

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005503

# 基于光纤磁传感的套损检测技术研究

杨留强 江松元 宫继刚 衣贵涛 刘镇江 陈小安

(中国石油集团测井有限公司辽河分公司 盘锦 124011)

**摘要:**报道一种FBG F-P磁敏感结构结合光相干检测的光纤磁场传感器,应用于套损检测技术领域。光纤FBG F-P干涉仪设计为弱反射的长腔长结构,以提高磁传感器相移灵敏度;基于差动抗干扰探测结构消除磁场与温度的交叉敏感性,采用双层封装结构,可适应与恶劣环境。搭建套损检测试验平台,制定试验方案,实验结果表明磁传感器测量结果与实际模型缺陷基本一致。光纤磁传感器为全光纤结构,进行耐压与防水封装后,能满足实际井下测量工作环境的应用。

**关键词:**生产测井;磁传感器;光纤传感器;套损检测

**中图分类号:**TE212.9;TE19 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**140.30

## Study on the technology of casing damage detection based on optical fiber magnetic sensing

Yang Liuqiang Jiang Songyuan Gong Jigang Yi Guitao Liu Zhenjiang Chen Xiao'an

(Liaohe Branch of China Petroleum Logging Co., Ltd., Panjin 124011, China)

**Abstract:** A fiber optic magnetic field sensor with FBG F-P magnetically sensitive structure combined with optical coherence detection is reported and applied in the field of casing loss detection. The fiber optic FBG F-P interferometer is designed with a long cavity structure with weak reflection to improve the phase shift sensitivity of the magnetic sensor. Based on the differential anti-interference detection structure to eliminate the cross-sensitivity between magnetic field and temperature, the double-layer packaging structure can adapt to the harsh environment. The test platform for casing damage detection was built and the test scheme was formulated. The experimental results showed that the measured results of the magnetic sensor were basically consistent with the actual model defects. The fiber optic magnetic sensor is an all-fiber structure, which can meet the application of underground measurement working environment after being sealed with pressure-proof and water-proof.

**Keywords:** production logging; magnetic sensor; fiber optic sensor; casing damage detection

## 0 引言

随着油田开发,我国老油田的许多井的出现了套管形变、腐蚀和错断现象,严重影响了石油的开采。套管损坏状况检查及预防已成为油田开发过程中的重点工作,准确判断套损情况是修补套管漏洞的关键。目前应用较多的套管腐蚀检测手段包括电磁、超声波、井下成像、机械井径测量。常用的套损仪器有 Sondex 公司 MIT、MTT 和俄罗斯 MID-K、MIDS 仪器、斯伦贝谢 EM Pipe Scanner、超声成像测量仪 USI、多臂成像井径仪 PMIT 等。井径测井和超声波成像测井只能检查套管内壁的变化,不能检查套管的厚度变化情况,并且超声成像技术测井速度较慢,井筒内不能存在气泡,井壁要求干净,受结垢、结蜡影响大;多臂井径受

偏心影响大,存在漏测的可能;MIT 精度高,但在结蜡严重的井段无法测量套管内径的变化,且测速大于 600 m/h 的情况下,测量数据误差较大;MTT 会受到双层管柱影响,干扰信号较大,不能正常反映管柱损伤情况,仅能定性判断损伤情况。MID-K 只能测量油管 and 套管内径的平均值,不能得出套管的椭圆度,检测精度不高<sup>[1-5]</sup>。

光纤传感技术具有耐高温、体积小、抗干扰能力强等优点,在有限空间井筒内采用阵列测井方式实现井周成像定量评价。光纤测井技术应用近年来逐渐得到人们认可,特别是分布式测量(DTS&DAS)已经应用于套管井、裸眼井、压裂射孔等领域<sup>[6-7]</sup>。光纤测井技术在生产井动态监测和井筒完整性检测方面是一个新兴领域,国内在这方面的研究较晚,大多都是实验室理论研究。本文提出一种基于光

收稿日期:2020-12-07

纤磁传感技术的套损检测技术研究,解决上述测井方法存在的问题。本文提出的方案在前期完成的“光纤传感磁定位测井仪研制”的基础上,提高灵敏度磁传感结构,制定试验方案,进行不同类型洞孔试验测量,测量结果与实际情况对比,通过进一步结构小型化研究,可以应用于井下套损检测,为井下套管完整性井周成像定量化评价奠定基础。

### 1 光纤传感套损检测原理

本文采用光纤光栅法布里-珀罗(FBG F-P)结合超磁致伸缩材料(GMM)作为微弱的漏磁敏感单元,进一步以光相干探测进行信号解调,进行油井管道微弱漏磁探测,对管道的漏磁特性及分布进行测量,实现油气井套损测试与分析。当铁磁性材料在外磁场感应作用下被磁化,在材料存在缺陷(腐蚀、裂纹、破裂、划伤等)处,磁导率发生变化,致使磁力线发生弯曲,一部分磁力线漏出材料表面形成漏磁。光纤漏磁传感器自身携带的永磁铁在金属管壁全周围产生一个闭合磁回路,被测管道没有缺陷时,大部分的磁力线从被测管道的内部通过;当被测管内壁或外外壁存在金属损失时,由于磁阻变化,磁力线穿出管壁之外产生漏磁,漏磁被位于两磁极间的光纤漏磁传感器检测到,经过漏磁信号处理和模式识别处理,实现缺陷判定。

### 2 高灵敏度光纤漏磁传感理论模型

法布里-珀罗腔(F-P腔)对应变和温度具有敏感性,是高灵敏度光学传感器的常用结构,而在同一根光纤写入间隔一定距离的两个光纤光栅就构成全光纤的FBG F-P标准具,光纤光栅法布里-珀罗腔结构如图1所示。光纤FBG F-P同样具有高灵敏度的应变与温度敏感性,而且比单个光纤光栅有更高的灵敏度<sup>[8-11]</sup>。

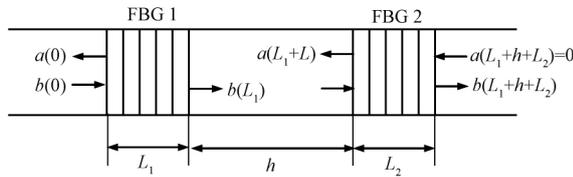


图 1 光纤光栅法布里-珀罗腔结构

光纤FBG F-P腔中的光纤在漏磁作用下产生应变,导致其腔长产生变化,由相位表达式可得到,当外界环境发生变化时,在波长λ处的相位变化满足:

$$\frac{\Delta\phi_{F-P}}{\phi_{F-P}} \Big|_{\lambda} = \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta L_{F-P}}{L_{F-P}} \quad (1)$$

其中,φ<sub>F-P</sub>为FBG F-P腔固有相移系数;Δφ<sub>F-P</sub>为外界磁变化引起的相移系数;n为FBG F-P腔固有折射率;Δn为外界磁变化引起的折射率变化;L<sub>F-P</sub>为FBG F-P固有长度;ΔL<sub>F-P</sub>为外界声波振动引起的FBG F-P长度变化。由式(1)可以看出,弱反射率光纤光栅F-P结构的腔长、光纤折射率变化将引起相位变化,对外界的被测场变化

具有更高的敏感度,可以构建高精度、高分辨率的光纤传感系统。依据漏磁套损测量特性,结合干涉型FBG F-P结构以及其信号解调与处理方法,建立光纤漏磁传感理论分析模型,对探测信号特征、探测灵敏度、系统响应特性以及信号特征解释等进行理论分析和仿真,进一步获得漏磁敏感的FBG F-P结构优化设计参数。

### 3 漏磁传感器设计

光纤漏磁传感器设计主要围绕传感器高温性能、灵敏度和封装结构3个方面,开展相关技术攻关。FBG F-P敏感单元制作实际上是在一根光纤上,间隔一定的光纤长度,刻写上反射波长、反射率以及反射光谱带宽一致的两个光纤光栅。为了消除光纤光栅的退敏现象,本文光纤光栅加工采用飞秒脉冲直接写入技术。在这种加工工艺中,制作光栅的光纤可以使用高温光纤,采用高峰值功率飞秒光脉冲直接照射高温光纤形成光纤光栅,然后进行退火处理,这样光纤光栅就消除了退敏现象,光纤光栅能工作在高温环境中<sup>[12-13]</sup>。在制作过程中,必须依据优化设计参数,控制FBG F-P结构的腔长、光栅的反射光谱特性(反射率、反射光谱带宽),以获得尽可能高漏磁探测灵敏度。在写入过程中,通过光栅长度和折射率调制深度来调整光纤光栅的反射率和反射光谱线宽;光纤光栅制作时应控制其反射光谱带宽,使其反射光谱带宽尽可能小,以提高反射光信号的相干长度,从而改善系统的信噪比。

传感单元耐压结构设计则采用双层封装结构,其内层主要由不锈钢基座和附有光纤的GMM材料构成漏磁敏感单元,外层结构则采用圆形的不锈钢管耐压密封封装,以保证高压环境的使用。

基于差动抗干扰探测结构需要消除磁场与温度的交叉敏感性。因此在内层封装结构上,用同一FBG F-P结构与GMM并行封装在基座上,敏感单元封装结构如图2所示。在这种结构下金属玻璃上的光纤受磁场和温度共同作用,而封装在基座上的FBG F-P结构则只对温度敏感,这样通过两对FBG F-P结构就组成差动探测结构,能有效地消除磁场与温度的交叉敏感性。

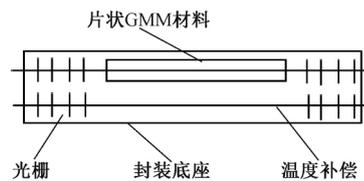


图 2 敏感单元封装结构

### 4 光纤传感系统总体方案设计

基于光纤FBG F-P的漏磁传感系统如图3所示。获得高灵敏度探测,采用高精度光波相位解调实现微弱磁场信号解调,即用更精细的光波相位来检测磁场作用下光纤

FBG F-P 腔长的微小变化,实现高灵敏度磁场探测。系统中存在两个干涉仪,即磁场敏感光纤 FBG F-P 干涉仪和相位解调光纤 Michelson 干涉仪。磁场敏感光纤 FBG F-P 干涉仪,其腔长在磁场的调制下反射光谱相位发生变化,其变化大小与磁场强度成比例,利用相位解调光纤 Michelson 干涉仪解调出光波相位的变化,则实现高灵敏度的磁场传感<sup>[14-16]</sup>。

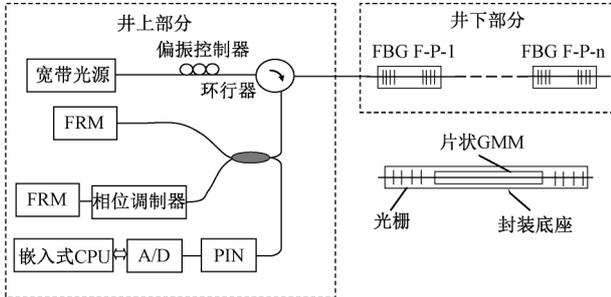


图 3 光纤 FBG F-P 漏磁传感系统

由图 3 可知,光纤漏磁套损传感系统由两部分构成,即井上和井下两部分。井上部分主要由传感光源模块、偏振控制器、信号解调干涉光路、光电探测、A/D 转换模块、以及嵌入式计算机等组成;井下部分则主要包括磁源和光纤漏磁敏感基元构成的传感阵列,将传感阵列沿油管四周等角度排列,结合数据融合处理实现基于漏磁的套损成像探测。

### 5 实验结果与分析

本试验是根据漏磁场形成理论,采用全光纤的弱磁场测量探头,搭建试验平台,试验中使用了圆形铁磁磁体,其外径为 18 mm,内径为 4 mm,厚度为 3 mm。磁体与 N-N 的距离为 10 cm,光学传感器位于中间,传感器与板表面之间的距离为 3 mm。磁体与板表面之间的距离是 3 mm,固定光学传感器,磁铁和磁轭。以恒定的速度将它们滑过铁板的表面。漏磁信号由光学弱磁场传感器获取。进行磁光和光电转换后,可以在显示器上观察到光强度的变化。分别对钢板表面,钢管表面的狭缝,通孔、盲孔等缺陷进行漏磁检测,将单个、多个光纤套损检测传感器分别置于成对永磁铁的 N-S 或 N-N 两极间,分别对不同孔径的套管损伤进行检测,记录信号的信噪比、幅度以及与套损间距对应关系,如图 4 所示。

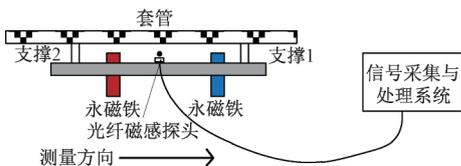


图 4 试验系统

表 1 所示为套损检测试验方案。建立光纤套损检测试验平台后,制定套损检测试验方案,按照表 1 制定计划完成相应试验。

表 1 试验内容统计

序号	探头数量	套损规格/ mm	套损 材质	探测距离/ mm
1	1	Φ16	钢套管	8
2	1	Φ9	钢板	8
3	1	Φ3	钢套管	3
4	1	Φ9	钢板	8
5	1	Φ3	钢板	3
6	2	Φ16	钢套管	12
7	1	3 横缝	钢套管	8
8	2	Φ9	钢板	5
9	1	Φ10 盲孔	钢板	8

标准比试件:按照《压力管道漏磁内检测对比试件制作规范》文件要求设计加工的铁板件,标准试件缺陷板设计如图 5 所示。

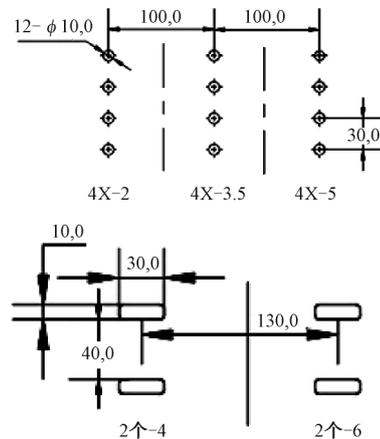
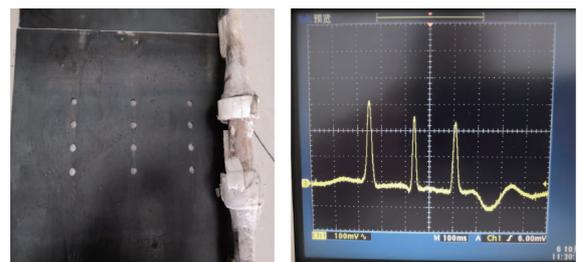


图 5 标准试件缺陷板

将光纤传感器从左到右匀速通过直径为 10 mm 的 3 种盲孔缺陷深度分别为 50%、35%、20%。探测高度 3 mm 盲孔深度越深,泄漏磁通量越大,所得信号强度越强,如图 6 所示。探测信号的波峰数量标识出探头通过的盲孔数量一致,信号强度与盲孔深度呈正向关系,波峰之间的距离标识出盲孔之间的距离关系。



(a) 缺陷金属板 (b) 测试结果

图 6 盲孔测试示意图

凹槽缺陷(30 mm × 10 mm, 缺陷深度分别为 20%、

35%、50%)，采用和圆形盲孔一样的方法，其输出的 3 个信号峰强度按阶梯增大，准确反映出了凹槽的深度信息和宽度信息，而且 3 个信号峰间距相等，体现出 3 种凹槽间的距离信息，如图 7 所示。本实验表明光纤漏磁探测系统准确地获得了工件凹槽缺陷的特征信息和空间位置信息。

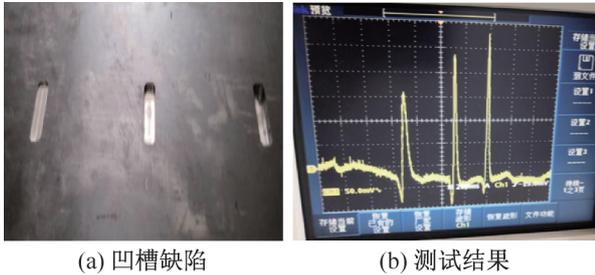


图 7 凹槽缺陷与测试结果

图 8 所示为腐蚀深度和光信号强度之间的关系。曲线表明，铁磁板表面的腐蚀深度与光强成正比。由于光学传感器在扫描板的表面，因此圆形盲孔的信号梯度小于长凹槽的信号梯度。

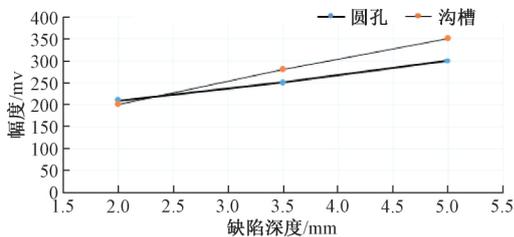


图 8 腐蚀深度和光信号强度之间的关系

采用同样的测试方法对长度为 130 mm，宽度为 3 mm 的裂缝进行测试，传感器沿裂缝纵向扫描时能获得裂缝的长度等信息。试验结果如图 9 所示，结果表明光纤漏磁探测系统对铁磁性金属表面缺陷具有高灵敏度的探测能力，所得输出信号准确地反映出缺陷数量、深度、宽度以及空间位置等信息。

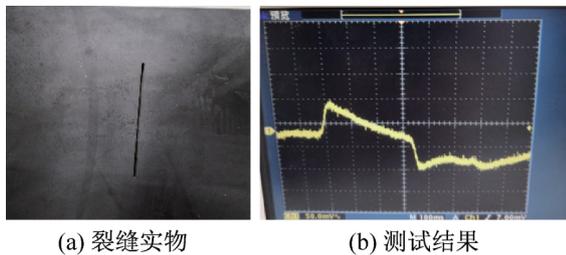


图 9 裂缝测试及结果

经过试验，调整测量距离得知漏磁场的幅值、相位及频率等都与缺陷的性质和几何尺寸等存在着关联性。光纤漏磁传感器探头的放置位置，提高高度等影响测量的精度。试验结论如表 2 所示。

试验验证了光纤微弱磁场传感应用于套损检测的可行性，套损检测仪器精度较高的磁测厚仪器 MTT 的实际探

表 2 试验结果统计

序号	套损规格	测试结果
1	Φ16	N-S、N-N 放置，12 mm 均获得明显信号
2	Φ9	N-S、N-N 放置，单双传感器均获得明显信号
3	Φ3	N-S 放置信号差；N-N 放置，获得明显信号
4	3 mm 横缝	N-N 放置，获得明显信号
5	Φ10 盲孔	N-N 放置，信号可反映盲孔深浅、距离

测圆孔精度大于 Φ7 mm，而光纤漏磁检测精度达到 Φ3 mm，远高于再用的套损检测仪器技术指标。

## 6 结 论

本文采用光纤 FBG F-P 漏磁敏感结构用布拉格光纤光栅对构成对称结构，磁场作用下的超磁致伸缩材料对 FBG F-P 腔内的光纤产生拉伸应变效应，使 FBG F-P 中的谐振峰产生相位移动，采用高精度的相位分析法获得高灵敏度的磁场探测。漏磁传感系统采用高精度光相干信号分析方实现 FBG F-P 漏磁传感系统的信号提取，提高了测量精度。搭建试验平台，完成多探头漏磁探测，测量数据能够反映出实际缺陷的几何特征，为光纤传感套损检测阵列圆周成像实际应用提供试验依据和技术参考。

## 参考文献

- [1] 李娜, 宋连振, 周佳美, 等. 测井技术在套损检测中的应用[J]. 2018 油气田勘探与开发国际会议 (IFEDC 2018) 论文集, 2018: 2908-2916.
- [2] 黎明, 邱金权, 金鑫, 等. 新型电磁探伤 MID-S 测井技术套损检测研究[J]. 石油仪器, 2012, 26(4): 4-6.
- [3] 王丽忱, 甄鉴, 朱桂清. 国外套管腐蚀检测技术研究进展[J]. 科技导报, 2014, 32(18): 67-72.
- [4] ALOBAIDI W M, KINTNER C E, ALKUAM E A, et al. Experimental evaluation of novel hybrid microwave/ultrasonic technique to locate and characterize pipe wall thinning[J]. Journal of pressure Vessel Technology, 2017, 140(1): 011501.
- [5] LIU B, HE L Y, ZHANG H, et al. The axial crack testing model for long distance oil-gas pipeline based on magnetic flux leakage internal inspection method[J]. Measurement, 2017, 103: 275-272.
- [6] 杨留强, 宫继刚. 基于光纤传感技术的伽马探测研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(4): 113-116.
- [7] 刘均荣, 史伟新, 李博宇, 等. 分布式光纤声音传感技术在油田中的应用及发展前景[J]. 地质科技情报, 2017, 36(5): 262-266.
- [8] 伍波, 刘永智, 张谦述, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔的高效窄线宽光纤激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 350-353.
- [9] 朱秀英, 汪浩, 江松元, 等. 光纤传感磁定位测井仪研

- 制[J]. 中国石油学会“第十九届测井年会,2015;202-206.
- [10] 侯倩,庞伟,吴梓楠,等. 基于光纤传感的磁定位测井装置研制[J]. 测井技术,2019,37(3):66-70.
- [11] 孟凡勇,卢建中,闫光,等. 长啁啾光纤光栅分布式双参量传感特性研究[J]. 仪器仪表学报,2017,38(9):2210-2216.
- [12] 伍波. 1.5  $\mu\text{m}$  掺铒窄线宽光纤激光器研究[D]. 成都:电子科技大学,2007;55-63.
- [13] 江超,王东宁. 飞秒激光脉冲刻写光纤布拉格光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2008,45(6):59-66.
- [14] SHEN T, SUN B C, FENG Y. Mach-zehnder interference all-fiber sensor for measurement of magnetic field and temperature, optics and precision engineering[J]. June, 2018,26(6):1338-1344.
- [15] 张润华,贾银亮,王平. 一种抑制钢轨表面缺陷漏磁检测提高干扰的方法[J]. 电子测量技术,2020,43(19):148-153.
- [16] WANG J G, ZENG J, LI Z H, et al. Research on fiber magnetic field sensor based on LPG and FBG composite structure [C]. International Conference on Optical Instruments & Technology: Advanced Optical Sensor & Applications, 2018, DOI: 10.1117/12.2295312.

#### 作者简介

杨留强,硕士,高级工程师,主要研究方向为测井新技术新工艺、光纤传感器与分布式光纤测井技术等。

E-mail:ylqlh1129@163.com