

# 基于微震监测的定向长钻孔水力裂缝三维延展规律研究

王 滨

中煤科工开采研究院有限公司 北京 100013; 天地科技股份有限公司 北京 100013; 中煤科工(西安)开采工程技术有限公司 西安 710018

**摘 要:** 为探明坚硬顶板内定向长钻孔水力裂缝延展规律,建立了三维裂缝延展模型,分析了裂缝延展半径,并通过在水平定向长钻孔周围安装微震监测探头,收集压裂期间有效微震事件发生时间,确定微震震源三维坐标,以分析水力裂缝在坚硬砂岩顶板内的延展范围、形态及延展速度。根据某矿2305工作面坚硬顶板1#、2#定向长钻孔压裂期间微震监测分析,可知水力裂缝在空间成发散状延展延伸,裂缝在垂直方向上的延展范围大于水平方向,裂缝延展速度随压裂时长减小。研究结论可为煤矿坚硬顶板区域压裂施工提供参考。

**关键词:** 定向长钻孔; 水力压裂; 水力裂缝; 微震监测

引言:我国煤层总量的30%为坚硬顶板煤层,坚硬顶板垮落滞后会引发多种围岩控制难题<sup>[1-2]</sup>。定向长钻孔区域压裂技术具备大功率、大流量、裂缝延展范围广、延伸速度快等特点,可解决坚硬顶板带来的冲击地压、动压巷道大面积变形、端头三角区悬顶等多种难题。

在进行坚硬顶板定向水平钻孔压裂时,需考虑水力裂缝在顶板内的延展形态、方向、范围等三维延展规律,为钻孔布置、压裂间隔、压裂时间等关键参数提供设计依据,是达到预期压裂效果的保障。陈治喜等<sup>[3]</sup>通过层状介质中水力裂缝垂向延展的数值模拟,分析了地应力、断裂韧性等对裂缝高度的影响,指出地层断裂韧性对裂缝高度有明显的止裂作用,冯彦军等<sup>[4]</sup>采用最大拉应力准则分析了裂纹起裂压力及起裂方向,利用有限元软件模拟出了裂纹延展过程。赵凯凯等<sup>[5-6]</sup>根据周向拉应力准则,分析了定向压裂裂纹起裂角和临界起裂水压与预制裂纹倾角、水压、主应力差等的关系,并采用数值模拟软件XSite,研究了钻孔方位和地应力对裂纹三维延展形态的影响,分析了钻孔起裂和预制裂纹起裂条件下裂纹延展形态的异同。侯振坤等<sup>[7]</sup>开展了一系列页岩水力压裂物理模拟试验,分析了地应力、起裂方式、岩性、流量等对裂纹的延伸与空间展布规律的影响,探究了网状裂纹的形成机理。张广清等采用断裂力学分析、数值模拟计算等方法,考虑地应力、方位角等的影响,研究了钻孔附近水力裂纹空间转向规律。徐成等对切槽定向压裂试验中流量对裂纹偏转距的影响规律开展了研究。吴拥政通过预制

切槽,在砂岩内开展定向压裂试验,探究了应力差和层理对起裂压力和裂纹延展形态的影响。赵海峰等依据岩石断裂力学分析了水力裂缝与地层界面相交时水力裂缝沿裂缝高度可能发生的止裂、转向和穿过界面的3种延展行为。王素玲等基于延展有限元中的分离裂缝模型研究了裂缝在砂-泥岩界面上的延展过程,指出裂缝延展形态主要受界面层力学性质的影响。陈海潮等以四川盆地某页岩气井综合微地震监测实验为例,从监测台阵、微地震参数获取和资料解释三方面,总结了微地震监测技术的研究现状和发展趋势。

以上研究通过理论分析、物理模拟试验等手段对水力裂缝延展进行预测。微地震监测也可用于水力裂缝监测,该技术在油气开采中用于评估压裂效果、优化压裂施工、减轻地质灾害和降低勘探开发成本和风险的综合技术,是储层压裂中最精确、最及时、信息最丰富的监测手段,但该技术煤矿井下应用较少。因此,本文介绍了微震监测技术在煤矿井下定向水平长钻孔压裂水力裂缝延展规律分析中的监测应用方法,并现场进行定向水平长钻孔区域压裂试验,通过微震监测震源定位分析,主要研究煤矿井下定向水平钻孔水力裂缝的三维形态、裂缝延展范围及延展速度。

## 1、定向水平孔水力裂缝模型

煤矿井下定向长钻孔区域压裂卸压技术预先在目标岩层内施工水平定向钻孔,再采用大功率压裂泵组向孔内泵入大流量压裂液进行后退式逐段压裂。该技术采用千米定向钻机进行超长钻孔钻进,可实现高、中、低层位1000m钻进。

采用高精度定向钻进管理测量系统，在稳定岩层中偏差控制在 ±1m 以内。采用大流量煤矿压裂泵组向定向长钻孔内注入高压水，泵组施工排量可达 0.3 ~ 1.0m<sup>3</sup>/min，最大工作压力达 60MPa。

不同于倾斜钻孔，定向水平长钻孔压裂裂缝延展模型可简化为如图 1 所示。图中轴方向为裂缝半径，轴方向为裂缝缝宽。

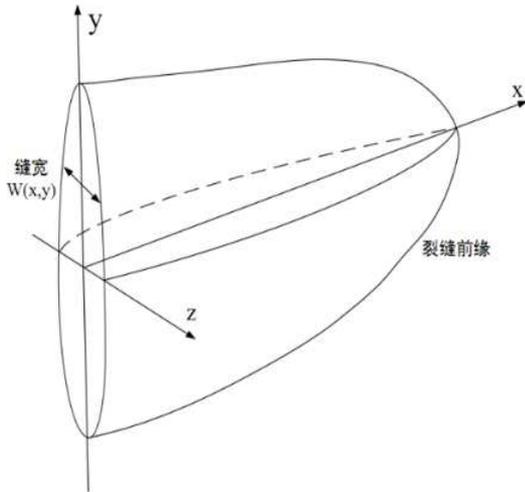


图 1 三维裂缝模型

裂缝朝向取决于应力方向，压裂半径及裂缝宽度取决于注水流量、压裂时长、压裂孔径、岩层厚度及孔隙率，则压裂时间与压裂半径可用如下公式表示：

$$Lt = \pi(R - r)^2 W \phi \quad (\text{式 1})$$

式中，L 为压裂泵流量，R 为压裂半径，m；r 为孔眼半径，m；W 为裂缝宽度，m；φ 为孔隙度，%。结合实践及所用设备参数，预估定向长钻孔压裂裂缝延展半径一般为 20 ~ 50m。

## 2、井下水力裂缝微震监测技术

微地震监测技术是基于声发射学和地震学的地球物理技术，可通过观测、分析生产活动中产生的微小地震事件，来监测其对生产活动的影响、效果及地下状态。

在煤矿进行水力压裂时，岩层破裂会向周围传播一种微弱的地震波。通过在破裂区周围的空间内布置检波器，采集水力裂缝产生的波形信号和到时数据，由于震源与传感器之间的距离不同（如图 2），因此微震传感器接收震动波到时的不相同，根据各微震传感器不同的到时差，便可确定破裂发生的位置，并在三维空间上显示出来。

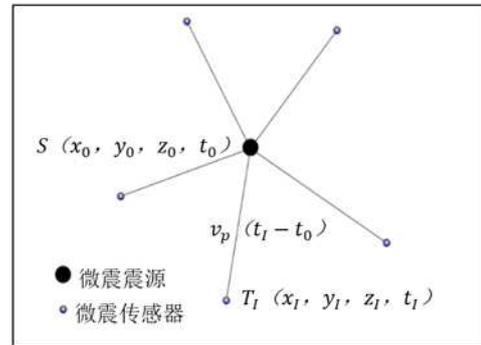


图 2 微震震源定位原理

在水力裂缝延展监测工程中，假设震动波以定值波速在均质、各向同性的煤岩体中传播，基于到时不同理论，则震源定位方程可用如下公式：

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} = V_p(t_i - t_0) \quad (\text{式 2})$$

式中：x<sub>0</sub>、y<sub>0</sub>、z<sub>0</sub>、t<sub>0</sub> 分别是微震震源坐标及时间参数，x<sub>i</sub>、y<sub>i</sub>、z<sub>i</sub>、t<sub>i</sub> 是第 i 传感器的空间坐标和 p 波初至到时。公式中存在 4 个未知参数，因此当具备 4 个有效传感器，就能实现震源的精确定位。若有效微震传感器个数大于 4 个，便可对震源参数进行优化。

## 3、微震监测现场试验

### 3.1 现场压裂方案

某矿延展工作面砂岩顶板因其岩石强度高、厚度大、整体性强等特点，预计工作面在回采过程中有强烈的周期性来压，强矿压将导致临空侧巷道超前支护段严重变形，影响工作面正常推进，因此采用定向水平长钻孔区域压裂对坚硬顶板进行弱化。

2305 辅助运输巷邻近上一工作面采空区，因此在 2305 辅助运输巷内布置钻场，钻场位置为 900m 里程处，向该工作面靠近辅运侧上覆坚硬岩层中施工了 2 个定向长钻孔进行区域压裂，为探明裂缝延展规律，对两个定向长钻孔进行了微震监测。其中，1# 钻孔主孔位置在水平方向距离 2305 辅助运输巷 20 米，在垂直方向上距离 2305 辅助运输巷顶板 23 米。2# 钻孔主孔位置在水平方向距离 2305 辅助运输巷 51 米，在垂直方向上距离 2305 辅助运输巷顶板 23 米。

### 3.2 微震监测方案

在 2305 辅助运输巷内定向水平压裂孔周围施工 8 个微震监测钻孔，钻孔孔径均为 73mm。

向 8 个监测孔中分别推送检波器至孔底。在进行压裂作

业时,将检波器外接至 YWZ8 型煤矿用微震监测仪(如图3),对水力裂缝产生的波形信号和到时数据进行高速采集。



图3 YWZ8 型微震监测仪及检波器

#### 4、监测结果分析

采用大流量煤矿井下压裂泵组依次对 1#、2# 定向长钻孔进行压裂,从孔底开始每 21m 压裂一段。其中 1# 水平定向孔在压裂第 11 ~ 19 段时开机进行微震监测,2# 水平定向孔在压裂第 12 ~ 18 段时进行开机监测。

##### 4.1 水力裂缝形态及范围

1# 水平定向钻孔在压裂第 11-19 段期间,共接收到 39 次有效微震信号。基于震源计算公式,计算出 1# 监测孔水力裂缝延展过程中的微震震源坐标。可知裂缝在空间内呈发散状延伸,裂缝在水平方向上最远延展距离发生在第 16 压裂段,为 30.94 米,在垂直方向上最远延展距离发生在第 19 压裂段,为 38.7 米。2# 水平定向钻孔在压裂第 12 ~ 18 段时共接收到 60 个有效微震信号。基于震源计算公式可得 2# 监测孔水力裂缝延展过程中的微震震源坐标。可知裂缝整体延展成网状,裂缝在水平方向上最远延展距离发生在第 17 压裂段,为 23.66 米,在垂直方向上最远延展距离发生在第 16 压裂段,为 46.5 米。

综上,裂缝在空间内成发散状延展延伸,且裂缝在垂直方向上的延展距离大于水平方向,为裂缝主要延展方向,根据地应力测试结果,该工作面辅助运输巷受上部煤层回采影响,原岩应力场为  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$  型应力场,故裂缝主要延展方向朝最大应力方向,最远可达 46.5m。同时在水平方向上也有所延展,最远可达 30.94m。

##### 4.2 裂缝延展速度

已知水力裂缝起裂并延展至震源位置所需时间,以及压裂段位置与震源位置距离,便可得到裂缝延展速度。通过

收集接收微震信号较多的 1# 钻孔第 11 压裂段、第 16 压裂段、第 17 压裂段的信号接收时间、震源位置信息,总结裂缝延展速度规律。

第 11 段压裂位置坐标 (X, Y, Z) = 4358.6725, 1838.4966, 893.7532。压裂开始时间为 10:50。共接收有效微震信号 9 次。平均 3.03m/min。

#### 5、结论

(1) 根据震源定位可知,水平定向钻孔区域水力压裂技术,采用大功率大流量压裂泵组进行压裂,可在坚硬岩层内形成发散状复杂水力裂缝缝网。

(2) 在原岩应力场为  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$  型应力场条件下,裂缝主要延展方向朝垂直应力方向,最远可达 46.5m。同时在水平方向上也有所延展,最远可达 30.94m。

(3) 裂缝延展速度最大可达 6m/min,最慢是为 0.4m/min,且压裂初期裂缝延展速度较快,随压裂时间延长,裂缝延展速度逐渐降低。

#### 参考文献:

- [1] 靳钟铭,等. 煤矿坚硬顶板控制[M]. 北京:煤炭工业出版社,1994.
- [2] 康红普,冯彦军. 煤矿井下水力压裂技术及在围岩控制中的应用[J]. 煤炭科学技术,2017,45(1):1-9.
- [3] 陈治喜,陈勉,黄荣樽,等. 层状介质中水力裂缝的垂向延展[J]. 石油大学学报:自然科学版,1997,21(4):23-26.
- [4] 冯彦军,康红普. 水力压裂起裂与延展分析[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(S2):3169-3179.
- [5] 赵凯凯,姜鹏飞,冯彦军,等. 基于最大周向拉应力准则的水力裂纹起裂特征研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2021,3(2):14-22.
- [6] 赵凯凯,张镇,李文洲,等. 基于 XSite 的钻孔起裂水力裂缝三维延展研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(8):1483-1491.
- [7] 侯振坤,杨春和,王磊,等. 大尺寸真三轴页岩水平井水力压裂物理模拟试验与裂缝延伸规律分析[J]. 岩土力学,2016,37(2):407-414.

#### 作者简介:

王滨(1987.6-),男,汉族,籍贯山东东平,研究生,高级工程师,研究方向:煤层顶板岩层压裂的工程及科研工作。