

d_{cs} 指数检测地层压力原理与实践

董 振 国

(地质矿产部第五普查勘探大队)

内容提要 本文在 d_c 指数检测地层压力方法的基础上又考虑了钻头磨损、钻头类型及压差的影响。经现场实践检验结果同实际情况吻合。藉此法还可推算地层孔隙压力和区分砂泥岩。

d_c 指数检测地层压力的方法已被钻井界广泛接受,推广应用结果取得较大进展和成效。但是,现行的 d_c 指数法还存在一定的缺陷,它还明显受钻头磨损、钻头类型和压差的影响,如果我们在使用中忽略了这些因素,就会在具体工作中造成混乱。本文在 d_c 指数的基础上考虑了钻头类型、钻头磨损和压差的影响,进一步完善了 d_c 指数法。

一、 d_c 指数法基本原理

为了校正钻头因素对基本 d_c 指数的影响,Roland. E. Geard提出用 d_{cs} 指数法检测地层压力,其原理仍基于压实理论,公式来源于标准钻速方程,即:

$$R = KK'N^e \left(\frac{W}{D} \right)^d \quad (1)$$

式中 R ——机械钻速, m/h; K ——钻头磨损系数,无因次; K' ——岩石可钻性系数,无因次; N ——转盘转速, r/min; e ——转速指数,无因次; W ——钻压, t; D ——钻头直径, mm; d ——钻压指数,无因次。

假如我们取均一的泥页岩层来研究,那么 $K' = 1$,假定转数对钻速成线性影响,则取 $e = 1$,公式简化为:

$$R = KN \left(\frac{W}{D} \right)^d \quad (2)$$

解方程(2)得:

$$d = \frac{\lg \frac{R}{KN}}{\lg \left(\frac{W}{D} \right)} \quad (3)$$

式(3)经过单位换算,变形为:

$$d = \frac{\lg (3.282 F / K \cdot N \cdot T)}{\lg (0.671 W / D)} \quad (4)$$

式中 F ——进尺(m);
 T ——钻时(min)

在以往的 d_c 指数研究中,对于钻头的影响处理过于理想化,只是简单地取镶齿钻头,而舍去其它型号钻头,并认为钻头磨钝适中,取 $K = 1$ 。

事实上,钻头因素对 d_c 指数的影响还是很大的,其影响方式有两种:一是牙齿磨损引起钻速降低, d_c 指数逐渐增加,如图1和图2;二是钻头类型不同,造成 d_c 指数的位移,如图3中的1、2、3曲线段所示,当钻头类型变化大时,如从镶齿钻头1段变为铣齿钻头2段或镶齿钻头3段, d_c 指数的变化更为显著。

第一种因素我们用牙齿磨损量 h 表示,设新钻头 $h = 0$;牙齿全部磨损时 $h = 1$ 。

第二种因素我们用钻头类型指数 P 来表示,其值的大小与钻头的IADC编码有关,推荐值见表1。

有了 h 值与 P 值,我们就可以找出钻头

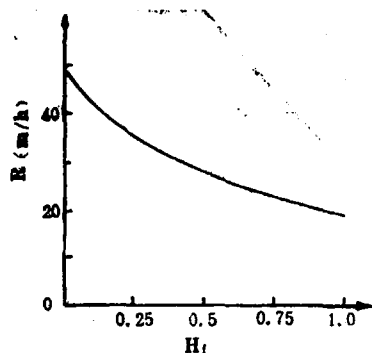


图1 钻速与牙齿磨损量的关系

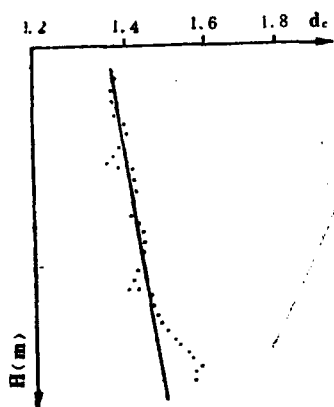


图2 钻头磨损对d_c值的影响

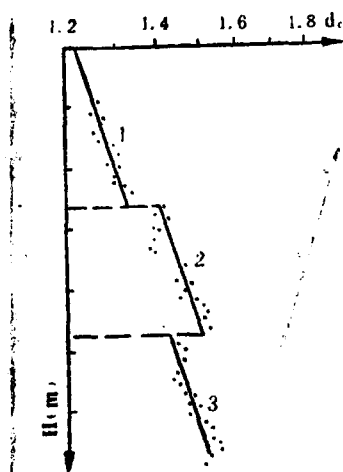


图3 钻头类型对d_c值的影响

磨损系数方程:

$$K = \frac{1}{(0.93h^2 + 6h + 1)^p} \quad (5)$$

钻头的IADC值和P指数的关系 表1

齿型	铣型钻头			镶型钻头				金刚石钻头
适用地层	软	中	硬	特软	软	中	硬	坚硬
系列号	1	2	3	4	5	6	7	8
P指数	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0	0

钻头在井下工作期间,其牙齿磨损量是无法测定的,只能在钻头起出之后,测出牙齿最终磨损量 h_t ,显然 $0 < h_t < 1$ 。牙齿瞬时磨损量的求法,先引出进尺效果系数:

$$y = h_t \frac{H - H_0}{L} \quad (6)$$

式中 y ——进尺效果系数; h_t ——牙齿最终磨损量; H ——当时井深, m; H_0 ——起始井深, m; L ——单只钻头的总进尺, m。

牙齿磨损量 h 与 y 的关系为:

$$h = y \frac{0.31h_t^2 + 3h_t + 1}{0.31y^2 + 3y + 1} \quad (7)$$

至此,与K系数计算有关的参数均已找到,下面只要将式(6)代入式(7),再代入式(5),就可求出K值,再将K值代入基本公式(4)中,便可以得出 d 值。

与沿用的方法比较,新指数 d 的物理含义增加了一项钻头磨损系数K。

压差对 d 值的影响是通过钻速间接起作用的,如图4。为了消除压差的影响,仍采

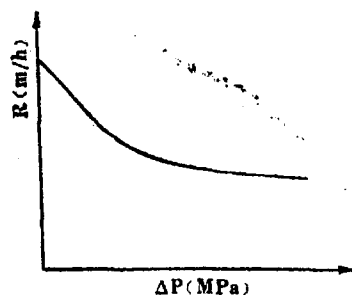


图4 钻速-压差关系图

用Rehm和McClenden提出的修正方法,对 d 指数加以改进,即:

$$d_{c_s} = d \frac{G_{f_n}}{ECD} \quad (8)$$

式中 d_{c_s} ——修正“ d ”指数; G_{f_n} ——地层水密度, g/cm^3 ; ECD ——当量循环密度, g/cm^3 。

$$\text{而 } ECD = \frac{\sum \Delta P \times 10}{H} + \gamma_m$$

式中 $\sum \Delta P$ ——总环空压降, 0.1 MPa; H ——井深, m; γ_m ——泥浆密度, g/cm^3 。

d_{c_s} 指数是由 d_c 指数发展而来的, 工作步骤与 d_c 指数基本相同。

关键为取全取准钻时、转速、钻压、钻头直径和类型、泥浆密度等5项数据。此外, 还要收集钻头最终磨损量和总进尺, 计算环空压降。

在日常工作中, 若新钻头类型和钻进措施与上个钻头差别不大, 可结合上个钻头实际磨损量和进尺预测新钻头的指标, 这样可以防止漏测高压过渡层。

1. 绘制 d_{c_s} —— H 曲线

把计算好的 d_{c_s} 值, 随即画到半对数纸相应的井深上。

2. 正常倾向线的建立

正常压实的倾向线是通过 d_{c_s} —— H 曲线拟合的一条反映井底压差和压实规律的直线, 它的方程为:

$$\ln d_{c_n} = a \cdot H + b$$

式中 d_{c_n} ——测点在正常倾向线上的外推值; a ——斜率; b ——截距

a 、 b 两个系数是由一元回归方程(线性)确定的, 其中

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \ln d_{c_{s_i}} - n \bar{H} \ln d_{c_s}}{\sum_{i=1}^n H_i^2 - n \bar{H}^2}$$

$$b = \ln \bar{d}_{c_s} - a \bar{H}$$

二、地层孔隙压力计算

将“ d_{c_s} —— H ”曲线转换为“地层压力——深度”曲线是 d_{c_s} 指数法的主要目的。

据研究, 地层压力异常的程度与 d_{c_s} 偏离值呈正交变化。它们之间的定量关系是根据伊顿(Eaton·B·A)提出的近似指数方程计算地层压力的方法。

伊顿地层压力梯度公式:

$$G_f = G_s - (G_s - G_{f_n}) \left(\frac{d_{c_s}}{d_{c_n}} \right)^{1.2}$$

有了地层压力梯度数据, 就能近似计算地层破裂压力梯度和孔隙度值。

伊顿破裂压力梯度公式:

$$G_R = G_f + \frac{\mu}{1 - \mu} (G_s - G_f)$$

碎屑岩孔隙度:

$$\phi = \frac{G_s - 0.93 G_f - 0.02 G_{f_n}}{G_s - G_{f_n}} - 0.93 \left(\frac{d_{c_s}}{d_{c_n}} \right)^{1.2}$$

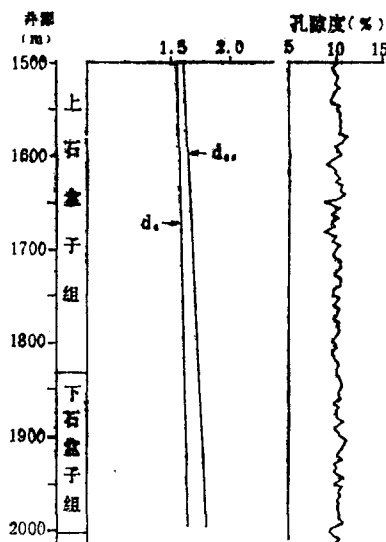


图5 南3井 d_{c_s} 与 d_{c_n} 线对比图

式中 G_f ——地层压力梯度, 100kPa/m;
 G_s ——上覆岩层压力梯度, 100kPa/m;
 G_R ——地层破裂压力梯度, 100kPa/m;
 μ ——岩层泊松比; ϕ ——孔隙度, %。

三、现场实践

以南华北的南3井为例说明 d_{cs} 指数 的特点。由图5的曲线和表2、表3的数据可以看出:

1. 同一钻头, d_{cs} 指数与 d_c 指数相比, 浅部偏差较小, 随埋深增加偏差逐渐加大。这

南3井 d_c 、 d_{cs} 指数结果对比 表2

引用方法	数值范围	倾向线方程	地层压力梯度	孔隙度 (%)
d_c 指数	1.5~1.65	$1.5d_{cn} = 0.208 \frac{H}{1000} + 0.094$	115 kPa/m	/
d_{cs} 指数	1.6~1.8	$1.6d_{cn} = 0.219 \frac{H}{1000} + 0.142$	113 kPa/m	9~11

南3井13#钻头部分 d_c 、 d_{cs} 值对比 表3

钻头新度	井深 (m)	岩性	d_c 值	d_{cs} 值	备 注
100%	1350	砂岩	1.60	1.79	钻头类型
	1360	泥岩	1.84	2.00	XHP ₃
	1370	铝土岩	1.86	2.00	磨损等级
	1380	泥岩	1.69	1.85	T ₃ B ₃
	1390	砂岩	1.62	1.80	进尺94.13m
	1400	砂岩	1.48	1.65	
	1410	铝土岩	1.70	1.87	
	1430	泥岩	1.85	2.02	

说明在 d_{cs} 曲线上, 由于考虑了钻头磨损对 d 带来的影响, d_{cs} 指数自动补偿了钻压指数的增加, 故 d_{cs} 指数法更接近实际。

2. 计算出的孔隙度值一般在10%左右, 反映所钻遇的地层时代为古生代的老地层, 泥页岩遭受的压实作用强烈。

3. 用 d_{cs} 指数法估算的地层压力梯度113kPa/m与关井求压的结果112kPa/m比较, 误差在2%以内。

四、效果

1. 由于 d_{cs} 指数法考虑了钻头因素对 d_c 值的影响, 因此对地层压力反映敏感, 精度高, 与实测压力资料较为吻合 (见表4)。

2. d_c 指数直接用泥浆密度代替当量循环密度, 不能有效地消除大的压差对 d_c 指数的影响 (见图6), 而 d_{cs} 指数则可解决这个问题。

塔北地层压力检测与实测对比表 表4

井号	井深 (m)	检 测 (kPa/m)	实 测 (kPa/m)	绝对误差 (Δ)
沙4井	5300~5370	115	114.4	+0.6
	4300	124	122	+2
沙5井	5600	113	113	0

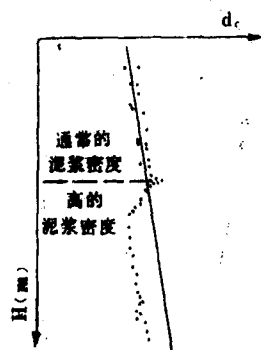


图6 压差很大时 d_{cs} -H曲线

3. 从 d_{cs} —H曲线上可以方便地区分砂、泥岩（见图7和图8）。如果 d_{cs} 值普遍较低，说明是厚层砂岩；如果 d_{cs} 值较高，说明是泥岩；如果 d_{cs} 值介于高低之间则说明砂、泥岩互层。

4. 计算的孔隙度值，可作为储层评价的参考资料。

综上所述，我们认为 d_{cs} 指数考虑了 d_c 指数未考虑的钻头和压差的影响因素，因此比 d_c 指数法准确，是检测地层压力的一种

较为完善的方法。相信在计算机普及的今天，可获得大面积推广的效果。

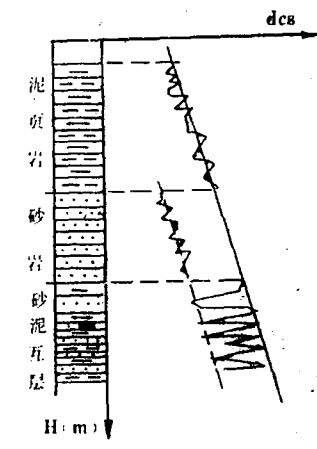


图8 d_{cs} 指数指示岩性

参 考 文 献

〔1〕 Geoservices, d.EXPOENT OVER PRESSURES

〔2〕 汪仲英 d 指数法《地层压力和地层破裂压力的确定方法》1982年11月

〔3〕 胡湘炯《对用钻压指数法检测地层孔隙压力的剖析》1985年10月

（本文收到日期 1988年5月16日）

图7 d_{cs} 指数和岩性的关系

采用新技术 改造低渗透

川中矿区大搞聚能压裂初见成效

〔本刊讯〕 川中矿区从1988年5月中旬开始先后在6口井进行聚能压裂试验，取得了初步成果：5口井喷油、1口井无效，成功率达83%。

“聚能压裂”，就是把上千个大气压的能量聚集起来，针对油层进行单孔射开、单孔压裂，使裂缝延伸得更远，为出油打开较大通道。从理论上讲，这种新工艺适合致密的低渗透油层。但理论正确与否还得靠实践来检验。1988年5月8日，台9井开始施工，1988年5月11日对凉高山层进行了聚能酸化压裂，至5月26日，进行间隙开井放喷和试生产，累计产出原油140t。在此作业之前，这个层位无产量。紧接着，川中矿区的作业五队采用聚能压裂新工艺，于1988年6月12日在金47井获得日产原油25t，7月16日金48井获得日产原油35t，8月28日金46井获得日产原油20t。

在取得初步经验的基础上，矿区根据中顾委常委康世恩同志的意见，拟定了川中地区30口井的聚能压裂施工方案，并新建了两个试油队。可以预见，到年底，川中矿区的聚能压裂试验将会取得更大成果。

（王能贵）

39 Cementing Practice in High Pressure Gas Wells with KQ-A Aerated Cement

This paper presents a new cementing method with KQ-A aerated cement which provides a new way to solve the problem of gas leakage caused by "weightlessness" of cement slurry. Through cementing practice in sever gas wells of South Sichuan Petroleum Mine, Sichuan Petroleum Administration (i.e. Sha-9, O-1, Bao-61, Ba-14, Tonglan-5, Lu-14, Long-40-1 etc.), it is proved that this method can prevent gas leakage at the well head or fluid interconnection among zones in the gas wells with high pressure and multizone reservoirs respectively, and the cementing quality has been obviously improved.

Xu Yongjie, Li Fude, Fu Derong, Guo Xiaoyang, Liu Liangquan

45 Principle and Practice Detecting the Formation Pressure with d_c Index

In this paper, the influence of the wear and type of bit and the differential pressure is taken into account on the basis of the method detecting the formation pressure with d_c index. The practical examination in work site shows that the result is identical with practical conditions. With the help of this method, the formation pore pressure can be calculated and the sandstone and mudstone can be distinguished.

Dong Zhenguo

50 Probing the Normograph and Mathematical Model of Gas Well Compressibility Factor

Based on applying the katz (u. s) chart of natural gas compressibility factor to obtain compressibility factors in a gas well, this paper designs and draws a normograph with which the natural gas compressibility factors may be directly read off according to the bottom hole flowing pressure and well depth, and derives a corresponding mathematical model of compressibility factor. Its reliability has been proved in design and experiment of water withdrawal in gas production technique.

Yang Chuandong

56 Fully Implicit Numerical Calculation Method for Acid Solution Concentration Distribution in Acidized and Fractured Fissures in Case of Using Prepad

Taking account of the conditions of common ion effect, temperature field and acidized rock reaction heat, the fully implicit numerical calculation method for acid solution concentration distribution in acidized and fractured fissures in case of using prepap is proposed in this paper. This method has a good stability, is practical and easy to calculate and can be used for acidizing and fracturing design and optimizing the parameters in case of using prepap.

Li Ping

STORAGE / TRANSPORTATION / SURFACE CONSTRUCTION

64 Change Rule Analysis and Calculation of Investment in Oil and Gas Pipeline Construction

In this paper, the change situation of investment in oil and gas pipeline construction is