

页岩储层破裂特征及 裂缝分布预测

Failure Characteristics in Shale Reservoirs and the
Prediction of Fractures Distribution

—— 邬忠虎 左宇军 易同生 孙文吉斌 伍耀文 / 著

非外借

 科学出版社

国家自然科学基金面上项目 (No. 51574093、No. 51774101)

国家科技支撑计划项目 (No. 2012BAB08B06)

贵州省应用基础研究计划重大项目 (JZ 字[2014]2005)

贵州省高层次创新型人才培养项目 (合同编号: 黔科合人才 (2016) 4011 号)

贵州大学培育项目 (黔科合平台人才 [2017] 5788-49)

贵州省土木工程一流学科建设项目 (项目编号: QYNYL [2017] 0013)

页岩储层破裂特征 及裂缝分布预测

**Failure Characteristics in Shale Reservoirs and the
Prediction of Fractures Distribution**

邬忠虎 左宇军 易同生 孙文吉斌 伍耀文 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以数值模拟和物理试验为主要研究手段,对贵州凤冈三区块下寒武统牛蹄塘组页岩储层的破裂模式、孔隙结构特征、裂缝发育特征、孔喉孔径分布特征、裂缝发育主控因素及该区域的裂缝分布定量预测开展了系统研究。根据多期叠加理论,结合断裂力学、岩石力学和地质力学理论建立了多期次构造应力场数值模拟与储层裂缝分布预测方法。研究成果可有效指导贵州黔北地区页岩气压裂开采方案的设计及水平井的部署。

本书可供土木工程、石油工程、采矿工程等领域的专业技术人员和高等院校的师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

页岩储层破裂特征及裂缝分布预测=Failure Characteristics in Shale Reservoirs and the Prediction of Fractures Distribution / 邬忠虎等著. —北京: 科学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-03-056728-4

I. ①页… II. ①邬… III. ①页岩—裂隙储层集—分布—预测—贵州IV. ①P618.130.206.273

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第048206号

责任编辑: 李 雪 武 洲 / 责任校对: 王萌萌

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年11月第一版 开本: 720×1000 1/16

2018年11月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 232 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

目前,随着常规油气资源量的减少,页岩气作为一种非常规能源越来越受到人们的广泛关注。页岩气储量大、分布广,是一种清洁高效的非常规天然气,被认为是常规能源的理想替代者,具有重要的战略地位。页岩既是储层也是烃源岩,其储集空间分为裂缝型、孔隙型和裂缝孔隙复合型,其中裂缝型占据重要地位。

贵州凤冈三区块是国土资源部第二轮页岩气探矿区出让进行招标的区块之一,具有良好的页岩气勘探开发前景。在页岩气勘探开发中,保存条件好的裂缝发育区往往是页岩气的甜点区域。页岩储层中的裂缝控制着储层的含气性、渗透性,是页岩游离气的重要储集空间之一,为页岩气勘探和开发中的井网布局、水平井的设计部署、水力压裂设计和优化注水方案等提供重要的依据,具有重要的理论意义和工程价值。

本书基于贵州凤冈三区块下寒武统牛蹄塘组页岩储层开展页岩储层矿物岩石学、储集物性、岩石力学等特征分析,裂缝发育特征描述,查明裂缝发育主控因素,结合地质力学、岩石力学、弹性力学和断裂力学理论建立多期次构造应力场作用下页岩储层裂缝分布预测方法。研究成果对贵州黔北地区页岩气压裂开采具有重要的指导作用。从宏观到微观角度观察页岩储层裂缝发育特征,发现下寒武统牛蹄塘组页岩岩心裂缝发育,其中以构造裂缝为主,构造裂缝中张性裂缝所占比例大于剪切裂缝。由野外露头、岩心、显微镜和扫描电镜观测可知,下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝充填程度较高,通常微裂缝中最常见的充填物是方解石,其次还有少量石英和黄铁矿。

构造应力场、岩性和矿物组分、岩石力学性质及有机碳含量是控制页岩储层裂缝的重要因素,其中构造应力场是裂缝形成最重要的因素。页岩中脆性矿物如石英、方解石等含量越高,裂缝越发育;有机碳含量也与裂缝发育程度呈正相关关系。研究区燕山期和喜马拉雅期叠加后的应力场模拟结果表明,在断裂带附近,断裂端部和断裂交汇处应力水平较高,应力低值区分布在断裂与断裂之间。裂缝发育区($I_c > 1.11$)主要分布在:①何家坝断裂、随阳山断裂、党湾断裂、桃坪断裂和峰岩断裂;②断裂转折处及不同断裂相交处。裂缝相对发育区($1 < I_c < 1.11$)主要分布在鱼泉沟断裂、随阳山断裂西部、永和断裂、FC-1井西侧和峰岩断裂西部。其他地方属于裂缝不发育区($I_c < 1$),贵州凤冈三区块裂缝发育程度受断裂控制明显。贵州凤冈三区块下一步勘探的重点区域建议优先选择裂缝发育区。

本书第1章绪论部分主要指出研究对象的重要意义和国内外研究现状;第2

章主要介绍贵州凤冈三区块的区域地质背景；第3章分析研究区下寒武统牛蹄塘组页岩储层特征；第4章对FC-1井进行测井解释评价；第5章分析研究区下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝发育特征及主控因素；第6章对研究区构造应力场进行三维数值模拟分析；第7章对研究区页岩储层裂缝分布进行定量预测；第8章为结论。

本书是在国家自然科学基金面上项目(No. 51574093、No.51774101)、国家科技支撑计划项目(No. 2012BAB08B06)、贵州省应用基础研究计划重大项目(JZ字[2014]2005)、贵州省高层次创新型人才培养项目(合同编号:黔科合人才(2016)4011号)、贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5788-49)、贵州省土木工程一流学科建设项目(项目编号:QYNYL[2017]0013)的资助下完成的,在此,特表示衷心的感谢!

本书在撰写过程中得到了贵州省非常规天然气勘探开发利用工程研究中心有限公司、贵州省煤田地质局、贵州省天然气能源投资股份有限公司在资料收集、取样及试验方面提供的帮助,尤其是贵州省天然气能源投资股份有限公司的伍耀文工程师为本书提供了丰富的地质资料,在此表示深深的谢意!特别感谢澳大利亚纽卡斯尔大学王善勇教授,中国地质大学(北京)丁文龙教授,中国矿业大学(北京)孟召平教授,中国地质科学院地质力学研究所王宗秀研究员、张林炎副研究员,东北大学朱万成教授、杨天鸿教授、于庆磊副教授,内蒙古科技大学陈世江副教授对本书提供的指导和帮助!此外,感谢作者的师弟鹿重阳、许云飞对本书提出的意见和建议!

由于作者水平和经验有限,书中难免有不足之处,敬请广大读者批评指正!

作者

2018年1月于贵阳

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 页岩气勘探开发研究现状	3
1.2.2 页岩储层裂缝预测研究现状	4
1.2.3 页岩气储层特征研究现状	9
1.2.4 贵州页岩气研究现状	10
1.3 本书主要研究内容	12
1.4 本书主要研究成果和认识	14
第 2 章 区域地质背景	16
2.1 研究区概况	16
2.1.1 地理位置及交通	16
2.1.2 自然地理	17
2.1.3 社会经济状况	17
2.1.4 水文特征	21
2.1.5 气候条件和风土人情	21
2.2 区域地层特征	22
2.3 沉积背景	27
2.4 区域构造演化及特征	28
2.4.1 大地构造位置	28
2.4.2 区域构造单元划分	28
2.4.3 区域构造演化特征	31
2.4.4 地质构造特征	33
2.5 FC-1 井地质概况	40
2.5.1 FC-1 井钻探概况	40
2.5.2 地层划分及依据	45
2.6 地层对比	59
第 3 章 研究区下寒武统牛蹄塘组页岩储层特征	66
3.1 页岩储层矿物岩石学特征	66

3.2	页岩储层储集物性特征	68
3.2.1	物性特征	69
3.2.2	孔隙结构特征	70
3.3	页岩储层岩石力学特征	75
3.3.1	页岩巴西劈裂试验	76
3.3.2	单轴抗压试验	77
3.3.3	三轴全岩应力-应变-渗透性试验	78
3.3.4	数值试验	85
3.3.5	覆压下页岩应力敏感性试验	94
第4章	FC-1 井测井解释评价	107
4.1	成像测井分析与评价	108
4.1.1	测井原理及处理方法	108
4.1.2	成像测井应用	109
4.2	交叉偶极子阵列声波测井资料分析	120
4.2.1	交叉偶极子阵列声波仪器原理	120
4.2.2	交叉偶极子阵列声波测井资料处理	120
4.2.3	地应力大小及方向分析	125
4.2.4	脆性评价	127
4.2.5	气层识别	127
4.3	自然伽马能谱测井资料分析	129
4.3.1	自然伽马能谱测井概述	129
4.3.2	FC-1 井自然伽马能谱测井资料分析	129
第5章	研究区下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝发育特征及主控因素	135
5.1	宏观裂缝发育特征	135
5.1.1	野外露头裂缝发育特征	135
5.1.2	岩心裂缝发育特征	137
5.2	微观裂缝发育特征	138
5.2.1	薄片裂缝特征	138
5.2.2	扫描电镜下裂缝特征	139
5.3	页岩裂缝发育主控因素	140
5.3.1	构造应力场	140
5.3.2	岩性和矿物组分	141
5.3.3	岩石力学性质	142
5.3.4	有机碳含量	144

第 6 章 研究区三维构造应力场数值模拟	146
6.1 构造应力场有限元数值模拟原理	146
6.1.1 有限元法简介	146
6.1.2 有限元法模拟基本步骤	147
6.1.3 Abaqus 有限元软件介绍	148
6.2 构造复合叠加在地质构造分析中的应用	148
6.2.1 构造复合叠加概述	148
6.2.2 构造复合叠加的基本原理	148
6.2.3 构造复合叠加对油气控制作用	150
6.3 构造应力场三维有限元数值模拟计算	151
6.3.1 地质模型的建立	151
6.3.2 力学模型的建立	151
6.3.3 数学模型的建立	157
6.3.4 反演标准	159
6.4 研究区构造应力场分布特征	160
第 7 章 页岩储层裂缝分布定量预测	162
7.1 储层破裂的力学机制	162
7.1.1 莫尔-库仑强度准则	162
7.1.2 格林菲斯强度准则	163
7.2 页岩破裂判别系数研究	164
7.2.1 页岩剪切破裂判别	164
7.2.2 页岩张性破裂判别	164
7.2.3 页岩储层破裂综合判别	165
7.3 页岩储层裂缝发育程度定量预测	165
第 8 章 结论	167
参考文献	169

第1章 绪 论

1.1 引 言

目前,随着常规油气资源量的减少,页岩气作为一种非常规能源越来越受到人们的广泛关注(Curtis, 2002; Montgomery et al., 2005; Warlick, 2006; Jarvie et al., 2007; Pireh et al., 2015; Wang et al., 2016a; Wu et al., 2017)。页岩气是常规油气最现实的替代资源之一,具有重要的战略地位。近年来,许多国家和地区都已经加大对页岩气的勘探开发和研究力度,我国的页岩气资源丰富,不同学者对我国不同沉积盆地及盆地外的页岩分布区开展了页岩气地质评价与有利区预测等研究工作(聂海宽等, 2009a; Zou et al., 2010; 陈尚斌等, 2012; Ding et al., 2012; 陈吉和肖贤明, 2013; Ding et al., 2013; Jiu et al., 2013; Meng and Xian, 2013; Zeng et al., 2013a; 黄磊和申维, 2015; 王秀平等, 2015; Li et al., 2016; He et al., 2016, 2017; 朱炎铭等, 2016),取得了丰富的成果认识和良好的勘探效果。近期重庆焦石坝地区下志留统龙马溪组页岩气田的商业化开发表明,南方地区是我国页岩气勘探开发的重要战略地区(Yang et al., 2016; Hu et al., 2017)。2016年,中国地质调查局在贵州遵义开发的AY-1井取得了页岩气重大突破性成果,使我国南方复杂地质构造区和贵州页岩气勘探开发展现了光明前景。

根据《国务院关于进一步促进贵州经济社会又好又快发展若干意见》(国发〔2012〕2号),《国土资源部关于加强页岩气资源勘查开采和监督管理有关工作的通知》(国土资发〔2012〕159号),《国务院办公厅关于转发国土资源部等部门找矿突破战略行动纲要(2011—2020年)的通知》(国办发〔2011〕57号),《国土资源部关于构建地质找矿新机制的若干意见》(国土资发〔2010〕59号),贵州省委、省政府提出的《关于实施工业强省战略的决定》(黔党发〔2012〕12号),《贵州省工业十大产业振兴规划》(黔府发〔2010〕16号)的要求,页岩气是一种清洁高效的能源资源。加强页岩气勘查、开采,对提高我国能源资源保障能力,优化能源结构,改善生态环境,促进经济社会可持续发展具有重要的战略意义。《页岩气发展规划(2011—2015年)》提出:“国民经济和社会发展‘十二五’规划明确要求‘推进页岩气等非常规油气资源开发利用’,为大力推进页岩气勘探开发,增加天然气资源供应,缓解我国天然气供需矛盾,调整能源结构,促进节能减排,特制定本规划。本规划期限为2011年至2015年,展望到2015年。”《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》明确提出:“实施地质找矿战略工程,加大勘查

力度,实现地质找矿重大突破,形成一批重要矿产资源的战略接续区。建立重要矿产资源储备体系。”据此,国土资源部、国家发展和改革委员会、科学技术部、财政部同有关部门编制了《找矿突破战略行动纲要(2011—2010年)》,以石油、天然气、铀、铁、铜、铝、钾盐等重要矿产为重点,开展主要含油气盆地,重点成矿区带地质找矿工作,力争用8~10年的时间新建一批矿产勘查开发基地,重塑全国矿产勘查开发格局,为我国经济社会可持续发展提供有力支撑。实施找矿突破战略行动,是新形势下进一步增强矿产资源保障能力的有效途径,对全面建成小康社会宏伟目标的实现具有重要意义。充分发挥好贵州能源资源富集区的矿产资源优势,建设我国南方地区重要的战略资源支撑基地,大力实施工业强区战略,加快推进新型工业化进程,促进遵义地区社会经济又好又快、更好更快地发展,实现“强区升位、跨越发展”的战略目标,建立和完善地质找矿新机制,扎实推进国土资源部提出的地质找矿“358”目标:“三年有重大进展,五年有重大突破,八到十年重塑矿产勘查开发新格局”,加快实现地质找矿的重大突破。贵州省委、省政府紧紧抓住国家深入实施西部大开发战略和《国务院关于进一步促进贵州经济社会又好又快发展的若干意见》(国发〔2012〕2号)的历史机遇,以“加速发展、加快转型、推动跨越”为主基调,大力实施工业强省和城镇化带动战略,按照国土资源部“358”找矿突破战略行动总体部署和贵州省找矿突破战略计划,为建设全国重要的能源基地、资源深加工基地,确保与全国同步实现小康社会的宏伟目标,充分调动社会各方积极性,发挥好地勘单位找矿主力军作用,实现地质找矿重大突破,为贵州社会经济发展提供资源保障。

页岩既是储层也是烃源岩,其储集空间分为裂缝型、孔隙型和裂缝孔隙复合型,其中裂缝型占据重要地位(Guo et al., 2016; Wang et al., 2016b; Wu et al., 2017)。聂海宽等(2009a)认为裂缝在页岩气成藏中具有两方面的作用:一方面,裂缝是页岩气的运移通道和储集空间,有助于页岩气储层总含气量的增加;另一方面,如果裂缝尺寸过大,有可能导致页岩气散失,不利于油气保存。事实上,气藏对于保存条件要求比较高,一般在断裂影响范围内,裂缝比较发育,对气藏保存是相对不利的;而不靠近断裂的地方,在存在上覆盖层的情况下,裂缝发育区往往是甜点区域。Bowker(2007)和Montgomery等(2005)通过对Barnett页岩进行研究,认为在阿巴拉契亚盆地中处于裂缝发育带的地方,页岩气产量高,而在裂缝不发育的地方,页岩气产量低甚至不产气,表明页岩储层中页岩气含量高低与储层裂缝密切相关。吴礼明等(2011)对渝东南地区的海相页岩进行研究,结果表明裂缝是页岩储层储集物性的重要特性之一,其发育控制着页岩气储层的含气性、渗透性,页岩储层裂缝的研究已经成为页岩气勘探开发中的一项重要内容。Curtis(2002)和张金川等(2004)通过研究表明指出,目前发现的具有工业价值的页岩气藏裂缝都比较发育。

同时,页岩储层中的裂缝不仅为页岩气的赋存提供空间,同时也是页岩气渗

流的通道。页岩储层在构造应力作用下产生的构造裂缝是裂缝中最重要的一种类型,准确预测和评价页岩中构造裂缝的发育特征、分布规律,可对页岩气勘探和开发中的井网布局、水平井的设计部署、水力压裂设计和优化注水方案等提供重要的依据,具有重要的理论意义和工程价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 页岩气勘探开发研究现状

页岩气资源潜力巨大,在全球分布广泛。美国能源信息署(Energy Information Administration, EIA)(EIA, 2013)对全球14个主要页岩气产气区进行页岩气资源调查评估,估计全球可采页岩气资源量为 $187 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。我国页岩气可采资源量为 $36 \times 10^{12} \text{m}^3$,全球排名第一,其次是美国(方小美和陈明霜, 2011)。

1. 国外页岩气勘探开发研究现状

美国在1821年就开始了页岩气的开发,是世界上最早从事页岩气研究和勘探开发的国家,从美国第一口商业井完钻以来,页岩气有近200年的勘探开发历史。从20世纪70年代开始,美国政府积极推进页岩气产业,政府机构在资金、政策和价格方面积极支持页岩气勘探开发研究,鼓励页岩气的商业化开发。同时,随着钻完井技术及水力压裂技术的进步,页岩气的单井产量大大提高,页岩气开发逐步成为美国重要的勘探开发目标。2007~2017年,美国页岩气产量大幅度增加,几大产气页岩储层如密歇根(Michigan)盆地的Antrim页岩、圣胡安(San Juan)盆地的Lewis页岩、福特沃斯(Fort Worth)盆地的Barnett页岩、阿巴拉契亚(Appalachian)盆地的Ohio页岩和伊利诺伊(Illinois)盆地的New Albany页岩的页岩气产量在2013年达到 $3100 \times 10^8 \text{m}^3$ 、2014年达到 $3400 \times 10^8 \text{m}^3$,远远超过我国常规天然气的年产量。据美国能源信息署的最新预测,到2035年美国页岩气产量将提高49%(EIA, 2013)。

继美国之后,加拿大也开展了页岩气勘探开发工作,根据预测,蒙特尼(Montney)盆地和霍思河(Horn River)盆地作为加拿大两大主要页岩气产气盆地,其页岩气开采资源量为 $6.80 \times 10^{12} \text{m}^3$,且资源分布面积广,涉及的地质层主要包括侏罗系、白垩系、三叠系和泥盆系(World Energy Council, 2010)。根据美国能源信息署预测,加拿大页岩气产量2020年将超过 $625 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

2. 我国页岩气勘探开发进展

我国页岩气的研究工作起步较晚,但随着世界各国对页岩气的逐步重视,进入21世纪以后,我国页岩气的勘探开发工作已经逐步启动,并先后在很多地方布

置勘探工作。2020年,我国天然气供需差距预计为 $80 \times 10^8 \text{m}^3$ 。页岩气作为一种清洁能源,具有开采寿命长的优点,一旦突破形成规模产能,必将对缓解我国油气资源紧张的压力产生重大影响。据估算,2012年我国页岩气可采资源量约为 $26 \times 10^{12} \text{m}^3$,与美国($28 \times 10^{12} \text{m}^3$)大致相当。主要分布在我国南方、华北地区及塔里木海相盆地,以及北方大片陆相盆地。

2009年,国土资源部启动页岩气地质资源调查项目,对我国上扬子及滇黔桂地区、华北及东北地区、中下扬子及东南地区、西北地区四大地区(不含青藏地区)的页岩气资源进行评价,共优选出有利区108个,累计面积为 $111.49 \times 10^4 \text{km}^2$,潜在页岩气地质资源量为 $134.42 \times 10^{12} \text{m}^3$,可采资源量为 $25.08 \times 10^{12} \text{m}^3$ (不含青藏地区)。2011年,页岩气成为我国第172个矿种,国家对其制定了一系列鼓励扶持政策,为社会资金进入页岩气勘查开发领域提供了机会,有利于形成竞争局面,加快我国页岩气勘探开发进程。2011年6月,国土资源部在第一轮页岩气探矿区招标中拿出了4个区块共 $1.1 \times 10^4 \text{km}^2$ 进行公开竞标,陕西延长石油(集团)有限责任公司、中国石油化工集团公司(以下简称中石化)、中国石油天然气集团有限公司等企业参与竞标。2012年10月,国土资源部拿出20个区块进行公开招标,总面积约 $2 \times 10^4 \text{km}^2$ 。

2012年11月,中石化在重庆涪陵地区的页岩气勘探取得重大突破,JY-1井获得高产气流。通过研究认为涪陵地区页岩气有利区面积达到 4000km^2 ,该区页岩气丰度高、厚度大,是典型的海相页岩气。随后在2013年9月,国家能源局建立了涪陵国家级页岩气示范区。截至2013年,涪陵国家级页岩气示范区年产页岩气 $6 \times 10^8 \text{m}^3$ 。2014年,中石化宣布涪陵页岩气田进入商业化开发阶段,将在2017年建成百亿立方米的页岩气田。2015年,涪陵页岩气田新增页岩气储量 $2739 \times 10^8 \text{m}^3$,该区成为除北美外的最大页岩气田(郭旭升等,2014;天工,2015)。

1.2.2 页岩储层裂缝预测研究现状

页岩储层中的裂缝不仅是页岩气的储集空间,同时也是其渗流通道,天然裂缝的发育可以有效提高游离气和吸附气的比例,影响页岩气的开发效益,裂缝作为油气勘探开发的一个重要指标,吸引了大量学者的广泛关注(Nelson, 2001; Zeng et al., 2010; Zhang et al., 2016; Zou et al., 2016; 穆龙新等, 2009; 久凯等, 2012)。北美在海相页岩气勘探开发中取得成功的经验表明,当页岩储层中发育大量的裂缝系统时,页岩可以作为有效储层(Curtis, 2002; Warlick, 2006; 孙岩等, 2008; 李新景等, 2007, 2009; 聂海宽等, 2009b; Cho et al., 2013)。根据目前的技术现状和储层裂缝特征,储层裂缝预测的方法主要有定性预测和定量预测两种。

1. 储层裂缝定性预测

储层裂缝定性预测主要是基于构造部位和岩性的关系进行预测。在断裂带两

侧、断裂末端、断裂交汇处及断裂产状发生改变的区域, 储层裂缝发育(久凯等, 2012)。与断裂距离越远, 裂缝发育程度越低。断裂带内外岩体力学性质差异越大, 裂缝越发育。此外, 断裂类型与裂缝发育程度有关, 通常正断层的裂缝发育程度较低, 逆冲断层的裂缝发育程度中等, 压扭性断层的裂缝发育程度最高。背斜构造在轴向上的裂缝密度、大小和连通性一般高于背斜两翼(Ghosh and Mitra, 2009)。

岩性对储层裂缝发育程度有重要影响。通常, 白云岩、砂岩和灰岩储层裂缝发育程度比泥岩和砾岩高(曾联波等, 2007; Ameen et al., 2012; 范存辉等, 2013)。

2. 储层裂缝定量预测

1) 曲率法预测裂缝

曲率反映几何体的弯曲程度, 包括欧拉曲率、最小主曲率、最大主曲率和高斯曲率等(Chopra and Marfurt, 2014)。从几何学角度出发, 储层裂缝分布在一定程度上可以通过曲率值表示(郭科等, 1998; Hunt et al., 2011)。通常, 岩石受构造应力挤压时, 会沿某一方向发生弯曲, 岩石中性面以上会承受张应力产生张性裂缝(图 1-1), 中性面以下受压应力, 不能产生张性裂缝; 地层受力越大, 曲率值越大, 岩石破裂程度也越高, 裂缝越发育(孙尚如, 2003)。因此, 从几何学角度看, 曲率值可以表征裂缝发育程度。

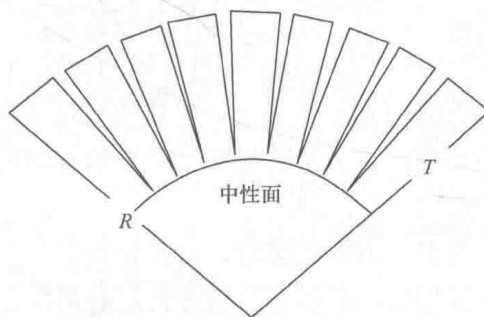


图 1-1 张性裂缝构造图

R-半径; T-拉应力

Murray(1968)最先把曲率法运用在美国圣菲斯普林斯(Spanish)油田的储层裂缝预测, 并取得成功, 随后许多学者将该方法引入我国的储层裂缝预测。曾锦光等(1982)以弯曲薄板作为力学模型, 对背斜构造进行了讨论分析, 得出了用最大主曲率值作为裂缝发育程度的判据。他提出用构造图计算最大主曲率的方法, 而且把该方法用于四川中坝构造并证明了该方法的有效性。Lisle(1994)将曲率属性推广到地质学领域, 并使其得到了广泛应用。李志勇等(2003)用曲率法对江汉盆地储层裂缝进行预测, 预测结果与实际情况吻合较好。彭红利等(2005)在微分几何原理的基础上导出了主曲率计算公式, 给出了构造裂缝形成时的临界曲率值计算公式, 并把主曲率方法成功应用于麻柳场嘉陵江组储层裂缝预测。刘宏等

(2008)采用综合曲率法对四川盆地三叠系嘉陵江组储层进行了裂缝预测,预测结果精度高于单一曲率法。刘金华(2009)在对渤海湾盆地火成岩进行裂缝预测时,发现了构造曲率法预测裂缝的缺陷,因此把缝面比参数与统计学分析引入曲率法,提出了经过改良的曲率法。王雷等(2010)采用曲率属性法对柴达木盆地某区块进行了裂缝预测,认为曲率属性法虽然有效,但是不能作为单独的评价标准,必须和其他属性法相结合才能提高预测精度。曲率法通常只考虑二维平面应力状态,没有考虑地层的三维实际情况,因此和三维应力(应变)分析相比,曲率法的预测结果没有三维应力(应变)分析精度高(Shaban et al., 2011)。此外,层间滑动对岩石的变形和破裂具有显著的控制作用(Smart et al., 2009)。根据曲率法的原理,该方法只适用于张性裂缝的预测,对剪切裂缝不适用,因而构造曲率法在裂缝预测方面也存在一定的局限性(吴胜和, 2010)。因此,构造曲率法在定性或者半定量储层裂缝预测分析中有一定的优势(李志军等, 2013; 王珂等, 2014, 2015),但由于仅仅考虑了张性裂缝,很难全面准确地预测裂缝。

2) 二元法预测裂缝

20世纪60年代, Price(1966)基于岩石破裂过程中表面能不断增加的现象,认为储层裂缝越发育,岩石中的弹性应变能越高。基于上述原理,周新桂等(1998)提出了能量法,在数值模拟中把岩石应变能作为储层裂缝预测的参数,认为岩石应变能越高,裂缝越发育。90年代起,许多学者把破裂法与有限元数值模拟相结合对储层裂缝进行预测(丁中一等, 1998; 宋惠珍等, 1999a, 1999b; 曾联波等, 2007; 周新桂等, 2007)。该方法通过拟合破裂值、能量值与单井裂缝密度之间的关系预测储层裂缝分布。实践表明,该方法能提高储层裂缝预测的准确程度,而且操作简单,效果明显(鞠玮等, 2013, 2014)。

二元法需要进行多元多次方程的拟合,对井位数量有要求,在井位数量少的情况下预测结果与实际有偏差,所以二元法有一定的局限性。

3) 分形维数法预测裂缝

分形理论认为,岩石破裂形成的裂缝具有分形特征(童亨茂, 2004),可以通过分形维数定量描述储层裂缝发育程度。尹燕义等(1998)分别用盒维数法和康托点集法对辽河油田38区块潜山变质岩储层进行分形维数研究,研究结果显示不论是宏观裂缝,还是微观裂缝,发育程度都具有明显的分形特征,可用分形维数值 D 描述储层裂缝发育程度。此外,在同一构造应力场下,不同岩性裂缝发育程度不同,碎屑岩中裂缝最发育,分形维数值最高;灰绿岩中裂缝发育程度最低,分形维数值最小。邬光辉等(2002)通过对塔里木碳酸盐岩储层裂缝进行研究,认为储层裂缝密度越大,分形维数值越大。邓攀等(2006)通过把分形维数值和电导率测井、声波测井、地层倾角测井和放射性测井结合起来,对辽河盆地的火山岩裂缝型储层裂缝发育程度和裂缝密度进行了定量预测。冯阵东等(2011)和赵力彬等

(2012)对克拉2气田储层裂缝进行研究时发现,裂缝密度值与分形维数值之间呈正相关关系,裂缝分形维数值可以作为衡量裂缝发育程度的指标。

采用分形维数法预测裂缝要求研究区地震解释精度高、断裂系统发育,存在一定的局限性。

4) 构造应力场数值模拟法预测裂缝

构造应力场是由于构造运动而产生的应力场(Bayly, 1992; 万天丰, 2004; Zoback, 2010; Yang et al., 2014),李四光首次提出了构造应力场的概念,并研究了各种构造行迹与构造应力的关系(李四光, 1973)。按形成时间划分,构造应力场分为古构造应力场和现今构造应力场。地壳中的各种地质现象与地质过程的演化都与构造应力作用密切相关(Zoback et al., 1989; Tingay et al., 2012)。构造应力场是控制储层裂缝的最主要因素,因此,在储层裂缝研究中,构造应力场的研究是一项重要内容(汪勇, 2013; Pei et al., 2014; 据宜文等, 2014)。构造应力场数值模拟法已经成为目前预测油气田储层裂缝分布的常用方法。和其他裂缝相比,页岩储层中以构造裂缝为主,其发育规律、形态和空间分布特征及渗流规律主要受控于构造应力场,尤其是古构造应力场,因此,广大学者通常运用古构造应力场反演的方法预测裂缝。古构造应力场的反演具有多解性,因此,数值模拟中必须通过多调试,反复验证,才能逐渐使数值模拟结果逼近实测的构造应力数据(Smart, et al., 2009; 曾联波等, 2010)。通过对研究区构造应力场进行模拟,并将模拟结果与格林菲斯(Griffith)强度准则和莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)强度准则相结合,即可对储层裂缝分布进行预测。通常用于构造应力场数值模拟的方法有:有限元法、有限差分法和离散元法。其中以有限元法应用最为广泛,它凭借处理复杂边界条件的能力及能在模拟中考虑断裂、温度和流体等作用,成为目前构造应力场数值模拟法预测储层裂缝的重要方法。

构造应力场数值模拟法预测储层裂缝是地质学、力学与数学相互交叉与有机结合的过程(沈国华, 2008; 孙晓庆, 2008; Zeng et al., 2013a; Yang et al., 2014; Dubinya et al., 2015)。从影响储层构造裂缝形成与发育的地质因素入手,在构造裂缝形成时期古构造应力场数值模拟的基础上,结合岩石破裂准则和单井裂缝描述成果,是目前定量预测构造裂缝分布规律的有效手段。曾锦光等(1982)首次把力学理论和裂缝预测相结合建立断层古应力场解析方法,但由于基础理论太过理想化,在实际运用中存在很大问题。随着电子计算机软硬件的快速发展,构造应力场数值模拟法预测裂缝研究取得了重大进展(殷有泉, 1987; 谭成轩和王连捷, 1999; 丁文龙等, 2010, 2011a; 冯建伟等, 2011; 邱登峰等, 2012; Jiu et al., 2013; Zeng et al., 2013b; 戴俊生等, 2014; 王俊鹏等, 2014; 岳喜伟等, 2014)。

就目前研究来看,通过建立研究目标区块的地质模型和力学模型,利用构造应力场数值模拟法进行储层裂缝预测具有良好的理论基础,是一种比较可靠的储

层裂缝预测方法, 应该是裂缝预测的主要方向。

5) 地震与测井预测裂缝

近年来, 随着科技进步, 地震和测井技术在裂缝预测方面也取得了重要进展。储层裂缝预测的地震方法包括横波分裂法、多波多分量探测法、相干体数据法、地震属性分析法等(巫芙蓉等, 2006)。在裂缝型油气藏中, 横波在裂缝储层中传播时会分裂成一个平行于裂缝方向的快波(S1)和一个垂直于裂缝方向的慢波(S2)(即所谓横波双折射现象), 通过利用检波器接收快、慢波数据, 并通过对接收数据进行坐标旋转, 分离出快波和慢波, 对数据进行处理得到裂缝走向和密度。张明等(2007)认为利用横波双折射现象预测裂缝的方法主要包括正交基旋转法、最小熵旋转法和全局寻优法等。多波多分量技术比单波携带更多的地质信息, 因此在裂缝预测方面比单波更具有优势, 可以有效预测裂缝系统(崔健等, 2008)。相干体数据法是20世纪90年代初发展起来的一种地震资料解释技术, 对断层和裂缝的识别效果比较好。由于地震勘探的连续性, 可以通过相干体技术方便、快捷地找到裂缝发育带、裂缝展布特征(袁士义等, 2004)。近年来, 许多研究者将相干体数据法成功运用到断层与裂缝的识别上, 并取得了很多有价值的研究成果。刘传虎(2001)和苏朝光等(2002)利用相干体数据法对研究区的储层裂缝进行了预测, 预测效果较为满意; 万学鹏等(2007)利用相干体数据法对K油田的碳酸盐岩裂缝分布特征进行了研究和预测, 认为不同强度和密度的断层及裂缝在相干体切片上具有明显区分。胡伟光(2010)利用相干体数据法不仅预测出了研究区裂缝发育带和断裂分布, 而且还解决了断裂组合问题。地震属性系指直接从地震数据中获取的几何学和统计学分析的定量参数(Sliz and Al-Dossary, 2014)。地震研究人员可以从地震属性中获得多岩性等地质信息。地震属性包括曲率属性、相干属性和地层倾角属性等, 这些属性能为研究人员判断裂缝空间展布特征提供依据。Jr(1965)揭示了裂缝孔隙度与曲率属性的关系, 并根据地震资料计算出了裂缝密度。张凤莲等(2007)运用地震相干与可视化技术, 预测了松辽盆地北部徐东地区营城组火山岩裂缝, 预测结果与井筒分析结果吻合。刘晓梅等(2009)针对碳酸盐岩储层非均质性和各向异性强的特点, 联合多元统计分析、地震属性和自适应性模糊神经网络等综合预测了塔中某工区的储层裂缝分布、碳酸盐岩储层裂缝孔隙度分布, 该方法弥补了利用某种单一技术难以准确定量地刻画出裂缝孔隙度空间分布情况的不足。预测结果与钻遇优质储层的井点吻合。顾雯等(2013)在裂缝型储层中运用叠后地震属性分析技术预测裂缝, 并建立了多属性预测储层裂缝的方法。Baytok和Pranter(2013)把曲率属性和三维地震数据、井壁成像测井和蚂蚁追踪属性相结合, 对储层裂缝发育程度与岩性关系进行了分析, 取得了良好效果。

目前, 在油气勘探开发中, 根据测井曲线响应特征识别裂缝, 尤其是成像测井资料在裂缝预测中占有重要地位。前人研究表明, 在已有的常规测井资料中,

深浅侧向、声波时差、密度、地层倾角等 20 种测井曲线可以比较有效地识别裂缝储层。裂缝发育段往往具有双侧向曲线差异、声波时差增大、密度减小、双井径存在差异等现象。成像测井技术是近 20 年来兴起的新型测井方法,是很多油田裂缝识别采用的主要方法(牛虎林等, 2008; 肖立志, 2010; 姚瑞士等, 2011; 李启翠等, 2013)。它与常规测井方法相比具有很大的优势(黄继新等, 2006), 成像测井能够使地质工作人员更加直观、清楚地观察裂缝特征(倾角、方位等)(张树东等, 2007), 所以它和岩心资料一样, 成为识别和评价裂缝发育的关键地质资料。同时它与岩心资料相比, 更能在测井段内连续观测, 所以成像测井在裂缝油气藏的识别和评价中必然得到更加广泛的应用。

1.2.3 页岩气储层特征研究现状

1. 页岩气储层岩石学特征分析

页岩储层岩石组成分析是储层特征研究中的关键部分, 关系到页岩气赋存方式、储层压裂造缝及开发方式等的选择(Curtis, 2002)。页岩储层岩石组成包含黏土矿物、有机质、石英等脆性矿物及碳酸盐矿物, 并含一定量的长石、云母、方解石、白云石、黄铁矿等矿物(赵杏媛和何东博, 2012; 王濡岳等, 2016; Wang et al., 2016b)。黏土矿物含量越低, 脆性矿物含量越高, 岩石的脆性越强, 在外力作用下越易形成裂缝, 越有利于页岩气开采(Ross and Bustin, 2009); 而黏土矿物含量越高, 页岩塑性越强, 压裂形成的裂缝以平面缝为主, 越不利于页岩体积改造(Jarvie et al, 2007)。

页岩中的有机质是生烃的物质基础, 根据页岩气勘探开发经验表明, 含气页岩中有利区的平均有机碳含量不低于 1.5%, 核心区不低于 2.0%(邹才能, 2011)。有机碳含量不仅与生烃能力密切相关, 对页岩气的吸附也有重要影响(蒲泊伶等, 2008), 此外, 页岩中裂缝发育程度也受有机碳含量的影响(Jarvie et al, 2007; Zhao et al, 2007)。页岩中随着有机质成熟度的增加, 有机质更多地转为烃类, 硅质含量增加, 脆性也在增强, 越容易形成裂缝(孟庆峰和侯贵廷, 2012)。丁文龙等(2012)通过对裂缝发育程度与有机碳含量的研究, 表明随着有机碳含量的增加, 储层裂缝发育程度由差到好地发展。很多学者就四川盆地龙马溪组页岩露头 and 钻井取心开展了矿物组分测试研究(刘树根等, 2011; 陈尚斌等, 2012; 黄金亮等, 2012; 王玉满等, 2012; 陈文玲等, 2013), 认为不同地理区域、不同层系、不同深度, 页岩有机碳含量均存在较大差距, 总体而言海相页岩有机碳含量高于陆相页岩。

黏土矿物主要包括伊利石、高岭石和蒙脱石, 是页岩中的主要成分之一。黏土矿物内部具有较大的孔隙比表面积, 因此具有很强的吸附性能, 这对页岩气的赋存状态有重要影响(Ross and Bustin, 2008)。页岩中除了黏土矿物之外, 还含有石英、方解石和长石等脆性矿物。这些脆性矿物含量越高, 越容易人工压裂形成