

一种泥页岩脆裂性质表征方法及其地质意义

鲍云杰^{1,2}, 杨振恒^{1,2}, 杨琦^{1,2}, 陈红宇^{1,2}, 付小东^{1,2}, 王杰^{1,2}

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

2. 中国石油化工集团公司 油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214151)

摘要:提出了一种泥页岩脆裂性质的表征方法——脆裂指数法,介绍了脆裂指数的测定流程和步骤。这种方法操作简便、对样品的大小、外形无特殊要求,对于泥页岩样品测试具有普遍意义。实验数据表明,泥页岩脆裂指数与孔隙度、比表面积大小呈正相关关系。从测定流程、方法、实验数据以及文献分析来看,泥页岩脆裂指数具有表征孔隙发育程度及其内部结构,尤其是微孔隙、微裂隙的潜在应用价值。初步探讨了脆裂指数在表征泥页岩内部结构性质以及气体解吸行为研究等方面的应用前景。

关键词:脆裂性质;脆裂指数;比表面积;解吸;泥页岩;页岩气

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

One kind of brittle shale characterization method and its geological significance

Bao Yunjie^{1,2}, Yang Zhenheng^{1,2}, Yang Qi^{1,2}, Chen Hongyu^{1,2}, Fu Xiaodong^{1,2}, Wang Jie^{1,2}

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. SINOPEC Key Laboratory for Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

Abstract: The paper presents one kind of brittle shale characterization method; brittle index, and introduces the determination process and procedure for the index. This method is simple to operate, and has no special requirements for sample size and shape, hence has universal significance for shale sample test. Experimental data show that the brittle index is positively correlated to porosity and specific surface area. According to measurement process, method, experimental data and literature analysis, the brittle index can characterize the extent and internal structure of porosity, especially the potential application for micro pores and cracks. The prospects for the application of brittle index in the studies of shale internal structure and gas desorption are discussed preliminarily.

Key words: brittle nature; brittle index; specific surface area; desorption; shale; shale gas

泥页岩的脆裂是钻井和实验室测试工作中司空见惯的现象,在钻井取心过程中,泥页岩岩心出筒时经常发生破裂,在实验室钻取测试用岩心柱时,经常发生开裂现象,这些都是泥页岩脆裂性质的具体表现。由于泥页岩的脆裂性质与盖层封盖能力、内部结构以及页岩油气储集单元压裂改造效果等密切相关,因此,针对泥页岩的脆裂特性,研究一种描述泥页岩岩样脆裂性质的方法,探讨泥页岩的脆裂性质及其与其他物理性质的关系,具有一定的理论和实践意义。

1 泥页岩脆裂性质研究现状

脆性是指材料在外力作用下(如拉伸、冲击等)仅产生很小的变形即断裂破坏的性质。近年

来,油气地质领域对泥页岩的脆性等岩石力学参数越来越重视。在盖层评价方面,通过对泥页岩的脆性(韧性)等岩石力学参数研究,评价盖层对油气的封盖能力;在钻井工程方面,通过对泥页岩的脆性(韧性)等岩石力学参数研究,研究井壁稳定性等问题;在页岩油气勘探开发领域,由于泥页岩中气体以吸附气赋存方式为主,且具有微孔隙、微裂隙发育的特性,使得研究人员除了关注孔隙度、渗透率、厚度、地层压力、有机碳含量、有机质成熟度等参数之外,还特别重视脆性矿物含量的多少^[1]。一般认为,当脆性矿物(石英、长石、方解石等)含量达到较高的程度时,在地质历史演化过程中,容易产生微小的裂隙,有助于页岩气的吸附存储。同时,在泥页岩油气开采过程中,脆性矿物含量高有

利于压裂形成诱导裂缝,提高产量。Bowker 认为, Fortworth 盆地的 Barnett 页岩产出大量天然气的原因,在于页岩的脆性和增产措施,而脆性与矿物成分有关,石英含量达 45%^[2], Bunting 公开了相近的数据^[3]。因此,脆性矿物含量是众多研究人员公认的一项重要参数,泥页岩的脆性评价是当前页岩气研究中的一个重要基础问题^[4-5]。

当前,岩石力学研究成果众多,但对于岩石的脆性的定义和度量还没有统一的说法^[6],在许多场合用强度、泊松比、弹性模量、硬度等参数评价岩石的脆性。一般认为岩石的泊松比越小,弹性模量越高,反映岩石的弹性越小,脆性越强,越容易破裂^[5]。通常情况下,泊松比、弹性模量这 2 个参数测定时,需要取得外形规则的样品,有的尚需要对样品进行饱和和盐水等预处理^[7],这些方法满足了特定测试和研究工作的需要。但与泥页岩脆性评价的需求相比,存在一定的问题和不足。一是泥岩、页岩和泥页岩由于受成分、结构的影响,在进行圆柱加工过程中非常容易破裂。而从泊松比和弹性模量的测定过程来看,对样品的要求较高,必须是规则的圆柱状,这样就导致很多的泥页岩样品因无法取得岩心柱而不能做泊松比和弹性模量测试,不能满足研究工作的需要。二是对岩样进行饱和和盐水等前期处理时,花费时间较多,工作效率较低。

2 泥页岩脆裂性质测定原理与方法

2.1 脆裂性质测定原理

弹性、塑性和脆性是固态材料的基本属性。脆性作为固体材料的基本属性之一,其最基本的表现形式就是固态材料受到外力后发生碎裂,碎裂后表面积增加,粒径变小。固态材料碎裂的程度,在外力和操作条件基本一致的前提下,主要受其成分组成、内部结构等内在因素控制,即碎裂程度是这种材料成分组成和内部结构的反映。从这个角度考虑,碎裂前后表面积和粒径的变化,都能在一定程度上反映固态材料的脆裂性质。

在煤炭领域,特别是在煤和瓦斯突出研究与预报工作中,媒体抵抗外力的坚固性指标——坚固性系数(也称普氏坚固性系数或普氏系数)是一项重要参数,且有测定标准^[8]。标准中称这种坚固性系数测定方法为捣碎法,需要的仪器和工具有捣碎筒、计量筒、分样筛、小锤等。测定过程和方法是:在煤层取得 100 mm 左右的煤块,将煤块破碎成 20~30 mm 的碎块状,称取 50 g 左右的样品,共 5 份,将每一份样品放入捣碎筒中,以 2.4 kg 的落锤在 60 cm 的

高度落下夯捣样品,一般夯捣 3~5 次,样品捣碎后,将 5 份样品集中并以 0.5 mm 的分样筛筛样,将粒径在 0.5 mm 以下的筛出,放到量筒中测量体积(高度),用下式计算样品的坚固性系数(f):

$$f = 20 n/L \quad (1)$$

式中: f 为坚固性系数; n 为夯捣次数; L 为样品在量筒的高度。这种方法在煤和瓦斯突出研究与预报工作中得到了广泛应用。

2.2 泥页岩脆裂测定方法

前人研究结果表明,坚固性系数可以在一定程度上反映煤的强度以及裂隙的发育情况^[9-11]。但标准文献中称这种方法只适用于褐煤、烟煤、无烟煤的坚固性系数测定^[8],目前尚没有人系统考察这种方法是否适用于泥页岩。分析认为,这种方法一方面可以给泥页岩脆裂性质研究提供借鉴;另一方面,由于泥页岩在组成上与煤有一定差异,在研究的侧重点上也不尽相同,因此,现行的方法也存在一定的局限性。比如,泥页岩中的页岩由于页理发育,更容易破碎,取样最好用切割的方式;此外,粒径小于 0.5 mm 的颗粒混杂在一起,用测定体积(高度)的方法难免存在误差。主要分析粒径小于 0.5 mm 的颗粒能否较好地反映泥页岩的脆裂性质特征。为此,尝试性地建立了以下流程和方法:

(1) 采集样品,样品质量 15 g 左右,采集过程中,尽量一次成功,不要过多敲击,以便尽量保持岩样内部结构的原状;(2) 在恒温箱中烘干;(3) 将烘干的样品取出,自然冷却至室温,称取重量,记为 G , 单位 g;(4) 将样品放到样品盘的中心位置;(5) 用质量为 2 kg 的落锤敲击样品,并重复 3 次;(6) 取出样品盘,收集样品;(7) 在收集的样品中,用分样筛选出粒径小于 0.45 mm 的样品,并称重,记为 G_1 , 单位 g;(8) 计算: $C = G_1/G$ 。

本文侧重于泥页岩的脆裂性质研究,与煤炭领域的坚固性系数(普氏坚固性系数)的获取方法和过程相比,既相似又有一定差异。基于参数获取过程主要表现为样品碎裂,故将 C 称为泥页岩脆裂指数。 C 的计算值理论上在 0~1 范围内, C 值越大,则表示泥页岩岩样越容易破碎,脆裂性质越强。 C 值的大小主要受两方面因素的影响:一方面是工作条件,包括落锤的质量、落锤的行程、冲击次数、样品盘的材质等;另一方面是岩样本身的特性,包括矿物组成、孔隙、微裂隙发育情况等。如果工作条件一定,那么 C 值就在很大程度上反映了泥页岩岩样脆裂性质的强弱。

3 脆裂性质实验研究及其地质意义

3.1 实验

选取河页 1 井、城墙沟、绿草山等剖面的泥岩、页岩等样品 25 块,分别进行了脆裂指数、比表面积和 X-衍射全岩分析、孔隙度等测试工作(表 1)。从测试数据的对比分析来看,脆裂指数与孔隙度、比表面积呈正相关关系,脆裂指数越大的样品,其孔隙度、比表面积也越大(图 1)。

脆裂指数与脆性矿物含量没有明显的相关关系(图 2),这一点与煤炭领域的研究结果不同。刘贞堂^[10]的研究结果表明,煤体的坚固性系数与变形模量关系密切(图 3),坚固性系数越大的样品,变形模量也越大。通常情况下,在工作条件一定时,泥页岩的脆性强弱,是泥页岩矿物组成与结构的综合反映。泥页岩中石英、长石、方解石等脆性矿物含量高,泥页岩的脆性就强。而从本实验来看,脆性矿物含量变化范围为 58%~84%,对应的脆裂指数变化范围为 0.011~0.233。脆裂指数与脆性矿

表 1 实验测试数据

Table 1 Experimental test data

样号	样品深度/m	岩性	脆裂指数	孔隙度/%	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	脆性矿物含量/%
1	1 903.28	泥页岩	0.053	1.3	3.81	
2	1 908.34	泥页岩	0.017	1.3	5.12	67
3	1 913.55	泥页岩	0.045	1.25	8.84	70
4	1 919.10	泥页岩	0.017	1.18	4.73	72
5	1 924.98	泥页岩	0.012	0.83	4.02	74
6	1 928.85	泥页岩	0.028	1.17	0.17	75
7	1 933.85	泥页岩	0.015	1.41	3.24	75
8	1 943.75	泥页岩	0.068	1.03	2.64	69
9	1 948.80	泥页岩	0.060	1.35	2.86	69
10	1 954.40	泥页岩	0.055	1.31	3.89	72
11	1 960.40	泥页岩	0.033	1.10	3.58	62.5
12	1 965.90	泥页岩	0.041	1.03	2.66	72
13	1 972.10	泥页岩	0.039	0.94	2.78	67
14	1 978.80	泥页岩	0.029	0.82	3.43	70
15	1 986.85	泥页岩	0.032	0.92	1.86	84
16	2 155.60	黑色页岩	0.091	1.23	6.82	58
17	剖面	富有机质泥岩	0.084	9.11	13.20	80
18	剖面	富有机质泥岩	0.157	9.12	11.25	69
19	浅孔	粉砂质泥岩	0.142	13.20	16.59	
20	浅孔	深灰色粉砂质泥岩	0.112	7.88	11.15	
21	剖面	粉砂质泥岩	0.182	9.78	14.71	
22	剖面	灰色页岩	0.224	13.38	14.05	
23	剖面	深灰—黑色页岩	0.076	8.14		
24	剖面	黑色碳质泥岩	0.233	28.67		
25	剖面	钙质页岩	0.011	0.14		

物含量没有明显相关性的原因,究竟是工作条件的选择问题,还是其他因素引起,尚需进一步研究。

3.2 泥页岩脆裂指数的地质意义

3.2.1 泥页岩脆裂指数与内部结构密切相关

固体材料在外界条件作用下,内部缺陷可能活化,造成固体材料内部损伤、破坏。损伤破坏过程中释放的应变能以弹性波的形式进行传播,这种现象称为声发射。文光才等研究表明^[11],在传播过程中,声发射的能量损失与固体材料的内在特性密切相关,材料的内在特性包括完整性、坚固性。取 14 组煤体、泥岩、页岩、泥质砂岩的声发射和坚固性系数测试实验,发现坚固性系数与声发射信号衰减系数关系密切(图 4),且坚固性系数越大,声发射信号衰减系数越小;而在一定的工作条件下,声发射信号的衰减,往往与岩石内部的孔洞、裂隙等有关。从本次实验来看,脆裂指数与孔隙度、比表面积呈

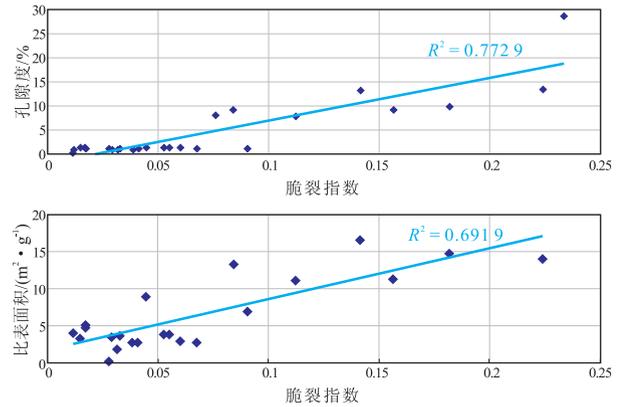


图 1 泥页岩脆裂指数与孔隙度及比表面积的关系

Fig.1 Shale brittle index vs. porosity and specific surface area

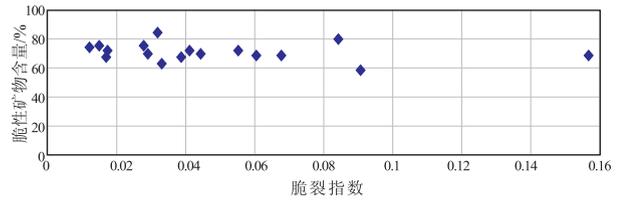


图 2 脆裂指数与脆性矿物含量的关系

Fig.2 Brittle index vs. brittle mineral content

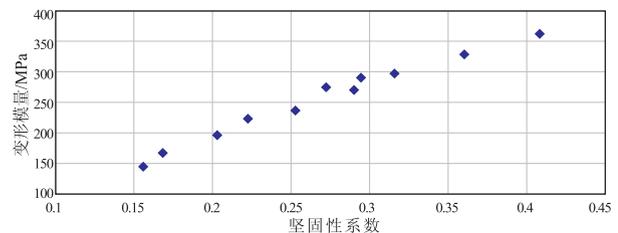


图 3 煤体的坚固性系数与变形模量的关系

据刘贞堂^[10]。

Fig.3 Coal ruggedness coefficient vs. deformation modulus

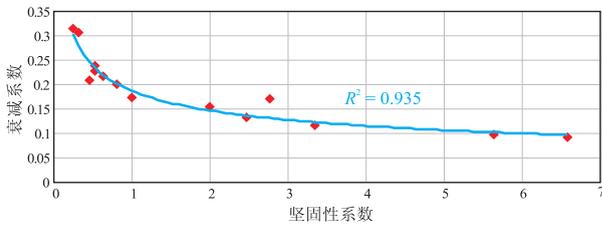


图 4 坚固性系数与衰减系数的关系
据文光才等^[11]。

Fig.4 Ruggedness coefficient vs. attenuation coefficient

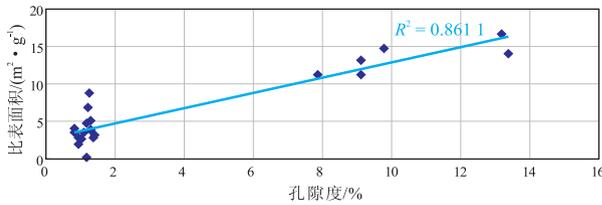


图 5 泥页岩孔隙度与比表面积的关系

Fig.5 Shale porosity vs. specific surface area

正相关关系(图 1),而孔隙度与比表面积关系较密切(图 5)。这也表明,在一定的工作条件下,脆裂指数可以反映泥页岩的孔隙、裂隙发育情况,从而为泥页岩的综合评价提供依据。

3.2.2 泥页岩脆裂指数用于气解吸特性研究

泥页岩气体解吸规律及其控制因素研究是页岩气勘探开发的基础问题。气体解吸过程中,解吸速度对于解吸曲线形态、直接法确定损失气含量等具有重要影响。解吸速度的影响因素众多,既有样品自身的孔隙结构与分布、裂隙发育情况以及矿物组成、有机质含量、岩石力学性质等因素,又有操作条件、仪器设备等因素。但在操作条件一定的情况下,揭示样品自身对吸附、解吸影响的主要控制因素,对于掌握其吸附、解吸规律具有重要意义。

在煤炭领域,将 3.5 g 规定粒度的煤样在 0.1 MPa 压力下吸附瓦斯后向固定真空空间释放时,用压差表示的 10~60 s 时间内释放的瓦斯量,称为瓦斯放散初速度。据尚显光等^[12]的研究,构造煤的瓦斯放散初速度与煤体的坚固性系数有关,煤体的瓦斯放散初速度随着煤体的坚固性系数降低而增加(图 6),即坚固性系数越小的煤体,瓦斯放散初速度越大;坚固性系数越大的煤体,其瓦斯放散初速度越小。江丙友等^[13]研究了煤岩超微孔隙结构特征及其分形规律,认为煤体的硬度与气体吸附性之间有一定的关系。由于本文提出的脆裂指数的内涵与煤体坚固性系数相近,与硬度有密切关系,因此,脆裂指数对泥页岩所含气体的解吸应该也具有类似的影响和特征。深入研究泥页岩的脆裂指数及其对解吸特征的影响,可以为认识泥页岩

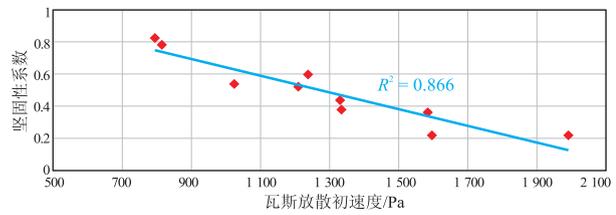


图 6 坚固性系数与瓦斯放散初速度的关系
据尚显光等^[12]。

Fig.6 Ruggedness coefficient vs. initial velocity of gas emission

解吸规律提供重要依据和信息。

4 结论

1) 本文提出的方法可以表征泥页岩的脆裂性质,脆裂指数的获取方法简便,对样品大小、外形无特殊要求,实用性较强。

2) 泥页岩的脆裂指数与泥页岩的孔隙度、比表面积呈正相关关系,暗示脆裂指数可以从特殊角度表征泥页岩的孔隙发育和内部结构。

3) 泥页岩脆裂指数的大小对其气体吸附与解吸行为影响的研究,对于页岩气勘探开发具有理论和实践意义。

参考文献:

- [1] 陈祥,严永新,章新文,等.南襄盆地泌阳凹陷陆相页岩气形成条件研究[J].石油实验地质,2011,33(2):137-141.
- [2] Bowker K A.Recent development of the Barnett Shale play,Fort Worth basin[J].West Texas Geological Society Bulletin,2003,42(6):1-11.
- [3] Bunting P J.Petro graphic analysis of the Barnett shale in the Fort Worth Basin[D].Fort Worth:Texas Christian University,2007.
- [4] 付永强,马发明,曾立新,等.页岩气藏储层压裂实验评价关键技术[J].天然气工业,2011,31(4):1-4.
- [5] 王祥,刘玉华,张敏,等.页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J].天然气地球科学,2010,21(2):350-355.
- [6] 刘恩龙,沈珠江.岩土材料的脆性研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19):3449-3453.
- [7] 李智武,罗玉宏,刘树根,等.川东北地区地层条件下致密储层力学性质实验分析[J].矿物岩石,2005,25(4):52-60.
- [8] 煤的坚固性系数测定方法 MT49-87 中华人民共和国煤炭工业部标准[S].1987-12-10 实施.
- [9] 郭臣业,鲜学福,吴轩洪,等.岩石破碎功、坚固性系数、强度关系的实验研究[J].重庆建筑大学学报,2008,30(6):28-31.
- [10] 刘贞堂.突出煤层煤体变形量与普氏坚固性系数的关系[J].煤炭工程师,1993(2):20-22.
- [11] 文光才,李建功,邹银辉,等.矿井煤岩动力灾害声发射监测适用条件初探[J].煤炭学报,2011,36(2):278-282.
- [12] 尚显光,温志辉,陈永超.构造煤瓦斯放散特性及其影响因素分析[J].煤,2011,20(6):31-33.
- [13] 江丙友,林柏泉,吴海进,等.煤岩超微孔隙结构特征及其分形规律研究[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2010,25(3):15-18.