

# 煤田测井相解释系统的研究

朱子强 (山东省煤田地质局数字测井站泰安 271000)

**摘要** 论述了测井相分析的基本原理和方法,并采用多种测井参数及主成分分析、聚类分析、Bayes 判别分析等数据处理方法,建立起一套适用于煤田地质勘探的测井相计算机解释系统。

**关键词** 解释系统 测井相 岩相 聚类分析

**中国图书资料分类法分类号** P631.84

**作者简介** 朱子强 男 32岁 硕士 煤田测井

## 1 引言

在地球物理测井技术中,现代计算机数字处理技术和数学理论方法广泛应用于测井解释的各个领域。如何应用丰富的测井资料比较准确的解释地质勘探中的沉积问题,已成为当今地球物理和地质学家所共同关注的研究课题。

通常,某种岩性、岩相类型的地层大都具有一组特定的测井响应值。也就是说,一组测井响应值对应着同一岩性、岩相类型的地层的概率是很高的。因此可以通过测井资料将钻井剖面的地层划分成若干个有地质意义的测井相。具体地说,测井相(又称电相 electrofacies)就是用以反映沉积岩性、岩相特征的

一组特定的测井响应值。

测井相有图形和数据两种表达方式。

测井相分析就是选取一组最能反映沉积岩岩性、岩相特征的测井参数物理量,并从中提取与岩性、岩相有关的幅值信息,应用数学处理方法将地层划分成若干个测井相;然后把这些测井相与基准孔中岩芯、岩相等地质资料进行对比,确定每个测井相所对应的岩性、岩相类型及沉积特征,以此来预测未取芯孔的沉积特征及煤层分布规律等。

## 2 测井资料预处理

### 2.1 测井参数的选取

根据国内煤田测井的实际情况,选择能反映岩

吻合;8号模型反映了2<sup>-2</sup>煤层的燃烧情况,左边界距80号测点161.38~165.44 m,考虑到烘烤带烧变岩磁性较弱,根据经验一般要向无磁性方向外推5~10 m,即图1b中8号模型向左外推5~10 m后,2<sup>-2</sup>煤层烧变岩左边界距80号测点150~160 m,与H<sub>153</sub>孔揭露的基本一致;2<sup>-2</sup>煤层烧变岩埋深钻孔揭露为93.4 m,反演结果8号模型底部最大深度为88.14 m,也基本与钻孔相吻合。

## 5 结语

a. 多边形体 $\Delta T$ 最优化反演方法,采用了等效地质异常体,较好地解决了烧变岩磁异常的倒转现象和地形起伏的影响,与简化的烧变岩体模型接

近。

b. 经过理论模型和实例计算证实,多边形体 $\Delta T$ 最优化反演对圈定复杂的火烧区边界方法可行,迭代次数少,反演精度高。

c. 该方法不但适用于火烧区烧变岩的反演解释,也可用来解释火成岩侵入体。

## 参考文献

- 祁明星,万兆昌.陕北煤田火区磁探工作方法及效果.物探与化探,1987;11(2):291~296
- 王邦华等.均匀磁化多面体的磁场.地球物理学报,1980;23(4):415~426

(收稿日期 1995—09—21)

性、岩相特征的视电阻率、密度、自然伽马、声波速度、中子孔隙度等测井参数及泊松比、泥质含量等计算参数来参与测井相分析。

## 2.2 测井曲线的环境影响校正

环境校正主要是消除或减少井眼、泥浆及核统计误差等各种非地层因素的影响。其方法详见参考文献 1。

## 2.3 地层特征参数的计算

### 2.3.1 泥质含量 $V_{sh}$ 的计算

将各种测井方法的测量结果看作是井下探测器在探测范围内某种物理量的平均值,并认为在岩性均匀的条件下,单位岩石体积对测井结果的贡献是相等的。于是在分析过程中可以抛开微观物理过程,着重从宏观上研究岩石成分的各个部分(岩石骨架、孔隙流体和泥质等)对测井结果的贡献,这就是岩石体积模型的研究方法。

我们知道,由密度和中子孔隙度可建立如下线性方程组,解之,即可求出地层泥质含量  $V_{sh}$ 。

$$\begin{cases} \rho_b = \rho_{ma} \cdot V_{ma} + \rho_{sh} \cdot V_{sh} + \rho_w \cdot \Phi \\ \Phi = \Phi_{ma} \cdot V_{ma} + \Phi_{sh} \cdot V_{sh} + \Phi_w \cdot \Phi \\ 1 = V_{ma} + V_{sh} + \Phi \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\rho_b$  —— 岩石的体密度,  $\text{g/cm}^3$ ;

$\Phi$  —— 中子孔隙度, %;

$\rho_{ma}$ 、 $\rho_{sh}$ 、 $\rho_w$  与  $\Phi_{ma}$ 、 $\Phi_{sh}$ 、 $\Phi_w$  分别为岩石的骨架、泥质、水分的密度和中子孔隙度。

### 2.3.2 岩石泊松比( $\sigma$ )的计算

根据弹性力学知识,岩石泊松比可由声波纵波速度( $v_p$ )与横波速度( $v_s$ )计算:

$$\sigma = \frac{1}{2} \cdot \frac{(v_p/v_s)^2 - 2}{(v_p/v_s)^2 - 1}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2},$$

式中  $\Delta t_s$  —— 横波时差;

$\Delta t_p$  —— 纵波时差。

$\Delta t_p$  值由仪器直接测得,  $\Delta t_s$  由下列经验公式求得:

$$\Delta t_s = \Delta t_p / [1 - 1.15 \frac{1/\rho + 1/\rho^3}{e^{1/\rho}}]^{3/2}, \quad (3)$$

式中  $\rho$  —— 地层密度,  $\text{g/cm}^3$ 。

## 2.4 测井曲线分层

详见参考文献 2。

## 2.5 测井数据取值

分层后的测井曲线,认为层内岩性单纯,岩性测井响应值为单值,曲线的波动只反映岩性的局部不均匀和测井随机噪声。但是,由于受测井仪器测量系统尺度(源距)的限制,不同厚度的岩层在边界处受围岩的影响不同。取值时,应注意数值的有效性。

如图 1 所示,将曲线划分为 5 种基本形态。其中,第 1、2、3 种形态取层内均值为层值;第 4 种取层内极大值为层值,第 5 种取层内极小值为层值。

## 3 测井相分析方法<sup>[3,4]</sup>

### 3.1 样本层的选择

在勘探区的基准孔中,选择厚度较大、孔壁条件

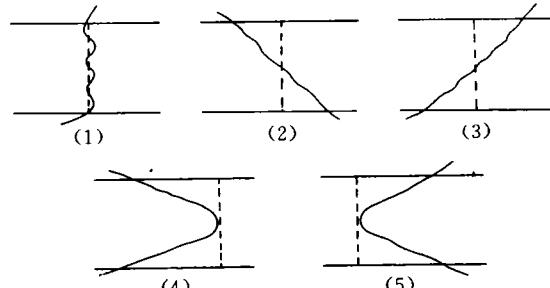


图 1 曲线基本形态划分

## TO DELINEATE FIRE AREA BY OPTIMIZATIONAL INVERSION OF $\Delta T$ ANOMALY OF POLYGONAL BODY

Dong Shouhua Li Zhidan (China University of Mining & Technology)

**Abstract** By analysing the characters of the  $\Delta T$  magnetic anomaly of burnt rock in the fire area, polygonal bodies are chosen for inversion model. The optimizational inverse method has been employed to delineate borders of the fire area. By damping least squares auto-fit, the iterative several times and ambiguity can be reduced, and accuracy is improved. The theoretical models and practical data have illustrated the effectiveness of the method.

**Keywords** burnt rock; magnetic anomaly; polygonal body; damping least square methods; inversion

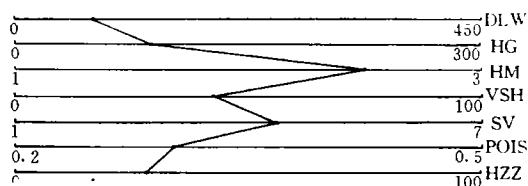


图 2 测井相梯形图

DLW——电位电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ; HG——自然伽马, API; HM——密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ; VSH——泥质含量, %; SV——声波速度,  $\text{km}/\text{s}$ ; POIS——泊松比, 1; HZZ——中子孔隙度, %

较好、测井曲线质量较高, 并包含测区各类岩性及岩相的层段作为标准样本层。采用梯形图法与聚类分析相结合的方法确定样本层的测井相。

### 3.2 梯形图法

如图 2 所示, 画出每种测井参数的梯级坐标线; 根据所用各测井参数数据的变化范围, 在梯级坐标线上标注比例尺; 将某一样本层的一组测井参数值在相应梯级线上; 把这些点用折线连接起来, 即形成一定形状的测井相梯形图。

在作出全部样本层梯形图后, 比较它们的形状, 即可把各样本层划分为若干类测井相。该方法虽然直观, 但工作起来较繁琐。

### 3.3 聚类分析法<sup>[5]</sup>

#### 3.3.1 数据归一化处理

由于各测井参数的量纲不同, 其数值一般相差很大, 不能直接用于计算, 为此需对样本层测井数据做标准化处理, 使处理后的各测井数据服从 0~1 正态分布。这里用标准差归一化处理法:

$$X'_{i,j} = (X_{i,j} - \bar{X}_j) / S_j; \quad (4)$$

式中  $\bar{X}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{i,j}$  为归一化前的样本均值;

$$S_j = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_{i,j} - \bar{X}_j)^2 \right]^{1/2}, \text{ 为归一化前的样本标准差;}$$

$X_{i,j}$  与  $X'_{i,j}$  分别为归一化前、后第  $i$  层第  $j$  条测井曲线的数值;

$N$ ——样本层数。

#### 3.3.2 主成分分析

主成分分析实质上是一种变量变换。在主成分分析中, 引进一组新的变量, 它们是原来变量的线性函数, 而且彼此不相关。这组新变量即称为主成分。

在测井相分析法中, 主成分分析是把由  $m$  个测井参数指标表示的岩性、岩相特征转化为由少数  $p$  个互不相关、相互独立 ( $m$  种测井参数已归一化) 的主成分来表示的岩性、岩相特征 ( $p < m$ ), 从而减少了聚类分析的计算工作量, 且不影响分析效果。

设有  $n$  个样品,  $m$  个测井参数指标, 原始数据为  $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 。第  $j$  个主成分是  $x$  的线性函数:

$$y_j = a_{1j}x_1 + a_{2j}x_2 + \dots + a_{mj}x_m = a_j^T x,$$

式中  $a_j^T$ ——样本协方差阵  $S$  对应于第  $j$  个最大特征值  $L_j$  的特征向量。

如果  $L_i \neq L_j$ , 由特征向量性质可知,  $a_i^T, a_j^T$  必定正交, 第  $j$  个主成分的样本方差等于  $L_j$ 。

如果  $S$  是正定阵, 则可以相继求出  $L_1, \dots, L_m$  和与之对应的  $a_1^T, \dots, a_m^T$ 。也就是说存在一个正交矩阵  $A'$ ,  $A'$  的各列是  $S$  的特征向量  $a_1^T, \dots, a_m^T$ , 即:

$$A' = \begin{vmatrix} a_1^T \\ \vdots \\ a_m^T \end{vmatrix} \quad Y = \begin{vmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{vmatrix} = A' X.$$

这一变换把原来的坐标系变换成了主成分坐标系。为了形式简便, 可设  $\bar{x} = 0$ , 这时原来的样本协方差阵成为:

$$S = \frac{1}{n} X' X.$$

而主成分的资料矩阵是

$$Y = \begin{vmatrix} y_{(1)} \\ \vdots \\ y_{(n)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (A' x_{(1)})' \\ \vdots \\ (A' x_{(n)})' \end{vmatrix} = X A;$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n y_{(a)} = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n A' X_{(a)} = \frac{1}{n} A' \bar{X} = 0;$$

主成分的协方差阵是

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} Y' Y &= \frac{1}{n} A' X' X A = A' S A \\ &= \begin{vmatrix} a_1^T \\ \vdots \\ a_m^T \end{vmatrix} S (a_1, \dots, a_m) = \begin{vmatrix} L_1 & 0 \\ \vdots & \ddots \\ 0 & L_m \end{vmatrix} \end{aligned}$$

主成分的协方差阵  $\frac{1}{n} Y' Y$  是一对角阵, 其主对

角元素是各主成分的样本方差：

$$S^2 y_i = a' S a_i = L_i \quad (i=1, \dots, m)。$$

系统的总方差(方阵  $S$  的迹)是

$$L_1 + L_2 + \dots + L_m = \text{tr} S。$$

第  $j$  个主成分的方差与总的方差之比

$$L_j / \text{tr} S$$

称为第  $j$  个主成分的贡献率。这个值越大, 表示第  $j$  个变量  $a'_j x$  综合  $x_1, x_2, \dots, x_m$  的能力越强。

主成分个数的选择可按下式进行：

$$\sum_{j=1}^p L_j / \text{tr} S \geq EPS, \quad (5)$$

式中  $EPS$  ——  $p$  个主成分的累计百分比。

### 3.3.3 聚类分析

按上述  $p$  个互不相关的主成分变量, 采用系统聚类分析方法确定测井相。

系统聚类分析是目前实际工作中用得最多, 且很方便的一种方法。在该法中, 任一步所得的分类都是前面各步分类的合并。它由  $n$  个类、每类只包含一个样品开始, 计算出类与类之间的距离, 合并距离最近的两类以得到新的分类, 直至所有的样品都合成一类为止。

根据类间距离的不同定义, 分最短距离法、最长距离法、类平均法及离差平方和法等。

这里采用离差平方和法。离差平方和法是 Ward 于 1963 年基于方差分析的思想提出的。他认为如果类划分得正确, 同类样品的离差平方和应当最小, 类与类之间的离差平方和应当最大。

设  $n$  个样品分成  $g$  类, 用  $x'_{(a)}$  表示第  $G_t$  类中的第  $a$  个样品(是一个  $p$  维向量), 以  $n_t$  记第  $G_t$  类中的样品个数,  $n_1 + n_2 + \dots + n_g = n$ , 用  $\bar{X}^{(t)}$  记第  $G_t$  类中样品的均值向量, 即：

$$\bar{X}^{(t)} = \frac{1}{n_t} \sum_{a=1}^{n_t} x'_{(a)}, \quad (t=1, \dots, g)。$$

用  $S_t$  记第  $G_t$  类中的样品离差平方和：

$$S_t = \sum_{a=1}^{n_t} (x'_{(a)} - \bar{X}^{(t)})^2。$$

而类内离差平方和的总和是

$$S = \sum_{t=1}^g S_t = \sum_{t=1}^g \sum_{a=1}^{n_t} (x'_{(a)} - \bar{X}^{(t)})^2。$$

当  $n$  个样品各自成一类时,  $S=0$ 。随着类的合并,  $S$  增大。

Ward 的想法是, 先将  $n$  个样品各自成一类, 聚类时每次并掉一类, 直至所有的样品归为一类。两类合并时, 选择使类内离差平方和的总和增加值最小。

Ward 所提出的方法实际上是将类  $G_p$  和  $G_q$  的距离平方定义为将  $G_p$  合并成  $G_r$  时所增加的离差平方和, 即

$$D_{p,q}^2 = S_r - S_p - S_q。$$

实际上,

$$D_{p,q}^2 = \frac{n_p n_q}{n_r} (\bar{X}^{(p)} - \bar{X}^{(q)})' (\bar{X}^{(p)} - \bar{X}^{(q)})$$

当合并  $G_p, G_q$  成新类  $G_r$  后, 新类  $G_r$  与任一其它类  $G_k$  的距离有以下递推公式:

$$D_{k,r}^2 = a_p D_{k,p}^2 + a_q D_{k,q}^2 - \beta D_{p,q}^2, \quad (6)$$

式中  $a_p = (n_k + n_p) / (n_k + n_r)$ ;

$$a_q = (n_k + n_q) / (n_k + n_r);$$

$$\beta = n_k / (n_k + n_r)。$$

### 3.3.4 测井相—岩性、岩相标准数据库文件

根据基准孔中岩性、岩相资料、对划分出的测井相做对比分析, 确定每个测井相所对应的岩性、岩相类型, 从而建立起勘探区的测井相—岩性、岩相数据库文件。

但应注意, 由于同类岩性、岩相的地层, 可能有不同的测井响应值(由孔隙度、液体性质等差别引起), 故可出现多种测井相对应一种岩性、岩相, 即测井相类型一般多于岩性、岩相种类。这就需要结合梯形图法来完善测井相—岩性、岩相库文件。

### 3.3.5 测井相判别模型

在建立测井相—岩性、岩相库后, 应用贝叶斯(Bayes)判别分析方法, 建立起测井相判别方程:

$$F_g(x) = \ln Q_g + C_{0,g} + C_{1,g} x_1 + \dots + C_{m,g} x_m. \quad (7)$$

修正(加权)后(7)式为:

$$F_g(x) = \ln Q_g + C_{0,g} + C_{1,g} \varepsilon_1 x_1 + \dots + C_{m,g} \varepsilon_m x_m,$$

式中  $Q_g = n_g / n, g=1, 2, \dots, G$ , 为验前概率;

$\varepsilon_i$  —— 测井曲线权系数, 依测井曲线的可信度给定;

$C_i$  —— 函数方程系数;

$x_i$  ——  $m$  条测井曲线值,  $m=7$ ;

$G$  —— 测井相类别数。

在计算出各测井相判别函数  $F_g(x)$  值后, 找出最大函数  $F'_{g'}(x)$  值, 并将该层归入第  $g$  类测井相,

计算出分类的后验概率  $P(g/x)$ 。

$$P(g/x) = p_g \cdot f_g(x) / \left[ \sum_{k=1}^G p_k \cdot f_k(x) \right]$$

$$= e^{y_g(x)} / \sum_{k=1}^G e^{y_k(x)}, \quad (8)$$

式中  $p_g$  ——先验概率;

$f_g(x)$  ——第  $g$  类概率分布密度;

$y_g(x) = F_g(x) - F'_g(x)$ 。

根据后验概率的大小,可确定出将该层划归到第  $g$  类测井相的可信度。

#### 4 解释系统软件设计

测井相解释系统软件主要按照软件工程学中的设计思想,使该系统具有较长的生命周期和较高的质量,同时兼顾可靠性、易理解性、易维护性和高效率等特点。

##### 4.1 系统界面

系统借助了煤田数字测井数据库 LOGSYS 管理系统和岩性解释系统 LOGGEOL。

##### 4.2 系统框图

见图 3 所示。

##### 4.3 系统编码

软件系统采用多种计算机语言混合编程:汇编语言编制图形输出程序,提高系统成果输出速度;FORTRAN 语言编制数据处理程序;C 语言编制窗口管理程序及屏幕绘图程序;BASIC 语言编制汉字图头程序。

##### 4.4 系统运行环境

a. 硬件。386 微机,内存 1 兆,硬盘 60 兆以上;VGA 显示器;A(C)R-3240 打印机及其兼容机。

b. 软件。MS-DOSV3.31~5.0 操作系统;TGV2.0、MSCV5.1、FORTRAN77V5.0、QUIC-BASICV4.0 编译系统;LOGSYS 数字测井专用数据库系统。

#### 5 结束语

测井相解释系统是目前煤田地球物理测井中,功能强、成本低、软件设计标准的测井地质解释系统。它综合利用了多种测井参数、多种分析方法,从而克服了应用单个测井参数,单种方法解释精度低、

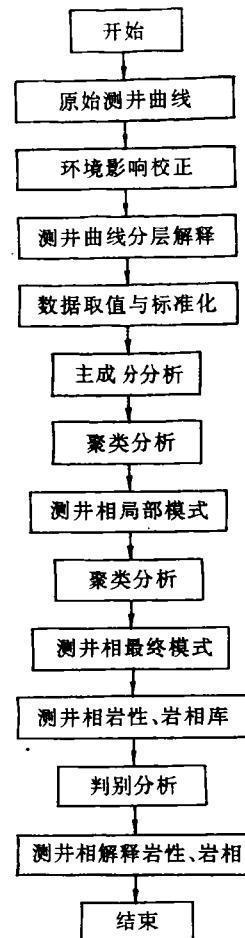


图 3 测井相解释系统程序框图

信息量少的缺点,拓宽了数字测井的地质应用领域。

本文在写作过程中,一直得到中国地质大学(北京)黄智辉教授、中国煤田地质总局秦杰及山东煤田地质局张景考高级工程师的热心指导,在此表示衷心感谢!

#### 参考文献

- 1 廉世和. 测井曲线预处理方法与软件的研究. 华东石油学院学报, 1984;1
- 2 朱子强, 廉世和. 煤田数字测井资料计算机自动解释. 煤田地质与勘探, 1992; 增刊: 129~134
- 3 斯伦贝谢测井公司, 李舟波译. 测井解释原理与应用. 北京: 石油工业出版社, 1991
- 4 刘业新, 王继贤. 测井相分析方法的研究及软件设计. 科学通报, 1989;4
- 5 蒋耀淞. 多元统计分析方法. 北京: 中国地质大学出版社, 1980

(收稿日期 1995-02-06)

# 稳态瑞雷波实测洞穴 $D-\bar{v}_R$ 曲线的类型

夏宇靖 (煤炭科学研究院西安分院 710054)

**摘要** 瑞雷波勘探对洞穴、疏松带等地质体的判断主要根据  $D-\bar{v}_R$  曲线形态变化表现的异常特征进行, 这在很大程度上有赖于解释者的实践经验。作者根据多年的实践, 把洞穴类地质体表现的异常特征归纳为 6 类, 分别举例加以说明, 为瑞雷波方法的推广应用及进一步实现解释工作的程序化、自动化, 提供了必要的基础资料。

**关键词** 类型  $D-\bar{v}_R$  曲线 瑞雷波 洞穴

**中国图书资料分类法分类号** P631.44

**作者简介** 夏宇靖 男 50岁 高级工程师 瑞雷波勘探

## 1 稳态瑞雷波勘探方法的基本原理

在三维空间中, 瑞雷波传播的波阵面是一个圆柱面<sup>[1]</sup>(图 1)。检波器接收的信息是以  $EB$  为半径的圆形底面, 以  $\lambda_R$ (波长)为高的圆柱体内介质的弹性性质, 主要是两道检波器之间的圆筒状体积内介质的弹性变化。

如图 2 所示, 电磁式振动器 E 激发 2~9 999 Hz

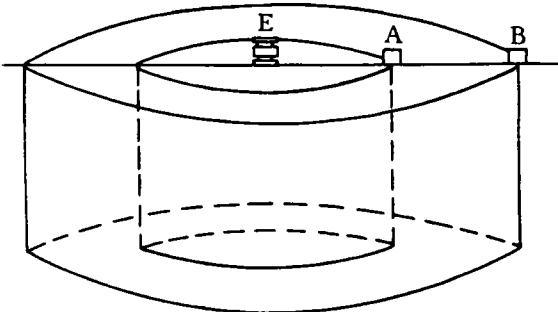


图 1 瑞雷波传播波阵面示意图

的可控频瑞雷波, 两道加速度检波器 A 与 B 分别接收震源 E 发出的瑞雷波信号, 经 GR-810 仪放大、滤波, 并用互相关原理计算两道信号的时差  $\Delta T$ 、瑞雷波传播的平均速度  $\bar{v}_R$ , 按半波长原理计算相应的勘探深度:

$$D = \lambda_R / 2 = \bar{v}_R / (2f),$$

式中  $\lambda_R$  —— 波长;

$f$  —— 频率。

由振动器 E 从高到低上百次频率的有序变化, 得到各频点对应的  $D$ 、 $\bar{v}_R$  值, 最终汇集成  $D-\bar{v}_R$  曲线。

实测  $D-\bar{v}_R$  曲线既反映了地层波波速的变化,

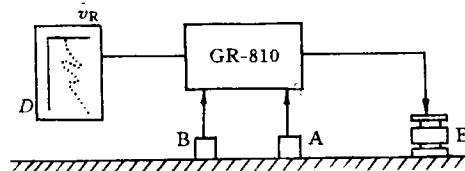


图 2 瑞雷波勘探工作原理示意图

## STUDY OF INTERPRETATION SYSTEM OF COAL LOGGING FACIES

Zhu Ziqiang (Numerical log team, shandong coal geology bureau)

**Abstract** In this paper, the basic theories and methods of log logging facies analysis are expounded. Many parameters of well logs and mathematical methods of data processing are used, such as principal factor analysis, cluster analysis and Bayes discriminant analysis etc., and logging facies explanation system to suit coal geological exploration is set up.

**Key words** interpretation system; logging facies; lithofacies; cluster analysis