

文章编号: 1673-8926(2016)01-0006-10 DOI: 10.3969/j.issn.1673-8926.2016.01.002

细粒沉积岩研究中几个值得关注的问题

周立宏¹, 蒲秀刚¹, 邓 远², 陈世悦², 鄢继华², 韩文中¹

(1. 中国石油大港油田分公司 勘探开发研究院, 天津 300280;

2. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 细粒沉积岩中蕴含着丰富的油气资源, 但其研究程度远低于粗碎屑岩, 尤其在岩石分类、岩相划分和脆性评价等方面的研究相对薄弱。以 X 射线衍射数据为基础, 以碳酸盐矿物、黏土矿物和长英质矿物为三端元, 将细粒沉积岩划分为 4 类 12 种岩石类型, 再根据特殊矿物含量进行具体命名。细粒沉积岩岩相学侧重于研究不同岩相的物质组成、结构构造、储层物性、烃源岩特征及含油性等, 以便优选优势岩相, 并寻找油气“甜点”。脆性影响细粒沉积岩压裂改造的效果, 目前常用岩石组分法和力学参数法对其进行评价, 二者在准确性、经济性及便捷性上各有优缺点, 应尝试建立一种能够准确而合理地表征岩石脆性的新方法。

关键词: 细粒沉积岩; 岩石类型; 岩相; 脆性指数

中图分类号: TE121.3 **文献标志码:** A

Several issues in studies on fine-grained sedimentary rocks

Zhou Lihong¹, Pu Xiugang¹, Deng Yuan², Chen Shiyue², Yan Jihua², Han Wenzhong¹

(1. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China;

2. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China)

Abstract: There are huge oil and gas resources in fine-grained sedimentary rocks. Researchers pay less attention to it compared to coarser sediments. Classification, lithofacies and brittleness evaluation of fine-grained sedimentary rocks remain a relatively weak research field. Based on the X-ray diffraction data, fine-grained sedimentary rocks were divided into 12 types of rock in four main categories by means of a three-unit division system. The three units are carbonate minerals, clay minerals and felsic minerals. Meanwhile, fine-grained sedimentary rocks were named according to the concrete content of special mineral. The study of lithofacies is mainly focused on the differences in components, texture, structure, reservoir physical properties, source rock character and oil-bearing property. A great emphasis should be placed on sedimentary environment, sedimentary progress and dynamical mechanism of different lithofacies to identify advantaged lithofacies for oil and gas exploration. Brittleness of fine-grained sedimentary rocks is of vital significance to the fracturing effect. Due to the demerits of elastic parameters method and mineral constituent method which are commonly used to evaluate the brittleness of fine-grained sedimentary rocks, a new accurate and rational method should be proposed.

Key words: fine-grained sedimentary rocks; rock types; lithofacies; brittleness index

收稿日期: 2015-06-10; 修回日期: 2015-11-20

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“大港油区大油气田勘探开发关键技术研究”(编号: 2014E-06)资助

作者简介: 周立宏(1968-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事油气勘探与开发方面的研究与管理工。地址: (300280) 天津市滨海新区大港油田幸福路 1278 号勘探开发研究院。E-mail: zhoulh@petrochina.com.cn

通信作者: 蒲秀刚(1968-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事沉积学与储层地质学等方面的研究工作。E-mail: puxgang@petrochina.com.cn

0 引言

细粒沉积岩(fine-grained sedimentary rocks)是指由粒径小于0.0625 mm的细粒沉积物组成的粒径较细、成分复杂的沉积岩,其成分主要包括长英质矿物(石英、钾长石与斜长石等)、黏土矿物(伊利石、绿泥石与蒙脱石等)、碳酸盐矿物(白云石与方解石等)及其他自生矿物等,传统上常用的泥岩、页岩、黏土岩和粉砂岩等概念都属于细粒沉积岩范畴^[1]。在含油气盆地研究中,细粒沉积岩过去主要被作为烃源岩或盖层看待,学者多针对其烃源岩特征与封盖能力等方面开展研究,与粗碎屑岩相比,对其重视程度不够。研究表明,细粒沉积岩分布广泛,约占全球沉积岩的70%^[2]。近年来,随着致密油气及页岩油气的勘探与开发不断取得突破,人们意识到细粒沉积岩不仅可以作为烃源岩与盖层,也可以形成生储盖一体的连续型油气聚集而蕴含丰富的油气资源,这类油气聚集属于非常规油气,有望成为未来油气勘探与开发的主战场^[3-5]。

1 细粒沉积岩研究现状

细粒沉积岩作为沉积学研究相对薄弱的领域,是目前研究的热点与重点之一^[6-8]。美国与加拿大等国家页岩油气及致密油气等资源的勘探与开发起步较早,其成果极大地促进了细粒沉积岩油气勘探理论的发展^[9-11]。在充分吸收并借鉴国外细粒沉积岩研究经验的基础上,近年来我国学者针对我国海相与陆相细粒沉积岩发育区进行了详细调研,并与北美各盆地含油气细粒沉积岩的分布、生油条件及储集条件等进行了类比^[12-14];在细粒沉积岩的岩性-岩相^[15-16]、储层特征^[17-19]及沉积体系^[20]等方面均取得了一系列认识。贾承造等^[21]指出非常规油气地质学中存在重要的理论问题,强调应建立细粒沉积体系分类方案,研究其源-储配置关系,明确细粒沉积体系与常规沉积体系的组合关系;邹才能等^[22]按沉积环境将富有机质页岩分为3类:海相富有机质页岩、海陆过渡相与煤系富有机质页岩和湖相富有机质页岩,并对我国页岩的分布、地球化学特征、储集层特征及其油气的运聚机理等进行了阐释,指出我国页岩气可采资源量约(10~25)万亿 m^3 ,页岩油可采资源量约为(30~60)亿t;张金川等^[23]将页岩类油气划分为页岩气和页岩油等2类,提出了页岩油远景区、有利区及目标区优选的参数体系和标准;姜在兴等^[1]介绍了细粒沉积岩的相关概念、术语及

分类,研究了硅质与碳酸盐等细粒物质的沉积动力学特征,以东营凹陷沙四上亚段和沙三下亚段为例,建立了细粒沉积岩的沉积模式,还以气候、相对湖面及物源输入等作为层序主控因素,划分细粒沉积层序格架;张顺等^[24]以泥页岩岩石类型及岩相特征为基础,综合考虑控制泥页岩发育的水动力条件、古湖盆底形及事件沉积等因素,对东营凹陷西部沙三下亚段细粒沉积岩发育区进行了沉积微相划分;袁选俊等^[20]总结了细粒沉积岩的研究进展与发展趋势,针对鄂尔多斯盆地延长组研究了细粒沉积岩沉积体系的分布规律,建立了以湖侵-水体分层为主的湖相富有机质页岩的沉积模式,提出“沉积相带、水体深度、缺氧环境与湖流”均是富有机质页岩分布的主控因素。

前期细粒沉积岩的研究多为对其分布、岩石学性质、烃源岩特征及储层物性等的描述或规律总结,而对其沉积过程、作用机理及控制因素的探讨均较少。目前,我国细粒沉积岩研究中存在以下迫切需要解决的问题:①细粒沉积岩矿物成分复杂,缺乏一套完善、系统且适用性强的分类方案;②细粒沉积岩的岩相研究多集中于宏观及微观特征的描述和各类性质的总结,缺乏对其沉积过程及动力学机制等方面的详细剖析;③细粒沉积岩的脆性缺少准确而合理的表征方法。

2 细粒沉积岩分类问题

细粒沉积岩岩石类型复杂,传统的细粒沉积岩类型主要依据粒级和沉积构造特征进行划分。由于受超微观实验条件的限制,人们对细粒沉积岩的矿物成分认识不够。地质工作者运用X射线衍射(XRD)分析与扫描电镜分析等技术对我国海相与陆相各盆地细粒沉积岩的研究^[20,24]表明:细粒沉积岩多由长英质矿物、黏土矿物与碳酸盐矿物混合组成,此外还含有黄铁矿、石膏与方沸石等自生矿物,而不仅仅由黏土矿物组成。随着非常规油气勘探与开发的兴起,从研究的重要性来看,细粒沉积岩可以与研究较多的碎屑岩、火山碎屑岩及碳酸盐岩等并列,它在矿物组成、形成环境、水动力条件、气候与物源等方面均有其独特性,只是目前对其认识不够。因此,对细粒沉积岩进行合理地分类,有利于细化认识,为细粒沉积岩油气勘探提供指导。

近年来,学者们对细粒沉积岩的分类多以矿物成分为分类依据,采用三端元的方式来划分岩石类

型。郝运轻等^[25]以泥质、粉砂与碳酸盐为三端元,将细粒沉积岩划分为泥岩、粉砂岩及砂岩、灰岩及白云岩和复杂过渡岩,其中复杂过渡岩岩石类型可以根据三端元的相对含量以“少前多后”的原则命名。姜在兴等^[1]以主要组分粉砂、黏土和碳酸盐为三端元,以其各自质量分数 50% 为界将细粒沉积岩分为粉砂岩、黏土岩、碳酸盐岩和混合型细粒沉积岩四大类;对于三端元组分含量相对均一的细粒混合沉积岩,将粉砂和黏土共同作为硅质碎屑端元,碳酸盐作为另外一个端元,以硅质碎屑质量分数 65% 为界,进行细化分类;此外,他们还结合我国中东部湖相含油气细粒沉积岩以碳酸盐、黏土矿物和有机质为主的特点,提出以有机质、碳酸盐及黏土矿物为三端元的分类方法。上述分类方案为细粒沉积岩岩石分类提供了重要的基础和借鉴,但在分类依据的选取上存在一些问题,例如其在分类端元的选取上,粉砂为粒级概念,黏土和碳酸盐为矿物成分概念,将三者并列作为三端元,容易造成操作上的不便。笔者对沧东凹陷孔二段发育的细粒沉积岩进行分析与测试,在此基础上,试将上述分类方案进行补充与完善,以使其能够更好地应用于我国陆相湖盆细粒沉积岩研究。

2.1 分类原则及依据

在制定划分方案时,应遵守“界线清晰、含义明确、简单实用、尊重传统”的原则,即:不同类别细粒沉积岩要有准确的划分界线,不易产生混淆;分类名称应能反映该类别细粒沉积岩的主要特征,含义直观明确;分类方案不宜太过复杂,且应具有较强的可操作性,划分后的岩石种类在宏观与微观尺度上均能清晰辨识;一些在岩浆岩及变质岩等其他岩

石类型中已经使用的名词不能再用于细粒沉积岩的分类。

矿物成分是细粒沉积岩研究的基础,它影响着细粒沉积岩的孔隙类型、物性和脆性等特征^[26],应将矿物含量作为岩石分类的重要依据。鉴于细粒沉积岩成分复杂、粒径较细且非均质性较强,在粗碎屑岩研究中常用的薄片鉴定法统计矿物含量已不适用于细粒沉积岩。XRD 分析是矿物学研究中一种较为准确的测试技术,笔者建议以 XRD 数据为主,辅以偏光显微镜鉴定与扫描电子显微镜鉴定等手段来确定细粒沉积岩的矿物成分及含量^[27]。

2.2 分类方案

细粒沉积岩的分类方案可以用“三端元、四组分”来概括。以细粒沉积岩中含量普遍较高的碳酸盐、长英质及黏土等矿物为三端元,采用传统的“三级命名法”(以质量分数 10%、25% 和 50% 为界),将细粒沉积岩划分为细粒长英沉积岩类(长英质矿物质量分数大于 50%)、碳酸盐岩类(碳酸盐矿物质量分数大于 50%)、黏土岩类(黏土矿物质量分数大于 50%)和细粒混合沉积岩类(各类矿物质量分数均不大于 50%)等 4 种类型[图 1(a)]。质量分数大于等于 25% 且小于 50% 的矿物类型以“……质”置于主名称之前;质量分数大于等于 10% 且小于 25% 的矿物类型作为次要形容词,以“含……”置于岩石名称的最前面;质量分数小于 10% 的矿物类型则不出现在岩石名称中。此外,结合所研究盆地的具体情况,若该地区普遍发育含量较高的特殊矿物(方沸石与黄铁矿等),则将该矿物作为三端元外的第 4 种组分,以其质量分数 10% 和 25% 为界进行命名,并置于岩石命名之前。以方沸石为例,其质量分数为

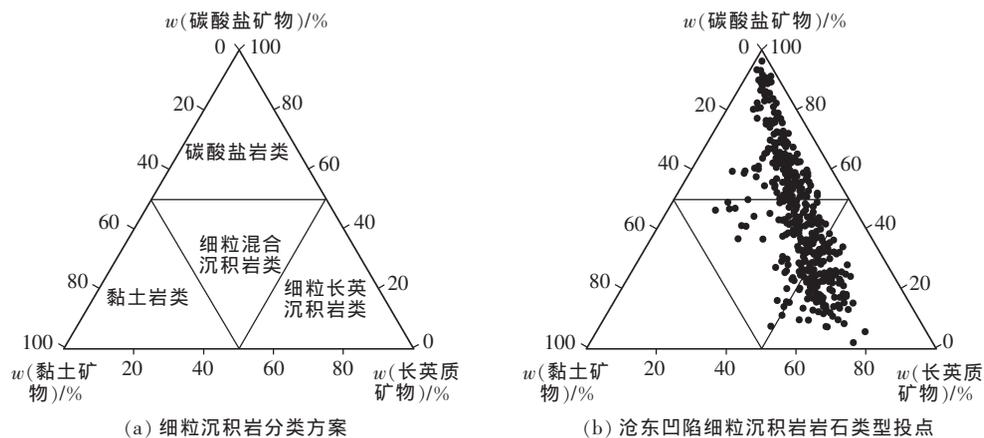


图 1 沧东凹陷孔二段细粒沉积岩分类

Fig. 1 Classification of fine-grained sedimentary rocks of the second member of Kongdian Formation in Cangdong Depression

10%~25% 和大于 25% 时分别命为“含方沸石……”和“方沸石质……”。同时,为了简化岩石名称,在方沸石发育(质量分数大于 10%)的细粒沉积岩命名中,质量分数大于等于 10% 且小于 25% 的矿物组分(碳酸盐矿物、黏土矿物及长英质矿物)不参与命名。

2.3 沧东凹陷孔二段细粒沉积岩分类

沧东凹陷位于黄骅拗陷南部,是一个重要的富油气凹陷,古近系孔店组二段沉积期为拗陷湖盆发育时期,沉积了 400 余米厚的细粒沉积岩,是盆地最

重要的烃源岩层系。以沧东凹陷 GX 井为例,针对孔二段细粒沉积岩段进行 XRD 分析并按照前文方案进行分类。结果表明,该段以碳酸盐岩类、细粒长英沉积岩类和细粒混合沉积岩类为主,几乎不发育黏土岩类[图 1(b)],反映了沧东凹陷湖盆规模相对较小,受物源影响较大的特征。此外,依据碳酸盐矿物、黏土矿物和长英质矿物的相对含量,并将该区较为发育的方沸石作为第 4 种组分,进一步划分出 24 种细粒沉积岩岩石(表 1)。

表 1 沧东凹陷孔二段细粒沉积岩岩石类型

Table 1 Classification of fine-grained sedimentary rocks of the second member of kongdian Formation in Cangdong Depression

岩类名称	岩石名称	三端元矿物归一化相对占比/%			w(方沸石)/%	备注
		长英质矿物	碳酸盐矿物	黏土矿物		
细粒长英沉积岩类	细粒长英沉积岩	≥50	<25	<25	≥10%且<25%: 含方沸石…… 岩; ≥25%:方沸 石质……岩	白云石含量高则为白 云岩或白云质,方解 石含量高则为石灰 岩或灰质
	云(灰)质细粒长英沉积岩	≥50	≥25	<25		
	黏土质细粒长英沉积岩	≥50	<25	≥25		
碳酸盐岩类	白云(灰)岩	<25	≥50	<25		
	长英质白云(灰)岩	≥25	≥50	<25		
	黏土质白云(灰)岩	<25	≥50	≥25		
黏土岩类	黏土岩	<25	<25	≥50		
	长英质黏土岩	≥25	<25	≥50		
	云(灰)质黏土岩	<25	≥25	≥50		
细粒混合沉积岩类	长英质细粒混合沉积岩	<50	<50	<50		长英质矿物含量最高
	云(灰)质细粒混合沉积岩	<50	<50	<50		碳酸盐矿物含量最高
	黏土质细粒混合沉积岩	<50	<50	<50		黏土矿物含量最高

3 岩相学问题

单纯以岩性为单元进行的研究已经无法满足细粒沉积岩油气勘探与开发的需求。因此,应在依据矿物成分进行岩石分类的基础上,结合岩石颜色、结构、构造、生物遗迹及有机质含量等因素,对其进行岩相划分。岩相是多种岩石学信息的综合:矿物成分是陆源输入-沉积作用及化学(生物)沉积作用的共同结果,其差异是造成细粒沉积岩类型多样的根本因素;颜色可以反映矿物成分和沉积时的氧化—还原环境;结构与构造均为沉积时水动力条件的体现,如在安静的水体分层条件下可以形成纹层状构造,而在湖泊底流的影响下会形成波状层理;不同的生物所需要的生存条件不同,生物遗迹可以间接反映水体的盐度和氧化—还原条件等;有机质含量是湖泊生烃能力与保存条件的综合反映。与岩石类型相比,岩相包含的信息更丰富,且在实际岩心观察中易于观察与辨识,以岩相或岩相组合为单元进行

细粒沉积岩储层物性、电性、烃源岩特性和脆性特征等研究,有利于寻找勘探“甜点”,对细粒沉积岩油气的勘探与开发具有重要意义。

针对北美的海相细粒沉积岩,国外学者对其进行了不同的岩相划分。Schieber^[28]依据颜色、矿物组成和沉积构造等将贝尔特盆地 Newland 组分为条纹页岩、灰色白云页岩及钙质粉砂页岩等 6 种岩相; Loucks 等^[9]依据矿物组成、结构与生物群将密西西比系 Barnett 页岩划分为纹层状硅质泥岩、纹层状黏土质灰泥岩、含生物骨骼的黏土质泥晶灰岩等 3 种岩相; Abouelresh 等^[11]依据矿物成分、水动力和有机质含量等将沃斯堡盆地中东部地区的 Barnett 页岩划分为 10 种岩相类型。国内学者对我国细粒沉积岩的岩相划分也进行了许多研究,邓宏文等^[29]根据结构构造、层序、地球化学特征、矿物成分和生物组合等将东营凹陷沙三段深湖相泥岩划分为内源性 & 外源性等 2 类共 8 种岩相类型,并结合沉积动力学分析,根据形成机理划分为湖控泥岩系、流控泥

岩系和滑塌泥岩系等3个成因系列;谢宗奎^[30]根据沉积构造将柴达木盆地台南地区第四系细粒沉积岩划分为7种岩相;马文辛等^[31]依据矿物成分、碎屑、生物和结构特征将四川盆地筇竹寺组泥页岩划分为7种岩相;对于四川盆地五峰组—龙马溪组,王志峰等^[15]从沉积时的水动力成因角度,将其划分出强、弱2类水动力带和8种岩相,梁超等^[16]根据矿物成分差异将其划分为5种岩相类型;张顺等^[32]根据矿物成分、沉积构造和有机质含量将东营凹陷沙三下亚段泥页岩进行岩相划分,并分析了5种较为发育岩相的测井响应特征。

从现有的研究成果来看,多数学者对岩相的划分相对简单,多以岩性和沉积构造类型作为划分依据,侧重于总结不同岩相的储层物性、烃源岩特征和含油性等,而缺少对其物源、环境、演化规律以及沉积动力学机制等方面的深入研究。笔者在对沧东凹陷孔二段细粒沉积岩的研究中发现,相同的岩相类型,其成因机制及物质来源可能存在差异。如图2所示,GX井井深为2 978.73 m和2 929.89 m等2处岩心,依据前文的岩石类型划分方案,岩心观察与

XRD数据都表明其均可划分为长英质细粒混合沉积岩,在此基础上结合沉积构造特征进行简单的岩相划分,其均可划分为纹层状长英质细粒混合沉积岩相。然而,根据镜下鉴定的结果,井深为2 978.73 m处细粒沉积岩中的长英质颗粒粒径为0.02~0.20 mm,以粉砂级为主,井深为2 929.89 m处细粒沉积岩中的长英质颗粒粒径小于0.01 mm,以泥级为主,它们分别代表了不同的水动力条件:前者的长英质层为事件性洪水沉积,突发性大洪水或滑塌事件引发携带有大量粗碎屑泥沙的重力流,由于能量强且速度快,其中的粗碎屑颗粒能够克服湖水的顶托作用,在湖底进行较远距离的搬运,因此沉积形成的长英质层矿物颗粒大且分选与磨圆均差;后者粒级相对较细的长英质层代表了具有相对较强水动力的河流输入,一般是由于季节性降雨量增加而引起,河流携带一定的陆源碎屑物质进入湖泊,粗碎屑在滨浅湖区依次沉淀,较细粒的颗粒则由于湖流的平流作用以悬浮态在湖泊中进行长距离搬运并沉积,进而形成了泥级长英质纹层。

与海相细粒沉积岩相比,湖相细粒沉积岩对环

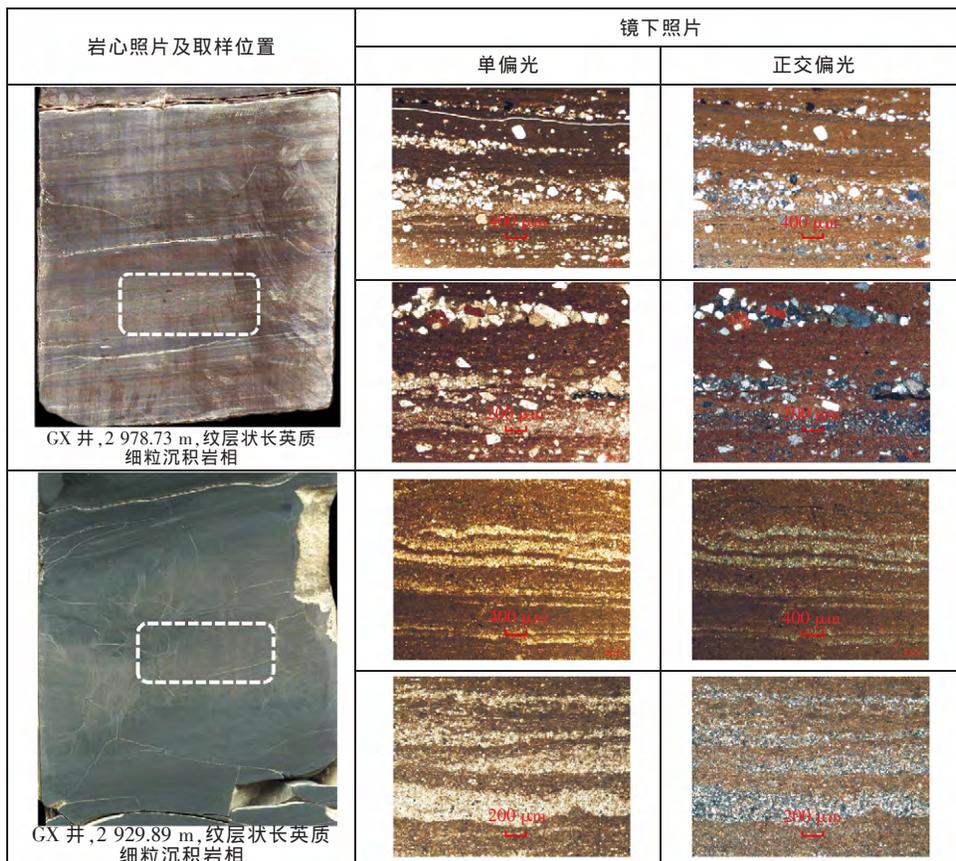


图2 沧东凹陷孔二段不同水动力条件下的长英质矿物

Fig. 2 Felsic minerals under different hydrodynamic conditions of the second member of Kongdian Formation in Cangdong Depression

境及气候变化更敏感,受物源影响更大,因此对湖相细粒沉积岩岩相的划分应更细致和系统,所选取的划分依据及划分的岩相类型应力求充分反映细粒沉积岩的物质来源、水体环境、气候条件、水动力强弱以及成岩作用过程等多方面的信息。此外,应结合常规测井技术和元素俘获测井及 FMI 成像测井等新技术建立不同岩相的测井响应模型^[33-34],研究岩相的展布规律及与粗碎屑骨架的配置关系,在此基础上优选优势岩相,并预测其分布,以更好地指导细粒沉积岩油气的勘探与开发。

4 脆性指数问题

细粒沉积岩具有岩石致密、低孔低渗和储集空间规模小等特征,其内部存储的油气有相当一部分以吸附态存在,采用常规开采技术难以获得工业产能,因此必须对其进行压裂改造。脆性是岩石的综合特性,是在自身天然非均质性和外在特定加压条件下产生内部非均匀应力,并导致局部破坏,进而形成多维破裂面的能力^[35]。岩石的脆性是影响其压裂改造效果的重要因素,脆性指数是衡量岩石脆性大小的常用指标,指数越大,岩石脆性也越强。

4.1 常用脆性指数计算方法

脆性指数的计算方法通常可分为两大类:一是利用相关力学参数(杨氏模量、泊松比、断裂韧性、抗拉强度、抗压强度及内摩擦角等)结合相应公式计算脆性指数;二是利用矿物组分对岩石脆性进行计算。其中力学参数法又可进一步划分为弹性参数法、强度比值法及内摩擦角法等(表 2)。

表 2 常用脆性指数计算方法及对应脆性等级

Table 2 Brittleness testing methods and hierarchical classification

脆性指数计算公式	界线	脆性等级	来源
$BI_1 = (YM - BRIT + PR - BRIT) \times 100$ 其中, $YM - BRIT = \frac{(YMS_c - 1)}{7}$; $PR - BRIT = \frac{(PR_c - 0.4)}{-0.25}$	>60	脆性很强	文献[36-37]
	40~60	脆性	
	<40	脆性较低	
$BI_2 = \sigma_c / \sigma_t$	>25	脆性很强	文献[37-39]
	15~25	脆性	
	10~15	中等脆性	
	<10	脆性较低	
$BI_3 = \sin \theta$	0~1		文献[35]
$BI_4 = (W_q + W_{ca}) / (W_q + W_{ca} + W_{clay})$	>40	脆性	文献[40-42]
	<40	塑性	

注: YMS_c 为静态杨氏模量; PR_c 为静态泊松比; σ_c 为单轴抗压强度; σ_t 为抗拉强度; θ 为内摩擦角; W_q, W_{ca} 与 W_{clay} 分别为石英、碳酸盐矿物与黏土矿物质量分数

(1) 弹性参数法

弹性参数法是利用样品的杨氏模量及泊松比,经过极差变换后求取样品脆性指数的方法。杨氏模量是轴向应力与轴向弹性应变的比值,是反映岩石刚性强弱的指标,杨氏模量越大,岩石越不易发生形变;泊松比是样品径向应变与轴向应变的比值,是反映样品横向变形系数的指标,泊松比值越大,岩石抗膨胀能力越差。杨氏模量与泊松比的不同组合表示岩石脆性大小的差异,杨氏模量越大,泊松比越低,岩石脆性越强。弹性参数法就是利用该原理,将杨氏模量作为正向指标,泊松比作为逆向指标,经极差变换后求取平均值作为岩石的脆性指数,计算公式见表 2 中的公式 BI_1 。

笔者通过对黄骅坳陷沧东凹陷孔二段 25 个细粒沉积岩样品进行不同围压条件下的静力法岩石力学实验,得到了 25 组杨氏模量及泊松比值,并在此基础上对样品脆性指数进行了计算。结果表明,在围压为 5 MPa 的情况下,脆性指数为 8.85~68.06,平均值为 42.88;在围压为 15 MPa 的情况下,脆性指数为 13.20~76.92,平均值为 38.36;在围压值为 25 MPa 的情况下,脆性指数为 8.21~64.49,平均值为 35.25;当围压增大至 35 MPa 时,脆性指数为 4.09~57.93,平均值为 36.95。整体来看,岩石的脆性随围压的升高而逐渐降低。

(2) 强度比值法

强度比值法是基于岩石强度的脆性评价方法之一,主要是凭借岩石单轴抗压强度与抗拉强度的差异来实现,单轴抗压强度与抗拉强度差异越大,岩石脆性就越强。单轴抗压强度可通过单轴力学实验获得,抗拉强度可通过巴西实验获得(巴西实验是测定岩石抗拉强度应用最广泛的实验方法)。利用抗压强度与抗拉强度差异性评价岩石脆性的方法很多,笔者采用 Goktan 等^[38]提出的抗压强度与抗拉强度比值法(表 2 中的公式 BI_2)对黄骅坳陷沧东凹陷孔二段细粒沉积岩进行计算,得到其脆性指数为 9.08~24.30,平均值为 15.16。Goktan 等^[38]依据强度比值法将岩石脆性划分为 4 个等级,沧东凹陷孔二段细粒沉积岩脆性指数主要为 10~25,占样品总数的 88%,为中等脆性—脆性。

(3) 内摩擦角法

内摩擦角是一个重要的岩石力学参数,是指岩石在受到垂直应力作用条件下发生剪性破坏时破裂面的倾角,角度大小反映岩石的抗剪强度。在工

程力学中,将内摩擦角的正弦值作为评价岩石脆性的重要指标(表2中公式 BI_3),正弦值越大,岩石脆性越强。岩石内摩擦角的测定主要包括三轴压缩实验及直接剪切实验2种,其模拟条件为较真实的地层条件。笔者采用等侧压三轴压缩实验($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$),根据岩性及深度,围压加压为30 MPa。三轴压缩实验结果表明,沧东凹陷孔二段细粒沉积岩内摩擦角为 $9.17^\circ \sim 48.49^\circ$,平均值为 28.65° ,正弦值为 $0.16 \sim 0.75$,平均值为0.47,岩石脆性主体处于中上等水平,与前述脆性评价结果基本一致。

(4) 矿物组分析法

力学参数法能较直接地反映岩石力学性质,但在建立地层脆性剖面时,需连续计算岩石的脆性指数,且需用地震纵、横波资料对井眼不规则和气体影响等因素进行校正,程序繁琐且费用昂贵,实用性受限。为更方便地评价岩石脆性,威德福(Weatherford)公司提出利用岩石矿物组分特征对脆性进行评价^[41-42],并提出以石英为脆性矿物,利用XRD资料对岩石脆性指数进行连续计算。

以此为基础,国内学者依据各研究区细粒沉积岩矿物组成特征,对威德福公司提出的矿物组分析法计算公式进行了修正。李钜源^[43]依据东营凹陷泥页岩矿物组成特征,分别以石英与碳酸盐矿物为脆性矿物,提出石英脆度、碳酸盐脆度及总脆度的概念(表3)。陈吉等^[44]在研究中国南方古生界富有机质泥页岩脆性特征时,将长石亦作为脆性矿物参与脆性指数的计算(表3中总脆度)。笔者依据黄骅坳陷沧东凹陷孔二段细粒沉积岩矿物组成特征,将方沸石亦作为脆性矿物并总结了总脆度计算公式(表3中总脆度)。利用脆性矿物含量计算岩石

脆性指数的方法较多,准确性参差不齐,需要对计算方法的优劣性进行评价。

在全岩XRD分析的基础上,笔者分别利用上述5种矿物组分析法计算公式对黄骅坳陷沧东凹陷孔二段21个细粒沉积岩样品的脆性指数进行了计算,并将计算结果分别与其杨氏模量、泊松比及内摩擦角等力学参数计算结果进行相关性分析。结果表明,沧东凹陷孔二段细粒沉积岩的石英脆度、碳酸盐脆度与工程力学参数脆度相关性普遍较差,而总脆度与工程力学参数脆度的相关性相对较好,3种总脆度中又以总脆度计算得到的脆性指数与力学参数脆度相关性最优,由此笔者建议将石英与碳酸盐作为脆性矿物参与总脆度的计算应更加接近地质实际。

4.2 计算方法对比与优选

笔者在岩石力学实验及全岩XRD分析的基础上,利用弹性参数法、强度比值法、内摩擦角法及矿物组分析法(总脆度)分别对沧东凹陷孔二段细粒沉积岩样品的脆性指数进行了计算并对计算结果进行了对比^[45-46]。由于受到细粒沉积岩非均质性及测试环境的影响,实验得到的原始数据必然存在误差,从而影响细粒沉积岩脆性指数计算的精度,因此需要对4种计算方法进行优选。对4种脆性指数计算结果的相关性进行分析表明:弹性参数法(BI_1)计算出的细粒沉积岩脆性指数与其他3种方法相关性最好,其次为矿物组分析法(BI_4),而强度比值法(BI_2)与内摩擦角法(BI_3)的计算结果与其他2种计算方法的相关性较差(图3),即由弹性参数法计算出的孔二段细粒沉积岩脆性指数可靠性更高,矿物组分析法次之。从沧东凹陷实测资料来看,笔者建议采用表2中公式 BI_1 及 BI_4 计算细粒沉积岩脆性指数来对其脆性进行综合评价。

弹性参数法计算出的沧东凹陷孔二段细粒沉积岩脆性指数最小值为16.11,最大值为57.93,平均值为40.97。利用矿物组分析法总脆度计算的结果表明,脆性指数最小值为26.97,最大值为97.89,平均值为74.98。计算结果表明,由弹性参数法计算的脆性平均值稍高于岩石脆性界线,而矿物组分析法计算的岩石脆性高于脆性界线。综合分析认为,沧东凹陷孔二段细粒沉积岩脆性中等—较强,各岩相的脆性存在较大差异,高脆性岩相分布区,其体积压裂的效果应更优。

表3 矿物组分析法脆性指数计算公式

Table 3 Calculation formulas of brittleness index in terms of mineral composition

类别	计算公式	来源
石英脆度	$Brit = \frac{W_q}{W_q + W_{ca} + W_{clay}}$	文献[42-43]
碳酸盐脆度	$Brit = \frac{W_{ca}}{W_q + W_{ca} + W_{clay}}$	文献[43]
总脆度	$Brit = \frac{W_q + W_{ca}}{W_q + W_{ca} + W_{clay}}$	文献[41-43]
总脆度	$Brit = \frac{W_q + W_{fel} + W_{ca}}{W_q + W_{fel} + W_{ca} + W_{clay}}$	文献[44]
总脆度	$Brit = \frac{W_q + W_{fel} + W_{an} + W_{ca}}{W_q + W_{fel} + W_{an} + W_{ca} + W_{clay}}$	本文

注: $W_q, W_{fel}, W_{ca}, W_{clay}$ 与 W_{an} 分别为石英、长石、碳酸盐矿物、黏土矿物与方沸石质量分数

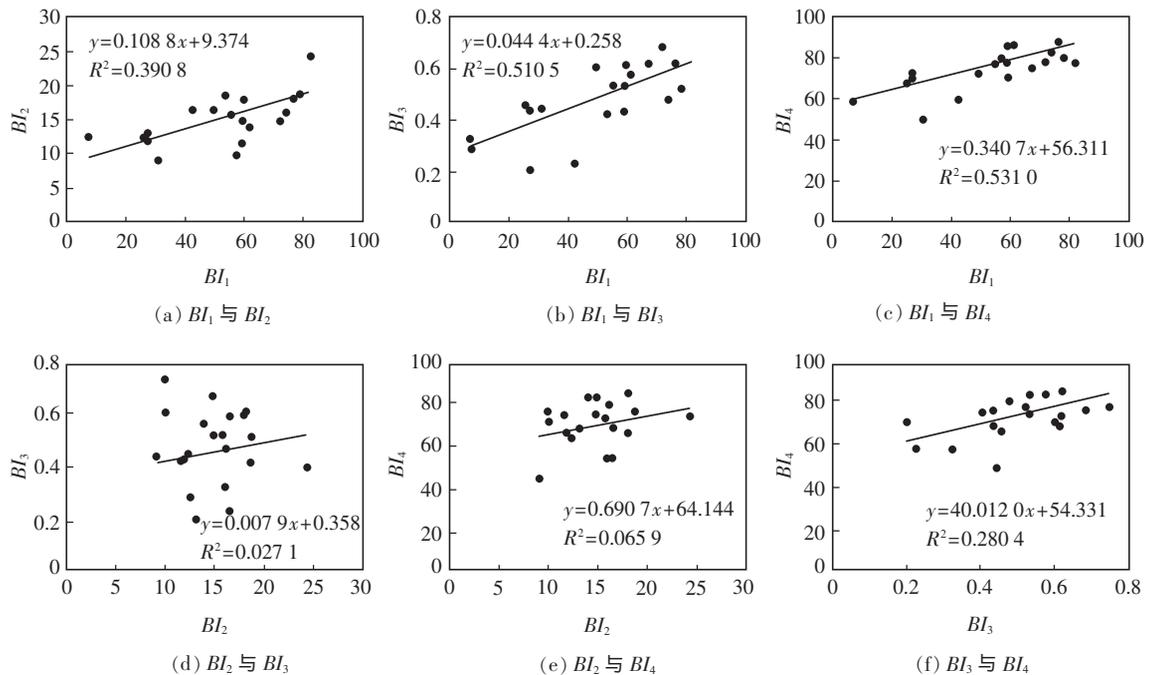


图3 沧东凹陷孔二段细粒沉积岩脆性指数相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of brittleness index of the second member of Kongdian Formation in Cangdong Depression

5 结论

(1) 鉴于细粒沉积岩成分复杂、粒径较细且非均质性较强,在粗碎屑岩研究中常用的薄片鉴定法统计矿物含量已不适用,应将X射线衍射(XRD)分析的矿物含量作为岩石分类的重要依据,采用“三端元、四组分”分类方案,将细粒沉积岩划分为细粒长英沉积岩类、碳酸盐岩类、黏土岩类与细粒混合沉积岩类4种类型。

(2) 在细粒沉积岩划分的基础上,应结合岩石颜色、结构、构造、生物遗迹和有机质含量等因素,对其进行岩相划分,而单纯的以岩性为单元进行研究已经无法满足寻找细粒沉积中油气“甜点”的需要。

(3) 脆性指数是衡量岩石脆性大小及预测压裂改造效果的常用指标,脆性指数的计算方法通常有弹性参数法、内摩擦角法、强度比值法及矿物组分法等4种,弹性参数法与矿物组分法计算出的细粒沉积岩脆性指数可靠性更高,且矿物组分法只将石英与碳酸盐矿物作为脆性矿物参与计算应更加接近地质实际。

参考文献:

[1] 姜在兴,梁超,吴靖,等.含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J].石油学报,2013,34(6):1031-1039.
Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimen-

tary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.

- [2] Aplin A C, Macquaker J S H. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2031-2059.
- [3] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J].石油学报,2012,33(2):173-187.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations; Taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [4] 柳波,吕延防,赵荣,等.三塘湖盆地马朗凹陷芦草沟组泥页岩系统地层超压与页岩油富集机理[J].石油勘探与开发,2012,39(6):699-705.
Liu Bo, Lü Yanfang, Zhao Rong, et al. Formation overpressure and shale oil enrichment in the shale system of Lucaogou Formation, Malang Sag, Santanghu Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 699-705.
- [5] 董大忠,邹才能,杨桦,等.中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J].石油学报,2012,33(增刊1):107-114.
Dong Dazhong, Zou Caineng, Yang Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(Suppl.1): 107-114.
- [6] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [7] Sageman B B, Murphy A E, Werne J P, et al. A tale of shales: the relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic-rich strata, Middle-Upper Devonian, Appalachian basin[J]. Chemical Geology, 2003, 195(1): 229-273.

- [8] Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [9] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579-601.
- [10] Slatt R M, O'Brien N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2017-2030.
- [11] Abouelresh M O, Slatt R M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett Shale in east-central Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 1-22.
- [12] 张林晔, 李钜源, 李政, 等. 北美页岩油气研究进展及对中国陆相页岩油气勘探的思考[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 700-711.
Zhang Linye, Li Juyuan, Li Zheng, et al. Advances in shale oil/gas research in North America and considerations on exploration for continental shale oil/gas in China[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(6): 700-711.
- [13] 杨振恒, 李志明, 王果寿, 等. 北美典型页岩气藏岩石学特征, 沉积环境和沉积模式及启示[J]. 地质科技情报, 2010, 29(6): 59-65.
Yang Zhenheng, Li Zhiming, Wang Guoshou, et al. Enlightenment from Petrology Character, Depositional environment and depositional model of typical shale gas reservoirs in North America[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(6): 59-65.
- [14] 赵俊龙, 张君峰, 许浩, 等. 北美典型致密油地质特征对比及分类[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(1): 44-50.
Zhao Junlong, Zhang Junfeng, Xu Hao, et al. Comparison of geological characteristics and types of typical tight oil in North America[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(1): 44-50.
- [15] 王志峰, 张元福, 梁雪莉, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组不同水动力成因页岩岩相特征[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 623-632.
Wang Zhifeng, Zhang Yuanfu, Liang Xueli, et al. Characteristics of shale lithofacies formed under different hydrodynamic conditions in the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 623-632.
- [16] 梁超, 姜在兴, 杨锦婷, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相及储集空间特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 691-698.
Liang Chao, Jiang Zaixing, Yang Yiting, et al. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 691-698.
- [17] 王玉满, 董大忠, 杨桦, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩储集空间定量表征[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(6): 1348-1356.
Wang Yuman, Dong Dazhong, Yang Hua, et al. Quantitative characterization of reservoir space in the Lower Silurian Longmaxi Shale, southern Sichuan, China[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(6): 1348-1356.
- [18] 杨巍, 陈国俊, 胡士骏, 等. 川南—黔北地区下古生界页岩孔隙发育特征[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(4): 47-52.
Yang Wei, Chen Junguo, Hu Shijun, et al. Pore characteristics of shale of Lower Paleozoic in southern Sichuan-northern Guizhou[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(4): 47-52.
- [19] 徐祖新. 基于 CT 扫描图像的页岩储层非均质性研究[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(6): 46-49.
Xu Zuxin. Heterogeneity of shale reservoirs based on CT images[J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(6): 46-49.
- [20] 袁选俊, 林森虎, 刘群, 等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式——以鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 34-43.
Yuan Xuanjun, Lin Senhu, Liu Qun, et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 34-43.
- [21] 贾承造, 郑民, 张永峰. 非常规油气地质学重要理论问题[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 1-10.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Four important theoretical issues of unconventional petroleum geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 1-10.
- [22] 邹才能, 董大忠, 杨桦, 等. 中国页岩气形成条件及勘探实践[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 26-39.
Zou Caineng, Dong Dazhong, Yang Hua, et al. Conditions of shale gas accumulation and exploration practices in China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 26-39.
- [23] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 322-331.
Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 322-331.
- [24] 张顺, 陈世悦, 谭明友, 等. 东营凹陷西部沙河街组三段下亚段泥页岩沉积微相[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 633-645.
Zhang Shun, Chen Shiyue, Tan Mingyou, et al. Characterization of sedimentary microfacies of shale in the lower third sub-member of Shahejie Formation, western Dongying Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 633-645.
- [25] 郝运轻, 谢忠怀, 周自立, 等. 非常规油气勘探领域泥页岩综合分类命名方案探讨[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 16-19.
Hao Yunqing, Xie Zhonghuai, Zhou Zili, et al. Discussion on multi-factors identification of mudstone and shale[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 16-19.
- [26] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 775-782.
Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Characteristics and significance of mineral compositions of Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas reservoir in the southern margin of Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 775-782.
- [27] 鄢继华, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 基于 X 射线衍射数据的细粒沉积

- 岩石定名方法与应用[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(1): 48-54.
- Yan Jihua, Pu Xiugang, Zhou Lihong, et al. Naming method of fine-grained sedimentary rocks on basis of X-ray diffraction data [J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(1): 48-54..
- [28] Schieber J. Facies and origin of shales from the mid-Proterozoic Newland Formation, Belt Basin, Montana, USA [J]. Sedimentology, 1989, 36(2): 203-219.
- [29] 邓宏文, 钱凯. 深湖相泥岩的成因类型和组合演化[J]. 沉积学报, 1990, 8(3): 1-21.
- Deng Hongwen, Qian Kai. The genetic types and association evolution of deep lacustrine facies mudstones [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(3): 1-21.
- [30] 谢宗奎. 柴达木台南地区第四系细粒沉积岩相与沉积模式研究[J]. 地学前缘, 2009, 16(5): 245-250.
- Xie Zongkui. Research on the Quaternary fine-fraction lithofacies and sedimentation model in Tainan Area, Qaidam Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(5): 245-250.
- [31] 马文辛, 刘树根, 黄文明, 等. 四川盆地周缘筇竹寺组泥页岩储层特征[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2012, 39(2): 182-189.
- Ma Wenxin, Liu Shugen, Huang Wenming, et al. Mud shale reservoirs characteristics of Qiongzhusi Formation on the margin of Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu university of technology: Science & Technology Edition, 2012, 39(2): 182-189.
- [32] 张顺, 陈世悦, 崔世凌, 等. 东营凹陷半深湖—深湖细粒沉积岩岩相类型及特征[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(5): 9-17.
- Zhang Shun, Chen Shi yue, Cui Shiling, et al. Characteristics and types of fine-grained sedimentary rocks lithofacies in semi-deep and deep lacustrine, Dongying Sag [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences, 2014, 38(5): 9-17.
- [33] 王敏, 朱家俊, 余光华, 等. 罗家地区泥页岩岩相特征及测井分析技术[J]. 测井技术, 2013, 37(4): 426-431.
- Wang Min, Zhu Jiajun, Yu Guanghua, et al. The shale lithofacies and logging analysis techniques in LuoJia Area [J]. Well Logging Technology, 2013, 37(4): 426-431.
- [34] 张晋言. 泥页岩岩相测井识别及评价方法[J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2013, 35(4): 96-103.
- Zhang Jinyan. Shale lithofacies logging identification and evaluation [J]. Journal of oil and gas technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute), 2013, 35(4): 96-103.
- [35] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 页岩脆性的室内评价方法及改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1680-1685.
- Li Qinghui, Chen Mian, Jin Yan, et al. Indoor evaluation method for shale brittleness and improvement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1680-1685.
- [36] Rickman R, Mullen M J, Petre J E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale [R]. SPE 115258, 2008: 1-11.
- [37] 郭天魁, 张士诚, 葛洪魁. 评价页岩压裂形成缝网能力的新方法[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 947-954.
- Guo Tiankui, Zhang Shicheng, Ge Hongkui. A new method for evaluating ability of forming fracture network in shale reservoir [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 947-954.
- [38] Goktan R M, Yilmaz N G. A new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting [J]. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2005, 105: 727-733.
- [39] 郭海萱, 郭天魁. 胜利油田罗家地区页岩储层可压性实验评价[J]. 石油实验地质, 2013, 35(3): 339-346.
- Guo Haixuan, Guo Tiankui. Experimental evaluation of crushability of shale reservoirs in LuoJia area, Shengli Oilfield [J]. Petroleum geology and experiment, 2013, 35(3): 339-346.
- [40] 赵金洲, 任岚, 胡永全. 页岩储层压裂缝成网延伸的受控因素分析[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(1): 1-9.
- Zhao Jinzhou, Ren Lan, Hu Yongquan. Controlling factors of hydraulic fractures extending into network in shale formations [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2013, 35(1): 1-9.
- [41] 董宁, 许杰, 孙赞东, 等. 泥页岩脆性地球物理预测技术[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(增刊1): 69-74.
- Dong Ning, Xu Jie, Sun Zandong, et al. Shale brittleness prediction by geophysical methods [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(Suppl.1): 69-74.
- [42] 刁海燕. 泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 3300-3306.
- Diao Haiyan. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale reservoir [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(9): 3300-3306.
- [43] 李钜源. 东营凹陷泥页岩矿物组成及脆度分析[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 616-620.
- Li Juyuan. Analysis on mineral components and frangibility of shales in Dongying Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 616-620.
- [44] 陈吉, 肖贤明. 南方古生界3套富有机质页岩矿物组成与脆性分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 822-826.
- Chen Ji, Xiao Xianming. Mineral composition and brittleness of three sets of Paleozoic borganic-rich shales in China South area [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 822-826.
- [45] 唐颖, 邢云, 李乐忠, 等. 页岩储层可压裂性影响因素及评价方法[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 356-363.
- Tang Ying, Xing Yun, Li Lezhong, et al. Influence factors and evaluation methods of the gas shale fracability [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 356-363.
- [46] 袁俊亮, 邓金根, 张定宇, 等. 页岩气储层可压裂性评价技术[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 523-527.
- Yuan Junliang, Deng Jingen, Zhang Dingyu, et al. Fracability evaluation of shale-gas reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 523-527.

(本文编辑: 李在光)