煤层气井水力压裂裂缝产状和形态研究

中国地质大学(武汉)　乌效鸣

提　要　对钻井水力压裂开采煤层气时,所形成的裂缝产状和形态进行了理论分析。提出了裂缝倾角、走向和形状的确定依据。

关键词　煤层气　水力压裂　产状和形态　地应力　抗张强度

1　引言

我国煤田分布广,利用钻井水力压裂技术开采煤层气可以获得丰富的工业和民用能源,同时也可以减少煤矿开挖时的瓦斯事故。在美国,现已形成具有商业规模的水力压裂开采煤层气工业,获得了显著的经济效益。近年来我国煤层气井压裂开采试验工作也取得重大进展。在"八五"国家重点科技攻关专题"煤层气井压裂技术方法研究"中,我们首先应用力学方法对煤层气井水力压裂的基本问题——由裂缝倾角和走向所决定的裂缝产状和反映裂缝边缘形状的裂缝形态——进行了分析研究,得出相应的计算和判别依据。这一成果不仅能用于指导煤层气井的压裂,而且对油气井和可溶性矿床的压裂开采也有现实意义。

在相对于钻井井眼近似为无限大的地层中,用封隔装置将注入压裂液的压力限制在一定深度层段压开煤层,可视为在该地层深度处的一个压力点源的挤张作用。根据地层性质的不同,这个作用将导致 3 种不同的基本结果:(1)对于硬脆、低塑性的地层,在注入压裂液量明显大于地层孔隙渗透速率的情况下,压开扁平状的裂缝;(2)对于孔隙度很大的高渗地层,在注入量有限的情况下,只能形成滤失;(3)对于松软、高塑性的地层,只能挤压出近似球状的泡穴。

一般煤系地层符合第一种情况,能够形成压裂缝。但也应对第二、三种情况发生的可能作出必要的分析判断,以避免在难以成缝或成缝效果很差的地层条件下进行压裂施工。本文讨论的问题以煤层条件符合第一种情况为前提。

2　裂缝产状、水平缝和垂直缝判据

裂缝产状由缝面倾角和走向两个要素确定。应用弹性力学方法分析计算,可以得到这两个参数。具体分析过程如下。

压裂使地层克服挤聚力而张裂,相对分离开的两个缝面移动方向必然与地层最弱(小)挤聚力方向相反,因此确定了地层最小挤聚力方向就能得到裂缝的倾角和走向。而地层中任意一点任意方向上的挤聚力由两部分组成:一是该方向的地应力;二是该方向岩石的内连结力,即岩石的抗张强度。

对于地应力,考察如图 1 所示的地层单元,其 6 个外表面共受 9 个应力分量作用:

$$\sigma_{ij}=\begin{bmatrix}\sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz}\\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz}\\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z\end{bmatrix} \tag{1}$$

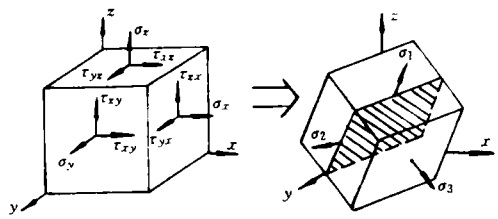

图 1　地层单元的主应力方向

注:若计算结果 σ_i 为负值,则表示应力方向指向内

根据这 9 个应力分量的数值,应用弹性力学主应力与应力主方向计算公式,解方程组:

$$\begin{cases}(\sigma_x-\sigma_n)n_1+\tau_{xy}n_2+\tau_{xz}n_3=0\\ \tau_{xy}n_1+(\sigma_y-\sigma_n)n_2+\tau_{yz}n_3=0\\ \tau_{xz}n_1+\tau_{yz}n_2+(\sigma_z-\sigma_n)n_3=0\\ n_1^2+n_2^2+n_3^2=1\end{cases} \tag{2}$$

可以确定唯一的 3 个相互垂直的空间方向,分别用式中 n_1、n_2、n_3 的 3 组解表示这 3 个方向的方向余弦。由这 3 个方向决定的单元体的 6 个表面上所受的剪应力均为零,只存在垂直于这 6 个表面的 3 对正应力(由式中 σ_n 解得)。其中 σ_3(最小)的方向就是地应力最弱小的方向。如果暂不考虑岩石自身的抗张强度,则裂缝就以缝面垂直于该方向而破裂。这样,裂缝的产状——缝面倾角和走向就同时得到了确定。换言之,裂缝扩展延伸的方位和斜裂缝的倾斜角度就得到确定。当然,坐标轴参照系应事先预定。

这一理论方法的实际应用,需获得压裂位置处地层的 9 个应力分量值。可以通过钻探和物探方法测取,

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

但测试工作复杂。为了不失一般情况下的应用，当地质构造比较简单，没有明显的扭转和剪切运动时，可以认为垂直正立的单元体6个表面上无剪应力，即3个主应力中有2个是水平的，1个是垂直的。根据前述原理，这时的最小主应力不是水平的就是垂直的，因而相应的裂缝或是垂直裂缝或是水平裂缝。也可以认为这两种情形分别是斜裂缝当裂缝倾角为90°或0°时的特例。

进一步考虑岩石自身抗张强度的影响。当垂直地应力 σ_z 为最小主应力且垂直抗张强度 σ_t^V 较小时，压裂产生水平裂缝；而当水平地应力 σ_H 为最小主应力且水平抗张强度 σ_t^H 较小时，压裂产生垂直裂缝。若某一方向虽然主应力最小但抗张强度较大时，则要根据主应力与抗张强度的和值是否为最小来进行判定。

地层中一点处的垂直地应力 σ_z 由上覆岩层垂直地应力 $\int_0^z \gamma(z)\mathrm{d}z$ 和垂直构造应力 Z 相加构成：

$$\sigma_z = \int_0^z \gamma(z)\mathrm{d}z + Z \tag{3}$$

式中：z ——地层深度；$\gamma(z)$——上覆岩层重度。

而该点处的水平地应力 σ_{Hx}〔σ_{Hy}则由上覆垂直地应力 σ_z 引起的侧压力 $\frac{\mu}{1-\mu}\int_0^z \gamma(z)\mathrm{d}z$ 由广义虎克定律导出〕与水平构造应力 X（或 Y）相加构成：

$$\sigma_{Hx} = \frac{\mu}{1-\mu}\int_0^z \gamma(z)\mathrm{d}z + X \tag{4}$$

$$\sigma_{Hy} = \frac{\mu}{1-\mu}\int_0^z \gamma(z)\mathrm{d}z + Y \tag{5}$$

式中：μ ——岩石的泊松比。

当地层平缓，无明显构造运动时，$Z=0$，$X=Y=0$；当上覆地层重度 $\gamma(z)$ 随深度 z 的变化不大时，可视 $\gamma(z)$ 为常数 γ。将这些条件代入上述的(3)、(4)、(5)式中，并进行积分可得：

$$\sigma_z = z\gamma \tag{6}$$

$$\sigma_H = \sigma_{Hx} = \sigma_{Hy} = [\mu/(1-\mu)]z\gamma \tag{7}$$

进一步，将垂直地应力 σ_z 与岩石垂直抗张强度 σ_t^V 相加，水平地应力 σ_H 与岩石水平抗张强度 σ_t^H 相加，分别构成垂直挤聚力 p_Z 和水平挤聚力 p_H：

$$p_Z = \sigma_z + \sigma_t^V = z\gamma + \sigma_t^V \tag{8}$$

$$p_H = \sigma_H + \sigma_t^H = [z/(1-\mu)]\gamma\mu + \sigma_t^H \tag{9}$$

压裂产生水平缝还是垂直缝的判据，就是比较 p_Z 和 p_H 何者为小。p_H 小时产生垂直缝，p_Z 小时产生水平缝。由于岩土泊松比 μ 的变化范围为0～0.5，即 $\mu/(1-\mu)$ 的变化范围为0～1，所以根据式(8)、(9)，水平挤聚力 p_H 随地层深度 z 的增长率总是低于垂直挤聚力 p_Z 的（见图2）。因此，地层越深越容易产生垂直裂缝。由(8)、(9)两式可得由水平缝转变为垂直缝的临界深度 z_c 的判别式：

$$z_c = (1-\mu)(\sigma_t^H - \sigma_t^V)/[(1-2\mu)\gamma] \tag{10}$$

由(10)式可得下面结果：

(1)当 $\sigma_t^H \leqslant \sigma_t^V$ 时，$z_c \leqslant 0$，裂缝总是垂直缝；

(2)当 $\sigma_t^H > \sigma_t^V$ 时（沉积岩一般有这种性质），存在某临界转变深度 $z_c > 0$；

(3)根据压裂试验区山西柳林煤岩性质的测试结果（$\mu=0.32$，$\gamma=2.0$，$\sigma_t^V \approx 0$，$\sigma_t^H = 1.5 \sim 2.5$MPa），计算得到 $z_c = 142 \sim 236$m；

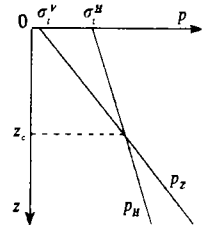

图2 水平缝与垂直缝的临界转变点

(4)与常规石油岩性比较，煤岩的抗张强度低得多，因此煤层压裂临界转变深度更浅，更易于产生垂直缝。

3 煤层裂缝的形态

裂缝的形态是指压裂作用下所产生裂缝的空间轮廓形状。裂缝形态客观地由地应力和岩石性质所决定，压裂作业参数可以在一定程度上改变裂缝形态。由以下定性分析可以得出5种有代表性的煤层裂缝形态，其中除第四种为临界深度 z_c 以浅的水平缝，其余均为深于 z_c 的垂直缝。

(1)当上下围岩的破裂强度明显大于煤层，并且煤层与上下围岩交界处连续性强，无明显水平分层界面时，裂缝不能突破上下围岩而只能在煤层中扩展，并且在交界处不能发生两缝面的相对分离滑移，因此裂缝高度恒定，即为煤层厚度，裂缝横截面呈椭圆形（图3a），称之为恒高椭圆截面缝。

(2)上下围岩的破裂强度也明显大于煤层，但与煤层交界处连续性弱，水平分层界面明显，裂缝虽不能突破上下围岩，但在交界处两缝面产生相对分离滑移，裂缝横截面呈矩形（图3b），称之为恒高矩形截面缝。

(3)当煤层厚度很大，超过压裂缝可延伸距离，或者上下围岩与煤层的破裂强度很接近时，裂缝沿各径向放射状扩展的程度比较均一，因此形成全方位圆盘状裂缝，在临界深度 z_c 以深处，该盘形裂缝直立，称之为径向扩展垂直缝（图3c）。

(4)与径向扩展垂直缝相应，当处于临界深度 z_c 以浅处时，盘形裂缝平躺，形成径向扩展水平缝。

(5)当上下围岩与煤层破裂强度的差值介于上述恒高缝和径向扩展缝之间时，裂缝高度在上下围岩中有所扩展，裂缝横截面呈如图3d所示形状，在煤层中

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

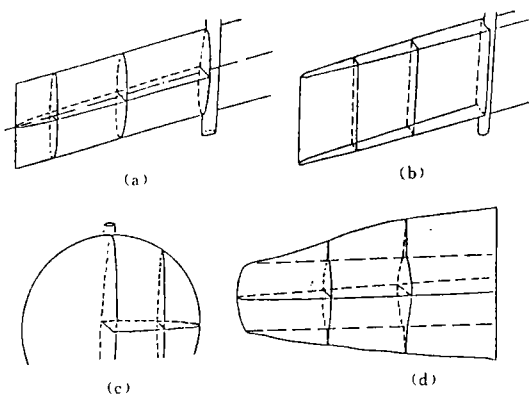

图 3　煤层裂缝形态

(a)恒高椭圆截面缝；(b)恒高矩形截面缝；
(c)径向扩展垂直缝；(d)变高型裂缝

缝宽较大，而在上下围岩中呈较窄的劈尖形，称这种裂缝为变高型裂缝。

以上 5 种裂缝形态较为典型常见。另外还有一些特殊和复杂的裂缝形态，如：软硬变层频繁地层易产生边际形态凹凸不平的裂缝，尤其当上下围岩破裂强度低于煤层时，易产生煤层扩展少、上下围岩扩展多的马蹄形裂缝；水平挤聚力 p_H 和垂直挤聚力 p_z 相对大小发生变化的地层易产生“T”形裂缝（复合裂缝）；最小水平主应力方位逐渐变化时易产生弯曲裂缝，等等。在这些特殊条件下，也应对产生这些复杂裂缝的可能性作出判断。

Study on Occurrences and Shapes of Hydraulic Fractures Formed in CBM Wells

Wu Xiaoming

China University of Geosciences, Wuhan

Abstract　Occurrences and forms of hydraulic fractures in drilling wells are analyzed for extraction of coalbed methane(CBM). The determination basis of dips, strikes and shapes of the fractures are presented.

Key words　coalbed methane, hydraulic fracture, occurrences and shapes, in-situ stress, tensile strength

为改变水泥浆某些性质的添加物

添加物名称		膨润土	珍珠岩	硅藻土	火山灰	砂	重晶石	赤铁矿	氯化钙	氯化钠	木质素磺酸盐	羧甲基纤维素	柴油	降失水剂	堵漏材料
密度	降低	○	○	○	○										
	增加					○	○	○	△	△	△				
需水量	少些										○				
	多些	○	△	○	△	△	△	△							△
粘度	降低								△		○				
	增加	△	△	△	△	△	△	△							
初凝时间	加速	△					△	△	○	○					
	减速			△							○	○	△	△	
凝固时间	加速						△	△	○	○					
	减速	△	△	△	△						○	○		△	
初凝强度	降低	△	△	△	△		△	△			○	○		△	△
	增加								○	○					
终凝强度	降低	△	△	○	△		△							△	△
	增加														
流动性	降低	△	△	△									△		△
	增加				○										
失水	降低	○									△	○	△	○	△
	增加		△	△											

○表示作用显著；△表示作用较次

据法国石油研究所

《工程勘察》1996 年征订启事

《工程勘察》杂志由中国建筑学会工程勘察学术委员会和建设部综合勘察研究设计院主办。主要介绍岩土工程、工程地质、环境地质、地下水资源勘察与评价、水文地质、工程测量、工程物探、工程钻探等方面的科研成果、测试方法、工程实例、实践经验与总结，着重推广新技术和新方法。

《工程勘察》杂志办刊重点是理论联系实际，侧重于工程实践。它是一本在工程勘察界具有一定影响的刊物，可供从事勘察、测量、设计、施工的人员以及有关科研人员、院校师生和管理人员参考。

《工程勘察》杂志为双月刊，80 页码，12 万字，每期定价 3.50 元，全年 21.00 元。国内外公开发行，在全国各地邮局（所）均可订阅，刊号 CN11－2025/TU，ISSN1000－1433，邮发代号 2－832。国外发行：中国出版对外贸易总公司（北京 782 信箱）。广告许可证：京东字 0388 号。

地址：北京市东直门内大街 177 号　　邮编：100007

电话：(010)4013366－256 或 257

欢迎订阅，欢迎投稿，欢迎刊登广告。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net