

# 井下放水试验智能化监测分析技术架构及应用

鹿存金 边凯 王创

井下放水试验是以地下水井流理论为基础，通过观测钻孔放水时水量和水位的变化来获取水文地质参数，为评价水文地质条件、预计涌水量、分析疏干降压可行性等工作提供依据，是矿区水文地质工作中查明勘探区水文地质条件并对地下水进行定量研究的重要方法，其成果比地面钻孔抽水试验更为准确。《煤矿防治水细则（2018）》中明确规定如遇地面水文地质勘探难以查清的问题，需要在井下进行放水试验。

传统放水试验一般采用压力表、流量计、计时器等设备，由专门技术人员在现场定期进行人工数据采集，随后将数据报表汇总到地面分析人员手中绘制水量、水压随时间变化的曲线，采用稳定流或非稳定流计算公式计算导水系数、渗透系数、给水度等参数。实际放水观测过程中因放水试验历时长、数据量大，操作人员需长期值守，造成人工投入大、数据记录存在人为误差的问题，且无法实现数据的自动采集、传输和报表的自动生成；分析阶段需要将数据绘制成各种曲线并结合理论公式利用配线法、直线图解法等求取水文地质参数，工作量大且精度不高。这与智能化矿山建设背景下水害监测准确性、有效性、实用性等方面的要求存在较大差距。2020年2月，国家发改委、国家能源局等八部委联合印发了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》，明确提出了煤矿智能化发展原则、目标、任务和保障措施，地测工作作为煤矿智能化的重要组成部分，是加快煤矿智能化建设，推进煤炭行业高质量发展的重要基础保障。因此，在大数据、互联网+等新技术不断涌现的背景下，井下放水试验作为一种重要的水文地质勘查手段亟须朝着智能化方向发展。

## 井下放水试验智能化监测分析技术架构及原理

### 智能化监测分析技术架构

井下放水试验智能化监测分析技术区别于传统放水试验过程中大量使用人工进行数据采集分析的方法，在监测点布置数据遥测终端进行全过程动态监测，通过矿井现有的网络通信渠道进行数据传输，利用地面计算机处理平台对数据进行分析。

井下放水试验智能化监测分析技术主要包括硬件和软件2个部分。井下放水试验智能化监测分析技术架构如图1所示。

（1）井下放水试验智能化监测分析技术硬件包括：超声波流量计、微功耗智能压力监测终端、工艺管道、数据传输系统（有线或无线方式）、计算机等设备。其中，超声波流量计、微功耗智能压力监

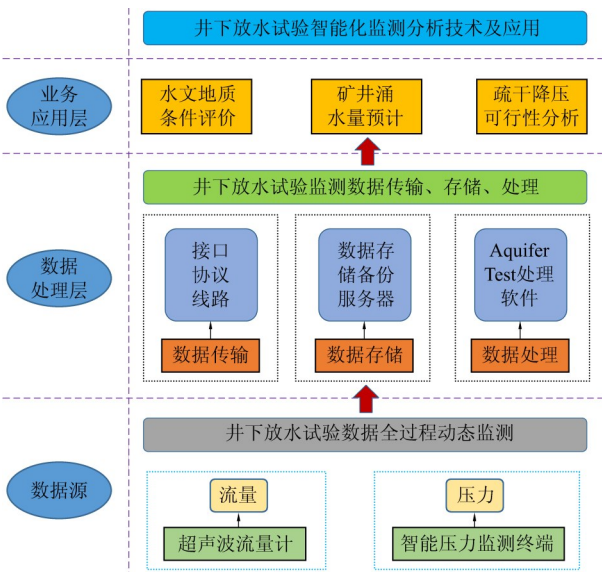


图1 井下放水试验智能化监测分析技术架构

测终端用于全过程自动监测水量和水压数据,工艺管道用于控制管道标准尺寸及安装超声波流量计外夹式传感器,数据传输系统用于数据由井下至地面的上传,计算机用于数据的存储及处理。

(2)井下水试验智能化监测分析技术软件为数据处理分析软件,用于处理井下遥测终端采集的数据,自动生成曲线图和数据报表,求取水文地质参数。

### 井下水试验智能化监测技术原理

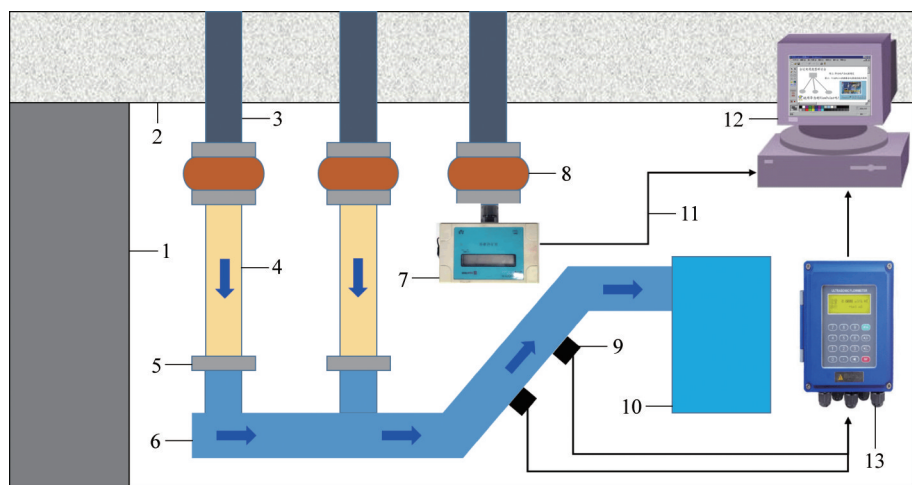
井下水试验智能化监测对象主要为放水过程中的放水孔水量和放水孔、监测孔水压,分别由超声波流量计和微功耗智能压力监测终端进行远程动态采集,按照设计的通信协议,将各监测点的水量、水压数据传输并存储到地面数据存储、备份服务器中。井下水试验智能化监测技术原理如图2所示。

外夹式或管段式超声波流量计是以“速度差法”为原理,采用先进的多脉冲技术、信号数字化处理技术及纠错技术,通过检测流体流动对超声束(或超声脉冲)的作用以测量流量。外夹式或管段式超声波流量计属于非接触式仪表,具有安装方便、宽量程比、低流量启动、精度高、低功耗、不受被测介质参数干扰等优点,另外可根据矿井工况条件选用防爆式主机。图3为TDS-100BF5型壁挂式主机+

外夹式传感器超声波流量计,适用管道口径80mm~6 000 mm(可结合放水孔数量提前加工多通工艺管道,将多个钻孔放水量集中于监测管道中),量程比为100:1,工作压力1.6 MPa,功耗小于0.1 mW,可以选用锂电池或MBUS接口外供电,断电后数据永久保存,外夹式传感器夹持部位要求高于进水口以保证介质满管。放水试验前需对主机进行标定,设置监测管直径及材质、介质类型、数据采集频率等。

微功耗智能压力监测终端是针对在恶劣环境下传感器采集数据、取电困难、传输效果差而专门研发的集测量、处理、存储、传输与显示于一体的工业级智能压力监测终端。微功耗智能压力监测终端有多种通信方式可供选择,具有数据传输稳定、电池使用寿命长、功耗低、防护等级高、安装及维护便捷等优点。图4为SSM-P208系列微功耗智能压力监测终端,设计量程10 MPa,精度为1 kPa,采用内置电池供电,本安型防爆。

超声波流量计和微功耗智能压力监测终端自钻孔开始放水时定期监测数据,直至放水试验结束,采用MODBUS等常用通信协议及GPRS通信模块,通过RS-485总线可以读取数据并发送到互联网传输至地面,无须人工现场参与,实现了整个放水试验水量及水压的全过程智能动态监测、无人值守。



1-煤层;2-巷道顶板;3-放水/监测钻孔;4-连接管路;5-法兰盘;6-多通工艺管道;7-微功耗智能压力监测终端;  
8-高压阀门;9-外夹式传感器;10-水仓;11-线缆;12-计算机;13-超声波流量计壁挂式主机

图2 井下水试验智能化监测技术原理



图3 壁挂式主机+外夹式传感器超声波流量计



图4 SSM-P208系列微功耗智能压力监测终端

井下水试验智能化分析技术原理

井下水试验智能化分析技术主要借助Aquifer Test软件。将井下监测点采集的监测孔压力数据导入软件进行处理分析，得出渗透系数、导水系数、给水度等水文地质参数。

Aquifer Test软件是由加拿大滑铁卢水文地质公司专门为水文地质学者和相关水利专家开发研制，依据不同模型的适用条件选取相应模型，通过配线法或直线图解法对抽/放水试验数据进行处理，求取水文地质参数，大幅提高了计算效率，避免了人工计算可能产生的误差，并在反复验证的过程中提高参数的准确度。

井下水试验智能化监测分析技术创新优势

相较于传统井下水试验数据采集及分析手段，智能化监测分析技术以安全和可靠为基础，依托先进的软硬件设备，有3点技术创新优势。

(1) 本质安全优势

整个放水试验过程进行智能化监测传输，除前

期设备安装、调试及阀门调节等工作投入1~2人短期现场作业外，数据采集及处理分析全部在地面完成，降低了井下工作发生事故的概率。

(2) 工作效率优势

数据智能化监测及分析可以保证数据采集的连续性及可靠性，利用较少的人员投入完成更多的数据监测处理，工作效率显著提升。

(3) 技术可靠优势

智能化监测技术实现井下水试验数据全过程连续监测、实时互联、可靠传输与存储；数据分析软件大幅减少了人为误差，提高了数据的准确性以及数据的完整性。

工程应用及效果分析

工程应用地点为宁夏固原某煤矿110504工作面。根据前期矿井水文地质类型划分报告结论，工作面直接充水含水层延安组和直罗组含水层段为极微弱—弱富水性含水层，但根据工作面井下探放水钻孔及2处同水平顶板冒落涌水情况分析，110504工作面运输巷顶板砂岩含水层富水性并不弱（钻孔最大单孔涌水量为90 m³/h），水压高（最大为1.20 MPa），工作面充水含水层水文地质条件与前期勘察结果差异较大，无法做出准确的水文地质条件评价，甚至会出现突水事故，严重威胁工作面的安全开采和矿井运行。

因此，根据前期物探及钻探资料选择在110504工作面运输巷反掘处开展井下多孔联合放水试验，采用智能化监测及分析技术，获取较为准确的水文地质参数，为矿井防治水工作提供基础数据。

井下多孔联合放水试验方案

综合考虑110504工作面地下水汇水特征、场地施工条件以及前期物探工作，主要针对110504工作面顶板延安-直罗组砂岩含水层进行混合放水试验，在110504工作面运输巷反掘处设计3个放水孔（FS1、FS2、FS3）和5个水压监测孔（G1、G2、G3、G4和反2）。



放水试验使用超声波流量计1台,备用1台;微功耗智能压力监测终端5台,备用1台。

放水流量由钻孔数量及高压阀门控制,流量由大到小依次递增并调整至稳定,全过程动态监测放水量及监测孔水压变化。放水试验方案流程如图5所示。

## 放水试验成果与分析

### (1) 放水试验成果

放水试验采用定流量放水方式,控制流量保持稳定,超声波流量计全程监测流量大小并根据变化情况进行阀门调节。

微功耗智能压力监测终端全过程监测钻孔水压变化,通过钻孔水压变化曲线(图6以G2监测孔30 m<sup>3</sup>/h流量放水过程为例)可以看出监测孔水压在放水试验初期明显下降,在2021年12月9日之后基本达到稳定。

结合放水孔流量和监测孔水压数据分析,放水试验目的层位延安-直罗组砂岩含水层为潜水含水层,符合潜水完整井非稳定井流理论,在Aquifer Test软件中选定放水流量及Neuman和Jacob公式计算。

将放水试验获得的放水量 $Q$ 、监测孔的距离 $r$ 、水位(水压)降深 $s$ 、放水时间 $t$ 、含水层厚度 $M$ 等数据导入数据处理分析软件,软件根据Neuman和Jacob公式原理,自动运用配线法和直线图解法计算含水层的给水度 $\mu$ 、导水系数 $T$ 和渗透系数 $K$ 。

以图7中G2监测孔运用Neuman配线法计算为例,求得含水层给水度 $\mu$ 为0.204,导水系数 $T$ 为75.4 m<sup>2</sup>/d,渗透系数 $K$ 为2.44 m/d。

根据井下放水试验智能化监测分析技术得出的水文地质参数,进一步计算单位涌水量 $Q$ 为1.16 L/(s·m)。按照《煤矿防治水细则(2018)》附录一富水性等级划分标准,将110504工作面5号煤层顶板延安-直罗组砂岩含水层富水性划分为强富水性。

### (2) 放水试验分析

根据本次井下放水试验得出的水文地质参数分析,含水层直接由弱富水性提升至强富水性,跨过了中等类型,结合110504工作面水文地质资料分

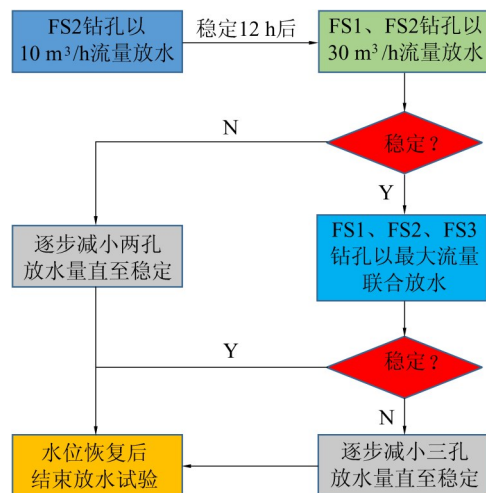


图5 放水试验方案流程

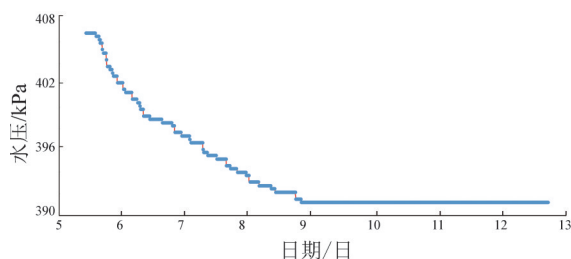


图6 G2监测孔2021年12月水压历时曲线

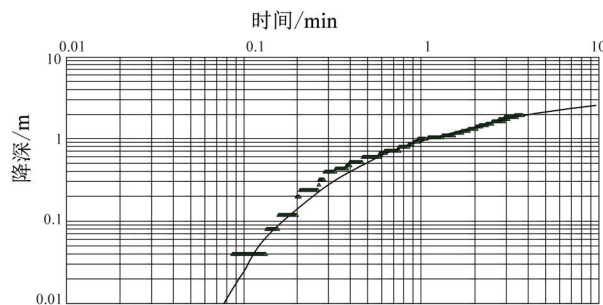


图7 G2监测孔配线法成果

析,主要有以下2点原因。

(1) 本次井下放水试验的水文地质条件与以往不同。根据矿井涌水量变化情况分析,矿井涌水量随着时间的增大趋势比较明显,如图8所示。矿井开采深度进入+1 150 m水平后,涌水量出现上升趋势;自2020年10月27日起,110504工作面开始探放水工作,矿井涌水量随即增大至550 m<sup>3</sup>/h左右,放水期间水位降深约40 m,实际涌水量平均为400 m<sup>3</sup>/h左右。

根据钻孔水压数据分析,延安-直罗组水位标高约为+1 280 m,110504工作面高位回风巷(+1 250运输大巷)标高为+1 240~+1 300 m,根据现场实

表1 地面抽水试验及井下放水试验参数计算涌水量误差分析

参数来源	计算参数				$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	与实际涌水量相比误差率%
	$K/(m \cdot d^{-1})$	$H/m$	$F/m^2$	$R_0/m$		
地面抽水试验	0.012 5	40	569 415	503	16	-96.0
井下放水试验	2.90	40	569 415	1 606	458	+14.5

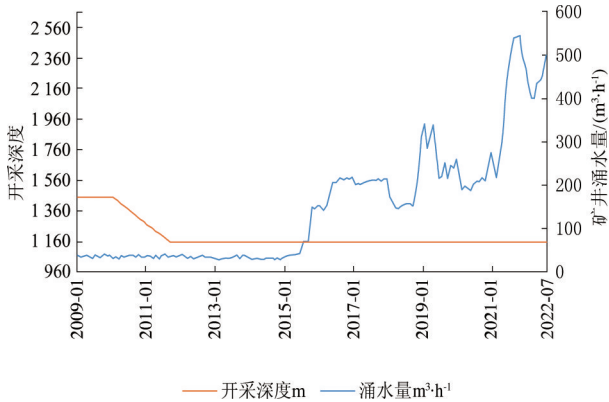


图8 矿井涌水量与开采深度及时间关系

际探查资料分析，在水位线以上回风巷处施工的探查孔钻孔无水，出水钻孔全部集中在水位线以下的运输巷，且探查孔出现涌水溃砂现象，煤层顶板赋存厚度为8~40 m且分布不均、胶结程度较差的富水砂体。

综合判定110504工作面为矿井首个进入水位线以下生产的工作面，水文地质条件与以往相比更加复杂，受水害威胁愈加严重。

(2) 水文地质参数获取方法更加合理。前期地面钻孔抽水试验常因使用“提桶法”或因孔深较大、抽水困难等因素造成误差较大，而抽水试验得出的结果受渗透系数强度效应的影响一般较小。井下放水试验相较于地面抽水试验流量、降深更大，与开采条件更相似，能更大幅度地改变地下水流场，尽可能地暴露含水层实际水文地质条件，且本次放水试验采用的智能化监测分析技术能够较好地避免人为误差。

为了进一步验证本次放水试验成果的可靠性，运用大井法分别选取抽水试验及放水试验求取的水文地质参数 $K$ （渗透系数）、 $H$ （降深）、 $F$ （回采面积）及 $R_0$ （引用半径）计算工作面涌水量 $Q$ ，并与工作面实际出水情况（平均400 m³/h）对比。地面

抽水试验及井下放水试验参数计算涌水量误差分析见表1。利用地面抽水试验参数计算的涌水量比实际涌水量偏小约96%；而利用放水试验参数计算的涌水量比实际涌水量偏大约14.5%，相对比较接近。

综上所述，本次放水试验成果与现场采掘揭露情况相近，为下一步进行工作面涌水量预计、疏干降压可行性分析、突水溃砂评价、排水系统改造升级、地面污水处理厂扩能等工作提供了较为准确的基础数据，避免了因采用地面勘查数据计算结果不准确，导致发生水害的可能。

结 语

井下放水试验智能化监测分析是煤矿智能化建设的内在要求，是传统水害防治技术数字化、智能化转型的重要组成部分，基本实现了放水试验过程的减人、增安、提效。

笔者提出的井下放水试验智能化监测分析技术架构实现了数据遥测终端全过程动态监测、井下-地面数据传输、试验数据计算机存储处理分析，以其本质安全、工作效率高、技术可靠性强等优势提升了放水试验的智能化水平。此外，通过工程应用验证了智能化监测分析技术的可靠性，求取的渗透系数及单位涌水量等水文地质参数准确度更高，为矿井防治水工作提供了基础保障。

■ 助理编辑：戴春雷

● 作者简介：

第一作者：鹿存金，博士，中国矿业大学师资博士后，主要从事水文地质及煤矿防治水研究。E-mail: tshjlej@126.com

● 作者单位：中国矿业大学资源与地球科学学院