

# 基于光纤光栅传感技术的井筒在线监测应用

单崇雷

(国投新集能源股份有限公司 板集煤矿,安徽 亳州 236744)

**摘要:**20世纪80年代以来,有百余个立井井筒发生了不同程度的破坏,而井壁的破坏与井筒的受力密切相关.特别是淮南矿区井筒穿越深厚的表土层,井筒受力十分复杂,因此采用有效的手段对井筒的受力情况进行实时监测、预警十分必要.板集煤矿井筒破坏修复后根据井筒所处的地层情况在井筒套壁过程中分布埋入光纤光栅传感器,建立了可以实时监测井筒不同深度和部位受力情况的在线监测系统.通过井筒在解冻过程中各部位的应力应变监测情况应用分析,该系统可实时远程在线监测且效果良好.可见,该系统为分析井筒受力特征与相关因素,预测井筒受力发展趋势、井筒的破坏预测和及时维护具有重要意义.

**关键词:**光纤光栅;井筒受力;在线监测

**中图分类号:**TD262.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2016)01-0006-05

## Application of wellbore into on-line monitoring based on sensing technology of fiber bragg grating

SHAN Chonglei

(Banji Coal Mine, SDIC Xinji Energy Co., Ltd., Bozhou 236744, China)

**Abstract:** Since the 1980s, hundreds of vertical shafts have been damaged to some degrees, which has been closely related with the wellbore stress. Especially in Huainan coal mining area, shafts need to penetrate the deep pedosphere, bringing about very complicated wellbore stress. Thus, it is necessary to take effective means of shaft force to conduct real-time monitoring and early warning. After Banji coal mine's shaft repair, distributed fiber bragg grating sensors are embedded in the process of casing wall based on the formation conditions of the shaft, and the on-line monitoring system is established. Through the analysis of stress and strain of each part during the shaft thawing process, the system performs well in real time and on-line remote monitoring. Therefore, this system is of great significance in the analysis of stress characteristics and related factors, the prediction of the development trend of wellbore stress, the failure prediction and timely maintenance of the well bore.

**Key words:** optical fiber grating; on-line monitoring; wellbore stress

立井是矿井的咽喉,井筒的破裂给矿井的安全生产带来极大威胁<sup>[1,2]</sup>.板集煤矿曾因副井井筒破裂造成大量涌水,井下已经施工完成的几千米巷道和3个井筒全部被淹没.不仅如此,由于井筒的大量突水造成地层沉降,对井筒又造成不同程度的破坏.为了解井筒在修复后地层应力场变化情况和井筒的受力状况,有必要采用一种有效的手段进行实时监测.通过建立井筒井壁变形和监测系统,对井壁的实际受力和变形进行长期监测,掌握具体井壁受力应变状况才能保障井筒的安全生产.板集煤矿在治理井筒时的二次套壁过程中,主、副、风三井筒均埋入了光纤光栅传感器,建立了在线监测系统.

## 1 光纤光栅传感技术

光纤 Bragg 光栅 (FBG) 是一种性能优良的反射滤波无源敏感元件. 光纤传感器安全防爆、抗电磁干扰、抗腐蚀、防水、体积小、灵活方便<sup>[3-5]</sup>. 光纤光栅作为传感器的一个重要的用途就是埋入复合材料或者结构中来实现材料、结构内部应变分布的实时监测, 形成了光纤机敏材料与结构<sup>[6]</sup>, 其主要原理如图 1. 光纤光栅技术的最新发展使采用现场观测的方法来全面了解复合材料内部的变形成为可能. 近几年来, 光纤测量技术在岩土工程领域应用广泛<sup>[7-9]</sup>.

光纤光栅传感技术应用井筒监测中近年来也逐渐兴起, 柴静等人为了及时发现第四系松散层沉降变形, 减少对井壁的影响, 基于光纤光栅传感技术, 采用在松散地层预设深度 180 m 的钻孔中埋入 18 根光纤 Bragg 光栅, 形成对松散含水地层井筒变形的监测和预报方法<sup>[10]</sup>. 刘化宽等人利用光纤光栅在东荣二矿副井井筒局部层段 (235 ~ 245 m 间) 进行应力应变监测, 并建立了预警系统, 取得了一定成果. 因此, 通过光纤光栅实时在线监测井筒的受力情况, 实践表明具有良好效果和发展前景.

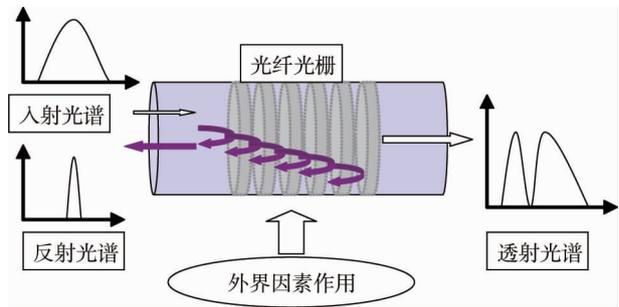


图 1 FBG 传感原理

## 2 井筒地质、水文地质条件

板集煤矿主井深度为 -769.9 m, 井口标高 +27.5 m. 井筒自上而下分别穿过地层为第四系松散层、二叠系.

松散层自上而下发育了 4 个含水层 (组) 和 3 个隔水层 (组). 对井筒影响较大的为第四含水层, 基本上与基岩直接接触. 该含水层顶界埋深 -514.4 m, 底界埋深 -558.36 m, 层厚 43.96 m, 含有砂层 3 ~ 5 层, 累厚 24.80 ~ 36.40 m, 占该含水层总厚的 59% ~ 72%, 上部砂层为中粗砂, 厚 12.70 m, 呈浅灰绿色、灰白色杂锈黄色, 疏松 - 松散, 含泥质团块, 偶见木植腐化物, 底部多含  $\Phi 3 \sim 6$  mm 石英砾石. 中部为含砾中细砂, 厚 6.30 m, 呈浅灰微带绿色, 性疏松 - 松散, 多含  $\Phi 3 \sim 7$  mm 砾石. 下部砂层厚 5.80 m, 为中粗砂、细砂, 呈灰白色少具锈黄色, 疏松 - 松散, 夹泥质团块, 局部含  $\Phi 3 \sim 10$  mm 砾石. 该含水层底部仅有 5.56 m 厚度的砂质粘土. 该含水层水位标高 16.51 ~ 17.15 m, 单位涌水量  $q = 0.153$  L/(s · m), 渗透系数  $K = 0.1603 \sim 0.6710$  m/d, 矿化度 2.388 ~ 2.419 g/L, 水质类型 Cl - Na 水, 富水性中等.

主井井筒基岩段穿过主要含水层为 9 煤顶板的上下 2 个主要含水层. 上层中粒砂岩厚 13.70 m, 标高 -611.11 ~ -597.41 m, 是井筒的主要含水层. 下层细砂岩厚 12.80 m, 水位标高 -648.4 ~ -635.60 m, 根据实际揭露资料, 该层砂岩灰白色, 致密, 块状, 较坚硬, 细粒结构, 主要矿物成分为石英, 长石, 少量暗色矿物及菱铁鲕粒, 硅质胶结, 上部垂向裂隙发育及节理发育, 岩石破碎, 存在构造迹象, 凿井时最大涌水量 39 m<sup>3</sup>/h, 且该层段施工有煤仓上口进风巷与井筒连接, 为井筒内淋水的主要含水层.

## 3 井筒监测实施

### 3.1 安装位置

根据主井井筒结构及地层情况在井筒布设 3 条监测线, 以方位角为 206° 的监测线为主测线, 另方位角分别为 86°, 326° 共 2 条测线为辅, 同时相辅相成, 井筒应变传感器的布设主要以竖向为主, 在几个关键点位再增设切向应变传感器. 竖向布设的每个测点均为带温补的应变传感器, 可同时进行应力、应变和温度等参数的实时监测, 而切向布设的为不带温度补偿的应变传感器.

主井井筒 3 条测线上各传感器的布设情况见下表 1. 本井筒共计 43 个竖向测点带温度补偿的应变传

传感器和 12 个不带温度补偿的应变传感器。

表 1 主井井筒传感器布置信息

测线 1(206°)			测线 2(326°)			测线 3(86°)		
测点编号	节段号	垂深/m	测点编号	节段号	垂深/m	测点编号	节段号	垂深/m
Z1-1	145	73.2	Z2-1	142	93.5	Z3-1	143	85.0
Z1-2	130	151.9	Z2-2	121	194.0	Z3-2	123	183.7
Z1-3	113	230.5	Z2-3	99	296.5	Z3-3	101	286.2
Z1-4	95	309.7	Z2-4	72	397.6	Z3-4	75	386.5
Z1-5	73	391.2	Z2-5	56	456.1	Z3-5	63	427.5
Z1-6	55	455.6	Z2-6	53	464.1	Z3-6	55	458.5
Z1-7	54	460.9	Z2-7	40	511.1	Z3-7	37	523.5
Z1-8	45	490.2	Z2-8	24	566.2	Z3-8	27	560.5
Z1-9	32	538.2	Z2-9	13	605.6	Z3-9	14	603.5
Z1-10	19	581.2	Z2-10	4	636.5	Z3-10	3	646.5
Z1-11	10	618.2	Z2-11	/	659.8	Z3-11	/	675.5
Z1-12	/	653.6	Z2-12	/	671.7	Z3-12	/	718.5
Z1-13	/	665.6	Z2-13	/	696.5	Z3-13	/	781.2
Z1-14	/	686.8	Z2-14	/	735.3	/	/	/
Z1-15	/	708.8	/	/	/	/	/	/
Z1-16	/	751.3	/	/	/	/	/	/

### 3.2 相关技术要求

1) 主井传感器及光缆的布置是随着套壁处理施工作业同时进行,传感器和光缆等均为在井筒套壁过程中埋在加固处理的混凝土中,即主光缆和传感器细缆需固定安装在竖向主筋和环向主筋上,传感器绑扎在环向主筋和竖向主筋附近.如果在传感器和光缆附近存在焊接作业时,要求在焊接前对相应的传感器及光缆等采取可靠的保护措施,确保传感器及光缆不受损坏.

2) 为了确保其埋设传感器的成活率,以便能够开展监测工作,对主要的监测位置要求考虑一定的冗余措施,每条测线的主光缆井下部分采用双回路.每条测线均敷设 1 条主光缆到底,每个传感器采取并联的形式进行连接,并且两端均接入主光缆,同时形成双回路,即确保每个传感器对应双回路主光缆的每一根光纤.所采用的传感器均为埋入式的传感器,并要求有较高的防水等级,其传感器的长短均为 10 cm 左右.

3) 井筒的每条主光缆均需直接引入集控中心机房内,统一接入一台解调仪进行数据采集,后续的数据存储、分析等功能由工控机进行统一分析处理.

### 3.3 在线监测系统

监测系统采用 B/S(Browser/Server,浏览器/服务器模式)结构,每个监测点位均以光栅光纤传感器网络为核心,对各个井筒受力变化情况进行实时监测,通过多芯光缆传输至服务器,通过运行智能监控软件实现对现场监测井筒受力变化的无线远程监控与管理,在线监测系统的整体构架如图 2 所示,分为监测测点、集控中心和远程客户端 3 大部分,以光纤通信与 Internet 相结合作为数据传输通道,通过 Internet 采用 B/S 模式可以由联网的任一客户机进行软件管理等操作.

该系统客户端做到全厂监控、实时参数、报警查询、历史数据、系统管理.等

全厂监控:用于查询各监测区域的地图分布和报警信息、查看传感器具体信息.

实时参数:用于查询所有传感器的状态和实时数据,可以跳转到实时数据监控、历史数据和报警信息界面.

报警查询:可以查看并处理数据报警信息,统计出报警最频繁的十个站点和十个监测点,方便进行重点跟踪和分析.

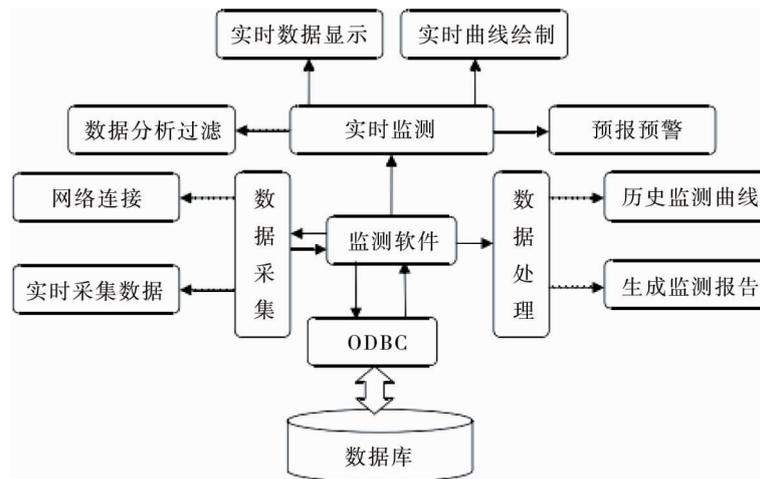


图 2 监测系统软件模块

历史数据:用于查询历史数据信息,并支持数据导出。

#### 4 在线监测应用

基于 FBG 技术的井筒监测系统,实现了板集煤矿主井井筒多点变形的在线监测和预警,以及井筒受力情况分析,现以解冻过程中的监测情况为例进行分析。

板集煤矿主井井筒在修复时采用的是冻结、套壁手段,在套壁完成后停止冻结。利用井筒在线监测系统可对井筒各位置进行在线实时监测。图 3 为选取的 1-11 (581.2 m, 位于松散层底部)、Z2-13 (671.7 m, 位于基岩段井壁座中) 2 个监测点自 3 月 28 日~7 月 17 日的应力应变的变化特征曲线图。

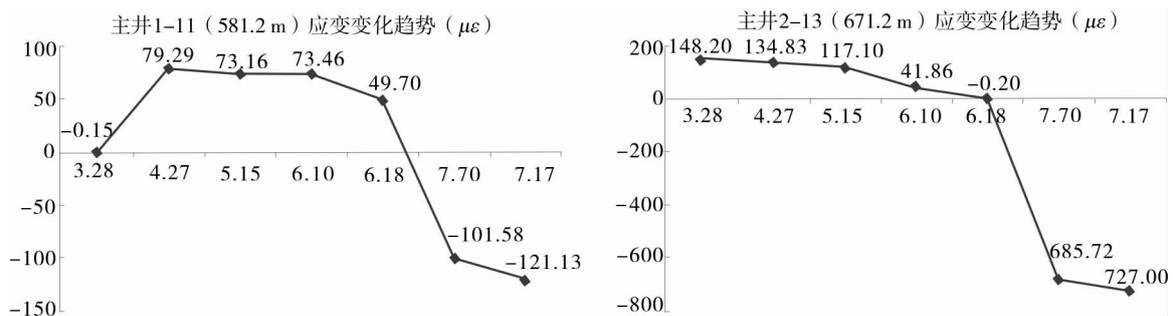


图 3 监测点应变曲线图

通过图 3 可以看出上述选取的 2 个监测点 1-11 和 2-13 的受力变化情况,其中正值为拉伸、负值为压缩。井筒 7 月 4 日开始停冻,解冻前期应变为正值处于拉伸状态,在解冻后出现明显的拐点突变为负值变成压缩状态,且出现较大的波动幅值。另外深度不同、应变值差异也较大,下部壁座明显大于上部。

结合冻结壁测温数据,基岩段的温度停冻后回升速度明显快于松散层段;另外结合井筒淋水监测情况,井筒在煤仓上口进风巷与井筒连接处的深度 683.3 m 的 9 煤顶板砂岩段在停冻后明显存在淋水逐渐增大趋势。

因此,初步分析井筒在井筒在停冻后随着温度的变化,以及井筒淋水造成地层失水会对井筒周围地应力造成改变,从而作用在井筒上。

另外,在各个监测点监测过程中,可以根据《混凝土结构设计规范》针对不同的混凝土设置报警值,如监测的应变达到预警值,系统会自动报警以进行警示。

## 5 结论

1) 光纤光栅传感器及光缆的布设采用埋入式在套壁施工作业同时进行明显要优于后期的表贴式. 因为更好增加传感器与井筒的耦合性, 以及后期不容易破坏, 特别是像主井此类提升井, 如是表面布置, 后期基本无法正常使用.

2) 在线监测系统传感器埋入点的选取应根据井筒的地层情况进行选择, 以利用井筒的监测需要.

3) 从监测情况看 FBG 应变传感器灵敏度高, 测量精确度高, 通过在线监测系统能够很好的实时监测到井筒受力应变情况, 并可结合其他相关因素进行分析. 通过该系统, 可为评价井筒安全状况提供依据.

4) 应根据井筒混凝土、深度等情况合理设置预警值, 并根据预警值采取何种措施值得进一步探讨.

### 参考文献:

- [1] 王宝贤. 恒源煤矿副井井壁破裂综合治理技术[J]. 能源技术与管理, 2013(2): 125 - 127.
- [2] 徐良才, 郭英海, 黄鑫磊, 等. 浅谈我国煤矿主要突水类型及防治技术[J]. 煤矿安全, 2011, 42(1): 53 - 56.
- [3] 柴敬, 朱磊, 张丁丁, 等. 多孔低压注水过程松散层沉降研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1720 - 1727.
- [4] 王道成, 张永涛, 刘明亮. 基于光纤光栅的厚松散层井筒破坏监测规律分析[J]. 陕西煤炭, 2011(2): 14 - 15.
- [5] 王太元. 基于光纤光栅技术的竖井井壁变形在线监测系统研究与设计[J]. 中国煤炭, 2015, 41(1): 62 - 65.
- [6] 方运买, 王太元, 王侃. 基于 FBG 技术的副井马头门变形在线监测[J]. 煤矿安全, 2015, 46(4): 210 - 212.
- [7] 朱鸿鹄, 殷建华, 靳伟, 等. 基于光纤光栅传感技术的地基基础健康监测研究[J]. 土木工程学报, 2010(6): 109 - 115.
- [8] 赵星光, 邱海涛. 光纤 Bragg 光栅传感技术在隧道监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(3): 587 - 593.
- [9] 陈朋超, 李俊, 刘建平, 等. 光纤光栅埋地管道滑坡区监测技术及应用[J]. 岩土工程学报, 2010(6): 897 - 902.
- [10] 邱标. 基于光纤光栅监测的厚松散层井筒变形预测研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.