

煤层气增产技术

张亚蒲 , 杨正明 , 鲜保安

(中国科学院渗流力学研究所 , 河北 廊坊 065007)

摘要 : 介绍了国内外煤层气开采现状、增产措施以及我国煤层气储层的特点 , 指出我国煤层气资源虽然十分丰富 , 但其勘探与开发水平还不高 ; 我国煤层气储层的特点 , 决定了我国开采煤层气的难度较大。此外还分析了目前国内外煤层气增产的 3 项主要技术 : 水力压裂改造技术、煤中多元气体驱替技术和定向羽状水平钻井技术。

关键词 : 煤层气 ; 开发趋势 ; 增产措施 ; 研究

中图分类号 : TE132.2 文献标识码 : A

前 言

煤层气 , 也称煤层瓦斯 , 是自生自储在煤层中的一种非常规的天然气 , 以吸附和游离状态储存于煤层当中的。研究表明^[1] , 煤层裂缝中的游离气不足总量的 10% , 煤层气主要吸附于煤层微孔隙的内表面。因此 , 要开采煤层气就必须使其从煤层中解吸出来。而只有当地层压力低于煤层的临界解吸压力时 , 煤层气才会得到释放。目前开采煤层气一般采用抽排煤层中承压水的方法 , 降低煤层压力 , 使煤层中吸附的甲烷释放出来。

煤层气藏与常规油气藏的储层特点有较大区别。煤层气藏具有以下特点 : 煤层的弹性模量比一般的砂岩或石灰岩储层低 , 一般小于一个数量级 , 而压缩系数高 ; 气水共存 ; 气藏压力低 ; 气层易损害 ; 天然裂缝发育。

1 国内外煤层气开采现状

1.1 国外煤层气开采现状^[2]

20 世纪 60 年代 , 美国通过地面钻孔的方式 , 第一次将煤层气作为资源开采。最近十几年来 , 美国天然气研究协会(GRI) 和美国 ICF 资源开发公司等单位根据煤层地质特点 , 改进了现代油气田钻井和压裂技术来开发煤层气 , 并开发了相应的计算机模拟软件 , 使煤层气开发技术逐渐完善 , 并迅速推广。目前 , 美国已经有 6 个盆地开始大规模开采煤层气 , 分别位于亚拉巴马州的黑勇士盆地、科罗拉

多州和新墨西哥州之间的圣胡安盆地、尤因塔、粉河、拉顿和阿巴拉契亚盆地。美国目前估计煤层气远景资源量为 $11.2 \times 10^{12} \sim 21.19 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 净产气已达到 $450 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。开发煤层气已成为美国天然气行业中发展最快、最活跃的一个独立分支。美国煤层气勘探开发的成功也引起了世界各国的重视。加拿大把煤层气作为 20 世纪 90 年代的能源资源 , 加紧开展评价与研究 ; 英国也在 1991 年引进美国技术进行煤层气的勘探与开发。前苏联等国通过煤层气资源的评价 , 已把煤层气作为重要的第 2 动力资源。

1.2 国内煤层气开采现状^[3]

我国煤层气资源也相当丰富 , 埋深 2 000 m 以上的资源量为 $31 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 与常规的天然气资源量相当 , 约占世界煤层气总资源量的 10% , 居俄罗斯、加拿大之后排第 3 位。最初 , 我国矿井瓦斯主要以井下抽放为主。到 20 世纪 90 年代初 , 我国开始研究煤层气地面开采技术 , 现在已有近 70 口煤层气试验井。其中辽宁铁法、山西晋城以及安徽淮北等矿区的煤层气开发试验已显示出良好的开发前景 , 部分单井日产气量达 7 000 m^3 。目前 , 全国煤层气年产量近 $6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。但总的来说 , 目前我国煤层气的勘探与开发尚处于开发试验阶段。

2 我国煤层气储层的特点

由于我国煤层的特点 , 在开采煤层气时 , 存在单井产量低、经济效益差的普遍情况。通过文献调

研,可以把我国煤层气藏的特点概括为以下几个主要方面^[3]:

(1)我国煤层气藏普遍存在低压(压力系数小于0.8)、低饱和度(小于70%)、低渗透的特征。煤层的渗透率一般为 $0.001 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,国内渗透率最大的煤层也仅为 $0.54 \times 10^{-3} \sim 3.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其渗透率比美国煤层的渗透率低2~3个数量级。

(2)非均质性强。我国大部分中阶煤层气藏均具有非均质性,使得井筒影响范围特别小,从而使井网整体降压的作用难以发挥。

(3)高煤阶气。据估计,我国的高煤阶煤层气资源占总资源的27.6%以上。在理论上,这些煤层不具有产气的能力,但实际上在沁水盆地的无烟煤中取得了单井和小型开发试验区的产气突破,已证明高煤阶也是一个重要的煤层气开发目标。但是,高煤阶气具有低渗和难脱附的特点,限制了目前常规开采技术的应用。

由于我国煤层气藏具有以上特点,如果只采用抽排煤层中的承压水来降低煤层压力的方法,使煤层中吸附的甲烷气释放出来,而不采取任何增产措施,不仅煤层气单井产量较低,而且许多井将失去开采的价值。为了提高煤层气单井的产量,获得经济产量,必须采取一些新的增产措施。

3 煤层气开采增产措施

目前国内外煤层气增产技术主要有^[3]:水力压裂改造技术、煤中多元气体驱替技术和定向羽状水平钻井技术。

3.1 水力压裂改造技术

3.1.1 原理及应用情况

水力压裂改造技术是开采煤层气的一种有效的增产方法。它应用于煤层气增产的主要机理为:通过高压驱动水流挤入煤中原有的和压裂后出现的裂缝内,扩张并伸展这些裂缝,进而在煤中产生更多的次生裂缝与裂隙,增加煤层的透气性。

通过对煤层进行水力压裂,可产生有较高导流能力的通道,有效地连通井筒和储层,以促进排水降压,提高产气速度,这对低渗透煤层中开采煤层气尤为重要;可消除钻井过程中泥浆液对煤层的伤害,这种地层伤害可急剧降低储层内部的压降速度,使排水过程变得缓慢,影响煤层气的开采。

目前,水力压裂改造措施是国内外煤层气井增产的主要手段。在美国14 000余口煤层气井中,有90%以上的煤层是通过水力压裂改造的,经压裂后的煤层,其内部可出现众多延伸很远的裂缝,使得在井中抽气时井孔周围出现大面积的压力下降,煤层受降压影响产生气体解吸的表面积增大,保证了煤层气能迅速并相对持久地泄放,其产量较压裂前增加5~20倍,增产效果非常显著。水力压裂改造技术在我国也得到了很好的应用。目前几乎所有产气量在 $1\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上的煤层气井都经过压裂改造。

3.1.2 技术特点

发展比较早,有比较成熟的现场施工经验,而且技术成本较低。但这种技术在煤层气生产实践中也存在一些问题:①由于煤层具有很强的吸附能力,吸附压裂液后会起煤层孔隙的堵塞和基质的膨胀,从而使割理孔隙度及渗透率下降,且这种降低是不可逆的,因此,目前国内外在压裂改造技术中,开始使用大量清水来代替交联压裂液,以预防其伤害,但其造缝效果受到一定的影响;②由于煤岩易破碎,因此,在压裂施工中,由于压裂液的水力冲蚀作用及与煤岩表面的剪切与磨损作用,煤岩破碎产生大量的煤粉及大小不一的煤屑,不易分散于水或水基溶液,从而极易聚集起来阻塞压裂裂缝的前缘,改变裂缝的方向,在裂缝前缘形成一个阻力屏障。

由以上分析可以看出,水力压裂技术适用于煤层比较坚硬的情况。如要用于较软的孔隙裂隙储层,必须对压裂液进行特殊处理。由此看来,新型压裂材料的研究是压裂技术的关键,是今后发展压裂改造技术的一个重要方面。

3.2 煤中多元气体驱替技术

注气增产法最初应用在石油和天然气的开采中,用来提高石油及天然气的采出程度,被认为是一种具有发展前途的新技术。美国Amoco公司目前正在将该方法应用到低渗透煤层气田的开发中,以提高煤层气的开采效果。

该项技术在现场试验中常用的注入气体为 N_2 和 CO_2 。其主要机理是:利用不同气体在煤层中的吸附能力不同。因此,国内外学者对多元气体在煤中的相互作用与替代机理进行了大量的研究。

在国外,HallFE、Greaves、Harpalani、ArriLE和

YeeD 等,分别对 $\text{CH}_4 - \text{N}_2$ 和 $\text{CH}_4 - \text{CO}_2$ 混合气体进行了吸附测试。结果表明^[4 5]:煤对不同气体的吸附能力不同,每种气体都不是独立吸附的,而是多元气体竞争相同的吸附位,且吸附和解吸遵循不同的压力与吸附量关系等温线。而 N_2 、 CO_2 可与甲烷竞争吸附,从而破坏煤层中甲烷的吸附平衡状态,使甲烷解吸出来。在国内,张力、唐书恒和吴世跃的实验结果表明^[6 7]:将 N_2 、 CO_2 或烟道气注入煤层后,注入气体向煤粒中吸附扩散,打破了原来的平衡和稳定,煤层中的吸附甲烷含量会降低,解吸扩散速率会增大,从而会提高甲烷的流动速率和抽放率。

该技术有先注气后采气的间断性注气和边注边采的连续注气 2 种模式。增产原理为:2 种模式都提高了储层的原始压力,使得煤层气的渗流速度增大,衰减时间延长,而注气引起煤层气渗流速度的增大,又造成了裂隙系统中煤层气分压下降速度的加快,引起更多的吸附煤层气参与解吸。解吸扩散速率增大,反过来又促使煤层气渗流速度加快;当注气压力较大时,还可能在煤层内形成新的裂隙,使渗透率增大,从而引起渗流速度增大;另外,由于煤是一种具有较高剩余表面自由能的多孔介质,当煤的剩余表面自由能总量一定时,即煤层与混合气体达到吸附平衡后,每一组分的吸附量都小于其在相同分压下单独吸附时的吸附量。因此,注气后,竞争吸附置换作用必然使一部分吸附的甲烷解吸扩散,从而引起扩散速率和渗流速度的提高。

目前,注气驱替煤层气被认为是一种具有发展前途的新措施,所以该方法受到各方面的广泛关注。国外储层模拟和先导试验表明,在煤层中注入非烃气体可以促进解吸,提高煤层气的单井产量和采收率。1996 年,在美国的圣胡安盆地进行了世界上第 1 次 $\text{CO}_2 - \text{ECBM}$ 试验,取得了一些经验。BP Amoco 公司在 San Juan 盆地进行了不同规模的 $\text{CO}_2 - \text{ECBM}$ 先导性试验,取得了良好的效果。在国内,注气开采煤层气项目也已开始启动。但发展注气增产技术的关键在于气源,即要寻找天然 CO_2 气源,探索和发展制 N_2 、注 N_2 、脱 N_2 和制 CO_2 等技术。

3.3 定向羽状水平钻井技术

定向羽状水平井是在常规水平井和分支井的基础上发展起来的,是指在一个主水平井眼的两侧再钻出多个分支井眼作为泄气通道。为了降低成

本和满足不同需要,有时在一个井场朝对称的 3 或 4 个方向各布一组水平井眼,有时还利用上下 2 套分支同时开发 2 层煤层。该技术是美国 CDX 公司的专利技术。

该技术的增产原理为^[8]:定向羽状水平井的分支井筒能够穿越较多的煤层裂缝系统,最大限度地沟通裂隙通道,增加泄气面积和地层的渗透率,从而提高单井产量。理论与实践也证明,在煤层中钻水平井的产量可以达到直井的 3 ~ 10 倍,且可大大减少常规钻井的井数,具有减少占地面积、节约管线等优点,从而提高经济效益。因此,钻定向羽状水平井开发煤层气具有很多有利条件。

近几年把这种技术应用于煤层气的开采成效显著。1999 年美国 CDX 公司首次将定向羽状水平井用于西弗吉尼亚进行煤层气开发,单井控制面积为 4 km^2 ,日产量达 $2.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。随后又相继在西弗吉尼亚、阿拉巴马、阿巴拉契亚等地区广泛应用定向羽状水平井,单井日产气 $3.45 \times 10^4 \sim 5.70 \times 10^4 \text{ m}^3$ 5 a 后,采出程度达到 85%。另外,CDX 公司还解决了低井底压力的技术问题,也使羽状水平井的技术优势得以充分地发挥。在我国,该技术还处于试验阶段。我国第 1 口煤层气羽状分支水平井是引进 CDX 公司专利技术,2004 年在樊庄高煤阶区试验取得成功。该井每个井组由 4 口定向羽状水平井和 4 口直井组成,定向羽状水平井穿过煤层段长达 1 200 m,在煤层沿水平段左、右可分若干分支井眼,1 个井组可控制面积 5.8 km^2 以上,3 a 内煤层气采出程度达 70%。

综合国内外关于羽状分支水平井的发展及中外学者对羽状分支水平井的研究可以看出,这项技术适用于厚度较大且分布稳定、结构完整的煤层,且需要煤阶较高、煤质较硬的地质条件。对缺乏背斜等顶部构造、山区煤层或渗透率较低等不适于直井方式开采的煤层,开采效果更好。

目前关于煤层气开发数值模拟的研究已有很多,但这些模型以及软件的应用范围大都是用于常规煤层气井的模拟,很少有专门针对羽状水平井的数值模拟模型和软件。中科院渗流流体力学研究所现已初步建立了羽状水平井的数值模拟模型,并形成相应的软件,但还需要进一步在生产实践中检验。

由于煤层气羽状水平井发展历史较短,所以许多关键技术还需要进一步研究。

4 结论与认识

(1)我国煤层气资源十分丰富,但目前煤层气的勘探与开发水平还较低。

(2)我国煤层气藏具有低压、低饱和、低渗透、非均质性强和高煤阶气的特点,决定了开采煤层气的难度加大,需要采取一些新的增产措施。

(3)水力压裂改造技术是目前开采煤层气的一种常用和有效的增产方法,它适合比较坚硬的煤层,如要用于较软的孔隙裂隙储层,必须要对压裂液进行特殊处理;煤中多元气体驱替技术尚处在研究阶段,但我国发展注气增产技术的关键在于气源问题;定向羽状分支水平井技术目前被认为是一种效果较好且成本较低的新的煤层气开采改造技术,但这项技术涉及钻井、开发和储层改造等许多方面,有许多关键技术还需要进一步深入研究。

参考文献：

[1] 张国壁,张惠蓉.煤层气勘探开发和增产技术[J].新



(上接第 91 页)子量的聚合物,用于稳定泡沫和进行流度控制。浓度较高的大分子量聚合物溶液不利于泡沫的生成和运移^[6],中低分子量的聚合物完全能够达到泡沫在稳定性方面的要求,并且不会抑制泡沫的发泡能力,基本上避免了三元复合驱中碱对聚合物的伤害问题和以前泡沫驱中起泡能力受限的问题。

4 结 论

(1)AS 溶液与泡沫交替注入提高采收率方法作为聚合物驱后的接替技术,与三元复合驱和泡沫复合驱相比,对聚合物驱后的地层有更强的适应能力。

(2)AS 体系与泡沫体系交替注入提高采收率技术能充分发挥两体系各自的优点,实现优势互补,效率更高。

(3)该技术相对于三元复合驱和泡沫复合驱,

疆石油地质,1994,15(1).

[2] 张在民.世界煤层气开发现状[J].天然气工业,1994,14(1).

[3] 杨陆武,孙茂远.中国煤层气藏的特殊性及其开发技术要求[J].天然气工业,2002,21(6).

[4] Hall F E, Zhou Chunhe. Adsorption of pure methane, nitrogen, nitrogen and carbon dioxide and their binary mixtures on wet Fruitland coal[A]. The 1994 Eastern Regional conferences and exhibition held in china iestor[C]. WVUSA, 1994.

[5] Greaves K H, Owen L B, McLenman J D, et al. Multi-component gas adsorption-desorption behavior of coal[A]. Proceedings of the 1993 International Coalbed Methane Symposium[C]. 1993.

[6] 张力,何学秋,王恩元,等.煤吸附特性的研究[J].太原理工大学学报,2001,32(4).

[7] 唐书恒,韩德馨.煤对多元气体的吸附与解吸[J].煤炭科学技术,2002,30(1).

[8] 江山,王新海,张晓红,等.定向羽状分支水平井开发煤层气现状及发展趋势[J].钻采工艺,2004,27(2).

编辑 常汉章

减小了驱油体系各组分之间的矛盾,更有利于工业化推广和应用。

参考文献：

[1] 吴文祥,刘洋.聚合物驱后岩心孔隙结构变化特性研究[J].油田化学,2002,19(3):253~256.

[2] 王风兰,王天智.萨中地区聚合物驱前后密闭取心井驱油效果及剩余油分析[J].大庆石油地质与开发,2004,23(2):59~60.

[3] 宗进旗,闫文鹏.高压低渗微裂缝油藏提高采收率技术研究[J].特种油气藏,2002,9(1):45~49.

[4] 程杰成,王德民.大庆油田三元复合驱矿场试验动态特征[J].石油学报,2002,23(6):37~40.

[5] 钱昱,张思富.泡沫复合驱泡沫稳定性及影响因素研究[J].大庆石油地质与开发,2001,20(2):33~35.

[6] 陈广宇,张国印,伍晓林.泡沫复合体系配方的研究[J].大庆石油地质与开发,2000,19(3):27~29.

编辑 姜 岭