

# 第一篇 MAK—2声波水泥胶结测井仪 测井及解释方法

在俄罗斯，声波方法是检查水泥胶结质量的主要方法之一。80年代，在石油天然气工业部的地球物理企业中，УЗБА—21和УЗБА—21А仪器形成了声波方法检测水泥胶结质量的基本生产规模，在80年代末，国家停止了这种仪器的供应。MAK—2声波测井仪在前全苏石油矿场地球物理研究所制造，替代УЗБА—21和УЗБА—21А仪器并成功地通过了1989年国家鉴定，目前前全苏石油矿场地球物理研究所和乌法地球物理仪器生产联合体能够批量生产这种仪器。

MAK—2声波测井仪具有测量参数多、解释方法新颖等特点，能够较好地评价水泥胶结状况，其参数提取方法和解释思路对于发展我国的声波测井技术有一定借鉴价值。

以下将系统地介绍 MAK—2声波测井仪器的物理基础、仪器校验方法、井下测量及解释方法。

## 第一章 用MAK—2声波测井仪检测水泥胶结 质量的物理基础

### 第一节 固井常识

一、固井包括往井下下套管和封固套管，其目的是加固由松软破碎岩石构成的井壁，封隔油气交互层和油水交互层。固井的方法是将套管下入井中，并在井眼与套管之间灌注水泥浆，形成的水泥石与套管和地层完全接触，实现对地层的封隔。

固井用的套管和水泥类型的选择决定于实际的钻井工程地质条件，如岩石的物理机械性质、地层压力与温度、地层流体特性、井斜及其它因素。

二、在井身结构中存在以下套管类型：导管、表层套管、技术套管（或中间套管）和油层套管。

目前，油气井固井所使用的套管主要是根据632—64号前全苏国家标准生产的，其套管外径分别为：114.3, 127.0, 139.7, 146.0, 168.3, 177.8, 193.7, 219.1, 244.5, 273.1, 298.5, 323.9, 339.7, 406.4, 426.0, 508.0mm，套管厚度为6~12mm。

在伏尔加—乌拉尔和西西伯利亚地区，最常采用的井身结构如表1—1所示。

表1—1 常用的井身结构

套管类型	套管外径 (mm)	裸眼井径 (mm)
导管	323.9	393.7
表层套管	244.5	295.3
油层套管	146.0 (168.3)	215.9

三、固井需使用各种类型水泥，表1—2给出了这些固井水泥的特性。在很多油气田，使用两种标号的水泥封固油层套管。用密度为 $1.5 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ 的胶质水泥浆封固生产井段的上部；用密度为 $1.8 \sim 1.9 \text{ g/cm}^3$ 的正常的硅酸盐水泥浆封固生产井段及其下部。

表1—2 常用水泥的某些特性

水泥种类	代号	环境温度限制 (°C)	水泥浆的密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	实验室条件下的最终固结期限 (h—min)		候凝两昼夜的强度 (MPa)	
				初凝时间	终凝时间	抗弯强度	抗压强度
硅酸盐水泥 (冷成) 1581—85号国家标准	ПЦК	22	1.85	2—00	10—00	2.7	12—13
硅酸盐水泥 (热成) 1581—85号国家标准	ПЦТ	75	1.85	1—45	4—30	6.2	21—42
轻质水泥 39—01— 08—411—80号技术规程	ОЦТ	40~140	1.50	1—45	8—00	1.5	—
重水泥 39—01— 08—535—85技术规程	УЦТ—1	75	2.12	2—15	5—00	2.5	10—12
	УЦТ—2	75	2.20~3.2	2—15	5—00	2.5	—
矿渣水泥 39—017— 80号国家标准	ЩТ	75~100	1.90	2—10	3—10	—	—
矿砂水泥 39—017— 80号国家标准	ЩЩЩ—120	80~160	1.83	2—00	10—00	2.5	10
	ЩЩЩ—200	160~220	1.83	2—00	8—00	—	20
轻质矿渣水泥 39— 014—80号国家标准	ОЩЩ—120	120	1.58	3—35	6—50	1.5	8~15
	ОЩЩ—200	190	1.58	3—35	5—30	1.5	8~15
重矿渣水泥 39— 014—80号国家标准	УЩЩ—120	120	2.12	2—00	10—00	3	8~15
	УЩЩ—2—120	120	2.20	2—00	10—00	3	10~25
	УЩЩ—1—200	160~220	2.12	2—00	8—00	4.5	5~10
	УЩЩ—2—200	160~220	2.22	2—00	8—00	3~4	6~15

四、水泥在套管外环形空间中的固结时间和固结速度决定于水泥浆的组分和密度、井下温度和压力、地层的渗流特性及其它地质工程条件。例如，胶质水泥的固结速度远远低于一般密度的硅酸盐水泥固结速度。所以，应该根据地质工程条件，通过实验的方法来具体地确定检测水泥胶结质量的最佳测井时间。

五、由于受各种地质、工程因素的影响，在固井以及后期油水（气）井生产过程中，水泥环可能产生以下类型的损坏：

1. 纵向窜通；
2. 水泥与套管、水泥与地层之间的微间隙；
3. 水泥连续性缺失；

4. 水泥呈现出低抗压强度和高渗透性。

六、声波水泥胶结测井方法可以解决以下问题：

1. 确定水泥返高；
2. 确定胶结好的井段；
3. 确定胶结不好的井段和评价水泥环损坏的程度；
4. 确定机械及其它因素对水泥环的影响；
5. 监测在井下条件下水泥环形成的过程。

## 第二节 MAK—2声波测井仪的主要技术特性

一、MAK—2声波测井仪用于检测套管井水泥胶结质量和研究裸眼井剖面。其要求的井下条件是：在检测水泥胶结质量时，当套管内径为100~155mm时，倾角要小于45°；而套管内径为155~320mm时，倾角要小于30°。在研究裸眼井剖面时，当井径为100~220mm时，倾角要小于30°，而当井径为220~320mm时，倾角要小于15°。井内介质要求是不含有气体的液体，井下温度要求在125℃以下（在两小时内，温度可以在150℃之内），要求压力在120MPa以下。

这种仪器可以与Y3BA—21A或Y3BA—21型地面测量面板和5500m的三芯铠装电缆配套使用。

二、全套仪器包括两只发射器直径分别为73mm、100mm的下井仪和一个地面控制面板（如图1—1所示）。下井仪器的声系部分包括一个声波信号发射器和两个声波信号接收器。发射器到第一个接收器的距离是 $L = (1000 \pm 5) \text{ mm}$ ，两个接收器的间距为 $S = (500 \pm 3) \text{ mm}$ 。下井仪器与地面面板Y3BA—21A可直接相连，而与Y3BA—21面板不能直接连接，必须通过本仪器的控制面板方可连接。

三、声波时差的测量范围：120~600 $\mu\text{s}/\text{m}$ ，基本相对误差不超过 $\pm 3\%$ 。

声波衰减系数的测量范围：3~30dB/m。在3~15dB/m范围内，测量的基本绝对误差不超过 $\pm 1.4 \text{ dB}/\text{m}$ ；而在15~30dB/m范围内，测量的基本绝对误差不超过 $\pm 2.8 \text{ dB}/\text{m}$ 。

四、仪器消耗功率不超过60V·A，其中控制面板消耗功率不超过25V·A。

五、仪器长度为3850mm、发射器直径为73mm的井下仪器的重量是80kg，而发射器直径为100mm的井下仪器的重量是85kg。地面控制面板的外形尺寸是305mm×120mm×240mm，其重量不大于10kg。

六、井下仪发射器的发射频率不超过20kHz。

七、仪器控制面板的主要功能：产生110V、50Hz的交变电压给井下仪器供电；分级调节（共分3级）仪器的放大系数；分割同步脉冲和井下仪器的测量信号，并将信号传到Y3BA—21型地面测量面板。

使用三芯电缆的两根缆芯给井下仪器供电，并传输同步脉冲信号和仪器测量信号，第三根缆芯作为备用缆芯。

在控制面板上，控制和显示机构的功能如下（图1—1所示）：

1. 接头“№ 220B50ГЛ”，是控制面板的电源接头；
2. 开关“СЕТЬ”，用于接通220V、50Hz的电源；
3. 信号灯“СЕТЬ”，用于指示电源接通；
4. 保险丝“СЕТЬ0.25А”，用于在超过控制面板允许电流情况下切断面板的220V、50Hz电

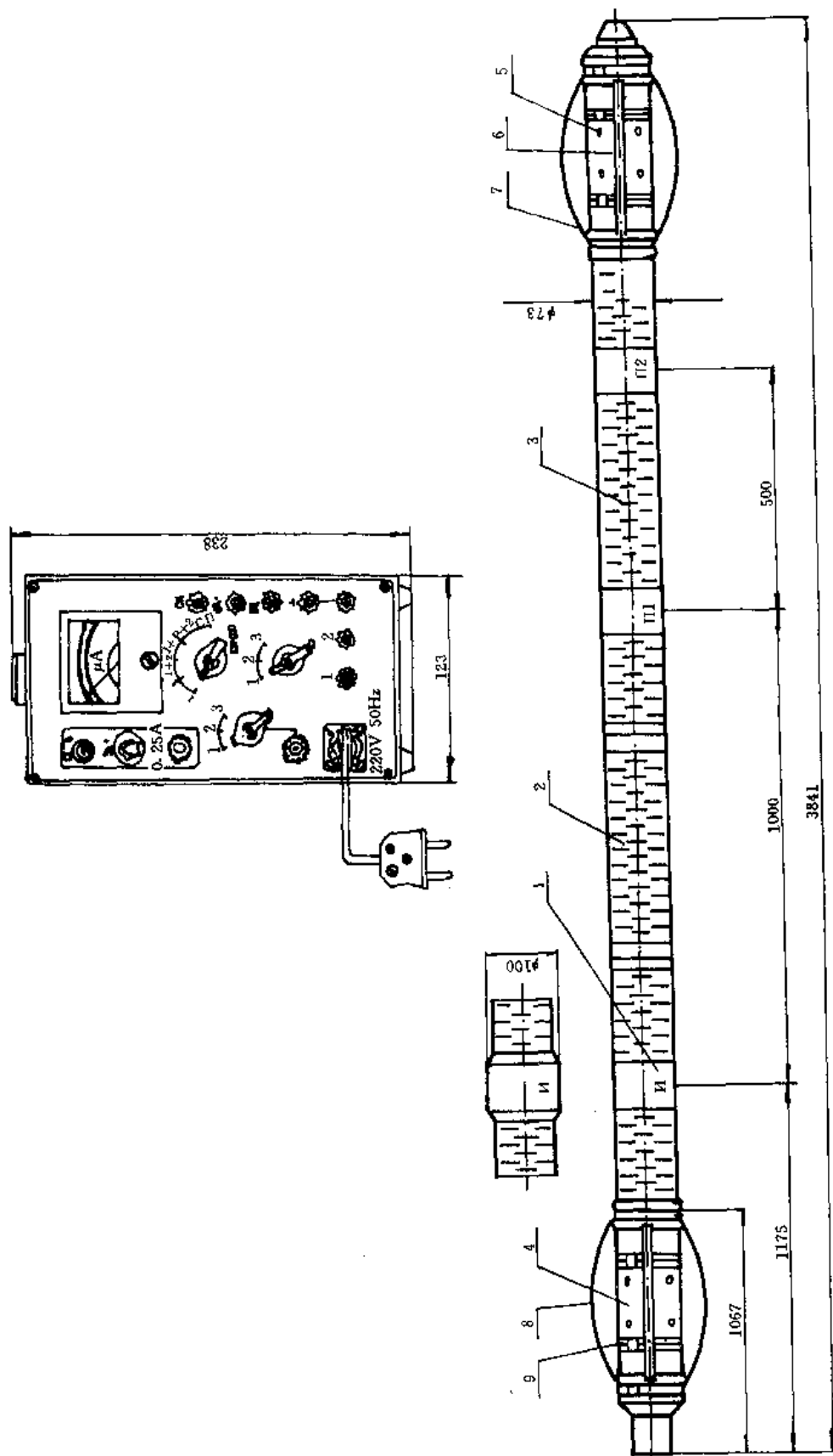


图 1-1 MAK-2 声波测井仪器结构示意图

源;

5. 保险丝“0.25A”, 用于在超过井下仪器允许电流情况下切断井下仪器的供电电源(110V、50Hz);

6. 转换开关“УСИЛ. СП”, 用于分级调节井下仪器放大系数(在1, 2, 3位置仪器放大系数相应为低、中、高值);

7. 转换开关“ПИТ. СП”, 用于根据测井电缆长度分级调节井下仪器电源电压(在1, 2, 3位置供电电压相应为110V、115V、120V);

8. 转换开关“СИНХР”, 用于切换近接收器同步信号(1)、远接收器同步信号(2)、远近接收器同步信号之和(1+2)、远近接收器同步信号和基准信号之和(1+2+P)和井下仪器同步信号(СП);

9. 接线柱“1, 2,  $\perp$ ”, 用于接通两根电缆缆芯和缆皮;

10. 接线柱“СП, ВК1, ВК2,  $\perp$ ”, 用于连接控制面板和地面测量面板УЗБА—21;

11. 微安表“ТОК СП”, 用于检测井下仪器的供电电流(微安表的最大刻度值是150mA)。

八、МАК—2声波测井仪的组成如图1—1所示, 包括声系、发射声脉冲电子线路单元(4)、声波信号接收电路单元(5)、扶正器。

声系包括发射部分(1)和声波信号接收部分(2), 其中发射部分包括发射器(4)和隔声体(3), 声波信号接收部分包括两个接收器( $\Pi_1, \Pi_2$ )。

仪器有两个扶正器, 分别安装在发射和接收电路单元的外壳上。每个扶正器包括不动支架(6)、两个活动弹簧片基座(7)、可拆卸半圆环(9)。在活动弹簧片基座上固定有四个弹簧板(即扶正器片)。可以根据所测井直径的大小, 调节可拆卸半圆环位置。当可拆卸半圆环安装在不动套筒和可动套筒之间时, 弹簧板(扶正器片)处于张开最大直径; 当可拆卸半圆环安装在活动套筒外侧时, 弹簧板(扶正器片)处于张开最小直径。

在全套仪器备件中有三种规格尺寸的弹簧板, 张开最大直径分别为105mm、250mm和350mm。其中第一种规格尺寸的弹簧板(扶正器片)用于测量100~105mm内径的套管井; 第二种规格尺寸的弹簧板用于测量106~220mm内径的套管井; 第三种规格尺寸的弹簧板用于测量200~320mm内径的套管井。

### 第三节 МАК—2声波测井仪的测量参数

一、声波发射器激发的各种类型的弹性波沿井轴方向传播(图1—2所示)。如果第一、第二界面都胶结好(水泥与套管和地层都接触), 那么接收器接收的波图由套管波(1)、地层纵波(2)、地层横波(3)、液体波(4)和斯通利波(5)叠加而成。将接收器接收的声波信号转换成电信号, 经过放大后传输到地面测量面板(УЗБА—21А或УЗБА—21), 从这些信号中提取解释参数并转换成模拟电压, 最后送到测井记录系统。

二、在地面测量面板首先记录波图信号的下列参数(如图1—2所示):

$T_1$  —— 幅度超过设置门坎高度( $H_n$ )的首波正相从发射器到第一个接收器的传播时间;

$T_2$  —— 幅度超过设置门坎高度( $H_n$ )的首波正相从发射器到第二个接收器的传播时间;

$A_{1n}$  —— 浮动时间窗在 $T_1$ 时刻测量的超过设置门坎高度( $H_n$ )的首波正相幅度;

$A_{2n}$  —— 浮动时间窗在 $T_2$ 时刻测量的超过设置门坎高度( $H_n$ )的首波正相幅度;

$A_{1\kappa}$  —— 在套管首波正相到达第一接收器时间设置的固定时间窗测量的弹性波幅度;

$A_{2K}$  — 在套管首波正相到达第二接收器时间设置的固定时间窗测量的弹性波幅度。  
用上述测得的参数计算以下相对声波参数：

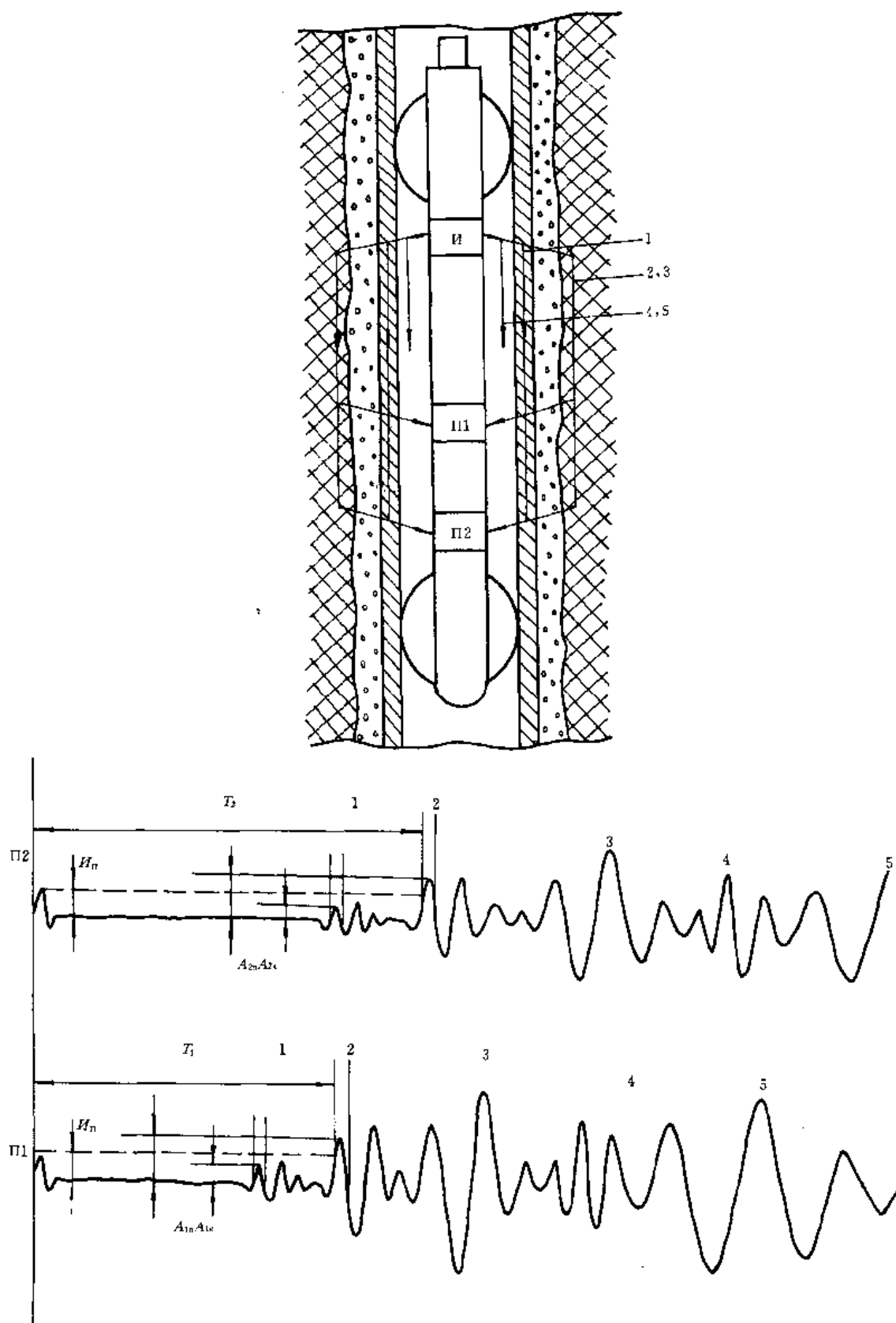


图1—2 弹性波在套管井中的传播路径和仪器记录的弹性波参数

### 1. 声波时差 $\Delta T$

$$\Delta T = \frac{T_2 - T_1}{S} (\mu s/m) \quad (1-1)$$

式中  $S=0.5m$ , 为两接收器间距。

### 2. 第一接收器接收的首波幅度 ( $A_{1n}$ ) 的衰减 $d_{1n}$

$$d_{1n} = 20 \lg \frac{U_0}{A_{1n}} (dB) \quad (1-2)$$

式中  $U_0 = \text{常数}$ , 为地面测量面板记录的信号最大幅度。

### 3. 第一接收器接收的套管波幅度 ( $A_{1k}$ ) 的衰减 $d_{1k}$

$$d_{1k} = 20 \lg \frac{U_0}{A_{1k}} (dB) \quad (1-3)$$

### 4. 第二接收器接收的首波幅度 ( $A_{2n}$ ) 的衰减 $d_{2n}$

$$d_{2n} = 20 \lg \frac{U_0}{A_{2n}} (dB) \quad (1-4)$$

### 5. 第二接收器接收的套管波幅度 ( $A_{2k}$ ) 的衰减 $d_{2k}$

$$d_{2k} = 20 \lg \frac{U_0}{A_{2k}} (dB) \quad (1-5)$$

### 6. 浮动窗记录的声波幅度的衰减系数 $\alpha_n$

$$\alpha_n = \frac{20}{S} \lg \frac{A_{1n}}{A_{2n}} = \frac{d_{2n} - d_{1n}}{S} (dB/m) \quad (1-6)$$

### 7. 套管波幅度衰减系数 $\alpha_k$

$$\alpha_k = \frac{20}{S} \lg \frac{A_{1k}}{A_{2k}} = \frac{d_{2k} - d_{1k}}{S} (dB/m) \quad (1-7)$$

三、如果地层中弹性波传播速度 ( $v_n$ ) 小于套管中弹性波传播速度 ( $v_k$ ), 那么  $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 、 $\alpha_k$  等参数反映弹性波沿套管传播的动态特性。如果  $v_n > v_k$ , 那么在一、二界面胶结好 (接触) 的情况下, 固定时间窗记录的是沿地层传播的弹性波。在这种情况下, 这些参数反映的是地层的动力学弹性特性。

如果套管波幅度小于门坎值 (如图1-2所示), 并且水泥环与套管和地层完全接触, 那么  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $\Delta T$ 、 $d_{1n}$ 、 $d_{2n}$ 、 $\alpha_n$  参数反映地层的运动学和动力学特性。如果套管波幅度大于门坎值 ( $U_n$ ), 那么这些参数反映套管的运动学和动力学特性。

四、Y3BA—21型地面测量面板可以同时测量和记录5个参数:  $T_1$ 、 $\Delta T$  (或者  $T_1$ 、 $T_2$ )、 $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 、 $\alpha_k$  或者  $T_1$ 、 $\Delta T$  (或者  $T_1$ 、 $T_2$ )、 $d_{1n}$ 、 $d_{2n}$ 、 $\alpha_n$ 。

Y3BA—21A型地面测量面板具有较好的性能, 可以同时测量和记录所有前面所提到的9个参数:  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $\Delta T$ 、 $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 、 $\alpha_k$ 、 $d_{1n}$ 、 $d_{2n}$ 、 $\alpha_n$ 。

五、MAK—2声波测井仪在测量  $\Delta T$ 、 $\alpha_k$ 、 $\alpha_n$  参数时具有标定、计量特性, 所以这些参数是基本测量参数, 而其它参数则是指示性的 (辅助) 参数。

## 第四节 测量参数与管外水泥环胶结状态的关系

一、在套管中传播的弹性波动力学和运动学特性取决于水泥与套管和地层的接触状况, 套

管、水泥和地层的声阻抗比以及波长与套管壁厚的比。在没有水泥环缺陷的情况下，套管波能量随着水泥强度、波长与套管壁厚比的增大而减小，随着声波发射频率的降低而减小。

二、套管波传播速度  $v_k$  取决于生产套管时所用的钢的型号，而与水泥环的胶结状况无关。对于大多数钢型的套管，根据632—64号国家标准，套管波传播速度  $v_k$  相对恒定，其平均值为  $5434\text{m/s}$ ，相对应的声波时差为  $\Delta T_k = \frac{1}{v_k} = 184\mu\text{s/m}$ 。

三、根据下面的公式计算套管波到达第一和第二接收器的时间：

$$T_{1k} = \frac{2d_k - d_n - d_l}{2v_k} \sqrt{1 - \left(\frac{v_n}{v_k}\right)^2} + \frac{l_1}{v_k} + T_{\text{on}} \quad (1-8)$$

$$T_{2k} = \frac{2d_k - d_n - d_l}{2v_k} \sqrt{1 - \left(\frac{v_n}{v_k}\right)^2} + \frac{l_2}{v_k} + T_{\text{on}} \quad (1-9)$$

式中  $d_k$ ——套管内径；

$d_n$ 、 $d_l$ ——接收器和发射器的直径；

$v_n$ 、 $v_k$ ——弹性波在洗井液和套管中传播速度；

$l_1$ 、 $l_2$ ——发射器到第一、第二接收器的距离 ( $l_1=1\text{m}$ ,  $l_2=1.5\text{m}$ )；

$T_{\text{on}}$ ——延迟时间，决定于被记录的套管波相位编号。

四、在水泥环没有缺陷的情况下，MAK—2声波测井仪在套管井中记录的地层纵波传播时间的计算公式：

$$T_1 = \frac{2D_k - d_n - d_l}{2v_k} + \frac{d_c - D_k}{v_u} \sqrt{1 - \left(\frac{v_n}{v_k}\right)^2} + \frac{l_1}{v_n} + T_{\text{on}} \quad (1-10)$$

$$T_2 = \frac{2D_k - d_n - d_l}{2v_k} + \frac{d_c - D_k}{v_u} \sqrt{1 - \left(\frac{v_n}{v_k}\right)^2} + \frac{l_2}{v_n} + T_{\text{on}} \quad (1-11)$$

式中  $D_k$ ——套管外径；

$d_n$ 、 $d_l$ ——发射器和接收器直径；

$d_c$ ——标称井径；

$v_k$ 、 $v_u$ 、 $v_n$ ——分别为弹性波在洗井液、水泥环和岩石中的传播速度；

$T_{\text{on}}$ ——延迟时间，决定于被记录的地层波相位编号。

公式 (1-10) 和式 (1-11) 右边第一项是弹性波经过液体传播的时间，第二、第三项之和是弹性波在水泥环和地层中传播的时间。从公式 (1-10)、(1-11) 中可以看出，时间  $T_1$ 、 $T_2$  决定于液体、水泥环和地层的声学特性和井的几何要素。

图1—3给出弹性波在水泥环中传播速度与水泥凝固时间的关系曲线，该关系曲线是用密度为  $1.85\text{g/cm}^3$  的标准水泥 (1) 和密度为  $1.6\text{g/cm}^3$  的轻质凝胶水泥 (2)，在环境温度为  $20^\circ\text{C}$  条件下的模型井中制作的。从关系曲线图中看出，当水泥凝固两昼夜时，声波在硅酸盐水泥 (波特兰水泥) 中传播速度大约是  $3000\text{m/s}$ ，而在轻质凝胶水泥中传播速度只达到  $1600\text{m/s}$ 。

表1—3给出地层纵波的首波正相到达第一、第二接收器 (发射器直径为  $73\text{mm}$ ) 的时间与速度  $v_n$  的关系。 $T_1$ 、 $T_2$  值是根据上面介绍的公式 (1-10和1-11) 计算的，所需要的参数如下： $d_k=126\text{mm}$ 、 $D_k=146\text{mm}$ 、 $d_c=216\text{mm}$ 、 $v_k=1500\text{m/s}$ 、 $v_u=3000\text{m/s}$ 、 $v_k=5434\text{m/s}$ 、 $\rho_u=1.85\text{g/cm}^3$ 。



表1—3 标准井筒条件下弹性波传播的时间

地层纵波时差 ( $\mu\text{s}/\text{m}$ )	地层纵波传播速度 ( $\text{m}/\text{s}$ )	$T_1$ ( $\mu\text{s}$ )	$T_2$ ( $\mu\text{s}$ )	地层波进入第一固定时间窗的时间 ( $\mu\text{s}$ )	地层波进入第二固定时间窗的时间 ( $\mu\text{s}$ )
130	7692.3	225	290	73	100
140	7142.9	235	305	63	85
150	6666.7	245	320	53	70
160	6250.0	254	334	44	56
170	5882.4	264	349	34	41
180	5555.6	273	363	25	27
190	5263.2	283	378	15	12
200	5000.0	292	392	6	2
210	4761.9	302	407		
220	4545.5	311	421		
230	4347.8	321	436		
240	4166.7	330	450		
250	4000.0	339	461		
260	3846.2	348	478		
270	3703.7	357	492		
280	3571.4	366	506		
290	3448.3	375	520		
300	3333.3	384	534		
310	3225.8	392	547		

表1—3中最后两栏给出了地层纵波的首波正相进入固定时间窗口（即用于在上述条件下记录套管波的时间窗口）的时间。固定时间窗的末端设置在套管首波正相的末端位置，即由正相位向负相位变化的零电位处。在地面测量面板 Y3BA—21 和 Y3BA—21A 上可以将固定时间窗的宽度设置成  $35\mu\text{s}$  或  $50\mu\text{s}$ 。可以根据下面公式计算第一、第二测量道固定时间窗的末端时间：

$$T_{1\text{ок}} = T_{1к} + \frac{T_{\text{фк}}}{2} \quad (1-12)$$

$$T_{2\text{ок}} = T_{2к} + \frac{T_{\text{фк}}}{2} \quad (1-13)$$

式中  $T_{1к}$ 、 $T_{2к}$  —— 根据公式 (1—8) 和式 (1—9) 计算的套管首波正相到达第一、第二接收器的时间；

$T_{\text{фк}}$  —— 套管波的周期。

对于上述原始资料， $T_{1\text{ок}} = 275 + 23 = 298\mu\text{s}$ ， $T_{2\text{ок}} = 367 + 23 = 390\mu\text{s}$ 。

从表1—3中看出，当  $v_n > 5000\text{m}/\text{s}$  时，地层波开始进入第二固定时间窗；而在  $v_n > 4800\text{m}/\text{s}$  时，地层波就进入第一固定时间窗。实际上，地层波波速比上述两个值还要低的时候就对固定时间窗记录的套管波参数 ( $d_{1к}$ 、 $d_{2к}$ 、 $\alpha_k$ ) 有影响，因为地层首波负相首先进入固定时间

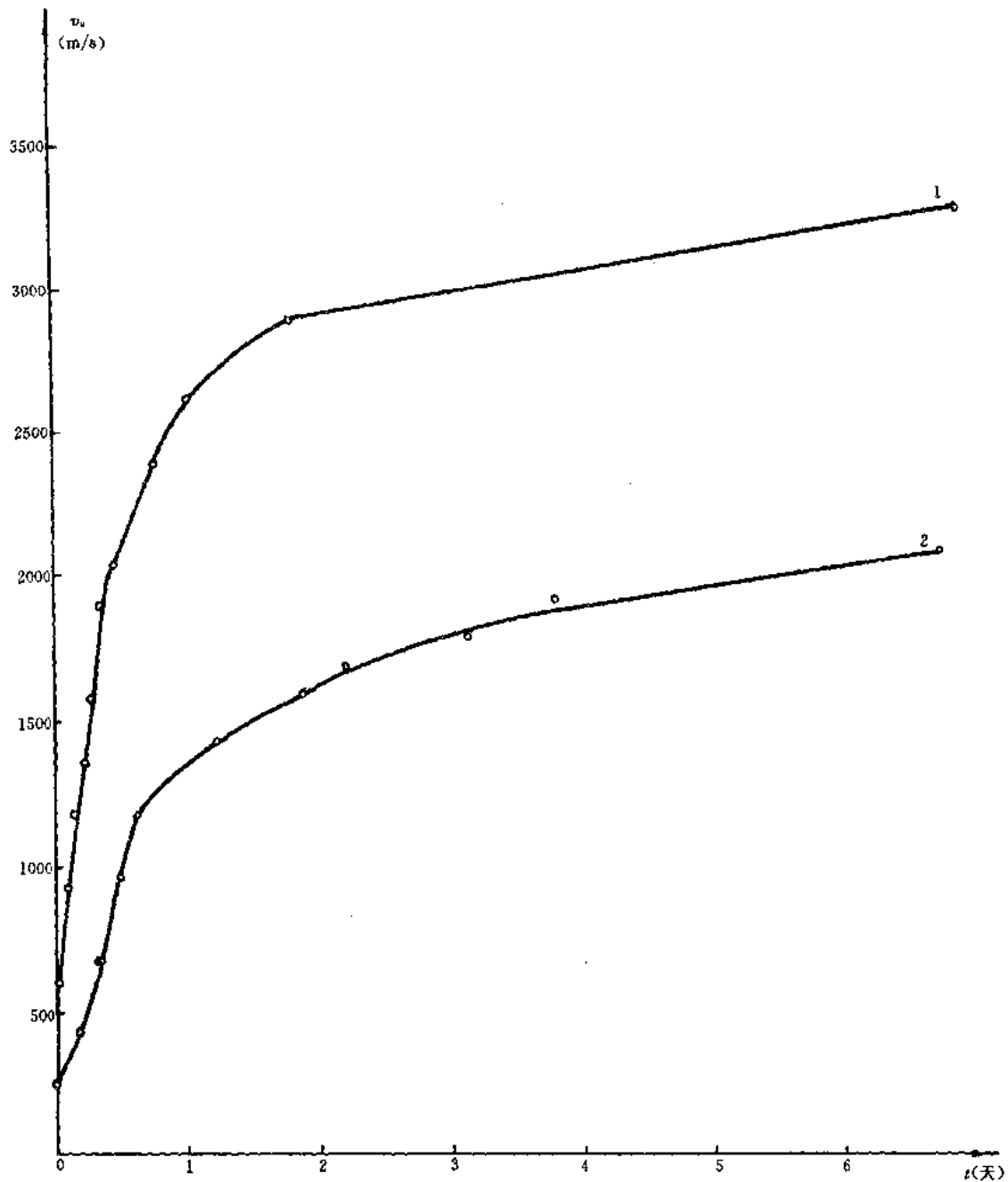


图1—3 在20℃条件下弹性波在水泥环中的传播速度与水泥凝固时间的关系  
1—密度为1.85g/cm³硅酸盐水泥的关系曲线；2—密度为1.6g/cm³轻质凝胶水泥的关系曲线

窗，与套管波互相干扰。

五、地面测量面板记录的套管波幅度 $A_{1u}$ 、 $A_{2u}$ 可用下式表示：

$$A_{1u} = A_u \cdot K_u \cdot K_{1u} \cdot K_o \cdot K_{1n} \cdot K_{1r} \cdot e^{-\alpha_k' \cdot l_1} \quad (1-14)$$

$$A_{2u} = A_u \cdot K_u \cdot K_{2u} \cdot K_o \cdot K_{2n} \cdot K_{2r} \cdot e^{-\alpha_k' \cdot l_2} \quad (1-15)$$

式中  $A_u$  ——发射器激发的声脉冲幅度；

$K_u$  ——弹性波在洗井液中的传输率；

$K_{1u}$ 、 $K_{2u}$  ——第一、第二接收器的偏心校正系数（在仪器完全居中时， $K_{1u} = K_{2u} = 1$ ；仪器

不居中时,  $K_{1u}$  和  $K_{2u} < 1$ );

$K_{1n}$ 、 $K_{2n}$  ——第一、第二接收器的灵敏度;

$K_0$  ——套管波的生成系数, 其数值依赖于洗井液、套管和水泥环的声阻抗比以及波长与套管壁厚的比值;

$K_{1r}$ 、 $K_{2r}$  ——第一和第二测量道的传输系数;

$\alpha'_k$  ——以  $N_p$  (奈培, 衰减单位) 为单位测量的套管波衰减系数;

$l_1$ 、 $l_2$  ——发射器到第一、第二接收器的间距。

上面的公式可以表示成

$$A_{1k} = A_{10} \cdot e^{-\alpha'_k \cdot l_1} \quad (1-16)$$

$$A_{2k} = A_{20} \cdot e^{-\alpha'_k \cdot l_2} \quad (1-17)$$

式中

$$A_{10} = A_u \cdot K_k \cdot K_{1u} \cdot K_0 \cdot K_{1n} \cdot K_{1r} \quad (1-18)$$

$$A_{20} = A_u \cdot K_k \cdot K_{2u} \cdot K_0 \cdot K_{2n} \cdot K_{2r} \quad (1-18')$$

$A_{10}$ 、 $A_{20}$  是在  $l_1 = l_2 = 0$  时, 第一、第二测量道输出的最大信号幅度。

六、由式 (1-3)、(1-5) 和式 (1-16)、(1-17) 推导得到计算声波幅度衰减 ( $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ ) 的公式:

$$d_{1k} = 20 \lg \frac{H_0}{A_{10} \cdot e^{-\alpha'_k \cdot l_1}} = \alpha'_k \cdot l_1 \cdot 20 \lg e + 20 \lg \frac{H_0}{A_{10}}$$

$$d_{2k} = 20 \lg \frac{H_0}{A_{20} \cdot e^{-\alpha'_k \cdot l_2}} = \alpha'_k \cdot l_2 \cdot 20 \lg e + 20 \lg \frac{H_0}{A_{20}}$$

$$d_{1k} = \alpha_k \cdot l_1 + 20 \lg \frac{H_0}{A_{10}} \quad (1-19)$$

$$d_{2k} = \alpha_k \cdot l_2 + 20 \lg \frac{H_0}{A_{20}} \quad (1-20)$$

式中  $\alpha_k = \alpha'_k \cdot 20 \lg e = 8.68 \alpha'_k$  ——套管波的衰减系数, dB/m。

依据式 (1-18)、(1-19) 得下列公式:

$$d_{1k} = \alpha_k \cdot l_1 + 20 \lg \frac{H_0}{A_u \cdot K_k \cdot K_{1u} \cdot K_0 \cdot K_{1n} \cdot K_{1r}} \quad (1-21)$$

$$d_{2k} = \alpha_k \cdot l_2 + 20 \lg \frac{H_0}{A_u \cdot K_k \cdot K_{2u} \cdot K_0 \cdot K_{2n} \cdot K_{2r}} \quad (1-22)$$

从式 (1-21)、(1-22) 看出: 套管波的幅度衰减不仅取决于套管波的衰减系数 (衰减系数的大小与水泥环的胶结状况有关), 也依赖于仪器因素 ( $A_u$ 、 $K_{1u}$ 、 $K_{2u}$ 、 $K_{1n}$ 、 $K_{2n}$ )、井筒条件 ( $K_k$ 、 $K_0$ ) 和测量电路的传输系数 (操作员可在测量面板上调校)。

如果能实现以下条件,

$$A_{10} = A_{20} = H_0 \quad (1-23)$$

幅度测量道可以调节到井下测量的最佳状态。将式 (1-23) 代入式 (1-19) 和式 (1-20) 中得:

$$d_{1k} = \alpha_k \cdot l_1 = \alpha_k \quad (1-24)$$

$$d_{2k} = \alpha_k \cdot l_2 = 1.5 \alpha_k \quad (1-25)$$

$$l_1 = 1\text{m}, l_2 = 1.5\text{m}。$$

如果下井仪器严格居中 ( $K_{1u} = K_{2u} = 1$ ), 井下仪器两个测量道的传输系数相等 ( $K_{1n} \cdot K_{1r} = K_{2n} \cdot K_{2r}$ ), 并且在声系范围内井下条件不变 ( $K_k = \text{const}$ ,  $K_0 = \text{const}$ ), 那么在地面测

量面板 Y3BA—21 和 Y3BA—21A 上两个幅度测量道的传输系数（传输率）可以同时调节，并满足式（1—23）的条件。

在实际井下条件下， $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$  值不同于用式（1—24）、（1—25）计算的结果，其原因是：（1）套管波的生成系数（生成率）随着水泥环强度特性的改变而有一定范围的变化（1~0.7）；（2）在井筒有较大倾斜角度的条件下，井下仪器相对井轴的偏心和倾斜使  $K_{1k}$  和  $K_{2k}$  值减小（1~0.6）；（3）由于洗井液温压条件和含气饱和度的变化， $K_k$  值可能随之改变（见第五节）。

仪器的校正应该在具有最小倾角和最小  $\alpha_k$  值的井中进行，并要求仪器所处的井段必须有一稳定的声学特性，且井段长度大于声系的长度。

七、套管波衰减系数  $\alpha_k$  与管外空间水泥环胶结状况的关系最为密切。对于没有缺陷的水泥环来说， $\alpha_k$  是下面主要影响因素的函数：

$$\alpha_k = f(\sigma_u, \delta_u, h_u, D_k, \lambda_s/h_k) \quad (1-26)$$

式中  $\sigma_u$ 、 $\delta_u$ 、 $h_u$ ——分别是水泥环的强度、密度和厚度；

$D_k$ 、 $h_k$ ——分别是套管外径和套管壁厚；

$\lambda_s$ ——发射器在井筒内激发的弹性波波长。

图1—4给出  $d_{1k}$ （1）、 $d_{2k}$ （2）、 $\alpha_k$ （3）和水泥凝固时间的关系曲线。曲线是用 MAK—2 仪器在模型井中实验获得的，模型井的技术参数是：套管外径146mm、壁厚10mm、长度5m，无缺陷的水泥环厚度27mm、水泥密度1.85g/cm<sup>3</sup>，周围介质温度是20℃。图1—4还给出在水泥环有45°缺失角的垂直通道的类似模型井中获得的  $\alpha_k$ （4）与水泥凝固时间的关系曲线。

图1—5给出  $d_{1k}$ （1）、 $d_{2k}$ （2）和  $\alpha_k$ （3）和水泥凝固时间的关系曲线。曲线是用 MAK—2 仪器在模型井中实验获得的，模型井的技术参数是：套管外径146mm、壁厚10mm，无缺陷的水泥环厚度27mm、密度1.6g/cm<sup>3</sup>，环境温度20℃。

图1—6给出水泥柱抗弯曲强度与水泥凝固时间的关系曲线（密度为1.85g/cm<sup>3</sup>硅酸盐水泥浆）。

从图1—4~图1—6看出，随着水泥凝固时间增加和水泥强度的增大， $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 、 $\alpha_k$  值成比例增大，在相同水泥凝固时间条件下，较低密度的水泥石与高密度水泥石相比，其套管波的动力学参数（ $\alpha_k$ 、 $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ ）的绝对值较低。

通过模拟实验和井下测量证明，密度为1.85g/cm<sup>3</sup>和1.6g/cm<sup>3</sup>的无缺陷水泥石，在不同凝固时间用带有 Y3BA—21A 型面板的 MAK—2 仪器测量的  $\alpha_k$ 、 $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$  参数达到表1—4给的值。表1—4中给出的  $\alpha_k^u$ 、 $d_{1k}^u$ 、 $d_{2k}^u$  参数值用作评价标准水泥和轻质水泥固井质量的界限值。

表1—4 水泥石不同凝固时间  $\alpha_k^u$ 、 $d_{1k}^u$ 、 $d_{2k}^u$  的极限值

水泥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	测 量 参 数	水泥凝固时间 (d)			
		1	2	7	14
1.85	$\alpha_k^u$ (dB/m)	24	30	35	—
	$d_{1k}^u$ (dB)	27	33	38	—
	$d_{2k}^u$ (dB)	40	48	55	—
1.6	$\alpha_k^u$ (dB/m)	9	11	15	20
	$d_{1k}^u$ (dB)	10	13	18	23
	$d_{2k}^u$ (dB)	15	19	25	33

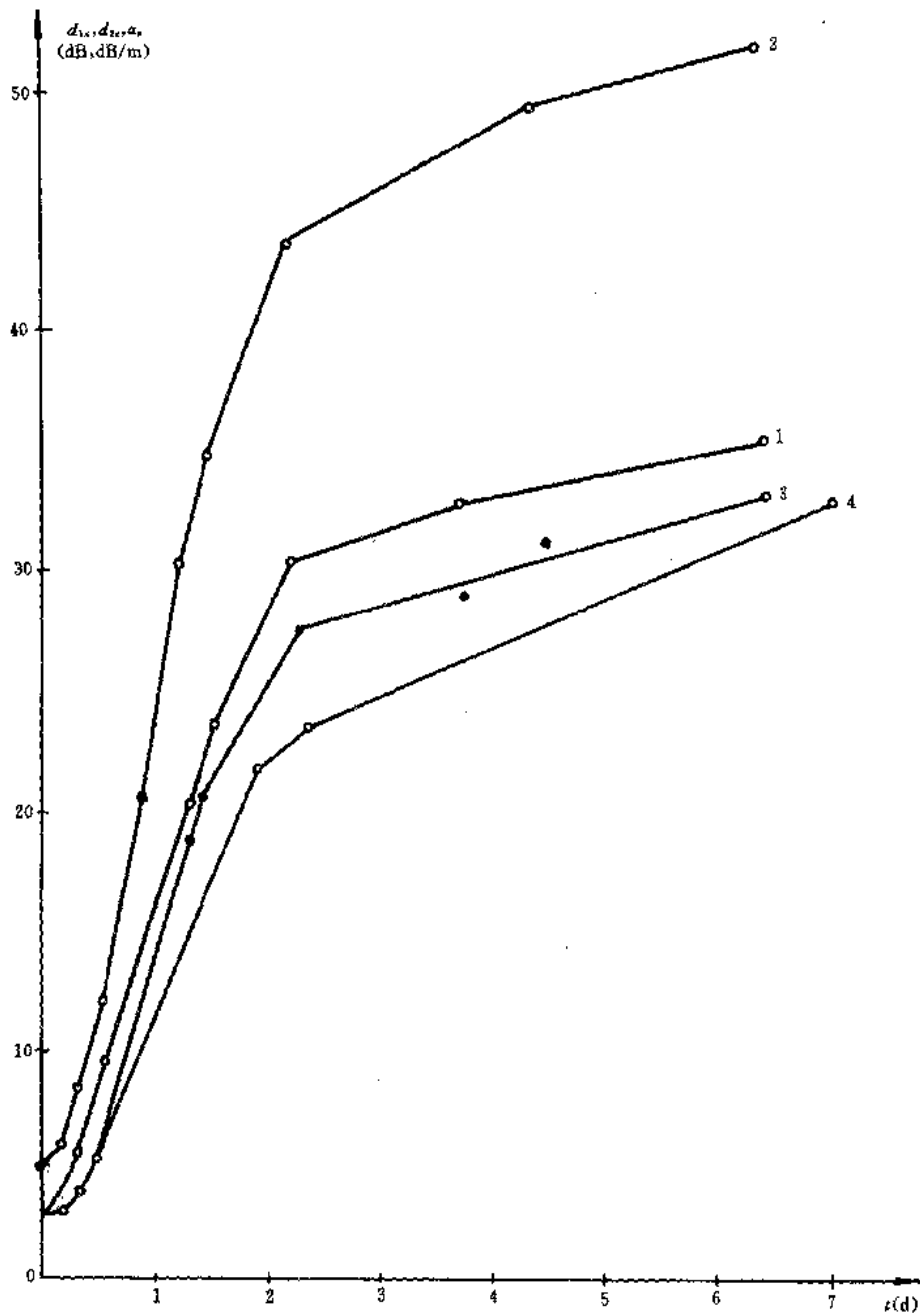


图1-4  $d_{1k}$  (1)、 $d_{2k}$  (2)、 $a_k$  (3) 与密度为 $1.85\text{g/cm}^3$ 无缺陷的水泥环凝固时间的关系和在水泥环有纵向通道(展开角为 $45^\circ$ )条件下,  $a_k$  (4) 与水泥凝固时间的关系

由于Y3EA—21A型测量面板测量参数 $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 的有效工作范围是55dB, Y3EA—21型面板 $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 参数的测量范围是50dB, 而MAK—2仪器的测量误差是在3~30dB/m范围内标定的, 所以将30dB/m作为 $a_k$ 参数的仪器测量上限, 将50dB作为 $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 参数的仪器测量上限。当 $d_{2k}$ 超过50dB时, 由于受仪器本身的电子噪声和井下仪器在井中移动时产生的噪声影响, 测量的 $d_{2k}$ 值就会失真。在由井筒斜度大引起的声波噪声较高的条件下,  $d_{2k}$ 的上限值可以限制在55~65dB的噪声水平上。在这种情况下, 当 $d_{1k}$ 值增加到40~45dB时, 根据公式(1-7)可知参数

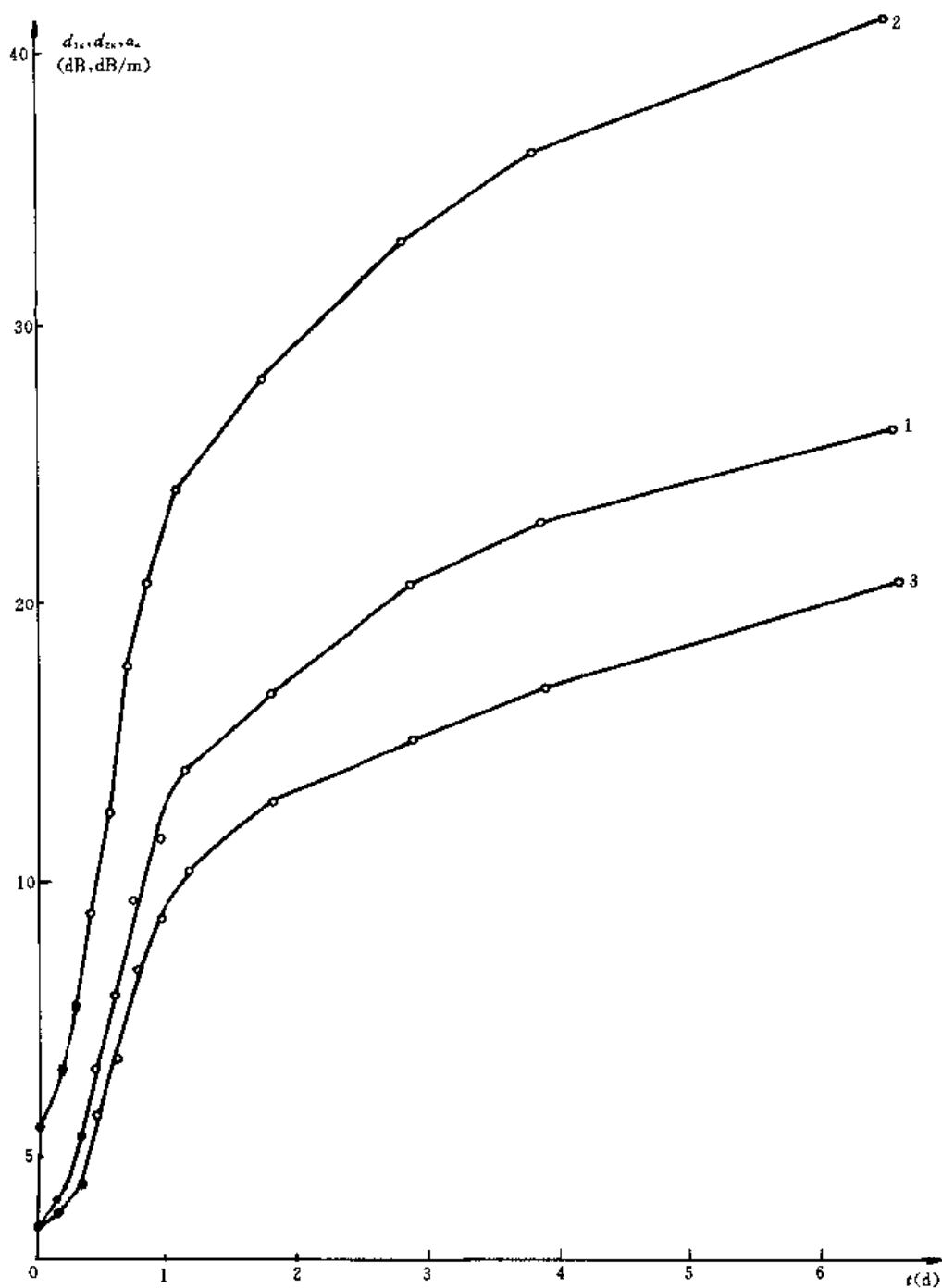


图1—5  $d_{1k}$  (1)、 $d_{2k}$  (2)、 $\alpha_k$  (3) 与密度为 $1.6\text{g/cm}^3$ 无缺陷的轻质胶体  
水泥环凝固时间的关系

$\alpha_k$  将减小 (小于 $30\text{dB/m}$ )。为了消除在  $d_{2k} > 48\text{dB}$  情况下  $\alpha_k$  参数值的不可靠性, 应该赋予参数  $\alpha_k 30\text{dB/m}$  的数值。

在 Y3BA—21型地面面板上, 上述要求可以利用逻辑电路装置自动完成 (见第二章第五节)。

在自由套管中, 弹性波的衰减系数  $\alpha_{\text{no}}$  取决于套管材质的弹性特性和套管直径。表1—5给出用 MAK—2仪器在套管模型中获得的  $\alpha_{\text{no}}$  与套管外径的关系。

八、套管波的波列含有3~4个波动周期 (6~8个相), 套管波的波动幅度从第一相到第四、

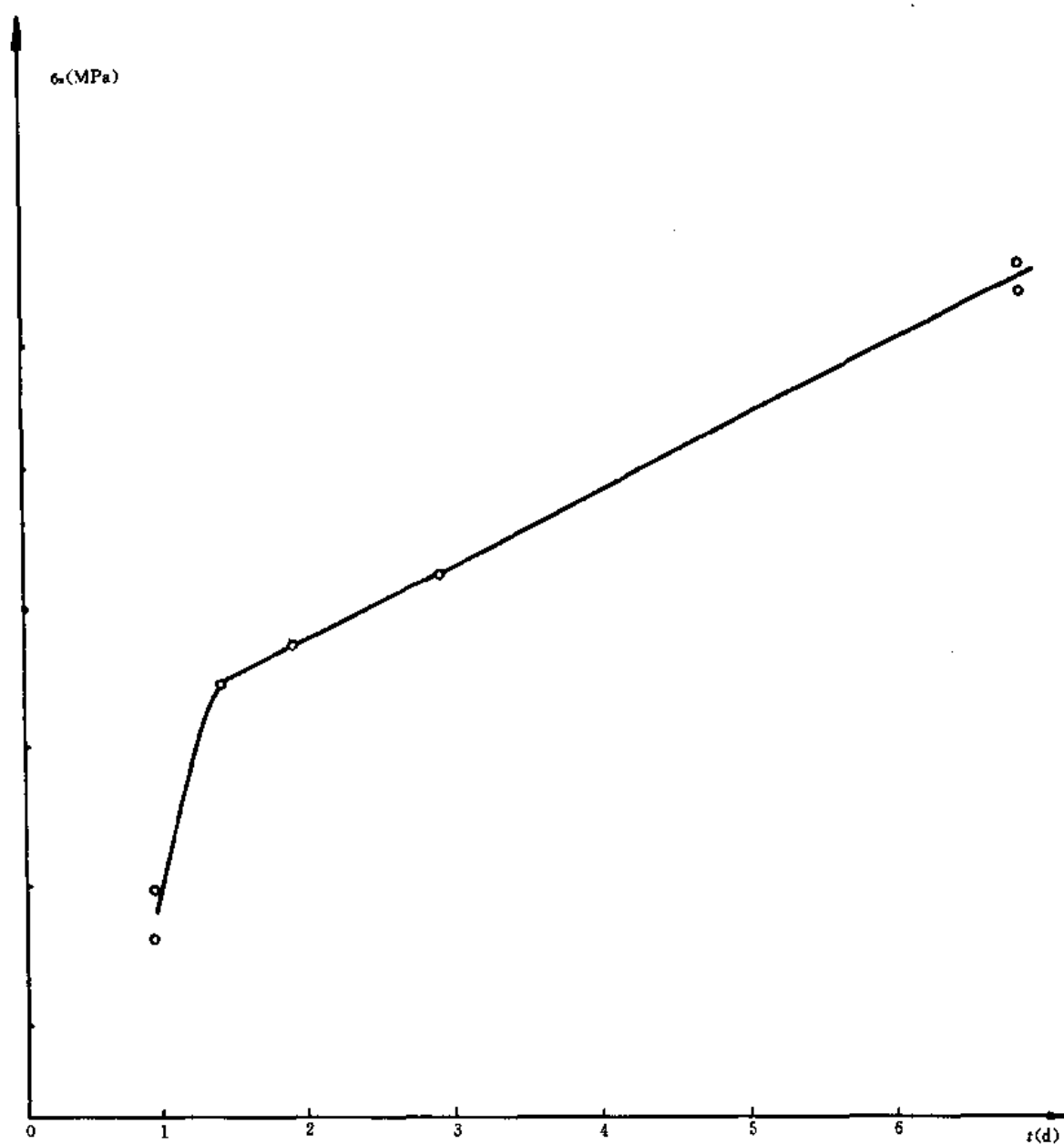


图1—6 水泥石的抗弯强度与水泥 ( $1.85\text{g}/\text{cm}^3$ ) 凝固时间的关系

表1—5 自由套管波衰减系数与套管外径关系

套管外径 (mm)	127	146	168	178	194	245	324
衰减系数 $\alpha_{70}$ (dB/m)	3.8	3.6	2.9	2.5	2.1	1.6	0.5

第五相是增加的,以后幅度逐渐减小到零值。在外径为146mm的自由套管中,用MAK—2仪器得到套管波第一到第六波动相幅度之间的比值——0.25, 1.0, 1.7, 2.0, 1.9, 0.8。由于测井时MAK—2仪器测量的是套管波第二波动相的幅度,所以把弹性波第二波动相幅度作为声波幅度的单位。

套管波的周期与仪器发射器激发的声波脉冲的频率、套管井的幅度频率特性有关。就外径是 146mm 的套管、直径为 73mm 和 100mm 的仪器发射器而言,波动周期 $T_{\text{波}}$ (第二、第三波动相持续时间之和)相应为 45 和 55 $\mu\text{s}$ 。

如果套管波第二波动相(首波正相)幅度小于地面测量面板的门坎值 $H_n$ ,那么就会产生所谓的“周波跳跃”现象。也就是说,幅度大于门坎值的后续正相波开始启动门坎装置。从上述弹性波各波动相幅度的比值可以看出,在波幅减小情况下,可能发生从第二波动相向第四波动相的跳跃现象(通常第四波动相比第二波动相幅度高 5~6dB)。在这种情况下,仪器记录的声波信号到达时间跳跃式地增加 45 $\mu\text{s}$  或 55 $\mu\text{s}$ ,这个增加值的大小与发射器的工作频率有关。由于套管波第四波动相幅度高于后续波正相幅度,所以,如果套管波第四波动相幅度小于测量门坎值,那么在低速岩性剖面中( $v_s < v_k$ )水泥环接触良好的情况下,仪器记录的波信号跳跃到地层首波正相处。当地层首波正相幅度低于测量面板的门坎值时,则发生从首波正相向高于门坎值的后续地层正相波的跳跃现象。在这种情况下,仪器接到波信号时间跳跃式地增加一个地层波周期 $T_{\text{地}}$ ,对于 73mm 和 100mm 发射器,相应增加约 50 $\mu\text{s}$  和 60 $\mu\text{s}$ (地层波周期比套管波周期 $T_{\text{波}}$ 大约长 10%~15%)。

九、在水泥与套管和地层完全接触的情况下,当套管波幅度小于门坎值时,在浮动时间窗所记录的弹性波动力学参数 $d_{1n}$ 、 $d_{2n}$ 、 $\alpha_n$ 反映地层的弹性特性,并与在裸眼井中测量的弹性波相应参数有相关关系。在水泥环有缺陷的情况下,套管波幅度超过门坎值,所以 $d_{1n}$ 、 $d_{2n}$ 、 $\alpha_n$ 等参数反映套管波的传播动态,并且与在固定时间窗记录的 $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 、 $\alpha_k$ 值相同。

在水泥环与套管接触良好的井段,可以通过在套管井中测量的 $d_{1n}$ 、 $d_{2n}$ 、 $\alpha_n$ 等参数与在裸眼井中测量的相同参数进行对比分析的方法,来评价水泥环与地层的接触状况。但是,由于没有在所有裸眼井中都进行声波测井,所以不可能利用 $d_{1n}$ 、 $d_{2n}$ 、 $\alpha_n$ 等参数来评价所有井的管外空间的水泥环胶结状况。利用这些参数评价管外空间水泥环胶结状况的另一个困难是,Y3BA—21型面板不能同时以固定时间窗和浮动时间测量信号的幅度参数,所以,在使用 MAK—2井下仪和 Y3BA—21面板测量 $d_{1n}$ 、 $d_{2n}$ 、 $\alpha_n$ 参数时,需要增加井下仪器的起下操作次数。

十、水泥环与套管之间的微环对套管波幅度有很大的影响,相对不大的微环(几十微米)就使套管波能量有很大增加。图1—7给出 $d_{1k}$ (1)、 $d_{2k}$ (2)和 $\alpha_k$ (3)与微环大小 $\Delta R$ 的关系曲线,该组关系曲线是用 MAK—2仪器在套管井模型上实验获得的。模型井的技术参数:套管外径146mm、壁厚10mm、长度5m,水泥环厚度27mm、水泥石密度1.85g/cm<sup>3</sup>。该实验是在环境温度20℃、水泥凝固两昼夜时进行的。

在套管内用产生25MPa表压的方法建立微环,并根据下式计算微环宽度 $\Delta R$ :

$$\Delta R = \frac{R^2 \cdot \Delta p}{E \cdot h_k} \left( 1 - \frac{\mu}{2} \right) \quad (1-27)$$

式中  $\Delta R$ ——微环宽度;

$R$ 、 $h_k$ ——套管外径和壁厚;

$\Delta p$ ——套管内的表压(剩余压力);

$E$ 、 $\mu$ ——套管的杨氏模量和泊松比。

从图1—7看出, $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 、 $\alpha_k$ 参数对0~40 $\mu\text{m}$ 范围内的微环反应灵敏,而在 $\Delta R$ 继续增大时, $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 、 $\alpha_k$ 值变化不大,并且趋近于自由套管特征值。显然,在有较宽的微环时,根据这些参数不能确定是否存在水泥环及其在管外空间的状态。但是,如果根据综合地球物理测井结



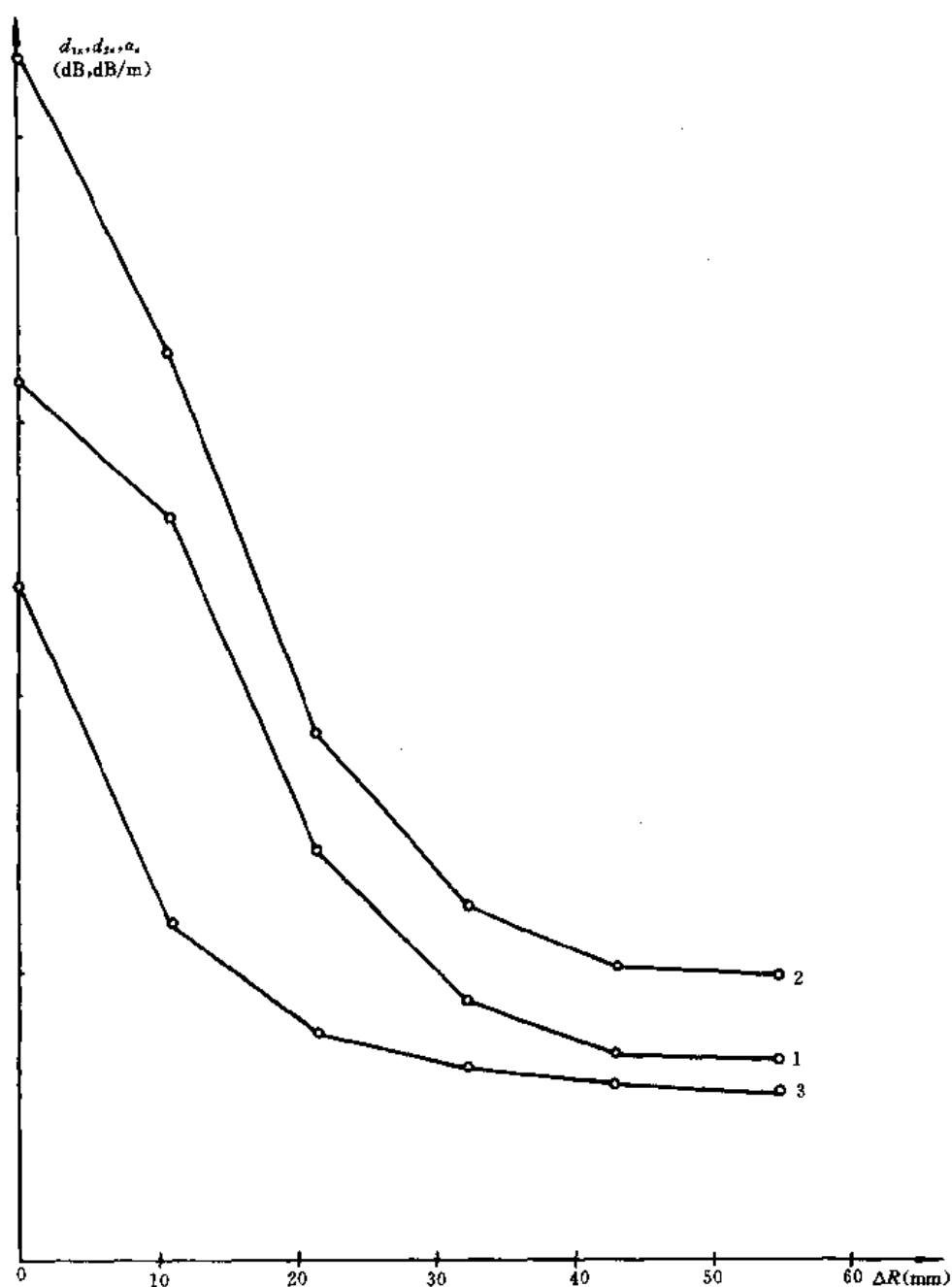


图1-7  $d_{1k}(1)$ 、 $d_{2k}(2)$ 、 $\alpha_k(3)$ 参数与套管和水泥环之间微间隙大小的关系

果（如利用伽马—伽马水泥胶结仪器）检测出有微环的井段，那么就可以使用图1-7的曲线确定微环缝隙大小。

十一、水泥环纵向孔道和连续性缺失导致套管波能量增大和  $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 、 $\alpha_k$  参数值的降低（相对胶结好的井段相应参数值而言）。为了便于比较和分析，图1-4给出了胶结良好（3）和有展开角为45°的纵向孔道（4）情况下的套管波衰减系数和水泥凝固时间的关系曲线。在水泥浆固结期结束并转变为固相以后，曲线3和曲线4的差值增加，且经过一天后差值大约为4dB/m，远远地超过 MAK-2 仪器测量  $\alpha_k$  的允许误差。然而，随着水泥环强度继续增加，曲线3和4的差值减小，并接近仪器在15~30dB/m 测量范围内的允许误差的极限（ $\pm 2.8$ dB/m）。由此得出，这种仪器由于受到仪器允许误差的限制，对水泥环中纵向孔道的分辨能力是有限的，

不能分辨展开角小于 $30^\circ$ 的纵向裂缝和小的通道。

在套管外径为146mm、壁厚10mm、水泥环厚度27mm、密度为 $1.85\text{g/cm}^3$ 的模拟井中实验获得了衰减系数 $\alpha_k$ 与水泥环中纵向孔道展开角 $\beta$ 的关系曲线，如图1—8所示。从关系曲线看出，对于小的纵向孔道参数 $\alpha_k$ 的分辨能力是低的，但是在展开角 $\beta > 30^\circ$ 的条件下，可以用于确定纵向孔道的展开度。

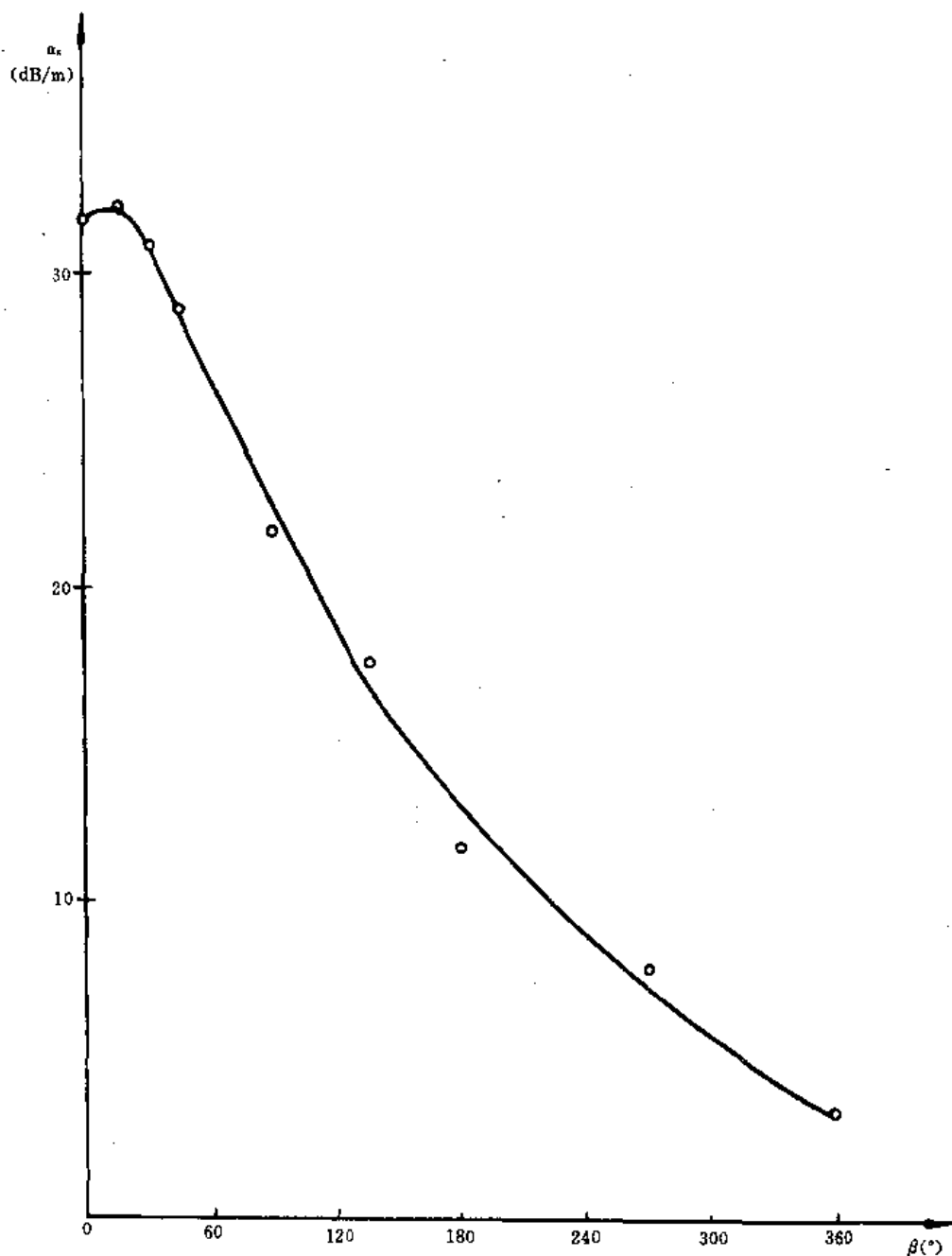


图1—8 衰减系数 $\alpha_k$ 与水泥环中纵向缺失展开角 $\beta$ 的关系

十二、根据前面的论述，在使用Y3BA—21A型地面面板测井时，建议记录以下组合参数—— $\Delta T$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $\alpha_k$ 、 $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ ，在使用Y3BA—21型地面面板测井时，建议记录 $\Delta T$ 、 $T_1$ 、 $\alpha_k$ 、 $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 参数。

用上述组合参数可以确定水泥返高、胶结好（无水泥环缺陷）的井段，并且能够划分出

有接触型缺陷和缺失型的井段。但是只用这些参数解释还不能准确地确定水泥环的缺陷类型(微环、孔道、破裂),可以利用伽马—伽马水泥胶结测井资料、反射式声波水泥胶结测井资料及 MAK—2 仪器测得的上述参数进行综合解释,获得评价水泥环缺陷类型和大小的信息。

## 第五节 测井的干扰因素和限制条件

一、在用 MAK—2 仪器测井时,最重要的条件是使井下仪器严格居中。为了满足这一条件,成套仪器中备有适于不同套管内径的三种规格的弹簧板扶正器。为保证井下仪器居中,扶正器的弹簧板应该有足够的刚度。但是,如果扶正器弹簧板刚度过大,那么对于倾角较大的井,仪器很难下到井底,所以应该在实际井筒条件下通过实验确定最佳扶正器刚度,使仪器既能居中,又能顺利下井。利用安装在扶正器活动套筒两端的可拆卸半圆环调节扶正弹簧板的最大和最小展开度(见第二章第四节)。

由于扶正器的刚度有限,在井筒倾斜角较大的情况下,井下仪器偏离套管轴心。因为在上提井下仪器时,测井电缆总是要使仪器的上部相对井轴向上偏离,而在仪器自身重量的作用下,仪器的下端相对井轴向下偏离。这样可以看到井下仪器相对井轴倾斜,也就是说,仪器的两个接收器不同程度地偏离井轴方向。

如果仪器平行偏离套管中心,那么在测量  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$  参数时会产生很大误差,但对测量  $\Delta T$ 、 $\alpha_k$  参数的精度影响要小得多。仪器相对套管中心的倾斜会导致测量参数  $\Delta T$ 、 $\alpha_k$  很大的附加误差,在解释测井资料时必须考虑校正。

二、考虑到井下仪器声系偏离套管中心,确定套管波传播时间的式(1—8)和式(1—9)应取如下形式:

$$T_{1k} = \frac{d_k - d_{np} - 2X_1}{v_k} \sqrt{1 - \left(\frac{v_k}{v_s}\right)^2} + \frac{l_1}{v_k} + T_{ок} \quad (1-28)$$

$$T_{2k} = \frac{d_k - d_{np} - 2X_2}{v_k} \sqrt{1 - \left(\frac{v_k}{v_s}\right)^2} + \frac{l_2}{v_k} + T_{ок} \quad (1-29)$$

式中  $X_1$ 、 $X_2$ ——第一、第二接收器相对于套管中心的偏移距离。

在这种情况下,声波时差的计算公式为

$$\Delta T = \frac{T_2 - T_1}{l_2 - l_1} = \frac{1}{v_k} - \frac{2(X_2 - X_1)}{v_s(l_2 - l_1)} \sqrt{1 - \left(\frac{v_k}{v_s}\right)^2} \quad (1-30)$$

从式(1—28)~式(1—30)看出,在仪器偏移套管中心情况下, $T_1$ 、 $T_2$  值减小,而  $\Delta T$  值在  $X_2 > X_1$  情况下减小,在  $X_1 > X_2$  情况下增大。

图1—9给出  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $\Delta T$  与套管倾斜角度的关系曲线。该曲线图是用带有73mm 直径发射器和张开度为250mm 扶正器的 MAK—2 仪器在模拟井实验获得的。模拟井的技术参数:套管内径150mm、壁厚8mm、长度5.5m。测量时仪器挂接在处于套管上端中心位置的测井电缆上,扶正弹簧板没有用可拆卸圆环固定,而是处于自由状态。

从关系曲线看出,倾角为45°时, $T_1$  减小近10 $\mu$ s,而  $T_2$  只减小6.5 $\mu$ s。由此可知,第一接收器所在的仪器中间部分比第二接收器所在的仪器下部偏离套管中心的程度大。表明第二接收器距下扶正器近而居中较好,而第一接收器所在的仪器中部没有扶正器,居中相对不好。在这种情况下,倾角增加到45°时, $\Delta T$  值增加7.0 $\mu$ s/m。

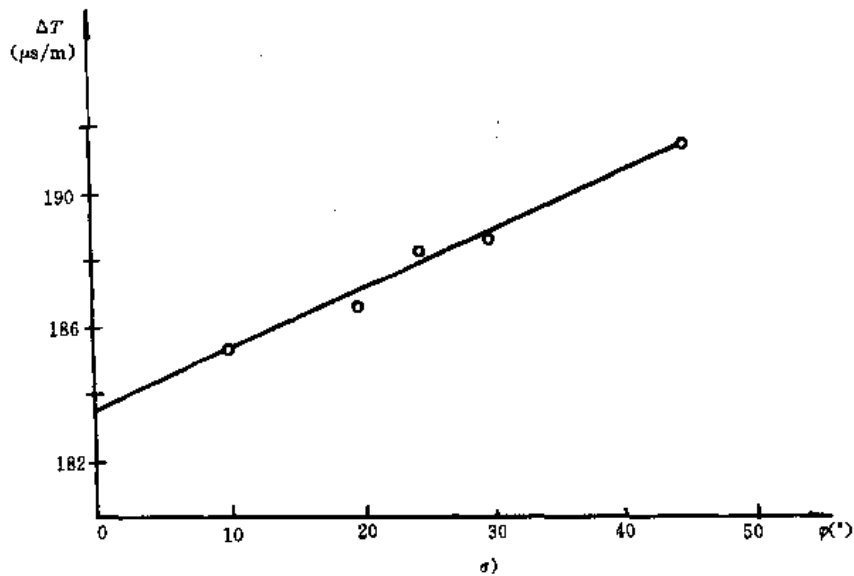
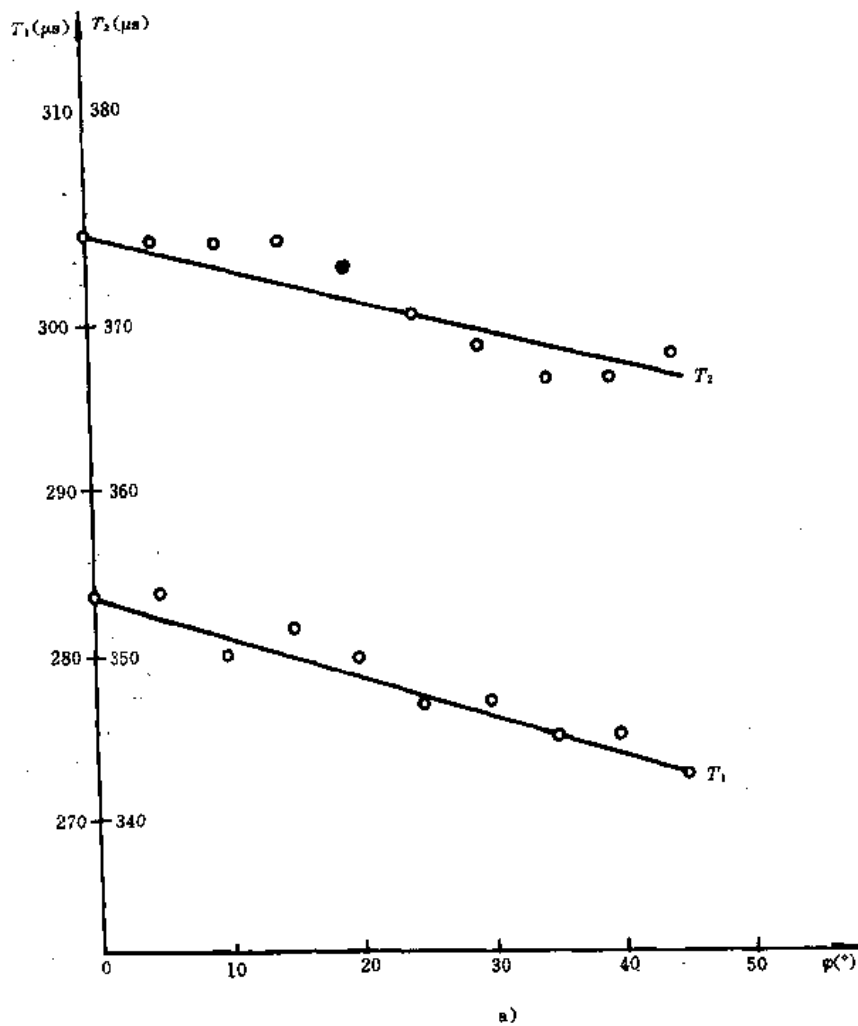


图1—9  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $\Delta T$  参数与内径为150mm 的套管倾斜角度的关系

图1—10给出根据式(1—28)和式(1—29)计算的第一、第二接收器偏离套管中心的距离( $X_1$ 、 $X_2$ )与套管倾斜角度的关系曲线。从关系曲线看出,在套管倾斜 $45^\circ$ 时,第一接收器偏移距离达到8mm,第二接收器的偏移距离为6.5mm。

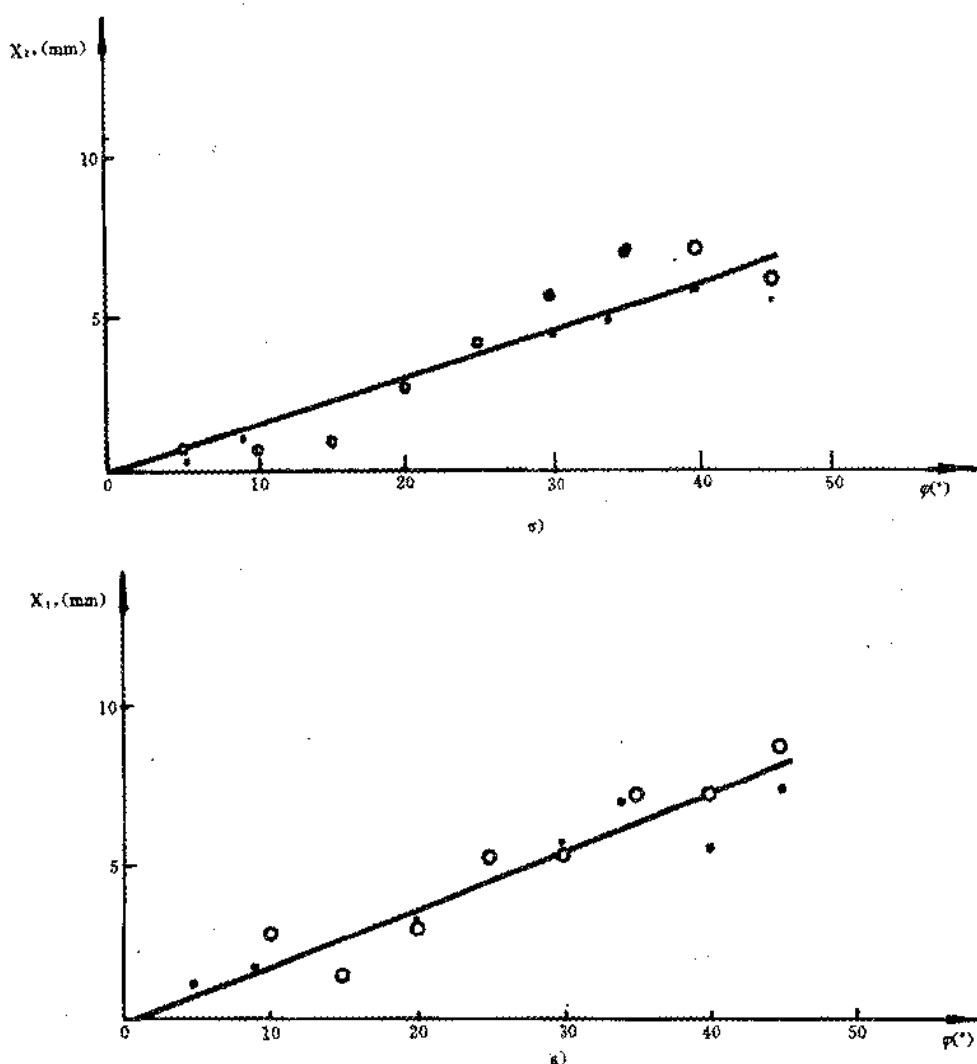


图1—10 近、远接收器偏离套管（内径150mm）轴心的距离与套管倾斜角的关系

三、幅度参数  $d_{1x}$ 、 $d_{2x}$ 、 $\alpha_x$  和时间参数一样，在很大程度上受到套管倾斜角度的影响。

图1—11给出和图1—9关系曲线同时获得的  $d_{1x}(1)$ 、 $d_{2x}(2)$ 、 $\alpha_x(3)$  与套管倾角关系的曲线。在套管倾角增大时，由于仪器偏心，参数  $d_{1x}$ 、 $d_{2x}$  值增大，而  $\alpha_x$  值减小。当套管倾斜角度达到  $45^\circ$  时， $d_{1x}$  值增大了 4.5dB，而  $d_{2x}$  值增大了 3.5dB（相对  $\varphi=0$  而言）。在这种情况下， $\alpha_x$  相对于起始值减小了近 2.0dB/m。

四、在套管内径超过 220mm 的井中测井时，建议使用弹簧板最大展开度 350mm 的大规格扶正器。同时，由于在较大内径套管中仪器的通过性能比在小直径套管中通过性能好，所以为了减小仪器在倾斜井中的偏心度，建议根据套管内径值用可拆卸半圆环确定弹簧板的最小展开度（见第二章第四节）。

图1—12给出在套管内径是 305mm、壁厚 10mm、长度为 5m 的井中，用带有 100mm 直径发射器、弹簧板固定最小开度 305mm 的 MAK—2 仪器获得的  $d_{1x}(1)$ 、 $d_{2x}(2)$ 、 $\alpha_x(3)$  与套管倾角的关系曲线，以及  $d_{1x}(4)$ 、 $d_{2x}(5)$ 、 $\alpha_x(6)$  参数在没有固定扶正器最小展开度值情况下的关系曲线。从图中的关系曲线看出，在没有固定扶正器弹簧板最小展开度的情况下，套管倾角小于  $30^\circ$

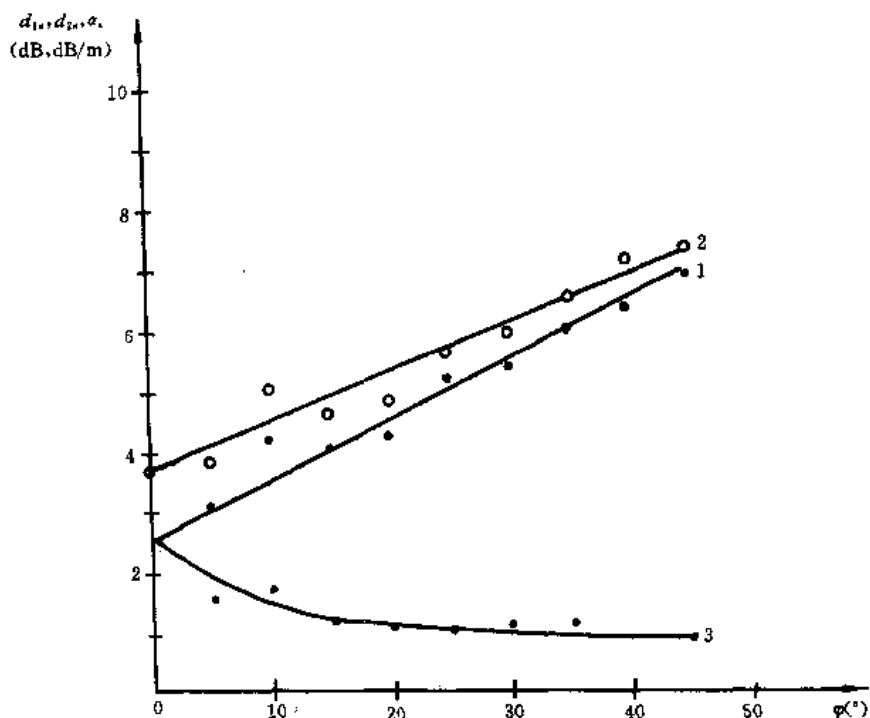


图1—11  $d_{1k}(1)$ 、 $d_{2k}(2)$ 、 $\alpha_k(3)$ 参数与套管（内径150mm）倾斜角的关系

时，参数  $d_{1k}$  的测量误差为 +6dB，参数  $d_{2k}$  的测量误差为 -6dB，参数  $\alpha_k$  的测量误差不超过 3.0dB。在扶正器弹簧板最小展开度固定的情况下，测量参数的误差大大减小，对于  $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 、 $\alpha_k$  相应不超过 +2dB、+1dB 和 -2dB/m。

五、上述套管波的时间和幅度参数与倾角的关系是在静态条件下获得的，而在井下测量时仪器是移动的，仪器运动状态下测量误差可能比在静止状态下的测量误差还要大。

通过模拟实验和井下测量，确定了由套管倾斜引起的  $\alpha_k$  参数（使用的是 MAK—2 仪器）允许误差的极限值，见表 1—6。

表 1—6 由套管倾斜引起的  $\alpha_k$  参数测量误差的极限值

套管外径 (mm)	套 管 倾 角 (°)								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
146	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0
168	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.5	2.5	2.5
245	1.5	1.5	2.0	2.5	3.0	3.0	—	—	—
324	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	—	—	—

六、洗井液中的气泡是井下测量时的主要限制条件，它将大大衰减弹性波幅度，使仪器测得的关于井筒管外空间水泥环胶结状况的信息失真。

图 1—13 给出用 MAK—2 仪器在南苏尔古特区 2084 号井获得的测井图。该图证明了洗井液

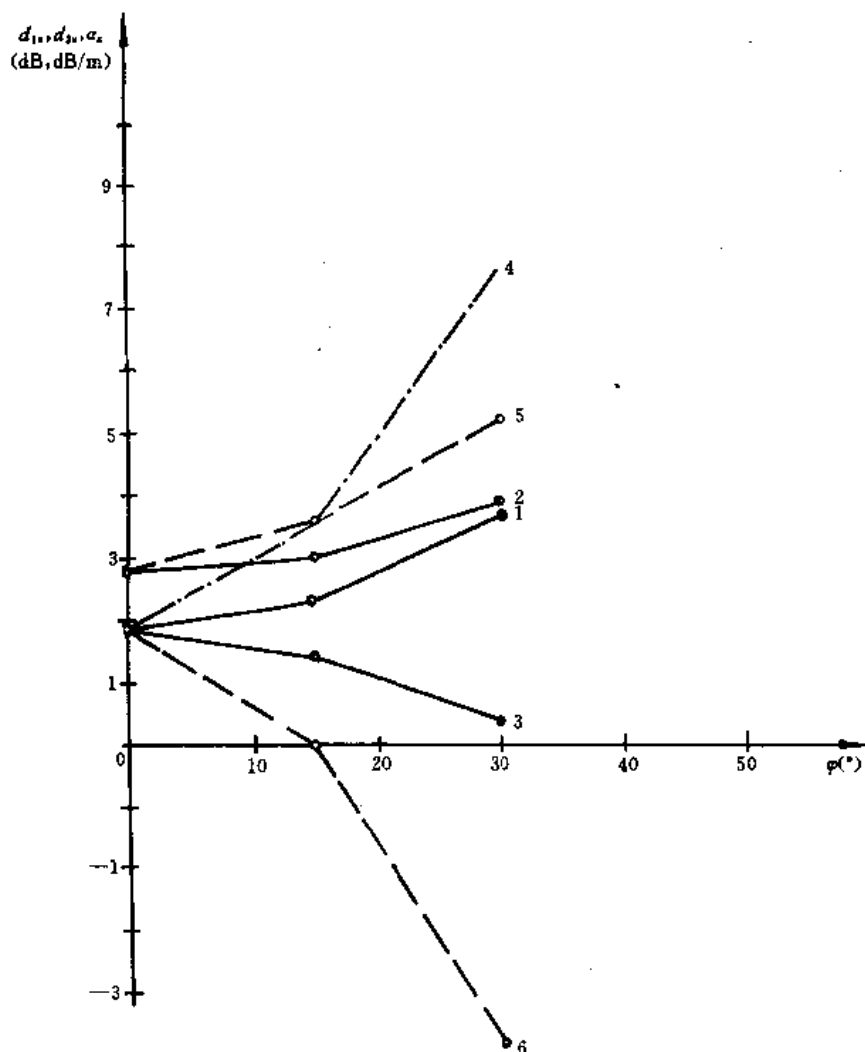


图1—12 在根据套管内径值固定扶正器弹簧板的最小展开度和不固定弹簧板展开度条件下,  $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 、 $\alpha_k$ 与套管(内径305mm)倾角的关系

1, 2, 4—固定条件下的  $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 、 $\alpha_k$ 的结果;

4, 5, 6—不固定条件下的  $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 、 $\alpha_k$ 的结果

中的气体对用这种仪器测得的弹性波参数的影响。在0~150m井段洗井液中含有的气体较多, 曲线变化的特征如下:

1. 在衰减系数  $\alpha_k$  保持相对不太大的情况下,  $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$ 幅度衰减值急剧增大。
2. 在  $d_{1k}$ 和  $d_{2k}$ 值大于27dB的条件下, 时间参数急剧增大并成为最大值。
3. 在  $d_{1k}$ 和  $d_{2k}$ 值小于27dB的条件下,  $T_1$ 和  $T_2$ 值开始超过相应的  $T_{1k}$ 和  $T_{2k}$ 值, 而  $\Delta T \approx \Delta T_k$ 。

在解释这种含气井段测井曲线时, 可能得出水泥胶结质量的错误结论。所以, 在上述井段不应该给出关于水泥胶结质量的结论。

七、如果在测井过程中灌注影响弹性波参数的洗井液, 那么也不应该给出关于上部井段水泥胶结质量的结论。

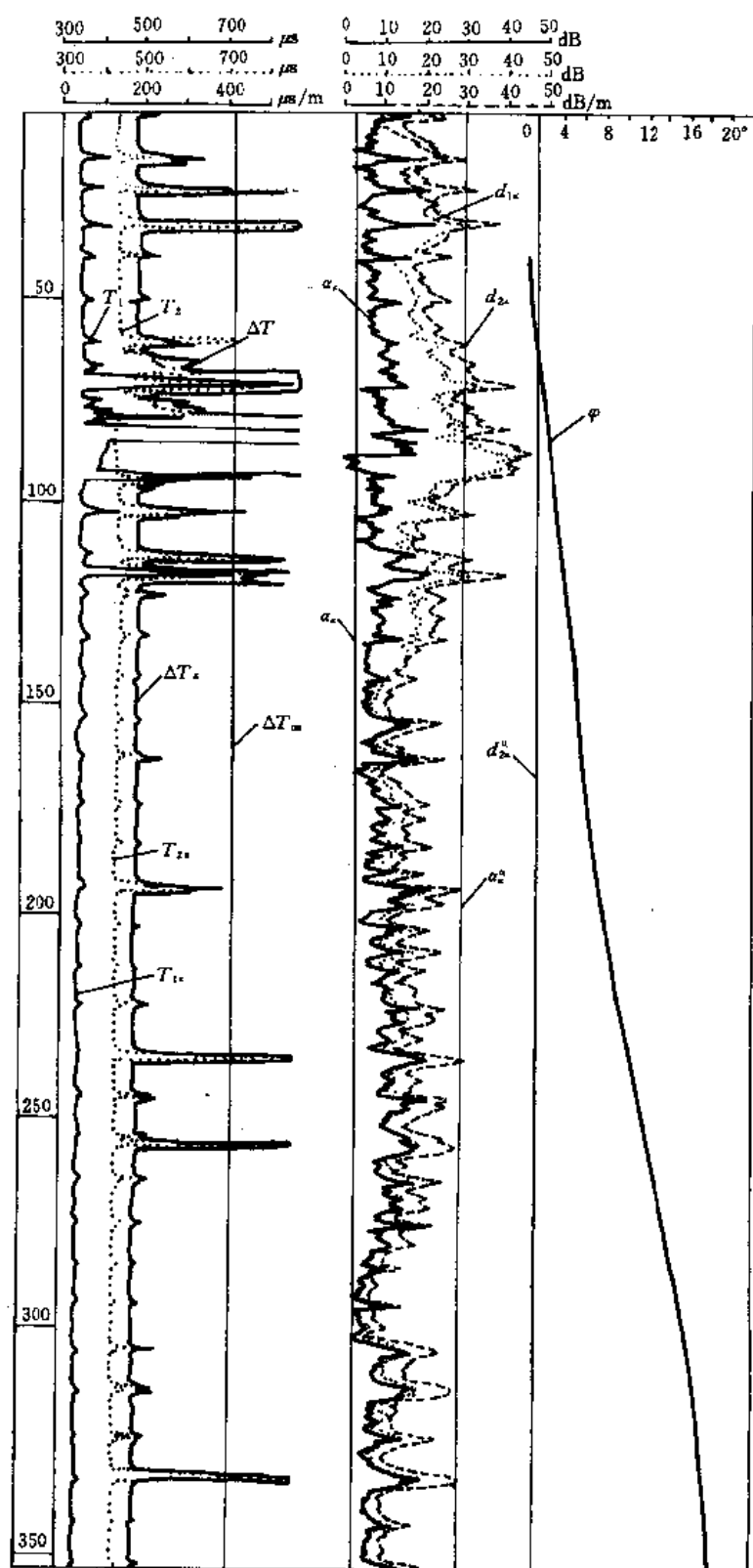


图1—13 在南苏尔古特区2084号井，  
直径为245mm 的表层套管中  
测得的 MAk—2曲线图



## 第六节 仪器的计量保证

МАК—2仪器的计量保证设备是 УПАК—1和 УПАК—2校验装置。УПАК—1装置的标准筒是用聚氯乙烯塑料制成的，它具有大衰减系数和低传播速度的特点，利用这种装置可以在接近泥岩的条件下校验仪器。为了校验声波水泥胶结测井仪器，必须模拟对未胶结套管有代表性的条件，УПАК—1装置可以模拟这些条件，但对于实际应用来说其精度是不够的。

УПАК—2装置的标准筒是用146mm的钢套管制作的，在标准筒中可以产生10MPa的剩余静水柱压力，这样就为更快速而准确地确定被检仪器的计量特性、发射器功率的一致性和接收器灵敏度提供了可能性。

除此之外，借助于 УПАК—2装置可以在将换能器安装在仪器中以前进行换能器的选择。同时，可以在宽的测量参数变化范围内，即从未胶结套管到胶结好套管的参数变化范围内，用 УПАК—1和 УПАК—2两种装置检验 МАК—2仪器。

用 УПАК—1和 УПАК—2装置校验 МАК—2仪器的流程如图1—14所示，根据校验规程 АЯ Ж2.899.019ИИ 进行仪器校正。

使用信号发生器、示波器和频率计测定弹性波传播时间；使用示波器、电压表、供电电源，根据补偿电路测量弹性波幅度。在测量时应该使用误差极限不高于图1—14所给极限的仪器。

井下仪器通过等效电缆与控制面板连接，仪器的扶正器是为在内径为120mm的套管中工作制造的，可以保证声波仪器在标准筒中居中。

在用 УПАК—2装置校验仪器时，将井下仪器放入标准筒中，然后借助于增压泵在标准筒内产生10MPa的液体表压。这时把校验变换器撤出井下仪器测量探头的范围以外。给测量仪器和仪器控制面板供电，将控制面板上的转换开关 ПИИТ. СП 置于位置3，开关 УСИЛ. СП 放在位置1，开关 СИИХР. X 放在位置1，开关  $S_1$  放在位置1。在示波器上观察从井下仪器近探测器传来的波图，根据脉冲发生器产生的脉冲后沿实现示波器同步。在信号发生器的输出端调节脉冲宽度，使示波器扫描波束的起点正好在控制面板输出端信号第二波动相通过零电平的位置。然后用频率计测量信号发生器产生的脉冲宽度  $T_1$ 。

用示波器的纵向偏移放大器调节声波信号第二波动相幅度，使其不小于示波器荧光屏的  $2/3$ ，锁定示波器荧光屏上最大幅度位置。然后将转换开关  $S_1$  置于位置2并从电源面板给示波器供直流电，调节电源面板输出电压，使得示波器上的波束偏移正好在波图的第二波动相幅度的最大位置，用电压表测量电阻  $R_2$  的电压，这个电压值等于近接收器接收的声波信号第二波动相幅度  $A_1$ 。

控制面板的转换开关 СИИХР 放在位置2， $S_1$  开关回至1位置，在示波器荧光屏上观察远接收器的波图。使用脉冲发生器和频率计，采用上述方法测量从控制面板的同步脉冲 CH 前沿到控制面板输出端 BK 上的声波信号第二波动相经过零电平点的时间  $T_2$ 。用示波器、供电电源和电压表，采用上述补偿方法确定井下仪器远接收器的首波第二波动相的幅度  $A_2$ 。

与仪器模拟的电脉冲延迟时间相对应的弹性波传播时差值根据下式计算：

$$\Delta T = \frac{T_2 - T_1}{S} \quad (\mu\text{s}/\text{m}) \quad (1-31)$$

式中  $S=0.5\text{m}$  为两接收器的间距。

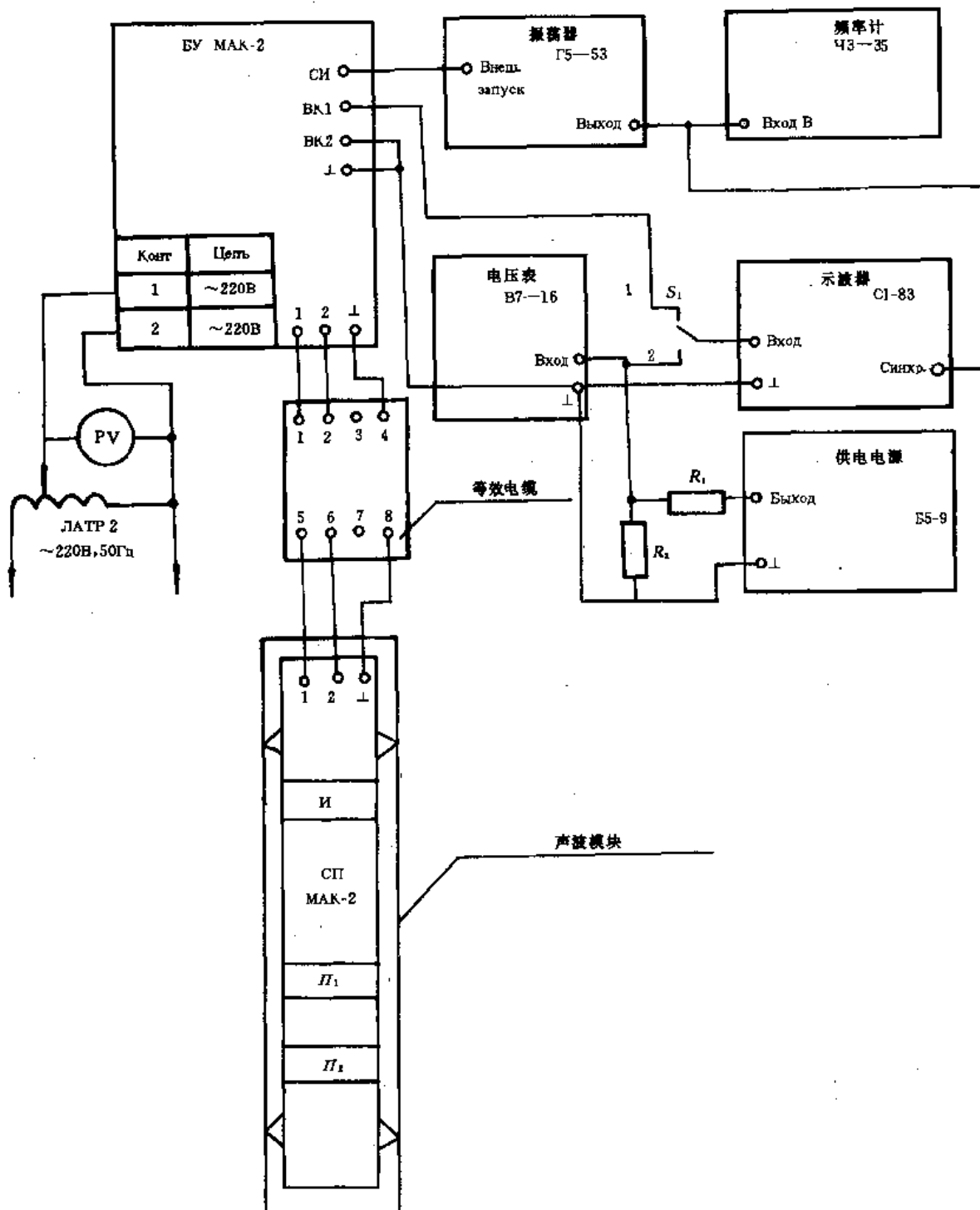


图1—14 仪器的校验图

根据公式 (1—32) 确定将弹性波传播时差转换为电脉冲延迟时间的基本相对误差，其公式为：

$$\delta_{\Delta T} = \frac{\Delta T - \Delta T_0}{\Delta T_0} \cdot 100\% \quad (1-32)$$

式中  $\Delta T_0$  —— 标准筒的声波时差值。

求得的  $\delta_{\Delta T}$  值应不大于  $\pm 3\%$ 。

与仪器模拟的电脉冲幅度比相对应的声波衰减系数根据下式计算：



式中  $\alpha_0$ ——标准筒的声波衰减系数。

用 VPIAK—2 装置求得的  $\Delta\alpha$  值应不超过  $\pm 1.4\text{dB/m}$ ，而用 VPIAK—1 装置求得的  $\Delta\alpha$  值应不超过  $\pm 2.8\text{dB/m}$ 。在 VPIAK—1 装置上校验仪器的方法与在 VPIAK—2 装置上的校验相类似。

安装在井下仪器中的换能器在长时间使用过程中会受到各种因素的影响（机械损害、漏油、电气绝缘破坏等），其发射功率和接收灵敏度可能改变。对 MAK—2 仪器而言，接收器作为换能器，它的不一致性将产生衰减系数的测量系统误差。

为了确定由于接收器不一致性产生的 MAK—2 仪器的系统误差，必须装配如图 1—15 所示的电路。

将 VPIAK—2 装置的换能器调节到最下面的位置，激发电压调到 3~6V，确定下井仪器远接收道的灵敏度，方法如下。

从换能器所在的最下面位置开始，沿着接收器缓慢地移动校验装置的换能器（先向上，然后再向下），力求获得远接收器从校验装置换能器接收到的首波第二波动相的最大幅度值，并固定换能器。用示波器在仪器控制面板输入端（信号互感器输入端）测量首波第二波动相（首波正相）的幅度  $A_{\text{нз}}$ 。 $A_{\text{нз}}$  可以表征井下仪器接收道的灵敏度，把  $A_{\text{нз}}$  值与仪器出厂检验时测量的参数值进行比较，如果  $A_{\text{нз}} < 0.8 A_{\text{нз0}}$ ，那么就将仪器送去修理或者磁化并重复这一项目的校验；如果在重新校验后仍是  $A_{\text{нз}} < 0.8 A_{\text{нз0}}$ ，那么就将井下仪器送去维修。在远接收道灵敏度确定以后，将 VPIAK—2 装置的换能器向上移动 0.5m（两接收器的间距），确定近接收道的灵敏度。

由于远、近两个接收器灵敏度的差异，在测量衰减系数时将产生仪器的系统误差，系统误差的计算公式为：

$$\Delta_c \alpha = \frac{20}{S} \lg \frac{A_{\text{нз}}}{A_{\text{нз0}}} \quad (\text{dB/m}) \quad (1-35)$$

求得的  $\Delta_c \alpha$  值记入仪器校验记录中。如果  $\Delta_c \alpha > 1.2\text{dB/m}$ ，那么将仪器送去维修。

采用以下方法确定井下仪器发射器的功率 ( $A_{\text{в}}$ )：将校验换能器的电缆连接到示波器的信号输入端，并使校验换能器处于声波信号接收状态，然后沿着仪器发射器缓慢地移动换能器，力求在换能器的输出端得到首波第二波动相最大幅度值，用示波器测量其幅度  $A_{\text{в}}$ 。

如果  $A_{\text{в}} < 0.8 A_{\text{в0}}$  ( $A_{\text{в0}}$  为仪器出厂检验时确定的发射器功率)，那么将井下仪器送去检修。

## 第二章 井下测量方法

应该按照 АЯЖ2.899.019ТО 技术说明和技术规程及以下介绍的要求使用 MAK—2测井仪器。

### 第一节 对仪器运输的要求

一、井下仪器应该放在测井仪器车或绞车底盘上安装的长度不小于4m、内径不小于110mm的仪器筒中运输。

二、应将仪器固定在筒内，以免仪器沿筒轴移动和振动及碰撞仪器筒。

三、仪器固定不允许卡住电声换能器外壳和扶正器部件。

四、在装卸仪器和进行井口安装时，不允许对仪器有弯曲负荷和撞击声电换能器外壳。

五、在运输之后，扶正弹簧板应该保持初始弧形和要求的最大展开直径。

六、地面仪器应该固定在测井操作室的仪器台上。

七、运输仪器时要求周围环境温度保持在 $-50^{\circ}\sim+50^{\circ}\text{C}$ 范围内。

### 第二节 对井场和井筒条件的要求

一、测试井应该装有利于往井口送仪器的坡道、用于把测井仪器车和绞车接入电网的配电盘、用于供水或供蒸汽的胶管。水和蒸汽用于冬季施工时冲洗井下仪器和加热导向滑轮设备。

二、起下设备应当保证使天滑轮离开套管上端的高度不小于5.0m。

三、在进行井下测量时，供电电压和频率应当为 $220\pm 22\text{V}$ 、 $50\pm 1\text{Hz}$ 。

四、测井前应该洗井，以清除套管中残存的水泥浆和其它阻碍仪器下井的物质。

五、用成分和密度均匀的洗井液灌满套管至井口。

六、洗井液灌满的井筒不应有含气泡的井段。

七、在洗井液还没有灌到井口情况下，或者在洗井液中存在富含气泡的井段，不能提供相应井段有关水泥胶结质量的结论。

八、在灌洗井液时测井，不能提供上部井段有关水泥胶结质量的结论，因为在这种情况下仪器记录弹性波参数受井筒上部气泡和液体流动产生的声波噪声的影响。

### 第三节 仪器工作的安全保证措施

一、在使用 MAK—2仪器时，必须满足下列文件中所介绍的安全要求：

1. 《石油天然气开采工业的安全条例》，苏联国家矿山技术监督局1974年1月31日批准（第12款）；

2. 《用户电气装置技术操作规程和技术安全规则》，苏联国家矿山技术监督局1984年12月

21日批准。

二、地面仪器壳体应该与测井仪器车壳体、地线相连，接地电阻应不低于 $4.0\Omega$ ，而电缆与仪器壳体之间的绝缘电阻应不低于 $40M\Omega$ 。

三、在接通 MAK—2 仪器控制面板 “СЕТЬ” 开关时，在 “1、2” 接线柱上相对 “⊥” 接线柱和面板壳体产生井下仪器所必须的110V、50Hz 的交变电压。“СЕТЬ” 开关接触时，禁止触及上述接线柱，必须在控制面板电源开关断路情况下连接测井电缆的缆芯和铠装外皮。

四、在下井仪供电电路的某些点产生高达600V 的电压，在通电状态下禁止拧开这一部分的保护套和触摸它的元件。

五、在地球物理企业仪器修理车间，应该由经过专门培训并通过1000V 电气设备作业安全技术考试的技术人员检修仪器。

## 第四节 用УЗБА—21А 地面面板进行井下测量

一、按照以下顺序进行井下测量准备：

1. 根据套管内径，用表2—1选择具有最佳扶正器和发射器规格尺寸的井下仪器。

表2—1 对于各种套管内径推荐使用的扶正器和发射器规格

被测量的套管内径 (mm)	$\leq 110$	110~220	220~320
发射器直径 (mm)	73	73	100
扶正器规格	小型	中型	大型
扶正弹簧张开最大直径 (mm)	110	250	350

2. 将选择好的井下仪器放在两个木制支架上，借助于活动半圆环调整扶正器弹簧板的张开度。

在使用中型扶正器测量内径小于150mm、倾角为 $45^\circ$ 的套管井时，为保证井下仪器起下顺利，借助于装在活动套筒内可拆卸半圆环调节扶正器弹簧板张开直径，并使其大于套管内径值20mm。在这种情况下，不使用装在活动套筒外面的半圆环调节扶正器张开度。

在使用大型扶正器测量内径为230~320mm、倾角在 $30^\circ$ 以下的套管井时，为减小井下仪器偏心，借助于装在扶正器活动套筒外面的可拆卸半圆环确定扶正器弹簧板的最小可能压缩直径，使其等于套管内径。

3. 取下井下仪器头护帽，确认密封圈完好后，将测井仪器与电缆头连接，并且按图2—1所示装配仪器连接电路。

在使用 УЗБА—21А 地面面板工作时，不再使用 MAK—2 控制面板，因为 MAK—2 仪器可以实现 УЗБА—21А 井下仪器的所有功能。

4. 给示波器、УЗБА—21А 地面面板供电（按钮 “СЕТЬ”），给井下仪器供电（按钮 СКВАЖ. ПРИБОР ПИТАНИЕ），调节好测井仪器所要求的电流，电流不应超过110mA。

5. 凭听觉检查井下仪器声脉冲发射器的工作。用螺丝刀或夹子等摩擦接收器外壳，检查仪器接收器电路的工作性能，摩擦时在示波器荧光屏上应观察到电脉冲信号。

6. 用数字式指示器和转换开关 “КОНТРОЛЬ” 在调零和刻度状态下检查 УЗБА—21А 面板

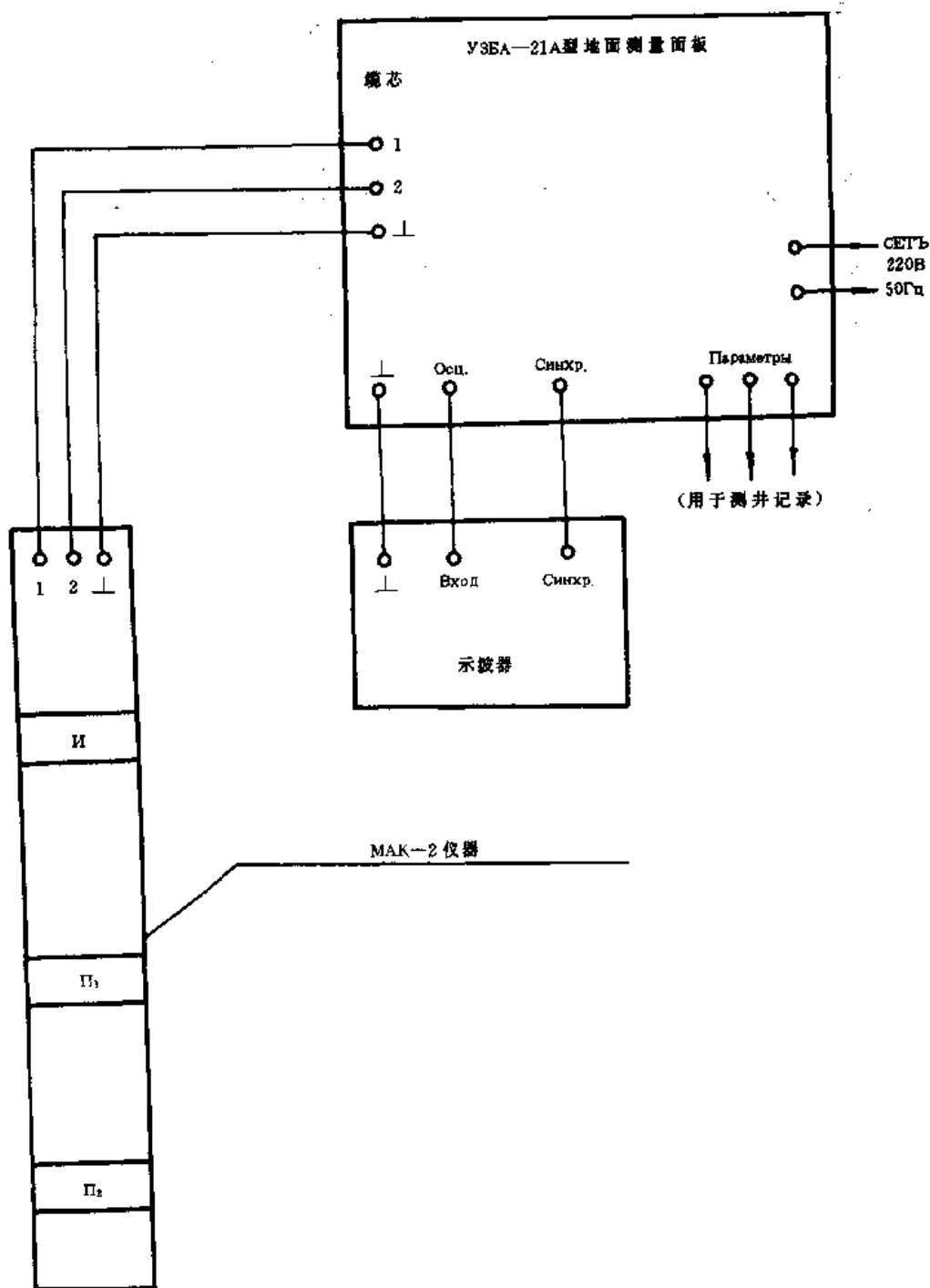


图2—1 使用 Y3BA—21A 面板测井时的仪器接线图

的工作性能，然后将面板转换到测量状态。

7. 将井下仪器提升到井口上方，同时防止仪器受机械弯曲和撞击，并放入套管到达电缆头位置，调定地面测井仪器深度计数器的零读数。

二、应该按照以下步骤完成井下测量：

1. 使测井记录仪处于工作状态，根据表2—2用位于插接面板后面的接线插接头将 Y3BA—21A 面板的输出端接到记录仪的输入端；当用照相记录器记录参数时，应将 Y3BA—21A 面板上相应接线端“ПАРАМЕТРЫ”连在自动照相记录器上。

表2-2 Y95A—21A 面板输出参数的记录格式

记录道号 No	记录的参数	参数零值	参数的刻度值	图的轨道号	图的记录比例	图的零线值	参数的记录点 (m)
1	$\Delta T$	0	200 $\mu$ s/m	1	50 $\mu$ s/m $\cdot$ cm	0	2.4
2	$T_1$	0	200 $\mu$ s	1	50 $\mu$ s/cm	200 $\mu$ s	1.7
3	$T_2$	0	300 $\mu$ s	1	50 $\mu$ s/cm	250 $\mu$ s	1.9
4	$a_k$	0	15dB/m	2	5dB/m $\cdot$ cm	-10dB/m	2.4
5	$d_{1n}$	0	7.5dB	2	5dB/cm	-10dB	1.7
6	$d_{2n}$	0	15dB	2	5dB/cm	-10dB	1.9

2. 把 Y95A—21A 面板依次转换到调零状态 УСТ. НУ ЛЯ 和刻度状态 КАЛИБРОВКА, 根据表2-2用测井记录器记录被测参数的零值(校验1)和刻度值(校验2)。

3. 将地面测量面板转换到测量状态 ИЗМЕРЕНИЕ, 调定井下仪器的最小放大系数, 即按“СКВАЖ. ПРИБОР УСИЛЕНИЕ2”按钮。

4. 低速往井中下放仪器, 然后将仪器停在不少于100m 的深度位置, 在该深度位置用示波器观察声波幅度的最大信号。

5. 在示波器屏幕上观察声波信号, 使用“СИГ.  $\varphi$  —  $\bar{\varphi}$ ”按钮调定声波信号的极性, 使第二波动相为正向。

6. 松开“ОСЦ. АЦ”按钮, 将 Y95A—21A 面板时间道的信号送到示波器的输入端。

按“ФАЗА ИЗМ—”按钮, 根据记录信号的前沿调定面板门坎装置的起动状态。将“СИНХР.”转换开关置于1+2位置, “АТТЕНЮАТОР АК”转换开关置于9位置, 电位器“УСИЛЕНИЕ КАН. 1”和“КАН. 2”置于中间位置, 在示波器屏幕上能观察到如图2-2a 所示的波图。

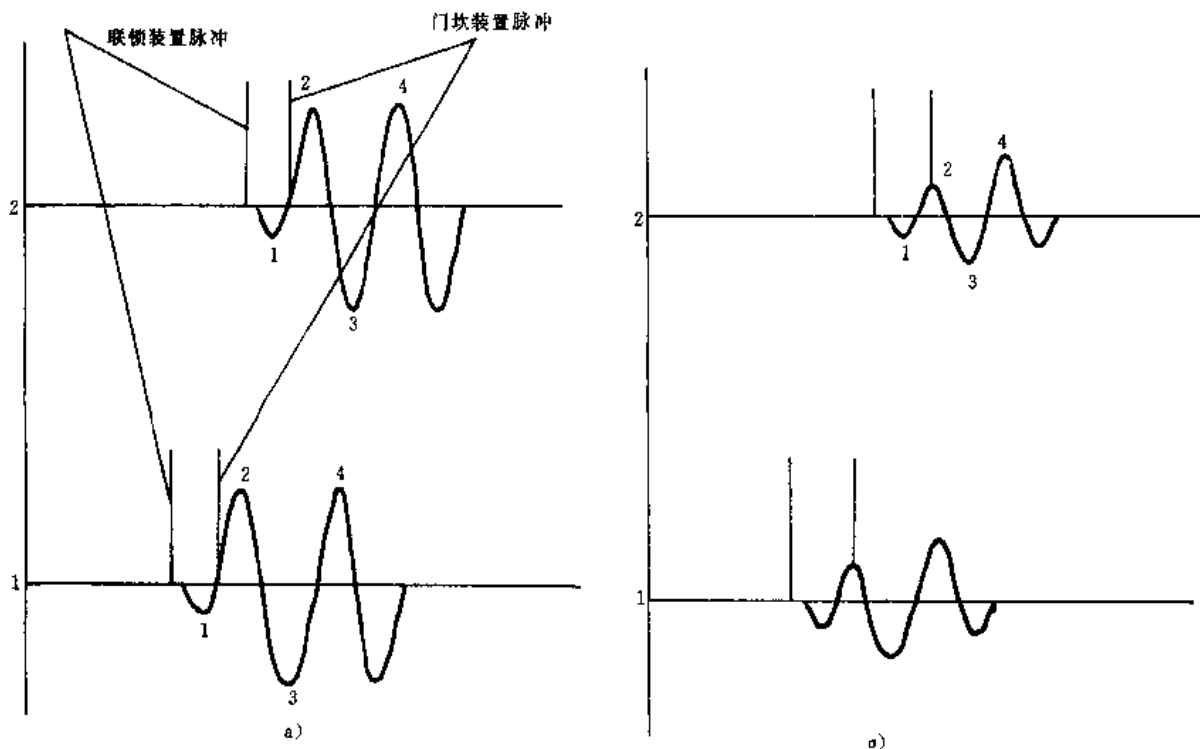


图2-2 联锁装置和门坎装置脉冲的设定



用电位器“ДЛИТ. БЛОКИРОВКИ КАН. 1”, КАН. 2”设置比两个测量道的首波第二波动相到达时间少 $50\mu\text{s}$ 的截止信号(图2—2a)。

用转换开关“КОНТРОЛЬ”和面板的数字式指示器测量两个测量道首波第二波动相的到达时间并确定属于套管波的记录信号。在记录套管波参数时, $T_1$ 、 $T_2$ 值在允许误差 $\pm 5\mu\text{s}$ 范围内应该与表2—3中给出的 $T_{1к}$ 和 $T_{2к}$ 值一致,这时 $\Delta T = \Delta T_k = (184 \pm 5) \mu\text{s/m}$ 。

表2—3 与厚度为10mm各种直径套管相对应的首波第二波动相到达时间和固定窗口结束的时间

套管外径 (mm)	第二波动相到达时间 ( $\mu\text{s}$ )				固定窗口终端脉冲的时间位置 ( $\mu\text{s}$ )			
	$T_{1к}$		$T_{2к}$		$T_{10к}$		$T_{20к}$	
	发射器直径 $\phi$		发射器直径 $\phi$		发射器直径 $\phi$		发射器直径 $\phi$	
	73mm	100mm	73mm	100mm	73mm	100mm	73mm	100mm
127	262	259	354	351	285	287	377	379
140	271	268	363	360	294	296	386	388
146	275	272	367	364	298	300	390	392
168	289	286	381	378	312	314	404	406
178	296	293	388	385	319	321	411	413
194	306	303	398	395	329	331	421	423
219	324	321	416	413	347	349	439	441
245	342	339	434	431	365	367	457	459
273	361	358	453	450	384	386	476	478
324	393	390	485	482	416	418	508	510

在胶结好的井段记录的时间可能与地层波有关。因此,如果 $T_1 \neq T_{1к}$ 、 $T_2 \neq T_{2к}$ 、 $\Delta T \neq \Delta T_k$ ,那么必须在将仪器下井的同时,选择 $T_1$ 、 $T_2$ 和 $\Delta T$ 等于计算的套管波到达时间,而信号幅度为最大值的井段。

7. 按“ОЦЛ. АК—АЦ”按钮,把УЗБА—21А面板的幅度道信号送到示波器的输入端。按“ОКНО ПЛАВ. Т. ФИКС.”按钮,调定幅度参数记录时窗的宽度,使其等于 $50\mu\text{s}$ 。用电位器“РЕГ.  $t_{к1}$ ,  $t_{к2}$ ”和“РЕГ.  $\Delta t$ ”设置第一、第二测量道固定时间窗,使得窗口终端记号位于首波正相后沿零电平处(见图2—3)。计算的固定时间窗的位置见表2—3。

用转换开关“АТТЕНЮАТОР АЦ”调定幅度信号的测量方式,使得以这种测量方式工作时不限制在示波器上观察到的记录信号的第二波动相。

然后,往井中下放仪器并用数字式指示器检测仪器测量参数 $\alpha_k$ 、 $d_{1к}$ 、 $d_{2к}$ ,同时选择 $\alpha_k$ 值恒定不变(2~15dB/m)的长度不少于2m的套管井段。把仪器停在该井段中间,并调节面板幅度道的传输系数,即用转换开关“АТТЕНЮАТОР АЦ”和电位器“АТТЕНЮАТОР ПЛАВНО”调节,使 $d_{1к} = \alpha_k \cdot l_1 = \alpha_k$  ( $l_1 = 1\text{m}$ ,为近接收器的源距),允许调节误差为 $\pm 1\text{dB}$ 。例如,如果 $\alpha_k = 12\text{dB/m}$ ,那么就应设置 $d_{1к} = 12\text{dB}$ 。

仪器调节不允许在倾角大于 $15^\circ$ ,洗井液具有不稳定声学特性的上部井段以及在套管接箍等位置。

8. 按“ОЦЛ. АК—АЦ”按钮,把УЗБА—21А面板时间道的信号送到示波器的输入端。继续往井下放仪器,选择长度不小于2m,其 $d_{2к}$ 值恒定并等于27dB的井段。把仪器停在该井段

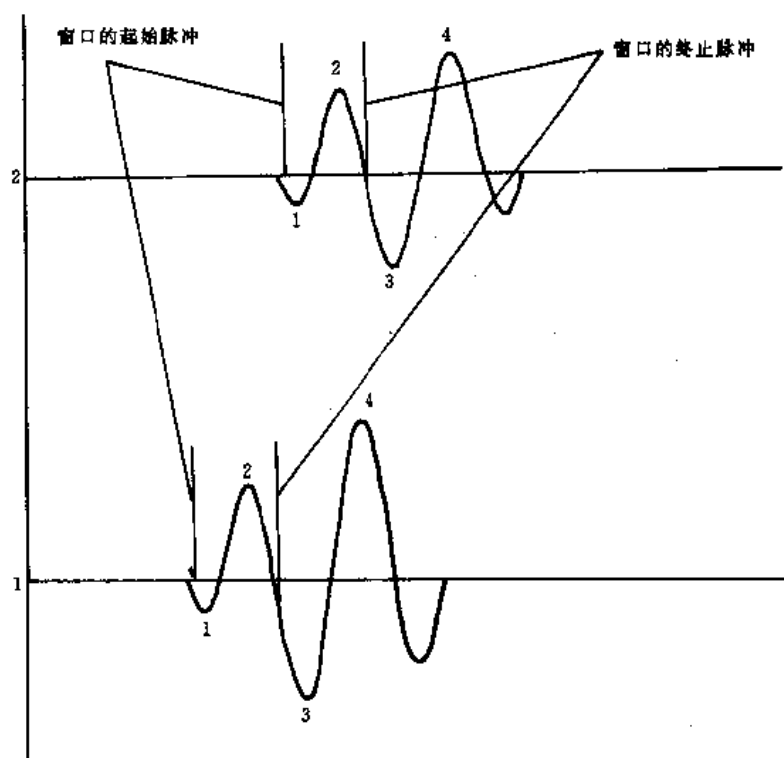


图2—3 固定时间窗位置的设定

中间，将增益选择开关放在9位置，调节测量面板时间道的传输系数。其具体调节方法是，用电位器“УСИЛЕНИЕ КАН. 2”将第二测量道的门限装置起动标志设在测量的声波信号第二波动相的尖峰处（见图2—26），固定这个电位器旋钮位置。然后把电位器“УСИЛЕНИЕ КАН. 1”的旋钮放在相同的位置，在这种情况下两个时间测量道的传输系数有相同的数值。继续往井中下放仪器证实，在第一测量道  $d_{1к} > 27\text{dB}$  条件下，当第二测量道  $d_{2к} > 27\text{dB}$  时，第二测量道的门限装置起动标志从声波信号的第二波动相跳到第四波动相位置。

让仪器停在  $d_{1к} = 27\text{dB}$  的井段，调节好增益电位器“УСИЛЕНИЕ КАН. 1”的位置，使第一测量道的门限起动标志处在声波信号第二波动相的尖峰处（图2—26）。

当井下没有  $d_{2к}$  可达到  $27\text{dB}$  的井段时，应该选择  $d_{2к}$  等于15、18、21或  $24\text{dB}$  的井段，将转换开关“АТТЕНЮАТОР АК”相应置于5、6、7或8位置，进行时间道的传输系数调节。在  $d_{2к} < 27\text{dB}$  情况下，将时间道传输系数调节完后，必须把转换开关“АТТЕНЮАТОР”调整到9位置（转换一个分度使两个时间道的传输系改变  $3\text{dB}$ ）。

9. 仪器调节完后，在测井过程中不允许改变控制机构的位置。

10. 将井下仪器下到调节点以下  $25 \sim 30\text{m}$  处，以  $1200\text{m/h}$  速度上提仪器测量声波参数曲线，测量井段不少于  $50\text{m}$ 。

11. 将仪器下到井底，以  $1200\text{m/h}$  的速度上提仪器到井口，测量声波主曲线。如果仪器运动时声波噪音和干扰不影响记录参数，可以用  $2000\text{m/h}$  的测井速度进行测量。

12. 在测完主曲线之后重新记录测量参数零位值和刻度值。

13. МАК—2下井仪需要 УЗБА—21А 地面面板供给的电流比 УЗБА—21А 下井仪器大  $20\%$ 。为了使面板产生的供给下井仪器的  $110\text{V}$ 、 $50\text{Hz}$  交流电压在消耗电流较大的情况下不降低，建议地球物理企业仪修部门的专家在 УЗБА—21А 面板的电源部分（板号 SV—S），用  $C_2$ —

## 第五节 用УЗБА—21地面面板进行井下测量

### 一、按以下顺序进行测井准备

1. 根据本章第四节的要求（即第四节中的“一”标题下的“1、2”两点要求）准备好井下仪器。

2. 取下井下仪器头护帽，确认密封圈完好后，将测井仪器与电缆头连接，并且按照图2—4装配仪器连接电路。

3. 为了保证 УЗБА—21面板和井下仪器正常工作，地球物理企业维修专家应对面板电路作如下修改：

1) 为了防止 УЗБА—21面板产生的给 УЗБА—21下井仪供电的电压进入 МАК—2仪器的控制面板，必须去掉保险丝  $F_2$  (СКВ. ПР. 0.1A) 和  $F_6$  (在插入式面板内)。在图2—4给出的仪器连接电路中，МАК—2测井仪器的供电及其放大系数的控制是通过 МАК—2仪器的控制面板实现的。

2) 在 ZL—R 板上，用  $C_2$ —33—0.25—3.9k $\Omega$  $\pm$ 10%型号的电阻代替  $R_{10}$ 20k $\Omega$  电阻。因为 МАК—2仪器两接收器的间距 ( $S=0.5$ m) 比 УЗБА—21仪器两接收器的间距 ( $S=0.85$ m) 小，所以这一改变对于调节（相对第一测量道而言）第二测量道固定时间窗位置的范围是必要的。

3) 在 ZL—T 板上，利用微调电阻器  $R_{45}$  调节  $d_{2k}$  参数逻辑电路的起动门坎，使门坎高度在 40mV 位置，这相对 УЗБА—21面板记录信号的最大幅 (10V) 是 48dB。在这样的调节条件下，只要  $d_{2k}$  超过 48dB， $\alpha_k$  参数就立即变成最大值 50dB/m。

4) 在 AWA 板上，用  $C_2$ —33—0.125—10k $\Omega$  $\pm$ 5%型号的电阻代替  $R_{15}$ — $R_{18}$ 、 $R_{23}$ 、 $R_{35}$ 、 $R_{46}$  电阻；在插接式线路上，用  $K_{53}$ —1—47 $\mu$ F $\pm$ 20%—20%型号的电容器代替  $C_3$ — $C_{11}$  电容器。这种修改使得可以把面板的接线端 ПАРАМЕТРЫ 上的输出电压的电平提高 20 倍，而不改变积分时间，同时可以用 СКР 和 ТРИАС 型的测井记录仪记录输出参数。

4. 给示波器、УЗБА—21地面面板（按钮“СЕТЬ”）和 МАК—2仪器的控制面板（翻转开关“СЕТЬ”）供电，并且根据控制面板上的指针式指示器调节井下仪器所需要的电流，电流强度不应超过 110mA。

将控制面板上的转换开关“УСИЛ. СЛ”放在 1 位置（放大系数最小），转换开关“СИНХР”放在 1+P+2 位置，而转换开关“ПИТ. СЛ”在电缆长度小于 3000m 时放在 1 位置，电缆长度在 3000~5000m 时放在 2 位置，电缆长度大于 5000m 时放在 3 位置。

5. 凭听觉检查井下仪器发射器的工作情况。用螺丝刀、钳子在声波接收器外壳上摩擦，检查仪器接收道的工作性能，摩擦时在荧幕上应观察到电脉冲信号。

6. 在面板输出电压分别为 +5V、+15V、-15V、零调节及刻度状态下检查 УЗБА—21面板的工作性能。

7. 将井下仪器提到井口上方，防止仪器机械撞击和挤压，把仪器下入套管到电缆头位置，并将深度记数器调到零读数位置。

### 二、按以下程序完成井下测量

1. 准备好测井记录仪，按表2—4将 УЗБА—21面板上的输出端 ПАРАМЕТРЫ 接到记录器的输入端。

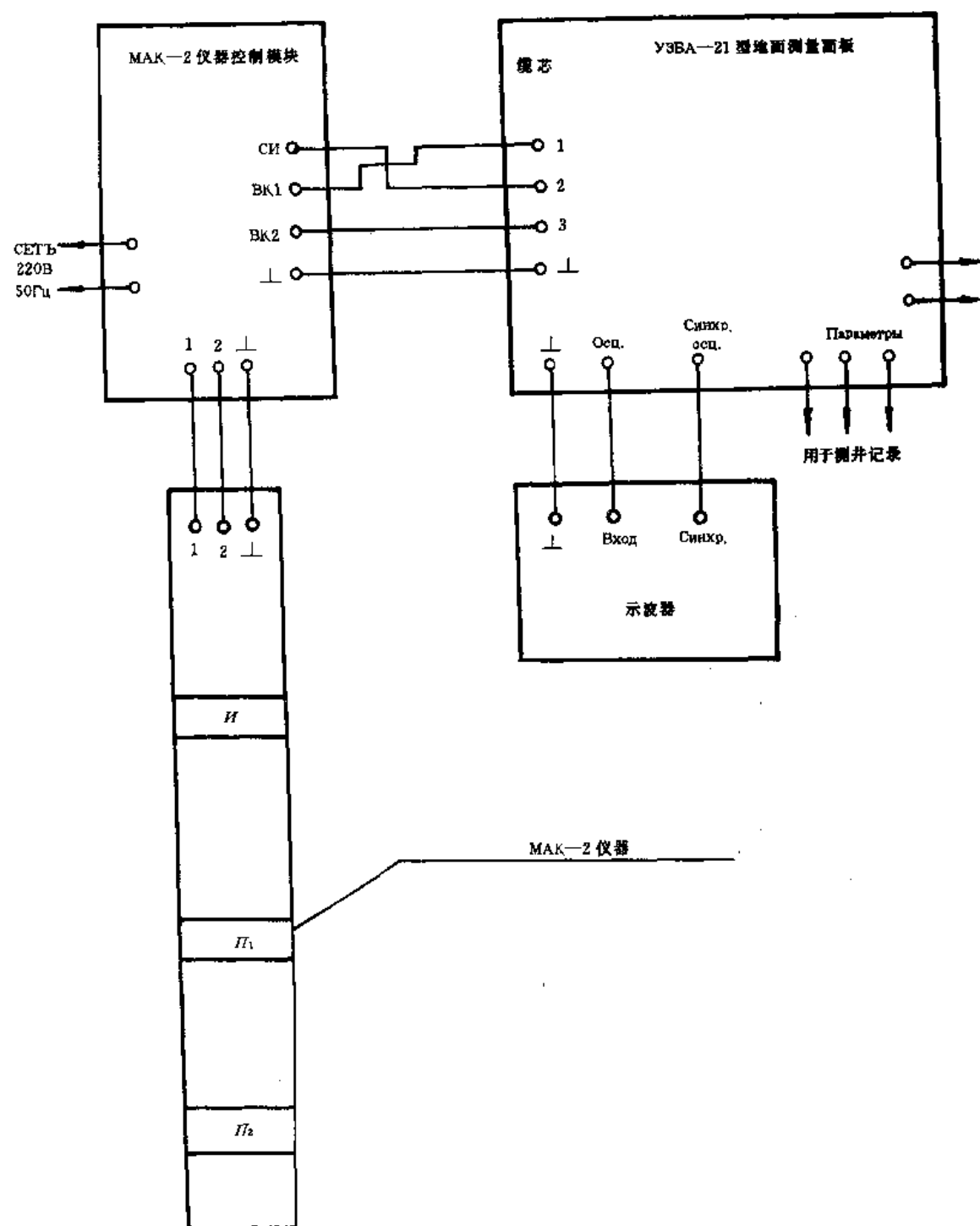


图2—4 使用 Y3BA—21 面板测井时的仪器接线图

表2—4 Y3BA—21 面板输出参数的记录格式

记录道号 No	记录参数	校验1参数值	校验2参数值	图的轨道号	图的记录比例	图的零线值	参数记录点 (m)
1	$\Delta T$	0	$340\mu s/m$	1	$50\mu s/m \cdot cm$	0	2.4
2	$T_1$	300	—	1	$50\mu s/cm$	$200\mu s$	1.7

续表

记录道号 No	记录参数	校验1参数值	校验2参数值	图的轨道号	图的记录比录	图的零线值	参数记录点 (m)
3	$\alpha_k$	0	25.5dB/m	2	5dB/m·cm	-10dB/m	2.4
4	$d_{1k}$	0	15dB	2	5dB/m	-10dB	1.7
5	$d_{2k}$	0	15dB	2	5dB/m	-10dB	1.9

2. 将 УЗБА—21 面板上的状态转换开关 “КАЛИБРОВКА ИЗМЕРЕНИЕ АК и АЦ” 相应设置在 0 位置 (校验1) 和  $200\mu\text{s}/\text{m}$ 、 $15\text{dB}/\text{m}$  位置 (校验2), 用测井记录仪记录测量参数的零值 (校验1) 和刻度值 (校验2)。因为 МАК—2 仪器两接收器间距为  $0.5\text{m}$ , 而 УЗБА—21 仪器两接收器间距为  $0.85\text{m}$ , 所以在 УЗБА—21 面板上, 当  $\Delta T$  和  $\alpha_k$  的刻度值分别为  $200\mu\text{s}/\text{m}$ 、 $15\text{dB}/\text{m}$  时, 对于 МАК—2 仪器而言, 参数  $\Delta T$  和  $\alpha_k$  取值分别为  $200 \times \frac{0.85}{0.5} = 340\mu\text{s}/\text{m}$  和  $15 \times \frac{0.85}{0.5} = 25.5\text{dB}/\text{m}$  (如表 2—4 所示)。

在这种情况下, МАК—2 仪器  $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$  的刻度值与 УЗБА—21 仪器相同, 等于  $15\text{dB}$ 。

在 УЗБА—21 面板上  $\Delta T$  为零值时产生  $T_1 = 300\mu\text{s}$  的刻度值, 而在  $\Delta T$  刻度值为  $200\mu\text{s}/\text{m}$  时产生  $T_1$  为  $580\mu\text{s}$  的刻度值。

3. 将 УЗБА—21 面板转为测量 (ИЗМЕРЕНИЕ) 状态, 并把面板控制机构调节到以下位置:

ПАРАМЕТРЫ АК —  $\Delta T$ 、 $T_1$ ;

ФАЗА ИЗМ. —  $\sim$ ;

АРУ К2 — 断路;

АРУ К1 — 断路;

ФИЛЬТР АЦ — 断路;

СИНХРОНИЗАЦИЯ —  $U_1 + U_2$ ;

ОКНО ПОСТ. -ПЛАВ — ПОСТ. 50。

井下仪器在以小于  $2000\text{m}/\text{h}$  的速度起下过程中, 要确定接通滤波器 “ФИЛЬТРА АК” 的必要性。在产生低频干扰影响测量参数的情况下, 建议接通 ФИЛЬТР АК (声波滤波器) 对其进行抑制。因为这个滤波器使时间道记录的信号幅度降低  $60\%$ , 所以在使用滤波器记录信号参数时, 应该在接通滤波器条件下进行时间道调节。

4. УЗБА—21 面板的调节和井下测量方法与第二章第四节中的相关内容类似。

УЗБА—21 面板与 УЗБА—21А 面板的差别在于该面板用于监测测量参数的指示器是指针式显示表, 而非数字式指示表, 所以造成准确的参数读值困难。为了比较准确地读出测量参数值, 在调节仪器时必须使用测井记录仪刻度器 (СКР 显示器)、ТРИАС 数字式指示器或者照像记录仪刻度器。

УЗБА—21 与 УЗБА—21А 面板的另一个主要差别在于增益调节器转换开关有 8 个位置, 并且每转换一个位置其信号幅度改变  $6\text{dB}$ 。所以必须在转换增益开关处于位置 5 时, 在  $d_{2k} = 27\text{dB}$  的井段调节面板的时间道。在没有  $d_{2k} = 27\text{dB}$  的井段情况下, 允许增益转换开关处于 3 和 4 位置, 在  $d_{2k} = 15\text{dB}$  的井段进行时间道调节。

## 第三章 测井资料解释

### 第一节 解 释 术 语

一、在声波水泥胶结质量地球物理测井实践中,采用以下用于测井资料解释的术语:

1. 水泥石与套管或者岩层没有接触;
2. 水泥石与套管或者岩层部分接触;
3. 水泥石与套管或者岩层完全接触;
4. 水泥石与套管或者岩层接触不确定。

二、用“接触”这个术语代替以前使用的“胶接”术语,可以反映一定密度和强度的水泥石与套管和岩层的机械接触状态以及水泥环中有没有立体类型的缺陷(或称“水泥缺失”)。

三、水泥石与套管没有接触可解释为管外空间没有水泥石或者解释为在水泥石与套管之间具有  $50\mu\text{m}$  以上的微环。

四、水泥石与套管部分接触可解释为水泥环中有接触类型或水泥缺失类型的缺陷。即缝宽  $\Delta R$  为  $0\sim 50\mu\text{m}$  的微环;展开角  $\beta$  为  $30^\circ\sim 360^\circ$  的垂直通道;长度大于  $0.25\text{m}$  的水泥石间断。

五、水泥石与套管完全接触解释为水泥环没有缺陷、与套管紧密接触或者是与套管紧密接触的水泥环带有小的超过仪器灵敏度的缺失(缺失展开角  $\beta$  小于  $30^\circ$  或者水泥间断长度  $H$  小于  $0.25\text{m}$ )。

六、水泥石与岩层的接触状态只有在水泥石与套管完全接触的条件下才能确定。在水泥石与套管没有接触或部分接触的情况下,水泥石与岩层的接触状态解释为不确定接触状态。这是因为,由于水泥环的缺陷,造成地层波幅度大大降低,并且地层波与套管波相互干涉,使得无法确定地层波参数。

七、在水泥环与套管完全接触条件下,用分析仪器记录的弹性波是否属于地层波的方法来评价水泥环与地层的接触状态。用仪器记录的参数  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $\Delta T$  与在给定的井筒条件下计算的地层波参数  $T_{1n}$ 、 $T_{2n}$ 、 $\Delta T_n$  比较的方法进行分析。在这种情况下,可以根据地层波的首波记录参数  $T_1$  和  $T_2$  ( $T_1=T_{1n}$ 、 $T_2=T_{2n}$ ),或者放过一个波动周期  $T_{\Phi n}$  ( $T_1=T_{1n}+T_{\Phi n}$ 、 $T_2=T_{2n}+T_{\Phi n}$ ),根据一个或两个仪器测量道记录地层波的参数 ( $\Delta T=\Delta T_n$  或  $\Delta T=\Delta T_n+2T_{\Phi n}$ ) 进行水泥环与地层接触状态的判定。

如果根据对  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $\Delta T$  参数的分析确定仪器测量的波属于地层波,那么水泥环与地层的接触就可以解释为完全接触。如果根据对上述参数的分析不能确定仪器记录的波属于地层波,那么水泥环与地层的接触解释为不确定的接触。

在解释 MAK—2 测井资料时,不用“水泥石与地层没有接触”这一术语。因为,如果在确定的门限值情况下仪器没有记录到地层波,那么这不一定与水泥石和地层没有接触有关,可能与岩石本身大量吸收弹性波能量有关(例如在松散、多孔、裂缝性岩石中),还可能与井壁不规则及其它原因有关。

## 第二节 解 释 标 准

根据用模型井做的实验研究和第一章讲述的理论计算以及测井资料建立了 MAK—2 测井资料的解释标准, 见表 3—1。

表 3—1 MAK—2 声波测井资料综合解释标准

序号	水泥石与套管和地层的接触特征	测 量 参 数					
		$\Delta T$ ( $\mu s/m$ )	$T_1$ ( $\mu s$ )	$T_2$ ( $\mu s$ )	$a_k$ (dB/m)	$d_{1k}$ (dB)	$d_{2k}$ (dB)
1	与套管没有接触、与地层接触不确定	1.1	$\Delta T_k \pm 6$ $178 \leq \Delta T \leq 190$	$T_{1k}^{+12}_{-8}$ $267 \leq T_1 \leq 287$	$T_{2k} \pm 8$ $359 \leq T_2 \leq 375$	$a_{s0} \pm 1.5$ $2 \leq a_k \leq 5$	$0 \leq d_{1k} \leq 10$ $1 \leq d_{2k} \leq 12.5$
2	与套管部分接触、与地层接触不确定	2.1	$\Delta T_k \pm 6$ $178 \leq \Delta T \leq 190$	$T_{1k}^{+12}_{-8}$ $267 \leq T_1 \leq 287$	$T_{2k} \pm 8$ $359 \leq T_2 \leq 375$	$(a_{s0} + 1.5)$ $< a_k < a_k^u$ $5 < a_k < 30$	$2.5 < d_{1k} < d_{1k}^u$ $\left  \frac{d_{1k}}{l_1} - a_k \right  \leq 10$ $5 < d_{2k} < d_{2k}^u$ $5 < d_{2k} < 48$
		2.2	$\Delta T_k - 6 \leq \Delta T \leq (\Delta T_k + 2T_{\Phi k}) + 6$ $178 \leq \Delta T \leq 280$	$T_{1k}^{+12}_{-8}$ $267 \leq T_1 \leq 287$	$T_2 \leq (T_{2k} + T_{\Phi k}) + 8$ $T_2 \leq 420$		
		2.3	$\Delta T > (\Delta T_k + 2T_{\Phi k}) - 6$ $\Delta T > 268$	$T_{1k}^{+12}_{-8}$ $+ 267 \leq T_1 \leq 287$	$T_2 > (T_{2k} + T_{\Phi k}) - 8$		
			$(T_{1k} + T_{\Phi k})^{+12}_{-8}$ $312 \leq T_1 \leq 332$	$T_2 > 404$			
		2.4	$\Delta T > \Delta T_k - 6$ $\Delta T > 178$	$T_{1k} - 8 \leq T_1 \leq (T_{1k} + T_{\Phi k}) + 12$ $267 \leq T_1 \leq 332$	$T_2 \geq (T_{2k} + T_{\Phi k}) - 8$ $T_2 \geq 404$		
3	与套管和地层完全接触	3.1	所有参数与第二种类型的条件一致, 但 $\left( \frac{d_{1k}}{l_1} - a_k \right) > 10$				
		3.2	$\Delta T_{mk} \leq \Delta T \leq \Delta T_k$ $130 \leq \Delta T \leq 184$	$T_{1mk} \leq T_1 \leq T_{1mk} + T_{\Phi k}$ $225 \leq T_1 \leq 321$	$T_{2mk} \leq T_2 \leq T_{2mk} + T_{\Phi k}$ $290 \leq T_2 \leq 413$	$a_{s0} \leq a_k < a_k^u$ $-10 \leq a_k < 30$	$0 < d_{1k} < 55$ $0 < d_{2k} < 55$
		3.3	$\Delta T_{mk} \leq \Delta T \leq \Delta T_k + 2T_{\Phi k}$ $130 \leq \Delta T \leq 284$	$T_{1mk} \leq T_1 \leq T_{1mk}$ $225 \leq T_1 \leq 276$			

序号	水泥石与套管和地层的接触特征	测量参数					
		$\Delta T$ ( $\mu\text{s}/\text{m}$ )	$T_1$ ( $\mu\text{s}$ )	$T_2$ ( $\mu\text{s}$ )	$a_k$ (dB/m)	$d_{1k}$ (dB)	$d_{2k}$ (dB)
3	与套管和地层完全接触	3.4 $\Delta T_k < \Delta T \leq \Delta T_{nc}$ $184 < \Delta T \leq 234$	$T_{1nc} \leq T_1 \leq T_{1nc} + T_{\Phi n}$ $276 \leq T_1 \leq 372$	$T_{2nc} \leq T_2 \leq T_{2nc} + T_{\Phi n}$ $367 \leq T_2 \leq 490$	$a_{0T} \leq a_k < a_k^u$ $-10 \leq a_k < 30$	$0 < d_{1k} < 35$	$0 \leq d_{2k} < 48$ $d_{2k} > 48$
					$a_k \geq a_k^u$ $a_k \geq 30$	$d_{1k} > d_{1k}^u - 6$ $d_{1k} > 27$	$d_{2k} > d_{2k}^u - 6$ $d_{2k} > 40$
					$0 < a_k < a_k^u$ $0 < a_k < 30$	$d_{1k} > 30$ $d_{1k} > d_{1k}^u$	$d_{2k} \geq 48$ $d_{2k} \geq d_{2k}^u$
					$a_{0T} \leq a_k < a_k^u$ $-10 \leq a_k < 30$	$0 < d_{1k} \leq 35$	$0 < d_{2k} < 48$ $d_{2k} > 48$
		3.5 $\Delta T_k < \Delta T \leq \Delta T_{nc} + 2T_{\Phi n}$ $184 < \Delta T \leq 334$	$T_{1nc} \leq T_1 \leq T_{1nc}$ $276 \leq T_1 \leq 327$	$T_{2nc} \leq T_2 \leq T_{2nc} + T_{\Phi n}$ $367 \leq T_2 \leq 490$	$a_k \geq a_k^u$ $a_k \geq 30$	$d_{1k} > d_{1k}^u - 6$ $d_{1k} > 27$	$d_{2k} > d_{2k}^u - 6$ $d_{2k} > 48$
					$0 < a_k < a_k^u$ $0 < a_k < 30$	$d_{1k} > 30$ $d_{1k} > d_{1k}^u$	$d_{2k} \geq 48$ $d_{2k} \geq d_{2k}^u$
					$a_k \geq a_k^u$ $a_k \geq 30$	$d_{1k} > 27$ $d_{1k} > d_{1k}^u - 6$	$d_{2k} > 40$ $d_{2k} > d_{2k}^u - 6$
					$0 < a_k < a_k^u$ $0 < a_k < 30$	$d_{1k} > 30$ $d_{1k} > d_{1k}^u$	$d_{2k} \geq 48$ $d_{2k} \geq d_{2k}^u$
		3.6 $\Delta T_{nc} < \Delta T \leq \Delta T_{nc}$ $234 < \Delta T \leq 320$	$T_{1nc} \leq T_1 \leq T_{1nc} + T_{\Phi n}$ $327 \leq T_1 \leq 445$	$T_{2nc} \leq T_2 \leq T_{2nc} + T_{\Phi n}$ $444 \leq T_2 \leq 605$	$a_k \geq a_k^u$ $a_k \geq 30$	$d_{1k} > 27$ $d_{1k} > d_{1k}^u - 6$	$d_{2k} > 40$ $d_{2k} > d_{2k}^u - 6$
					$0 < a_k < a_k^u$ $0 < a_k < 30$	$d_{1k} > 30$ $d_{1k} > d_{1k}^u$	$d_{2k} \geq 48$ $d_{2k} \geq d_{2k}^u$
					$a_k \geq a_k^u$ $a_k \geq 30$	$d_{1k} > 27$ $d_{1k} > d_{1k}^u - 6$	$d_{2k} > 40$ $d_{2k} > d_{2k}^u - 6$
					$0 < a_k < a_k^u$ $0 < a_k < 30$	$d_{1k} > 30$ $d_{1k} > d_{1k}^u$	$d_{2k} \geq 48$ $d_{2k} \geq d_{2k}^u$
4	与套管完全接触、与地层接触不确定	4.1 $\Delta T > \Delta T_{nc} + 2T_{\Phi n}$ $\Delta T > 420$	$T_1 > T_{1nc} + T_{\Phi n}$ $T_1 > 445$	$T_2 > T_{2nc} + T_{\Phi n}$ $T_2 > 605$	$0 < a_k < a_k^u$ $0 < a_k < 30$	$d_{1k} > 30$ $d_{1k} > d_{1k}^u$	$d_{2k} \geq 48$ $d_{2k} \geq d_{2k}^u$
		4.2 如果不能满足 3.4~3.7 中参数 $\Delta T$ 、 $T_1$ 或 $T_2$ 的条件,或者满足 $\Delta T$ 、 $T_1$ 或 $T_2$ 中任意一个条件,那么保持 4.1 和 4.2 的情况			$a_k \geq a_k^u$ $a_k \geq 30$	$d_{1k} > 24$	$d_{2k} > 36$
5	与套管和地层接触都不确定	5.1	参数都不符合 1~4 条款要求的标准				



MAK-2 仪器测井资料综合解释标准和部分解释标准适用于以下地质工程条件:

$$v_n = (3200 \sim 7500) \text{m/s}, v_a = 1500 \text{m/s}, v_u = 3000 \text{m/s}$$

$$D_k = 146 \text{mm}, d_c = 216 \text{mm}, d_u = 73 \text{mm}$$

$$\delta_a = (1 \sim 1.3) \text{g/cm}^3, \delta_u = 1.85 \text{g/cm}^3, \text{水泥凝固时间 } t \geq 2 \text{ 天}.$$

表 3—1 中使用下列符号:

- 1)  $\Delta T_k = 184 \mu\text{s/m}$ ——套管波时差;
- 2)  $\Delta T_{cu} = 130 \mu\text{s/m}$ ,  $\Delta T_{kc} = \Delta T_k + 50 = 234 \mu\text{s/m}$ ,  $\Delta T_{ku} = 320 \mu\text{s/m}$ ——相应为地层波速度  $v_n$  在 3125~7500m/s 范围内的声波时差低值、中值和高值;
- 3)  $T_{1k}$ ,  $T_{2k}$ ——分别为第一(近)、第二(远)接收器记录的套管波传播时间;
- 4)  $T_{1cu}$ ,  $T_{1kc}$ ,  $T_{1nc}$ ,  $T_{1nu}$ ——在相应等于  $\Delta T_{cu}$ ,  $\Delta T_k$ ,  $\Delta T_{kc}$ ,  $\Delta T_{ku}$  的地层中波的传播时差条件下, 第一接收器记录的地层波传播时间;
- 5)  $T_{2cu}$ ,  $T_{2kc}$ ,  $T_{2nc}$ ,  $T_{2nu}$ ——在相应等于  $\Delta T_{cu}$ ,  $\Delta T_k$ ,  $\Delta T_{kc}$ ,  $\Delta T_{ku}$  的地层中波的传播时差条件下, 第二接收器记录的地层波的传播时间;
- 6)  $T_{\Phi k}$ ——套管波波动周期(对于 73mm 发射器,  $T_{\Phi k} \approx 45 \mu\text{s}$ ; 对于 100mm 发射器,  $T_{\Phi k} \approx 55 \mu\text{s}$ );
- 7)  $T_{\Phi n}$ ——地层波波动周期(对于 73mm 发射器,  $T_{\Phi n} \approx 50 \mu\text{s}$ ; 对于 100mm 发射器,  $T_{\Phi n} \approx 60 \mu\text{s}$ );
- 8)  $\alpha_{\sigma T}$ ——地面测量面板测量的衰减系数的负极值 ( $-10 \text{dB/m}$ );
- 9)  $\alpha_k^u$ ,  $d_{2k}^u$ ——相应为无缺陷水泥环的衰减系数极限值和第二接收器测得的幅度衰减极限值(在硅酸盐水泥密度为  $1.85 \text{g/cm}^3$ 、凝固时间为两天的情况下,  $\alpha_k^u = 30 \text{dB/m}$ ,  $d_{2k}^u = 48 \text{dB}$ )。

在表 3—1 中共分五种水泥石与套管和岩层的接触状况。表中: 第一栏接触状态编号, 第二栏接触状态的特征, 第三栏接触类型判定条件的编号, 第四~九栏接触类型的判定条件。

一、在水泥石与套管没有接触情况下(见表 3—1 中 1), 仪器记录的参数是套管波参数, 这时  $\Delta T = \Delta T_k$ ,  $T_1 = T_{1k}$ ,  $T_2 = T_{2k}$ ,  $\alpha_k = \alpha_{\sigma 0}$ 。根据下井仪器的基本仪器误差和仪器在井筒中偏心引起的附加误差来确定测量值误差。在水泥石与套管没有接触或部分接触情况下, 水泥石与岩层的接触解释为不确定接触。

二、当水泥石与套管部分接触时(见表 3—1 中 2), 仪器记录的参数也是套管波参数。但动力学参数  $\alpha_k$ ,  $d_{1k}$ ,  $d_{2k}$  比没有接触情况下的动力学参数值高, 然而没有达到界限值 ( $d_k^u$  为 35dB、48dB)。在这种情况下, 运动学参数 ( $\Delta T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ) 既可根据首波正相记录 ( $\Delta T = \Delta T_k$ ,  $T_1 = T_{1k}$ ,  $T_2 = T_{2k}$ ), 也可放过一个波动周期  $T_{\Phi k}$  根据一个测量道记录 ( $T_1 = T_{1k}$ ,  $T_2 = T_{2k} + T_{\Phi k}$ ,  $\Delta T = \Delta T_k + 2T_{\Phi k}$ ) 或者根据两个测量道记录 ( $T_1 = T_{1k} + T_{\Phi k}$ ,  $T_2 = T_{2k} + T_{\Phi k}$ ,  $\Delta T = \Delta T_k$ )。除此之外, 还允许放过一个以上周期, 根据第二测量道记录 ( $T_2 > T_{2k} + T_{\Phi k}$ ,  $\Delta T > \Delta T_k + 2T_{\Phi k}$ )。

在水泥石与套管部分接触的井段中, 能观察到  $\alpha_k$ ,  $d_{1k}$ ,  $d_{2k}$  参数随着胶结质量的变化而同步变化。这时,  $d_{1k}$  ( $l=1\text{m}$ ) 和  $\alpha_k$  曲线之间的偏差在同一记录比例条件下不超过  $10 \text{dB/m}$  (考虑到仪器偏心误差和幅度道的调节误差)。

三、在水泥石与套管和岩层完全接触情况下(见表 3—1 中 3), 套管波幅度低于仪器的门坎值, 而测量面板记录的是地层波参数。这种情况下, 落到用于记录  $\alpha_k$ ,  $d_{1k}$ ,  $d_{2k}$  的固定时间窗的是  $v_n > 5000 \text{m/s}$  的地层波信号(见表 1—3)。在测井图上看到  $v_n$  变化时  $\alpha_k$ ,  $d_{1k}$  和  $d_{2k}$  曲线不同步的变化。

在 3.1 的情况中假定  $v_n \approx v_k$ , 所以参数  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $\Delta T$  受第二种接触类型 (n. 2) 条件的影响。 $d_{1k}$  ( $l=1m$ ) 超过  $\alpha_k$  (10dB/m) 以上是接收到地层波的标志。

3.2~3.7 情况的差别与地层波的时差有关, 此种情况下允许在一个测量道放过一个周期弹性波 (3.3、3.5、3.7) 或者在两个测量道都放过一个弹性波周期 (3.2、3.4、3.6)。当地层中弹性波传播时差  $\Delta T_n < \Delta T_k$  (3.2、3.3) 时, 地层波各个波动相都可能落到幅度道的固定时间窗 (见表 1—3), 所以可看到  $d_{1k}$  和  $d_{2k}$  参数的不同步变化, 其变化范围 0~50dB, 而参数  $\alpha_k$  既可能是正值, 也可能是负值。

在 3.4 和 3.5  $\Delta T_k < \Delta T_n \leq \Delta T_{nc}$  情况下, 当  $\Delta T_n < 200\mu s$  时, 就象 3.2 和 3.3 的情况, 地层波的波动相可能落到幅度道的固定时间窗。当  $\Delta T_n > 200\mu s$  时, 只有套管波的波动相能够落到固定时间窗上。所以, 在后一种情况下, 水泥石与套管完全接触的特征是  $\alpha_k \geq \alpha_k^n$  或  $d_{2k} \geq d_{2k}^n$ , 而水泥石和地层完全接触的特征是表 3—1 中给的和根据公式 (1—10) 和式 (1—11) 计算的时间参数值的结合。

在 3.6 和 3.7 情况中, 当  $\Delta T_n > \Delta T_{nc}$  时, 只有套管波能落在用于记录  $\alpha_k$ 、 $d_{1k}$ 、 $d_{2k}$  的固定时间窗上。水泥石与套管的完全接触用以下必要条件表征:  $\alpha_k \geq \alpha_k^n$  或者  $d_{2k} \geq d_{2k}^n$ 。水泥石与地层的完全接触用根据式 (1—10) 和 (1—11) 计算的时间参数值的组合表征, 并考虑到可能在一个测量道上放过一个波动周期。

在 3.6 和 3.7 情况中, 动力学参数反映水泥石与套管的接触状态, 而运动学参数反映水泥石与地层的接触状态。

四、水泥石与套管完全接触, 与岩层不确定接触 (见表 3—1 中 4) 采用仪器记录的下列弹性波参数表征。

同 3.6 和 3.7 的情况一样, 动力学参数反映水泥石与套管的接触状态, 用  $\alpha_k \geq \alpha_k^n$  或  $d_{2k} \geq d_{2k}^n$  条件来表征水泥石与套管完全接触。运动学参数反映水泥石与地层的接触状态, 在满足表 3—1 中 4~6 栏条件的情况下, 水泥石与地层的接触认为是不确定接触。

五、如果上述弹性波的动力学参数和运动学参数都不满足表 3—1 中 1~4 接触类型的条件, 那么与套管和岩层的接触都认为是不确定接触。

六、表 3—1 给出了各种胶结类型的一般判定公式, 其具体的参数数值是根据给定的地质和工程条件确定的。对于其它地质和工程条件, 记录参数的值主要与套管和井筒的直径有关, 表 3—2 和表 3—3 给出了不同套管和井筒直径条件下的记录参数值。

七、为了定量评价井的胶结状况, 建议使用胶结指数  $K_e$ , 按下面公式计算:

$$K_e = \frac{\alpha_k - (\alpha_{ko} + 1.5)}{\alpha_k^n - (\alpha_{ko} + 1.5)} \quad (3-1)$$

式中  $\alpha_k$ ——衰减系数值;

$\alpha_{ko}$ ——自由套管中的衰减系数值;

$\alpha_k^n$ ——在水泥环无缺陷、与套管完全接触的条件下获得的衰减系数极限值;

1.5dB/m——测量  $\alpha_k$  的允许误差。

在水泥石与套管部分接触情况下 (表 3—1 中的 2),  $K_e$  与  $\alpha_k$  有关, 并在 0~1 之间变化,  $K_e$  反映胶结缺陷 (微环、通道或间断) 的相对值, 缺陷指  $K_d = 1 - K_e$ 。

当水泥石与套管没有接触时 (见表 3—1.1), 胶结指数  $K_e$  等于零 ( $\alpha_k \leq \alpha_{ko} + 1.5$ ); 当水泥石与套管完全接触时, 胶结指数  $K_e$  等于 1。

表 3—2 各种套管和井筒直径条件下的 MAK—2 仪器 (73mm 发射器) 记录的声波参数值

仪器记录的参数	套管外径 (mm) 井筒直径 (mm)				
	146 190	146 216	168 216	245 295	324 394
$T_{1k}$	275	275	289	342	393
$T_{2k}$	367	367	381	434	485
$T_{1m}$	218	225	233	285	344
$T_{1mk}$	270	276	285	335	394
$T_{1nc}$	315	327	337	382	440
$T_{1nn}$	398	400	413	464	519
$T_{2mk}$	282	290	298	350	409
$T_{2nk}$	360	367	375	425	484
$T_{2nc}$	430	444	454	497	555
$T_{2nn}$	558	560	573	624	679

表 3—3 各种套管和井筒直径条件下的 MAK—2 仪器 (100mm 发射器) 记录的声波参数值

仪器记录的参数	套管外径 (mm) / 井筒直径 (mm)				
	146/190	146/216	168/216	245/295	324/394
$T_{1k}$	272	272	286	339	390
$T_{2k}$	364	364	378	431	482
$T_{1m}$	208	216	224	285	335
$T_{1mk}$	260	267	275	335	385
$T_{1nc}$	305	318	328	382	431
$T_{1nn}$	389	391	404	464	510
$T_{2mk}$	273	281	289	350	400
$T_{2nk}$	350	357	366	425	475
$T_{2nc}$	420	435	445	497	546
$T_{2nn}$	549	551	564	624	670

八、表 3—1 给出的综合解释标准既可用于 MAK—2 测井资料的手工解释,也可用于计算机自动解释。

### 第三节 中、低速 (陆源) 岩性剖面测井资料解释

在中、低速 (陆源) 岩性剖面中 ( $v_n < 5000\text{m/s}$ 、 $\Delta T_n > 200\mu\text{s/m}$ ), 地层波不影响动力学

参数  $\alpha_n$ 、 $d_{1n}$ 、 $d_{2n}$ 。所以, 不管运动学参数有多大, 动力学参数都可反映水泥石与套管的接触状态。在水泥石与套管完全接触 ( $\alpha_n \geq \alpha_n^*$  或  $d_{2n} \geq d_{2n}^*$ ) 前提下, 用运动学参数  $\Delta T$ 、 $T_1$ 、 $T_2$  (见表 3—1) 可以评价其与岩层的接触状况。

图 3—1 给出用 MAK—2 仪器在普里拉兹洛姆油田 1055 号井 (套管外径 146mm) 中记录的曲线图和手工解释结果, 图中带圈的数字表示与表 3—1 给出的各种水泥石与套管和地层的接触类型相对应。该井于 1990 年 10 月 18 日挤水泥固井, 其中井的上段用密度为  $1.6\text{g/cm}^3$  的轻质凝胶水泥固井, 下段用密度为  $1.85\text{g/cm}^3$  的硅酸盐水泥固井。该井在 1080m 处有最大倾角  $26^\circ$ , 测井日期为 1991 年 4 月 4 日。

在 483~511m 井段, 水泥石与套管没有接触 ( $\alpha_n = \alpha_{no}$ 、 $\Delta T = \Delta T_n$ 、 $T_1 = T_{1n}$ 、 $T_2 = T_{2n}$ )。在水泥返高位置 (511m 深度), 虽然运动学参数保持不变, 但动力学参数却表现为急剧增加 ( $\alpha_n > \alpha_{no}$ )。在 511~532m 井段, 水泥石与套管部分接触, 衰减系数  $\alpha_n$  超过  $\alpha_{no} + 1.5 = 5\text{dB/m}$ , 但没有达到无缺陷水泥环的界限值  $\alpha_n^*$ 。对于  $\alpha_n^*$  值的选择, 必须根据水泥凝固时间、水泥的组分及其密度来确定 (表 1—4), 该井段水泥凝固时间超过 2 周,  $\alpha_n^*$  值等于  $20\text{dB/m}$ 。图 3—1 给出的  $\alpha_n^*$  等于  $30\text{dB/m}$  的线是用正常水泥 (密度  $1.85\text{g/cm}^3$ ) 固井的下部 2604~2686m 井段衰减系数的临界线。

在下部 2629~2638m 井段,  $5 < \alpha_n < 30$ , 解释为水泥石与套管部分接触; 在下部其它井段,  $\alpha_n \geq 30\text{dB/m}$  或  $d_{2n} \geq d_{2n}^* = 48\text{dB}$ , 解释为水泥石与套管完全接触。然而, 在这些井段水泥石与地层的接触状况根据表 3—1 中相应的运动学参数值有各种不同的解释: 在水泥石与地层完全接触的井段,  $\Delta T \leq \Delta T_m = 420\mu\text{s/m}$ 、 $T_1 \leq 445\mu\text{s}$ 、 $T_2 \leq 605\mu\text{s}$ 。如果运动学参数值超过上述界限值, 那么与地层的接触解释为不确定接触。

手工解释时, 允许把个别参数偏离界限值且长度不超过 1m (两接收器间距) 的井段划入相邻的其它参数具有相似值的较长的井段解释。用电子计算机进行自动解释时, 这种井段划分可自动实现。

图 3—2 给出普里拉兹洛姆油田 1070 井的 (生产套管外径 146mm) MAK—2 测井曲线和手工解释结果。1070 号井的标称井径为 216mm, 上部井段用密度为  $1.6\text{g/cm}^3$  的轻质凝胶水泥固井, 下部井段用正常的  $1.85\text{g/cm}^3$  硅酸盐水泥固井。固井时间是 1990 年 12 月 12 日, 最大井斜在 1860m 处为  $17^\circ$ , 测井日期是 1991 年 3 月 28 日。

图 3—3 和图 3—4 给出本井用计算机自动解释的结果。

从图 3—2~图 3—4 看出, 手工详细解释的结果与计算机自动解释的结果吻合, 但深度从 2464.4~2465.2m 井段 (0.8m) 除外, 主要是由于井段不长, 自动解释时将其归入上面的井段解释。

图 3—5 给出在苏尔古特东区 159 井测得的 MAK—2 曲线图和手工解释结果。该井上段用  $1.52\text{g/cm}^3$  的轻质凝胶水泥固井, 下段用  $1.82\text{g/cm}^3$  的硅酸盐水泥固井。固井日期是 1990 年 11 月 9 日, 测井日期是 1991 年 3 月 30 日。最大井斜在 1180m 处为  $19^\circ$ 。图 3—6~图 3—9 给出了该井的计算机自动解释结果, 其管外空间水泥环的所有胶结状况, 手工和自动解释结果都吻合。

水泥胶结质量和缺失程度可以用胶结指数  $K_c$  来评价 (图 3—9),  $K_c$  变化范围是 0~1。当水泥环与套管没有接触或者没有水泥, 即水泥胶结缺陷最大时,  $K_c = 0$ ; 当水泥环没有缺陷, 与套管完全接触时,  $K_c = 1$ 。

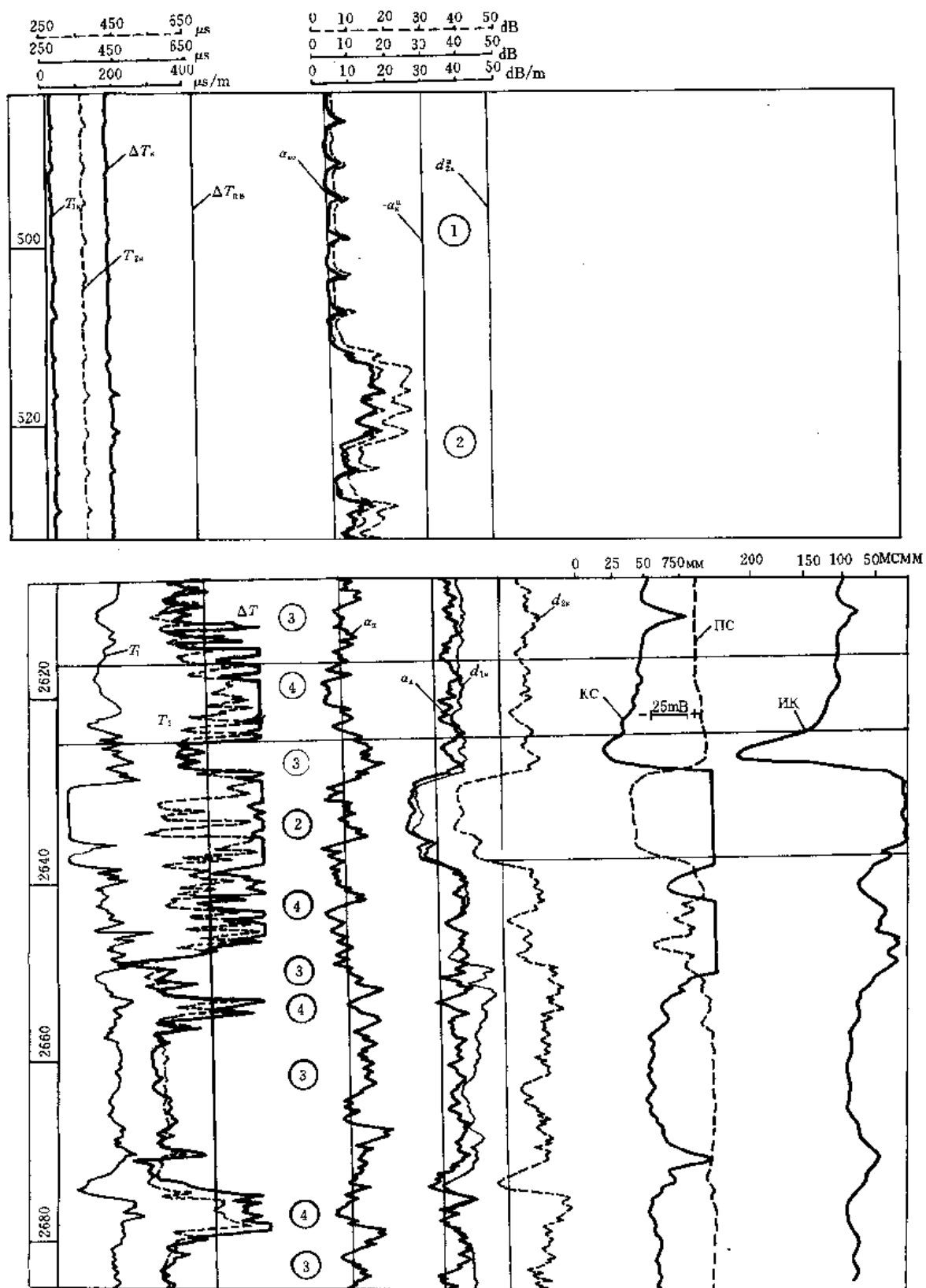


图 3—1 用 MAK - 2 仪器在普里拉兹洛姆油田  
1055 号井 (内径 146mm) 测得的曲线

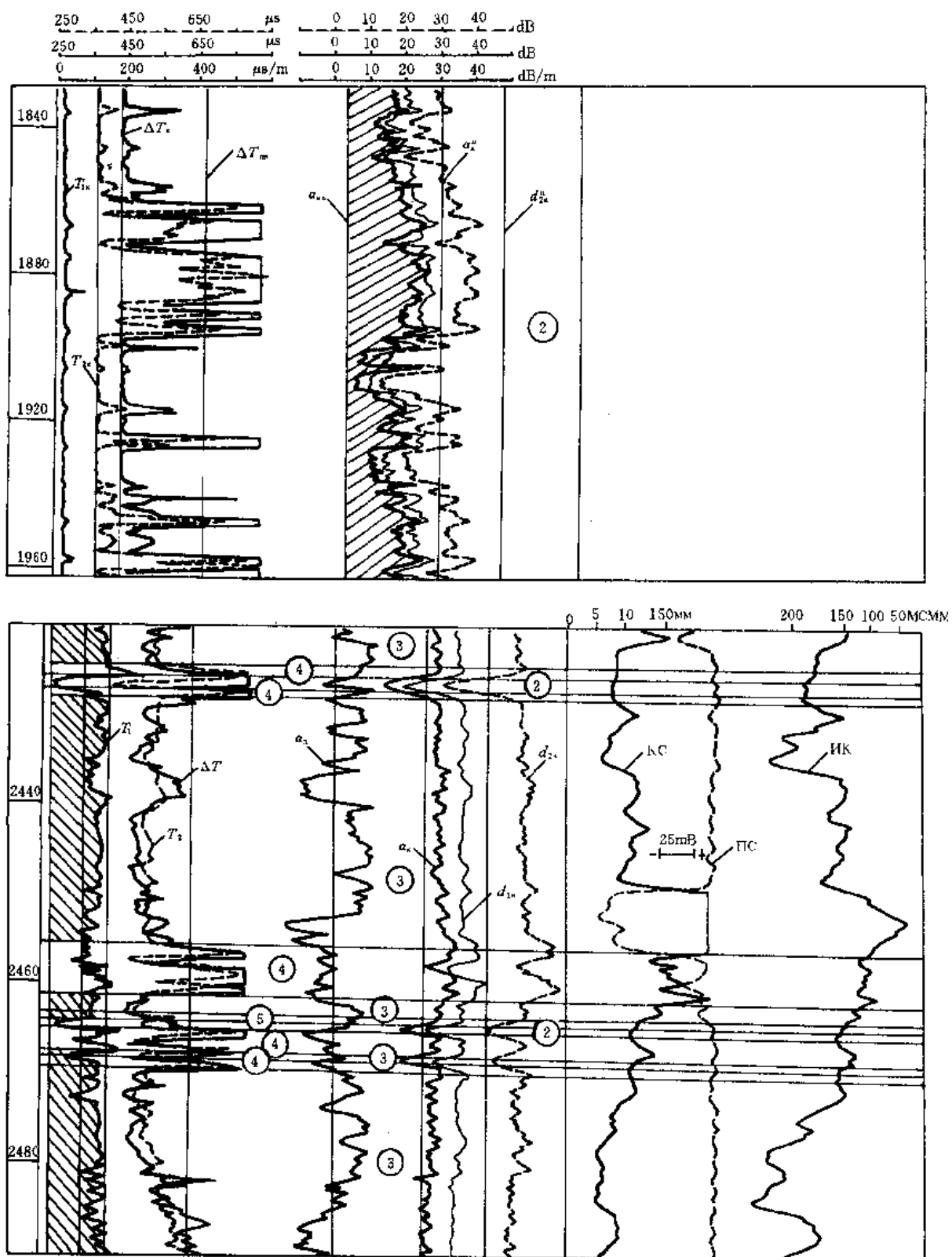


图 3 2 用 MAK—2 仪器在普里拉兹洛姆油田 1070 井（内径 146mm）测得的曲线

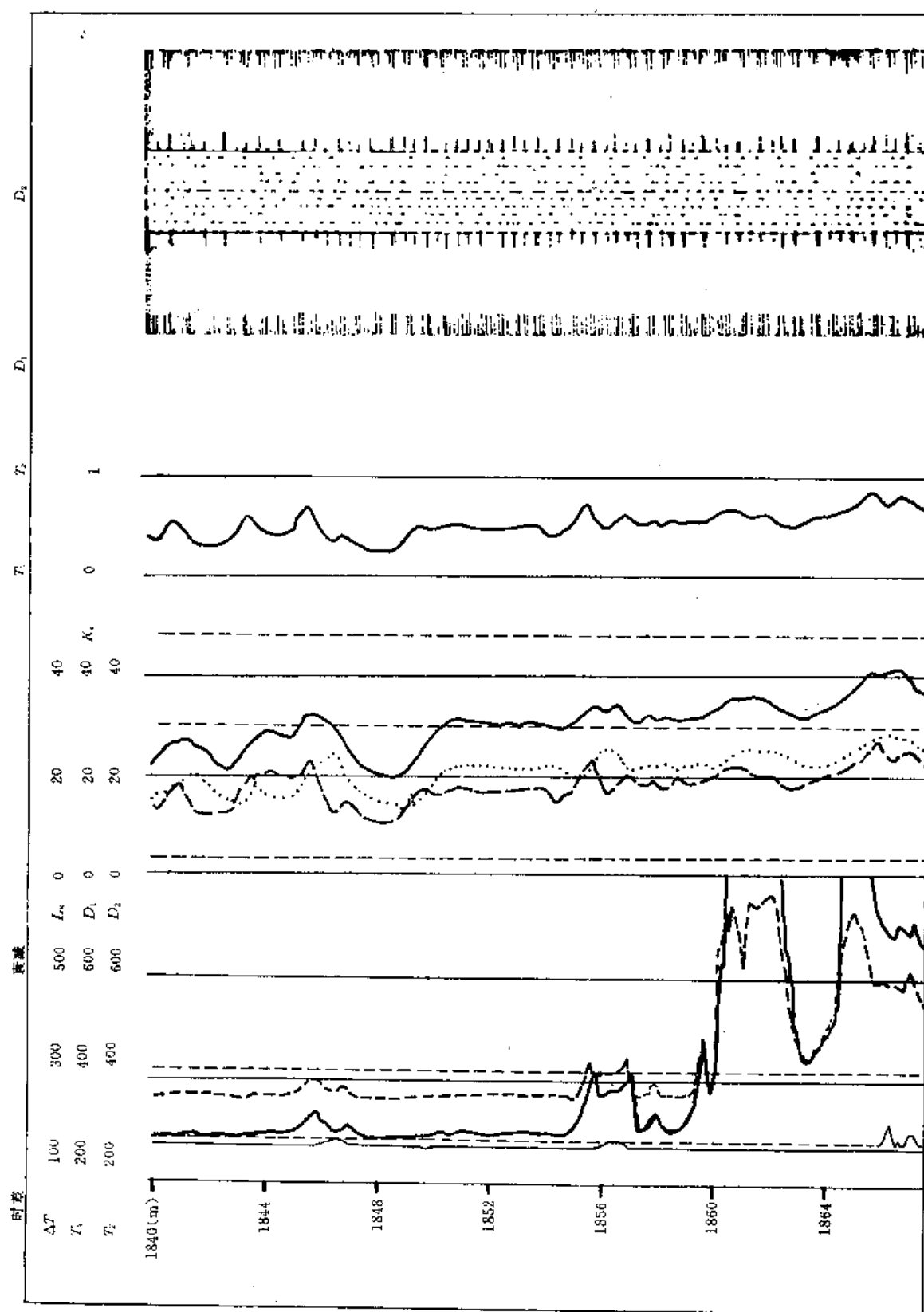


图 3-3 普里拉兹洛姆油田 1070 井在 1840~1868m 井段的 MAK-2 测井资料计算机自动解释结果

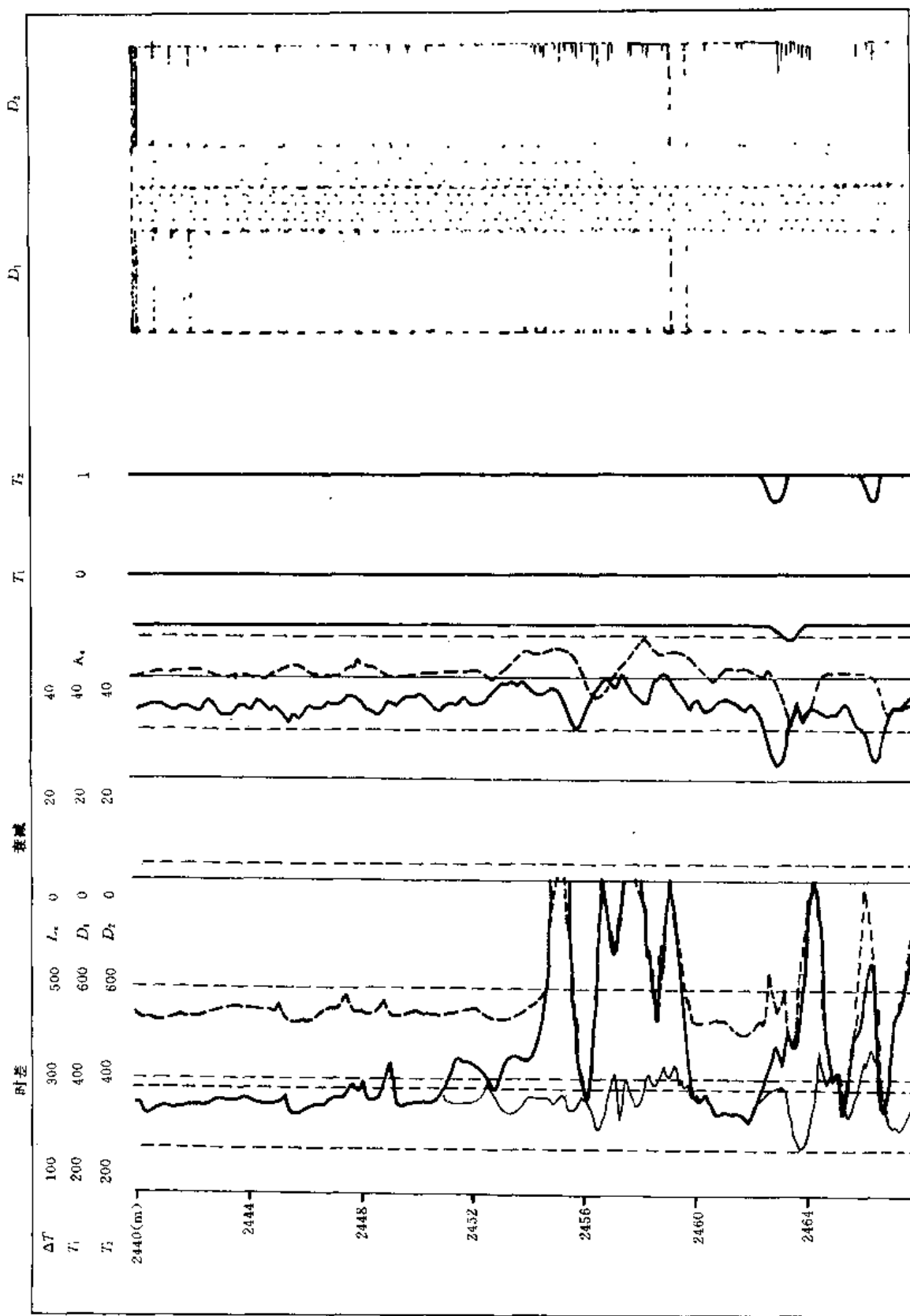


图 3 4 普里拉兹洛姆油田 1070 井在 2440~2468m 井段的 MAK-2 测井资料计算机自动解释结果