

DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2018.12.008

二氧化碳致裂器泄能关键参数研究

彭 然^{1,2,3}

(1.煤炭科学技术研究院有限公司 装备分院,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)

摘要:为致裂器爆破能达到最佳的效果,开展了准静态强度测试、动态爆破致裂试验,分析了二氧化碳致裂器泄放压力与定压剪切片厚度、发热材料用量和液态二氧化碳充装量之间的关系,并得出了泄放压力模型;通过压力的计算分析和三维流体模拟,分析出泄能口的最优布置方式。试验结果表明:定压剪切片厚度为3 mm时,准静态抗剪强度为130 MPa,合理的发热材料用量为113 g,泄放压力峰值约为185 MPa;厚度为4 mm时,准静态抗剪强度为220 MPa,合理的发热材料用量为163 g,泄放压力峰值约为263 MPa;在保证整体刚度和使用寿命前提下,尽量减小泄能通道长度,增大孔直径,断面面积与定压剪切片破断面积相同,腔内壁光滑,泄能口倾角75°为宜。

关键词:煤层瓦斯;二氧化碳致裂器;泄能参数;泄放模型;泄能口布设

中图分类号:TD713+.3

文献标志码:A

文章编号:1003-496X(2018)12-0031-04

Study on Key Parameters of Carbon Dioxide Fracturer During Energy Discharge

PENG Ran^{1,2,3}

(1.Equipment Branch of China Coal Research Institute Company Limited, 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)

Abstract: In order to achieve the best blasting effect, quasi static strength test and dynamic blasting splitting test were carried out. And the release pressure and the thickness of the constant pressure shear sheet of the carbon dioxide fracturers were analyzed, and the relationship between the amount of heating material and the filling amount of liquid carbon dioxide were determined. Finally, the model of discharge pressure were obtained. The optimal layout of the outlet was analyzed through the calculation and analysis of pressure and three-dimensional fluid simulation. The test results showed that when the thickness of the shear sheet was 3 mm, the quasi-static shear strength was 130 MPa, and the reasonable amount of heating material was 113 g, and the peak discharge pressure was about 185 MPa. When the thickness was 4 mm, the quasi-static shear strength was 220 MPa, and the reasonable amount of heating material was 163 g, and the peak discharge pressure was about 263 MPa. Under the premise of guaranteeing the overall stiffness, the length of the discharge channel was minimized and the diameter of the hole was increased. The cross section area was the same as that of the constant pressure shearing slice, the cavity wall was smooth and the angle of outlet inclination was 75°.

Key words: coal seam gas; carbon dioxide fracturer; energy discharge parameter; discharge pressure model; outlet layout of energy discharge

二氧化碳深孔预裂爆破是利用储液管内液态二氧化碳经加热棒加热,温度不断升高,达到二氧化碳气液超临界点^[1],气化膨胀达到剪切片极限强度后,瞬间释放高压气体冲破定压剪切片,从泄能头

泄放破断煤(岩)体^[2-4],高压的二氧化碳气体瞬间爆炸中心传播出来,强烈的压缩邻近空气,使介质压力、密度突然升高而形成空气冲击波^[5],这种冲击波能够扩大和延伸煤(岩)体的裂缝,也能对爆源附近的物体产生冲击和破坏,然而泄能口的布设方式影响高压二氧化碳流体的泄放压力、流量,进而影响致裂效果,为此研究泄能时静态抗剪压力和动态峰值

基金项目:“十三五”国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045-004-005)

压力等关键参数,为致裂器能达到良好的致裂效果,提供科学依据。

1 泄能参数研究

1.1 剪切片对泄放压力的影响

定压剪切片是控制液态二氧化碳在储液管内相变升压极限的关键部件,为了确定发热材料用量、液态二氧化碳充装量、定压剪切片强度合理匹配关系及对泄放压力的影响,需要在实验室内测定定压剪切片准静态抗剪强度。

利用定压剪切片抗剪强度试验机进行强度测试,将定压剪切片防置于试验机平台上,并用顶针紧密固定,启动泵,油压作用在剪切片表面,通过持续不断加压,实时记录压力表压力上升过程数据,当油压达到定压剪切片极限抗剪强度后,剪切片破断,压力停止升高,试验机记录下最终的压力,即定压剪切片极限抗剪强度。使用刻槽方式为3/4圆形的定压剪切片,厚度分别为3 mm与4 mm,按照上述抗剪强度测试方法对不同厚度定压剪切片准静态极限抗剪强度进行了测定,每种厚度定压剪切片极限抗剪强度测定3次,取平均值,定压剪切片抗剪强度测定结果见表1。

表1 定压剪切片抗剪强度测定结果

剪切片厚度/mm	切片抗剪强度/MPa			
	第1次	第2次	第3次	平均值
3	128	133	129	130
4	222	217	221	220

1.2 发热材料用量测试

在实验室内开展了外径57 mm、长度1 m的储液管条件下的发热材料合理用量爆破试验。在高压防爆试验舱内进行试验,安装固定架、视频监控装置等,一方面能实现爆破全过程动态监控,另外能防止外界环境因素对多次试验的结果产生影响,按试验经验选择不同发热材料用量,3、4 mm不同厚度剪切片分别进行试验,发热材料合理用量测定结果见表2。

在实际爆破过程中,液态二氧化碳充装量一般控制在0.90~1.00 kg之间,可认为保持不变,定压剪切片厚度不变的情况下,瞬态载荷基本保持不变,储液罐体积固定,由试验结果可得,当定压剪切片厚度为3 mm时,需要发热材料至少113 g才能将定压剪切片成功爆破;当定压剪切片厚度为4 mm时,需要发热材料至少163 g才能成功爆破。因此,

表2 发热材料合理用量测定结果

剪切片厚度/mm	发热材料用量/g	二氧化碳充装量/kg	试验结果
3	163	0.97	成功
3	130	0.93	成功
3	113	0.90	成功
3	85	0.95	未爆开
4	113	0.90	未爆开
4	145	0.93	未爆开
4	163	0.94	成功

成功爆破一定厚度定压剪切片所需的发热材料用量存在1个最小值,实际得出的结果近似最小发热材料用量,在实际爆破应用过程中,在最小值基础上增加1个安全系数,既能保证二氧化碳致裂器成功爆破,又不至于浪费发热材料,能满足实际使用需求。

1.3 泄放压力测试

为了考察不同发热材料用量、液态二氧化碳充装量与爆破压力之间关系,搭建了爆破过程储液管内压力变化测定试验系统^[6]。试验系统主要包括防爆试验舱、数据采集系统、侧壁开孔的 $\phi 57$ mm致裂器、固定装置等,其中,数据采集系统包括压力传感器、数据采集卡及其配套软件、直流稳压电源、计算机、信号线、电源线等。

根据发热材料合理用量考察结果,利用爆破压力测试系统对液态二氧化碳充装量、发热材料用量条件下的管内压力变化开展了实测。

试验考察了规格为 $\phi 57$ mm、长度1 m、定压剪切片厚度为3、4 mm的致裂器爆破过程管内压力变化情况,试验过程中,液态二氧化碳充装压力均为10 MPa,发热材料用量分别以130、160 g为基数,20 g为增加量,开展了6次爆破压力测定试验,爆压压力测定试验记录表见表3。

表3 爆压压力测定试验记录表

定压剪切片厚度/mm	发热材料用量/g	液态二氧化碳充装量/kg	峰值压力/MPa
3	130	0.93	181.31
3	150	0.96	187.41
3	180	0.95	186.50
4	163	0.96	263.40
4	180	0.95	268.37
4	200	0.96	263.50

从测定结果可以得出,3 mm定压剪切片动态抗剪强度约为185 MPa左右,4 mm定压剪切片动态抗剪强度为263 MPa,均高于二者准静态抗剪强度

130、220 MPa,说明定压剪切片在动态载荷作用下,抗剪强度具有增大的物理特性,也能说明流动气体对剪切片压力不够持续线性所致。发热材料用量对储液管内压力变化影响不大,在二氧化碳充装量和剪切片厚度一定时,发热材料化学反应放出的热量使得液态二氧化碳升温相变,最小的发热材料用量即可触发全部二氧化碳发生相变,因此,发热材料用量在满足成功爆开定压剪切片基础上,适当增加有限量即可^[7]。

2 泄能口关键参数研究

2.1 泄放压力数学模型

二氧化碳致裂器属于物理爆破设备,储液管内压力变化应满足超临界二氧化碳流体状态方程^[8-12],即 R-K 方程:

$$p_{\text{CO}_2} = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{T^{\frac{1}{2}} V(V+b)} \quad (1)$$
$$a=0.42748 \frac{R^2 T_c^{2.5}}{p_{c1}}$$
$$b=0.08664 \frac{RT_c}{p_{c1}}$$

式中: p_{CO_2} 为储液管内二氧化碳流体压力,Pa; R 为气体常数,8.314 J/(mol·K); T 为储液管内二氧化碳流体温度,K; V 为储液管内二氧化碳流体摩尔体积,m³/mol; T_c 为二氧化碳临界温度,K; p_{c1} 为二氧化碳临界压力,Pa。

从式(1)可以得出,在气体常数、二氧化碳临界温度与临界压力不变的条件下,二氧化碳泄放压力只与二氧化碳摩尔体积和温度有关。当液态二氧化碳充装量完全按照设计充装压力进行充装时,可以认为储液管内二氧化碳摩尔体积保持不变,因此,二氧化碳泄放压力大小只与温度有关,即与发热材料用量有关。

定压剪切片厚度为3 mm时,从爆破压力测定试验得出其动态抗剪强度约为185 MPa,而根据发热材料合理用量试验得出成功爆开所需的发热材料用量约为113 g;定压剪切片厚度为4 mm时,从爆破压力测定试验得出其动态抗剪强度约为263 MPa,成功爆开的发热材料用量约为163 g。

利用最小二乘法拟合得到二氧化碳致裂器泄放压力与发热材料用量的数学关系为:

$$p_s = 76.932e^{0.0066m} \quad (2)$$

式中: p_s 为泄放压力,MPa; m 为发热材料用量。

2.2 泄能孔布设方式对泄能的影响分析

致裂器升温升压相变后,高压的二氧化碳流体冲破剪切片,从泄能头释放出去,巨大的能量以何种方式释放出去对煤矿进行最大程度的致裂,是研究液态二氧化碳致裂的核心内容,泄能口的布设方式对二氧化碳致裂器的泄能压力、气体流速等参数起到至关重要的作用。泄能口的布设方式主要包含泄能孔的数量、直径、排列方式3个方面。

2.2.1 泄能孔直径对泄能的影响分析

二氧化碳泄放过程相当于高压容器冲破安全阀膜片的过程,当破膜压力一定时,破膜面积越小,单位时间的流体泄放量就越小,泄放后流体压力越小,容器内的超压将继续增大;相反,破膜面积增大到一定程度时,单位时间的流体泄放量将增加,泄放后压力也增大,容器内超压将在短时间内迅速减小。根据流体力学理论,流体在通道内流动时,将会受到沿途阻力和局部阻力影响,能量存在损耗,过流断面越小,能量沿途损失越大;过流断面突变越大,能量局部损失也越大。

因此,基于以上分析,泄能孔的直径将直接影响泄能后能量的损失,为了取得最大限度的泄能效果,在不影响泄能头整体刚度的情况下,保证泄能头多次循环使用次数的前提下,尽量减小泄能通道长度,增大孔直径,断面面积与定压剪切片破断面积相同,腔内壁光滑^[13]。

2.2.2 泄能孔方向对泄能的影响分析

二氧化碳致裂器泄能孔的开孔方向对起爆后致裂器止飞起到关键作用,管内产生的高压、高温气体向尾部泄放口喷射^[14],瞬间产生的反向作用力使管体反向急速运动,运动速度大小与其自身管体质量、喷射气体流量和速度有关,质量越小、流量越大,管体急速运动越快,反之亦然。

储液管内高压二氧化碳气体冲破定压剪切片后,沿直线向泄能孔底方向运动,到达孔底后在泄能口方向向外喷射,孔口的方向不同,气体的运动方向沿孔口方向,产生的方向作用力方向也将不同:①当气流沿直线运动时,高压二氧化碳气体向泄能头方向运动,将会产生相反的作用力,导致致裂器向钻孔孔口方向运动,造成致裂器飞管现象;②当气体由孔底转向泄能口运动时,随孔口方向不同,产生不同方向的反向作用力:当孔口方向与管体轴线正交时,即90°时,泄能口在圆周方向均匀布置,不同泄能孔喷射的二氧化碳气体形成的反向作用力合理为0,不会阻止致裂器运动;当孔口方向与管体轴线斜交时,方向朝致裂器顶端,不同泄能孔喷射的二氧化碳

形成的反向作用力不为0,此作用力将与气体沿直线运动时的作用力相互抵消,阻止致裂器飞出。

经受力分析,如果使泄能口倾斜一定角度,泄放的作用力可分解为轴向和径向作用力,径向作用力相互抵消,致裂器不能转动,4个泄能口的轴向作用力可抵消部分爆破瞬间产生的轴向作用力,轴向力减小,致裂器止飞。

采用Solidworks进行三维模型建立,管体材料45号钢,剪切片材料为Q345,使用Flow Simulation进行内部流动分析,对4个斜泄能口进行封盖,封盖厚度为3mm,形成1个完全封闭的内部体积,设置热动力参数,压力为测定的185MPa,插入入口边界条件腔内总压185MPa,设置4个泄能口为出口边界条件,显示封盖处动压平均值,进行网格划分,加载试验。内部流体模拟结果显示,经过多次湍流和涡流之后,封闭空间内压力聚集,爆破瞬间冲破泄能片,泄压压力185MPa,在4个泄能口冲出,由结果可知4个泄能口压力相同。由于爆破泄放时间很短,可等效把气体当作理想不可压缩气体,由理想气体状态方程可得:

$$pV=nRT \quad (3)$$

式中: p 为压力; V 为体积; n 为物质的量; R 为气体常量; T 为体系温度。

冲破剪切片压力 $p_1=185$ MPa,半径 R_1 ;泄能口处压力 p_2 ,口半径 R_2 ;假设斜孔倾斜角度为 α ,4个泄能口作用力在轴向向上的合力与爆破产生的轴向外力相等,使致裂器达到平衡;

$$4 \times \pi R_2^2 p_2 \cos \alpha = p_1 \pi R_1^2 \quad (4)$$

由此得出泄能口倾角 $\alpha=75^\circ$ 为宜。

3 结 语

1)讨论了二氧化碳致裂器泄放压力与定压剪切片厚度、发热材料用量和液态二氧化碳充装量之间的关系,开展了准静态抗剪强度测试、动态爆破测试,选取了泄能过程中的关键参数,得出了泄放压力数学模型。

2)试验得出爆破后泄放压力仅与发热材料用量和定压剪切片厚度有关,发热材料用量不能低于最小值,才能成功起爆,材料用量与泄能压力并不是正比例线性关系;定压剪切片厚度不同,静态抗剪压力和动态泄能压力都不同,厚度越厚,相应数值越大。

3)在分析泄能孔布设方式对泄能压力、止飞效果影响基础上得出:泄能孔面积大小能够影响泄能

过程高压二氧化碳流体能量损失大小,在满足泄能头结构强度前提下,应尽可能增加泄能孔面积,避免流动方向突变;泄能孔开孔方向影响高压二氧化碳流体泄放时形成的反作用力方向,2种作用力可相互抵消,达到止飞效果。

参考文献:

- [1] 王兆丰,孙小明,陆庭侃,等.液态CO₂相变致裂强化瓦斯预抽试验研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2015,34(1):1-5.
- [2] 赵立朋.煤层液态CO₂深孔爆破增透技术[J].煤矿安全,2013,44(12):76-81.
- [3] 贺超.基于二氧化碳深孔预裂增透技术的低透煤层瓦斯治理[J].煤炭科学技术,2017,45(6):67-72.
- [4] 黄园月,尹岚岚,倪昊,等.二氧化碳致裂器研制与应用[J].煤炭技术,2015,34(8):123-124.
- [5] 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,2015,43(2):80-83.
- [6] 康玉.煤气泄漏装置的数值模拟与试验研究[D].秦皇岛:燕山大学,2011.
- [7] 孟祥甜,刘磐,倪昊,等.CO₂致裂器药卷最小起爆长度试验[J].煤矿安全,2018,49(1):53-56.
- [8] 严成增,孙冠华,郑宏,等.爆炸气体驱动下岩体破裂的有限元-离散元模拟[J].岩土力学,2015,36(8):2419-2425.
- [9] 李宁,陈莉静,张平.爆生气体驱动岩石裂缝动态扩展分析[J].岩土工程学报,2006,28(4):460-463.
- [10] 李宁,SWOBODA G.爆破荷载的数值模拟与应用[J].岩石力学与工程学报,1994,13(4):357-364.
- [11] 赵新涛,刘东燕,程贵海,等.爆生气体作用机理及岩石裂纹扩展分析[J].重庆大学学报,2011,34(6):75.
- [12] 李炜.数值分析模拟爆生气体作用下岩石裂纹扩展研究进展[J].工程建设,2008,40(2):16-22.
- [13] 凌伟明,杨永琦.爆生气体在光面爆破中的作用[J].煤炭学报,1990,15(1):73-82.
- [14] 杨小林,孙博,褚怀保.爆生气体在煤体爆破过程中的作用分析[J].金属矿山,2011(11):65-68.

作者简介:彭然(1987—),河北保定人,助理研究员,煤炭科学研究总院在读硕士研究生,从事应急救援及安全技术等方面研究。

(收稿日期:2018-07-12;责任编辑:李力欣)