

油水井电磁探伤技术与应用

电磁探伤测井技术是根据电磁感应原理检测井下套管的技术状况，确定套管的厚度、裂缝、变形、错断、内外壁腐蚀及射孔质量，可定性定量评价井下套管质量分布，以指导作业工艺方案的制定。根据瞬变电磁法的检测原理和特点，设计了套管检测系统的总体结构方案；探伤仪三个电磁探头通过X、Y和Z三轴向排布设计，测试时在井下套管中产生纵向涡电流和径向环电流，实现了对所测井段信息的全方位覆盖；并运用反演算法与快速解释方法实现了对套管完整性和损伤形态的快速准确描述。此外，该技术采用非接触式连续快速测量的方式，在油田大规模套损普查方面更具优势，胜利工程院研发的电磁探伤测井技术现已在胜利油田现场成功应用120余井次，测试施工成功率达96%，解释准确度符合率达95%以上。

刘红兰/中石化胜利油田石油工程技术研究院

0 引言

油水井套管损伤（以下简称套损）直接影响井内安全和油气开采效果，目前常用的套损检测方法有印模法、井温及同位素检测法、多臂井径测井法、超声波彩色成像测井法和磁测井法^[1]，但受结构和测量原理的限制，存在只能探测套管内壁信息、受井液环境影响大或测试速度慢等问题。电磁探伤测井技术在定量检测套损形态方面有更大的优势，具有可测取套管壁厚变化及外壁信息、定量评价和快速测试等优点，测量准确度高，操作安全可靠快捷，同时具有很强的实用性。

1 电磁探伤检测方法

1.1 瞬变电磁法套损检测原理

电磁探伤仪是应用法拉第电磁感应定律原理^[2]，以瞬变电磁法为理论基础进

行设计的。该仪器由发射系统和接收系统两部分组成，工作过程分为发射、电磁感应和接收三部分。发射电流为双极性电流脉冲，采用正负间断方式脉冲发射，具有瞬时和平面波场的特点^[3]。

利用瞬变电磁原理对生产井进行套损检测，其测井物理理论模型如图1所示。在直流脉冲电流关断瞬间，其周围产生一次场，然后磁场衰减在井下套管中产生纵向涡电流和径向环电流；由于感应电流随时间变化，在其周围又产生按指数规律随时间衰减的二次磁场，接收线圈检测感应电动势 ϵ 。发射电流关断后由于一次场不断衰减且趋于消失，仅有二次感应电流磁场相互作用，同时二次场的传播衰减速率与套管形状、电导率等信息有关，当套管发生变形、腐蚀、孔洞和裂缝等损伤时，将部分或全部切断感应电流的通路，改变感应电动势 ϵ 的幅度，再通过解释程序对测取数据进行显示、分析和处理，就可定性定量地判断套损状态。

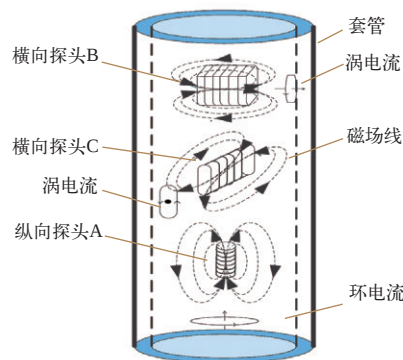


图1 瞬变电磁测井物理模型

1.2 瞬变电磁法套损检测技术特点

瞬变电磁法套损检测时，观测是在



刘红兰/高级工程师

关键词/Keywords

瞬变电磁法 ·
套管损伤 ·
快速测试 ·
定量评价 ·
反演解释 ·

脉冲间歇中进行的,且只测量关断后期的纯二次场数据,由此该技术具有以下主要特点。

1) 具有更强的探测能力。测量纯二次场信息,排除了一次场干扰,减少了对检测对象产生异常响应的分析,分辨率高,加大发射功率即可直接提高探测能力。

2) 具有更高的观测准确度。单脉冲激发可得到包含更多信息的整条瞬变磁场的衰减曲线,通过多次叠加可大幅提高信噪比,同时提高了观测准确度。

3) 具有更广的适应性。采用非接触式连续快速测试,现场检测操作简单可靠,测试效率高。

2 电磁探伤仪的结构及功能特点

油水井套管电磁探伤技术属于工程测试中的磁测井系列,其系统结构组成如图2a所示,电磁探伤仪由测试绞车控制起下,各磁探头测取套管的相关信息数据,通过配套单芯电缆传至地面数据处理装置,并以图像方式实时显示。现场测试完毕后通过解释软件进行解释分析,完成套管质量的分布测试报告。

电磁探伤仪仪器结构如图2b所示,整个仪器主要由X、Y和Z三轴向电磁探头(纵向长探头A、横向探头B和横向探头C)以及上下扶正器组成,另外还附加了伽马和温度两个探头,各电路模块穿插在各个探头之间。其中纵向长探头A探测范围较大,主要用于测量套管厚度、纵向裂缝和腐蚀情况。而横向短探头B、C主要用于探测套管的横缝、射孔和腐蚀^[4]。通过磁探头三轴向排布设计,

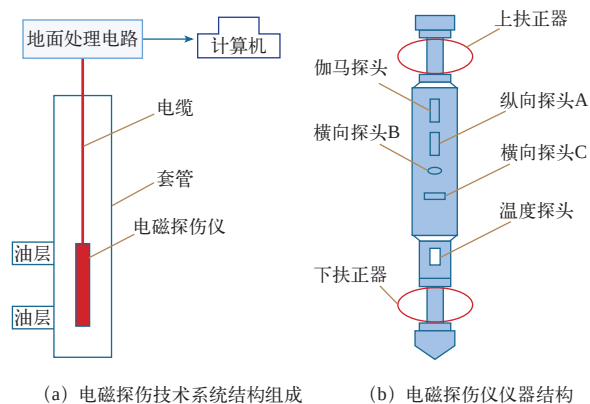


图2 电磁探伤技术系统及仪器示意图

实现了对所测井段信息的全方位覆盖。温度探头用来检测井内流体温度场的变化;伽马探头用来探测井身周围自然伽马强度,即用于校深;上下扶正器保持仪器在套管中居中,起到扶正作用。

3 测试数据反演解释

3.1 数据解释原理

在采用迭代法求解泛函极值的反演方法中,需通过正演模型分析确定正演算子并构造泛函模型,以进行后续的反演计算。套损检测中,柱状对称模型下纵向探头的时域响应函数为

$$U(t) = f(\sigma, \mu, T, D) \quad (1)$$

那么在该响应的各采样时间点 t_j ($j=1, \dots, 10$ 为采样点的序数)处令

$$f_j(\sigma, \mu, T, D) = U(t_j) \quad (2)$$

即将各采样通道的时域响应理论值表示为套管电磁特性参数 σ 、 μ 和形状位置参数 T 、 D 的多元函数;对于长探头的任意一个时域响应 $x(t)$,设其实际采样点幅值为 $x_j = x(t_j)$,于是各采样点信号幅值构成一个测试矢量,即

$$\mathbf{x} = \{x_j\} \quad j=1, 2, \dots, 10 \quad (3)$$

根据最小二乘准则构造出泛函表达式为

$$\min F(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \min \sum_{j=1}^{10} [f_j(\sigma, \mu, T, D) - x_j]^2 \quad (4)$$

采用泛函极值方法求解,得到 f_j 与实际测量值偏差最小的参数集合 $(\sigma^*, \mu^*, T^*, D^*)$,并作为套管物理状态的完全描述。

3.2 反演算法与快速解释方法

在时域响应 $U(t)$ 的计算中,壁厚(即变换后的等效壁厚 T_e)及其他变量 σ 、 μ 和 D 出现在柱面波函数的宗量以及确定待定系数的边界条件和递推关系中,与 $U(t)$ 形成一种复杂的非线性关系。对于瞬变电磁法套管壁厚的反演问题,主要以Rosenbrock算法^[5](转轴探测法)的步骤为例:

1) 设定初始点 $\mathbf{x}^{(0)}$, n 个标准正交化的初始矢量组 $\{\mathbf{d}^1, \dots, \mathbf{d}^n\}_0$,各探测方向上初始步长 $\delta^0 = (\delta_1^0, \delta_2^0, \dots, \delta_n^0)^T > 0$,步长增大系数 $\alpha > 1$,步长收缩系数 $\beta \in (0, 1)$ 及收敛准确度 $\varepsilon > 0$,置 $k=0$ 。

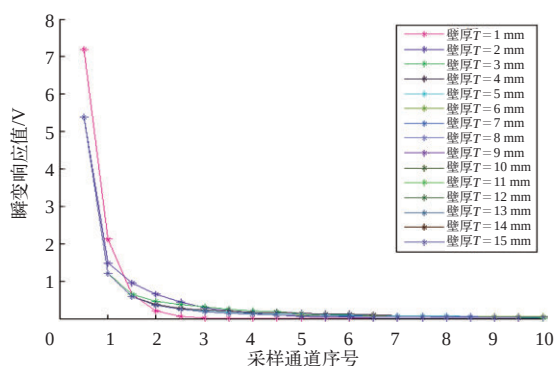
2) 令 $\mathbf{y} = \mathbf{x}^k$ 。

3) 从 $\mathbf{y}$ 出发, 做平行于矢量组 $\{\mathbf{d}^1, \dots, \mathbf{d}^n\}_k$ 的反复轴向探测移动。若 $f(\mathbf{y} + \delta_j^k \mathbf{d}^j) \leq f(\mathbf{y})$, 则令 $\mathbf{y} = \mathbf{y} + \delta_j^k \mathbf{d}^j$, $\delta_j^k = \alpha \delta_j^k$, 加大探测步长; 若 $f(\mathbf{y} + \delta_j^k \mathbf{d}^j) > f(\mathbf{y})$, 则令 $\mathbf{y} = \mathbf{y}$, $\delta_j^k = -\beta \delta_j^k$, 反向探测并减小步长, 直到 n 个方向 $\mathbf{d}^j (j=1, 2, \dots, n)$ 都搜索失败, $\mathbf{y}$ 为当前探测方向集合下的最小值。

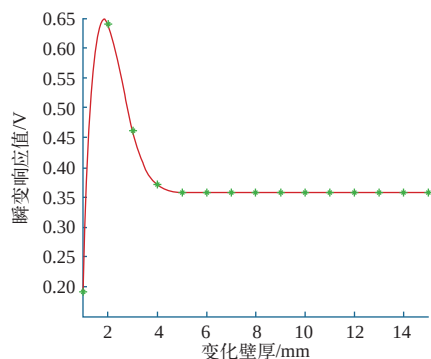
4) 令 $\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{y}$, 若 $\|\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^k\| \leq \varepsilon$, 则停止迭代输出 $\mathbf{x}^{k+1}$, 否则转5)。

5) 令 $\mathbf{d}^0 = \mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^k$, 建立新的标准正交化矢量组 $\{\mathbf{d}^1, \dots, \mathbf{d}^n\}_{k+1}$, 令 $\delta^{k+1} = \delta^0$, $k = k + 1$ 转2)。

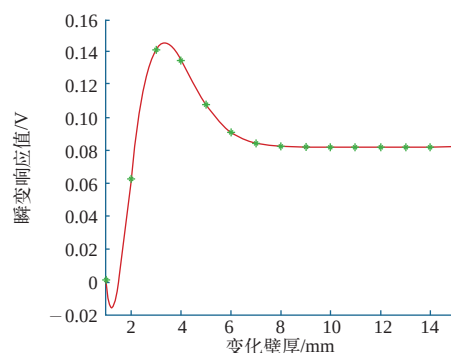
该法是在求解空间的当前点构造 n 个正交方向, 然后在每个方向进行探测移动, 找到函数值下降最快的方向, 移动某个步长, 再在新点构造新的 n 个正交方向(如利用矩阵的QR分解), 再次循环查找直至求得收敛的极小值解 $\mathbf{x}^*$ 。由于并未用到梯度来确定搜索方向, 避免了正向算子做微分运算引起的数值不稳定性。以下结合磁偶极子发射模型正演仿真的数据结果, 说明上述方法实施壁厚反演计算的有效性, 对比结果如图3所示。



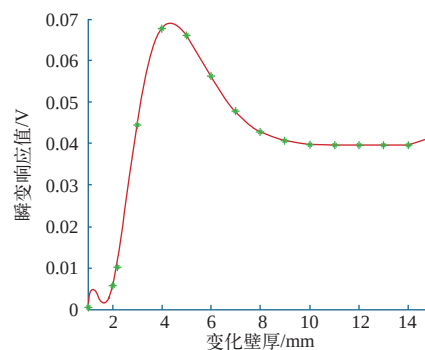
(a) 不同壁厚下(1~15 mm)的仿真瞬变响应对比



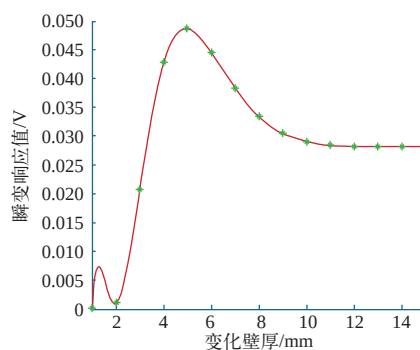
(b) 第2采样通道的剖面电压曲线



(c) 第5采样通道的剖面电压曲线



(d) 第8采样通道的剖面电压曲线



(e) 第10采样通道的剖面电压曲线

图3 磁偶极子发射模型下正演仿真与剖面电压曲线

图3b~e以图3a不同壁厚下的瞬变响应仿真计算结果为基础, 分别选取4个采样通道, 并将各通道下不同壁厚的离散仿真结果采用插值方法描绘剖面电压曲线。通过试验测定该曲线时, 按上述方法进行拟合近似得到模型函数。

该快速解释方法实际上是瞬态响应的指数拟合, 即在瞬变信号的衰减晚期, 信号幅值约以指数规律递减(二次场正向波解系数 $K_p(x)$ 在大宗量 x 时的渐进式为负指数函数), 而套管壁厚与指数律的衰减快慢直接相关。该解释方法得到的套管

壁厚数据偏差率在可接受的范围,能对管壁完整性和套损形态作出快速准确描述和评价。

4 现场测试

至2015年12月,由胜利工程院研发的电磁探伤测井技术在胜利油田油水井现场测试120余井次,并通过封隔器验套、40臂井径仪测井技术和作业措施效果等方式验证了电磁探伤测试的准确性和先进性,现场测试施工成功率达96%,解释准确度符合率达95%以上。

4.1 临106-斜17油井探伤测试

临106-斜17油井套管外径139.7 mm,井深2 667 m,套管壁厚7.72 mm/9.17 mm(该井部分井段两种不同壁厚套管交替联入)。2015年10月29日分别进行了电磁探伤测试和40臂井径仪测试。电磁探伤测试全井段测速为600 m/h,最高井温132 ℃,仪器稳定可靠,数据曲线完整清晰,较40臂测试技术300 m/h测速有了很大提高,实现了油水井套损快速检测。

(1) 套漏井段检测

由该井测取的电磁探伤测井资料(见图3)可知:在井下1 267 m和1 272 m处探测信号曲线幅值同时降低,经反演解释判定,在1 267 m处存在约1 mm的扩径,在1 272 m处则为直径约12 mm的孔洞损伤。而如图4所示,从40臂测井资料上也可得出,在1 271~1 272 m处存在孔洞套损,在1 267 m附近则未有套损显示。

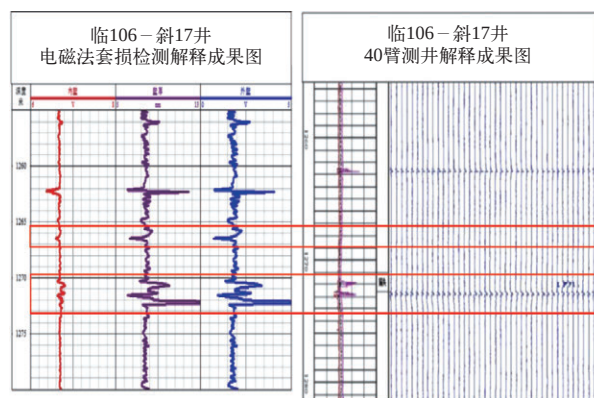


图4 LPL106-X17电磁探伤与40臂井径测试套漏段对比

(2) 套管壁厚变化段检测

如图5所示,从选取的1 540~1 580 m井段测试资料可知:该井井下1 560~1 570 m井段套管(为一整根套管)信息曲线异常变化,电压幅值大幅降低。40臂测井因只能测取套管内壁信息,则易解释该井段为扩径;电磁探伤技术则可完整地解释出此根套管外径未变,仍为139.7 mm,此根套管壁厚为7.72 mm,而其他套管壁厚为9.17 mm,该井从井下1 500 m开始,整体采用两根9.17 mm壁厚套管与一根7.72 mm壁厚套管交替联入的方式完井。由此可知,电磁探伤技术较40臂测井能更直观定量地评价出套管壁厚变化分布,可为下步工艺措施的制定提供可靠依据。

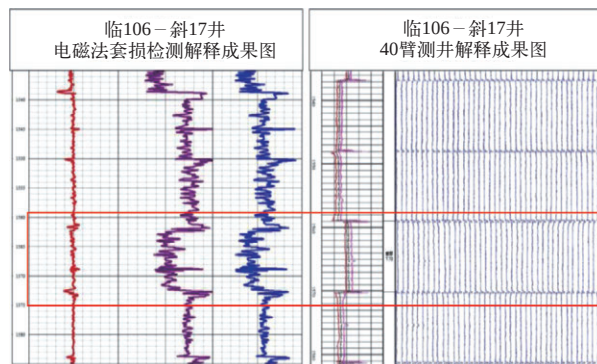


图5 LPL106-X17电磁探伤与40臂井径测试套管壁厚变化井段对比

两种套损检测技术所显示出的该井套管质量分布结论基本一致,解释准确度符合率很高,验证了电磁探伤测井技术对不同套损形态的探测分辨能力,而该技术较40臂测井在套损定量评价和快速检测方面更具优势。

4.2 辛70-10注水井探伤测试

辛70-10注水井套管外径139.7 mm,套管壁厚7.72 mm,套管深度2 361.99 m,2014年12月该井注水压力由日常的11 MPa突降至4 MPa,怀疑出现套漏。于2014年12月22日进行了电磁探伤测试,测试结果如图6所示,在井下1 719 m和1 743 m处,早中晚信号均异常突变,曲线幅值同时降低(左偏),且抖动异常明显。经反演解释,在1 719 m处为直径约10 mm的孔洞,在1 743 m处为约长

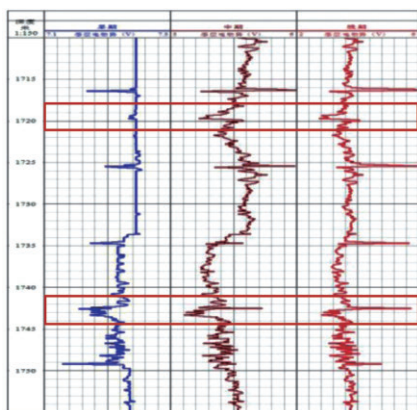


图6 DDX70-10井套损段测试曲线

13 mm、宽11 mm的近似方形破损。

为验证电磁探伤技术的准确性和实用性,对该井实施了封隔器验套工艺,得出串点为井下1 710~1 760 m范围。进行注水泥封串层措施作业后,该井套压、油压和日注水量恢复正常,如图7所示,验证了电磁法套损检测技术在现场测试的准确性和实用性。

5 结束语

1) 电磁探伤测井技术应用电磁感应原理,能

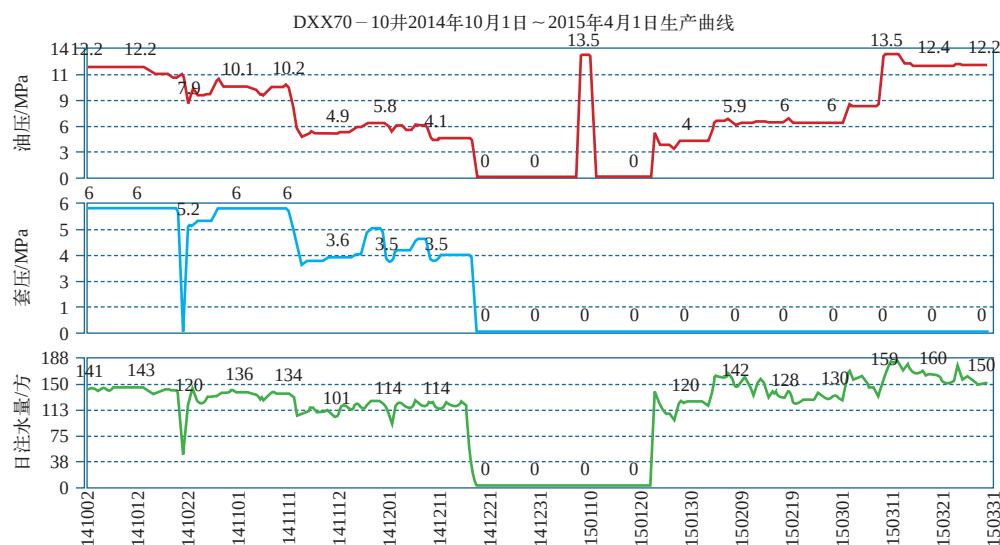


图7 DDX70-10井2014年10月1日~2015年4月1日生产曲线

够定性定量评价不同类型的套管损伤,达到了套管孔洞最小探测直径10 mm、壁厚分辨率1 mm的技术水平,且解释准确度符合率达95%以上。

2) 电磁探伤仪采用非接触连续测量的方式测试,测速达600 m/h,实现了油水井全井段套损快速检测。

3) 电测探伤测井技术可及时发现井下套管质量分布,为实现套损普查和数字化油田建设提供了技术支撑,同时为下步单井精细管理方案的制定提供了依据。

参考文献

[1] 孙彦才,郑华,崔艳辉.多层管柱电磁探伤测井

技术[J].测井技术,2003,27(3):246-249.

[2] 李强. MID-K电磁探伤成像测井仪在长庆油田的应用[J].测井技术,2007,31(4):373-379.

[3] 嵇艳鞠.浅层高分辨率全程瞬变电磁系统中全程二次场提取技术研究[D].长春:吉林大学,2004.

[4] 谢荣华.检查套管损伤的电磁探伤测井方法及应用[J].测井技术,2003,27(3):242-245.

[5] 张钟俊,华兆麟,吴修敬. Rosenbrock最小实现算法的改进与发展[J].应用科学学报,1983,1(1):33-42.

(收稿日期:2017-07-03) EA