

关于大幅度提高我国煤层气单井产量的探讨

罗 平 亚

西南石油大学

罗平亚.关于大幅度提高我国煤层气单井产量的探讨.天然气工业,2013,33(6):1-6.

摘 要 目前我国煤层气单井产量低,已经成为制约煤层气产业发展的严重障碍。为此,在分析煤层气单井产量形成和控制机理的基础上,剖析了低产的原因:①对于储层条件绝大多数都不如美国的中国煤层而言,游离态甲烷气的渗流在其运移中不占主导地位,而解吸和扩散常常成为其运移的主控因素;②现在所采用的系列开采技术不能直接调控上述主控因素,因而并不完全适用于该类煤层的煤层气开发。进而提出了提高煤层气单井产量的技术思路:借鉴防止煤层瓦斯突出和页岩气有效开发的研究成果和思路,以煤层中长水平井等特殊结构井井筒为依托,将井筒附近 20~40 m 之内的煤层压裂形成一个由大小不同裂缝构成的裂缝网络,将该区域内的煤层“分割”成若干大小不等的煤块,使每一个大煤块四周的毫米级裂缝与井筒直接相连并与大气相通,在抽排过程中较快形成高温、高压差下煤块内气体的释放,煤块中的各级裂缝加速这个过程,相当于加速了煤块中气体的解吸、扩散、渗流速度,同时因之而增大了煤块的基质渗透率,这又反过来加速了煤层气的解吸、扩散、渗流速度,从而可大幅度提高单井产量。

关键词 煤层气 提高单井产量 地质条件 开发技术 适用性 水平井 鱼骨刺分支井 体积压裂 裂缝网络

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2013.06.001

A discussion on how to significantly improve the single-well productivity of CBM gas wells in China

Luo Pingya

(Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 6, pp.1-6, 6/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The single-well productivity of CBM gas wells is far below the anticipated level, which severely restricts the CBM gas development in present China. However, the current exploitation theories and technologies seem helpless to solve this problem. In view of this, this paper first analyzed the reasons of the low productivity of CBM gas wells as well as the possible influencing factors. Compared with the US CBM gas reservoirs, those in China have dissatisfactory geological conditions, where free-state methane gas migrate through coal beds driven by desorption and diffusion instead of by percolation. The current exploiting techniques still fail to take good advantage of desorption and diffusion to improve the single-well productivity so they are not completely fit for the CBM gas development in China. From this respect, positive proposals were presented herein. There are two ways for CBM gas engineers to improve the single-well productivity. One is to enlarge the gas discharge area; the other is to speed up the migrating gas from a reservoir to a wellbore. With reference to the volumetric fracturing applied to stimulate the US shale gas reservoirs, it is suggested that the herringbone multilateral wells with the length of 20 - 40 m be first drilled at different directions of a horizontal CBM gas well; then, the fracturing treatment be performed on the multilateral wells one by one or in groups so that the artificial fracture network will be formed to easily "cut" coal beds in the wellbore areas; thus, the azimuth, length and numbers of multilateral wells be optimally designed to meet the need of the artificially-made fracture network in the wellbore area.

Key words: CBM, improvement of single-well productivity, geological condition, development technology, applicability, horizontal well, herringbone multilateral well, volumetric fracturing, fracture network

作者简介:罗平亚,1940年生,中国工程院院士;主持和完成了40多项部省级以上科研项目,获部省级以上研究成果奖励30余项(次),出版专著6部,公开发表论文近200篇;现主要从事钻井液与完井液、储层保护技术和提高采收率研究工作。地址:(610500)四川省成都市新都区。电话:(028)83032947。E-mail:luopy@swpu.edu.cn

我国的煤层气资源非常丰富,经过 20 多年的攻关,形成了煤层气排水降压开采技术、定向羽状水平井等 MRC 特殊结构井(包括“穿针”技术等)钻完井技术及开采技术、煤层气开采裸眼洞穴完井技术、煤层气的煤储层压裂改造技术及压后积液配套技术、全过程储层保护技术、排采智能调控技术、煤层气藏井网井距优化等煤层气开采的全部主导技术,基本建立起适合中国煤层地质条件的中高煤阶煤层气开发系列配套技术,总体上达到国际先进水平。

但是,从产业的角度来看待,煤层气在我国的发展却并不尽如人意。2012 年全国煤层气年产量仅 $26.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ (国家要求 2015 年达到 $160 \times 10^8 \text{ m}^3$)。截至 2012 年底,全国已钻煤层气生产井共计 11 000 多口,其中具有工业产量的气井只有 6 000 多口(仅占全部生产井的 55% 左右),且平均单井产气量仅 $1\,090 \sim 1\,700 \text{ m}^3/\text{d}$ (美国平均单井产气量为 $3\,000 \sim 6\,000 \text{ m}^3/\text{d}$)。单井产量过低以及由此而带来的综合成本难以降低已成为制约我国煤层气发展的严重障碍,而更为严重的是虽经多年努力仍没能改变这一局面,至今仍未找到成倍增加煤层气单井产量的办法和技术。

我国煤层气产业的发展已经到了关键时期。众所周知,有效的煤层气开发技术要保证:①提高单井产量和采收率,使煤层气井具有工业价值;②降低开发综合成本,使低单井产量仍具有经济效益。据测算,若要达到国家的要求,至少要将现有单井产量提高 2 倍以上。因此,成倍提高我国煤层气单井产量是破解当前困局、保证我国煤层气产业持续发展的第一要务和必由之路。

1 我国煤层气单井产量普遍偏低的原因

1.1 地质条件差异

人们大多认为,目前我国煤层气单井产量普遍偏低主要是由于我国煤层地质条件与美国相比有很大差距,远不如美国煤层气储层条件好,即使全盘采用美国成熟技术仍然不能有效开采。

1.2 开发技术适用性

从美国煤层气开发实践看,其国内丰富的煤层气资源至今也只有很少一部分能够被现有技术成功开发,这说明现有技术本身就存在适用范围的问题——从理论到技术只能适用于储层条件好的煤藏(埋深不大、含气量高、对甲烷吸附能力较弱使游离甲烷含量高、地层压力高、渗透率高、适当产水等),而对大多数煤层也同样不完全适用。

1.3 低产原因剖析

1)我国所采用的煤层气开采技术大多基于美国成

功的开采方法和技术,所建立的钻井、钻水平井、钻特殊结构井并与压裂技术相配合,实行全过程储层保护的系列配套技术是典型的低渗透、超低渗透气藏有效开发技术,它适用于储层流体以渗流方式运移为基础的储层开发,可以通过扩大泄气面积有效提高其单井产量。但煤层气在煤层中的储存和运移方式十分复杂,在多数煤层中 80%~90% 的甲烷含于煤的致密基质微孔隙中,以吸附状态存在,而地层水主要分布在煤层的割理和裂缝中(一般不进入微孔隙)。吸附状态的甲烷要运动到井筒形成产量必须经历:从煤的表面解吸成为游离气,在基质中从煤的表面向细微裂缝扩散,在细微裂缝中渗流到大裂缝再渗流运移到井筒等过程。解吸→扩散→渗流是一个串联发生的过程。其单井产量(每天从煤层内部运移到井筒内的煤层气的多少)取决于这 3 个步骤中最慢的一步。而对大多数煤层而言,由于对甲烷吸附能力强解吸能力弱、游离甲烷含量低(10%)、地层压力低、渗透率很低使煤层气的解吸速度和扩散速度都比渗流速度慢。因此,对于这类煤层而言,游离态甲烷气的渗流在其运移中不占主导地位,而解吸和扩散常常成为其运移的主控因素,致使煤层气单井产量低;现在所采用的系列开采技术不能直接调控上述主控因素来提高单井产量,因而并不完全适用于这种煤层的煤层气开发。

2)目前的煤层气开采技术也对煤层中煤层气以吸附态为主的特性进行了必要的考虑,其具体做法是实验测出储层煤在煤层温度条件下的等温吸附曲线(图 1)^[1]。使用时测定煤层流体压力 p_A ,再测定煤层含气量,然后依据其等温吸附曲线确定吸附平衡压力 p_B ,只有当煤层流体压力低于 p_B ,其甲烷才开始解吸,故 p_B 被称为临界解吸压力。由于煤层中常常 p_A 大于 p_B ,故在煤层条件下煤层气不解吸就无法形成产量,当煤层流体压力不断下降(常采用排水降压)到小于等于 p_B 时,煤层气开始解吸→扩散→渗流→进入井筒形成产量。所以煤层气井一般都必须长期排水降压以后才能投产。但是在此生产过程中解吸和扩散还是主控因素,因此我们现在所用的开采方法和技术虽然考虑了煤层气的吸附特性,但仍然不能完全适用于它。同时,虽然煤的吸附等温曲线对其开采十分重要,但是目前所有实验测得的等温吸附曲线都存在一定的问題。目前常用的测定方法是將储层煤处理后,放入高压釜中在一定压力下通入甲烷,待达到地层温度下的吸附平衡后测定单位质量煤中甲烷含气量与煤层气压力的关系,从而得到该种煤的等温吸附曲线。这种测定方法本身并无原则性问题,而问题在于此等温吸附

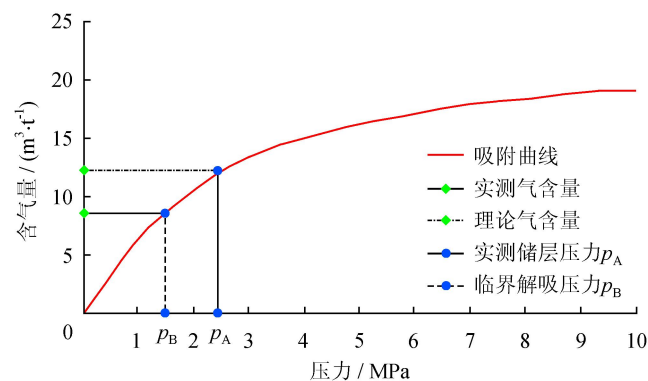


图1 某井5#煤等温吸附曲线图

曲线受煤中含水状况影响较大,理论研究和实验结果均表明:煤中含水会大幅度降低甲烷的吸附量(图2)^[1]。由于地层中煤的实际含水量没有测得(也很难测得)。所以这种影响无法确定,而且煤层中水的存在不仅作为混入煤中一种成分影响其吸附量,而且还作为地层流体中的一种相态而影响煤层流体压力,从而更大程度地影响其吸附状态和吸附量。所以用现有方法测定的等温吸附曲线难以准确指导煤层气的有效开采。

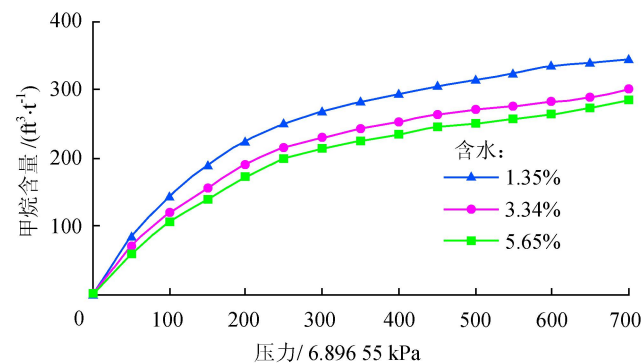


图2 含水量不同对甲烷吸附量的影响图
(1 ft=0.304 8 m)

3)另外,利用等温吸附曲线的临界解吸压力来表征煤层气开始解吸的做法也值得商榷。煤层中含有甲烷和水,其地层流体压力是由气、水两相共同产生的,由于气、水互不相溶各成一相,其中气体压力和液体压力都同为地层流体压力,在煤层中水一般处在裂缝、割理中,并不进入煤基质孔隙,基质孔隙则全为气相所占据,在基质孔隙中游离的甲烷与吸附的甲烷处于吸附平衡状态。因此,对被吸附的甲烷而言,其平衡气相压力就是地层压力 p_A ,而不是通常所说的脱附临界压力 p_B 。因此在排水降压时,位于裂缝割理中的水一抽出则煤层流体压力下降,基质孔隙中气体压力也随之下降,其中吸附态甲烷开始解吸(而不是压力降至 p_B 才

开始)。排水1~2年则解吸也随之进行了1~2年,到排水后期已有大量煤层气完成了解吸和扩散过程,但受裂缝中水的封堵不能顺利进入井筒形成产量(地层水的水锁作用)。因此对于埋深不大、含气量高、对甲烷吸附能力较弱(解吸能力强)、地层压力高、渗透率高的煤层,抽排1~2年排出上万平方米水之后,这部分煤层的流体压力已经大幅度下降而且已经有不少吸附气解吸并扩散到割理和裂缝中,同时由于煤层气解吸可能使其煤层基质渗透率不断增加,又会反过来促进解吸和扩散能力的不断提高,其综合作用的结果是可能获得较高的单井产量。而这对大多数甲烷吸附能力强(解吸能力弱)、地层压力低、渗透率低的煤层而言并不适用。

4)由于煤层气开采必须经历解吸→扩散→渗流→入井形成产量的全过程,因此只有测定出煤层条件下不同开采方式、不同开采阶段气体的解吸速度、扩散速度、渗流速度等,并对比确定速度最慢的环节,才能确定在此条件下单井产量的主控因素,才能明确这种条件下能否形成工业产量,也才能有针对性的找寻加快其最慢一步的方式和途径,从而形成提高煤层气单井产量的有效技术和方法,方能建立或选择适合的开采方式和有效技术。但是在大多数的情况下,目前所采用的方法和技术原则上只能加速渗流作用对产量的贡献,而不能直接加速解吸和扩散作用,因而很难适用于大多数煤层中煤层气的有效开采。而且迄今为止,对煤层条件下各种开采方式对甲烷解吸速度和扩散速度的影响研究并不多,对其变化规律和定量评价研究则更少,因而不能有效指导煤层气的工业化开采。目前的技术只能对含水的煤层气藏进行有效开采,因为按现在的开采原理,只有煤层水的大量抽排,才能使煤层流体压力下降到其临界解吸压力以下,煤层气开始解吸形成产能。若煤层中不含水,无法通过排水来降低地层压力,则煤层流体压力很难下降到其临界解吸压力以下,所以很难开采,故而无水煤层的煤层气工业化开采便成为尚无法解决的难题,加之中国富含瓦斯的煤层很多并不含水。因此,目前的开采技术对这部分丰富的煤层气资源常常无能为力。

2 大幅度提高我国煤层气井单井产量的建议

2.1 坚定信念、毫不动摇、加强基础、创新思维,坚持对煤层气开采理论及应用技术的深入研究

经过20多年的攻关研究,按目前国际煤层气开发技术标准,我国煤层气开采技术水平总体上已经达到国际先进水平,但单井产量仍然过低而效果不佳,而且

按现有理论和技术,该做的都已经做了,而且做得很好。因此,如何打破这个瓶颈,缺乏明确的方向和清晰的思路,人们已经开始失去耐心和信心,加上页岩气开发热的冲击和影响,煤层气开发有被边缘化、被忽视甚至事实上被放弃的趋势。但是煤层气开发研究决不能停止,更不能放弃。因为这是国民经济发展的迫切需要,也决不能让如此巨大的资源在国家发展急需的时候被闲置。

煤层气和页岩气相比,国内总资源量虽大致相同,但从其资源富集程度、埋藏深度、钻井、压裂工程难度以及钻完井综合成本等方面比较,前者多优于后者,加上 20 多年工作所积累的经验教训,为进一步发展打下了良好的基础。因此只要其开采理论和技术过关,煤层气工业化开发比页岩气相对更容易、更现实、希望也更大,没有理由对此失去信心和希望,更不能因发展页岩气而忽视对煤层气的坚持和重视。

当然,我们也必须清楚地认识到,再完全沿用现在的理论方法和思路进行煤层气研究很难有所突破。必须重新从基础研究开始,深入研究煤层中煤层气形成单井产量的机理及影响因素和作用规律等动力学问题,从而凝练其基础科学问题,综合应用其他学科新的进展和成果,研究解决上述基础科学问题,从而得到新的理念、新的思路、新的方法,并与现有技术优化集成形成以大幅度提高煤层气单井产量为核心的适用于我国大多数煤层地质条件和储层条件的煤层气有效开发系列配套技术。

2.2 深入煤层气单井产量形成机理、主控因素及影响规律的动力学研究

核心是“煤层条件下决定煤层气单井产量的主控因素及其调控原理和方法”,它至少应包括以下内容。

1)煤层中煤层气含量的测定、煤层气压力的测定、煤层流体压力的测定。

2)煤层条件下,煤层气在煤层中的等温吸附曲线的测定。

3)煤层条件下,不同开采方式、不同开采过程煤层气解吸速度及其影响因素研究。

4)煤层条件下,不同开采方式、不同开采过程煤层气在煤层基质中扩散速度及其影响因素研究。

5)煤层条件下,不同开采方式、不同开采过程煤层气在裂缝、割理中渗流的研究。

6)决定单井产量的主控因素及其调控方法研究。

7)与现有技术密切结合,优化集成形成提高单井产量的方式、技术研究。

8)煤层中煤层气能否有效开发的评价方法与评价

标准研究。

2.3 借鉴防止煤层瓦斯突出理论研究和页岩气有效开发的成果和研究思路

倘若我们能找到一种新的理论、新的方法将煤层气单井产量大幅度提高,从而使其产气井比例明显提高(例如由现在的 55% 提高到 85%),单井产量增加 1 倍,则同样井数的煤层气总产量将由现在的 $26 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 增加到 $70 \times 10^8 \sim 120 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,完全可以达到甚至超过国家预期的目标。

提高煤层气单井产量有两条途径:①增大泄气面积,例如水平井、MRC 技术、压裂技术、水平井多级分段压裂技术等都可达到此目的;②加快储层中气体向井筒运移的速度。在煤层气中它由煤层中甲烷气的解吸、扩散、渗流速度中最慢的一步确定,提高这一步的速度将直接提高单井产量。

采用大量增加泄气面积的方法来增加单井产量,在国内煤层气开发中也有成功的先例。例如 DNPO2 井,是在煤层中的鱼骨刺井,共有 13 个“鱼骨刺分支”,煤层中总计进尺 7 687 m,单井产量 3 年稳产超过 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,且尚有逐渐增加的趋势,是周围直井的 20 倍(周围直井的单井产量只有 $1\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右),3 年累计生产煤层气超过 $2\,500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。但在同一地区如果采用直井压裂形成 50 m 长的一对裂缝,其泄气面积可达到原直井的 270 多倍,大于此鱼骨刺井的煤层泄气面积,但其日产量却仍然只有 $1\,000 \sim 2\,000 \text{ m}^3$,可见尽管增大泄气面积是煤层气提高单井产量的重要因素。但不是唯一因素,因此要想大幅度提高单井产量,提高煤层气储层中气体向井筒运移速度也极为必要。为此必须要测定甲烷在煤中的解吸速度,解吸后甲烷在煤基质中的扩散速度以及它在煤的裂缝中的渗流速度。目前,无论测定哪一个速度都十分困难,至今尚无有效方法。而且三者的度量方式各不相同,很难直接比较其大小,特别是这 3 个过程首尾相接,同时发生。三者相互制约更难确定各自发生的速度和相对的大小。但是,从另一方面看,无论这 3 个过程谁快、谁慢、谁是主控因素,其最终都直接表现为甲烷在煤层中向某一方向(如井眼方向)运移的速度(即单位时间内在某一方向上通过单位面积的甲烷运移的量),它的影响因素很多且极为复杂,但与运移压差有直接关系。若对一个含甲烷煤块而言,也可理解为在一定温度和压差情况下单位时间内从煤块中逸出的甲烷量。在煤矿预防瓦斯突出的理论研究成果中,研究了在地层温度、压力条件下一旦煤块处于较低气体压力(如大气压)情况下,煤块大小与瓦斯气体逸出速度的

关系(图3)^[2]。

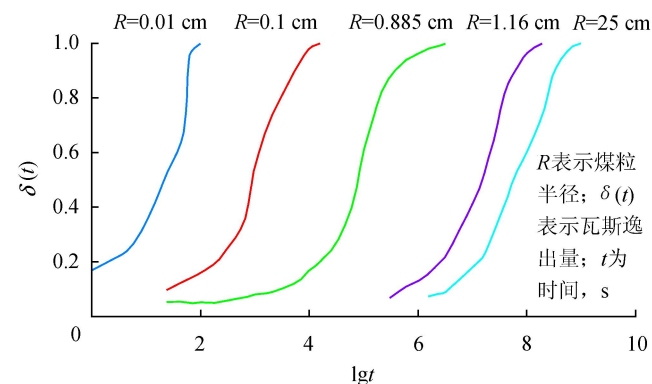


图3 煤块尺寸与煤瓦斯逸出速度的关系图
(KOMMYHNCT-HOBA9 矿, Hatau 煤层)

虽然目前能进行这种研究的煤块体积很小(厘米级),但是运用相同的思路和方法,有可能得出大煤块(比如 10 m 级)的尺寸大小、温度、瓦斯压力与瓦斯逸出速度的关系。即通过这种研究,可以计算和测定出在地层温度、地层气体压力下含有一定量瓦斯的煤块使之直接与大气沟通(处于大气压力条件下),不同大小煤块中的甲烷放出 50%、70%、100% 所需的时间,或者求出一定时间内(如 10 年、8 年、5 年)能将其中甲烷释放出 50%、70%、100% 的煤块尺寸大小。

另一方面,设想在一个厚 40 m 的煤层中部钻一口水平段长为 1 000 m 的水平井,以水平井为轴周围半径 20 m 的煤层为研究对象(为一个长 1 000 m、半径为 20 m 的“水平煤柱体”);则其体积为 $125.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,设此煤层含气量为 $10 \text{ m}^3/\text{t}$,则它共含煤层气 $1 800 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右,设 5 年采出 60%,则 5 年内其平均单井日产量超过 $6 000 \text{ m}^3$ 。

再者,若能用压裂等的方式将此水平井为轴的煤柱由毫米级人工裂缝切割成一定尺寸(如 10 m 级)大小的煤块,由于它们都距井筒很近(距井筒 20 m 内),则裂缝可直接与井筒相连再与大气相通,一方面可使“水平煤柱”中的水很快被抽出,则煤柱内人工裂缝流体压力较快下降到煤层气临界解吸压力之下,使其解吸加剧,另一方面每个煤块周边裂缝内压力也同时迅速下降直到接近大气压。若通过前述“煤块大小与煤层气逸出速度关系”的研究成果计算出这种情况下,煤块中甲烷气 5 年逸出 60% 的煤块大小为 V^* 立方米[即相当于把含气量 $10 \text{ m}^3/\text{t}$,瓦斯压力 20 MPa(煤层压力),体积为 V^* 立方米的煤块放在大气中,在 $50 \sim 60^\circ\text{C}$ (煤层温度)气温下,5 年时间煤中的瓦斯跑掉 60% 的情况]。只要我们用压裂的方式将近井带“水平

煤柱”切割成此 V^* 立方米大小的煤块,就可能获得稳产 5 年,平均单井日产不低于 $6 000 \text{ m}^3$,5 年共产出 $1 100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 煤层气的良好效果。

借鉴页岩气有效开发的成功经验及其基本原理,采用体积改造压裂可能在水平井筒附近的近井带煤层形成密集的裂缝网络。它由毫米级的主干裂缝、1 mm 左右的次级裂缝、 $100 \sim 900 \mu\text{m}$ 的微裂缝和微米级的细微裂缝构成。在这些裂缝中毫米级的主干裂缝把近井带煤层“切割”成若干尺寸为 V^* 的大煤块、次一级的裂缝又把此大煤块“切割”成次一级大小的煤块,再次一级的裂缝又把次一级大小的煤块“切割”成更次一级大小的煤块,依次类推。这样由体积改造压裂形成的各级裂缝构成的网络把近井带煤层“切割”成各级大小的煤块,其中大煤块周边毫米级的裂缝比较容易与井筒相连,再和大气相通,则类似把大量高温、高压、高含甲烷气的煤块置于大气之中,则其中煤层气逸出速度随煤块变小而迅速加快,将大煤块逐级“切割”成小煤块的各级裂缝将加速这个过程,使大煤块中的气体“很快”进入煤块周边的毫米级裂缝再直接与井筒相连而形成产量,其结果事实上相当于大大缩短了煤层中气体流向井筒的距离,相当于加速了煤层气在煤层中向井眼方向的运移速度。由此则有可能大幅度提高其单井产量。

按照这个思路,这种办法若能成功应用,不仅可能成倍提高煤层气的单井产量,而且还有可解决高含煤层气的无水煤藏煤层气的有效开采问题。

按照这一思路,其煤层气有效开采方式与页岩气开发类似,在煤层中钻长井段水平井是基础,其目的主要不是增大泄气面积,而是为此后近井带的体积改造压裂提供一个适当的依托或平台。因此,它的设计要有利于体积改造的完成,这一点目前我们的技术完全可以实现;压裂的目的也不主要是沟通地层深部天然裂缝和增大泄气面积,因而它与以控制缝长、缝宽、缝高为其主要内容,以尽量避免形成多缝来保证形成足够长的单缝为主要目标的常规压裂不同,而是以在水平井近井带煤层形成致密的裂缝网络来“切割”煤层为其目标。因此与现用常规压裂在目的、原理、设计、工艺、技术等各个方面都有着极大的不同,这是我们目前并未完全理解和掌握的技术。

实践证明,对煤层进行压裂完全可行,但煤岩的力学性质与页岩、砂岩、石灰岩有很大差别,其杨氏模量低、泊松比高,压裂产生的裂缝宽度较大、缝长较短;煤层中裂缝割理发育,易出现多裂缝和裂缝曲折、降低有效缝长;煤岩抗压和抗张强度都很低,虽有利于裂缝产生和延伸,但也会造成支撑剂的嵌入和煤粉尘的产生,

对压裂效果造成不良影响;在不同地应力情况下压裂可以形成水平裂缝、垂直裂缝,其形状可为“T”形或“I”形,然而在大多数情况下形成缝长较短、多条裂缝同时存在具有多种形态的复杂裂缝。因此可以说,按传统的压裂要求而言,煤层压裂具有其特点和难度,但对其要在水平井筒近井带煤层形成半径不大(即缝长较短)、裂缝密集的裂缝网络而言,则可能成为有利因素。所以通过研究充分利用煤层的这些特性来实现近井带煤层体积改造压裂是完全可能的。

综上可知,有必要参考页岩气体积压裂技术,深入研究在煤层水平井近井带形成裂缝网络的压裂理论与技术,其中特别要注意此时研究水平井的主要功能是为体积压裂提供一个必要的依托和实施平台。因此,它们的井眼方位及轨迹设计必须以最有利于压裂形成裂缝网络为目标来进行优化。例如此时可以考虑充分利用鱼骨刺井实行多级压裂,即在水平井的不同方位上钻出多个20~40 m长的鱼骨刺分支井,然后在每一分支井中实行压裂(逐个进行或分组同时进行)以有利于沿水平井近井带形成裂缝网络“切割”煤层(如图4所示),分支井方位、口数与每口井的长度按有利于近井带裂缝网络形成要求而优化设计。

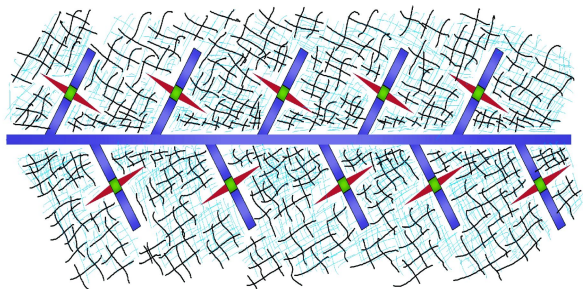


图4 利用鱼骨刺分支井对主井筒近井带煤层进行体积改造压裂形成的裂缝网络示意图

同时,还要特别注意解决页岩气体积改造中必须大排量、大液量的问题,研究形成合理的排量和较小的液量(越小越好),形成近井带煤层体积改造的压裂技术及压后排液配套技术。

3 结论

1) 尽管目前我国煤层气发展处于十分困难的时期,但我们必须坚定信念、毫不动摇、加强基础、创新思维,坚持煤层气开采理论及应用技术的深入研究。

2) 要想进一步促进我国煤层气开发的进步和发展,必须低成本的成倍增加煤层气单井产量,而现有的理论、方法和技术很难实现这一目标。

3) 深入系统研究煤层气单井产量形成机理,弄清

其动力学过程。在此基础上,借鉴防止煤层瓦斯突出的理论与技术研究成果及页岩气有效开发技术,有可能在现有技术的基础上形成将现在煤层气单井产量成倍增加的原理和方法。主要技术思路:以煤层中长水平井等特殊结构井井筒为依托,在井筒附近20~40 m之内的煤层(其煤层气含量可达 $1\,000 \times 10^4 \sim 3\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$)压裂形成一个由大小不同裂缝构成的裂缝网络,其中毫米级的裂缝将此区域内的煤层“分割”成长、宽、高若干米的煤块,而它们又由次一级裂缝(比如0.5~1.0 mm)“分割”成更小一级的煤块,依此类推。在近井带含有这个裂缝网络的煤层的区域内,其地层水更容易完成抽排,使每一个大的煤块四周的毫米级裂缝与井筒直接相连(最远不过30 m)并与大气相通,在抽排过程中其压力可能较快下降到与地面大气压接近的程度,形成高温(井下温度)、高压差(地层压力与大气压力之差)下煤块内气体的释放,煤块中的各级裂缝大大加速这个过程,相当于大大加速了煤块中气体的解吸、扩散、渗流速度,同时因之而增大了煤块基质渗透率,这又反过来加速解吸、扩散、渗流速度,加上致密裂缝网络形成的巨大泄流面积,从而可大幅度(成倍)增加单井产量。倘若煤层厚度介于30~50 m,可用水平井从中贯通;若大于80 m,则可用鱼骨刺井来扩大其改造区域,或上、下钻2个水平井眼来包含整个煤层。

4) 主要研究攻关内容:①通过理论和实验研究建立含甲烷气的煤块在一定温度及压差条件下,向周围空间释放甲烷气的速度与煤块大小的关系(在不同含气量、不同含气压力、不同环境温度、不同环境压力情况下);②根据煤层力学性质及裂缝发育状况,按压裂形成网络裂缝的要求,设计和钻成长段水平井、鱼骨刺水平井等特殊结构井;③以长水平井等特殊结构井井筒为依托,实施多级体积改造压裂或以鱼骨刺井的多个分支井为依托,实施体积改造压裂;④与现在煤层气开发的成功经验和技術相结合,优化集成形成可大幅度提高我国大多数煤层单井产量的煤层气高效开发系列配套技术。

参 考 文 献

- [1] 伊向艺,雷群,丁云宏,等.煤层气压裂技术与应用[M].北京:石油工业出版社,2012:35,37.
YIN Xiangyi, LEI Qun, DING Yunhong, et al. Research & Application of Coalbed Methane Fracturing Technology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012:35,37.
- [2] А Э Петросян, Н И Устинов, Институт горного дела (Академия наук СССР). Исследование процессов возникновения внезапных выбросов угля и газа [M]. Москва:ИДАТЕЛЬСТВО НАУКА,1978:31.

(收稿日期 2013-06-12 编辑 居维清)