

泥页岩的 X 射线衍射定向指数与理化性能 及井壁稳定的关系^①

沈守文¹ 沈明道¹ 梁大川¹ 张国钊²

1 (西南石油学院 四川南充 637001)

2 (承德石油高等专科学校 河北承德 067000)

提 要 首次提出了泥页岩 X 射线衍射定向指数的测定方法,探讨了定向指数与矿物成分、定向指数与泥页岩理化性能(密度、回收率、膨胀率、阳离子交换容量等)的关系。并在定向指数的基础上,提出了综合指数的概念,然后以定向指数和综合指数为主要依据,对坍塌地层泥页岩进行了分类。这对于钻井工程上研究井壁稳定的机理,预防井壁失稳,具有重要的理论意义和实用价值。

关键词 X 射线衍射 定向指数 理化性能 泥页岩分类 井壁稳定

第一作者简介 沈守文 男 38岁 副教授 博士生 矿物岩石学与石油地质学

1 前言

井壁稳定问题是钻井工程中经常遇到的一个十分复杂的难题。井壁的不稳定会延长钻井周期,影响井身质量、固井质量,妨碍测井及地质资料的准确取得,甚至导致油井报废,延误新油田的发现。

井壁不稳定问题,一般发生在泥页岩、盐岩、未胶结或弱胶结的砂岩及其它破碎性岩石的地层。但是常见的影响最严重的是泥页岩地层^[1]。导致泥页岩不稳定的原因,从诱发机理上可以分为两大类,即力学原因和物理化学原因。力学原因包括泥页岩塑性变形、硬脆性页岩沿滑动面(层理、节理、裂缝等)的滑动及钻井液密度不能平衡构造应力或泥页岩沉积压实过程中所形成的异常压力所引起的页岩破裂和剥落坍塌。物理化学原因是指钻井液与页岩地层发生物理化学作用引起水化膨胀和分散,强度下降,导致井壁不稳定。然而,作为内因,泥页岩本身的矿物组成、结构构造以及理化性能(密度、回收率、膨胀率、阳离子交换容量等)是至关重要的控制因素。因此,快速、准确、有效地测定泥页岩的成分、结构、理化性能,探讨它们的相互关系,对于研究井壁稳定的机理,防止井壁失稳,具有重要的理论意义和实用价值^[2]。但是,已往的研究多集中在泥页岩矿物成分、理化性能的分析方面,而对泥页岩的结构仅限于定性描述,并且对结构构造与理化性能的关系,与井壁

稳定的关系未作深入探讨。本文首次提出了测定泥页岩 X 射线衍射定向指数的方法,其目的在于定量地描述粘土矿物颗粒沿岩层面的定向排列程度,从而研究泥页岩的结构。进而探讨定向指数与矿物成分、理化性能、井壁稳定的关系,为钻井工程上预防井壁失稳提供一个新的有用的参数。

2 泥页岩 X 射线衍射定向指数的测定

泥页岩主要是由细小的粘土矿物组成的。由于粘土矿物多呈片状(其平面平行于晶体内部结构中的(001)面网),所以它们沿岩层面定向排列的程度,能反映泥页岩的结构。测定粘土矿物的定向程度,就是利用 X 射线衍射技术,分别测定泥页岩平行层面的切面上和垂直层面的切面上的粘土矿物(001)面网的衍射强度。具体测试方法如下。

2.1 样品制备

对于胶结致密的泥页岩,可用常规岩芯切制方法。将泥页岩岩芯切成 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 大小的立方体(稍小于此尺寸也可),然后分别用 400 目、600 目、800 目的磨料磨制光面。并把其中的一个平行于岩层面的平面记作 A 面,把两个垂直岩层面的平面分别记作 B 面和 C 面。若是胶结疏松的泥页岩,则在切磨岩样之前,先煮胶或涂上一层环氧树脂固结后,再进行切制。

^① 中国石油天然气总公司“八·五”重点科研课题部分研究成果
收稿日期: 1997- 01- 01 收修改稿日期: 1997- 04- 31

2.2 X射线衍射仪分析

将抛光的三个面先后放入铝框样品夹持器,铝框与样品之间的空隙用胶泥充填,并使样品抛光面与铝框处于同一平面上,然后在 X 射线衍射仪上分别对三个抛光面进行扫描。扫描角度 $3^{\circ} \sim 63^{\circ}$,扫描速度 $4^{\circ}/\text{分}$,步长 0.01,电压 35 kV,电流 30 mA

2.3 求积分强度

利用日本理学公司 X 射线衍射仪上自带的软件,分别测定三个抛光面 (A 面、B 面、C 面) 上各种粘土矿物 (001) 面网衍射总强度 I_{001} (即 2θ $3^{\circ} \sim 13^{\circ}$ 上的总积分强度) 以及 (060) 面网的衍射总强度 I_{060} (即 2θ $59^{\circ} \sim 63^{\circ}$ 上的总积分强度)。

2.4 计算定向指数

根据下列公式计算。

$$K^{11} = \frac{I_{001}(A)}{I_{060}(A)} \quad (1)$$

$$K^{\perp} = \frac{1}{2} \left(\frac{I_{001}(B)}{I_{060}(B)} + \frac{I_{001}(C)}{I_{060}(C)} \right) \quad (2)$$

$$OI = \frac{K^{11}}{K^{11} + K^{\perp}} \quad (3)$$

式中: $I_{001}(A)$ 代表 A 面上粘土矿物 (001) 面网的衍射总强度; $I_{060}(A)$ 代表 A 面上粘土矿物 (060) 面网的衍射总强度; $I_{001}(B)$ 代表 B 面上粘土矿物 (001) 面网的衍射总强度; $I_{060}(B)$ 代表 B 面上粘土矿物 (060) 面网的衍射总强度; $I_{001}(C)$ 代表 C 面上粘土矿物 (001) 面网的衍射总强度; $I_{060}(C)$ 代表 C 面上粘土矿物 (060) 面网的衍射总强度; K^{11} 为平行岩样层面的切面 (A 面) 上粘土矿物的定向系数; K^{\perp} 为垂直岩样层面的切面 (B 面和 C 面) 上粘土矿物的定向系数 (即 B 面定向系数和 C 面定向系数的平均值); OI 为样品的 X 射线衍射定向指数。定向指数 OI 的值在 0~1 之间变化。如果 $OI=1$, 由公式 (3) 知 $K^{\perp}=0$, 又由公式 (2) 推知 $I_{001}(B)=0$, 且 $I_{001}(C)=0$, 这表明在垂直岩层的切面上找不到平躺着的粘土矿物, 说明所有的粘土矿物都平行于岩层面平躺。因此 $OI=1$, 代表粘土矿物平行层面理想定向。如果 $OI=0$, 由公式 (3) 可以得知, $K^{11}=0$, 又由公式 (1) 可以推知, $I_{001}(A)=0$, 这表明在平行岩层的切面上, 找不到平躺着的粘土矿物, 说明所有的粘土矿物都垂直于层面而直立。因此, 如果 $OI=0$, 则代表粘土矿物垂直层面理想定向。如果 $OI=0.5$, 由公式 (3) 得知, $K^{11}=K^{\perp}$, 这说明粘土矿物平行层面定向与垂直

层面定向的概率相等, 也就是说, 粘土矿物没有显示出任何定向性。如果 OI 的值在 0.5~1 之间, 表明粘土矿物主要是平行岩层面排列, 其值越大, 越接近 1 时, 表明粘土矿物平行岩层面的定向性越好。如果 OI 值在 0~0.5 之间, 表明粘土矿物主要是垂直岩层面排列, 其值越小, 越接近零时, 则表明粘土矿物垂直岩层面定向排列越好而相对于平行岩层面的定向性越差。

3 定向指数与矿物成分、理化性能的关系

泥页岩的 X 射线衍射定向指数 (OI), 实际上是泥页岩结构的反映, 而岩石的结构与矿物成分有一定的关系。研究表明, 随着高岭石、伊利石、绿泥石含量的增加, 定向指数有增加的趋势 (图 1 2 3)。而随

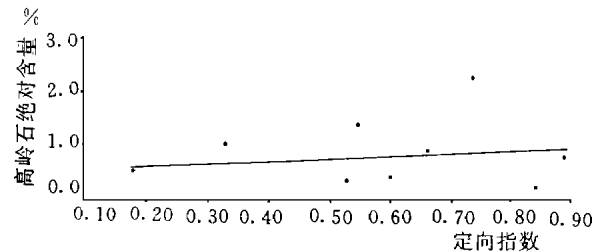


图 1 定向指数与高岭石绝对含量的关系

Fig. 1 Relationship between Orientation Index and content of kaolinite

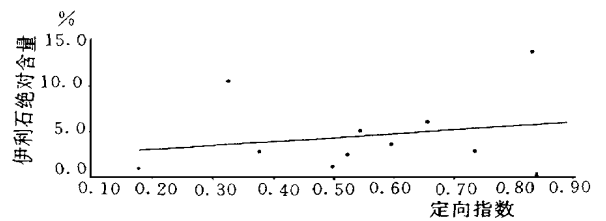


图 2 定向指数与伊利石绝对含量的关系

Fig. 2 Relationship between Orientation Index and content of illite

着蒙脱石、伊蒙混层、非晶质含量的增加, 定向指数有减小的趋势 (图 4 5)。这可能是由于高岭石、伊利石、绿泥石晶体较大, 多呈片状, 易于定向; 而蒙脱石、伊蒙混层晶体较小, 一般常呈弯曲鳞片状, 且不规则, 并且多呈絮状、蜂窝状, 以及非粘土矿物多呈球形颗粒状, 直接影响粘土晶片的定向排列, 使之不易定向的缘故。可见定向指数与粘土矿物的种类和

粒度有一定的关系。

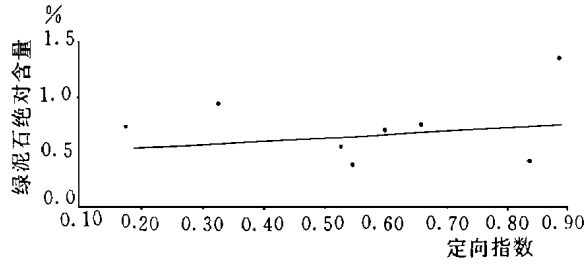


图 3 定向指数与绿泥石绝对含量的关系

Fig. 3 Relationship between Orientation Index and content of chlorite

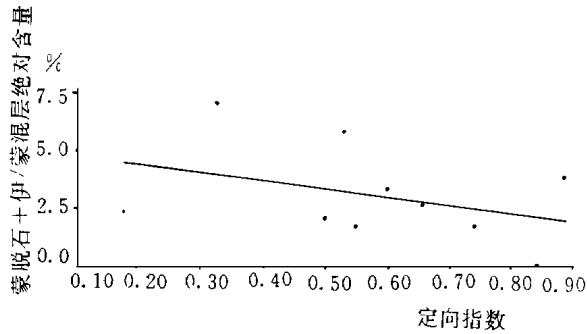


图 4 定向指数与蒙脱石+伊/蒙混层绝对含量的关系

Fig. 4 Relationship between Orientation Index and content of smectite and illite/smectite

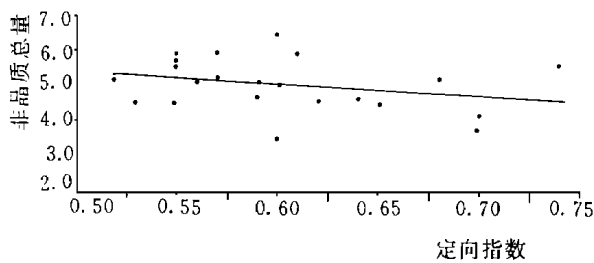


图 5 定向指数与非晶质总量的关系

Fig. 5 Relationship between Orientation Index and content of amorphous minerals

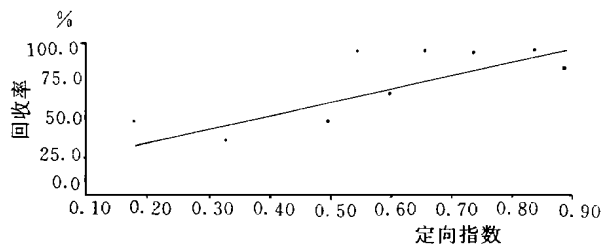


图 6 定向指数与回收率的关系 (样品 11- 20)

Fig. 6 Relationship between Orientation Index and recovery percent

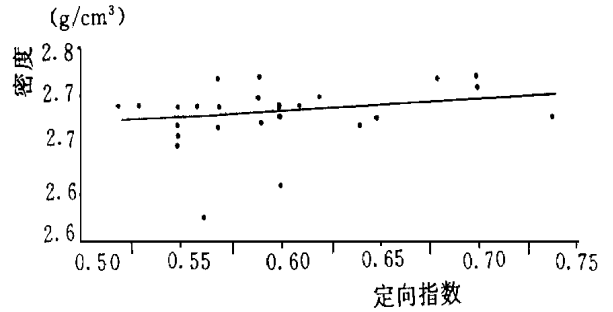


图 7 定向指数与密度的关系

Fig. 7 Relationship between Orientation Index and density

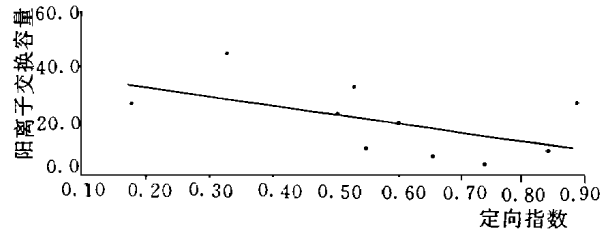


图 8 定向指数与阳离子交换容量的关系 (样品 11- 20)

Fig. 8 Relationship between Orientation Index and cation exchange capacity

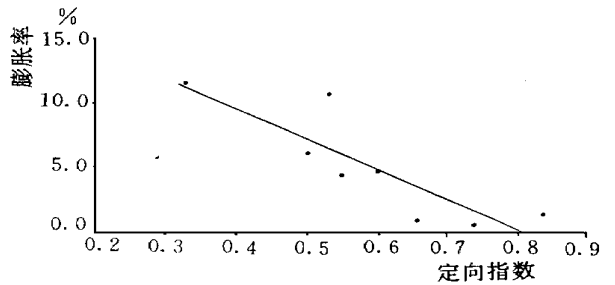


图 9 定向指数与膨胀率的关系

Fig. 9 Relationship between Orientation Index and expansion percent

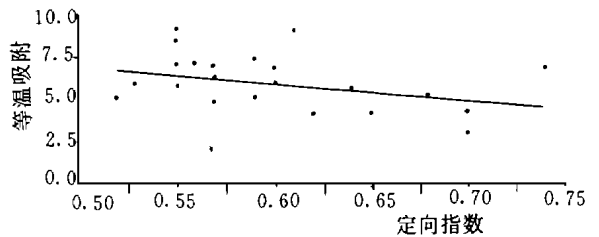


图 10 定向指数与等温吸附 (KH₂PO₄)的关系

Fig. 10 Relationship between Orientation Index and isothermal absorption (KH₂PO₄)

定向指数与理化性能的关系,则表现为随着定

向指数的增加,泥页岩的密度、回收率有增加的趋势 (图 6、7), 而阳离子交换容量、膨胀率、等温吸附则

有降低的趋势(图 8 9 10) 其原因在于,定向指数增大,表明泥页岩中的高岭石、伊利石、绿泥石等稳定组分增加,蒙脱石、伊蒙混层、非晶质等不稳定组分降低,同时泥页岩结构也变得致密,从而导致泥页岩密度增加,更不易分散,回收率增大,阳离子交换容量、膨胀率、等温吸附降低。换句话说,定向指数小,则易发生水化膨胀或分散型井壁失稳问题。定向指数大则井壁较稳定,但是在这种情况下,如果泥页岩发育大量微裂隙或构造应力集中,也可发生硬脆性页岩破裂和剥落型井壁失稳问题

在定向指数与理化性能关系图上可以看到,有些图的数据点,仍有些分散,说明理化性能并不取决于单一因素。但是定向指数与理化性能的关系,仍然显得比其他参数(例如矿物成分)与理化性能的关系要好一些(图表略)。因此,定向指数的提出对于钻井过程中井壁稳定的研究具有重要的理论和实际意义。

4 综合指数与理化性能的关系

由于泥页岩中的不稳定组分(主要是蒙脱石、伊蒙混层、非晶质等)以及结构因素(如定向指数)都与理化性能有一定关系。但单一因素的相关性都不是太好。为了系统地研究泥页岩组构与理化性能的关系,同时为泥页岩的分类提供依据,我们提出了综合指数的概念。所谓综合指数,实际上是把影响泥页岩理化性能的几个主要参数(指标)叠加起来,这样所得的和数,就是泥页岩组构的综合指数。我们提出三个综合指数,即:

$$\text{综合指数 I} = (\text{蒙脱石} + \text{伊蒙混层绝对含量}) + (1 - \text{定向指数})$$

$$\text{综合指数 II} = \text{非晶质总量} + (1 - \text{定向指数})$$

$$\text{综合指数 III} = (\text{蒙脱石} + \text{伊蒙混层绝对含量}) + \text{非晶质总量} + (1 - \text{定向指数})$$

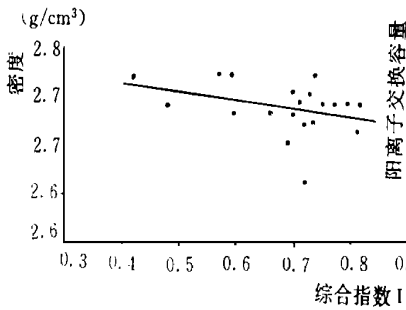


图 11 综合指数I 与密度的关系

Fig. 11 Relationship between comprehensive Index I and density

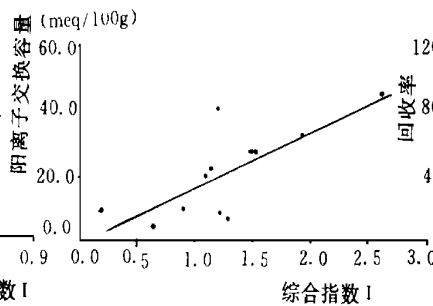


图 12 综合指数I 与阳离子交换容量的关系

Fig. 12 Relationship between comprehensive Index I and cation exchange capacity

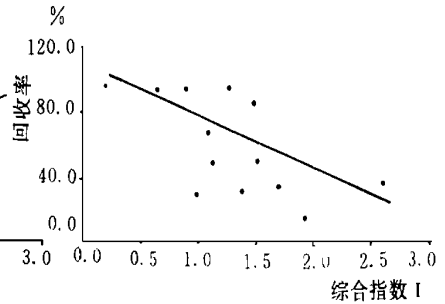


图 13 综合指数I 与回收率的关系

Fig. 13 Relationship between comprehensive Index I and recovery percent

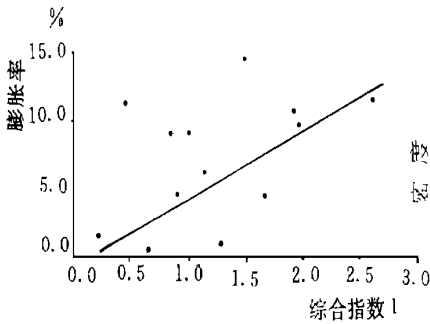


图 14 综合指数I 与膨胀率(16 h)的关系

Fig. 14 Relationship between comprehensive Index I and expansion percent

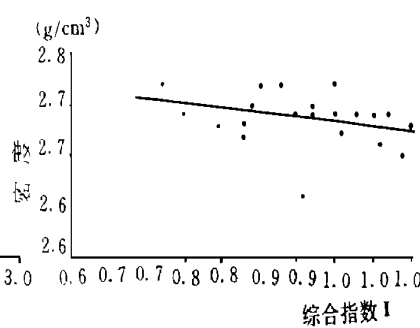


图 15 综合指数II 与密度的关系

Fig. 15 Relationship between comprehensive Index II and density

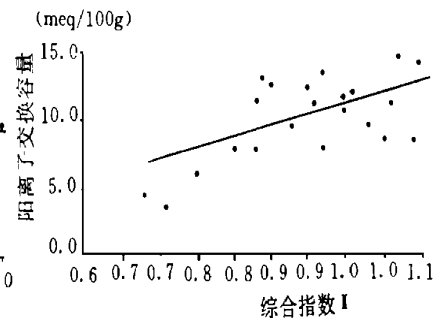


图 16 综合指数II 与阳离子交换容量的关系

Fig. 16 Relationship between comprehensive Index II and cation exchange capacity

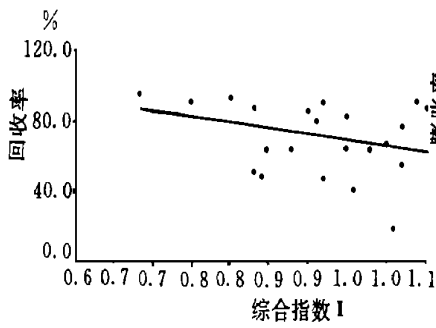


图 17 综合指数 II 与回收率的关系

Fig. 17 Relationship between comprehensive Index II and recovery percent

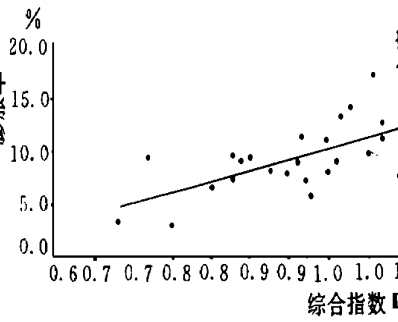


图 18 综合指数 II 与膨胀率的关系

Fig. 18 Relationship between comprehensive Index II and expansion percent

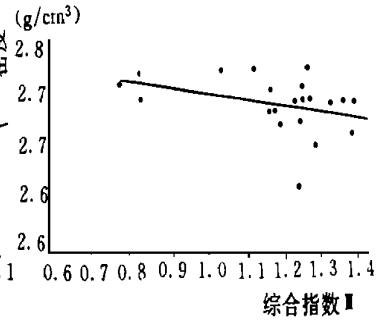


图 19 综合指数 III 与密度的关系

Fig. 19 Relationship between comprehensive Index III and density

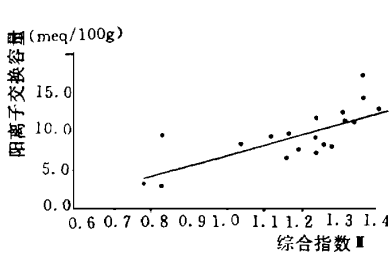


图 20 综合指数 III 与阳离子交换容量的关系

Fig. 20 Relationship between comprehensive Index III and cation exchange capacity

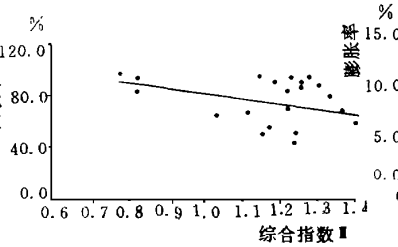


图 21 综合指数 III 与回收率的关系

Fig. 21 Relationship between comprehensive Index III and recovery percent

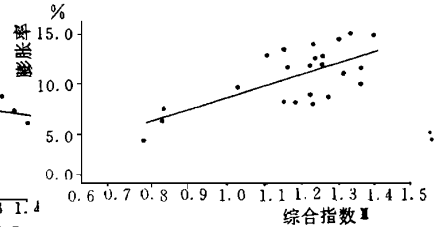


图 22 综合指数 III 与膨胀率的关系

Fig. 22 Relationship between comprehensive Index III and expansion percent

公式中 (1-定向指数) 的意思是把定向指数指示的意义反向。本来定向指数在 0~1 中变化,定向指数越小,井壁越不稳定。现在用了 (1-定向指数) 后,定向指数越小,则 (1-定向指数) 就越大,对井壁稳定越不利。这样综合指数 I 和 II 中所采用的两项参数,综合指数 III 中所采用的三项参数,都为有害参数。有害参数越大,则井壁越不稳定。这样利用它们的加和,有助于判断井壁的稳定性的,从图 11~ 图 22 可以看出综合指数与泥页岩理化性能的关系普遍比单一因素的关系好。在三个综合指数中,似乎 I、II 比 III 还好。在三个综合指数中,似乎 I、II 比 III 还好。这可能是由于综合指数 III 尽管考虑的因素多,但因素之间有相互干扰,相互作用的缘故。

5 坍塌地层泥页岩分类

关于坍塌地层泥页岩分类,国内外学者都进行

过探讨^[1]。所提出的分类方案有的强调粘土矿物的种类及含量,岩石强度、基质特性和水化分散程度;有的强调岩石的阳离子交换容量、含水量、粘土矿物类型与含量、岩石密度和水化分散特性;有的强调泥岩的比表面积;有的强调泥页岩膨胀性、分散性及其冲蚀程度;有的强调泥页岩的应力状态和结构构造特征,这些分类方案都不同程度地存在不足。我们通过对坍塌地层的大量样品分析,从泥页岩本身的矿物成分、结构出发,结合某些理化性能参数,提出了一个简单、实用、易于操作的分类方案(表 1)。分类依据是泥页岩的定向指数、综合指数以及粘土矿物的类型、阳离子交换容量,其中主要依据是定向指数和综合指数。这是因为,定向指数和综合指数与理化性能及井壁稳定的关系较好,加之定向指数和综合指数易于测试,并具有经济和快速的特点,因而此分类易于推广。

表 1 坍塌地层泥页岩分类表

Table 1 Classification of shales of easy collapsing formations

类别	综合指数			定向指数	粘土矿物类型	固结程度	阳离子交换容量 (meq/100g)	特征
	I	II	III					
I	> 0.9	> 1.0	> 1.4	< 0.5	蒙脱石、伊蒙混层	软	20~40	高度分散
II	0.7~0.9	0.8~1.0	1.2~1.4	0.5~0.7	伊蒙混层为主	较硬	10~20	较易分散
III	0.5~0.7	0.6~0.8	1.0~1.2	0.7~0.8	伊利石、伊蒙混层	硬	3~10	中等分散可剥落
IV	< 0.5	< 0.6	< 1.0	> 0.8	伊利石、高岭石、绿泥石	脆	0~3	有剥落趋势

事实上,从井壁稳定的表现特征来看,泥页岩可概分为两大类。一类(即分类表中的I、II类)易膨胀而引起缩径和拔活塞等井眼不稳定。产生这种井眼不稳定问题的泥页岩具有回收率低、造浆能力强、阳离子交换容量高等特点。钻井工作者常把这类泥页岩称为软泥岩,表现为岩块呈柔性变形。另一类是由裂缝引起的剥落掉块所造成的井眼不稳定。钻井工作者常把这类泥页岩称为硬脆性泥页岩。一般说来,对于软泥岩地层,解决井眼不稳定的办法是加入防膨剂,以防止膨胀性矿物的膨胀为主。对于硬脆性泥页岩地层,由于井眼不稳定问题多是由泥页岩裂缝和高压异常引起的,所以解决井眼不稳定问题,首先是应该使用正压差下钻井,防止异常高压带引起坍塌,其次是在钻井液中加入裂缝封堵剂,同时还加入适量的防膨剂。

6 结论

1)定向指数(OI)是泥页岩结构的反映,它不仅与泥页岩的粘土矿物类型有关,而且能与泥页岩的理化性能及井壁稳定建立起联系。具体表现为定向指数与泥页岩的密度、回收率呈正相关,而与阳离子

交换容量、膨胀率呈负相关。定向指数值越小,粘土晶片沿岩层面定向排列的程度越差,泥页岩的活性因素越大,井壁越不稳定。所以定向指数的提出对于井壁稳定的研究具有十分重要的实际意义。

2)综合指数综合地考虑了影响泥页岩理化性能的因素,克服了单一因素的不足,能较好地反映泥页岩的总体理化性能。三个综合指数(I、II、III)都是有害指数,数值越大,井壁越不稳定,这为量化井壁稳定性提供了依据。

3)以综合指数和定向指数为主要依据对易塌地层泥页岩进行分类,具有简单、实用、易于操作的特点,值得推广。

致谢:扈淑蓉、罗兴树、邹翔、姚峰等同志曾参加过本课题的研究工作,特致谢意。

参 考 文 献

- 徐同台. 国外不稳定泥页岩分类简述. 钻井液与完井液, 1989, (2): 32~34
- 沈守文. 粘土矿物与石油的钻采工程. 中国矿物岩石地球化学学会第五届年会论文集. 兰州: 兰州大学出版社, 1994. 60~61

A Study on Relationship Between Orientation Index of Shales by X-ray Diffraction and Physicochemical Properties and Well-bore Stability

Shen Shouwen¹ Shen Mingdao¹ Liang Dachuan¹ Zhang Guozhao²

¹ (Southwest Petroleum Institute, Nanchong, Sichuan 637001)

² (Chengde Petroleum School, Chengde, Hebei 067000)

Abstract

This paper gives out a method for the determination of Orientation Index of shales by X-ray diffrac-