

文章编号: 1006-7051(2022)04-0078-06

# 致裂器对液态 CO<sub>2</sub> 相变破岩的功效影响分析

肖婷, 欧玉峰

(广东中仁工程集团有限公司, 广州 510515)

**摘要:** 为了研究致裂器因素对液态 CO<sub>2</sub> 相变破岩功效的影响, 利用现场应用及统计分析的方法, 结合 CO<sub>2</sub> 相变工作的工况分析, 对国内目前几种典型的致裂器, 从其部件适配性、致裂管结构及工作原理、应用工艺等方面进行分析研究。结果表明: 致裂器的部件适配性、整体的稳定性及安全性直接与破岩的作业效率、宏观效果等方面紧密关联, 甚至关系到破岩结果的成败, 致裂器是影响液态 CO<sub>2</sub> 相变破岩功效的关键因素。最后基于国内主流致裂管目前存在的不足, 提出了致裂管的改进和发展趋势。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 破岩; 现场应用; 统计分析; 功效影响; 致裂器因素

**中图分类号:** TD235 **文献标志码:** A **doi:** 10.19931/j.EB.20210093

## Analysis of the effect of the fracturer on liquid CO<sub>2</sub> phase-transforming rock fracturing

XIAO Ting, OU Yu-feng

(Guangdong Zhongren Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 510515, China)

**Abstract:** In order to study the influence of fracturer factors on the rock-breaking efficiency of liquid CO<sub>2</sub> phase change, using the method of field application and statistical analysis, combined with the analysis of the working conditions of CO<sub>2</sub> phase change, several typical domestic fracturers are analyzed and researched from the aspects of its component adaptability, structure and working principle, and application technology. The results show that the adaptability of components, overall stability and safety of the fracturer are directly related to the operation efficiency and macroscopic effect of rock breaking, and even related to the success or failure of the rock breaking results. The fracturer is the key factor affecting the rock breaking efficiency of liquid CO<sub>2</sub> phase change. Based on the current deficiencies of domestic mainstream fracturing pipes, the improvement and development trend of fracturing pipes are put forward.

**Key words:** CO<sub>2</sub> expansion fracturing; field application; statistical analysis; efficacy effects; fracturer factor

液态 CO<sub>2</sub> 相变破岩主要依靠相变产生的气体膨胀对外做功来实现<sup>[1]</sup>。与传统的炸药爆破方式不同, CO<sub>2</sub> 本身无毒、无害, 其液-气相变是吸热过程, 不发光、发热, 也无新的产物生成, 而且其相变破岩产生的粉尘少、飞石少、振动小、振动波频率低、衰减慢, 对环境影响小<sup>[2-3]</sup>, 在环保和安全方面具有明显的独特优势。

近年来在我国铁路、公路、市政、矿山、水利等工程爆破领域中液态 CO<sub>2</sub> 相变破岩技术得到了广泛推广应用。在应用中均采用“钻爆法”破岩工艺, 即通过对拟破岩体进行钻孔, 再在钻好的炮孔内装埋致裂器并使其处于做功态, 激发孔内的致裂器, 使装在其内的 CO<sub>2</sub> 相变进行做功破岩。而传统装药“钻爆法”, 涉及严格而繁琐的审批手续,

收稿日期: 2021-05-17

作者简介: 肖婷(1988—), 女, 硕士, 工程师, 从事工程爆破技术和企业安全管理方面的研究。E-mail: 675464303@qq.com

在环境复杂或安全敏感区域施工受限,同时存在一定安全风险,对比来看,CO<sub>2</sub> 相变破岩优势不言而喻。实践表明,所使用的致裂器不同,其破岩功效不尽相同,甚至出现因致裂器选用不当造成破岩失败的结果。因此,需要深入分析致裂器因素对 CO<sub>2</sub> 相变破岩的功效影响,进一步促进液态 CO<sub>2</sub> 相变破岩技术的应用与改进。

## 1 液态 CO<sub>2</sub> 相变工作的工况分析

### 1.1 液态 CO<sub>2</sub> 相变的质能与做功关系

液态 CO<sub>2</sub> 相变做功过程由激发管内化学药剂,在引火头发火激发作用下发生化学反应并释放热能和 CO<sub>2</sub> 吸热发生液-气相变并对外做功两个过程组成<sup>[4-5]</sup>。将 CO<sub>2</sub> 相变过程理想化,忽略重力影响和激发管内物质的化学反应放热过程,激发管释放的热能按“零能平衡”处理,即激发管内物质反应所放的热,刚好能够将所配致裂管内的液态 CO<sub>2</sub> 完全相变气化,这时,CO<sub>2</sub> 相变致裂破岩过程,可视为气体膨胀对外做功的过程。将液态 CO<sub>2</sub> 装管后并严密堵塞的炮孔,看成闭口系统,便可采用热力学进行分析<sup>[6]</sup>,此时进入和离开系统的能量只包括热量和作功两项。显然,“零能平衡”条件下,激发管释放的热能等于致裂管内的 CO<sub>2</sub> 液-气相变内能增加与其对外所做的功之和,即:

$$Q = \Delta U + \int_I^{\text{II}} P dV \quad (1)$$

式中:Q 为激发管释放的热能,J; $\Delta U$  为 CO<sub>2</sub> 液-气相变内能增加,即相变气化热,J;P 为气体压力,Pa;V 为气体体积,m<sup>3</sup>;I 为气体做功前初始状态;II 为气体做功后状态(常态)。

理想状态下液态 CO<sub>2</sub> 相变对外所做的功由气体泄充动能和体积膨胀能 2 部分组成<sup>[6-8]</sup>

由动力学冲量守恒定律可得出气体泄充动能( $E_c$ )为

$$E_c = \frac{1}{m} [(PS^2 + SP^2) \int_{t_1}^{t_2} t^2 dt + P^2 S^2 \int_{t_1}^{t_2} t dt] \quad (2)$$

式中: $E_c$  为气体泄充动能,J; $m$  为气体质量,kg;S 为气体对周围约束的作用面积,m<sup>2</sup>;P 为气体压强,Pa,N; $t_1$  为液态 CO<sub>2</sub> 刚开始气化时对周围约

束的作用时间,s,取 0; $t_2$  为气体充泄对周围约束的作用时间,即液态 CO<sub>2</sub> 完全气化的时间,s。

由式(2)可得:

$$E_c = \frac{1}{3m} (PS^2 + SP^2) [t^3]_{t_1}^{t_2} + \frac{1}{2m} P^2 S^2 [t^2]_{t_1}^{t_2} \quad (3)$$

式中符号同式(2)。

理想状态下,视相变前后温度恒定,液态 CO<sub>2</sub> 相变体积膨胀能变化( $E_h$ )状态,符合气体克拉伯龙方程形式<sup>[6-8]</sup>下的变化状态,即:

$$E_h = \frac{m}{M} RT \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{1}{V} \right) dt \quad (4)$$

式中: $E_h$  为体积膨胀能,J; $m$  为气体质量,kg; $M$  为气体摩尔质量,kg/mol;V 为气体体积,m<sup>3</sup>;T 为气体温度,K;R 为常数, $R = 8.34 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$ 。

由式(3)式容易得出:

$$E_h = \frac{m}{M} RT [\ln V]_{t_1}^{t_2} \quad (5)$$

式中符号同式(4)。

式(2)、式(3)表明,在闭口系统下,液态 CO<sub>2</sub> 相变的气体泄充对外做功能力与其质量成反比。这与封闭条件下参与相变的质量越大,气化产生的气体越多,对气体泄充形成的阻力越大,气体泄充的做功能力越弱的实际相符。

式(4)、式(5)表明,在闭口系统下,液态 CO<sub>2</sub> 相变体积膨胀能变化对外做功的能力,与其质量成正比。

上述分析表明:当液态 CO<sub>2</sub> 质量小,其相变对外做功能力也较小,并且主要以气体泄充对外做功为主。当液态 CO<sub>2</sub> 质量较大,其相变对外做功能力也大,而且主要以相变体积膨胀能变化对外做功为主。

### 1.2 致裂器的作用

致裂器,是指存储 CO<sub>2</sub> 并让其在此受热发生液-气相变,同时对外做功的装置,主要由激发管(也称供热管、活化管)和致裂管(也称储液管)组成<sup>[9]</sup>。

激发管是可内置于致裂管内为管内 CO<sub>2</sub> 发生液-气相变提供热能的装置。目前国内主流激发管

采用装配式结构,由管壳、管内化学药剂和引火头组成<sup>[10]</sup>,其外形与结构如图 1 所示。当这种激发管的围压达到反应条件压强值时,化学药剂在引火头的发火激发作用下迅速反应,并瞬间释放出大量热能,可实现对 CO<sub>2</sub> 相变的供热。

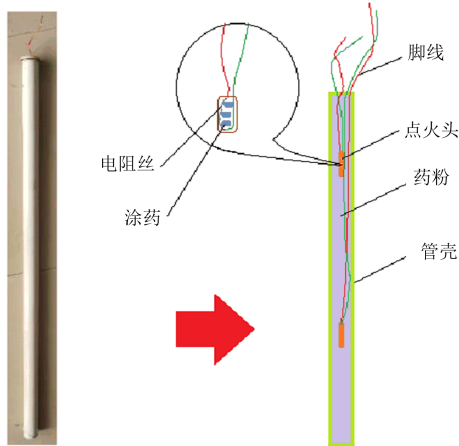


图 1 激发管的外形及结构

Fig. 1 The shape and structure of the excitation tube

致裂管是用于内置激发管与 CO<sub>2</sub> 的重要装置。按工艺使用分,国内主流致裂管可分为重复性使用管、孔外充气一次性管和孔内充气一次性管 3 种。

表 1 国内几种致裂器标准配置

Table 1 Standard configuration of several domestic crackers

致裂器类型	致裂管		激发管		药剂与 CO <sub>2</sub> 质量配比
	规格/mm	CO <sub>2</sub> 额定容量/kg	规格/mm	药剂质量/g	
重复性施工管	Φ73×930	1.0	Φ26×350	220	1:9.1
	Φ95×1 200	2.0	Φ32×480	450	1:6.67
	Φ108×2 300	7.0	Φ40×800	1 000	1:5.00
孔外充气一次性管	Φ90×1 000	4.0	Φ32×800	600	1:6.67
	Φ90×1 200	5.0	Φ32×1 000	750	1:6.67
	Φ76×800	3.0	Φ40×600	600	1:5.00
孔内充气一次性管	Φ76×1 400	5.0	Φ40×800	1 000	1:5.00
	Φ102×1 000	5.0	Φ40×900	1 200	1:4.17

实践检验表明,上述几种主流致裂器,现场充装 CO<sub>2</sub> 时,将其药剂与 CO<sub>2</sub> 质量的实际配比与标准质量配比误差控制在±10%以内,正常情况下

能获得满意破岩效果。当致裂器内装的药剂与 CO<sub>2</sub> 的质量配比失调时,出现破岩失败或失控的现象(见表 2)。

表 2 致裂器药剂与 CO<sub>2</sub> 质量配比失调的破岩结果

Table 2 Rock fragmentation results of the mismatch of the mass ratio of the cracker agent and CO<sub>2</sub>

致裂器类型	配置情况	破岩效果
孔外充气一次性管	Φ90×1 000 mm 致裂管,配 Φ32×800 mm 激发管,管内药剂与 CO <sub>2</sub> 实际质量配比 1:5.3。	致裂管完全破裂并被抛出 20 m;岩石破裂被抛散;飞石较多,最大飞散距离大于 30 m,超出预控制的距离 10 m。
孔内充气一次性管	Φ76×1 450 mm 致裂管,配 Φ35×800 mm 激发管,管内药剂与 CO <sub>2</sub> 实际质量配比 1:8.3。	声音巨大、激发管纸壳飞出,上黏有残药,实际反应药剂量为总量的 60%,激发管供能不足,岩石未裂,破岩失败。

### 3 致裂管结构原理影响分析

不同类型的致裂管的结构与工作原理不同。重复性使用管是一种由充装头、管体、泄能头组成的组装管。泄能片和泄气孔设置在致裂管的底部,破岩工作时致裂管被封闭在炮孔这种闭口系统下,从泄气孔泄冲出来的高压气流,首先作用在炮孔底端岩壁上,进而由岩壁产生一种对致裂管向上的反作用力。

孔外充气一次性管是由带有提环与接线极的顶部端头和带有充气控制阀的封底,与适配的无缝钢管牢固焊接成一体性的腔体结构固定管。激

发管由厂家标配,并预置在致裂管腔体内被封焊住,不可更换。

孔内充气一次性管是一种由顶盖、管壁及焊接缝、底盖组成的装配管,其管壁由轻钢卷曲有缝对接焊固后再与底盖焊接,形成薄壁管状结构的管体。焊接缝是管体薄弱部位,进而为致裂管在管内相变气体膨胀作用下的破裂起到定位作用,避免了“飞管”与管壁随机性破裂的结构问题。目前国内主流致裂管的典型结构及其工作原理<sup>[2]</sup>如图 2 所示,国内几种致裂管的结构尺寸及特性数据采集如表 3 所示。

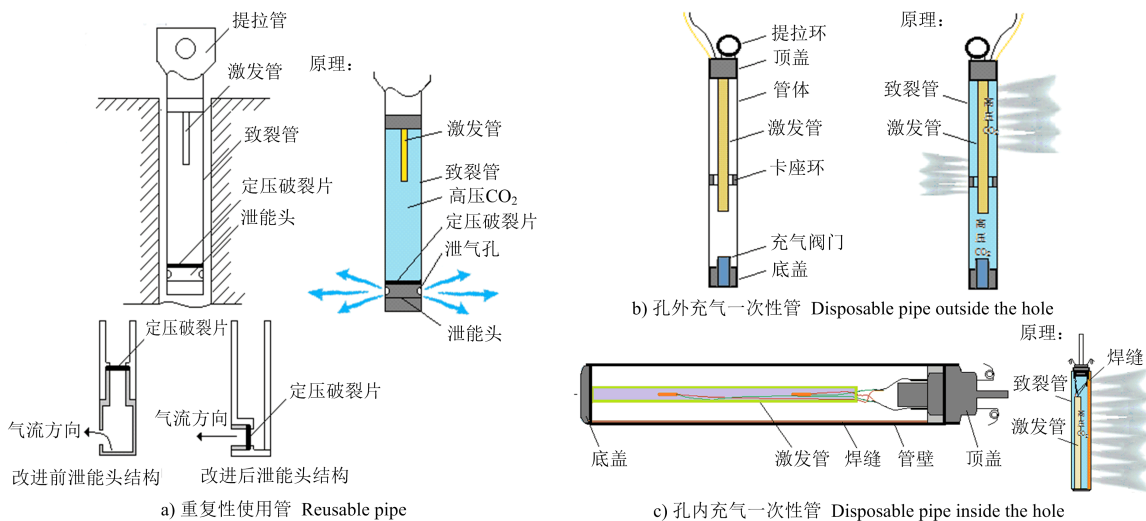


图 2 致裂管的典型结构及工作原理

Fig. 2 Typical structure and working principle of fracturing pipe

表 3 国内几种致裂管的结构尺寸及主要特性

Table 3 The structural dimensions and main characteristics of several domestic fracturing pipes

致裂器类型	结构尺寸/mm		质量/kg	管壁强度/MPa	管内额定气压/MPa	充气方式	使用寿命
	直径	长度					
重复性使用管	Φ90 mm	73	930	22	≥300	140	重复使用 15 次以上
	Φ115 mm	95	1 200	43	≥300	190	
	Φ130 mm	108	2 300	108	≥300	230	
孔外充气一次性管	Φ115 mm	90	1 000	15	50	8~10	炮孔外充气 一次性耗用
	Φ115 mm	90	1 200	20	50	8~10	
孔内充气一次性管	Φ90 mm	76	870	5	30	8~10	炮孔内充气 一次性耗用
	Φ115 mm	76	1 400	7	30	8~10	
	Φ130 mm	102	1 000	10	30	8~10	

致裂管的结构直接决定了致裂管的工作原理及应用工艺,对 CO<sub>2</sub> 相变破岩的功效具有直接影响。

重复性使用管的定压泄能片可起到稳定破岩工况的作用,有利于破岩,效果也往往能令人满意。但因存在“飞管”隐患,安全风险较高,需有防

“飞管”的工艺措施,加上管的整体笨重,其应用的作业效率往往较低。

孔外充气一次性管管内相变气体膨胀致使管体破裂进而对外做功的方向,是由管体最薄弱部位决定的,极具随机性。实践中,当致裂管的管体强度均匀时,在相变气体膨胀作用下,致裂管会沿轴向形成贯穿整管的致裂缝,更有甚者会被胀裂成管皮,其破岩功效也最理想。当致裂管管体强度不均匀,尤其焊接不牢固时,致裂管在相变气体膨胀作用下一般在顶部开裂,其破岩效果降低,甚至出现顶部端头被冲出炮孔外的“冲管”现象,而导致破岩失控,带来安全风险。

孔内充气一次性管先将其装入炮孔内封堵好再对其充灌  $\text{CO}_2$ ,操作的安全风险大为降低,但灌充管内的  $\text{CO}_2$  实际质量,无法用称重方式准确计量,仅依靠充装机上的气体流量计显示确定。整体上,致裂管的焊接质量、装配连接质量、充装机上气体流量计的精度等因素,均会对这种致裂器的破岩功效构成直接影响,成为其破岩工况不稳定的重要因素。实践应用表明,对接口焊接强度过高的致裂管,在管内相变气体膨胀作用下,不沿此焊缝破裂,破裂部位呈显随机性,其破岩的效果也往往低于预期。而对接口焊接强度过低的致裂管,在对其充气时,管壁便沿此焊缝过早破裂,出现致裂管被气“胀爆”的早爆现象,导致破岩失败,并带来极大安全风险。当致裂管的部件连接不紧密、不牢靠时,充装  $\text{CO}_2$  致裂管会出现漏气,甚至在相变气体膨胀作用下出现顶盖被冲出炮孔外的“冲管”现象,进而导致破岩失败,安全失控。当气体流量计的计量失准,实际灌装的  $\text{CO}_2$  少于额定量过多时,破岩出现“假做功”的失败现象。

#### 4 致裂器应用工艺影响分析

不同类型的致裂器,其应用的操作工艺不同。重复性使用管应用时按“拆装—充气计量—搬输—入孔—填塞—链锁锚固—连线起爆”的流程进行操作。单根管从拆装充气到连线破岩起爆,现场统计显示,平均耗时需 10 min 以上,作业效率整体较低。而且填塞要求高,用振动棒捣实填塞,

密实度不足均会有“飞管”现象出现。

孔外充气一次性管的应用工艺流程为“充气—计量—搬输—入孔—填塞—连线起爆”。现场统计显示,单根管从充气到连线破岩起爆,连续作业平均耗时不足 7 min。但是,当充气位置离炮孔较远时,充气后由于管内激发管的药剂已处于高围压的反应活化态,此时采用人力搬运这种致裂器,操作存在较大的安全风险。

孔内充气一次性管应用的工艺流程为“部件装配—搬运—入孔—填塞—充气—连线起爆”。据现场统计,装配单根此类致裂器,单人作业用时一般需要 10 min,加上后续作业时间,连续作业用时平均 20 min。此类致裂器组件多,每一部件的质量和装配环节若出现问题,均会导致致裂器工况异常,最终影响其破岩效果。因此,实际应用中这种致裂器的工况影响因素多,稳定性较差,出现问题后不易处理,在工程实践中对有问题的炮孔,常以“废管”“弃孔”被迫放弃起爆的方式进行处理。

#### 5 结语

大量现场应用及统计分析表明,致裂器对液态  $\text{CO}_2$  相变破岩的功效影响是本质的,能直接决定破岩的成败,而国内目前的这几种主流致裂器,还不足以完美满足液态  $\text{CO}_2$  相变破岩的高效、安全、稳定等综合功效要求。工程实践亟待有工况稳定、安全可靠、操作便捷、适用宽泛的致裂器出现。

#### 参考文献(References):

- [1] 陈喜恩,赵龙,王兆丰,等. 液态  $\text{CO}_2$  相变致裂机理及应用技术研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(9): 95-97, 101. CHEN X E, ZHAO L, WANG Z F, et al. Mechanism and application technology of liquid  $\text{CO}_2$  phase-transforming fracturing[J]. Coal Engineering, 2016, 48(9): 95-97, 101.
- [2] 谢晓峰,李夕兵,李启月,等. 液态  $\text{CO}_2$  相变破岩技术述评研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(6): 1407-1412.

- XIE X F, LI X B, LI Q Y, et al. Research and review about the liquid CO<sub>2</sub> phase-transforming rock fracturing technology[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(6): 1 407-1 412.
- [3] 杨永梅, 姜光忍, 唐宇恒. 二氧化碳气体爆破技术发展及应用[J]. 设备管理与维修, 2019(6): 85-86.
- YANG Y M, JIANG G R, TANG Y H. Development and application of carbon dioxide gas blasting technology[J]. Plant Maintenance Engineering, 2019(6): 85-86.
- [4] 詹德帅. 二氧化碳重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. Carbon dioxide filling capacity and cracking effect simulation analysis [D]. Beijing: China Coal research institute, 2017.
- [5] 孙小明, 黄园月, 倪昊. CO<sub>2</sub> 致裂器泄能过程分析[J]. 煤炭技术, 2015, 34(4): 263-265.
- SUN X M, HUANG Y Y, NI H. Research on energy releasing process of CO<sub>2</sub> fracturing facility[J]. Coal Technology. 2015, 34(4): 263-265.
- [6] 周科平, 柯波, 李杰林, 等. 液态 CO<sub>2</sub> 爆破系统压力动态响应及爆炸能量分析[J]. 爆破, 2017, 34(3): 10-13.
- ZHOU K P, KE B, LI J L, et al. Pressure dynamic response and explosion energy of liquid carbon dioxide blasting system[J]. Blasting, 2017, 34(3): 10-13.
- [7] 赵龙. 液态二氧化碳相变致裂影响半径时效性研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016.
- ZHAO L. Research on timeliness of influence radius by liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing technique [D]. Jiaozuo: Henan University of Technology, 2016.
- [8] 许梦飞. 煤层中液态二氧化碳相变致裂半径的研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016.
- XU M F. Research of liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing technology radius in coal seam [D]. Jiaozuo: Henan University of Technology, 2016.
- [9] 陈晨. 影响二氧化碳致裂器起爆可靠性因素分析[J]. 煤炭爆破, 2017, 122(4): 13-15.
- CHEN C. The analysis of reliability and safety actors of carbon dioxide fracturer [J]. Coal Mine Blasting, 2017, 122(4): 13-15.
- [10] 夏军, 周明安, 徐天福. 装配式激发管燃烧、激发特性研究[J]. 采矿技术, 2018(6): 147-147.
- XIA J, ZHOU M A, XU T F. Study on combustion and excitation characteristics of assembled excitation tube[J]. Mining Technology, 2018(6): 147-147.

(上接第 50 页)

- [9] 熊祖钊, 易流, 黄小武, 等. 城市复杂环境下基坑土石方爆破振动控制研究[J]. 爆破, 2016, 33(1): 45-49.
- XIONG Z Z, YI L, HUANG X W, et al. Study on the vibration control of earth rock blasting in the complex environment of the city [J]. Blasting, 2016, 33(1): 45-49.
- [10] 张卫彪. 市区地铁站基坑明挖段爆破开挖工程实践[J]. 工程爆破, 2017, 23(6): 60-63.
- ZHANG W B. Blasting and excavation practice of open excavation section of urban subway station foundation pit[J]. Engineering Blasting, 2017, 23(6): 60-63.
- [11] 孙永, 张文锡, 宋杰, 等. 直壁基坑深孔台阶爆破控制技术[J]. 爆破, 2018, 35(4): 69-73.
- SUN Y, ZHANG W X, SONG J, et al. Block blasting control technology of foundation pit of subway station in urban area[J]. Blasting, 2018, 35(4): 69-73.