

# 在役石油管道无损检测方法

周明

何凤歧 麻百勇

(上海大学, 上海 201800) (中国核动力研究设计院, 成都 610041)

**摘要** 介绍在役石油输送管道的漏磁及超声检测方法的检测原理及手段, 同时介绍基于这两种检测原理的两种检测爬机的结构及原理, 并简单阐述了其各自的优缺点。

**关键词** 管道 超声检验 漏磁检验

## NONDESTRUCTIVE TESTING METHODS FOR INSERVICE OIL PIPELINES

Zhou Ming

He Fengqi Ma Baiyong

(Shanghai University) (Nuclear Power Institute of China)

**Abstract** The principles of ultrasonic and magnetic-flux inspection methods for inservice oil pipelines and the structures of the pigs on the basis of the two methods are described. Their advantages and disadvantages are given at last.

**Keywords** Pipeline Ultrasonic testing Magnetic-flux testing

石油管道是我国能源部门所必需的输送设备。目前, 我国铺设的输油和输气管道已达 30 余万 km, 且正以 1 000~2 000km/a 的速度铺设新管线。管道经长期使用, 管壁受冲刷和腐蚀以致减薄, 常常发生泄漏事故。不仅造成经济上的巨大损失, 且会污染环境影响生态。现在, 我国大多数石油管道已进入事故多发期, 如何做到防患于未然, 搞好输油管道的在役检测工作, 已成为能源部门的当务之急。

由于石油输送管道往往铺设于地下或海底, 采用传统的检测手段实施输油管道的在役检测十分困难。近年来, 美、德、加、俄等国采用最新电子、机械和无损检测技术成果, 开展了大量研究开发工作。当前, 国际上主要采用管道检测爬机(Intelligent Pigging)进行输油管道的在役检测, 其检测主要采用超声波检测方法及涡流检测方法。

### 1 管道超声检测

#### 1.1 在役输油管道超声检测

超声检测是目前应用最为广泛的一种无损检测方法。它有灵敏度高、穿透力强、探伤灵活、效率高、成本低及对人体无害等优点, 它不仅可探测金属及非金属材料的缺陷(内部的和表面的), 还可测定材料的厚度及强度等。但超声波在空气中衰减很快, 检测时, 一般要有声波的传播介质(如水、油等)。

一般来讲, 在役输油管道的受蚀缺陷主要是管壁的受蚀减薄, 而用超声检测技术来探测输油管道管壁的厚度最为简便和直接, 其检测原理如图 1。

由于输油管道大都铺设于地下或海底, 对在役输油管道进行检测, 一般将超声探头置于被检管道的内部。当超声探头对管壁发出一个超声脉冲后, 探头首先接收到由管壁的内表面反射回的脉冲, 该脉冲与基准脉冲之间的间距  $A$  是很容易测量的。然后, 超声探头又会接收到由管壁的外表面反射回的脉冲, 这个脉冲与内表面产生的脉冲之间的间距  $B$  反映了管壁的厚度。超声探头沿管道的圆周方向进行旋转, 不断地向管壁发射脉冲, 管道径向的缺陷将被检测到。随着超声检测探头沿管道轴向前移, 就完成了对整段管道的检测。

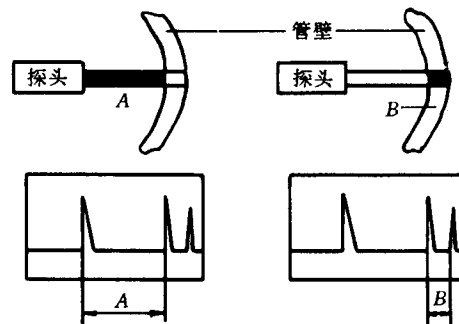


图 1 超声检测法检测管道

## 1.2 管道超声检测爬机

超声检测爬机(Ultrasonic Pig)是一种在役输油管道的无损检测工具,它是继管道漏磁检测爬机之后发展起来的。目前,对超声检测爬机的研究,无论是检测精度、定位精度、数据存储还是数据分析,均已达到了较高的水平。管道超声检测爬机主要由以下几部分组成。

### 1.2.1 检测头

超声检测爬机的检测部分一般采用多元蜂窝式检测头,其最多可载有500多个超声探头。各超声探头直接向管壁发射宽频超声波,又直接接收反射波。这种结构的检测爬机内部还设有摆锤及自动调节机构,以免爬机在行进过程中发生自身的偏转。带有多探头装置的检测爬机不仅可精确地测定管壁受损的轴向位置,还可确定管壁受损的径向位置。

### 1.2.2 检测定位

检测定位是指检测爬机自己设置定位标记,它是通过里程轮来实现的。通用做法是在管道检测爬机的机体外部设置定位轮,此轮由弹簧支撑紧贴被测管壁。当爬机行走时,里程也随之旋转,里程轮每旋转一周,检测爬机在储存记录里便设定一个标记。与此标记相对照,可容易地定出管道受损位置。

### 1.2.3 数据存储

目前的管道在役检测爬机尚无法对管道进行实时检测,它只能对各种数据进行简单的筛选,然后进行储存,储存下来的数据还有待于二次处理。爬机需储存的数据包括被测管道内各段的温度及压力值、内外定位数据以及有关管道受损检测数据,其中关键且数量庞大的是受损管壁检测数据。

管道检测爬机在管道内进行检测时,由超声探头向管壁发射超声波,该波经内外管壁的反射又为超声探头所接收,接收后的波信号经处理被转换成数字信号。对输油管道的检测,在役管道检测爬机的一次工作行程往往达数十公里甚至数百公里,其需储存大量的各种数据,例如,对 $\phi 122\text{cm}$ 、长200km的管线进行检测,检测爬机的行进速度为1m/s,采用多探头结构,最终的数据储存量可达80GByte。由于爬机的行进速度较快及超声探头数目多而带来的数据通道数多,爬机数据采集的速度很高,数据流约为400kByte/s。对于管道检测爬机采集的检测数据,首先由机内微处理器进行压缩处理,压缩处理后的数据先要送入数据缓冲器,由此过渡,最终输入磁带储存。

### 1.2.4 爬机驱动

在役管道检测爬机是由管内输送的石油直接驱

动的无缆爬机,此种爬机由多节组成,检测速度可达1~10m/s,一次可连续检测100~200km长的管线。另一种是有缆在役管道检测爬机,虽然其每次检测长度只有几百米,最多只达2000~3000m,但设备简单,可靠性高。

### 1.2.5 数据分析

目前的管道检测爬机对所检测的数据尚无实时处理功能,只能将数据储存于磁带上,待检测爬机检测完整段管线后,由爬机内取出记录磁带,将其记录的数据输入微机,数据的最终处理是由微机完成的。

### 1.2.6 电源

管道检测爬机上的电源主要为机内各种探测装置和控制装置服务。目前的管道检测爬机供电形式有电缆供电及电池供电两种。电缆供电指检测爬机尾部拖有电缆,电缆与地面或船上的电机相连,由电机提供爬机所需的电力。这种形式的爬机还带有履带行走装置,可在管道内前进或后退。它适用于检测内部情形复杂的管道,遇有阻塞,爬机可靠行走装置退出管道。由于所携电缆之限,它不能长距离检测,一般检测距离仅达数公里。为了能长距离检测,管道检测爬机往往采用电池作电源。

### 1.2.7 机体

检测爬机一般为一机多节,各节为密封筒状,分置仪器、电源及电机等部件。机体各节相互之间以万向结相联,以利爬机转弯。因为检测爬机的工作环境多为油、水等介质,为了密封,机壳外部常覆以聚氨酯或橡胶等材料。由于检测爬机所处的特定工作环境,机体还要能承受高温高压。爬机结构见图2。

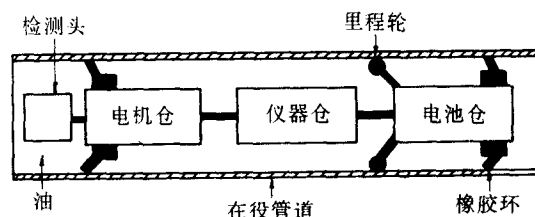


图2 管道超声检测爬机示意图

### 1.2.8 国外一些检测爬机的主要性能指标

检测管径为 $\phi 159\sim 1504\text{mm}$ ,行走速度为10m/s,探头数目为64~512个,判别精度为 $\pm 1\text{mm}$ ,检测距离为50~200km,弯曲半径为1.5~3D(D为管道直径),承受温度为5~60℃,承受压力为 $1.50\times 10^7\text{Pa}$ 。

## 2 管道漏磁检测方法

### 2.1 在役输油管道漏磁检测

漏磁检测是一种多功能的无损检测技术,它有

很高的检测速度。漏磁检测方法应用范围广,对于金属材料,它不仅能提供金属材料表面缺陷的信息,还能提供材料裂纹深度的信息,且不需要耦合剂。

石油输送管道是电磁的良好导体,利用漏磁检测技术可以检测输油管道的各种缺陷,如管道裂缝和管壁的受腐减薄等。漏磁检测技术应用于输油管道的检测,其原理如图3。当采用漏磁检测方法对输油管道的壁厚进行检测时,由线圈产生交变磁场进入被测管壁。此时,若被测管壁没有受损即不存在缺陷,则磁力线将不外溢;若被测管壁已受腐减薄或存在裂缝,部分磁力线将外溢,此时,利用磁敏探头采集到信号,通过对信号的分析,即可得知管壁的受损情况。但漏磁检测方法也有它的局限性,如只限于材料表面和近表面的检测、被测管壁不能太厚、干扰因素多及需要特殊的信号处理等,目前人们正研究采用远场涡流进行在役管道的检测。

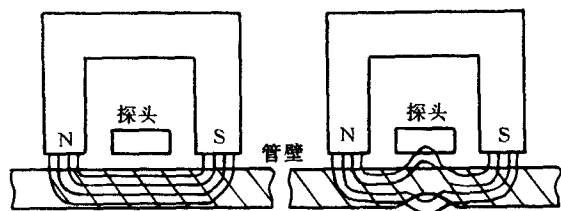


图3 漏磁法检测管道

## 2.2 漏磁检测爬机

漏磁检测爬机(Magnetic-flux Pig)是借助漏磁检测技术,为适应在役管道的现场条件而设计的一种管道检测设备。它的基本结构类同于超声检测爬机,整机亦由仓体(分为装载仪器的仪器仓、装载电池的电力仓等)、检测探头(检测线圈及其装配件)、数据存储装置及驱动装置等组成。只不过它的检测头结构不同于超声检测爬机的检测头,由两组检测探头构成,第一组探头用于检测管壁内表面的受蚀状况,第二组探头则用于检测管壁的外表面,两组探头均环列于检测头外且垂直于被测管壁。

国外漏磁检测爬机的研制始于80年代初期,至今已发展到第二代。其可携带数十个乃至近200个检测探头<sup>[1]</sup>,对上百公里的输油管道进行在役检测,检测管壁的各种缺陷,最小可检测出直径为3.2mm的缺陷。

## 3 两种管道检测爬机对比

由于检测方法的不同,导致可检测对象、检测范围及检测结果都有所区别,附表为超声检测与涡流检测两种方法的对比。

由附表可见,因为漏磁检测爬机的检测探头得

贴近管壁进行检测,当管壁不平,如有焊瘤,或管壁积有其它杂质时,将引起检测探头的抖动,从而产生虚假数据。漏磁检测爬机对管壁缺陷无法定量分析,其测得的检测数据不够精确,需经过校验方能使用<sup>[2]</sup>。漏磁检测爬机由于其检测机理所限,它对金属敏感度很高,当管道所用材料混有杂质时,将影响它对管道的测量。另外,对于大管径及管壁较厚的管道,漏磁检测爬机的能力亦是有限的。但漏磁检测爬机可对各种管壁缺陷实施检验,它不受检测介质的影响,即被测管道内的油液对涡流检测爬机的检测没有影响,漏磁检测爬机适于检测中小型管道,检测时不易产生漏检现象。

同样由附表可知,超声检测爬机适合对大管径、厚管壁的管道进行检测,它的检测精度很高,检测数据简单且不需对检测数据进行校核,这就大大提高了爬机的检测效率。然而,超声检测对检测介质敏感,当管壁缺陷处的蜡质层过厚,将影响超声检测爬机对该处的检测,超声检测爬机对超声探头的方向及至管壁的距离要求很高,它的扫描带受超声探头的限制,处理不当易产生漏检。

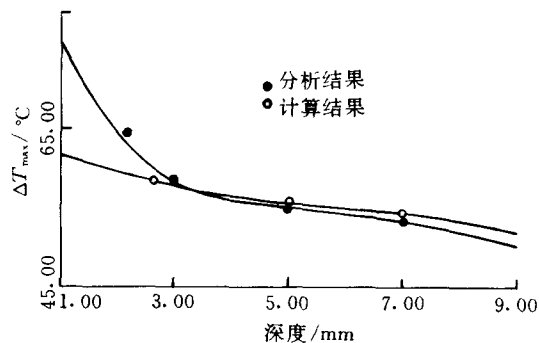
综上所述,对在役输油管道实施检测,无论漏磁检测爬机或超声检测爬机都是行之有效的检测工具。漏磁检测爬机适于检测管壁的细小缺陷,如管壁

附表 超声检测与漏磁检测比较

特 征 量	漏磁检测	超声检测
测量最大壁厚/mm <sup>1)</sup>	20(30)	100
测量最小壁厚/mm	0	3
对材料敏感特性	高	无
液体对检测影响 <sup>2)</sup>	无	有
可测最小减薄值/mm <sup>3)</sup>	0.1T	1
测量精度/mm	±0.2T	±0.1
数据采集 <sup>4)</sup>	可以	可以
检测管道面积(%)	100	100
对焊缝的敏感性 <sup>5)</sup>	小	大
爬机速度影响	有	无
对蜡质层敏感性 <sup>6)</sup>	中	高
对金属层敏感性 <sup>7)</sup>	高	低
检测裂缝 <sup>8)</sup>	不适宜	适合
最小探头尺寸/cm	50.08	15.24
检测数据分析	复杂	简单

注:1) 测厚取决于漏磁爬机大小。2) 超声检测环境需单一液体。3) T'为管壁厚度。4) 限于高性能漏磁检测爬机。5) 取决于检测探头的大小。6) 如果蜡质层很厚。7) 如焊瘤等。8) 需要改进爬机。

(下转第13页)

图4  $\Delta T_{\max}$ 与缺陷深度的关系

差的关系曲线,并同实验数据进行了对比(图4)。

另外,理论分析对于揭示热传导过程及其信号

(上接第7页)

- detection by nondestructive inspection. ASM Metals Handbook (Vol 11). 8th edition, Ohio: Metals Park, 1976. 214-224
- 9 Packman PF et al. Reliability of flaw detection by non-destructive inspection. ASM Metals Handbook (Vol 11). Ohio: Metals Park, 1976. 41-424
  - 10 Packman PF et al. ASM Metals Handbook (Vol 11). 9th Edition, 1989. 689-701
  - 11 Goranson UG, Rogers JT. Elements of damage tolerance verification. Proc 12th ICAF Symposium, France: Toulouse, 1983.
  - 12 Boogaard J, Van GM Dijk. NDT reliability and product quality. NDT & E International, 1993, 26(3)
  - 13 Van GM Dijk, Boogaard J. NDT reliability—a way to go. Proc 13th World Conf NDT, 1992.
  - 14 Nockemann C, Heidt H, Thomsen N. Reliability in NDT: ROC study of radiographic weld inspections. NDT & E International, 1991, 24(5): 91
  - 15 Yang JN, Donath RC. Inspection reliability of components with multiple critical locations. Proc 14th Symposium on NDE, San Antonio: 1983.
  - 16 Yang JN, Chen S. Fatigue reliability of gas turbine engine components under scheduled inspection maintenance, Journal of Aircraft AIAA, 1985, 22(5): 415-422
  - 17 Yang JN and Chen S. An exploratory study of retirement for-cause for gas turbine engine components, Journal of Propulsion and Power AIAA, 1986, 2(1): 38-49
  - 18 Silk MG. Flaw size distribution in pressure vessels and flaw detection probabilities in NDT. British Journal of NDT, 1991, 33(10): 491-494

收稿日期: 1997-12-08

形成机理也是必不可少的。

## 参 考 文 献

- 1 Thomas Jones, Harold Berger. Thermographic detection of impact damage in graphite-epoxy composites. Materials Evaluation, 1992(11): 1446-1453
- 2 Balageas DL, Krapez JC, Cielo P. Pulsed photothermal modeling of layered materials. J Appl Phys, 1986, 59(2): 348-357
- 3 俞昌铭. 热传导及其数值分析. 北京: 清华大学出版社, 1987. 450-454

收稿日期: 1997-12-22

(上接第10页)

裂纹和直径很小的腐蚀点等。在检测管壁的厚度方面,它则不如超声检测爬机那样简便。另外,管道中的油或水等介质对漏磁检测爬机的检测影响很大,漏磁检测爬机需存储的检测数据也很多。超声检测爬机在检测管壁的细小缺陷方面虽不如漏磁检测爬机那样精确,但它在测厚方面,其精度要优于漏磁检测爬机,且需存储的检测数据较涡流检测爬机要少得多。由于受超声波的物理特性所限,超声检测爬机要在有油或水等传导介质的条件下才能正常工作。

对于石油输送管道的检测,常常是检测管壁的受蚀减薄。因此,超声检测爬机在在役输油管道的无损检测方面,有着更大的应用和发展前景。

## 4 我国在役管道检测爬机的发展状况

在役管道检测爬机实际上是一种高技术和高可靠性的智能机器人,它涉及无损检测、电子、机械、材料、工艺、计算机及智能控制等多学科和技术,需要与工程应用密切配合。由于国内管道使用部门对于在役管道检测设备的迫切需要,不少石油化工等管道使用部门及科研院校正在大力研制及开发适合国内实际情况的在役管道检测机。

## 参 考 文 献

- 1 A comparison of ultrasonic and diverted magnetic flux pipeline inspection technologies. Proceedings of the 1992 Pipeline Pigging Technology Conference. Holland: Gulf Publishing Company and Surveys Ltd.
- 2 Raad JA de. Comparison between ultrasonic and magnetic flux pigs for pipeline inspection. Pipes & Pipelines International, 1987(1): 7-15

收稿日期: 1998-06-20