

# 煤层水力喷射成孔实验研究

杨兆中<sup>1</sup>, 谭 龙<sup>1</sup>, 彭 鹏<sup>2</sup>, 李小刚<sup>1</sup>, 覃兆勇<sup>3</sup>

(1.西南石油大学油气藏国家重点实验室, 四川 成都 610500; 2.中国石油塔里木油田塔西南勘探开发公司, 新疆 喀什 844000; 3.中国石油新疆油田分公司工程技术研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

**摘要:**煤层气藏在我国储量巨大且具有低压、低饱和、低渗透、非均质性强、储层构造复杂、煤岩易破碎的特点。水力喷射成孔工艺能够避免煤层坍塌, 消除常规射孔所导致的压实效应, 破碎煤岩改善储层的渗透性。通过大尺寸物理模型实验研究得出喷嘴直径变大且孔径增加、磨料浓度升高孔径增加但孔深先增加后减小、泵压升高孔深增加。筛选出一组泵压 25 MPa, 喷嘴直径 4 mm, 磨料浓度 6.6% 的作业参数, 对现场施工的参数设计有指导作用。

**关键词:**煤层气; 水平井; 水力喷射成孔实验; 孔体积

中图分类号: TE257 文献标识码: A

## Experimental research on hydraulic jet drilling in coalbed

Yang Zhaozhong<sup>1</sup>, Tan Long<sup>1</sup>, Peng Peng<sup>2</sup>, Li Xiaogang<sup>1</sup> and Qin Zhaoyong<sup>3</sup>

(1.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2.Southwest Tarim Exploration and Development Company, Tarim Oilfield, PetroChina, Kashgar, Xinjiang 844000, China; 3.Engineering Technology Institute, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China)

**Abstract:** There are huge coalbed methane reserves existing in our country. These CBM reservoirs have the characteristics of low pressure, low saturation, low permeability, high heterogeneity and complex reservoir structure, with the easily broken coal rocks. The technology of the pore-creating by the hydraulic jet can avoid the collapse of the coal bed, eliminate the compaction effect caused by the conventional perforation and break the coal petrography to promote the permeability of the reservoir. By the study of the large physical models, the conclusion was that the bore diameter increases by the increasing of the nozzle diameter. The abrasive concentration and the pore diameter increases but the bore depth decreases after the increasing and the pumping pressure and the bore depth increase. Finally, the operation parameters were optimized, that is, the pumping pressure is 25 MPa, the nozzle diameter is 4 mm and the abrasive concentration is 6.6%. These parameters are helpful for the parameter design of the site construction.

**Key words:** coalbed methane (CBM), horizontal well, hydraulic jet drill experiment, hole volume

## 1 煤层气水力喷射成孔研究目的

水力喷射成孔工艺是一种重要的射孔完井方式<sup>[1]</sup>。连续油管携带喷头从水平井段下入, 沿着煤层底板前行。到达射孔位置后, 连续油管带动喷头向

上部喷射。水柱离开喷嘴后以较高速度冲破煤岩储层, 形成了一定深度和直径的孔道。然后连续油管拖动喷头至下一位置。最终, 在不同位置不同方向喷出众多具有一定深度和直径的孔道。

煤层内部割理发育, 弹性模量相对常规砂岩储层较低, 而泊松比较高, 整体较脆, 钻完井的过程中

收稿日期: 2016-12-30。

第一作者简介: 杨兆中(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 油气藏增产改造理论与技术。

基金项目: 国家科技重大专项课题“多层复杂媒体结构区煤储层直井压裂技术研究”(2016ZX044-04-02)。

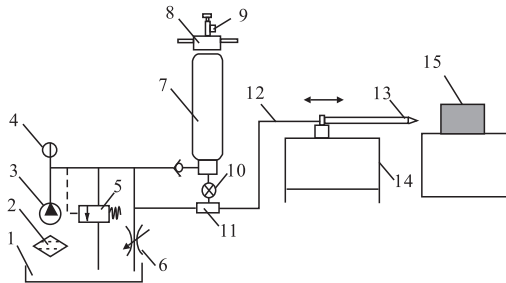
应力容易发生变化而导致煤层井壁失稳坍塌。且煤层气井钻井和固井过程中的液体渗入煤层,在煤层孔隙沉淀。

该工艺的增产机理主要是解除近井地带污染,松弛压实圈,避免炮弹射孔的压实污染,增加地层渗透率<sup>[2]</sup>。具有优点:①在煤层中产生稳定的孔道,能够避免煤层坍塌;②在煤层中各个方向喷出不同的孔,扩大了煤层的解吸面积,提高了煤层气产量;③克服煤层气井井周的应力集中,清除压实效应,增加煤层渗透率;④施工工序简单,能够有效地降低煤层气的开采成本。

综上所述,水力喷射成孔工艺在煤层气水平井开采中是可行的。其既能避免煤层坍塌,又可以有效地克服煤层气井井周产生的应力集中,改变井周附近的应力场,清除压实效应,改善井周围的渗透性。本文通过大尺寸物理模拟实验,研究了煤岩中水利喷射各参数对成孔形态的影响,这对水利喷射工艺在煤层气水平井完井中的应用具有指导作用。

## 2 实验设备

水力喷射成孔实验装置见图1。



1. 水箱;2. 过滤器;3. 柱塞泵;4. 压力表;5. 安全阀;6. 调压阀;  
7. 磨料罐;8. 旋盖;9. 卸压阀;10. 磨料截止阀;11. 混合腔;12.  
耐压胶管;13. 喷头;14. 自进装置;15. 煤岩夹持系统

图1 水力喷射成孔室内实验装置示意图

Fig. 1 Indoor experimental facility of hole-creating by hydraulic jet

在室内进行水力喷射成孔实验,实验装置主要包括三个单元,分别为动力单元、磨料供给单元、喷射单元。其中动力单元主要由高压柱塞泵和变频器组成;磨料供给单元主要由磨料罐、泄压阀和磨料截止阀等组成;喷射单元主要由喷嘴、加旋元件、喷头圆柱体等组成。

## 3 水力喷射成孔实验研究

### 3.1 工艺参数范围选择

#### 3.1.1 泵压优选

经过调试发现,当泵压为30 MPa时,煤样很容易坍塌破碎,基本不能形成稳定的孔;泵压不超过25 MPa时,基本能够形成稳定的孔。所以研究泵压取20 MPa、25 MPa和30 MPa时的喷射成孔规律。

#### 3.1.2 喷嘴直径优选

煤层气水力喷射现场施工中采用的喷嘴直径范围基本为4 mm左右,室内现有2 mm、3 mm和4 mm三种直径型号,所以喷嘴直径选为2 mm、3 mm和4 mm。

#### 3.1.3 磨料浓度优选

煤层气水力喷射现场施工的平均砂比(即磨料浓度)约为6%~8%,而现有装置的磨料浓度可调范围为3.6%~10.5%,研究磨料浓度取3.6%、6.6%和8.9%时的喷射成孔规律。

### 3.2 实验研究

水力喷射物理模拟实验采用正交实验法,所研究的工艺参数取值为三因素三水平,实验为三因素三水平实验,采用 $L_9(3^4)$ 正交表,通过正交设计软件可以得出正交实验方案计划见表1。

表1 正交实验方案计划  
Table 1 Schedule of orthogonal experiment

水平	因素		
	泵压/MPa	喷嘴直径/mm	磨料浓度,%
1	15	2	3.6
2	15	3	6.6
3	15	4	8.9
4	20	2	6.6
5	20	3	8.9
6	20	4	3.6
7	25	2	8.9
8	25	3	3.6
9	25	4	6.6

对于靶距的选取,根据廖华林<sup>[3-4]</sup>在对超高压水射流破岩的研究与实验团队前期的室内调试发现,当靶距取5 cm时,能够喷出较深较大的孔。所以在物理模拟实验中,将靶距固定为5 cm,喷射时间选为3 min。

## 4 结果与讨论

### 4.1 孔的形态分析

本实验目的是为了揭示不同工艺参数下的水力喷射成孔规律。表征参数为孔深和孔径。为了测量的准确性,对每组实验的孔深和孔径分别测三次,最后取平均值,表2为九组实验结果。

表2 实验结果  
Table 2 Test results

实验号	孔深/mm				孔径/mm			
	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	平均值	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	平均值
1	66	65	66	66	30	32	30	31
2	70	71	69	70	34	33	34	34
3	67	67	69	68	44	45	46	45
4	78	79	76	78	31	31	33	32
5	96	94	94	95	37	38	38	38
6	74	75	78	76	40	39	41	40
7	90	91	91	91	32	33	33	33
8	83	82	84	83	34	36	35	35
9	113	112	113	113	43	43	44	43

实验能够成功地喷出稳定的孔,且孔眼近似圆形(图2)。为了能够清晰地观察到孔道内部的形状,将实验后的煤样剖开,更方便地研究成孔形状以及测量孔的表征参数。



图2 水泥面成孔  
Fig. 2 Cement hole

由图3可以看出,孔成倒锥形,主要由圆形截面和V形垂面组成。所得结果与王建国<sup>[5]</sup>、林晓东等人

的成果相符合。高压水射流刚开始破碎煤岩的时候,由于成孔深度很浅,煤屑和磨料颗粒等可以向开阔的空间溅出,随着孔深的逐渐增大,煤屑和磨料颗粒反溅的空间逐渐被挤压,它们只能作用于孔壁,从而对附近的孔壁产生磨蚀,最终随着颗粒反溅出孔,会对整个孔壁都产生磨蚀作用,形成了由圆形截面和V形垂面组成的倒锥形的孔,而且孔内壁十分光滑,也证明了反溅颗粒的磨蚀作用。



图3 煤岩成孔剖面  
Fig. 3 Profile of coal hole

### 4.2 各影响因素对成孔效果的影响规律

由于室内研究中表征成孔效果的参数为孔深和孔径,而三个工艺参数对孔深和孔径的影响规律却不尽相同。为了更好地表征成孔效果,特引入了孔体积这一参数,把即将喷出的孔近似看作圆锥体,根据孔深和孔径就可以求得孔体积,孔体积把两个表征参数很好地综合统一起来,最优的工艺参数组即为对应的孔体积最大的那组参数。

由表3可以得出在条件9实验下得出的孔体积

表3 实验算的孔体积结果  
Table 3 Range analysis of influence factors of hole depth and aperture

实验号	孔深(平均值)/ mm	孔径(平均值)/ mm	孔体积(平均值)/ mm <sup>3</sup>
1	66	31	16 596
2	70	34	21 174
3	68	45	36 031
4	78	32	20 899
5	95	38	35 895
6	76	40	31 818
7	91	33	25 930
8	83	35	26 604
9	113	43	54 671

(下转第79页)