

doi: 10.3969/j.issn.1001-8352.2018.03.012

# 液态 CO<sub>2</sub> 多致裂管爆破同步性研究\*

范永波 乔继延 李世海 冯 春

中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室(北京,100190)

[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。本文中,提出一种提升液态 CO<sub>2</sub> 多致裂管爆破同步性的方法,保持现有致裂管主体结构不变,将导爆管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。经试验数据对比分析发现,原有致裂管内导爆管与防爆片分置在致裂管两端,导爆管点燃后,需通过致裂管内的液态 CO<sub>2</sub> 传递压力,击破防爆片共需 30~60 ms,优化后击破时间小于 20 ms,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,增大致裂管释放口面积 20%,可有效增大总冲量值 10%,提升爆破效果。

[关键词] 致裂管; 液态 CO<sub>2</sub>; 爆破同步性

[分类号] TD235.3

## Study on Blasting Synchronization of Liquid CO<sub>2</sub> Cardox Blasters

FAN Yongbo, QIAO Jiyan, LI Shihai, FENG Chun

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

[ABSTRACT] Normally a group of cardox blasters will be detonated simultaneously during onsite operation to enhance the blasting effect. In fact, the blasting synchronization can not be well controlled which may affect the blasting effect. In this paper, a new method was proposed to improve the blasting synchronization by the direct paste of detonator on the rupture disk. Pressure values for the whole process of blasting were collected by comparison test. Testing data analysis discloses that for cardox blaster with detonator and rupture disk separated at each of its ends, it takes about 30-60 ms to accomplish the ignition of detonator and pressure passing through the liquid CO<sub>2</sub> to blow up the rupture disk. Whereas for the new design, it needs less than 20 ms. Superior blasting synchronization could be obtained after optimization. In addition, increasing the outlet area by 20% while other conditions remain unchanged can effectively bring in 10% improvement in total impulse value which will enhance the blasting effect.

[KEYWORDS] cardox blaster; liquid CO<sub>2</sub>; time synchronization; experiment study

## 引言

液态 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 致裂管<sup>[1]</sup>。高压液态 CO<sub>2</sub> 爆破是一种无炸药爆破。60 年代初,美国采用液态 CO<sub>2</sub> 爆破法开采的原煤已占其总产量的 20%<sup>[2-3]</sup>。液态 CO<sub>2</sub> 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,适用

于破碎多孔脆性介质<sup>[4-5]</sup>。液态 CO<sub>2</sub> 爆破产生高压气体的压力比炸药的压力小,约为黑火药的 1/3、硝酸铵炸药的 1/6<sup>[6]</sup>。

近 20 年来,液态 CO<sub>2</sub> 致裂管爆破技术在中国也得到了应用<sup>[7-8]</sup>。郭志兴<sup>[9]</sup>利用液化的 CO<sub>2</sub> 作为传递爆炸威力的媒介,将液化的 CO<sub>2</sub> 充入致裂管,工作时通过电极和加热元件将 CO<sub>2</sub> 加热,使其压力迅速提升,从而冲破致裂管末端的防爆片,使液态 CO<sub>2</sub> 快速气化膨胀,为被爆物提供气动力和推力,将被爆物体胀开。邵鹏等<sup>[10]</sup>用石膏和石子做成不同

\* 收稿日期:2017-10-30

作者简介:范永波(1980-)男,博士,助研,主要从事爆炸力学试验相关研究。E-mail: ybfan@imech.ac.cn

强度的正方形试块,尺寸为200 mm×200 mm×200 mm,放入致裂管;将高压N<sub>2</sub>注入致裂管,由于防爆片的密封作用,使高压N<sub>2</sub>暂时储存于致裂管内;随着N<sub>2</sub>压力的不断增高,防爆片上的压力达到破膜压力时即被撕裂,高压N<sub>2</sub>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<sup>[11]</sup>开展了超临界CO<sub>2</sub>射流破岩试验研究,超临界CO<sub>2</sub>流体具有接近液体高密度和气体低黏度的特性,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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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,尤其位于同一钻孔串联的两根致裂管,如果起爆时间相差过大,很容易出现致裂管弯曲,甚至“飞管”现象,产生很大的安全隐患。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。笔者通过开展对比试验,对提升多致裂管爆破同步性进行探讨。

## 1 液态CO<sub>2</sub>致裂管及同步性测试试验方案

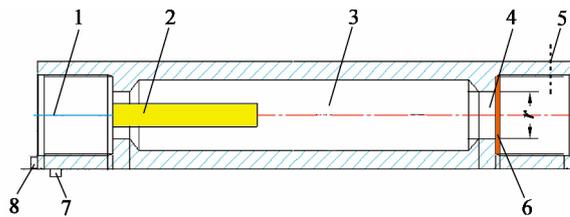
通过灌装泵向致裂管内充装液态CO<sub>2</sub>。灌装之前,将导爆管和防爆片封装在致裂管内,灌装完成后,通过起爆器起爆导爆管,使致裂管内的液态CO<sub>2</sub>迅速升压至200~300 MPa,促使防爆片破裂,液态CO<sub>2</sub>迅速气化,体积瞬间膨胀500~600倍,高压CO<sub>2</sub>气体从释放口喷出,通过出气口作用于岩体,达到物理爆破的目的。

致裂管同步性的影响因素主要包括药量、起爆位置、防爆片厚度及加工的精度。

液态CO<sub>2</sub>致裂管,主要由导线、导爆管、液态CO<sub>2</sub>储存仓、防爆片、释放口、出气口、进液口、控制阀门组成,另外还需要辅助的起爆器和导线。其中,导爆管内装药的组分是高氯酸钾、水杨酸和草酸铵。

常规装药结构,导爆管与防爆片分置于致裂管的两端,如图1所示;优化后的装药结构,通过胶水将导爆管粘贴在防爆片上,如图2所示。

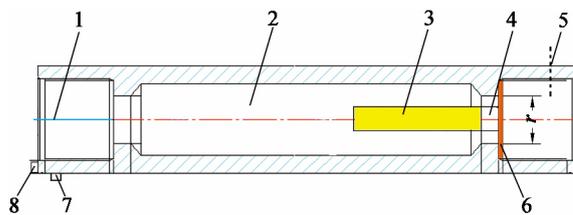
两种装药结构的致裂管,除导爆管位置不相同之外,初始灌装压力均为10 MPa,其余包括致裂管型号、液态CO<sub>2</sub>灌装质量、导爆管内装药质量等均



1 - 导线; 2 - 导爆管; 3 - 液态CO<sub>2</sub>储存仓; 4 - 释放口; 5 - 出气口; 6 - 防爆片; 7 - 进液口; 8 - 控制阀门。

图1 液态CO<sub>2</sub>致裂管常规装药结构示意图

Fig. 1 Conventional charging structure diagram of liquid CO<sub>2</sub> cardox blaster



1 - 导线; 2 - 液态CO<sub>2</sub>储存仓; 3 - 导爆管; 4 - 释放口; 5 - 出气口; 6 - 防爆片; 7 - 进液口; 8 - 控制阀门。

图2 液态CO<sub>2</sub>致裂管优化结构示意图

Fig. 2 Optimized structure diagram of liquid CO<sub>2</sub> cardox blaster

相同。防爆片材质对于爆破压力峰值的影响最为直接,为保证其压力峰值的稳定性,试验所用防爆片采用同一批次钢材型号定制,直径和厚度完全一致。通过改变导爆管位置,对爆破压力起跳信号至压力峰值全过程进行监测。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。

## 2 试验数据分析

### 2.1 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3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)。

典型曲线如图3所示。需要说明的是,据压力测试数据,液态CO<sub>2</sub>气化,压力上升的时间 $t_{升}$ 为5~7 ms,因此,在该条件下多根致裂管爆破的时间差小于 $t_{升}$ ,即可认为同步性较好。

### 2.2 导爆管粘在防爆片上,致裂管双管同步性测试

由图3可知,第1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

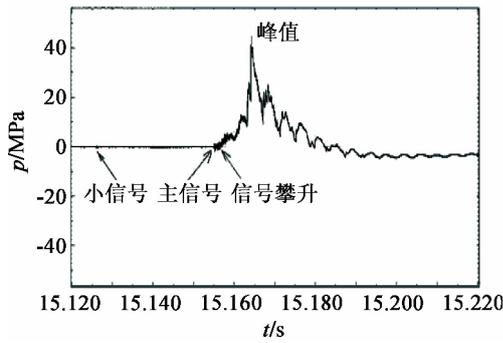


图 3 压力时程曲线

Fig. 3 Pressure-time history curve

管爆燃后,经过液态 CO<sub>2</sub> 将压力传递至防爆片位置。为了消除这种不确定性因素,可尝试压缩其压力传递时间。优化后的装药结构是将导爆管直接粘在防爆片上,导爆管爆燃后直接击破防爆片,完成爆破过程,如图 4 所示。



图 4 导爆管粘在防爆片上

Fig. 4 Detonator pasted directly on the rupture disk

对于优化后的结构,开展了两组试验。

第 1 组试验参数:两根致裂管充装液态 CO<sub>2</sub>,质量分别为 2.18 kg、2.20 kg,充装质量比较接近,相差 20 g,导爆管内装药质量均是 440 g,防爆片厚度 6 mm;

第 2 组试验参数:两根致裂管充装液态 CO<sub>2</sub>,质量分别为 2.10 kg、2.30 kg,充装质量相差比较大,相差 200 g,导爆管内装药质量均是 440 g,防爆片厚度 6 mm。

图 5 为致裂管结构优化后双管同爆压力时程曲线的对比。

由图 5 可知,第 1 组试验两根致裂管气化时间相差 1.4 ms,第 2 组试验两根致裂管气化时间相差 0.8 ms,均小于液态 CO<sub>2</sub> 的气化时间 5 ~ 7 ms,两组试验的双管同步性均可以保证。由上述试验测试数据对比可以看出,当采用优化后的装药时,液态 CO<sub>2</sub> 的灌装量对双管的同步性几乎没有影响。

### 2.3 常规装药结构 致裂管双管同步性测试

对于常规装药结构,现场多根致裂管同步性效

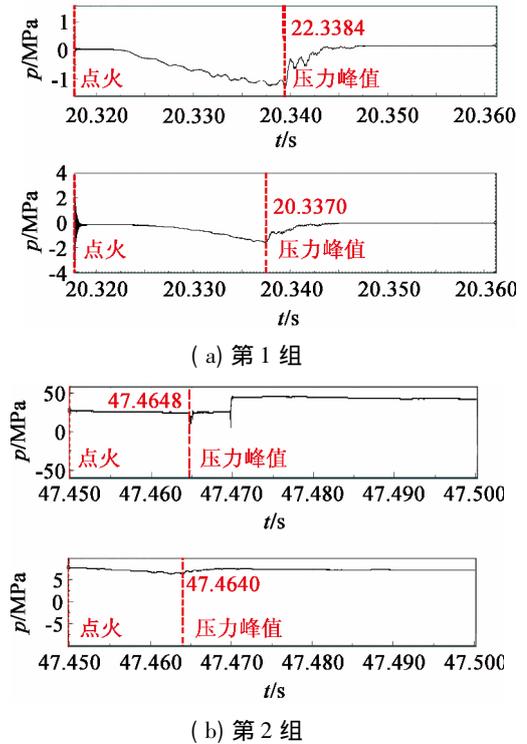


图 5 优化结构后双管同爆压力时程曲线对比

Fig. 5 Pressure-time history curve comparison after optimization

果不好,充装液态 CO<sub>2</sub> 质量是一关键因素。试验参数:两根致裂管充装液态 CO<sub>2</sub> 的质量均为 2.22 kg,导爆管内装药质量均是 440 g,防爆片厚度 6 mm。

由图 6 可见,两根致裂管气化时间相差 3.5 ms。在充装 CO<sub>2</sub> 质量控制精准的前提下,常规装药方式双管起爆时间差均可控制在 5 ~ 7 ms 之内,可保证同步性。

由图 5 和图 6 对比可以发现,在同等条件下,优化后的装药结构,从起爆器点火到压力峰值之间的时间跨度比常规装药结构的时间跨度缩短近一倍,大幅降低时间不同步因素。现场爆破工程中,常规装药结构方式下进行的双管同爆,出现的不同步现

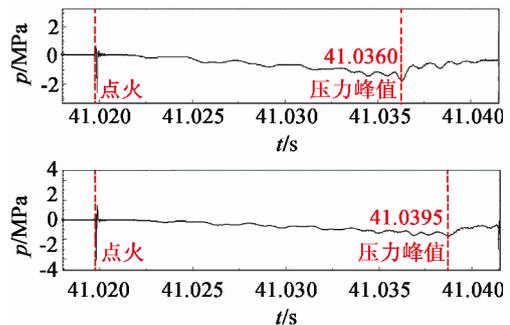


图 6 常规装药结构双管同爆压力时程曲线对比

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

象较为突出,主要跟 CO<sub>2</sub> 充装质量相差悬殊有直接关系。

### 2.4 改变致裂管释放口口径 加快气化速度

致裂管释放口剖面图如图 1、图 2 所示,通过调节  $r$  值的大小,可以改变液态 CO<sub>2</sub> 的气化速度。理论上讲,  $r$  值越大,液态 CO<sub>2</sub> 气化越快。

改变致裂管释放口口径,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。改变致裂管释放口口径尺寸,开展了口径 38 mm 和 46 mm 两组对比测试。获得了较好的压力时程曲线,其中一个数据见图 8。

在提取测试数据时,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 CO<sub>2</sub> 气化对外做功的大小。

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 38 mm 和 46 mm 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

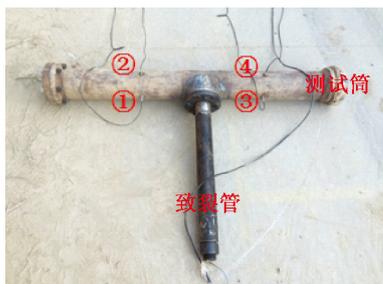


图 7 改变致裂管口径爆破效果测试

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

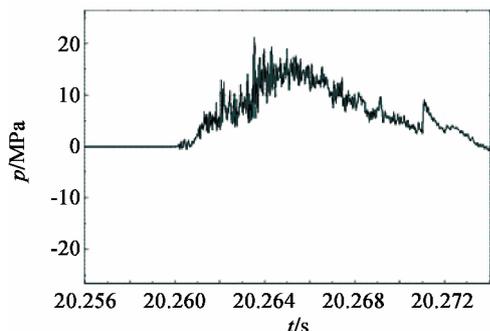


图 8 致裂管压力时程曲线(口径 46 mm)

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

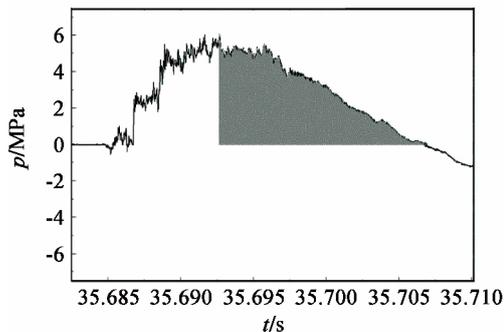


图 9 压力冲量的统计方法

Fig. 9 Statistical method diagram of pressure impulse

表 1 致裂管不同口径冲量对比

Tab. 1 Impulse comparison of different diameters of cardox blaster

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

力由  $p = 2\sigma_s \delta / r$  来决定,其中  $\sigma_s$  是材料的强度,  $\delta$  和  $r$  分别为防爆片的厚度和半径。当防爆片材质和厚度相同时,出气口压力随半径的减小而增大。由口径和冲量数值对比可知,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,更有利于液态 CO<sub>2</sub> 气化对岩体做功,破岩效果相应地改善。

## 3 结论

通过开展液态 CO<sub>2</sub> 致裂管爆破对比试验,针对导爆管位置和释放口口径提出了优化方案,经试验数据对比分析,优化后的装药结构可有效提升多致裂管的爆破同步性,增大致裂管释放口口径可一定程度提升破岩效果。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 CO<sub>2</sub> 气化时间明显减少,可保证多致裂管爆破的同步性;常规装药结构条件下,液态 CO<sub>2</sub> 气化时间较长,在液态 CO<sub>2</sub> 控制不够精准条件下,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.

[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(3): 1-4, 15.

[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 Y. Model test on coal breakage by high pressure air-shooting [J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1997, 17(4): 322-325.

[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): 67-69, 82.

[5] LONG D Q, YE F Y, ZHAO G H. Optimization and characterization of wheat bran modified by in situ enhanced CO<sub>2</sub> blasting extrusion[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(2): 605-611.

[6] SPUR G, UHLMANN E, ELBING F. Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application [J]. Wear, 1999, 233/234/235: 402-411.

[7] MÁŠA V, KUBA P. Efficient use of compressed air for dry ice blasting [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 111(Part A): 76-84.

[8] DONG S J, ZENG J Y, LI L F, 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, 2017, 71: 136-147.

[9] 郭志兴. 液态二氧化碳爆破筒及现场试爆[J]. 爆破, 1994(3): 72-74.

[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 P, XU Y, CHENG Y S. Research on the test system of airshooting [J]. Explosive Materials, 1997, 26(5): 6-8.

[11] 杜玉昆. 超临界二氧化碳射流破岩机理研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.  
DU Y K. Study on the rock-breaking mechanism of supercritical carbon dioxide jet [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2012.



(上接第 54 页)

ZHANG H, YAN S L, WU H B. Factors influencing on delay accuracy of stored silicon type delay composition [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2014(2): 37-40.

[13] 张建富 胡延臣. 延期药粒度级配对延期精度的影响[J]. 含能材料, 2014, 22(4): 84-88.  
ZHANG J F, HU Y C. Effect of particle gradation of delay composition on delay precision [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(4): 84-88.

[14] 凌爱江. 导爆管雷管质量控制与改进[J]. 煤矿爆破, 2006(1): 20-21.  
LING A J. Quality control and improvement of nonel detonator [J]. Coal Mine Blasting, 2006(1): 20-21.

[15] 中国兵器工业集团公司. 火工品试验方法: 第 27 部分 温度冲击试验: GJB5309. 27—2004 [S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2004.

[16] 中国兵器工业集团公司. 火工品试验方法: 第 30 部分 湿热试验: GJB5309. 30—2004 [S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2004.

[17] 中国兵器工业集团公司. 火工品试验方法: 第 33 部分 震动试验: GJB5309. 33—2004 [S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2004.

[18] 中国兵器工业集团公司. 火工品试验方法: 第 36 部分 2 m 跌落试验: GJB5309. 36—2004 [S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2004.

[19] 中国兵器工业集团公司. 火工品试验方法: 第 37 部分 锤击试验: GJB5309. 37—2004 [S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2004.

[20] 中国人民解放军总参谋部兵种部. 火工品检验验收规则 总则: GJB3653. 1—99 [S].