

液态 CO₂ 相变致裂器泄能头气孔压力研究

王 伟^{1,2,3,4} 李亚东^{1,2,3} 郑永香^{1,2,3,4} 尹 超^{1,2,3,4} 李朝博⁵
路小茜^{1,2,3} 周星宇^{1,2,3}

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室,河北 石家庄 050043;2. 石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室,河北 石家庄 050043;3. 石家庄铁道大学土木工程学院,河北 石家庄 050043;4. 石家庄铁道大学河北省金属矿山安全高效开采技术创新中心,河北 石家庄 050043;5. 河北省应急管理科学研究院,河北 石家庄 050051)

摘 要 采用 CO₂ 相变爆破代替传统炸药爆破作为输入能量,对低渗砂岩铀矿层进行“爆破增渗”物理改造,对于提高我国天然铀产量具有十分重要的意义。目前工业化生产的 CO₂ 致裂器主要针对煤矿开采等领域设计,在爆破增渗工况中适应性不佳。为此,对传统致裂器泄能头进行多孔设计、平衡各泄气孔压力,为设计出针对爆破增渗领域的“各气孔压力大且均匀”的致裂器提供理论参考。以 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型为理论基础,基于计算流体动力学(CFD)对致裂器泄能头部分进行了数值仿真试验,分析了泄能头内的气体流动规律及压力分布特征,探讨了位置关系和孔径特征两个因素对泄气孔压力变化的影响规律。结果表明:为保持气孔压力的稳定输出,对称式分布的泄气孔优于交错式分布的泄气孔布置;同时,泄气孔直径设置为由首部至端部递增的非均匀式,可有效降低各气孔之间的压差。上述分析进一步表明:非均匀对称式的泄能头类型更符合爆破增渗的需求。

关键词 CO₂ 相变爆破 爆破增渗 CFD 泄能头 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型 数值模拟

中图分类号 TD868 **文献标志码** A **文章编号** 1001-1250(2022)-07-050-08

DOI 10.19614/j.cnki.jsks.202207007

Study on Pore Pressure of Discharge Head of Liquid CO₂ Phase Change Cracker

WANG Wei^{1,2,3,4} LI Yadong^{1,2,3} ZHENG Yongxiang^{1,2,3,4} YIN Chao^{1,2,3,4} LI Chaobo⁵
LU Xiaoxi^{1,2,3} ZHOU Xingyu^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Mechanics Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education of Roads and Railway Engineering Safety Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4. Hebei Metal Mine Safety and Efficient Mining Technology Center, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 5. Hebei Academy of Emergency Management Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract Using CO₂ phase change blasting instead of traditional explosive blasting as input energy, the physical transformation of "blasting and increasing permeability" of low-permeability sandstone uranium deposit is of great significance to improve the production of natural uranium in China. At present, the industrialized CO₂ fracturing device is mainly designed for coal and rock mining and other fields, and has poor adaptability in blasting seepage increasing conditions. Therefore, the porous design of the discharge head of the traditional crack maker is carried out to balance the pressure of each vent hole, which provides a theoretical reference for the design of the crack maker with "large and uniform pressure of each vent hole" in the field of blasting infiltration. RNG $k-\varepsilon$ based on the turbulence model, the numerical simulation test of the energy discharge head of the crack breaker is carried out based on computational fluid dynamics (CFD). The gas flow law and pressure distribution characteristics in the energy discharge head are analyzed, and the influence law of the position relationship and the pore size characteristics on the pressure change of the vent hole is explored. The results show that in order to keep the stable output of pore pressure, the symmetrical distribution of vent holes is better than the staggered distribution of vent holes; At the same

收稿日期 2022-03-15

基金项目 国家自然科学基金项目(编号:51979170, U1967208);河北省自然科学基金项目(编号:E2021210128, E2021210036)。

作者简介 王伟(1978—),男,院长,教授,博士,博士研究生导师。通信作者 郑永香(1991—),男,讲师,博士,硕士研究生导师。

time, the diameter of the vent hole is set as a non-uniform type from the head to the end, which can effectively reduce the pressure difference between the pores. The above analysis results further show that the type of non-uniform and symmetrical energy discharge head is more in line with the needs of blasting infiltration.

Keywords CO₂ phase change blasting, blasting infiltration, CFD, energy discharge head, RNG $k-\varepsilon$ turbulence model, numerical simulation

随着安全有序发展核电目标要求的提出,我国基本形成了包括核能在内的多轮驱动能源生产体系^[1]。目前我国天然铀产量仅占需求量的 25%^[2-3],长期依靠进口的现状严重限制了核电、核军工的有序发展。目前我国已探明的铀矿中,砂岩型铀矿占 43%,原地浸出工艺(即“地浸”)是最有效、合理的开采方式^[4-5]。地浸技术仅适用于渗透系数为 0.5~10.0 m/d 的高渗透性砂岩型铀矿^[6-7]。然而,针对目前我国已探明的砂岩型铀矿普遍渗透性较低(渗透系数 < 0.1 m/d)的现状,王伟等^[8-9]提出了以炸药作为能量输入的低渗铀矿层“爆破增渗”物理改造方法,有效提高了低渗透砂岩型铀矿的渗透性。

随着技术的发展革新,传统炸药爆破的弊端逐渐显现,二氧化碳相变爆破在工程中得到了广泛应用^[10],众多学者对二氧化碳爆破原理及致裂效果进行了深入研究。二氧化碳爆破技术的基本原理为液态二氧化碳受热相变,短时间内体积急剧膨胀,由所产生的高压气体对周围介质进行爆破冲击^[11]。相关试验研究表明,二氧化碳相变爆破的峰值压力和作用时间位于炸药爆破与水力压裂之间,且致裂效果更好^[12]。夏祥等^[13]通过开展岩体致裂和爆破试验,对振动速度传播和衰减规律进行了分析,发现二氧化碳致裂方式在中远区域的减振效果更显著,与传统炸药爆破方式相比,其爆破近区粉碎程度偏低,致裂效果更优。白鑫等^[14]采用理论方法计算了液态二氧化碳相变致裂的影响半径,证明该技术可有效增加岩体损伤裂隙扩展。与此同时,部分学者对影响致裂效果的因素开展了相关研究。雷云^[15]通过液态二氧化碳相变气爆压力试验平台及测试系统,对距爆口不同位置的应力—时间变化规律进行了研究,发现随着距离的增加,压力降低先快后慢,整体呈二次抛物线形式。XIA 等^[16]对二氧化碳爆破进行了一系列的探索性试验,通过综合分析对比液态二氧化碳充填量、加热材料用量以及定压剪切片厚度 3 个因素对爆破效果的影响,发现液态二氧化碳充填量对爆破效果影响最大,约为加热材料的 231 倍,剪切片太厚易导致爆破失败,管壁温度升高。ZHANG 等^[17]采用数值模拟和试验相结合的方式对裂隙扩展结果、试样破碎程度等进行了分析,认为剪切片强度、泄气孔数量和半径是影响爆破效果的关键因素。上述研究针对距离、充液

量、剪切片厚度、泄气孔数量等爆破效果的影响因素进行了深入讨论,反映出二氧化碳爆破技术具有良好的致裂效果,有利于裂隙网络的形成扩展。然而,目前矿山开采等领域常用的工业化二氧化碳致裂器多由预切槽或单一泄气孔产生的优势流定向剥落周围煤岩体。该类致裂器应用于爆破生产中时,因其单一、少量的泄气孔,往往会产生较大压力,生成大主裂缝。煤层增渗领域所用的多孔释放管可以在一定程度上形成裂隙网络,而致裂器各气孔压力的变化趋势、压力差值等因素对所生成裂隙的均匀度有重要影响,故有必要对其进行深入讨论。

爆破增渗需要通过致裂器产生大量连通的小裂隙,最终形成良好的裂隙网络。本研究在现有工业化生产的二氧化碳致裂器基础上,对致裂器泄能头进行多孔化设计,对泄能头上泄气孔之间的位置关系和孔径特征进行调整,以平衡、调节各气孔压力,从而达到对炮孔壁均匀加压进而产生大量微小裂隙、形成裂隙网络的目的。为实现上述目的,结合流体动力学相关理论,以 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型为理论基础,分析泄能头腔体内的气体流动规律及压力分布特征;通过监测各气孔压力数据,讨论各气孔压力间的相关性、最大峰值、峰值差值等参数,得到了位置关系和孔径特征这两个因素对泄气孔压力的影响规律,为设计出适用于爆破增渗工况的“各气孔压力大且均匀”的致裂器提供理论参考。

1 模型构建

1.1 泄能头内气体流动模型

液态 CO₂ 相变产生的高压气体冲破剪切片射入泄能头内形成湍流,本研究采用湍流模型模拟泄能头腔体内气体的流动过程,并进一步监测各泄气孔压力。湍流模型主要有单方程 S-A 模型、双方程 $k-\varepsilon$ 模型、五方程雷诺应力(RSM)模型、大涡模型(LES)等 4 种模型^[18],结合雷诺数等条件,选择相应的模型进行计算。

雷诺数是用来表征流体流动的无量纲数,雷诺数大小对选择湍流模型具有重要指导意义。其计算公式为

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu}, \quad (1)$$

式中, Re 为雷诺数; ρ 为流体密度,气态 CO₂ 取

1.787 8 kg/m³; u 为流体流速, m/s; L 为特征长度, 取 10^{-2} m; μ 为黏性系数, 取 1.37×10^{-5} Pa · s。

将上述参数代入式(1), 结果大于 4 000, 为高雷诺数。故本研究选取 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行模拟计算。

为确保湍流模型计算的准确性, 在湍动能 k 方程的基础上, 引入湍动耗散率 ε 方程, 形成 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型。为适应高雷诺数流动问题, 用重整化的数学方法对瞬时 N-S 方程进行推导, 得到重整化 $k-\varepsilon$ 模型(RNG $k-\varepsilon$ 模型)^[18], 湍动能 k 和湍动耗散率 ε 由如下运输方程确定:

$$\frac{\partial(\rho \cdot k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot k \cdot u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_k \cdot \mu_{eff}) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \cdot \varepsilon + Y_M, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot \varepsilon \cdot u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_\varepsilon \cdot \mu_{eff}) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot (G_k + G_{3\varepsilon} \cdot G_b) - G_{2\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (3)$$

式中, ρ 为流体密度, kg/m³; t 为时间, s; u_i 和 u_j 分别为 i 方向和 j 方向的速度, m/s; x_i 和 x_j 分别为 i 方向和 j 方向的坐标, m; α_k 、 α_ε 分别为湍动能和耗散率的有效普朗特数的倒数, 在高雷诺数极限下, $\alpha_k \approx 1.393$ 、 $\alpha_\varepsilon \approx 1.393$; $G_{1\varepsilon}$ 、 $G_{2\varepsilon}$ 、 $G_{3\varepsilon}$ 为经验常数, 分别取 1.44、1.92、0.09; μ_{eff} 为有效动力黏度, kg/(m · s); G_k 为由平均速度梯度引起的湍流动能 k 的生成项,

$G_k = \mu_t \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$; μ_t 为湍动黏度, $\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}$; C_μ 为经验常数, 高雷诺数时取 0.084 5; G_b 为由

于浮力引起的湍流动能 k 的生成项, $G_b = \beta \cdot g_i \cdot \frac{\mu_t}{Pr_t}$

$\frac{\partial T}{\partial x_i}$; β 为热膨胀系数, 约为 0.012; g_i 为重力加速度在

i 方向上的分量; Pr_t 为湍动普朗特数, 默认取值为 0.85; T 为开尔文温度, K; Y_M 可压缩湍流脉膨胀造成的耗散率, $Y_M = 2\rho \cdot \varepsilon \cdot M_t^2$; M_t 为湍流马赫数, $M_t = \sqrt{k/a^2}$; a 为声速, m/s。

1.2 泄能头模拟方案及几何模型

1.2.1 模拟方案

本研究对传统二氧化碳致裂器泄能头进行多孔化设计, 考虑两个变量: ① 位置关系, 根据泄气孔分布的几何位置, 可分为对称式和交错式两种; ② 孔径特征, 根据同一泄能头上泄气孔直径是否一致, 可分为均匀(5 mm)和非均匀(4~6 mm)两类。为充分对比分析各因素的影响程度, 本研究依据控制变量法定模拟方案, 共设置 4 个基本类型, 即均匀对称式分布、均匀交错式分布、非均匀对称式分布和非均匀交错式分布, 见表 1。

表 1 泄能头模拟方案

Table 1 Simulation schemes of energy discharge head

方案编号	孔数/个	布孔方式	孔径/mm	类型
1	6	3 组对称式	5、5、5	均匀对称式
2	6	3 组交错式	5、5、5	均匀交错式
3	6	3 组对称式	4、5、6	非均匀对称式
4	6	3 组交错式	4、5、6	非均匀交错式

1.2.2 几何模型

根据表 1 所示模拟方案, 本研究采用 ICEM 软件进行建模并进行网格划分。泄能头模型尺寸为 100 mm×30 mm (长×宽), 入口设置在左侧首部居中位置, 直径 10 mm。依据泄气孔位置关系因素, 上下壁面分别对称或交错地设置 3 组泄气孔; 结合孔径特征因素, 泄气孔直径设置为均匀式(均为 5 mm)分布或非均匀式(分别为 4、5、6 mm)分布, 泄能头几何模型如图 1 所示。

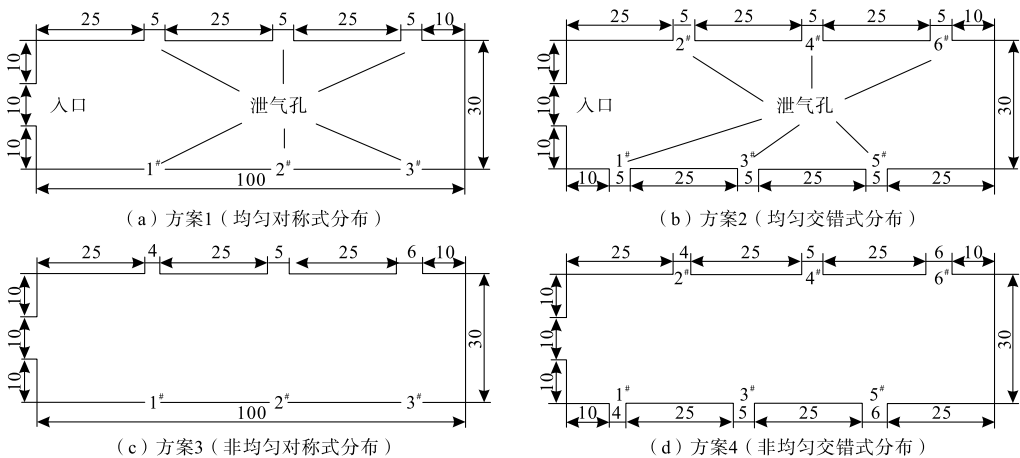


图 1 泄能头几何模型(单位:mm)

Fig. 1 Geometric models of energy discharge head

泄气孔压力监测数据是分析位置关系和孔径特征对于气孔压力影响的关键性资料。本文的主要研究内容为高压气体的流动过程,无需考虑重力的影响。因此,对称式分布模型只对单侧泄气孔进行监测即可,即由左侧首部至右侧端部依次布设 1[#]~3[#]测点;而交错式分布模型两侧泄气孔均进行监测,即由左侧首部至右侧端部依次布设 1[#]~6[#]监测点,如图 1 所示。

2 泄能头仿真模拟

2.1 数学参数

为了对设计“各气孔压力大且均匀”的致裂器提供理论参考,本研究采用数值模拟方法,对所得各泄气孔的监测数据及压力—时间曲线进行对比分析。为提高数据分析的科学性、直观性,结合统计学理论引入了包括相关系数、最大峰值、峰值差值在内的 3 个数学参数。

相关系数方程(*Correl* 函数)需具有两组数据即数组 1、数组 2,公式为

$$\text{Correl}(X, Y) = \frac{\sum (x - \bar{x}) \cdot (y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \cdot \sum (y - \bar{y})^2}}, \quad (4)$$

式中, X, Y 分别为数组 1 和数组 2 的样本集合; \bar{x}, \bar{y} , 分别为数组 1 和数组 2 的样本平均值。

相关系数表征各泄气孔压力数据随时间变化的一致性、相关性,数值越接近于 1,各气孔压力越一致。各泄气孔压力数据两两组合计算相关系数,选取最大、最小相关系数,可有效避免出现同一泄能头上个别泄气孔之间压力数据高度一致而与其他泄气孔之间数据差异较大的情况。最大峰值表征同一泄能头各泄气孔所能达到的最大压力,数值越大压力越大。峰值差值定量表述各泄气孔之间的最大压差程度,数值越小各气孔压力越均匀。综上所述,相关系数越接近于 1,峰值越高,差值越小,则可认定为越符合“各气孔压力大且均匀”的要求。

2.2 压力监测数据分析

根据表 1 所示的泄能头模型方案进行仿真计算,并对各监测点数据进行了包括相关系数、最大峰值、峰值差值在内的统计学分析,结果见表 2。

由表 1 可知:模拟 1 和模拟 3(对称式分布)相关系数较大,尤其是模拟 3,其各组监测数据间相关系数最小为 0.827 3 > 0.8,呈高度相关;最大可至 0.970 1,几近于完全相关;且其泄气孔最大峰值达

266.20 MPa,各泄气孔峰值差值仅为 10.73 MPa。模拟 2 和模拟 4(交错式分布)最大峰值较大,但其峰值差值较大。

表 2 泄能头气孔压力分析结果

Table 2 Analysis results of vent pressure of energy discharge head

方案编号	最大相关系数	最小相关系数	最大峰值 /MPa	峰值差值 /MPa
1	0.875 4	0.000 8	266.52	187.26
2	0.761 5	-0.071 1	347.96	227.57
3	0.970 1	0.827 3	266.20	10.73
4	0.623 9	0.041 2	346.24	188.83

2.3 腔内气体流动规律

对模拟过程中泄能头内空气和气态 CO₂ 的体积分数进行监测可知,腔内流体运动过程基本规律可以表述为:高速高压气体由左侧首部射入泄能头腔体,经右侧端部壁面反射回流,最后由上下壁面所设泄气孔释放。该过程中,壁面结构导致湍流、涡流等产生。计算初期压力波动较大,至 0.5 ms 时泄能头腔体内气体流动普遍达到相对稳定状态。

泄气孔呈对称式分布时产生对称涡流,增加能量耗散。一是因泄能头宽度有限,高压气体射流前端扩散不完全产生回旋涡流;二是端部壁面反射作用,产生涡流,另外由于上下壁面所设泄气孔的位置关系呈对称式分布,故其涡流也呈对称式,如图 2(a)所示。但由于结构的对称性,其边界状况对腔内流体的扰动性整体较小,故尽管存在涡流,但腔体内气体流动整体保持稳定状态,上下壁面对应的气孔压力一致,有利于输出更加均匀稳定的压力。

泄气孔呈交错式分布时也产生涡流,其产生原因与对称式相似。但其边界条件不同,泄气孔的位置关系呈交错式,故产生非对称涡流,如图 2(b)所示。本研究为高雷诺数气体(大于 4 000),惯性对流场的影响大于黏滞力,流体流动较不稳定,此种情况下流速的微小变化容易发展、增强,形成紊乱、不规则的紊流。因此边界对腔内流体的扰动性骤增,即湍流动能增大,致使压力波动较大,无法输出稳定压力。

2.4 腔内气体压力分布特征

由腔内气体流动分析可知,高压气体首先冲击右侧端部壁面继而回流,此过程势必会在腔内气体压力分布上有所体现。为更好地探究泄气孔的位置关系和孔径特征对泄气孔压力的影响,需进一步分析泄能头腔体内的压力分布特征。

由泄能头腔体内压力云图(图 3)可知,泄能头腔体内明显呈现出由右侧端部至左侧首部压力降低的

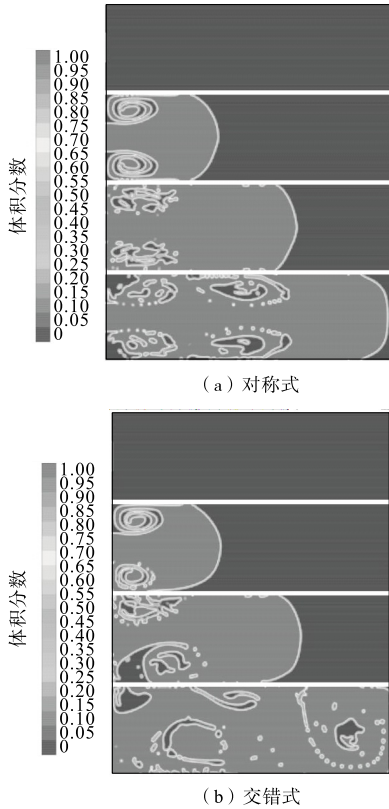


图 2 泄能头内气体流动对比

Fig. 2 Comparison of gas flow in energy discharge head

■ —空气; ■ —气态CO₂

特征,并且在计算初期,部分区域会出现压力负值现象。由于本研究雷诺数大于 0.3,为可压缩流体,现引入气体压缩理论对压力特征进行分析,公式为

$$\frac{P \cdot V}{T} = n \cdot R, \quad (5)$$

式中, P 为压强,Pa; V 为体积,m³; T 为开尔文温度,K; n 为物质的量,取 0.5 mol; R 为气体常量,取 8.314 51 J/(mol · k)。

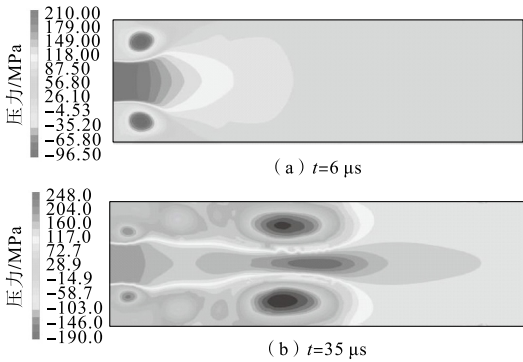


图 3 泄能头腔体内压力云图

Fig. 3 Pressure nephogram of energy discharge head cavity

当雷诺数较大时,腔内气体微小的变化极易形成涡流、紊流,从而降低了气体的流动速度,如图 4 所示。射入腔体内的气体速度快,而紊流导致气体的释放速度较慢,故腔内 CO₂ 气体未能等量释放,即同等

气体所占体积减小。CO₂ 气体温度不变,物质的量以及 R 为常量,因此同等气体所占体积减小势必引起压力增大。又因为气体由端部回流至首部,沿途经过所设泄气孔释放,故呈现出由右侧端部至左侧首部压力降低的特征。

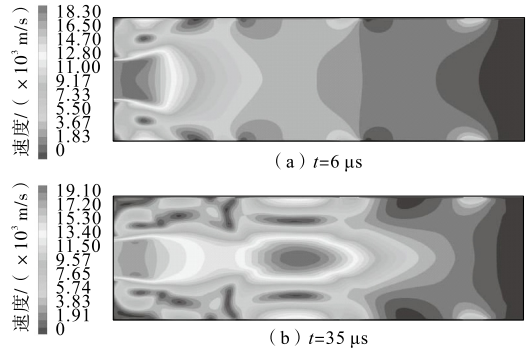


图 4 泄能头腔体内速度云图

Fig. 4 Velocity nephogram of energy discharge head cavity

图 3 中涡流区域相对压力小于 0,即呈现为负压现象。对泄气孔压力的大量监测数据以及压力—时间曲线进行分析发现,在大部分模拟试验的初始阶段以及个别试验的整个模拟过程中,存在负压现象。高压 CO₂ 气体喷射至泄能头腔体中,射流速度可达 1.91×10^4 m/s,腔内气体速度分布如图 4 所示。依据射流负压理论,CO₂ 气体由入口高速射入,周围空气被射流卷走,造成短暂的真空状态,继而临近空气被卷入,最终产生负压现象。同时研究表明,入射气体速度越大,形成的紊流传递给周围流体的动能越大、负压越低,但入口速度与负压的关系呈非线性^[19-20]。

3 气孔压力影响因素分析

3.1 泄气孔位置关系对气孔压力的影响

在液态 CO₂ 相变爆破泄能头模拟试验中,泄气孔的位置关系是本研究考虑的主要影响因素之一。由上述泄能头腔体内的气体流动分析可知,泄气孔的位置关系导致边界条件变动,继而对腔体内气体的流动状况产生较大影响。本研究对方案 3(非均匀对称式分布)和方案 4(非均匀交错式分布)结果进行对比分析。压力监测点设置如图 1 所示,方案 3 设置 3 个监测点,方案 4 设置 6 个监测点,其压力—时间曲线如图 5 所示。

CO₂ 相变爆破全过程持续时间较长,为减少计算量、并有效破岩,本研究选择其中压力为 200 MPa 左右的 0.5~3.0 ms 时间区间进行分析。由图 5 可知:方案 3 中各曲线走势一致,峰值范围为 250~270 MPa,且 3 个测点达到峰值的时间基本一致;2#测点、3#测点的压力—时间曲线基本完全重合,1#测点与其他两组数据之间的差值维持在 10MPa 左右,满足爆

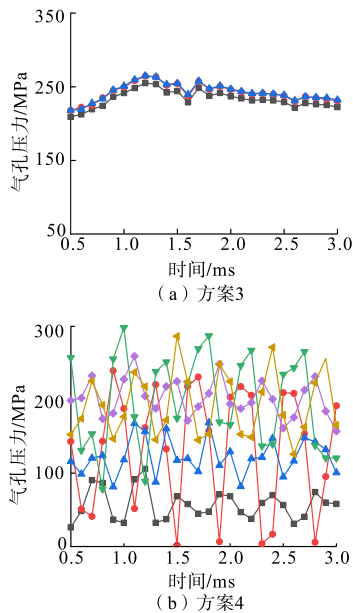


图 5 不同位置关系下的压力—时间曲线对比

Fig. 5 Comparison of pressure-time curves under different position relationship

■—1#测点; ●—2#测点; ▲—3#测点; ▼—4#测点; ◆—5#测点; ◆—6#测点

破增渗所需“各气孔压力大且均匀”的要求。方案 4 中,由于边界条件对流体的扰动性增加,形成极不规则的紊流,导致各曲线波动较大,无法输出持续稳定的压力。

本研究分析表明:对称式气孔分布中,泄能头几何结构呈对称性,边界的规律性更强,对腔体内流体的扰动性更小。泄能头上各气孔压力稳定性相对更高,波动较小,压力—时间曲线具有很好的稳定连续性。交错式气孔分布中,微小的边界变化极大地提高了腔体内气体流动的紊乱程度,直观表现为气孔压力波动加剧。

综上所述,泄气孔位置关系对气孔压力的影响主要体现在压力输出的稳定性方面,对称式分布,气孔压力更加持续稳定;交错式分布,更易形成波动性脉冲气体。本研究认为:为形成均匀良好的几何裂隙网络,对称式气孔分布更适用于“爆破增渗”工况。

3.2 泄气孔孔径特征对气孔压力的影响

泄气孔孔径特征是本研究考虑的另一主要影响因素。依据孔径特征可划分为气孔直径由端部至首部降低的非均匀式分布和端部至首部直径相同的均匀式分布。通过分析泄气孔位置关系对气孔压力的影响可知:泄气孔呈对称式分布时气孔压力波动较小。为便于分析研究,选择方案 1(均匀对称式分布)和方案 3(非均匀对称式分布)来分析孔径特征对气孔压力的影响。压力监测点设置如图 1 所示,方案 1 和方案 3 均设置 3 个监测点,其压力—时间曲线如图 6 所示。

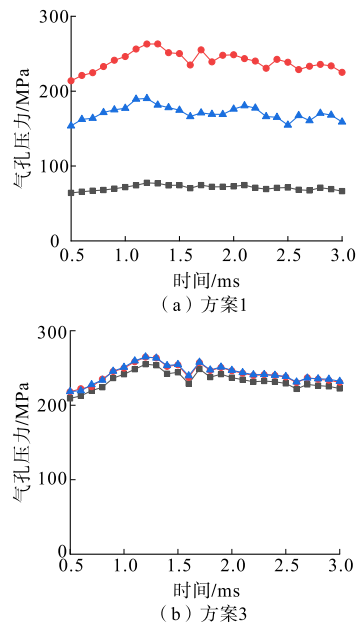


图 6 不同孔径特征下的压力—时间曲线对比

Fig. 6 Comparison of pressure-time curves under different aperture characteristics

■—1#测点; ●—2#测点; ▲—3#测点

由图 6 可知:方案 1 中各曲线相对稳定,走势也趋向于一致。但 2#测点压力围绕 240 MPa 波动;3#测点压力围绕 165 MPa 波动;1#测点压力围绕 65 MPa 波动,各气孔压力悬殊。结合模拟结果可知,方案 1 最大峰值压力为 266.52 MPa,略高于方案 3,但其最大差值达 187.27 MPa,此种状况显然无法满足“压力均匀”的要求。而方案 3 的结果表明,其气孔间的压差较小,故其释放的压力更加均匀。

通过分析泄能头腔体内的压力分布特征可知,泄能头内压力呈现出由右侧端部至左侧首部逐渐降低的特征。泄气孔孔径特征呈均匀分布时,没有结合压力分布特征做出相应调整,导致各泄气孔差值较大,并不能很好地适用于爆破增渗工况。方案 1 中,高速气体冲击壁面产生回流,依次经过 3#、2#、1#测点所在的气孔释放。均匀式的气孔布置致使压力大的端部区域气孔压力更大,压力小的首部区域气孔压力更小,最终形成巨大的压力差值。而模拟 3 结合腔内压力分布特征,3#、2#、1#测点所在的气孔直径依次减小,3 处以扩大气孔直径的方式减小压力,相反,1 处以缩小气孔直径的方式增大压力。通过一增一减的方式,平衡 3 组气孔压力,最终将各气孔压力差值控制在 10 MPa 左右。

综上所述,泄能头腔体内表现出由端部至首部压力降低的分布特征。孔径特征呈非均匀式分布时与压力分布特征相契合,故各气孔压力值近似,可提高裂隙均匀度,适合于爆破增渗工况;均匀式分布没有根据压力分布特征做出相应调整,致使各气孔之间压

差较大,更适合于需要进行压差爆破的工况。

4 结 论

为降低泄气孔间的压差,获得更加均匀稳定的输出压力,采用数值模拟的方式进行分析,对所得泄气孔压力数据进行了统计学分析,研究了位置关系和孔径特征对泄气孔压力变化的影响规律。主要得到如下结论:

(1)泄能头腔体内压力呈现出由右侧端部至左侧首部降低的特征,因此将泄气孔直径设置为由端部至首部递减的非均匀式分布,可有效地平衡各泄气孔压力、降低压差;气体流动的雷诺数较大,故极小的边界改变都会引起腔体内气体流动的剧烈变化。因此,非均匀对称式分布,更易输出均匀持续稳定的压力。

(2)所研究的致裂器,其压力相对较小,在地应力更高的深层资源开采应用中可能会具有一定的局限性。因此需要综合考虑装药密度、加热装置与液态 CO₂ 的接触面积等因素,进一步研发威力更大的致裂器。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国国务院新闻办公室.《新时代的中国能源发展》白皮书[R/OL]. [2021-12-05]http://www.scio.gov.cn/. The State Council Information Office of the People's Republic of China. White Paper on China's Energy Development in the New Era [R/OL]. [2020-12-21]. http://www.scio.gov.cn/.

[2] GRANCEA L, MIHALASKY M J, FAIRCLOUGH M. Uranium Resources 2020, Production and Demand[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020.

[3] 陈军强,曾威,王佳营,等.全球和我国铀资源供需形势分析[J].华北地质,2021,44(2):25-34. CHEN Junqiang, ZENG Wei, WANG Jiaying, et al. Analysis of supply and demand situation of uranium resources in the world and China[J]. North China Geology, 2021, 44(2): 25-34.

[4] 张万亮,苏学斌,张渤.可地浸砂岩型铀资源开采利用系数的探讨——以钱家店铀矿床为例[J].铀矿冶,2017,36(1):19-22. ZHANG Wanliang, SU Xuebin, ZHANG Bo. Discussion on mining utilization coefficient for in-situ leaching sandstone type uranium resource: a case study of Qianjiadian Uranium Deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(1): 19-22.

[5] 张建华,朱新铖,史曦.某原地浸出铀矿井型及井距优化数值模拟[J].金属矿山,2017(3):25-30. ZHANG Jianhua, ZHU Xincheng, SHI Ji. Optimization numerical simulation on well pattern and well spacing of an in-situ leaching uranium mine[J]. Metal Mine, 2017(3): 25-30.

[6] 国防科学技术工业委员会. EJ/T 1194—2005 地浸砂岩型铀矿水文地质勘查规范[S].北京:中国标准出版社,2005. Commission of Science, Technology and Industry for National Defence. EJ/T 119—2005 Specification for Hydrogeological Exploration on In-situ Leaching Sandstone Type Uranium Deposits[S]. Beijing: China Standard Press, 2005.

[7] 王晓卿,刘瑞兰,李建辉,等.原地浸出采铀工艺中氡分布特征及控制措施研究[J].铀矿冶,2021,40(1):76-81. WANG Xiaoqing, LIU Ruilan, LI Jianhui, et al. Radon exhalation characteristics and control measures in in-situ leaching uranium mines[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2021, 40(1): 76-81.

[8] 王伟,李小春.低渗透砂岩型铀矿床增渗方法及其可行性研究[J].岩土力学,2009,30(8):2309-2314. WANG Wei, LI Xiaochun. Study of enhanced permeability methods and their feasibility in low-permeability sandstone-type uranium deposit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2309-2314.

[9] 李小春,王伟.低渗透砂岩型铀矿床爆破增渗的方法: ZL200810048968.6[P].2008-08-26. LI Xiaochun, WANG Wei. Blasting Method for Increasing Permeability of Low Permeability Sandstone Type Uranium Deposit: ZL200810048968.6[P]. 2008-08-26.

[10] 周盛涛,罗学东,蒋楠,等.二氧化碳相变致裂技术研究进展与展望[J].工程科学学报,2021,43(7):1-14. ZHOU Shengtao, LUO Xuedong, JIANG Nan, et al. A review on fracturing technique with carbon dioxide phase transition[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(7): 1-14.

[11] WEIR P, EDWARDS J H, WEIR P, et al. Mechanical loading and cardox revolutionize an old mine[J]. Coal Age, 1928, 33: 288-290.

[12] 孙可明,辛利伟,吴迪,等.初应力条件下超临界 CO₂ 气爆裂致裂规律研究[J].固体力学学报,2017,38(5):473-482. SUN Keming, XIN Liwei, WU Di, et al. Study on cracking law of supercritical CO₂ gas explosion under initial stress[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2017, 38(5): 473-482.

[13] 夏祥,李海波,王晓炜,等.核电工程中的 CO₂ 致裂与炸药爆破地表振动传播规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(7):1-7. XIA Xiang, LI Haibo, WANG Xiaowei, et al. Comparison analysis of ground vibrations induced by CO₂ gas fracturing and explosive blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(7): 1-7.

[14] 白鑫,骆桂君,王艳,等.低渗砂岩型铀矿液态 CO₂ 相变致裂增透高效开采新模式[J].金属矿山,2021(7):50-57. BAI Xin, LUO Guijun, WANG Yan, et al. Feasibility study on enhanced permeability of low permeability sandstone type uranium deposit with liquid CO₂ phase transition fracturing[J]. Metal Mine, 2021(7): 50-57.

[15] 雷云.低渗透高瓦斯煤层二氧化碳相变致裂增透理论及实验研究[D].成都:西南石油大学,2018. LEI Yun. Theoretical and Experimental Study on Carbon Dioxide Phase Change Induced Cracking and Permeability Enhancement in Low Permeability and High Gas Coal Seams[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.

[16] XIA J Q, DOU B, TIAN H, et al. Research on initiation of carbon dioxide fracturing pipe using the liquid carbon dioxide phase-transition blasting technology[J]. Energies, 2021, 14: 521-537.

[17] ZHANG Y N, DENG J R, DENG H W, et al. Peridynamics simulation of rock fracturing under liquid carbon dioxide blasting[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2019, 28(7): 1038-1052.

[18] 朱红钧. FLUENT 15.0 流场分析实战指南[M].北京:人民邮

- 电出版社,2015.
- ZHU Hongjun. Fluent 15.0 Practical Guide for Flow Field Analysis [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2015.
- [19] 高波,寇子明. 基于 Fluent 射流器负压产生机理的研究[J]. 煤矿机械,2012,33(7):77-79.
- GAO Bo, KOU Ziming. Mechanism research of negative pressure produced for jet device based on Fluent[J]. Coal Mine Machinery, 2012,33(7):77-79.
- [20] 王海艳,刘纪新,于晓,等. 新型孔式环形射流泵的结构设计及仿真分析[J]. 煤炭技术,2019,38(1):160-163.
- WANG Haiyan, LIU Jixin, YU Xiao, et al. Structure design and simulation analysis of new-type perforated annular jet pump[J]. Coal Technology,2019,38(1):160-163.