

DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2018.05.006

CO₂ 切槽定向致裂机理实验研究

刘全保,王 飞,闫晶晶,刘红威,郭成成
(太原理工大学 矿业工程学院,山西 太原 030024)

摘 要:基于 CO₂ 致裂理论和实践,结合切槽定向爆破方法,提出了 CO₂ 切槽定向致裂技术,定性分析了 CO₂ 切槽定向致裂机理,开展了 CO₂ 切槽定向致裂实验。结果表明:在 CO₂ 致裂过程中,切槽产生了应力集中和孔壁裂纹抑制 2 个力学效应,再加切槽对裂纹方向的引导作用,在三者共同影响下,使裂纹沿着设计方向起裂和扩展,从而实现 CO₂ 致裂裂纹的定向控制。

关键词:二氧化碳;致裂;定向;切槽孔;准静态作用

中图分类号:TD235.39

文献标志码:A

文章编号:1003-496X(2018)05-0023-04

Directional Fracturing Caused by Carbon Dioxide

LIU Quanbao, WANG Fei, YAN Jingjing, LIU Hongwei, GUO Chengcheng

(School of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on the theory and practice of carbon dioxide fracturing, combined with the pre-notched directional fracture, the carbon dioxide pre-notched directional fracturing technique was proposed. The mechanism and experiment of carbon dioxide pre-notching directional fracturing technique was studied. The results show that during the process of carbon dioxide fracturing, the pre-notched hole produces two mechanical effects of a strong tensile stress area around notch and a compression stress area around non-notching direction, as well guiding effect on the crack direction. Under the combined action of these three effects, the cracks initiate and propagate along the pre-notched direction, and the directional control of the cracks made by carbon dioxide is achieved.

Key words: carbon dioxide; fracturing; directional; pre-notched hole; action of quasi-static

定向控制爆破方法主要包括:切槽孔定向、聚能药包定向、切缝药包定向等^[1],用以提高爆破成型质量,保护围岩稳定性,获得理想断裂面和轮廓线^[2],已被广泛应用于井巷、公路、水电、隧道等工程领域^[3]。然而,现有技术的起裂能量主要来源于化学炸药,易受煤矿井下粉尘、瓦斯浓度等条件限制^[4],具有危险性高、污染重、易产生明火等缺点。CO₂ 致裂技术是一种物理爆破方法,已广泛应用于石油增产^[5-6]、页岩气开采^[7]、瓦斯促抽^[8-9]、工作面落煤^[10]、煤层顶底板防治等领域^[11-12],体现出了比炸药爆破安全性高、不产生明火、爆破能量可控、适用范围广等优点^[13],这为在煤岩中使用定向控制爆破提供了新思路。近年来,国内外学者^[14-17]对 CO₂ 致裂技术致裂过程中,压力变化过程及致裂影响半径等方面进行了大量研究,但对 CO₂ 致裂技术定向应用方面的研究较少,特别是对 CO₂ 定向致裂机理鲜有报道。从 CO₂ 致裂过程中,冲击波作用时间短、动效应不明显,主要破坏能量来源于气体膨胀压力^[18-19]特性出

发,结合切槽孔定向方法所需起裂压力小、方向易于控制、致裂面平整、爆破工艺简便的技术优势^[1],提出 CO₂ 切槽定向致裂技术。理论分析了切槽在 CO₂ 定向致裂过程中产生的力学效应以及切槽对裂纹起裂扩展方向的影响,并用实验结果对理论分析结果进行验证。

1 CO₂ 切槽定向致裂机理分析

CO₂ 切槽定向致裂是通过将圆形孔切槽将高压 CO₂ 气体能量集中于槽线(两槽尖连线)方向,迫使裂纹沿设计方向起裂、扩展,同时抑制其他方向裂纹,来实现裂纹方向控制和保护围岩的目的。

1.1 切槽对高压 CO₂ 气体的应力集中作用

对于圆形孔而言,由于高压 CO₂ 气体对孔壁各方向应力是均匀对称,在孔壁围岩中会生成大随机初始裂纹,当长短不等、方向各异的裂纹同时扩展,会分散和削弱大部分致裂能量,缩短致裂半径。因此,将高压 CO₂ 气体能量集中,减少 CO₂ 致裂过程中

出现初始裂纹数量,引导裂纹沿设计方向起裂扩展,是CO₂切槽定向致裂技术的研究思路。

对于切槽孔而言,切槽改变了孔内高压CO₂气体应力分布,切槽将高压CO₂气体导入槽内,对切槽面产生对称的应力作用,由力的平行四边形准则可知,切槽面所受合应力被“引导”集中于槽线方向,从而在切槽端部形成应力集中现象^[20](图1),该区域产生强有力的“气楔削切”效应,降低了槽尖起裂所需应力,迫使槽尖裂纹沿槽线方向起裂;随着切槽尖端裂纹起裂失稳,高压CO₂气体楔入该新生裂纹,在裂纹尖端不断膨胀和受岩石挤压,裂纹尖端拉应力和剪应力增大,推动裂纹高速扩展,最终使目标岩体沿槽线方向断裂,形成平整断裂面。

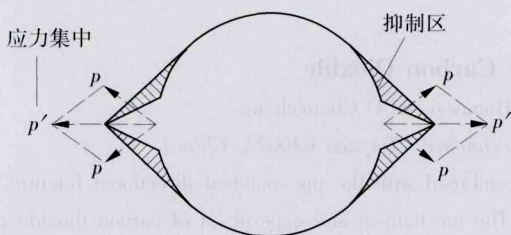


图1 应力集中与裂纹抑制区示意

1.2 切槽对孔壁裂纹的抑制作用

切槽不仅改变圆孔形状,而且孔壁介质强度会重新分布,使孔壁抗压强度远大于切槽尖端的抗压强度,这就加强了切槽尖端裂纹起裂优势,亦降低了孔壁随机径向裂纹生成的可能性;当高压CO₂气体充满切槽孔时,切槽根部附近会出现低压应力区

域,而离切槽较远的孔壁其它区域,其压应力分布仍与圆形炮孔分布相近,这就形成4个裂纹生长抑制区^[21],对该区域内裂纹的产生起到抑制作用;随着切槽尖端裂纹延伸,高压CO₂气体向裂纹尖端聚集,气体对孔壁压应力强度降低,作用时间缩短,从而减小孔壁损伤程度,提高围岩稳定性。

1.3 切槽对裂纹起裂扩展方向的引导作用

文献[22]据断裂力学中应变能密度因子理论,提出岩石在准静态作用下,裂纹只会沿着最小应变能密度因子方向起裂和扩展。因此有下式成立:

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_0} = 0, \left. \frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} \right|_{\theta=\theta_0} > 0 \quad (1)$$

式中: S 为应变能密度因子,MPa·mm; θ_0 为起裂角; θ 为裂纹扩展方向与切槽对称轴之夹角。

切槽尖端的应变能密度因子为:

$$S = \frac{2(1+\nu)K_1^2}{16\pi E} [(1+\cos\theta)(3-4\nu-\cos\theta)] \quad (2)$$

式中: E 为岩石弹性模量,MPa; ν 为泊松比, $0 < \nu < 1$; K_1 为切槽尖端的应力强度因子,MPa·m^{1/2}。

将式(2)求导并代入式(1)求解得 $\theta_0=0$ 为唯一解,即沿槽线方向起裂和扩展。

2 CO₂切槽定向致裂实验研究

2.1 实验系统和实验模型制作

利用CO₂致裂实验模拟系统(图2)进行研究,主要模拟在CO₂致裂过程中气体准静态作用下,圆形孔试块和切槽孔试块致裂后裂纹分布形态,记录试块起裂压力,统计裂纹数量、裂纹扩展方向。

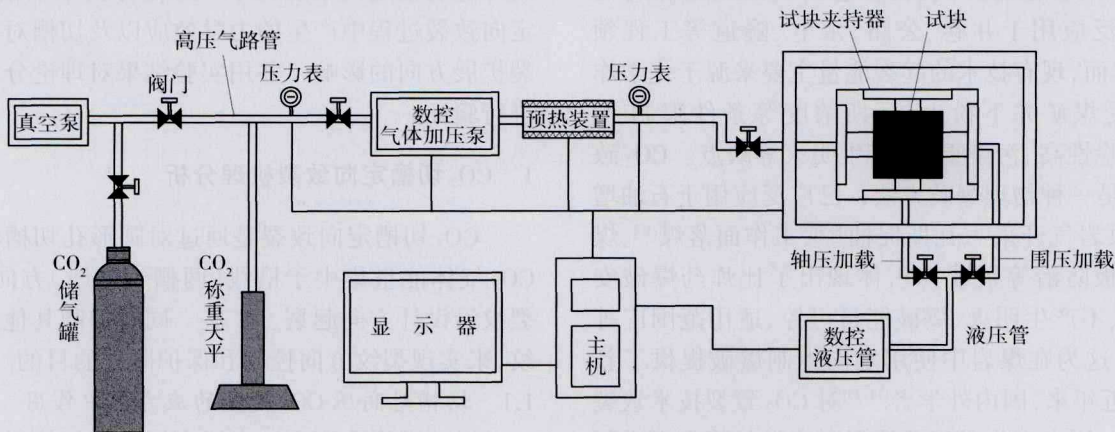


图2 实验系统示意图

实验试块采用颗粒直径小于0.5 mm石英砂为骨料的混凝土试块,砂胶比为4:1,掺适量水搅拌均匀,在几何尺寸150 mm×150 mm×150 mm立方体试

件模具中振捣成形,制备2组实验试块,制作过程中以相同材料制作 $\phi 50$ mm×100 mm标准试件3块,以测试块物理力学参数,脱模后室内浇水养护28

d. 采用预留圆形孔,孔深度 100 mm,直径 6 mm。切槽孔横向与纵向剖面如图 3。切槽孔试块采用手工锉刀切槽,角度 60° ,槽深 1.5 mm。试件孔与高压气路管用环氧树脂胶连接,封孔深度 30 mm,静置 5 d 达到最佳胶封效果。通过测量试件平均单轴抗压强度 6.73 MPa,平均抗剪切强度 2.13 MPa。

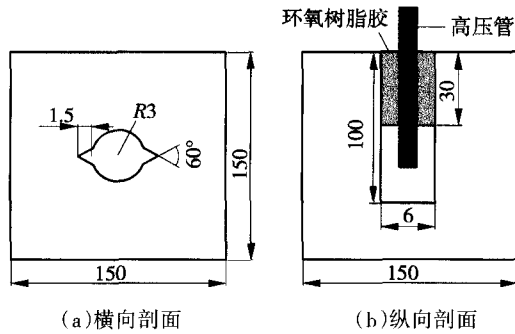


图 3 切槽孔横向与纵向剖面

2.2 实验过程

1) 将试块放入试块夹持器,启动数控液压泵,对试块施加 0.5 MPa 的轴压和围压用于固定,连接试块耐压管与气路增压系统。

2) 开启真空泵排尽管路内空气,关闭排气阀。启动恒温控系统,将试块和管路预热温度控制在 50°C 。

3) 启动注气系统,将 CO_2 气体注入数控增压泵进行恒流增压,流量设置 20 mL/min。

4) 观察数控压力系统,数据采集系统记录并显示各项参数。当 CO_2 压力值减小到恒定值,说明整个实验过程完成。

2.3 结果分析

保持管路和试块恒温 50°C ,将 CO_2 气体注入高压管路,对试块加压,当压力开始下降,停止加压。观察致裂后试件表面宏观裂纹的长度、数量、方向等具体破坏形貌特征并进行统计。

在圆形孔试块致裂后,由于环氧树脂胶为高抗压、抗剪切强度胶在该面无裂纹产生,而其余 5 个面均产生 3~6 条随机分布、长度不等的宏观裂纹,试块被切成大小不等的 9 块。这是由于 CO_2 气体对圆形孔壁压应力分布的均匀对称性,导致裂纹呈现随机分布状态,圆形孔试块致裂效果与机理分析保持一致,表明实验方案的可行性。在实验后,试块被沿着两切槽尖端方向切成 2 块,试件表面仅形成 1 条连续宏观裂纹,且断裂面平整,孔壁无裂纹产生。这说明在 CO_2 准静态作用过程中,切槽改变了孔内气体压应力分布,将合应力集中到槽尖方向,产生的

“气楔削切”效应将试块沿槽线方向劈开,形成理想断裂面;由于 CO_2 气体在起裂裂纹尖端积聚必然导致孔壁围岩所受压应力被削弱,再加切槽对孔壁裂纹的抑制作用,则孔壁不会有裂纹起裂生长。

根据数据采集系统在致裂过程中的数据,绘制孔内压力随时间变化曲线,切槽孔试块孔内压力变化曲线如图 4。压力曲线从 0 到峰值的过程为数控加压泵恒流加压的过程,不体现实验结果,故忽略不做分析,A 曲线和 B 曲线分别为圆形孔试块。由图 4 可知,当曲线压力达到峰值, CO_2 压力大于试块的断裂强度,试块开始起裂;当压力峰值开始下降,是裂纹的扩展阶段;当压力趋于 0,试件被彻底破坏。A 曲线的压力峰值(7.65 MPa)明显高于 B 曲线峰值(4.54 MPa),表明在相同材料的情况下,由于切槽对 CO_2 气体压力的集中作用,压应力在切槽尖端发生应力叠加,使槽线方向所受的压力要远大于孔壁压力,降低了切槽孔试块起裂压力。

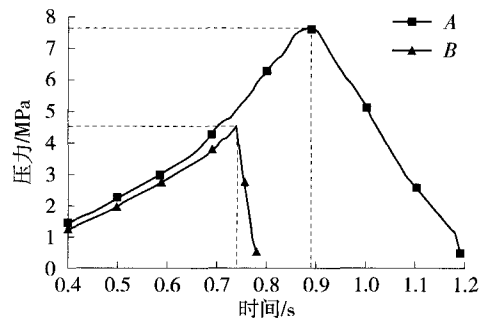


图 4 致裂过程中压力随时间变化曲线

压力下降过程,是裂纹的扩展过程,B 曲线的斜率明显高于 A 曲线,说明圆形孔试块中 CO_2 泄压时间(0.3 s)高于切槽孔试块泄压时间(0.05 s),即切槽孔试块裂纹扩展速度要远大于圆形孔试块裂纹扩展速度。圆形孔试块致裂时,裂纹起裂数量较多,会造成高压 CO_2 气体能量被分散,分散作用会导致裂纹尖端能量降低,而裂纹的扩展主要依赖于气体在裂纹尖端的高应力,对裂纹扩展速度产生削弱减缓。对于切槽试块来说,切槽对应力集中作用使得试件在槽线方向优先起裂,当只有 1 条裂纹起裂时,高压 CO_2 气体能量被全部集中于该裂纹尖端,产生远远高于圆形孔裂纹尖端的应力场,从而提高了裂纹扩展速度。

3 结论

1) 通过对 CO_2 切槽定向致裂机理进行了分析,

可以看出由于切槽的存在,改变了高压CO₂气体在孔内的应力分布,在槽尖端产生压力集中作用和孔壁裂纹的抑制作用,在这2个力学效应共同作用下,裂纹在切槽尖端优先起裂,同时抑制了孔壁裂纹生成;切槽对裂纹的引导作用改变了裂纹随机分布的形态,使得裂纹沿着设计方向延伸扩展。

2)与圆形孔试块致裂效果对比,切槽降低了试块起裂压力,表面沿设计方向产生1条宏观径向裂纹,裂纹扩展速度有显著提高且断裂面平整,实验结果与CO₂切槽定向致裂机理分析结果一致。

3)研究结果表明,在CO₂致裂过程中采用切槽孔定向方法可以达到裂纹方向控制、保护围岩的目的,为CO₂切槽定向致裂技术能够等到更加广泛的应用提供参考。

参考文献:

[1] 杨仁树,杨国梁,高祥涛.定向断裂控制爆破理论与实践[M].北京:科学出版社,2017.

[2] 岳中文,郭洋,王煦.切槽孔爆炸载荷下裂纹扩展行为的实验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(10):2018-2026.

[3] 李清,王平虎,杨仁树,等.切槽孔爆破动态力学特征的动焦散线实验[J].爆炸与冲击,2009,29(4):413.

[4] 黄闰月,尹岚岚,倪昊,等.二氧化碳致裂器研制与应用[J].煤炭技术,2015,34(8):123-124.

[5] 江怀友,沈平平,钟太贤,等.二氧化碳埋存与提高采收率的关系[J].油气地质与采收率,2008(6):52-55.

[6] HOLM L W. Carbon dioxide solvent flooding for increased oil recovery[J]. Journal of Petroleum Technology, 1959, 216(12): 225-231.

[7] 鲜学福,殷宏,周军平,等.页岩气藏超临界CO₂致裂增渗实验装置研制[J].西南石油大学学报(自然科学版),2015(3):1-8.

[8] 周西华,门金龙,宋东平,等.液态CO₂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.

[9] 王兆丰,李豪君,陈喜恩,等.液态CO₂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(9):11-16.

[10] 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(1):22-24.

[11] 朱拴成,周海丰,李浩荡.二氧化碳炮处理综采工作面巷道三角区悬顶[J].煤矿安全,2013,44(8):144.

[12] 张家行,张兴华,李豪君.CO₂致裂技术机理及其在底鼓治理中的应用[J].煤矿安全,2017,48(1):70.

[13] 贺超.基于二氧化碳深孔致裂增透技术的低透煤层瓦斯治理[J].煤炭科学技术,2017,45(6):67-72.

[14] DU Yukun, WANG Ruihe, NI Hongjian, et al. Determination of rock-breaking performance of high-pressure supercritical Carbon dioxide jet[J]. Journal of Hydro-dynamics, 2012, 24(4): 554-560.

[15] Dawson G K W, Golding S D, Massarotto P, et al. Experimental supercritical CO₂ and water interactions with coal under simulated in situ conditions[J]. Energy procedia, 2011(4): 3139-3146.

[16] Stuart D, Robyn F, Richard S. Swelling of Australian coals in supercritical CO₂[J]. International Journal of Coal Geology, 2008(74): 41-52.

[17] 范迎春,霍中刚,姚永辉.复杂条件下二氧化碳深孔预裂爆破增透技术[J].煤矿安全,2014,45(11):74.

[18] 徐颖.高压气体爆破破煤模型试验研究[J].西安矿业学院学报,1997(4):25-28.

[19] 孙可明,辛利伟,王婷婷,等.超临界CO₂气爆煤体致裂规律模拟研究[J].中国矿业大学学报,2017,46(3):501-506.

[20] 张玥.V形刻槽爆破机理动态数值模拟分析[J].爆破器材,2009,38(4):1-5.

[21] 阳友奎,邱贤德,张志呈.切槽爆破中切槽的导向机理[J].重庆大学学报(自然科学版),1990(5):68-74.

[22] 宗琦.岩石炮孔预切槽爆破断裂成缝机理研究[J].岩土工程学报,1998(1):30-33.

作者简介:刘全保(1989—),男,山西吕梁人,在读硕士研究生,研究方向为矿井灾害防治。

(收稿日期:2017-09-07;责任编辑:陈洋)

