

## ◀ 钻井与完井 ▶

## 利用测井资料综合预测岩石可钻性的试验研究

梁启明<sup>1</sup> 邹德永<sup>1</sup> 张华卫<sup>1</sup> 李学清<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东东营 257061; 2. 滇黔桂石油勘探局生产管理处, 云南昆明 650021)

**摘要:** 岩石可钻性是钻头选型、提高钻井效率的基础, 利用测井资料预测岩石可钻性是行之有效的手段。通过室内试验, 重点研究岩性、密度和泥质含量对岩石可钻性的影响规律, 在已有的可钻性与声波时差关系模型基础上, 考虑不同岩石岩性、密度和泥质含量对其可钻性级值的影响, 建立了新的岩石可钻性综合预测模型。经验证, 该模型预测精度较高, 能满足工程需要。

**关键词:** 岩石可钻性; 声波测井; 测井数据; 数学模型; 实验室试验

**中图分类号:** TE21    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-0890 (2006) 01-0017-03

岩石可钻性用以表征岩石抗钻强度的大小, 是岩石物理性质在钻进时的综合表现, 是钻头选型和优选参数钻井最重要的参数之一。目前国内外普遍采用声波时差测井资料来预测岩石可钻性<sup>[1-7]</sup>, 但声波时差是岩石声学特性的综合反映, 主要包括岩性、孔隙度、孔隙流体类型, 并不能完全反映岩石抗钻强度的大小, 因此岩石可钻性预测精度不是很高。笔者通过室内试验, 分别研究了岩石声波时差、岩性、密度和泥质含量对岩石可钻性的影响规律, 建立了岩石可钻性级值综合预测模型, 提高了预测精度。

## 1 岩心试验

### 1.1 岩样准备

分别选取一定数量的灰岩、砂岩和泥岩岩心, 制成高度40~70 mm, 两端面平行、磨光的岩样。

### 1.2 声波时差测定

试验仪器由声波发射和接收仪、示波器及声波探头等部分组成, 如图1所示。将岩样放于两探头之间, 发射探头发射的超声波穿过岩样后, 被接收探头接收, 电子信号在示波器上被显示出来。确定首波始点, 测出声波在岩石中的穿过时间t, 若岩样长度为L, 从而可以求取声波时差:

$$\Delta t = t/L \quad (1)$$

式中,  $\Delta t$  为岩样的声波时差,  $\mu\text{s}/\text{m}$ ;  $t$  为声波在岩石中的穿过时间,  $\mu\text{s}$ ;  $L$  为岩样长度,  $\text{m}$ 。

### 1.3 可钻性测定

利用华石Ⅲ型岩石可钻性测定仪测定可钻性。在每块岩样上钻3~5孔, 取钻时 $t'$ 的几何平均值作为岩样的可钻性代表值, 并转换成级值 $K_d$  ( $K_d = \log_2 t'$ )<sup>[8]</sup>。

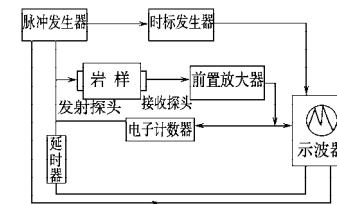


图1 波速测试系统示意图

### 1.4 密度测定

采用排水法测定岩样密度  $\rho$  (单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

### 1.5 泥质含量测定

根据 Stokes 沉降法则, 采用沉降虹吸分离法测定砂岩泥质含量。

## 2 试验结果分析

### 2.1 岩性的影响

将三种不同岩性的岩石一起分析, 以岩石可钻性级值  $K_d$  为纵坐标, 以声波时差  $\Delta t$  为横坐标作散点图, 如图2所示, 回归模型为 (相关系数  $R=0.79$ ):

$$K_d = -3.2936 \ln(\Delta t) + 23.651 \quad (2)$$

由图2可见, 所得数据点比较分散, 回归公式也不理想。取声波时差接近的一组岩样作比较, 发现岩性不同, 可钻性级值差别较大, 说明岩性对可钻性的影响较大。不同岩性的岩石, 其结构、组分, 还有其他许多物理性质可能差别很大, 对岩石可钻性的影响

收稿日期: 2005-07-07; 改回日期: 2005-09-28

作者简介: 梁启明 (1981—), 男, 2004年毕业于石油大学 (华东) 石油工程专业, 现为中国石油大学 (华东) 油气井工程专业硕士研究生。

联系电话: (0546) 8394550

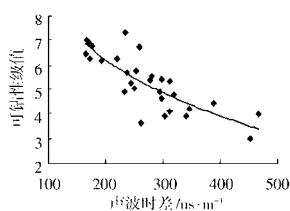


图 2 岩石可钻性与声波时差的关系

可能呈现出不同的规律性。为此,笔者分别作了灰岩、泥岩、砂岩 3 种岩石的可钻性级值与声波时差的散点图(见图 3),并据此建立与之对应的回归模型。

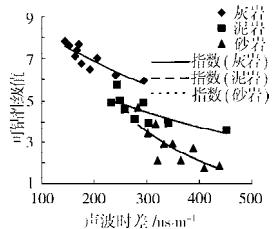


图 3 3 种岩石的岩石可钻性与声波时差的关系

灰岩岩石可钻性级值与声波时差关系的回归公式(相关系数  $R=0.87$ ):

$$K_d = 10.705 e^{-0.0025 \Delta t} \quad (3)$$

泥岩岩石可钻性级值与声波时差关系的回归公式(相关系数  $R=0.91$ ):

$$K_d = 9.7213 e^{-0.0026 \Delta t} \quad (4)$$

砂岩岩石可钻性级值与声波时差关系的回归公式(相关系数  $R=0.85$ ):

$$K_d = 8.7922 e^{-0.0018 \Delta t} \quad (5)$$

由式(3)~(5)可以看出,按照不同岩性建立的岩石可钻性预测模型,其相关性明显增加,预测准确性提高。

## 2.2 密度 $\rho$ 的影响

在岩性划分的基础上,笔者分别作了灰岩、泥岩、砂岩 3 种岩样的岩石可钻性与密度的散点图,如图 4 所示。由图 4 可以看出,灰岩和泥岩的可钻性与密度存在着较好的规律性,得到的回归公式相关系数较高。

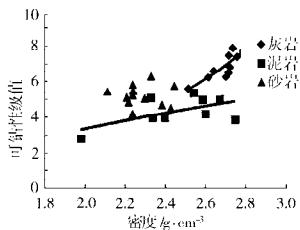


图 4 3 种岩石的岩石可钻性与密度的关系

灰岩岩石可钻性级值与密度关系的回归公式(相关系数  $R=0.83$ ):

$$K_d = 0.266 e^{1.2019 \rho} \quad (6)$$

泥岩岩石可钻性级值与密度关系的回归公式(相关系数  $R=0.84$ ):

$$K_d = 7.3502 \ln \rho - 1.9796 \quad (7)$$

砂岩的岩石可钻性级值与密度无明显规律性,究其原因,砂岩的结构较前两种岩性更为复杂,影响其可钻性的因素更多,比如泥质含量、胶结物成分以及胶结类型等。

## 2.3 泥质含量对砂岩可钻性的影响

泥质含量  $V_{cl}$  直接影响着砂岩的力学性质。即使在致密砂岩中存在极少的泥质,虽然岩石的体积模量下降较小,但剪切模量明显下降,并致使纵横波的波速明显下降。前人研究表明,  $V_{cl}$  超过某一定值时,随着  $V_{cl}$  的增加,砂岩纵横波速呈非线性减小,抗压强度和抗剪强度也呈非线性减小。图 5 为由试验数据作出的砂岩可钻性级值与  $V_{cl}$  的散点图。由图 5 可以看出,  $V_{cl}$  对砂岩可钻性的影响也应该有规律可循。

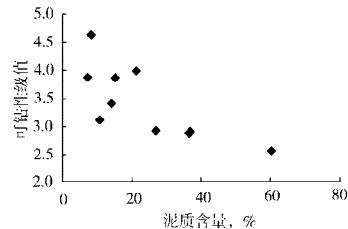
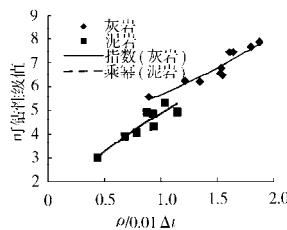


图 5 砂岩可钻性与泥质含量的关系

## 3 综合模型的建立

上述分析结果表明,灰岩和泥岩的可钻性级值与岩石的声波时差和密度  $\rho$  密切相关,综合考虑这两个因素,可以找到灰岩和泥岩可钻性与 “ $\rho/0.01\Delta t$ ” 的相关关系(见图 6)。

图 6 灰岩和泥岩可钻性与  $\rho/0.01\Delta t$  的关系

灰岩岩石可钻性级值与  $\rho/0.01\Delta t$  关系的回归公式(相关系数  $R=0.94$ ,  $x=\rho/0.01\Delta t$ ):

$$y = 3.8949 e^{0.3647x} \quad (8)$$

泥岩岩石可钻性级值与  $\rho/0.01\Delta t$  关系的回归公式(相关系数  $R=0.94$ ,  $x=\rho/0.01\Delta t$ ):

$$y = 5.0049 x^{0.6143}$$

砂岩的可钻性与声波时差和泥质含量密切相关,

综合考虑这两个因素，可得砂岩可钻性级值与“ $-\ln(V_{cl}) / 0.001\Delta t$ ”的相关关系图（见图 7）及回归公式（相关系数  $R=0.88$ ,  $x=-\ln(V_{cl}) / 0.001\Delta t$ ）：

$$y = 0.8747 \ln x + 2.1885$$

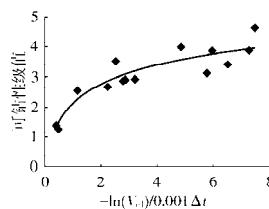


图 7 砂岩可钻性与  $-\ln(V_{cl}) / 0.001\Delta t$  的关系图

## 4 模型的验证

为检验室内试验数据回归分析获取的可钻性综合预测模型的预测精度，以已有室内试验数据为基础，对不同岩性岩石分别按照单因素模型和双因素模型进行了验证。结果表明：双因素模型的预测值比单因素模型的预测值更接近实钻值，灰岩的岩石可钻性预测精度平均达 90%，泥岩和砂岩的岩石可钻性预测精度平均达 80%。这说明利用可钻性综合预测模型预测地层可钻性是可行的，具有较高的精度。

## 5 结论及建议

1) 试验数据分析表明，岩性直接影响岩石的可

钻性级值。

2) 对于试验测试的岩心，灰岩和泥岩的可钻性与声波时差和密度具有很好的规律性，而砂岩的可钻性与声波时差和泥质含量具有较好的规律性。

3) 砂岩的结构成分复杂，应进一步研究各因素对其可钻性的影响规律，提高其可钻性级值的预测精度。

## 参 考 文 献

- [1] 邹德永, 陈永红. 利用声波时差资料确定岩石可钻性的研究 [J]. 石油钻采工艺, 1996, 18 (6): 27-30.
- [2] 赵军, 蔡亚西, 林元华. 声波测井资料在岩石可钻性及钻头选型中的应用 [J]. 测井技术, 2001, 25 (4): 305-307.
- [3] 葛洪魁, 林英松, 张卫东, 等. 钻井地层评价技术研究进展 [J]. 石油钻探技术, 2003, 31 (5): 20-23.
- [4] 王克雄, 魏凤奇. 测井资料在地层抗钻特性参数预测中的应用研究 [J]. 石油钻探技术, 2003, 31 (5): 61-62.
- [5] 梁彩芳. 测井及地震资料在钻井工程中的应用 [J]. 石油钻探技术, 2003, 31 (3): 26-28.
- [6] 路保平, 张传进, 鲍洪志. 利用多测井参数求取岩石可钻性 [J]. 石油钻探技术, 1998, 26 (3): 4-6.
- [7] 卢春阳, 陈济峰, 杨海滨, 等. 海南福山凹陷地层可钻性及钻头选型 [J]. 石油钻探技术, 2002, 30 (1): 10-12.
- [8] 尹宏锦. 实用岩石可钻性 [M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1989.

[审稿 葛洪魁]

## Predicting Rock Drillability by Well Logging: An Experimental Research

Liang Qiming<sup>1</sup> Zou Deyong<sup>1</sup> Zhang Huawei<sup>1</sup> Li Xueqing<sup>2</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Production Management Department, Dianqiangui Petroleum Exploration Bureau, Kunming, Yunnan, 650021, China)

**Abstract:** Rock drillability is significant for selecting proper bit and improving drilling efficiency, and can be properly predicted by well logging information. Through lab tests and theoretical researches into effects of lithology, density, and silt content on rock drillability a novel comprehensive prediction model is established based on available relations between drillability and interval transmit time and factors such as varied lithology, density, and silt-content. The accuracy of the model is validated and can meet the requirements of engineering applications.

**Key words:** rock drillability; sonic logging; logging data; mathematical model; lab test

## 青海油田乌北 3-3 井喜获高产工业油流

乌北 3-3 井位于乌南油田乌 5 断块西北方向较低部位，目的是进一步了解乌 5 断块西北方向地层的含油性，完钻井深 1900m，电测资料解释出油层 4 层（厚 12.5m），差油层 2 层（厚 5.3m），油水同层 1 层（厚 1.9m）。计划试油 5 个层组，在试第一个层组时，用  $\phi 4$ mm 油嘴求产，日产油 33m<sup>3</sup>。该井获高产工业油流，为该区域的进一步勘探开发创造了条件，也为拓宽该油田的勘探开发提供了借鉴，并为该油田难采储量的动用指明了方向。