

煤层群条件下合层多段压裂技术研究

罗开艳^{1,2}, 周效志³

(1. 贵州省煤层气页岩气工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550008; 2. 贵州省煤田地质局实验室, 贵州 贵阳 550008; 3. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221008)

摘要: 贵州地区普遍发育薄—中厚煤层群, 煤层气开发地质条件复杂特殊, 需要与之相匹配的工艺技术。在具体分析贵州地区煤层群发育特点的基础上, 提出煤层气合层多段压裂技术。合层多段压裂是从煤层群的角度出发, 从同一口井中优选多个压裂段, 每个压裂段包含相邻的多个煤层及煤层之间的夹层; 通过小层射孔, 投球封堵, 填砂封隔, 可降低施工难度, 提高合层多段压裂施工效果。合层多段压裂技术已在盘江矿区松河矿煤层气地面开发示范工程中应用实施并取得一定成效。

关键词: 煤层气; 煤层群; 合层压裂; 多段压裂; 投球

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)10-0200-04

Study on the Technology of Full-zone and Multi-stage Fracturing under Condition of Coal Seams/LUO Kai-yan^{1,2}, ZHOU Xiao-zhi³ (1. Guizhou Engineering Research Center for Coalbed Methane and Shale Gas, Guiyang Guizhou 550008, China; 2. Laboratory of Coal Mine Exploration of Guizhou Province, Guiyang Guizhou 550008, China; 3. China University of Mining & Technology, Xuzhou Jiangsu 221008, China)

Abstract: Thin and medium-thickness coal seams are developed commonly in Guizhou, the geologic conditions of coalbed methane (CBM) exploration are complicated and special. Based on the analysis on the characteristics of coal seams development in Guizhou, the technology of full-zone and multi-stage fracturing was suggested. Several fractured segments are optimized in one same well, each segment comprises a plurality of adjacent coal seams and interlays between coal seams. Construction difficulty can be reduced by ball plugging and sand filling & sealing. Full-zone and multi-stage fracturing technology has been applied in CMB ground development demonstration project of Songhe mine of Liupanshui coalfield with some success.

Key words: coalbed methane (CBM); coal seams; multi-stage fracture; multi-section; fracture ball sealer

贵州省煤层气资源十分丰富, 埋深 2000 m 以浅的煤层气资源量为 31511.59 亿 m³, 约占全国煤层气资源量总量的 10%, 仅次于山西, 位列全国各省第二^[1-3]。但贵州省的煤层气地质条件复杂, 普遍发育薄—中厚煤层群, 开发难度大, 许多在国内外煤层气开发领域比较成熟的工艺技术在贵州地区应用效果不佳, 普遍存在单井产量低、经济效益差的困境。合层多段压裂技术在松河矿煤层气开发工程中的应用, 是贵州省煤层气开发的一种新探索, 对于形成适合贵州煤层气地质特点的开发技术体系, 推进贵州省煤层气大规模商业化开发具有重要的实践意义。

1 贵州煤层群发育特征

煤层群主要是指含煤地层在纵向上煤层层数多, 煤层间距较小, 且形成于同一聚煤地质时期^[4]。

而贵州地区广泛发育薄—中厚煤层群, 表现为煤层层数多, 煤层间距相对较小, 煤厚薄, 如表 1 所示。贵州煤层群主要发育于龙潭组。龙潭组属于三角洲—潮坪—泻湖沉积体系, 煤层顶底板及煤层之间主要由较为致密的粉砂岩、泥质粉砂岩构成, 透水性弱, 阻气作用强, 使得众多煤层在垂向上难以实现有效的气—水交换作用, 从而形成垂向上的多层叠置含煤层气系统, 表现为多个煤层群共存。

煤层群内煤层的顶底板可能有较好的含气量。贵州地区煤层受构造影响严重, 再加上沉积的作用, 煤层内的瓦斯运移到煤层的顶板岩层中, 导致煤层之间的岩层有较高的含气量, 从而使煤层群内的煤层及煤层之间的砂岩共同构成一个含气系统。这在贵州地区的煤田勘探和煤层气开发实践中得到证实。例如, 盘江矿区 17 号煤层的顶板粉砂岩中含气量

收稿日期: 2016-05-25; 修回日期: 2016-08-15

基金项目: 贵州省科技重大专项资助项目“贵州省煤层气地面抽采关键技术研究及工程示范”(编号: 黔科合重大专项字[2014]6002号)

作者简介: 罗开艳, 男, 汉族, 1987年生, 工程师, 硕士, 地质工程专业, 从事煤层气勘探开发工作, 贵州省贵阳市观山湖区阳关大道112号煤田科技中心三楼(研究中心), yishui540713@126.com。

表1 贵州盘江矿区主要构造单元煤层群发育情况

构造单元	含煤层数	总厚度/ m	龙潭组		长兴组	
			可采 层数	可采总 厚度/m	可采 层数	可采总 厚度/m
盘关向斜(东)	9~56	24.2~44.9	3~6	7.3~11.5	6~9	8.6~12.1
盘关向斜(西)	28~66	26.8~46.2	6~13	7.7~16.2	4~7	6.2~12.3
青山向斜	15~29	19.9~33.6	3~7	8.1~14.5	0~6	0~7.9
土城向斜	31~60	21.9~51.3	4~15	4~20.7	5~9	6.5~13.6
旧普安向斜	4~51	2~63	4~8	7.2~19.1	0~5	0~7.5
照子河向斜	20~80	23.8~50	0~18	0~22.7	2~8	1.7~9.3

普遍在 $5 \text{ m}^3/\text{t}$ 以上,这就为煤层之间的夹层与煤层的合层压裂奠定了地质基础^[5-8]。

2 合层多段压裂技术

2.1 合层多段压裂技术原理

对于薄—中厚煤层群发育的地区,若按常规方法在同一口井中优选一个或几个煤层进行开发,将不得不舍弃含煤地层中含气量较高的部分煤层。在煤层厚度普遍较薄,单层或几个煤层的开采往往产量不高。而结合煤层群的发育特征,在优选压裂段的时候,不再以煤层为单位,而是以煤层群为单位来考虑,首先优选几个煤层群,再从每个煤层群中优选合适的压裂段,每一口井有多个压裂段、多个煤层群联合开发,可以克服单层煤厚偏薄,煤层气资源分散的缺陷,便于集中资源优势,提高单井产量。

煤层群条件下的合层压裂是指在优选的多个压裂段中,每个压裂段包含多个煤层以及煤层之间含气性较好的地层^[9-11]。国内沁水盆地有过合层压裂的先例,但主要限于相邻两个煤层的联合压裂,如三交地区太原组8号煤和9号煤的合层压裂^[12-14]。而对于贵州地区的薄—中厚煤层群,难以优选出几个好的主力煤层,而更适合于从煤层群的角度出发,从每个煤层群中优选出一段地层来压裂,每个压裂段包括多个煤层及煤层之间含气性较好的地层。

总之,煤层群条件下的合层多段压裂就是从煤层群的角度出发,结合煤层群发育的特征,根据沉积环境、储层物性、煤层间距等参数,将煤系地层划分为多个煤层群,先优选出条件较好的煤层群,再从每个煤层群中优选压裂段,同一口井有多个压裂段,每一个压裂段包含多个煤层及其夹层,实现煤层气资源的联合开发。

2.2 合层多段压裂施工关键技术

2.2.1 小层射孔

煤层群中优选出的压裂段由于包含多个煤层及其夹层,往往跨距较大,为减小施工难度,提高压裂效果,适合采用小层射孔,即在整个压裂段中,不是连续射孔,而是主要以煤层为中心,兼顾含气量较好的夹层,分小段射孔,使得孔眼集中在主要目标层段,每个压裂段包含数个射孔段。

2.2.2 投球封堵

投球分层压裂在常规油气开发领域已是较为完善、适用范围广的工艺,尤其适用于地层破裂压力存在一定差异、层间距小的多层油气藏的增产改造^[15-16]。煤层群条件下的合层压裂,其目的层往往包含多个煤层及煤层之间的岩层,它们之间的非均质性强,岩体力学性质存在显著差异。一方面,煤岩和煤层顶底板由于岩性不同,力学性质有所不同;另一方面,贵州地区煤层受多期构造影响,硬煤与软煤(碎粒煤和糜棱煤)并存,初次压裂时,大部分压裂液进入软煤,而硬煤难以压开,整体压裂效果往往不理想。而在小层射孔的基础上,投球合层压裂过程中,破裂压力小的目的层先压开,完成一个目的层的施工后,投入一定数量的堵塞球,由于已压开层进液量大,堵塞球被带入已压开层的射孔炮眼并将其堵住并限制其流量,迫使泵注压力和有效排量发生改变,以压开破裂压力较高的另一目的层,最终实现合层压裂的目的,并尽量使储层的改造相对均一。

2.2.3 填砂封隔

直井或定向斜井的多段压裂,通常是自下而上逐段进行。相比下双封隔器封隔,通过填砂暂时封堵已压裂层段,更加经济适用,且施工简单。初次填砂达到设计高度,进行沉砂并试压后再探砂面,以确保压裂,砂面下降在设计允许范围内。整口井多个压裂段的施工都完成后,再进行冲砂洗井作业。

3 典型实例

3.1 松河矿地质概况

松河矿位于贵州省六盘水市盘县特区北部土城向斜北翼中段,处于师宗—贵阳断裂、紫云—水城断裂和盘县—水城断裂所形成的三角带内,为一单斜构造,地层走向 $N60^\circ W$,倾向西南,地层平均倾角 23° 。属于六盘水煤田,上二叠统龙潭组是贵州最主要的含煤地层,沉积类型自西向东为陆相、海陆过渡相和海相沉积。松河井田龙潭组煤系地层本身为弱含水层。龙潭组顶部围岩为飞仙关组的绿色粉砂质泥

岩,底部下伏地层为玄武岩组,均为良好的隔水层。

松河井田属于六盘水煤田,是薄—中厚煤层群发育的典型地区。根据松河矿煤田勘探资料显示,松河井田上二叠统龙潭组(P₃l)含煤47~66层,一般50余层。含煤总厚度37~47 m,一般41 m,含煤系数12%。含可采煤层17层,可采总厚度23.51 m,可采含煤系数6.9%。井田内龙潭组可采煤层共17层,其中,全井田可采或基本全井田可采煤层有1+3号、4号、9号、12号、15号、16号、17号七层,可采总厚度11.68 m;大部分可采煤层有5₁号、6₂号、18号、27₂号、29₂号、29₃号6层,可采总厚度8.85 m;局部可采煤层有10号、11号、27₁号、29₁号4层,可采总厚度4.49 m。其余数十层不可采的薄煤层分布在可采煤层之间。

3.2 S-2井合层多段压裂地质设计

S-2井是贵州省盘江矿区松河矿煤层气地面抽采示范工程中的一口定向井。该井钻遇的主要含煤地层为二叠系上统龙潭组,其井段为545.0~880.0 m,视厚度335 m。

该井共钻遇煤层38层,煤层总厚度43.9 m,平均厚度仅1.16 m,呈现典型的薄—中厚煤层群发育的特点。根据煤间距、煤岩组份及沉积特点,可将整个煤层群划分为4个群组,如表2所示。

表2 S-2井煤层群发育特征

煤层群	煤层群厚度/m	含煤层数	组内煤层平均间距/m	组内主要煤层
第一煤层群	27	6	4.22	1+3、4、51、52
第二煤层群	60	10	5.05	61、91、92、10、11
第三煤层群	83	12	5.13	13、15、16、17、22
第四煤层群	69	10	4.07	271、291、292、293

注:每个煤层组内包含1~5层不可采薄煤层。

根据埋深条件、储层物性,先优选出适合压裂改造的煤层群,优选的结果为第一煤层群、第二煤层群和第三煤层群,再从每个煤层群中优选压裂段,并细化射孔层位。射孔以主要煤层为中心,适当向煤层的顶底板延伸。S-2井具体的合层多段射孔压裂方案如表3~5所示。

表3 S-2井第一压裂段地质设计

煤层号	顶板岩性	底板岩性	煤层深度/m	射孔层段/m	射孔段长度/m
1+3	粉砂岩	粉砂岩	545.80~548.53	545.00~549.00	4
5 ₁	粉砂岩	粉砂岩	561.63~564.53	561.00~565.00	4
5 ₂	粉砂岩	泥质粉砂岩	571.30~573.30	571.00~574.00	3

3.3 S-2井合层多段压裂施工

表4 S-2井第二压裂段地质设计

煤层号	顶板岩性	底板岩性	煤层深度/m	射孔层段/m	射孔段长度/m
9 ₁	粉砂岩	粉砂岩	608.94~610.64	609.00~612.00	3
9 ₂	粉砂岩	粉砂岩	623.75~624.51	623.00~630.00	7
10	粉砂岩	粉砂岩	628.76~629.88		
11	粉砂岩	粉砂岩	634.90~636.00	633.00~636.00	3

表5 S-2井第三压裂段地质设计

煤层号	顶板岩性	底板岩性	煤层深度/m	射孔层段/m	射孔段长度/m
13	泥质粉砂	粉砂岩	670.43~671.50	670.00~672.00	2
15	粉砂岩	粉砂岩	677.38~679.50	677.00~680.00	3
16	粉砂岩	粉砂岩	685.13~687.24	685.00~690.00	5

3.3.1 整体施工工序

(1)通井、探砂面、试压、洗井。下 $\varnothing 114$ mm通井规+ $\varnothing 73$ mm油管落实砂面深度,用清水冲砂至人工井底,并用浓度为1%的KCl洗井液正循环洗井至进出口水质一样,然后试压至15 MPa,稳压30 min压降 ≥ 0.5 MPa为合格。

(2)射开第三压裂段。采用102型射孔枪,127型射孔弹,射孔孔密为16孔/m,射孔相位角 60° ,按设计的射孔层位进行射孔。

(3)第三段煤层压裂。按压裂设计进行施工,根据压裂曲线现场确定投球时间点。

(4)放喷排液。第三段煤层压裂施工结束后,接硬管线控制放溢流,放溢流速度控制在 $0.2 \sim 0.5$ m³/h。

(5)填砂。进行填砂作业,填砂至井深655 m,封住已施工完的第三压裂段。填入石英砂,沉砂2 h后再探砂面,砂面与设计值上下不超过1 m为合格。砂面位置合格后,起出探砂管柱。

(6)射开第二压裂段:采用102型射孔枪,127型射孔弹,射孔孔密为16孔/m,射孔相位角 60° 。

(7)第二段煤层压裂。按压裂设计进行施工,根据压裂曲线现场确定投球时间点。

(8)放喷排液。第二段煤层压裂施工结束后,接硬管线控制放溢流,放溢流速度控制在 $0.2 \sim 0.5$ m³/h。

(9)填砂。进行填砂施工,填砂至井深595 m,封堵已施工完的第二压裂段。

(10)射开第一压裂段并进行压裂施工,压后进行放溢流。

(11)溢流结束后,对全井进行冲砂洗井作业。

3.3.2 合层多段压裂施工效果

以S-2井第一压裂段的施工为例进行分析。

如图1所示,当日8:21开始供液压裂,依次打入前置液、携砂液、顶替液。第一阶段顶替结束,完成第一批目标层段的压裂后,9:33开始投球,投入尼龙球80个,投球后再依次泵入前置液、携砂液、顶替液,完成其余目标层的压裂。

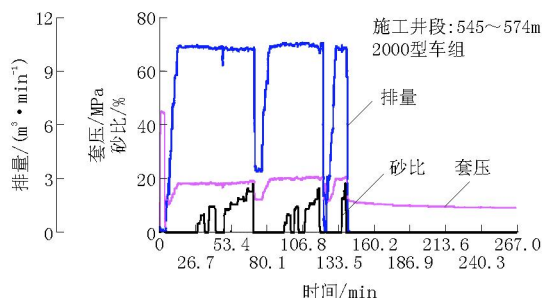


图1 S-2井第一压裂段(合层压裂)施工曲线

S-2井第一压裂段共注入液量1241.0 m³,加石英粉砂12.6 m³,石英中砂38.1 m³,石英粗砂4.5 m³,平均砂比12.4%,施工一般排量6.7~10.3 m³/

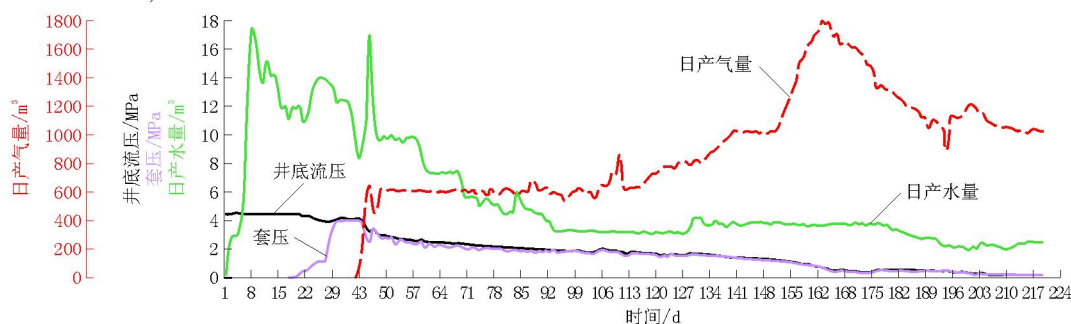


图2 S-2井排采曲线图

提高单井产量;压裂过程中通过投球封堵依次压开几个射孔层段,从而提高整体压裂效果。单井的多段压裂施工中,填砂封隔相比下桥塞等封隔工艺,工序简单,成本较低。

(3)合层多段压裂技术在煤层群发育的典型地区松河矿进行探索性实践,取得一定成效,但在合层压裂裂缝的发育机理以及压裂施工工艺方面还需要进一步的研究完善。

参考文献:

[1] 杨兆彪,秦勇,高弟,等.煤层群条件下的煤层气成藏特征[J].煤田地质与勘探,2011,39(5):22-26.
 [2] 秦勇,熊孟辉,易同生,等.论多层叠置独立含煤层气系统以贵州织金-纳雍煤田水公河向斜为例[J].地质论评,2008,54(1):65-69.
 [3] 刘龙乾.青山矿区煤层气赋存规律及其资源潜力[D].江苏徐州:中国矿业大学,2007:1-84.
 [4] 秦勇,高弟.贵州省煤层气资源潜力预测与评价[M].江苏徐州:中国矿业大学出版社,2012.

min,所有施工参数均达到或超过设计指标。

第三压裂段和第二压裂段的施工与此类似,最终圆满完成S-2井3个段的合层压裂施工。如图2所示,S-2井排采前7个月的最高日产气量达到1800 m³,稳定日产气量在1000 m³以上,在贵州地区属于单井产量较高的井。

4 结论与认识

(1)贵州地区薄—中厚煤层群发育,特殊的开发地质条件深刻影响开发技术的有效性。合层多段压裂技术是从煤层群的角度出发,联合开发多个煤层及其夹层,能够有效提高单井产量。

(2)合层多段压裂比常规的压裂施工更为复杂,可以优选目标煤层及其含气量较好的顶底板作为一个小层进行射孔,每个压裂段包含多个小层,以增加单井内的产气通道,同时开发多个煤层的资源量,

[5] 高弟,秦勇,易同生.论贵州煤层气地质特点与勘探开发战略[J].中国煤炭地质,2009,21(3):20-23.
 [6] 梁冲冲,吴财芳,李腾.多层叠置独立含气系统中煤储层孔隙特征研究[J].煤炭科学技术,2013,41(6):104-107.
 [7] 倪小明,苏现波,李玉魁.多层合层水力压裂关键技术研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(5):728-739.
 [8] 倪小明,贾炳,王延斌.合层水力压裂煤层投球数的确定[J].天然气工业,2012,32(7):33-37.
 [9] 汪万红,郑玉柱.煤层气分压合排技术适应条件分析[J].煤田地质与勘探,2014,42(4):36-38.
 [10] 李仲东,周文,吴永平.我国煤层气储层压力异常的成因分析[J].矿物岩石,2004,24(4):87-92.
 [11] 徐宏杰,桑树勋,易同生,等.黔西地应力场特征及构造成因[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(6):1960-1966.
 [12] 李国彪,李国富.煤层气井单层与合层排采异同点及主控因素[J].煤炭学报,2012,37(8):1354-1358.
 [13] 朱东君.贵州织金区块煤层气井排采影响因素分析[J].油气藏评价与开发,2015,5(2):78-80.
 [14] 熊燕莉,冯曦,杨雅和,等.多层合采气井动态特征及开发效果分析[J].天然气勘探与开发,2005,28(1):21-24.
 [15] 王松,春兰,杨兆中.低渗透气藏分层压裂难点及对策[J].断块油气田,2009,16(6):115-117.
 [16] 段品佳,张超,屈长龙,等.煤层气储层压裂负效应作用机理[J].煤炭学报,2014,39(S2):447-451.