

文章编号: 1006-6616 (2013) 04-0377-08

# 致密砂岩储层构造裂缝形成机制及 定量预测研究进展

徐会永<sup>1</sup>, 冯建伟<sup>2</sup>, 葛玉荣<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学期刊社, 山东 青岛 266580;

2. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

3. 中国石油测井有限公司, 新疆 哈密 735200)

**摘要:** 致密砂岩裂缝性储层已逐渐成为非常规油气资源勘探开发的重点, 构造裂缝形成机制研究及定量预测也相应成为热点问题。从构造地质学和地质力学角度对目前的裂缝研究方法进行系统分析, 并对含微裂隙的岩石损伤力学实验分析、复合地层本构关系及破裂准则的建立以及不同应力场作用下裂缝参数的定量表征方法进行详细对比后认为, 裂缝的产生、裂缝的位置和方向以及裂缝参数的量化是实现裂缝准确预测的关键。今后裂缝研究的发展方向主要有 3 个, 即基于构造地质学和岩石损伤力学的宏观野外观察和微观室内试验相结合研究裂缝形成机制, 考虑多重影响因素并基于能量转换理论的复合岩石破裂准则建立, 基于精细构造地质模型的有限元数值模拟实现各期应力场作用下裂缝参数的三维定量表征。

**关键词:** 致密砂岩储层; 构造裂缝; 形成机制; 定量预测; 非常规油气

**中图分类号:** P542; P553

**文献标识码:** A

## 0 引言

随着中国油气资源勘探开发逐渐由东部向西部、由常规储层向非常规储层转变, 致密气、页岩气和煤层气成为国家“十二五”规划后的开发重点<sup>[1]</sup>。很多学者认为在致密气、页岩气和煤层气 3 种非常规天然气中, 应该优先发展致密气<sup>[2-3]</sup>。致密气资源量数据相当可靠、开发致密气技术较成熟、致密气的分布与常规气在很多地方重叠、基础设施建设成本较低<sup>[3]</sup>, 因此致密气的开发前景比页岩气更明朗。中国石化已启动鄂尔多斯致密油气增储上产会战<sup>[3]</sup>。此外, 来自国土资源部的数据显示, 2011 年全国天然气产量为  $1011.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[4]</sup>, 致密气产量约为  $350 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[3]</sup>, 约占全国天然气总产量的三分之一。

非常规气藏开发有很多相似之处, 如都需要打水平井和丛式井、都需要压裂工艺等。国内已基本掌握了致密砂岩油气的开发配套技术, 有些技术已达国际先进水平。但大规模开发不能照搬国外模式, 还需要通过有的放矢的基础研究和工程技术的先导性试验, 提出适合中

收稿日期: 2013-03-02

基金项目: 山东省博士后基金项目“基于应力场模拟的低渗透砂岩储层裂缝多参数定量建模”(201003104)

作者简介: 徐会永 (1977-), 男, 汉族, 山东庆云人, 副编审, 博士, 主要从事沉积学及石油地质学等方面的研究及科技论文编辑工作。E-mail: xhy7714@upc.edu.cn

国地质特点的技术方法,尤其是针对裂缝性致密砂岩气藏。总体看,裂缝性致密气藏仍处于早期勘探开发阶段。

中国致密砂岩气分布广阔,主要分布在四川、鄂尔多斯、渤海湾、松辽、塔里木、柴达木及准噶尔等盆地,以塔里木库车凹陷为代表的深层低孔低渗致密砂岩储层最为典型。由于多期的构造运动以及典型的陆相沉积特点,往往会形成裂缝性致密砂岩气藏,多期网状构造缝作为主要的渗流通道,分布规律有着极强的复杂性。因此,搞清裂缝的分布规律并进行空间的准确定量预测一直是地质学家和油藏工程师追求的目标,近些年来引起了国内外地质学的高度关注。

## 1 裂缝预测方法及实现的关键

裂缝性储层具有复杂性,目前还缺乏有效的定量表征裂缝的方法。20世纪60年代,美国和中东地区发现天然裂缝后,国内外学者曾尝试过多种解决此类问题的途径,主要有:从构造特征入手研究天然地下储层裂缝,并探讨构造主曲率与裂缝发育的关系;建立裂缝岩体力学模型,应用构造应力场模拟技术,根据岩石破裂准则和应变能密度进行裂缝参数定量化表征及预测<sup>[5]</sup>;应用地球物理资料通过提取多种属性进行裂缝识别和预测;根据岩心裂缝实测和成像测井解释数据,应用多元统计方法和随机插值法建立离散裂缝网络模型(DFN)进行裂缝空间分布规律描述;基于地层主曲率和开发动态资料相结合的裂缝综合预测方法;用分形分维方法半定量预测储层中不同尺度裂缝的空间分布<sup>[6]</sup>。

以上方法都不同程度地推动了裂缝研究的快速发展,但最终的描述和预测精度都达不到油气勘探开发的要求,究其原因主要有:常常简化地下地质情况,采用同向均质地力力学模型,未能在明确裂缝发育的宏观和微观主控因素的基础上建立针对含泥质软弱夹层的复合岩石破裂准则;常常简化、弱化裂缝形成的力学作用,未能剖析不同期次构造活动对早期缝网的改造影响并建立一个合理的力学模型。归根结底,构造应力作为裂缝形成和发育的直接驱动力,是外因,地层本身的结构和组合是内因,只有将两者有效地结合起来,从地质力学的角度,详细剖析它们之间的复杂耦合关系,才是实现砂岩储层裂缝参数全局化精确定量描述的有效途径,也是必然的发展趋势。

## 2 脆性砂岩储层裂缝研究

目前构造裂缝定量表征要解决的关键问题有3个:①在什么样的应力作用下才能产生裂缝;②如何确定裂缝的起始位置和发育方向<sup>[7]</sup>;③如何确定裂缝的密度、开度等反映裂缝生成数量的参数。

裂缝是岩石破裂的结果,已有的基于岩石强度假说的破裂准则包括单剪强度准则、双剪强度准则、三剪强度准则、应变能密度准则和最大张应力强度准则,尤以描述岩石宏观破裂的库仑-莫尔广义单剪准则和从微观机理出发的格里菲斯广义最大张应力准则使用最广。有研究者对格里菲斯准则进行修正后提出了考虑中间主应力的三维格里菲斯准则,但是修正的格里菲斯理论在压应力时才有实际意义,很接近库仑-莫尔理论,且只有当压缩拉伸强度比近于8或12时,理论与实验结果才吻合较好<sup>[7]</sup>。

岩石破裂准则不仅能够解释岩石破裂产生裂缝的机制,也可以判断裂缝的初始方位,解

决裂缝定量表征的关键问题。对于上述裂缝定量表征的第③个问题,有学者结合岩石破裂准则、能量法以及多元统计法对裂缝开度和密度进行量化<sup>[7]</sup>。Price将岩石中裂缝数量与最初储存于岩石中的应变能联系起来,认为具有相对高值应变能的岩石要比相同厚度、具有低值应变能的岩石具有更多的裂缝<sup>[8]</sup>。唐湘蓉等<sup>[9]</sup>从裂缝形成的外因——古构造应力场出发,根据弹性力学理论,利用连续介质有限元数值模拟法和岩石破裂准则,研究某古潜山储层裂缝的方位、密度分布。石胜群<sup>[10]</sup>、唐永等<sup>[11]</sup>应用三维构造应力场数值模拟技术,运用岩石断裂力学理论,进行构造裂缝发育密度与能量值之间的定量关系研究,较好地描述了泥岩、泥灰岩裂缝储层发育及分布规律。尤广芬<sup>[12]</sup>利用三维有限元模拟应力场的结果,根据岩石的张破裂准则和剪破裂准则,通过地层综合破裂值评价指标和岩石形变能量值建立了裂缝密度的数学模型。戴俊生课题组在国内杂志上发表了有关基于应力场模拟进行低渗透砂岩裂缝定量预测的文章,使用库仑-莫尔破裂准则和格里菲斯破裂准则相结合对应力计算结果进行判别,依据能量守恒和应变能密度对裂缝发育程度进行预测<sup>[13-15]</sup>。显然,基于这一系列的破裂准则可以将裂缝的定量表征或预测做到半定量化和定量化,而且考虑了现今应力场对早期裂缝的改造影响,对于脆性岩层已经足够。但这毕竟是在一定假设和条件简化的基础上建立的,实际地质情况显示,即使是厚层致密砂岩储层中也存在一系列的软弱的泥质隔夹层,这些隔夹层的存在或多或少会发生一定的塑性变形,尤其是在砂岩、泥岩互层的情况下适合于选择复合岩石破裂准则。同时存在于砂岩地层中的一系列先期微裂缝或粒内缝加速了岩石的破坏进程,格里菲斯破裂准则正是从微观机理出发,成为断裂力学的经典理论,但它是以张性破裂为前提,因此,仍需要作相应的改进。

### 3 复合砂泥储层裂缝研究

岩石受地质构造运动的影响其组织结构极度不均匀,使均匀连续假设与实际情况并不相符。随着非线性科学的迅猛发展,岩石力学的研究融合了损伤力学、断裂力学、经典弹塑性力学、物理学、信息论等学科,使其逐渐超越了经典固体力学的框架,岩石强度理论的研究也逐渐从古典强度理论、广义强度理论等经典强度理论发展到考虑了断裂、损伤过程的强度理论,从宏观唯象研究发展到跨尺度多层次的理性研究<sup>[16]</sup>。20世纪70年代后,损伤力学、细观力学、强度理论研究进入新的阶段。许多学者对岩石的损伤进行了大量研究,建立了宏观损伤模型,如Marigo脆性和疲劳损伤模型、Karlcinovic连续损伤模型、Supartono和Sidoroff的理想损伤模型、Bui和Ehrlacher的损伤模型、Frantziskonos和Desai的损伤模型、Cheng和Dusseault的损伤-空隙压力耦合连续统模型、Kawamoto和Ichikawa的节理岩体损伤模型、周维垣的节理岩体弹脆性损伤模型、朱维申的裂隙岩体弹塑性损伤断裂模型、谢和平的岩石损伤模型等<sup>[16-17]</sup>。这些连续损伤模型根据热力学理论和弹塑性理论对其损伤过程进行唯象分析,通过定义特定的损伤变量,建立损伤演化方程,再基于等效原理建立损伤本构方程。

对岩石而言细观模型(KLM)的建立还存在较大困难,进一步的损伤变量定义很困难,因此通过室内实验研究岩石在不同载荷下的微观损伤破坏行为是一种行之有效的方法。在这方面,Obert等首先将声发射技术用于岩石破坏预报,其后Scholz等就变形曲线、扩容、临界破坏与声发射的关系又做了大量的研究<sup>[17]</sup>。赵永红等<sup>[18]</sup>借助于扫描电镜,并采用分形几何理论,从微观上分析了岩体、软岩膨胀过程中岩石内部颗粒结构的变化规律以及裂纹随外

载增加时的变化过程。20世纪90年代以来,国内外学者利用X射线CT检测技术在岩石损伤力学特性研究方面取得了许多成果。Marigo等<sup>[19]</sup>最早利用X射线CT机研究了岩样的微裂纹和不均一结构,后来国内崔玉红等<sup>[20]</sup>对非贯通细观裂纹节理介质CT实验进行了数值模拟研究,得到了多个材料参数对细观损伤的影响,刘京红等<sup>[21]</sup>相继在前人的基础上基于CT图像完成了岩石破裂过程裂纹分形特征的研究。由于含泥质隔夹层的砂岩储层属于复合介质材料,在这方面,肖长富等<sup>[22]</sup>、赵平劳<sup>[23]</sup>通过大量的力学实验提出了复合岩石“渐进协调剪切破坏”假说,并建立了由剪切角、层间强度等参数决定的复合岩石强度准则以及单轴压缩层状岩石本构关系。阳友奎等<sup>[24]</sup>在假设各组分岩石遵循莫尔-库伦准则的基础上建立了复合岩石的破坏准则,所用“复合等效方法”考虑了层面对岩石力学参数的影响,能够精确地描述复合岩层的强度特性。在前人研究的基础上,国外的一些学者相继推导出了Von-Mises屈服准则下的弹塑性Cosserat连续体公式,并把它推广到压力相关 $J_2$ 流动准则情况,进一步发展了Cosserat连续体大应变模型<sup>[25-27]</sup>。国内相关专家也在此研究的基础上,从岩石破坏的微观角度,导出了各分层在不同围压、不同有效应力、不同参数及不同损伤演化过程下的三维非线性损伤本构方程。如:杨春和等<sup>[28]</sup>考虑了具有不同力学特性相邻岩层之间的微观位移协调,建立了宏观平均意义下的Cosserat介质扩展本构模型,为三维和非线性问题提供了理论基础。李银平等<sup>[29]</sup>通过围压实验发现泥岩夹层对岩体的破坏影响明显,泥岩夹层首先发生横向拉伸破坏,并伴随着应力-应变的“应力跌落”现象,主要是因为岩性界面附近泥岩体受到等效横向拉伸应力作用造成的。曾联波等<sup>[30]</sup>通过岩石力学实验和声发射实验,证实了在平面上不同方向岩石力学性质各向异性的存在,是影响不同时期不同组系裂缝发育差异的主要原因。

可见,对于单层和层状复合地层的破坏损伤模型的研究已经日渐成熟,同时考虑了软弱夹层对岩石整体破坏的负面影响以及由此产生的塑性变形和应力跌落现象,但得出的结果主要应用在岩体滑坡、隧道开挖、地面工程和航空航天材料的危险评估中,应用于复杂裂缝性砂岩油气藏裂缝预测的相关报道几乎没有,且实验或扫描都是在单轴力学实验的基础上进行,力的作用方式也仅仅是单向持续加载。总体来看,在3个方面仍需深入研究:一是岩石细观模型的建立,如何构筑一个包含必需信息的细观模型(KLM)来反映岩石的特征;二是细观模型与宏观整体的映射关系,如何通过平均化的方法将细观模型(KLM)推广到岩石整体;三是发挥计算机技术在数值计算、虚拟现实等方面的优势,促进复合岩石如含泥质夹层的致密砂岩强度理论分析及应用的新发展<sup>[31]</sup>。

## 4 多期裂缝的参数定量表征

尽管以损伤力学理论实现复杂地层裂缝演变过程及参数定量表征已具备了大量的研究基础,但如何在此基础上考虑不同构造期次构造应力场对前期裂缝的改造影响并将其量化是一项艰巨的任务。前期工作均是在“古应力场产生裂缝,现今应力场仅改造裂缝”前提下开展的,即从大量的野外观察和实验发现现今应力实际上是古应力产生断裂后的残余应力,是以当前井点测试值为前提的,其强度远远达不到岩石的破裂条件,但在现今应力状态下,裂缝壁面承受的剪应力和压应力改变着裂缝的开度,进而改变其渗流特征。在经典无限长平行板裂缝渗流模型中,开度对渗透率有较大影响。研究者考虑单裂隙岩体法向应力对裂缝开度的影响,建立了反映法向应力与裂缝渗透率耦合的经验公式。Barton等<sup>[32]</sup>除考虑裂缝面

正应力的影响外,还考虑了剪应力效应,因此,目前已明确裂缝开度 $b$ 的大小受应力和应变控制,若不考虑裂缝壁内流体化学反应,则应力-应变和裂缝开度成较好的函数关系。Jing等<sup>[33]</sup>发展了Barton的理论,并将现今应力场对裂缝参数的影响从二维扩展到三维。赵延林等<sup>[34]</sup>通过进行三维压力作用下渗流规律的研究,得到三维应力作用下粗糙单裂缝渗流特性与应力耦合公式,但是限制了受力方向,因而不具有通用性。

此后,吴时国等<sup>[35]</sup>采用3DMove软件从构造力学演变的角度建立三维裂缝模型,通过对地层的构造发育历史进行反演,计算和分析了单元体的渗透率和渗透率各向异性特征,但假设条件过多,忽略了三维体强度参数的各向异性,且只考虑了古应力及应变量的变化,存在一定局限性。因此,进一步探讨多期次应力场与裂缝参数之间的定量化关系,并建立多因子协调作用下的复合砂岩储层破裂准则和有效的力学模型是实现准确裂缝预测的重点。

## 5 今后发展方向

裂缝的形成机理和参数的定量精确表征是石油地质学的前沿性课题。随着研究手段和研究方法的不断丰富和完善,裂缝研究方面的难点将不断得到解决,并能有效地运用于工程实践和致密砂岩储层的油气勘探开发中。由此总结,今后裂缝研究的发展重点还需紧紧围绕3个方向:①紧密依托构造地质学、储层地质学理论,在“构造应力是裂缝形成外因,地层结构是裂缝形成内因”的思路指导下,从应力的角度入手,深入分析构造-沉积耦合效应对裂缝形成发育的控制作用;②充分利用野外考察和先进的室内试验手段,从宏观和微观的角度,基于岩石损伤力学理论,深入研究微裂缝从产生、发育到改造的微观损伤演化过程,建立岩性差异、岩性界面、应力强度、应力速率共同影响作用下的非线性复合岩石多级破裂准则和本构关系;③充分利用先进的计算机模拟技术,基于能量转换理论,考虑裂缝产生的表面能、塑性耗散能、剪切缝摩擦能等多种能量的转换关系,建立应力、应变和裂缝参数之间的线性、非线性定量关系模型,实现裂缝三维空间展布精确描述,最终指导裂缝性致密砂岩气藏的勘探开发部署。

## 参 考 文 献

- [1] 张雨晴,王志章.致密碎屑岩裂缝性储层预测方法综述[J].科技导报,2010,28(14):109~111.  
ZHANG Yu-qing, WANG Zhi-zhang. A review of prediction methods for reservoirs of tight fractured clastic rock [J]. Science & Technology Review, 2010, 28(14): 109~111.
- [2] 谢克昌.未来5—10年是非常规天然气发展关键期[EB/OL].(2012-03-19).<http://energy.people.com.cn/GB/17425065.html>.
- [3] 王军善.致密气开发应领跑非常规天然气[EB/OL].(2012-05-03).[http://www.crd.net.cn/2012-05/03/content\\_5161615.html](http://www.crd.net.cn/2012-05/03/content_5161615.html).
- [4] 国土资源部.去年中国天然气产量首破千亿立方米[EB/OL].(2012-02-23).<http://finance.chinanews.com/ny/2012/02-23/3692395.html>.
- [5] 王军,戴俊生,冯建伟,等.乌夏断裂带二叠系火山岩-碎屑岩混杂地层裂缝预测[J].中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(4):19~20.  
WANG Jun, DAI Jun-sheng, FENG Jian-wei, et al. Fracture prediction of Permian volcanic-clastic rock formation in Wuxia fault belt [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2010, 34(4): 19~20.

- [6] 王建华. DFN 模型裂缝建模新技术 [J]. 断块油气田, 2008, 15 (6): 55~57.  
WANG Jian-hua. DFN model: A new modelling technology for fracture [J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2008, 15 (6): 55~57.
- [7] 李明. 准噶尔盆地乌夏地区二叠系储层裂缝研究 [D]. 东营: 中国石油大学 (华东), 2008: 2~5.  
LI Ming. Study on the Permian reservoir tectoclase in Wuxia area of Junggar Basin [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2008: 2~5.
- [8] 孙业恒. 史南油田史深 100 块裂缝性砂岩油藏建模及数值模拟研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2008.  
SUN Ye-heng. Study on reservoir modeling and numerical simulation for fractured sandstone reservoir in block Shishen-100 in Shinan Oilfield [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2008.
- [9] 唐湘蓉, 李晶. 构造有限元数值模拟在裂缝预测中的应用 [J]. 特种油气藏, 2005, 12 (2): 25~26.  
TANG Xiang-rong, LI Jing. Application of finite element numerical simulation of tectonic stress field in fracture prediction [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2005, 12 (2): 25~26.
- [10] 石胜群. 三维构造应力场数值模拟技术预测泥岩裂缝研究应用 [J]. 中国西部科技, 2008, 27: 37~39.  
SHI Sheng-qun. Study and application of mudstone fracture prediction by 3D tectonic stress field numerical simulation technology [J]. Science and Technology of West China, 2008, 27: 37~39.
- [11] 唐永, 梅廉夫, 陈友智, 等. 川东北宣汉—达县地区构造应力场对裂缝的控制 [J]. 地质力学学报, 2012, 18 (2): 120~139.  
TANG Yong, MEI Lian-fu, CHEN You-zhi, et al. Controlling of structural stress field to the fractures in Xuanhan-Daxian region, northeastern Sichuan Basin, China [J]. Journal of Geomechanics, 2012, 18 (2): 120~139.
- [12] 尤广芬. 储层裂缝预测的三维有限元数值模拟研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2010: 1~3.  
YOU Guang-fen. Reservoir fracture prediction of three-dimensional finite element numerical simulation [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010: 1~3.
- [13] 戴俊生, 冯建伟, 李明, 等. 砂泥岩间互地层裂缝延伸规律探讨 [J]. 地学前缘, 2011, 18 (2): 277~283.  
DAI Jun-sheng, FENG Jian-wei, LI Ming, et al. Discussion on the extension law of structural fracture in sand-mud interbed formation [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18 (2): 277~283.
- [14] 冯建伟, 戴俊生, 马占荣, 等. 低渗透砂岩裂缝孔隙度、渗透率与应力场理论模型研究 [J]. 地质力学学报, 2011, 17 (4): 303~311.  
FENG Jian-wei, DAI Jun-sheng, MA Zhan-rong, et al. Theoretical model about fracture porosity, permeability and stress field in the low-permeability sandstone [J]. Journal of Geomechanics, 2011, 17 (4): 303~311.
- [15] 戴俊生, 张继标, 冯建伟, 等. 高邮凹陷真武断裂带西部低级序断层发育规律预测 [J]. 地质力学学报, 2012, 18 (1): 11~21.  
DAI Jun-sheng, ZHANG Ji-biao, FENG Jian-wei, et al. Development law and prediction of the lower-order faults in the west of Zhenwu fault zone in Gaoyou sag [J]. Journal of Geomechanics, 2012, 18 (1): 11~21.
- [16] 邱战洪. 非线性动力损伤力学理论及其数值分析模型 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 14~19.  
QIU Zhan-hong. Theory of non-linear dynamic damage mechanics and numerical modeling [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005: 14~19.
- [17] 谢和平, 彭瑞东, 周宏伟, 等. 基于断裂力学与损伤力学的岩石强度理论研究进展 [J]. 自然科学进展, 2004, 14 (10): 1086~1090.  
XIE He-ping, PENG Rei-dong, ZHOU Hong-wei, et al. Progress in strength theory of rocks based on fracture mechanics and damage mechanics [J]. Progress in Natural Science, 2004, 14 (10): 1086~1090.
- [18] 赵永红, 熊春阳, 戴天环, 等. 细砂岩变形破坏过程的实验研究 [C] // “力学 2000” 学术大会论文集. 北京: 气象出版社, 2000: 351~352.  
ZHAO Yong-hong, XIONG Chun-yang, DAI Tian-huan, et al. Experimental study on deformation damage process of fine sandstone [C] // Proceedings of “Mechanics 2000” Conference. Beijing: Meteorology Press, 2000: 351~352.
- [19] Marigo J J. Modelling of brittle and fatigue damage for elastic materials by growth microvoids [J]. Engineering Fracture

Mechanics, 1985, 21 (4): 861.

- [20] 崔玉红, 周世才, 陈蕴生. 非贯通细观裂纹节理介质 CT 实验的数值模拟及影响参数讨论 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (3): 631 ~ 633.  
CUI Yu-hong, ZHOU Shi-cai, CHEN Yun-sheng. Numerical analysis of meso-crack and meso-damage laws and its influential parameters for non-interpenetrated jointed media based on experiment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (3): 631 ~ 633.
- [21] 刘京红, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 基于 CT 图像的岩石破裂过程裂纹分型特征分析 [J]. 河北农业大学学报, 2011, 34 (4): 104 ~ 107.  
LIU Jing-hong, JIANG Yao-dong, ZHAO Yi-xin, et al. Fractal characteristic analysis of rock breakage process based on CT test images [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2011, 34 (4): 104 ~ 107.
- [22] 肖长富, 邱贤德. 复合岩石在单向和三轴压缩应力状态下的强度和变形特征的探讨 [J]. 重庆大学学报, 1983, 6 (3): 24 ~ 26.  
XIAO Chang-fu, QIU Xian-de. Investigation of strength and deformation of composite rock in uniaxial and triaxial compression test [J]. Journal of Chongqing University, 1983, 6 (3): 24 ~ 26.
- [23] 赵平芳. 层状岩体抗弯刚度及其软弱夹层效应 [J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1992, 28 (8): 150 ~ 155.  
ZHAO Ping-lao. The bending rigidity of bedded rock mass and effect of weak intercalations [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 1992, 28 (8): 150 ~ 155.
- [24] 阳友奎, 蒋为民. 复合岩石的破坏准则 [J]. 重庆大学学报, 1990, 13 (6): 20 ~ 25.  
YANG You-kui, JIANG Wei-min. A failure criterion of composite rock [J]. Journal of Chongqing University, 1990, 13 (6): 20 ~ 25.
- [25] SUJATHA V, CHANDRA Kishen J M. Energy release rate due to friction atbi-material interface in dams [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2003, 129 (7): 793 ~ 800.
- [26] LABUZ J F, DAIL S T. Residual strength and fracture energy from plane-strain testing [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126 (10): 882 ~ 889.
- [27] Lundberg B. A split Hopkinson bar study of energy absorption in dynamic rock fragmentation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1976, 13 (6): 187 ~ 197.
- [28] 杨春和, 李银平. 互层盐岩体的 Cosserat 介质扩展本构模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (23): 4226 ~ 4232.  
YANG Chun-he, LI Yin-ping. Expanded Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (23): 4226 ~ 4232.
- [29] 李银平, 杨春和. 层状盐岩体的三维 Cosserat 介质扩展本构模型 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (4): 509 ~ 512.  
LI Yin-ping, YANG Chun-he. Three-dimensional expanded Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (4): 509 ~ 512.
- [30] 曾联波, 赵继勇, 朱圣举, 等. 岩层非均质性对裂缝发育的影响研究 [J]. 自然科学进展, 2008, 18 (2): 216 ~ 219.  
ZENG Lian-bo, ZHAO Ji-yong, ZHU Sheng-ju, et al. Impact of rock anisotropy on fracture development [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18 (2): 216 ~ 219.
- [31] 金峰, 胡卫, 张冲, 等. 考虑弹塑性本构的三维模态变形体离散元方法断裂模拟 [J]. 工程力学, 2011, 28 (5): 1 ~ 4.  
JIN Feng, HU Wei, ZHANG Chong, et al. A fracture simulation using 3-D mode distinct element method (3MDEM) with elastoplastic constitutive model [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28 (5): 1 ~ 4.
- [32] Barton N, Bandis S, Bakhtar K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985, 22 (3): 121 ~ 140.
- [33] JING Z, WILLS-Richards J, WATANABE K, et al. A new 3-D stochastic model for HDR geothermal reservoir in fractured crystalline rock [M]. France: Strasbourg, 1998: 28 ~ 30.

- [34] 赵延林, 赵阳升, 郜保平. 裂隙岩体的固气耦合模型及其在岩盐储气库中的应用 [J]. 矿业研究与开发, 2006, 26 (2): 38 ~ 40.  
ZHAO Yan-lin, ZHAO Yang-sheng, XI Bao-ping. Coupling mathematical model of solid and gas for fractured rock and its application in rock salt cavern gas storage [J]. Mining Research and Development, 2006, 26 (2): 38 ~ 40.
- [35] 吴时国, 王秀玲, 季玉新, 等. 3Dmove 构造裂缝预测技术在古潜山的应用研究 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34 (9): 818 ~ 824.  
WU Shi-guo, WANG Xiu-ling, JI Yu-xin, et al. Application of 3Dmove structural fracture Prediction technology in paleo-buried hill [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004, 34 (9): 818 ~ 824.

## RESEARCH PROGRESS ON MECHANISM AND QUANTATIVE PREDICTION OF STRUCTURAL FRACTURES IN TIGHT-SAND RESERVOIRS

XU Hui-yong<sup>1</sup>, FENG Jian-wei<sup>2</sup>, GE Yu-rong<sup>3</sup>

(1. Periodical Office of China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China;

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

3. China Petroleum Logging Co. LTD., Hami 735200, Xinjiang, China)

**Abstract:** As fractured tight-sand reservoirs was thought to be an important type for exploration and production of unconventional oil and gas resources at present, understanding mechanism of structural fracture networks in reservoirs accordingly is thought to be the research focus. From sides of structural geology and rock mechanics to make comprehensive analysis, such as comparisons of rock damage mechanics experiments, constitutive relation of composite formation and its failure criteria, and quantitative method for predicting fracture distribution, it is shown that generation, location, orientation of fractures and quantification are the keys to predict fracture networks. Then it is shown that there exist three main directions for fracture research, including fracture mechanism study using structural geology, damage mechanics and laboratory experiments, composite rock failure criterion based on energy conservation law considering multiple factors, and fracture parameters of three-dimensional quantitative characterization using finite element numerical method based on fine structure model.

**Key words:** tight-sand reservoir; structural fracture; mechanism; quantitative prediction; unconventional oil and gas