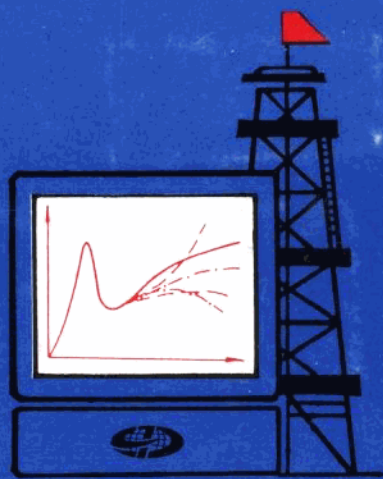


煤层气井水力压裂 计算原理及应用

乌效鸣 编著



中国地质大学出版社

目 录

第一章 概述	(1)
§ 1.1 引言	(1)
§ 1.2 煤层气压裂开采的发展概况	(2)
§ 1.3 煤层气压裂开采的一般流程	(4)
§ 1.4 煤层水力压裂工艺技术	(6)
§ 1.5 煤层水力压裂原理研究概况	(13)
第二章 裂缝产状、形态和破裂压力	(15)
§ 2.1 地应力及其分布	(16)
§ 2.2 裂缝产状、水平缝与垂直缝判据	(17)
§ 2.3 煤层裂缝方位的测试方法	(20)
§ 2.4 煤层裂缝的形态	(21)
§ 2.5 煤层破裂压力	(23)
§ 2.6 煤层裂缝的延伸压力与闭合压力	(27)
第三章 煤岩力学(物理)性质及其对压裂效果的影响	(30)
§ 3.1 煤岩主要力学(物理)性质及其测试方法	(30)
§ 3.2 煤样力学性质测试结果与比较分析	(32)
§ 3.3 煤岩脆性断裂的力学特性	(34)
§ 3.4 煤岩物理性质概述	(36)
§ 3.5 煤岩的孔隙度和渗透率	(39)
§ 3.6 煤岩特征及其对压裂的影响	(41)
第四章 煤层压裂模拟计算原理	(44)
§ 4.1 无滤失裂缝尺寸计算模型	(44)
§ 4.2 压裂液在裂缝中流动摩阻计算模型	(48)
§ 4.3 渗流滤失模型	(50)
§ 4.4 综合模型体系	(56)
§ 4.5 加砂设计	(57)
§ 4.6 煤层气的增产效果预测	(58)
第五章 煤层气井水力压裂模拟软件	(61)
§ 5.1 压裂模拟软件总体设计	(61)

§ 5.2	输入参数设计.....	(61)
§ 5.3	裂缝产状、形态与破裂压力子模块	(63)
§ 5.4	裂缝尺寸、滤失量与净压力子模块	(64)
§ 5.5	加砂设计与增产效果预测子模块.....	(65)
§ 5.6	输出设计.....	(67)
第六章	煤层气井水力压裂压力曲线分析	(72)
§ 6.1	二维模型压力曲线分析.....	(72)
§ 6.2	拟三维模型压力曲线分析.....	(78)
§ 6.3	压裂异常情况的诊断.....	(84)
第七章	煤层气井水力压裂优化设计	(86)
§ 7.1	煤层压裂效果的定性分析.....	(86)
§ 7.2	压裂优化设计的目标函数.....	(88)
§ 7.3	优化设计的数学方法.....	(89)
§ 7.4	压裂优化设计软件.....	(90)
§ 7.5	煤层气井水力压裂优化设计实例.....	(93)
参考文献		(97)
后记		(99)

第一章 概 述

§ 1.1 引 言

一、煤层气开发的意义

煤层气又称煤层甲烷气,煤炭工业称之为煤层瓦斯,是在成煤过程中形成并赋存于煤层中的一种非常规天然气。这种天然气大部分(70%~95%)吸附在煤岩孔隙内表面上,少量呈游离状态存在于煤的割理和其他孔、裂隙中,还有少许溶解在煤层水中,一般天然含气量平均可达几立方米/吨煤至几十立方米/吨煤。对煤层气进行开采可以为工业和民用提供重要能源;同时也可以减少煤矿开采时的瓦斯爆炸事故。

众所周知,为了煤矿安全,以前总是将煤层瓦斯抽放掉,虽然有一些利用,但其开采活动总是与采煤作业结合进行的,作为一种副产品,只能是抽放多少利用多少。近十多年来,引进常规油气钻井、开采技术进行煤层甲烷开采,并根据煤储层的特点不断改进,获得了一定的成功。可以在相当大面积的地区连片开采,也可以在超过采煤深度的煤层中开采,并获得了可观的经济效益。从而,逐步形成了一个新的工业部门——煤层甲烷工业,使煤层甲烷成为一种新的资源。

世界上有74个国家蕴藏着煤炭资源,同时也赋存着煤层气,其中俄罗斯、中国、美国等12个国家的境内,埋深小于2 000 m的煤层气资源达 $270 \times 10^{12} \text{ m}^3$,相当于常规天然气探明储量的两倍多。由于开采煤层气具有深度较浅、投资小、见效快的特点,70年代以来,煤层气的开发受到越来越多国家的注意和重视,并相继开始了勘探试验和工业开采活动。尤其在美国,经过十多年的试验探索和生产实践,已建立了以圣胡安盆地和勇士盆地为代表的大规模煤层气开采工业区,形成开采这一丰富的非常规天然气资源的商业规模。

二、煤层气的技术性问题

开采煤层气或煤层甲烷需要引用常规天然气的理论和钻井、开采技术,但又不能完全照搬油气钻、采技术。因为煤层气有其自身的特点,这就要求在煤层甲烷开发活动中加强理论研究,使钻井、测试、开采和利用系统配套。同时,还必须有一支各工种配套,具有综合施工能力的队伍,这样才能获得好的经济效益。

开采煤层甲烷,以煤作为产气层,而煤本身又是生气层,因而既要研究煤层中天然气的生成,又要研究煤层的储集性和流体在煤层中的迁移规律。但是,要使煤层甲烷开采获得成功,更重要的是研究煤的储集性能。必须对煤层的储集性能有清楚的了解,才能制定出有效的开发方案。

煤层作为生气层,首先必须有煤炭资源保证。煤层的分布、厚度、埋深、煤阶、灰分含量等因素影响着煤的含气量,决定了气资源规模的大小,所以在煤层甲烷开发中,准确测定上述因素对煤层含气量的影响具有重要意义。

解吸压力、储层压力、渗透性等因素也影响煤层甲烷的产量,其中对煤的渗透性研究具有格外重要的意义。与这些方面有关的一系列问题,构成了煤层甲烷研究工作的丰富而又复杂的系统工程。

由于煤的特殊力学物理性质,钻井、完井、测试和开采技术必须与煤储层性质相适应,所以从钻井、测试到开采的过程是一个技术适应性试验的过程,必须通过试验、优选技术、优化开发方案才能获得高的产气量。

利用以钻井水力压裂为关键技术的一整套工艺过程对煤层气进行开采,是当今世界上开发煤层气所用的主要技术方法。在压裂开采过程中,通常需要向钻井井眼中注入高压液体并限制其在预定井段压开煤层,形成长达十几米至一百多米的夹砂裂缝,然后排水降压。当煤层水压力降至吸附气解吸压力以下时,煤层气首先从煤岩的微孔隙表面上释放出来,并扩散进入煤岩的割理系统,再从割理系统中渗流至压开的裂缝中,最后在比原井眼面积大得多的裂缝中汇集流向井眼并被排采出地面。因此水力压裂的效果是影响煤层气产出效率的关键之一。

尽管常规的水力压裂工艺方法在石油及天然气开采中应用已有较长历史,但由于煤系地层在地质条件和岩石性质等诸多方面与常规油储层有明显差别,并且煤层气的赋存、运移和产出机理及过程与常规油气层也不相同,需要对常规压裂技术进行必要的改进和发展,以适于煤层气的开采,因此煤层气井水力压裂工艺过程和作业参数有其自身的特点和规律。

§ 1.2 煤层气压裂开采的发展概况

一、国外煤层气开采技术发展动态

水力压裂工艺技术首次用于煤层压裂是1954年,在美国亚拉巴马州沃克县。此后,煤层气井压裂技术并未大面积推广。直到1973年美国矿业局为了调查评价水力压裂对于改善采矿前煤层脱气所具有的价值,以煤矿安全为首要目的进行了大量的压裂作业试验。1978年美国能源部(DOE)和有关公司集中在亚拉巴马州北部的勇士盆地进行了旨在进一步评价煤层水力压裂特征和煤层气商业价值的联合项目,大大促进了煤层气在美国的勘探开发利用,并由此逐步形成今日生机勃勃的煤层气工业。

经过十多年的开发,目前美国已有两个盆地建立起煤层甲烷工业,它们是圣胡安盆地和勇士盆地,被称为煤层甲烷工业发达地区。圣胡安盆地第一个煤层甲烷气田是锡达希尔气田,它是1977年投入开采的,到1989年全盆地有11个采区,生产井400多口(见图1.1),1989年产煤层甲烷约 $21.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。各采区相互毗邻,形成开采范围达1 560 km^2 的连片采区。勇士盆地第一个投产的气田普莱森特格洛夫气田于1980年投产,到1989年底全盆地内有9个采区,范围有1 080 km^2 左右,基本连片,共有生产井约970口,1989年产煤层甲烷约 $7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

勇士盆地的煤层甲烷产量在勇士盆地天然气总产量中所占比例逐年上升,1988年底达到近30%。同时,勇士盆地煤层甲烷产量在亚拉巴马州天然气总产量中所占的比例达到12%。勇士盆地煤层甲烷产量到1989年累计达到 $28.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ (见图1.2)。其他一些含煤盆地的甲烷开发活动也在积极进行。

此外,澳大利亚于80年代初开始从本国地质特点出发,组织了大规模的煤层成岩矿物和压裂技术的攻关研究项目。加拿大、日本、德国、英国、印度、波兰等20多个国家也相继开展了煤层气的勘探开发试验活动。目前,煤层气压裂开采作为新兴的能源开发技术已在海外兴起。

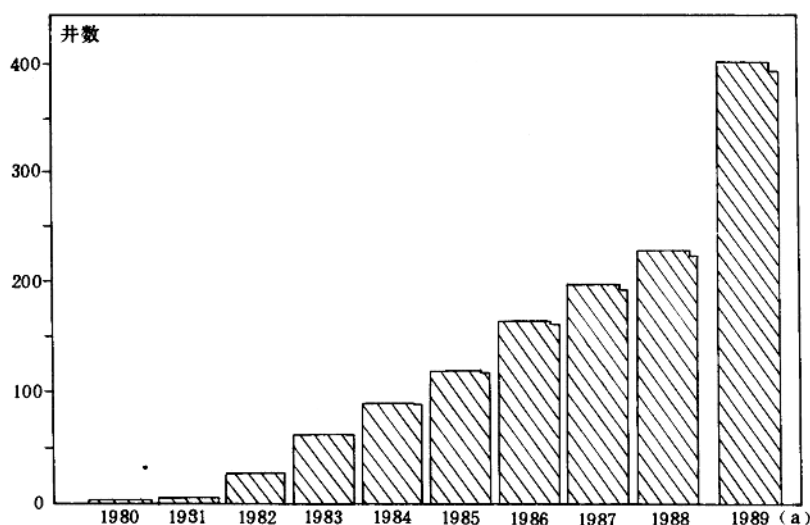


图1.1 美国圣胡安盆地的煤层甲烷生产井数

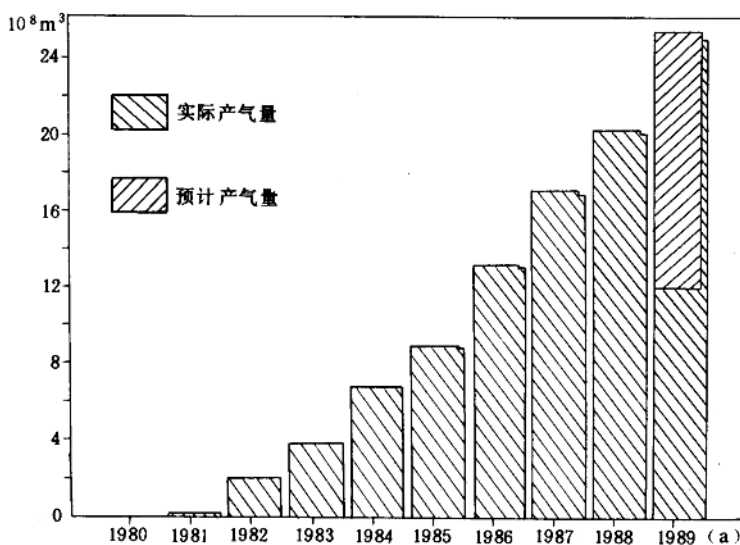


图1.2 美国勇士盆地煤层甲烷年产量

二、我国对煤层气开发的状况

我国70~80年代期间,在辽宁、河南、湖南、山西等地由一些矿务局与科研单位合作,进行过以地面垂直钻井压裂方式开发煤层气的试验,取得一定的增产效果。但当时由于缺乏对煤层

气储集及产出机理的深入认识,也没有进行系统的适于煤系地层特点的压裂原理和施工设计研究,故试验项目一度中断,未能形成开发、推广规模。

80年代末期,我国煤层气的勘探开发进入新的历史阶段,国家计委对煤层气事业给予了极大的重视,将煤层气勘探开发研究列入“八五”国家科技攻关项目。据不完全统计,1990~1995年期间,地矿、煤炭、石油所属有关部门以及地方政府已在十余个煤田或地区,利用国内资金或与国外合资打了60多口资源评价钻孔和生产试验钻孔,有的地方还进行了采气试验,取得了可喜的成果。

1991年在经过较为系统的国内外信息调研和技术准备的基础上,地矿部华北石油地质局正式提出“八五”国家重点科技攻关专题“煤层气井压裂工艺方法研究”项目,并由中国地质大学(武汉)承担其中的专项“煤岩力学物理性质及煤层气井压裂设计软件研究”,获批准实施。从而,在国内开始系统深入地进行煤层气井水力压裂原理和优化设计的研究。

§ 1.3 煤层气压裂开采的一般流程

煤层气开采过程包括钻井、完井、强化、测试和开采等,以下将进行简略地介绍。

一、钻井

开采煤层气常采用采空区钻井、水平井和垂直井三种钻井方式(图1.3)。

采空区钻井是从采空区上方由地面钻井到煤层上方或穿过煤层,也可在采煤之前钻井。采空区顶板因巷道支柱前移而坍塌,产生新的裂缝使瓦斯从井中涌出,如果采空区顶部还有煤层并成为采空区的一部分,瓦斯涌出量更大。这种井的产量下降较快,宜当地利用。采空区对煤层

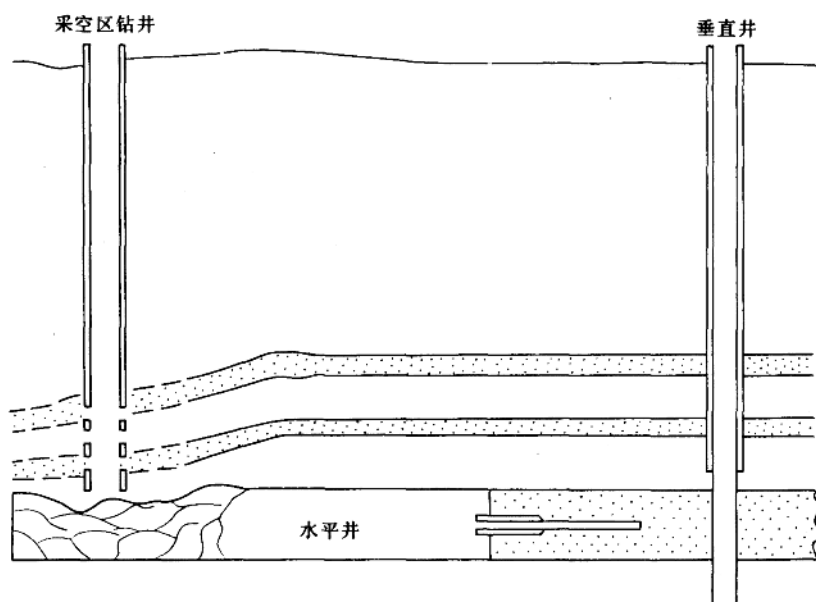


图1.3 煤层气开采的钻井方式

脱气可达50%。

水平井有二种方式,一种是从巷道打的水平孔抽放瓦斯,另一种是从地面先打直井再造斜井,沿煤层钻水平孔,是一种形式的强化措施,称为“排泄孔”。

垂直井是从地面打直井穿过煤层进行采气,是最主要的钻井方式。钻井中常遇到的问题是地层涌水、煤层渗透性受损、煤层坍塌,煤层需经排水后方能产气。对这些问题,要求在泥浆使用、钻井工艺、完井技术上采取特殊的措施。

煤层气井有单煤层井与多煤层井之分。按深度,大于900 m 的为深煤层井,小于900 m 的则为浅煤层井。按功能可划分为勘探井、生产井和监测井等。

二、完井

煤层气井的完井方式分为裸眼完井、套管完井和混合完井(即裸眼完井与套管完井两种方式混合),见图1.4。

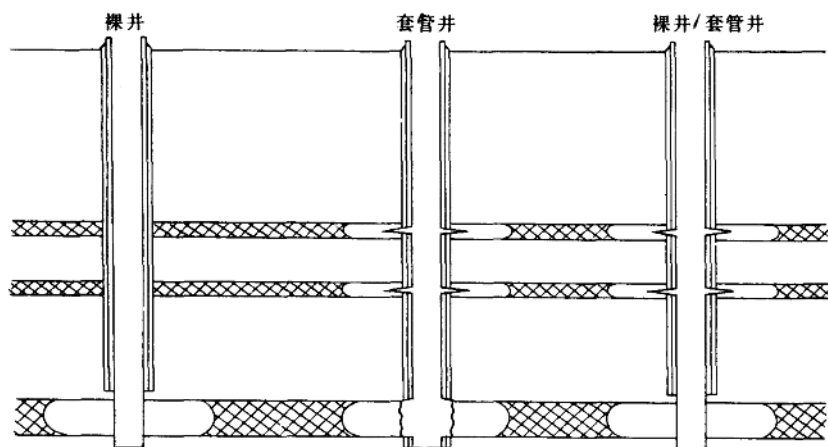


图1.4 煤层气井完井方式

裸眼完井是钻到煤层顶板,下套管固井,再钻开生产层段的煤层,产气煤层保持裸眼。这种完井方式在煤层气井中是费用最低的完井方式,但强化作业时的稳定性差,煤层坍塌会导致失败,一般只在单煤层井使用。

套管完井是对产气煤层下入套管。其优点是对产层入口可控制保护,维持井身稳固。固井时尽量使用低密度水泥,分级注水泥固井和采用特殊的固井工具克服水泥引起的地层伤害。采用特殊的封隔器装置可使水泥只在非生产层处固井,而在产层处不与煤层接触,避免水泥渗入损伤煤层。

套管尺寸必须适于生产情况的需要。应该根据预测的气水产出量,选用一定抽水设备后,再决定套管尺寸。

完井过程中还应注意对地层入口的控制,即裸眼、射孔、割缝等技术。

三、强化

由于绝大多数煤层的渗透率都很低,仅靠井眼圆柱侧面积作为出气面积是远不够的,所以必须采取人工强化增产措施,包括煤层水力压裂、打水平排泄孔和洞穴应力释放法等。

压裂的效果之好坏,是生产井成败的关键。在水力压裂强化时,压裂产生的裂缝最好与煤层的面割理方向垂直,以获得更高的产气量,这就要求在造缝控制方面采取专门技术。

同时,对区域应力场特征,煤层及顶底围岩的力学物理性质要能准确地掌握。例如:煤岩的弹性模量一般比围岩要低得多,压裂缝会比预期的宽;煤的脆碎性会导致出现特别高的处理压力等情况。因此,压裂强化设计必须以常规储层中使用的工艺为基础进行改进。另外一个问题是压裂后需要洗井,清除井内回流的液体,排掉井内所有的碎屑。这些措施,可能由于煤的低渗透性而要比常规储层更为显得重要。

洞穴应力释放法是一种综合的混合方法。在紧靠煤层附近或煤层之中造成一个洞穴,洞穴使煤层中应力场的形式和大小重新分布。应力分量从洞穴的四周指向洞穴,当负荷大于煤层的极限承载能力时,煤层崩落并向洞穴里垮塌,并使煤进一步破碎成小块。从洞穴中排掉垮塌煤块形成了一个松弛带,松弛带内现存裂缝敞开使煤层和围岩更具渗透性,这种条件对煤层甲烷气的迁移和产出十分有利。

四、升举

煤层气井有些能够自流生产,但一般需要人工升举。抽出煤层中的水,使产层压力下降后才能产气。煤层气井一般在前期几个月到一年内产水量大。因此,研究水文地质条件,预测产水量,选择合适的抽水设备进行抽排,是关系到煤层气井成败的又一关键技术。煤层气井开采要尽量排水以降低井底压力。

与常规储层的开采方式不同,对煤层气井的抽水与排水,不需要通过邻井的注水保持压力,而是在邻井同时排水降压,以获得高的产气量。这一点,应特别引起注意。

§ 1.4 煤层水力压裂工艺技术

一、压裂液的功用和性能要求

影响煤层压裂成败的诸多因素中,压裂液及其性能是非常重要的。对大型煤层压裂来说,这个因素就显得更为突出。压裂液及其性能对能否造出一条足够尺寸的、有足够导流能力的填砂裂缝是有直接关系的。在煤层压裂施工的各项费用中,压裂液要占50%左右,使用恰当性能的压裂液也是提高煤层压裂经济效益的重要措施。

压裂液是一个总称。在煤层压裂过程中,注入井内的压裂液在不同的阶段有各自不同的功用,它们可以分为三种。

1. 前置液

它的作用是破裂煤层并造成一定几何尺寸的裂缝,以供后面的携砂液进入。在温度较高的地层里,它还可起一定的降温作用。有时为了提高前置液的工作效率,在一部分前置液中加入细砂(粒径100~140目,砂比10%左右),以堵塞地层中的微隙,减少其液体的滤失。前置液的用量有时高达总压裂液量的40%左右。

2. 携砂液

它起到将支撑剂(砂子)带入裂缝,并将砂子置于预定部位的作用。在总液体中这部分所占比重很大。携砂液和其他压裂液一样,都有造缝及冷却地层的作用。

3. 顶替液

它的作用是在打完携砂液后,用顶替液将井筒中全部携砂液带入裂缝中。

根据压裂不同阶段的需要,压裂液可能是具有多种性质的液体,其中还含有用于不同目的的添加剂。对于占液量绝大部分的前置液及携砂液都应具备一定的造缝能力,并使压裂后的裂缝壁面及填砂裂缝有足够的导流能力,因此它们的性能必须具备如下要求:

(1) 滤失少 这是造长缝的重要性能。压裂液的滤失性主要取决于它的粘度与造壁性,粘度高造壁能力大,则滤失少。在压裂液中添加防滤失剂能改善造壁性,将大大减少滤失量。

(2) 悬砂能力强 压裂液的悬砂能力主要取决于粘度,压裂液只要有足够高的粘度,砂子就可以基本处于悬浮状态,这对砂子在缝中的合理分布是非常有利的。

(3) 摩阻低 压裂液在管道中的摩阻愈小,则在设备功率一定的条件下,利用来造缝的有效功率就愈多。反之,摩阻过高不仅降低了有效功率的利用,甚至由于井口压力过高而限制了压裂施工。

(4) 稳定性 压裂液要具备一定的热稳定性,不能由于温度升高而使粘度有大幅度变化。另一种是压裂液的抗机械剪切的稳定性,不因流动而发生大幅度的降解。

(5) 配伍性 压裂液进入地层后,与地层中的岩石矿物及各种流体接触,不应起不利于煤层气渗滤的物化反应。例如不要引起粘土膨胀或发生沉淀而堵塞地层。这种配伍性的要求是非常重要的,往往有些低渗地层压裂后效果不佳,有部分原因就是由于配伍性不好造成的。

(6) 低残渣 要尽量降低压裂液中的水不溶物质(残渣)含量,以免堵塞孔隙而降低煤岩及填砂裂缝的渗透率。

(7) 排液 排液是煤层压裂工艺中的重要环节。排液量的多少直接影响压裂效果,特别是低压井的排液尤为重要。根据地层条件及压裂液的性能,排液量的变化范围很大,从20%~30%到70%~80%不等。

(8) 货源广,价格便宜,便于配制 随着大型压裂的发展,压裂液的消耗量很大,是压裂成本中的主要组成部分。近年发展起来的速溶连续配制工艺,大大方便了施工,降低了对储液罐及场地的要求。

二、压裂液分类

在煤层压裂中,经常使用的压裂液有水基压裂液、油基压裂液、乳状压裂液、泡沫压裂液等。近十几年来发展起来的水基冻胶压裂液具备粘度高、摩阻低及悬砂性好的优点,现在已成为主要使用的压裂液了(在国外占煤层压裂液总用量的三分之二)。

1. 水基压裂液

目前在水基压裂液中主要用三种水溶胀性聚合物作为它的成胶剂,即植物胶(瓜胶、田菁、皂仁等)、纤维素衍生物(羟乙基纤维素、羧甲基羟乙基纤维素等)及合成聚合物(聚丙烯酰胺、聚乙烯醇等),这几种高分子聚合物在水中溶胀成溶胶,交链后成为粘度极高的冻胶。

2. 泡沫压裂液

美国对低渗煤岩地层,成功地进行了水力压裂。为了降低滤失的不利影响及易于反排,采用了泡沫压裂液。常添加有破胶剂及发泡剂的水基冻胶压裂液,将支撑剂经混砂车、高压泵车

携至管汇处,在这里破胶成水并与高压氮气混合,在强烈的搅动下形成泡沫液携砂进入井中。

泡沫压裂液多用淡水、盐水、聚合物水溶液作为基液,二氧化碳、空气、氮气等为气相。发泡剂多用非离子型表面活性剂。

泡沫压裂液中的气-液比多为65%~85%,低于65%泡沫压裂液的粘度偏低,而高于92%则泡沫不稳定。泡沫压裂液的粘度随泡沫干度的增加而增加(干度表示气相所占体积的百分数);温度对泡沫压裂液性能的影响不大。压力下降后由于气体膨胀而使泡沫破裂。

泡沫压裂液具有接近于宾汉型非牛顿液体的流变性。

泡沫压裂液的优点是:

(1) 注入泡沫压裂液到缝中,增加了排液的能量,从而易于排液。

(2) 泡沫压裂液自身具有良好的防滤失作用,因为气-液两相滤失于地层后,任何一相的相渗透率都会降低。泡沫液中的液相又相对的少,二者共同的作用将大大减少对地层的伤害。

(3) 泡沫压裂液有足够的造缝能力与一定的携砂能力。

(4) 泡沫压裂液的摩阻比水要低40%~66%。

但是在使用过程中,还应注意的是:

由于井筒气-液柱的压降低,压裂过程中需要较高的注入压力。另外,使用泡沫压裂液的砂比不能过高,在需要注入高砂比的情况下,可先用泡沫压裂液将较低砂比的支撑剂带入,然后再泵入可携带具有高砂比支撑剂的常规压裂液。

3. 油基压裂液

原油或炼油厂粘性成品油均可用作油基压裂液,但性能不满足要求,故多用稠化油。基液为原油、汽油、柴油、煤油、凝析油,稠化剂为脂肪酸皂,如脂肪酸铝皂、磷酸酯铝盐等。稠化油压裂液遇地层水后会自动破乳。

4. 其他压裂液

为了改善压裂液的滤失性及增加悬砂能力,国外曾在低渗煤层气大型压裂中使用乳状液及酸基压裂液。

聚合物乳状液是由两份油和一份稠化水组成,外相是由水溶性聚合物和具有表面活性剂的淡水、盐水或酸液配制而成。乳状液粘度随外相中聚合物浓度及油相体积浓度的多少而定。油相浓度低于50%则粘度太低,高于80%则乳状液不稳定或粘度太高。用于淡水的表面活性剂是0.5%的托饼油酸钠,而用于盐水的则是季胺盐。

酸基压裂液可以用植物胶、纤维素稠化酸液得到稠化酸,也可以用非离子型聚丙烯酰胺在浓盐酸溶液中以甲醛交链而得到酸胶冻,还可使用OP型表面活性剂可配制油(20%~50%的体积)酸(3%~35%的重量)的油酸乳状液。

三、支撑剂

在地层中产生一条具有高导流能力(导流率),且足够长的填砂裂缝,是使煤层气增产的最重要的因素,煤层气就是依靠这条填砂裂缝才能获得增产效果。可以说煤层水力压裂工程中的各个环节,都要围绕如何提高填砂裂缝的导流能力进行工作。因此,对支撑剂、导流能力、支撑剂沉降的研究显得非常重要。

为了在地层中造成的裂缝,使停泵后不致于闭合,则要在缝内填入支撑剂。

自从出现水力压裂这种增产方法以来,首先而又广泛使用的支撑剂是砂子。而对于中深井(1500 m左右)的各类地层,使用砂子都有一定的成功率。使用砂作为支撑剂的优点是多方面

的,它比较便宜,并且在许多地区大都可以就地取材,这是使用砂子的重要原因。此外,砂子本身还具备如下的长处:圆度较好的砂子,当其强度抵抗不住外来的压力时,破碎成小片,这种破碎状态仍能保持一定的或较高的渗滤能力。使用砂子的缺点是强度不够高,开始破碎的压力大约为 $2\,746\times 10^4\text{ Pa}$,在深井中不能使用。在深井中若使用砂子作为支撑剂,其导流率可能会降低到原有的1/10或更低些,砂子筛选不好或清洗不好而混入杂物时,都会降低其导流能力。

烧结铝矾土制成的支撑剂,我国称之为陶粒。它的成分是铁-钛氧化物、富铝红柱石($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$)及 $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$,形状不规则,圆度为0.65,色深灰,表面光滑,密度为 3.8 g/cm^3 ,硬度在 $1.45\times 10^4\text{ Pa}$ 左右。陶粒具有很高的强度,在 $6\,864\times 10^4\text{ Pa}$ 的闭合压力下,陶粒所提供的导流能力约比砂子高一个数量级,但价格也较贵。因此,陶粒对于深井压裂是很合适的。

还有一种是瓷土制成的支撑剂,它是由富铝红柱石及 $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ 等矿物组成。圆度很好,可达0.9,色灰白,表面光滑,但密度及硬度均较铝矾土烧结的陶粒为低。

超级砂是近年来发展起来的一种支撑剂。它是在砂子或其他固体颗粒外表涂上(或包上)一层塑料(这是一种热固性塑料)。进入裂缝后先软化成玻璃状,然后在地层温度下硬化。例如所用酚醛树脂的固化温度为 54.5°C ,可承受 260°C 的高温。这种支撑剂虽在高闭合压力下会破碎,但能防止破碎后所产生的微粒的移动,仍能保持一定的导流能力。

由于支撑剂在压裂中的重要性,目前在支撑剂的类型及性能上均不断地在发展,近期研究比较多的是改善加工方法的陶粒及超级砂两种。分析现用陶粒的主要矛盾,表现在它的强度与重度两个方面。陶粒的理论破碎压力取决于材料的强度及弹性模量,而后者与制造方法有关。可以把陶粒制成实心型、中空型及多孔型三类,材料相同但制作方法不同,其产品的力学物理性能也有差别。

由高纯度矾土制成的均匀多孔型陶粒,在破碎压力降低到 $13\,728\times 10^4\text{ Pa}$ 以前,孔隙度可达50%。因此,使用高纯度矾土制成的陶粒,在一定范围内增加孔隙度以降低其重度而不太影响其强度的作法是有可能的。使用热固性塑料将密度为 2.0 g/cm^3 (孔隙度为50%左右)的陶粒包起来,可以保证其高强度和低重度的特点。

中空型陶粒的中空体积占总体积的26%时,其强度与实心的相比,基本上不变。中空体积达到45%,下降不到一半。45%的中空体积与20%孔隙度的两种陶粒,具有相同的强度。

陶粒的强度与矿物组成有关,三氧化二铝的含量越多,质地越纯,其强度越大。既保持一定的强度,又要降低密度,则可选择空心或多孔制法,其中空心的优越性较大。

塑料涂层或包层的新型支撑剂可能有较好的发展前途。一般说来比较理想的支撑剂应具有:

- (1) 密度要低,最好低于 2.0 g/cm^3 ;
- (2) 能承受闭合压力到 $13\,728\times 10^4\text{ Pa}$;
- (3) 在 200°C 的盐水中呈化学惰性;
- (4) 圆度应接近于1;
- (5) 按体积计,应与砂子同价。

四、分层压裂

我国的煤层气田,多数都是多层的。在多层情况下,压裂成功率不高的原因之一,是压裂液不能按照人们的意愿进入目的层。该压开的压不开,不该压开的反而压开了,这是人们不希望出现的结果。在多层情况下,要进行分层压裂。分层的方法很多,如利用封隔器的分层方法,利

用暂堵剂的分层方法,利用限流法或填砂法等都可以进行分层压裂作业。

1. 堵球法分层压裂

同时开采渗透率不同的多层煤层气,当压裂液泵入井内以后,液体首先进入高渗层,而一般低渗层是压裂的目的层,这时就可以将一些堵球随液体泵入井中,因为液体先向高渗层流动,所以堵球随之将高渗层的孔眼堵住,待压力蹿起,即可将低渗层压开。这种方法可在一口井中多次使用,一次施工可压开多层。

这种方法的优点是省钱省时,经济效益好。但有时井下并不是想象的那样层次分得很清楚,因而封堵效率并不理想。如果压开一层后,用堵球封堵住,然后再射孔进行第二层作业,这样可得到好效果。

使用的堵球有两大类,一种是高密度的,即球的密度比液体大;一种是低密度的,这种密度低于液体的堵球具有明显的浮力效应(堵球一般是用工程塑料、铝等为材料)。

2. 限流法分层压裂

在分层压裂中,桥塞与封隔器法虽然在分层上有效,但作业复杂且成本高,堵球法有时也因为井况原因而无法使用,例如,若套管外窜漏或因堵球破裂、损伤,使液体旁流则失去封堵作用。

限流法分层压裂用于多层而各层之间的破裂压力有一定差别的煤层气井。此时可用控制各层的孔眼数及孔眼直径的办法,限制各层的吸水能力以达到逐层压开的目的。图1.5是一个限流法的例子。

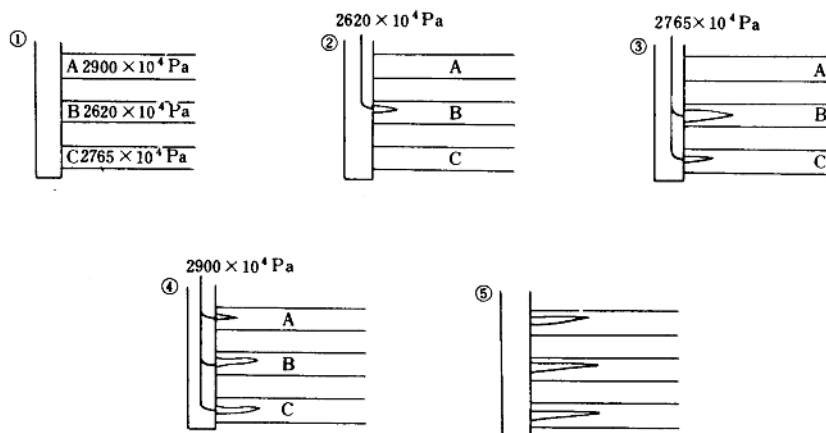


图1.5 限流法的工艺过程

A、B、C三个煤层,其相应的破裂压力为 $2900 \times 10^4 \text{ Pa}$ 、 $2620 \times 10^4 \text{ Pa}$ 、 $2765 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。按射孔计划将各层按一定孔眼数射开,当注入压力(井底)为 $2620 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时,B层压开。然后提高排量,因为孔眼的摩阻比例于排量,当B层的孔眼摩阻大到 $145 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时,注入的井底压力达到 $2765 \times 10^4 \text{ Pa}$,此时C层被压开。继续提高排量,当B层孔眼的摩阻增加 $280 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时,注入的井底压力达到 $2900 \times 10^4 \text{ Pa}$,A层被压开。射孔的作用像井下油嘴,随着排量的增加,井底的压力也不断提高,从而逐层压开,这就是限流分层压裂法。这个方法能逐层地连续被压开,一直到注入压力达到套管允许的强度值为止。

这个方法的特点是在完井射孔前,要按照压裂的要求设计射孔方案,包括孔眼位置,孔的密度及孔径,从而压裂与完井成为紧密关联的一个整体,所以应该研究影响限流完井的几个因素,便于设计限流法压裂。

3. 封隔器分层压裂

我国已研制出多种形式的封隔器及井下工具,可用于多种条件下的分层压裂工艺。在分层压裂中多使用各种配套的井下管柱。图1.6是一套压裂管柱的示意图。

4. 选择性压裂

在同一开发层系中,由于地质上的非均质性,也存在高渗与低渗层段的差别。在几米厚的煤层中存在高、低渗透层的交互层,很难使用封隔器分层或限流法分层压裂。在这种情况下就要使用选择性压裂的方法,使压裂液导至低渗透层以便压开尚有生产潜力或未动的低渗层。具体作法是在向井内挤入压裂液的同时,混入暂堵剂(聚乙烯与石蜡制作的小球),因为液体首先进入吸入能力强的高渗层,暂堵剂随之将高渗层部位的孔眼堵住,使其减少或失去吸水能力,此后泵入不带暂堵剂的压裂液,则能在低渗层部位压裂起缝。

暂堵剂有油溶性与水溶性两种,它们可分别用于煤层气井的选择性压裂上。使用选择性压裂的井最好具有一定的厚度(在4 m以上)和水平裂缝,这样易于控制裂缝产生的部位。如果地下气水层部位清楚,有可能堵住含水高渗层而压开含气低渗层。

选择性压裂也可用于重复压裂上,利用小蜡球将层中原裂缝堵住,在其他气层部位压开新裂缝,可达到增产目的。如果不采用选择性重复压裂的方法,很可能会使原裂缝延伸。采用这种做法有时也会收到一定的增产效果,但也有可能会造成大量出水,导致增产效果不好。

五、人造阻挡层控制裂缝高度

控制垂直裂缝的高度,使裂缝尽可能在煤层中扩展,对煤层气的压裂开采是至关重要的。为此,施工时须在压裂液中应用一种添加剂(固体),使其聚集在裂缝的上部形成一个人工阻挡条带,用以起到阻挡层的作用。

根据流体力学理论可知,流体在裂缝中的流动也遵守一条普遍的法则,即沿阻力最小的通道流动(这一点已被实践所证实)。如果要防止裂缝向下延伸,则使用较重的支撑剂输入到新生成的裂缝底部,此后压裂液就能导向,向裂缝上部流动。诺尔特曾提出一种“非常规压裂技术”用以控制压裂中裂缝的高度,此方法是将石英粉和100目、20/40目及10/20目的砂子用高粘压裂液带入缝中,用以将缝端的上部堵住,限制裂缝向上发展。

在这样思路的启发下,近来试验一种密度小的固体颗粒在裂缝的液体中靠浮力,自动进入裂缝的高部位形成一条人造阻挡带,以控制裂缝不向超过人们愿望的高度上延伸。这种固体颗粒(添加剂)在泵入支撑剂之前泵入,使它有条件聚集在新生缝的顶部。由于这种人工阻挡条带部分地阻挡了缝内高压向上部地层的传递,因此可适当地提高处理压力而不会产生裂缝向上

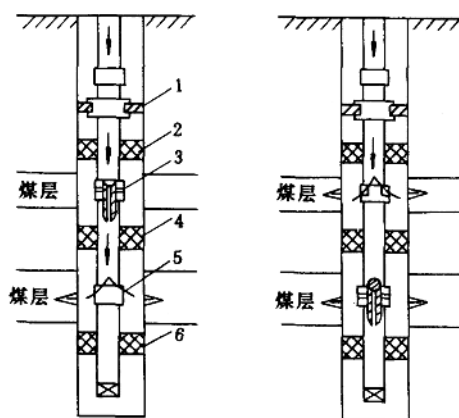


图1.6 多层分压管柱

1—水力锚;2、4、6—封隔器;3—滑套;5—喷砂嘴

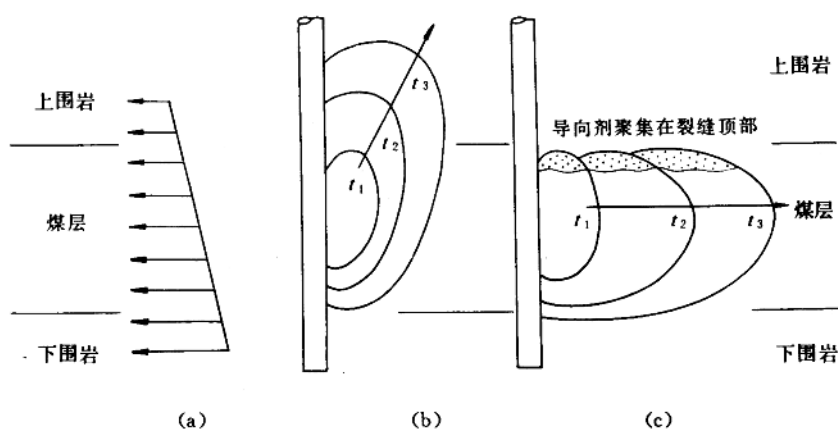


图1.7 使用浮力式导向剂的工作原理

(a)应力分布;(b)常规作业;(c)使用浮力式导向剂

延伸所带来的风险。这种浮力式导向剂(添加剂)的作用原理可用图1.7示意出来。

利用这种工艺技术的一些关键技术要求如下:

(1) 导向剂的粒径应当足够的小,以防止在泵送过程中遭受到任何机械损伤。检查的方法是在压裂车后取样,检查其经过混砂车、泵车后的破碎情况,所选用的导向剂应当是轻微或完全没有受到损伤的才行。

粒径还要足够大,以防止导向剂混入到缝中的砂堤内,并且在排液及生产过程中,导向剂也不会进入到砂堤中。这样可以减少对填砂裂缝导流能力的不利影响。

(2) 固相导向剂在液体中的上浮速度,取决于液体粘度、导向剂浓度及液体的密度。单粒导向剂在水基压裂液中的上浮速度,在理论上可按斯托克斯定律等公式计算,计算结果与实验观察结果比较符合。

(3) 为了使导向剂能有效地发挥作用,它应当能适应裂缝中的压力、温度及流体环境。实验发现,增加压力会降低其形成阻挡条带的效率,而温度及作用时间对此作用无大影响。导向剂应适应地层水、酸或油的环境,以便用于一般常用的压裂液中。

(4) 使用达西渗滤定律可计算不同厚度导向剂层位的压力差。而流量与粘度这二个参数则可使用与导向剂相同孔隙度的岩芯,在动滤失仪上,用同样液体做实验来得到。在人造阻挡层两侧的压差与其厚度应呈线性关系,随着应力的增加,不仅压差应当增大,并且随着厚度的增加,压差应更迅速地加大。

(5) 如果停泵后导向剂已经被压实在裂缝顶部,导向剂与砂子的用量比例,取决于裂缝高度与导向剂层的厚度。实验证明,在类似于导流仪的装置中将其下部充填砂子,顶部充填导向剂,在不同侧压下测量渗透率,如果粒径选择适当,导向剂不对裂缝渗透率有什么影响。

(6) 选择满足上述因素的导向剂之后,还须考虑使用此项技术的工艺步骤。首先,导向剂应加在裂缝延伸至非目的层之前。在压裂过程中井底附近缝中的压力最高,亦即裂缝离开目的层,首先发生在井底。导向剂应加在前置液之前的液体里,选择的施工参数(如使用的压裂液性能、排量、导向剂浓度等),都应有利于导向剂很快地上浮而形成人工阻挡层。

§ 1.5 煤层水力压裂原理研究概况

一、煤层水力压裂原理研究概况

煤层气井压裂原理与常规石油、天然气井压裂原理有许多相似之处,借鉴并改进石油压裂理论方法和工艺技术,是形成煤层气井压裂理论方法和工艺技术的重要途径。常规石油压裂的基础理论研究在国内外开展已有相当长的历史,以压裂过程模拟、施工设计理论为主导,自60年代开始,就有简单的压裂模拟和设计模型用于指导压裂施工。60~70年代,二维的 PKN、KGD 和 Radial 压裂理论模型相继问世,并得到推广应用。70年代中期,国外压裂理论又发展到拟三维模拟与设计水平。进入80年代中期,全三维方法数值模型在美国产生,并不断得到推广。科学地应用力学、数学和计算机等高新技术,提高压裂模拟的准确性,完善压裂设计的优化程度,用先进的理论方法指导压裂实践,已收到日趋良好的实用效果,在石油压裂中越来越为人们所重视。

如何将常规石油压裂理论方法有机地引入煤层气井的压裂模拟与设计中,并在此基础上进行适于煤层特点的改造和完善,成为当今煤层气井压裂理论研究的重要课题。以美国 Terra Tek 公司为代表开展了从煤岩机械物理性质测试到煤岩中水力裂缝发育特征的系统实验研究工作,并以此为基础提出煤层气井的水力压裂对策。以美国强化压裂实验室(STM-LAB, INC)为代表的一些单位曾对造成煤层渗透性伤害的机理进行了多方面研究与分析,他们通过评价煤层气伤害的各种因素,提出低伤害压裂液的可选方案,并研制出相应的添加剂产品。以麻省理工学院著名压裂专家 Cleary 先生和美国资源工程系统公司(RES)为代表的科研人员,就不同的煤层埋藏地质条件,对下述问题进行了专门研究:支撑剂的沉降与对流,近井筒裂缝的迂曲,岩石的非线性膨胀效应,流变性对压裂作用的影响,渗透性变化对裂缝发育的影响等,并根据他们的理论提出了实际应用的设计方案。总之,就煤层气井压裂技术和理论研究而言,目前美国应首推为领导地位。

二、我国的研究情况及工作方向

我国煤田分布广大,煤层气资源丰富,而煤层气井压裂机理的科学理论研究和系统化施工设计,以前在我国尚未展开。在煤系地层中压裂的结果,包括裂缝产状、形态、尺寸和压裂液的滤失,对煤层气强化增产效果的估计,以及适于煤层压裂的压裂液流变性、支撑剂性质、泵注参数、加砂程序的优化等问题亟待得到解决,用以指导煤层气井压裂施工,使煤层气的产量得以明显提高,以加快我国新兴能源开发的步伐。为此,作为煤层气井水力压裂原理研究,应在以下方面开展深入系统的工作:

(1) 研究影响煤层水力压裂效果的岩石力学物理性质和地层特点,为压裂模拟和设计提供重要原始数据。

(2) 在分析煤系地层和煤岩性质条件下的裂缝发育特点,获得煤层裂缝的典型产状、形态、破裂压力和扩展规律,得出相应的判据。

(3) 建立裂缝体积固体力学模型、缝内压裂液流阻模型和渗流模型、支撑剂运移与分布模型以及导流能力与增产效果预测模型,并研究模型间的相互联系,获得煤层压裂全过程真实模拟的数学方法。

(4) 研究实测煤层压裂压力曲线变化规律,并结合煤岩性质、地层特点和施工参数对压裂效果进行分析、诊断。

(5) 分析影响煤层压裂效果的各方面因素,建立压裂综合目标函数,提出煤层气井水力压裂优化设计方法和优化施工作业参数。

(6) 研制煤层气井水力压裂模拟、设计和压力曲线分析计算机软件,为现场提供指导煤层水力压裂施工的重要技术方法。