

窦斌,肖鹏,郑君,等. 二氧化碳爆破致裂激发干热岩储层作用效果[J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 150-159.
Dou Bin, Xiao Peng, Zheng Jun, et al. Effect of stimulation in hot dry rock reservoirs from carbon dioxide blasting-induced cracking[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 150-159.

二氧化碳爆破致裂激发干热岩储层作用效果

窦斌,肖鹏,郑君,田红,崔国栋,吴天予

(中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

摘要:采用二氧化碳爆破致裂为激发干热岩储层提供了一种新的技术思路和途径。为了探究二氧化碳爆破致裂激发干热岩储层的作用效果,开展了二氧化碳爆破致裂干热岩储层作用范围的数值模拟研究。考虑实际开采过程中钻井液对井壁附近干热岩储层的降温影响,采用以温差为变量的拟合函数设置损伤区储层材料参数,用洗井后井壁附近储层温度分布函数设置损伤区储层温度场,并借助炸药爆破的相关理论、公式设置爆破荷载,结合COMSOL软件模拟了二氧化碳爆破致裂激发干热岩储层的过程。结果表明,二氧化碳爆破致裂干热岩过程中存在多次应力集中作用,且在炮孔附近压应力集中造成压碎区,压碎区外拉应力作用形成裂隙区;储层的初始温度以及定压片厚度都会影响二氧化碳爆破致裂激发干热岩储层的作用效果,其中初始温度对爆破压碎区范围影响较大,对裂隙区范围影响较小,定压片厚度改变对压碎区范围影响较小,主要影响爆破裂隙区的分布。本研究成果可为干热岩地热能后续的开采利用提供理论支持和参考。

关键词:干热岩;储层激发;二氧化碳爆破;地热能;数值模拟

中图分类号:P314

文章编号:2096-8523(2022)05-0150-10

收稿日期:2022-02-25

doi:10.19509/j.cnki.dzkg.2022.0194

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of stimulation in hot dry rock reservoirs from carbon dioxide blasting-induced cracking

Dou Bin, Xiao Peng, Zheng Jun, Tian Hong, Cui Guodong, Wu Tianyu

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074)

Abstract: Carbon dioxide blasting provides a new technical idea and way to stimulate hot dry rock reservoirs. To explore the effect of carbon dioxide blasting-induced cracking on dry-hot rock reservoirs, a numerical simulation for the action range of carbon dioxide blasting-induced cracking of hot dry rock was carried out. Considering the cooling effect of drilling fluid on the hot dry rock reservoir near the wellbore in the actual mining process, the fitting functions with temperature difference as a variable were adopted to set the material parameters of the reservoir in the damaged area, and the temperature distribution functions of the reservoir near the wellbore after well washing were adopted to set the temperature field of the reservoir in the damaged area. The blasting load was set by the relevant theories and formulas of explosive blasting. Combined with COMSOL software, the process of carbon dioxide blasting to stimulate hot dry rock reservoirs was simulated. The results showed that there were multiple stress concentrations in the process of the dry hot rock cracking caused by carbon dioxide blasting, the compressive stress concentration near the blast hole produced the crushing zone, and the tensile stress outside the crushing zone formed the fracture zone. In addition, the initial temperature of the reservoir and the thickness of the pressure plate would affect the effect of carbon dioxide blasting fracturing to stimulate dry and hot rock reservoirs.

基金项目:国家重点研发计划(2019YFB1504201);自然资源部深部地热资源重点实验室开放基金(KLDGR2022K01)

作者简介:窦斌(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事地热能开发利用的研究及教学工作。E-mail:doubin@cug.edu.cn

通信作者:郑君(1987—),女,副教授,主要从事地热能开发利用以及钻进自动化方面的研究及教学工作。E-mail:junzheng@cug.edu.cn

The initial temperature had a great influence on the scope of the blasting crushing zone and had little influence on the scope of the fracture zone. The thickness of the pressure plate had little influence on the scope of the crushing zone, which mainly affected the distribution of the blasting fracture zone. The research results could provide a theoretical support and a reference for the subsequent exploitation and utilization of dry-hot rock geothermal energy.

Key words: hot dry rock; reservoir stimulation; carbon dioxide blasting; geothermal energy; numerical model

随着不可再生能源的减少以及社会对环境问题的重视,地热资源得到了越来越多的认可与关注^[1-2]。干热岩是一种不含流体或含少量流体、埋深为3~10 km、温度为150~650℃的致密热岩体,相较于地压型和水热型地热能,干热岩在储量上占据明显优势,具有广阔的开发利用前景^[3-4]。增强型地热系统(enhanced geothermal system,简称EGS)是干热岩开发的重要工程技术,其中储层激发是EGS设计中的关键一步^[5-9]。现阶段干热岩储层激发主要以水力剪切为主,但其存在一些弊端,例如:过于依赖储层天然形成的裂隙,受原位应力场影响较大,裂隙扩展方向难以预测,且在致密岩层中压裂效果不佳等,目前将爆破技术应用于干热岩储层激发是一个新的研究方向^[10-12]。二氧化碳爆破致裂技术有着爆破压力大且可控,作业时间短,造缝均匀,经济环保等优点,并且可与水力压裂等技术结合用于干热岩储层激发,对于干热岩的开发利用有着重要意义^[13]。

二氧化碳爆破装置最早由英国的CRDOX公司生产并用于清理水泥生产过程中的堵塞情况,而后Singh^[14]分析了将这种技术应用于矿山生产、市政工程等其他工程领域的可行性,为二氧化碳爆破技术的推广应用提供了理论支撑。20世纪末,该技术被逐步应用到提高煤层透气性方面^[15-16]。近年来,我国在二氧化碳爆破致裂的研究方面也取得了丰硕成果:董庆祥等^[17]分析了液态二氧化碳爆破致裂机理,进行了理论计算并得到二氧化碳致裂的TNT当量,该计算方法对液态CO₂相变致裂爆破影响半径及布孔参数的确定具有重要意义;孙小明^[18]进行了穿层钻孔相变致裂增透试验,通过分析抽采钻孔的流量、浓度等参数,证实了液态二氧化碳相变致裂对煤层具有很好的增透效果;秦江涛等^[19]提出使用高压水力压裂和二氧化碳相变致裂方法进行煤层增透,并与高压水力压裂和普通抽采效果进行了比较分析,为二氧化碳爆破技术与其他方法的结合提供了思路;徐超等^[13]分别从爆破压力、爆破过程、裂缝形态以及对岩体和环境的影响方面,探讨了二氧化碳爆破用于干热岩储层激发的可行性;成诗冰等^[20]研究了二氧化碳爆破致裂引起的岩体损伤并确定了

合理的爆破参数,为二氧化碳爆破在台阶开挖工程的应用提供了重要参考;此外,随着二氧化碳爆破致裂技术的日趋成熟,其在石方开采、破冰作业等方面皆有所运用^[21]。

综上所述,二氧化碳爆破致裂技术的主要运用以及相关研究大部分集中在煤炭领域,而其他方面涉及不多,由于在干热岩的开发等领域缺少实际工程案例,对这方面的探索也甚少,因此开展关于二氧化碳爆破致裂储层的作用效果以及激发储层的作用机理研究是有必要的。笔者拟利用COMSOL软件,将二氧化碳爆破能量转化为TNT炸药当量并借助炸药爆破理论研究二氧化碳爆破冲击波作用在储层岩石上的冲击荷载,结合工程实际情况考虑爆破前期的钻井液冷却影响,建立二氧化碳爆破致裂激发干热岩储层的数值模型,并通过模型计算结果对二氧化碳爆破致裂干热岩的过程以及作用效果进行分析研究,研究结果对于将二氧化碳爆破致裂技术运用到干热岩储层激发实际工程的可行性具有重要意义,也可为后续干热岩地热资源的开发利用提供理论支持与参考。

1 二氧化碳爆破荷载分析

1.1 爆破峰值荷载

二氧化碳爆破的原理是运用液态二氧化碳在转化为气态二氧化碳时体积发生剧烈膨胀而产生高压,以此来达到物理爆破的目的。爆破发生后,高压气体冲击岩石表面并以爆炸应力波的形式进入岩层,在岩层内部会形成复杂的应力场,由于目前二氧化碳爆破缺乏相关理论及计算公式,而后续进行数值模拟需要借鉴炸药爆破的基本模型,另一方面,TNT炸药是适用范围最广、相关研究最多的炸药类型之一,故研究爆炸荷载时将其换算为同等当量下的TNT炸药,借助炸药爆破相关公式进行计算。根据炸药爆破理论,可将炸药充填形式分为耦合装药和不耦合装药,前者装药直径与炮孔直径接近,爆炸产生的高压气体将直接作用于孔壁;后者装药直径远小于炮孔直径,爆炸产物将首先引起药包附近空气介质扰动,并经由空气传播至岩体。由于二氧

化碳爆破致裂器管体直径一般远小于干热岩水平段井径,因此二氧化碳爆破应视为不耦合装药爆破。采用C-J模型分析爆炸能量变化,做如下假设^[22]:①爆炸产物在炮孔内绝热膨胀;②爆炸产物初始膨胀压力为平均爆轰压;则可得爆破最大初始荷载如下:

$$P = \frac{n\rho_e D^2}{8} (r_e/r_h)^6 \quad (1)$$

式中: P 为不耦合装药下孔壁处爆破峰值应力(MPa); ρ_e 为等效装药密度(kg/m^3); D 为炸药爆速,依据TNT炸药,取 $6.92 \text{ km}/\text{s}$; r_e 为装药半径(m); r_h 为炮孔半径(m)(参考 165.1 mm 的水平井直径); n 为压力增大系数(多取 $8\sim 11$)。

根据式(1)计算出不同型号致裂器峰值爆破荷载(表1),为后续模拟提供参数依据。

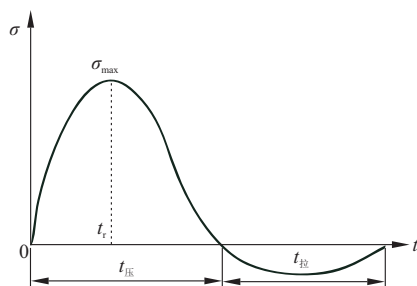
表1 不同型号致裂器爆破参数

Table 1 Blasting parameters of different types of crackers

致裂器型号	致裂器外径/mm	定压片厚度/mm	等效装药密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	峰值荷载 P/MPa ($n=8\sim 11$)
		3.5	102.040 8	0.73~1.00
38型	38	4.0	117.346 9	0.83~1.14
		4.5	132.653 1	0.95~1.30
		4.0	117.476 4	9.56~13.15
57型	57	4.5	132.704 9	10.80~14.85
		5.0	147.933 3	12.04~16.56
95型	95	4.5	132.649 6	231.40~318.16
		5.0	148.034 2	258.23~355.07
		5.5	163.760 7	285.67~392.80

1.2 爆破荷载时程曲线

爆破发生后,爆炸应力波将进入岩体并进行传播,在此过程中由于岩石波阻抗影响,应力波将衰减并形成随时间变化的荷载函数。一般而言,取炮孔壁处质点受力情况进行分析便可得到爆破荷载作用时程曲线^[23](图1),研究爆破时程曲线是研究爆破



σ_{\max} 为峰值应力; t_r 为应力上升时间; $t_{\text{压}}$ 为压应力作用时间;
 $t_{\text{拉}}$ 为拉应力作用时间

图1 典型爆破应力时程曲线示意图

Fig. 1 Diagram of the typical blasting stress time history curve

荷载时的关键步骤。

二氧化碳爆破产生的高压气体冲击孔壁造成的爆炸应力波首先以压应力形式作用于岩体,在时间 t_r 范围内高压气体快速充满爆点附近的炮孔环空,使得作用于孔壁的压应力不断攀升直至到达峰值荷载 σ_{\max} ,随后逐步衰减至0值($t_{\text{压}}$ 区域);当压应力作用完全消失后,压缩过程中岩体储存的弹性势能释放并形成逐步攀升的径向拉应力,随着弹性势能释放拉应力达到峰值,此后逐渐衰减直至完全消失($t_{\text{拉}}$ 区域)。

数值模拟中常采用的爆破荷载曲线主要包括三角形荷载和指数衰减型荷载2种,考虑COMSOL软件情况以及后续模拟的准确性,本研究采用指数衰减型荷载构建爆破激发模型。指数衰减型荷载由峰值荷载和应力衰减函数 $f(t)$ 组成,即 $\sigma(t) = Pf(t)$; $f(t)$ 通常定义为与应力衰减系数相关的指数型函数,参考相关研究^[24-25],定义应力衰减函数如下:

$$\begin{cases} f(t) = \exp\left(\frac{-\alpha t}{t_0}\right) \sin\left(\frac{4\pi t}{t+t_0}\right) \\ t_0 = 0.00081 \times \sqrt[3]{m_e} \end{cases} \quad (2)$$

式中: α 为应力衰减系数,根据文献[24-25]中的方法计算,取值按表2; t_0 为荷载作用时长(s); m_e 为爆炸物(TNT)当量(kg)。

表2 不同温度储层应力衰减系数(α)取值

Table 2 Values of the stress attenuation coefficients(α) of reservoir with different temperatures

储层温度	室温(20℃)	300℃	400℃	500℃	600℃
α	2.047	1.960	1.923	1.893	1.825

2 储层激发模型建立

2.1 几何模型

利用COMSOL软件建立二维储层激发模型(图2),模型尺寸设置为 $600 \text{ cm} \times 600 \text{ cm}$,炮孔直径设置为 16.5 cm 。由于本研究前期已采用COMSOL软件模拟钻井液洗井过程(钻井液温度 20°C 、流速 $9.897 \text{ m}/\text{s}$,作用时长 50 h),结果显示热损伤区的具体范围受储层初始温度的影响极小,故本模型根据前期模拟结果,将受前期钻井液影响的热损伤区半径设为 150 cm ,其余部分认为是未损伤区。

2.2 材料及其参数设置

本模型将干热岩储层视为各向同性且连续的均质材料,且忽略块体模型自身重力及水平地应力造成的影响。假定热损伤均发生在钻井液洗井降温过程中,热损伤区之外的干热岩储层未受到钻井液冷却作用影响,则处于热损伤区外的干热岩储层物理

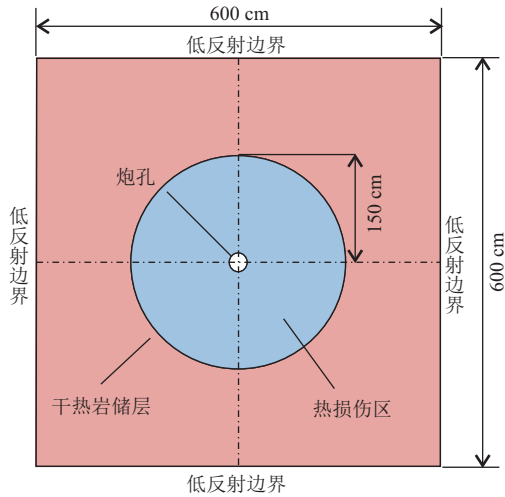


图 2 储层激发物理模型示意图

Fig. 2 Physical model diagram of reservoir stimulation

力学性质采用常温下花岗岩近似替代。模拟前笔者已对采自青海地表露头的花岗岩进行了物理力学试验,可按照试验结果设置未损伤区储层参数(表 3)。

表 3 未损伤区储层参数

Table 3 Reservoir parameters in damaged area

参数名称	密度 $\rho_0 / (g \cdot cm^{-3})$	弹性模量 E_0 / GPa	泊松比 μ_0	抗拉强度 RTS_0 / MPa	抗压强度 UCS_0 / MPa
取值	2.614	13.22	0.188	12.02	123.44

研究表明,处于热损伤区的干热岩储层由于钻井液冷却的影响发生力学性质劣化,其各项参数对比未损伤区域均有所下降。本次研究根据对采自青海地表露头的花岗岩进行高温遇水冷却后所测得物理力学试验数据,具体试验方法参考课题组以前发表的文献[26],以温差为变量进行函数拟合,将拟合方程应用于损伤区的材料参数设置(表 4)。

表 4 损伤区储层参数

Table 4 Reservoir parameters in damaged area

参数名称	拟合方程
密度 / $(g \cdot cm^{-3})$	$\rho_1 = 2600 - 2600[\rho_0(\Delta T)\%]$ $\rho_0(\Delta T) = 0.006706 - 0.00151\Delta T + 7.74804 \times 10^{-6}\Delta T^2$
弹性模量 / GPa	$E_1(\Delta T) = 2.77304 \times 10^{-5}\Delta T^2 - 0.0298\Delta T + 13.22308$
泊松比	$\mu_1(\Delta T) = 0.18815 + 4.33326 \times 10^{-5}\Delta T + 2.73458 \times 10^{-7}\Delta T^2$
抗拉强度 / MPa	$RTS_1(\Delta T) = 12.01947 - 0.01532\Delta T - 1.98964 \times 10^{-7}\Delta T^2$
抗压强度 / MPa	$UCS_1(\Delta T) = -9.58993 \times 10^{-5}\Delta T^2 - 0.08661\Delta T + 123.43994$

2.3 温度场设置

将未损伤区储层初始温度分别设置为 300, 400, 500, 600℃。设置热损伤区初始温度时,根据前期模拟钻井液洗井过程的结果,预先得到不同初始温度的储层经钻井液降温影响后的温度场分布,再将其导入至储层激发模型,以此设置模型温度场(图 3)。

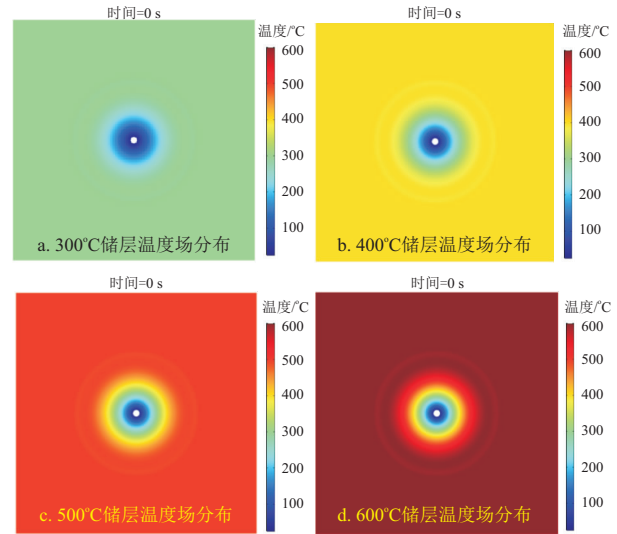


图 3 不同初始温度下储层模型温度场分布图

Fig. 3 Distribution of the reservoir model temperature field under different initial temperatures

2.4 爆破荷载设置

本次研究不考虑高压气体进入裂隙后的“气楔”作用,将爆炸应力波作用视为岩石破坏的主要影响因素;假定模型处于无限介质中,为避免应力波在几何模型边缘发生反射影响模拟结果,将模型四壁设置为低反射边界;忽略破坏过程中由于开裂等模型结构改变造成的材料性能损伤和应力重分布现象,且不考虑封孔材料及环空气体对爆破过程的影响;基于圣维南原理忽略致裂器形状及在炮孔中位置的影响,依据 1.2 小节中的所计算得到的指数衰减型爆破荷载时程曲线 $\sigma(t)$,将爆破荷载直接施加在孔壁位置。

2.5 网格剖分

采用物理场控制对模型进行网格剖分(图 4)。其中未受损区储层采用常规三角形网格,热损伤区储层设置为较细化网格,并对炮孔附近储层进行加密处理,共计 2742 个域单元和 268 个边界单元。

3 结果分析

3.1 储层激发过程分析

各个储层温度下的爆破应力波由于荷载方程、

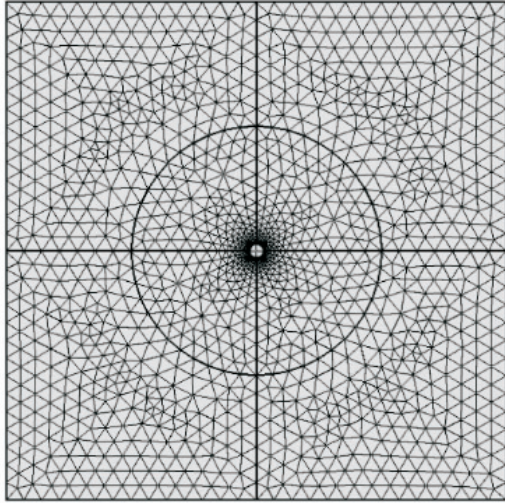


图4 储层激发模型网格剖分图

Fig. 4 Meshing diagram of the reservoir stimulation model

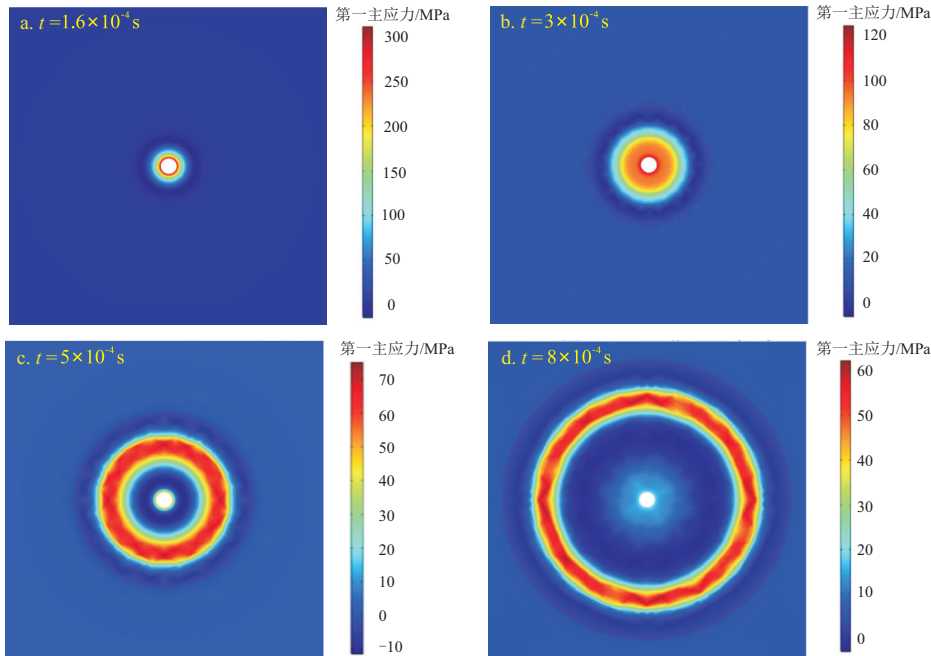


图5 不同时刻最大主应力云图(300℃)

Fig. 5 Maximum principal stress nephograms at different times(300℃)

爆破过程中爆炸应力波主要以压缩波的形式传播,故而最大主应力(第一主应力)表现为压应力,分析其应力云图可较为直观地观察到应力波波头在不同时刻所到达的区域。爆破发生后炮孔壁附近储层受到逐步攀升的压应力作用并形成压碎区,在 $t = 1.6 \times 10^{-4}$ s 时刻达到最大值(图 5-a),此后压应力波由冲击波逐步衰减为弹塑性波并对外扩散(图 5-b~d),表明此时的峰值应力区已经由炮孔附近的热损伤区传播至远端未损伤区。

对 x 轴逆时针 45° 方向的应力张量进行分析可知,在 $t = 1.6 \times 10^{-4}$ s 时刻拉应力作用达到最大值,

模型温度函数及材料参数的区别,在相同时刻会传播至储层不同区域,且应力大小有所区别,但综合来看,各温度下应力波传播过程均呈现出大致相同的变化趋势。本研究采用二氧化碳爆破致裂器进行模拟,其中定压片是控制管内相变后产生的二氧化碳气体压力峰值,当受到管内气体有效压力高于其强度极限时定压片发生破裂,气体高速冲出并撞击周围岩壁,从而达到爆破致裂的效果,工程中可通过设置定压片厚度达到控制爆破半径的目的^[27]。篇幅原因本文以 300°C 的干热岩储层采用 95 型致裂器搭配 5.5 mm 定压片压力增大系数取 11 时的模拟结果为例,讨论分析二氧化碳爆破激发干热岩储层的应力波传播过程。根据计算结果绘制出爆破过程中不同时刻储层的最大主应力云图(图 5)、应力张量云图(图 6)及 Von-Mises 有效应力云图(图 7)。

此刻峰值为 200.3 MPa(图 6-a),应力集中区主要位于炮孔附近;此后爆破过程中拉应力主要分布于压应力外侧,且峰值随时间逐步衰减,分析判断其主要为压应力作用下的衍生应力(图 6-b,c); $t = 8 \times 10^{-4}$ s 时刻应力张量呈现出“拉-压-拉”嵌套状,压应力内、外侧拉应力峰值分别为 10.7, 20.8 MPa(图 6-d),判断外侧拉应力主要为衍生拉应力,内侧为卸荷拉应力和衍生拉应力的综合作用。

在 $t = 1.6 \times 10^{-4}$ s 时刻储层有效应力主要集中在炮孔壁附近,有效应力峰值为 385 MPa,表明此时应力集中是由于压缩波进入岩体造成的,有效应力

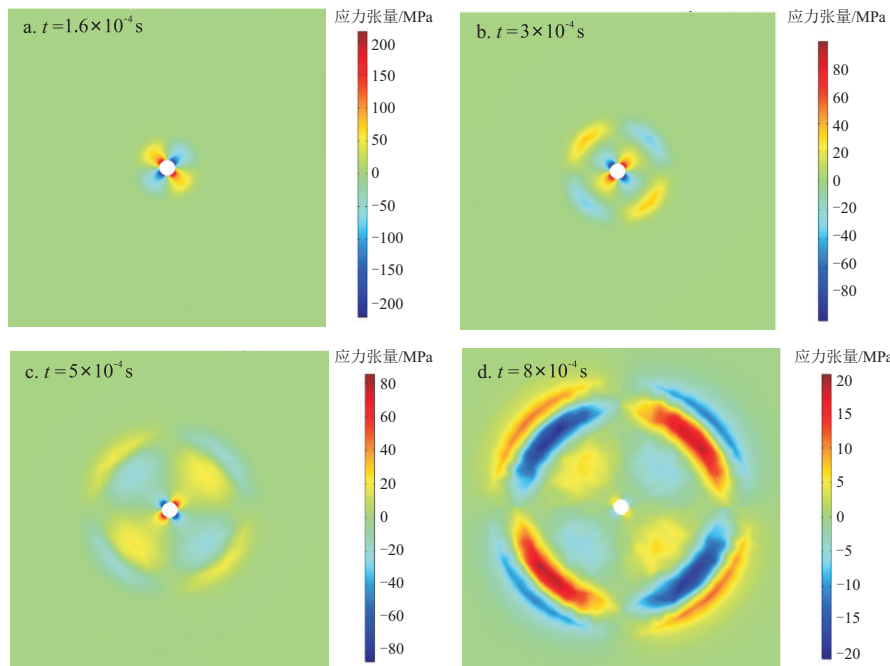


图 6 不同时刻应力张量云图(300℃)

Fig. 6 Stress tensor nephograms at different time(300℃)

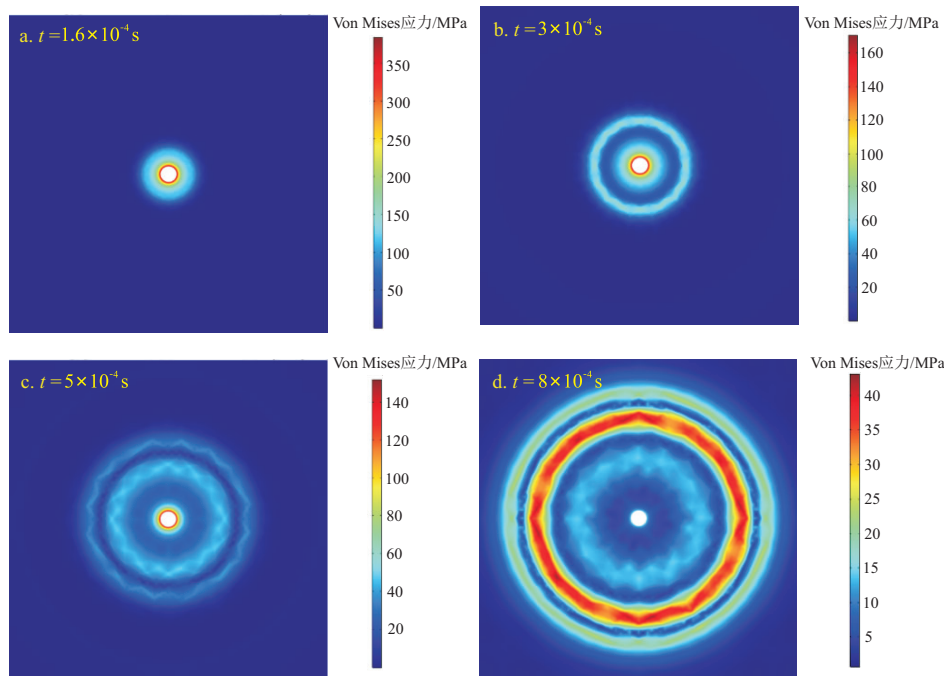


图 7 不同时刻 Von-Mises 有效应力云图(300℃)

Fig. 7 Von-Mises effective stress nephogram at different time(300℃)

表现为压应力(图 7-a)。在 $t = 3 \times 10^{-4}$ s 时刻孔壁附近有效应力峰值下降为 171.8 MPa, 同时在作用范围远端形成第二集中区, 该区域有效应力峰值为 66.7 MPa(图 7-b), 分析可知孔壁附近应力集中区有效应力表现为压应力, 第二集中区表现为衍生拉应力。在 $t = 5 \times 10^{-4}$ s 时刻孔壁附近集中区有效应力峰值下降为 152 MPa, 第二集中区有效应力峰值

下降为 49.7 MPa, 同时在远端形成第三集中区, 有效应力峰值为 38.2 MPa(图 7-c), 分析可知孔壁附近应力集中区有效应力表现为径向卸荷拉应力, 第二集中区为此时应力波波峰位置, 第三集中区有效应力表现为环向衍生拉应力。在 $t = 8 \times 10^{-4}$ s 时刻炮孔壁附近应力集中区消失, 第一应力集中区为应力波波峰位置, 有效应力表现为压应力, 其峰值下降

为 43.2 MPa;第二集中区有效应力表现为环向衍生拉应力,其峰值为 19.1MPa(图 7-d)。可以看出,在二氧化碳爆破发生后,炮孔壁附近区域以及远端均存在着多次应力集中现象,且不同时刻应力集中现象的形成原因是有所区别的。

3.2 储层激发范围

3.2.1 不同温度储层激发范围

不同温度的干热岩储层受到钻井液冷却后热损伤程度不同,弹性模量、波阻抗以及动态抗拉强度等物理力学性质也不同。同时,由于各温度下储层的应力波衰减系数不同,故而爆破荷载方程也会相应改变。因此,相同致裂器在不同温度储层中的爆破激发范围理论上也有所区别。本次研究选取 95 型致裂器,搭配 5.5 mm 定压片,分别对其在 300, 400, 500, 600℃ 干热岩储层中的爆破激发范围进行分析。

为判断有效应力作用规律,沿模型 x 轴方向布置(0.12, 0), (0.2, 0), (0.6, 0), (1, 0), (2, 0) 5 个域点探针。以 300℃ 储层为例,根据 5 个域点探针结果来绘制的有效应力时程曲线(图 8)。可以看出,不同位置的监测点所受有效应力数值不同,但基本均存在主、次 2 个应力峰,部分点存在 3 个应力峰。通过分析认为,主峰为压应力作用,是压碎区形成的主要影响因素,随后出现的次峰为卸荷拉应力与衍生拉应力综合作用。有效应力主峰值大于岩石动态抗压强度的区域为压碎区,有效应力次峰值大于岩石动态抗拉强度的区域为裂隙区。为了更清晰地描述激发范围,沿模型 x 轴正半轴 8~36 cm 内每 2 cm 增设一个探针(炮孔半径为 8.25 cm,设置探针时近似为 8 cm);36~180 cm 内每 10 cm 增设一个探针,共计 29 个。将检测点与炮孔壁距离设为 D ,读取各点峰值应力并与岩石动态强度曲线比较后可绘制出激发范围图(图 9)。

对不同温度储层的压碎区、裂隙区范围图对比分析可知,各温度储层激发区域分布模式大致相同,但激发范围有所区别。总的来说,压碎区均分布在孔壁周围,并且压碎区范围随储层温度升高而大致呈上升趋势,这表明孔壁附近储层热损伤程度受储层原始温度影响较大,并且初始温度越高的储层完井后降温幅度越大,物理力学性质相比钻井损伤前劣化越显著,所以温度越高的干热岩层爆破激发后产生的压碎区范围越大。反观裂隙区范围图可以看出,各温度储层的爆破裂隙区基本都在 1.2 m 范围内,同理由温度场分布可知,该区域的岩层温度已接近未损伤区(温差在 10℃ 内),储层岩石的热损伤程度受储层原始温度影响较小,故各温度储层的裂隙区范围较为接近,均在 1.08~1.28 m 范围内,而这

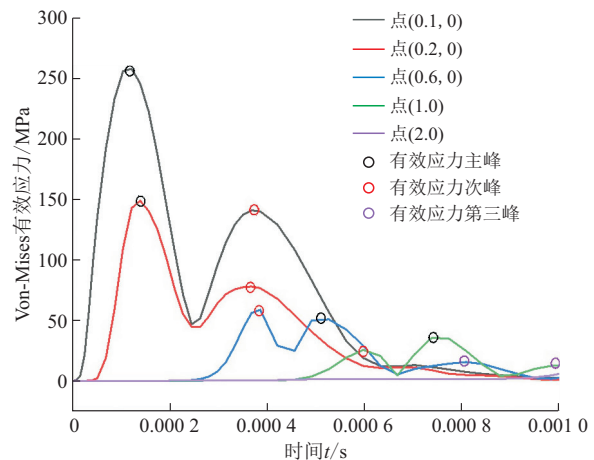


图 8 各监测点 Von-Mises 有效应力时程曲线图(300℃)

Fig. 8 Time history chart of Von-Mises effective stress at each monitoring point(300℃)

个结果也基本符合哈努卡耶夫经验值(0.8~1.2 m)。由此表明,储层的初始温度对于二氧化碳爆破致裂所形成的压碎区范围影响较大,对于裂隙区的范围影响较小。

3.2.2 不同厚度定压片激发范围

不同型号及结构参数的致裂器爆破峰值荷载有所区别,同时应力加载时间也不同。本次研究主要探究相同储层条件下,搭配不同厚度定压片后 95 型致裂器的激发范围变化情况,同时取 57 型致裂器作为对照组,设置不同工况(表 5);由于储层温度对裂隙区范围影响较小,取压碎区范围最接近理论值的 600℃ 储层为代表设置材料参数及温度场。

表 5 不同工况下致裂器参数

Table 5 Parameters of crackers under different working conditions

组别	致裂器型号	定压片厚度/mm	爆破当量/TNT	压力增大系数(n)
工况 1	95	5.5	0.479	8
工况 2	95	5.0	0.433	11
工况 3	95	5.0	0.433	8
工况 4	95	4.5	0.388	11
工况 5	95	4.5	0.388	8
工况 6	57	5.0	0.204	11

打开激发范围边界附近探针,分别计算后可得到各组对应探针点的有效应力时程曲线,然后对比不同组别致裂器在不同区域造成的有效应力及该点的动态强度可以得到各组孔隙区与裂隙区范围。读取时程曲线数据并整理后便得到各组激发范围,并根据文献[23]中的压碎区和裂隙区理论公式计算出解析值加以对比验证(表 6)。

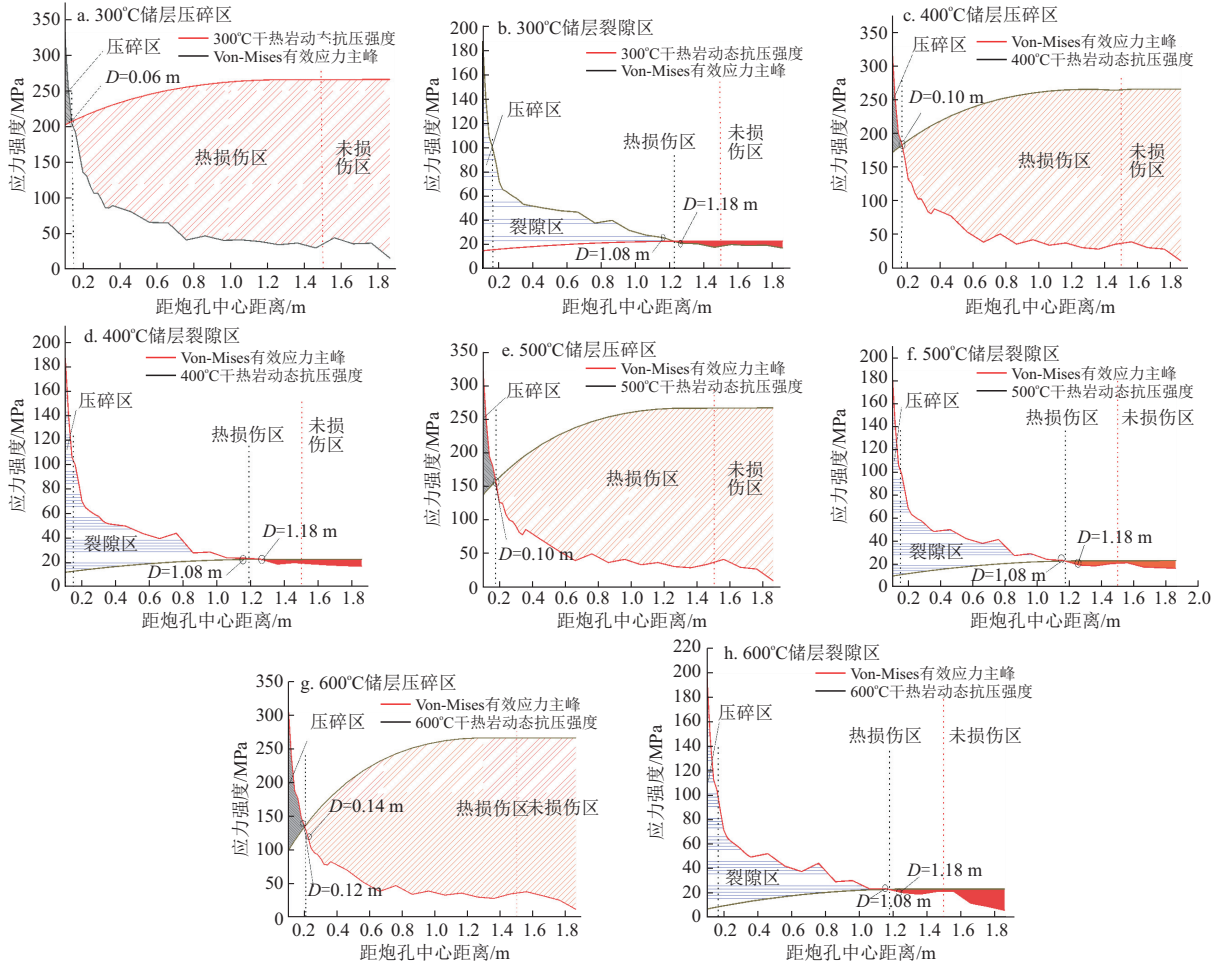


图 9 不同温度储层激发范围示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the reservoir excitation range at different temperatures

表 6 不同工况致裂器爆破激发范围

Table 6 Blasting excitation range of crackers under different working conditions

组别	压碎区长度	裂隙区长度	压碎区长度	裂隙区长度
	模拟值/m	模拟值/m	解析值/m	解析值/m
工况 1	0.1~0.12	0.88~0.98	0.133 1	0.853 7
工况 2	0.12~0.14	0.98~1.08	0.140 4	0.900 5
工况 3	0.1~0.12	0.88~0.98	0.129 7	0.831 9
工况 4	0.1~0.12	0.88~0.98	0.136 6	0.876 1
工况 5	0.08~0.1	0.68~0.78	0.126 2	0.809 4
工况 6	<0.02	<0.02	0.066 0	0.423 3

工况 1~5 的压碎区和裂隙区模拟值与公式的解析值极为接近,而工况 6 模拟值与解析值差距极大,分析认为,理论公式相对更适合计算耦合装药的情况,工况 1~5 致裂器直径与炮孔直径差值较小,不耦合系数缩小倍数与压力增大系数(n)大部分相互抵消,采用公式计算误差较小;而工况 6 不耦合系

数过小,相同装药密度下与解析公式计算出的耦合装药激发范围相差极大。综上分析,在不耦合系数较小的情况下,采用公式解析计算并根据生产要求选择合适的致裂器型号与配件参数,相比哈努卡耶夫经验值是更为准确的。

在压力增大系数取最大值 11 的情况下,95 型致裂器搭配 4.5,5 mm 定压片时压碎区长度比搭配 5.5 mm 定压片时分别下降了小于 2 cm 和 2~4 cm,裂隙区长度分别下降了 0~20 cm 和 10~30 cm;取最小值情况下($n=8$ 时)压碎区分别下降了小于 2 cm 和 2~4 cm,裂隙区长度分别下降了 0~10 cm 和 10~30 cm,所以可以看出,定压片厚度改变对压碎区长度影响较小,主要影响爆破裂隙区分布。另一角度讲,由于储层爆破激发主要利用裂隙区提高换热面积或辅助水力压裂,因而可以认为定压片厚度对致裂器在干热岩层中的爆破激发效果影响较大,所以不考虑成本情况下,在液态 CO_2 充装量及活化器用量允许范围内应尽可能提高定压片厚度从而获得更好的致裂效果。

4 结论与展望

4.1 结论

进行二氧化碳爆破的荷载分析,采用指数衰减型爆破时程曲线设置孔壁荷载,考虑钻井液对井壁附近储层的冷却影响设置储层材料属性以及温度场,建立二氧化碳爆破致裂激发干热岩储层的数值模型,并通过爆破过程中的最大主应力、应力张量以及 Mises 有效应力等云图,以及结合探针数据与岩石动态强度后绘制的激发范围图,综合分析后得出结论如下:

(1)二氧化碳爆破致裂过程中,炮孔附近压应力集中造成压碎区,压碎区外拉应力作用形成裂隙区。距离炮孔较近区域在爆破过程中存在 2 次有效应力集中,第一次为压应力作用,第二次为衍生拉应力和卸荷拉应力综合作用;距离炮孔较远区域存在 3 次有效应力集中,其中第一次为衍生拉应力作用,第二次为压应力作用,第三次为衍生拉应力和卸荷拉应力综合作用。

(2)储层初始温度对二氧化碳爆破压碎区范围影响较大,温度越高的干热岩层爆破激发后产生的压碎区范围越大,对裂隙区范围影响较小。由于储层激发主要利用爆破裂隙区,因此可认为二氧化碳爆破致裂器在不同温度的干热岩储层中均具有较为稳定的激发效果。

(3)定压片厚度改变对压碎区范围影响较小,主要影响爆破裂隙区分布。为取得良好储层激发效果,在液态 CO₂ 充装量及活化器用量足够的情况下应提高定压片厚度获得更大范围的裂隙区。致裂器管径(型号)主要影响装药不耦合系数,由于干热岩储层水平段(炮孔)井径较大,理论上采用管体直径小于 95 mm 的致裂器无法取得有效的激发效果。

4.2 展望

二氧化碳爆破致裂技术和干热岩储层激发是近年来比较热门的研究领域,均具有相对广阔的发展前景,但将二者相结合的研究目前开展过少,相关设备和理论都有待完善;由于缺少实际工程案例作为参考,本文主要参考前人的处理方法和炸药领域的部分理论,数值模拟分析了二氧化碳爆破建造干热岩储层的作用机理和激发范围,尚存在诸多不足之处,希望在今后的研究工作中针对以下问题进行补充研究:

(1)适用于干热岩储层的二氧化碳爆破致裂器已研制完成,但如何将其安全下放至储层位置,以及爆破后如何回收至地表仍是亟待解决的工艺难题;

(2)由于相变致裂技术为纯物理爆炸,与炸药爆

炸这种化学爆炸存在一定区别,后续还需要进行更多现场试验以总结爆破规律,为二氧化碳爆破领域提供更为准确合理的计算公式。

(3)由于软件功能和操作水平限制,本文只讨论了压碎区和裂隙区的大致范围,无法通过数值模拟手段研究出爆破后裂缝的形态和扩展规律;后续可以结合颗粒流模型等数值模拟手段揭示出爆生裂缝形态在不同工况下的演化规律,同时通过设计现场试验对模拟结果加以佐证。

参考文献:

- [1] 周总瑛,刘世良,刘金侠.中国地热资源特点与发展对策[J].自然资源学报,2015,30(7):1210-1221.
Zhou Z Y, Liu S L, Liu J X. Study on the characteristics and development strategies of geothermal resources in China[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7): 1210-1221 (in Chinese with English abstract).
- [2] Hammons T J, Gunnarsson A. Geothermal sustainability in Europe and worldwide[C]//2008 43rd International Universities Power Engineering Conference. IEEE, 2008.
- [3] 李德威,王焰新.干热岩地热能研究与开发的若干重大问题[J].地球科学:中国地质大学学报,2015,40(11):1858-1869.
Li D W, Wang Y X. Major issues of research and development of hot dry rock geothermal energy[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(11): 1858-1869 (in Chinese with English abstract).
- [4] Duchane D V. Geothermal energy from hot dry rock: A renewable energy technology moving towards practical implementation[J]. Renewable Energy, 1996, 9(1/4): 1246-1249.
- [5] 汪集旸,胡圣标,庞忠和,等.中国大陆干热岩地热能资源潜力评估[J].科技导报,2012,30(32):25-31.
Wang J Y, Hu S B, Pang Z H, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. Science and Technology Review, 2012, 30(32): 25-31 (in Chinese with English abstract).
- [6] Feng Y, Chen X, Xu X F. Current status and potentials of enhanced geothermal system in China: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 33: 214-223.
- [7] Huang W, Cao W, Jiang F. A novel single-well geothermal system for hot dry rock geothermal energy exploitation[J]. Energy, 2018, 162: 630-644.
- [8] 窦斌,高辉,周刚,等.我国发展增强型地热开采技术所面临的机遇与挑战[J].地质科技情报,2014,33(5):208-210.
Dou B, Gao H, Zhou G, et al. Opportunities and challenges of developing enhance geothermal system technology in China[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(5): 208-210 (in Chinese with English abstract).
- [9] 马峰,蔺文静,郎旭娟,等.我国干热岩资源潜力区深部热结构[J].地质科技情报,2015,34(6):176-181.
Ma F, Lin W J, Lang X J, et al. Deep geothermal structures of potential hot dry rock resources area in China[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(6): 176-181 (in Chinese with English abstract).
- [10] 陆川,王贵玲.干热岩研究现状与展望[J].科技导报,2015,33

- (19):13-21.
- Lu C, Wang G L. Current status and prospect of hot dry rock research[J]. Science and Technology Review, 2015, 33(19): 13-21(in Chinese with English abstract).
- [11] Cheng Y, Zhang Y, Yu Z, et al. Investigation on reservoir stimulation characteristics in hot dry rock geothermal formations of China during hydraulic fracturing [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(8): 3817-3845.
- [12] Zhang W, Wang C, Guo T, et al. Study on the cracking mechanism of hydraulic and supercritical CO₂ fracturing in hot dry rock under thermal stress[J]. Energy, 2021, 221: 119886.
- [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 C, Dou B, Tian H, et al. Process of carbon dioxide blasting to build EGS thermal reservoir [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(5): 247-252(in Chinese with English abstract).
- [14] Singh S P. Non-explosive applications of the PCF concept for underground excavation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(3): 305-311.
- [15] Vidanovic N, Ognjanovic S, Ilicic N, et al. Application of unconventional methods of underground premises construction in coal mines[J]. Technics Technologies Education Management-Ttem, 2011, 6(4): 861-865.
- [16] Caldwell T. A comparison of non-explosive rock breaking techniques [C]//Proceedings of the 12th Australian Tunnelling Conference. [S. l.]: [s. n.], 2005.
- [17] 董庆祥, 王兆丰, 韩亚北, 等. 液态 CO₂ 相变致裂的 TNT 当量研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(11): 84-88.
- Dong Q X, Wang Z F, Han Y B, et al. Research on TNT equivalent of liquid CO₂ phase-transition fracturing[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(11): 84-88(in Chinese with English abstract).
- [18] 孙小明. 液态二氧化碳相变致裂穿层钻孔强化预抽瓦斯效果研究[D]. 河南焦作: 河南理工大学, 2014.
- Sun X M. Research on strengthening gas pre-drainage effect with the fracturing technique by liquid CO₂ phase transition in layer through boring [D]. Jiaozuo Henan: Henan Polytechnic University, 2014(in Chinese with English abstract).
- [19] 秦江涛, 陈玉涛, 黄文祥. 高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透技术[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 80-84.
- Qin J T, Chen Y T, Huang W X. Combined permeability improved technology with high pressure hydraulic fracturing and carbon dioxide phase change cracking [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 80-84(in Chinese with English abstract).
- [20] 成诗冰, 洪志先. 液态 CO₂ 致裂技术在管廊基坑台阶开挖中的应用[J]. 工程爆破, 2021, 27(5): 80-89.
- Cheng S B, Hong Z X. Application of liquid CO₂ fracturing technology in bench excavation of utility tunnel foundation pit [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(5): 80-89(in Chinese with English abstract).
- [21] 周盛涛, 罗学东, 蒋楠, 等. 二氧化碳相变致裂技术研究进展与展望[J]. 工程科学学报, 2021, 43(7): 883-893.
- Zhou S T, Luo X D, Jiang N, et al. A review on fracturing technique with carbon dioxide phase transition[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(7): 883-893(in Chinese with English abstract).
- [22] 张晋红. 柱状药包在岩石中爆炸应力波衰减规律的研究[D]. 太原: 中北大学, 2005.
- Zhang J H. Study on the attenuation law of explosion stress wave in rock of cylinder charge [D]. Taiyuan: North University of China, 2005(in Chinese with English abstract).
- [23] 东兆星, 邵鹏. 爆破工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- Dong Z X, Shao P. Blasting engineering [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004(in Chinese).
- [24] 戴俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2001(2): 144-147.
- Dai J. Calculation of rock crushing circle and fissure circle in cylindrical charge blasting [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2001(2): 144-147(in Chinese with English abstract).
- [25] 史晓鹏, 张银平, 袁本胜. 爆炸荷载作用下应力波衰减规律研究[J]. 矿冶, 2010, 19(3): 15-17.
- Shi X P, Zhang Y P, Yuan B S. Research on weaken rules of stress wave by explosion loads [J]. Mining and Metallurgy, 2010, 19(3): 15-17(in Chinese with English abstract).
- [26] 朱振南, 田红, 董楠楠, 等. 高温花岗岩遇水冷却后物理力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 2): 169-176.
- Zhu Z N, Tian H, Dong N N, et al. Experimental study of physico-mechanical properties of heat-treated granite by water cooling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 169-176(in Chinese with English abstract).
- [27] 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 J Q, Dou B, Xu C, et al. Optimum design of CO₂ fracture initiator for thermal reservoir construction in hot dry rock [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1): 75-80(in Chinese with English abstract).