

一次性二氧化碳致裂器筒体刻槽有限元分析

胡军科^{1,2},徐坤鸿¹,赵存¹,牛奇斌¹

(1. 中南大学机电工程学院,湖南长沙 410083;

2. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室,湖南长沙 410083)

摘要:研究一次性二氧化碳致裂器筒体刻槽参数优化问题。针对传统的可重复使用的二氧化碳致裂器存在的故障率高和回收困难等问题,在刻槽型爆破片的研究基础上,利用 ANSYS Workbench 非线性有限元法,计算筒体的塑性极限内压,并且对筒体刻槽的形状、深度、宽度、长度等参数进行深入分析,并通过实验验证了仿真结果。结果表明,刻槽深度是决定筒体塑性极限内压的最主要因素,刻槽长度和刻槽宽度对塑性极限内压的影响可以忽略;三种槽形状下的应力集中系数相差不大,切削量是导致极限内压值差异的主要原因。

关键词:一次性二氧化碳致裂器;有限元分析;极限内压

中图分类号:TP391.9 **文献标识码:**B

Finite Element Analysis on the Grooved Body of One - Off Carbon Dioxide Fracturing Device on ANSYS Workbench

HU Jun - ke^{1,2}, XU Kun - hong¹, ZHAO Cun¹, NIU Qi - bin¹

(1. College Of Mechanical & Electrical Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

2. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

ABSTRACT: Research on the grooved parameters optimization of the body of one - off carbon dioxide fracturing device was carried out in the paper. Aiming at the high failure rate and cumbersome recycle of the traditional reusable carbon dioxide fracturing device, a finite element model of nonlinear finite element method based on ANSYS Workbench was established, according to the research of grooved rupture disc. The limit internal pressure of the body was calculated, and grooved parameters of the body, such as shape, length, width and depth, were analyzed deeply. The reliability of the simulation results was verified through experiment. The results show that the groove depth is the main factor affecting the limit internal pressure of the body, while the length and width can be ignored and the stress concentration factor of different groove shapes is not much difference, while cutting volume is the main factor affecting the limit internal pressure of the body.

KEYWORDS: One - off carbon dioxide fracturing device; Finite element analysis; Limit internal pressure

1 引言

近年来,囿于炸药爆破安全性低,噪声和污染等问题,一种非炸药爆破技术——二氧化碳致裂技术取得了极大的发展,二氧化碳致裂技术是利用液态的二氧化碳在有限的空间内吸热气化后体积剧烈膨胀产生高压,使煤层、岩石或混凝土破裂的技术^[1]。这种技术在爆破过程中无明火产生,安全性相对较高,可广泛用于煤矿开采、采石场等工程项目^[2,3]。

目前,在研究和应用中比较广泛的是可回收重复使用的二氧化碳致裂器^[4],但其在实际应用中也存在以下缺点和不足:运送和使用比较费力,多次使用后易造成弯管及断管现象,回收困难。

为解决以上问题,有学者借鉴于刻槽型爆破片的应用,提出一种一次性二氧化碳致裂器^[5],采用金属筒体刻槽,取消定压泄能片,使爆破方向更可控,爆破压力更稳定准确,减少繁琐的回收工作。

普通型爆破片,当其爆破压力较低时,大多是很薄的箔材,这就给制造带来了难度,此外,在安装时为保证密封效果

的压紧力的不同,或者爆破片拱形面有划痕都会导致爆破的压力不稳定。而刻槽型爆破片很好地解决了上述问题,在爆破片的凸面刻“十”字形的槽,爆破片在压力作用下,变形基本上集中在减弱槽上,在爆破压力下减弱槽处因为强度不足而断裂,这种爆破片的爆破压力由刻槽处的强度决定,降低了制造上的难度,并且使爆破压力更精确,爆破片在爆破后不产生碎片,较普通型爆破片更加安全^[6]。文献[7]研究了正拱形刻槽爆破片刻槽数与刻槽尺寸等影响其爆破性能的因素,得出了正拱形刻槽爆破片爆破压力公式;文献[8]对径向结构的刻槽爆破片进行了弹塑性有限元分析,研究了爆破片的极限载荷与槽底余厚之间的关系;文献[9]根据刻槽型爆破片的爆破压力公式,运用有限元软件,验证了爆破片的安全性能。

以上这些研究对刻槽型爆破片进行了理论分析,实验验证,鉴于目前还没有关于致裂器筒体刻槽参数的相关研究,笔者在借鉴前人对刻槽型爆破片研究的基础上,利用有限元分析方法^[10,11],对筒体刻槽的形状、深度、宽度、长度等参数进行系统分析和计算,所得结论对一次性二氧化碳致裂器在工程中的推广具有指导意义。

2 原理介绍

2.1 非线性分析

工程中的结构力学问题其实都是非线性问题,只不过很多时候在分析时为了简化模型而进行了线性假设。而对于很多实际应用中的问题,仅从线性方面去分析并不能满足要求,所以非线性分析方法的应用越来越广泛了。

引起非线性的原因主要有以下几种,几何非线性、接触非线性和材料非线性。材料非线性是指其应力(σ)与应变(ϵ)关系是非线性的,造成这种非线性的原因有很多,比如加载历史,环境温度的变化等,而最直接的体现就是金属的塑性。

非线性有限元分析(non linear finite element analysis),是指利用计算机仿真工具综合考虑材料或结构非线性变化的分析方法。如前所述,加载历史或变形的历史会影响材料的弹塑性行为,因此在进行结构的非线性有限元分析时,通用的加载方式是增量加载,将问题分解为若干个近似于线性的问题进行求解。

2.2 金属塑性

当材料发生的是弹性变形时,卸载后材料的变形可以恢复。一般而言,金属材料的弹性变形都是小变形,其 $\sigma - \epsilon$ 关系是线性的,遵循 Hookean 定律。而一旦载荷超过金属的屈服极限,金属进入塑性阶段,这个阶段发生的变形是不可恢复的,如下图 1。

塑性材料分析中最常用的数据是 $\sigma - \epsilon$ 关系曲线。由固体力学相关理论可知:进行大应变分析用真实应力和应变,进行小应变(ϵ 低于 5%)分析的数据是工程应力和应变。

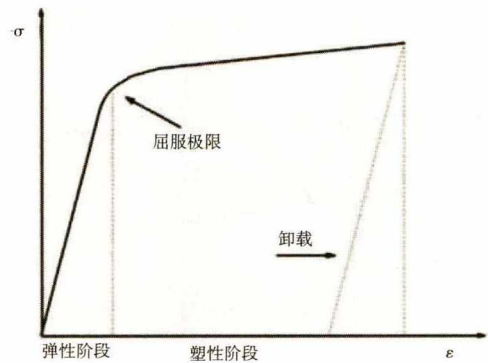


图1 金属的塑性

2.3 Von Mises 准则

单向受拉试件,可以通过对比轴向应力和屈服应力来判断构件是否发生屈服,而对于处于一般应力状态下的结构,无法像单向受拉试件那样去判断,而屈服准则就是在结构处于一般应力状态下也能判断其是否发生屈服的标量。

Von Mises 准则是指当材料内某处的等效应力(Eqv - stress)达到某一值时,该处就发生塑性变形。其表达式如下

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (1)$$

2.4 强化准则

强化准则定义了材料在塑性阶段其初始屈服准则是如何变化的。常见的强化准则有两种:随动强化和等向强化。

随动强化仅仅发生屈服方向上的移动,不适用于大应变分析;等向强化的屈服面在主应力空间的所有方向都呈现扩大现象,如上图 2 所示,这种变化趋势适用于大应变分析。

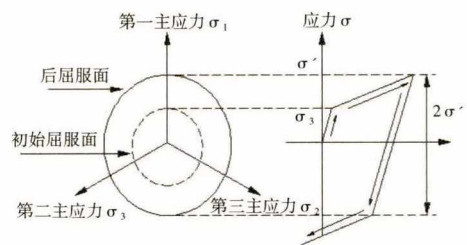


图2 等向强化

3 模型的建立

3.1 几何模型

一次性二氧化碳致裂器与可重复使用的致裂器的作用机理一样,都是利用高压气体做功达到致裂效果。其工作原理是:将液态二氧化碳充入密闭的装有发热装置的高强度金属筒体内,当激活发热装置时,金属筒体内会迅速形成高压气体。当气体压力上升达到筒体的强度极限时,筒体会沿轴

向刻槽处破裂泄放高压气体,作用于岩石孔壁,产生的高压应力达到致裂破坏的效果。一次性二氧化碳致裂器的结构

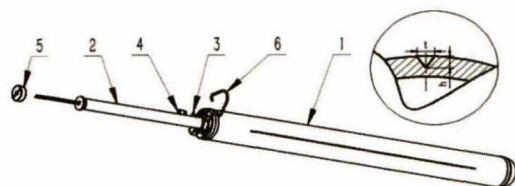


图3 结构简图

注:1-储液管;2-活化器;3-安全泄压片;4-螺钉;5-压紧螺堵;6-拉环

简图如图3。

3.2 单元及材料属性选择

有限元分析采用 ANSYS Workbench 软件。采用 SOLID187 单元,这种单元具有塑性、大变形和大应变效应,在塑性阶段可以很直观地体现屈服现象。简化筒体两端,由于筒体是对称的,取一半作为分析对象,考虑到刻槽处的应力集中,网格的划分采用自由划分,在刻槽处采用加密网格,网格模型如图4。



图4 网格模型

致裂器筒体的材料是 Q245R。采用 Von Mises 屈服准则和多线性等向强化材料模型(MISO)^[12],能满足比例加载和大应变分析,能更真实反应材料的性能,Q245R 的屈服强度为 245MPa,抗拉强度 520MPa,弹性模量 19600MPa,泊松比为 0.3。通过拉伸试验,Q245R 的应力应变关系如表1。

表1 Q245R 钢应力应变关系

ϵ_i	0.00044	0.00765	0.0235	0.0458
σ_i/MPa	247.78	291.5	335.23	378.95
ϵ_i	0.0677	0.0922	0.1215	0.1562
σ_i/MPa	422.68	466.4	510.13	553.85
ϵ_i	0.1969	0.2443	0.2987	0.339
σ_i/MPa	597.58	641.31	685.03	714.18

3.3 载荷及边界条件

对一次性二氧化碳致裂器筒体的受力进行简化,在筒体内表面均匀地施加压力,在筒体一端施加固定约束,防止筒体发生刚体移动,因为是取的 1/2 模型,在对称面上添加对称约束。

3.4 计算方法选择

考虑到致裂器筒体结构和金属材料的非线性特性,本文利用基于 ANSYS Workbench 的非线性有限元分析模块求解

筒体的塑性极限载荷。一般采用增量加载的方式,在加载的过程中为了使载荷子步尽可能地小,采用自动时间步的方法,为了能同时考虑到分析过程中的几何非线性,打开大变形(Large deflection)选项。

3.5 极限载荷的确定

在求解塑性极限载荷时,一般假定结构为理想弹塑性且发生的是小变形,但是在工程应用中绝大多数的金属都具有应变硬化和几何强化特性,因此,这种求解方法就得不到理想的结果。

近年来有限元分析方法不断地被应用于分析塑性极限载荷,一般会以有限元方法获得负载应变曲线,然后利用失效准则来得到塑性极限载荷,最常用的有 1/2 弹性斜率准则,该准则以材料发生显著的屈服为标志,但是对于很多金属材料来说,即使结构发生了屈服,仍然具有一定承载能力,所以,这种方法趋于保守。

新的方法如下:采用 Newton-Raphson 方法求解,这种方法会在求解时自动寻找满足程序收敛的计算方向,由于采用的是增量加载方式,时间步由程序给定,因此载荷增量得以确定。如果载荷大于结构所能承受的极限,那么非线性方程组的刚度矩阵奇异,就会导致程序发散,求解失败。确定求解失败的时间点,该点所施加的载荷就是致裂器筒体的极限载荷^[13]。

3.6 有限元模型和计算方法验证

以某系列二氧化碳致裂器筒体为研究对象, $D=89\text{mm}$, $\delta=5\text{mm}$,长度 $L=500\text{mm}$,根据以上建模思路和求解方法,首先求出未刻槽筒体极限压力的仿真解,与理论值对比,验证上述计算方法是否可靠。

理论值采用文献[14]给出的公式:

$$P_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s [1 + (1 - \eta)(2 - \eta)] \ln K \quad (2)$$

式中, η 为材料的屈强比, $\eta = \sigma_s / \sigma_b$, K 为筒体的外径与内径比值。

由下表2可以看出,筒体塑性极限载荷有限元解相比理论值偏差不大,证明这种思路是可行的。

表2 未刻槽致裂器筒体两种解的对比

δ/mm	P_0/MPa	P_B/MPa	误差/%
5	60.98	58.405	4.22
4	49.35	47.274	4.21
3.5	43.44	41.626	4.18
3	37.45	35.88	4.19
2.5	31.40	30.073	4.23

4 仿真分析

图5为 $\delta=5\text{mm}$ 时未刻槽筒体在极限内压下的等效应力(Eqv-stress)和塑性应变(Plastic strain)云图,从图中可以看出,当筒体达到塑性极限内压时,只是筒体直筒部分发生

了塑性变形,并没有发生整体屈服,取最大应力处所在的断面,通过观察断面应力云图,可以看出内压筒体应力出现明

显的分层,应力是由内向外传递的,同样地,应变云图也存在明显的分层现象。

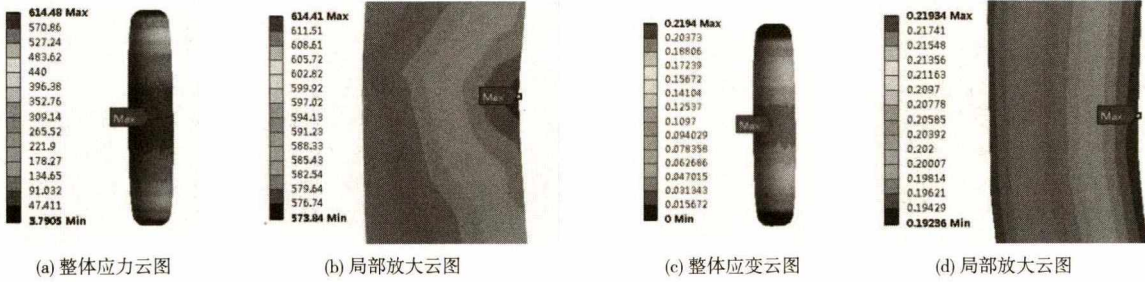


图5 未刻槽筒体在极限内压下的 Eqv - stress 和 Plastic strain 云图

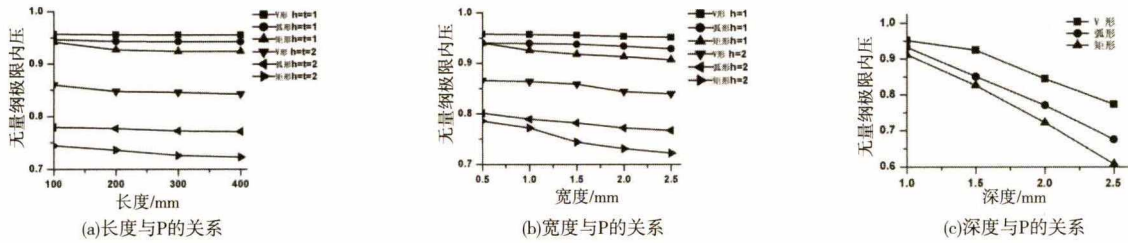


图6 刻槽长度 l、宽度 t、深度 h 与 P 的关系



图7 不同槽形状下的断面应力云图

以刻槽深度 h 、长度 l 、宽度 t 和不同形状为参数,建立筒体刻槽塑性极限分析模型。定义无量纲极限内压 P 为刻槽筒体内压 P_B 与相同条件下无槽筒体内压 P_0 的比值,即

$$P = \frac{P_B}{P_0} \quad (3)$$

图 6(a) 分析了 $h = t = 1\text{mm}$ 和 $h = t = 2\text{mm}$ 两种情形下,无量纲极限内压 P 与刻槽长度 l 的关系;图 6(b) 分析了 $h = 1\text{mm}$ 和 $h = 2\text{mm}$ 两种情形下,无量纲极限内压 P 与刻槽宽度 t 的关系;图 6(c) 分析了当刻槽长度 l 和刻槽宽度 t 一定时,无量纲极限内压 P 与刻槽深度 h 的关系。

由上图 6 可以看出,刻槽长度和刻槽宽度都不是影响极限内压的主要因素,而刻槽深度对极限内压有很显著的影响;还可以发现,相同条件下,极限内压由大到小顺序为:V 形,弧形,矩形。

下面分析相同内压载荷下不同形状的刻槽筒体的应力分布情况。图 7 为内压 40

MPa, $h = t = 2\text{mm}$, $l = 400\text{mm}$ 时三种不同槽的最大等效应力所在的断面应力局部放大云图,可以发现,刻槽处有很明显的应力集中,应力还是由内向外传递,最大应力由小到大的顺序为:V 形,弧形,矩形,这个结果与极限内压的结果是一致的。

表 3 给出了载荷为 40MPa, $h = t = 2\text{mm}$, $l = 400\text{mm}$ 时三种槽的主体部分和刻槽部分的应力分布情况,从结果可以看出,三种结构都存在应力集中现象,而它们的应力集中系数差别不大,因此,可以认为三种槽的应力集中程度是一样的。

表3 槽部和结构主体应力比较

形状	主体应力/MPa	最大应力/MPa	应力集中系数
V 形	212.74 - 279.6	479.69	1.72 - 2.25
弧形	281.98 - 370.82	637.1	1.72 - 2.26
矩形	302.39 - 399.02	688.74	1.73 - 2.28

5 实验验证

图8为实验原理图,表4为实验数据。为验证仿真计算的可靠性,用水压法测量 $h = t = 1\text{mm}$ 、 $h = t = 2\text{mm}$ 时不同槽形状下的筒体的极限内压。利用空气增压泵提供高压,驱动水或者油液对筒体进行加压实验,实验压力 6 - 60MPa,精度 0.1MPa。

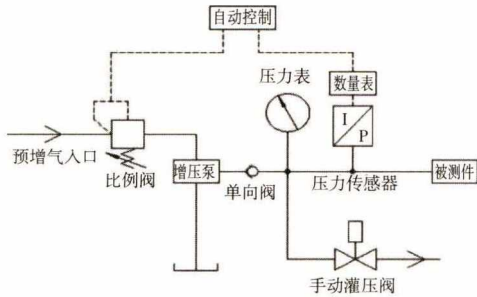


图8 高压水压泵原理图

表4 极限内压的实验值与仿真值对比

参数	实验值/MPa	仿真值/MPa	误差/%
V形 $h = t = 1$	60.6	58.266	3.85
弧形 $h = t = 1$	59.5	57.25	3.78
矩形 $h = t = 1$	59.2	56.951	3.8
V形 $h = t = 2$	55.4	52.91	4.49
弧形 $h = t = 2$	50.4	47.884	5.00
矩形 $h = t = 2$	48.1	45.705	4.98

6 结论

1) 随着筒体刻槽长度的增大,致裂器筒体的塑性极限内压基本没有变化;随着筒体刻槽宽度的增大,极限内压有轻微的降低,因此,在实际工程应用中可忽略刻槽长度、宽度对极限内压的影响。

2) 刻槽深度是影响致裂器筒体内压的主要因素,随着刻槽深度的增加,筒体的极限内压近似呈线性关系降低。

3) 不同刻槽形状对筒体的极限内压有不同的影响,三种槽的应力集中系数差距不大,由于V形槽的切削量最小,所以其极限内压最大。

4) 利用有限元法计算筒体塑性极限内压与实验值的偏

差不超过5%,且结果稳定,这样就可以大大降低通过爆破实验来检验筒体的工作量。

参考文献:

- [1] 张小康,丁亚明. 非炸药爆破破岩展望[J]. 广东化工, 2017, (15):132-133.
- [2] 王军,肖永胜. 用二氧化碳爆破技术开采某石灰石矿的大理石材[J]. 现代矿业, 2015, (6):15-17.
- [3] 王大赛. 二氧化碳爆破在掘进工作面的应用[J]. 化工管理, 2016, (15):101-102.
- [4] 黄园月,等. 二氧化碳致裂器研制与应用[J]. 煤炭技术, 2015, (8):123-124.
- [5] 周明,魏厚银,黄斌. 一次性使用的二氧化碳致裂器及其制作方法[P]. 中国专利, CN105863637A, 2016-08-17.
- [6] 李志义,喻健良. 爆破片技术及应用(第1版)[M]. 北京:化工工业出版社, 2006: 14-20.
- [7] 喻健良,丁信伟,贺匡国. 正拱形刻槽爆破片爆破特性研究[J]. 压力容器, 1994, (6): 44-47.
- [8] 丁信伟,高光藩. 径向带槽金属爆破膜结构非线性力学行为研究[J]. 天然气工业, 2004, (4):84-86.
- [9] 焦仁雷,谈乐斌,潘孝斌. 基于ANSYS的某正拱带槽爆破片的设计及仿真[J]. 装备制造技术, 2012, (11):57-58.
- [10] 张风武. 基于ANSYS的某设备平台桥的仿真分析[J]. 计算机仿真, 2011, (3): 385-388.
- [11] 陈晟,杨俊. 基于ANSYS的压电圆片振子径向振动模式分析[J]. 计算机仿真, 2009, (3):318-321.
- [12] 浦广益. ANSYS Workbench 基础教程与实例详解[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013:360-363.
- [13] 徐谦. 典型承压结构的塑性极限载荷分析[D]. 北京化工大学, 2006:12.
- [14] 柳爱群,杨中,杨焯. 圆筒形压力容器爆破压力经验公式的改进[J]. 机械强度, 2013, (5):652-656.

[作者简介]



胡军科(1964-),男(汉族),湖南人,教授,硕士生导师,主要研究领域为工程机械,矿山机械。

徐坤鸿(1992-),男(汉族),湖北省武汉人,硕士研究生,主要研究领域为工程机械,矿山机械。

赵存(1992-),男(汉族),河南省南阳人,硕士研究生,主要研究领域为工程机械,矿山机械。

牛奇斌(1992-),男(汉族),山西省运城人,硕士研究生,主要研究领域为工程机械,矿山机械。