

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2017.03.023

二氧化碳致裂器在岩石中深孔 预裂爆破中的应用研究*

黄晓实¹,张范立²,张政¹,程康¹

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 安徽金寨抽水蓄能有限公司, 金寨 237300)

摘要: 二氧化碳致裂器具有施工安全、操作简单等明显的优点, 由于其能量释放嘴的限制, 在岩石爆破中受到一定的局限。归纳分析了当今二氧化碳致裂器释放嘴结构状况, 采用大型分析软件模拟分析了释放嘴, 提出了喷嘴适合边坡预裂爆破的结构形式是锥形, 进口宽度为 40 mm, 出口宽度为 20 mm, 长度为 18 mm, 收缩角约 30° 释放嘴优化结构形式和合理参数, 喷嘴形状应为长条矩形形状, 沿致裂器两侧竖向线等距排列的布置, 并在实际工程中试用效果良好。

关键词: 二氧化碳致裂器; 预裂爆破; 释放嘴; AUTODYN 模拟

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2017)03-0131-05

Study on Application of CO₂ Fracturing Apparatus in Pre-splitting Blasting of Rock Deep Hole

HUANG Xiao-shi¹, ZHANG Fan-li², ZHANG Zheng¹, CHENG Kang¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Anhui Jinzhai Pumped Storage Co Ltd, Jinzhai 237300, China)

Abstract: Carbon dioxide fracturing has the advantages of safe construction and easy operation, and is limited in the rock blasting due to the limitation of its energy release nozzle. This paper summarizes and analyzes the current carbon dioxide fracturing device release nozzle structure, using large-scale analysis software simulation analysis of the release of mouth, put forward the structure form of nozzle suitable for slope pre-splitting blasting is tapered, import export width is 40 mm, width 20 mm, length is 18 mm, the contraction angle of about 30° to release mouth structure and reasonable optimization the parameters, nozzle shape should be long rectangular shape, fracturing for vertical line along the sides are arranged on the layout, the practical application shows that has great application value.

Key words: carbon dioxide fracturing; pre-splitting blasting; release nozzle; AUTODYN simulation

二氧化碳致裂器破碎岩石是利用低温液态二氧化碳迅速升温改变为气态, 从而导致压力上升瞬间泄能, 达到破碎岩石的目的。二氧化碳致裂器是上世纪 50 年代英国 CARDOX 公司研发制作的高压气

体膨胀破岩装置, 英文名为 Cardox Tube System。最初用于代替炸药来应用于煤矿增透技术中。由于其安全高效性, 先后美国, 法国, 德国, 土耳其等国家引进使用。目前, cardox 管在国外主要应用于矿山采石生产, 篦冷机清理雪人, 水库大坝附近水下爆破作业以及其他工程开挖土石方的应用^[1,2]。国内对液态二氧化碳相变膨胀致裂技术的泄能及致裂岩石的理论研究已有一定成果, 文献[3]在二氧化碳相变致裂增透技术研究中, 利用 TNT 当量模型计算

收稿日期: 2017-07-24

作者简介: 黄晓实(1996-), 女, 武汉理工大学土木工程 2014 级岩土工程菁英班本科生, (E-mail) 1329903501@qq.com。

通讯作者: 程康(1963-), 男, 教授, 主要从事岩土工程、爆破工程科研和教学工作, (E-mail) 732651430@qq.com。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2010-ZY-TJ-011); 交通部科技项目(2009353342550)

SD390型二氧化碳致裂器的 TNT 当量值;并运用 FLuent 数值模拟方法针对致裂器释放管参数进行优化研究,结合工程试验后提出了优化后释放管的参数数值。文献[4]对致裂器致裂岩石机理过程建立了一个比较系统的体系,并通过理论分析和数值模拟对现场应用进行研究。最后通过理论公式推导阐述了致裂器释放能量的大小、气体压力、气体速度的计算,并对致裂器在煤层中的卸能作用做了介绍。

总之,二氧化碳致裂器从引进、消化、应用,在国内已经基本掌握这种技术,并且具有的一定规模,生产厂家也达到数十家。但是,由于致裂管重复使用的限制和局部泄能的局限,导致全面推广使用有一定的难度。特别是绝大多数致裂器都是底部泄能释放能量,对于炮孔较深时,破碎效果较差。本文就是针对这种情况,力图改变局部泄能变位纵向条状泄能,使之能在岩石中深孔爆破、特别是预裂爆破中能够应用^[5,6]。

1 二氧化碳致裂器释放管泄能嘴参数优化

1.1 二氧化碳致裂器压力变化分析

目前常用的致裂岩石手段有炸药爆破,二氧化碳相变膨胀破岩法以及水力压裂法。已有数值模拟表明,致裂器爆破后,压力峰值在几百个兆帕的数量级,与炸药相比其爆破压力上升时间较为缓慢且其高压持续时间较长;但其压力却比水力压更大。几种装置的能量释放过程和技术参数,见表1和图1。

表1 三种装置释放压力技术参数表

Table 1 Three technical parameters of releasing pressure of equipment

类型	峰值压力/MPa	升压时间/s	加载速率/(MPa·s ⁻¹)	总过程/s
炸药爆破	>10 ⁴	10 ⁻⁷	>10 ⁸	10 ⁻⁶
CO ₂ 液-气相变爆破	10 ²	10 ⁻³	10 ² ~10 ⁶	10 ⁻²
水力压裂	10	10 ²	<10 ⁻¹	10 ⁴

常见岩石的抗压极限强度为几十兆帕到几百兆帕的量级,抗拉强度约为抗压强度的十分之一左右,约几兆帕至几十兆帕。因此,二氧化碳致裂器其产生的压力可以满足预裂爆破工程的需要。

1.2 AUTODYN 模拟喷嘴参数优化

为了致裂器能产生预裂缝,改造控制气体释放的终端元件——释放管便是关键所在。由于试验材料难以得到且爆破试验破坏性大,在这里便利用有限元分析软件 AUTODYN 数值模拟高压二氧化碳气

体经过喷嘴向外喷射,最后传播至炮孔壁上的过程。并将等当量的炸药在相同情况下爆炸作用在炮孔壁上的应力计算结果与数值模拟的结果进行对比验证。通过与理论计算结果的对比,以验证数值模型的正确性。然后通过 AUTODYN 模拟不同型号的喷嘴来得到适合预裂爆破的最优参数。

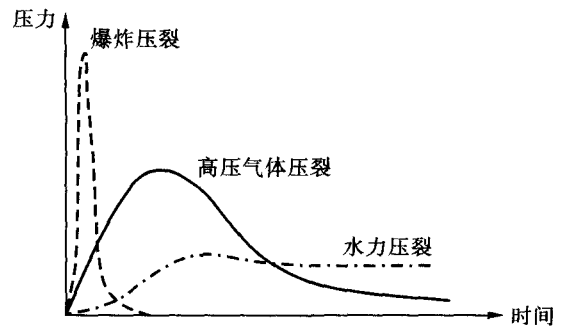


图1 三种装置压力释放过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pressure release process of three devices

1.2.1 模型建立

本次模拟现有主要的两种结构形式的喷嘴,其模型结构形式如图2所示,数值模拟采用 mm-mg-ms 的单位制。为优化喷嘴的截面尺寸参数,这采用二维平面模型模拟,可显著提高模拟计算速度。模型中共有三个 parts,其中两个是空气域,采用欧拉求解器,网格每一毫米划分一个,共 975 个网格,两个 parts 用 Joins 连接;喷嘴为最后一个 parts,采用拉格朗日求解器,并统一设置:进口宽度为 30 mm,出口宽度为 20 mm,长度为 18 mm。根据液态二氧化碳致裂器技术资料,模型参数以 F57-L 型号为根据。其定压剪切片的极限抗剪强度(等于气体释放压力)为 236 MPa,液态二氧的填充量为 1.25 kg。

1.2.2 模拟结果

对图2中的两种不同结构形式的喷嘴进行模拟,得到其压力云图3,从上压力云图中可以看到,第一种喷嘴喷射流场较长,较细,气体压力喷射集中;第二种喷嘴喷射流场则较短,较粗,气体压力喷射比较分散。

通过三个观察点的记录,得到如图4的压力时程折线图,从上图可以看出喷嘴2的观测点1处其压力峰值最大,到达 89.9 MPa,但是随着离释放嘴的距离增大,其压力峰值迅速衰减,在 10 mm 处为 46.3 MPa,在 15 mm 处为 22.1 MPa。反观喷嘴1,虽然离喷嘴最近的观测点1压力峰值不如喷嘴2大,但是其随着距离的增加,压力衰减比喷嘴2慢。

故到观测点2为76.4 MPa,观测点3为46.3 MPa的压力峰值均大于喷嘴2。由于喷嘴到炮孔壁的距离

一般为10~15 mm,且碰嘴1的喷射流场更流畅,故预裂爆破中喷嘴1的结构形式更优。

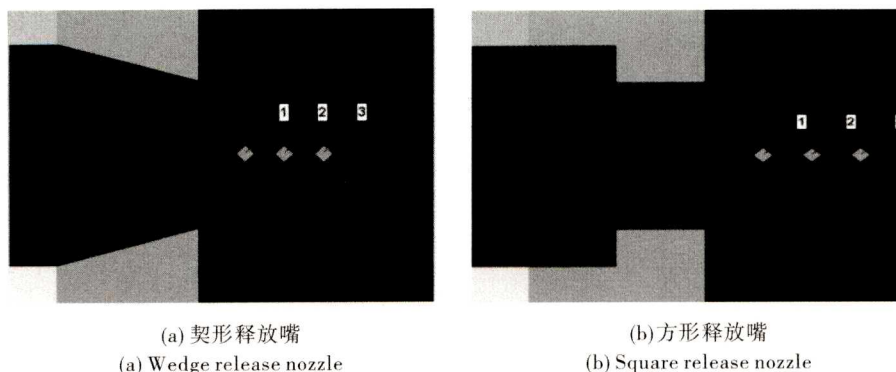


图2 致裂器能量释放嘴结构示意图
(1,2,3)表示测点位置

Fig. 2 Schematic diagram of the energy release nozzle of a cracker
1,2,3 Position of measuring point

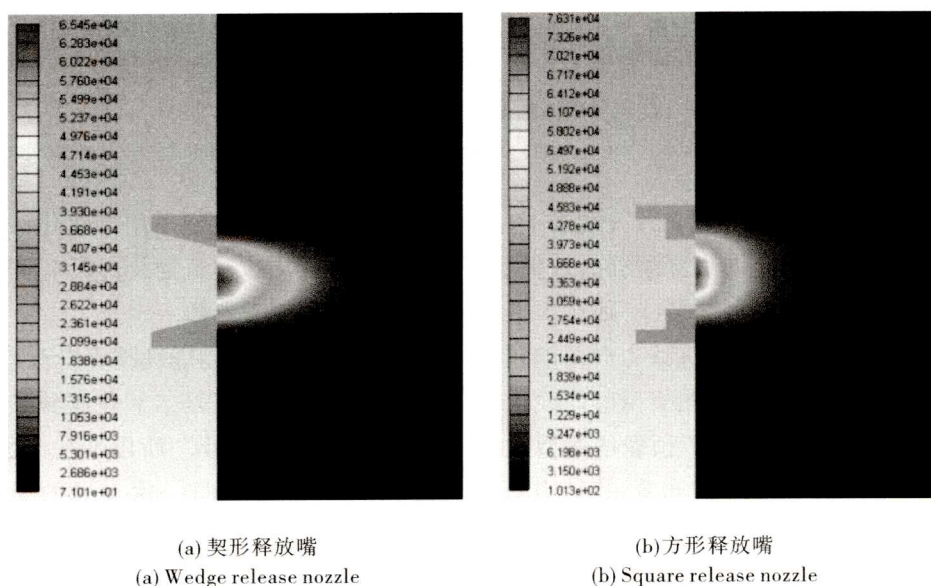


图3 不同能量释放结构压力云图

Fig. 3 Pressure nephogram of different energy release structures

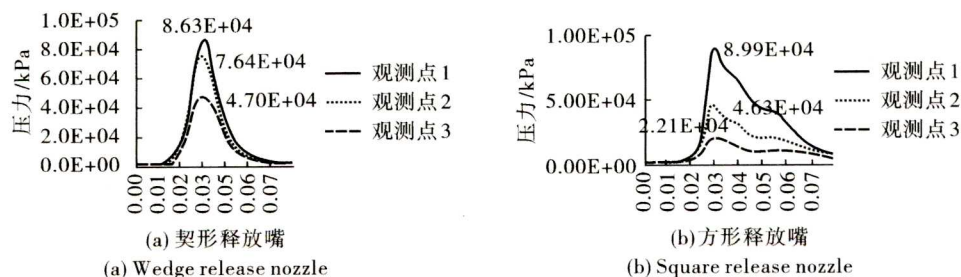


图4 不同能量释放结构典型部位压力变化示意图

Fig. 4 Pressure change of typical parts of different energy release structures

1.3 释放嘴参数优化结果

前面部分通过模拟两种不同结构形式的喷嘴,得

到喷嘴1的结构形式更加有利。现在对碰嘴1的截面尺寸参数进行优化。其截面见图5,主要包括入口宽度

D_1 和出口宽度 D_2 , 喷嘴长度 L , 收缩角度 θ 等。

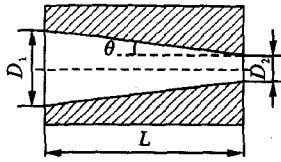
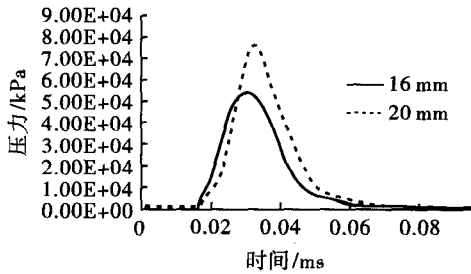


图5 释放嘴结构示意图

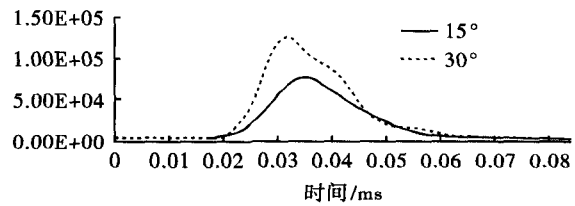
Fig. 5 Schematic diagram of the release nozzle

由文献[3]中所述: 当其他条件相同, 而嘴长 L



(a) 不同口径喷嘴压力时程图

(a) Pressure time diagram of different caliber nozzles



(b) 不同缩口角度喷嘴的压力时程图

(b) Pressure time diagram of different necking angle nozzles

图6 能量释放结构不同工况下压力变化示意图

Fig. 6 Sketch map of pressure change under different working conditions of energy release structure

1.4 适用于预裂爆破的释放嘴布置

预裂爆破需要达到一条定向贯穿裂缝的效果。而要使两个炮孔之间形成一条贯穿裂缝, 则在水平面上应当使高压气体沿着两炮孔的连线方向两侧同时释放气; 在炮孔竖直截面上, 需要沿管身竖向沿线状释放能量。根据上述原则, 并以煤矿预裂增透型致裂器为改造蓝本, 可将喷嘴以此方式布置, 其结构见图7。

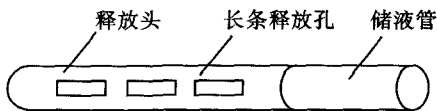


图7 二氧化碳致裂器预裂爆破释放嘴布置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of release nozzle for pre-splitting blasting of carbon dioxide cracking device

2 工程应用实例

2.1 工程概况

工程位于湖北省恩施市东风大道与中山路交叉口处。此为城市主干道, 周边环境非常复杂, 车流量大, 在道路两侧有市政管网、电线及民房等建筑物。隧道西端洞口明挖土石方量为 25 829.2 m³ 左右, 开挖边坡高度 25 m 左右, 为 III 级边坡。由于周边环境

在 18 mm、20 mm、24 mm 之间变化时, 喷射流场变化不大, 从装置的便捷性和经济效应出发, 选择 18 mm 的喷嘴长度。以下情况都将在嘴长为 18 mm 时进行讨论。

本文主要对两种工况进行了模拟研究。工况 1: 收缩角度 θ 不变, 改变出口宽度 D_2 ; 工况 2: 出口宽度 D_2 不变, 改变收缩角度 θ , 其喷射流场没有明显变化, 当收缩角度为 30° 时, 其的峰值压力要更大, 故 30° 的收缩角度为模拟的最优参数。见图 6。

极为复杂, 建设方决定采用二氧化碳致裂器进行破碎岩石, 确保周边建筑物及行人车辆安全。

2.2 致裂器爆破参数

二氧化碳致裂器爆破破碎岩石与炸药爆破岩石其机理是一致的, 只是二氧化碳致裂器释放的能量大小比炸药爆炸要小。所以炮孔参数(间距、排距、孔深)要适当减小, 且一次起爆的规模在一排至两排。本次工程二氧化碳致裂器爆破参数见表 2 所示。

表2 二氧化碳致裂器爆破岩石参数表

Table 2 Blasting rock parameters of carbon dioxide cracking apparatus

炮孔种类	间距/m	排距/m	孔深/m	孔径/mm
爆破孔	1.2	0.8	6.0	120
边坡预裂孔	1.2		6.0	120

2.3 爆破效果

爆破施工后, 边坡爆破残孔率达到 95% 以上, 不平整度小于 20 cm。周边行人和建筑物居民没有一起投诉, 达到了爆前建设方提出的安全和开挖质量的要求。具体效果如图 8 所示。



(a) 装药照片
(a) Charge photo



(b) 爆破后照片
(b) Post blast photograph

图8 爆破效果照片

Fig. 8 Blasting effect photos

3 结论

(1)对预裂爆破的机理过程进行分析研究。预裂成缝的机理是炮孔应力波的叠加产生炮孔连线上的拉应力而致裂岩石,且爆生气体通过气楔作用进一步使裂纹扩增。但是,应力波作用在炮孔壁上的峰值应力不能大于岩石动态抗压强度,且不小于岩石动态抗拉强度。

(2)分析现有致裂器构造对于预裂爆破的不足之处,并运用有限元软件 AUTODYN 对喷嘴参数进行优化,得到相应的释放气体喷射流场压力云图以及观测点的压力时程图。通过对数值模拟结果分析得到喷嘴适合边坡预裂爆破的结构形式是锥形,进口宽度为 40 mm,出口宽度为 20 mm,长度为 18 mm,收缩角约 30°。然后通过分析现有的释放头构造形式的优缺点,得到喷嘴形状应为长条矩形状,沿致裂器两侧竖向线等距排列的布置。

(3)工程实际应用表明,二氧化碳致裂器长条矩形状喷嘴,能够形成预裂面,预裂效果满足工程要求。

参考文献 (References)

- [1] ANON. Cardox system brings benefits in the mining of large coal[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(5):27-28.
- [2] TINGKAN Lua, ZHAO Feng WANG bo. Improvement of coal seam gas drainage by under-panel cross-strata stimulation using highly pressurized gas[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 77: 300-312.
- [3] 洪紫杰,王成,熊祖强.高瓦斯低透气性煤层二氧化碳相变致裂增透技术研究[J].*中国安全生产科学技术*, 2017, 13(1):27-28.
- [3] HONG Zhi-jie, WANG Cheng, XIONG Zu-qiang. Study on carbon dioxide phase change fracturing and permeability enhancement technology in high gas and low permeability coal seam[J]. *Science and Technology of Safety Production in China*, 2017, 13(1):27-28. (in Chinese)
- [4] 韩亚北,王兆丰.液态二氧化碳相变致裂增透机理研究[J].*河南理工大学学报*, 2014, 28(4):72-74.
- [4] HAN Ya-bei, WANG Zhao-fen. Study on mechanism of phase change cracking enhancement of liquid carbon dioxide[J]. *Journal of Henan Polytechnic University*, 2014, 28(4):72-74. (in Chinese)
- [5] 程康,祝文化,王清华.岩土开挖工程爆破[M].武汉:武汉理工大学出版社,2008.
- [5] CHENG Kang, ZHU Wen-hua. *Rock and soil excavation engineering blasting*[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2008. (in Chinese)
- [6] 聂政.二氧化碳炮爆破在煤矿的应用[J].*煤炭技术*, 2007, 26(8):62-63.
- [6] NIE Zheng. Application of carbon dioxide blasting in coal mines[J]. *Coal Technology*, 2007, 26(8):62-63. (in Chinese)