

DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2018.01.014

CO₂致裂器药卷最小起爆长度试验

孟祥甜^{1,2,3}, 刘 磐⁴, 倪 昊^{1,2,3}, 孙小明^{1,2,3}

(1.煤炭科学技术研究院有限公司,北京 100013;2.煤矿应急避险技术装备工程研究中心,北京 100013;
3.北京市煤矿安全工程技术研究中心,北京 100013;4.榆林神华能源有限责任公司 青龙寺煤矿分公司,
陕西 榆林 719315)

摘 要:对 CO₂ 致裂器药卷最小起爆长度进行测试,利用控制变量法分段逐步进行爆破试验,并对爆破效果进行理论分析,讨论工程应用当中药卷的最佳长度。得到不同型号致裂器的安全起爆药卷长度与增大起爆威力的方法,方法对煤层瓦斯抽采致裂及岩石致裂具有指导作用。

关键词:岩石致裂;CO₂致裂器;药卷长度;定压剪切;安全起爆

中图分类号:TD235.37⁺¹

文献标志码:A

文章编号:1003-496X(2018)01-0053-04

Experimental Study on the Minimum Detonation Length of Carbon Dioxide Fracturing Device

MENG Xiangtian^{1,2,3}, LIU Pan⁴, NI Hao^{1,2,3}, SUN Xiaoming^{1,2,3}

(1.China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;2.Coal Mine Emergency Hedging Technology Equipment Engineering Research Center, Beijing 100013, China;3.Beijing Coal Mine Safety Engineering Technology Research Center, Beijing 100013, China;4.Qinglongsi Coal Mine Branch of Yulin Shenhua Energy Co., Ltd., Yulin 719315, China)

Abstract: The minimum detonation length of cartridge for CO₂ fracturing device is tested, and the blasting experiment was carried out stepwise by using the control variable method, and the blasting effect is analyzed theoretically. The optimal length of the cartridge in engineering application was discussed. The method of the obtained safety detonation volume and the method of increasing the explosive power of different types of fractures have a guiding role in coal seam gas drainage and rock fracturing.

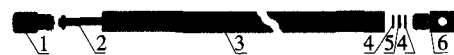
Key words: rock fracturing; carbon dioxide fracturing device; length of cartridge; constant shear; safe detonation

CO₂致裂器是近几年在煤层气开发领域推广应用的新型爆破设备,开创了气体爆破的新局面,为非煤矿山及民用爆破提供了新的思路和参考^[1-2]。国内对于CO₂致裂器的研究目前尚处于初始阶段,对于致裂器威力大小及影响因素的相关探讨更是凤毛麟角,为此以CO₂致裂器爆破试验为基础,研究致裂器控制爆破技术中影响爆破威力的因素,为研发新型致裂设备提供依据。

1 CO₂致裂器的结构及特点

CO₂致裂器利用液态CO₂受热气化膨胀,内部压力达到剪切片承载强度时瞬间释放高压气体^[3-6],实现破断岩石或落煤。克服了传统炸药爆破破坏性大、危险性高、可控性低等缺点^[7-9]。CO₂致裂器结构如图1。

其中剪切片是起爆威力的决定因素。当储液管



1-充装阀; 2-加热装置; 3-储液管;
4-密封垫; 5-定压剪切片; 6-释放管

图1 CO₂致裂器结构

瞬间聚能大于剪切片的剪切强度时,剪切片剪开,能量瞬间释放并作用于周围岩体;当储液管瞬间聚能小于剪切片的剪切强度时,剪切片不能被剪开,能量从其他地方缓慢释放,爆破失败。暂且将剪切片的最小剪开强度定义为致裂器的最小起爆能量。针对MZL89-800致裂器承压能力强、储液管装多、起爆威力大的特点,剪切片的厚度由原来的3 mm增加到4.5 mm,使得该致裂器能够产生更大的起爆威力。

为研究剪切片的最小剪开强度与剪切片厚度及起爆药卷长度的关系,合理确定CO₂致裂器药卷的最小起爆长度,减少单次起爆对药剂的浪费,设计

了如下的试验。

2 试验方法

2.1 试验方案

试验采用控制变量法,即在保证储液管型号、充装压力、剪切片厚度以及药卷直径等不变的前提下,将药卷的长度从 350 mm 依次等长度递减,测试能否正常起爆。若起爆正常,说明该长度不是药卷的最小起爆长度;若不能起爆,则说明药卷的最小起爆长度在本次起爆和上次起爆的药卷长度之间。然后以该范围为测试重点,进一步精确测定药卷的最小起爆长度。

一般测得最小起爆范围后,可将该范围的上限作为药卷的安全起爆长度。用以确保每次成功起

爆,对实际生产有较好参考价值。试验的基本步骤是将充装好的致裂器安装在试验舱内部的致裂器固定架上,使用 U 型卡和螺栓固定。从试验舱引导线至机械加工车间,然后使用万用表测量导通,确定线路完好之后,开始警戒,放炮。

2.2 试验参数

以 MZL89-800 型号的致裂器为试验对象。该致裂器储液管外径 89 mm,长度为 800 mm。选用剪切片的厚度为 4.5 mm,直径 69 mm。充装压力 10 MPa,药卷直径 40 mm,长度从 350 mm 依次递减 60 mm。每次试验前先对空的加热棒的长度和质量进行测量,然后以一定的装药系数进行装药,确保装药密度不变。对装药后的加热棒进行二次测量,前后的质量差,即为实际的装药量。试验参数见表 1。

表 1 致裂器爆破试验参数

	加热棒部分			液态 CO ₂ 充装部分		
	加纸管长度/mm	整体(空)质量/g	药剂质量/g	充装前质量/kg	充装后质量/kg	液态 CO ₂ 充装量/kg
试验 1	350	852(233)	619	25.20	27.20	2.00
试验 2	290	739(211)	518	25.05	27.25	2.20
试验 3	230	597(209)	388	24.85	26.95	2.10
试验 4	170	470(198)	272	24.80	26.90	2.10
试验 5	110	328(184)	144	24.60	26.80	2.20
试验 6	140	390(191)	199	24.70	26.90	2.20
试验 7	160	436(195)	241	24.75	26.90	2.15

3 试验效果分析

3.1 安全起爆试验及现象

试验 1 发热棒长度 350 mm,净装药量 619 g,致裂器充装压力 10 MPa 下,液态 CO₂ 充装量 2.00 kg,其他量不变。启动发爆器后听到爆破声响,间隔约 1 s 听到致裂器固定架撞击舱体的声音。同时,爆生气浪冲开试验舱的前门与后窗,并释放出大量的白色烟雾,烟雾持续约 30 min。进入试验舱,致裂器连同固定架侧倒在地面。

试验 2、试验 3、试验 4 发热棒长度、净装药量及液态 CO₂ 充装量见表 1。试验现象与第 1 次基本一致,均在启动发爆器之后听到爆破声响和致裂器固定架撞击舱体的声音。同时,爆生气浪冲开试验舱的前门与后窗,释放出大量的白色烟雾。

试验 5 取发热棒长度 110 mm,净装药量 144 g,致裂器充装压力 10 MPa 下,液态 CO₂ 充装量 2.20 kg,其他量不变。启动发爆器之后听到致裂管漏气

声,声音持续近 1 min,气体吹起舱体内灰尘,灰尘持续约 10 min。进入试验舱,致裂器仍然固定在试验架上。致裂器未能成功起爆,CO₂ 从泄能头螺纹处漏出。

初步确认药卷的最小起爆长度范围为 170~110 mm,对应的净装药量为 272~144 g。即当药卷长度为 170 mm 时,致裂器可以安全起爆。小于 170 mm 时,药卷提供热量可能不足以使致裂器安全起爆。

3.2 安全起爆试验应力分析

对前 5 次最小起爆药卷长度试验的剪切片进行应力分析,可以从起爆能量的角度分析发热棒的装药量对起爆威力的影响。5 次试验后收集的剪切片如图 2。

试验 1 中,剪切片被压缩成一团,整体从储液管爆出,滞留在泄能头中。试验 2、试验 3、试验 4 中,剪切片明显被剪切为 2 个部分,外环压在密封圈处,中间部分完全剪断并发生剧烈变形。而试验 5 中剪切片完好,中间部分形成 1 cm 的凸起。



图2 爆破后剪切片

通过对5次试验的剪切片进行应力分析可以得出,当药卷长度在安全起爆长度(170 mm)以上时,药卷激发时所提供的热量能够瞬间加热足够多的液态CO₂,使管内压力迅速升高,超出剪切片的极限应力值,瞬间剪断切片,释放出巨大能量。此时,剪切片瞬间经历了塑性变形和破坏变形阶段,切片沿密封圈边缘发生剪切破坏。当药卷长度低于安全起爆长度(170 mm)时,药卷激发时所提供的热量较少,能够加热并气化的液态CO₂较少,管内压力升高较慢,不能达到剪切片的极限应力值,仅使其发生塑性变形。由于剪切片形状发生变化,密封圈对气体的密封能力减弱,气体在剪切片发生形变的同时,从密封圈螺纹处漏出,这也印证了在5次试验时,未听到爆破声,而是听到气体泄漏的声音。

3.3 最小起爆药卷长度试验

为得到MZL89-800致裂器的精确的最小起爆长度,试验以110 mm为起点逐次增加药卷的长度至170 mm。与前5次试验不同的是,每次药卷的长度增量较小,其他起爆条件相同。

试验6发热棒长度140 mm,净装药量199 g,致裂器充装压力10 MPa下,液态CO₂充装量2.20 kg,其他条件不变。启动发爆器之后听到致裂管漏气声,声音持续近1 min。现象如同试验5,气体未能推开试验舱门窗,仅吹起舱体内灰尘。进入试验舱,致裂器仍然固定在试验架上,并布满灰尘。可以肯定,致裂器未能成功起爆,CO₂从泄能头螺纹处漏出。说明140 mm的药卷不足以起爆致裂器。

增加药卷的长度至160 mm,净装药量241 g,致裂器充装压力10 MPa下,液态CO₂充装量2.20 kg,其他条件不变,进行第7次试验。启动发爆器之后先听到致裂管漏气声,声音较大且频率较高。随后即听见致裂管爆破声,同时爆生气浪冲开试验舱的门窗,并释放出大量的白色烟雾。进入试验舱,致裂器从固定架上脱落,充装头飞出并将试验舱门撞坏。检查致裂管及充装头发现,充装头与管体的螺纹均严重脱扣,管体温度在50℃左右,内壁布满黑

灰,有明显的燃烧痕迹。另一端泄能头完好,剪切片未能成功剪开,中部凸起。

通过2次试验可以确定,当加热棒的长度在110~160 mm时,药剂燃烧提供的热量不足以充分加热液态CO₂,致使剪切片不能剪开,能量一部分从螺纹处释放,另一部分转化为热能。

3.4 应力分析

后4次试验剪切片变形照片如图3。对比后4次试验的剪切片可以发现,试验5、试验6、试验7中剪切片都没有被剪开,只是在中间部分形成了明显凸起。这与试验4得到的剪切片的形状完全不同。同时也印证了为何在进行试验6、试验7时会听到很大的漏气声。



图3 后4次试验剪切片变形照片

在试验6中,当药卷激发产生热量后,迅速加热液态CO₂,管内气体急剧膨胀,压力急剧升高。剪切片在强大压力的作用下迅速进入塑性变形阶段。该阶段的剪切片中间部分发生形变,边缘因受剪力的影响也发生微量形变,在充装头的螺纹密封圈处产生缝隙^[10]。此时,气体从螺纹处泄漏,管内压力迅速减小,剪切片的塑性变形停止。说明此次试验药卷长度不能提供足够的热量,爆破失败。

试验7中,药卷激发的热量首先加热液态CO₂,使管内压力升高。促使剪切片发生塑性变形,在充装头的螺纹密封圈处形成缝隙,导致气体泄漏,发出频率很高的漏气声。由于药卷药量较试验6多,在药剂的持续加热下,液态CO₂膨胀速率远大于气体泄漏速率,因此,管内压力持续增大。同时药剂燃烧热量使充装头端螺纹的屈服极限降低,当压力超过一定值时,在该处发生了螺纹脱扣现象,并伴随着剧烈的爆破声。而此时的剪切片因为压力急剧释放,变形停止。与试验6得到的剪切片相比,明显凸出更明显,约2 cm左右。同样也说明此次试验药卷不足以提供剪开剪切片的气体膨胀吸热量,爆破试验失败。

3.5 试验结论

通过前5次试验,得到了MZL89-800致裂器的安全起爆长度为170 mm,同时也得到该型号致裂器的最小起爆药卷长度范围在170~110 mm。

后2次试验分别进行了140 mm和160 mm药卷的试验,都没有成功起爆致裂器,并对致裂器产生破坏性影响。因此,可以确定170 mm为该种型号致裂器的最小起爆药卷长度。

4 结 语

在之前MZL76系列致裂器中,使用的药卷直径为25 mm,试验室测量最小起爆长度为230 mm。经过2种系列致裂器不同阶段的测试,可以得到如下结论:经测试MZL89-800致裂器的最小起爆药卷长度为170 mm;剪切片的厚度和直径决定了致裂器的起爆能量;在装药系数及药卷直径相同的前提下,加热棒(药卷)长度决定了药卷瞬间加热量,并直接影响液态CO₂的气化率;当药卷直径不同时,药卷直径越大,药卷燃烧速度越快,相同时间内放热量越多;在装药量一定的前提下,同一系列致裂器的起爆威力由药卷长度决定。

参考文献:

[1] 何满潮,孙晓明.中国煤矿软岩巷道工程支护设计与

施工指南[M].北京:科学出版社,2004.

[2] JC Stankus, S S Peng. Floor bolting for control of mine floor heave[J]. Mining Engineering, 1994(9): 1099-1102.

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

[4] 魏刚, 夏洪满, 姜凤岗, 等. 液态CO₂爆破器落煤试验研究[J]. 煤矿开采, 2009, 14(1): 22-24.

[5] 聂政. 二氧化碳炮爆破在煤矿的应用[J]. 煤炭技术, 2007, 26(8): 62-63.

[6] 王在明. 超临界二氧化碳连续管钻井液特性研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2008.

[7] 霍中刚. 二氧化碳致裂器深孔预裂爆破煤层增透新技术[J]. 煤炭科学技术, 2015(2): 81-83.

[8] 范迎春, 霍中刚, 姚永辉. 复杂条件下二氧化碳深孔预裂爆破增透技术[J]. 煤矿安全, 2014, 45(11): 74-77.

[9] 朱拴成, 周海丰, 李浩荡. 二氧化碳炮处理综采工作面巷道三角区悬顶[J]. 煤矿安全, 2013, 44(8): 144.

[10] BROCK D. 工程断裂力学基础[M]. 王克仁, 何明元, 高桦, 译. 北京: 科学出版社, 1980: 114-159.

作者简介:孟祥甜(1988—),男,陕西渭南人,硕士,2015年毕业于内蒙古科技大学,主要从事矿山力学、采矿工艺与技术装备等方面的研究。

(收稿日期:2017-04-07;责任编辑:李力欣)

(上接第52页)

flow hydraulically fractured gas wells[J]. Journal of Petroleum Technology, 2013, 31(12): 1515-1524.

[7] Bennion D B, Bietz R F, Thomas F B, et al. Reductions in the productivity of oil and low permeability gas reservoirs due to aqueous phase trapping[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1994, 33(9): 45-44.

[8] Ni G, Cheng W, Lin B, et al. Experimental study on removing water blocking effect (WBE) from two aspects of the pore negative pressure and surfactants [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 31: 596-602.

[9] Liu Q, Guo Y, An F, et al. Water blocking effect caused by the use of hydraulic methods for permeability enhancement in coal seams and methods for its removal [J]. International Journal of Mining Science & Tech-

nology, 2016, 26(4): 615-621.

[10] 陈向军,刘军,王林,等.不同变质程度煤的孔径分布及其对吸附常数的影响[J].煤炭学报,2013,38(2): 294-300.

作者简介:王 乾(1991—),男,河南安阳人,在读硕士研究生,从事煤层气地质学与煤层气勘探开发方面的研究。

(收稿日期:2016-12-30;责任编辑:王福厚)

