

立井井壁受力智能感知系统及其工程应用

况联飞 杨金宏 赵光思 朱启银 赵晓东

立井井壁的受力大小无论对生产矿井还是新建井筒而言均十分重要，投产运营后若井壁受力过大将导致井筒发生破裂，新建井筒井壁厚度的设计又直接依据其外荷载大小而定。因此，从理论上讲，自井筒建设之初即埋设传感器于井壁混凝土内部，并对其受力变形发展进行长期观测是确保井壁安全的重要举措之一。然而，因对井壁外荷载的认知不足，缺乏对井壁受力监测的相关研究。20世纪80年代以来，我国出现了上百个立井井筒的压剪破坏。相关理论研究、室内试验以及现场长期监测结果均揭示出竖直附加力是导致井壁发生破裂的主要原因。

井壁破裂灾害事故的频发逐渐凸显出井壁受力监测的重要性。对于已投产使用的井筒，通过井壁开槽埋设应变计可对井壁受力发展相对变化量进行把握，但井壁受力的绝对变化量仍然未知。针对施工期间井壁的受力情况，一些研究人员对建井过程中冻结压力、钢筋受力、混凝土应变及井壁混凝土温度演化等变化规律进行了实测研究和分析。但受测试条件所限，施工期间的监测措施未能持续对井筒投产运营后进行长期观测。同时，对大体积混凝土早龄期的相关测试较为缺乏。可见，传统测试技术在井壁受力监测方面存在测不到、测不准以及测点离散、测试必须借助外部元器件等诸多缺陷。此外，传统点测技术需要布设大量的通信电缆，但在煤矿井筒中对电缆的保护难度很大，尤其在主井井筒中。随着大数据、互联网+等新技术的不断涌现，立井井壁受力监测亟待向智能化、自感知等方向发展。

立井井壁受力智能感知系统架构

井筒智能感知可定义为在一定的时空条件

下，对环境因素（温度、荷载等）和结构自身因素（压力、应变等）的获取、分析、显示以及对未来状态的预测。具体而言，就是通过预埋在井壁中的各类传感器（钢筋计、混凝土应变计、土压力计、水压力计及温度传感器等）或结构自感知，实时监测井壁受力的发展过程，并结合既有模型分析判断井壁的受力特征与安全状况。

典型井壁受力智能感知系统由传统定点测试、准分布式光纤和碳纤维机敏混凝土区域自感知测试3部分组成，可实现对井壁受力点、线、体多维度的综合把握，井壁受力智能感知系统架构如图1所示。

传统定点测试（点）

传统定点测试通常假定结构是完整且均质的，材料的变形为弹性且可恢复，则可以根据井筒受力特征与地层特性，沿井筒深度方向选择若干个测试断面。此外，考虑到外荷载的不均匀性，每个断面选定3~4个方位对井壁混凝土应变、钢筋应力以及外壁水土压力和温度等进行监测。

为解决“测不到”的难题，采用测试模块下井与传感器就近安设，在钢筋笼绑扎基本完成的同时埋设各类传感器（图2），所有传感器通过有线的方式与测试模块相连，连接完成后即开始数据采集，测试模块箱通过钢筋笼骨架固定并尽可能地使箱门面贴近模板内侧，以便后续进行维护工作时开箱门。同时，为满足可长期测试的需要，测试模块箱内预装大容量锂电池，并对测试模块进行低功耗设计，仅在采集期间需要外部供电，其余时间则处于休眠状态。为进一步实现井筒内的无线通信（摒除难以保护且价格高昂的竖向通信电缆），每层位模块箱内安设局域无线传输zigbee模块，且每层位

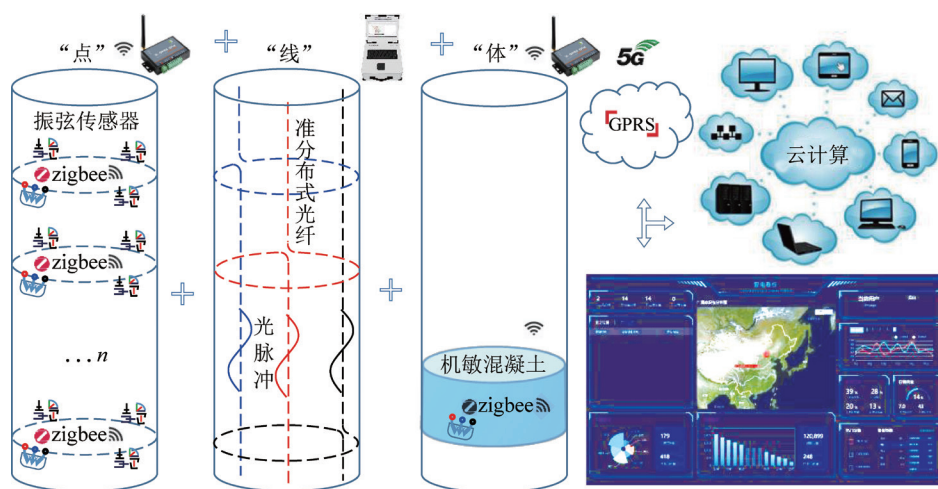


图1 井壁受力智能感知系统架构

无线模块兼具节点和路由功能，以确保井筒内无线通信稳定可靠。

为解决“测不准”的难题，采用在应变计附近埋设无应力计筒的方式对自由应变进行精确测定。混凝土的应变可分解为荷载应变、温（湿）度应变、混凝土收缩（膨胀）应变（也称为自生体积应变）和徐变应变。其中荷载应变直接与荷载产生的应力相对应，而温（湿）差、自生体积应变，只有在变形受到约束时才在结构中产生应力，同时徐变应变也应视为应力相关应变的一部分。因此，应力相关应变包括荷载应变，以及温（湿）差、自生体积应变受到约束时产生应力的那部分应变和徐变应变。反之，温（湿）度变化、自生体积应变中未受到约束的那部分应变（也称为自由应变）因为并不与应力相对应，称为应力无关应变，不会对结构造成破坏。工程上通常采用无应力计测试混凝土的自由应变，由结构中测得的应变和自由应变相减即可得到被约束的那部分温（湿）差变化和自生体积应变，进而能够准确获知结构的应力相关应变。

对于混凝土应变计数据处理的基准点，最理想状态为应变计弹性和混凝土弹性模量相同的时刻，基准点通常处于混凝土从初凝到终凝的某一时刻，但实际上对于基准点的确定在操作上是存在一定难度的。依据课题组前期研究结论，混凝土的终凝时刻可以通过初期较密测点的温度变化过程曲线



图2 传统定点测试传感器安装

来确定，也可认为温度曲线的反弯点（即温度上升至最高点后开始下降的时刻）对应为混凝土终凝时刻，并以此作为应变计计算的起点。由于智能感知系统在混凝土浇筑之前，测试即开始了高频的自动数据采集，进而能够准确获知应变变化的起始点。

上述相关措施解决了传统定点测试中遇到的“测不到”“测不准”的难题，摒弃了大量的竖向通信电缆，实现了井筒内的无线通信，地面部分由于有移动信号（5G），可通过租赁移动运营商流量以GPRS形式进行远程数据传输，来实现异地监管电脑对远程井筒内任一测点的实时控制。

准分布式光纤测试（线）

传统定点测试能够获取到的深长井筒受力数

据是极其有限的，无法从整体上对井筒安全做出全面评判。深长井筒与远长隧道一样具有典型的线型特征，若能分布式地获取线型井筒任一深度的受力情况，对评判井筒安全将会十分有利，但代价也是高昂的。工程上通过折中的方式，采用光纤光栅传感技术与光时域定位技术，可实现对准分布式感测光缆（测点间距1~2 m）的应变多点监测，进而获取不同深度井壁的受力变化。井壁受力智能感知系统中对于线型受力的监测将采用准分布式光纤的方式进行，具体而言，准分布式光纤可随内外壁施工埋入或待井壁施工完成后采用外挂的形式进行安装（图3），设计光缆长度可沿井筒筒长布设，刻栅间隔1~2 m，并可在传统定点测试层位布设环向测试光缆。考虑到井筒受力的不均匀性，竖向光缆可沿井筒周圈不同方位布设3~4条平行测线。对于外挂式安装的光缆可通过配重预拉的方式进行光缆固定，以满足后期井筒在竖直方向上主要为受压变形的受力特征要求。

碳纤维机敏混凝土区域自感知测试（体）

无论是传统定点测试还是准分布式光纤均必

须借助外部元器件（各类传感器或光缆）对结构的受力变形进行感知，若通过一定的技术对结构材料本身进行改进，使其能够对外界信号进行自感知，则将创新性地推动智能井壁建设进程。

井壁受力智能感知系统中区域（体）自感知测试采用碳纤维机敏混凝土。机敏混凝土也称为智能混凝土，通过在普通混凝土中按配方添加碳纳米管、炭黑或碳纤维等导电材料，使混凝土结构本身具有导电与（力、温度）敏感特性（图4）。采用与普通混凝土相同的制作工艺可制成机敏混凝土试块，埋设于被监测的混凝土工程结构中，也可直接浇筑机敏混凝土工程结构。这种区域性传感技术可自感知井壁的各种变化（力学、温度、渗水等方面），从物理指标上反映为埋设于机敏混凝土内部的不同测点间电阻的变化，进而实现对井壁区域性受力的整体把握。

系统集成与云分析平台

基于目前发展成熟的物联网和大数据等技术对上述点、线、体3个子系统进行集成，可实现信息的实时在线传输与云分析。

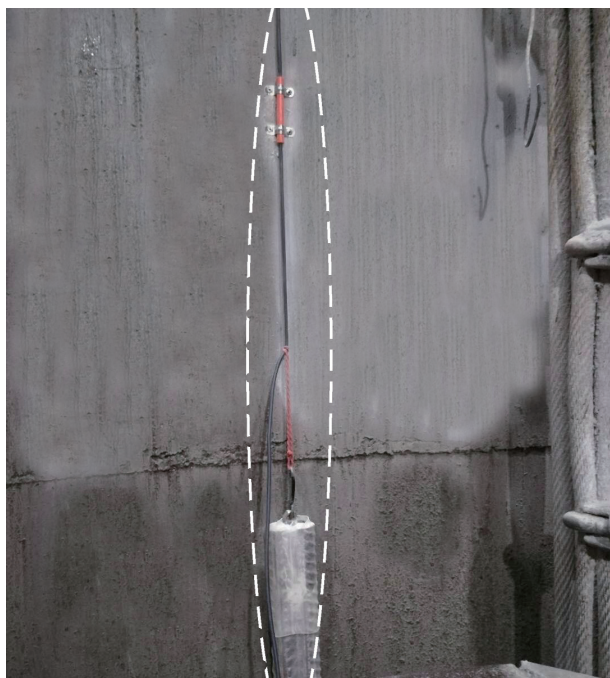


图3 准分布式光纤现场安装



图4 机敏混凝土测试铜电极

具体为传统定点测试传感器和区域碳纤维机敏混凝土电极信号以有线的方式连接至各层位模块,不同模块间通过zigbee在井筒内无线通信,信号传输至井口后连同准分布式光纤解调仪信号通过GPRS方式传输至监管机构固定IP地址的指定计算机串口,测试数据经阈值分析、异常剔除后转化为工程物理量,并进一步基于井壁受力预测数学模型进行大数据分析,以对未来一段时间井壁受力发展趋势做出推演预报。该分析结果对非管理员客户采用网络登录服务器的形式进行浏览,实现监测数据的云共享。

工程应用效果分析

工程应用地点为位于内蒙古鄂尔多斯的东胜煤田呼吉尔特矿区的葫芦素矿西翼风井,井筒净直径5.5 m,井深657 m,采用全深冻结法施工,冻结深度673 m。井筒穿越地层自上而下依次为第四系、白垩系和侏罗系地层,其中以白垩系弱胶结砂岩地层为主,且地层富含孔隙、裂缝水,井筒施工难度大。

考虑内外壁共同承载,该井壁结构设计自上而下采用了3种不同结构型式,其中0~-628.5 m采用双层钢筋混凝土井壁结构,但-460 m以深取消了内、外壁间塑料薄板夹层,-628.5~-644.5 m为整体浇筑单层井壁结构。取水压折减系数为0.7,对不同深度段的井壁厚度进行了相应减薄优化。

测试系统布设

为确保井筒施工与运营安全,并论证新型井壁结构设计的合理性,对葫芦素西翼风井实施了点—线—体全方位的智能感知测试。

其中,传统定点测试依据地层主要含水层位置与岩性特征,分别在-280、-420、-510、-554、-620 m不同深度沿井筒内、外壁周圈埋设混凝土三向应变计、无应力计、土压力计和孔隙水压传感器,共布设180个传感器对井壁应变、水土

压力以及温度变化等进行长期观测。

准分布式光纤采用套壁完成后沿井壁通过铆钉固定的方式进行外挂安装,测试深度为-440~-640 m,并沿周圈每间隔120°平行布设3条共计600 m的弱光栅特种光缆,光缆信号通过光纤引至井口接入解调仪。

自感知机敏混凝土在葫芦素西翼风井中实施了3.6 m段高(3模)的试验,试验段位于-614.4~-618 m。采用同掺法将一定比例的碳纤维均匀撒入料中,然后按常规混凝土浇筑工艺对井壁施工,碳纤维混凝土力敏信号采用竖直和水平方向间距均为1 m的34只电极分上下2层进行数据采集。同样,测试模块固定在井壁内,数据通过无线信号传输至井口。

所有井筒内测试数据汇集到地面井口后,通过GPRS远程无线模块发送至监管机构指定计算机,再进行后续处理分析。

传统定点测试结果分析

基于相关测试技术的革新,传统定点测试部分解决了以往“测不到”“测不准”2个难题,实测获得的外壁5层混凝土在套内壁前温度演化历时曲线如图5所示。

由测试结果可知,各层混凝土温度在水化热和冻结冷源双重影响下呈现出先急速升温又快速降至0℃的变化规律,外壁各层水化平均最高温度为33.95℃,最大值出现在第4层,最小值出现在第2层,分析认为这与围岩超欠挖、冻结温度场及地层岩石热导特性差异等因素有关。随着冻结壁冷量不断向井壁混凝土传递,温度逐渐降至0℃以下,其中第2层只经历了15 d的正温养护即进入负温,可见,外壁混凝土的养护环境十分恶劣。但也有例外,随着深度的增加冻结效率不断下降,实测外壁3~5层混凝土在套内壁之前均能保证正温养护,这对井壁强度的增长十分有利。进一步对图5中外壁第3层混凝土浇筑入模后24 h内的温度进行放大分析,如图6所示。

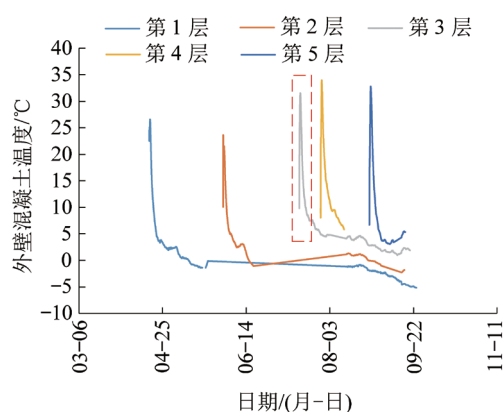


图5 外壁5层混凝土温度演化历时曲线（2017年）

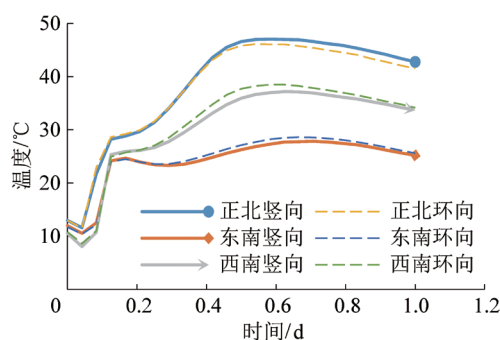


图6 外壁第3层混凝土入模24 h内温度历时曲线

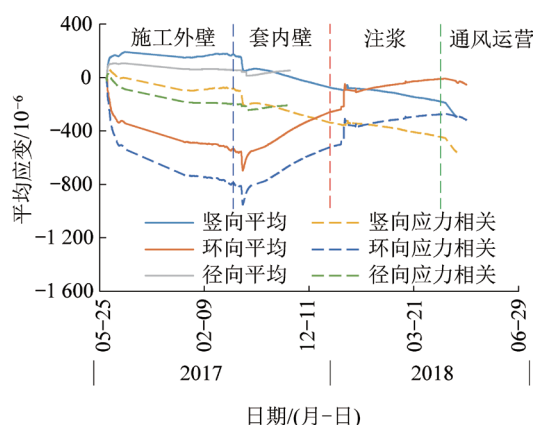


图7 外壁第2层三向平均应变历时曲线

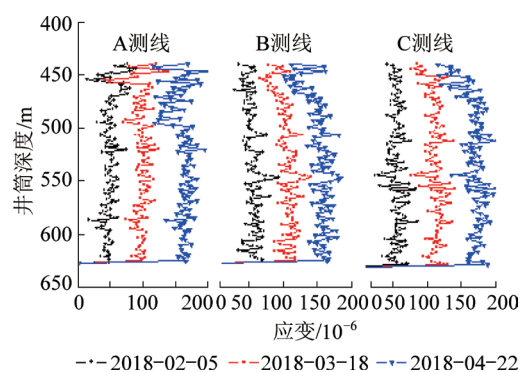


图8 不同深度准分布式光纤测试结果

由于自动数采模块在混凝土浇筑之前已经开始工作，能够对混凝土早龄期的温度演化进行详细掌握，由图6可知，混凝土浇筑入模时的温度为10℃左右，随后受水化热影响，温度不断上升，但不同方位的温度出现了差异，其中正北方位可能因为超挖严重、井壁偏厚或冻结管偏斜远离井帮使得该处温度最大。但同一测点位置的2个传感器温度演化几乎完全相同，均在17 h左右温升达到极大值，进而可据此作为混凝土应变计算起点。

基于上述应变计算起点判读，并与无应力计自由应变作差，典型井壁应变长期演化历时曲线如图7所示。

为抵消混凝土的固化干缩，该工程外壁采用了补强收缩混凝土，受混凝土早龄期自由膨胀及井

壁吊挂的双重影响，竖向和径向应力的相关应变在初期表现为拉应变，随后逐渐转变为压应变，但最大拉应变小于 200×10^{-6} 。环向应力为井筒最大主应力，外壁混凝土浇筑时，环向应变急速增大，随后受冻结压力影响缓慢增大，至套壁施工时，受内壁水化热影响环向应变表现为1台阶式增大，随后随内壁混凝土固化不断存在及自由膨胀影响，环向压应变表现为减小趋势。壁间注浆施工进一步减小了环向应变，但受通风运营影响又略有增大。在整个施工运营期间，三向应变最大的为环向压应变，最大表观应变为 -689.64×10^{-6} ，但考虑无应力计的自由应变修正，其应力相关应变实际为 -952.65×10^{-6} ，尽管该压应变对于井壁安全而言是有保障的，但若没有上述传统点式测试技术的创新，则极有可能对井壁安全做出误判。

表1 不同方位电极应变计算结果

电极方位	R_0/Ω	R/Ω	$\Delta R/\Omega$	$\Delta R/R_0$	敏感系数 K	计算应变 $/10^{-6}$
东南竖向	454.05	146.14	-307.90	-0.68	2 300	-295
西南竖向	352.90	2.17	-350.73	-0.99		-432
东北竖向	1 246.74	186.93	-1 059.81	-0.85		-370
西北竖向	957.91	534.36	-423.55	-0.44		-192

准分布式光纤测试结果分析

不同深度准分布式光纤应变测试结果如图8所示, 其应变数据处理以2018年1月3日安装后首期波长数据为基准, 该日期对应的现场工况为内外壁间注浆完成并开始通风运营。测试结果表明: 随着时间的推移, 3条平行测线应变均为受压累积, 但不同深度位置应变数值有差异, 4个月的最大累积应变约为 200×10^{-6} , 与上述传统定点观测结论一致, 分析认为这与冻结壁的融化体缩导致的地层变形有关。但平行的3条测线应变演化未见明显差异, 且沿深度方向未见应变持续累积, 进而可认为该深长井筒的受力在深度方向上是均匀的。

机敏混凝土测试结果分析

对现场浇筑的机敏混凝土进行标准试件制作, 并进行拉、压与电极间阻值关系标定, 定义敏感系数 K 为

$$K = \Delta R / (R_0 \Delta \epsilon)$$

式中: ΔR 为拉、压变形导致的电极间阻值变化;
 R_0 为电极间电阻初始值; $\Delta \epsilon$ 为拉、压应变。

经测试, 机敏混凝土受压时电极间阻值减小, 压缩敏感系数 $K_1=2\ 300$; 拉伸时阻值增大, 拉伸敏感系数 $K_2=15\ 455$ 。西翼风井现场试验段的机敏混凝土井壁不同方位的电极应变计算定量数值见表1。

表1监测数据截止日期为2018年5月15日, 对应的现场工况为外壁浇筑混凝土后至通风运营。由监测数据可知, 不同方位井壁竖向应变均为压缩累积, 最大压缩应变为西南方位 -432×10^{-6} , 该定量数值与传统定点监测结果吻合, 但不同方位井壁受力存在差异。可见, 新型机敏混凝土能够满足结构区域受力的自感知测试要求。

总结

(1) 立井井壁智能感知系统包含传统定点测试、准分布式光纤测试(线)及自感知机敏混凝土测试(体)3部分, 该系统能够实现井壁混凝土全寿命周期的点-线-体多维度信息综合获取与云处理分析。

(2) 传统定点测试解决了“测不到”“测不准”的难题, 能够准确获取井壁混凝土早龄期的温度与变形等演变规律, 实测结果表明葫芦素矿西翼风井外壁混凝土入模后17 h左右, 水化温度达到极大值, 平均最高温度达 $33.95\ ^\circ\text{C}$, 不同层位最短正温养护时间为15 d, 进一步基于无应力计自由应变修正, 测试获得了井壁应力相关应变定量数值。

(3) 准分布式光纤实现了对深长井筒不同深度位置间距2 m的应变信息全局把握, 实测井筒200 m深度范围内数据表明、受通风运营影响, 不同深度井壁竖向应变均受压增大, 但最大应变小于 200×10^{-6} , 与传统定点测试数据基本吻合。

(4) 机敏混凝土实现了井壁区域受力的整体自感知, 现场试验段井壁竖向应变结果表明: 不同方位受力存在差异, 最大竖向应变为 432×10^{-6} , 同样该定量数值与传统定点测试应力相关应变结果相吻合。

■ 责任编辑: 李金松

作者简介:

第一作者: 况联飞, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事深部地下工程方面的科研与教学工作。

Tel: 0516-83995678, E-mail: klfumt@126.com

作者单位: 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室; 中煤建设集团有限公司

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020ZDPYMS18)