及金属管道研究模型的横截面示意图。研究选取 1 段长 100 cm 的管道,管道内径  $R_1 = 15$  cm,外径  $R_2 = 15.51$  cm。管道内部填充甲烷模拟实际输运过程中的天然气介质。环形粒子探测器半径约 1 m,套装在管道外侧,可沿管道轴线运动。

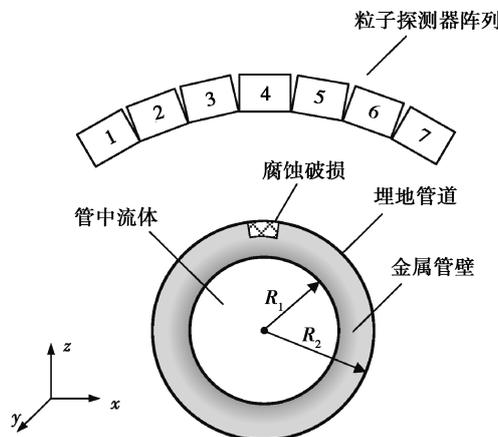


图 4 金属管道模型截面示意图

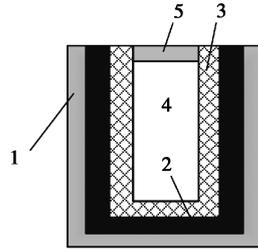
Fig. 4 Section of metallic pipeline

管壁发生腐蚀时,仅腐蚀部位外部对应的粒子探测器才能够有效地探测到粒子能量的变化。实验中主要关注正对腐蚀部位的 7 组 NaI 粒子探测器所构成的弧线形探测器阵列。管道腐蚀表现为一侵蚀管道金属表面的凹陷缺损。

#### 3.2 粒子探测器构成

粒子探测器用于接收辐射粒子,将粒子所带能量转化为可观测的外部信号进行辐射探测。本研究需要同时探测光子和电子的运输结果及两种粒子形成的能量沉积,因此选用同时对光子和电子的探测效率较高的 NaI 闪烁探测器<sup>[17-18]</sup>。图 5 所示为 NaI 闪烁探测器的结构示意图,其中的 NaI(Tl)为粒子探测器的闪烁

体,粒子进入闪烁体内与其发生电离或激发等相互作用产生可供外部观测的信号,研究指标为粒子在 NaI (Tl)晶体中形成的能量沉积。



注:1-Al 外壳;2-海绵层;3-MgO;4-NaI(Tl)晶体;5-SiO<sub>2</sub>

图 5 NaI 闪烁探测器结构示意图

Fig. 5 Structure of NaI scintillation detector

### 3.3 检测模拟及结果

管道金属壁的材料为钢铁,壁厚 5.1 mm,通过  $\beta$  射线在铝和钢铁材料中的射程比例关系计算能够穿透 5.1 mm 钢铁材料的  $\beta$  粒子的初始能量。根据式(2),令

$$R_{\max, \text{Fe}} = 5.1 \text{ mm},$$

归算到需要穿透的铝材厚度为

$$R_{\max, \text{Al}} = \frac{(Z/M_A)_{\text{Fe}}}{(Z/M_A)_{\text{Al}}} \cdot \frac{\rho_{\text{Fe}}}{\rho_{\text{Al}}} \cdot R_{\max, \text{Fe}} = 14.2 \text{ mm},$$

查表<sup>[15]</sup>, $\beta$ 射线的初始能量约为 7 MeV。

粒子放射源投入管道内部,放射源在管道的中空腔内均匀随机分布,任意时刻能向各个方向发射各向同性、初始能量为 7 MeV 的  $\beta$  粒子。影响粒子探测器中能够形成的放射能量沉积的因素为腐蚀的程度,即腐蚀厚度和面积大小。试验模拟的腐蚀厚度范围为 1~5 mm,腐蚀面积为 10~40 cm<sup>2</sup>。在设定的管道范围内进行两因素五水平模拟试验,表 1 为两因素五水平试验设计表。

表 1 两因素五水平试验设计表

Table 1 Factors and levels in two factors and five levels experiment design

模拟试验 编号	腐蚀厚度/ mm	腐蚀面积/ cm <sup>2</sup>	模拟试验 编号	腐蚀厚度/ mm	腐蚀面积/ cm <sup>2</sup>
0	0	0	11	3	30
1	1	10	12	3	40
2	1	20	13	4	10
3	1	30	14	4	20
4	1	40	15	4	30
5	2	10	16	4	40
6	2	20	17	5	10
7	2	30	18	5	20
8	2	40	19	5	30
9	3	10	20	5	40
10	3	20			

7 组粒子探测器在不同腐蚀程度下获得的能量沉积结果如图 6 所示,相对于无腐蚀情况下能量沉积的倍率结果如表 2 所示。

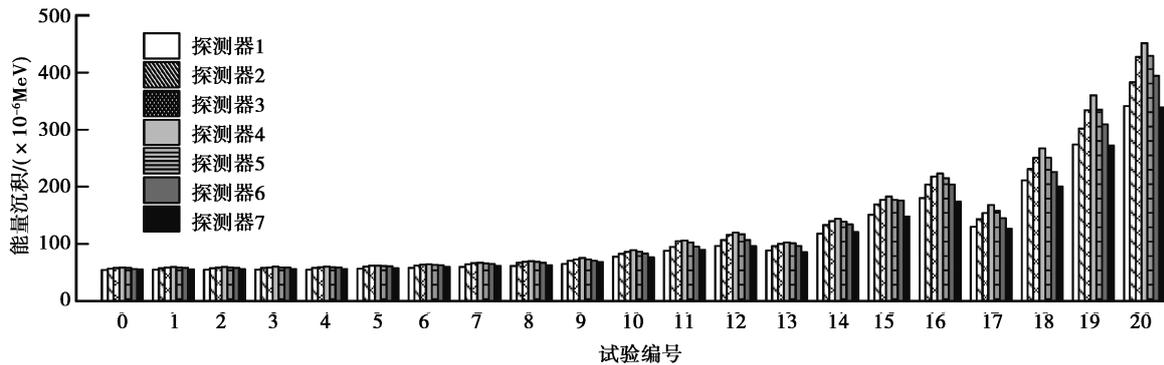


图 6 各次试验中探测器能量沉积分布  
Fig. 6 Energy deposition in each experiment

表 2 能量沉积倍率试验结果  
Table 2 Results of energy deposition in multiply

模拟试验 编号	相对于无腐蚀情况下的能量沉积倍率							合计
	探测器 1	探测器 2	探测器 3	探测器 4	探测器 5	探测器 6	探测器 7	
1	1.00	1.02	1.01	1.01	1.01	1.04	1.00	1.01
2	1.00	1.02	1.01	1.01	1.01	1.04	1.01	1.01
3	1.01	1.02	1.01	1.02	1.01	1.04	1.01	1.02
4	1.00	1.03	1.01	1.02	1.02	1.05	1.01	1.02
5	1.03	1.06	1.06	1.05	1.06	1.08	1.03	1.05
6	1.07	1.10	1.09	1.09	1.09	1.12	1.07	1.09
7	1.10	1.14	1.14	1.14	1.13	1.15	1.11	1.13
8	1.12	1.18	1.18	1.19	1.18	1.20	1.14	1.17
9	1.19	1.24	1.25	1.28	1.25	1.26	1.23	1.24
10	1.42	1.46	1.47	1.51	1.49	1.48	1.37	1.46
11	1.61	1.67	1.80	1.79	1.76	1.70	1.61	1.71
12	1.77	1.88	1.98	2.04	2.01	1.91	1.73	1.91
13	1.62	1.69	1.72	1.75	1.73	1.71	1.53	1.68
14	2.16	2.33	2.40	2.44	2.39	2.38	2.18	2.33
15	2.77	2.98	3.04	3.11	3.05	3.10	2.66	2.96
16	3.30	3.59	3.73	3.78	3.70	3.63	3.13	3.56
17	2.37	2.52	2.64	2.85	2.71	2.59	2.26	2.57
18	3.86	4.07	4.29	4.53	4.32	4.02	3.60	4.10
19	5.00	5.31	5.72	6.11	5.77	5.50	4.89	5.48
20	6.23	6.75	7.30	7.66	7.37	7.02	6.09	6.93

## 4 检测方法的敏感性研究

### 4.1 腐蚀厚度和面积的敏感性

粒子探测器能够获得的能量沉积与进入探测器闪烁体的光子流量和电子流量呈正相关,由腐蚀的厚度和腐蚀面积 2 项指标决定。通过构造方差检验判断腐蚀厚度和腐蚀面积对能量沉积的影响的显著性。

#### 4.1.1 修正数 $P$

本试验为两因素五水平试验,总试验次数为

$$n = n_a \cdot n_b, \quad (4)$$

式中,  $n_a$  为第一项因素的水平数,  $n_b$  为第二项因素的水平数,本试验中  $n = 20, n_a = 5, n_b = 4$ 。计算中用  $x_{ij}$  表示第  $i$  个因素在第  $j$  次水平试验下的试验结果总和,通过式(5)计算修正数  $P$ 。

$$P = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^{n_a} \sum_{j=1}^{n_b} x_{ij} \right)^2. \quad (5)$$

#### 4.1.2 各因素的离差平方和(SS, sum of squares of deviations)

每个因素均安排在试验表的某一列且无交互性,视为单因素试验进行计算。通过式(6)计算第  $i$  个因素的离差平方和

$$S_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^2 - P, \quad (6)$$

式中:  $n_i$  为对应因素的水平数;  $n_i'$  为对应该水平的试验次数。离差平方和反映了该因素的水平变化时引起的试验结果的差异,即其对试验结果影响的显著性。

#### 4.1.3 平均离差平方和(即均方值 MS, mean-square value)

通过式(7)和式(8)分别计算第  $i$  个因素的自由度  $f_i$  和平均离差平方和  $M_i$

$$f_i = n_i - 1, \quad (7)$$

$$M_i = \frac{SS_i}{f_i}. \quad (8)$$

对图 6 能量沉积试验结果进行方差分析,结果如表 3 所示。比较表 3 中的均方值可以确定腐蚀厚度和腐蚀面积两相指标对能量沉积结果影响的显著性关系。

表 3 两因素五水平试验方差分析

Table 3 Variance analysis of two factors and five levels experiment

因素	腐蚀厚度/mm	腐蚀面积/cm <sup>2</sup>	因素	腐蚀厚度/mm	腐蚀面积/cm <sup>2</sup>
$x_{1j}$	1 620.52	3 614.94	$x_{3j}^2$	6 345 209.86	24 054 512.61
$x_j^2$	1 772.55	3 987.30	$x_{4j}^2$	17 623 120.04	33 816 551.04
$x_{3j}$	2 518.97	4 904.54	$x_{5j}^2$	57 941 630.56	—
$x_{4j}$	4 197.99	5 815.20	S	6 216 088.85	868 465.11
$x_{5j}$	7 611.94	—	$f$	4	3
$x_{1j}^2$	2 626 085.07	9 089 863.20	$M$	1 554 022.21	289 488.37
$x_{2j}^2$	3 141 933.50	15 898 561.29			

分别计算腐蚀厚度和腐蚀面积的方差,腐蚀厚度的均方值为 1 554 022.21,腐蚀面积的均方值为 289 488.37。腐蚀厚度的均方值大于腐蚀面积的均方值,说明腐蚀厚度的变化对能量沉积,包括进入粒子探测器的光子和电子流量等参数的影响比腐蚀面积变化的影响更为显著。

从图 6 中试验 1~8 可以发现,当腐蚀厚度较小时,随着腐蚀面积线性增大,能量沉积探测结果没有明显提升,而当腐蚀厚度进一步增大时,能量探测的结果出现了较明显上升。如表 2 所示,当腐蚀厚度达到 5 mm

时,腐蚀情况下探测到的能量沉积可达到正常无腐蚀情况下的7倍以上。这一结果说明当管道发生腐蚀时,能量沉积探测的结果与正常无损情况相比有较明显的差异,同时也进一步验证了腐蚀厚度对能量沉积探测的影响比腐蚀面积的影响更显著。

#### 4.2 管道厚度均匀性对检测方法的影响

从图6中试验0~8的结果可以看出,若管道仅出现了很细微的腐蚀时,能量沉积高于无损情况的结果,但这并不意味着即使是很小尺寸的腐蚀都能被这种射线探测方法探测到。根据GB/T 17395—2008《无缝钢管尺寸、外形、重量及允许偏差》、GB/T 12771—2008《流体输送用不锈钢焊接管道》,对于研究对象DN300型管道,在最不严格的条件下,壁厚的允许误差范围为 $\pm 15\%$ ,故需要计算管道壁厚在4.25~5.75 mm允许范围变化下的本底误差。由于管道壁厚增大反而导致能量沉积减小,所以只计算壁厚减小到最低允许壁厚4.25 mm时的能量沉积,其结果如图7所示。

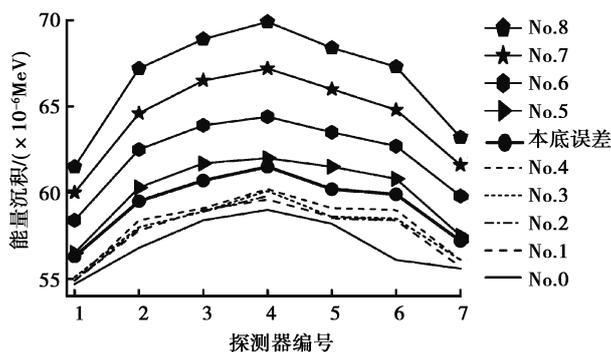


图7 本底误差与试验1~8能量沉积曲线

Fig. 7 Energy deposition in background error and experiment No. 1~8

在试验1~4腐蚀厚度为1 mm的4次试验中,各探测器获得的能量沉积均小于最大允许管壁厚度误差情况下的能量沉积。这一结果表面上违背了管壁厚度越小,能量沉积越大的规律。进一步分析可知,造成这一现象的原因在于,当腐蚀厚度仅为1 mm时,腐蚀面积较小,存在大量的粒子从管道正常厚度的部分穿透管道进入粒子探测器,而这部分粒子能量较低,因此整体上看,当腐蚀厚度为1 mm时,大部分进入探测器的粒子能量都会小于误差情况下的粒子能量,造成如图7中试验1~4的能量沉积结果小于本底误差的情况。

在试验5~8腐蚀厚度为2 mm的4个试验中,各探测器获得的能量沉积在允许壁厚误差条件之上,但是结合表2倍率的结果来看,当腐蚀厚度为2 mm时,各探测器所获得的最大能量沉积仅约为正常情况下的1.2倍,能量沉积的差异不够显著,不足以说明管道是否发生腐蚀。

从上述分析可得,射线探测法对管道检漏在腐蚀厚度这项指标上更为灵敏,且当管道腐蚀厚度不小于管壁的40%时,能够较明显地分辨腐蚀时的能量沉积和正常情况下的差异,而当腐蚀厚度太小的时候,使用该方法不能够准确说明管道是否发生腐蚀。

## 5 结论

1)采用粒子探测技术,分析比较 $\beta$ 粒子穿越不同厚度钢铁屏蔽材料后于NaI探测器内形成的能量沉积可以达到评估管壁腐蚀情况的目的。

2)射线探测腐蚀方法能够较灵敏探测管道壁厚是否发生异常减小,腐蚀厚度越大,腐蚀发生前后能够探测到的能量差异越大,越能说明管道是否发生腐蚀。

3)采用射线探测法检测管道腐蚀可以在管壁完全穿孔泄漏之前检测到管道的腐蚀。当腐蚀厚度超过管道壁厚的40%时,射线探测法能够较准确地判断管道是否发生腐蚀。

## 参考文献:

- [1] 王艳平, 曹树刚, 刘洪, 等. 油气长输管道综合评价模型设计与实现[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(11): 121-126.  
Wang Y P, Cao S G, LIU H, et al. Design and implementation of comprehensive evaluation model for long distance oil-gas pipeline[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(11): 121-126.(in Chinese)
- [2] Gemant A, Hines E, Alexanderson E L. Leak location by radioactive gases in buried pipes[J]. Journal of Applied Physics, 1951, 22(4): 460-464.
- [3] 林伟国, 王晓东, 戚元华, 等. 管道泄漏信号和干扰信号的数字化判别方法[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1197-1203.  
Lin W G, Wang X D, Qi Y H, et al. Digital identification method for pipeline leak and interference signal[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 1197-1203.(in Chinese)
- [4] Colombo A F, Lee P, Karney B W. A selective literature review of transient-based leak detection methods[J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2009, 2(4): 212-227.
- [5] 谢玉东, 王勇, 马鹏磊, 等. 控制阀的流量自感知及其在外泄漏自感知中应用[J]. 工程科学与技术, 2017(4): 205-210.  
Xie Y D, Wang Y, Ma P L, et al. External leakage self-sensing based on flow rate self-sensing of a control valve[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2017(4): 205-210. (in Chinese)
- [6] 王延年, 朱强, 赵则祥. 长输油气管道泄漏检测方法研究进展[J]. 石油机械, 2007, 35(5): 49-53.  
Wang Y N, Zhu Q, Zhao Z X. Advancement in the study of leakage detection method for long-distance oil and gas transportation pipeline[J]. China Petroleum Machinery, 2007, 35(5): 49-53. (in Chinese)
- [7] Kamar A R, Abd-Elhady A M, Sabiha N A, et al. Location estimation of coating defects and mitigation of induced AC voltages along buried gas pipeline[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2018, 12(2): 209-217.
- [8] 李文洋, 甘芳吉, 周永杰, 等. 基于多向交流电位降的管道裂纹腐蚀检测方法[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(5): 1-5.  
Li W Y, Gan F J, Zhou Y J, et al. Crack corrosion of pipeline detection based on multidirectional alternating current potential drop technology[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(5): 1-5. (in Chinese)
- [9] 甘芳吉, 余敏, 徐涛, 等. 基于多频交流场指纹法的金属管道腐蚀监测研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(4): 246-250.  
Gan F J, Yu M, Xu T, et al. Metal pipe corrosion on-line monitoring technique based on multi-frequency alternative current field signature method[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(4): 246-250.(in Chinese)
- [10] Yong J, Xia B, Yong H, et al. Harmonic voltage induction on pipelines: measurement results and methods of assessment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2170-2179.
- [11] Tang D F, Yang X G, Yong J, et al. Active method for mitigation of induced voltage in integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2019, 235: 553-563.
- [12] Suyama F M, Delgado M R, Dutra da Silva R, et al. Deep neural networks based approach for welded joint detection of oil pipelines in radiographic images with Double Wall Double Image exposure[J]. NDT & e International, 2019, 105: 46-55.
- [13] 王世亨, 刘圣康. 137Cs $\gamma$ 射线透射法检测输油管道油垢的初步实验研究[J]. 原子能科学技术, 2002, 36(6): 535-538.  
Wang S H, Liu S K. Preliminary experimental research to detect grease stain of petroleum pipeline by 137Cs  $\gamma$ -ray transmission method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2002, 36(6): 535-538.(in Chinese)
- [14] 陈伯显, 张智. 核辐射物理及探测学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011.  
Chen B X, Zhang Z. Nuclear radiation physics and detection [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2011. (in Chinese)
- [15] 尚爱国. 核武器辐射防护技术基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2016.  
Shang A G. The basis of radiation protection technology for nuclear weapon[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2016. (in Chinese)
- [16] Haug E, Nakel W. The elementary process of bremsstrahlung [M]. Beijing: Peking University Press, 2004.
- [17] Grupen C, Shwartz B. Particle detectors[M]. 2nd. UK: Cambridge University Press, 2011.
- [18] Sokolov A D, Pchelintsev A B, Loupilov A V, et al. Beta and X-ray spectrometer for monitoring of beta-radiating nuclides[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(2): 238-240.