文章编号：1006-7051(2023)05-0105-08

CO_2 相变爆破致裂管内压力变化试验研究

尤 横[1]，岳中文[1]，杨海斌[1,2]，王尹军[3]，郭宝江[2]，李继红[2]，张风军[2]，苗玉杰[2]
(1. 中国矿业大学力学与建筑工程学院，北京 100083；2. 河北云山化工集团有限公司，河北 邢台 054011；3. 矿冶科技集团有限公司，北京 100160)

摘　要： 为研究 CO_2 相变爆破过程中致裂管内压力变化规律，通过现场试验获得压力与时间关系曲线，并且通过改变 CO_2 充装质量、激发药剂质量和泄能片厚度，获得致裂管中压力变化规律，采用试验参数计算出 73 型号致裂器爆破当量。研究结果表明，致裂管体不同位置处达到的峰值压力不同，最大处峰值压力比最小处峰值压力高 1.30～1.67 倍；爆破过程致裂管中压力变化分为 4 个阶段，泄压阶段极为迅速，在数微秒间，并且随 CO_2 充装质量增大而增加；在 CO_2 充装质量 1 100 g、激发药剂质量 180 g 和泄能片厚度 4.0 mm 条件下，该型号致裂器爆破当量最大为 0.378 kg 乳化炸药，研究成果为工程应用提供技术参考。

关键词： CO_2 相变爆破；压力测试；致裂管内压力；炸药当量
中图分类号： TD235　**文献标志码：** A　**doi：** 10.19931/j.EB.20220365

Experimental study on pressure change in cracking tube during process of CO_2 phase change blasting

YOU Heng[1], YUE Zhong-wen[1], YANG Hai-bin[1,2], WANG Yin-jun[3], GUO Bao-jiang[2], LI Ji-hong[2], ZHANG Feng-jun[2], MIAO Yu-jie[2]
(1. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. Hebei Yunshan Chemical Group Co. Ltd., Xingtai 054011, Hebei, China; 3. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: To study the rule of the pressure change in the cracking tube during the process of CO_2 phase change blasting, the pressure-time relationship curves were obtain through field test, and rule of the pressure change by changing CO_2 filling mass, stimulating agentmass and energe release film thickness, and the 73 model cracking device blasting equivalent is calculated using the test parameters. The results show that, the peak pressure at different locations are different, and the maximum peak pressure is about 1.30-1.67 times higher than the minimum; The pressure changes into four stages, pressure relief stage is extremely rapid in a few microseconds and increases with the increase CO_2 filling mass, At the CO_2 fillingmass of 1 100 g, stimulating agentmass of 180 g and energe release film thickness of 4.0 mm, maximum blasting equivalent of this model cracking device is 0.378 kg emulsion explosive. These research results provide technical reference for engineering application.

Key words: CO_2 phase change blasting; pressure test; pressure in the cracking tube; explosive equivalent

作为一种新型爆破技术，CO_2 相变爆破符合绿色环保、经济合理、安全可靠的精细爆破要求，近年来发展迅速，被广泛应用于煤层瓦斯增透、基坑开挖和石方开采工程，取得了较为理想的效果。

收稿日期： 2022-10-31
基金项目： 国家重点研发计划基金资助项目(GN2021-06-3045)
作者简介： 尤 横(1997－)，男，在读硕士，从事爆破工程方面的研究。E-mail：3043577051@qq.com
通信作者： 岳中文(1975－)，男，博士，教授，从事岩土工程和采矿工程方面的研究。E-mail：zwyue75@163.com

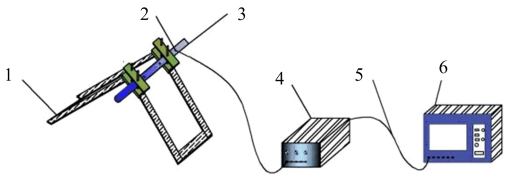
有学者运用理论、实验室试验、数值模拟和现场试验等方法研究了 CO_2 相变爆破机理和技术。在岩体致裂效果和应用方面，詹德帅[1]、王明宇[2]和郭云龙等[3]对高压 CO_2 气体冲出作用于岩体的致裂效果进行相关研究，得出岩体裂纹扩展的相关规律。刘小雄等[4]对 CO_2 相变致裂过程中的频谱特征和能量分布进行研究，得出致裂过程中振动的相关规律。郭云龙等[5-6]通过将 CO_2 相变爆破产生的能量换算成炸药当量来研究相变爆破产生的岩体损伤、爆破振动等。王兆丰等[7-12]将 CO_2 相变致裂技术应用于富瓦斯煤层，有效提高了瓦斯抽采效率。此外，CO_2 相变爆破技术还在地铁施工[13]、基坑开挖[14]和露天矿山开采[15-16]中有大量应用，取得了良好效果。在致裂器冲出压力研究方面，部分研究者[17-19]发现其致裂压力曲线与爆破荷载较为相似，均为近三角形式，但其升压速率与压力作用时间和爆破荷载有明显区别，其属于中应变率长持时荷载。在致裂管内压力测试方面，郭勇等[20]研究了致裂管中压力与时间变化规律，并且分析了温度对压力变化的影响。肖城旭[21]试验研究发现泄能片厚度对致裂管中压力大小起决定性作用，并且理论分析了致裂管中 CO_2 充装量对压力和温度的影响。赵飞[22]和周西华等[23]通过测试管中压力变化，分析了煤体在相变爆破过程中受力状态，为煤体开采和增透提供了依据。但是对于在不同变量条件下致裂管体内不同位置处压力变化规律的研究较少，需要进一步探讨和分析。

采用压力测试系统对 73 型号致裂管内不同位置处进行压力测试，得出了在不同条件下致裂管内不同位置处压力变化规律，为现场工程应用提供技术支撑。

1 试验系统及设计

1.1 试验系统

试验所需的设备仪器包括压力传感器、固定架、73 型号致裂管、信号放大器、示波器、CO_2 充装机和液态 CO_2 储液罐。试验系统如图 1 所示。



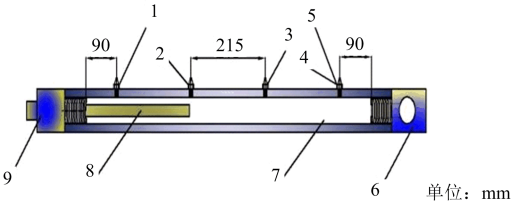
注：1-固定架；2-压力传感器；3-CO_2 致裂器；4-信号放大器；5-信号传输线；6-示波器。

图 1 试验系统

Fig. 1 Experiment system

1.2 试验设计

在外径为 73 mm、壁厚 14 mm、长度为 945 mm 的致裂管体一侧相隔等距离钻出 4 个螺纹孔，将相同规格的压力传感器分别拧入孔中。从充装头到泄能头方向分别为测点 1、2、3、4，其中测点 1 和 4 分别距离管体内腔端壁均为 90 mm，并且 4 个测点位置相距均为 215 mm。放入泄能片和激发药剂，使用天平称量充入的 CO_2 质量，将致裂管固定于支架中，连线安全起爆后，示波器记录此过程致裂管中压力变化。压力传感器布置如图 2 所示。



注：1. 2. 3. 4-测点；5-压力传感器；6-泄能头；7-致裂管体；8-激发药剂；9-充装头。

图 2 压力传感器布置位置

Fig. 2 Arrangement position of the pressure sensor

通过改变激发药剂质量、CO_2 充装质量和泄能片厚度组成 12 组试验方案，如表 1 所示。

表 1 试验方案

Table 1 Experiment scheme

试验组别	CO_2 充装量/g	激发药剂质量/g	泄能片厚度/mm
1	1 000	160	4.0
2	1 000	180	4.0
3	1 000	200	4.0
4	1 000	220	4.0
5	1 000	240	4.0
6	800	180	4.0
7	900	180	4.0
8	1 100	180	4.0
9	1 000	180	2.0
10	1 000	180	2.5
11	1 000	180	3.0
12	1 000	180	3.5

2　试验结果及分析

2.1　压力-时间曲线分析

试验测出的压力-时间曲线如图 3 所示。曲线表明，通电使激发药剂起燃放出热量，致裂管内压力会有一个缓慢上升过程，之后逐渐加快到达峰值压力，此过程需要数百毫秒，到达峰值压力时，泄能片破开，管内压力急速释放，在数十毫秒时间内达到零压，之后压力依然会下降，使管内处于一个负压状态，达到低谷后，管外空气涌入，管中压力处于缓慢上升状态并趋于零压，此过程需要数百毫秒时间。

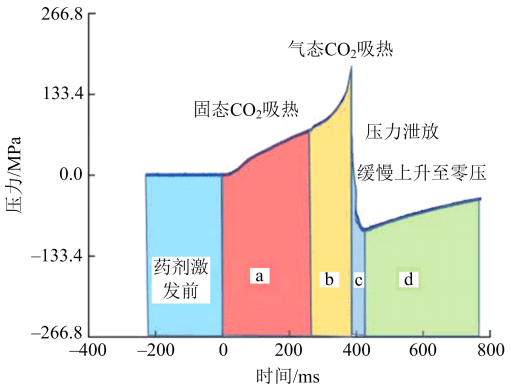


图 3　测点处压力变化

Fig. 3　The pressure change at the measuring point

CO_2 的熔化热为 196.65 J/g，气化热为 570.08 J/g，恒容比热容为 0.63 J/(g·K^{-1})，分析认为致裂管内压力变化大致分为 4 个阶段：a)固液态 CO_2 吸热膨胀阶段(0～270 ms)；b)气态 CO_2 吸热膨胀阶段(270～390 ms)；c)高压气体冲出阶段(390～410 ms)；d)管中压力缓慢上升至零压阶段(410～1 000 ms)。第 1 阶段中，管中压力成线性缓慢增长，由于此时致裂管中的 CO_2 处于固液态状态，分子间距和运动速度都较小，CO_2 的熔化热和气化热数值都较大，单位质量的 CO_2 气化成气体需要较高的热量供给，此时管中压力上升只是由于 CO_2 从固液态气化为气态，其分子间距增大的结果。第 2 阶段中，绝大部分的 CO_2 已经处于气体状态，由于 CO_2 的比热容相比其熔化热和气化热较小，因此激发药剂燃烧剩余的热量使管中温度急剧升高，CO_2 气态分子运动速度加快，此阶段管中压力呈指数形式增长，在 100 ms 左右的时间内，压力可升高数百兆帕。第 3 阶段中，泄能片在管中高压和泄能头棱角共同作用下发生压剪破坏，管中高压气体迅速经泄能口冲出，此时的管中压力急剧下降，在 10 ms 左右时间内，从峰值正压降低至峰值负压。第 4 阶段内由于致裂管内处于负压状态，周围环境中的气体开始经泄能口向管内回流，使管中压力上升至零压，由于此过程中，管中与环境压差逐渐减小，升压速率逐渐变小，压力上升减慢，此过程大约需要 600～800 ms 甚至更长时间。

2.2　峰值压力分析

CO_2 充装质量、泄能片厚度和激发药剂质量不同时，管内达到的峰值压力会随之改变。具体峰值压力数值如表 2 所示。

表 2　峰值压力测试结果

Table 2　Experiment results of peak pressure

(MPa)

试验组别	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
1	238.12	184.09	277.47	270.80
2	276.34	237.92	325.50	321.03
3	265.13	216.11	316.16	304.82
4	249.23	200.55	299.70	291.04
5	230.34	162.75	271.91	265.69
6	198.55	155.41	231.45	225.00
7	235.65	204.10	264.33	253.46
8	288.14	255.13	333.30	325.03
9	152.08	124.73	181.42	178.76
10	164.08	147.63	209.88	199.66
11	246.79	200.10	291.48	288.14
12	250.57	206.77	302.15	289.26

试验结果显示，测点 3 与测点 4 处的峰值压力较大，测点 1 与测点 2 处的峰值压力较小，其中测点 3 处峰值压力是测点 2 处峰值压力的 1.30～1.67 倍。分析认为，激发药剂的点燃点靠近充装头端，其点燃后放出热量，导致其周围的 CO_2 吸热迅速膨胀与远处形成压力差，并且由于火焰沿着柱状激发药剂传播，使管体中生成多重压力波。生成的压力波沿着管腔向泄能头端方向传播，到达端部后，经过泄能片和管体端壁反射形成反射压力波，与后来的压力波相互多重叠加，使管体末

端区域出现高压现象。致裂管腔中压力波叠加如图 4 所示。

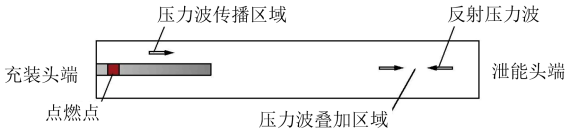


图 4 致裂管中压力波叠加

Fig. 4 Pressure wave superposition in thecracking tube

2.2.1 激发药剂质量对峰值压力影响分析

不同测点处峰值压力随激发药剂质量变化如图 5 所示。在 CO_2 充装质量为 1 000 g 和泄能片厚度为 4.0 mm 前提条件下，改变激发药剂质量，获得了激发药剂在 160、180、200、220 和 240 g 条件下不同测点处的峰值压力。分析发现，在一定范围内，峰值压力会随着激发药剂质量增加而增大，多于最优激发药剂质量后，峰值压力反而会下降。

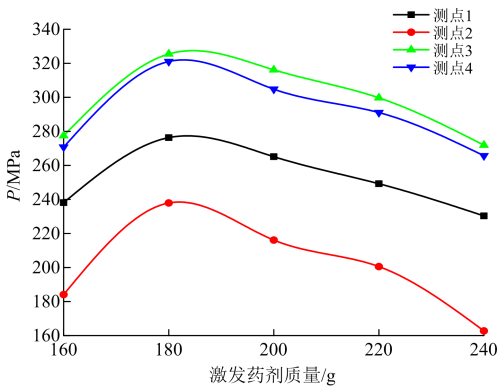


图 5 峰值压力随激发药剂质量变化关系

Fig. 5 Change relationship of peak pressure withstimulating agentmass

CO_2 相变爆破过程中泄能片受压剪作用如图 6 所示。分析认为，致裂管中能够达到的峰值压力与泄能片的压剪强度有关，当管中压力达到一定数值使泄能片发生压剪破坏后管中高压气体释放，管中压力便开始下降。

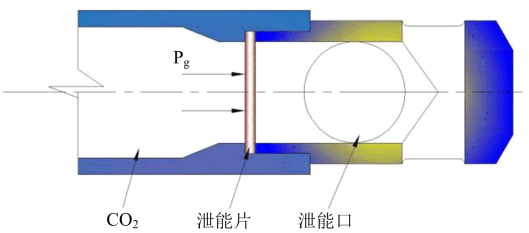


图 6 泄能片受压剪作用

Fig. 6 Pressure-shear action of energe release film

在试验中，泄能片厚度均为 4.0 mm，激发药剂被点燃后，管中压力开始上升，因此泄能片从激发药剂点燃便开始受压剪作用，可将管中压力上升时间作为泄能片的受压剪时间。试验测得的压力上升时间和泄能片受压剪速度如表 3 所示。

表 3 不同质量激发药剂下压剪速度

Table 3 Pressure-shear velocity of differentmass of stimulating agent

激发药剂质量/g	压力上升时间/ms	平均压剪速度/(cm·s^{-1})
160	166.28	2.41
180	94.13	4.25
200	113.31	3.53
220	115.11	3.47
240	172.19	2.32

试验结果表明，180 g 药剂时，对泄能片的压剪速度最大，240 g 激发药剂时压剪速度最小，试验的结果完全符合材料的压剪强度随压剪速率增加而增加的结论。分析认为，致裂管中的 CO_2 质量与激发药剂质量存在一个合适配比，使管中压力可以持续升高达到较高峰值，此试验中合适配比为 50∶9。当配比小于该数值时，即激发药剂质量偏高，CO_2 完全转化为气体后还剩余大量热量，这些热量使管内温度升高至较高数值，对于管内压力增加无显著作用，当激发药剂质量偏低时，其释放的热量不足以加热气态 CO_2，甚至一部分 CO_2 还处于固液态状态，导致管中压力较低。

2.2.2 泄能片厚度对峰值压力影响分析

不同测点处峰值压力随泄能片厚度变化如图 7 所示。在 CO_2 充装质量为 1 000 g 和激发药剂质量为 180 g 前提条件下，改变泄能片厚度，获得在泄能片厚度为 2.0、2.5、3.0、3.5 和 4.0 mm 下的各测点处峰值压力。分析发现，在一定范围内，各点峰值压力会随着泄能片厚度增加而增大。致裂管不同位置处达到的峰值压力不同，测点 3 处峰值压力最大，测点 2 处峰值压力最小，其两点相差 1.37～1.46 倍。

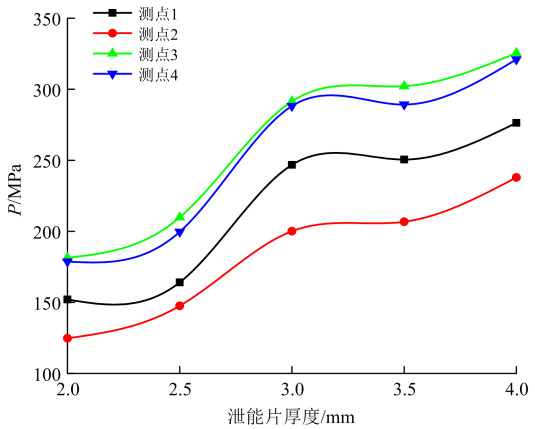


图 7　峰值压力随泄能片厚度变化关系

Fig. 7　Change relationship of peak pressure with thickness of energe release film

理论计算致裂管中压力峰值，一般采用如下公式[6]

$$P_g=\frac{2\sigma_s\delta}{R} \tag{1}$$

式中：P_g 为致裂管中压力峰值；σ_s 为泄能片的抗剪强度；δ 为泄能片厚度；R 为泄放孔半径。

理论计算的致裂管中峰值压力与泄能片的厚度成正相关，对于试验中用到的不同厚度的泄能片，其理论峰值压力比值即为泄能片厚度的比值。不同厚度泄能片的理论与试验测得的峰值压力比值如表 4 所示。

表 4　泄能片不同厚度比值下的峰值压力比

Table 4　Peak pressure ratio at different thickness ratios of energe release film

泄能片厚度比	试验测得峰值压力增长倍数				理论增长倍数	相对差值/%
	测点1	测点2	测点3	测点4		
2.5/2.0	1.08	1.18	1.16	1.12	1.25	5.60～13.60
3.0/2.5	1.50	1.36	1.39	1.44	1.20	13.33～25.00
3.5/3.0	1.02	1.03	1.04	1.00	1.17	11.11～14.53
4.0/3.5	1.10	1.15	1.08	1.11	1.14	0.88～5.26

分析发现，致裂管中的峰值压力理论增长倍数更接近管体中部的实际试验增长倍数，管体两端的实际峰值压力增长倍数与理论增长倍数相差较大。试验中对于不同厚度的泄能片，管中各点处峰值压力增长倍数相差较小，各点处的峰值压力差值随泄能片厚度增加而呈增大趋势。

2.2.3　CO_2 充装质量对峰值压力影响分析

不同测点处峰值压力随 CO_2 充装质量变化如图 8 所示。在泄能片厚度为 4.0 mm 和激发药剂质量为 180 g 前提条件下，改变 CO_2 充装质量，获得在 CO_2 充装质量为 800、900、1 000 和 1 100 g 下的各测点处峰值压力。分析发现，在一定范围内，各点峰值压力会随着 CO_2 充装质量增加而增大，随着 CO_2 充装密度从 0.67 g/cm^3 增加至 0.92 g/cm^3，其各点处的峰值压力增长了 44.01%～64.17%。致裂管不同位置处达到的峰值压力不同，测点 3 处峰值压力最大，测点 2 处峰值压力最小，其两点相差 1.30～1.49 倍。

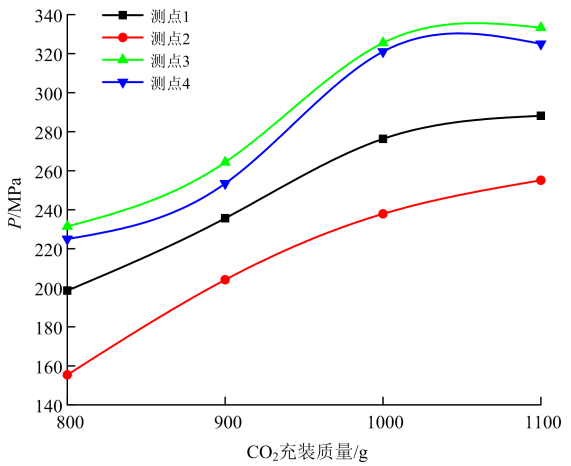


图 8　峰值压力随 CO_2 充装质量变化关系

Fig. 8　Change relationship of peak pressure withfillingmass of CO_2

2.3　泄压时间分析

每次试验固定激发药剂为 180 g 和泄能片厚度为 4.0 mm 不变，改变 CO_2 充装质量，其泄压持续时间会发生改变。其泄压时间具体数值如表 5 所示。

表 5　泄压持续时间测试结果

Table 5　Experiment results of pressure release duration

CO_2 充装质量/g	泄压时间/us			
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
800	3 785	3 360	3 605	3 904
900	7 148	8 517	7 073	8 415
1 000	7 784	9 981	8 308	12 186
1 100	9 052	12 172	9 595	13 096

不同测点处泄压时间随 CO_2 充装质量变化如图 9 所示。研究结果表明，当 CO_2 充装质量增加

时，致裂管中泄压持续时间会增加。CO_2 的充装密度从 0.67 g/cm^3 增加至 0.92 g/cm^3，即充装密度增加 37.31%，泄压时间测点 1 增长 139.15%，测点 2 增长 262.26%，测点 3 增长 166.16%，测点 4 增长 235.45%。

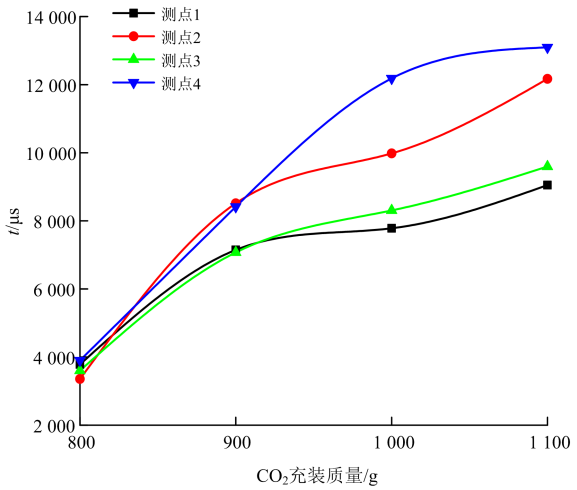


图 9 泄压时间随 CO_2 充装质量变化关系

Fig. 9 Change relationship of pressure relief time with fillingmass of CO_2

分析认为，4 个测点处的泄压时间并不一致，其泄压时间测点 1 和 3 较小，测点 2 和 4 较高，由此推断出在泄压过程中，管中高压气体并不均衡，压力出现高低峰现象。靠近泄能口处的测点 4 泄压时间最长，在其泄压过程中，管体深处的气体对其进行补充，保证其能够持续泄压。

2.4 单根致裂器爆破能量的乳化炸药当量计算

致裂管中 CO_2 绝大部分以液体形式存在，因此采用压缩气体和水蒸气的爆炸能量计算公式计算其爆破的能量[24]，如下式：

$$\omega=\frac{P_1V}{K-1}\left[1-\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K-1}{K}}\right] \tag{2}$$

式中：ω 为 CO_2 相变爆破能量；P_1 为致裂管中峰值压力；V 为致裂管容积；P_2 为标准大气压；K 为 CO_2 绝热指数，$K=1.295$。

经过试验测试，当 CO_2 充装质量为 1 100 g，激发药剂质量为 180 g，泄能片厚度为 4.0 mm 时，致裂管中峰值压力可达 333.30 MPa，致裂管容积为 1.2 L，求得的爆破能量 ω 为 1136.16 kJ。

乳化炸药当量可用下式计算：

$$W=\frac{\omega}{Q} \tag{3}$$

式中：Q 为乳化炸药的爆热，$Q=3\ 009$ kJ/kg。

经计算，单根致裂器爆炸能量为 0.378 kg 的乳化炸药。

此外，研究还发现，当激发药剂质量或者充入的 CO_2 质量过少时，相变过程产生的压力不足以完全剪切开泄能片，泄能片在致裂管中压力和泄能头共同作用下会产生较大压剪变形和位置松动，管中高压气体会缓慢释放，此过程的泄压时间会持续数秒时间，其压力变化曲线如图 10 所示。

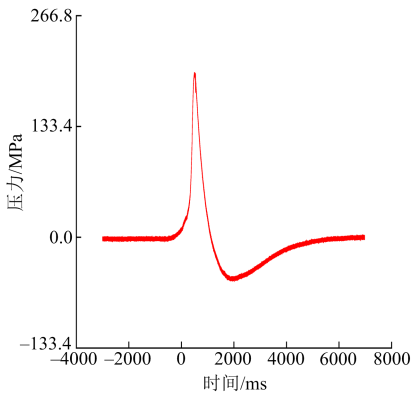


图 10 泄能片压剪变形下致裂管中压力变化

Fig. 10 Pressure change in crack tube under pressure-shear deformation of energe release film

3 结论

1）致裂管中的压力变化与激发药剂质量、CO_2 充装质量和泄能片厚度有关，压力曲线变化过程大致分为 4 个阶段：线性缓慢上升阶段、指数急剧上升阶段、高压气体冲出阶段和缓慢回归零压阶段。

2）CO_2 充装质量与激发药剂质量存在一个合适配比使致裂管内压力升高到较大数值，配比数值过大或过小均对管中峰值压力增加有消极作用，致裂管中不同位置处的峰值压力不同，靠近泄能头处的峰值压力大于靠近充装头处的峰值压力，最大峰值压力处的压力是最小峰值处压力的 1.30～1.67 倍。

3）CO_2 充装质量对泄压时间有明显影响作用，致裂管中 CO_2 充装密度增加 37.31%时，泄压时间可增长 139.15%～262.26%，在泄压过程中，管中压力并不均衡，出现高低峰现象。

4）对于 73 型号致裂管，当 CO_2 充装质量为 1 100 g、激发药剂质量为 180 g 和泄能片厚度为 4.0 mm 时，其致裂管内产生的峰值压力最大，泄压持续时间最长，单根致裂器爆破能量相当于 0.378 kg 的乳化炸药，可为工程应用提供参考。

参考文献（References）：

[1] 詹德帅. 二氧化碳充装量与致裂效果的模拟分析[D]. 北京：煤炭科学研究总院，2017.
ZHAN D S. Simulation analysis of carbon dioxide filling and cracking effect[D]. Beijing: General Institute of Coal Science and Research, 2017.

[2] 王明宇. 液态二氧化碳相变爆破裂纹扩展规律研究及应用[D]. 徐州：中国矿业大学，2018.
WANG M Y. Research and application of crack expansion rule of liquid carbon dioxide phase transition blasting[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.

[3] 郭云龙，李纪宝，孙崔源，等. 孔间距对二氧化碳相变爆破效果的影响模拟分析[J]. 铁道建筑，2022，62(6)：125-129.
GUO Y L, LI J B, SUN C Y, et al. Simulation analysis of the influence of hole spacing on the blasting effect of carbon dioxide phase transition blasting[J]. Railway Construction. 2022, 62(6): 125-129.

[4] 刘小雄，李启月，冯国伟，等. 液态二氧化碳相变破岩振动能量分布研究[J]. 矿冶工程，2018，38(3)：5-10.
LIU X X, LI Q Y, FENG G W, et al. Study on vibration energy distribution of liquid carbon dioxide phase transition blasting to breaking rock[J]. Mining and Metallurgy Engineering. 2018, 38(3): 5-10.

[5] 郭云龙，孟海利，孙崔源，等. 二氧化碳膨胀爆破岩体数值模拟分析[J]. 铁道建筑，2021，61(9)：85-88，93.
GUO Y L, MENG H L, SUN C Y, et al. Numerical simulation of carbon dioxide expansion blasting rock mass[J]. Railway Construction, 2021, 61(9): 85-88, 93.

[6] 夏祥，李海波，王晓炜，等. 核电工程中的 CO_2 致裂与炸药爆破地表振动传播规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2021，40(7)：1 350-1 356.
XIA X, LI H B, WANG X W, et al. Experimental study on the surface vibration propagation law of CO_2 phase transition cracking and explosive blasting in nuclear power engineering [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2021, 40(7): 1 350-1 356.

[7] 王兆丰，李君豪，陈喜恩，等. 液态 CO_2 相变致裂煤层增透技术布孔方式研究[J]. 中国安全生产科学技术. 2015，11(9)：11-16.
WANG Z F, LI J H, CHEN X E, et al. Study on cloth hole method of liquid CO_2 phase transition cracking coal seam penetration technology[J]. China Safety Production Science and Technology, 2015, 11(9): 11-16.

[8] 陈善文，潘竞涛，贾男. 王家岭煤矿 CO_2 相变致裂煤层增透技术应用研究[J]. 煤炭技术，2016，35(12)：175-177.
CHEN S W, PAN J T, JIA N. Application study on coal seam penetration technology of CO_2 phase transition cracking in Wangjialing coal mine[J]. Colliery Engineering, 2016, 35(12): 175-177.

[9] FAN Y C, QIN B T, ZHOU Q, et al. Liquid CO_2 phase transition fracturing technology and itsapplication in enhancing gas drainage of coal mines [J]. Adsorpt Sci Technol, 2020, 38(9-10): 393-412.

[10] 沈玉旭，张文阳，崔凯，等. 煤层液态 CO_2 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.
SHEN Y X, ZHANG W Y, CUI K, et al. Experimental study on coal seam penetration technology of liquid CO_2 phase transition cracking[J]. Mining Research and Development. 2022, 42(1): 133-138.

[11] CHEN H D, WANG Z F, CHEN X E, et al. Increasing permeability of coal seams using the phase energy of liquid carbon dioxide[J]. Journal of CO_2 Utilization, 2017, 19: 112-119.

[12] 白鑫. 液态二氧化碳相变射孔致裂煤岩体增透机理及

应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2019.
BAI X. Study on the penetration mechanism and application of liquid carbon dioxide phase transition perforation cracking coal rock mass[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.

[13] 宋伟. 复杂环境下地铁施工二氧化碳破岩技术研究[J]. 铁道勘察,2020,46(4):80-83,87.
SONG W. Research on carbon dioxide rock breaking technology for underground construction in complex environment[J]. Railway Survey. 2020,46(4):80-83,87.

[14] 成诗冰,洪志先. 液态 CO_2 致裂技术在管廊基坑台阶开挖中的应用[J]. 工程爆破. 2021,27(5):80-89.
CHENG S B, HONG Z X. Application of liquid CO_2 cracking technology in the excavation of foundation pit steps of pipe gallery[J]. Engineering Blasting, 2021,27(5):80-89.

[15] 朱宽,钟冬望,刘令,等. 二氧化碳膨胀爆破在石灰石矿山中的模拟及应用[J]. 采矿技术,2020,20(6):77-81.
ZHU K, ZHONG D W, LIU L, et al. Simulation and application of CO_2 phase transition blasting in limestone mine[J]. Mining Technique,2020,20(6):77-81.

[16] 刘征,李昆,费日东. 二氧化碳炮爆破技术在山体石方开挖工程中的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版),2017,(14):103.
LIU Z, LI K, FEI R D. Application of carbon dioxide phase transition blasting technology in mountain rock excavation engineering[J]. Urban Construction Theory Research (Electronic edition), 2017, (14):103.

[17] ZHANG Y N, DENG J R, DENG H W, et al. Peridynamics simulation of rock fracturing under liquid carbon dioxide blasting[J]. Int J Damage Mech, 2019, 28(7):1 038-1 052.

[18] HUS B, PANG S G, YAN Z Y. A new dynamicfracturing method: deflagration fracturing technology with carbon dioxide[J]. Int J Fract, 2019, 220(1): 99-111.

[19] CHI L Y, ZHANG Z X, AALBERG A, et al. Measurement of shock pressure and shock-waveattenuation near a blast hole in rock[J]. Int J Damage Eng,2019, 125: 27-38.

[20] 郭勇,柯波,吴著明,等. 液态 CO_2 爆破系统相变过程的热力学特性研究[J]. 爆破,2018,35(4):108-115.
GUO Y, KE B, WU Z M, et al. Study thermodynamic characteristics of the phase transition process in a liquid CO_2 blasting system[J]. Blasting, 2018,35(4):108-115.

[21] 肖诚旭. 液态二氧化碳相变致裂的试验研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2018.
XIAO C X. Experimental study on the cracking generation of liquid carbon dioxide phase transition[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018.

[22] 赵飞. 液态二氧化碳爆破致裂煤体压力特性及增透效果研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
ZHAO F. Study on the pressure characteristics and penetration effect of liquid carbon dioxide blasting to crack coal body[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[23] 周西华,门金龙,宋东平,等. 液态 CO_2 爆破煤层增透最优钻孔参数研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(3):524-529.
ZHOU X H, MEN J L, SONG D P, et al. Study on optimal drilling parameters of liquid CO_2 blasting coal seam [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(3): 524-529.

[24] 李文炜,狄刚,王瑞欣. 船运液态二氧化碳储罐爆炸事故的原因分析[J]. 安全与环境工程. 2010,17(1):95-98.
LI W W, DI G, WANG R X. Causation analysis of liquid carbon dioxide storage tank explosion hazard [J]. Safety and Environmental Engineering. 2010,17(1):95-98.