

液态 CO₂ 多致裂管爆破同步性及爆破效果优化试验研究

范永波, 李世海, 乔继延, 段文杰

(中国科学院力学研究所, 流固耦合系统力学重点实验室, 100190, 北京)

摘要: 现场进行爆破作业时, 为提升爆破效果, 往往布设多个钻孔, 同时起爆。实际上, 多致裂管起爆的时间差较大, 同步性较难控制, 直接影响爆破效果。本文提出一种提升液态 CO₂ 多致裂管爆破同步性方法, 保持现有致裂管主体结构不变, 将药包直接粘贴在防爆片上。通过开展致裂管爆破对比试验, 对爆破全过程进行压力数据采集。经数据对比分析发现, 原有致裂管内药包与防爆片分置在致裂管两端, 药包点燃后, 需通过致裂管内的液态 CO₂ 传递压力, 击破防爆片共需 30-60ms, 优化后不足 20ms, 可明显降低爆破时间的不确定性, 这种条件下多管串并联爆破更容易实现同步性。另外, 通过开展对比试验研究, 在其他条件不变的前提下, 增大致裂管出气口面积 20%, 可有效增大总冲量值 10%, 提升爆破效果。

关键词: 爆破管; 液态 CO₂; 同步性; 试验研究

Experiment Study on Blasting Synchronization and Blasting Optimization of Liquid CO₂ Explosion Technology

Fan Yongbo, Li Shihai, Qiao Jiyan, Duan Wenjie

Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190

Abstract

In order to enhance the blasting effect, many cardox blasters will be used simultaneously. Actually, the blasting synchronization is not well controlled, which affects the blasting effect. In this paper, a method for improving the blasting synchronization is proposed, pasting explosives directly on the rupture disk. By blasting comparison test, the whole process of blasting pressure time data is collected. Through data analyzing, when explosives and rupture disk are separately at the end of the cardox blaster, it takes about 30 – 60 ms because it is necessary to pass the pressure through the liquid CO₂ in the cardox blaster, by comparison, it takes less than 20 ms after optimization. We can obtain the superior blasting synchronization after optimization. In addition, increasing the outlet area of 20% can effectively increase the total impulse value of 10%, which will enhance the blasting effect under the same conditions.

Keywords: Cardox blaster; Liquid CO₂; Time synchronization; Experiment study

引言

液态CO₂爆破方法是60年代初期在美国等一些采矿业发达的国家开始研究应用的一种物理爆破方法, 美国埃多克斯公司最先研制成功了液态CO₂致裂管^[1]。高压液态CO₂爆破是一种无炸药爆破, 60年代初, 美国用液态CO₂爆破法开采的原煤已占其总产量的20%^{[2][3]}。液态CO₂爆破与一般炸药爆破相比, 气体缓慢膨胀、扩散, 剪切效果平稳, 对破碎多孔脆性介质较适合^{[4][5]}。爆破产生高压气体的压力比炸药爆破的压力小,

约黑火药1/3, 硝铵炸药的1/6^[6], 液态CO₂致裂管爆破是近二十年在中国发展起来的一项爆破技术, 它利用了液态CO₂在高压迅速释放条件下具有高体积膨胀的特性, 利用产生的高压气体膨胀对外做功将岩体致裂破碎^{[7][8]}。郭志兴^[9]利用液化的CO₂作为传递爆炸威力的媒介, 爆破前将液化的CO₂充入致裂管, 工作时通过电极和加热元件将CO₂加热使其压力增加到一定程度, 从而冲破致裂管末端切变盘, 使受热快速膨胀的CO₂通过致裂管末端的气门释放出来, 为被爆物提供气动力和推力, 将被爆物体胀开。邵鹏^[10]用石膏和石子做成不同强度的正方形试块, 尺寸为200mm×200mm×200mm, 放入致裂管。将高压N₂注入致裂管, 由于爆破膜片的密封作用, 使高压N₂暂时储存于致裂管内。随着N₂压力的不断增高, 爆破膜片上的压力达到破膜压力时即被撕裂, 高压N₂将由撕裂孔迅速释放并作用于被爆介质, 使介质产生破碎。最终给出了破膜压力与材料强度的关系曲线, 随着介质抗拉强度的增加, 破碎介质所需要的破膜压力呈非线性增长。杜玉昆等^[11]开展了超临界CO₂射流破岩试验研究, 超临界二氧化碳流体具有接近液体高密度和接近气体低黏度的特性, 表面张力小, 因而有较好的流动、渗透和传质性能。证实了超临界CO₂能有效降低破岩门限压力, 导致岩石出现大体积破碎。

当在工作面布置多根液态CO₂致裂管进行爆破时, 往往会出现多根致裂管爆破不同步现象, 因此, 提升多根致裂管现场爆破的同步性, 从而提升整体爆破效果显得尤为重要。

2 液态 CO₂ 致裂管及同步性测试试验方案

液态CO₂致裂管爆破系统主要包括液态CO₂、液态CO₂灌装泵、致裂管、导爆管、起爆器。通过灌装泵向致裂管内充装液态CO₂, 灌装之前, 导爆管(药包)封装在致裂管内, 灌装完成后, 将致裂管逐一插入爆破孔, 并连接致裂管与起爆器间的接线, 起爆器接通后, 导爆管内的低压保险丝引发快速反应, 使致裂管内的液态CO₂在几十毫秒内迅速升压至200—300 MPa, 位于致裂管释放口上方位置的防爆片破裂, 液态CO₂迅速气化, 体积瞬间膨胀600多倍, 高压CO₂气体从释放口喷出, 作用于岩体, 达到物理爆破的目的。

2.1 液态 CO₂ 致裂管

液态CO₂致裂管, 如下图1所示, 主要由点火头, 导爆管, 液态CO₂储存仓, 防爆片, 释放口, 出气口, 另外还需要辅助的起爆器和导线。

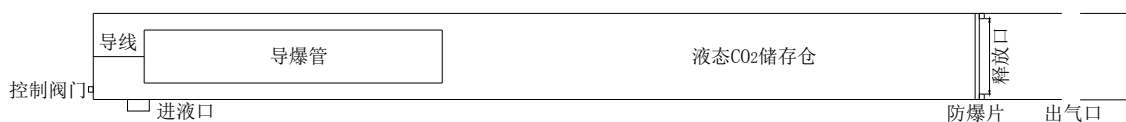


图 1 液态 CO₂ 致裂管常规结构示意图

Fig.1 Conventional structure diagram of cardox blaster

2.2 试验方案

初始灌装压力为10Mpa, 两种致裂管结构除导爆管位置不相同之外, 其余包括致裂管型号, 液态CO₂灌装质量, 导爆管, 防爆片厚度等均相同, 常规致裂管结构和优化后结构分别如图1图2所示。通过改变导爆管位置, 对爆破起跳信号至压力峰值的整个过程进行监测。对于现场爆破效果, 多根致裂管爆破的时间差起着控制性作用, 时间差越小, 爆破效果越好。

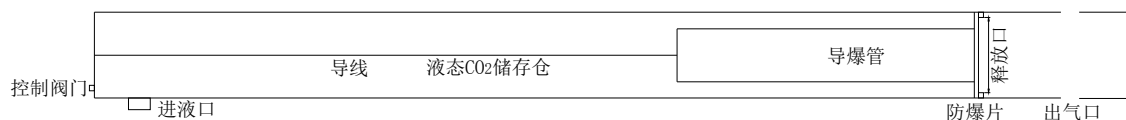


图 2 致裂管结构优化示意图

Fig.2 Optimized structure diagram of cardox blaster

3 试验数据分析

3.1 压力时程曲线

由动态压力传感器获得的压力时程曲线整体上分为三个阶段：①点火-完全爆燃阶段（小信号—主信号）②破片阶段（主信号—信号攀升）③气化压力迅速上升阶段（信号攀升—峰值），典型曲线如下图3所示。需要说明的是，据压力测试数据，因液态CO₂气化产生压力上升的时间为5-7ms，因此，在该条件下多根致裂管爆破的时间差小于该值，即可认为同步性较好。

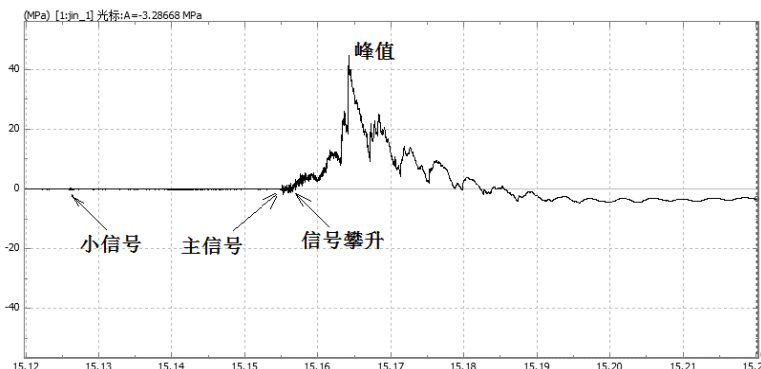


图3 压力时程曲线

Fig.3 pressure-time history curve

3.2 单释放口，导爆管放在防爆片上，致裂管双管同步性测试

由上图3可知，第一阶段时间占总时间比例最大，而且波动最大，这一时间段反映的物理过程是导爆管爆燃后，经过液态CO₂将压力传递至防爆片位置。为了消除这种不确定性因素，压缩压力传递时间，我们将药包直接粘在防爆片上，药包爆燃后直接击破防爆片，完成爆破过程，如下图4所示。



图4 药包粘在防爆片上

Fig.4 Explosives pasted directly on the rupture disk

试验参数：两根致裂管充装液态CO₂质量分别为2.18kg、2.2kg，充装质量比较接近，相差20g，药包均是440g，防爆片厚度6mm。

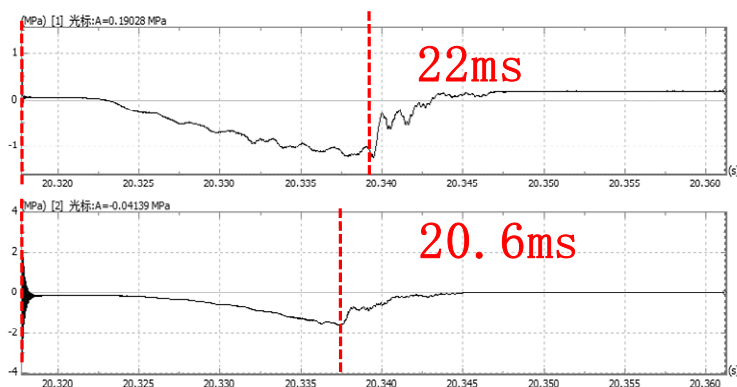


图 5 优化后双管同爆压力时程曲线对比

Fig.5 Pressure-time history curve comparison after optimization

由上图5，两根致裂管气化时间相差1.4ms，小于液态CO₂的气化时间5-7ms，两根致裂管同步性可以保证。

3.3 单释放口，传统药包位置，致裂管双管同步性测试

现场多根致裂管同步性效果不稳定，现场充装液态CO₂质量是一关键因素。试验参数：两根致裂管充装液态CO₂质量均为2.22kg，药包均是440g，防爆片厚度6mm；

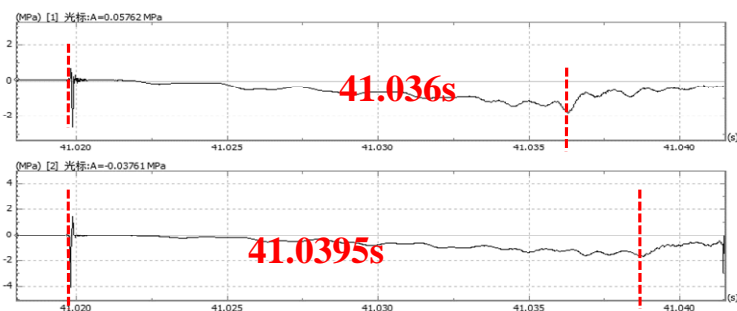


图 6 传统装药结构双管同爆压力时程曲线对比

Fig.6 Pressure-time history curve comparison about conventional structure

由上图6，气化时间相差3.5ms，在充装CO₂质量控制精准的前提下，现有装药方式双管起爆时间差均可控制在5-7ms之内，可保证同步性。

但是在常规装药结构条件下，从起爆器点火的小信号到压力峰值之间的时间跨度比优化后的时间跨度高一倍，现场爆破工程中，传统药包安装方式下进行的双管同爆，出现的不同步现象较为突出，主要跟CO₂充装质量相差悬殊有直接关系。

3.4 改变致裂管释放口口径，加快气化速度

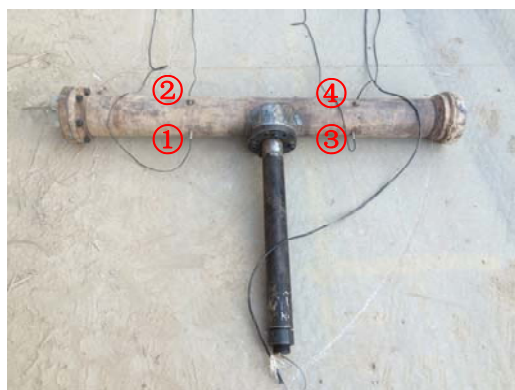


图7 改变致裂管口径爆破效果测试图

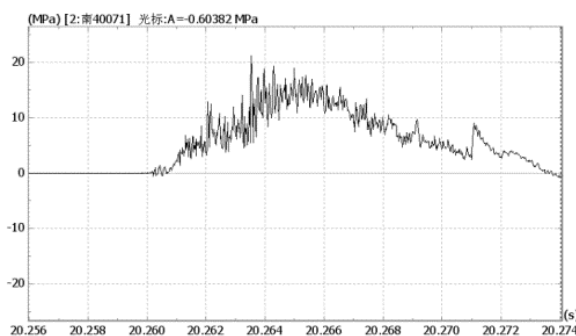


图8 致裂管压力时程曲线（口径46mm）

Fig.7 Blasting effect after changing the diameter of the cardox blaster

Fig.8 Pressure-time history curve of cardox blaster (diameter 46mm)

改变致裂管释放口径，并将其连接在测试筒上。在测试筒上①-④位置进行压力测试，如图7所示。改变致裂管释放口径尺寸，其中致裂管进行了口径38mm和46mm测试。各次测试获得了较好的压力-时程曲线，见图8。

在对每一次测试数据提取时，包括点火到破片的时间、破片到峰值的时间、峰值后的卸压时间、压力峰值和冲量。其中冲量指的是卸压的总冲量，即压力由峰值回落到零点的阶段，由压力幅值与时间轴所包

围的面积（如图9）。这个冲量值，反映了液态CO₂气化对外做功的大小。

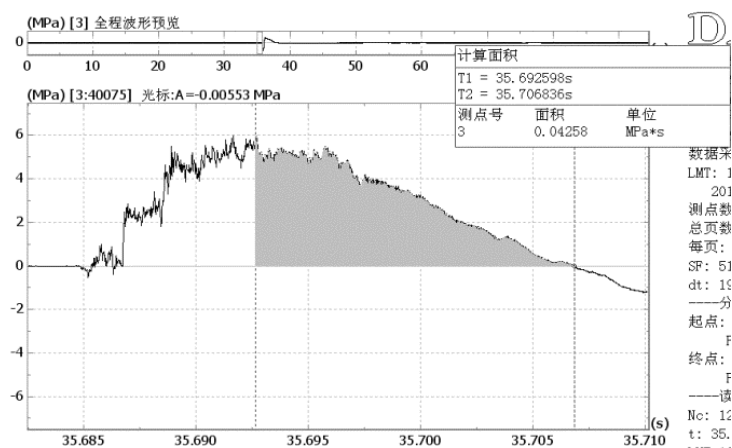


图 9 压力冲量的统计方法图

Fig.9 Statistical method diagram of impulse

表 1 致裂管不同口径冲量对比

Table 1 Impulse comparison of different diameter

口径(mm)	38	46
压力峰值(MPa)	22.2	19.4
卸压时间(ms)	7.0	9.0
冲量(MPa·ms)	57.2	63.5

以压力峰值、峰值后的卸压时间和卸压的总冲量作为指标,对比口径38mm和46mm的效果,统计见表1。

据表1可知,当口径较小时,压力峰值高,但是卸压时间短,而总的冲量小。这是因为,出气口的压力由 $p = \sigma_s \frac{2\delta}{r}$ 来决定,其中 σ_s 是材料的强度, δ 和 r 分别为防爆片的厚度和半径。当防爆片材料和厚度相同时,出气口压力随半径减小而增大。由口径和冲量数值对比,当增大致裂管出气口面积20%,可有效增大总冲量值10%。

综上所述,增大致裂管释放口口径,有利于液态CO₂气化对岩体做功,破岩效果相应地改善。

4 结论

通过开展液态CO₂致裂管爆破试验,针对导爆管位置和释放口口径提出了优化方案,经数据对比分析,优化结果后能提升爆破效果。获得结论如下所示。

(1) 优化装药结构后,可明显缩短爆破总时间,双管同爆时,液态CO₂气化时间明显减少,可保证爆破的同步性效果;常规装药结构条件下,液态CO₂气化时间较长,在液态CO₂控制不够精准的条件,易出现爆破不同步现象。

(2) 增大致裂管释放口口径,压力峰值低,卸压时间长,总冲量高。增大致裂管出气口面积20%,可有效增大总冲量值10%。

参考文献

- 1 徐颖, 程玉生, 王家来. 国外高压气体爆破[J], 煤炭科学技术, 1997, 25(5): 52-53 (Xu Ying, Cheng Yusheng, Wang Jialai. Foreign High- Pressure Gas Blasting[J], Coal Science and Technology, 1997, 25(5): 52-53 (in Chinese))
- 2 徐颖, 程玉生. 高压气体爆破破煤机理模型试验研究[J], 煤矿爆破, 1996, 34(3): 1-15 (Xu Ying, Cheng Yusheng. Model Test Study on Coal breaking mechanism by High- Pressure Gas Blasting[J], Coal mine blasting, 1996, 34(3): 1-15 (in Chinese))
- 3 徐颖. 高压气体爆破破煤模型试验研究[J], 西安矿业学院学报, 1997, 17(4): 322-325 (Xu Ying. Model Test Coal Breakage by High- Pressure Air Blasting [J], Journal of XI' AN Mining Institute, 1997, 17(4): 322-325 (in Chinese))
- 4 徐颖. 高压气体爆破采煤技术的发展及其在我国的应用[J], 爆破, 1998, 15(1): 67-82 (Xu Ying. Development and Application about the Mining Technology by High- Pressure Air Blasting in China[J], Blasting, 1998, 15(1): 67-82 (in Chinese))
- 5 Long Daoqi, Ye Fayin, Zhao Guohua. Optimization and Characterization of Wheat Bran Modified by in-Situ Enhanced CO₂ Blasting, LWT - Food Science and Technology, Volume 59, Issue 2, Part 1, December 2014, Pages 605-611
- 6 G Spur, E Uhlmann, F Elbing. Dry-ice Blasting for Ccleaning: Process, Optimization and Application, Wear, Volumes 233 - 235, December 1999, Pages 402-411
- 7 Vitezslav Masa, Pavel Kuba. Efficient Use of Compressed Air for Dry Ice Blasting, Journal of Cleaner Production, Volume 111, Part A, 16 January 2016, Pages 76-84
- 8 Dong Shujuan, Zeng Jinyan, Li Lifan et al. Significance of in-Situ Dry-ice Blasting on the Microstructure, Crystallinity and Bonding Strength of Plasma-sprayed Hydroxyapatite Coatings[J], Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Volume 71, July 2017, Pages 136-147
- 9 郭志兴. 液态二氧化碳爆破筒及现场试爆[J], 爆破, 1994, 72-74 (Guo Zhixing. Cardox Blaster and Explosion on Site[J], Blasting, 1994, 15(1): 72-74 (in Chinese))
- 10 邵鹏, 徐颖, 程玉生. 高压气体爆破实验系统的研究[J], 爆破器材, 1997, 26(5): 6-8 (Shao Peng, Xu Ying, Cheng Yusheng. Study on High- Pressure Air Blasting Experiment System[J], Blasting, 1998, 15(1): 67-82 (in Chinese))
- 11 杜玉昆. 超临界二氧化碳射流破岩机理研究[D] (Doctoral dissertation, 2012, 中国石油大学) (Study on the Rock-breaking Mechanism of Supercritical Carbon Dioxide Jet[D] (Doctoral dissertation, 2012, China University of Petroleum (in Chinese))