

煤层气勘探开发理论与实践系列丛书

资助 国家科技重大专项大型油气田及煤层气开发课题和专题
山西省煤层气联合研究基金

煤储层 水力压裂裂缝延展机制

MEICHUCENG SHUILI YALIE LIEFENG YANZHAN JIZHI

王生维 陈立超 等著



非外借



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

煤层气勘探开发理论与实践系列丛书

国家科技重大专项大型油气田及煤层气开发(2011ZX05034-002)课题和
(2016ZX05067001-007)专题

资助

山西省煤层气联合研究基金(2016012007)

煤储层水力压裂裂缝延展机制

Meichuceng Shuili Yalie Liefeng Yanzhan Jizhi

王生维 陈立超 等著



中国地质大学出版社

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

煤储层水力压裂裂缝延展机制/王生维,陈立超等著. —武汉:中国地质大学出版社,2017.9
(煤层气勘探开发理论技术与实践系列丛书)

ISBN 978-7-5625-4078-6

I. ①煤…

II. ①王…②陈…

III. ①煤田-水力压裂-裂缝延伸

IV. ①TD742

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 223146 号

煤储层水力压裂裂缝延展机制

王生维 陈立超 等著

责任编辑:段连秀

策划编辑:段连秀

责任校对:周旭

出版发行:中国地质大学出版社有限责任公司(武汉市洪山区鲁磨路388号) 邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

http://cugp.cug.edu.cn

开本:787毫米×1092毫米 1/16

字数:170千字 印张:6.75

版次:2017年9月第1版

印次:2017年9月第1次印刷

印刷:武汉市籍缘印刷厂

印数:1—1000册

ISBN 978-7-5625-4078-6

定价:78.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

煤层气勘探开发理论与实践系列丛书

编委会名单

主 任：王生维

副 主 任：乌效鸣 王峰明 李 瑞

陈立超 张 洲

编委会成员：(以姓氏笔画排序)

吕帅锋 吕 凯 刘少杰 刘 伟

刘旺博 刘和平 刘建华 孙钦平

杨青雄 杨 健 李俊阳 肖宇航

何俊铎 谷媛媛 张 明 张典坤

张晓飞 张 晨 陈文文 陈安冬

孟 欣 赵俊芳 胡 奇 侯光久

贺 飞 袁 铭 晁巍巍 唐江林

董庆祥 韩 兵 栗冬梅

总 序

我国的煤层气产业经过国家“八五”到“十三五”规划期间近 30 年的科技攻关与工程实践,已经建成了沁水盆地南部、鄂尔多斯盆地北部和东缘等煤层气田,同时在新疆、贵州、东北等煤区也形成了一定的煤层气产能。目前煤层气勘探开发技术已经延伸到煤矿生产过程中利用地面工程治理采煤工作面煤层瓦斯领域。

煤层气勘探开发长期实践极大地促进了我国煤层气勘探开发理论水平的提高和工程技术的不断创新。作为我国煤层气勘探开发长期实践的亲历者,本课题组成员在先期参与全国各主要煤层气区勘探工程的基础上,又陆续参与了沁水盆地南部、内蒙古、新疆等煤区的煤层气勘探开发实践。本丛书在系统总结现有煤层气勘探开发理论认识 and 实践经验基础上,集中展现了作者团队在煤层气勘探开发方面积累的系列研究成果,主要包括煤层气勘探开发选区、煤储层评价原理与技术、煤层气藏地质、煤层气井钻井工艺技术、煤储层水力压裂裂缝延展机理以及煤层气排采工程。

煤层气勘探开发的成败在很大程度上取决于对煤层气藏地质条件认识的深刻程度,取决于所采用的工程技术措施是否适合于拟勘探开发的煤层气藏地质条件。在构成煤层气藏地质的所有要素中,首先是煤储层的煤体结构及其对应的大裂隙系统发育特征,不仅对煤层气藏赋存起着至关重要的控制作用,而且深刻影响着工程技术措施的效果;其次是煤层气藏的含气性和构造、水文地质等封闭保存条件,在煤层气勘探开发过程中的钻井、压裂和排采工程环节,对煤层气的顺利产出也起着决定性作用。因此,煤层气勘探开发必须将煤层气藏地质认识与一系列工程措施有机结合,才可能获得比较理想的勘探开发效果。

我国煤层气藏地质条件比较复杂,在长期的煤层气勘探开发实践中,遇到过各

种各样的特殊地质条件和工程技术难题,积累了许多成功经验,包括地质理论认识和工程技术实践经验,建成了一批高产煤层气井;但是也存在不少低产煤层气井。认真回顾和总结煤层气开发的经验教训,形成比较系统的煤层气开发工程认识成果,是编著《煤层气勘探开发理论与实践系列丛书》的初衷,旨在指导和促进煤层气勘探开发理论和技术水平的提高,更好地培养煤层气勘探开发工程的技术人才。

中国地质大学(武汉)煤层气勘探开发研究团队起步于1992年的国家“八五”科技项目,长期坚持煤层气藏地质认识与开发工程的有机结合,先后完成了国家“973”课题、“十一五”和“十二五”国家科技重大专项中大型油气田与煤层气开发的课题,以及企业委托项目等。本团队的煤层气勘探开发研究经历大致为:①研究煤储层特征、勘探选区、钻井液及压裂液污染防治的起步跟踪阶段;②研究煤储层大裂隙系统、压裂煤层气井开挖跟踪观测、煤层气开发井产能和生产历史综合分析的发展阶段;③研究和实践煤层气开发新井型、在气藏条件复杂煤区开发煤层气、研发部分新探测仪器等的创新阶段。长期不懈的科研生产实践形成了一系列的理论认识和技术成果。

《煤储层岩石物理研究与煤层气勘探选区》从煤储层的孔隙、裂隙系统研究入手,提出了依托矿井人工煤储层露头进行煤储层岩石物理和煤层气藏研究的技术方法体系,促进了煤层气藏封闭特征、煤储层可改造性、煤层气可采性、煤层气富集与高产影响因素的分析和预测。

《煤储层物性控制机理及有利储层预测方法》在沁水盆地南部详细的煤储层观测研究基础上,发现并阐述了煤储层内部的天然大裂隙系统。

《煤储层评价原理技术方法及应用》在研究煤储层的孔隙及大裂隙系统发育特征基础上,发现了小微构造与煤储层大裂隙系统发育特征之间的关系,总结了煤储层评价在煤层气开发与瓦斯防治中的应用,介绍了煤层气藏的主要探测技术。

《中国若干煤区煤层气藏地质》以沁水盆地南部、内蒙古和新疆等煤区的煤层气藏地质研究为例,总结了煤储层大裂隙系统的发育特征、煤层气藏围岩与煤储层大裂隙系统之间的关系,研究了煤层气藏封闭保存、煤层水、煤层气成藏、典型煤层气藏的特征及其描述方法。

《煤与煤层气钻井工艺》在系统总结以往多年煤层气钻井工艺技术基础上,重点阐述了获取煤心技术、定向钻进技术、复杂煤系地层井眼护壁稳定及钻井液技术。

《煤储层水力压裂裂缝延展机制》在总结水力压裂煤层气井开挖解剖成果的基础上,阐述了煤储层水力压裂裂缝延展与内部充填特征、煤储层压裂液“滤失”特征及机理,研究了煤储层水力压裂裂缝延展机制、煤储层压裂裂缝充填机制。

《煤层气排采工程》在系统分析煤储层导流裂缝系统和煤层气井流体产出规律的基础上,结合煤层气井排采成功的工程实践,总结了煤层气井不同产出阶段的特征以及复杂流体通道排采响应特征。另外,在总结排采过程的高产稳产控制措施经验的基础上,提出了独到的理论认识和技术方法。

《煤层气开发技术与实践》以沁水盆地南部煤层气开发为例,从煤层气藏地质、煤层气井钻井、煤储层压裂增产、煤层气井排采、煤层气井集输等方面系统阐述了我国高煤阶煤层气开发工程技术突破的历史过程。

本丛书较系统地总结了我国以沁水盆地南部、内蒙古和新疆等煤区为代表的煤层气勘探开发方面的理论技术和工程实践的成果,既有煤储层和煤层气藏等方面的理论认识,又有钻井、压裂、排采工程技术的实践经验。在编写方面强调科学性、实用性和可操作性,可供从事煤层气开发工程的管理者和科技人员参考,也可作为高等教育的参考教材。

在本丛书的出版之际,对参与本丛书撰写、出版和曾经给予大力支持的所有单位和个人,一并致以衷心的感谢!

鉴于著者水平有限,书中难免存在错误及不完善之处,敬请读者批评指正。

著 者

2017年9月

前 言

煤储层水力压裂裂缝延展特征及内部充填模式一直是煤层气开发工程中极为重要的技术问题,它不仅是评价煤层气井压裂改造效果的指标,也是制约煤层气井产能的重要参数。要查明煤储层压裂裂缝、内部充填特征及其控制因素,不仅需要采用压裂煤层气井在矿井开采过程中的跟踪观察,而且也需要理论分析和室内试验等技术手段。为此,著者按照上述研究思路和技术方法,从2009年开始跟踪研究煤矿采掘工作面揭露的地面煤层气水力压裂井中煤储层压裂裂缝的延展特征及裂缝充填物的分布特征,在沁水盆地南部寺河矿、成庄矿等地开展煤储层压裂裂缝井下观测解剖的现场工作,经过试验分析和理论研究,初步查明了煤储层压裂裂缝的延展机制及充填模式。

本书共分六章。第一章介绍了煤储层水力压裂裂缝的研究背景、国内外研究现状等。第二章介绍了煤储层水力压裂裂缝矿井解剖的原理及工作流程,提出了沁水盆地南部煤储层压裂裂缝延展的主要模式。第三章阐述了用于测试煤岩压裂液的滤失途径及滤失量的试验系统,获得了原生结构煤、构造煤样品压裂液滤失的特征参数(滤失量、滤失路径),总结了不同煤体结构煤岩压裂液的滤失路径及空间展布。第四章研究了原生结构煤、构造煤压裂液滤失的动力学机制,结合损伤力学提出构造煤压裂液的滤失模式,构建了原生结构煤、构造煤压裂液滤失量计算的数学模型,分析了压裂液滤液闭锁对煤层气藏流体产出的伤害机制,提出了煤储层滤液伤害的防治工艺措施。第五章提出了煤储层压裂裂缝发展的过程,应用材料力学理论分析了压裂裂缝的启裂机制,建立了原生结构煤、构造煤压裂裂缝的启裂模式。

本书第一章、第三章由王生维撰写,第二章、第四章、第五章由陈立超撰写。全

书由王生维统稿。

衷心感谢晋城煤业集团、寺河矿、成庄矿等单位在现场观测中给予的帮助和支持！衷心感谢山西蓝焰煤层气公司、中石油华北油田山西煤层气公司在现场解剖和基础研究等方面提供的大力帮助！感谢王保玉、王德璋、李国富、田永东、王峰明、赵彬、卫金善、吴光亮等专家的大力支持与帮助！

本研究得到国家科技重大专项大型油气田及煤层气开发 2011ZX05034 - 002 课题、2016ZX05067001 - 007 专题，以及山西省煤层气联合研究基金(2012012007)(2014012011)(2016012007)的资助。

由于著者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

著 者

2017年9月10日

目 录

第一章 概 论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 国内外研究现状	(3)
1.2.1 水力压裂机理	(3)
1.2.2 岩石损伤与压裂裂缝扩展机制	(7)
1.2.3 水力压裂模型	(9)
1.2.4 水力压裂多裂缝研究	(13)
1.3 研究方法和内容	(14)
1.3.1 研究方法	(14)
1.3.2 研究内容	(16)
第二章 煤储层水力压裂裂缝延展与内部充填特征	(18)
2.1 煤储层压裂裂缝延展空间几何特征解剖	(18)
2.1.1 煤储层压裂裂缝特征解剖观测	(18)
2.1.2 区域地质及原生裂缝发育特征	(20)
2.1.3 沁水盆地 3 [#] 煤储层压裂裂缝延展特征	(23)
2.2 煤储层内压裂液流动范围特征解剖	(27)
2.2.1 煤储层内压裂液流动范围的研究原理及取样方法	(27)
2.2.2 煤储层压裂混合液平面分布特征规律	(31)
2.2.3 压裂液的分布与原生裂缝系统的关系	(35)
2.3 煤储层压裂裂缝内部充填特征解剖	(36)
2.3.1 压裂裂缝内充填物的组成及形态特征	(36)

2.3.2	压裂裂缝内支撑剂空间特征变化规律	(39)
2.3.3	支撑剂分布部位及砂运动特征分析	(40)
2.3.4	压裂裂缝充填物分布特征及控制因素	(42)
2.4	小 结	(44)
第三章	煤储层压裂液滤失特征及机理	(45)
3.1	煤储层压裂液滤失的概念	(45)
3.2	煤储层压裂液滤失的空间及路径	(46)
3.2.1	煤储层压裂液滤失特征实验	(46)
3.2.2	压裂液滤失的空间和路径分析	(50)
3.3	煤储层压裂液滤失的动力学机制	(53)
3.3.1	原生结构煤压裂液滤失动力机制	(54)
3.3.2	构造煤压裂液滤失动力学机制	(57)
3.4	煤储层压裂液滤失量计算数学模型	(59)
3.4.1	压裂中的滤失量计算原理	(59)
3.4.2	原生结构煤压裂液滤失的数学模型	(60)
3.4.3	构造煤压裂液滤失的数学模型	(60)
3.5	煤储层裂缝内压裂液滤失伤害机制	(61)
3.6	小 结	(62)
第四章	煤储层水力压裂裂缝延展机制	(64)
4.1	煤储层压裂裂缝发展过程	(64)
4.2	煤储层压裂裂缝启裂机制	(66)
4.2.1	原生结构煤压裂裂缝启裂机制	(66)
4.2.2	构造煤压裂裂缝启裂机制	(68)
4.3	煤储层压裂裂缝延展机制	(69)
4.3.1	压裂液体的注入路线	(69)
4.3.2	煤储层原生裂隙系统与压裂裂缝延展的关系	(70)
4.3.3	支撑裂缝颗粒充填扩张力链作用	(71)
4.3.4	裂缝充填扩张的力学条件	(72)

4.4	煤储层压裂裂缝横向扩张机制损伤力学分析·····	(73)
4.5	小 结·····	(75)
第五章	煤储层压裂裂缝充填机制·····	(77)
5.1	煤粉源集合体分布特征·····	(77)
5.2	煤粉源集合体造浆作用和聚集作用·····	(78)
5.2.1	构造煤粉源集合体造浆作用·····	(78)
5.2.2	原生裂缝煤粉源集合体聚集作用·····	(80)
5.3	煤粉源集合体对水力压裂效果的影响·····	(81)
5.3.1	煤粉源集合体发育特征·····	(81)
5.3.2	煤层气井水力压裂效果对比分析·····	(81)
5.3.3	煤粉源控制压裂效果机理及防控措施·····	(82)
5.4	煤层气井近井压裂裂缝堵塞机制·····	(82)
5.5	小 结·····	(85)
	参考文献·····	(86)

第一章 概论

1.1 研究背景

随着我国煤层气产业规模的日益扩大,煤层气勘探开发扩展到地下深部、构造复杂、高地应力煤区,开发目标煤储层的物性条件也越来越复杂,因煤层埋深加大、地应力增高、小微构造发育等因素导致的煤体结构复杂性越发显著,且这种复杂性严重制约着煤储层的原始渗透性,进而影响煤层气井生产能力及矿井煤层气的抽放效率(王生维等,2012;李明潮等,1996;钱凯等,1996;桑树勋等,2001)。

当前,国内外煤层气开发公司均将水力压裂改造技术作为改善煤储层物性、提高气藏流体渗流能力的关键手段之一(王鸿勋等,1998;王鸿勋,1983;乌效鸣,1997),然而现实是在国内有相当数量的煤层气井水力压裂效果并不理想,尤其是在煤体结构复杂的地区,煤层气井压裂施工难度大、压裂造缝效果差、煤层气井寿命短的现象依然普遍,煤储层岩石物性及其内部结构特征是重要内因。煤储层岩石物性对煤层气井水力压裂造缝效果影响非常关键,并主要体现在煤储层为孔隙、裂缝非常发育的双孔隙储层。

煤储层内部原生孔、裂隙系统发育对压裂造缝效果的影响方式有:低级别的孔隙及微裂隙(几微米—几百微米)控制着气井水力压裂中压裂液的滤失程度,进而影响压裂中压裂液有效造缝的规模及效率;高级别的气胀节理及构造节理(十几厘米—几米)直接控制着压裂裂缝的延展方位及空间尺寸,依据最小耗能原理(李正军,2011;周筑宝,1998,2001;赵忠虎等,2008),压裂裂缝延展基本沿着原始构造节理并对其进行拓宽、延长,而延展的方位与构造节理曲折程度及裂缝壁面特征存在一定的关系。从矿井解剖来看,煤储层压裂裂缝延展同样严格遵循最小耗能原理。

更为重要的是,煤储层煤体结构对压裂造缝效果的影响。煤岩是一种自然损伤材料,煤岩中存在着各种缺陷或裂纹,如裂隙、空洞、层理、节理,这些无疑会对煤岩的动、静态损伤断裂产生影响。当作用于煤岩的载荷超过弹性极限时,煤岩就表现出明显的非弹性变形,而造成煤岩非弹性变形的主要原因是微裂纹扩展以及煤岩内部孔隙、微裂隙空间受到压缩,微裂纹的扩展和搭接对煤岩的力学性质产生显著影响,导致煤岩强度逐渐劣化到最后断裂。在常规储层水力压裂的裂缝形态研究中,人们对压裂裂缝的延伸扩展引入线弹性材料破裂判别准则,岩石介质被看作是连续的,没有缺陷、损伤及蠕变。但事实上,在煤

岩中往往存在着奇异缺陷和分布缺陷,在裂纹附近区域中的岩石必然具有更严重的分布缺陷,其力学性质不同于距裂纹尖端附近处,并且在流体压力作用下,岩石不仅会发生弹性应变,还会发生损伤变化(Lemaitre, 1984; 卢应发等, 1990; 殷有泉, 1995; 王金龙等, 1990; 陶振宇等, 1991; 李新平等, 1991; 凌建明等, 1992)。因此,为了更切合实际,必须从损伤力学和界面断裂力学角度研究岩石真实的破裂过程,即通过构建损伤模型,对不同损伤程度煤岩体构建压裂裂缝数学模型,解释煤岩体后期水力压裂过程中受压煤岩体内部微裂纹的产生、扩展、搭接以及后期失稳破坏的过程,综合分析煤储层主干压裂裂缝延展规模。

著者在对沁水盆地潘庄、成庄等区块 15 口煤层气井解剖中发现,其中 12 口煤层气井的压裂裂缝延展方位与近井筒部位构造节理发育方向平行;3 口煤层气井的压裂裂缝服从于延展方位平行最大水平主应力的原则。压裂裂缝空间几何尺寸方面,压裂裂缝的有效支撑裂缝长度多在 10m 以内,支撑裂缝宽度在井筒附近可达 10cm,且压裂裂缝均未压穿煤层(图 1-1)。上述现象表明,煤储层压裂裂缝延展模式与传统压裂裂缝模型存在较大偏差,常规压裂造缝机制及压裂裂缝模型不适用于煤储层,简单地对其沿用甚至会错误估计煤层气井压裂造缝效果,导致煤层气井部署设计中放大井距,从而造成大面积的抽采残留体。

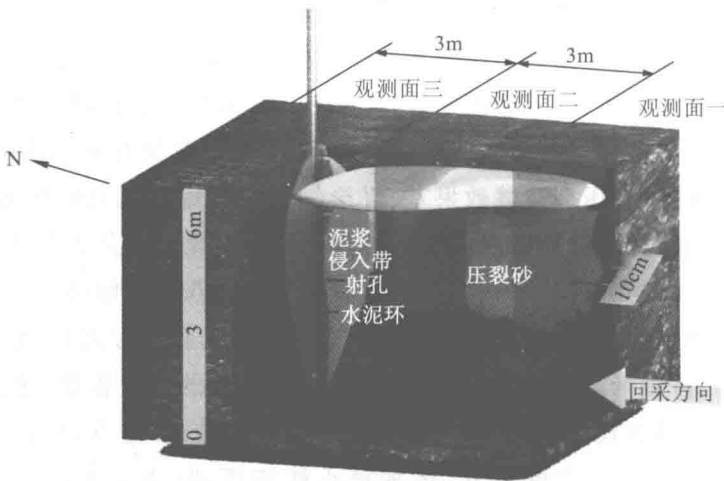


图 1-1 沁水盆地南部煤储层压裂裂缝延展特征(矿井解剖)

煤储层压裂液滤失对煤层气井水力压裂造缝效果控制非常显著,主要体现在:①压裂液滤失致使起到压裂造缝的压裂液体积消耗减少,大量压裂液进入煤岩基质内部,极大地影响了煤储层压裂造缝的规模与效果。②滤失压裂液进入煤岩基质后,通过内生裂隙缝间“闭锁”作用在压裂裂缝面两侧形成表皮效应(FFS),压裂裂缝壁面两侧煤岩内含水饱和度较高,大量压裂液分子锁在煤岩内部孔隙及微裂隙内部,从而屏蔽了外界的压力传递及气藏内部流体的产出,同时进入煤岩基质中的有机大分子也会对煤储层造成严重的导流能力伤害。因此客观厘定煤岩各类缺陷的空间大小,研究压裂液滤失的途径与空间,基于损伤力学理论构建煤储层压裂液滤失动力学模型,并查明压裂液闭锁机制,从而确定降

滤失、防闭锁的有效措施具有重要的实践意义。

结合室内实验、矿井解剖取样,评价压裂液滤失对储层物性的伤害等研究工作是实现煤储层水力压裂液滤失防治的基础,同时煤储层压裂液滤失对煤层气井水力压裂造缝效果也是有利的。比如在煤储层压裂液滤失对支撑剂运移、沉降影响方面,矿井解剖发现,煤储层压裂裂缝内部支撑剂支撑效果尚可,主要是由于煤储层压裂液快速滤失导致裂缝闭合时间短,支撑剂颗粒沉降距离小,因此全缝高范围内支撑剂颗粒分布较为均匀。

煤层气压裂井解剖研究表明,照搬常规油气藏水力压裂理论构建煤储层水力压裂模式的误差比较大,问题集中体现在常规油气藏砂岩、页岩储层的岩石机械力学性质及其裂缝系统与煤储层存在质的差别,即内部损伤程度不同。水力压裂施工是一个产层岩石中的各种孔洞和微裂纹等在强烈的压裂液作用下不断生长交叉并最终贯通汇合成宏观水力裂缝的过程,宏观裂纹以及岩石内生长的微裂纹组在一定程度上增加了储层的渗流体积,提高了流体的渗流能力,同时也对整个岩石的力学性能造成了不可逆的损伤劣化(王钰,2012;李连崇等,2003;李广平,1995;高文学等,2000;Gurson,1977;李玮等,2008)。因此,在现有理论研究的基础上,充分考虑煤储层岩石物性,基于煤岩损失力学及材料断裂力学,通过煤层气井矿井解剖,将流体过程研究与煤储层裂缝延展紧密结合,建立符合煤储层特点的裂缝延展及颗粒充填模型,结合损伤力学与界面断裂力学理论,构建煤储层压裂裂缝延展机制与充填模式,无疑具有重要的理论与生产意义。

目前煤储层水力压裂裂缝延展机制与充填模式的复杂性极大地制约着煤层气井产能及后续改造工艺选择。煤储层压裂裂缝以裂缝发育复杂、裂缝内充填物分布规律不明、压裂液滤失程度高且后期对储层伤害程度深、解堵难度大等为特征。前期借鉴常规油气藏压裂裂缝理论,提出了煤储层压裂裂缝延展模式,但其裂缝模型与裂缝发育实际差异较大,裂缝启裂延展机制与客观实际有比较大的出入,且煤储层压裂裂缝内部充填物分布及运移特征偏重室内实验模拟及数值计算,煤储层压裂液滤失机制和空间、压裂裂缝堵塞机制等尚未开展系统研究,上述问题均严重制约着煤层气井水力压裂理论的创新,而且已经严重影响了煤层气井压裂工艺改进及后续排采生产。

因此,本书以沁水盆地南部 3[#] 煤储层为例,基于矿井解剖、室内实验与理论分析,系统总结煤储层压裂裂缝延展机制与充填模式,研究压裂裂缝启裂延展机制,探究煤储层压裂液滤失机制,分析压裂裂缝充填机制及其对气井压裂效果和产能情况的制约。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 水力压裂机理

自 1947 年水力压裂技术首次在美国堪萨斯州 Hugoton 气田试验性应用以来,岩石介质中的压裂裂缝启裂、裂缝扩展机制、水力压裂压裂液、支撑剂等一系列问题得到了广

泛而深入的研究。在压裂裂缝启裂、裂缝扩展方面,Hubbert 和 Willis(1957)提出了第一个破裂压力的计算公式,该公式在上述假设下,应用了太沙基(Terzaghi)有效应力,故后人称为 H-W 公式。

国内学者亦对上述问题开展了研究。黄荣樽(1981)综合国外关于水力压裂裂缝的启裂和扩展的研究,提出了垂直裂缝和水平裂缝的启裂判据,并分析了影响裂缝延伸方向的各种因素。他认为裂缝的形成主要决定于井壁上的应力状态,而确定和影响应力状态的因素有地壳应力、地层的孔隙压力、井内液体压力、压裂液向地层中的渗滤流动以及被压裂地层的机械物理性质。刘翔鹏等(1983)指出油层水力压裂中除产生垂直于最小主应力的主裂缝外,还可产生其他方位的斜平缝、斜垂缝,这类裂缝的产生与井壁应力的变化有关,即在水力压裂中除存在张力裂缝外,在某些地应力条件下还存在以切应力为主的裂缝。在压裂施工中,如采用多次重复加压而不改变原地应力状态,可使已产生的裂缝继续延伸;如改变原地应力状态,则可形成新形态的裂缝。据此可提出“震动压裂”的概念,即可多次重复加压以扩展或增多裂缝,达到提高增产效果的目的。蒋惺耀等(1983)从力学模型、射孔、局部构造射孔应力场,岩层产状以及孔隙压力等诸多方面进行了系统的研究,提出射孔是调节破裂值,控制造缝初始方位和造缝形态,影响造缝效果的重要工艺措施,并对破裂压力预测公式进行了修正。李宾元(1984)基于断裂力学对油气井“水力压裂”的破裂压力分析,以二维弹性孔板理论为基础,应用线弹性断裂力学理论,对油气井水力压裂作了理论分析,得出了计算岩石破裂压力的公式。黄荣樽(1984)对地层破裂压力预测模式进行了探讨,从存在地质构造力而产生非均匀地应力场的一般情况出发,分析井壁岩石呈现破裂的应力条件,以及考虑地层本身的强度性质提出了新的预测模式,并对模式中所包含的各项参数的确定方法进行了分析讨论。吴继周等(1990)利用线性四步法求解了水力压裂裂缝几何形态的数学模型,从而求得了裂缝各截面的高度、宽度和压力,通过大量计算,对影响裂缝几何形态的因素进行了分析,指出地层参数和施工参数都不同程度地影响裂缝的几何形态,主要影响因素有油层厚度、地层应力、杨氏模量、注入速度、黏度。李同林(1994)对水压致裂煤层裂缝发育特点进行了研究,通过大量煤岩力学性质测试,证实了试验区目的层煤岩弹性模量低、泊松比较高、脆性大、易破碎、易压缩,还得出了目的层煤岩 Mohr 断裂准则二次抛物线型包络线,煤层水压致裂裂缝形式判断条件,裂缝开裂角方位的计算公式以及有关结论。王仲茂和胡江明(1995)对水力压裂裂缝形态进行了研究。

乌效鸣(1995)对煤层气井水力压裂裂缝产状和形态进行了研究,定性分析得出 5 种有代表性的煤层裂缝形态,即恒高椭圆截面缝、恒高矩形截面缝、径向扩展垂直缝、径向扩展水平缝、变高型裂缝。阳友奎等(1995)据岩石断裂力学理论,证明了水力压裂裂缝具有与缝内压力分布无关的椭圆形自相似扩展特征,在此基础上,结合断裂力学与流体力学给出了水力压裂裂缝内压力分布的近似解析解。李同林(1997)运用弹性力学理论和材料强度理论,对煤层各向同性体水力压裂造缝机理进行了深入探讨,认为形成裂缝的关键因素是地应力及其分布和岩层力学的固有特性,压裂液的性质和注入方式同时也对裂缝形成

有一定的影响。杨天鸿等(2002)研究了非均匀性对岩石水压致裂过程的影响机理,得出岩石不均质性导致产生不规则的水压破裂路径,以及岩石的不均质性对破裂的开始压力和失稳压力有很大影响的结论。邓广哲等(2004)对煤岩水压裂缝扩展行为特性进行研究,采用地应力场控制地下水压致裂的方法,通过来自铜川矿区的9块大型煤块试件,研究了水压裂缝扩展行为的控制参数。周健等(2007)采用大尺寸真三轴实验系统,探讨了天然裂缝与水力裂缝干扰后水力裂缝走向的宏观和微观影响因素,分析了压力曲线,提出了天然裂缝破坏准则,总结了不同地应力状态下裂缝的形态。杜春志等(2008)分析水力压裂时煤层裂缝的扩展特征,根据最大拉应力准则,分析了空间壁面裂隙扩展的力学条件。杨焦生等(2012)采用大尺寸(300mm×300mm×300mm)真三轴试验系统对煤储层裂缝形态进行测试(图1-2),研究了地应力、天然割理裂缝、隔层及界面性质对沁水盆地高煤阶煤岩水力裂缝扩展行为和形态的影响。

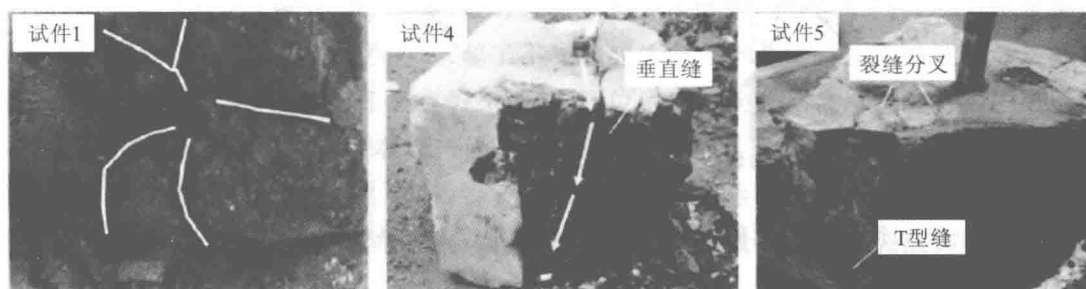


图1-2 煤储层压裂裂缝延展室内实验特征(杨焦生等,2012)

王素玲等(2012)采用扩展有限元法定量分析裂缝扩展机制,并采用白光散斑实验对低渗透储层砂/泥岩界面的裂缝扩展进行了实时跟踪。赵金洲等(2012)基于室内实验和矿场压裂,认为裂缝性地层水力裂缝在近井区域可能扩展为复杂的径向缝网,这与均质地层水力压裂产生的平面对称双翼裂缝具有显著的差异。基于弹性力学和岩石力学理论,考虑天然裂缝与射孔孔眼相交的情况,结合张性启裂准则,建立了裂缝性地层水力裂缝沿天然裂缝张性启裂的压力计算模型。程远方等(2013)对应力敏感条件下煤层压裂裂缝延伸进行了模拟研究,以清水为介质对晋城煤田煤样采用围压恒定不变、孔隙压力渐变的方式进行了应力敏感实验,分析了净围压与渗透率之间的关系,考虑渗透率动态变化对压裂液滤失的影响,推导了煤层压裂滤失系数计算方程,建立了应力敏感条件下煤层压裂裂缝延伸模型并提出了求解方法。宋晨鹏等(2014)分析了天然裂缝对煤层水力压裂裂缝扩展的影响。通过建立压裂裂缝遇煤岩交界面的二维模型,采用理论分析结合数值模拟的方法,对煤岩交界面的破坏机理及压裂裂缝扩展规律进行研究。许露露等(2014)以沁水盆地安泽区块煤储层为例,建立了水力压裂裂缝扩展模型,并对该模型的现场应用进行了研究。程亮等(2015)研究了倾斜煤层水力压裂启裂压力计算模型及判断准则。根据最大拉应力理论,分析真实环境下倾斜煤层压裂钻孔周围应力状态,建立压裂钻孔周围煤岩体启