

合层水力压裂煤层投球数的确定

倪小明^{1,2} 贾炳¹ 王延斌³

1.河南理工大学能源科学与工程学院 2.山西晋城无烟煤矿业集团公司 3.中国矿业大学地球科学与测绘工程学院

倪小明等.合层水力压裂煤层投球数的确定.天然气工业,2012,32(7):33-37.

摘 要 在单层较薄、煤层间距较小的多煤层发育地区进行合层水力压裂时,合理的投球数是保障合层水力压裂施工过程顺利进行、被改造的各煤层总体效果最佳的重要条件之一。煤储层与砂岩储层在力学性质等方面存在一定的差异性,若参照砂岩储层的投球数对煤储层进行改造,可能导致施工压力上升、煤层段压裂效果欠佳等问题。因此,准确得出不同地质情况下的合理投球数,可以解决以往投球数确定难、施工效果无法保证的问题。基于合层投球水力压裂原理,系统分析了合层投球水力压裂的影响因素,在此基础上,分别构建了软、硬煤交互和不同硬煤的合层水力压裂地质模型及投球数数理模型。应用该模型,对淮北芦岭矿 8[#]+9[#] 合层水力压裂的投球数进行了设计,现场施工结果表明,该方法能对不同煤层组合下的合层水力压裂的投球数确定提供理论依据。

关键词 煤层气 合层 水力压裂 投球数 确定 数学模型

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2012.07.008

封堵球合层压裂技术最初是基于多个层间距小、不能用分隔器分卡的多个已射孔的油气层进行分层压裂。为了保证水力压裂过程的顺利进行,同时又能使各个油气层的裂隙通道得到充分的改善,国内外研究者或从岩石力学角度进行理论分析计算、或从实验室角度进行实验、或根据现场施工进行经验总结等方面进行了研究。李勇明、王兴文^[1-2]等通过对堵塞球受力分析,建立了破裂压力计算模型、投球最小排量方程,对射孔孔数和直径进行了设计,取得较好效果;Webster 等^[3]以及 Stipp 和 Williford^[4]曾介绍了采用封堵球进行多级压裂,但可能导致某些层段压裂满足不了要求;冯明生等^[5]根据限流压裂曲线对压开层位进行了分析计算,对工程具有一定的指导意义。蒋延学等^[6]提出合理确定投球时机以及多次投球实现多层合层压裂。倪小明等^[7]基于虚拟储层提出了确定投球数的合层压裂。肖晖等^[8]研究了施工参数对堵塞球运动的影响。与油气层相比,煤储层的非均质性更强,若以油气层的判定依据或方法对煤储层实施投球,可能导致工程方面的失败。关于煤储层合层压裂投球数的判

定鲜有报道。笔者根据多煤层发育特点,结合投球工艺技术和施工条件,对不同煤储层组合下投球数进行确定,以为多煤层合层压裂的投球工艺提供理论指导。

1 合层投球水力压裂原理及影响因素

多煤层发育区的合层压裂投球技术主要是针对非均质性差异性大的储层进行的。投球的目的一方面是限制某些孔的流量,另一方面是使施工压力上升,使储层的改造相对均一。为了确定合层水力压裂的投球数,首先需对合层投球水力压裂的裂缝形态的影响因素进行分析。

1.1 合层投球水力压裂原理

合层投球水力压裂是基于间距较小、非均质性差异相对比较大的两层或多层煤为前提,把井筒作为一个密闭系统,通过地面高压泵把液体注入井筒,当达到煤层某些地方的破裂压力时,首先破裂进行延伸,为防止裂隙闭合,并进行加支撑剂操作来支撑裂缝。因煤储层非均质性强,岩石力学性质差异性大,势必造成在煤层某些段裂缝延伸较远,某些煤层段裂缝延伸较近,

基金项目 :国家科技重大专项课题“煤层气开发动态评价模型与软件系统”(编号:2011ZX05034-005)、国家自然科学基金(编号:40902044)、中国博士后科学基金(编号:20100480848)。

作者简介 :倪小明,1979年生,副教授,博士;主要从事瓦斯地质及煤层气勘探开发方面的研究工作。地址:(454000)河南省焦作市高新区世纪路2001号。电话:13598539437。E-mail:nxm1979@126.com

为了限制这些裂缝延伸远的继续延伸,同时使裂缝延伸近的能够进一步延伸扩展,此时投入一定数量的尼龙球(也可以是其他材料制作的球),把裂缝容易延伸的那部分孔眼堵塞,迫使施工压力和有效排量发生改

变,达到改造初始裂缝延伸距离近的那部分层段的目的。因此,能否使初始裂缝延伸近的层段进一步得到改造,合理的投球数是决定因素。其压裂原理如图1所示。



图1 合层投球水力压裂原理示意图

1.2 合层投球水力压裂裂缝形态的影响因素

合层投球水力压裂是在三维空间地质体中进行的,压裂时裂缝形态的影响很多,主要影响因素有煤岩力学性质、地应力特征、围岩特征、构造地质条件、施工泵注参数等。

1.2.1 煤岩力学性质及煤层段非均质性对压裂裂缝形态的影响

合层投球水力压裂作用的对象主要是煤层段,水力压裂主要是靠挤聚力在煤层的弱面首先开裂。煤储层的非均质性较强,当煤层段岩石力学性质差别不大时,水力压裂时,煤层段的弱面不明显,无效孔眼很少,几乎没有,这种情况下,储层的改造相对比较均一,几乎不需要使用投球。当煤层段岩石力学性质差异较明显时,水流主要在弱面中进行流动,起不到煤层段整体改造的效果,此时,当压裂一段时间后,则需要使用投球技术封堵住一部分孔眼,即那些流量相对比较大的孔眼,因前段时间的压裂已经在弱面中加入了一定量的支撑剂,通过封堵,则可能在岩石力学性质相对较大的煤层段进行储层改造,进而达到均一改造的目的。

1.2.2 地应力特征对压裂裂缝形态的影响

原始状态下,煤岩体受到垂直方向和水平方向三轴应力的作用。水力压裂时,裂缝形态不仅受到煤岩本身力学性质等方面的影响,还与三轴应力的大小和方向有关。当煤层段裂隙不发育时,可将其近似看作一均质体,压裂时,首先将在与最小应力垂直的方向上发生张裂,然后在平行于最大应力方向上进行延伸;当煤层段裂隙发育时,裂缝延伸受控于裂隙方向、煤岩强度、应力大小等的共同作用,即看裂隙的正应力与应力的关系,正应力若为最小应力,则将沿着裂缝延伸,正应力若不是最小应力,则将沿着原始裂隙与最大应力之间进行延伸。

1.2.3 围岩特征对压裂裂缝形态的影响

围岩力学性质与煤层力学性质的差异性及其应力剖

面在一定程度上也影响着裂缝形态。当围岩力学性质明显高于煤层段时,压裂时很难突破顶、底板限制,压裂裂缝仅在煤层段进行延伸;当围岩力学性质与煤层段力学性质差别不大时,压裂时裂缝可能突破顶、底板的界限,在围岩中进行延伸。

1.2.4 构造地质条件对压裂裂缝形态的影响

褶皱构造发育的地区,一方面改变了煤岩体的裂隙发育、煤岩力学性质;另一方面可能造成应力的集中和分散,进而对压裂时裂缝产生影响。断层构造发育的地区,使断层附近的应力发生改变,煤体结构、煤岩力学性质等发生改变,这些都影响着压裂时裂缝延伸形态。

1.2.5 施工泵注参数对压裂裂缝形态的影响

施工泵注参数主要包括压裂规模、施工排量、砂比等。压裂规模越大,裂缝在长度、宽度及高度三维方向均有不同程度的扩展;施工排量不仅影响施工过程中的携砂能力,施工排量的增加引起净压力的增加;在一定程度上,提高砂比就意味着降低支撑剂裂缝的宽度。这些都影响着压裂时裂缝的形态。

2 合层投球水力压裂地质模型

通过合层投球水力压裂裂缝形态的影响因素可知,应力状态、煤岩本身、泵注参数等对压裂裂缝形态影响最大,笔者也主要基于这几方面建立合层投球水力压裂的地质模型。

成煤环境的复杂性、多期性以及构造运动,导致煤层段的煤岩力学性质具有一定的差异性。当成煤过程及成煤后煤层段遭受的构造运动不强烈时,煤层段的变形不太强烈,即煤层段主要以硬煤为主,但由于受到了构造运动,煤层段岩石力学性质有一定的差异,导致一次压裂时有部分煤层段可能压不开,为了让整个煤层段几乎能全部压开,则可实施投球技术进行压裂,地质概念模型如图2所示。

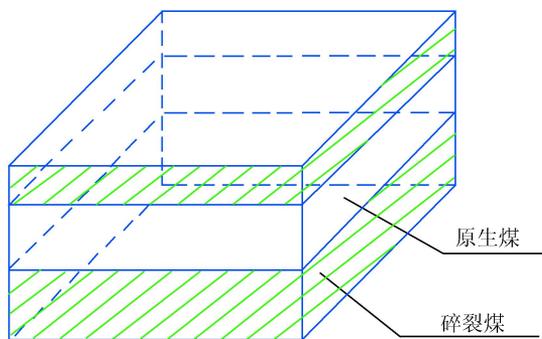


图 2 硬煤互层地质概念模型图

当煤层段形成过程、形成后遭受的构造运动强烈程度不同时,导致煤层段岩石力学性质差异性较大时,即软煤(碎粒煤和糜棱煤)和硬煤共存,第一次压裂时,大部分压裂液进入软煤,压裂效果不甚理想,为了在硬煤中进行压裂,则需要使用投球技术,此类情况的地质概念模型如图 3 所示。

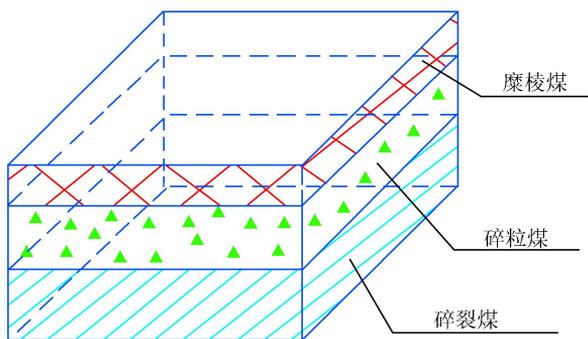


图 3 软硬煤结合地质概念模型图

水力压裂时,裂缝可能突破顶、底板进入围岩,裂缝延伸比较复杂,笔者所建模型主要基于裂缝,仅在煤层中延伸。

3 合层水力压裂投球数的确定

煤岩力学性质、地应力特征等的差异性,导致水力压裂时有效孔数不同,这些决定了在合层投球水力压裂时投球数的不同。

3.1 投球数数理模型计算思路

不管是软、硬煤岩互层还是力学性质差异的硬煤

互层,投球数计算思路可表述为:

- 1) 根据测井资料对煤体结构进行划分,得出硬煤(原生结构煤和碎裂煤)和软煤(碎粒煤和糜棱煤)或不同硬煤厚度及应力剖面。
- 2) 根据地应力、煤岩力学特征、煤层特征、泵注参数等确定水力压裂时有效孔数量。
- 3) 同样泵注井口压力下,要使其能在硬煤中裂缝开启并延伸,同时又不能造成压裂时压力过大,无法施工,在 96 型射孔弹射孔条件下,根据孔眼摩阻线解图,结合水力压裂的最大排量,得出不同投球数下的施工压力。
- 4) 根据硬煤岩石力学性质、破裂压力、软煤岩石力学性质及泵注压力,确定出投球数与硬煤破裂延伸的关系。
- 5) 根据软、硬煤厚度、岩石力学性质、泵注参数等,最终确定出能在软、硬煤中都得到延伸的投球数,其计算思路如图 4 所示。

3.2 投球数数理模型

投球数建模基于以下假设:

- 1) 煤层是连续、稳定、水平的。
- 2) 水力压裂时无法突破顶、底板围岩。
- 3) 忽略压裂液在储层中流动过程时煤体颗粒对其的阻碍作用。
- 4) 忽略顶底板的影响。
- 5) 忽略压裂段上下之间的液柱压差及液体的滤失。
- 6) 软硬煤层划分以后为相对均质的。
- 7) 压裂液在各个有效孔眼中的流量相同。

当硬、软煤层共存时,含有多层软硬层和只有两层软硬煤层的确定原理相同。在此,以两层进行论述。根据测井曲线,设煤厚度分别为 m_1 、 m_2 ,孔密为 16 孔/m。

则孔的数量为:

$$n = [16(m_1 + m_2)] \quad (1)$$

式中 n 表示射孔数,个;[]表示取整。

一般情况下,煤层中的天然裂隙几乎不可能是完全联通的,要使裂缝延伸比较远,施工压力必须达到无裂缝时,新裂缝形成的极限条件,施工压力达到 $p_E^{[9]}$,

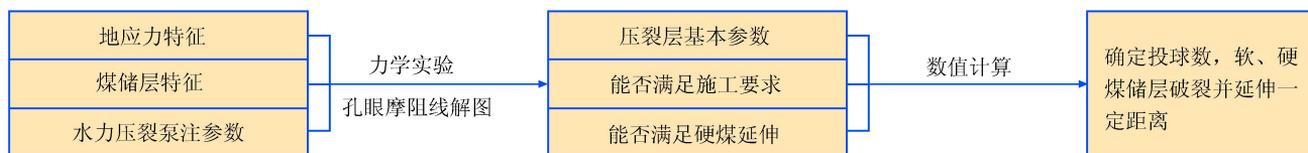


图 4 合层投球水力压裂投球数计算流程图

即

$$p_E = S_t + \alpha + \Delta p_{pf} + \Delta p_f - p_w + p_p \quad (2)$$

式中 p_E 为形成新裂缝的极限施工压力,MPa; S_t 为煤岩抗张强度,MPa; α 为最小主应力,MPa; Δp_{pf} 为射孔孔眼摩阻,MPa; Δp_f 为井筒摩阻(参考临近井),MPa; p_w 为井筒静液柱压力,MPa; p_p 为储层压力,MPa。

射孔孔眼摩阻一般采用下式^[10]求得:

$$\Delta p_{pf} = 2.25 \times 10^{-9} \frac{Q^2}{n d^4 c^2} \quad (3)$$

式中 Δp_{pf} 为孔眼摩阻,MPa; ρ 为压裂液密度,kg/m³; Q 为施工排量,m³/min; n 为射孔有效孔数; d 为射孔孔眼直径,m; c 为孔眼流量系数,取 0.80~0.85。

结合式(2)、式(3)可以求出此时有效孔数 n_1 为:

$$n_1 = 1.5 \times 10^{-3} \frac{Q}{d^2 c} \sqrt{\frac{\rho}{p - S_t - \alpha - \Delta p_f + p_w - p_p}} \quad (4)$$

为了确定投球数,假定堵上 n_0 个孔以后,全煤层均被压开,此时有效孔眼数 n^2 为:

$$n^2 = [16(m_1 + m_2)] - n_0 \quad (5)$$

根据式(3)得出此时总孔眼摩阻为 Δp_{pf1} ,结合式(2)、(3)、(5)求出此时在硬煤中形成新裂缝的临界施工压力 p_{E1} 为:

$$p_{E1} = S_t + \alpha + \Delta p_{pf1} + \Delta p_f - p_w + p_p \quad (6)$$

假设堵上 n_0 个孔以后,硬煤层刚好没有被压开,此时有效孔眼数 n^3 为:

$$n^3 = n - n_0 \quad (7)$$

根据式(3)得出此时总孔眼摩阻为 Δp_{pf2} ,结合式(2)、(3)、(7)求出此时施工压力 p_{E2} 为:

$$p_{E2} = \alpha + \Delta p_{pf2} + \Delta p_f - p_w + p_p \quad (8)$$

当施工压力 p_{E2} 大于或等于 p_{E1} 时,则在硬煤中可以形成新的裂缝;当两者相等时,则刚好可以形成新的裂缝。此时的投球数即为允许的最少投球数 n_0 ,即

$$\Delta S_t = \frac{2.25 Q^2}{1\,000 d^4 c^2} \left[\frac{1}{(n_1 - n_0)^2} - \frac{1}{(16[m_1 + m_2] - n_0)} \right] \quad (9)$$

式中 ΔS_t 为两层煤抗张强度的差值,MPa。

根据式(9)计算出此时的投球数 n_0 。

同时投球数不能过多,当投球数过多时,有效孔数减少,施工压力过大。为了确定最大封堵球数,则设堵上 n_1 孔以后,全层段均被压开,同时施工压力达到允许的极限压力,此时有效孔数为:

$$n^5 = [16(m_1 + m_2)] - n_1 \quad (10)$$

根据式(3)求出此时总孔眼摩阻 Δp_{pf3} ,结合式(2)、(3)、(10),得出此时施工压力 p_{E3} 为:

$$p_{E3} = S_t + \alpha + \Delta p_{pf3} + \Delta p_f - p_w + p_p \quad (11)$$

此时达到了极限施工压力,所以允许的最大投球数为 n_1 ,即

$$n_1 = 16[m_1 + m_2] - \frac{1.5 Q}{1\,000 d^2 c} \times \sqrt{\frac{\rho}{p_{\max} - S_t - \alpha - \Delta p_f + p_w - p_p}} \quad (12)$$

式中 p_{\max} 为井口最大允许施工压力,MPa。

最终得出投球数 N 为:

$$n_0 < N < n_1 \quad (13)$$

对于含有软煤层时,在 N 满足式(13)的同时,应尽量将软煤层完全封堵。

4 应用效果评价

4.1 煤储层及地质概况

笔者以淮北矿区芦岭矿某煤层气垂直井 8[#]+9[#] 煤层合层投球水力压裂来检验理论的适用性。

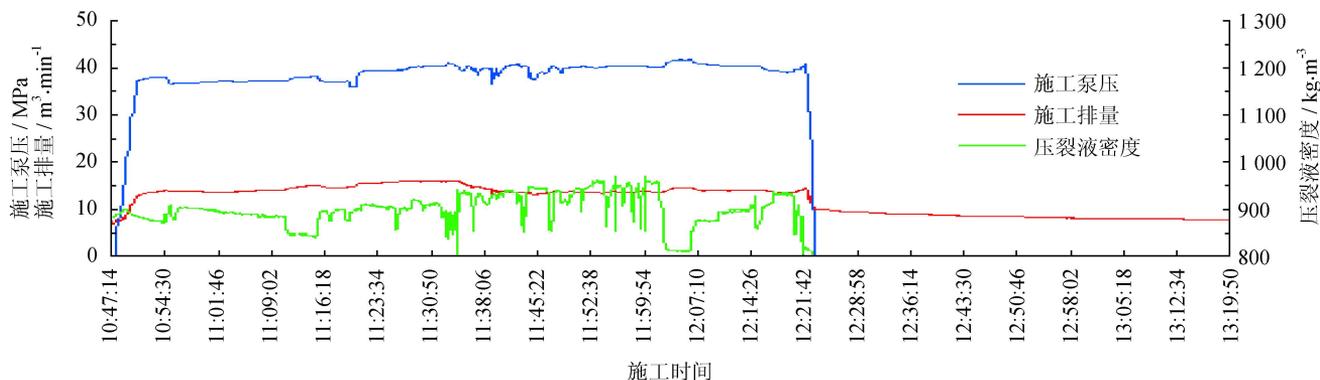
芦岭矿位于皖北宿州市东南约 20 km 处,本区煤储层及主力可采煤层有 8[#]、9[#] 和 10[#] 煤层。8[#] 和 9[#] 因距离较近可进行合层压裂。芦岭矿某煤层气垂直井 8[#] 和 9[#] 煤储层基本参数如表 1 所示。

4.2 现场应用效果评价

首先根据测井曲线得出 8[#]+9[#] 煤层软煤厚度为 3.5 m,硬煤厚度分别为 4 m 和 4.45 m;第一次压裂时施工压力为 14.2 MPa,结合该区地应力资料和表 1 数据,利用投球数计算模型,得出压裂时压裂液主要进入了软煤层以及抗张强度较小的煤层;为了把硬煤层压开,进行了理论计算,同时考虑施工极限压力 35 MPa,当施工压力达到极限压力时,投球数为 158 个,当刚好将硬煤层压开时,投球数为 45 个。根据软煤层厚度,

表 1 芦岭矿某煤层气垂直井 8[#]、9[#] 煤储层及第一次施工基本参数一览表

压裂层段	中部埋深/ m	含气量/ m ³ ·t ⁻¹	厚度/ m	射孔数/ 个	抗拉强度 (硬煤)/MPa	储层压力/ MPa	第一次施工 排量/m ³ ·min ⁻¹	第一次施工 压力/MPa	管柱摩阻/ MPa
8 [#]	735.9	8.15	10	159	0.8	6.72	7.4~7.5	12.9~14.2	1.5
9 [#]	744.6	9.02	2	32	0.6	7.03			

图 5 8[#]+9[#]合层压裂施工曲线图

当将软煤层全部封堵时,投球数为 56 个。所以,投球数介于 45~158 个之间,并且尽可能接近 56 个。实际中投球数为 53 个,现场合层施工压力曲线如图 5 所示。合层压裂后进行了试采气,排采半年多时间,该井产气量能维持在 800 m³/d 左右,在含气量不到 10 m³/t 的情况下能维持这样的产气量,在一定程度上说明了合层投球压裂具有一定的效果。

5 结论

通过合层投球水力压裂投球数研究,得出以下结论:

1) 合层煤层段煤岩力学性质的差异大小在一定程度上决定了合层水力压裂时有效孔眼数。在一定程度上,软煤层厚度越大,第一次压裂时有效孔眼数越多。

2) 投球数既受煤岩力学性质影响,同时又受现场施工极限压力的影响。在一定程度上,投球数越多,全目的层段压开的可能性越大,但同时又要考虑施工过程中的极限压力。芦岭矿合层投球压裂后的产气效果在一定程度上验证了这一压裂工艺的可行性。

3) 投球技术不是一剂“万灵丹”,同时受到现场条件的制约,与其他工艺技术相结合进行施工也许效果会更好。

参 考 文 献

- [1] 李勇明,翟锐,王文耀,等.堵塞球分层压裂的投球设计与应用[J].石油地质与工程,2009,23(3):125-127.
- [2] 王兴文,杨建英,任山,等.堵塞球选择性分层压裂排量控制技术[J].钻采工艺,2007,30(1):75-76.
- [3] WEBSTER K R, GOINS W C J, BERRY S C. A continuous multistage fracturing technique [J]. Journal of Petroleum Technology, 1965, 12(6):19-25.
- [4] STIPP L C, WILLIFORD R A. Pseudo-limited energy: a sand fracturing technique for simultaneous treatment of multiple pays [J]. Journal of Petroleum Technology, 1968, 15(5):57-62.
- [5] 冯明生,方宏长.限流压裂曲线分析及压开层位的判定计算[J].石油勘探与开发,1999,26(4):89-92.
- [6] 蒋延学,胥云,李治平,等.新型前置投球选择性分压方法及其应用[J].天然气工业,2009,29(9):88-90.
- [7] 倪小明,苏现波,李玉魁.多煤层合层压裂关键技术研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(5):728-732.
- [8] 肖晖,李洁,曾俊.投球压裂堵塞球运动方程研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(5):163-167.
- [9] 乌效鸣.煤层气井水力压裂计算原理及应用[M].武汉:中国地质大学出版社,1997:27-29.
- [10] 魏慧蕊,王荣.采油一厂红 15 区投球压裂井压开层位的判定[J].新疆石油科技,2011,21(2):11-16.

(修改回稿日期 2012-04-27 编辑 韩晓渝)