

高含硫气藏 水平井产能评价

Gaohanliu Qicang Shuipingjing Channeng Pingjia

郭肖 编著



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

高含硫气藏水平井产能评价

郭肖 编著

图书在版编目(CIP)数据

高含硫气藏水平井产能评价/郭肖编著.——武汉:中国地质大学出版社,2014.8
ISBN 978-7-5625-3338-2

- I. 高…
- II. 郭…
- III. 含硫气体-气藏工程-水平井-油气测井-产能评价
- IV. TE37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 050924 号

高含硫气藏水平井产能评价		郭 肖 编著
责任编辑:王凤林		责任校对:张咏梅
出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)		邮编:430074
电 话:(027)67883511 传 真:(027)67883580		E-mail:cbb@cug.edu.cn
经 销:全国新华书店		Http://www.cugp.cug.edu.cn
开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16		字数:290 千字 印张:11.125
版次:2014 年 8 月第 1 版		印次:2014 年 8 月第 1 次印刷
印刷:武汉教文印刷厂		印数:1—500 册
ISBN 978-7-5625-3338-2		定价:45.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

高含硫气藏在四川盆地川东北地区有着广泛分布,普遍具有埋藏深、储层厚度大、非均质性强、三高(高温、高压、高产)以及具有边底水等特征,同时由于高含硫气体具腐蚀性和剧毒性,钻井工艺、采气工艺、集输工艺、净化工艺难度大,技术条件要求高,成本昂贵。

高含硫气藏气体在开采过程中,随着气体产出,地层压力不断下降,元素硫将以单体形式从载硫气体中析出,且在适当的温度条件下以固态硫的形式存在,并在储层岩石的孔隙喉道中沉积,从而堵塞天然气的渗流通道,降低地层有效孔隙空间及渗透率,影响气体产能。由于高含硫气藏开发的特殊性,常常采用水平井和大斜度井进行少井高产开发。目前,经典的水平井产能公式以及产能评价忽略了硫沉积对产能的影响,这将可能导致高含硫气藏水平井产能预测存在偏差。因此开展高含硫气藏水平井产能评价研究具有十分重要意义。

本书阐述了硫沉积研究进展、水平井产能公式研究进展以及气井产能评价方法研究进展,介绍了高含硫气藏开发特征,优选出高含硫气藏混合气体偏差系数和黏度计算模型,对水平井产能方程进行了优选并修正,并分析了水平井产能的影响因素,重点开展了高含硫气藏水平井气井非稳态产能评价、水平井试井解释研究、水平井合理配产以及高含硫气藏数值模拟研究。本书图文并茂、内容夯实、创新性强,并附有大量应用实例,对高含硫气藏开发实践具有较强的指导意义。

本书撰写过程中得到教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0950)、“高含硫气藏渗流物理”四川省高等学校科技创新团队、“高含硫气藏安全高效开发四川省青年科技创新研究团队”以及“十二五”国家油气重大专项“高含硫碳酸盐岩气藏多相渗流规律研究”(2011ZX05017-001-HZ03)的支持,本人研究生帮助整理部分稿件并参与校核工作,同时向本书所有引用资料的作者一并表示感谢。

编者希望本书能为从事油气田开发工程领域技术人员和大专院校相关专业师生提供帮助和指导。限于编者的水平,本书难免存在不足和疏漏之处,恳请同行专家和读者批评指正,以便今后不断对其完善。

编 者

2014 年 6 月

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 硫沉积研究进展	(1)
第二节 水平井产能公式研究进展	(3)
第三节 多分支井产能公式研究现状	(4)
第四节 压裂井产能公式研究现状	(5)
第五节 水平井分段压裂产能公式研究进展	(5)
第六节 气井产能评价方法研究现状	(6)
第七节 章节分布介绍	(7)
第二章 高含硫气藏开发特征	(11)
第一节 高含硫气藏分布	(11)
第二节 高含硫气藏开发的特点与难点	(11)
第三节 高含硫气藏开发渗流特征	(12)
第四节 高含硫气藏开发技术	(13)
第三章 高含硫气藏水平井稳态产能	(16)
第一节 高含硫天然气高压物性参数	(16)
第二节 水平井、大斜度井稳态产能方程优选及影响因素分析	(32)
第四章 高含硫气藏水平井气井产能评价	(49)
第一节 气井产能分析概念	(49)
第二节 水平井常规产能方程	(49)
第三节 水平井产能影响因素分析	(59)
第四节 产能评价实例分析	(65)
第五章 高含硫气藏水平井试井解释	(85)
第一节 高含硫气井不稳定试井解释分析	(85)
第二节 高含硫气藏试井解释理论	(86)
第三节 实例分析	(95)
第六章 高含硫气藏水平井合理配产	(105)
第一节 合理产量确定的原则	(105)
第二节 合理产量初步确定	(105)
第七章 高含硫气藏数值模拟	(133)
第一节 高含硫裂缝性气藏数学模型	(133)
第二节 机理分析与实例研究	(146)

第一章 概论

高含硫气藏在全球范围分布广泛,美国得克萨斯州 Murray Franklin 气田、加拿大阿尔伯达省 Bentz/Bearberry 气田、Panther River 气田、美国密西西比州 Black/Josephine 气田、Cox 气田以及我国渤海湾盆地陆相地层的华北赵兰庄气田、胜利油田罗家气田和四川盆地海相地层的渡口河气田飞仙关组气藏、罗家寨气田飞仙关组气藏、普光气田飞仙关组气藏、铁山坡气田飞仙关组气藏、龙门气田飞仙关组气藏、高峰场气田飞仙关组气藏、中坝气田雷口坡组气藏和卧龙河气田嘉陵江组气藏,均属典型的高含硫气藏。该类气藏普遍存在以下主要特点:

- (1) 硫化氢含量高、平面与纵向上分布不均。
- (2) 气藏埋藏深、地温梯度大、地层压力高。
- (3) 纵向上产层多、储层非均质强,一般情况气井产量高。
- (4) 储集类型多为裂缝-孔隙型、储集空间复杂。
- (5) 钻井工艺、采气工艺、集输工艺、净化工艺难度大,技术条件要求高,成本昂贵。
- (6) 开采过程中存在复杂的流体相变,在近井地带和井筒存在硫沉积。
- (7) 由于存在气-液(水、液硫)-固(固硫)耦合综合流动,导致高含硫气藏渗流规律复杂。

高含硫气藏气体在开采过程中,随着气体产出,地层压力不断下降,元素硫将以单体形式从载硫气体中析出,且在适当的温度条件下以固态硫的形式存在,并在储层岩石的孔隙喉道中沉积,从而堵塞天然气的渗流通道,减小地层有效空间并降低地层渗透率,影响气体产能。由于高含硫开发的特殊性,常常采用水平井和大斜度井进行少井高产开发。目前,经典的水平井产能公式以及产能评价忽略了硫沉积对产能的影响,这将可能导致高含硫气藏水平井产能预测存在偏差,因此开展“高含硫气藏水平井产能评价研究”具有十分重要的意义。

高含硫气藏水平井产能评价研究涉及到硫沉积与水平井产能评价等内容,本书主要开展高含硫气藏硫沉积实验和预测模型研究以及水平井产能公式与产能评价研究进展。对高含硫气藏硫沉积和油气藏水平井产能研究国内外开展了大量的研究工作,并取得了一系列的研究进展,其研究成果和研究方法将为本书研究提供借鉴。

第一节 硫沉积研究进展

一、硫沉积实验研究进展

高含硫气藏开采过程中,随地层压力和温度不断下降,当气体中含硫量达到饱和时元素硫结晶体析出。若结晶体微粒直径大于孔喉直径或是气体携带结晶体的能力低于元素硫结晶体

的析出量,则会发生硫物理沉积现象。同时,硫和硫化氢之间也存在一个化学反应平衡,即 $\text{H}_2\text{S} + \text{S}_x \rightleftharpoons \text{H}_2\text{S}_x$,随着温度和压力降低,多硫化物分解析出更多的硫。大量硫物理化学沉积能引起气藏严重污染和伤害。硫沉积通常采取与温度和压力有关的硫溶解能力作为硫沉积条件的判别依据。国内外不少学者对硫溶解度开展了实验和理论研究,其中最为著名的是 Bruce E Robert 的硫在酸性流体中溶解度的常数经验关系式。此后, Kunal Karan 等(1998)建立了用于预测硫在酸性气体中溶解度的热力学模型,并用该模型模拟计算了硫在纯硫化氢气体中以及酸性气体混合物中的溶解度。Tomcej(1988)利用状态方程预测了低压下硫在酸性气体中的溶解度,Heidemann(2001)利用改进的 PR 状态方程描述了中高压条件下酸性气体中硫的相行为及其溶解度。卞小强等(2011)基于化工热力学和超临界流体缔合理论,建立了酸性气体中硫溶解度的半经验、半理论四参数(压力、温度、溶解度和超临界流体密度)缔合模型,该模型同时考虑了高温、高压和密度对缔合反应的影响,克服了 Chrastil、Del Valle 模型不考虑高压对缔合平衡的影响以及 Gordillo 模型参变量过多的缺陷,极大地提高了预测硫溶解度的精度。

Kuo(1972)最早建立了硫沉积量和渗透率的经验关系式。Adin(1978)基于实验建立了固相颗粒沉积引起的孔隙度和渗透率变化的经验模型。Gruesbeck 和 Collins(1982 年)引入堵塞通道率来表征硫沉积对渗透率的伤害。F Al Awadhy 等(1998)实验研究了碳酸盐岩油藏不同原油驱替速度下硫沉积引起驱替压差增加的问题。Shedid A Shedid(2004)实验研究了碳酸盐岩油藏中元素硫沉积以及沥青与元素硫共同沉积的储层伤害问题,并利用扫描电镜(SEM)研究了岩芯中硫沉积位置。Abdulrazag Y Zekri(2009)和 Shedid A Shedid(2009)分别实验评价了元素硫沉积和沥青沉积对碳酸盐岩油藏注 CO_2 驱替动态的影响。Tran 和 Civan 等(2010)对不同粒径、不同形状、不同组分和不同浓度的微粒对裂缝造成的伤害进行了实验研究。

二、硫沉积预测模型研究进展

Kuo 建立了一维径向流动模型来研究了井距、产气速度、井筒半径对硫沉积的影响。Roberts 应用常规黑油模型用油组分替代固态沉积硫,并设置其相对渗透率为零来模拟硫沉积过程。Jamal(2000)基于文献 Gruesbeck 和 Collins,考虑硫的沉积和吸附,建立了元素硫运移沉积数学模型。Nicholas Hands 等(2002)考虑近井地带温度变化和地层中水动力效应影响,建立了高含硫裂缝性气藏硫沉积预测解析模型。Faruk Civan(2007)建立了微粒在多孔介质的孔隙吼道中运移、聚集、沉积、堵塞等综合储层伤害数学模型。郭肖等(2006、2009)利用岩芯流动实验(借助扫描电镜)研究了不同注入速度下岩芯中不同位置处的(硫微粒)沉积量的大小,并利用建立的三维多组分数学模型研究了初始硫化氢浓度、岩石渗透率和气流速度对硫沉积的影响。Jinghong Hu 等人(2013)在常规黑油模型的基础上,分析得到了硫沉积与束缚水饱和度的关系,建立了非达西流动下硫沉积储层伤害模型。当储层压力低于临界压力时,束缚水饱和度降低,压力也下降快,气体生产时间也变短。

第二节 水平井产能公式研究进展

目前水平井的产能分析主要有三种方法:解析方法、物理模拟方法和数值模拟方法。

(1)解析方法。其中包括从数学模型出发推导出水平井产能公式的解析解、保角变换方法、势的叠加原理、镜像反映原理和等值渗流阻力法等,主要是针对地层中的单相渗流情形。

(2)物理模拟方法。物理模拟方法主要是利用物理现象的相似性,通过物理模型直观模拟水平井的渗流场,为数学模型的研究提供依据。

(3)数值模拟方法。数值模拟方法主要是从数学模型出发,给出有效的解法,然后设计软件和直井模拟软件的基础上,准确地表述水平井(如流入井筒的计算、井筒内压力降的描述以及网格的局部加密等)来模拟水平井的开发。

水平井产能解析方法虽然计算精度不高,但是由于其方法简捷,目前仍然被广泛应用来预测水平井产能。

国内外在水平井产能公式研究方面作了大量的研究工作。国外较为典型的是 Borisov、Giger、Joshi 以及 Renard 等人提出的水平井产能公式。其中对 Joshi 公式的引用较为普遍。

20 世纪 80 年代中期,在 SPE 上开始有大量的关于水平井瞬时压力研究的论文发表。在数学模型方面,研究结果涉及到在各向异性介质中水平单井的不定常渗流数学模型,其内边界考虑井筒储存效应和表皮效应,而外边界在垂向上有定压(油藏-油井系统要么有底水要么有气顶)和封闭两种,平面上为无穷延伸或者箱式封闭的情形。常用的求解方法有积分变换方法和 Green 函数方法,先求出线源,再通过 Duhamel 积分加入井储和表皮。在试井分析方法方面,几乎所有的文献都只是约略地概述,而没有给出较详细的结果。著名研究人员有 Goode 和 Thambynayagam(1985)、Daviau 和 Mournonval(1985)、Clonts(1986)、Ozkan 和 Raghavan(1987)、Kuchuk 和 Goode 等(1988)。而涉及到在双重孔隙介质中水平单井的不定常渗流研究的有 Carvalho 和 Rosa(1988)、Aguilera 和 Ng(1989)DuFui-Fu(1991)、刘慈群和王晓冬(1991)等人。

进入 90 年代以来,水平井的不定常渗流理论及井底压力动态分析方面的发展方兴未艾。研究领域扩展到双重渗透介质不定常渗流、带有有限导流垂直裂缝的水平井的压力动态、分支水平井不定常渗流等问题,研究人员有 Ozkan 和 Raghavan(1991)、Thompson 和 Manrique(1991)、Larsen(1992)、王晓冬和刘慈群(1994)、孔祥言和徐献芝(1996)等。

王迎春等人(2011)采用齐成伟的环形裂缝群复势通式,推导出了稳定渗流服从达西定律的低渗透气藏辐射状分支水平井的产能预测公式。刘启国等人(2011 年)通过保角变换方法,推导得到同时考虑高速非达西效应、应力敏感和启动压力梯度的低渗透气藏水平井产能新公式。孙恩慧(2011)等人以顶底不渗透边界的低渗透气藏为例,在直井基础上推导出低渗透气藏的斜度井稳产产能方程。

近几年,由于我国高含硫气藏的开发与开采,国内学者对含硫气藏采气过程中元素硫沉积对水平井产能的影响做了深入的研究。

陈中华等人(2007)根据元素硫溶解度与压力关系,利用稳定渗流理论,建立了元素硫析出的沉积模型。在对水平井流态分析的基础上,预测了高含硫气藏直井和水平井在开采初期,其

含硫饱和度在不同产能下、不同井距处随时间的变化规律。结果表明从元素硫沉积方面考虑,水平井相较于直井更有利于高含硫气藏的开发,并且水平段越长越好。水平井元素硫沉积主要发生在水平段的两端。

王少军等人(2012)考虑元素硫沉积对储层渗透率的影响,建立含硫气藏水平井产量预测公式,并分析水平井长度、储层有效厚度、元素硫沉积和非均质性对产量的影响,其中元素硫沉积和非均质性对水平井产量影响较大。计算结果表明,考虑元素硫沉积的 Joshi 公式和陈元千公式计算结果与实际产量接近,可用于含硫气藏生产初期产量预测。

陈鹏辉等人(2013)根据气相渗流与液相渗流的相似原理和 Roberts 气体相对渗透率与含硫饱和度的关系,成功地将齐成伟公式改造为带状高含硫气藏中分支水平井的拟三维产能预测公式。根据齐成伟公式的高含硫气藏修正公式,分析硫沉积量和渗透率各向异性系数对产能的影响规律后,取得了硫沉积量对产能的影响大于渗透率各向异性系数、在带状高含硫气藏中宜打纵向双分支水平井的重要认识。

第三节 多分支井产能公式研究现状

目前通过解析法得到的多分支水平井产能公式均是建立在水平井段在同一水平面的对称或不对称情况下,其假设过于理想化,和现实情况具有较大的差异。

程林松(1995)等人利用拟三维的思想,运用保角变换、镜像反映等处理方法将三维渗流问题转换为两个二维渗流问题,针对完全对称的多井底水平井(即各分支井水平井段长度相同),推导出了多分支水平井的产能公式。该产能公式的局限性体现在:仅针对完全对称的多井底水平井(即各分支井水平段长度相同),而对于其他分支井布井方式没有很好的适应性。

Larsen(1996)用拟表皮因子法利用全渗透垂直井的线源解将任意的多分支井用一口有综合表皮因子(拟表皮因子)的井代替,从而得到多分支井的产能。拟表皮系数法最主要的特点是不针对特定的井型,对井的结构限制少,而且可以考虑每个分支表皮的影响。但是该模型只能用于单层、均质、水平方向各向同性的油藏,对多层、非均质的油藏却不适用。

彭显强(2003)等人根据拟三维思想,运用保角变换以及镜像理论、叠加原理和等值渗流阻力法等渗流理论,对不完全对称多井底水平井稳定渗流进行了研究,推出其流场分布和产能计算公式。

韩国庆(2004)等人对由两个斜分支组成的双分支井进行讨论,得到了双分支井半解析产能预测模型。他们假设分支井共分为 n 段,整个模型中的未知量有 $2n$ 个,包括每段通过井壁的流入量(n 个)和每段中点处的无因次压降(n 个)。可以建立的方程也有 $2n$ 个,其中包括 1 个质量守恒方程、 n 个压力响应方程和 $n-1$ 个井筒流动方程。对这 $2n$ 个方程进行联立求解,即可求得该双分支井的产能。

陈卫东(2006)等人建立了多分支井油藏渗流与井筒流动耦合的产能预测模型。对于水平井模型考虑了井筒摩擦、井筒内流动和加速油藏流动扰动等引起的压降对产能的影响。模型中油藏渗流计算采用 Joshi 稳态流动模型和 Helmy-Wattenbarger 拟稳态流动模型;水平井筒流动计算采用 Ouyang 单相流动模型;主井筒流动计算采用 Beggs-Brill 两相流动模型。提出了求解所建模型的半解析法,编制了多分支井产能预测软件。通过实例计算分析了多分支井

压力与产能的关系、分支井井筒压力与产量分布,以及某一分支井油层压力、水平井长度变化对其他分支井产能及多分支井总产能的影响。

第四节 压裂井产能公式研究现状

在产能计算方面,针对特定裂缝模型,Mcguire 和 Sikora(1960)、Tinsley 等人(1969)先后给出电模拟的产量预测图版,而 Prats(1961)通过椭圆渗流模型给出等效井径曲线,Raymond 和 Binder(1967)等人利用等值渗流阻力法给出三角裂缝产量预测公式。Agarwal 等人(1979)通过对 Cinco(1977)压力诊断曲线纵坐标取倒数,近似得到了垂直裂缝井的产量递减曲线,研究结果不能令人满意。近年来,Poe(1999、2000)的研究比较深入,他们从半解析解出发,根据裂缝的特定流动期曲线计算了垂直裂缝井的产量递减曲线,结果较好。

蒋廷学(2001)等人运用保角变换原理,分别考虑了无限导流和有限导流情况下的垂直压裂井的稳态产能。

魏建光(2009)等人基于等效井径模型裂缝内线性流动模型、井筒变质量流动模型,运用势叠加原理,建立了压裂水平井油藏渗流与井筒管流耦合模型。研究分析了裂缝参数对其压裂水平井产能影响规律,他们认为:①裂缝宽度与裂缝渗透率对压裂水平井产量影响较小,对裂缝产量与水平井段产量影响较大,随裂缝宽度增宽、裂缝渗透率增大,裂缝产量增大、水平井段产量减小;②裂缝半长对压裂水平井产量、裂缝产量、水平井段产量影响均较大,随裂缝半长增长,压裂水平井产量和裂缝产量增大、水平井段产量减小。并运用灰色关联因素分析方法,给出了裂缝参数对其产能影响的重要性排序方法,在该文献的计算条件下,裂缝参数对差能影响的重要性的先后顺序为:①裂缝条数;②裂缝半长;③裂缝宽度;④裂缝渗透率。

唐汝众(2010)等人假设裂缝均质,其渗透率具有各向同性;考虑裂缝导流能力随生产时间的失效;裂缝中流体的流动为达西流动 3 个条件,建立了油藏与裂缝的物理模型和数学模型,并对其进行了差分求解、编程。通过对胜利油田某水平井的产能预测,对裂缝参数进行了优化,优化结果为:裂缝长度 140m,4 条裂缝,裂缝间距大于 200m,裂缝采用鱼骨状分布。

张汝生(2011)等人将压裂设计软件 FracPT 与油藏描述软件 Eclipse 相结合,设计用以对水平井分段压裂进行产能预测。

第五节 水平井分段压裂产能公式研究进展

水平井分段压裂产能预测主要包括解析法、半解析法和常规数值模拟产能预测方法,解析法和半解析法多用于压裂水平井产能的简单预测和评价,解决单相流动问题;数值模拟可以解决油、气、水三相渗流的问题。

目前对水平井分段压裂产能公式的解析法研究进展如下:

郎兆新(1994)等人在假设流体沿裂缝和水平段无压力损失,压裂裂缝的流量均相等,地层流体仅沿裂缝流入井筒的情况下,应用势理论和叠加原理,研究并提出了水平井分段压裂后的

产能方程的解析法。

孙福街(2005)等人在郎兆新所提出的水平井分段压裂产能公式的原理上,假设流体由裂缝流入水平管段,以及水平管道流入根端的过程中存在压力降,从而建立了更完善的水平井分段压裂产能公式。

曾凡辉(2011)等人结合射孔压裂水平井的油气渗流机理以及流体在水平井筒中的流动规律,应用势叠加原理,建立了考虑孔眼流动、裂缝(孔眼)干扰、井筒与油藏耦合的压裂水平井产能半解析模型,取得了一定的成果。

第六节 气井产能评价方法研究现状

产能是指油气井(层)在一定射孔程度、一定生产压差以及一定时间范围内的生产能力。由于油气田开发的需要,产能有两个显著的特点:必须达到一定生产规模与在较长的一段时间内使油气田能保持稳定生产。

产能评价与配产是油气藏工程的最重要的组成部分。油气层的产能评价从油气田的试油开始。通过试油试采,可以定性地了解储层的渗透性、油气藏的天然能量强弱与油井的采油方式、油气井的产液能力。然后是试井,通过系统试井,不但可以反映储层物性,而且可以通过采油指数等指标来判断油气层平面及纵向上产能的差异,通过观察地层出砂与油气两相流动等现象综合确定油气井的合理生产压差;而不稳定试井主要是确定储层的有效渗流能力,研究储层的非均质性,研究与评价钻完井过程对储层造成的污染大小与投产前对油井的改善状况——表皮系数 $S>0$, 储层存在污染;表皮系数 $S<0$, 储层得到改善;表皮系数 $S=0$, 储层无污染也无改善。

气井产能分析主要分为气井产能测试和气井产能分析两个阶段。

气井产能测试以气体的稳定渗流理论为基础,目的是确定气井的产能方程和合理的生产制度,预测气井产量随着气藏衰竭而下降的方式。气井产能试井的基本方法是首先关井取得静止地层压力,然后开井生产,在短期内多次改变气井的工作制度,待每个工作制度下气流达到稳产后,测量该制度下的产气量、井底压力及井口油、套压等资料,按气体稳定渗流理论整理这些资料,求得气井产能方程式和绝对无阻流量,并以此分析气井生产状况。目前产能测试方法可分为多点稳定流动测试方法和单点稳定流动测试方法等,对应的测试方法有系统试井测试、等时试井测试、修正等时试井测试和一点法测试。

对产能试井资料的解释与处理方法称之为产能分析方法,不同的产能测试方法得到的测试资料应采用不同的产能分析方法,气井产能分析方法有二项式方法、指数式方法以及单点式方法。

自 20 世纪 20 年代起,国外对气井产能评价方法作了大量的研究。

1925 年,巴涅特和波尔斯介绍了气井试井方法,1929 年,Piece 和 Rawlines 对产能试井方法进行了改善。1936 年,Rawlines 和 Schellhards 公布了大量气井基础试井结果,并且推广应用了“常规”回压试井方法,也称系统试井。1955 年,Cullender 提出了一种“等时试井”方法,它包括气井以相等的时间间隔在几种不同的产量下生产。这种试井方法所需要的生产试井时间对于高渗透气藏虽然不长,但是对于低渗透气井来说每次生产后要求压力恢复至测试前的

地层压力,却需要很长的时间,因此,它被 Katz 等人(1959 年)提出的“修正等时试井”方法所替代。

2007 年,段永刚等建立气藏与井筒耦合渗流模型,对罗家寨气藏非稳态产能进行了预测研究。同年,李琰等基于渗流力学理论,建立了含硫气井在非达西平面径向稳定渗流条件下的二项式产能方程,分析了硫沉积对气井产能的影响,并用现场的实测资料予以验证。

2008 年,张烈辉等人从渗流力学出发,分析了高含硫气藏存在的渗流模式,建立了附加表皮、复合渗流模型等产能试井解释数学模型,解决了高含硫气田由于单井产量高、部分井存在硫堵塞等现象导致产能试井曲线异常,部分井资料出现负斜率的问题。

2011 年,潘谷分析了普光气田主体气井不停产测试方法的可行性,建立气井不停产试井(测试)理论研究,提出了气井不停产试井方法和气井不停产试井资料解释方法。

2012 年,袁帅评价了常规产能解释方法的适应性,在此基础上建立了普光气田的产能评价方法,即普光一点法、井口压力二项式产能法、地层系数法、产率比方程法、物质平衡与产能结合法。通过上述方法进行拟合多目标函数,可以得到目前地层压力下单井的产能。

2013 年,李鹭光总结了高含硫气井产能评价非稳态测试分析技术。针对高含硫气井测试成本高、安全风险大、难以普遍采用常规稳态测试评价产能的问题,研究建立了参数约束“一点法”和非稳态测试条件计算稳态无阻流量新方法,有效提高了高含硫气井产能评价的准确性。以龙岗二叠系—三叠系礁滩高含硫气藏为例,利用参数约束“一点法”开展气井产能快速评价,其平均分析误差从 32.7%降至 7.5%。

第七节 章节分布介绍

本书第一章为概论,主要介绍高含硫气藏硫沉积实验和预测模型研究进展以及水平井产能公式与产能评价研究进展;第二章为高含硫气藏开发特征,较全面地介绍了高含硫气藏分布、开发的特点与难点、开发渗流特征、开发技术等;第三章优选出高含硫气藏混合气体偏差系数和黏度计算模型,对水平井产能方程进行了优选和校正,并分析了水平井产能的影响因素;第四章为高含硫气藏水平井气井产能测试与产能分析研究,介绍了高含硫气井常规产能方程的建立,并通过矿场实例阐述其应用;第五章为高含硫气藏水平井试井解释研究,详述了不稳定试井解释理论,并通过矿场实例阐述其应用;第六章为高含硫气藏水平井合理配产研究,主要介绍了高含硫气井合理配产的原则,并结合实例进行分析;第七章为高含硫气藏数值模拟研究,建立了高含硫裂缝性气藏数学模型,并结合某高含硫气藏实际情况,分析其开发技术政策。

参考文献

- [1]《国外六类气藏开发模式及工艺技术》编写组. 国外六类气藏开发模式及工艺技术[M]. 北京:石油工业出版社,1995.
- [2]《气藏开发应用基础技术方法》编写组. 中国五类气藏开发模式[M]. 北京:石油工业出版社,1997.
- [3]Shedid A Shedid, Abdulrazag Y Zekri, Ai-Ain P O. Formation damage due to sulfur deposition in porous media[C]. SPE 73721, 2002.
- [4]杜志敏, 张勇, 郭肖, 杨学峰. 含硫气藏中的硫微粒运移和沉积[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, 23(1):69-72.
- [5]王琛. 硫的沉积对气井产能的影响[J]. 石油勘探与开发, 1999, 10(5):56-58.
- [6]陈康良. 含硫气井的硫沉积及其解决途径[J]. 石油钻采工艺, 1990, 5: 73-77.
- [7]欧成华, 胡晓东, 万红心. 含硫气藏元素硫沉积及防治对策研究[J]. 石油钻采工艺, 2005, 28(6):86-89.
- [8]翟广福. 气藏中硫的沉积机理及其对生产的影响[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(3):301-303.
- [9]朱光有, 张水昌, 等. 中国含硫化氢天然气的形成及其分布[J]. 天然气地球科学, 2004, (6):18-21.
- [10]戴金星, 胡见义, 贾承造, 等. 科学安全勘探开发高硫化氢天然气田的建议[J]. 石油勘探与开发, 2004, 21(6):1-4.
- [11]付德奎, 郭肖, 杜志敏, 等. 高含硫气藏硫沉积机理研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(5):109-111.
- [12]Roberts B E. The effect of sulfur deposition on gas well inflow performance[C]. SPE Reservoir Engineering, 1997, 12(2):118-123.
- [13]Kunal Karan, et al. Sulfur solubility in sour gas: predictions with an equation of state model[J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1998, 37: 1679-1684.
- [14]卞小强, 杜志敏, 汤勇. 四参数缔合模型预测酸性气体中硫的溶解度[J]. 天然气工业, 2011, 31(3):73-74.
- [15]Kuo C H. On the production of hydrogen sulfide—sulfur mixtures from deep formations[J]. Journal of Petroleum Technology, 1972, 24(9): 1142-1146.
- [16]Adin A. Prediction of granular water filter performance for optimum design[J]. Filtration and Separation, 1978, 15(1):55-60.
- [17]Gruesbeck C, Collins R E. Entrainment and deposition of fine particles in porous media[J]. SPE, 1982, 12(1):847-856.
- [18]Kuo C H, Clossmann P J. Theoretical study of fluid flow accompanied by solid precipitation in porous media [J]. AIChE Jour, 1966, 12(1):995.
- [19]Jamal H, Abou-Kassem. Experimental and numerical modeling of sulfur plugging in carbonate reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2000, (26): 91-103.
- [20]Guo Xiao, Du Zhimin, Yang Xuefeng, Zhang Yong and Fu Dekui. Sulfur deposition in sour gas reservoirs: laboratory and simulation study[J]. Petroleum Science, 2009, 6(4):405-414.
- [21]Jinghong Hu, Shunli He. Modeling of sulfur plugging in a sour gas reservoir[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2013, 11:18-22.
- [22]Giger F M, Reiss L H and Jourdan A P. The reservoir engineering aspect of horizontal drilling[C]. SPE 13024, 1984.
- [23]Economides M J, Brand C W, Frick T P. Well configuration in anisotropic reservoirs[C]. SPE 27980, 1994.
- [24]Babu D K, Odeh A S. Productivity of a horizontal well APP indices A and B[C]. SPE 18334, 1988.

- [25]Renand G,DuPuy J M. Formation damage effects on horizontal well flow effieieney[C]. SPE 19414,1991.
- [26]Babu D K,Odeh A S. Productivity of a horizontal well[C]. SPE 18298,1989.
- [27]Penmateha V R,Khalid Aziz. Effeets of pressure drop in horizontal wells and optimum well length[C]. SPE 57193,1999.
- [28]Travis Billiter, John Lee, Robert Chase. Dimensionless inflow-performance-relationship curve for unfractured horizontal gas wells[C]. SPE 72361,2001.
- [29]Thrhan Yldiz. Multilateral pressure-transient response[C]. SPE 83631,2003.
- [30]Kamkom R,Zhu D. Evaluation of two-phase IPR correlations for horizontal wells[C]. SPE 93986,2005.
- [31]Chen H Y,Asaad N. Horizontal-well productivity equations with both uniform-flux and uniform-pressure wellbore modes[C]. SPE 97190,2005.
- [32]Azar F-Nejad, et al. Potential distribution around sources with finite length(horizontal and vertical partially penetrating wells and fractures)Part 1:steady state fuild flow[C]. SPE 35270,1996.
- [33]范子菲. 底水驱油藏水平井产能公式研究[J]. 石油勘探与开发, 1993,1(20):71-75.
- [34]程林松,郎兆松,张丽华. 边水驱油藏水平井开采的油藏工程研究[J]. 石油勘探与开发,1993 (A00):121-126.
- [35]吕劲. 水平井度势、产量和表皮因子公式和讨论[J]. 油气井测试,1995,4(3):14-16.
- [36]窦宏恩. 预测水平井产能的一种新方法[J]. 石油钻采工艺,1996,18(1):23-24.
- [37]刘想平. 气藏水平井稳态产能计算新模型[J]. 天然气工业,1998,18(1):17-19.
- [38]王迎春,邱元瑞. 低渗气藏中分支水平井的产能预测公式[J]. 油气地球物理,2011,9(3):69-70.
- [39]刘启国,蒋艳芳,张烈辉. 低渗透气藏水平井产能计算新公式[J]. 特种油气藏,2011,18(5):71-74.
- [40]孙恩慧,李晓平. 低渗透气藏气水两相流井产能分析方法研究[J]. 岩性油气藏. 2012,24(6):121-124.
- [41]程林松,李春兰,郎兆新,张丽华. 分支水平井的研究[J]. 石油学报,1995,16(2):49-55.
- [42]Larsen L. Productivity computations for multilateral, Branched and other generalized and extended well concepts[C]. SPE 36754,1996.
- [43]彭昱强,何顺利,魏俊之. 不完全对称多井底水平井产能研究[J]. 2003,2(2):28-30.
- [44]韩国庆,吴晓东,陈昊,等. 多层非均质油藏双分支井产能影响因素分析[J]. 石油大学学报,2004,28(4):81-85.
- [45]陈卫东,Hill A D. 多分支井产能预测方法[J]. 中国海上油气,2006,18(6):394-398.
- [46]蒋廷学,单文文,杨艳丽. 垂直裂缝井稳态产能的计算[J]. 石油勘探与开发,2001,28(2):61-63.
- [47]魏建光,汪志明,张欣. 裂缝参数对压裂水平井产能影响规律分析及重要性排序[J]. 水动力学研究与进展,2009,24(5):631-639.
- [48]唐汝众,温庆志,苏建,曲占庆. 水平井分段压裂产能影响因素研究[J]. 石油钻探技术,2010,38(2):80-83.
- [49]张汝生,孙志宇,李宗田,张祖国. 黑油模型和压裂设计软件相结合预测水平井分段压裂产能[J]. 石油钻采工艺,2011,33(6):70-73.
- [50]郎兆新,张丽华,程林松. 压裂水平井产能研究[J]. 石油大学学报,1994,18(2):43-46.
- [51]孙福街,韩树刚,程林松,李秀生. 低渗气藏压裂水平井渗流与井筒管流耦合模型[J]. 西南石油学院学报,2005,27(1):32-36.
- [52]曾凡辉,郭建春,尹建. 井筒与油藏耦合的压裂水平井非稳态产能计算模型[J]. 现代地质,2011,25(6):1059-1066.
- [53]Rawlins E L, Schellhardt M A. Back-pressure data on natural-gas wells and their application to production practices[R]. Bureau of Mines, Bartlesville, Okla, USA, 1935.
- [54]段永刚,陈伟,李允,等. 罗家寨气藏非稳态产能预测新方法研究[J]. 西南石油大学学报,2007,29(1):64-

66.

- [55]张烈辉,刘启国. 含硫气藏气井产能试井解释理论[J]. 天然气工业,2008,4:86-88.
- [56]李琰,李晓平. 含硫气藏产能分析方法研究[J]. 西南石油大学学报,2007,29:43-45.
- [57]朱斌. 洞穴-裂缝-孔隙三重介质储层气井试井分析方法研究[D]. 成都:西南石油大学学位论文,2011.
- [58]潘谷. 普光气田主体气井不停产试井研究及应用[D]. 武汉:长江大学学位论文,2011.
- [59]袁帅. 普光高含硫气藏产能分析方法研究及其应用[D]. 成都:西南石油大学学位论文,2012.

第二章 高含硫气藏开发特征

第一节 高含硫气藏分布

高含硫气藏全球分布广泛,目前全球已发现 400 多个具有工业价值的高含硫气田(藏),主要分布在加拿大、美国、法国、德国、俄罗斯、中国和中东地区。

全球高含硫气藏储量超过 $736\ 320 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占世界天然气总储量的 40%。加拿大是高含硫气田较多的国家,其储量占全国天然气总储量的 1/3 左右,主要分布在落基山脉以东的内陆台地。阿尔伯塔省有 30 余个高含硫气田,天然气中 H_2S 的平均含量约为 9%,如卡罗林(Caroline)气田, H_2S 含量为 35.0%;卡布南(Kaybob South)气田 H_2S 含量为 17.7%;莱曼斯顿(Limestone)气田 H_2S 含量为 5%~17%;沃特堂(Waterton)气田 H_2S 含量为 15%,这 4 个气田是加拿大典型的高含硫气田,探明地质储量近 $3000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

俄罗斯高含硫气藏储量接近 $5 \times 10^{12} \text{ m}^3$,主要集中在阿尔汉格尔斯克州,分布于乌拉尔-伏尔加河沿岸地区和滨里海盆地,以奥伦堡(Orenburg)和阿斯特拉罕(Astrakhan)气田为代表。其中,奥伦堡气田是典型的高含硫大型气田,天然气可采储量达到 $18\ 408 \times 10^8 \text{ m}^3$,气体组分中 H_2S 含量为 24%。

此外,美国、法国和德国等都探明有高含硫气藏储量,典型的大型高含硫气田有:美国的惠特尼谷卡特溪(Whitney Canyon-Carter Creek)气田,探明天然气储量 $1500 \times 10^8 \text{ m}^3$;法国的拉克(Lacq)气田,探明天然气储量 $3226 \times 10^8 \text{ m}^3$;德国的南沃尔登堡(South Woldenberg)气田,探明天然气储量 $400 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

四川盆地是我国天然气工业的发源地,天然气规模化勘探始于 20 世纪 50 年度初,已发现的 22 个含油气层系中有 13 个高含硫气藏,近 15 年发现的众多二叠系、三叠系礁滩气藏均为高含硫气藏。我国 H_2S 含量超过 30 g/m^3 的高含硫气藏中有 90%集中在四川盆地。四川盆地已探明高含硫天然气储量约 $9200 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国天然气探明储量的 1/9。已动用高含硫天然气储量 $1402.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,占已探明高含硫天然气储量的 15%,开采潜力大。华北油田赵 2 井是我国目前已钻遇硫化氢含量最高的井,其硫化氢含量高达 92%,四川盆地川东地区飞仙关组硫化氢含量大多在 14%~17%,各个气田 H_2S 含量差异较大,但目前已发现的气田 H_2S 含量一般低于 20%,气体中基本不含 C_7 以上烃类组分,部分气田含有有机硫。

第二节 高含硫气藏开发的特点与难点

由于硫化氢气体的剧毒性和腐蚀性,使得安全清洁经济地开发高含硫天然气的技术要求

高、难度大,主要体现在以下几个方面:

(1)气藏复杂特征导致开发技术需求复杂化。

以四川盆地高含硫气藏为例, H_2S 含量最高达 $493\text{g}/\text{m}^3$,最大埋深达 7000m ,最大地层压力近 90MPa ,最高温度达 175°C ,包括裂缝—孔洞、裂缝—孔隙等复杂储集类型和不同活跃程度的边、底水,气井产能较高但差异大,难以采用同一技术模式进行开发。

(2)地理和人居环境对气藏开发提出苛刻要求。

高含硫气藏开发工程量大、成本高;多数高含硫气藏处于多静风、人口密度大的环境,高含硫天然气一旦泄露,后果严重;农业经济所占比重较重,环境保护要求高。这些客观条件对高含硫气藏安全清洁开发提出了极高的要求。

(3)气藏开发前期评价质量要求高。

大型高含硫气田开发钻完井、净化厂和集输系统建设工程量和投资大,产能建设需准确确定产能规模,对气藏早期描述、气井产能快速评价要求高。在高含硫气井资料录取受限的情况下,确保开发前期评价的可靠性难度大。

(4)气藏开发安全保障与成本控制难度大。

高含硫气藏开发材质等级高、工艺技术复杂,目前国内高含硫气藏开发的材质主要依赖进口,导致成本大幅度增加,要兼顾安全生产和效益开发,需研发适应不同工况下的新型抗硫管材、设备与工艺技术,准确评价安全性。新领域的开发探索工作量大,难度高。

(5)环境与安全风险实时评价与控制技术要求高。

高含硫气藏开发风险控制涉及钻完井、地面集输、净化和气田水及钻井废泥浆处理等环节,其核心问题是风险的量化评估难度大,环境保护的关键点是解决针对高含硫气田开发过程中产生的特定污染物的治理技术难题,如含硫有毒气体、钻井废泥浆、含硫化氢气田水等的处理技术及工程化应用。

第三节 高含硫气藏开发渗流特征

(1)元素硫来源及运载理论。

高含硫天然气在地层中一般会有元素硫形成。元素硫的形成主要有两种可能:一是硫化氢在地层高温环境中,与硫化亚铁发生氧化—还原反应生成元素硫;二是硫化氢和二氧化碳在高温高压环境下发生反应生成元素硫。

元素硫在天然气中的运载方式一般分为两种:化学运载和物理运载。化学运载是指:在地层条件下形成的元素硫与硫化氢结合成多硫化氢。物理运载是指元素硫溶解在分子烷烃混合流体中,或元素硫以微滴状被高速气流带走。

(2)元素硫在酸气中的溶解。

元素硫在高含硫天然气中的溶解包括化学溶解和物理溶解。化学溶解是指硫与硫化氢形成多硫化氢;物理溶解指硫溶解在分子烷烃流体中。

(3)硫化氢气体及硫在地层中的吸附。

气体吸附和硫在多孔介质中吸附是高含硫天然气在地层中流动时存在的普遍现象。气藏模拟中常用 Langmuir 等温吸附模型来描述气体在多孔介质中的吸附现象。而对于高含硫气