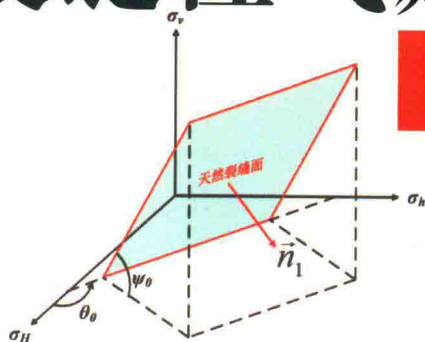


LIEFENGXING QICANG YALIE
JICHU LILUN

裂缝性气藏压裂

基础理论



李勇明 等著



科学出版社

裂缝性气藏压裂基础理论

李勇明 等著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对裂缝性气藏水力压裂存在的主要问题,研究裂缝性储层起裂压力预测模型,探索水力裂缝延伸模式,表征砾石和天然裂缝综合影响的压裂液滤失,建立水平井分段压裂形成复杂形态裂缝的产量预测模型,并进行了大量实例计算分析。

本书可供从事油气田开发研究人员、压裂工程师及油气田开发管理人员参考,也可作为大专院校从事油气田开发相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

裂缝性气藏压裂基础理论 / 李勇明等著. — 北京: 科学出版社,
2016.3

ISBN 978-7-03-047893-1

I. ①裂… II. ①李… III. ①裂缝性油气藏-压裂 IV. ①TE371

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 058388 号

责任编辑: 杨 岭 罗 莉 / 责任校对: 邓丽娜 刘莉莉

责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年5月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2016年5月第一次印刷 印张: 9.5

字数: 182千字

定价: 69.00元

前 言

水力压裂改造是气藏高效开发的关键技术之一。由于天然裂缝的存在,导致压裂裂缝的起裂、延伸和效果评价等与常规砂岩气藏有本质区别。本书针对目前裂缝性气藏水力压裂研究中面临的几个关键问题,展开理论探索,建立较为系统的裂缝性气藏压裂的基础理论模型,力图破解裂缝性气藏压裂模型模拟和评价基础理论中的某些难点问题,为解决裂缝性气藏压裂的工程问题提供理论依据。

根据弹性力学理论、几何变换方法、断裂力学理论,针对水力裂缝在裂缝性储层中的起裂和延伸模式进行研究,建立斜井井筒围岩和孔眼壁面的应力分布模型及不同起裂方式下的破裂压力计算模型,并计算分析破裂压力的影响因素、水力裂缝与天然裂缝相交的影响因素;建立同时考虑砾石和天然裂缝影响下的压裂液滤失解析模型,以数值方法研究砾石和天然裂缝对压裂液滤失的影响;建立天然裂缝和砾石影响下的水力裂缝延伸模型,实现水力裂缝延伸模拟;开展考虑天然裂缝影响的复杂人工裂缝形态的水平井分段压裂产量预测研究,并进行地层参数和裂缝参数的敏感性分析,旨在对裂缝性气藏的有效开发提供参考。在论述过程中,尽可能做到基础理论和实际应用相结合,以便加深在裂缝性气藏压裂基础理论方面的认识。

本书是作者长期教学、指导研究生过程中的对裂缝性气藏压裂领域基础理论的系统总结与概括。本书撰写分工如下:第1章由蒲璇撰写,第2、4章由李勇明、伍洲撰写,第3章由李勇明、罗攀撰写,第5、6章由李勇明、何弦桀、蒲璇撰写。限于作者水平,难免存在不足之处,恳请同行专家和读者批评指正。

作 者

2015年11月30日

目 录

第1章 绪论	1
1.1 裂缝性储层破裂压力和裂缝扩展模型研究进展	2
1.1.1 裂缝破裂理论研究	2
1.1.2 水力裂缝和天然裂缝相交机理研究	3
1.2 裂缝性砂砾岩储层压裂液滤失数值模拟研究进展	5
1.3 裂缝性储层水平井分段压裂产量预测研究进展	7
1.4 章节内容安排	8
第2章 裂缝性储层破裂压力模型研究	10
2.1 裂缝性储层斜井井筒及射孔孔眼应力分布	10
2.1.1 原地应力的坐标变换	10
2.1.2 井筒围岩受力分析	13
2.1.3 射孔孔眼围岩应力分布	18
2.2 裂缝性储层破裂压力模型	21
2.2.1 从井筒围岩本体起裂	21
2.2.2 沿天然裂缝剪切起裂	23
2.2.3 沿天然裂缝张性起裂	31
2.3 裂缝性气藏破裂压力计算分析	32
2.3.1 从岩石本体起裂	33
2.3.2 沿天然裂缝剪切起裂	35
2.3.3 沿天然裂缝张性起裂	40
第3章 裂缝性砂砾岩储层压裂液滤失数值模拟	43
3.1 裂缝性砂砾岩滤失的有限元模型	43
3.2 砾石对压裂液滤失的影响	47
3.2.1 砾石大小和含量的影响	47
3.2.2 砾石排列的影响	48
3.2.3 砾石形状的影响	49
3.3 天然裂缝对压裂液滤失的影响	50

3.3.1	天然裂缝方向的影响	51
3.3.2	天然裂缝密度的影响	52
3.3.3	天然裂缝宽度的影响	53
3.3.4	天然裂缝长度的影响	53
3.3.5	天然裂缝位置的影响	55
3.3.6	天然裂缝连通性的影响	56
3.3.7	砾缘缝的影响	57
第4章	裂缝性储层裂缝扩展模式研究	58
4.1	水力裂缝与天然裂缝相交准则	58
4.1.1	Blanton 准则	59
4.1.2	Waripinski 准则	61
4.1.3	Gu-Weng 准则	62
4.2	水力裂缝与天然裂缝相交行为分析	65
4.2.1	天然裂缝张开或剪切滑移的条件	65
4.2.2	水力裂缝穿过天然裂缝的条件	68
第5章	裂缝性储层水平井分段压裂产量预测模型	74
5.1	气体流动特征与缝间干扰分析	74
5.1.1	气体流动特征研究	74
5.1.2	人工裂缝形态与缝间干扰分析	77
5.2	假设条件及物理模型	80
5.3	不稳定渗流早期产量预测模型	82
5.3.1	气体由基质流向天然裂缝的压降模型	82
5.3.2	气体由天然裂缝流向人工裂缝的压降模型	86
5.3.3	不稳定早期产量预测模型	92
5.4	不稳定渗流晚期产量预测模型	95
5.4.1	气体由基质流向天然裂缝的压降模型	95
5.4.2	气体由天然裂缝流向人工裂缝的压降模型	99
5.4.3	不稳定晚期产量预测模型	103
5.5	拟稳定渗流阶段产量预测模型	105
5.5.1	气体由基质流向天然裂缝的压降模型	105
5.5.2	气体由天然裂缝流向人工裂缝的压降模型	106
5.5.3	拟稳定时期产量预测模型	109

5.6 模型求解.....	111
第 6 章 水平井分段压裂产量影响因素分析	113
6.1 实例验证.....	113
6.2 地层参数影响分析.....	116
6.3 人工裂缝参数影响分析.....	123
6.3.1 单一因素影响分析.....	123
6.3.2 正交试验分析	134
6.3.3 布缝方案优化研究	136
参考文献	139

第1章 绪 论

大多数油气田的开发已进入中后期，产量陆续进入全面递减阶段，增产改造的难度不断加大，各种问题逐渐突出。此时，人们把目光投入到致密储层、薄储层以及裂缝性储层等低渗和特低渗油气藏。天然气在裂缝性圈闭中聚集而形成的气藏称为裂缝性气藏，与其他类型的气藏相比，裂缝性气藏常具有以下特点：原始孔隙率高低不一、渗透率极低，但在裂缝发育带的渗透率很高，其储渗空间发育分布极不均匀，同一储集层的不同部位的储集性能相差悬殊。在实验室测定的气层岩心渗透率往往很低，但在地下由于裂缝发育，沟通了储集层中各种储集空间，形成了一个畅通的渗流系统，所以裂缝性气藏在开采中的实际渗透率很高。

当上覆岩层压力过大时，由于地层的可压缩性，天然裂缝便会闭合，因而若不实施压裂增产措施，该类气藏几乎不能获取经济效益。由于裂缝性储层具有特低孔、超致密、大量天然裂缝和微裂缝发育等特征，在压裂改造时需要采用体积压裂技术沟通天然裂缝，以形成裂缝网络使改造体积最大化，从而提高储量动用程度。与常规储层相比，裂缝性气藏在压裂评价、设计、优化等方面有如下几个重点、热点研究方向。

(1) 破裂压力和裂缝扩展模型研究。支撑裂缝的形态和导流能力决定了压裂改造的效果。而由于天然裂缝的影响，压裂施工时裂缝性储层的裂缝破裂方式及裂缝扩展模式与常规砂岩气藏有本质区别，存在从岩石本体起裂、沿天然裂缝张开起裂、沿天然裂缝剪切起裂等情况。水力裂缝和天然裂缝相交时可能使天然裂缝张开、剪切滑移，也可能使水力裂缝直接穿过天然裂缝。裂缝的破裂方式直接影响破裂压力的大小，水力裂缝延伸过程中与天然裂缝的相交也会影响裂缝网络的形态和连通性。因此，在设计压裂方案时需要有针对性地研究上述内容。

(2) 压裂液滤失数值模拟研究。从国内外报道来看，一方面，关于天然裂缝对滤失和裂缝延伸的影响的研究著作很多，其中有使用解析方法的，也有使用数值方法的。利用解析方法实现的模型一般简便易用，但该方法需使用一定的假设条件，数值方法虽然繁琐，但可以研究很复杂的问题，结合计算机可以较方便地得出准确结果。另一方面，关于砾石对滤失和裂缝延伸的影响研究很少，同时考虑天然裂缝和砾石影响下的滤失模型和裂缝延伸模型的研究更少，这一方面的空白亟待填补。

(3) 压裂产量预测研究。水平井压裂技术被认为是增大改造体积、有效开发

低渗透储层的良好途径,尤其是近年来水平井分段压裂技术的不断突破,极大地提高了低渗透储层地质储量的有效动用程度。裂缝性气藏中存在的大量天然裂缝会对压后产量产生巨大影响,这在以往的模型中未被重点考虑,致使压后产量预测的准确性大大降低。能否准确计算水平井分段压裂的产量不仅影响到压裂参数设计结果和压后经济评价结果,而且还会在很大程度上影响水平井分段压裂施工的成功率及有效率,所以提高水平井分段压裂后产量预测的准确程度非常重要。

由于裂缝发育带可垂直切穿多层岩层,把原来互相隔绝的储集空间沟通起来,形成一个统一的储集空间,因此,裂缝性油气藏常呈块状,其油气柱高度一般都较大。目前世界上产量最高的万吨井,绝大多数与碳酸盐岩中的裂缝性油气藏有关,这也进一步促进了裂缝性气藏压裂技术的创新和推广。最为显著的就是随着水平井压裂理论、裂缝扩展机理和压裂液滤失机理的研究以及产量预测模型的广泛应用,已形成了一套独有的、不同于常规砂岩和碳酸盐岩储层的评价、设计、优化的理论体系和技术模式。

本书针对目前裂缝性气藏水力压裂研究中面临的几个关键问题,展开理论探索,深入认识基本现象、原理,并对工程问题进行定量分析和解释。同时,对水力裂缝在裂缝性储层中的起裂和延伸模式进行研究,首次建立同时考虑砾石和天然裂缝影响的压裂液滤失解析模型,用数值方法研究砾石和天然裂缝对压裂液滤失的影响,建立受天然裂缝和砾石影响下的水力裂缝延伸模型,并开展考虑天然裂缝影响的复杂人工裂缝形态的水平井分段压裂产量预测研究,旨在对裂缝性气藏的有效开发提供参考。

1.1 裂缝性储层破裂压力和裂缝扩展模型研究进展

1.1.1 裂缝破裂理论研究

自1947年美国堪萨斯州的水力压裂试验成功以来,水力压裂技术已经发展为油气田增产增注的重要技术措施。最早的破裂压力计算公式由Hubbert和Willis^[1]于1957年提出,模型以Terzaghi有效应力为基础,忽略了地层的渗透性。之后,Haimson和Fairhurst^[2]将岩石的渗透性问题加以考虑,建立了新的破裂压力计算公式,并对Hubbert-Willis公式进行了改进。

1984年,黄荣樽^[3]针对各种破裂压力计算模型考虑影响因素不够全面的问题,提出了新的计算模型,并分析讨论了此模型中包含的各项参数的确定方法。

1987年,Yew等^[4]利用前人的应力场分析成果,忽略孔隙和岩石抗张强度对

起裂的影响,建立了简化的斜井破裂压力计算模型。该模型可以计算裂缝的起裂角和起裂方位。

2000年, Hossain 等^[5]通过直接替换裸眼斜井的切向应力,分析了套管射孔斜井的切向应力的表达形式,建立了射孔斜井破裂压力的计算模型,成为今天广泛引用的破裂压力计算模型。

2003年,胡永全等^[6]将射孔井中套管和岩石视为两种不同性质的材料,采用线性有限元软件计算了近井应力场,并结合强度理论迭代求解了射孔井破裂压力。

2008年,李勇明等^[7]针对储层污染对破裂压力的影响,引入表皮压降修正了常规破裂压力计算方法,建立了考虑储层污染的破裂压力计算新模型。

2013年,任岚等^[8]基于弹性力学和岩石力学理论,考虑裂缝性储层中射孔孔眼与天然裂缝相交的情况,根据张性破坏准则,建立了水力裂缝沿天然裂缝张性起裂的破裂压力计算模型。

2014年,尹建^[9]以均质、各向同性的二维平面人工裂缝模型为基础,利用位移不连续理论推导建立了非等裂缝半长、非等间距和任意裂缝倾角的水力裂缝诱导应力数学模型。在此基础上,通过分析裂缝干扰下井壁处应力场的变化规律,结合岩石破裂强度准则可预测破裂压力的变化规律。

在开展破裂压力计算模型研究的同时,很多学者对裂缝的破裂模式和判定方法展开了分析。

1995年,陈勉等^[10]综合考虑孔隙压力、压裂液渗流效应及作业条件对破裂压力的影响,利用多孔弹性理论,采用叠加原理推导了斜井井筒周围应力分布的表达式,提出了新的起裂判据,并分析了垂直裂缝和水平裂缝产生的机理。

2005~2006年,金衍等^[11,12]运用井壁稳定性原理,分别对天然裂缝地层中垂井和斜井的破裂压力进行了研究,认为水力裂缝在井壁处可能存在三种起裂方式,即从岩石本体起裂、沿天然裂缝面剪切起裂和沿天然裂缝面张性起裂。

2015年,尹建等^[13]对裂缝干扰下水平井破裂点的影响因素进行了分析,结果表明,包括裂缝条数、长度和净压力在内的裂缝参数以及原始主应力状态、水平井方位角和完井方式等都会影响后续裂缝破裂压力的大小,从而影响破裂点的位置。

1.1.2 水力裂缝和天然裂缝相交机理研究

Lamont 和 Jessen^[14]早在 1963 年就针对岩石中的天然裂缝对水力裂缝延伸的影响进行了室内实验研究。实验结果表明:水力裂缝在逼近和离开天然裂缝的时候,它的延伸方向会发生改变,并且水力裂缝离开天然裂缝的位置点是随机的。

1974 年, Daneshy^[15]针对花岗岩中基质界面、小尺度裂缝和大尺度天然裂缝三种类型岩石缺陷对水力裂缝延伸的影响进行了室内实验, 发现只有大尺度天然裂缝岩石缺陷会对水力裂缝的延伸产生一定的影响, 会在一定情况下阻止其穿过天然裂缝。

1982~1986 年, Blanton^[16,17]考虑了逼近角和水平应力差对天然裂缝与水力裂缝相互作用的影响, 以水力裂缝与天然裂缝作用区域的应力分布为基础, 建立了水力裂缝与天然裂缝相互作用的判断准则。

水力裂缝和天然裂缝之间的相互作用也是研究重点之一。1987 年, Jeffrey 等^[18]使用二维不连续位移方法模拟计算了天然裂缝和水力裂缝之间的相互作用。

1995 年, Renshaw 等^[19]考虑水力裂缝为张开型裂缝, 以水力裂缝周围的应力分布为基础, 建立了水力裂缝穿过天然裂缝的判断准则。

2003 年, 杨丽娜和陈勉^[20]结合复变函数理论和位错理论, 考虑裂缝相互干扰的情况, 建立了无限大介质中缝尖应力强度因子的数学模型, 利用模型计算了缝尖的应力强度因子和转角。

与此同时, 研究人员对影响水力裂缝延伸的主要因素也进行了分析。2005 年, Potluri 等^[21]以裂缝相互作用的数个准则为基础, 针对水力裂缝与天然裂缝的相交行为进行了系统研究, 分析了水平应力差、逼近角、裂缝强度条件和天然裂缝中的流体压力分布等因素对水力裂缝不同的延伸模式的影响。

2008 年, Akulich 和 Zvyagin^[22]假设地层为无限大非渗透弹性介质, 对水力裂缝与天然裂缝间的相互作用进行了研究。计算中考虑压裂液为不可压缩牛顿流体, 天然裂缝满足摩尔-库伦破裂准则。研究结果表明: 水力裂缝在逼近天然裂缝的过程中, 天然裂缝将延缓水力裂缝的延伸。

近年来, 国内外专家学者对水力裂缝穿过天然裂缝的理论研究进行了进一步的完善。2008 年, 陈勉等^[23]通过实验研究了天然裂缝影响下的水力裂缝形态、压力响应曲线和压裂液滤失机理。研究表明: 天然裂缝性储层中的裂缝扩展分为主缝加分支缝和径向网状两种形态。

2009 年, Olson 和 Taleghani^[24]考虑了裂缝相互之间的应力影响, 建立了一种简化的数值模型, 可解释压裂裂缝之间的力学作用, 并模拟计算多裂缝的同时延伸的情况。

2010 年, Gu 和 Weng^[25]基于裂缝尖端应力的线弹性断裂力学解对 Renshaw-Pollar 判定准则进行了改进, 改进后的准则可以计算任意逼近角情况下天然裂缝张开而不发生滑移的应力大小。

1.2 裂缝性砂砾岩储层压裂液滤失数值模拟研究进展

现阶段,压裂液滤失理论多未考虑砾石存在等复杂条件,一般情况下多考虑滤失三区的经典理论,将储层考虑为均匀介质(包含基质模型和裂缝模型),也有考虑了裂缝系统的双重介质滤失模型的研究。水力裂缝扩展多被认为呈对称的两条直线状,这在常规的均质油气藏中是正确的,而裂缝性油气藏中的裂缝延伸情况非常复杂,解析方法难以精确描述。存在砾石的砂砾岩油气藏的裂缝延伸则更为复杂,国内外鲜有此类报道。

有学者使用扩展有限元法等数值方法研究天然裂缝与水力裂缝之间的作用关系,如 Blanton、Warpinski 等。该方法可以精确地描述水力裂缝与天然裂缝之间的作用,甚至可以描述天然裂缝对水力裂缝的诱导作用。但砾石对水力裂缝扩展的影响研究少有报道。砾石对砂砾岩的渗透性存在影响,需要建立模型来定量评价砾石与渗透率之间的关系。

2007 年,胡昱等^[26]研究了多轴应力作用下的砂砾岩岩芯渗流规律。研究表明:在压应力的作用下,砂砾岩岩芯的渗透性有明显降低,且法向应力对其影响最为显著,说明砂砾岩裂缝的渗流能力是压力的函数。计算时考虑压力的影响可使结果更接近实际情况。

2010 年,王益维等^[27]分析了裂缝性储层压裂液滤失机理,得到了依赖于压力的裂缝性地层滤失系数,该方法考虑了压力和天然裂缝的影响,对裂缝性储层的滤失计算具有一定意义。

2011 年,冯阵东等^[28]认识到裂缝方向对裂缝渗透性有很大的影响,在多种坐标系中研究了裂缝的渗透率,并得到笛卡儿坐标系下的整体坐标系中的渗透率的计算方法,对裂缝渗透性的研究具有一定意义。

2012 年,闫建平^[29]对岩芯进行剖切处理后,使用岩芯图像扫描和计算机图形方法,精确描述了砂砾岩岩芯结构并计算砾石粒径、面积、磨圆度等参数,为获取砂砾岩砾石物性参数提供了一种有效而新颖的方法。

1991 年,古发刚等^[30]在前人研究滤饼实验的基础上,提出了考虑多种因素的滤失计算模型。相对于经典模型,该模型考虑了压降、剪切速度等多种因素,更加接近于真实情况,也更为精确有效。但该模型仍然只考虑了均质储层中的情况,并不适用于裂缝性储层。

2000 年,Yew 等^[31]研究了裂缝动态扩展情况下的压裂液滤失程度。这是一个非常复杂的问题,他们使用了数值方法和计算机编程求解,再次证实了数值方法在复杂情况下解决问题的能力。

2003 年,付永强等^[32]将多参数的压裂液滤失模型推广到双重介质中,使双重介质的滤失计算也可以考虑滤饼等多种因素。该模型考虑了比以往双重介质更为实际的情况,因此更准确有效。

2005 年,李勇明等^[33]考虑到裂缝性油气藏中的天然裂缝会使滤失量成倍增加,由此建立了双重介质滤失模型,并使用正交变换求得精确解。该模型将天然裂缝作为滤失控制方程的一部分而加以考虑,因而更适用于裂缝性储层,对该类储层的滤失计算具有进步意义。

2006 年,任岚等^[34]考虑滤失的二维特征,建立了压裂液滤失的二维模型,并用差分法求解。该模型没有考虑储层的非均质情况,但考虑了压裂液黏度的变化和压裂液的二维流动,所以对均质储层滤失的描述更为精确,同时证实了数值方法对压裂液的滤失具有较好的实用性。

20 世纪 60 年代~20 世纪 80 年代末,压裂工程师们经过多年的实践,开始认识到天然裂缝的存在对正确预测裂缝的起裂、延伸和闭合等动态行为的影响。经典的压裂理论认为:由于受地应力场的影响和控制,在压裂改造储层中将形成两条以井筒为中心的对称水力裂缝,裂缝沿垂直最小主应力方向延伸,因此,压裂后生产时水力裂缝的实际控制区域较为有限,仅仅在两条水力裂缝周围的区域。事实上,储层结构弱面-天然裂缝对裂缝延伸的控制作用必然存在,但目前鲜有认识。

2011 年,Dahi-Taleghani 和 Olson^[35]认为水力裂缝遇到天然裂缝后是穿越天然裂缝,还是沿天然裂缝延伸,取决于天然裂缝的剪切强度和水力裂缝扩展前沿区域的强度。他们推导出了一个基于扩展有限元方法的水力裂缝扩展的新模型,并认为裂缝网络的复杂程度极大地受到原地应力差、岩石韧性、天然裂缝胶结强度、天然裂缝的方向等因素的影响。

2012 年,Keshavarzi 和 Mohammadi^[36]使用扩展有限元方法研究了水力裂缝在裂缝性储层中的延伸。结果表明:水力裂缝的延伸极大地受到了由天然裂缝产生的原地应力场的干扰,天然裂缝网络内压力的增加以及远场地应力差的减小会导致交叉裂缝的增加。在与水力裂缝交叉之前,天然裂缝端部的破裂是常常被忽略而又非常重要的一种现象,它可以解释许多水力裂缝的复杂行为。当逼近角较小时,二者交叉后水力裂缝常常会使天然裂缝张开,而逼近角较大时则可以观察到水力裂缝穿越天然裂缝的现象。

天然裂缝与水力裂缝之间的作用方式不乏较为简便的判断标准。例如,Blanton 给出了水力裂缝能否穿越天然裂缝的判据,Warpinski 和 Teufel 则给出了水力裂缝能否诱发天然裂缝剪切滑移的判据,Renshaw 也给出了交叉的水力裂缝和天然裂缝是否能形成复杂网络的判定标准。

在研究砾石对裂缝延伸的影响方面,2010年,孟庆民等^①对人造岩样进行了水力压裂裂缝扩展机理模拟实验,模拟了无砾石、有砾石在不同压差、不同砾石粒径条件下的裂缝扩展规律,通过对施工曲线的分析,定性地分析了砾石对裂缝扩展的影响。证明了在砾石存在的情况下,主裂缝还是沿着最大主应力方向扩展,液体沿着砾石发生绕流现象。砾石对施工压力影响较大,粒径越大,流体流动阻力越大,施工压力波动越明显。

2007年,赵益忠等^[37]使用巨砾岩心进行裂缝扩展实验,其结果显示裂缝延伸方向基本沿最大主应力方向,易形成不规则裂缝或多裂缝,破裂压力较高。但该研究没有进一步深入思考其机理。

2011年,王昊^[38]通过人工岩样和数值模拟软件 RFPA 模拟了在不同粒径、含量的砾石影响下的裂缝扩展情况,总结出砾石对水力裂缝延伸的影响规律,并据此成功指导了某井的压裂。

1.3 裂缝性储层水平井分段压裂产量预测研究进展

1. 国外研究现状

1990年,Conlin等^[39]首次建立了四分之一人工裂缝模型来计算分段压裂水平井的产量,模型计算结果与生产数据拟合较好。

1991年,Roberts等^[40]推导了考虑非达西渗流效应的致密气藏分段压裂水平井产量预测半解析模型,分析了储层渗透率、人工裂缝条数对压后产气量的影响。

2010年,Clarkson等^[41]应用非稳态导数分析法建立了单一孔隙介质下的水平井分段压裂产量计算公式。该公式充分考虑了储层的特性和压后人工裂缝的几何形态,并且从早期线性流、早期径向流、晚期线性流和晚期径向流四种流态研究压裂水平井的生产动态。

2011年,Sennhauser等^[42]在Conlin模型的基础上,考虑了储层特征和流体在压裂裂缝中的渗流特征,建立了一个四分之一人工裂缝模型来预测水平井分段压裂的产量,分析了裂缝几何尺寸和裂缝间距对压后产量的影响,同时通过计算得出中部裂缝产量低于端部裂缝的结论。

2012年,Larch等^[43]建立了一个考虑吸附特性的双孔隙度模型来预测气藏水平井分段压裂的压后生产动态,并分析了人工裂缝条数、人工裂缝间距和加砂量对压后产气量的影响。

① 孟庆民,张士诚,郭先敏,等.砂砾岩水力裂缝扩展规律初探[J].石油天然气学报,2010,32(4):119-123.

2014 年, Lin 和 Zhu^[44]采用“板源”法建立了水平气井产量预测模型, 该方法可以计算不压裂水平井产量, 也可计算水平井压后产量。

国外学者所建立的水平井分段压裂产量预测模型均是在人工裂缝垂直于水平井筒、裂缝均匀对称分布、多条裂缝之间没有相互干扰的假设条件下进行的, 而且往往是在不考虑天然裂缝的影响下仅针对稳态渗流过程的产能计算。

2. 国内研究现状

2010 年, 唐汝众等^[45]在水平井分段压裂后出现不同人工裂缝形态的基础上, 建立了油气藏和裂缝的产量预测模型, 并研究了压裂裂缝条数、长度和非对称分布对压后产量的影响规律。

2012 年, 陈汾君等^[46]应用 PEBI 网格加密法开展了分段压裂水平井参数优化设计, 并研究了水平井段长度、裂缝长度、裂缝间距、裂缝条数和裂缝导流能力对压后产量的影响规律。

2012 年, 张燕明等^[47]应用复位势理论和势叠加原理, 建立了考虑水平井筒压降损失影响下的分段压裂水平气井产能预测数学模型, 并进行了裂缝参数的优化设计。

2013 年, 钟森^[48]在势叠加原理与复位势原理的基础上, 应用气体状态方程和拟压力函数, 推导出考虑人工裂缝之间相互干扰情况下的致密气藏分段压裂水平井产能计算数学模型。

2015 年, 李海涛等^[49]针对裂缝性低渗透气藏, 采用体积源的思想建立了相应的基础渗流模型, 结合人工裂缝内流动压降并根据叠加原理, 分别推导出裸眼、固井分段压裂水平井的产能评价方法。

国内对于水平井分段压裂产量预测的相关研究起步比较晚, 且绝大多数气藏压裂水平井的产能计算公式都是由油气藏压裂水平井的产能计算公式发展而来的。虽然国内许多学者已经开始研究非均匀对称分布、几何形态不规则的压裂裂缝对压后产量的影响, 但考虑的渗流过程单一且大多忽略天然裂缝对渗流的影响, 导致模型的适应性较差。

1.4 章节内容安排

本书主要包括如下五部分。

第 2 章分析射孔孔眼与天然裂缝相交的情况下水力裂缝的起裂方式, 根据建立的射孔壁面应力分布模型及张性破裂准则, 建立不同起裂方式下的射孔斜井破裂压力计算模型, 并应用裂缝性气藏地质参数进行计算分析。

第 3 章为裂缝性砂砾岩储层压裂液滤失机理研究, 分别使用解析方法和数

值方法建立砂砾岩储层滤失模型，分析宏观因素和微观因素对压裂液滤失的影响程度。

第4章运用经典水力裂缝与天然裂缝相交准则分析计算天然裂缝张开、剪切滑移、被水力裂缝穿过等行为的影响因素，针对性分析裂缝性储层压裂改造中可能产生的相交行为。

第5章为推导考虑天然裂缝影响下的分段压裂水平气井在不稳定渗流早期、不稳定渗流晚期、拟稳定渗流时期的产量预测模型，并研究模型的解法。

第6章利用控制变量法研究地层参数以及人工裂缝参数对裂缝性气藏水平井分段压裂产量的影响。通过正交试验分析得出影响压后产量的人工裂缝参数的主次顺序，并开展人工裂缝布缝方案优化研究。

第2章 裂缝性储层破裂压力模型研究

2.1 裂缝性储层斜井井筒及射孔孔眼应力分布

实际工况下,井筒和射孔受力状态较为复杂,受到地应力、孔隙压力、井筒内流体应力、压裂液滤失引起的附加应力、封隔器引起的应力集中等因素的影响,井壁岩石受井筒影响还可能发生塑性形变,再加上岩石的不均质性和各向异性,因此进行数学分析十分复杂。为方便分析井筒和射孔的应力分布,假设岩石为均匀且各向同性的线弹性多孔介质,井筒和射孔内都受到相等的均匀液体内压,水泥环胶结良好,不考虑压裂液与岩石的物理化学作用。

2.1.1 原地应力的坐标变换

地层应力状态包含三个相互作用的正交主应力,即垂向上的上覆岩层应力 σ_v 、最大水平主应力 σ_H 和最小水平主应力 σ_h ,除此之外还包括孔隙流体的压力 P_p 。斜井的井轴方向与垂向不一致,存在一个夹角,即井斜角 ψ ,且井轴在水平面上的投影也与最大水平主应力存在一个夹角,即方位角 β 。

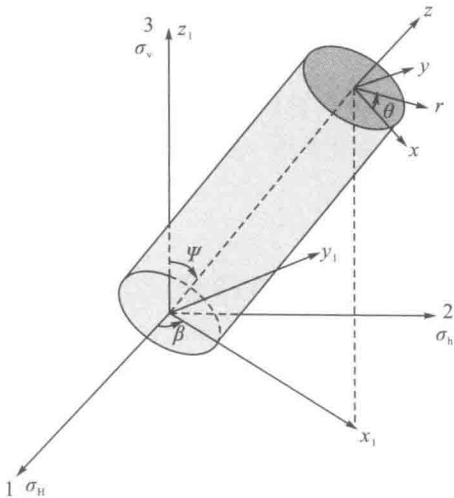


图 2-1 地应力坐标系及井筒坐标系示意图

为了方便分析斜井的应力分布,需要将原地应力从地应力坐标系(1, 2, 3)转换