

梭型分压注入工具内流场 PIV 实验研究

吴迪 李伊兰 班久庆 张威 张伟文 杨兴宙

东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆 163300

摘要: 为了通过实验手段得到不同分子量、不同流量的聚合物溶液在流经不同槽数分压注入工具时的流场变化, 基于相似原理设计了一套可用粒子成像测速 (PIV) 系统进行实验的梭型分压注入工具模型, 并利用 PIV 系统对不同实验条件下流经该模型内的聚合物溶液进行连续拍摄, 得到大量的溶液运动瞬时图像。再利用 Tecplot 软件进行分析处理, 得到不同分子量、不同流量聚合物溶液在流经不同槽数分压注入工具时降压槽内流场的速度云图。分析实验结果表明: 聚合物溶液通过梭型分压注入工具时在降压槽底部出现漩涡; 流量越大, 漩涡中心越偏向外壁; 聚合物分子量越大或降压槽槽数越少, 管壁附近速度梯度越大; 分压注入工具的槽数对漩涡的位置无明显影响。实验为分压注入工具内部流场分布提供了一种新的研究方法。

关键词: 聚合物溶液; 降压槽; PIV; 分压注入工具

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2016.04.013

0 前言

利用分压配注器分层配注聚合物^[1-3]广泛应用于油田生产。其中的分压注入工具^[4-5]是利用流体经一系列节流间隙与膨胀腔通道, 使流体的动能不断变化, 造成不同的压力损失, 从而达到减压的目的^[6-7]。

目前, 由于实验手段的缺乏, 针对分压注入工具结构的优化和其降压槽内流场分布的研究均是通过运用 Fluent 等数值模拟软件进行模拟分析^[8-11], 缺乏足够的实验验证。近年来粒子成像测速 (PIV) 技术的发展^[12-17]使得通过实验手段获得形状复杂的降压槽内溶液瞬时动力学流动状态成为可能。本文基于相似原理设计了一种可用于 PIV 系统的梭型分压注入工具实验模型, 并利用该装置进行实验, 分析了不同条件下分压注入工具内聚合物溶液流场的分布规律。实验为分压注入工具内的流场研究提供了一种新的方法, 并为分压注入工具结构的优化提供了验证手段和技术支持。

1 相似准则下实验模型的设计

综合考虑实验观测效果和模型加工难度, 在满足几何相似前提下, 计划将分压注入工具的降压槽放大, 放大后的模型尺寸见图 1。

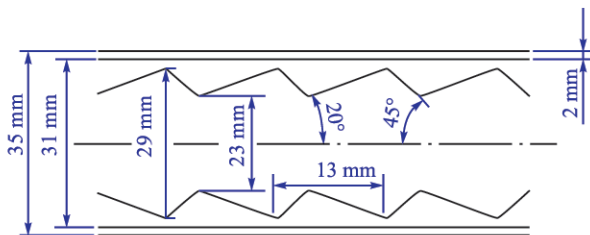


图1 分压注入工具实验模型中降压槽尺寸

其中: 实验模型套管外径为 35 mm、内径为 31 mm, 套管壁厚 2 mm, 降压槽外径为 29 mm、内径为 23 mm, 槽间距 13 mm, 前槽间角 45°, 后槽间角 20°。

由于本次试验中黏性力起主导作用, 依据黏性力相似准则, 只需在保证原型与模型几何相似及运动相似的

收稿日期: 2016-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目“分注工具对三元复合体系作用机理及三元复合体系与油层的匹配关系研究”(QC2015056); 黑龙江省自然科学基金项目“分质过程对三元复合体系黏度和流度控制能力影响的机理研究”(NEPUQN 2014-27)

作者简介: 吴迪(1990-), 男, 黑龙江明水人, 硕士研究生, 主要从事复杂流体与流动的研究工作。

基础上,达到雷诺数相等即可使实验模型内流动与现场实际流动达到动力相似。

非牛顿流体在分压注入工具内流动的广义雷诺数为^[18-19]:

$$Re' = \frac{Dv\rho}{K'\left(\frac{8v}{D}\right)^{n'-1}} = \frac{D^{n'}v^{2-n'}\rho}{8^{n'-1}K'}$$

$$\text{经过计算得到 } K' = K\left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n; n' = n$$

$$\text{即: } Re = \frac{D^n v^{2-n} \rho}{8^{n-1} K \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n} = \frac{D^n v^{2-n} \rho}{\frac{K}{8} \left(\frac{6n+2}{n}\right)^n}$$

$$\text{实验需满足 } \frac{Re_p}{Re_m} = \frac{v_p d_p \rho_p}{v_m d_m \rho_m} = 1$$

在横截面为同心圆的条件下,分注工具水力直径即为分注工具特征长度^[20]。 χ 为湿周, D 为水力直径, d 为特征长度:

$$R_h = A/\chi = \frac{4\pi(R^2 - \bar{r}^2)}{\chi}$$

$$= \frac{4\pi(R^2 - \bar{r}^2)}{2\pi(R + \bar{r})} = 2(R - \bar{r})$$

且 $G = v \cdot A$; $A = 4\pi(R^2 - \bar{r}^2)$, 即:

$$\frac{Re_p}{Re_m} = \frac{G_p d_p \rho_p / A_p}{G_m d_m \rho_m / A_m} = \frac{G_p / \chi_p}{G_m / \chi_m} = \frac{G_p / (R_p + \bar{r}_p)}{G_m / (R_m + \bar{r}_m)} = 1$$

所设计的模型与原型尺寸之比 1.62 : 1。实验时调节通过分压注入工具模型的流量,即可使实验与现场实际情况达到动力相似。

为保证良好的粒子成像效果,实验所用模型均使用亚克力材料制作。本次实验共制作了三套分压注入工具模型,降压槽槽数分别为 5、10、18。

2 实验方案与实验步骤

2.1 溶液组分

实验中配置聚合物溶液所用水为人工合成盐水(矿化度 6 778 mg/L);聚合物为大庆炼化厂产,分子量分别为 1.6×10^7 、 1.9×10^7 、 2.5×10^7 的聚丙烯酰胺(HPAM)。

2.2 实验流程

实验用 PIV 系统为 MiniPIV。高速摄像机曝光时间为 1/128 000 s。所用示踪粒子为空心玻璃微珠($d \leq 10 \mu\text{m}$),加量为 0.1 g/L。

实验流程见图 2。

实验均在室内无干扰光源条件下进行。

2.3 实验方案

分别针对聚合物分子量、溶液流量、模型槽数 3 个变量进行 3 组 PIV 测试实验。具体方案见表 1。

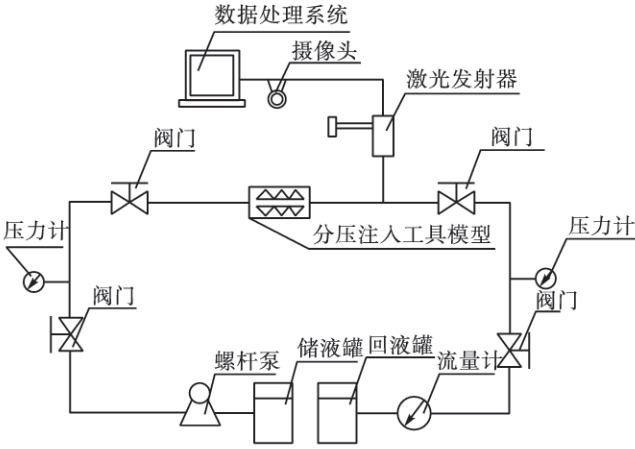


图 2 实验流程

表 1 速度场 PIV 测试的实验方案

方案号	聚合物分子量	聚合物浓度/(mg·L ⁻¹)	溶液流量/(m ³ ·d ⁻¹)	模型槽数
1	1.6×10^7	2 000	20	18
	1.9×10^7			
	2.5×10^7			
2	2.5×10^7	2 000	20	18
			30	
			50	
3	2.5×10^7	2 000	50	5
				10
				18

2.4 实验步骤

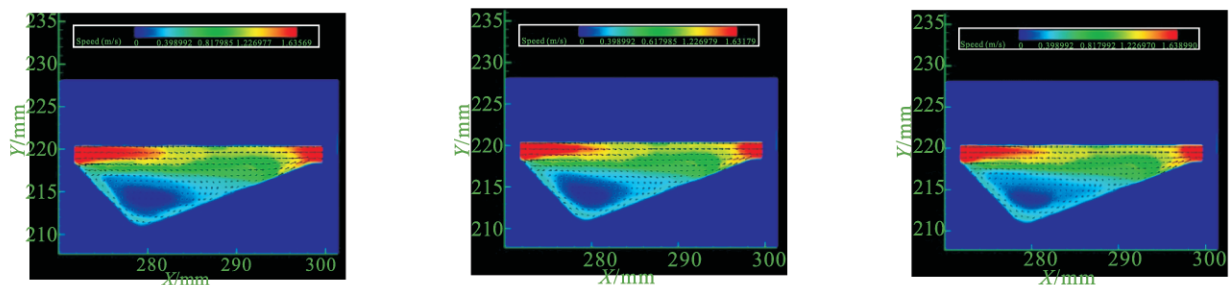
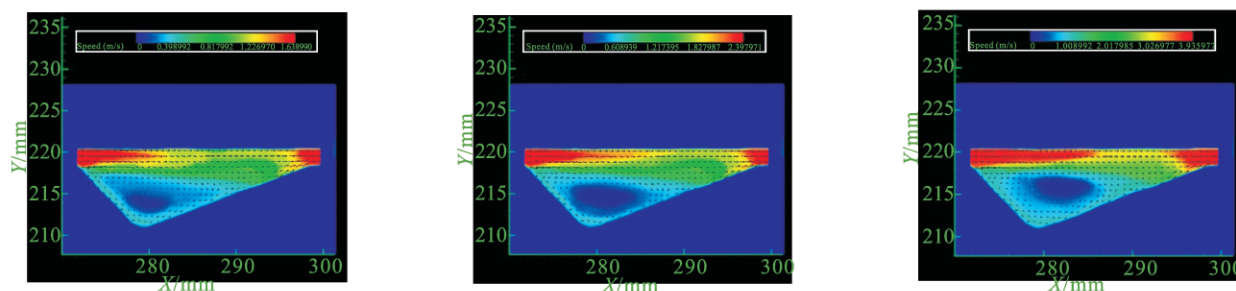
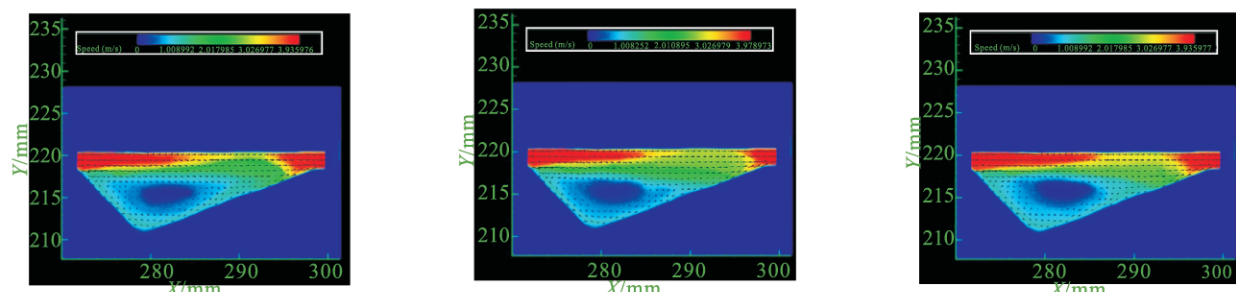
- 1)按图 2 所示流程连接实验装置。
- 2)配置实验所需不同种类聚合物溶液并加入示踪粒子。
- 3)进行粒子成像测速实验,拍摄不同实验条件下溶液经过分压注入工具末尾降压槽时的溶液粒子成像数据。
- 4)运用 Tecplot 对采集到的图像进行处理分析。

3 结果与分析

由 Tecplot 处理得到采取不同方案时单个降压槽内速度分布图(速度云图上不同的颜色代表不同的速度大小,在同一幅图中,红色表示最大速度,蓝色表示速度为 0),见图 3~5。

分别将不同聚合物分子量、不同流量、不同降压槽槽数条件下,降压槽内聚合物溶液轴向平均速度进行比较,见图 6。

通过图 6 对比可以看出:分注工具内环空最小间隙处速度最大,随着过流面积增大,溶液速度开始减小,过流面积转而逐渐减小,至流过约 2/3 槽后,流速转而增大;槽内中心处速度最小,靠近降压槽壁速度增大,贴近壁面附近速度趋近于 0。

a) 1.6×10^7 分子量b) 1.9×10^7 分子量c) 2.5×10^7 分子量图3 不同分子量聚合物溶液以 $20 \text{ m}^3/\text{d}$ 流量流经 18 槽分压注入工具速度云图a) $20 \text{ m}^3/\text{d}$ b) $30 \text{ m}^3/\text{d}$ c) $50 \text{ m}^3/\text{d}$ 图4 不同流量下 2.5×10^7 分子量聚合物溶液流经 18 槽分压注入工具速度云图

a) 5 槽

b) 10 槽

c) 18 槽

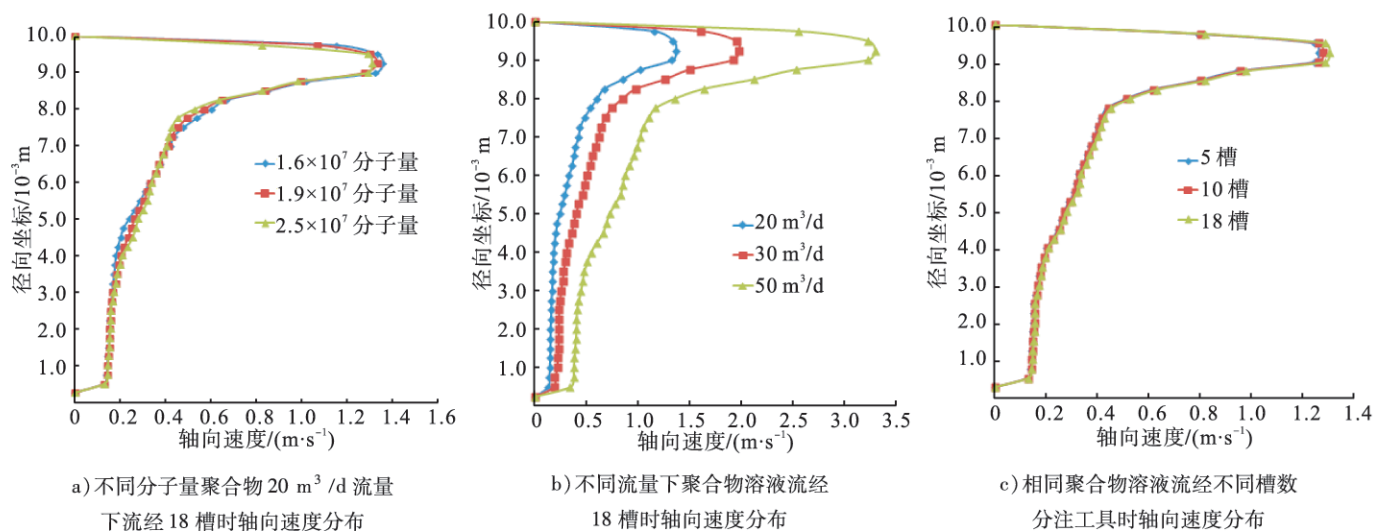
图5 2.5×10^7 分子量聚合物溶液以 $20 \text{ m}^3/\text{d}$ 流量流经不同槽数分压注入工具速度云图a) 不同分子量聚合物 $20 \text{ m}^3/\text{d}$ 流量
下流经 18 槽时轴向速度分布b) 不同流量下聚合物溶液流经
18 槽时轴向速度分布c) 相同聚合物溶液流经不同槽数
分注工具时轴向速度分布

图6 不同实验条件下分注工具内轴向平均速度分布对比

环空最小间隙处的溶液流动方向与流体整体流动方向相同。随着流体流动,装置过流面积增大,流动逐渐向下扩散,在槽底处出现顺时针漩涡,至再次接近装置环空最小间隙处,流动方向回归溶液整体流动方向。流量越大,槽底的漩涡中心越向外壁偏移;流量越小,漩涡中心越向槽底偏移;且流量越大,紊流区域越大,溶液越容易形成紊流。流量相同但溶液组分或槽数不同时,漩涡位置改变并不明显。

环空最小间隙附近速度梯度大,这主要是由于接近装置内壁,流速由于管壁摩阻、分子附着力、黏性力的作用而降低,槽底溶液流动空间陡然增大引起的。环空最小间隙轴向最大速度随聚合物分子量(即黏度)增大或降压槽数减小而减小,环空最小间隙两端速度梯度随聚合物分子量增大或降压槽数减小而增大。

聚合物溶液的聚合物分子量、流量一定,分注工具槽数不同时,流经分注工具降压槽内的漩涡位置和溶液质点流动方向无明显差异。

4 结论

1) 溶液流经分压注入工具时,降压槽内环空最小间隙处速度最大,随过流面积增大,速度逐渐减小,至流过约 $2/3$ 槽长后,流速开始逐渐增大;槽内中心处速度最小,靠近降压槽壁速度增大,贴近壁面附近速度趋近于0。

2) 聚合物溶液高速通过降压槽时在槽底出现漩涡,流量越大漩涡中心越向降压槽外壁偏移,流量越小漩涡中心越向槽底偏移。

3) 环空最小间隙处最大速度随聚合物分子量增大或降压槽数减少而减小,环空最小间隙两端速度梯度随聚合物分子量增大或降压槽数减少而增大。

4) 流量相同时,分压注入工具的降压槽槽数对漩涡位置无明显影响。

参考文献:

- [1] 张玉荣,闫建文,杨海英,等. 国内分层注水技术新进展及发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(2): 102-107.
- Zhang Yurong, Yan Jianwen, Yang Haiying, et al. Technologies of Separated Layer Water Flooding: An Overview[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(2): 102-107.
- [2] 陈晓红,段宏. 聚合物单管多层分注技术原理及应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(4): 53-55.
- Chen Xiaohong, Duan Hong. Principle and Application of Polymer Separate Injection Technology[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(4): 53-55.
- [3] 马宏伟,单晶,申秀丽,等. 聚合物低剪切井下配注器的研制及应用[J]. 石油机械, 2005, 33(8): 33-34.
- Ma Hongwei, Shan Jing, Shen Xiuli, et al. Development and Application of Polymer Low Shear Downhole Injection Device[J]. China Petroleum Machinery, 2005, 33(8): 33-34.
- [4] 毕红军,丛洪良,张健,等. 新型地面恒流量配注器的研制与应用[J]. 石油矿场机械, 2005, 34(4): 76-77.
- Bi Hongjun, Cong Hongliang, Zhang Jian, et al. Study and Application of Newly Developed Distributor[J]. Oil Field Equipment, 2005, 34(4): 76-77.
- [5] 韩振国,胡胜国,潘国华. 聚合物单管多层滑套开关配注器研制[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(6): 66-68.
- Han Zhenguo, Hu Shengguo, Pan Guohua. Study of Multilayer Polymer Single Sliding Sleeve Switch Allocator[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(6): 66-68.
- [6] 柴凤忠,张玉华,于微微. 聚驱分层注入工艺技术研究[J]. 油气田地面工程, 2007, 26(11): 56.
- Chai Fengzhong, Zhang Yuhua, Yu Weiwei. Study on the Technology of Polymer Flooding and Layered Injection[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2007, 26(11): 56.
- [7] 单晶,马宏伟,袁云,等. 聚合物驱井下单管多层分注工艺[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(3): 35-37.
- Shan Jing, Ma Hongwei, Yuan Yun, et al. Injection Process of Underground Single Multilayer Polymer Flooding[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(3): 35-37.
- [8] 孟令尊,崔海清,王常斌,等. 分层配注器波纹环空流场的数值模拟[J]. 石油机械, 2006, 34(2): 15-17.
- Meng Lingzun, Cui Haiqing, Wang Changbin, et al. Numerical Simulation for Corrugation and Annular Flow Field of a Stratification Injection Allocator[J]. China Petroleum Machinery, 2006, 34(2): 15-17.
- [9] 孟令尊,崔海清,崔金哲,等. 非牛顿流体在配注器波纹杆环空中流动的数值模拟[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(3): 30-33.
- Meng Lingzun, Cui Haiqing, Cui Jinzhe, et al. Numerical Simulation of Annulus Flow of Non-Newtonian Fluid in Injection Allocation Regulator Corrugated Pole[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2006, 30(3): 30-33.
- [10] 蔡萌,张晶明,李滕. 幂律流体在梭形内管环空中流动的流场数值分析[J]. 大庆师范学院学报, 2013, 33(6): 86-89.
- Cai Meng, Zhang Jingming, Li Meng. Numerical Analysis of the Flow Field in the Air Flow of a Power Law Fluid in a Shuttle Shaped Inner Tube[J]. Journal of Daqing Normal University, 2013, 33(6): 86-89.
- [11] 冯定,李喜梅,黄朝斌,等. 分层注聚配注器环空聚合物流动研究[J]. 石油机械, 2009, 37(10): 7-10.
- Feng Ding, Li Ximei, Huang Chaobin, et al. Research on

- the Flow of the Annular Polymer in Separate-Layer Polymer Injectional Locator[J]. China Petroleum Machinery, 2009, 37 (10): 7-10.
- [12] 阮 驰,孙传东,白永林,等. 水流场 PIV 测试系统示踪粒子特性研究[J]. 实验流体力学, 2006, 20(2): 72-77.
Ruan Chi, Sun Chuandong, Bai Yonglin, et al. The Characteristics of the Tracer Particles Used in Water Flow Field for PIV System[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20 (2): 72-77.
- [13] 杨小林,严 敬. PIV 测速原理与应用[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2005, 24(1): 19-20.
Yang Xiaolin, Yan Jing. Principles for the Measurement and Image Processing Using PIV[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2005, 24 (1): 19-20.
- [14] 李亚林,袁寿其,汤 跃,等. 离心泵内流场 PIV 测试中示踪粒子跟随性的计算[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(1): 6-10.
Li Yalin, Yuan Shouqi, Tang Yue, et al. Analysis on Tracing Ability of PIV Seeding Particles in Flow Fields of Centrifugal Pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30 (1): 6-10.
- [15] 任 芸,吴登昊,刘厚林,等. 离心泵内部不稳定流动的 PIV 测试[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 46-51.
Ren Yun, Wu Denghao, Liu Houlin, et al. PIV Experiment on Flow Instabilities in Centrifugal Pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46 (2): 46-51.
- [16] 权 辉,李仁年,苏清苗,等. 基于 PIV 测试的螺旋离心泵内部流动特性研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 28-32.
Quan Hui, Li Rennian, Su Qingmiao, et al. Internal Flow Characteristic of Screw Centrifugal Pump Based on PIV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46 (4): 28-32.
- [17] 栗鸿飞,宋文武. PIV 技术在流动测试与研究中的应用[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2009, 28(5): 27-31.
Li Hongfei, Song Wenwu. Application of PIV in the Test and Study of Flow Field[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2009, 28 (5): 27-31.
- [18] 袁世伟. 幂律非牛顿流体流动的数值计算与实验研究[D]. 上海:华东理工大学, 2014.
Yuan Shiwei. Numerical Simulation and Experimental Study of Power-Law Fluid[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.
- [19] 刘乃震,王廷瑞,刘孝良,等. 非牛顿流体的稳定性及其流态判别[J]. 天然气工业, 2003, 23(1): 53-57.
Liu Naizhen, Wang Tingrui, Liu Xiaoliang, et al. Stability of Non-Newtonian Fluid and Its Flow Pattern Discrimination[J]. Natural Gas Industry, 2003, 23 (1): 53-57.
- [20] 薛朝阳. 确定水力半径的新方法[J]. 河海大学学报, 1995, 23(2): 107-112.
Xue Chaoyang. A New Method to Determine the Hydraulic Radius [J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 1995, 23 (2): 107-112.

中国最大单体天然气藏创环保新纪录

中国最大天然气单体海相整装气藏——龙王庙组气藏创下环保新纪录,其龙王庙天然气净化厂,采用自创的“标准还原尾气处理”新技术,硫磺回收率创造了国内新高,达到惊人的 99.8%。这代表着中国天然气开采以“绿色发展”理念引导的新方向。

磨溪区块龙王庙组气藏位于四川省遂宁市、资阳市和重庆市潼南县境内,“十二五”期间经国土资源部审定,磨溪区块龙王庙组气藏探明地质储量 $4\,403.83 \times 10^8 \text{ m}^3$,为国内迄今最大的单体海相整装气藏。

磨溪 009-3-X-3 井是开发磨溪区块龙王庙组气藏的一口新高产气井,它的环保措施颇具代表性。中国石油西南油气田公司采用“离心电化学吸附新技术+设备集成撬装一体化”等新技术、新工艺,把这口井的钻井废弃物制造成免烧砌块 43 000 块、基土 $1\,000 \text{ m}^3$ 以上、免烧砖 10 750 块、免烧陶粒 42 m^3 ,用于修建磨溪 022-X1 井井场和堡坎,既降低了环境风险,又节约了工程投资。

据中国石油西南油气田公司工作人员介绍,遂宁龙王庙天然气净化厂应用自主创新技术、推广应用成熟技术,以国内最高的硫磺回收率,已处理含硫气 $100.05 \times 10^8 \text{ m}^3$,净化了排放气体;应用“电渗析和蒸发结晶浓缩污水处理”工艺,污水回收利用率达到 99%,实现了工业废水“零排放”。

中国石油西南油气田公司新闻发言人钱治家说:“环保工作没有终点,企业发展要融入地方经济发展之中,更要践行绿色发展理念,为社会奉献绿色能源。”

(曾 妍 摘自中国石油新闻中心网)