

## 对煤层气井施工技术的认识

石连臣

**摘要** 根据施工煤层气井的成功实践,介绍了有关煤层气井的钻进、固井工程及煤层改造等施工技术。

**关键词** 煤层气 钻井 固井 煤层改造

### Drilling Technique for Coalbed Methane Well

*Shi Lianchen* (The Northeast Bureau of Coalfield Geology, Shenyang, 110011)

**Abstract** Based on the successful experience of constructing of coalbed methane well, the construction technique is introduced on drilling, well protection, coalbed reconstruction and so on.

**Key words** coalbed methane, drilling, well protection, coalbed reconstruction

煤层气俗称瓦斯,主要成分为甲烷,占90%以上,它是在煤形成过程中逐步生成并赋存于煤层及煤系地层中的一种非常规天然气。它主要以吸附状态储存在煤层及其孔隙、裂隙中,以游离溶解状态为辅。在煤层顶板附近的砂岩中则以游离状态为主储存在其孔隙和裂隙中。煤层气作为优质洁净新型能源和化工原料,越来越得到人们的重视,开发利用好这种能源,变害为利,变废为宝,不仅有利于煤矿安全生产,有效减少大气环境污染,还可改善我国能源结构。

世界上约有20多个国家进行了煤层气的勘探开采工作,热点在美国、中国、北欧、澳大利亚、俄罗斯等国。特别是美国"开采煤层气热"在圣胡安盆地和黑勇士盆地形成,各石油公司在这两个盆地所打煤层气井数量创历史纪录。每口井成本约40万美元,大多数煤层气井深914.4m(3000 ft),产气量都很高,日产2.83万m<sup>3</sup>(100万ft<sup>3</sup>)的气井比比皆是,最高的一口井日产气量25.49万m<sup>3</sup>(900万ft<sup>3</sup>)。美国煤层气年产量1993年为1.99 × 10<sup>10</sup>m<sup>3</sup>,约为美国天然气产量的5%。

我国煤炭资源和煤层气资源均比较丰富,煤炭产量连续11年居世界第一。“八五”期间,我国有关部门广泛开展了煤层气开发的前期工作,但至今煤层气的地面开采利用还未形成工业规模和商业价值。几年来,我国的煤层气开发工作也引起了国际社会的关注,联合国开发计划署及美国、澳大利亚的约七八家石油开发公司纷纷进入

我国，寻求合作开发项目。据不完全统计，1990~1996年，在近20个煤田或地区已施工了近100口煤层气勘探开发试验井。华北石油地质局在山西柳林进行了小型井网开采试验，完井7口，其中6口井采气试验均获得工业性气产量，有5口井日产量1000~7000m<sup>3</sup>。中原石油勘探局在山西晋城进行了小型井网开采试验，完井7口，均获得工业性气产量，平均日产量2000m<sup>3</sup>以上。

通过几年的煤层气勘探开发实践，我们也深切感受到，除了地质构造、煤层特性等因素外，在煤层气井的施工技术方面也存在着一些亟待解决的技术问题。煤层气井的钻探施工与石油天然气、煤田钻探施工既有相似之处也有不同之处。如取心技术、储层保护技术、固完井技术、排水采气技术，尤以其储层测井、试井、造穴、射孔压裂、产层增产改造等技术的差异较大，其施工工艺的合理与否在很大程度上决定了气井产气量的大小及其寿命的长短。换句话说，煤层气资源地面开发的成败与工程施工技术方法有着相当重要的关系。

我局最早于1986年开始对煤层气勘探开发进行试验。十几年来，先后在阜新、沈阳外围、鸡西、铁法、鹤岗等煤田累计施工煤层气勘探参数井、开发试验井、商业生产井27口，累计进尺21024m，井深321~1305m，属于煤层气开发区。1995年，我局承担了由中国煤田地质总局立项的国家一类“铁法煤田煤层气勘探”项目，在铁法煤田大兴井田先后施工了DT1、DT2、DT3煤层气生产试验井。下面重点以这3口井的施工情况谈谈有关认识。

## 1 概况

铁法煤田位于辽宁省东北部，距沈阳市约100km，距铁岭市30km，交通便利。矿区面积约513km<sup>2</sup>。已探明储量16.5亿t，截止1996年保有储量13.83亿t，已建成8对现代化矿井，年煤炭生产能力约1500万t，矿区内各矿井均为高瓦斯矿井，根据钻探煤心瓦斯样解吸法测量，各煤层平均气含量约8m<sup>3</sup>/t，根据已开采的4、7煤层矿井实测平均气含量17.42m<sup>3</sup>/t。地面开采条件较好，地层由老至新为前震旦系花岗片麻岩，晚侏罗系(阜新组-煤系，建昌组-火山岩)，早白垩系-第三系红层和第四系粘土。本区含煤20层，其中上含煤段含煤10层(1~10)，主要可采层有4、7、8、9煤层，下含煤段10层(11~20)，主要可采煤层有12、13、14、15、16煤层，全区以中~厚层复合煤层为主，赋存深度绝大部分在1000m以浅，目前开采水平为-200~-50m，开采范围仅占矿区总面积的4.5%。本区煤种主要为长焰煤和气煤，在-600m水平以浅是长焰煤为主，以深是气煤为主。由于辉绿岩的侵入，在接触变质带周围有少量的不粘结煤和天然焦。距断层、天然焦越近，吨煤瓦斯含量越高，有的可达26.28m<sup>3</sup>/t。

## 2 钻井工程

钻井是地面勘探和开发煤层气田的必要手段。为了解和掌握井田的地质情况，煤层气的测试参数，煤、岩样的化验指标，就要把地下的气采出来，这些都要通过钻井工作来实现。钻井工作的质量与速度直接影响着煤层气田的勘探开发，只有打好井、快打井才能保证高水平地勘探和开发煤层气田。

### 2.1 井身结构

根据大兴井田的地质条件，DT1井井身结构为表层套管、技术套管、生产套管(见

图1a), DT2、DT3井井身结构为表层套管、生产套管(见图1b)。表层套管应该坐在完整致密的岩层上,完全封隔第四系含水层及基岩裂隙风化带,随后水泥固井,水泥浆应返至地表。

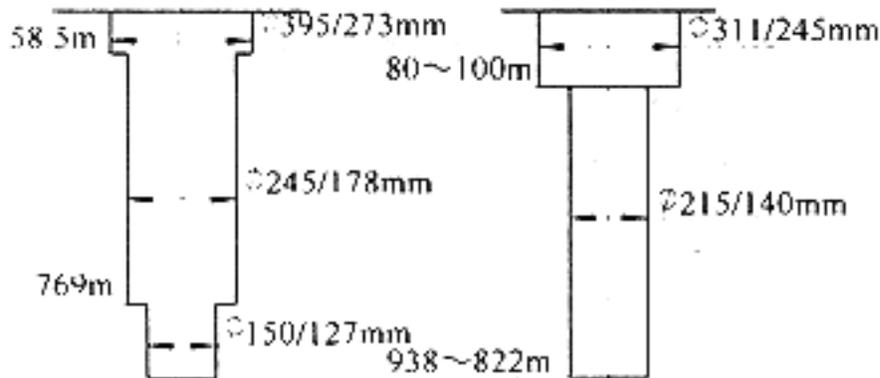


图1 井身结构示意图

(右侧数字为孔径/套管直径)  
(a)DT1井;(b)DT2、DT3井

排采实践证明,煤层气井的日产量与井口压力都不大,DT3井最大日产气量 $11381\text{m}^3$ ,最大井口压力 $2.8\text{MPa}$ ,DT1井最大日产气量 $417\text{m}^3$ ,最大井口压力 $1.85\text{MPa}$ 。采用J55钢级的套管,强度完全可以满足煤层气井的压裂和生产要求,没有必要采用N80钢级的套管,同时 $\cdot 177.8\text{mm}$ 生产套管也偏大, $\cdot 139.7\text{mm}$ 套管亦能满足生产要求。

DT2、DT3两井终井深度都穿过最下部目的煤层底板 $50\text{m}$ ,留作排采时的沉淀物口袋。

## 2.2 钻井液

根据地层选择合理的冲洗液类型,如地层完整、孔壁稳定,可采用清水作冲洗液。但对于破碎、裂隙发育、易坍塌的水敏性煤系地层,则必须使用优质泥浆作冲洗液,否则井眼安全无法保证。针对铁法地层的实际情况,我们使用了水基双聚泥浆体系。

## 2.3 钻进取心

为了摸清气田的渗透率、储层压力、煤层甲烷吸附特性、解吸压力等参数的分布规律,必须采取一定数量的煤、岩心供采样化验。DT1井先是采用大口径钻进,用大径川83型取心器及DMD841型取心器取心,均不能满足地质设计要求。后改用煤田常规钻进采心工艺, $\varnothing 68\text{mm}$ 钻铤, $\varnothing 89\text{mm}$  DMD841型取心器,小参数钻进,煤心采取率达 $98\%$ ,岩心采取率达 $99\%$ ,达到地质设计要求。

根据DT1井的实践,结合铁法煤田煤层较多的情况,在施工DT2、DT3井时采用了小径钻进取心、大径扩孔完井的施工工艺,顺利完成钻井施工。DT2井5个目的煤层的煤心采取率为 $92\%$ ,岩心采取率为 $91\%$ 。DT3井8个目的煤层的煤心采取率为 $94.9\%$ ,岩心采取率为 $86\%$ ,均达到设计要求。

在鹤岗煤层气井的施工中，小径全部采用绳索取心钻进，这样不仅提高煤心提取速度，减少瓦斯逸失量，而且全孔取心有利于观察岩层的裂隙发育情况，掌握地层漏失规律，为提高固井质量提供更准确的资料。

## 2.4 储层测试

3口井共进行7段次试井，分别由3个试井队完成。DT2井的下煤段15、16煤层因顶板裂隙发育，9天坐封5次，损坏新胶套1个，未坐封住，在16.5MPa压力时即返水，裸眼测试无法进行。后固井对15、16煤层进行射孔管内测试，取得了储层参数。其余6个层段都是裸眼测试。通过与3个试井队的试井作业配合，有以下几点体会：

(1)试井队胶套规格应有多种，以适应不同井径的需要。DT1井试井时，为了适应胶套规格 $\varnothing 120 \sim 130\text{mm}$ 的要求扩孔2次，DT3井上煤组试井也扩孔2次。而C试井队，带有两种规格的胶套，测试这两口井时，未进行扩孔，既节约了工时材料，减轻了工人劳动强度，又达到了裸眼测试，尽可能接近储层原始状态的目的。

(2)为了减轻泥浆对储层原始状态的影响，坐封前C试井队先用清水顶替钻井液，清洗井壁后立即充气膨胀胶套，使被测试井段较干净。

(3)电子压力计不固定在油管內，能自由上下为好，当井下试井预计的储层压力有变化时，从油管中提上来，重新设置时间间隔，比全部提上油管方便许多。

(4)套管內测试与裸眼测试比较有如下优点：

利于提高煤层测试参数的准确度。裸眼测试时，因需要在较大范围内选择封隔器坐封位置，因此所测试层段较大，除煤层外还包含部分顶底板层段。如DT3井7、9煤层厚29.63m，煤层与非煤段厚度约1:1，12、13、14煤层厚24.91m，煤层与非煤段厚度比为1:0.7。这些岩层中存在的裂隙，将影响到所测煤层参数的准确性。而套管內测试是在固井后进行的，可准确针对煤层射孔测试，消除了煤层附近地层因素的影响，准确性有所提高。

安全可靠。裸眼测试时要求钻井液为清水，在有坍塌掉块现象的复杂地层，易发生翻埋事故。在顶板裂隙发育、地层应力大、井的椭圆度较大时，也常常会造成坐封失败。DT2井的15、16煤层采用套管內测试，管壁光滑，管内都是清水，坐封安全可靠，启封便利。

## 3 固井工程

固井是完井工程的关键之一，其质量好坏直接关系到气井改造、压裂与排采的成败。对于固井质量应注意以下几个问题：

(1)根据固井操作规程应先堵漏后固井，钻进时发现漏失层应及时进行水泥堵漏。固井水泥浆以返到地表为最好。

(2)了解地层裂隙、煤层割理发育状况。这在取心钻进时可从钻井液的消耗量中观察到。

(3)控制固井水泥浆的密度及排量。防止破坏原有的压力平衡，而形成新的局部层段的压裂漏失。

(4)提高套管质量。套管本身及其下入时的施工质量，将会影响封隔器的下入和固井耐压能力。检查套管除了要用通径规查内径，螺纹规查丝扣外，有条件还应该进行超声波探伤和打压试验。如DT2井完成了15、16煤层压裂改造后，在进行第二层段压裂时，发现在350m处封隔器下不去，后填砂封隔小型压裂测试时，套管外返泥浆，压力

上不去，给12、13、14煤层段压裂改造带来很大困难。良好的水泥环至少可以提高套管强度20%。

## 4 煤层改造

我国煤层的渗透率一般较低，铁法煤层的渗透率在 $(0.99 \sim 14.85) \times 10^{-16} \text{m}^2$  (0.1 ~ 1.5毫达西)。如此低的渗透率必须进行改造，以便形成好的煤层气气流通道，达到高产稳产的目的。在增产改造措施上，我们经历了裸眼造穴、清水压裂、清水携砂压裂、大规模高砂比高压压裂的过程。

### 4.1 裸眼造穴，清水压裂

为了使煤层与井眼最大限度连通，解除近井地带的污染，增大井眼有效半径，增大煤层自由表面积，对DT1井下煤组12、13、14煤层采用了水力冲割造穴工艺。根据捞取颗粒返出量估算洞穴容积为 $2.33 \text{m}^3$ ，则其理论直径为0.68m，下入 $\varnothing 127 \text{mm}$ 筛管、尾管总长103.27m，气举洗井后压裂，压入清水 $170 \text{m}^3$ ，井口压力5.5MPa。按设计下 $\varnothing 177.8 \text{mm}$ 套管固井，但造穴改造效果很不理想。分析原因：首先是水量小又无支撑砂；其次由于断层因素造成裸眼段过长，这样只改造了近井带煤层，而远井带煤层没有得到改造。与后来的压裂改造效果比较，铁法煤田的煤层改造应以压裂为宜。据介绍美国的造穴条件是煤层渗透率要 $> 49.5 \times 10^{-16} \text{m}^2$  (5毫达西)。

### 4.2 清水携砂压裂

清水压裂的裂缝在地应力作用下会很快闭合，交联液携砂能力强，但考虑其化学分子对煤层的污染伤害，若破胶不彻底会堵塞微小喉道。我们对DT1井上煤组进行了清水携砂压裂改造。为了悬浮石英砂提高携砂能力，排量不能小于 $8 \text{m}^3/\text{min}$ 。压裂分两段进行，第一段先压7、9煤层，总液量 $416.81 \text{m}^3$ ，20~40目石英砂 $30 \text{m}^3$ ，平均砂比12.2%，最高泵压13.6MPa。7、9煤层压裂后填砂封隔，再压4煤层，总液量 $346.7 \text{m}^3$ ，20~40目石英砂 $20 \text{m}^3$ ，平均砂比9.79%，最高泵压15.9MPa。设计缝长7、9煤层93.6m(单翼)，4煤层134.5m(单翼)。压裂施工后用声发射仪测量方位：7、9煤层缝NE69°，最大单翼缝长105m；4煤层缝NE69°，最大单翼缝长138m。经排采试验，未达到理想产量，分析原因：

- (1) 石英砂充填地层裂隙，使泵压曲线平缓下降，煤层改造不够理想。
- (2) 含砂比偏低，使导流能力提高不够。
- (3) 仅沟通天然裂隙割理，没有造出新缝。

### 4.3 细砂降滤失，高压压裂

在DT3井压裂设计中，压裂规模参考美国低渗透率大规模，高渗透率小规模的经验，结合DT3井所在断块该井距断层边界的距离，设计单翼支撑缝长202m，支撑缝宽4mm。在现场施工条件允许下，尽量加大砂比，泵压曲线应较大起伏为宜。

DT3井自下而上先后进行3次压裂作业，累计压入压裂液 $1650.9 \text{m}^3$ ，压20~40目石英砂 $140 \text{m}^3$ 。单层最大压液量 $712.5 \text{m}^3$ ，单层最高压砂量 $60 \text{m}^3$ ，单层平均砂比12.6%，单层最高砂比13.5%，最高泵压43MPa。针对上煤组4、7、9煤层段裂隙发育，为了堵裂隙，减少滤失，在前置液中加入100~120目细砂 $20 \text{m}^3$ ，使泵注压力由18MPa提高到35MPa，比DT1井上煤组泵注压力提高1倍多。

### 4.4 其它注意事项

压裂液的配制，由使用大坑中的雨水，到改用井水，到现在用自来水，虽然提高了成本，却保证了压裂液的洁净，最大程度减小了对煤层微裂隙的污染。同时为了降低摩阻提高泵效，抑制煤层中灰分的膨胀，在压裂液中加入了减阻剂和防膨胀剂。

除DT1井下煤组采用套管注入压裂外，其余压裂都采用油套混合注入压裂，便于处理万一发生的堵埋事故，提高了施工的安全性。

封隔方法，用填砂法安全性好，但准确程度差，压裂后探砂面比压裂前要低。用可捞式封隔器封隔，准确程度高，但有时失效造成捞不上来的事故。

煤田煤层压裂模型与油田的压裂设计模型是不同的，用油田模型作缝长设计时要加大系数。油田以造直缝为主，煤田以沟通弯曲缝为主。

## 5 排水采气

煤层气井的排水采气工作，是检验煤层气井设计、施工效果，实际评价煤层气田的重要工作。

DT1井下煤组造穴水力激发后，下入 $\varnothing 57\text{mm}$ 井下杆式泵进行排水。甲烷气体从油套环形空间排出，点火成功，火焰高度2m左右，用U型管法计算出日产气量1000m<sup>3</sup>左右。随后安装采油树，游梁式抽油机，水、气计量表，陆续排采4个多月，平均日产气量10余m<sup>3</sup>，日产水量10余m<sup>3</sup>。分析认为：当初为近井地带游离气体，煤层段没有改造，达不到长期采气要求。DT1井上煤组压裂改造后，经过几个月的排水采气，最高日产气量417.3m<sup>3</sup>。最高井口压力1.85MPa，未能达到工业气流要求。

DT3井压裂后，根据水文地质资料，煤层及顶底板砂岩属弱含水层，选择 $\varnothing 44\text{mm}$ 井下杆式泵、3型游梁式抽油机进行排采作业，最大日产水量61m<sup>3</sup>，通常30~40m<sup>3</sup>，液面深度80~120m，距最上一层煤顶板350~390m。后进行修井作业，更换为 $\varnothing 57\text{mm}$ 泵，并增加气锚，提高了泵效，增大排水量，液面降至120~160m，日产量稳步上升，由1997年4月15日的14 m<sup>3</sup>逐步上升到12月1日的9200m<sup>3</sup>，最高井口压力2.8MPa。

从1997年4月9日开始排采，至1998年7月21日已15个多月，累计采气151万m<sup>3</sup>，累计产水12844m<sup>3</sup>。后来虽然采用了24kW燃气发电机组，减少了柴油的消耗，但绝大多数的甲烷气排空。10月以后将抽油机的冲次降到一挡(7次/min)，排水量在20~30m<sup>3</sup>/日，井口压力0.3MPa，日产气量8000m<sup>3</sup>左右，井口压力1.0MPa，控制日产气量5000m<sup>3</sup>左右，最大日产气量为1998年3月26日的11381m<sup>3</sup>。现液面在435m左右，井口压力2.3MPa。经气样化验甲烷含量94%。

## 6 其它几点认识

(1)如果煤田的构造比较复杂，断层较多，在选定区块孔位前，应进行区块三维地震，以摸清断层的产状、数量，提高钻井成功率。

(2)选区时应考虑煤质。如铁法煤为硬质煤，排采15个月只有少量的煤粉排出。若是在粉煤层进行排采，必须充分考虑煤粉、支撑砂的排出问题，气流通道的闭合或堵塞，必然影响到产气量。沈北煤田煤质为褐煤，煤质较软，压裂后初期日产气量3000m<sup>3</sup>，不到3个月就不出气了。韩城的煤层中含粉煤，排水采气时煤粉随水进入井中造成排水困难，日产气量也有所降低。

(3)目的煤层的选择应统筹安排。如DT1井设计时没有考虑15、16煤层，终井煤层为14煤层，DT2、DT3井终井煤层为16层，在对15、16煤层射孔后发生喷水、喷气现象。

(4)压裂缝的方位、缝长与井田煤层的就地主应力的方位、大小有关，对井田区块的就地应力应进行必要的研究。例如，是否可以较长时间保持一定压力？压裂时的突然压力下降说明造出新缝，再保持一定的压力以扩展延长缝长。煤层压裂中如较长时间保持一定的压力，是否也能沟通主应力方向的煤层割理，造出新缝。据悉日本葛根田地热井压裂最长时间56h。

作者简介：石连臣：男，1951年生，东北煤田地质局生产处副处长，高级工程师；1977年毕业于河北地质学院探工系；现负责局基桩施工筹建工作。

作者单位：地址：110011 沈阳市沈河区盛京路24号。

## 7 参考文献

- [1] 刘广志.开发煤层气的工程技术.探矿工程，1998，(1).
- [2] 王生辉.对铁法矿区煤层气资源开发的几点认识.煤层气，1997，(3).
- [3] 李克向主编.保护油气层钻井完井技术.北京：石油工业出版社，1993.

收稿日期：1998-09-15