

• 煤田物探 •

{ 煤 { 层 } 的 { 反 { 射 } }

中国矿业大学 刘天放

休斯顿大学 R.E.sheriff

在中国东部,石炭二叠纪煤系广泛分布。该区典型的地质剖面由三部分组成:表层是第四系,有的地方还有第三纪未固结或固结较差的砂、砂质粘土、粘土、砾石和泥灰岩等;中部是石炭二叠纪含煤岩系,主要为砂岩、粉砂岩、泥岩及其互层,中下部含有数层厚约1~5 m、有时直至10 m以上的可采煤层,底部还有多层厚度小于10 m稳定的海相石灰岩;基底是厚层状的奥陶纪石灰岩。三大层间,皆为代表长期风化剥蚀的不整合界面所分割,特别是表层与煤系间的角度不整合界面是一个强反射面,它与主要可采层有关的反射波构成了该区的优势反射波(图1)。

近年来,该区一般采用24~48道仪器、6~12次叠加、0.5~1 ms采样、10 m道距、十米至数十米偏移距、单个或多个短基线组合接收。

煤层的密度与速度显著低于围岩,因而可以观测到与主要可采煤层有关的强反射。煤层,作为一个典型的低速薄层,它的反射已有许多讨论。值得提出,Almoghrabi和Lange(1986)先后在两篇文章中讨论含气砂岩反射特征及各种亮点的分辨中涉及到了煤层的反射。该文提出用波的相移叠加技术来计算薄层反射系数的一些问题,并借助于数因子量值选择不当,很可能造成死循环。

c. 参数初值的给定。给定的参数初值如与实际值偏差太大,会使循环次数增多,甚至会出现计算机系统紊乱或溢出等现象。

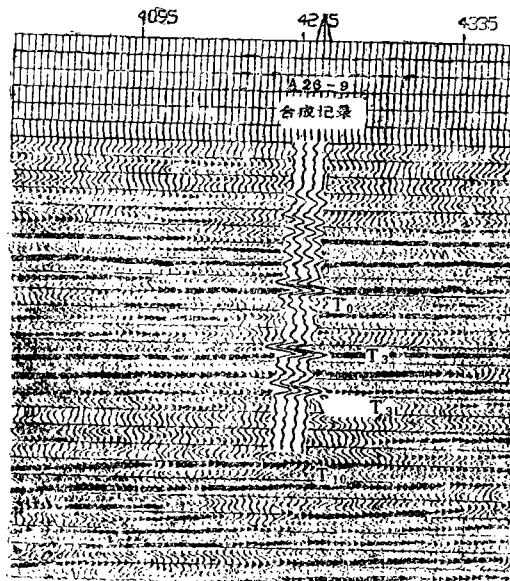


图1 山东济宁一井田L26线地震剖面
(人工合成记录及钻孔对比)

值计算方法,模拟中国东部的情况,对煤层反射波做进一步探讨。

1 煤层的反射系数

通常,可采煤层厚度比起其中传播的地震波长来,煤层是一个典型的低速薄层。它的顶底界面是彼此靠近的、明显的波阻抗分界面,在地震记录上,使用通常的高分辨率地震勘探也无法分辨。因此,地面接收到的煤层反射波几乎都是与顶底板界面有关的反射

对上述影响方面,可通过全面分析水文地质条件,正确刻划出水文地质结构,做到恰如其分,就可完全克服上述缺点,使运算速度提高,达到反演选参、修正模型之目的。

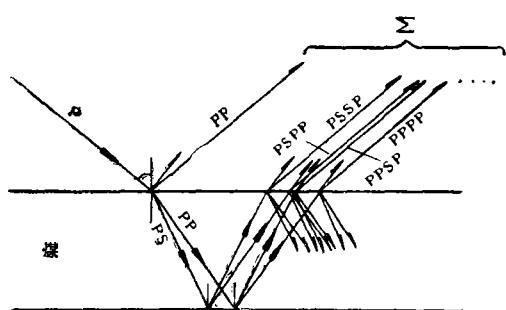


图2 按相移叠加法计算煤层反射系数原理图

波分量的总和或干涉波。在讨论煤层反射波时，应将煤层作为一个薄层的整体来考虑。除了讨论顶底界面的反射纵波外，也应该考虑转换波、多次波及多次转换波。根据这种设想，使用波的叠加方法是合理的。

如图2所示，一个单频谐和平面纵波(P)入射到煤层上，在顶界面上将产生两个反射波(PP, PS)，两个折射波(PP, PS)，后者在煤层中向下传播，在底界面上将产生4个反射波返回，在上界面上又将有8个反射波返回煤层，而下行形成多次波及多次转换波，同时有8个折射波透过上界面，与多次波向上层辐射的能量一起，先后都进入上层介质，由于同类波分量具有相同速度与传播方向，按一定的相移关系叠加在一起就形成了我们在地面上所观测到的与煤层有关的反射波，它的振幅可写成：

$$A_{\Sigma} = \left(R_0 + \sum_i \left(\sum_j T_{12}(i) * T_{21}(i) * \prod_{j=1}^n R_{23}(j, i) * \prod_{j=1}^{n-1} R_{21}(j, i) \right) * \cos \zeta_n(i) \right) * A_0 \quad (1)$$

式中： A_{Σ} ——合成反射振幅；

A_0 ——入射P波的振幅；

n ——多次反射的重复次数；

i ——反射波、透过波的序号；

R_0 ——顶界面下行反射系数；

R_{23} ——底界面上行反射系数；

R_{21} ——顶界面上行反射系数；

T_{12}, T_{21} ——顶界面下行、上行透 过系 数，各反射系数及透过系数按 精确的Zoeppritz方程(Dohr, 1985)计算；

ζ_n ——反射波分量相对于顶界面下行 反射波的几 何相 移，其关 系 为：

$$\zeta_n(i) = \sum_n 2 \pi \frac{h}{\lambda} \left(\frac{V_{pn1-1}}{V_{dn}} \cos \theta_{231} + \frac{V_{pn1-1}}{V_{up}} \cos \theta_{231} \right) \dots \dots \quad (2)$$

式中： λ ——煤层P波波长；

V_{pn1-1} ——煤层P波传播速度；

V_{dn}, V_{up} ——煤层下行、上行波 速；

$\theta_{231}, \theta_{231}$ ——煤层底界面上的入射 角、反射角，它们的数 值及序数*i*决 定于波型 (表1)。

表1 θ, i 与 波 型 关 系

波型	V_{dn}	V_{up}	i
PP	V_{pn1-1}	V_{pn1-1}	1
PS	V_{pn1-1}	V_{sn1-1}	2
SP	V_{sn1-1}	V_{pn1-1}	3
SS	V_{sn1-1}	V_{sn1-1}	4

现按中国东部的情况，设有一个由 n_l 层水平介质组成的模型，各层都是均匀各向同性的， $V_p(i)$ 、 $V_s(i)$ 、 $\rho(i)$ 和 $h(i)$ 分别代表第*i*层介质的P波速度、S波速度、密度和层厚， $i = 1, 2, \dots, n_l$ ，代表层的序号，煤层的序号为($n_l - 1$)。若以 $n_l = 4$ 为例，模型各层物性参数如表2所列。表中，长度、质量和时间单位分别用m.g.s制。

从这个模型出发。图3给出了按式(1)计算所得的结果。图中表示了在不同偏移距 10、50、……450 m (对应于不同CDP道1, 3, ……23)时，煤层反射系数 R_{Σ} 随比值煤厚/ λ 而变化。

表2 模型的物性参数

层序	岩 性	V_p m/s	V_s m/s	ρ g/cm^3	h m
1	表层	1750	1000	1.80	210
2 or 4	(H)	3710	1990	2.60	
	(M)	3414	1707	2.39	
	(L)	3170	1585	2.36	220
8	煤层 (CO)	1960	1090	1.39	
	天然焦 (NCO)	2316	1060	1.52	
	火成岩 (LIM.)	4850	2705	2.73	4.4

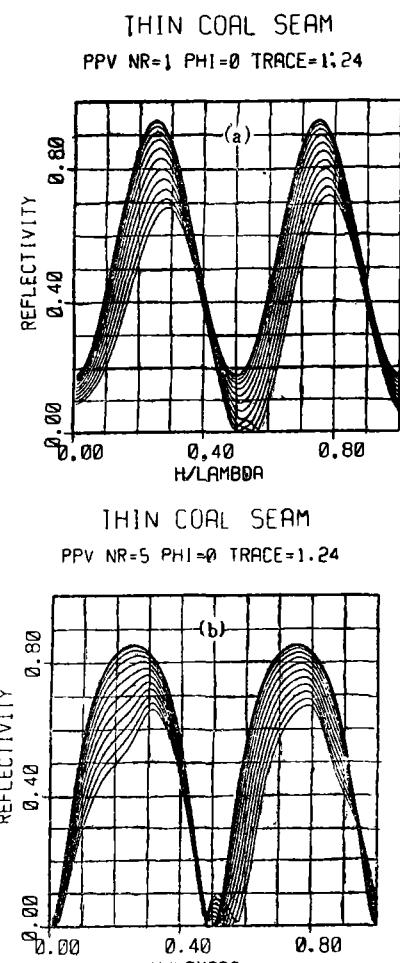


图3 煤层反射波纵波的反射系数
 a—不考虑煤层内多次反射波;
 b—考虑煤层内多次反射波(重复次数为5)

2 影响煤层反射系数的因素

由式(1)可知, 影响煤层反射系数的因

素除了煤层顶底界面作为单一界面的反射系数之外, 还与许多其它因素有关。现就这些因素讨论如下:

煤层作为一个低速薄层, 它的厚度对煤层反射波的调谐作用是十分明显的。在讨论的条件下, 若以垂直入射至单一界面的反射系数0.47~0.56为参考, 图3表明, 煤层反射系数随比值 h/λ 有很大的变化。近偏移距道(或近于垂直入射)反射系数, 在 $h/\lambda = 1/4$ 或 $3/4$ 时, 达到超过0.8的极大值。随偏移距增大(或入射角的减小), 它可以有0.3~0.4的变化, 且极大值略向 h/λ 增大的方向移动。这个移动是因为 θ_{23i} 和 θ_{23r} 均随偏移距增大而增大, 为了使几何相移满足调谐条件, h/λ 必须稍为增大。

因此, 煤层作为一个薄层整体的复合反射系数, 可能大于或小于其顶底单一界面的反射系数, 这取决于比值 h/λ 。

偏移距或入射角的变化, 是影响煤层反射系数的另一个重要因素。在所讨论的模型条件下, 由于下述原因, 入射角可能变化在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 之间:

- a. 煤层赋存深度相对于所用偏移距不太大;
- b. 基岩面上下速度差异大;
- c. 主要可采煤层上覆煤系厚度不大。

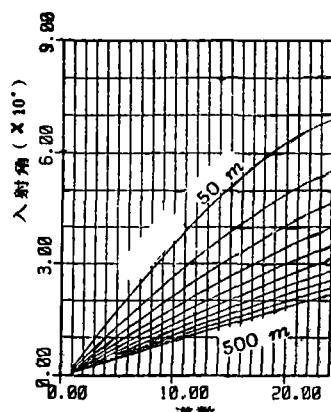


图4 在第二层介质厚度从50~500m时, 入射角与偏移距离关系

其原因：或由于煤系与表层的不整合接触；或由于煤系有褶皱起伏、断裂影响；或由于剥蚀等。

由图4看出，煤层反射系数随入射角增大（CDP道号增加）而减小，最大变化可达 $0.2\sim0.3$ ，其变化大小和梯度随 h/λ 不同而异。

从式（1）计算煤层反射系数时，考虑了中途发生过波型转换的波分量。不同的波分量对煤层反射波的贡献有很大的差异。图5给出了不考虑多次波的最简单情况。除了同类反射纵波PP、PPPP外，还包含了PPSP、PSPP、PSSP三个中途发生过转换的波分量（图中均用实线表示）。就反射P波而言，分量PP、PPPP虽随偏移距缓慢减小，但对反射波的贡献最大。其余三个波分量的贡献尽管随偏移距迅速增大，但在讨论的范围内，仍要小20~30dB以上，几乎

THIN COAL SEAM

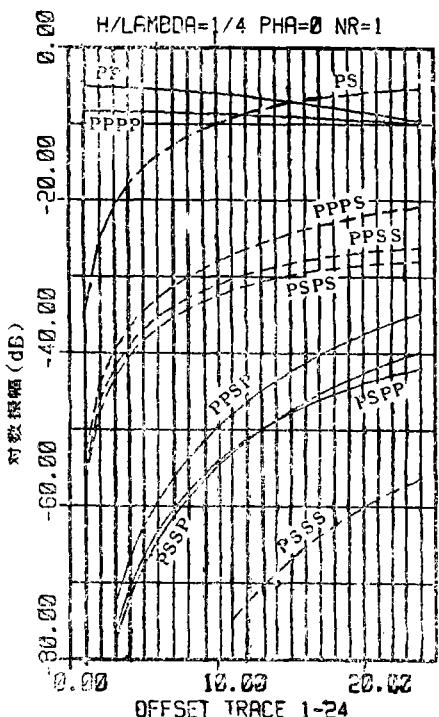
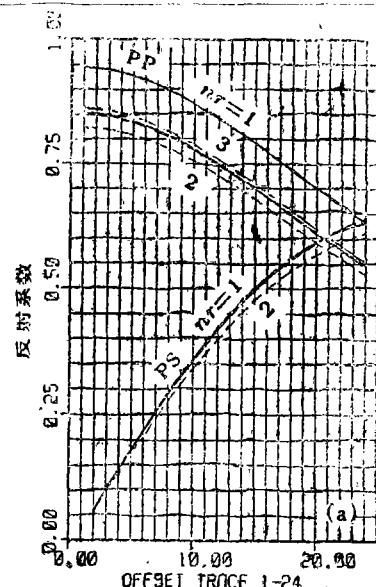
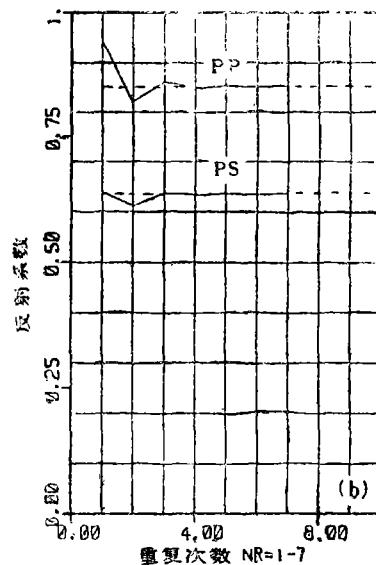


图5 不同波分量对合成反射振幅的贡献



(a)



(b)

图6 在 $h/\lambda = 1/4$ 时，多次波重複次数对反射系数的影响

都可以忽略不计（至少在较小偏移距范围内是如此）。

由于多次波、多次转换波的引入，使煤层反射系数的计算变得十分复杂。计算表明，它们对反射系数是一个重要的影响因素，影响的大小随反射波的重複次数(nr)而变。显然，重複次数越大，由于越多的能量已经辐射到围岩中，而对煤层反射波的贡献越小。图6a表示了在 $h/\lambda = 1/4$ 、 nr 不同时，

反射系数随偏移距(CDP道号) 的变化。上一组曲线是反射P波的情况。由图可见, 不同 nr 的曲线都几乎平行, 说明 nr 对反射系数的影响随偏移距变化不大。图6b上面一条曲线PP表示在偏移距=10 m、 $h/\lambda = 1/4$ 时、煤层反射P波的反射系数随 rn 的变化情况。从该图清楚看到, 考虑多次波($nr \geq 2$)时反射系数都要小于只考虑一次波($nr = 1$)的反射系数。随 nr 增大, 反射系数时小时大, 最大影响在0.1左右, 最终趋于一个稳定的数值。换句话说, 在计算中, 只要考虑有限多次反射(譬如 $nr = 4 \sim 5$), 也就足够精确了。这个结论也可以从图3得出, 而图3只给出了 $nr = 1$ 、 $nr = 5$ 两种情况。只要全观不同 nr 时的图件发现, 在 $nr = 2$ 、3时, 曲线有较大地畸变, nr 再增大, 曲线的形状趋于稳定, 如图3b所示。

通常是在地面来观测, 那末还有更多影响煤层反射波振幅的因素必须考虑。在这个模型中, 还考虑了如下几个方面:

- a. 几何发散;
- b. 中间界面的透过损失;
- c. 煤层反射波到达地表的出射角。讨论反射P波时, 取其垂直分量; 相反, 在讨论反射转换S波时, 取其水平分量。

基于以上讨论, 现在采用雷克子波(Sheriff, 1984)

$$W(t) = (1 - 2\pi^2 f^2 t^2) \exp(\pi f t)^2 \dots \dots (3)$$

针对煤层及其围岩物性发生变化, 即单一顶底界面反射系数变化时, 制作的煤层反射波合成记录示于图7、8、9。

中国东部, 常见有火成岩侵入煤系, 使煤发生横向变化: 有时, 煤层被烘烤, 甚至变成天然焦; 有时, 火成岩顺煤层侵入, 甚至完全被它吞食。如果再考虑到冲刷、剥蚀与相变, 煤层甚至缺失, 被泥岩、砂岩所代替。在这些条件下, 同一煤层沿横向可能发生很大的变化。一般说来, 该替换层的密度

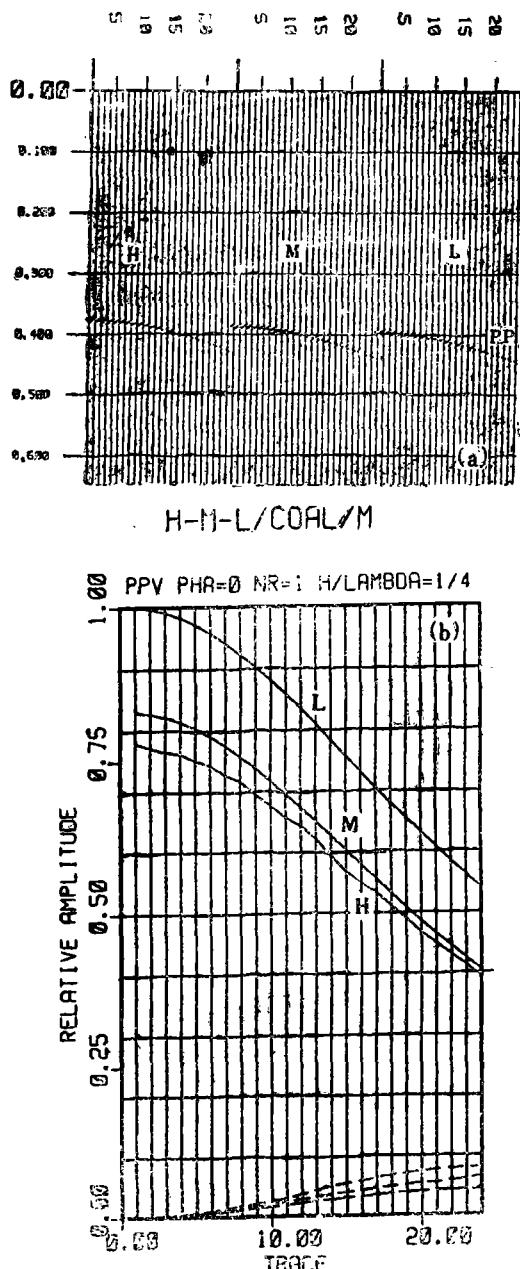


图7 在有火成岩侵入, 煤层变为天然焦($n-coal$)或被火成岩(Lim.)替换后反射振幅随偏移距的变化
a—合成的CDP道集;
b—相对反射振幅随偏移距的变化

与速度都比煤层大, 甚至大得多, 其单一界面反射系数都将减小。图7是对应于薄煤层、天然焦、火成岩(或石灰岩)的CD P道集及相应的振幅随偏移距变化的曲线, 即AVO

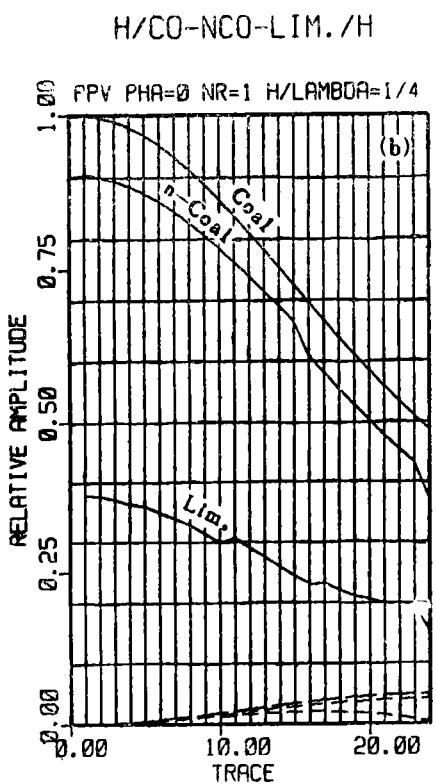
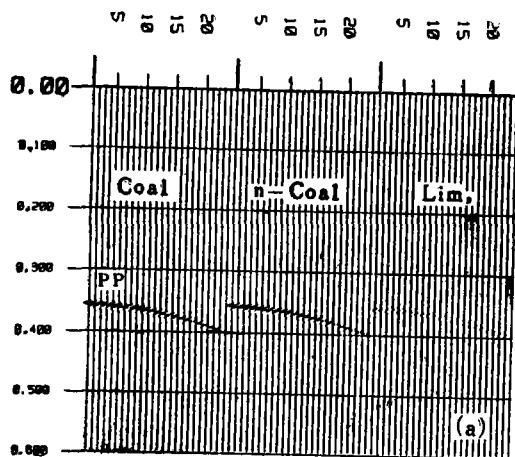


图8 当底板速度中等(M),顶板速度分别为高、中、低(H.M.L.)时,煤层反射振幅随偏移距的变化

a—合成的CDP道集;
b—相对反射振幅随偏移距的变化(实线为纵波)

曲线。这里, $h/\lambda = 1/4$, $nr = 1$, 即没有考虑多次波。显而易见, 在讨论的条件下, 各反射波振幅随偏移距增大而减小。其中, 煤与天然

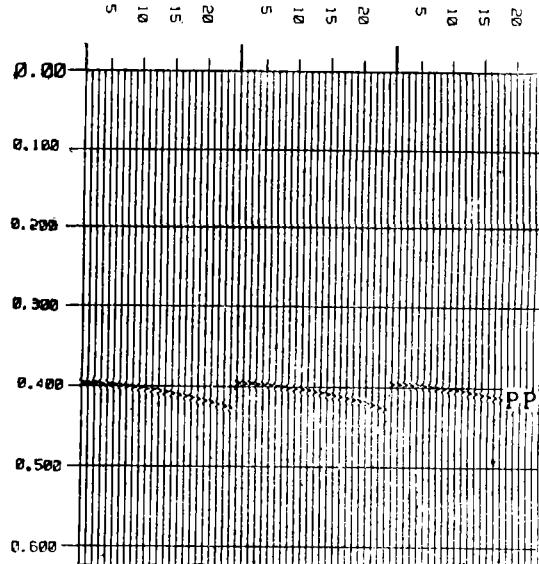


图9 围岩条件与图8相同时,合成的CDP道集

焦的反射,除后者振幅略小一点外,十分相近,难于分辨;而火成岩或石灰岩反射,具有相反的极性及较弱的振幅。可以想见,当煤层被火成岩替换后,与该层位有关的反射将极性反转,明显减弱,甚至消失。

图8表示煤层底板岩性保持不变(速度及密度中等,M),而顶板岩性不同(速度密度分别为高、中、低,即H、M、L)时的情况。值得特别指出的是:顶板波阻抗越小,煤层反射波的振幅越强。这可能与顶界面透过损失小有关。图9表示顶底板岩性与图8相同时的合成CDP道集,可以看出,底板岩性变化对煤层反射波振幅影响不大明显。图8、图9表明,当煤厚及物性稳定的条件下,煤层反射波强弱变化,可能反映了顶板岩性的变化,而与底板岩性变化的关系不大。

3 结论

煤层的反射与许多因素有关。除了煤层与其围岩物性差异及煤厚的调谐作用两个主要因素外,入射角(或偏移距)及煤层内多次波也是十分重要、不容忽视的因素。至于煤层内转换波分量的影响,在不大的偏移距范

选择伽马-伽马测井影响因素的探讨

段铁梁 陈文宁 刘栋梁 杨启富

(云南煤田地质勘探公司)

使用软伽马射线源的选择伽马—伽马方法其响应值主要取决于探测物质的有效原子序。因此，该方法是煤层定性、定厚及煤灰分确定的较好的方法之一，也是中国煤田地质局近期重点推广的方法。但是，目前该方法仪器尚无统一的测试方法；仪器的影响因素亦未深入研究；仪器的输出受外界条件干扰，致使不同时期的测井资料难以对比，更难于建立煤灰分与方法响应值之间的相关关系，即使使用大量资料进行数理统计分析，也无法获得可靠的成果。因此，有必要对仪器进行试校验，研究各种因素的影响。

仪器响应的影响因素可分为两类：一是仪器工作状态（性能）；二是井眼环境。前者可以通过测试找出规律，用刻度的办法消除；而后者难以消除。研究的目的是引起人们重视，并正确估价测井成果的精度。本文以哈尔滨煤田地质科研所研制的HSG—1型选择伽马—伽马仪为例，探讨该方法的各种影响因素。

1 仪器性能影响因素测试

1.1 外电源电压变化影响

表1列出了外电压由190V变化到230V时，煤样品（ $250\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ ）

表1 煤样外电源电压影响试验

外电源电压(V)	190	200	210	220	230
校频输出 $\Delta V_{\text{校}}$ (mV)	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1
ΔV (mV)	7.2~8.0	7.3~8.2	7.4~8.2	7.2~8.1	7.2~8.1
$\Delta \bar{V}$ (mV)	7.60	7.75	7.80	7.65	7.65
测试条件	任 意				

围内是非常次要的。

在煤层近于水平、上覆各层介质较为均匀的条件下，对于等偏移道集其对应的入射角可视为一个常数，多次波及转换波的影响也近于一个常数，在这一前提下，等偏移距剖面上煤层反射波振幅的变化，基本上只反映了煤厚及物性的变化。若测区煤厚、煤质变化不大，煤层反射波的变化主要反映了顶板岩性的变化；若顶板岩性及煤质稳定时，煤层反射波的变化就比较单纯地反映了煤厚的变化。因此，在有利的条件下，仔细研究煤层反射波的特征，就可能成为直接预测煤

厚变化及岩性变化的主要途径。

参考文献

- [1] Almoghrabi, H. and Lange, J.: Layers and Bright Spots, *Geophysics*, 1986, Vol.51, №3.
- [2] Lange, J. and Almoghrabi, H.: Impulse Reflectivity of Thin Layers, Modeling presented on 56th SEG meeting, 1986.
- [3] Sheriff, R.E.: *Encyclopedic Dictionary of Geophysical Exploration*, SEG, 1984.
- [4] Gerhard P.Dohr, *Seismic Share Waves, Part A, Theory*, London, 1985.