

高能电弧脉冲压裂技术初探

周 健, 蒋廷学, 张保平, 赵 晓, 李洪春

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要: 为了掌握高能电弧脉冲压裂技术的基本原理, 研究影响其压裂效果的关键参数, 进行了高能电弧脉冲压裂理论分析和室内试验。理论分析可知, 高能电弧脉冲压裂所产生的冲击波压力与放电电压、脉冲能量和放电时间有关。室内试验显示, 电弧压力脉冲能在混凝土试样中的模拟井筒的井壁上造成裂缝, 裂缝呈径向分布, 在近井筒区域无明显弯曲。试验结果表明, 在高压电弧脉冲压裂中, 随着放电电压和单次能量的增高, 产生的脉冲压力峰值会增大, 造成的电弧脉冲裂缝的缝高和缝长也会增大。研究结果为进一步进行高能电弧脉冲压裂提供了试验数据。

关键词: 电弧脉冲压裂 放电电压 脉冲峰值压力 电弧裂缝 缝高 实验室试验

中图分类号: TE357.1⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2014)03-0076-04

Preliminary Study on High-Energy Pulsed Arc Fracturing

Zhou Jian, Jiang Tingxue, Zhang Baoping, Zhao Xiao, Li Hongchun

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: In order to get a better understanding of the principle of high-energy pulsed arc fracturing, determine key factors affecting its fracturing results, theoretical analysis and lab experiment were conducted for high-energy pulsed arc fracturing. The theoretical analysis indicates that the pulse wave pressure produced in high-energy pulsed arc fracturing depends on the discharging voltage, pulse energy and discharging time. Lab experiment shows that obvious fractures around the wellbore in concrete samples can be created by using different discharging voltages, the fractures are radial with no obvious bending in near wellbore area. The testing results show that the pulse pressure peak will increase with the increase of discharging voltage and pulse energy, and the fracture height and length will also increase. The research results provide testing data for further high-energy pulsed arc fracturing.

Key words: electric arc pulse fracturing; discharging voltage; pulse peak pressure; arc fracture; fracture height; laboratory testing

高能电弧脉冲压裂技术是采用高电压大电流在井下脉冲放电一段时间后, 在储层中造出一定长度的裂缝, 从而提高油气井产量。该技术具有储层伤害低、无需消耗大量水等特点。美国矿务局石油研究中心^[1]曾经进行过一系列电弧脉冲压裂技术的室内试验和页岩储层现场井组试验。室内试验结果表明, 电弧在页岩露头内部造成了明显的裂缝。现场试验表明, 4 口试验井井壁上产生了明显的电弧脉冲压裂裂缝。Ronghai Mao 等人^[2]的室内研究表明, 在模拟地应力条件下 (3~4 MPa), 高能电弧脉冲压裂的造缝效果, 不仅与放电参数有关, 还与储层

岩性有关。国外公司目前也在进行高能电弧脉冲压裂技术的前瞻性研究^[3]。国内的相关技术有电脉冲采油技术, 该技术以近井筒解堵为目的, 能量较低, 作用范围较短^[4-5]。为了掌握高能电弧脉冲压裂技

收稿日期: 2013-05-06; **改回日期:** 2014-01-14。

作者简介: 周健 (1979—), 男, 江苏镇江人, 2003 年毕业于江苏工业学院过程装备与控制工程专业, 2008 年获石油大学 (北京) 油气井工程专业博士学位, 高级工程师, 主要从事石油工程岩石力学及水力压裂、裂缝监测技术等方面的研究。

联系方式: (010)84988550, zhouj.sripe@sinopec.com。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司前瞻性研究项目“高能电弧脉冲压裂前瞻性研究” (编号: P13014) 部分研究内容。

术的基本原理,分析影响其压裂效果的关键参数,笔者采用理论分析与试验验证相结合的方法,进行了高能电弧脉冲压裂造缝机理研究,分析了冲击波压力与放电电压、单次能量和裂缝高度之间的关系。

1 高能电弧脉冲压裂的造缝原理

电弧脉冲压裂的原理是,通过高能量大电流在有限空间液体中进行瞬间放电,造成储层孔隙中的流体发生“闪蒸”效应,由此产生高温高压,达到造缝效果。电弧高温引起通道内压力升高,形成冲击压力波,压力波的最高压力可达几十至数百兆帕。当放电发生在有限空间内时,由于井壁的限制,容易造成较高的压力。当放电产生的压力大于材料(岩石等)的抗压强度时,材料便会产生裂纹并破碎。前人的研究表明,有限空间液电介质冲击波压力的经验公式为^[6]:

$$p_m = \beta \sqrt{\frac{\rho W}{\tau T}} \tag{1}$$

式中: p_m 为冲击波的波前最大压力,Pa; β 为无因次复杂积分函数,近似取 0.7; ρ 为流体密度,kg/m³;W 为放电通道单位长度的脉冲总能量,J/m; τ 为压力波前时间,s; T 为脉冲能量的持续时间,s。

Ronghai Mao 等人的试验研究表明^[2],能量在数百焦耳至几千焦耳时,放电产生的压力可达到 30~

40 MPa(与放电回路的电感和电阻密切相关)。
冲击波理论认为,在岩石上把压力转换为应力的效率取决于微爆炸能量和岩石阻抗的比值。当爆炸能量与岩石阻抗的比值相对较小时能够更加有效地把压力转换成应力,它们之间的关系为^[6]:

$$\sigma_{PF} = 2 p_m / (1 - Z) \tag{2}$$

式中: σ_{PF} 为在岩石上产生的应力,MPa; p_m 为冲击波(微爆)压力,MPa; Z 为微爆能量与岩石阻抗的比值。

理论分析可知,高能电弧脉冲压裂放电所产生的冲击波压力与放电电压、脉冲能量和放电时间有关,放电电压越大、能量越高,放电时间越短,所产生的冲击波的压力也越高。

2 高能电弧脉冲压裂放电试验方案

采用具有自主知识产权的高能电弧原理样机进行了高能电弧脉冲压裂室内试验。高能电弧原理样机主要包括充电控制与触发系统、储能电容器、放电开关、电能传输与电弧生成系统及安全保护系统部分(见图 1)。该原理样机的储能电容器最高储存 40 kJ 电能,最高工作电压 20 kV,放电电流的波形和脉冲宽度可根据需要进行调节,电流最高可达 70 kA。

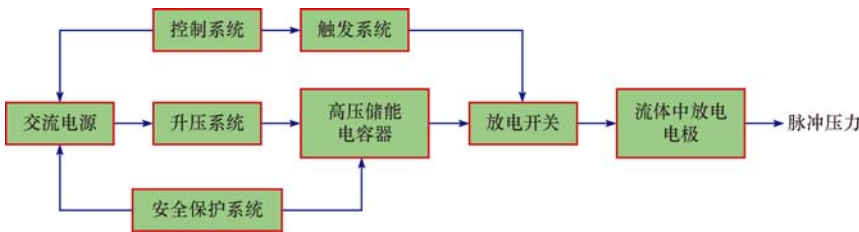


图 1 高能电弧原理样机工作流程
Fig. 1 Schematic diagram of high energy arc pulse prototype

采用混凝土试样进行电弧脉冲压裂试验。试样尺寸为 $\phi 48.0\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 。试样中心有 $\phi 6.0\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ 的模拟井筒。每次电弧脉冲压裂试验之前,模拟井筒中充满密度为 1.0 kg/L 的水。按水泥和砂子配比的不同将混凝土试样分为两种,配比分别为 2:1 和 1:1,两种试样的力学参数见表 1。

表 1 混凝土试样的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of concrete samples

水泥与砂子的配比	单轴强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
2:1	43.63	12.30	0.21
1:1	37.92	10.84	0.20

采用变电压和变能量的方法进行电弧脉冲压裂室内试验,考察电弧脉冲参数与裂缝缝高之间的相互关系。

3 电弧脉冲压裂试验结果及分析

3.1 造缝效果和放电波形特征

Ronghai Mao 等人^[2]的室内试验研究表明,在模拟三向地应力条件下,多次脉冲放电后,电弧脉冲压裂裂缝在井筒附近呈多方向起裂,在相对较远的区域,沿垂直于最小主应力方向延伸。

笔者所进行的电弧脉冲压裂试验由于没有模拟三向地应力,所以最有可能出现的电弧脉冲压裂裂缝形态是多方向起裂和扩展。图 2 为笔者所做高能电弧脉冲压裂试验的裂缝形态。从图 2 可以看出,电极在充满水的模拟井筒中放电后,裂缝主要沿着 3 个主要方向起裂和延伸,在近井筒区域无明显的扭曲;每个电弧裂缝都延伸到了试样的外边缘,每条裂缝的缝长都是 22 cm,缝高略有差异。



图 2 电弧脉冲压裂裂缝形态

Fig. 2 Shape of fractures created by high-energy arc pulse fracturing

在试验过程中,通过电压测量传感器记录放电电压,同时也通过示波器记录放电电流的波形。图 3 是与图 2 对应的高能电弧脉冲压裂时的电流波形和放电电压。从图 3 可以看出,当充电电压达到设定放电电压(5 kV)后,进行脉冲压裂试验,电压在 0.15 ms 后降至充电前的 0 V,同时电流在 0.10 ms 内完成了一个完整的放电波形。

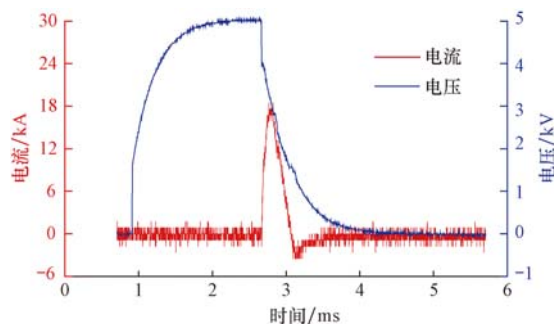


图 3 高能电弧脉冲压裂时的电流波形和放电电压

Fig. 3 Current waveform and discharging voltage during a high-energy arc pulse fracturing

3.2 高能电弧脉冲压裂室内试验结果

笔者采用混凝土试样进行高低电压电弧脉冲压裂试验,结果见表 2 和表 3。

由表 2 可知,对于力学参数相同的试样,随着放电电压增大,电弧裂缝的缝长和缝高会相应地动态增长,裂缝延伸到试样的外表面。在高压电弧脉冲压裂后,剖开试样发现裂缝呈径向分布,在近井筒区域无明显弯曲(见图 4)。

3.3 放电电压与裂缝高度的关系

图 5 为水泥和砂子配比为 1:1 和 2:1 的试样电弧脉冲压裂时缝高和放电电压的关系曲线。从图 5 可以看出,电弧压裂在试样中产生的裂缝缝高随放电电压的升高而增大。

表 2 低电压电弧脉冲压裂试验结果

Table 2 Tests results with low voltage pulse fracturing

试样	水泥与砂子的 配比	放电电压/ kV	裂缝数量/条	单翼裂缝长度/ cm	单翼裂缝高度/ cm	单次放电能量/ kJ	脉冲峰值压力/ MPa	放电次数
1-1	1:1	5	4	22	25	12.5	15.06	1
2-1	2:1	5	3	22	25	12.5	15.06	5
1-2	1:1	9	4	22	28	40.0	26.94	1
2-2	2:1	9	3	22	27	40.0	26.94	1

表 3 高电压电弧脉冲压裂试验结果

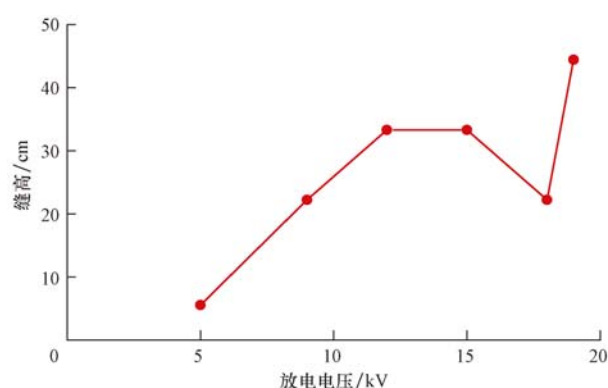
Talbe 3 Tests results with high voltage pulse fracturing

试样	水泥与砂子的 配比	放电电压/ kV	裂缝数量/条	单翼裂缝长度/ cm	单翼裂缝高度/ cm	单次放电能量/ kJ	脉冲峰值压力/ MPa	放电次数
1-3	1:1	12	4	22	30	14.4	27.11	4 次
2-3	2:1	12	4	22	26	14.4	27.11	1 次
1-4	1:1	15	4	22	30	22.5	33.89	1 次
2-4	2:1	15	4	22	31	22.5	33.89	1 次
1-5	1:1	18	4	22	25	6.5	34.34	3 次
2-5	2:1	18	4	22	28	6.5	34.34	4 次
1-6	1:1	19	4	22	32	36.0	42.87	1 次爆裂
2-6	2:1	19	4	22	32	36.0	42.87	1 次爆裂

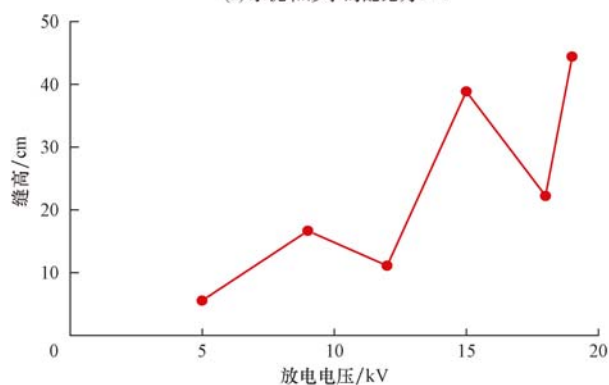


图 4 电弧脉冲压裂后井壁周围径向裂缝形态

Fig. 4 Shape of radial fractures around wellbore after electric pulse fracturing



(a) 水泥和砂子的配比为1:1



(b) 水泥和砂子的配比为2:1

图 5 缝高与放电电压的关系

Fig. 5 Relationship between fracture height and discharging voltage

图 6 为放电电压与单次能量、脉冲峰值压力的关系曲线。从图 6 可以看出, 单次能量和峰值压力随放电电压升高而增大。

将图 6 与图 5 相结合, 可知在其他条件相同的情况下, 放电电压、单次能量越高, 产生的电弧脉冲峰值压力越高, 造缝效果也越好。

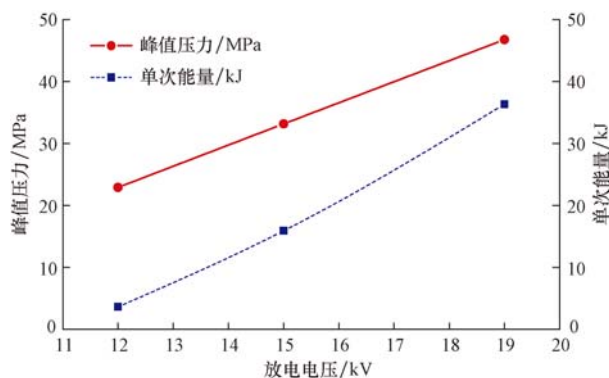


图 6 放电电压与单次能量、峰值压力的关系

Fig. 6 Relationship of discharging voltage, pulse energy and peak pressure

4 结 论

1) 在不考虑地应力的条件下, 高能电弧能在混凝土试样中造成多条非常明显的裂缝, 在近井筒区域呈径向扩展形态, 无明显的扭曲。

2) 单次放电电压越高, 所产生的脉冲峰值压力越高, 所造成裂缝的缝高也越高。

参 考 文 献

References

- [1] Melton N M, Theodore S C. Fracturing oil shale with electricity[J]. Journal of Petroleum Technology, 1968, 20(1): 37-41.
- [2] Mao Ronghai, de Pater Hans J, Leon Jean Francois, et al. Experiments on pulse power fracturing[R]. SPE 153805, 2012.
- [3] Leon Jean-Francois J, Fram J H. Pulse fracturing device and method; US, 8220537 B2[P]. 2012-07-07.
- [4] 班志强, 姚建豪, 补福. 井下低频电脉冲技术在河南油田的应用[J]. 测井技术, 2002, 26(3): 238-241.
Ban Zhiqiang, Yao Jianhao, Bu Fu. Application of downhole low frequency electric pulse vibrotechnique in Henan Oilfield[J]. Well Logging Technology, 2002, 26(3): 238-241.
- [5] 易兵, 董启山, 董瑞春, 等. 吉林油田大功率直流电场强化采油技术研究进展[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(3): 898-901.
Yi Bing, Dong Qishan, Dong Ruichun, et al. The advance of Jilin Oilfield strengthening recovery technology by powerful direct current electric field[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(3): 898-901.
- [6] 秦曾衍, 左公宁, 王永荣, 等. 高压强脉冲放电及其应用[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2000: 1-8.
Qin Cengyan, Zuo Gongning, Wang Yongrong, et al. High voltage pulse discharge and its application[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2000: 1-8.

[编辑 刘文臣]