基于径向导向槽工艺的定向气体压裂试验与数值模拟研究*

谭涛[1],陈天宇[1],金长宇[1],赵福权[2]

(1.东北大学 深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
2.中基发展建设工程有限责任公司, 北京 101300)

摘要:岩体弱化技术中,气体压裂相较于水力压裂更易形成复杂的裂缝网络,为了研究定向压裂技术领域中的气体压裂裂缝扩展机理,开展了基于径向导向槽工艺的定向气体压裂室内物理试验与数值模拟研究。提出了径向导向槽制备方法,模拟封隔器的原理设计了特制密封夹具,并借助声发射装置对气压致裂过程进行了实时监测。试验结果表明:径向导向槽在一定尺度内能显著改变气体压裂裂缝的扩展方向,且对比无径向导向槽试件降低了约30%的起裂压力;气体压裂动态加载方式下出现特有的主裂缝+次生微裂缝的裂缝网络,且裂缝宽度相对准静态加载方式增加了2~3倍。在此基础上,基于LS-DYNA进行了有无导向槽的瞬态气体压裂动力学数值模拟,对比分析了有无径向导向槽模型的有效塑性应变、范式等效应力等指标,模拟结果与室内试验结果一致。研究结果可推动深部硬岩定向压裂技术与岩体弱化方法的发展,为定向气体压裂技术的工程应用提供技术支撑。

关键词:定向气体压裂;径向导向槽;裂缝扩展;数值模拟

中图分类号:TD327 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)02-0021-10

Experimental and Numerical Simulation Study on Directional Gas Fracturing Based on Radial Guide Groove Technology

TAN Tao[1], *CHEN Tianyu*[1], *JIN Changyu*[1], *ZHAO Fuquan*[2]

(1.State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment,
Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;
2.China Solibase Engineering Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: Among the rock mass weakening technology, gas fracturing is more likely to form complex fracture networks compared with hydraulic fracturing. In order to study the fracture propagation mechanism of gas fracturing in the field of directional fracturing technology, laboratory physical experiments and numerical simulation studies on directional gas fracturing based on the radial guide groove technology were carried out. A preparation method of radial guide groove was proposed, a special sealing fixture was designed to simulate the principle of packer, and the acoustic emission device was used to monitor the gas fracturing process in real time. The experimental results show that the radial guide groove can obviously change the propagation direction of gas fracturing fractures within a certain scale, and the fracture initiation pressure is reduced by about 30% compared with that without guide groove. Under the dynamic loading method of gas fracturing, a unique fracture network of primary fracture and secondary micro-fracture appears, and the fracture width increases by 2-3 times compared with the quasi-static loading method. On this basis, LS-DYNA was used to simulate the dynamic dynamics of transient gas fracturing with or without guide groove. Indicators such as effective plastic strain and von mises stress of the models with and without radial guide grooves were compared and analyzed, and the simulation results are consistent with the laboratory experimental results. The research results can promote the development of directional fracturing technology and rock mass weakening methods for deep hard rocks, and provide technical support for the engineering application of directional gas fracturing technology.

Key words: Directional gas fracturing, Radial guide groove, Fracture propagation, Numerical simulation

---

* **收稿日期**:2025-03-13
基金项目:辽宁省科学技术计划项目(2023JH1/10400004)
作者简介:谭涛(2000—),男,湖南益阳人,硕士研究生,主要从事气体压裂控制方法研究。E-mail:tantneu@163.com
通信作者:金长宇(1979—),男,辽宁鞍山人,博士,教授,主要从事岩石力学与数值模拟方法研究。E-mail:jinchangyu@mail.neu.edu.cn

0 引言

随着地球浅部常规资源日渐枯竭,深部资源开采已经成为能源领域的当务之急。深部硬岩的储层基质往往存在着强度高、硬度大、完整性高、孔隙发育不完全等特点,从而导致开采难度加大,此时通常应用岩体弱化方法改造地质条件,其中压裂技术作为人工改造地质体的核心技术手段,目前已广泛应用于各类特殊工程环境[1-2],包括改变局部地应力场、改造地质体以及形成人工裂缝网络等。

压裂作业的主要方法有水力压裂与气体压裂,水力压裂技术发展历史悠久,其裂缝扩展模式一般是沿最大主应力方向延伸形成单一的主裂缝[3],经过多年的研究与发展,已经有成熟的作业方法与施工体系。但水力压裂在某些工程条件下也存在着弊端,例如压裂液会污染环境、水的压缩比小、耗费大量水资源等。气体压裂方法包括炸药爆生高能气体的瞬态压裂与高压气体或流体的干法压裂[4-5],具有高压缩比、高动能、能源清洁的特点,在保留高压优势的同时解决了开采现场炸药危险性高、审批手续繁琐的问题。气体更大的压缩比会在压裂过程中产生更大的动能,产生更多的裂缝,提高破岩的效率。众多学者开展了气体压裂试验研究[6-9],结果表明,气体压裂形成的裂缝形态是呈簇状分布的复杂裂缝网络,对岩体的弱化效果比水力压裂更明显。结合其环保且高效的优势,气体压裂已经成为压裂方法的新选择。但在实际工程环境中,压裂作业中裂缝的扩展往往受其他条件如地应力环境、岩层天然节理与裂隙的影响,导致裂缝无法朝实际工程需要的方向扩展。为此,有学者提出了定向水力压裂方法,随后二十多年里,众多学者在理论分析、室内试验与现场试验的基础上进行了机理研究并逐步完善定向水力压裂技术[10-14],通过室内试验与现场工程试验均验证了导向槽引导的定向水力压裂作业的应用效果。目前,定向水力压裂施工方法已较为成熟,被广泛应用于坚硬顶板控制、坚硬矿体开采、卸压等特殊工程环境。该技术能在一定空间尺度内改变水力裂缝延伸走向,但仍然受制于水力裂缝的单一性,若应用在崩落法等情况下会导致大块顶板或岩体垮塌崩落,对现场施工作业的安全性产生一定威胁。

结合深部硬岩开采的岩体特性,本文研究含径向导向槽的定向气体压裂技术的裂缝形态与扩展模式,旨在提升压裂作业中裂缝走向控制及裂缝网络形成效果,减少安全生产事故,提高矿山生产的安全水平和经济效益。本研究可以进一步推动深部硬岩弱化方法研究,为未来矿山开采领域"向深部进军"提供技术支撑。

1 径向导向槽导向机理

根据传统岩石破裂准则,水力或流体压裂的裂缝通常沿最大主应力方向延伸,这导致裂缝的扩展方向将依赖钻孔周围地应力场。而定向压裂技术中预制的导向槽会在钻孔处形成结构弱面,同时使钻孔及裂缝周围区域内的孔隙压力重新分布,对后压裂钻孔的裂缝扩展形成诱导应力,导致这些裂缝的扩展与延伸方向发生改变,使裂缝向目标岩层扩展,导向槽导向机理如图 1 所示。

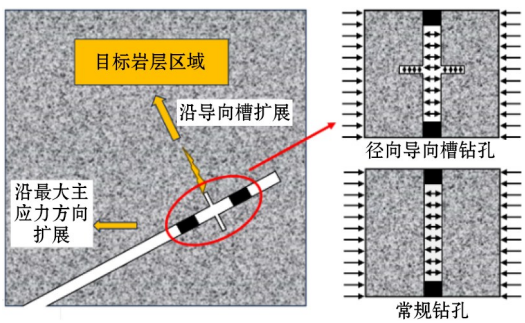


图 1 导向槽导向机理

Fig.1 Guiding mechanism of guide groove

径向导向槽与钻孔模型可以简化为二维平面问题,建立如图 2 所示的几何模型:平板中央一直线状裂纹(可看作短半轴→0 的椭圆的极限情形)长为 $2a$,作用于裂纹面上的张力为 $-P$(本文中认为张拉方向为负,压缩方向为正)。

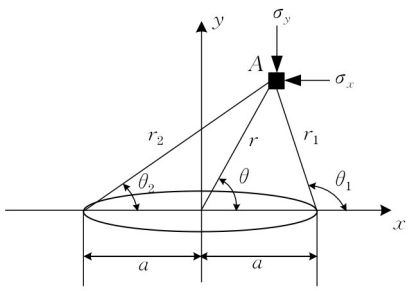


图 2 径向导向槽二维几何模型

Fig.2 2D geometric model of radial guide groove

二维裂缝的诱导应力如下[15]:

$$\sigma_x=-P\frac{r}{a}\left(\frac{a^2}{r_1r_2}\right)^{\frac{3}{2}}\sin\theta\sin\frac{3}{2}(\theta_1+\theta_2)+$$

$$P\left[\frac{r}{(r_1r_2)^{\frac{1}{2}}}\cos\left(\theta-\frac{1}{2}\theta_1-\frac{1}{2}\theta_2\right)-1\right] \quad (1)$$

$$\sigma_y=P\frac{r}{a}\left(\frac{a^2}{r_1r_2}\right)^{\frac{3}{2}}\sin\theta\sin\frac{3}{2}(\theta_1+\theta_2)+$$

$$P\left[\frac{r}{(r_1r_2)^{\frac{1}{2}}}\cos\left(\theta-\frac{1}{2}\theta_1-\frac{1}{2}\theta_2\right)-1\right] \quad (2)$$

$$\sigma_z=\mu(\sigma_x+\sigma_y) \quad (3)$$

$$\tau_{xy}=P\frac{r}{a}\left(\frac{a^2}{r_1r_2}\right)^{\frac{3}{2}}\sin\theta\cos\frac{3}{2}(\theta_1+\theta_2) \quad (4)$$

式中:σ_x、σ_y、σ_z 分别为 x、y、z 方向上的诱导应力,MPa;τ_{xy} 为 xy 平面上的诱导剪切应力,MPa;μ 为泊松比;r、r_1、r_2 为裂缝面上任意一点与钻孔的距离,m;θ、θ_1、θ_2 为裂缝方位角,(°);a 为裂缝半长,m。

由公式(1)至公式(4)可知:初始裂缝在原始地应力场上附加了诱导应力,其大小随着距裂缝面距离的增大而迅速降低,到达一定距离后,地应力场仍为初始状态,因此改变了诱导应力范围内的局部地应力场;裂缝在垂直于缝面方向产生的诱导应力最大,在裂缝延伸方向上产生的诱导应力最小,在诱导应力影响范围内裂缝尖端发生张拉破坏,裂缝沿导向槽继续扩展。

2 预制径向导向槽的气体压裂室内物理试验

为了验证本文提出的基于径向导向槽工艺的定向气体压裂方法的可行性,利用物理仿真试验开展了力学研究。

2.1 模型制备与装配

试验采用水泥、细砂、石灰、水为原料制备含径向导向槽的相似材料模型,模型为 200 mm×200 mm×200 mm 的立方体,中心位置有上下贯通的直径为 22 mm 的钻孔。在预制钻孔径向裂缝的方法上,DENG 等[16]将镂空金属件预置在试件内部,李立[17]采用水流割缝设备进行径向割缝。本研究在模型制备过程中增设预置模具,浇筑前使用塑料膜将粗盐颗粒加少许水晾干包裹制成厚度约为 4 mm 的圆盘形薄板,并使用 3D 打印的模具固定于模型中部位置。模型养护完成后,通过钻孔水洗冲孔掏槽的方式预置径向圆槽形导向槽,成功制备了厚度约为 4 mm 的径向导向槽。该方法既降低了对割缝设备的依赖,又避免了镂空金属件方式下气压只能作用在裂缝尖端的问题。最终从钻孔处观测得到的掏槽后的导向槽形态如图 3 所示。



图 3 掏槽后的导向槽形态

Fig.3 Shape of guide groove after hollowing out

封孔方式上,传统水力压裂的封孔一般采用底部开口的注水管,并采用插管后封胶的方式密封。但气体压裂产生的裂缝形态包含许多微裂缝,且由于气体相较于水有更高的压缩比与流动性,若采用底部开口的注气方式,高动能的气体将直接作用在注气口底部的钻孔处,结合试件内部在钻孔或压裂过程中原本产生的细小裂缝,极易发生脱胶、注气钢管崩出的现象。气压致裂试验的增压过程中气体压力往往达到几十兆帕以上,此时注气钢管崩出会产生相当大的速度,有较高的危险性。因此本研究根据实际工程中封隔器的原理,按模型尺寸设计并制作了配套夹具,如图 4 所示,图中特制钢管壁上设置有均匀分布的圆形孔隙,使得注气过程中气体能均匀输出作用在钻孔孔壁。装配过程中将特质钢管放入试件上下贯通的钻孔内,该钢管与两片钢片夹板通过螺纹与螺帽连接,钢片夹板分别与相似材料试件的顶端、底端贴合;在钢管两端与试件钻孔之间的间隙中设置橡胶圈封隔,并继续灌注 AB 胶进一步密封。钢管上部与气压致裂实验仪注气口相连接,此时钻孔与钢管之间仍留有一定间隙,以满足注气过程的需求。

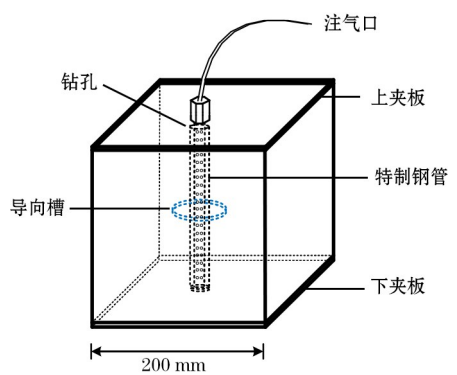


图 4 特制密封夹具

Fig.4 Special sealing fixture

2.2 气体压裂试验系统

本次试验系统包括室内气压致裂实验仪、双轴加载实验台、声发射装置、压缩机及气源气体,如图 5 所示。选取氮气作为气源,取垂直应力方向作为压裂钻

孔走向,预制的导向槽为钻孔径向,即水平应力方向。为验证径向导向槽改变裂缝扩展方向的效果,并探究动静态加载方式对裂缝形态的影响,本次研究取有无导向槽、动静态加载方式为对照条件进行正交试验,依托东北大学深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室双轴加载实验台开展压裂试验。

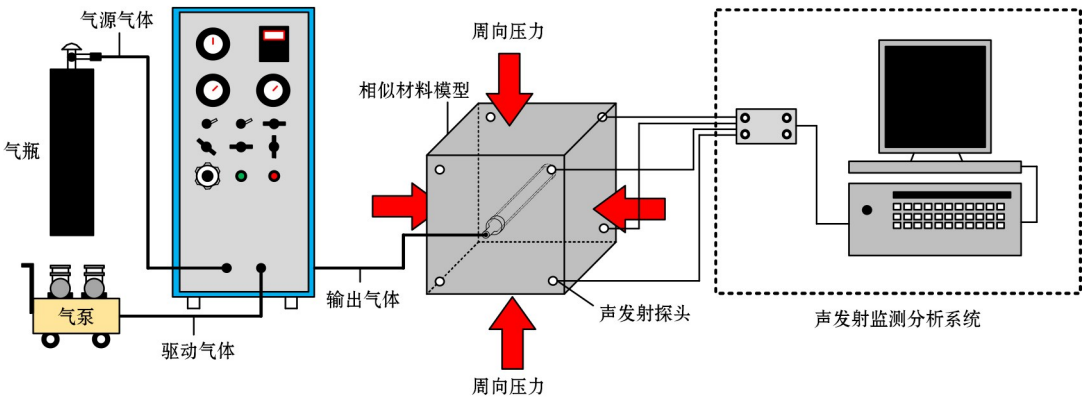


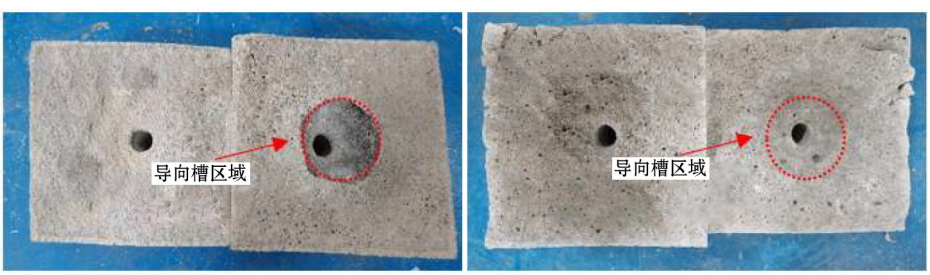
图 5　气体压裂试验系统

Fig.5　Experimental system of gas fracturing

为获取气体压裂导致的内部裂缝发展情况,采用美国声发射公司第三代声发射系统 PCI-3 收集记录信号,该系统能够实现声波信号的采集、空间定位、波形处理及事件发生时间的确定。具体试验中,对试件加载双向应力确定边界应力后,在试件的前、后方共布置 6 个传感器,连接至声发射装置以采集信号,通过自主算法确定破裂事件位置。上文封孔装置装配完成后,注气管与气压致裂试验仪输出口相连接,将试件置于双轴压力实验台,通过加载围压模拟水平地应力环境。气源经注气口通过钢管不断注入钻孔内。待气压升至相似材料试件破裂压力时,试件逐渐破坏出现裂缝。此过程通过声发射装置采集破裂信号,得到事件坐标与能量数据。

2.3　试验条件及裂缝监测

基于试验对照条件,本试验挑选了 5 组具有代表性的试件,其中有 3 组试件完全破裂有明显断面,有 2 组出现微裂缝但未完全破裂。根据破裂后的试件断面图,可以观察到预制导向槽的位置基本合理,符合工程条件下的割缝状态,如图 6 所示。为了收集声发射信号中的事件数据,设置钻孔轴向为 z 方向,水平方向为 x、y 方向,具体试验条件见表 1。



(a) 试件 2　　(b) 试件 4

图 6　压裂后试件断面

Fig.6　Fracture section of the specimens

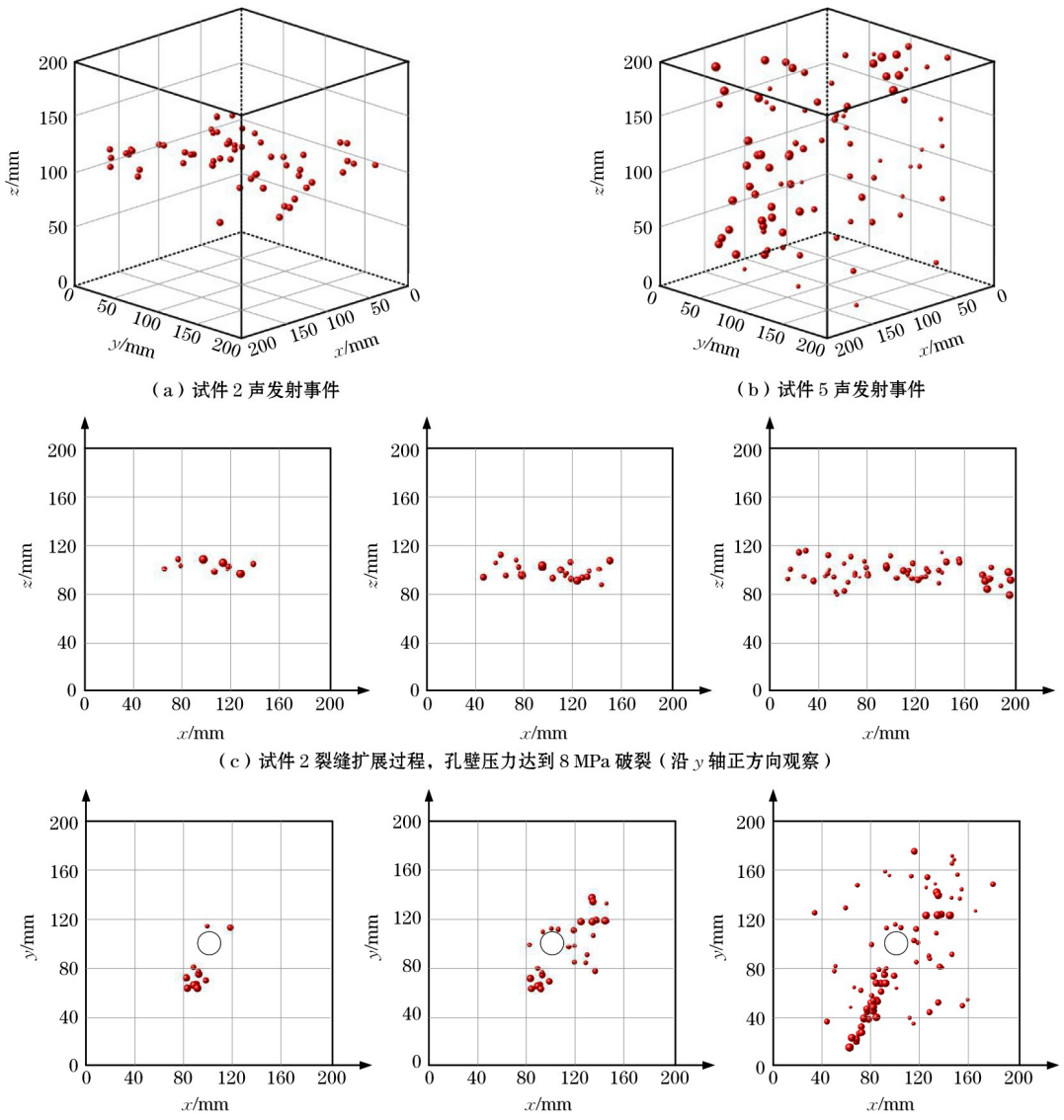
表 1　气体压裂试验条件

Table 1　Experimental conditions of gas fracturing

试件	有无导向槽	加载方式	环向应力比	致裂压力
1	无	准静态	1∶1	达到 12 MPa 破裂
2	有	准静态	1∶1	达到 8 MPa 破裂
3	无	动态	1∶1	预设 15 MPa 动态冲击
4	有	动态	1∶1	预设 15 MPa 动态冲击
5	—	准静态	1∶3	达到 13 MPa 破裂

基于声发射装置检测到的事件空间坐标数据与试验现场试件破裂形态,根据声发射事件的三维坐标定位与能量,采用 Origin 绘图工具绘制三维散点图,结合试件表面裂缝与断面,人工绘制得到基本裂缝形态。本研究气体压裂试验中的动静态加载结果有明显区别,静态加载方式下气体通过气压装置注气口进入注气管直接作用在钻孔壁,即钻孔的孔壁压力从 0 开始逐步增加,试验中致裂过程根据注气

速率差别一般持续 30～90 s,声发射装置能够采集到大部分事件数据,声发射事件三维定位如图 7 所示。动态加载方式下,先关闭高压气体致裂装置的输出截止阀,装置在内部增压泵工作下持续增压,气体在泵内不断压缩,在输出口压力表读数达到约 15 MPa 后,打开输出截止阀,压裂气体在高压作用下瞬间通过注气管注入孔壁,孔壁压力瞬时增加到与输出压力一致。这个过程是瞬时的,因此声发射装置监测到的往往只有一个事件,在数据方面无法提供定位,但在动态加载情况下试件往往破裂程度高,达到完全破裂,试件断面清晰可见,可以通过人工观察记录裂缝及断面形态。



(a) 试件 2 声发射事件　(b) 试件 5 声发射事件

(c) 试件 2 裂缝扩展过程,孔壁压力达到 8 MPa 破裂(沿 y 轴正方向观察)

(d) 试件 5 裂缝扩展过程,孔壁压力达到 13 MPa 破裂(沿 z 轴正方向观察)

图 7　声发射事件三维定位点

Fig.7　3D location points of acoustic emission event

2.4　试验结果分析

由裂缝形态图结合试件实际断面可知,上述试件钻孔孔壁受压破坏损伤区较小,说明本次试验的致裂压力不存在过大的情况,5 组试件均以拉伸破坏为主。以声发射数据及断面形态为基础绘制裂缝平面图,得到 5 组试件的裂缝显式形态图,如图 8 所示。

在准静态方式下加载的试件有三组,不含导向槽的试件 1、试件 5 分别在静载压力达到 12 MPa、13 MPa 时发生破裂,裂缝均从钻孔壁起裂并形成沿轴向展开的裂缝面,如图 8(a)、图 8(e)所示。其中试件 1 衍生出次生裂缝,沿水平面 20°与 45°扩展,均为拉伸破坏,结合同条件其他试件情况,试件 1 出现次生裂缝面的原因可能是试件本身材料的不均匀性导致的,一定程度上反映了岩层天然结构弱面对

裂缝扩展的影响。含导向槽的试件 2 在静载压力达到 8 MPa 时破裂,裂缝从导向槽边缘尖端处起裂,并朝钻孔径向方向即水平方向展开,裂缝较为平滑并形成基本重合于水平面的裂缝面,如图 8(b)所示。准静态加载下三组试件裂缝的平均宽度为 0.4 mm。



(a) 试件 1



(b) 试件 2



(c) 试件 3



(d) 试件 4



(e) 试件 5

图 8 5 组试件的显式裂缝形态图

Fig.8 Explicit fracture morphology diagrams of five groups of specimens

动态方式下加载的试件有两组,均采用初始压力为 15 MPa 的动态加载。不含导向槽的试件 3 中,主裂缝从钻孔两侧起裂并朝两侧延钻孔轴向展开,在试件钻孔边缘位置出现 3 条裂缝分支,试件边缘的次生裂缝出现滑移与剪切破坏,如图 8(c)所示。含导向槽的试件 4 中,主裂缝变为从导向槽边缘起裂并朝钻孔径向方向即水平方向展开,裂缝粗糙程度高并在试件边缘延伸出 2 条主裂缝和 5 条微裂缝,形成裂缝网络,如图 8(d)所示。两组试件均出现复杂裂缝网:主裂缝为拉伸破坏,裂缝宽度范围在 0.9～1.6 mm 之间;次生裂缝网为混合型破坏,裂缝宽度在 0.3～0.5 mm 之间。

上述 5 组试件中,动态加载的试件 3 和试件 4 破裂程度高,裂缝形态粗糙并伴随次生微裂缝;准静态加载的试件 1 和试件 5 裂缝没有贯通试件整体,试件未完全破裂;含导向槽的准静态加载试件 2 裂缝宽度较小,但贯通了整个试件的 xoy 平面,在压裂后的观察阶段,试件因搬运过程中受到的微小外力干扰,沿 xoy 平面贯通的裂缝完全破裂。

基于上述试验现象可以得出以下结论:

(1) 有无导向槽对照组对比下,即试件 1 与试件 2、试件 3 与试件 4 对比下发现,无导向槽情况下裂缝沿钻孔轴向方向展开,同等应力情况下有导向槽的试件裂缝改为朝钻孔径向扩展,表明径向导向槽一定尺度内可以显著改变气压裂缝走向;

(2) 将试件 1 与试件 2 对比可知,导向槽可以有效降低起裂压力,其比例约为 30%;

(3) 将动静态加载方式对比,即试件 1 与试件 3、试件 2 与试件 4 对比,发现动态加载情况下会在裂缝展开阶段产生 2～3 条主裂缝,并伴随 3～5 条细微次生裂缝,且两种加载方式下的裂缝宽度区别明显,动态加载情况下破裂程度更明显、裂缝宽度相对于准静态加载情况下增加了 2～3 倍,动静态加载下裂缝形态对比如图 9 所示。



(a) 准静态加载下的裂缝



(b) 动态加载下的裂缝

图 9 动静态加载下裂缝形态对比

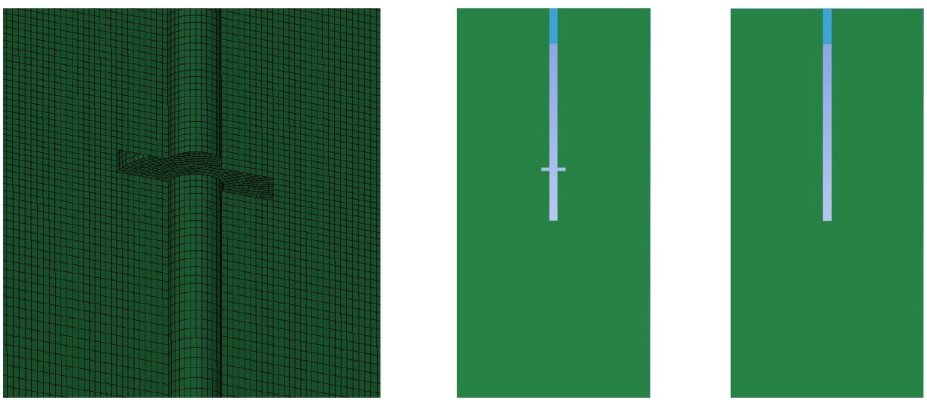
Fig.9 Comparison of fracture morphology under dynamic and static loading

3 瞬态气体压裂数值模拟

3.1 模型构建及参数

为对室内试验进行验证,采用非线性有限元动力分析软件 LS-DYNA 建立数值模型。在瞬态气体压裂的模拟方法上,常用的方法有等效炸药替代法或直接加载应力曲线,本研究针对瞬态气体压裂过程的复杂裂纹扩展问题,采用等效炸药法进行数值模拟。该方法将高压气体对岩石的加载作用等效为炸药爆炸产生的瞬时压力波,利用 LS-DYNA 内置的高爆炸药材料模型模拟气体压裂的初始压力脉冲。通过调整炸药的当量、起爆位置和边界条件,模拟高压气体在瞬态冲击下的能量释放过程。结合其他关键字模拟岩石在高压载荷下的脆性断裂行为及裂纹动态扩展路径。

模型尺寸(长×宽×高)为 1 000 mm×1 000 mm×2 000 mm,钻孔直径为 48 mm,导向槽直径为 140 mm、厚度为 20 mm,网格划分在导向槽区域加密,模型单元总数共计 6 965 452 个。瞬态气体压裂数值模型如图 10 所示。



(a)导向槽局部加密网格 (b)含径向导向槽模型 (c)无径向导向槽模型

图 10 瞬态气体压裂数值模型

Fig.10 Numerical models of transient gas fracturing

三维模型由岩石、封隔器、炸药和空气组成,其中炸药和空气设置为流体,各部分之间采用流固耦合算法 CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 实现相互作用,岩石采用拉格朗日单元,流体计算域则采用 ALE 网格,为避免大变形出现的负体积问题,采用关键字 ALE_STRUCTURED_MESH_CONTROL_POINTS 建立。在炸药单元设置方面,采用体积填充法关键字 INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY,在空气流体域中填充炸药,该方法能更加灵活地调整炸药模型。此外,将地应力条件设置为水平方向 5 MPa 的周向围压。

岩石本构模型采用 K&C 模型,该模型最初针对混凝土设计,但其对材料损伤、塑性流动和动态响应的处理方式也可扩展至类似脆性材料的模拟,适用于岩石力学中动态破坏、多轴应力状态、流固耦合以及岩石裂隙萌生与扩展的过程,且仅需输入少量参数,其他参数自动生成,易于标定,K&C 关键参数见表 2。

表 2 K&C 模型关键参数

Table 2 Key parameters of K&C model

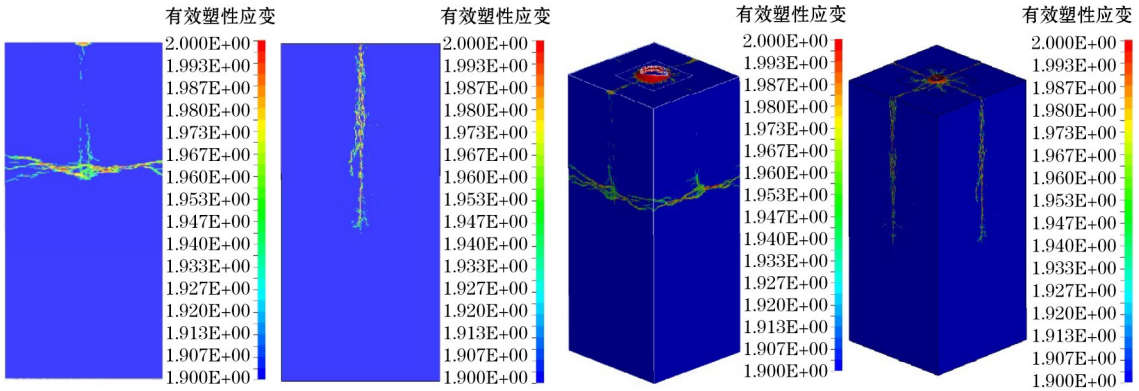
材料密度 R_0/(kg/m³)	泊松比	剪切破坏面参数/MPa	长度换算系数/m	应力换算系数/MPa
2 180	0.2	-2×10^{7}	39.37	1.45×10^{-4}

3.2 径向导向槽作用对比分析

根据上述模型以及流固耦合模块设定,对有无径向导向槽的模型模拟结果进行对比分析,以有效塑性应变为指标,不同条件下的岩石损伤效果如图 11 所示。

从模型的塑性形变结果可以看出,模型得到了与物理试验结论一致的效果,即相较于无径向导向槽试件,含径向导向槽的试件产生了沿导向槽径向扩展的复杂裂缝,与物理试验含径向导向槽试件的水平向裂缝形态高度一致,但模拟结果产生了极其细微的纵向裂缝,而物理试验并没有这一现象,考虑到人工浇筑试件的局限性,这可能是由于试验中所浇筑的模型尺寸较小导致导向槽处结构弱面影响效应明显,水平向裂缝早于纵向裂缝发育,因试件尺寸

限制,水平向裂缝先扩展导致试件已经产生断面而完全破裂。

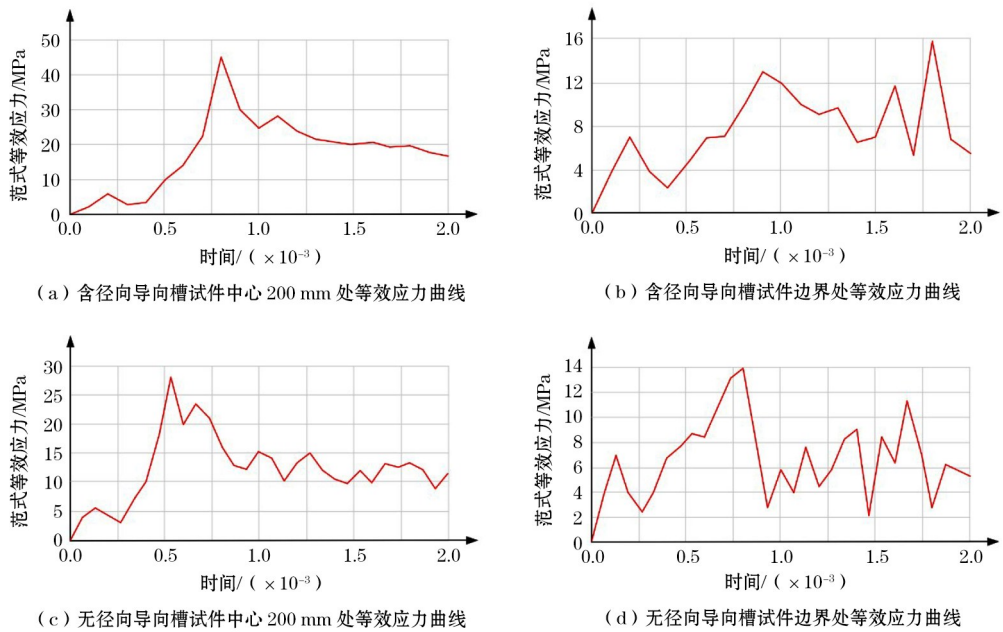


(a) 含径向导向槽模型正视图 (b) 无径向导向槽模型正视图 (c) 含径向导向槽模型45°俯视图 (d) 无径向导向槽模型45°俯视图

图 11 有无径向导向槽模型的有效塑性应变对比

Fig.11 Comparison of effective plastic strain in the models with and without radial groove

除塑性形变外,在考虑岩石等脆性材料的破坏情况时,最大主应力、范式等效应力等都是重要指标,取含径向导向槽模型中导向槽水平面距中心200 mm、500 mm为参考点,以同坐标的无径向导向槽模型的单元点位为对照,取各分析步中两种模型的范式等效应力条件进行对比,结果如图12所示。



(a) 含径向导向槽试件中心200 mm处等效应力曲线 (b) 含径向导向槽试件边界处等效应力曲线

(c) 无径向导向槽试件中心200 mm处等效应力曲线 (d) 无径向导向槽试件边界处等效应力曲线

图 12 取点单元范式等效应力曲线对比

Fig.12 Comparison of v-m effective stress curves of the point elements

通过对比分析图12中的范式等效应力曲线可知,在相同条件下,含径向导向槽试件的峰值范式等效应力均要高于无径向导向槽的钻孔试件,含径向导向槽试件所取点单元处范式等效应力峰值为45.5 MPa,无径向导向槽试件等效应力峰值则为27.7 MPa。该数值在一定范围内存在波动,与取点单元位置有关,但和试验中起裂压力显著降低的现象吻合,模拟结果表明导向槽可在一定程度上提高压裂作业的峰值应力,能显著降低起裂压力。

4 结论

本文通过设计模拟封隔器的特制密封夹具与导向槽制备方法,开展了基于导向槽工艺的定向气体压裂试验研究,通过声发射装置监测与断面观测得到有无径向导向槽试件的裂缝形态,探究了气体压裂动态加载方式下裂缝网络扩展模式,具体结论如下。

(1) 在环向应力及其他条件相同的情况下,径向导向槽能明显改变气压裂缝的走向,使裂缝沿导向槽方向即钻孔径向扩展,达到了人为改变裂缝走向的效果,且导向槽对比裸眼钻孔可以将起裂压力降低约 30%。

(2) 气体压裂能在动态加载情况下形成复杂裂缝网,本文试验中体现为 2 条主裂缝和 3～5 条细微裂缝的混合破坏模式;且动态加载下试件的破裂程度更明显、裂缝宽度相对准静态加载下的裂缝宽度增加了 2～3 倍。

(3) 在物理试验的基础上,进行了基于动力学仿真软件 LS-DYNA 的数值模拟,通过对有无径向导向槽模型的有效塑性应变、范式等效应力等指标对比分析,验证了室内物理试验现象,且相同加载情况下含径向导向槽试件的等效应力峰值明显高于无径向导向槽试件。

(4) 本文证明了结合径向导向槽工艺的气体压裂方法在深部硬岩压裂中控制裂缝走向并形成裂缝网络有一定可行性和适用性,为应用气体压裂技术弱化深部硬岩提供了方法参考。不足之处在于,本次试验受限于试验条件导致试件的尺寸较小,对气压裂缝的扩展与观测还存在一定局限性,今后可开展更大尺度的气体压裂试验研究。

参考文献(References):

[1] 李小刚,唐政,朱静怡,等.深层煤岩气压裂研究进展与展望[J].天然气工业,2024,44(10):126-139.
LI Xiaogang, TANG Zheng, ZHU Jingyi, et al. Research progress and prospect of deep coalrock fracturing[J]. Natural Gas Industry,2024,44(10):126-139.

[2] 王梓麟,时婧玥,徐栋,等.煤储层无水压裂技术现状及展望[J].钻采工艺,2024,47(1):80-86.
WANG Zilin, SHI Jingyue, XU Dong, et al. Research status and prospects of waterless fracturing technology in coal reservoir[J]. Drilling & Production Technology,2024,47(1):80-86.

[3] HUBBERT M K, WILLIS D G. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. Transactions of the AIME, 1957, 210: 153-168.

[4] HAN Jinjing, PU Wanfen, LIU Rui, et al. Research and method of air burst fracturing[J]. Ferroelectrics,2021,579(1):1-11.

[5] 陈华彬,马自强,艾生军,等.射孔高能气体压裂技术研究及应用[J].钻采工艺,2020,43(3):67-69+5.
CHEN Huabin, MA Ziqiang, AI Shengjun, et al. Research & application of perforating high energy gas fracturing technology[J]. Drilling & Production Technology,2020,43(3):67-69+5.

[6] ZHAO Xinglong, HUANG Bingxiang, XU Jie. Experimental investigation on the characteristics of fractures initiation and propagation for gas fracturing by using air as fracturing fluid under true triaxial stresses[J]. Fuel,2019,236:1496-1504.

[7] 曹有勋,杨涛,陈德任,等.冲击气压对岩石动态破裂形态的影响规律研究[J].安全,2023,44(2):50-53.
CAO Youxun, YANG Tao, CHEN Deren, et al. Study on the influence law of shock pressure on rock dynamic fracture morphology[J]. Safety & Security,2023,44(2):50-53.

[8] 孔子幸,马衍坤,杨发德,等.高压气体致裂煤岩孔壁应变响应特征研究[J].工矿自动化,2024,50(10):105-111.
KONG Zixing, MA Yankun, YANG Fade, et al. Study on the strain response characteristics of coal and rock borehole walls under high-pressure gas fracturing[J]. Journal of Mine Automation,2024,50(10):105-111.

[9] 张兆海,叶鹏,常仁强,等.冲击气压对含层理泥岩致裂形态的影响规律及声发射响应[J].煤炭技术,2024,43(1):133-137.
ZHANG Zhaohai, YE Peng, CHANG Renqiang, et al. Effect law of impact pressure on fracture morphology and acoustic emission response of stratified mudstone[J]. Coal Technology,2024,43(1):133-137.

[10] 周雷,李立,夏彬伟,等.含径向水力割缝钻孔导向压裂裂缝形态及影响要素[J].煤炭学报,2022,47(4):1559-1570.
ZHOU Lei, LI Li, XIA Binwei, et al. Fracture pattern and influencing factors of guided hydraulic fracturing with radial slot and well borehole[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(4):1559-1570.

[11] 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.
KANG Hongpu, FENG Yanjun. Hydraulic fracturing technology and its applications in strata control in underground coal mines[J]. Coal Science and Technology,2017,45(1):1-9.

[12] 康红普,冯彦军,张震,等.煤矿井下定向钻孔水力压裂岩层控制技术及应用[J].煤炭科学技术,2023,51(1):31-44.
KANG Hongpu, FENG Yanjun, ZHANG Zhen, et al. Hydraulic fracturing technology with directional boreholes for strata control in underground coal mines and its application[J]. Coal Science and Technology,2023,51(1):31-44.

[13] 李艳增.导向槽定向水力压穿增透技术研究与应用[J].煤炭科学技术,2016,44(4):50-54.
LI Yanzeng. Study and application of guide slot directional hydraulic pressurized penetration and permeability improved technology[J]. Coal Science and Technology,2016,44(4):50-54.

[14] 刘文静,李刚,梁少剑,等.特厚煤层坚硬顶板水力压裂控制技术研究[J].煤炭工程,2021,53(11):67-72.
LIU Wenjing, LI Gang, LIANG Shaojian, et al. Control technology of hard roof hydraulic fracturing in extra-thick coal seam[J]. Coal Engineering,2021,53(11):67-72.

[15] 邓燕.重复压裂压新缝力学机理研究[D].成都:西南石油学院,2005.
DENG Yan. Mechanical mechanism of fracture creation for refracturing [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University,2005.

[16] DENG J Q, LIN C, YANG Q. Investigation of directional hydraulic fracturing based on true tri-axial experiment and finite element modeling[J]. Computers and Geotechnics, 2016,75:28-47.

[17] 李立.坚硬顶板直井径向水力割缝导向压裂裂缝起裂和扩展机制研究[D].重庆:重庆大学,2022.
LI Li. Study on Fracture initiation and propagation mechanism of radial hydraulic slot guided vertical well fracturing in hard roof [D]. Chongqing: Chongqing University,2022.