

刘彦麟,陈子涵,邹全乐,等.基于正交试验的CO₂致裂器泄能头的参数优化[J].矿业安全与环保,2020,47(4):107-111.

DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.2020.04.021

基于正交试验的CO₂致裂器泄能头的参数优化

刘彦麟,陈子涵,邹全乐,曾 强,叶 辰

(重庆大学 资源与安全学院,重庆 400044)

摘要:为了对CO₂致裂器泄能头的参数设计提供优化方案,采用ANSYS-CFX对CO₂致裂器的泄能头内部的流场进行数值模拟与仿真,分析了CO₂致裂器的单孔泄能头在不同入口气体压力、扩张段长度、收缩断面直径下所受最大压力,建立了由25组数值模型构成的正交试验表。通过正交试验分析可得:在入口气体压力为290 MPa、扩张段长度为40 cm、收缩断面直径为0.073 m时,CO₂致裂器泄能头所承受的压力最大,达到317.2 MPa。研究结果可为提高CO₂致裂器使用的安全性提供理论支撑。

关键词:煤层增透;CO₂致裂器;泄能头;正交试验;数值模拟;参数优化;安全性

中图分类号:TD712⁺.6 文献标志码:B 文章编号:1008-4495(2020)04-0107-05

Parameter optimization of the discharge head of CO₂ fracturing device based on orthogonal experiment

LIU Yanlin, CHEN Zihan, ZOU Quanle, ZENG Tao, YE Chen

(College of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to provide an optimization scheme for the parameter design of the discharge head of CO₂ fracturing device, ANSYS-CFX was used for numerical simulation and emulation of the flow field inside the discharge head of CO₂ fracturing device, the maximum pressure of the single-hole discharge head of CO₂ fracturing device under different inlet gas pressure, divergence cone and diameter of contraction section was analyzed, while an orthogonal test table composed of 25 numerical models was established. The experimental analysis shows that when the inlet pressure is 290 MPa, the divergence cone is 40 cm, and the diameter of contraction section is 0.073 m, the discharge head of CO₂ fracturing device comes to the maximum pressure, reaching 317.2 MPa. The results provide theoretical support for improving the safety of CO₂ fracturing device.

Keywords: permeability enhanced of coal seam; CO₂ fracturing device; discharge head; orthogonal experiment; numerical simulation; parameter optimization; safety

随着煤矿开采深度的不断增加,深部煤层气储层将呈现出高地应力、高瓦斯含量、强吸附性等特征,因此,煤层气储层的渗透率将进一步降低,造成煤矿瓦斯抽采难度增大^[1]。近年来,为达到煤矿开采增产目的,有关研究人员开始通过研究CO₂致裂技术使煤层透气性得以提高^[2]。霍中刚^[3]研发出CO₂深孔预裂爆破煤层增透新技术,通过理论分析和数值模拟研究发现,采用CO₂致裂器在煤层中进行深孔预裂爆破,可促进煤层孔隙系统发育,提高煤

层的透气性,达到强化瓦斯抽采的目的;张亮等^[4]通过顺煤层CO₂致裂增透技术,使煤层原生孔洞裂缝增大,瓦斯含量大幅降低,最大降幅达到59%。为了使CO₂致裂器的使用更为安全,提高其应用的广泛性,越来越多的学者开始对CO₂致裂器安全性进行研究。在CO₂致裂器的安全设计方面,李艳丽等^[5]对CO₂致裂器的设计、制造和生产提出相应的技术要求,以确保爆破过程的安全性;孙小明等^[6]通过试验发现CO₂致裂管的泄能剪切片的厚度会影响CO₂气体泄出的压力,并建立了相应的数学模型;王子雷等^[7]通过自行设计的CO₂致裂管气密性试验装置,对CO₂致裂管的气密性进行了研究;彭然等^[8]通过准静态抗减压强度测试与动态爆破测试,优化了定压减压片厚度、发热材料的量及液态CO₂的量等参

收稿日期:2020-05-19;2020-06-09 修订

作者简介:刘彦麟(1998—),男,重庆人,主要从事矿山安全方面的研究工作。E-mail:624933924@qq.com, Tel: 023-62910900。

数;吴国群^[9]从安全性出发对 CO₂ 致裂管内 CO₂ 充装的压力、气体纯度提出优化建议。

根据前人的研究结果可以看出,目前对 CO₂ 致裂器安全性的参数优化主要是通过对定压剪切片与充装气体的压力两方面进行研究,很少对 CO₂ 致裂器的泄能头部分进行研究。泄能头部分是释放能量的关键部件,因为 CO₂ 致裂器的泄能头部分在释放能量的同时需要承受相当大的压力,会对其使用的安全性造成一定的影响^[10],因此有必要对 CO₂ 致裂器的泄能头部分开展安全性方面的研究。笔者基于 CFX 数值模拟软件,以 CO₂ 致裂器的单开孔泄能头为研究对象^[11],选取入口气体压力、扩张段长度、收缩断面直径 3 种影响因素^[2],利用正交试验原理进行不同参数组合条件下的数值模拟分析,最终确定对 CO₂ 致裂器的单开孔泄能头造成最大压力的参数组合,可为 CO₂ 致裂器单孔泄能头的设计提供理论参考。

1 数值模型及试验方法

CO₂ 致裂器主要由 6 部分组成,分别是:充装阀、发热装置、储液管、密封垫、剪切片(可定压)、泄能头(致裂筒和泄能器)。泄能头底端固定连接储液管,在泄能头与储液管之间固定连接剪切片,剪切片的顶端和底部固定连接密封垫,储液管的底部固定连接充气阀,并且在储液管的内部固定连接发热管^[2]。CO₂ 致裂器结构及组成如图 1 所示。

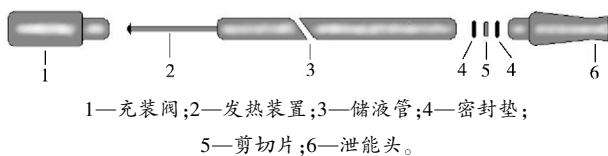


图 1 CO₂ 致裂器结构及组成示意图

CO₂ 致裂器的致裂方式:通过在其储液管里充装压缩的液态 CO₂,保持储液管内的液态 CO₂ 压力,启动加热装置产生热量使液态 CO₂ 气化膨胀并产生巨大压力,最终达到定压剪切片的极限强度,进而冲破储液管定压剪切片,将储液管内高压 CO₂ 从泄能头释放出来,作用在煤体上,实现定向致裂^[12]。

1.1 泄能头数值模型构建及求解条件

1.1.1 泄能头模型构建

用 Design Modeler 建立泄能头的模型,根据泄能头的工作原理,将泄能头部分(致裂筒和泄能器)简化为长 0.75 m、直径 0.073 m 的收缩—扩张型管^[13],其一端为气体入口,另一端为气体出口^[14]。气体出口至收缩断面的距离为扩张段长度。CO₂ 致

裂器泄能头模型如图 2 所示。

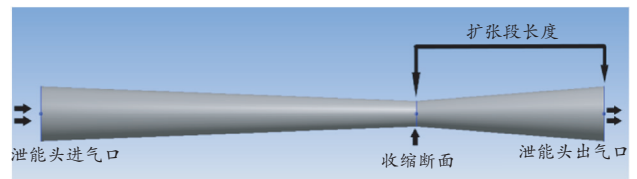


图 2 CO₂ 致裂器泄能头物理模型

1.1.2 CFX 求解条件

将模型导入 CFX-pre 中设置边界条件,假设气体在管内的流动是均匀且连续的。将气体压力作为入口的边界条件,将大气压作为出口的边界条件。具体的求解条件如下:

- 1) 气体模型:选取理想状态下的 CO₂ 气体。
- 2) 壁面条件:将周围壁面定义为刚性壁面,不受内部气体的影响。

1.2 试验方法

1) 对选取的 3 种与泄能头所受最大压力有关的影响因素进行单因素试验,确定各个因素与泄能头所受压力之间的关系;

2) 对 3 种因素建立三因素五水平的正交试验表,并建立相应的泄能头数值模型;

3) 根据正交试验表进行试验并进行正交分析;

4) 得出影响泄能头所受压力的主要影响因素和泄能头受压最大时的 3 种因素的组合方式。

2 试验结果与分析

2.1 单因素试验结果分析

2.1.1 入口气体压力对泄能头所受最大压力的影响规律

控制泄能头的扩张段长度和收缩断面直径不变,分别求出入口气体压力为 210 ~ 300 MPa 条件下泄能头所受最大压力值,每间隔 10 MPa 取一值,其变化趋势如图 3 所示。

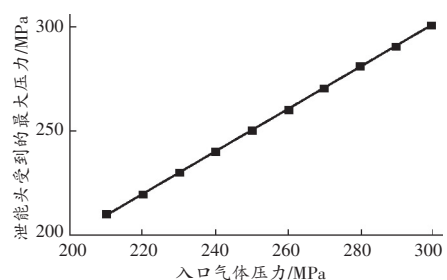


图 3 不同入口气体压力下泄能头所受最大压力变化趋势

泄能头所受最大压力集中在扩张段,通过对计算结果分析可得,泄能头所受到的最大压力随着入口气体压力的增大而增大,如图 4 所示。

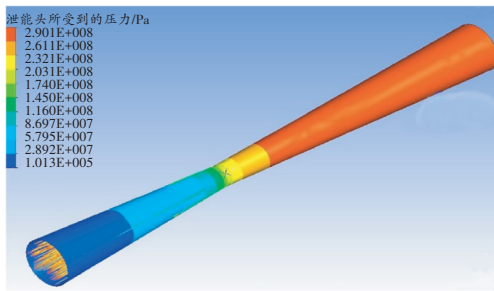


图4 入口气体压力为290 MPa时泄能头所受压力云图

2.1.2 扩张段长度对泄能头所受最大压力的影响规律

圆管内的气体经过圆管截面积逐渐缩小和扩大后,气体压力会发生实质性改变^[15]。由于扩张段会因其长度而影响气体经过截面时是突然性还是渐变性,从而对压力造成影响,故控制泄能头进气口气体压力和收缩断面直径不变,分别求出扩张段长度为23~50 cm(每3 cm取值)条件下泄能头所受最大压力值,结果如图5所示。

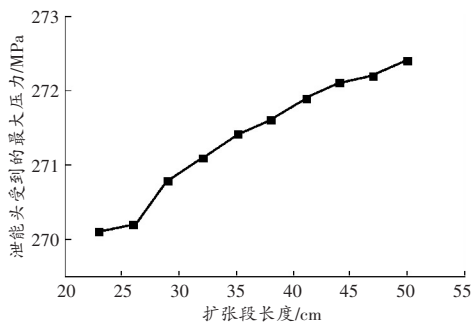


图5 不同扩张段长度下泄能头所受最大压力变化趋势

由图5可见,泄能头所受到的最大压力随扩张段长度的增大整体呈上升趋势,但变化较为缓慢。

2.1.3 收缩断面直径对泄能头所受最大压力的影响规律

由于气体流经圆管直径逐渐缩小和突然扩大的过程中,气体压力会受到影响,故控制泄能头进气口气体压力和扩张段长度不变,分别求出收缩断面直径在0.023 5~0.065 8 m(每0.007 0 m取值)条件下泄能头所受最大压力值,结果如图6所示。

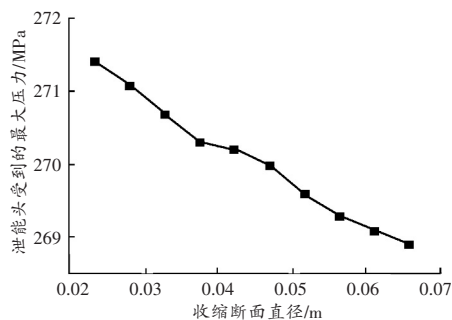


图6 不同收缩断面直径下泄能头所受最大压力变化趋势

由图6可见,泄能头所受到的最大压力随收缩断面直径的增大呈逐渐减小的趋势。

2.2 正交试验结果

通过单因素试验可知,入口气体压力、扩张段长度和收缩断面直径3种因素对泄能头所受最大压力分别有不同的影响。因此选取入口气体压力、扩张段长度、收缩断面直径为自变量,选取泄能头所受最大压力为因变量,进行不同条件组合下的数值模拟研究。

结合实际工程应用和试验经验,将泄能头所受的最大压力(用 p 表示)作为强度指标,以入口气体压力(210~290 MPa,每20 MPa取值)、扩张段长度(20~60 cm,每10 cm取值)、收缩断面直径(0.033~0.073 m,每0.01 m取值)这3个因素作为试验因素(分别用 A 、 B 、 C 来表示)。各个参数分别取5个水平依次进行数值模拟研究,模拟结果见表1。

表1 各因素水平及数值模拟结果

试验编号	A /MPa	B /cm	C /m	p /MPa
1	210	20	0.033	212.2
2	210	30	0.043	203.8
3	210	40	0.053	210.2
4	210	50	0.063	210.3
5	210	60	0.073	211.5
6	230	20	0.043	230.2
7	230	30	0.053	230.3
8	230	40	0.063	230.6
9	230	50	0.073	231.7
10	230	60	0.033	230.1
11	250	20	0.053	250.1
12	250	30	0.063	250.8
13	250	40	0.073	251.8
14	250	50	0.033	250.1
15	250	60	0.043	250.5
16	270	20	0.063	270.7
17	270	30	0.073	271.9
18	270	40	0.033	270.1
19	270	50	0.043	270.4
20	270	60	0.053	270.6
21	290	20	0.073	292.1
22	290	30	0.033	290.1
23	290	40	0.043	290.2
24	290	50	0.053	290.5
25	290	60	0.063	290.8

2.3 三因素显著性分析

由表1可以看出,第21次模拟的泄能头所受最大压力最大为292.1 MPa,其对应的水平组合为 $A_5B_1C_5$ ($A_5=290$ MPa, $B_1=20$ cm, $C_5=0.073$ m)。计算因素在每个水平下极差与极差均值,其结果如表2所示。根据表2数据,绘制三因素五水平均值图,如图7所示。

表2 各因素水平均值与极差

因素	各水平出口压力/MPa					极差/ MPa
	均值1	均值2	均值3	均值4	均值5	
A	209.60	230.58	250.66	270.74	290.74	81.14
B	251.60	249.38	258.90	250.60	250.70	9.52
C	250.52	249.02	250.34	250.64	251.80	2.78

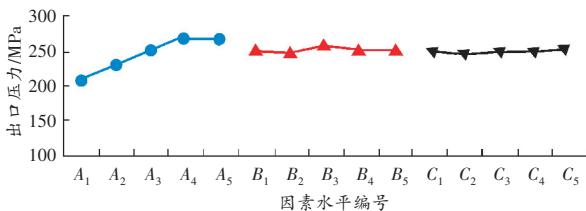


图7 三因素五水平均值图

由图7可知:

- 1) 入口气体压力在290 MPa(A_5)时,泄能头所受压力最大;
- 2) 扩张段长度为40 cm(B_3)时,泄能头所受压力最大;
- 3) 收缩断面直径为0.073 m(C_5)时,泄能头所受压力最大;
- 4) 入口气体压力越大,泄能头所受压力越大。

综上可知,入口气体压力为290 MPa、扩张段长度为40 cm、收缩断面直径为0.073 m时,出口压力最大,即影响泄能头所受最大压力的最佳组合为 $A_5B_3C_5$ 。

由极差分析可知,对于泄能头所受最大压力,影响程度由大到小依次为收缩断面直径、入口气体压力、扩张段长度。

2.4 统计模型构建和参数估计

通过对试验结果建立统计模型可以验证上述分析的合理性。令因素A(入口气体压力)的5个水平的主效应为 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 ;因素B(扩张段长度)的5个水平主效应为 B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 ;因素C(收缩断面直径)的5个水平主效应为 C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 ;令 $p_{(ijk)} = \mu + A_i + B_j + C_k + \varepsilon_{ijk}$,表示在水平组合 $A_iB_jC_k$ 下的所受最大压力,于是上述数据的统计模型为 $p_{(ijk)} = \mu + A_i + B_j + C_k + \varepsilon_{ijk}$,式中 ε_{ijk} 为试验中的随机误差。

对于25次正交试验,有25个统计模型,借助MATLAB进行最小二乘法计算可得到在因变量为泄能头所受最大压力时各个水平主效应值为: $\mu = 250.464, A_1 = -40.864, A_2 = -19.884, A_3 = 0.196, A_4 = 20.276, A_5 = 40.668, B_1 = 0.596, B_2 = -1.084, B_3 = 0.116, B_4 = 0.136, B_5 = 0.236, C_1 = 0.056, C_2 = -1.440, C_3 = -0.124, C_4 = 0.176, C_5 = 1.336$ 。从而估计值 $p'(A_5B_3C_5) = \mu + A_5 + B_3 + C_5 = 292.584$ MPa,与CFX仿真试验误差为7.8%,误差较小,与正交试验相比是最佳值。

2.5 回归分析

将表2数据输入SPSS软件中,将入口气体压力、扩张段长度和收缩断面直径作为自变量,泄能头所受最大应力作为因变量,使用回归模型指令,可得 CO_2 泄能头所受最大压力回归模型,见表3。

表3 泄能头所受最大压力的回归分析

类别	标准系数	显著性
1(常量)		0.108
入口气体压力	0.039	0
扩张段长度	0.002	0.813
收缩断面直径	0.021	0.059

由表3可知,泄能头入口气体压力、扩张段长度和收缩断面直径的标准系数均为正,且三者的值均小于0.05,证明影响显著,验证了入口气体压力越大,泄能头所受压力越大;收缩断面直径越大,泄能头所受压力越小;扩张段长度越长,泄能头所受压力越大。与统计模型的计算结果吻合。

2.6 最优参数组合及试验验证

通过上述分析,推断对于泄能头所受最大压力的最佳组合为 $A_5B_3C_5$ 。继续用模拟软件进行模拟,追加最佳试验,其结果为 $p(A_5B_3C_5) = 317.2$ MPa。可以看出,泄能头所受最大压力显著增加,证明追加试验比25个试验组的组合强度更大。

3 结论

针对 CO_2 致裂器泄能头使用的安全性问题,对影响泄能头所受压力的3种主要影响因素——入口气体压力、收缩断面直径、扩张段长度进行分析,并利用ANSYS-CFX软件建立模型,模拟得出以下结论:

- 1) 对各水平下的均值与极差对正交试验结果进行分析,分别得到使泄能头受到压力最大时的组合,以及各因素对泄能头所受压力的影响趋势。
- 2) 在用CFX软件进行仿真模拟追加试验时,可以得到当入口气体压力保持290 MPa、扩张段长度

为40 cm、收缩断面直径为0.073 m时,泄能头所受最大压力达到317.2 MPa。

3)在对相关参数(入口气体压力、扩张段长度、收缩断面直径)采用正交试验与回归分析进行相关调整,可以将泄能头所受最大压力进行优化提高。可为今后CO₂致裂器泄能头的优化设计提供参考与指导作用。

参考文献:

[1] 张阳. 综采工作面二氧化碳致裂器的研究应用[J]. 企业科技与发展, 2017(10):101-103.

[2] 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.

[3] 霍中刚. 二氧化碳致裂器深孔预裂爆破煤层增透新技术[J]. 煤炭科学技术,2015,43(2):80-83.

[4] 张亮,刘传培,詹德帅. CO₂致裂器在煤层致裂中的应用研究[J]. 煤矿机械,2018,39(5):123-124.

[5] 李艳丽,杨宏伟,朱立强,等. 二氧化碳致裂装置的研究[J]. 石化技术,2018,25(6):39-40.

[6] 孙小明,黄园月,倪昊. CO₂致裂器泄能过程分析[J]. 煤炭技术,2015,34(4):263-265.

[7] 王子雷,李孔刚. CO₂致裂器充装阀气密性试验装置研究[J]. 煤矿机械,2018,39(4):38-39.

[8] 彭然. 二氧化碳致裂器泄能关键参数研究[J]. 煤矿安全,2018,49(12):37-40.

[9] 吴国群. 二氧化碳致裂器安全度试验测定[J]. 煤矿爆破,2016(6):5-6.

[10] 邹德龙,王岩,赵海波,等. 亭南煤矿井下二氧化碳致裂器泄漏安全风险分析[J]. 现代矿业,2018,34(1):212-213.

[11] JUN H S, JINHYUN C, SUP Y T. Liquid CO₂ fracturing: effect of fluid permeation on the breakdown pressure and cracking behavior [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018,51:3407-3420.

[12] 徐颖,程玉生. 高压气体爆破破煤机理模型试验研究[J]. 煤矿爆破,1996(3):2-5.

[13] 马海忠. 二氧化碳致裂器爆破技术在煤矿巷道掘进的实践[J]. 山东煤炭科技,2019(2):38-40.

[14] 邱天德. CO₂致裂器在安能煤矿中的试验研究[J]. 煤矿机械,2018,39(7):48-49.

[15] 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.

(责任编辑:陈玉涛)

(上接第106页)

[4] 牟义. 典型地质异常体电磁法响应特征研究[J]. 煤矿开采,2017,22(4):4-9.

[5] 邱浩,郝宇军,陈健强. 煤矿采空区瞬变电磁超前探测波场成像研究[J]. 煤炭工程,2020,52(2):56-58.

[6] 袁永榜. 水力压裂增透效果综合物探检验技术研究[J]. 矿业安全与环保,2019,46(2):20-24.

[7] 牟义,李宏杰,李文,等. 瞬变电磁法定量评估河流流域开采区富水性技术[J]. 重庆大学学报,2020(3):1-16.

[8] 岳建华,杨海燕,胡搏. 矿井瞬变电磁法三维时域有限差分数值模拟[J]. 地球物理学进展,2007(6):1904-1909.

[9] 岳建华,薛国强. 中国煤炭电法勘探36年发展回顾[J]. 地球物理学进展,2016,31(4):1716-1724.

[10] 于景邨,常江浩,苏本玉,等. 老空水全空间瞬变电磁法探测三维数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术,2015,43(1):95-99.

[11] 杨海燕,邓居智,张华,等. 矿井瞬变电磁法全空间视电阻率解释方法研究[J]. 地球物理学报,2010,53(3):651-656.

[12] 姜志海. 巷道掘进工作面瞬变电磁超前探测机理与技术研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2008.

[13] 常江浩. 煤矿富水区矿井瞬变电磁响应三维数值模拟

及应用[D]. 徐州:中国矿业大学,2017.

[14] 程久龙,黄少华,温来福,等. 矿井全空间三维主轴各向异性介质瞬变电磁场响应特征研究[J]. 煤炭学报,2019,44(1):278-286.

[15] 刘亚军,胡祥云,彭荣华,等. 回线源瞬变电磁法有限体积三维任意各向异性正演及分析[J]. 地球物理学报,2019,62(5):1954-1968.

[16] 刘百祥,孙喆,袁永榜. 地-井瞬变电磁法线性导体正演及异常响应特征研究[J]. 煤炭科学技术,2019,47(6):187-191.

[17] 贾春曦. 瞬变电磁法三维有限差分数值模拟和响应特征研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.

[18] 徐正玉. 地-井瞬变电磁时域有限差分三维数值模拟[D]. 南昌:东华理工大学,2016.

[19] YEE K S. Numerical solution of initial boundary problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. IEEE Trans Ant Prop,1966,14(3):302-307.

[20] 徐正玉,杨海燕,邓居智,等. 基于异常场的地-井瞬变电磁法正演研究[J]. 物探与化探,2015,39(6):1176-1182.

(责任编辑:陈玉涛)