

# 干热岩热储建造的二氧化碳爆破致裂器优化设计

夏杰勤<sup>1,2</sup>, 窦斌<sup>1,2</sup>, 徐超<sup>1,2</sup>, 田红<sup>1,2</sup>, 郑君<sup>1,2</sup>,  
崔国栋<sup>1,2</sup>, 谷俊廷<sup>3</sup>, 陈劲<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 地球深部钻探与深地资源开发国际联合研究中心, 湖北 武汉 430074;

3. 河北省地矿局第一地质大队, 河北 邯郸 056001)

**摘要:**干热岩作为一种可再生的清洁能源,如何开采具有重要意义,但温度和深度双重因素导致干热岩型地热资源开采难度大。在开采过程中,储层建造是其中的关键技术。储层建造产生大规模的体积裂隙网络,以保证有大面积的换热通道进行长期的热能提取,二氧化碳爆破致裂技术作为一种新方法为储层建造提供了新思路。本文简述了二氧化碳爆破致裂技术,以及爆破过程中二氧化碳充装量、活化剂用量、定压片厚度之间的内在关系,重点优化了用于干热岩型地热储层建造的二氧化碳致裂器,设计了致裂器内部结构的具体参数,完善了外部结构和整体系统,最终研发了一种可用于干热岩型地热储层建造的新型二氧化碳致裂器,为干热岩型地热储层建造提供有效的技术手段,填补了耐高温高压的井下二氧化碳致裂器领域的空白。

**关键词:**储层建造;干热岩;二氧化碳爆破;致裂器;结构优化

**中图分类号:**P314 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)01-0075-06

## Optimum design of CO<sub>2</sub> fracture initiator for thermal reservoir construction in hot dry rock

XIA Jieqin<sup>1,2</sup>, DOU Bin<sup>1,2</sup>, XU Chao<sup>1,2</sup>, TIAN Hong<sup>1,2</sup>, ZHENG Jun<sup>1,2</sup>,  
CUI Guodong<sup>1,2</sup>, GU Juntong<sup>3</sup>, CHEN Jin<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

2. National Center for International Research on Deep Earth Drilling and Resource Development, Wuhan Hubei 430073, China;

3. The First Geology Brigade, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Handan Hebei 056001, China)

**Abstract:** How to mine hot dry rock, which is a kind of renewable clean energy, is of great significance; however, both the temperature and depth of hot dry rock makes it difficult to exploit hot dry rock geothermal resources. In the mining process, reservoir construction is one of the key technologies. Reservoir construction produces a large-scale volumetric fracture network to ensure a large area of heat exchange channels for long-term thermal energy extraction. As a new method, the carbon dioxide blasting fracturing technology provides new ideas for reservoir construction. This paper briefly describes the carbon dioxide blasting fracturing technology, as well as the internal relationship between the amount of carbon dioxide charged, the amount of activator, and the thickness of the rupture disc during the blasting process. The carbon dioxide fracture initiator used in the construction of hot dry rock geothermal reservoirs is optimized. The specific parameters of the internal structure of the initiator have been designed, and the external

**收稿日期:**2020-06-22; **修回日期:**2020-10-22 **DOI:**10.12143/j.ztgc.2021.01.010

**基金项目:**国家自然科学基金项目“共和盆地储层干热岩人工裂隙与流体传热机理及热效率研究”(编号:41674180);中国地质大学(武汉)实验技术研究项目“多场耦合水-岩相互作用下砂岩热储层动态监测”(编号:SKJ2019088);中国地质大学(武汉)大学生自主创新启航项目“多场耦合水-岩作用下砂岩热储层改造机理研究”(编号:1910491A18)

**作者简介:**夏杰勤,女,1996年生,硕士研究生在读,地质工程专业,主要从事中深层地热能开发研究,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,1594618044@qq.com。

**通信作者:**陈劲,男,汉族,1967年生,主任,高级工程师,主要从事地质工程、岩土钻掘工程专业方面的研究工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,chenjin@cug.edu.cn。

**引用格式:**夏杰勤,窦斌,徐超,等.干热岩热储建造的二氧化碳爆破致裂器优化设计[J].钻探工程,2021,48(1):75-80.

XIA Jieqin, DOU Bin, XU Chao, et al. Optimum design of CO<sub>2</sub> fracture initiator for thermal reservoir construction in hot dry rock[J]. Drilling Engineering, 2021,48(1):75-80.

structure and overall system have been improved. Finally, a new type of carbon dioxide initiator that can be used in the construction of hot dry rock geothermal reservoirs is developed, which provides effective technical means for the construction of hot dry rock geothermal reservoirs, and fills the gap in the field of downhole carbon dioxide fracturing initiators that are resistant to high temperature and pressure.

**Key words:** reservoir construction; hot and dry rocks; carbon dioxide explosion; initiator; structural optimization

## 0 引言

随着全球化石燃料的加速减少及开发利用所带来的环境污染日益加剧,蓝天保卫战、北方冬季清洁供暖工作向纵深推进<sup>[1]</sup>,以干热岩型地热资源为代表的新型清洁能源愈发受到广泛关注<sup>[2]</sup>。干热岩地热能是一种储藏在地壳深处岩石中的热能,具有资源量大、分布广、热能持续稳定、环境友好等优势,是未来新能源利用的一个重要方向<sup>[3-6]</sup>。

温度与深度双重因素导致干热岩型地热资源开发难度大,并且热储岩体中没有良好的流体介质换热通道,无法达到大规模商业化开采要求,因此热储层建造成为干热岩热能开发的关键技术。目前干热岩型地热储层建造基本沿用油气行业水力压裂技术<sup>[7]</sup>,但水力致裂技术只能在垂直于最小主应力方向上形成一条主裂缝且受地应力场的影响较大。气体致裂技术可由单一主裂隙向钻孔多方向扩展延伸,裂隙破裂面增大,表现为曲折复杂的裂隙网络<sup>[8]</sup>,改造效果显著。二氧化碳高压气体爆破技术实现了高压气体瞬间释放冲击储层岩石的动态致裂<sup>[9-10]</sup>,具有爆破压力大且可控、爆破作业时间短、爆破装置简易、适用性强并可重复利用、经济环保、安全可靠等众多优势。二氧化碳爆破从理论研究、设备研制到实际应用<sup>[11-12]</sup>已经建立了一套成熟的体系,但都只能用于浅层岩体开采,尚不能用于深井高温高压环境。

大井深、高温高压的开采环境给二氧化碳爆破压裂干热岩型地热储层带来了一定的技术难题;同时干热岩储层多为花岗岩这类致密坚硬的岩石,所需爆破压力极高。二氧化碳高压气体爆破要想成功建造商业化干热岩型地热储层,致裂器爆破成功的基础上还需满足其释放的能量大于岩体的屈服强度。前期徐超等<sup>[13]</sup>分析了二氧化碳爆破用于干热岩储层建造的可行性,从理论角度对二氧化碳致裂器的外部结构进行了简单改进。李艳丽<sup>[14]</sup>等分别从密封性、可连接性、材质的选择及制造的工艺流程等方面对二氧化碳结构设计提出了具体的要

求。黄园月等<sup>[15]</sup>研制并设计出了二氧化碳致裂器快速充装系统,自动化控制充装管路的液态二氧化碳的压力、充装质量以及充装泵的环境温度。Chen等<sup>[16]</sup>设计了一种用于监测液态二氧化碳爆破过程冲击波压力的试验装备,便于深入研讨二氧化碳爆破作用机理。Hu等<sup>[17]</sup>深入研究气体爆破基础上提出了一种新的二氧化碳静态气动压裂技术。想要成功在干热岩储层压裂出贯通的体积裂隙网络,还需对二氧化碳致裂器内部参数重新设计以及外部结构进一步优化,才能够用于干热岩地热开发。

## 1 二氧化碳爆破致裂技术

二氧化碳爆破是一个物理相变气体膨胀做功的过程,液态二氧化碳吸收活化器产生的大量热能后,可在20~40 ms内迅速气化,体积瞬间膨胀600多倍并产生高压,当气体压力达到定压剪切片极限强度,定压片发生破坏,高能二氧化碳气体瞬间从前端泄能口释放,作用于岩体,进而产生裂隙。常用的致裂器爆破压力为200~250 MPa,换算后,相当于0.15~0.18 kg的TNT爆炸当量,释放能量达622~782 kJ,爆破压力及爆破能量可观。

完成二氧化碳高压气体爆破技术的设备主要由充装系统、爆破系统和监测系统组成。充装系统包括二氧化碳储藏罐、二氧化碳充装机、二氧化碳旋紧机等;监测系统主要为温度、压力监测仪器;爆破系统是关系到实验成功与否的关键,包括致裂器与高能脉冲起爆器。其中适用于干热岩储层建造的致裂器改造是本文研究的重点,仅对致裂器结构等做详细介绍。

致裂器由充能头、活化器、储液管、定压片、垫片及泄能头等组成(见图1)。充能头、储液管与泄能头以螺纹相连,材质均为42铬钼钢,整体长度910 mm,外径95 mm,俗称为95型致裂器。

充能头负责充入液态二氧化碳;泄能头为装置激发后高能二氧化碳气体的出口通道;活化器是为储液管内液体二氧化碳提供热能的一个复合装置;

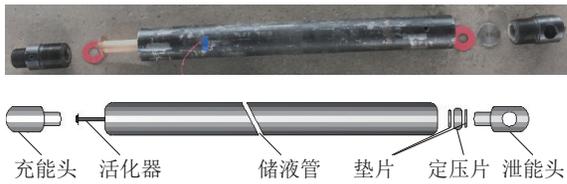


图 1 二氧化碳致裂器实物与结构组成

Fig.1 Photo and structure of the carbon dioxide initiator

定压片的目的是控制管内二氧化碳气体压力,当压力达到预设值,且高于定压片破裂压力时使其破裂,气体冲出。图 2 为活化器与定压片实物图。



图 2 活化器与定压片实物

Fig.2 Activator and rupture disc

## 2 用于干热岩开采的二氧化碳致裂器

在满足爆破成功的基础上,爆破力的设计是成功建造干热岩型地热储层的前提,因此理清二氧化碳爆破机理,确定合适的致裂器内部爆破参数至关重要。同时还要保证致裂器能够抵达爆破点,在高温高压的工作环境成功开展爆破作业,其外部结构必将不同于常规致裂器。

基于上述要求,根据对国内外大量相关文献调研后,设定致裂器的最大爆破力为深部围压环境下储层岩石强度 500 MPa;根据气体状态方程 VHL 的变量相互关系<sup>[12]</sup>,确定利于实现的温度范围;依据温度、压力数值,求解出  $V_m = V/n$ 。调研目前石油钻探行业的钻杆常用尺寸,设计致裂器的外观尺寸:内外径、长度、容积等;结合二氧化碳爆破机理确定定压片厚度及二氧化碳充装量;计算所设温度及充装量下,活化器所需释放的热量,通过类比确定所设计的致裂器活化器的质量。再依次对保温隔热环、监测系统、防爆通道及末端螺纹进行优化。最终形成可用于深井下爆破的致裂系统。相关步骤见图 3。

### 2.1 二氧化碳爆破因素研究

二氧化碳致裂器是否成功爆破取决于活化剂

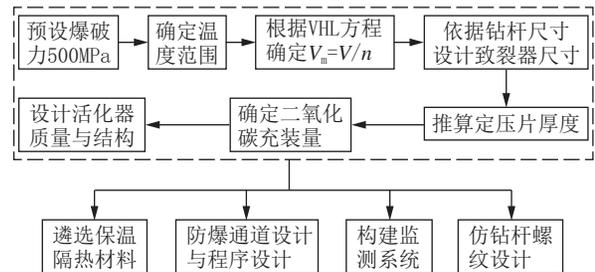


图 3 适用于干热岩储层改造的致裂器设计步骤

Fig.3 Design steps for the fracturing device suitable for hot dry rock reservoir reconstruction

用量、定压片厚度以及二氧化碳充装量,研究三者变量和爆破情况相关规律,对合理确定组合参数,提高致裂器工作效率,优化致裂器系统设计,具有重要的理论指导意义。

基于上述目的,开展了系列室外爆破试验(地表常温下),以活化剂用量、定压片厚度、二氧化碳充装量为实验变量测试了 95 型致裂器的爆破效果。

控制定压片厚度 4.0 mm 和二氧化碳充装量 1.31 kg,活化剂用量从 250 g 增至 300 g,致裂器从无法引爆至引爆成功。控制定压片厚度 4.5 mm 和活化剂用量 250 g,二氧化碳充装量从 1.40 kg 增至 1.51 kg,致裂器从无法引爆至引爆成功。以 4.0、4.5、5.0 mm 为梯度增加定压片厚度,控制活化剂用量为 250 g,能够成功引爆所需的二氧化碳充装量分别为 1.49、1.51、1.59 kg。可以看出活化剂用量和二氧化碳充装量一定程度上对引爆情况表现为正向积极作用,且两者相互影响爆破结果;定压片厚度则表现为负向消极作用。

### 2.2 二氧化碳致裂器内部参数设计

#### 2.2.1 预设爆破力

干热岩储层多为花岗岩、花岗闪长岩及黑云母片麻岩等,岩石坚硬、完整性好、渗透率极低。同时储层岩体的抗压强度还受到所处环境的影响,选取花岗岩岩样不同围压和强度之间的关系为:

$$\sigma_s = -0.12813\sigma_3^2 + 12.21405\sigma_3 + 172.494 \quad (1)$$

强度随温度的增加先增加后减少,400 °C 是岩样三轴抗压强度的一个拐点,此后随着温度的升高,岩样的抗压强度不断下降。由于深埋地下的干热岩体在结晶时就处于高温状态,温度对岩石强度的劣化显得微弱。结合室内试验探究的规律,将二氧化碳致裂器的爆破力设为 500 MPa。

### 2.2.2 二氧化碳充装量和活化剂用量

二氧化碳爆破时,活化器瞬间被点燃产生大量的热量,液态二氧化碳吸收能量相变,管体内的压力急剧升高,液态二氧化碳转化为超临界状态。活化器主要是用于系统供能,提供激发热能,温度指标可以直接反映活化器作用效果。采用真实气体状态方程即 Pen-Robinson 方程,简称 P-R 方程,确定液态二氧化碳激发温度为 400 K。

再通过研究高温高压状态下的气体 VHL 方程<sup>[18]</sup>准确描述二氧化碳爆破过程中气体组分高温高压热力学状态,确定爆轰环境下气体的压力、体积和温度(PVT)热力学关系(图4)。通过 matlab 得到适合的二氧化碳气体体积,最后计算出满足干热岩储层爆破压力的二氧化碳充装量为 4 kg。

活化器释放的热量  $Q$  主要用于液态二氧化碳气化  $Q_1$  和气体二氧化碳气体升温  $Q_v$ , 其中满足  $Q = Q_1 + Q_v$ 。通过以前期实验数据(活化剂用量/定压片厚度/二氧化碳充装量)(250/5.0/1.50)为计算标准,实验中达到的最高温度为 405.8 K,二氧化碳充装量为 1.50 kg,计算得到 250 g 的活化器释放的热量为 565.272 kJ,预设的 4 kg 二氧化碳,升高温度至 400 K 所需热量为 1482.51 kJ,相当于前者的

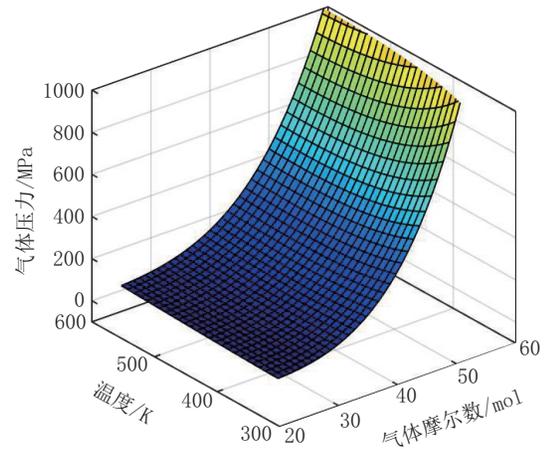


图4 气体状态方程 VHL 的变量相互关系

Fig.4 Relationship between the variables of the gas state equation VHL

2.62倍,需要 655.66 g 的活化器药量。

### 2.2.3 定压片厚度

干热岩储藏于地层深部,二氧化碳致裂器上下提取、实施精准爆破需要依靠钻杆配合运输。故调研了目前国内常用钻杆的技术参数(见表1)。为给保温隔热环的厚度设计留下足够尺寸,选取公称直径为 5 in(1 in=25.4 mm,下同)的钻杆,确定外径为 127 mm,厚度至少为 9.5 mm,长度 $\geq$ 9.6 m。

表1 常用钻杆技术参数

Table 1 Technical parameters of common drill pipes

公称尺寸/ in	本体外径/ mm	本体内径/ mm	壁厚/ mm	内容积/ (L·m <sup>-1</sup> )	质量/ (kg·m <sup>-1</sup> )	长度/ m	抗拉强度/ kN	母接头长度/ mm	母接头内径/ mm
5 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	139.7	121.4	9.17	11.35	38.48	9.6	3503	280~305	88.9
5	127.0	108.0	9.5	9.16	32.87	9.6	3170	280~305	88.9
4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	114.3	92.5	10.92	6.56	29.84	9.6	3304	300	76.2
4	101.6	82.3	9.65	5.2	23.39	9.6	2598	304.8	65.1
3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	88.9	70.2	9.35	3.87	22.25	9.6	2176	279.4	54.0
2 <sup>7</sup> / <sub>8</sub>	73.0	54.6	9.195	2.36	16.67	9.6	1718	254	41.3
2 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	60.3	46.1	7.11	1.68	10.54	9.6	1108	254	41.3

定压片的设计需要根据爆破力与内压作用面的直径来确定,在 500 MPa 条件下,定压片厚度与内压作用面直径成正比。图 5 中阴影区域表示定压片厚度超过设计范围,不能完成爆破的情况。为防止井下作业时钻井液对致裂器的腐蚀破坏,出现定压片厚度减小或定压片结构发生变化,最终影响爆破效果,特设计双定压片结构,靠外侧定压片直径与内侧

定压片的相同,仅在厚度及材质方面有所不同,使得外侧定压片强度远远低于内侧定压片强度。外侧定压片材质以防酸化、轻便及低强度为主。

为保证管体的强度达到要求,预设壁厚为 20 mm,保温隔热环厚度为 20 mm,那么内直径为 47 mm。根据计算,定压片厚度应在 19.0 mm 左右。

### 2.3 二氧化碳致裂器外部结构优化

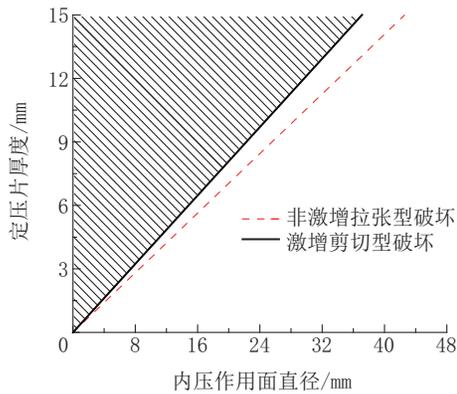


图 5 定压片厚度范围

Fig.5 Thickness range of the rupture disc

### 2.3.1 保温隔热材料选取

保温隔热环外部为钢制材料,加上环体本身具有一定的厚度,可有效减缓致裂器下放深井过程中与套管和井壁的碰撞,使二氧化碳致裂器安全完好的到达预定起爆位置。

根据傅立叶定律,一维径向稳态导热条件下,管状结构绝热材料的导热系数见公式(2),按照爆破所需热量,反推保温隔热层材料的导热系数,从而选择保温隔热材料。

$$\lambda = \frac{Q \ln(r_2/r_1)}{2\pi l(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

式中: $\lambda$ ——导热系数; $Q$ ——通过绝热材料的总热量, $W$ ;  $r_2$ ——绝热材料外表面半径, $m$ ;  $r_1$ ——绝热材料内表面半径, $m$ ;  $t_2$ ——绝热材料外表面温度, $^{\circ}C$ ;  $t_1$ ——绝热材料内表面温度, $^{\circ}C$ ;  $l$ ——绝热材料有效长度, $m$ 。

设计尺寸规格为:致裂器管体的外表面半径  $r_2 = 0.0635\text{ m}$ ,保温环的厚度为  $0.020\text{ m}$ ;致裂器外侧温度参考干热岩的开采温度  $t_2 = 300\text{ }^{\circ}C$ ,不包含保温隔热层管体外部温度  $t_1 = 25\text{ }^{\circ}C$ ;致裂器的长度  $l = 4\text{ m}$ 。依据上述参数,计算可得所用致裂器保温隔热层材料的导热系数  $\lambda = 0.04\text{ W}/(m \cdot K)$ 。调研相关材料的导热系数,最终选用导热系数为  $0.006\text{ W}/(m \cdot K)$  的 TDD 真空绝热保温板。

### 2.3.2 监控系统

致裂器管壁内外侧设有温度、压力传感器,实时监测深井破岩二氧化碳致裂器的内部状态,且与中心控制器相连,输出结果通过无线发射传输信息至远程控制终端,地面操控人员可实时监测深井中的致裂器内部状态并对紧急情况做出及时的处理。

### 2.3.2.1 压力传感器

经过筛选,监测系统最终可选择 OMEGA 公司生产的 PX91N0-10KSV 型压力传感器,OMEGA 的 PX91 系列是坚固的超高温压力传感器系列,完全密封,具有全不锈钢结构,设计用于高温的试验箱。

### 2.3.2.2 温度传感器

温度传感器最终选择 K 型热电偶,是一种广泛应用温度传感器,具有热电动势较大、测量精度高、灵敏度高、线性度好、稳定性和均匀性较好等优点,其测量范围  $-200 \sim 1300\text{ }^{\circ}C$ ,符合本实验的温度测试要求。

### 2.3.3 防爆系统

为防止致裂器运输过程中高温和碰撞导致液态二氧化碳局部受热膨胀,发生自爆等不安全现象,在充能头内设置了启闭阀门与防爆通道组成防爆系统,可小范围调节管体内压力。当监测系统检测到管体内压力小范围上升时,中心控制器开启指令启闭阀门,通过泄去小部分二氧化碳平衡管体内温度和压力,当管内温压达到稳定状态启闭阀门接受指令关闭。部件设计如图 6 所示。

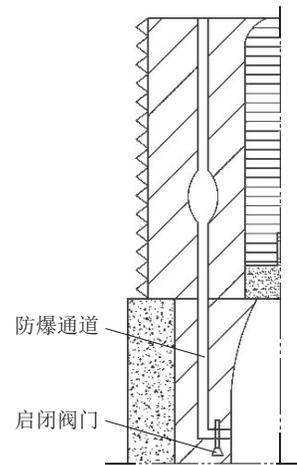


图 6 防爆系统设计示意

Fig.6 Design of the explosion-proof system

### 2.3.4 连接设计

通过在充能头外设置有可与母头钻杆相连接的螺纹,二氧化碳致裂器可置于钻杆前端,随钻杆下放到深井预定位置,解决了二氧化碳致裂器井下运输问题。因总体为圆柱螺纹,外螺纹牙型选择三角形细螺纹,细牙的螺距小,升角小,自锁性能更好,可用于细小零件薄壁管中,有振动或变载荷的联接,以及微调装置等,可以很好地连接致裂器和钻杆。

### 3 结论

(1)揭示了活化剂用量、定压片厚度、二氧化碳充装量为影响二氧化碳致裂器爆破的主要因素。活化剂用量和二氧化碳充装量越多,定压片厚度越小,致裂器爆破的可能性越大。

(2)设计了用于干热岩型地热储层建造的二氧化碳致裂器内部参数。气体爆破力500 MPa、激发温度400 K、活化器质量655.66 g、内腔直径47 mm、定压片厚度19 mm,且二氧化碳成功引爆的基础上满足致裂建造干热岩型地热储层的爆破压力。

(3)优化了用于干热岩型地热储层建造的二氧化碳致裂器外部结构。选取导热系数为 $0.006\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的TDD真空绝热保温板为保温隔热材料;分别选用PX91N0-10KSV型压力传感器、K型热电偶为压力、温度传感器监控管内温压;设置启闭阀门与防爆通道组成防爆系统,根据温压传感器数据智能控制与调节管体内压力。

(4)研制了一种可用于干热岩型地热储层建造的二氧化碳致裂器,为干热岩储层建造提供有效的技术手段,填补了耐高温高压的井下二氧化碳致裂器领域的空白。

### 参考文献(References):

- [1] 刘明亮,庄亚芹,周超,等.化学刺激技术在增强型地热系统中的应用:理论、实践与展望[J].地球科学与环境学报,2016,38(2):267-276.  
LIU Mingliang, ZHUANG Yaqin, ZHOU Chao, et al. Application of chemical stimulation technology in enhanced geothermal system: theory, practice and prospects [J]. Earth Science and Journal of Environmental Sciences, 2016,38(2):267-276.
- [2] 罗天雨,刘全稳,刘元爽.干热岩压裂开发技术现状及展望[J].中外能源,2017,22(10):23-27.  
LUO Tianyu, LIU Quanwen, LIU Yuanshuang. Present situation and prospect on hydraulic fracturing development technique of hot dry rock[J]. Sino-Foreign Energy, 2017,22(10):23-27.
- [3] Wenbo Huang, Wenjiong Cao, Fangming Jiang. A novel single-well geothermal system for hot dry rock geothermal energy exploitation[J]. Energy, 2018,162:630-644.
- [4] Tester J W, Anderson B J, Batchelor A S, et al. The future of geothermal energy-impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century[R]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [5] Duchane D, Brown D. Hot dry rock (HDR) geothermal energy research and development at Fenton Hill, New Mexico [J]. GHC Bull, 2002,23:12-19.
- [6] Wan Z, Zhao Y, Kang J. Forecast and evaluation of hot dry rock geothermal resource in China [J]. Renewable Energy,

- 2005, 30(5):1831-1846.
- [7] 孟星宇.真三轴条件下岩石水力与气体致裂裂隙扩展规律试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.  
MENG Xingyu. Experimental study on hydraulic and gas fracturing of rocks under true triaxial compression[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [8] 盖迪.低渗透煤层气压致裂损伤模型及数值模拟[D].沈阳:东北大学,2017.  
GAI Di. Damage model and numerical simulation for gas fracturing in low-permeability coal seams[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [9] 王明宇.液态二氧化碳相变爆破裂纹扩展规律研究及应用[D].徐州:中国矿业大学,2018.  
WANG Mingyu. Study on crack propagation law of liquid carbon dioxide phase transition blasting and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [10] 吕进国,李守国,赵洪瑞,等.高地应力条件下高压空气爆破卸压增透技术实验研究[J].煤炭学报,2019,44(4):1115-1128.  
LÜ Jinguo, LI Shouguo, ZHAO Hongrui, et al. Technology of pressure relief and permeability enhancement with high pressure air blasting under high geo-stress [J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(4):1115-1128.
- [11] S.P.Singh. Non-explosive applications of the PCF concept for underground excavation[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998,13:305-311.
- [12] Caldwell T. A comparison of non-explosive rock breaking techniques[EB/OL]. www.ats.org.au/papers/tina2005.pdf.
- [13] 徐超,窦斌,田红,等.二氧化碳爆破致裂建造增强型地热系统热储层工艺探讨[J].地质科技情报,2019,38(5):247-252.  
XU Chao, DOU Bin, TIAN Hong, et al. Process of carbon dioxide blasting to build eggs thermal reservoir[J]. Geological Science and Technology Information, 2019,38(5):247-252.
- [14] 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.  
LI Yanli, YANG Hongwei, ZHU Liqiang, et al. Study on the cracking unit of carbon dioxide[J]. Petrochemical Technology, 2018,25(6):39-40.
- [15] 黄园月,唐春晓,尹岚岚.二氧化碳致裂器快速充装系统的研制[J].煤矿机械,2015,36(7):114-115.  
HUANG Yuanyue, TANG Chunxiao, YIN Lanlan. Development on fast filling system of carbon dioxide fracturing facility [J]. Coal Mine Machinery, 2015,36(7):114-115.
- [16] Chen Y., Zhang H., Zhu Z., et al. A new shock-wave test apparatus for liquid CO<sub>2</sub> blasting and measurement analysis [J]. Measurement and Control, 2019,52(5-6):399-408.
- [17] Hu S., Pang S., Yan Z. A new dynamic fracturing method: deflagration fracturing technology with carbon dioxide[J]. International Journal of Fracture, 2019,220(1):99-111.
- [18] 韩勇.炸药爆轰产物状态方程理论与应用研究[D].绵阳:中国工程物理研究院,2015.  
Han Yong. Theory and application of state equation of explosive detonation products [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2015.

(编辑 荐 华)