

doi:10.13301/j.cnki.ct.2015.04.101

CO₂致裂器泄能过程分析*

孙小明, 黄园月, 倪昊

(煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013)

摘要: 理论分析结合数值计算, 对泄能过程中储液管内 CO₂ 状态变化情况及压力变化进行了分析, 并通过测试试验拟合得到了致裂器泄放压力随剪切片厚度变化的数学关系 $p=14.992e^{0.4912d}$ 。此外, 依据 TNT 当量法计算了单个致裂器正常使用时泄放能量相当于 0.15 kgTNT。

关键词: CO₂ 致裂器; 泄放压力; 泄能过程; TNT 当量

中图分类号: TD235.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-8725(2015)04-0263-03

Research on Energy Releasing Process of CO₂ Fracturing Facility

SUN Xiao-ming, HUANG Yuan-yue, NI Hao

(China Coal Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Analyzes phase state of CO₂ and pressure change in tube through theoretical analysis combined with numerical calculation, and derives a mathematical formula which explains the relationship between discharge energy and slice thickness through experiment $p=14.992e^{0.4912d}$. In addition, calculates the energy that a single fracture machine release equivalent to 0.15kg TNT according to the TNT equivalent method.

Key words: CO₂ fracturing facility; release pressure; energy releasing process; TNT equivalent

0 引言

CO₂ 致裂器是主要应用于煤层增透的一项新装备, 具有操作流程简便、使用安全可靠、致裂能量大且可控的优点, 该装备是基于液态 CO₂ 相变致裂技术研发而成, 为煤矿瓦斯治理工作提供了除保护层开采、多种水力化措施、炸药松动爆破等措施之外的一个新方法。目前, 该技术已在焦作、平顶山、六盘水、晋城等矿区进行了试验, 并开始得到推广。但是, 对于 CO₂ 致裂器泄能过程特征的研究尚落后于工程实践, 对泄能过程的系统分析还不够深入, 这对工程实践会带来不小的困惑, 本文基于煤炭科学技术研究院有限公司生产研发的 CO₂ 致裂器, 结合理论分析与数学模型对其泄能过程进行研究。

* 国家科技重大专项资助项目 (2011ZX05041-003-02; 2011ZX05065-006)

耗过大极易发生过电流现象损坏电机。

(4) WX-4 截割头为 1 线 3 齿设计, 在本次试验中表现为效率低下, 对整机振动激励较大, 横扫工况切割比能耗极低, 钻进工况仅在初入切时较为理想。

(5) 综上, WX-4 方案淘汰, 在 J23 方案的基础上, 参考 WX-2 和 WX-3 后端截齿的布局方式进行进一步提升。

参考文献:

[1] 李佐民, 刘玉荣, 张凤岩, 等. 掘进机截割头最佳截线间距的探讨[J]. 煤炭技术, 2000, 19(2): 5-6.

[2] 王增春, 赵占军, 相磊. 悬臂式掘进机关键技术探讨[J]. 煤炭技术, 2011, 30(5): 247-249.

[3] 宋金标, 孙方相, 胡振南, 等. EBZ260 纵轴式掘进机截割头的设

1 CO₂ 致裂器的工作原理

CO₂ 致裂器主体由充装阀、发热装置、储液管、定压剪切片及泄能头组成, 如图 1 所示。通过在储液管左右两端分别安装充装阀和泄能头, 即形成了致裂器的中空管状密闭结构, 其中在充装阀一端安置有发热装置, 泄能头一端安置有定压剪切片。

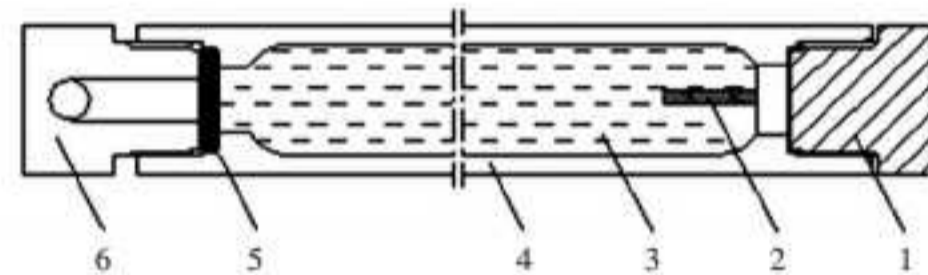


图 1 CO₂ 致裂器结构示意图

1. 充装阀 2. 发热装置 3. 液态 CO₂ 4. 储液管 5. 定压剪切片 6. 泄能头
CO₂ 致裂器在使用时, 通过低压起爆器启动储液管内的发热装置, 释放大量热量使储液管内的液态 CO₂ 气化, 引起管内压力在瞬间急剧上升, 直到

计计算[J]. 煤矿机械, 2013, 34(9): 16-18.

[4] 闫炳雷, 王颖, 马璐. 基于 LS-DYNA 的掘进机截割头截割过程模拟[J]. 煤矿机械, 2012, 33(12): 37-38.

[5] 韩宇飞, 应明, 朱鹏飞, 等. 基于 Top-down 设计方法的截割头设计[J]. 煤矿机械, 2012, 33(10): 15-16.

[6] 张梦奇. 基于截齿轨迹确定掘进机截割头运动速度研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(8): 71-74.

[7] 刘英林. EBZ-135 掘进机截割头结构优化设计[J]. 煤炭工程, 2011(9): 12-14.

[8] 唐琼, 范学群, 徐丰. 基于 SolidWorks 新型 59 把截齿截割头研究[J]. 安徽理工大学学报, 自然科学版, 2012, 32(4): 44-46.

作者简介: 李祥松 (1979-), 辽宁沈阳人, 讲师, 主要从事煤矿机械的试验研究, 电子信箱: xiangsong_li@126.com.

责任编辑: 郑万才 收稿日期: 2014-09-20

达到定压剪切片的抗剪切强度并将其冲破, 高压 CO₂ 气体从泄能头的排气孔释放, 作用在泄能头附近的介质上, 使其破碎或产生裂隙, 达到预裂的目的。CO₂ 致裂器在深孔中使用时还需要连接若干根推杆, 利用一定数量的推杆可将致裂器准确推送至需要爆破的作业点。致裂器可单根使用, 用于穿层钻孔煤层预裂等短距离预裂作业, 也可多根串联使用, 用于顺层长钻孔中的松动爆破作业。

2 致裂器卸压物理过程分析

CO₂ 致裂器储液管内的能量泄放是一个独特的物理过程, 是由储液管内的液态 CO₂ 吸热气化发生物理变化而引发的, 因此, 利用其能量泄放对周围物料产生破坏的过程为物理过程, 与普通储罐内的液化可燃物因化学反应迅速释放热量且使储罐内温度与压力上升而引发的热爆炸具有本质的区别。致裂器泄放能量的大小与管内充装液态 CO₂ 质量、初始充装压力、发热装置提供热量以及剪切片的极限强度有关。

2.1 管内 CO₂ 状态变化分析

储液管内可充装约为 1 kg 的液态 CO₂, 其汽化潜热为 578 kJ/kg, 即 1 kg 的液态 CO₂ 气化时需要 578 kJ 热量。因此, 将装有加热装置的储液管启动后, 管内的 CO₂ 液体将会经历如下 2 个过程的变化: ① 液态 CO₂ 吸收热量 Q₁, 状态变为气态, 压力开始上升, 而温度仍保持初始温度 T₁; ② 气态 CO₂ 继续吸收热量 Q₂, CO₂ 气体分子热运动进一步加剧, 导致储液管内的压力急剧上升。在加热装置提供足够热量的前提下, 管内气体压力在极短的时间内大幅上升, 直到达到定压剪切片的极限强度 p₂, 才将其冲破卸压。其物理过程如图 2 所示。

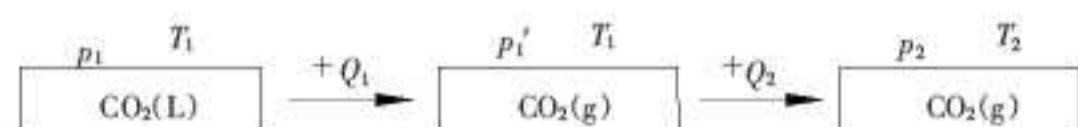


图 2 储液管内 CO₂ 状态转变过程

在高温、高压环境下, 分子热运动加剧, 液体分子具有较高能量, 液相与气相差别较小, 因此液态 CO₂ 的气化潜热随温度、压力的升高而减小, 即需要的 Q₁ 变小。那么发热装置提供的热量就会有更多的部分参与到过程 2 中, 使得气体升温、压力升高速度更快。

2.2 管内压力变化分析

致裂器储液管长 1 m, 直径 51 mm, 长径比为 19.6, 对于大长径比 (L/D>4) 的柱形密闭容器来说, 其管内压力发展、泄放过程与球形、方腔形容器内的液化气体爆炸、泄爆过程有很大不同。致裂器管内压

力变化过程如图 3 所示。

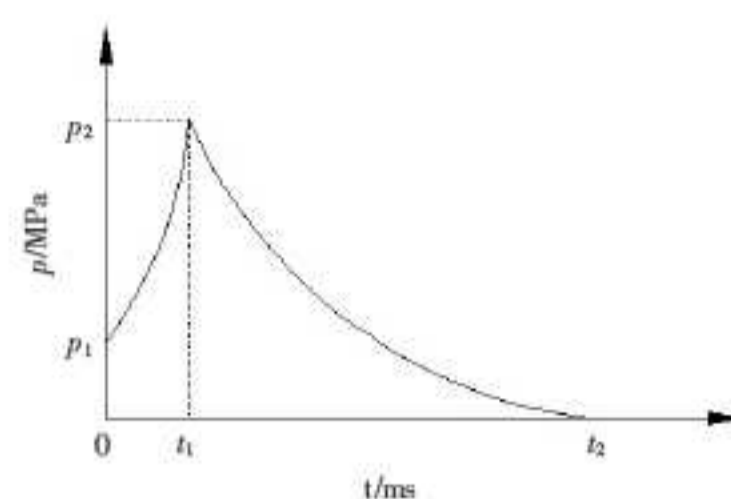


图 3 CO₂ 致裂器管内压力变化过程

初始阶段, 储液管内保持一定的灌装压力 p₁, p₁ 高于液态 CO₂ 的临界压力 7.38 MPa (临界温度 31.2 °C), 以此保证常温下管内 CO₂ 的状态为液态。

0~t₁ 阶段: 致裂器启动, 发热装置释放大量热量, 液态 CO₂ 吸热气化, 体积急剧膨胀, 在等容的环境中, 液态 CO₂ 的大量气化导致管内压力也急剧上升, 并且随着管内热量的传播, 气化过程也在加速进行, 压力升高速度越来越大。

t₁~t₂ 阶段: 在 t₁ 时刻储液管内的压力达到定压剪切片的极限强度 p₂, 导致剪切片被瞬间破坏, 随后管内气体高速冲出, 形成高速、高压气流, 管内压力随着 CO₂ 气体释放而逐渐减小。压力下降速率

$$\frac{dp}{dt} = \begin{cases} \frac{RT_1}{V} \left[-918S_v \left(\frac{p-p_0}{T_2} \right)^{1/2} \right] & (\text{亚音速泄放 } p \leq 1.89p_0) \\ \frac{RT_1}{V} \left[-1.392 \frac{S_v p}{T_1^{1/2}} \right] & (\text{音速泄放 } p \leq 1.89p_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中 R——CO₂ 气体常数, R=8.31 J/(mol·K);
V——储液管容积, V=0.96×10⁻³ m³;
S_v——泄放口面积, m²;
p——管内气体压力, Pa;
p₀——管外大气压力, Pa。

另外, CO₂ 气体的流动状态可由速率方程描述。对于音速释放, 泄放速率

$$\frac{dm}{dt} = C_d S_v \sqrt{pp_u k \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1+k}{1-k}}} \quad (2)$$

对于亚音速释放, 其泄放速率

$$\frac{dm}{dt} = C_d S_v \sqrt{\frac{2pp_u k}{k-1} \left[\left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (3)$$

式中 m——CO₂ 的质量, kg;
C_d——泄放口的泄放系数;
p_u——CO₂ 气体密度, kg/m³;
k——CO₂ 的绝热指数, k=1.295。

2.3 剪切片厚度对泄放压力的影响

在完全密闭的容器中对一定量的液体 CO₂ 提供热量, 可以使其气化并导致管内压力升高, 根据气体状态方程 pV=nRT, 压力升高的程度受到气体温

度的影响。致裂器的泄能装置会将管内压力在尚未达到极限压力之前将其释放,以达到安全可控的目的,并且泄放压力的大小与剪切片材料、厚度有关,为研究不同厚度的剪切片对泄放压力的影响,利用某优质碳钢进行多组实验,试验结果如图4所示。

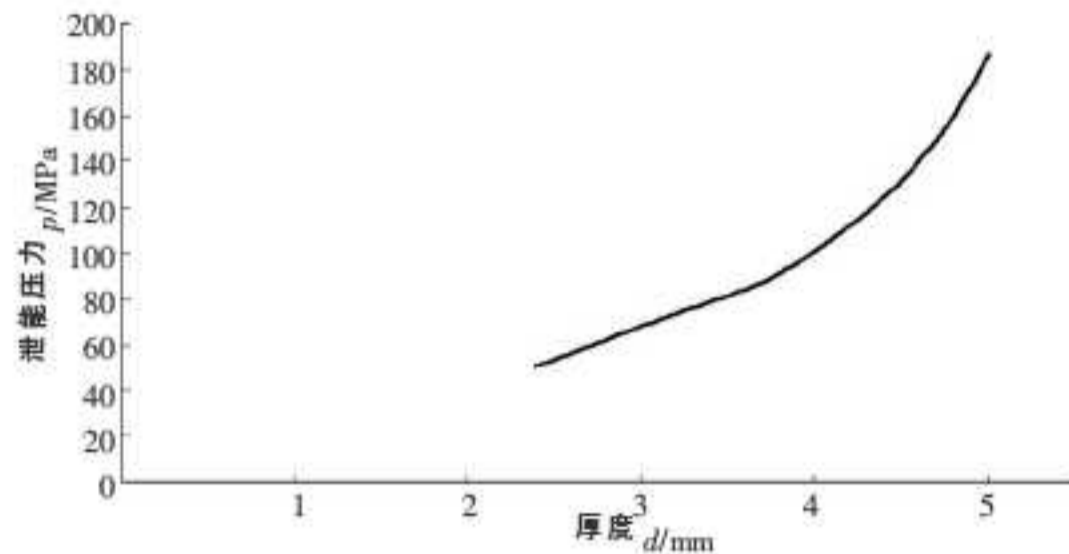


图4 定压剪切片与释放压力关系

由图4可知,在一定范围内,致裂器的泄放压力随着剪切片厚度增加而增大,符合指数规律 $p=14.992e^{0.4912d}$, 拟合度 $R=99.62\%$ 。在使用 6.0 mm 厚的剪切片进行试验时,剪切片仅仅鼓开一个裂缝,未能完全被破开。表明只有选用合适厚度的剪切片才能很好的发挥致裂器的作用,剪切片太薄则管内尚未积聚较高压力就开始泄能,而剪切片太厚导致不能被瞬间冲破,起不到泄能致裂的作用。

2.4 致裂器释放能量近似计算

带有卸压装置的压力容器爆破时能量以3种形式向外释放:①释放的高能气体的冲击能量;②剪切片破裂能量;③容器残余变形能量。后二者消耗的能量只占爆破总能量的3%~15%,大部分能量是以高能气体的形式释放。对于CO₂致裂器来说,其碎片能量为剪切破裂片时消耗的能量,另外由于储液管材质坚硬,爆破过程中变形量微小,因此这两方面消耗的能量比常规压力容器更小,爆破的主要能量表现为高能CO₂的冲击能量。

CO₂致裂器释放能量的大小可通过理论计算进行量化考核。目前,对于压缩气体容器物理爆破强度的计算有TNT当量模型、计算流体力学CFD方法和AICHE模型,其中TNT当量模型计算过程较简单,不用进行复杂的建模过程,是工程上常用的强度计算方法,具有很好的类比性。

储液管中的CO₂大部分为液体,也有很少部分气体。当储液装置启动后,液体蒸发对外做功,同时伴有气体的急剧膨胀做功。由于储液管中CO₂液体的质量占管内流体质量的绝大部分,因此液体蒸发气化做功的能量是致裂器释放能量的主体。致裂器释放能量

$$W = \frac{pV}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = 676\,881.9\text{ J} \quad (4)$$

式中 p ——致裂器爆炸时的压力,按照定压剪切片的破坏极限, $p=250 \times 10^6\text{ Pa}$ 。
储液管物理爆炸的TNT当量

$$W_{\text{TNT}} = \frac{W}{Q_{\text{TNT}}} = 0.15\text{ kg} \quad (5)$$

式中 Q_{TNT} ——TNT炸药的爆炸能, $Q_{\text{TNT}}=4\,520\text{ kJ/kg}$ 。
即由一根储液管组成的CO₂致裂器在正常使用时,释放能量的TNT当量为0.15 kg。

3 结语

(1)CO₂致裂器的泄能效果受到加热器提供的热量、储液管容积、泄能片厚度等因素影响,正常启动致裂器后储液管内液态CO₂首先吸热气化,随后随着吸热升温从而导致管内压力迅速上升,最终达到剪切片的极限强度后,将其破坏泄放能量,并通过压力下降速率方程及气体泄放速率方程对泄能过程进行了描述。

(2)通过试验验证了不同厚度的剪切片对泄放效果的影响,拟合出了一定厚度范围内剪切片厚度与泄放压力的关系 $p=14.992e^{0.4912d}$, $R=99.62\%$ 。

(3)利用TNT当量法估算了单个CO₂致裂器在正常使用时,释放能量的TNT当量为0.15 kg。

参考文献

- [1]朱拴成,周海丰,李浩荡. CO₂炮处理综采工作面巷道三角区悬顶[J]. 煤矿安全, 2013, 44(8):144-146.
- [2]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.
- [3]聂政. CO₂炮爆破在煤矿的应用[J]. 煤炭技术, 2007, 26(8):62-63.
- [4]冯长根. 热爆炸理论[M]. 北京:科学出版社, 1988.
- [5]俞昌铭, Venart, 熊音. 一种冷爆炸现象的物理数学分析初探[J]. 工程热物理学报, 1995, 16(3):354.
- [6]俞昌铭,单彦广,肖金生,等. 液化气储罐受热引爆机理分析[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(4):522-530.
- [7]胡俊,浦以康,万士昕,等. 柱形容器开口泄爆过程中压力发展特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1):47-52.
- [8]李美庆. 安全评价员实用手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2007.
- [9]党文义,刘昌华. 压缩气体容器物理爆炸计算模型[J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34(2):104-107, 131.
- [10]李文炜,狄刚,王瑞欣. 储运液态CO₂储罐爆炸事故的原因分析[J]. 安全与环境工程, 2010, 17(1):95-98.

作者简介:孙小明(1988-),北京人,硕士研究生,从事矿山安全技术研究。

责任编辑:郑万才 收稿日期:2014-11-05