

# 偶极横波远探测测井技术在储气库井测井中的应用展望

万初坤

中石化经纬有限公司胜利测井公司, 中国·山东 东营 257096

**摘要:** 油气藏型与盐穴型储气库井测井旨在识别井筒周边岩性、计算孔隙度与渗透率, 但远地层岩性仅可依据均质模型推测, 难以精细描绘远地层缝洞与边界。储气库密封性依赖于岩层地质安全。通过概述声波远探测测井的原理和发展, 以及胜利测井公司 RMAC 偶极横波远探测测井仪的研制和应用情况, 对盐穴储气库井进行偶极横波远探测测井进行了展望。通过横波速度公式和弹性力学的理论公式推导出盐岩地层横波的传播速度为 2325m/s, 确定盐岩地层为快地层, 从而证明偶极横波远探测测井在理论上可以在盐岩地层中取得较好的测井结果。

**关键词:** 储气库测井; 偶极横波远探测; 边界识别; 盐岩横波速度

## Prospects for the Application of Dipole Shear Wave Remote Detection Logging Technology in Gas Storage Well Logging

Wan Chukun

Sinopec Jingwei Co., Ltd. Shengli Well Logging Company, Dongying, Shandong, 257096, China

**Abstract:** The logging of oil and gas reservoir type and salt cavern type gas storage wells aims to identify the lithology around the wellbore, calculate porosity and permeability, but the lithology of the remote formation can only be inferred based on homogeneous models, making it difficult to accurately depict the fractures and boundaries of the remote formation. The sealing of gas storage facilities depends on the geological safety of rock formations. By summarizing the principle and development of acoustic remote detection logging, as well as the development and application of RMAC dipole shear wave remote detection logging tool by Shengli Logging Company, the prospects for dipole shear wave remote detection logging of salt cavern gas storage wells are discussed. The propagation velocity of transverse waves in salt rock formations is derived to be 2325m/s through the formula of transverse wave velocity and the theoretical formula of elastic mechanics. It is determined that the salt rock formations are fast formations, thus proving that dipole transverse wave remote detection logging can theoretically achieve good logging results in salt rock formations.

**Keywords:** Gas storage logging; Dipole transverse wave remote detection; Boundary recognition; Salt rock transverse wave velocity

## 0 前言

无论是油气藏型还是盐穴型储气井, 测井的主要目的是识别储层井筒周围岩层的岩性, 并计算出孔隙度、渗透率等数据, 而井筒以远地层的岩性情况只能依据均质地层模型推论, 在分析地质构造上通常的方法是通过录井、地震、测井等资料综合解释, 对井筒以远地层的情况如缝洞和具体圈闭边界无法精细刻画。而储气库的密封安全性取决于围岩的地质结构的安全性。随着测井技术的发展, 偶极横波远探测测井技术发展成熟, 在快地层中可以对井外 80m 范围内地质异常体进行成像, 弥补了井筒以远地层信息无法获取的不足。

## 1 声波远探测测井原理和发展简述

### 1.1 测量的基本原理

声波远探测是远探测声波反射波成像测井的一种, 测量的主要目的是用反射波对地层的反射面进行成像。根据成像所利用反射波性质不同, 声波远探测技术又分反射纵波成

像(主要针对单极子)和反射横波成像(主要针对偶极子)。当仪器上的声源被激发时, 其声源产生的一类能量波辐射到井外, 在地层中被地质构造界面反射的声波回到井中并被仪器的接收器所接收。通过对这些全波信号进行偏移处理, 可以对井周围的地层构造进行声波成像, 并获得井旁地质构造信息, 其识别井旁裂缝及构造体等方面具有重要作用<sup>[1]</sup>。单极子测井无法记录软地层的横波信息。偶极子测井中因为反射横波对流体有更好的探测能力, 且偶极子的偏振特性, 能够形成不同走向的地质异常体成像图, 以及反射波信噪比更强, 偶极子反射横波远探测与单极子反射纵波远探测相比具有明显的优势。

### 1.2 声波远探测发展概述

偶极子横波远探测在国外首先提出, 但却是在中国快速发展完善的。

中国石油大学(华东)提出控制声源频率低于弯曲波截止频率设计远探测仪器(唐晓明等, 2013), 并确立偶极

子反射横波远探测的关键参数(唐晓明等, 2012—2013)<sup>[2]</sup>。其他机构针对现有问题, 研究了三分量传感器方法(官昊等, 2013)和相控三维 SH 横波远探测理论(王瑞甲等, 2015)。中国企业在仪器研发和处理方法上领先, 中石油侧重方法和软件开发(马修刚, 2014), 中海油研究成像特征并研发仪器, 实现井外 70m 裂缝成像与解释(郝仲田等, 2014; 张聪慧等, 2017)。

中石化胜利测井公司一方面利用现有仪器进行了裂缝和溶蚀孔洞远探测特征描述和识别(许孝凯等, 2015), 一方面研发多分量横波远探测成像测井仪进行反射横波超远距离探测, 对井外 80m 范围内地质异常体进行成像<sup>[3]</sup>。

## 2 胜利测井公司 RMAC 偶极横波远探测测井仪简介

中石化经纬有限公司胜利测井公司研制的偶极横波远探测测井仪器 RMAC, 采用低频率偶极声源及独特的声系采集结构, 偶极发射换能器频率范围 1~4KHz; 在快地层中可探测井外 80m 异常体(见图 1)。由于偶极横波测量具有偏振方向的特点, 因而可以确定井外反射体的走向与倾角。从而实现了声波测井探测范围从零点几米到近百米的飞跃, 大大增大了测井探测地层的体积范围。

多油田多口井偶极横波远探测的施工, 明确了该技术的主要作用。

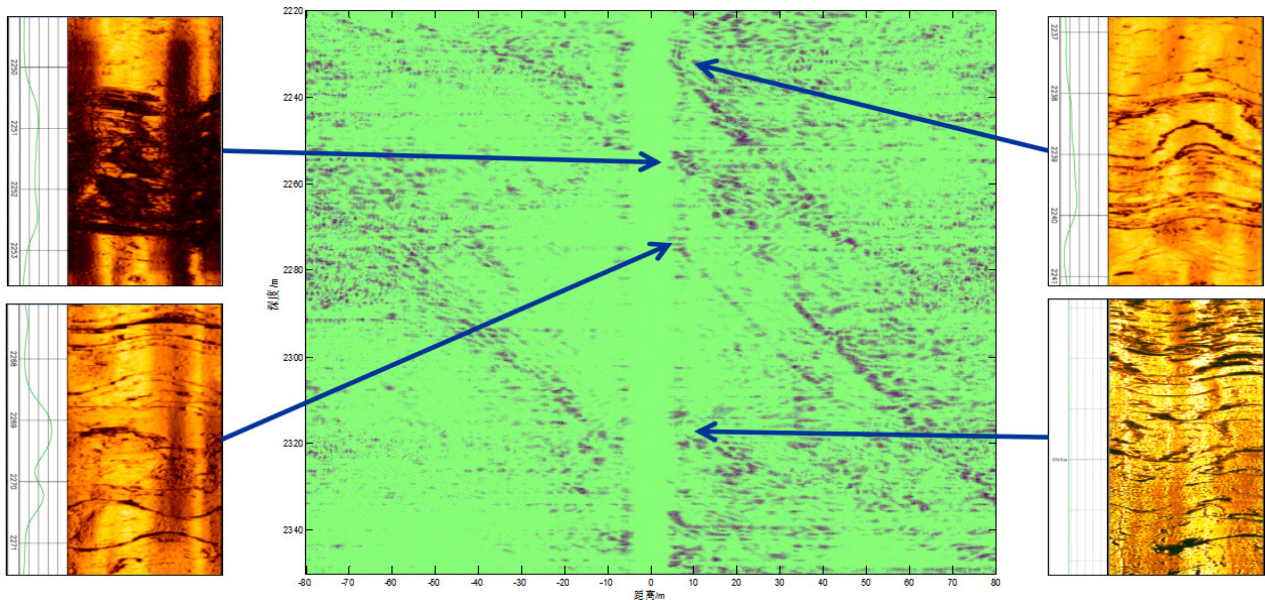


图 1 G8 井探测到井旁 80m 内裂缝发育及延伸情况

### 2.1 井筒及以远地质异常体精细描述

通过专用软件进行处理解释, 可实现对井内裂缝及溶蚀孔洞的延伸情况、组合关系及有效性进行评价, 可对井外存在的裂缝及溶蚀孔洞进行识别, 并可确定裂缝的走向及倾角的功能。还可以帮助解决水平井地层边界识别、地下储气库描述等相关地质难题。

### 2.2 提升井震结合水平

偶极横波远探测测井与地震资料的结合, 可进一步提升油气储集体横向描述能力和精度, 为缝洞型油气田的开发方案优化设计提供技术支持。

### 2.3 支持和优化钻井设计

通过对缝洞类储层的有效性评价、井旁甜点识别, 为压裂改造选层和侧钻井方案制定等提供依据。

RMAC 在中石化西北、胜利、勘探分公司、中石油冀东等油田累计完成 20 余口井的测井施工, 创远探测测井最远纪录(GX, 80m)、远探测测井最深纪录(TPX,

7148m), 并首次应用于页岩气水平井(DYX 侧钻水平井), 涉及火成岩、碳酸盐岩、页岩、致密砂岩等储层类型, 见到良好应用效果, 实现了生产与科研紧密结合(见图 2、图 3)。

## 3 偶极横波远探测测井技术对储气库井的应用展望

偶极横波远探测测井技术是被视为“透过井, 往远看”发现远地层隐蔽地质异常体的亮点技术。实现了测井由“一孔之见”到“一孔远见”的变革。在碳酸盐岩、火成岩、变质岩等复杂缝洞型油气藏、非常规油气的勘探开发中有明显效果。根据偶极横波远探测技术的原理和技术性能, 在储气库井的测井中也应有较好的应用效果。下面分析下不同类型储气库井中, 偶极横波远探测测井技术的应用展望。

通常地下储气库分类方式较多, 根据储层岩石类型可分为三类: 盐岩储层, 碳酸盐岩储层, 砂岩储层。

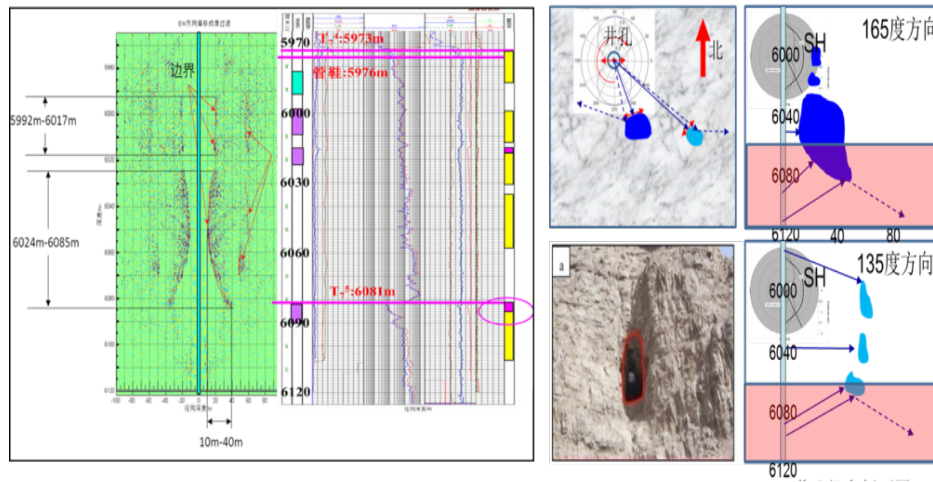


图 2 应用实例

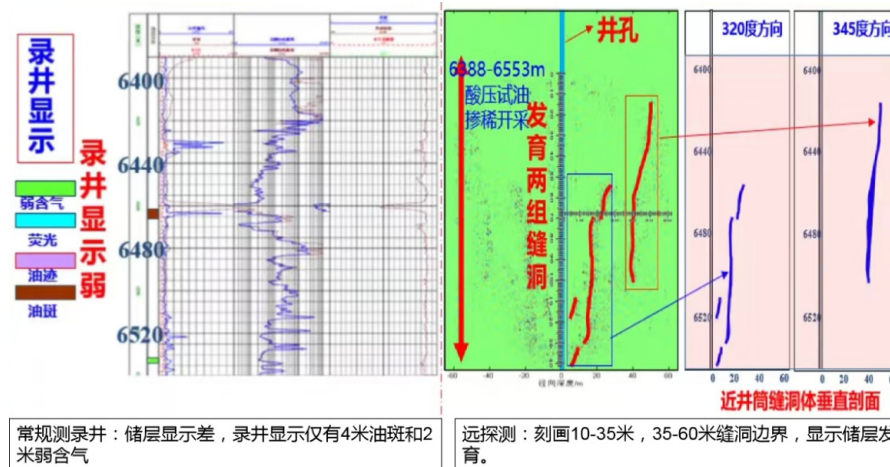


图 3 资料对比

### 3.1 盐岩储层

盐穴储气库因盐岩具有非常低的渗透特性与良好的蠕变行为，其力学性能较为稳定等特性，成为优良的天然气地下储存介质。但通常在层状盐岩层中会出现不同岩性的夹层或盐岩地层界面<sup>[4]</sup>。盐穴储气库井在卤水溶腔之前，常规测井方法无法可靠获知溶腔区域的地层地质情况，溶腔区域内是否有与外部地层连通的夹层、裂缝、盐岩地层界面开裂等关系到盐穴储气库密封的安全。

在已知的公开文献中尚未有关于盐岩横波的研究。根据横波原理，横波速度  $V_s$  与介质切变模量  $G$  以及介质的密度  $\rho$  有关。公式为：

$$V_s = (G / \rho)^{0.5}$$

又知切变模量  $G$  和弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$  之间的关系按弹性力学的理论公式表示为：

$$G = E / 2 * (1 + \mu)$$

在中国金坛盐岩储气库的盐岩力学试验中，测得盐岩弹性模量  $E$  为 18000Mpa，泊松比  $\mu$  为 0.3，盐岩的密度为 2.165g/cm<sup>3</sup>（见表 1）。

表 1 金坛储气库基本力学参数<sup>[5]</sup>

岩性	弹模 / MPa	泊松比	内聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)	容重 / MPa
泥岩	10000	0.3	4.35	30	0.0235
盐岩	18000	0.3	—	—	0.0222
泥岩夹层	4000	0.3	—	—	0.0235

因此，可以通过公式得出横波在盐岩中的速度约为 2325m/s，大于地层流体的声波速度 1500m/s。地层横波速度大于井内流体声波速度被称为快速地层，也叫硬地层。这也说明偶极横波远探测测井可以在盐岩地层中应用。

在盐岩地层中，偶极横波远探测可以探测的较远，因此通过偶极横波远探测测井，识别井筒周围盐层几十米内的夹层、裂缝、断层和圈闭边界，识别盖层断裂，在理论上会有较好的应用。

### 3.2 碳酸盐岩储层

碳酸盐岩大多坚硬、致密，储渗空间为孔隙、裂缝和孔洞，地层因缝隙孔洞发育，可以作为储气库良好的存储介质。建库前地层流体的复杂分布大大增加了储气库高速注

采有效库容量、工作气量、井注采气能力等关键指标设计难度<sup>[6]</sup>。偶极横波远探测已经在多油田的多口井碳酸盐岩储层取得了较好的应用成果,可以对储层内的缝洞和方位探测清楚。通过对储气库井筒周围远地层偶极横波远探测成像可识别界山、裂缝和溶蚀孔洞发育等相关储层信息,摸清井周流体分布、走向,对射孔及酸化压裂提供指导,以建立高效可靠的注采气能力。

储气库的盖层是否存在断裂、盖层岩性是否均一等对气库是否密封起着重要作用。远探测技术能探测识别到探测范围内储层外地层边界和断层分布,边界是否存在可疑裂缝,对建库评价和设计、后续井钻孔的分布有指导意义。

碳酸盐岩储层采用水平井设计,钻遇的缝洞可能性大于直井,在理论上会比直井的储气量大 3~5 倍,因此碳酸盐岩储气库井采用水平井设计的较多。通过偶极横波远探测测井,识别水平井井眼中地层边界,储层厚度,评价出井眼轨迹在储集层中的相对位置,识别盖层中是否有断裂,进行井眼平面和垂向位置优化,对后续其他水平钻孔的轨迹设计有指导意义。

### 3.3 砂岩储层

在浅部砂岩储层中孔隙分布均匀,孔隙较大,渗透率好,是较好的储气库建设方案。然而在浅部砂岩储层,孔隙中充填流体,因横波较难通过流体传播,因此在压实较疏松的浅部砂泥岩剖面中,偶极横波远探测不能有较好的应用(单极子纵波可通过流体在慢地层中传播,探测范围可以达到 3~10m)。深部致密砂岩属低孔低渗储层,在塔河油田有成功应用的实例,但因为地层孔隙小,渗透率低,达不到储气库井快速高强度注采气的要求。

## 4 结论

①通过横波速度公式和弹性力学的理论公式推导出盐岩地层横波的传播速度为 2325m/s,确定盐岩地层为快地层,从而证明偶极横波远探测测井理论上可以在盐岩地层中取得较好的测井结果。②偶极横波远探测测井技术的应用场景可以推进到储气库井快地层储层的测井应用中,综合录井、地震、测井和声波远探测等资料信息,可以为地下储气库的地质安全、储盖层评价,和库容、注采能力等进行描述。指导区域井位布局和井身轨迹设计,对碳酸盐岩储层射孔和压裂进行指导,对盐穴储气库溶腔前的安全评价具有一定意义。③浅部疏松砂岩储层进行偶极横波远探测,因流体不传递横波而有局限性。④偶极横波远探测是一种新发展起来的成像测井技术,在不同地质地层条件下的测井场景中还需要进一步的探索,发展出一整套适合储气库井不同储层的评价和描述方法。

### 参考文献:

- [1] 柴细元,张文瑞,王贵清.远探测声波反射波成像测井技术[J].测井技术,2009(6).
- [2] 魏周拓,唐晓明,陈雪莲.井中偶极声源激励下的反射声场影响因素分析及仪器关键参数优选[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013(6).
- [3] 董经利,许孝凯,张晋言,等.声波远探测技术概述及发展[J].地球物理学进展,2020,35(2).
- [4] 陈晓源.江汉盐穴储气库密封测试方法研究[J].江汉石油职工大学学报,2010,23(4).
- [5] 王冠,谢凌志,侯正猛,等.岩盐三轴压缩试验方法及数据处理方式的对比研究[J].岩土力学,2014(2).
- [6] 先智伟,谢箴.地下储气库的地质条件要求和选型[J].天然气与石油,2004,22(2).