

# 蒙特卡罗方法在地质建模中的应用

武 骞\*, 韩继勇

(陕西延长石油<集团>有限责任公司研究院 陕西 西安 710065)

**摘 要:**一个简单的垂向交互的岩性序列,通常可以被看成是沉积环境的一部分,可以对其建立相应的模型并用计算机实现模拟。“蒙特卡罗方法”可被应用于地质建模,只要这种需要解决的地质问题涉及到概率分布和概率计算。应用蒙特卡罗方法建立蒙特卡罗岩性模型系统,并利用这样一个模型系统实现对具有两种岩性的垂向交互层的模拟,并给出特定输入参数的岩性模型的输出结果和计算结果。

**关键词:**蒙特卡罗方法;伪随机数;地质建模

**中图分类号:**P539 **文献标识码:**B **文章编号:**1004—5716(2012)07—0051—06

## 1 蒙特卡罗方法

蒙特卡罗方法是一种随机抽样求取统计平均的方法。其基本思想是:在求解数学、地质等问题时,先建立一个概率模型或随机过程,使它的参数等于问题的解,然后通过对模型进行抽样试验来计算所求参数的统计特征,求得近似解。它包括以下步骤:

(1)建立概率模型。对于本身不是随机性质的确定性问题,要用蒙特卡罗方法求解,就必须事先构造一个人为的概率过程。对于研究交互层岩性分布这样一个具有随机性质问题,主要是正确的模拟这个概率过程。

(2)产生抽样随机数。有了明确的概率过程后,为实现过程的数字模拟,就必须从已知概率分布得到随机数的抽样。这就涉及到从已知分布律函数  $f(x)$  实现抽样。由于我们研究的是具有两种岩性的交互地层,本质上可将其看作是一种奇偶判断的问题,随机数是具有这种奇偶判断功能的随机变量。

(3)计算待求解。最后用随机数对已知分布律的随机参数进行抽样,计算待求解。在本文研究中,待求解指的是:具有两种岩性在交互层分布状况的数值表示。

## 2 两种岩性地层模型

在沿层状介质垂直方向的地层剖面上,岩性是一个随机变量,岩层厚度也是一个随机变量。为了研究岩性与岩层的分布状况和分布规律,我们使用计算机程序模拟这样的一个沉积环境:一个假定的具有两种岩性的水平层状介质模型结合了许多假设的初始数据。改变任何一个初始数据,都会生成一个新的岩性模型。任何一

个交互层岩性模型都包括若干个岩性序列,每一个岩性序列都开始于均质的上覆介质,终止于均质的底层空间。在上覆介质和底层之间是两种岩性的交互部分,是我们研究的蒙特卡罗岩性序列。具有两种岩性的地层模型如图 1 所示。

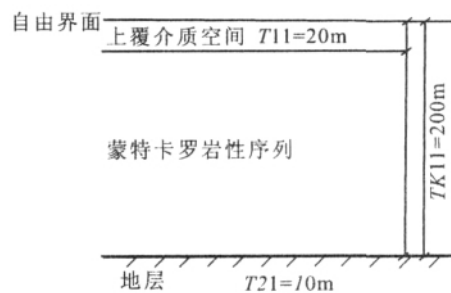


图 1 具有两种岩性的地层模型图

模型上覆介质空间的厚度  $T11$  为 20m;上覆介质和交互层的总厚度  $TK11$  为 200m,其中,蒙特卡罗岩性序列的厚度为 180m;底层空间的厚度  $T21$  为 10m;自由界面可以理解为地面。交互层是我们研究的重点,两种不同岩性如何进行交互,各自的厚度是多少,需要使用蒙特卡罗方法进行研究和探讨。由于地层岩性的分布状况是不可预知的,所以,对它进行模拟时,就应该在确定岩性成分的前提下,允许各种分布状况的发生。

图 2 以厚度为 40m 的砂、泥岩交互层为例,给出了几种砂、泥岩在垂向上分布与变化的情况。从图 2 可看出:砂、泥岩如何交互,以及砂、泥岩各自的厚度完全是

\* 收稿日期:2011-11-05 修回日期:2011-12-07

第一作者简介:武骞(1978-),男(汉族),陕西咸阳人,助理工程师,现从事石油钻井技术工作。

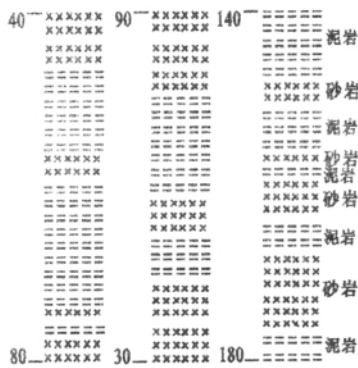


图2 砂、泥岩交互层分布图例

随机的。但这种随机的分布是可用计算机进行模拟的。图2只给出3种砂、泥岩随机交互的情形,实际上,通过计算机会产生大量的地层模型。对计算机生成的模型的研究而言,会涉及到验证和优选的问题。就目前而言,可以将地层模型与通过测井资料或地震反演得到的结果进行对比。

### 3 伪随机数算法

为了产生随机数,有人曾利用各种方法将随机数制表。但是制表本身容量有限,放到计算机上要消耗掉大量的存储空间,而且不能重复使用,因而不适合大规模实验研究。鉴于此,人们尝试使用数学方法来产生伪随机数,它可以用初始种子值控制后续整个随机数序列,也就是说相同的种子值可以产生相同的随机数序列,对于交互层分布状况的模拟,这具有优势。其基本思想是利用一种递推公式:

$$\zeta_{n+k} = T(\zeta_n, \zeta_{n+1}, \dots, \zeta_{n+k-1})$$

对于给定的初始值  $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \dots, \zeta_k$ , 根据关系  $T$ , 可以逐个推导  $\zeta_{n+k}, n=1, 2, \dots$ 。实际中,我们经常用到的是  $K=1$  的情况,这是一种单步递推的方式:

$$\zeta_{n+1} = T(\zeta_n)$$

对于给定的初始值  $\zeta_1$ , 根据关系  $T$ , 可以逐个推导  $\zeta_2, \zeta_3, \zeta_4, \dots$ 。下面,我们就使用这种单步的方式去推导伪随机数。我们给出如下的推导公式:

$$K_{n+1,1} = (M_{n4} + \text{INT}((M_{n3} + \text{INT}((M_{n2} + \text{INT}(M_{n1}/100))/100))/100)) - 100 \times \text{INT}((M_{n4} + \text{INT}((M_{n3} + \text{INT}((M_{n2} + \text{INT}(M_{n1}/100))/100))/100))/100))$$

$$K_{n+1,2} = (M_{n3} + \text{INT}((M_{n2} + \text{INT}(M_{n1}/100))/100)) - 100 \times \text{INT}((M_{n3} + \text{INT}((M_{n2} + \text{INT}(M_{n1}/100))/100))/100)$$

$$K_{n+1,3} = (M_{n2} + \text{INT}(M_{n1}/100)) - 100 \times \text{INT}((M_{n2} + \text{INT}(M_{n1}/100))/100)$$

$$K_{n+1,4} = M_{n1} - 100 \times \text{INT}(M_{n1}/100)$$

$$\text{RAND} = K_{n+1,1} \times 10^{-1} + K_{n+1,2} \times 10^{-3}$$

其中:  $M_{n1} = 11 \times K_{n4}; M_{n2} = 11 \times K_{n3}; M_{n3} = 11 \times K_{n2} + K_{n4}; M_{n4} = 11 \times K_{n1} + K_{n3}; \text{INT}$  采取向下取整的方式。

我们首先设定8位初始种子值  $K_{01} K_{02} K_{03} K_{04}$ , 通过以上公式的一步递推就可以产生一个新8位伪随机数序列  $K_{11} K_{12} K_{13} K_{14}$  和一个介于0~10之间的伪随机数  $\text{RAND}_1$ , 如果再进行一步递推, 那么  $K_{11} K_{12} K_{13} K_{14}$  将作为输入, 产生另一个8位伪随机数序列  $K_{21} K_{22} K_{23} K_{24}$  和另一个介于0~10之间的伪随机数  $\text{RAND}_2$ 。每一次递推产生的  $\text{RAND}$  值将作为我们进行奇偶判断的依据, 映射于本文研究内容, 也就是说, 它将成为确定岩性状态的依据。

我们开发的地质模型系统采用 FORTRAN 作为开发工具, FORTRAN 语言规定: 凡是以 I、J、K、L、M、N 这6个字母之一开头的所有变量名, 其变量类型自动设为向下整形, 即隐含整形<sup>[2]</sup>。这一点, 为后续算法中进行取整运算提供了便利。

以下是该算法的实现, 假定初始种子为 12345678, 通过一次调用就可以产生一个新的伪随机数序列 92582458 和一个介于0~10之间的伪随机数 9.258。新的8位伪随机数序列 92582458 将作为下一次调用的输入值, 通过向下取整运算后, 9.258 的整数将用于进行奇偶判断, 以此来判定岩性。在蒙特卡罗模型的实现中, 我们用奇数代表泥岩, 偶数代表砂岩。依据这样的准则, 伪随机数 9.258 对应的将是一个泥岩单元, 也就是说, 初始种子值为 12345678 对应的第一个蒙特卡罗岩性序列的第一个地震单元是泥岩。以下为伪随机数生成算法:

```
SUBROUTINE RANDOM (K1,      //假设 K1=12, K2=34,
K2, K3, K4, RAND)          K3=56, K4=78
M1=11×K4                    //M1=858
M1=11×K4                    //M1=858
M2=11×K3                    //M2=616
M3=11×K2+K4                //M3=452
M4=11×K1+K3                //M4=188
J=M1/100                    //J=8
K4=M1-100×J                //K4=58
M2=M2+J                    //M2=624
J=M2/100                    //J=6
K3=M2-100×J                //K3=24
M3=M3+J                    //M3=458
J=M3/100                    //J=4
K2=M3-100×J                //K2=58
```

```
M4=M4+J //M4=192
J=M4/100 //J=1
K1=M4-100*J //K1=92
X1=K1 //X1=92
X2=K2 //X2=58
RAND=(X1*1.E-2+ //RAND=9.258
X2*1.E-4)*10.
RETURN
```

K1、K2、K3、K4 是在输入子程序 INPUT1 中进行的定义的。由于伪随机数序列本身具有周期性,而周期的长短是由初始种子值的长度来决定,在伪随机数序列周期内,伪随机数是相互独立、不会出现重复的。也就是说,在伪随机数序列周期内,一个初始种子严格地对应着一个伪随机数序列。

如果将伪随机数序列映射到我们所研究的地层序列上,那么可认为:程序所生成的每一个 8 位的伪随机数序列都对应着一个伪随机数,每一个伪随机数都对应着交互层的一个岩性单元,而岩性序列模型是由岩性单元组成的。也就是说:每一个初始种子都对应着若干个地层岩性序列。本文中采用 8 位初始种子值,能够保证伪随机数序列具有足够长的周期。

4 输入输出文件

表 2 给出的速度值、密度值以及各种岩性占总体的比例来自现场数据,岩性速度值和岩性密度值通过测井获得,它将作为蒙特卡罗模型的初始输入参数。

表 2 不同岩性的速度、密度以及单层厚度					
岩性序列组成	速度值 (m/s)	密度值 (g/cm³)	地震单元厚度 (m)	岩层厚度 (m)	占交互层的比例 (%)
上覆介质	1400	2.40	4.20	20	—
砂岩岩层	2150	2.05	6.45	—	30~50
泥岩岩层	2000	1.95	6.00	—	50~70

上覆介质和底层空间可当做边界条件。其中,岩性单元厚度是依据采样间隔 6ms 计算得到的。本文最后给出的蒙特卡罗模型“A”的第一个岩性序列的输出结果,是依据该表的参数计算得到的。

4.1 输入模块的实现

表 3 给出了输入子程序 IUPUT1 的初始输入参数项、以及变量名称。输入参数项代表输入参数的物理意义,变量名称是初始输入参数的符号表示。通过变量对初始输入参数值的传递,可以实现对输出结果的控制,即不同是输入参数值对应不同的蒙

特卡罗模型。

表 3 输入子程序 IUPUT1 的变量集合			
初始参数项	变量名称	初始参数项	变量名称
蒙特卡罗模型种类	ANAM3	8 位的初始输入种子值	K11K12 K13K14
岩性序列的数量	NM1	顶层与交互层的总厚度	TTK1
砂岩的速度	VST1	泥岩层速度	VSH1
砂岩的密度	DST1	泥岩层密度	DSH1
上覆介质厚度	T11	底层空间厚度	T21
上覆介质速度	V11	底层空间速度	V21
上覆介质密度	D11	底层空间密度	D21
子波采样间隔	DELT1	程序标识符号	SIGN1

通过对变量的赋值可以实现对系统的初始化操作,通过初始输入参数的定义,确定了岩性模型的输出结果。

4.2 模型参数的输出

参数输出部分主要用于对所输出的蒙特卡罗模型进行注释和说明。运行地质模型系统后,系统所生成的地层模型的输出结果和运算结果会被自动写入一个“.DAT”文件中,同时文件的名称会自动被改变。

5 蒙特卡罗模型的建立

下面依据输入子程序 INPUT1 所定义的初始输入参数,给出了蒙特卡罗模型的一个岩性序列的输出结果。

5.1 蒙特卡罗模型的实现

使用蒙特卡罗方法研究垂向岩性分布状况,主要通过建立相应的蒙特卡罗模型来实现。图 3 给出了具体的实现流程:系统调用计算子程序 ABCD 来实现蒙特卡罗模型岩性状态的判断和厚度的计算。通过图 3 可看出 ABCD 的执行过程:当 ABCD 被触发之后,首先调用输入子程序 INPUT1 和伪随机数生成子程序 RANDOM,然后,根据 INPUT1 中设定的初始值进行计算。最后进行输出。从图 3 可看出:建立模型主要涉及 3 个功能模块:

(1)奇偶判断。奇偶判断是对所产生伪随机数的整数部分的奇偶性进行判断,以此来决定转移岩性的状态,即下一个地震单元是砂岩还是泥岩。以下为奇偶判断算法:

```
CALL RANDOM(K1,K2,K3,K4,RAND)
RANDM=RAND //产生随机数
LAYER=RANDM
FRNDM=LAYER //取整
GRNDM=FRNDM/2
```

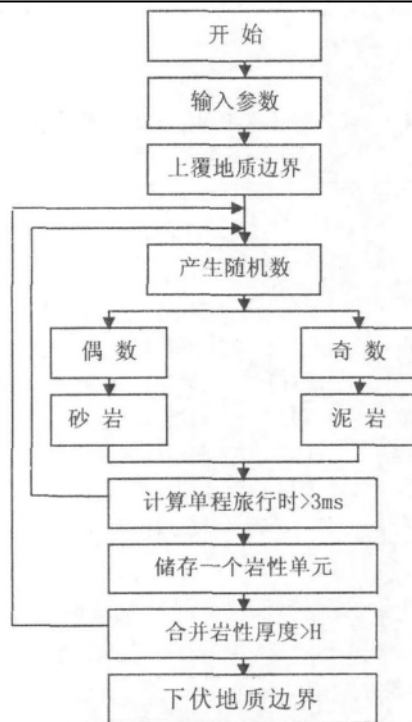


图3 蒙特卡罗模型的实现过程

IS=GRNDM

IS=IS\*2                      \\取整

IF(LAYER-IS) 70,40,70 \\判断岩性

它首先通过调用伪随机数生成子程序,生成一个介于 0~10 之间的伪随机数,然后,对它的整数部分进行奇偶判断。判断过程利用了程序语言向下取整的性质。

(2)地震单元厚度计算。地震单元厚度是根据相应的采样时间和岩性速度计算出的。对于交互层的任何一种岩层厚度来说,都有相应的垂直双程旅行时间与之相对应,该时间在数值上等于地震波的采样间隔。同样,对于每一种岩性的采样间隔,将会有有一个相应的地震单元厚度与之相对应。以下为计算地震单元厚度:

VST1=VST\*0.003           \\砂岩地震单元的厚度  
.....

VSH1=VSH\*0.003           \\泥岩地震单元的厚度

可以看出:地震单元厚度值是垂直单程旅行时间与相应岩性速度值的乘积。而垂直单程旅行时间是垂直双程旅行时间的一半,它在数值上等于采样间隔的一半。

(3)岩性合并。岩性合并是将相同的岩性单元划分为一个层位。正确的岩性合并能够增加模型对地层本体的逼近程度。图 4 展示了其基本原理。

根据种子值所生成的第一个伪随机数,首先被用于进行奇偶判断,当岩性状态确定之后,该伪随机数被用于计算蒙特卡罗序列第一层的厚度。首先,经程序的

岩性	每层包含的地震单元	地震单元	反射系数
砂岩		1 XXXXXXXX	0
		2 XXXXXXXX	0
		3 XXXXXXXX	0
泥岩	2	4 XXXXXXXX	Y
		5 XXXXXXXX	0
砂岩	1	6 XXXXXXXX	Y
泥岩	2	7 XXXXXXXX	Y
		8 XXXXXXXX	0

XXXXXX 砂岩  
XXXXXX 泥岩

图4 岩性、地震单元和反射系数之间的关系

判定,如果伪随机数大于或者等于单程旅行时间,也就是说,它如果满足地震单元的约束条件,那么,就计算该层所包括地震单元数,紧接着输出每一个地震单元的相应值。然后,重新调用伪随机数生成算法 RANDOM,产生一个新的伪随机数,重复上面的计算过程。如果本次生成的岩性状态与上一个地震单元的岩性状态相同,那么,进行岩性合并,否则将本次所生成的岩性划为另一个层。然而,如果所生成的伪随机数不满足地震单元的约束条件,那么这个伪随机数被抛弃,它所代表的岩性状态同样被抛弃。然后,继续重复上面的判断。直到地震单元的累计厚度大于或者等于 TTK1 为止。

如果得到的连续的几个伪随机数的整数部分都是偶数,每一个偶数都大于或者等于单程旅行时间,即满足地震单元的约束条件,那么就可以将其合并,形成一个较厚的砂岩地层。也就是说,既然各个地震单元的声波阻抗是一样的,那么,在它们的交界面处就不会有反射发生,也就可以认为这个交界面是不存在的。以下为岩性合并的算法实现:

TT=(RANDM/VST\*1000.)/3.0

NS=TT

ITNL=ITNL+NS           \\顶层与砂岩层数之和

ANS=NS                 \\该层包括的砂岩单元数

NS 为伪随机数的值对应的砂岩地震单元数,如果为 0,则抛弃;如果为 1,则输出一个砂岩单元;如果 NS 为 2,则输出两个砂岩单元;……。以上分析可看出:系统对岩性的判断结果依靠所生成的伪随机数。每一个伪随机数首先用于岩性判断,其次用于单程旅行时间的检测。这个过程不断重复,直到累积厚度达到 TTK1 为止,便建立起了蒙特卡罗模型。

## 5.2 蒙特卡罗模型的输出

输入子程序 INPUT1 中的输入值是可以随时被改变。通过改变任何一个输入值,可以生成不同的蒙特卡罗模型,不同模型对应不同的岩性输出结果。以下给出了蒙特卡罗模型 A 的第一个岩性序列(共 400 个岩性

序列),它是根据前面定义的输入参数得到的(第 11~ 30 个地震单元省略):

```
MONTE CARLO MODEL                                A
NUMBER OF COLUMNS REQUIRED                        400
TOTAL THICKNESS OF MODEL                         200.0000
STARTING RANDOM NUMBER IS                        12345678

                                VELOCITY    DENSITY    THICKNESS
TOP BUFFER                        1400.0000    2.4000    20.0000
SHAL                            2000.0000    1.9500
LOWER BUFFER                    2400.0000    2.2000    10.0000
SAND                            2150.0000    2.0500

SAMPLING INTERVAL MSEC  6.0
EXIT FROM SUBROUTINE INPUT1
MODEL NUMBER = 1
```

UNITS	RANDOM	VELOCITY	DENSITY	FTIK	RC	ASYMB
01	.00	1400.00	2.40	4.20	1.00	0.
02	.00	1400.00	2.40	8.40	.00	0.
03	.00	1400.00	2.40	12.60	.00	0.
04	.00	1400.00	2.40	16.80	.00	0.
05	.00	1400.00	2.40	21.00	.00	0.
06	9.26	2000.00	1.95	27.00	.07	1.
07	9.26	2000.00	1.95	33.00	.00	1.
08	4.30	2150.00	2.05	39.45	.06	-1.
09	4.32	2150.00	2.05	45.90	.00	-1.
10	4.98	2150.00	2.05	52.35	.00	-1.
.....						
31	9.43	2000.00	1.95	181.50	-.06	1.
32	9.43	2000.00	1.95	187.50	.00	1.
33	9.58	2000.00	1.95	193.50	.00	1.
34	9.58	2000.00	1.95	199.50	.00	1.
35	9.34	2000.00	1.95	205.50	.00	1.
36	9.34	2000.00	1.95	211.50	.00	1.
37	.00	2400.00	2.20	218.70	.00	0.

```
SAND  CONTENT=33.9%    64.5M
SHAL  CONTENT=66.1%    126.0M
SAND;SHAL                RATIO=.512
LAST RANDOM NUMBER IS : 93383978
EXIT FROM SUBROUTINE     ABCD
```

以上输出结果由多个数据列组成,包括:地震单元、伪随机数、速度、密度、累积厚度、反射系数值、初始脉冲响应。在每一个岩性序列后面,给出了砂岩和泥岩各自的百分比、砂岩和泥岩之间的比例关系、以及该岩性序列所对应的最后一个伪随机数序列。从输出可看出:第一个岩性序列对应有 37 个伪随机数序列。12345678 是第一个岩性序列的初始种子,第一个岩性序列的最后

一个伪随机数序列是 93383978,该伪随机数序列将作为计算第二个岩性序列的初始种子……依次类推。  
在交互层部分,所有的伪随机数都大于 3,这是因为我们所设定的采样间隔是 6ms,所以交互层地震单元的约束条件是垂直单程旅行时间大于或等于 3ms。而上覆介质和底层空间部分,是不受地震单元约束条件限  
(下转第 59 页)

### 3.1.2 腐蚀环(裸环、包环)+WJF-10缓蚀剂的现场试验

2011年10月7日2时在40767JS队承钻的联7-6井第二次下入203#(裸环)和303#(包环)试验腐蚀环,井深2403.6m;腐蚀环放置与第一次相同,8时下钻到底,加入WJF-10缓蚀剂1000kg。入井后使用216PDC钻头,钻井液密度1.20,粘度51;钻压60,泵压15,排量32。2011年10月17日13时起出,井深3040m。累计入井245h。

腐蚀环取出后按SY/T5390-91标准的要求和步骤进行清洗、分析,试验日期:2011-10-07,试验井:联7-6,腐蚀环编号:203、303,腐蚀环材质:G105,试验井段:2403.6~3040m,腐蚀环总表面积:85.9cm<sup>2</sup>、35.3cm<sup>2</sup>,试验时间:245h,腐蚀环试前质量:107.30g、103.42g,钻井液性能:密度1.20,粘度51,腐蚀环试后质量:107.12g、103.37g,腐蚀环在钻杆内位置:加重钻杆上第一、第二根钻杆的内螺纹水眼内,腐蚀速率:203#:0.75kg/(m<sup>2</sup>·a);303#:0.51kg/(m<sup>2</sup>·a),评级意见:良好。

### 3.2 腐蚀环现场实验WJF-10缓蚀剂缓蚀率

按SY/T5390-91标准给出的平均腐蚀速率公式:

$$R=87.60(m-m_1)/At \quad (1)$$

式中: $R$ ——金属平均腐蚀速率,kg/(m<sup>2</sup>·a);

$m$ ——试验前的腐蚀环质量,mg;

$m_1$ ——试验后的腐蚀环质量,mg;

$A$ ——腐蚀环的总表面积,cm<sup>2</sup>

$t$ ——腐蚀环在钻杆内的总时间,h。

缓蚀效率(%):

$$\eta=(R-R_{\text{缓}})/R \quad (2)$$

裸环 201#/203#:  $\eta=(6.33-0.75)/6.33=88.15\%$

包环 301#/303#:  $\eta=(3.96-0.51)/3.96=87.12\%$

通过联7-6井的腐蚀环实验,表明WJF-10缓蚀剂(添加0.6%以上)缓蚀率均超过85%。

### 4 结论

(1)G105钻杆材料在现有水基钻井液中具有较强的自腐蚀倾向,腐蚀电位 $E_{\text{自}}=-0.661\text{V}$ ,腐蚀电流密度 $I_{\text{自}}=1.340\times 10^{-6}\text{A/cm}^2$ 。 $\text{Cl}^-$ 对腐蚀的影响最大。

(2)G105钢的金相微结构为索氏体组织,具有良好的耐疲劳性能。钻杆材料的“刺漏”主要是由涂层局部破损后引起的自催化孔蚀过程所致。

(3)通过筛选和优选的缓蚀剂主要成分、起主要作用的是钼酸钠。考虑到成本因素,使用该性钼酸钠配方的WJF-10缓蚀剂,该缓蚀剂成本较低,用量为钻井液总量0.6%,能取得较为理想的缓蚀效果。

(4)现场试验直观、清楚地表明,研究筛选的缓蚀剂WJF-10,缓蚀效果显著,缓蚀率超过85%。有推广应用的价值和前景。

(上接第50页)

户满意,同时也会给我们带来更大的经济效益,相信在今后工作中不断总结经验,同时加深理论学习,使理论与实践相结合,会使绳索取芯金刚石钻头的寿命更长,时效更快。

参考文献:

- [1] 阮海龙,等. 针对复杂地层金刚石钻头的改进与应用[J]. 探矿工程,2010,37(1):67-69.
- [2] 贾美玲,等. 深孔钻探金刚石钻头技术研究[J]. 探矿工程,2010,37(12):71-73.
- [3] 沈立娜,阮海龙. 国内外金刚石钻头的部分技术进展[J]. 探矿工程,2011,38(5):78-80.

(上接第55页)

制的。通过对初始输入参数的计算得到蒙特卡罗岩性模型,并以此来研究岩性的分布状况,是我们研究的目标。对于正演研究来说,它是研究地震模型的基础。

### 6 小结

蒙特卡罗方法是一种(0,1)分布的方法,可用于奇偶判断,所以对具有两种岩性的地层模型研究是有效的。利用蒙特卡罗方法,通过建立蒙特卡罗模型,实现了岩性分布状况的模拟。探讨了蒙特卡罗模型的实现

过程,并给出了实际模型的分布状况。

参考文献:

- [1] Neidell, N. S., Beard, J. H., Zenith Exploration Co. Inc. Seismic Visibility of Stratigraphic Objectives [J]. SPE 1985:14175-MS.
- [2] 谭浩强,田淑清. FORTRAN77 结构化程序设计[M]. 北京:高等教育出版社,1985:38-230.