

中文引用格式:鲁寨军,王志富,姚术健,等. 38 mm 型 CO₂ 致裂器内部参数对致裂器做功能力影响[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9): 78-86.

英文引用格式:LU Zhaijun, WANG Zhifu, YAO Shujian, et al. Impact of internal parameters on the fracturing performance of 38 mm CO₂ fracturing tool [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 78-86.

38 mm 型 CO₂ 致裂器内部参数对致裂器 做功能力影响*

鲁寨军^{1,2}教授, 王志富^{1,2}, 姚术健^{1,2}教授, 钟睦^{**1,2},
史湘石^{1,2}, 陈斐鹏^{1,2}

(1 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075;

2 中南大学 极端流体力能前沿科学中心, 湖南 长沙 410075)

中图分类号: X924.2 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.09.1378

基金项目: 国家自然科学基金资助(12272414); 湖南省自然科学基金资助(2023RC3045); 湖南省科技创新计划项目(2023RC1026); 中南大学研究生创新项目(QL20230075)。

【摘要】 为快速获得液态 CO₂ 致裂器内部参数对致裂器做功能力的影响特征, 优化提高液态 CO₂ 致裂器做功能力, 提高煤层瓦斯抽采效率, 设计液态 CO₂ 致裂器做功能力快速评估试验装置。使用煤矿用 38 mm 型致裂器进行 4 水平 3 因素的 9 组正交试验, 分析液态 CO₂ 致裂器发热管内部装药量、主管内液态 CO₂ 填充量、泄能片厚度以及泄能头释放口径对于致裂器做功能力的影响主次顺序; 进一步对其中最重要的影响因素进行固定变量试验, 分析最重要影响因素对液态 CO₂ 致裂器做功能力的影响特征。结果表明: 对于煤矿用 38 mm 型 CO₂ 致裂器, 泄能片厚度对于液态 CO₂ 致裂器做功能力的影响最大, 发热管内部装药量次之, 主管内液态 CO₂ 填充量及泄能头释放口径影响最弱; 液态 CO₂ 致裂器做功能力随着泄能片的厚度增加而增加, 但当泄能片厚度增加到一定程度时, 液态 CO₂ 致裂器做功能力增幅不够明显, 达到一定厚度泄能片不会破裂, 当 38 mm 型致裂器内部参数设置为 CO₂ 质量 0.33 kg、释放口径 18 mm、装药量 60 g、泄能片厚度 2.0 mm 时致裂器做功能力对应三硝基甲苯(TNT) 当量为 0.202 kg, 相对当前工地使用参数做功能力提升 21.9%。

【关键词】 CO₂ 致裂器; 内部参数; 做功能力; 液态 CO₂ 填充量; 发热管内部装药量; 泄能片厚度; 泄能头释放口径

Impact of internal parameters on the fracturing performance of 38 mm CO₂ fracturing tool

LU Zhaijun^{1,2}, WANG Zhifu^{1,2}, YAO Shujian^{1,2}, ZHONG Mu^{1,2},
SHI Xiangshi^{1,2}, CHEN Feipeng^{1,2}

(1 School of Transportation Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410075, China;

2 Research Center of Advanced Scientific Research on Extreme Fluid Power, Central South University,

Changsha Hunan 410075, China)

* 文章编号: 1003-3033(2024)09-0078-09; 收稿日期: 2024-03-11; 修稿日期: 2024-06-12

** 通信作者: 钟睦(1970—), 男, 湖南邵阳人, 硕士, 讲师, 主要从事 CO₂ 液气相变技术理论与应用研究。E-mail: zhongmu@csu.edu.cn。

Abstract: In order to swiftly elucidate the influence of internal parameters on the fracturing performance of a liquid CO₂ fracturing tool and optimize its functionality for enhanced coal seam gas extraction efficiency, a rapid assessment experimental apparatus was designed. A set of 9 orthogonal experiments involving 4 horizontal and 3 influencing factors was conducted utilizing a 38 mm mining-specific fracturing tool. The study analyzed the relative significance of the internal charge quantity in the heating tube, liquid CO₂ filling volume in the main pipe, the thickness of the fracture plate, and the caliber of the release aperture on the fracturing tool's performance. Furthermore, pivotal influencing factors were subjected to fixed-variable experiments to explore their impact patterns on the fracturing performance of the liquid CO₂ fracturing tool. Results indicate that, for the 38 mm mining-specific CO₂ fracturing tool, the thickness of the fracture plate exerts the most substantial influence on the fracturing tool's performance, followed by the internal charge quantity in the heating tube. The impact of the liquid CO₂ filling volume in the main pipe and the caliber of the release aperture is comparatively weaker. The fracturing performance of the liquid CO₂ fracturing tool gradually stabilizes with an increase in the thickness of the fracture plate, reaching a point where the plate does not rupture. When the internal parameters of the 38 mm fracturing tool are set to a CO₂ mass of 0.33 kg, a release caliber of 18 mm, a charge quantity of 60 g, and a fracture plate thickness of 2.0 mm, the tool's fracturing performance corresponds to a TNT(Trinitrotoluene) equivalent of 0.202 kg which is enhanced by 21.9% compared to the current on-site parameters.

Keywords: CO₂ fracturing tool; internal parameters; capacity to do work; liquid CO₂ filling volume; internal charge quantity in heating tube; thickness of fracture plate; caliber of release aperture

0 引言

煤炭开采过程伴随着大量煤层气产生,给煤矿生产带来较多安全问题^[1],如煤矿瓦斯含量过高,可能引发瓦斯突出、爆炸等事故。目前,用于提高煤层气抽采效率的方法主要有水力压裂^[2-3]、液压开槽^[4]、深孔预裂爆破技术^[5]、气体压裂技术^[6]、瓦斯抽采钻孔技术^[7]等。液态 CO₂ 相变压裂技术压裂半径范围较大,在有效开采煤层气方面具有更广泛的应用前景。常见的液态 CO₂ 相变致裂器的做功能力有限,无法满足厚煤层压裂改造的要求,因此,需要提高液态 CO₂ 相变致裂器的做功能力,扩大其致裂范围,以满足厚煤层压裂改造的要求。

诸多学者围绕液态 CO₂ 相变致裂器的做功能力开展了深入研究。沈玉旭等^[8]利用数值模拟方法研究了单孔、多孔以及不同钻孔间距下的液态 CO₂ 相变致裂低透气煤层裂隙扩展规律;马小敏^[9]提出工作面分区增透高效抽采技术,运用分组试验和理论分析方法,研究了不同布孔工艺参数条件下 CO₂ 相变致裂对低透气煤层瓦斯抽采的增透作用规律;贾进章等^[10-11]研究了地应力、瓦斯压力、煤体抗拉强度及孔径大小对液态 CO₂ 相变致裂半径的影响,并研究了双孔同时起爆应力波的传播特征、控制孔

对煤体裂隙扩展规律的影响,双孔爆破有效致裂半径明显提高;YAN Hao 等^[12]研究了不同煤岩界面强度对 CO₂ 致裂注入压力-时间演化规律的影响,分析了 CO₂ 裂纹在煤岩界面区域的扩展模式,揭示了煤岩界面强度对裂纹扩展规律的影响。尤横等^[13]考虑了 CO₂ 充装质量、激发药剂质量和泄能片厚度等不同影响因素下致裂管中压力变化规律,并给出 73 型号致裂器的最大爆破当量;SHANG Zheng 等^[14]研究了 CO₂ 致裂器的泄能头释放口径、泄能片厚度以及注液密度对致裂器内部压力变化的影响;ZHANG Yanan 等^[15]分析了致裂器释放压力及致裂器泄能头释放口径对液体 CO₂ 爆破效果下岩石裂纹扩展机制。

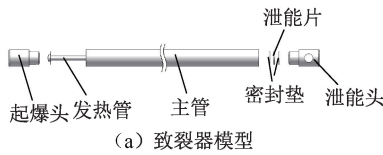
大量研究集中于 CO₂ 致裂器外界影响因素,如孔网参数布置、煤层抗拉强度、地应力、瓦斯应力对煤层扩展机制、范围等。然而,CO₂ 致裂器作为 CO₂ 气体压裂技术的能量储备器,是 CO₂ 气体做功的源头,CO₂ 致裂器内部本身各参数设置对 CO₂ 做功性能有着重要影响,当前研究较少,且未分析内部参数对 CO₂ 致裂器做功能力的量化特性,并基于该特性优化参数。鉴于此,笔者拟搭建致裂器做功能力快速评估试验系统,并基于 4 个致裂器的可调参数,设计正交试验,分析 4 个主要参数对 CO₂ 致裂器做功

能力的影响权重,在此基础上进行扩展延伸,进一步分析主要影响因素对于 CO₂ 致裂器做功能力的影响特性,以期为提高液态 CO₂ 致裂能力提供理论参考与借鉴。

1 内部参数对做功能力影响权重试验

1.1 试验装置设计及做功能力评估原理

CO₂ 致裂器的模型结构如图 1 所示,其中,CO₂ 致裂器本身可调的参数为发热管内部装药量、主管内液态 CO₂ 填充量、泄能片厚度以及泄能头释放口径。



(a) 致裂器模型



(b) 煤矿用外径38 mm型CO₂致裂器

图 1 CO₂ 致裂器

Fig. 1 CO₂ blasting device

CO₂ 致裂器本身可调的参数为发热管内部装药量、主管内液态 CO₂ 填充量、泄能片厚度以及泄能头释放口径,为定量评估以上参数设置对 CO₂ 相变致裂器做功能力的影响,设计做功能力快速评估试验系统,如图 2 所示。

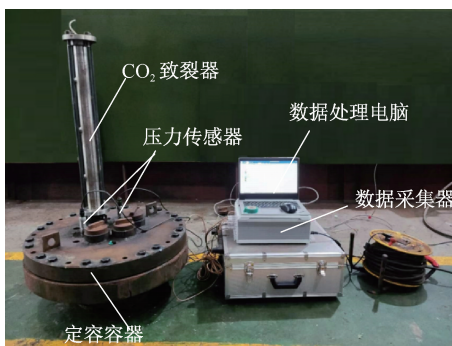


图 2 做功能力评估试验装置

Fig. 2 Experimental device for evaluating work ability

做功能力快速评估试验系统置包括 CO₂ 致裂器(为防止爆炸,管壁已加厚)、定容容器、压力传感器、数据采集器以及数据处理电脑。当 CO₂ 致裂器压力达到泄能片破裂强度,CO₂ 从泄能头释放口喷入到定容容器中,定容容器中压力上升到峰值 p ,结合定容容器中 CO₂ 的密度 ρ ,采用真实气体方程即可计算出定容容器中 CO₂ 内能,通过比较定容容器

中 CO₂ 内能的大小,评估不同参数设计下 CO₂ 致裂器做功能力的大小。依据文献[16]结果,选择 Feng 真实气体方程^[17]来计算 CO₂ 的物性参数。

$$\begin{aligned} \frac{p}{\rho R_g T} = & 1 + b_2 \rho' + b_3 \rho'^2 + b_4 \rho'^3 + b_5 \rho'^4 + b_6 \rho'^5 + \\ & b_7 \rho'^2 \exp[-c_{21} \rho'^2] + b_8 \rho'^4 \exp[-c_{21} \rho'^2] + \\ & c_{22} \rho' \exp[-c_{27} (\Delta T)^2] + \\ & c_{23} \frac{\Delta p}{\rho'} \exp[-c_{25} (\Delta p)^2 - c_{27} (\Delta T)^2] + \\ & c_{24} \frac{\Delta p}{\rho'} \exp[-c_{26} (\Delta p)^2 - c_{27} (\Delta T)^2] \end{aligned} \quad (1)$$

式中: R_g 为 CO₂ 气体常数,0.188 9 J/(g · K); T 为 CO₂ 的温度,K; ρ' 为中间变量; ΔT 、 Δp 为中间变量,具体计算见下式; $c_1 \sim c_{27}$ 及 $b_2 \sim b_8$ 为系数,具体的值见表 1。

$$\rho' = \frac{\rho}{\rho_c} \quad (2)$$

式中 ρ_c 为 CO₂ 临界密度,取 467.6 kg/m³。

表 1 Feng 方程的参数

Table 1 Parameters of Feng equation

| | | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------------|
| c_1 | 0.376 194 | c_{15} | -2.794 98 |
| c_2 | 0.118 836 | c_{16} | 5.623 93 |
| c_3 | -3.043 79 | c_{17} | -2.938 31 |
| c_4 | 2.274 53 | c_{18} | 0.988 759 |
| c_5 | -1.238 63 | c_{19} | -3.047 11 |
| c_6 | 0.250 442 | c_{20} | 2.323 16 |
| c_7 | -0.115 350 | c_{21} | 1.073 79 |
| c_8 | 0.675 104 | c_{22} | -0.000 059 972 4 |
| c_9 | 0.198 861 | c_{23} | 0.000 088 533 9 |
| c_{10} | 0.216 124 | c_{24} | 0.003 164 18 |
| c_{11} | -0.583 148 | c_{25} | 10 |
| c_{12} | 0.011 974 7 | c_{26} | 50 |
| c_{13} | 0.053 727 8 | c_{27} | 800 00 |
| c_{14} | 0.026 521 6 | — | — |
| b_2 | $c_1 + \frac{c_2}{T'} + \frac{c_3}{T'^2} + \frac{c_4}{T'^3} + \frac{c_5}{T'^4} + \frac{c_6}{T'^5}$ | | |
| b_3 | $c_7 + \frac{c_8}{T'} + \frac{c_9}{T'^2}$ | | |
| b_4 | $c_{10} + \frac{c_{11}}{T'}$ | | |
| b_5 | $c_{12} + \frac{c_{13}}{T'}$ | | |
| b_6 | $\frac{c_{14}}{T'}$ | | |
| b_7 | $\frac{c_{15}}{T'^3} + \frac{c_{16}}{T'^4} + \frac{c_{17}}{T'^5}$ | | |
| b_8 | $\frac{c_{18}}{T'^3} + \frac{c_{19}}{T'^4} + \frac{c_{20}}{T'^5}$ | | |

$$\Delta T = 1 - T'; \Delta \rho = 1 - \rho' \quad (3)$$

$$\text{其中, } T' = \frac{T}{T_c} \quad (4)$$

式中 T_c 为 CO₂ 临界温度,取 304.13 K。

Feng 方程的具体焓 h 可描述为:

$$\begin{aligned} \frac{h - h_0}{R_g T} = & \left(\frac{p}{\rho R_g T} - 1 \right) + \left(\frac{c_2}{T'} + 2 \frac{c_3}{T'^2} + 3 \frac{c_4}{T'^3} + \right. \\ & 4 \frac{c_5}{T'^4} + 5 \frac{c_6}{T'^5} \left. \right) \rho' + \frac{1}{2} \left(\frac{c_8}{T'} + 2 \frac{c_9}{T'^2} \right) \rho'^2 + \\ & \frac{1}{3} \left(\frac{c_{11}}{T'} \right) \rho'^3 + \frac{1}{4} \left(\frac{c_{13}}{T'} \right) \rho'^4 + \frac{1}{5} \left(\frac{c_{14}}{T'} \right) \rho'^5 + \\ & \frac{1}{c_{21}^2} \left(3 \frac{c_{18}}{T'^3} + 4 \frac{c_{19}}{T'^4} + 5 \frac{c_{20}}{T'^5} \right) \times \\ & [1 - (1 + c_{21} \rho'^2) \exp(-c_{21} \rho'^2)] - \\ & 2c_{22} c_{27} T' \Delta T \rho' \exp[-c_{27} (\Delta T)^2] + \\ & \frac{c_{23} c_{27}}{c_{25}} T' \Delta T \exp[-c_{25} (\Delta \rho)^2 - c_{27} (\Delta T)^2] + \\ & \frac{1}{c_{21}^2} \left(3 \frac{c_{15}}{T'^3} + 4 \frac{c_{16}}{T'^4} + 5 \frac{c_{17}}{T'^5} \right) [1 - c_{27} (\Delta T)^2] + \\ & \frac{c_{24} c_{27}}{c_{26}} T' \Delta T \exp[-c_{26} (\Delta \rho)^2 - c_{27} (\Delta T)^2] \quad (5) \end{aligned}$$

式中 $h_0 = \int_0^T c_p dT$ 为 CO₂ 的初始焓值,比热容 c_p 可用下式描述:

$$c_p = 0.45 + 1.67\eta - 1.27\eta^2 + 0.39\eta^3 \quad (6)$$

其中,

$$\eta = \frac{T}{1\,000\,000} \quad (7)$$

内能 u 表示为:

$$u = h - \frac{p}{\rho} \quad (8)$$

式中 h 为 CO₂ 的焓。

1.2 试验参数设置

采用煤矿用 38 mm 型 CO₂ 致裂器进行正交试

验,当前煤矿现场中 38 mm 型 CO₂ 致裂器使用参数为泄能片厚度设置 1.5 mm,液态 CO₂ 填充量为 0.36 kg,发热管内部装药量 50 g,泄能头释放口径 22 mm。

为保证工作现场实际使用效果,相关参数不宜设置太低,做功能力太低失去使用意义;考虑到试验安全,如果参数设置太高,CO₂ 致裂器可能存在爆炸风险,所以参数不宜设置太高,故正交试验中参数设置围绕目前现场使用参数展开。泄能片厚度设为 1.0、1.5、2.0 mm,液态 CO₂ 填充量设为 0.33、0.36、0.39 kg,发热管内部装药量设为 40、50、60 g,因为结构尺寸原因,泄能头释放口径最大只能为 22 mm,故参数只能以下降梯度设置,为 22、20、18 mm。CO₂ 致裂器做功能力主要影响因素研究的正交试验工况见表 2。

表 2 参数影响研究正交试验

| 试验号 | 泄能片厚度/mm | CO ₂ 质量/kg | 释放口径/mm | 装药量/g |
|-----|----------|-----------------------|---------|-------|
| 1 | 1.0 | 0.33 | 18 | 40 |
| 2 | 1.0 | 0.36 | 20 | 50 |
| 3 | 1.0 | 0.39 | 22 | 60 |
| 4 | 1.5 | 0.33 | 20 | 60 |
| 5 | 1.5 | 0.36 | 22 | 40 |
| 6 | 1.5 | 0.39 | 18 | 50 |
| 7 | 2.0 | 0.33 | 22 | 50 |
| 8 | 2.0 | 0.36 | 18 | 60 |
| 9 | 2.0 | 0.39 | 20 | 40 |

1.3 正交试验结果

正交试验定容容器内压力曲线如图 3 所示,定容容器内峰值压力见表 3,获得定容容器内峰值压力后可根据 Feng 方程计算得到定容容器内 CO₂ 所含内能,见表 4。

表 3 定容容器压力峰值

| 试验号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 定容容器压力峰值 | 1.23 | 1.21 | 1.34 | 1.76 | 1.30 | 1.39 | 1.65 | 1.80 | 1.35 |

表 4 各试验对应 CO₂ 内能

| 试验号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CO ₂ 内能 | 176.14 | 183.02 | 196.70 | 225.12 | 188.79 | 201.29 | 218.07 | 238.24 | 198.87 |

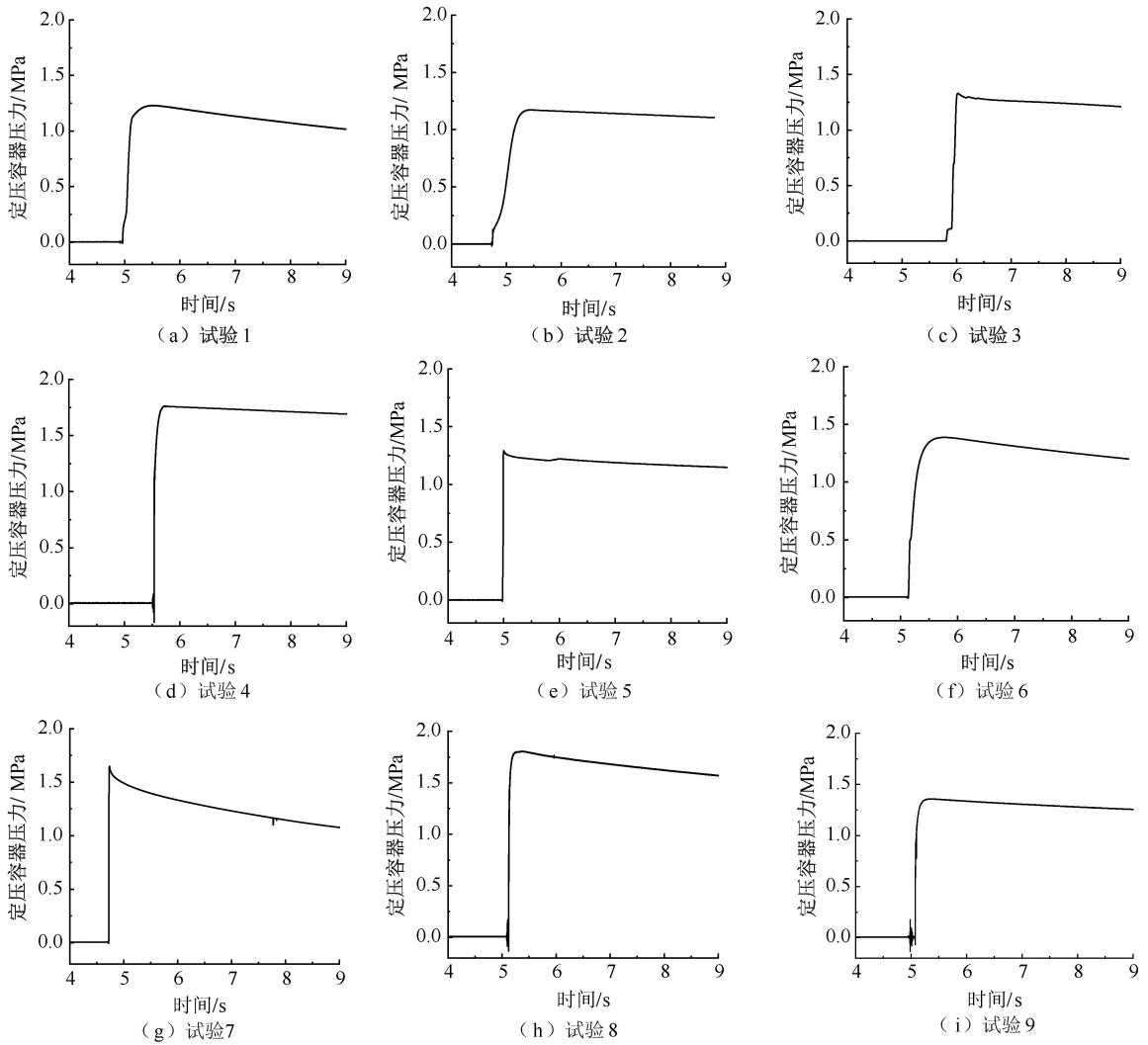


图3 定压容器压力曲线

Fig.3 Pressure curve of constant pressure vessel

2 正交试验结果分析

2.1 极差分析

根据 Feng 方程所计算定压容器内 CO₂ 所含内能,计算并分析各影响因素的极差大小,正交试验结果见表 5。

表 5 正交试验结果

Table 5 Orthogonal test results table

| 试验号 | 泄能片厚度 | CO ₂ 质量 | 释放口径 | 装药量 | CO ₂ 内能/kJ |
|-----|-------|--------------------|------|------|-----------------------|
| 1 | 水平 1 | 水平 1 | 水平 1 | 水平 1 | 176.14 |
| 2 | 水平 1 | 水平 2 | 水平 2 | 水平 2 | 183.02 |
| 3 | 水平 1 | 水平 3 | 水平 3 | 水平 3 | 196.70 |
| 4 | 水平 2 | 水平 1 | 水平 2 | 水平 3 | 225.12 |
| 5 | 水平 2 | 水平 2 | 水平 3 | 水平 1 | 188.79 |
| 6 | 水平 2 | 水平 3 | 水平 1 | 水平 2 | 201.29 |

续表 5

| 试验号 | 泄能片厚度 | CO ₂ 质量 | 释放口径 | 装药量 | CO ₂ 内能/kJ |
|-----|-------|--------------------|------|------|-----------------------|
| 7 | 水平 3 | 水平 1 | 水平 3 | 水平 2 | 218.07 |
| 8 | 水平 3 | 水平 2 | 水平 1 | 水平 3 | 238.24 |
| 9 | 水平 3 | 水平 3 | 水平 2 | 水平 1 | 198.87 |

极差分析见表 6。表 6 中, R 为各影响因素的极差,由表 6 可知:泄能片厚度的极差 $R_A = 33.11$,发热管内部装药量的极差 $R_D = 32.09$,远大于泄能头释放口径的极差 $R_C = 4.04$ 与液态 CO₂ 填充量的极差 $R_B = 7.49$,表明对于 38 mm 型煤矿用 CO₂ 致裂器,泄能片厚度与发热管内部装药量对于致裂器释放后 CO₂ 所含内能影响显著,泄能头释放口径与液态 CO₂ 填充量对于 CO₂ 内能影响较小。

每个影响因素下的 K_i 值表示试验结果中该影响因素水平为 i 的 3 组试验的 CO₂ 内能之和, $k_i =$

K_i/n , n 为水平数, k_i 为 K_i 的均匀化结果, K_i 与 k_i 直观反映了影响因素的不同水平对 CO₂ 内能的影响。每个影响因素下的 k_i 越大, 表示该影响因素取 i 水平时的 CO₂ 内能越大, 根据 k_i 计算值绘制 4 个因素的水平趋势如图 4 所示。由图 4a、图 4d 可得, 泄能片厚度、发热管内部装药量与致裂器释放后 CO₂ 所含内能的大小呈正相关, 由图 4b、图 4c 看出, 液态 CO₂ 填充量、泄能头释放口径与致裂器释放后 CO₂ 所含内能大小呈负相关。

表 6 极差分析

Table 6 Range analysis

| 变量 | 泄能片厚度 | CO ₂ 质量 | 释放口径 | 装药量 |
|-------|--------|--------------------|--------|--------|
| K_1 | 555.86 | 619.33 | 617.67 | 563.8 |
| K_2 | 615.2 | 612.05 | 607.01 | 602.38 |
| K_3 | 657.18 | 596.86 | 603.56 | 662.06 |
| k_1 | 185.29 | 206.44 | 205.89 | 187.93 |
| k_2 | 205.07 | 204.02 | 202.34 | 200.79 |
| k_3 | 219.06 | 198.95 | 201.19 | 220.69 |
| R | 33.11 | 7.49 | 4.04 | 32.09 |

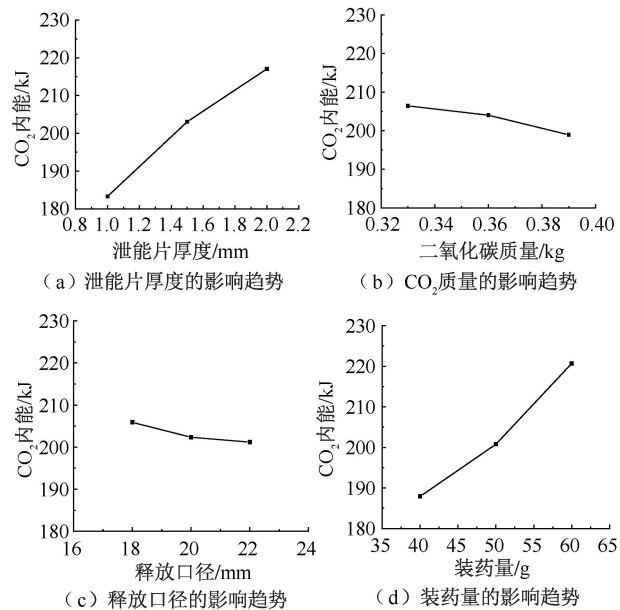


图 4 各因素水平趋势

Fig. 4 Run chart of each factor level

2.2 方差分析

根据方差分析验证正交试验的结果, 由 2.1 节中极差分析的结论可知: 泄能头释放口径大小对内能的影响显著性最低, 因此, 将泄能头释放口径大小合并到误差项中分析, 方差分析结果见表 7。表 7 中, F 值表示影响因素影响液态 CO₂ 相变爆破致裂强度的大小, F 值越大, 影响强度越大。可知: 各因素对于液态 CO₂ 相变爆破致裂强度影响的主次顺

序依次为泄能片厚度、发热管内部装药量、液态 CO₂ 填充量、泄能头释放口径。表中最后一列 P 值在多因素试验设计中表示各因素对试验的影响程度, 即因素在试验中的重要性。 P 值越小, 认为该因素越重要。当 $0 \leq P \leq 0.05$ 时, 认为该影响因素是重要因素。置信度 = $(1-P) \times 100\%$, 文中 P 值选用 0.05, 则对应置信度为 95%。由 P 值得出, 38 mm 型煤矿用 CO₂ 致裂器内部参数对其做功能力大小的影响显著性为: 泄能片厚度 > 发热管内部装药量 > 液态 CO₂ 填充量 > 泄能头释放口径, 泄能片厚度及发热管内部装药量为重要影响因素。方差分析结果与极差分析结果保持一致, 验证了正交试验结果的可靠性。

表 7 正交设计方差分析

Table 7 Orthogonal design anova table

| 方差来源 | 离差平方和 | 自由度 | 均方 | F 值 | P 值 |
|--------------------|----------|------|--------|-------|-------|
| 泄能片厚度 | 1 664.90 | 2.00 | 832.45 | 64.16 | 0.015 |
| CO ₂ 质量 | 85.00 | 2.00 | 42.50 | 3.28 | 0.233 |
| 释放口径 | 25.95 | 2.00 | 12.98 | 1 | 0.5 |
| 装药量 | 1 564.60 | 2.00 | 782.30 | 60.29 | 0.016 |

CO₂ 致裂器内部各参数之间的交互作用也可能存在影响, 由表 7 中 P 值可知: 液态 CO₂ 填充量以及泄能头释放口径的影响远远低于泄能片厚度与发热管内部装药量带来的影响, 所以忽略液态 CO₂ 填充量以及泄能头释放口径与其他参数的交互影响, 仅分析泄能片厚度与发热管内部装药量的交互作用。图 5 为泄能片厚度与装药量交互作用图。由图 5 可知: 二者存在交互作用, 但 3 条线几乎平行, 可见交互作用微弱。综上所述, CO₂ 致裂器内部参数相互之间的交互作用对致裂器做功能力大小影响可忽略。

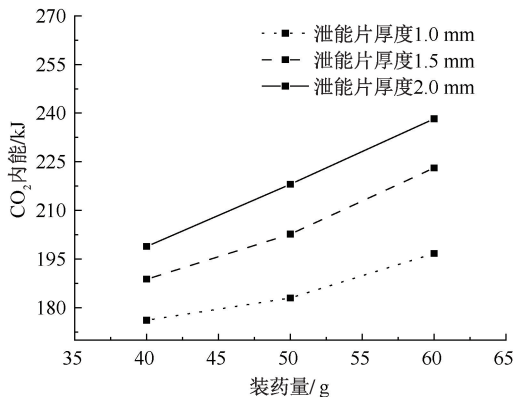


图 5 泄能片厚度与装药量交互作用

Fig. 5 Diagram of interaction between the thickness of the fracture plate and the charge

泄能片厚度对致裂器释放后 CO₂ 所含内能大

小影响大是因为当发热管内部装药量一致时,药剂燃烧后,致裂器内液态 CO₂ 吸热使致裂器内压力上升,当泄能片厚度较薄时,泄能片破裂较早,此时致裂器内药剂未充分燃烧即随 CO₂ 喷出,燃烧效率较低,CO₂ 获得的能量少,使得 CO₂ 所含内能小,导致其做功能力低;当泄能片厚度较厚时,泄能片破裂晚,此时致裂器内药剂在充分燃烧后才随 CO₂ 喷出,燃烧效率高,CO₂ 获得的能量高,使得 CO₂ 所含内能大,使其具有较高的做功能力。

极差分析与方差分析结果一致,说明试验结果可靠。各因素交互作用影响分析结果证明 2 个主要影响因素泄能片厚度与发热管内部装药量交互作用微弱,可以忽略。所以,可确定在正交试验工况中以 2.0 mm 泄能片厚度、0.33 kg 液态 CO₂ 填充量、18 mm 泄能头释放口径、60 g 发热管内部装药量作为 38 mm 型煤矿用 CO₂ 致裂器使用参数可以获得更高的膨胀做功能力。

3 泄能片厚度对致裂器做功能力影响

根据第 2 节中正交试验结论,泄能片厚度与发热管内部装药量均具有重要影响,但是,增加发热管内部装药量会提高 CO₂ 致裂器内部的压力。当前煤矿现场中药量较大,试验中最大药量已经高于煤矿现场药量,如果药量再增加,可能会发生爆管危险,出于对试验安全的考虑,不探究发热管内部装药量影响特性。在保持液态 CO₂ 填充量 0.33 kg、泄能头释放口径 18 mm、发热管内部装药量 60 g 不变的情况下通过改变泄能片厚度,进行做功能力评估试验。选取对 38 mm 型致裂器做功能力影响最大的影响因素泄能片厚度作为研究对象,开展泄能片厚度对致裂器做功能力影响的试验,试验工况见表 8。

表 8 泄能片厚度对致裂器做功能力影响试验研究
试验工况

Table 8 Experimental study on the influence of energy release plate thickness on the work capacity of a cracker under different working condition

| 试验号 | 泄能片厚度/mm | CO ₂ 质量/kg | 释放口径/mm | 装药量/g |
|-----|----------|-----------------------|---------|-------|
| 1 | 1.0 | 0.33 | 18 | 60 |
| 2 | 1.2 | 0.33 | 18 | 60 |
| 3 | 1.4 | 0.33 | 18 | 60 |
| 4 | 1.6 | 0.33 | 18 | 60 |
| 5 | 1.8 | 0.33 | 18 | 60 |
| 6 | 2.0 | 0.33 | 18 | 60 |
| 7 | 2.2 | 0.33 | 18 | 60 |

定容容器压力如图 6 所示。可见,在液态 CO₂ 填充量、发热管内部装药量以及泄能头释放口径固定的前提下,随着泄能片厚度从 1.0 mm 增加到 1.6 mm,定容容器压力从 1.56 MPa 增加到 2.08 MPa,压力增加较为明显;泄能片厚度从 1.6 mm 增加到 2.0 mm,定容容器压力仅从 2.08 MPa 增加到 2.21 MPa,增加不够明显;泄能片厚度从 2.0 mm 增加到 2.2 mm,泄能片未发生破裂,可见,对于特定型号的致裂器存在最大泄能片厚度,超过该厚度,泄能片不会破裂,致裂器失效。

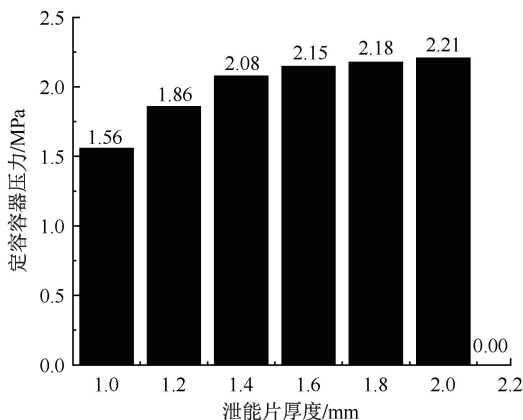


图 6 不同泄能片厚度对应定容容器压力对比
Fig. 6 Comparison of pressure in fixed volume vessels corresponding to different thickness of energy release plates

根据 Feng 方程计算得到不同工况下定容容器 CO₂ 所含内能对比,如图 7 所示。定容容器内 CO₂ 所含内能随着泄能片厚度增加而增加,但是,增加幅度不够明显,当增加至 2.0 mm 时,接近最大,即致裂器内药剂燃烧效率最高。当泄能片厚度超过 2.0 mm,致裂器内压力将不足以使泄能片破裂,致裂器失效。综合第 2 节分析,可确定对于 38 mm 型煤矿用 CO₂ 致裂器以 2.0 mm 泄能片厚度、0.33 kg 液态 CO₂ 填充量、18 mm 泄能头释放口径、60 g 发热管内部装药量作为使用参数可以获得更高的膨胀做功能力。

使用做功能力评估试验系统,对当前煤矿现场中 38 mm 型 CO₂ 致裂器进行做功能力评估试验,结果如图 8 所示。定压容器内压力仅为 1.37 MPa,根据 Feng 方程计算得到此时定压容器内 CO₂ 所含内能为 232.0 kJ。与之相比,采用优化后的参数设置时,定压容器内 CO₂ 所含内能为 282.9 kJ,致裂器膨胀做功能力提升 21.9 %。

在爆破工程中,采用三硝基甲苯(Trinitrotoluene, TNT)当量 W 来表征爆破器材的爆破威力,TNT 当

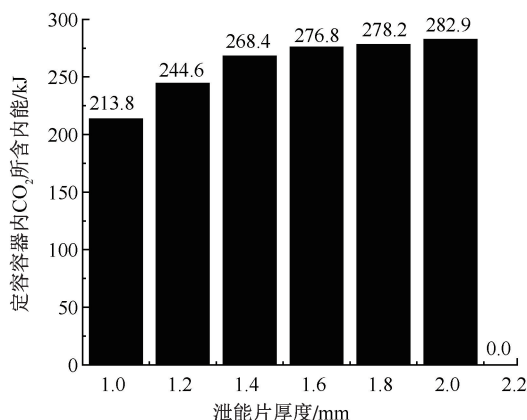


图7 不同泄能片厚度对应定容容器内 CO₂ 内能对比

Fig.7 Comparison of CO₂ internal energy in a constant volume container corresponding to different thicknesses of energy release plates

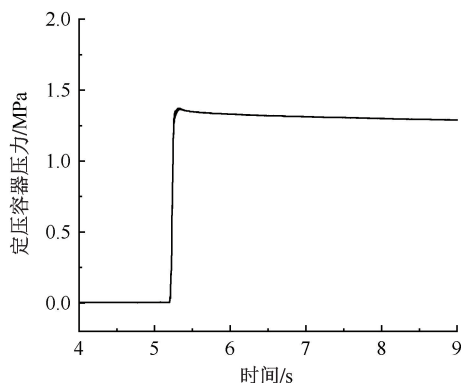


图8 使用现工地参数所测定压力容器压力曲线

Fig.8 Pressure curve of the pressure vessel was measured using the current site parameters

量计算见下式^[11]：

$$W = \frac{E_g}{Q} \quad (9)$$

式中： E_g 为定压容器内 CO₂ 所含内能，kJ； Q 为 1 kg TNT 爆炸能，取 4 250 kJ/kg。

计算得到液态 CO₂ 填充量 0.33 kg、泄能头释放口径 18 mm、发热管内部装药量 60 g、泄能片厚度 2.0 mm 时，38 mm 型煤矿用致裂器对应的 W 为 0.202 kg。

4 结 论

1) 38 mm 型煤矿用 CO₂ 致裂器内部参数对其做功能力大小的影响显著性为：泄能片厚度>发热管内部装药量>液态 CO₂ 填充量>泄能头释放口径。且泄能片厚度及发热管内部装药量为重要影响因素。

2) 在其他参数固定时，随着泄能片的厚度增加，定容容器压力逐渐增加，但增加幅度逐渐不够明显，对于特定型号的致裂器存在最大泄能片厚度，超过该厚度，泄能片不会破裂，致裂器失效。

3) 相较于实践中工地使用参数，采用 2.0 mm 泄能片厚度、60 g 发热管内部装药、18 mm 泄能头释放口径、0.33 kg 液态 CO₂ 这些参数时，38 mm 型煤层液态 CO₂ 相变致裂器做功能力提高 21.9%，对应 TNT 当量为 0.202 kg。

5 致 谢

特别感谢湖南训保军训器材有限公司，为本文研究提供相关试验器材。

参 考 文 献

- [1] 曹焜, 孙海涛, 戴林超, 等. 煤与瓦斯突出动力效应的模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 113-120.
CAO Jie, SUN Haitao, DAI Linchao, et al. Simulation research on dynamic effect of coal and gas outburst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 113-120.
- [2] 贾进章, 葛佳琪, 甄纹浩, 等. 水力压裂增透技术及应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(10): 63-68.
JIA Jinzhang, GE Jiaqi, ZHEN Wenhao, et al. Research and application of anti-reflection technology of hydraulic fracturing[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(10): 63-68.
- [3] 巩泽文. 基于 RFPA-3D 的煤层钻孔水力压裂裂缝扩展规律数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7 310-7 316.
GONG Zewen. Numerical simulation of crack propagation law of coal seam drilling hydraulic fracturing based on RFPA-3D[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(17): 7 310-7 316.
- [4] 常智. 龙马溪组页岩气储层交替注液压裂裂缝扩展规律研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2019.
CHANG Zhi. Study on fracture propagation law of shale gas reservoir of Longmaxi formation subject to alternating fluid

- injection hydraulic fracturing treatment[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2019.
- [5] WU Haojun, GONG Min, WU Xiaodong, et al. Effect and response of coal and rock media conditions on deep-hole pre-splitting blasting techniques for gas drainage[J]. *Energies*, 2022, 15(22): DOI:10.1016/j. jgsce. 2023. 204943.
- [6] WEI Xiangrui, WANG Xiang, WU Guangan, et al. Research and application of high-energy gas fracturing mechanism based on CT scanning technology[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(11): 7981–7996.
- [7] 赵鹏翔, 常泽晨, 李树刚, 等. 厚煤层采空区定向钻孔分域抽采研究及应用[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(1): 70–79.
- ZHAO Pengxiang, CHANG Zechen, LI Shugang, et al. Research and application of directional drilling sub area extraction in thick coal seam goaf[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(1): 70–79.
- [8] 沈玉旭, 张文阳, 崔凯, 等. 煤层液态 CO₂ 相变致裂增透技术试验研究[J]. *矿业研究与开发*, 2022, 42(1): 133–138.
- SHENG Yuxu, ZHANG Wenyang, CUI Kai, et al. Experimental study on permeability enhancement technology by liquid CO₂ phase change fracturing in coal seam[J]. *Mining Research and Development*, 2022, 42(1): 133–138.
- [9] 马小敏. 超长工作面 CO₂ 相变致裂分区增透高效抽采技术试验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(7): 57–61.
- MA Xiaomin. Experimental study on partitioned permeability enhancement high-efficiency extraction technology of CO₂ phase change fracturing in ultra-long working face[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(7): 57–61.
- [10] 费进章, 李斌, 王东明. 煤层液态 CO₂ 相变致裂半径范围的影响因素研究[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(4): 57–63.
- JIA Jingzhang, LI Bin, WANG Dongming. Study on influencing factors of cracking radius range caused by liquid CO₂ phase transition in coal seams[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(4): 57–63.
- [11] 费进章, 邢迎欢, 李斌, 等. 液态 CO₂ 相变爆破孔网参数优化研究[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(6): 1868–1879.
- JIA Jinzhang, XING Yinghuan, LI Bin, et al. Study on optimization of hole network parameters of liquid CO₂ phase change blasting[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(6): 1868–1879.
- [12] YAN Hao, WANG Wenlong, ZHANG Jixiong, et al. Experimental study on the influence of coal-rock interface strength on crack propagation law of supercritical carbon dioxide fracturing[J]. *Gas Science and Engineering*, 2023, 112: DOI: 10.1016/j. jgsce. 2023. 204943.
- [13] 尤横, 岳中文, 杨海斌, 等. CO₂ 相变爆破致裂管内压力变化试验研究[J]. *工程爆破*, 2023, 29(5): 105–112.
- YOU Heng, YUE Zhongwen, YANG Haibin, et al. Experimental study on pressure change in cracking tube during process of CO₂ phase change blasting[J]. *Engineering Blasting*, 2023, 29(5): 105–112.
- [14] SHANG Zheng, WANG Haifeng, LI Bing, et al. Experimental investigation of BLEVE in liquid CO₂ phase-transition blasting for enhanced coalbed methane recovery[J]. *Fuel*, 2021, 292(7): DOI:10.1016/j. fuel. 2021. 120283.
- [15] ZHANG Yanan, DENG Junren, DENG Hongwei, et al. Peridynamics simulation of rock fracturing under liquid carbon dioxide blasting[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2019, 28(7): 1038–1052.
- [16] YAO Hongxin, WEI Xuezhong, YE Hong. Supercritical carbon dioxide as a new working medium for pneumatic launch: a theoretical study[J]. *Defence Technology*, 2021, 17(4): 1296–1306.
- [17] HUANG Fengshin, LI Menghui, LEE L, et al. An accurate equation of state for carbon dioxide [J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1985, 18(6): 490–496.

作者简介: 鲁寨军 (1975—),男,湖南醴陵人,博士,教授,主要从事动力学分析及相关测试技术、CO₂ 液气相变冷弹射技术、CO₂ 液气相变致裂技术等方面的研究。E-mail: qlzjzd@csu.edu.cn。

