DOI: 10.11883/bzycj-2017-0057 文章编号: 1001-1455(2018)05-1051-06

静水压力对岩石在等离子体冲击下压裂效果的影响*

付荣耀[1,2,3],孙鹤鸿[1,2,3],徐旭哲[2,3],严 萍[1,2,3]

(1. 中国科学院大学,北京 100049;
2. 中国科学院电工研究所,北京 100190;
3. 中国科学院电工研究所电力电子与电气驱动重点实验室,北京 100190)

摘要: 为了了解与掌握深井下水中放电冲击波对岩石的破碎作用规律,建立了静水压力高达 35 MPa 的电脉冲压裂装置,可模拟深井近 3 000 m 下的围压,并进行了不同静水压下等离子体冲击压裂实验。电脉冲压裂装置最高工作电压 20 kV,最大储能 40 kJ。在 0~25 MPa 的静水压力条件下,对 6 块砂岩岩样进行了冲击压裂实验。实验结果表明,随着静水压力的升高,相同放电条件下压裂产生的裂缝长度和宽度明显降低。所以静水压力的升高将使得岩样损伤范围减小,孔隙度以及渗透率提升幅度下降。静水压力对冲击压裂后裂缝的形成、分布、生长具有明显的影响。与常压下形成的裂缝相比,施加围压后裂缝多集中在电极处,数量多,但是长度较短,存在不同程度的弯曲,甚至局部区域出现了环形裂缝。

关键词: 等离子体;静水压力;冲击波;脉冲放电;岩石压裂

中图分类号: O347.3 **国标学科代码:** 13015 **文献标志码:** A

非常规天然气、煤层气和页岩气等绿色能源成为各国日益青睐的资源。目前主要是通过水力压裂技术来改造能源储集层,美国页岩气的开采中广泛应用了水力压裂技术,但需要消耗大量的水资源,且水中添加的化学物质会对地下水造成污染。针对页岩气开采中带来的负面问题,提出了一种适用于致密气储层的低耗水、低伤害、低能耗的等离子体冲击压裂技术。该技术是以“液电效应”为理论基础的一种压裂手段。“液电效应”是指当电容器储能通过放电开关在水中电弧放电时产生强大的冲击波并伴随强烈辐射的一种现象。电弧放电时放电电流可达几十至数百千安培,放电时间在几十微秒至数百微秒,瞬时温度可达数千度,瞬时功率可达数百兆瓦,引起电极间等离子通道内压力升高,形成强脉冲压力波,产生的压力幅值可达几十至数百兆帕。当电弧放电产生的冲击波压力大于页岩层的抗压或者抗拉强度时,页岩层便会产生裂缝,提高岩样渗透率,从而提高页岩气井产量。公式(1)给出了一个冲击波压力的经验公式:

$$p_{\mathrm{m}}=\beta[\rho W/(\tau T)]^{1/2} \tag{1}$$

式中:p_{m}为冲击波的波前最大压力;β 为无因次的复杂积分函数,近似取 0.7;ρ 为液体密度;W 为放电通道单位长度的脉冲总能量;τ 为压力波前时间;T 为脉冲能量的持续时间。从上式可以看出,可以通过改变放电能量、冲击压力波波前时间和冲击波持续时间来调节冲击波压力的大小。

当前无静水压条件下水中等离子体水中放电技术已经逐步成熟。冲击波的形成、发展以及衰减过程基本原理也有了一定的研究基础,但是我国页岩气储层地质条件复杂,地表条件较差,埋藏深度都在 3 km 左右,此深度下页岩层承受几十兆帕的围压,围压成为影响深井下压力效果的一个关键因素[1-3]。由于现场实验测试研究难度较大,所以使用静水压力模拟围压,研究静水压力下水中等离子体放电特性以及冲击压力波的传播规律,为深井下等离子体冲击压裂工具的研制提供理论依据。

* **收稿日期:** 2017-02-22; **修回日期:** 2017-04-24
基金项目: 国家自然科学基金项目(51577176)
第一作者: 付荣耀(1986—),男,博士研究生,助理研究员,furongyao@mail.iee.ac.cn。

1 等离子体冲击压裂装置研制

研制了一套静水压下等离子体冲击压裂装置，装置各部件以及压裂实验内腔尺寸如图 1 所示。使用此装置产生的静水压力来模拟深井围压，最大静水压力达 35 MPa，进行等离子体冲击压裂实验时将砂岩岩样放入直径为 350 mm、高为 500 mm 的高压釜中，通过压力泵向高压釜注水增压，使静水压力达到设定值。

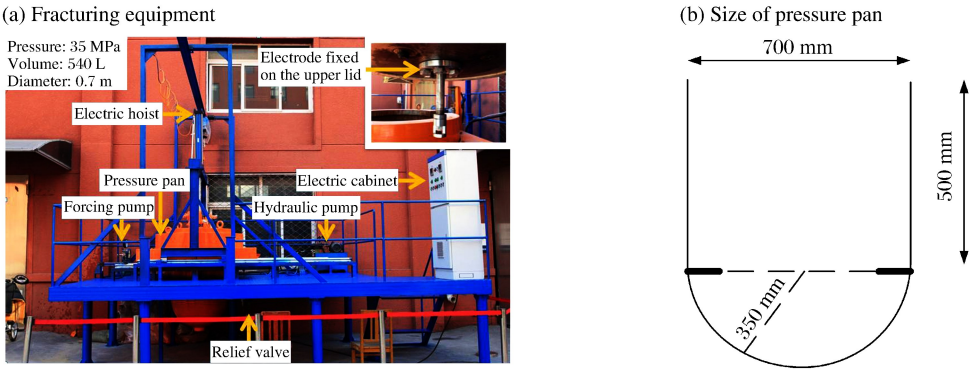


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental equipment

用于产生等离子体冲击波的大电流脉冲源电路结构如图 2 所示。其中恒流充电电源最大功率为 20 kW，输出电压在 0～20 kV 范围内可调，采用绝缘栅双极型晶体管 IGBT 功率模块组成功率变换系统，IGBT 工作在零电流切换模式下，使得充电电源在重复运行时减少开关管损耗和发热[4-14]。放电开关采用三电极空气开关，在重复冲击压裂工况下工作稳定，寿命高。

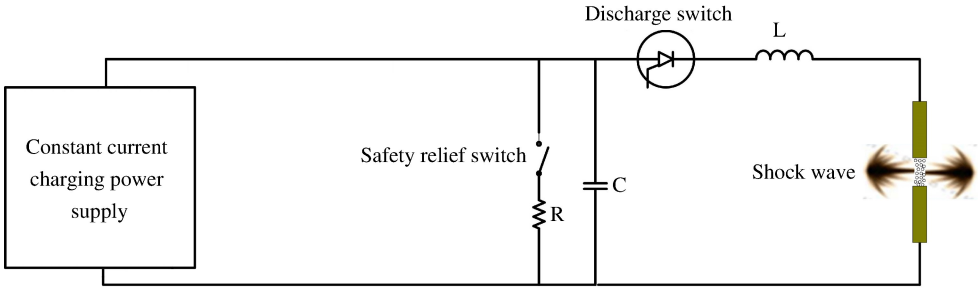


图 2 脉冲源电路结构图

Fig. 2 Schematic of the pulsed power system

图 2 中 L 为放电回路寄生电感(主要为放电电缆产生)。C 为 10 台 20 μF/20 kV 并联电容器组。R、C 和安全泄放开关组成了能量泄放回路。脉冲源负载为浸入水中的放电电极，电极为对极结构，使得冲击波向水平两侧传播，对两侧岩样进行压裂破碎。

2 实验研究

对砂岩岩样进行了静水压力下等离子体冲击压裂实验，岩样尺寸为 40 cm×40 cm×40 cm，中心钻孔直径 5 cm，深 22 cm。岩样力学强度测试表现为抗压强度 49.46 MPa，杨氏模量 11 255 MPa，泊松比 0.182 5。放电电极间距为 7 mm，放电电极采用对极模式，极间距离为 7 mm，储能电容均为 200 μF。实验过程中主要通



图 3 砂岩岩样

Fig. 3 Sandstone samples

过改变放电电压、放电次数和静水压力来研究等离子体冲压压裂后井筒裂缝的发展规律。放电电压主要是以 15 kV 和 18 kV 为主，进行时间间隔为 1 min 的重复性放电实验。实验时待放电电极深入孔内后，需将岩样上孔密封，以保证放电产生的冲击波向两侧作用。

2.1　无静水压力下冲击压裂实验

对岩样 CO1 共进行了 5 次 15 kV 放电试验，每次放电能量为 22.5 kJ。冲击压裂完成后对岩样进行测量，岩样表面缝高一面 330 mm，另一面 350 mm，如图 4 所示。



图 4　砂岩试样 CO1 压裂图片

Fig. 4　Fracture pictures of sandstone samples CO1

无静水压力放电时冲击压裂效果明显。能量足够大时，较少放电次数就可使得裂缝贯穿整个岩样，且裂缝清晰，但条数少；在天然岩样为实验对象时，裂缝对称出现。

2.2　不同静水压力下冲击压裂实验

分别进行了 0、5、10、15、20 和 25 MPa 静水压力冲击压裂实验，对应的实验对象分别是岩样 CO1、岩样 1、岩样 2、岩样 3、岩样 4 和岩样 5。每组实验时直至岩样出现明显的裂缝为止。冲击压裂后将岩样在距井底 5 cm 处横向切割，观察岩样井内裂缝和横切面裂缝随着静水压力变化而产生裂缝形态发展规律。

静水压力为 5 MPa 时 1 号岩样经过 5 次 15 kV 放电和 8 次 18 kV 放电压裂后裂缝如图 5 所示。

静水压力为 10 MPa 时，岩样 2 经过放电压裂后，岩样井内裂缝及岩样横截面切开后如图 6 所示。

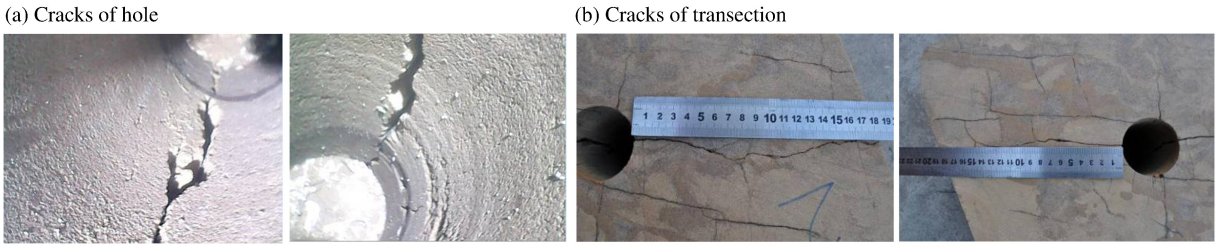


图 5　岩样 1 裂缝图片

Fig. 5　Fracture pictures of sandstone sample 1

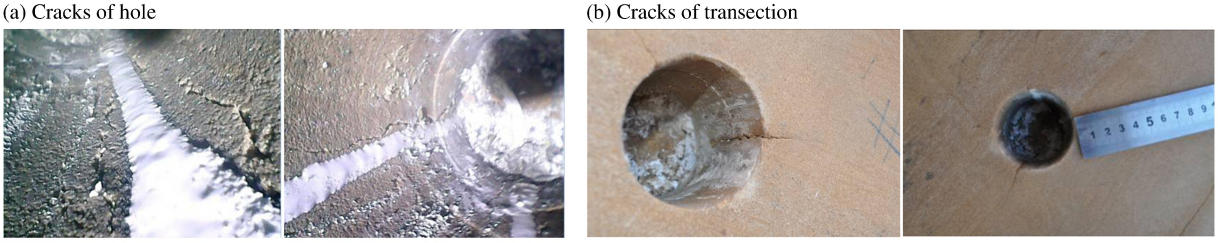


图 6　岩样 2 裂缝图片

Fig. 6　Fracture pictures of sandstone sample 2

静水压力为 15 MPa 时，岩样 3 经过 20 次 18 kV 放电冲击压裂后，岩样井内裂缝及岩样横截面如图 7 所示。

静水压力为 20 MPa 时，岩样 4 经过 12 次 15 kV 和 5 次 18 kV 放电冲击压裂后，岩样井内裂缝如图 8 所示。

静水压力为 25 MPa 时，岩样 5 经过 20 次 18 kV 放电压裂后，岩样井内裂缝如图 9 所示。

对上述实验结果进行了归纳总结，放电参数和冲击压裂后岩样裂缝参数如表 1 所示。

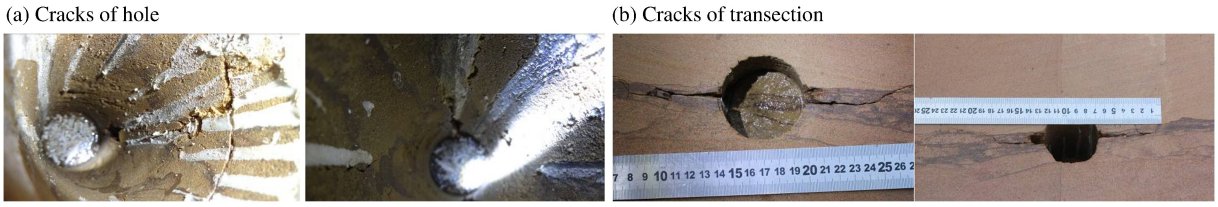


图 7 岩样 3 裂缝图片

Fig. 7 Fracture pictures of sandstone sample 3

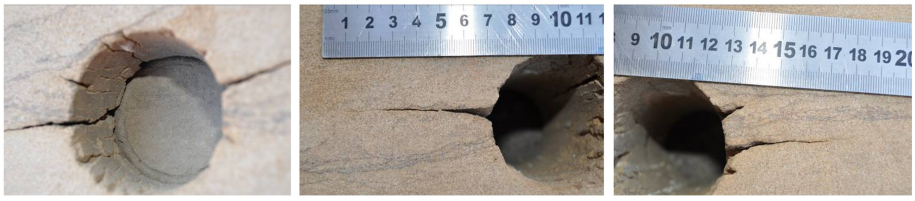


图 8 岩样 4 裂缝图片

Fig. 8 Fracture pictures of sandstone sample 4



图 9 岩样 5 裂缝图片

Fig. 9 Fracture pictures of sandstone sample 5

表 1 压裂实验数据

Table 1 Data for fracture experiments

砂岩编码	静水压力/MPa	工作电压/kV	放电次数	单次放电能量/kJ	裂缝高度/mm	裂缝径向长度/mm	井内裂缝条数
1	5	15	5	22.5	200	190,150	5
		18	8	32.4			
2	10	13	4	16.9	200	20,30	3
		15	3	22.5			
		18	10	32.4			
		15	4	22.5			
		18	15	32.4			
3	15	18	20	32.4	200	170,170	5,一条主缝
4	20	15	12	22.5	170	60,50	4
		18	5	32.4			
5	25	18	20	32.4	110	5	多裂缝,一条主缝
CO1	0	15	5	22.5	350	70	一条主缝

从表 1 中可以初步看出，单次脉冲放电电压越高、单次储能越大、放电次数越多，电弧压裂造缝效果越好。压裂造缝长度与单次放电电压、单次能量、放电次数成正比例关系。放电电压低时，需要更多放电次数来能达到压裂效果。从裂缝长度可以看出，随着静水压力的升高，裂缝高度尺寸越来越小，同样径向长度也会越来越短，但是裂缝的条数会随着静水压力的升高而变多。

3　结　语

进行了静水压力下水中放电冲击压裂实验，从岩样造缝效果中初步得到了静水压力对等离子体冲击压裂的影响规律。静水压力对岩样裂缝的形成，扩展具有抑制作用。相同能量的等离子体冲击波施加到岩样后，压裂产生的裂缝长度会随着静水压力的升高而减小，从而会导致裂缝的导流能力下降。静水压力能明显地影响裂缝的形成、分布和生长。与常压下形成的裂缝相比，施加静水压力后裂缝多集中在电极处，数量多，长度短，存在不同程度的弯曲，而且局部区域出现了环形裂缝。

参考文献：

[1] 石崇兵，李传乐. 高能气体压裂技术的发展趋势[J]. 西安石油学院学报，2000，15(5)：17-21.
SHI Chongbing, LI Chuanle. Development tendency of high energy gas fracturing technique[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 2000,15(5):17-21.

[2] 张保平，方竞，田国荣，等. 水力压裂中的近井筒效应[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(14)：2476-2479.
ZHANG Baoping, FANG Jing, TIAN Guorong, et al. Near wellbore effects in hydraulic fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(14):2476-2479.

[3] 周健，陈勉，金衍，等. 裂缝性储层水力裂缝扩展机理试验研究[J]. 石油学报，2007，28(5)：109-113.
ZHOU Jian, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental study on propagation mechanism of hydraulic fracture in naturally fractured reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(5):109-113.

[4] RUTGERS W R, JONG I D. Multi-tip sparker for the generation of acoustic pulses[J]. Sensor Review, 2003,23(1): 55-59.

[5] SUN Y, FU R, FAN A, et al. Study of rock fracturing generated by pulsed discharging under confining pressure [C]// 2015 IEEE Pulsed Power Conference (PPC). Austin, TX, USA: IEEE, 2015:1-4. DOI:10.1109/PPC.2015.7296927.

[6] BEES G L, TYDEMAN A. Capacitor charging power supply design for pulse to pulse repeatability applications[C]// Digest of Technical Papers: 12th IEEE International Pulsed Power Conference (Cat. No. 99CH36358). Monterey, CA, USA: IEEE, 1999,1:397-398. DOI:10.1109/PPC.1999.825494.

[7] BIEBACH J, EHRHART P, MULLER A, et al. Compact modular power supplies for superconduting inductive storage and for capacitor charging[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2001,37(1):353-357.

[8] POLLARD B C, NELMS R M. Using the series parallel resonant converter in capacitor charging application[C]// Proceedings of APEC'92 Seventh Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. MA, USA, USA: IEEE, 1992:245-252. DOI:10.1109/APEC.1992.228405.

[9] 杨小卫，严萍，孙鹞鸿，等. 35kV/0.7A 高压变频恒流充电电源[J]. 高电压技术，2006，32(5)：54-56.
YANG Xiaowei, YAN Ping, SUN Yaohong, et al. 35kV/0.7A high voltage high frequency constant charging power supply[J]. High Voltage Engineering, 2006,32(5):54 -56.

[10] FORSYTH A J, WARD G A, MOLLOV S V. Extended fundamental frequency analysis of the LCC resonant converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003,18(6):1286-1292.

[11] 邵建设，严萍. 高压电容器充电电源谐振变换器的定频控制[J]. 高电压技术，2006，32(11)：107-110.
SHAO Jianshe, YAN Ping. Constant switching frequency control of resonant converter of high voltage capacitor charging power supply[J]. High Voltage Engineering, 2006,32(11):107-110.

[12] 苏建仓，王利民，丁永忠，等. 串联谐振充电电源分析与设计[J]. 强激光与粒子束，2004，16(12)：1611-1614.
SU Jiancang, WANG Limin, DING Yongzhong, et al. Analysis and design of series resonant charging power supply[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004,16(12):1611-1614.

[13] NELMS R M, SCHATZ J E. A capacitor charging power supply utilizing a ward converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1992,39(5):421-428.

[14] 张东辉,严萍.高压电容器充电电源的研究[J].高电压技术,2008,34(7):1450-1455.
ZHANG Donghui, YAN Ping. Development in high voltage capacitor charging power supply[J]. High Voltage Engineering, 2008,34(7):1450-1455.

Effect of hydrostatic pressure on fracture of rock subjected to plasma impact

FU Rongyao[1,2,3], SUN Yaohong[1,2,3], XU Xuzhe[2,3], YAN Ping[1,2,3]

(1. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
2. *Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*;
3. *Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*)

Abstract: In order to understand the fracture law of rock by shock wave in deep water, an electric pulse fracturing device with hydrostatic pressure up to 35 MPa was established, which can simulate the confining pressure of 3 000 m underground. The experiments of plasma impact fracturing under different hydrostatic pressures were carried out. The maximum operating parameter of the fracturing device is 20 kV/40 kJ. Six sandstones were fractured by electric pulse under the hydrostatic pressure which ranges from 0 to 25 MPa. The experimental results show that the length and width of fracture decrease significantly with the increase of hydrostatic pressure under the same energy. So the destroy range of shock wave decreases and the porosity and permeability decline with the increase of confining pressure. The hydrostatic pressure has obvious influence on the formation, distribution and growth of the crack after impact fracture. Compared with the cracks formed by atmospheric pressure, cracks are concentrated in the electrode. The number of cracks is more but the length is shorter and there are different degrees of bending, even annular cracks occur in the local area.

Keywords: plasma; hydrostatic pressure; shock wave; pulse discharge; rock fracture

(责任编辑 张凌云)