

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.09.010

电弧压裂技术研究现状与发展

鄢宇杰¹, 付荣耀^{2,3}, 李楠¹, 孙鹤鸿^{2,3}, 严萍^{2,3}

(1. 中国石化西北分公司工程技术研究院, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:介绍了中国油气开采工程中使用的各种压裂技术优缺点,根据工程需要提出了电弧压裂技术,分析了电弧压裂技术的工作原理以及国内外研究现状,并对目前电弧压裂工程应用进行了分析,总结了电弧压裂技术对油气储层的适用性。根据目前电弧压裂装置深井下高温高压的作业难点,并提出了井下压裂工具改进的实施方案和大面积储层改造的思路,为电弧压裂技术的发展提供工程应用参考。

关键词:液电效应; 电弧压裂; 解堵; 脉冲放电

Research Status and Development of Arc Fracturing Technology

YAN Yujie¹, FU Rongyao^{2,3}, LI Nan¹, SUN Yaohong^{2,3}, YAN Ping^{2,3}

(1. Research Institute of Engineering Technology, Northwest Oilfield Branch Company, SINOPEC, Urumqi 830011, China; 2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The advantages and disadvantages of using various fracturing technology for gas production engineering oil in China is introduced. According to the need of the project put forward arc fracturing technology, the working principle of arc fracturing technology and the research status at home and abroad are analyzed. The analysis for the engineering application of the engineering application is made. The applicability of arc fracturing technology to oil and gas reservoirs are summarized. According to the difficulty of high temperature and high pressure in deep well, the improved implementation plan of underground fracturing device and the idea of large area reservoir reconstruction are put forward. The technical solutions provide reference for engineering application in the development of arc fracturing technology.

Key words: liquid electric effect; arc fracturing; plugging removal; pulse discharge

0 引言

当前国内经济发展及能源需求与环境问题的矛盾十分突出,仅依靠常规油气资源的开发已不能满足中国经济的需要,国家《十三五规划》中提出了“推动低碳循环发展,推进能源革命,加快能源技术创新,建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系。提高非化石能源比重,推动煤炭等化石能源清洁高效利用。有序开放开采权,积极开发天然气、煤层气、页岩气”。据统计,全球非常规天然气的总资源

量是常规天然气资源量的8.3倍,中国非常规天然气(包含致密砂岩气、煤层气、页岩气和天然气水合物)资源量 $280.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$,约为常规天然气资源量的5.01倍。中国非常规天然气具有巨大的开采潜力,一旦其得到充分利用将在一定程度上解决中国的能源及环保问题。从中国非常规天然气发展现状来看,影响非常规天然气开采的主要技术障碍是多数地区气层的低透气性,这使得通过地面钻井开采时,只能抽取到井旁周围近距离气体,在开采初期往往还能出现较高的产气量,但一旦钻孔附近的

收稿日期:2019-06-22; 修回日期:2019-08-24

基金项目:中石化西北油田分公司调研项目(高能电弧压裂破岩实验及评价)。

Research Project of sinopec northwest oilfield branch(Experiment and Evaluation on High Energy Arc fracturing Rock Breaking).

气体排尽后,较远处的气体不能大量补充到井中而造成供气衰竭,导致不久后产量急剧下降。因此需要对完井储层进行压裂改造,使得非常规天然气从储层裂缝中源源不断的渗出进入气井^[1-4]。

1 压裂技术应用现状

低渗透油气开采施工作业中常用的储层改造技术有酸化压裂、高能气体压裂、爆燃压裂技术、复合射孔技术以及水力压裂技术^[5-9]等。

酸化压裂是在高于地层破裂压力下用酸液作为压裂液,进行不加支撑剂的压裂。酸化压裂过程中靠酸液的溶蚀作用将裂缝的壁面溶蚀成凹凸不平的表面,以使停泵卸压后,裂缝壁面不会完全闭合。因此,具有较高的导流能力,对恢复和提高油井生产能力,效果明显。此法适用于碳酸盐岩油藏,不足之处是酸液的应用对土地环境造成污染,且控制裂缝中的酸液的滤失速率非常困难,在准确预测酸蚀裂缝导流能力和酸蚀裂缝长度上较为困难。

爆燃压裂技术是利用固态、液态和气态炸药在井筒内瞬间爆燃,产生上千度的高温和吉兆帕的高压,形成每秒数千米的爆炸冲击压力波。近井壁围岩在此冲击波和高温高压爆生气体作用下,产生很高的径向和切向压应力,这样大的压应力远远大于岩石的动态抗压强度,对井壁围岩产生粉碎性破坏,形成压碎区,不能形成多裂缝体系。在爆破附近区域边缘,冲击波迅速衰减为应力波。井壁围岩受到径向压应力的同时在切向方向上受到拉应力,而岩石又是脆性材料,其抗拉强度很低,因此,当切向拉应力值大于岩石的抗拉强度时,岩石即被拉断,所以由此形成裂缝。爆炸压裂技术可以在储层造成宏观裂缝但是岩层近井破坏性形变爆炸产物堵塞,降低渗透率,且目前炸药管控比较严格,在运输和储存等方面存在安全性问题。

高能气体压裂技术是利用火药、推进剂或炸药混合物爆燃产生高温高压冲击压力波在井筒周围产生多条辐射状裂缝,其压力脉冲比爆炸压裂平缓在毫秒的时间内即可实现对储层的压裂,在井壁能够产生较宽的裂缝,可以改善近井地带的渗流环境但是裂缝短并且容易闭合且高温高压气体对井筒有破坏作用。复合射孔技术是把射孔技术与高能气体压裂技术等其他高能量压裂手段融合在一起对地层进行复合作用,提高地层渗透导流能力,综合性压裂技术,需要联合作业,现场实施起来比较困难。

水力压裂是目前储层压裂改造的主要技术,它是借助高压将大量水、沙子以及化学物质的混合物通过钻孔打入地下,强冲击波压裂储层,使其出现更大更多裂缝,从而将其中的石油或天然气储备释放出来的开采方法。在非常规天然气的开采中,水力压裂技术已经应用在了高煤阶硬煤的煤层气的开发。然而在大量松软煤层的煤层气开发中,水力压裂技术受地应力场和煤层天然裂隙发育状况的控制,难以全方位有效传播,往往只能形成“线状”或不完整“网状”的煤储层改造效果,实际上无法达到真正意义上的区域增渗。美国在页岩气的开采中主要压裂技术是水力压裂。然而,中美两国页岩气资源状况有很大差别:美国页岩气储层地质构造简单,地表条件较好,适宜规模开发,产气量较好的页岩气田的产气深度都是1 000 m左右;而中国的页岩气储层地质条件复杂,地表条件较差,埋藏深度都在3 000 m左右。水力压裂技术在生产过程中需要消耗大量水资源,中国富含油气的开采地区大都是水资源匮乏的山地,水力压裂技术实施需要付出代价。非常规天然气的发展需要破解资源环境制约,减少对环境的影响主要方法之一是从技术方面着手。

为了解决中国非常规天然气开采中遇到地质特点区域性差异问题,实现岩层大面积可靠稳定改造,加快非常规天然气的压裂开采与增产,提出了一种电脉冲压裂技术。用于产生强冲击波的电脉冲压裂装置结构见图1。图1中: C 是储能电容器; L 为放电电感; R 为安全泄放电阻,负载为放电电极。

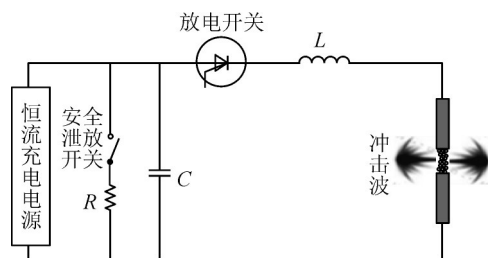


图1 电弧压裂装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of arc fracturing device

该技术原理是储能元件在水中放电时产生的放电电流可达几十至数百 kA,放电时间在几十微秒至数百微秒,放电电极之间形成等离子体通道,通道内瞬时温度可达数千度,瞬时功率可达数百兆瓦,向电极两侧发出几十至数百 MPa 的冲击压力波。当冲击波压力大于页岩层的抗压或者抗拉强度时,会直接压裂储层便会产生裂缝,做功后的激波会穿过裂缝继续传播,随着传播距离的增加,激波进一步衰减为地震波,在含有饱和油气水储层的

不同介质界面上产生剪切力。对于长期生产的储层,地震波可剥离渗流通道表面的附着堵塞物,实现解堵功能。对新开发储层,地震波对储层介质产生强烈扰动,能够改善增加微裂缝隙,减小表面张力,提高储层的渗流能力,促进吸附气体解吸。激波重复频率作用于储层时,还以疲劳模式降低储层的各种力学性能,扩大各种作用的有效区域。相比于以上传统的压裂技术,高功率电脉冲压裂技术具有低能耗、低伤害、易操作等特点,适用于低渗透油页岩储层及煤层气的油气增产。

2 电弧压裂技术目前研究现状

近年来国内外对于电弧压裂技术的应用有很多的工程性研究,从早期用于油田的井下电脉冲解堵开始,电脉冲压裂技术一直受到研究人员的关注,国内外多家科研机构以及公司针对电弧压裂技术的作用机理以及工程应用做出了大量的研究以及技术改进,不断推进电弧压裂技术的进步。

G Touya 等人搭建了 50 kV/30 kA/100 kJ 压裂装置,通过实验数据得出了放电产生的压力波与放电电流,电极距离的关系公式^[10-16]。美国科罗拉多大学进行过一系列电弧压裂技术的室内实验、现场矿场实验和现场浅井实验。其原理是采用高压交流电持续放电,在油页岩露头 and 试验井中进行长时间放电实验,实验产生了预想的裂缝。雪佛龙公司委托荷兰 Delft 大学进行高能电弧压裂室内实验。实验压裂对象采用 30 cm×30 cm×30 cm 的致密砂岩,实验装置配备了水力裂缝主动监测系统。俄罗斯和乌克兰均有产品出售(北京德瓦斯公司引进其设备),其储能为 1.5 kJ。华中科技大学刘思维,林福昌等人开展了亚音速流柱和超音速流注两种放电模式对激波强度的影响,同时也对建立了岩石动态压裂模型,对冲击波在岩石中作用过程进行了仿真^[18-19]。华中科技大学卢新培等人 在 2000 年就开展了等离子体水中放电特性、声辐射特性以及压力特性研究^[20-22]。国防科技大学王一博对水中放电激波的近场传播规律和聚束规律作出了理论上的研究,通过建立由等离子体声源、PCB 压力传感器和高速相机等构成的实验测量系统,研究了强声波脉冲引发的空化气泡运动和二次声辐射。清华大学李柳霞,王新新等人进行了水中铜丝电爆炸及冲击波的初步研究,研究了初始电容储能,放电电流幅值以及铜丝直径等因素对水中电爆炸沉积能量以及产生冲击波的影响。中国矿业大学秦勇与西安交通大学邱爱慈院士联合提出了基于脉冲功率技术的

高聚能重复强脉冲波激励煤储层的设想,通过一系列工程试验与探索,确立了煤层气井强激波煤储层增渗作业的工艺基础。西安交通大学周海滨等人在常压环境下通过引爆含能材料产生激波对砂岩进行了压裂,并测量了岩样内应变压力^[21-28]。中科院电工研孙鹄鸿等人开展了模拟地应力条件下高能电弧压裂实验研究,建立了 30 MPa 围压模拟系统,初步探索了围压条件下岩石压裂缝隙发展规律^[29-33]。太原理工大学贾少华等人也相继开展了高压脉冲在煤体增透与致裂实验工作,研究了激波前沿对冲击波的影响^[34-35]。内蒙古科技大学鲍先凯等人对煤样进行了单纯静水压裂(3 MPa)和相同水压力(3 MPa)、不同放电电压(5 kV, 10 kV)条件下的高压电脉冲水力压裂试验,应用 CT 扫描技术分析了煤样内部裂纹的起裂、发展、分布情况;建立数值模拟分析了水压电脉冲作用下裂隙的发展规律和裂缝周边的应力分布情况,得到了放电电压越高,裂隙易产生、易发展,放电电压越高,裂纹数量越多,裂纹的起裂时间更早,裂缝延伸长度更长,宽度更宽,致裂效果更好^[36]。

3 成熟的电弧压裂产品工程应用

目前国内外较为成熟的电弧压裂产品有俄罗斯的 NOVAS 公司,加拿大的 bluespark 公司,以及国内各大高校研究所自发研制的井下电脉冲设备。

俄罗斯的 NOVAS 公司利用等离子脉冲增产技术进行储层改造。它的工作原理是利用井下储层在不同地质条件下特有的固有频率,利用等离子体脉冲波做诱导,与储层固有频率产生水平方向的谐振,制造出大量的微裂缝隙,此缝隙不需要化学药剂及支撑剂,且不会再进一步合拢,很好的解决了石油井,煤层气井,页岩气井的低渗透率问题,为能源的增产提供环保,低成本,高效益的服务。诺瓦斯公司的井下脉冲压裂工具结构将储能电容器,高压模块,变压器,控制器,放电电极等集成在一起,结构紧凑。诺瓦斯公司电弧压裂井下设备在注水井作业数据见表 1。表 1 中的编号 2087,储层为碎屑层。注水量大幅度增大,诺瓦斯产品参数见表 2。

表 1 诺瓦斯注水井作业数据

Table 1 Injection well operation data

处理前		处理后	
注水量/(m ³ ·d ⁻¹)	注水压力/MPa	注水量/(m ³ ·d ⁻¹)	注水压力/MPa
29.2	83.0	150.0	96.0

表2 诺瓦斯公司产品参数

Table 2 Product parameters of NOVAS

参数	数值	参数	数值
工作深度/km	4	工作温度/℃	95~100
设备直径/mm	102	设备长度/mm	2 700
储能/kJ	1.5	输入电压(AC)/V	220
输入功率/W	500	输出功率/MW	102
放电电流/kA	250	脉冲时间/ μ s	55

加拿大 bluespark energy 公司生产出的电弧压裂设备具有体积小,能量小等特点,其产品已经在美国,加拿大等地油田应用。产品在不同的岩层以及井深条件下的工程作业数据见表3。

表3 加拿大 bluespark 公司产品工程应用

Table 3 Engineering application data of bluespark

井类别	井深/ km	岩石 性质	温度/ ℃	施工时 间/d	油增 产/%
酸化井	1.9	蒙特尼岩	65	45	166
注水井	1.0	砂岩	—	90	—
生产井	1.3	砂岩	43	90	65
除垢井	3.4	砂岩	120	180	173
裸眼井	浅滩	疏松砂岩	25	90	—

中科院电工研究所(IEE CAS)从20世纪70年代开始研制电脉冲解堵设备,在全国各大油田进行了测试作业,在油气的解堵增渗方面取得了很好的效果。电工所井下设备示意图见图2。电工所研制电弧压裂装置电气参数见表4。电工所研制的电弧压裂设备在华北油田的砂岩储层作业时获取的作业数据见表5。

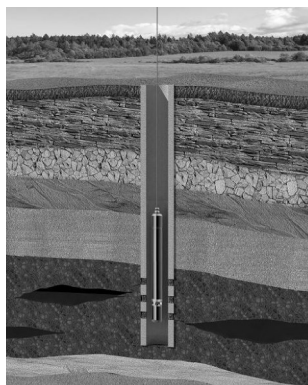


图2 中科院电工所井下设备设计图

Fig. 2 Schematic diagram of arc fracturing equipment

通过电弧压裂技术的应用实例分析,总结出目前电弧压裂设备对储层的适用性为以下4个方面。

1)油层生产过程中被污染堵塞的油层:在采油井中,一般处理初期有一定的产能,但产量下降较

表4 电工所设备参数

Table 4 Product parameters of IEE CAS

参数	数值	参数	数值
输入电压	220 V, 1 kVA	下井深度/m	$\leq 3\ 000$
工作电压/kV	5.3	外形尺寸	6 m $\times$ ϕ 102 mm
最大储能/kJ	5	环境温度/℃	+90
重复工作时间	20 s 可调	脉冲发射器频率/kHz	20

表5 中科院电工所井下电弧压裂解堵设备工程应用

Table 5 Engineering application data of IEE CAS

井号	厚度/ m	日产液/t		日产油/t		有效期/d
		施工前	施工后	施工前	施工后	
哈43-25	28.0	0.8	15.1	0.7	4.0	171
哈2-416	26.2	21.0	25.6	6.6	14.6	131
阿3-114	134.0	29.7	35.0	4.7	6.0	90
安41-8	6.0	5.2	9.2	3.3	6.5	95

快的井。

2)严重污染油气井层:因结垢、结蜡造成堵塞的油井;钻井或其他作用过程中有明显污染的油水井。

3)对水、酸有敏感性的油气层。

4)处理层段温度不高于105℃。由于受到井下工具工作环境温度所限制。

目前有些开采地区深井作业深度达三四千米,作业温度高达120℃以上,常规的电弧压裂设备由于受到各器件的耐温限制不能在深井下正常工作,必须对井下工具进行改造。

4 井下压裂工具改进方案

井下电弧压裂装置工作温度要求120℃以上时,仅仅选择高耐温器件不是绝对可靠,必须对井下设备结构进行改造,从物理隔热入手。

针对井下高温工作环境,对井下电弧压裂装置结构提供一种改进示意图。高能电弧压裂改进结构示意图见图3。

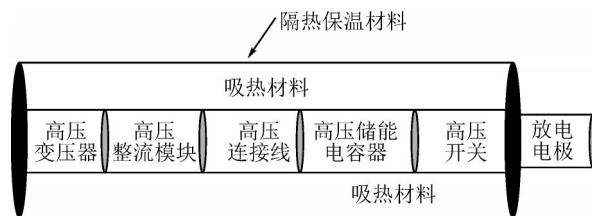


图3 井下高能电弧压裂装置改进结构示意图

Fig. 3 Improved structure diagram of arc fracture device

根据井下高温问题,提出了两种解决思路:

1)在电弧压裂设备外层缠绕导热系数低的保温层,在保温层外部再覆盖薄不锈钢薄层,起到隔绝外部温度以及增加耐磨性与刚性

2)利用真空杜瓦的绝热原理(保温瓶原理),用两层薄壁不锈钢构成封闭腔体,中间波纹状填充高强度微孔硅酸钙片作为支撑,然后整体抽真空。阻断空气对流,大幅度的降低固体导热。

5 结语

目前在非常规油气开采方面,电弧压裂技术在近井解堵,稠油井处理,注水井等方面应用较为成熟广泛,但是由于电弧压裂装置受到深井空间的制约,装置功率与能量不足以产生宏观远范围裂缝,不能造成大面积的缝隙网络,电弧压裂技术还没有应用到大规模的储层压裂作业中。此项技术可以与其他压力措施相互配合形成新的改造技术。如在天然裂缝较少的储层进行压裂时,可以先用电弧压裂在近井处制造微裂缝,再进行其他高能量的压裂技术推进压裂作用范围。

电弧压裂技术是一种较为绿色环保的手段,电弧压裂装置在深井下受到深井高达 120 ℃与几十兆帕围压的影响,此应用环境对电弧压裂装置的电气设备以及高密度储能电容器提出了改造方案,相信在不久的将来完善并推动电弧压裂技术在不同地质特性条件下非常规天然气深井开采中的应用。

参考文献:

- [1] 董大忠,邹才能,杨桦,等. 中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J]. 石油学报,2012,33(s1):107-114.
DONG Dazhong, ZOU Caineng, YANG Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(s1): 107-114.
- [2] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [3] 张金川,徐波,聂海宽,等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业,2008,28(6):136-140.
ZHANG Jinchuan, XU Bo, NIE Haikuan, et al. Exploration potential of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 136-140.
- [4] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 天然气工业,2010,30(10):7-12.
JIANG Yuqiang, DONG Dazhong, QI Lin, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 7-12.
- [5] 蒋金宝,林英松,阮新芳,等. 低渗透油藏改造技术的研究及发展[J]. 钻采工艺,2005,28(5):50-53.
JIANG Jinbao, LIN Yingsong, RUAN Xinfang, et al. Development of low permeability reservoir improvement[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(5): 50-53.
- [6] 胡永全,林辉,赵金洲,等. 重复压裂技术研究[J]. 天然气工业,2004,24(3):72-75.
HU Yongquan, LIN Hui, ZHAO Jinzhou, et al. Study on repetitive fracturing technology[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(3): 72-75.
- [7] 杨丙秀,蒋廷学,丁云宏,等. 低孔低渗储集层探井低伤害压裂技术研究与应用[J]. 石油勘探与开发,2005,32(2):119-122.
YANG Bingxiu, JIANG Tingxue, DING Yunhong, et al. Low damage fracturing technology for exploration wells in low porosity and permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration & Development, 2005, 32(2): 119-122.
- [8] 唐颖,唐玄,王广源,等. 页岩气开发水力压裂技术综述[J]. 地质通报,2011,30(s1):393-399.
TANG Ying, TANG Xuan, WANG Guangyuan, et al. Summary of hydraulic fracturing technology in shale gas development[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(s1): 393-399.
- [9] 唐远游,陶云奇. 应用水力压裂技术提高单一低渗煤层瓦斯抽采效果[J]. 煤矿安全,2012,43(9):1-3.
TANG Yuanyou, TAO Yunqi. Using hydraulic fracturing technology to improve gas extraction effect of single low-permeability coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(9): 1-3.
- [10] TOUYA G, REESS T, PÉCASTAING L, et al. Development of subsonic electrical discharges in water and measurements of the associated pressure waves[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 2006, 39(9): 5236-5244.
- [11] CHO S H, KANEKO K. Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 771-784.
- [12] OSHITA D, HOSSEINI S, MIYAMOTO Y, et al. Study of underwater shock waves and cavitation bubbles generated by pulsed electric discharges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(4): 1273-1278.
- [13] LAYCAK J F. The effects of hydrostatic pressure on the gas accumulation following a single spark discharge in a liquid dielectric[C]//Electrical Insulation Conference. [S.l.]: [s. n.], 1967:277-280.
- [14] CHEN Wen, MAUREL O, REESS T, et al. Experimental

- study on an alternative oil stimulation technique for tight gas reservoirs based on dynamic shock waves generated by pulsed arc electrohydraulic discharges[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, 88-89(SI): 67-74.
- [15] MARTIN J, REESS T, FERRON A D, et al. Influence of hydrostatic pressure and temperature on the water dielectric strength and on the dynamic pressure wave[C]// *Power Modulator and High Voltage Conference*. [S.l.]: IEEE, 2012:370-373.
- [16] MAUREL O, REESS T, MATALLAH M, et al. Electrohydraulic shock wave Generation as a means to increase intrinsic permeability of mortar[J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(12): 1631-1638.
- [17] CHEN Wen, MAUREL O, LA BORDERIE C, et al. Experimental and numerical study of shock wave propagation in water generated by pulsed arc electrohydraulic discharges [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2014, 50(5): 673-684.
- [18] 刘思维, 刘毅, 李显东, 等. 水间隙击穿放电模式对激波强度的影响分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(10): 2807-2815.
- LIU Siwei, LIU Yi, LI Xiandong, et al. Effect of electrical breakdown discharge modes on shock wave intensity in water[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(10): 2807-2815.
- [19] 刘毅, 李志远, 李显东, 等. 水中大电流脉冲放电激波影响因素分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(9): 2741-2750.
- LIU Yi, LI Zhiyuan, LI Xiandong, et al. Effect factors of the characteristics of shock waves induced by underwater high current pulsed discharge[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(9): 2741-2750.
- [20] 卢新培, 张寒虹, 潘垣, 等. 水中脉冲放电的压力特性研究[J]. *爆炸与冲击*, 2001, 21(4): 282-286.
- LU Xinpei, ZHANG Hanhong, PAN Yuan, et al. Study on the pressure characteristics of pulsed discharge in water[J]. *Explosion & Shock Waves*, 2001, 21(4): 282-286.
- [21] 卢新培, 潘垣, 张寒虹. 水中脉冲放电的电特性与声辐射特性研究[J]. *物理学报*, 2002, 51(7): 1549-1553.
- LU Xinpei, PAN Yuan, ZHANG Hanhong. The electrical and acoustical characteristics of pulsed discharge in water [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(7): 1549-1553.
- [22] 卢新培, 潘垣, 刘克富, 等. 水中放电等离子体状态方程的理论研究[J]. *高压物理学报*, 2001, 15(2): 103-110.
- LU Xinpei, PAN Yuan, LIU Kefu, et al. The state equations of plasma produced by pulse discharge in water [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2001, 15(2): 103-110.
- [23] 秦勇, 邱爱慈, 张永民. 高聚能重复强脉冲波煤储层增渗新技术试验与探索[J]. *煤炭科学技术*, 2014(6): 1-7.
- QIN Yong, QIU Aici, ZHANG Yongmin. Experiment and discovery on permeability improved technology of coal reservoir based on repeated strong pulse waves of high energy accumulation[J]. *Coal Science & Technology*, 2014 (6): 1-7.
- [24] HAN Ruoyu, ZHOU Haibin, LIU Qiaojue, et al. Generation of electrohydraulic shock waves by plasma-ignited energetic materials: I. Fundamental mechanisms and processes[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(12): 3999-4008.
- [25] ZHOU Haibin, HAN Ruoyu, LIU Qiaojue, et al. Generation of electrohydraulic shock waves by plasma-ignited energetic materials: II. Influence of wire configuration and stored energy[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43 (12): 4009-4016.
- [26] ZHOU Haibin, ZHANG Yongmin, LI Hengle, et al. Generation of electrohydraulic shock waves by Plasma-Ignited energetic materials: III. Shock wave characteristics with three discharge loads[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(12): 4017-4023.
- [27] 周海滨, 刘巧珏, 赵有志, 等. 脉冲大电流放电引爆含能材料产生冲击波的储层改造[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(4): 202-206.
- ZHOU Haibin, LIU Qiaojue, ZHAO Youzhi, et al. Transformation of oil-and-gas reservoir with shock waves by high current pulsed discharge ignited energetic materials explosion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(4): 202-206.
- [28] 孙凤举, 曾正中, 邱毓昌, 等. 一种用于油水井解堵的脉冲大电流源[J]. *高电压技术*, 1999, 25(2): 47-49.
- SUN Fengju, ZENG Zhengzhong, QIU Yuchang, et al. Pulse high current power supply used for dredging oil & water wells[J]. *High Voltage Engineering*, 1999, 25(2): 47-49.
- [29] 孙鹤鸿, 孙广生, 严萍, 等. 高压电脉冲采油技术发展[J]. *高电压技术*, 2002, 28(1): 41-42.
- SUN Yaohong, SUN Guangsheng, YAN Ping, et al. The development of the electric pulse oil-mining technology, high voltage engineering[J]. *High Voltage Engineering*, 2002, 28 (1): 41-42.
- [30] 金明剑, 孙鹤鸿. 不同参数条件下水中脉冲放电的电学特性研究[J]. *高电压技术*, 2004, 30(7): 46-49.
- JIN Mingjian, SUN Yaohong. Electrical characteristics of underwater pulsed discharge under different experiment parameters[J]. *High Voltage Engineering*, 2004, 30(7): 46-49.
- [31] 付荣耀, 周健, 孙鹤鸿, 等. 无围压下高压电脉冲放电在岩石压裂中的应用[J]. *高电压技术*, 2015, 41(12): 4055-4059.
- FU Rongyao, ZHOU Jian, SUN Yaohong, et al. Application of high voltage pulse discharge in rock fracturing without confining pressure[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41 (12): 4055-4059.

- [32] FU Rongyao, SUN Yaohong, FAN Ailong, et al. The research of high voltage power supply with a high-energy arc fracturing device[C]//IEEE Pulsed Power Conference (PPC). Austin, TX, USA: IEEE, 2015: 1-4.
- [33] SUN Yaohong, FU Rongyao, FAN Ailong, et al. Study of rock fracturing generated by pulsed discharging under confining pressure[C]//IEEE Pulsed Power Conference (PPC). Austin, TX, USA: IEEE, 2015: 1-4.
- [34] 贾少华, 赵金昌, 尹志强, 等. 基于高压电脉冲煤体增透的水激波波前时间变化规律研究[J]. 太原理工大学学报, 2015(6): 680-684.
- JIA Shaohua, ZHAO Jinchang, YIN Zhiqiang, et al. Research on change laws of front time in water shock-wave based on pulsed high-voltage discharge in permeability enhancement in coal seams[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015(6): 680-684.
- [35] 闫东, 卞德存, 阙梦辉. 水中高压放电基本现象分析[J]. 煤炭技术, 2014, 33(7): 294-296.
- YAN Dong, BIAN Decun, QUE Menghui. Basic phenomenon analysis of high voltage discharge in water[J]. Coal Technology, 2014, 33(7): 294-296.
- [36] 鲍先凯, 杨东伟, 段东明, 等. 高压电脉冲水力压裂法煤层气增透的试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2415-2423.
- BAO Xiankai, YANG Dongwei, DUAN Dongming, et al. The experiment and numerical simulation of coalbed methane penetration by hydraulic fracturing with high-voltage electric pulse[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2415-2423.
- 鄢宇杰(1986—), 男, 工程师, 现从事储层改造研究工作。
- 付荣耀(1986—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为脉冲功率以及应用(通讯作者)。