

# 抽油杆疲劳裂纹的超声波检测法

冯玮<sup>1</sup>, 姚红星<sup>2</sup>, 石惠宁<sup>2</sup>, 柳春图<sup>3</sup>

(1. 北京大学博士后流动站, 中国海洋石油研究中心博士后工作站, 北京 100027;  
2. 中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司采油工艺研究院, 河北 任丘 062552;  
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 本文将超声波探伤方法应用于抽油杆疲劳裂纹检测, 建立了基于非接触式水浸超声探伤、双向斜置线聚焦探头、轴向一切向运动分离三个关键技术的抽油杆疲劳裂纹检测方法, 并对不同深度的人工裂纹进行了检测实验, 对检测信号进行了分析, 给出了相应的检测范围。

**关键词:** 抽油杆; 疲劳裂纹; 检测; 超声波

## 1 前言

圆形截面的杆件是航空业、石油工业等领域工程结构中的常用构件, 其安全性是确保持续生产的重要基础。在工作期限较长的情况下, 上述构件很可能发生疲劳, 此时, 为了判定该构件是否能够继续使用、或者借助断裂力学方法对该构件进行疲劳寿命分析, 首先需要做的是判定其损伤状况。因此, 疲劳裂纹的检测工作具有非常重要的现实意义。例如油田采油生产中大量使用抽油杆, 这些抽油杆长期处于多种腐蚀性介质环境中, 并且承受着交变荷载<sup>[1]</sup>, 腐蚀性环境容易在抽油杆表面产生腐蚀坑, 而交变载荷的作用大大增加了在腐蚀坑等表面损伤处发生疲劳裂纹的可能。如果没有采取及时有效的措施对疲劳裂纹的产生和发展进行控制, 我们将面临因抽油杆断裂而导致的油井停产等一系列损失。

目前, 随着无损探伤技术的发展, 有多种检测技术已经得到了广泛的应用, 其中能够适用于大规模生产的方法主要有涡流法<sup>[2,3,4]</sup>和漏磁法<sup>[5,6]</sup>。但是, 这些检测方法在抽油杆疲劳裂纹的检测方面却面临无法回避的问题。首先, 涡流与漏磁方法要求探头与待检工件之间保持相对固定的间隙, 而抽油杆上的刮蜡器、限位器使得上述两种方法必须采用避让动作, 在保持检测速度的情况下将产生大量的漏检, 检测工作的意义将大打折扣; 其次, 疲劳裂纹是抽油杆断裂事故的重要原因, 同时杆体表面也可能同时存在腐蚀坑等其他缺陷, 这些缺陷将影响涡流与漏磁检测方法对疲劳裂纹的判别, 虽然可以通过一些工序对杆体表面进行清洁, 但是增加的工序将加大检测成本。因此, 对于抽油杆疲劳裂纹的检测工作, 涡流法与漏磁法并不是最佳的手段。本文将超声波探伤方法应用于抽油杆的疲劳裂纹检测, 取得了很好的效果。

基于实践经验, 用于抽油杆疲劳裂纹检测的方法需要满足如下条件:

- (a) 连续性。即检测过程不能因刮蜡器、限位器的存在而间断;
- (b) 单一性。即能够区分疲劳裂纹与腐蚀坑、锈蚀等其他缺陷;
- (c) 彻底性。即尽可能减小盲区(尤其是刮蜡器、限位器附近)。

## 2 关键技术

本文将超声波探伤技术应用于抽油杆疲劳裂纹的检测, 基于非接触式水浸超声探伤、双向斜置线聚焦探头、轴向一切向运动分离三个关键技术, 实现了过程连续、盲区较小的抽油杆疲劳裂纹检测方法。

### 2.1 非接触式水浸超声探伤

作者简介: 冯玮(1972.2), 男, 广东新兴人, 博士后, 从事压电机械结构、结构疲劳寿命、海洋工程结构冰激振动方面的研究。

目前能够进行大批量快速自动探伤的探伤方法有：磁粉和渗透法、涡流法、漏磁法、超声法<sup>[7]</sup>和 X-射线法<sup>[8]</sup>，其中磁粉和渗透法操作时间较长而仅适合小规模损伤检测，X-射线法针对体积性缺陷比较适合，涡流法和漏磁法两种方法是裂纹探伤技术中最为常见的方式。首先，涡流法和漏磁法在工作期间要求探头与工件表面保持固定间隙或紧密接触，这样对受检工件表面状况要求较高，而抽油杆因长期处于恶劣环境中而产生大量表面腐蚀坑，无法完全满足紧密接触的需要；其次，涡流法和漏磁法对探头与受检工件之间的间隙比较敏感，而抽油杆表面常常附着有一定厚度的油污和积蜡，它们对涡流法和漏磁法的探伤灵敏度影响巨大；第三，刮蜡器的存在要求接触方式下必须考虑大头避让装置，但在检测作业中快速行进的工件又会因为避让动作而出现检测盲区，一根抽油杆上通常分布着的多个刮蜡器大大减小了可探测区域。因此，要达到无间断连续探伤作业必须放弃传统的接触方式。

超声波探伤主要是通过测量信号往返于缺陷的渡越时间来确定缺陷和表面的距离，通过测量回波信号的幅度和发射器的位置来确定缺陷的大小和方位，它对于平面状态的缺陷（如裂纹、夹层、折叠等）具有很好的探测效果。与涡流法和漏磁法相比，超声波探伤方法具有指向性好、高灵敏度、性能稳定、不受电磁干扰的特点，目前在焊缝裂纹探伤方面有广泛的应用。根据抽油杆断杆样品电镜实验结果可知，抽油杆断裂原因主要是起源于表面夹杂和腐蚀坑的疲劳裂纹，而疲劳裂纹均垂直于杆轴，并且断口扩展区非常平滑；其次，超声波方法只需要在探头与工件之间需要填充传播介质而无须探头与工件紧密接触（例如水浸法就是将探头与受检工件全部放入水中，或者在探头与工件之间局部充水进行探伤的方法）。因此，超声波方法对抽油杆疲劳裂纹的探测比其它方法更为适合，探头不直接与工件接触为避让刮蜡器提供了可能，而且也适宜检测表面粗糙的工件。

## 2.2 双向斜置聚焦探头

由于水中声速小于钢中声速，声波从水中入射钢制工件时，产生折射后波束变宽，为了提高检测灵敏度，常使用聚焦探头。另外，为了对抽油杆整体进行裂纹检测，检测探头必须沿抽油杆轴向行进，而且在同一部位的裂纹有可能分布于周向任意位置，则要求检测探头相对受检抽油杆有切向运动，为了减小抽油杆与探头相对运动时所造成的探测盲区，我们采用线聚焦探头，并且根据焦线长度调整探头架的行走速度和抽油杆的旋转速度。

由于超声波方法对平面裂纹有较好的探测效果，同时也因为抽油杆疲劳裂纹垂直于油杆轴线的分布特征，我们的采用了可以调节角度的探头架，使得探头与抽油杆轴线方向成一夹角，从而利用疲劳裂纹面对超声波的投影反射探测裂纹。此外，为了避免斜裂纹漏检，我们的实验装置设计了多通道组合方式，超声波探头成对出现，并且指向相反。探头双向斜置的另一个目的是完成刮蜡器根部及其附近区域的探伤扫描，从而降低刮蜡器附近的检测盲区，如图 1 所示。

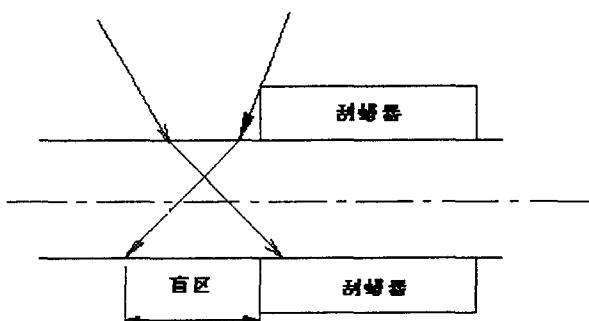


图 1 刮蜡器根部附近的检测盲区

## 2.3 轴向一切向运动分离

为了对抽油杆各部位进行裂纹检测，检测探头必须沿抽油杆轴向行进；其次，在同一部位的裂纹有可能分布于周向任意位置，则探伤探头相对受检抽油杆必须有切向运动。工件与探头的相对运动有三种方式，即探头固定工件运动、探头运动而工件固定、探头与工件同时运动，现有的抽油杆探伤设备通常采用固定探头方式，为了达到上述轴向和周向运动的要求，现有设备只有让受检抽油杆在自转的同时沿轴线方向推进。在这样的运动方式下，如果工件在长度范围内有截面的突然变化（例如带有附件），就必然引入避让问题，而避让装置在完成展开和闭合动作期间必然造成漏检，所以，我们的实验装置采用探头和工件同时运动的方式，即轴向和切向运动分离技术：抽油杆被固定在支架上并绕轴线旋转，而探头固定在探头架上以平行于抽油杆轴线的导轨为准作直线运动。轴向和切向运动分离技术是实现刮蜡器避让的必要手段。

### 3 实验装置

本文采用了如图 2 描述了抽油杆疲劳裂纹超声波检测实验台结构，实验台实物见图 3。

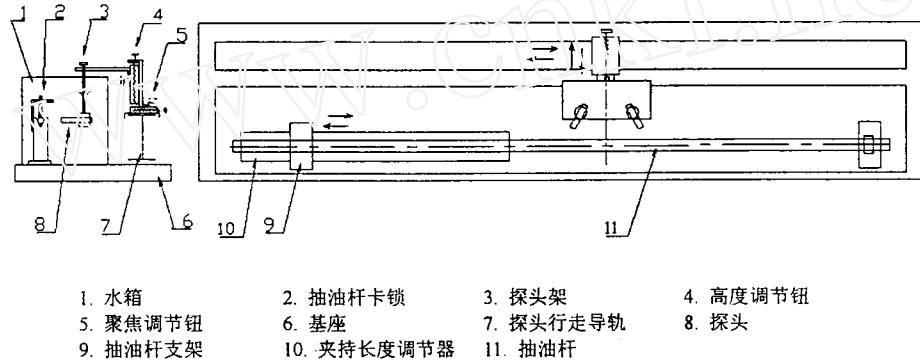


图 2 抽油杆疲劳裂纹超声波检测实验台结构图



图 3 抽油杆疲劳裂纹超声波检测实验台

### 4 实验与结果

#### 4.1 受检样本

限于实验台长度，本实验中所使用的检测样本由两段抽油杆拼成，如图 4 所示。在样杆上采用线切割方法进行人工刻伤，8 条人工裂纹深度分别为 0.5mm、1mm、2mm、3mm、4mm、5mm、6mm、7mm。为了模拟刮蜡器对裂纹检测带来的影响，这里保留了刮蜡器，并在刮蜡器根部用线切割方法加工了一条深度

为 1mm 的人工裂纹。为模拟抽油杆现场条件, 这里所采用的检验样本没有进行表面清洁, 杆体表面保留了原有的油污和锈蚀层, 刮蜡器根部附近的积蜡也予以保留。

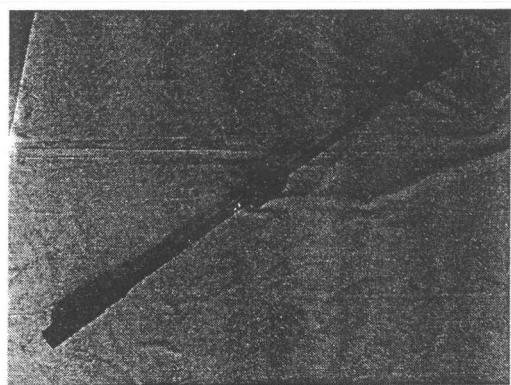


图 4 实验用样杆

#### 4.2 实验结果

本文对上述 9 条人工裂纹进行了检测实验, 记录了检测信号。对裂纹的峰值信号进行了汇总, 数据列于表 1, 位于刮蜡器根部的裂纹检测信号见图 5。

表 1 抽油杆杆体不同深度人工裂纹的检测信号峰值

| 裂纹深度 | 1mm* | 0.5m | 1mm  | 2mm  | 3mm  | 4mm  | 5mm  | 6mm  |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 信号峰值 | 57.9 | 41.6 | 56.5 | 64.9 | 66.9 | 65.9 | 64.8 | 61.7 |

单位: dB; \*: 刮蜡器根部裂纹

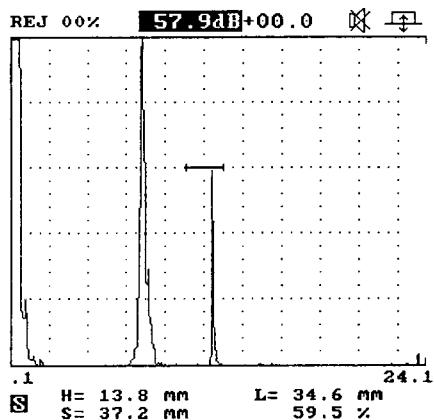


图 5 抽油杆刮蜡器根部 1mm 裂纹检测信号

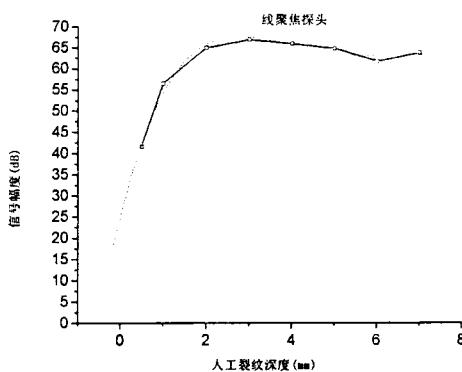


图 6 裂纹深度与检测信号峰值关系

### 5 结果分析

从图 5 中可以看到, 裂纹检测信号由三部分组成: 一次界面信号, 裂纹信号, 二次界面信号。从实验中观察到, 裂纹信号位于两个界面信号之间, 并且随着探头沿杆轴运动而逐渐增强; 同时, 抽油杆杆体的锈蚀、腐蚀坑等缺陷也能够被检测到, 但其检测信号出现在一次界面信号附近, 且随着探头沿杆轴运动而迅速消失。该现象的直接原因是锈蚀、腐蚀坑等缺陷的性质与疲劳裂纹不同, 后者一般深度较大、表面平

整，从而对超声波的反射信号强。据此，我们就能够识别真正的疲劳裂纹。

从表 1 中可以看到，借助本文提出的方法，位于刮蜡器根部的裂纹同样可以检测到，虽然附近存在积蜡，但是对检测信号峰值基本没有影响，这说明采用本文的检测方法将有效的避免盲区。

为了得到裂纹伤信号与裂纹深度之间的关系，以便通过探伤仪表头数据区分裂纹性质，我们将表 1 所示的检测数据绘制成曲线并进行多项式拟合，得到的结果如图 6 所示，其中实线是实验数据，虚线是拟合曲线。从图 6 可以看到，在 0.5mm 至 2.0mm 范围内，裂纹检测信号与裂纹深度之间成较好的线性关系，从而可以在该范围内借助检测信号来确定裂纹深度。虽然对深度大于 2mm 的裂纹无法分辨，但是 0.5mm~2.0mm 已经涵盖了抽油杆裂纹检测标准 SY/T 5643-1995 中有关抽油杆裂纹允许深度的范围，也就是说，在上述分辨范围内，能够对所检测的抽油杆是否可以继续使用作出判断。

综上所述，超声波探伤方法用于抽油杆疲劳裂纹检测是有效的，能够满足连续作业、在规定范围内识别疲劳裂纹、有效减小检测盲区的要求，有进一步开发利用的价值。

#### 参考文献：

- [1] 吴则中等.《抽油杆》.1994.
- [2] 沈跃. 抽油杆的涡流探伤. 无损检测. 1999, v21(11), 500-502.
- [3] 杨永超等. 抽油杆缺陷涡流式井口检测装置的应用. 石油机械. 2000, v28(11), 42-44.
- [4] 祖世强等. 抽油杆涡流检测装置及应用. 石油矿场机械. 2001, v30, 85-87.
- [5] 陈朝达等. 磁涡流及漏磁探伤装置检测抽油杆缺陷实验. 石油机械. 1996, v24(5), 26-30.
- [6] 陈宏道等. 管杆漏磁探伤现场应用中的问题及对策. 石油机械. 2002, v30(8), 45-48.
- [7] 张志永.《水浸聚焦超声波探伤原理》.1985.
- [8] 李瑞堂.《X 射线探伤检验技术》.1985.