

doi: 10.11799/ce201609028

液态 CO₂ 相变致裂机理及应用技术研究

陈喜恩¹, 赵 龙², 王兆丰², 李豪君²

(1. 平煤股份十三矿, 河南 平顶山 467000; 2. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 为了更好地将液态 CO₂ 相变致裂技术应用到煤层增透领域中, 达到经济快速消突的目的, 通过理论对致裂过程进行了分析, 将致裂过程分成冲击波作用和高压气体作用过程。并根据气体力学和断裂力学理论建立了致裂的力学方程, 计算得到了十三矿致裂影响半径为 8.2m, 同时通过现场试验验证了计算得到的影响半径是准确的, 为液态 CO₂ 相变致裂技术在增透消突机制、技术参数等方面的研究奠定了基础。

关键词: 液态 CO₂; 致裂机理; 煤层增透; 影响半径

中图分类号: TD713⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2016)09-0095-04

Mechanism and application technology of liquid CO₂ phase-transforming fracturing

CHEN Xi-en¹, ZHAO Long², WANG Zhao-feng², LI Hao-jun²

(1. No. 13 Mine of Pingdingshan, Pingdingshan 467000, China;

2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In order to make liquid CO₂ phase-transforming fracturing technology economical and efficient in antireflection zone, the crack initiation process is analyzed, and the mechanical equation is established based on gas mechanics and fracture mechanics. According to calculation result, the radius of influence in the No. 13 coal mine is 8.2m, the results are verified in field tests. This study lays foundation for the permeability increment and outburst risk elimination mechanism of liquid CO₂ phase-transforming fracturing, and the technical parameter study.

Keywords: liquid CO₂; fracturing mechanism; coal seam permeability increment; influence radius

液态 CO₂ 相变致裂技术起源于英国 CARDOX 公司, 最初名为 Cardox Tube System。但 Cardox 装置在国外的研究多集中在提高块煤率、采石场以及可燃物处理上^[1,2], 在煤层增透领域尚未有研究^[3]。液态 CO₂ 相变致裂技术作为一种新的爆破技术, 率先由河南理工大学王兆丰教授于 2012 年应用到煤层增透领域中。通过在九里山矿进行穿层强化预抽试验、处理老顶悬空的试验, 并在增透方面将该技术与水力冲孔进行了对比, 王兆丰、孙小明、韩亚北等^[4-6]通过分析发现预裂增透提高了钻孔瓦斯抽采量, 并且其在九里山矿的试验条件下得到的增透效果优于水力冲孔增透效果。液态 CO₂ 相变致裂技术在国内煤层增透领域发展十分迅速, 并取得了很大成功, 因此对液态 CO₂ 相变致裂技术在增透消突机制、技术参数的深入研究也显得十分迫切。

1 液态 CO₂ 相变致裂技术

液态 CO₂ 相变致裂是利用 CO₂ 的三相之间的转换释放出的能量来爆破致裂的, 影响相变的主要因素是压力和温度。气态、液态和超临界状态的临界点的压力为 7.39MPa, 温度为 31.06℃。因此可以看出液态 CO₂ 相变致裂是一种物理变化过程。

1.1 致裂装置

试验采用的液态 CO₂ 相变致裂技术装置由导电推送杆、推送装置、爆破筒、发热管、起爆器、充气装置构成。爆破筒是致裂的核心装置, 筒内部放置加热管、破裂片和液态的 CO₂。

收稿日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274090); 河南省协同创新项目(15131319)

作者简介: 陈喜恩(1969—), 男, 河南叶县人, 硕士, 高级工程师、现为平煤股份十三矿总工程师, 主要从事煤矿开采技术及管理工作, E-mail: dragon8864@163.com。

引用格式: 陈喜恩, 赵 龙, 王兆丰, 等. 液态 CO₂ 相变致裂机理及应用技术研究 [J]. 煤炭工程, 2016, 48(9): 95-97, 101.

1.2 致裂工艺

1) 充气过程: 致裂装置的充气过程可以在地面或者井下完成, 充气装置利用风压(6MPa)驱动增压泵, 将高压钢瓶内的 CO₂ 气体充入致裂装置的爆破筒中, 充气完成后爆破筒中的 CO₂ 为超临界状态(压力 40MPa), 由于爆破筒可承受几千兆帕的压力, 且只有在温度达到 31.1℃ 时 CO₂ 才会产生相变, 压力达到 270MPa 后冲破定压泄能片后才能发生反应, 因此在井下运输和使用过程中不会存在安全问题。

2) 致裂过程: 充气完成后, 在煤矿井下利用钻机借助于导电的推杆将爆破筒送到预定的煤层位置^[6], 用万用表测量导通后, 用矿用低压(9V)起爆器进行起爆, 起爆器产生的脉冲高压触发爆破筒内部的加热管发生反应, 产生大量的热量, 使液态 CO₂ 在 20ms 内转化为气态, 体积膨胀 600 倍, 压力升至 270MPa, 冲破定压泄能片由释放头释放出去, 并产生破坏力巨大的应力波, 使煤体产生裂隙并发育, 达到增加煤层透气性的效果。致裂完成后, 除了 CO₂ 气体、破裂片等耗材外, 整个装置其余部分均能收回重复使用。

1.3 致裂当量

为了对液态 CO₂ 致裂的效果定量的考察, 国内学者董庆祥、韩亚北、王兆丰教授等对液态 CO₂ 相变致裂的 TNT 当量进行研究, 根据其研究致裂时高压气体释放能量计算公式^[5,7]为:

$$E_g = \frac{pV}{K-1} \left[1 - \left(\frac{0.1013 \frac{K-1}{p}}{p} \right) \right] \times 10^3 \quad (1)$$

式中, E_g 为气体的爆破产生的能量, kJ; p 为绝对压力, MPa; V 为容器的容积, m³; K 为气体的绝热指数, 取 1.295。

试验采用的是 F57L 型爆破筒、5.1mm 厚的破裂片, 将致裂参数值带入式(1)可得致裂时气体产的能量。再根据式(2)可计算出所选用的致裂装置的 TNT 当量值 W_{TNT}。

$$W_{TNT} = \frac{E_g}{Q_{TNT}} \quad (2)$$

式中, Q_{TNT} 为 1kgTNT 爆炸能量, 取 4250kJ/kg。

根据式(1)、式(2)计算, 试验选用的液态 CO₂ 相变致裂装置(装液量 1.3kg、破裂片厚度 5.1mm)的当量为 283gTNT。

2 致裂过程分析及影响半径计算

2.1 致裂过程分析

整个致裂过程分为冲击波作用过程和高压气体作用两个过程。首先是致裂冲击作用, 煤体将产生径向的位移, 钻孔周围煤体产生径向压缩和切向拉伸。当切向的张拉应力超过极限抗拉强度后, 煤体将被破坏产生裂隙, 爆破冲击作用下煤体微元受力示意图如图 1 所示。

当冲击波衰减到低于煤体抗拉强度时, 裂隙将不再产生。冲击波作用的同时, CO₂ 气体紧随其后迅速膨胀, 沿着初始裂隙进入煤体, 由于气楔作用, 冲击波产生的径向裂隙或煤体内部的原生裂隙继续扩展, 直至 CO₂ 气体压力

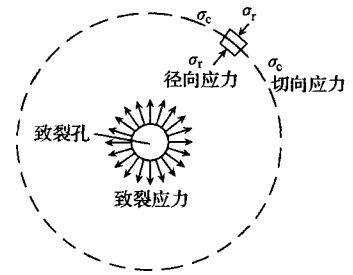


图 1 爆破冲击作用下煤体微元受力示意图

降低到不能使裂隙扩展停止。

通过对其致裂过程的分析, 可以看出液态 CO₂ 相变致裂过程属于高压气体膨胀的物理爆破过程, 与炸药爆破不同, 其爆炸时不会产生炸药爆破产生的爆轰波。

2.2 致裂影响半径计算

通过液态 CO₂ 相变致裂过程的分析, 可以看出该致裂过程属于高压气体冲击爆破过程。根据爆破动力学和气体断裂力学理论关于爆破气体对岩石的拉伸破坏作用研究, 直接作用区半径为爆破孔孔径的 3~9 倍, 其余两区分为爆破应力波作用区和爆破气体的准静力场区, 应力波作用区即可视为致裂压实区, 准应力场区为裂隙发育区。

直接作用区即初始裂隙半径可根据霍克-布朗准则^[8]计算, 公式如下:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c(m\sigma_3/\sigma_c + s)^{0.5} \quad (3)$$

式中, σ₁、σ₃ 分别为峰值压力下煤体最大、最小主应力, MPa; σ_c 为单轴抗压强度, MPa; m 为动、静载荷抗压强度系数, 爆破下 m 一般取 10; s 为岩石的霍克-布朗参数, 与岩石材料相关, 当 s = 1 时, 对应整岩石, 当 s < 1, 对应破碎岩石。

同时根据爆破受力公式, 在 r 处煤体所受径向应力 σ_r 大小为:

$$\sigma_r = P \times \left(\frac{r}{r_c} \right)^{-\alpha} \quad (4)$$

式中, P 为初始裂隙区内气体压力, MPa; r 为距离炮孔距离, m; r_c 为初始裂隙长度, m; α 为衰减指数, α = 2 ± $\frac{\mu}{1-\mu}$, 其中, μ 为煤体泊松比。

当煤体所受应力 σ₁ 大于 σ₃ 时煤体即会产生裂隙, 结合式(3)、式(4)可计算出初始裂隙长度 r_c 为:

$$r_c = r_h \times \left(\frac{P_{max}}{K_1 S_1} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (5)$$

式中, r_h 为致裂孔孔径, m; P_{max} 为气体压力峰值, MPa; K₁ 为动载下抗拉强度提高系数, 致裂加载速率下取值约为 10; S₁ 为岩石静载下的抗拉强度, MPa。

距离炮孔距离处的准静应力场为:

$$\begin{cases} \left(\frac{P_{max}}{2P} \right)^{1/K} = 1 + \left[\left(\frac{r_c}{r_h} \right)^2 - 1 \right] \frac{P}{K_b} \\ \sigma_r = P \left(\frac{r}{r_c} \right)^{-\alpha} \end{cases} \quad (6)$$

式中, K_0 为煤体体积模量, MPa。

经过应力波作用后, 可计算出初始裂隙长度, 带入式(6)可计算出距离炮孔距离处的准静应力, 应力值超过岩石的极限抗拉强度值后, 将会使岩石产生裂隙。

在此力学基础上可以计算出不同距离点上的受力大小, 同时根据以上公式, 将煤层静载荷下抗拉强度 $S_t = 5\text{MPa}$ 带入, 可在理论上计算出, 液态 CO_2 相变致裂技术能够将距离致裂孔约为 8.2m 处煤体发生破坏, 考虑到距离较远范围内煤体虽能产生裂隙, 但裂隙未必能够充分发育贯通, 即理论上最大影响半径为 8.2m。

3 现场应用

3.1 非致裂区效果

在平煤己₁₅₋₁₇-11111 底板岩巷试验巷道段内, 原有的抽采孔布置方式为: 设计每组布置钻孔 11 个, 布孔间距 6m, 考虑到实际施工一排布置 13 个钻孔开孔施工困难, 因此将两排钻孔为一组, 钻孔直径 94mm, 钻孔布置方式如图 2 所示。

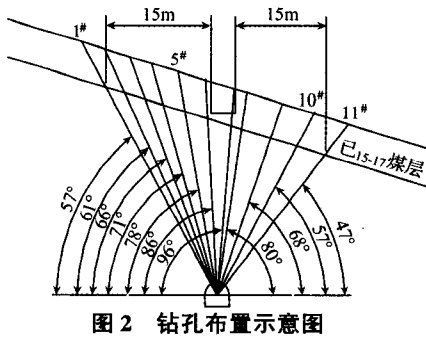


图2 钻孔布置示意图

为了与致裂效果对比, 首先进行了非致裂区上述布孔方式下的抽采效果考察, 实际测量到的非致裂区的瓦斯日平均抽采纯量, 如图 3 所示。

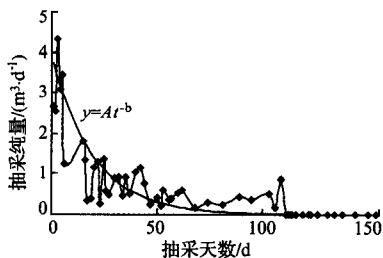


图3 非致裂区抽采纯量随时间变化曲线

通过图 3 中瓦斯抽采日纯量衰减曲线可看出, 在未采取增透措施条件下, 煤层瓦斯日抽采纯量衰减曲线为幂函数形式曲线, 即:

$$y = At^{-b} \quad (7)$$

式中, y 为日抽采纯量, m^3/d ; A 、 b 为常数; t 为时间, d 。

非致裂区煤层抽采孔在成孔后瓦斯抽采纯量快速升到较高的抽采水平, 但在不到 20d 内衰减至一个较低的平稳

水平, 20~40d 抽采纯量约为 $1\text{m}^3/\text{d}$, 50d 后平均维持在 $0.6\text{m}^3/\text{d}$ 左右, 煤层透气性系数为 $0.06\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 。

3.2 致裂区增透效果

在平煤己₁₅₋₁₇-11111 底板岩巷试验巷道段内, 与非致裂区相邻区内按照与非致裂区相同的布孔方式进行了致裂试验。根据计算得到的影响半径值 $R = 8.2\text{m}$, 在考虑不产生致裂空白区情况最大孔距为 $\sqrt{2}R = 11.3\text{m}$, 考虑最大孔距每组内仅致裂 1#、4#、7#、10# 四个孔(实际致裂孔间距达到 11m), 其余孔为正常的抽采孔。试验后考察得到单组平均瓦斯抽采浓度与纯量, 如图 4、图 5 所示。

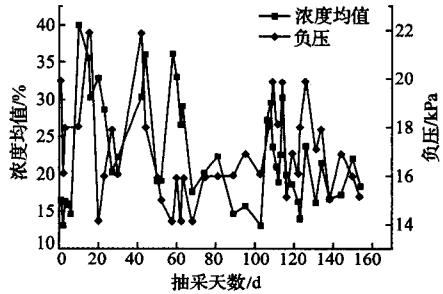


图4 致裂区平均浓度和负压随时间变化关系

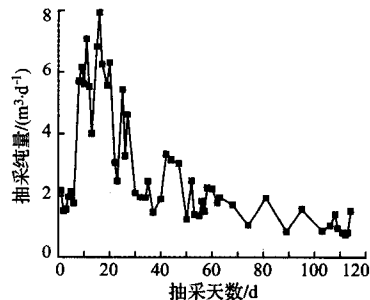


图5 致裂区平均日抽采纯量随时间变化关系曲线

在孔距 6m 布孔方式下第 8 天左右致裂后 10d、20d、30d、40d 单孔平均抽采纯量累计值分别为 46m^3 、 85m^3 、 112m^3 、 130m^3 。该布孔方式下, 单孔瓦斯日抽采纯量稳定在 $1.3\text{m}^3/\text{d}$ 。

根据致裂一个月内的流量数据计算得到煤层透气性系数由致裂前的 $0.06\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 变为致裂后的 $2.3 \sim 2.7\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$, 增加了 40 倍左右, 明显地缩短了抽采周期。这充分体现了采取致裂措施后能取得很好的增透效果, 同时也验证了根据致裂机理计算得到的致裂影响半径是准确的。

4 结论

1) 对液态 CO_2 相变致裂技术的装置、充气过程、致裂过程等进行了介绍, 并结合国内研究对致裂当量进行了计算, 经计算本次致裂试验液态 CO_2 相变致裂装置的当量为 277gTNT。

(下转第 101 页)

表面,实现均匀包裹,从而提高最终混凝土的和易性。

5 混合型湿喷法各因素的相互作用

综合上述分析可以推断出,要想获得较大的输送能力及较远的输送距离,需要较高的输送压力、较小的喷射料密度、较大的输送管道内径及较小的喷射料粒径。同时,想要获得较高的喷射面强度,降低回弹率,必须增设专门的加强砂石料(含速凝剂)和水泥浆混合均匀性的混合装置。

在煤矿的实际喷射原料准备中,砂子的含水率、含泥率及压缩空气中的含水率不得不引起足够的重视,因砂子和压缩空气的含水率高会显著提高喷射料的密度,含泥率高时砂石容易粘结成团而提高喷射料粒径,这些都会严重降低喷射能力和缩短输送距离。同时,砂子和压缩空气的含水率过高,将不得不降低水泥浆的水灰比,这将会造成水泥浆的流动性降低,水泥浆泵送管路容易堵塞,输送困难,同时水泥浆的流动性降低,会导致其与砂石料(含速凝剂)在混合器内混合的不均匀性,在喷头处形成较大的回弹率。因此,在力所能及的范围内,应尽可能地降低砂子的含水率和含泥率,同时在压缩空气输送管路增设气水分离装置,降低压缩空气中的水分含量。

相对来说,喷射料混合段内因已有水泥浆加入,喷射料的配比严格按混凝土的各个配比,各种成分相对稳定,同时,混合段管路的长短对混合效果几乎无影响,混合段可以设置的较短,以能满足喷射手喷射时的活动范围为限,因此,影响喷射能力和输送距离的关键在喷射料输送段。

喷射料混合段起始端的压缩空气是喷射料输送段末端的压缩空气,因此混合料输送段不宜设置太长,以免压缩空气压力和流量损失太大,到达混合器后已无力完成混合段的输送,造成混合段管路堵塞。

压缩空气的压力和流量是两个不同的指标,在煤矿井

(上接第97页)

2) 根据液态 CO_2 相变致裂过程,对相变致裂机理进行了初步的探讨,从致裂机理的分析可以看出,液态 CO_2 相变致裂过程属于高压气体膨胀的物理爆破过程,与炸药爆破不同,其爆炸时不会产生炸药爆破产生的爆轰波。

3) 根据爆破动力学和气体断裂力学理论公式计算出平煤十三矿煤层地质条件下最大的影响半径为 8.2m,为该技术在平煤十三矿的推广应用奠定了基础。

4) 根据计算得到的影响半径布孔后,对比考察非致裂区与致裂区效果,可以看出煤层透气性系数由致裂前的 $0.06\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 变为致裂后的 $2.3 \sim 2.7\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,增加了 40 倍左右,明显地缩短了抽采周期。

参考文献:

[1] S. P. Singh. Non-Explosive applications of the PCF concept for underground excavation [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998(13): 305-311.

下实际的喷射中,经常遇到压力虽然足够高,但因为输送管道直径不够大,造成压缩空气输送流量小,喷射时因没有足够量的压缩空气补充,不能持续保证一定的压力,同样会造成喷射脉冲大、回弹大、堵塞管路等故障,应引起足够的重视。

混合型湿喷法因为预先将水泥制成了水泥浆,彻底消除了喷射过程中水泥扬尘对工作环境的污染,有效保护了作业工人的身体健康。

6 结语

煤矿井下混凝土支护中混合型湿喷法是一种全新的湿喷工艺,比较适宜在煤矿巷道及其它狭小空间内进行湿喷作业。限于现有的分析水平,目前对整个湿喷过程还很难建立一个系统的力学模型进行定量的分析。特别是水泥浆和砂石料的混合过程,是一个涉及到固、液、气三相有关学科的复杂课题,目前只能做定性的分析。只有在实践中不断地探索和总结,才能使这种湿喷方法进一步完善。

参考文献:

[1] 戈和建. 煤矿井下湿喷机后配套 [J]. 煤矿机械, 2012(2): 118-119.

[2] 张仕同, 张庆和. 井下搅拌站的设计及应用 [J]. 煤炭工程, 2010, 42(9): 39-40.

[3] 臧培刚. 一种适用于井工煤矿的新型湿喷工艺及设备研究 [J]. 建井技术, 2014(6): 46-47.

[4] 陈润余. 对喷射混凝土经济性影响因素的探讨 [J]. 金属矿山, 1981(1): 2-5.

[5] 贾海深. 气送混凝土的流态与仿真 [J]. 机械工程与自动化, 2012(4): 29-30.

[6] 乔国恩. 湿混凝土气力输送与喷射的试验研究 [J]. 长沙矿山研究院季刊, 1985(5): 20-26. (责任编辑 张宝优)

[2] Vidanovic, N. Application of unconventional methods of underground premises construction in coal mines [J]. TECHNICS TECHNOLOGIES EDUCATION MANAGEMENT-TTEM, 2011 (6): 861-865.

[3] 全浩, 温雪峰, 郭琳琳. CO_2 捕集和地下封存技术的现状及发展趋势(一) [J]. 煤炭工程, 2007, 39(12): 75-79.

[4] 王兆丰, 孙小明. 液态 CO_2 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(1): 1-5.

[5] 韩亚北. 液态二氧化碳相变致裂增透机理研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.

[6] 孙小明. 液态二氧化碳相变致裂穿层钻孔强化预抽瓦斯效果研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.

[7] 董庆祥, 王兆丰, 韩亚北, 等. 液态 CO_2 相变致裂的 TNT 当量研究 [J]. 中国安全科学学报, 2014(11): 84-88.

[8] 李伟利, 王磊, 常聚才. 基于 Hoek-Brown 准则的围岩松动圈计算及现场测试 [J]. 煤炭工程, 2011, 43(2): 97-99. (责任编辑 张宝优)