

# 一种基于声发射检测油砂两相流量的方法

陈超<sup>1</sup>, 于起玲<sup>2</sup>, 钱玉祥<sup>3</sup>, 刘澎涛<sup>4</sup>

1. 中石油新疆油田分公司采油二厂, 克拉玛依 834000
2. 中石油新疆油田分公司实验检测研究院, 克拉玛依 834000
3. 中石油新疆油田分公司开发公司, 克拉玛依 834000
4. 中海油安全技术服务有限公司, 天津 300452

**摘要** 疏松砂岩油藏开发过程中出砂问题日益突出, 为降低油井出砂管理难度, 常采用适度出砂技术以保证油气井效益的最大化, 因此, 发展油砂两相流检测技术对及时、有效预测和控制油气井出砂具有重要意义。本文提出一种基于声发射技术检测油砂两相流流量的方法, 该方法利用超声波测量油相流量, 采用声发射传感器检测砂粒在油流中的声发射信号, 设计构建了油砂两相流声发射检测实验装置, 通过专门编写的采集软件对特征信号进行分析处理。结果表明, 保持其他条件不变, 声发射功率随砂粒质量、油流速度增加而增大, 随粒径增大而减小。建立了声发射功率与砂粒质量、粒度和油流速度三者之间的关系模型, 进而获取砂相的流量信息。

**关键词** 油砂两相流; 流量检测; 声发射信号; 信号处理

**中图分类号** TE38

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.08.009

## Oil-sand Phases Flow Detection Based on Acoustic Emission Technology

CHEN Chao<sup>1</sup>, YU Qiling<sup>2</sup>, QIAN Yuxiang<sup>3</sup>, LIU Pengtao<sup>4</sup>

1. Second Plant of Oil Production, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China
2. Experiment Testing Institute, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China
3. Development Company, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China
4. CNOOC Safety & Technology Services Co., Ltd., Tianjin 300452, China

**Abstract** The sand production problem in unconsolidated sandstone reservoir development has become increasingly prominent. To decrease the difficulty of oil well sand production management, moderate sanding techniques are usually used to maximize the benefit of oil and gas wells. Therefore, it is significant to develop oil-sand flow detection technology for timely and effective prediction and control of oil and gas well sand production. This paper proposes a method of flow detection in oil-sand phases based on acoustic emission technology. The method uses ultrasonic to measure the oil phase flow, also uses acoustic emission sensors to detect sand signal in oil flow, and build the experimental device of oil-sand flow detection, then analyzes the signal characteristics through specialized collection software. The results show that with other conditions remaining unchanged, acoustic emission power increases with the increase of sand mass and oil velocity, and decreases with increasing sand size; finally the acoustic emission power model of sand mass, sand size and oil velocity is established to obtain the sand flow information.

**Keywords** oil-sand two phase flow; flow detection; acoustic emission signal; signal analysis

收稿日期: 2013-12-03; 修回日期: 2014-01-24

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05024)

作者简介: 陈超, 助理工程师, 研究方向为采油工艺, 电子信箱: ccvab@sina.com

引用格式: 陈超, 于起玲, 钱玉祥, 等. 一种基于声发射检测油砂两相流量的方法[J]. 科技导报, 2014, 32(8): 58-63.

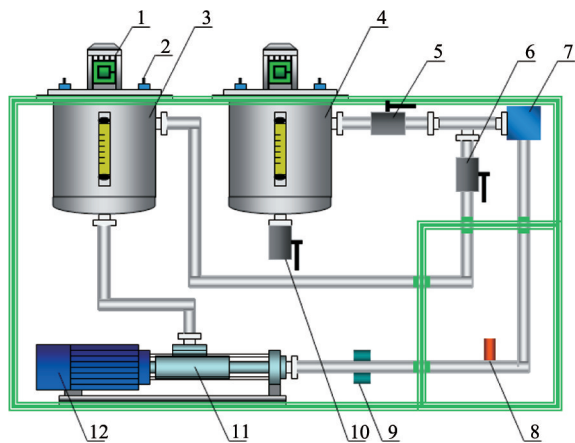
液固两相流普遍存在于人们日常生活和工业生产过程中,在石油、化工、煤炭、水力、食品等众多领域的生产过程中起着至关重要的作用,例如在油气勘探开发、流化床控制、管道水力输送、多相流计量和过程故障检测等方面<sup>[1-6]</sup>。液固两相流参数测量中,固相检测尤为困难,现在针对液固体系中固相流量的检测方法主要有软测量法、核磁共振法、流动层析法及微波法等,虽然它们具有不侵入流场等优点,但也存在一定缺陷。软测量需要通过大量数学估计和计算来实现待测过程中变量的测量与处理,过程复杂繁琐;核磁共振所需设备较为昂贵,不易普及;流动层析测量成本高、时间长,对作业人员有辐射危害,而且维护管理要求苛刻;微波法易受环境因素干扰,测量与调整精度不高,不利于现场使用<sup>[7]</sup>。

在油气开采过程中,随着油藏开发的不断深入,特别对于疏松油藏中出砂问题日益突出,若不能有效控制出砂量,会导致砂粒在生产管道中沉积,造成砂堵或砂埋现象,严重影响油气的正常生产<sup>[8-11]</sup>。目前,世界上很多油气田都存在不同程度的出砂问题,国外很多油田或服务公司都致力于油田出砂管理的研究,主要集中在出砂预测、防砂和固砂等方面,总体上来看,针对油气井出砂方面的研究还局限在出砂预测和出砂机制两个方向,由于引发出砂的原因具有复杂性和多变性,仅仅靠出砂预测远远不能满足生产需求,因此,应当加大研究能够实现实时检测出砂的方法和设备<sup>[12-15]</sup>。

## 1 油砂两相流声发射检测系统

### 1.1 装置设计

油砂两相流声发射检测装置主要由储液搅拌罐、冲击检测组件、压力传感器、超声检测组件、变频螺杆泵和高压管线等部分组成(图1)。



1—搅拌器;2—加热棒;3—储液罐 I;4—储液罐 II;5—阀门 I;6—阀门 II;7—冲击检测组件;8—压力传感器;9—超声检测组件;10—阀门 III;11—螺杆泵;12—变频电机

图1 油砂两相流声发射检测实验装置设计

Fig. 1 Experimental system of the oil-sand flow detection by acoustic emission

### 1.2 工作原理

油砂两相流检测包括液相流量和固相流量测量,其中固相颗粒为细小砂粒,可通过超声波对固相颗粒的反射测量液相流速,同时利用砂粒对管壁的冲击识别固相信息。砂粒在油流中流动并感受有源超声波的信号,反射给接收器后产生的频移与油流速度成正比,利用此特性设计能够准确测量适用于实验条件下油样的超声检测组件。砂粒除了作为感应有源超声波的反射介质外,其自身在一定速度下冲击管壁也会产生声发射信号,结合一定采集处理方法可以获得固相颗粒信息,检测流程如图2所示<sup>[16,17]</sup>。

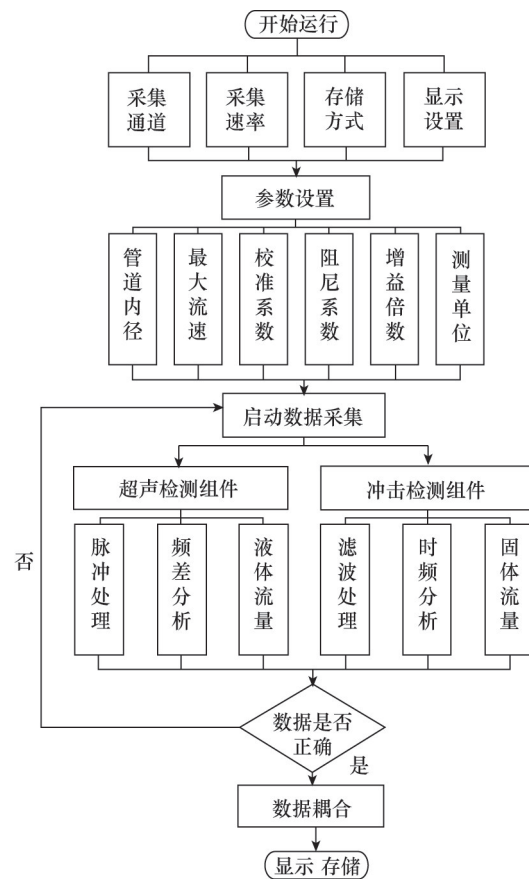


图2 信号采集流程图

Fig. 2 Flow scheme of the signal acquisition

## 2 声发射检测组件数值模拟评价

### 2.1 模拟设计

单独选取冲击检测组件进行 Fluent 模拟,采用离散相模型。网格采用 Quad/Submap 类型(图3),选择模型求解方式为离散计算,速度表示为绝对速度,环境压力为标准大气压,有重力影响, $x$  方向加速度为  $-9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,入口速度为  $2\sim 6 \text{ m/s}$ ,石英砂密度为  $2650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,粒径  $38\sim 100 \mu\text{m}$ ,油样密度为  $825.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,黏度  $0.095 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,温度  $18^\circ\text{C}$ ,湍流强度和流体力学半径分别为  $8\%$  和  $0.00175 \text{ m}$ ,松弛因子压力和动量系数分别为  $0.3$  和  $0.7$ ,初始迭代次数为  $500$  次。

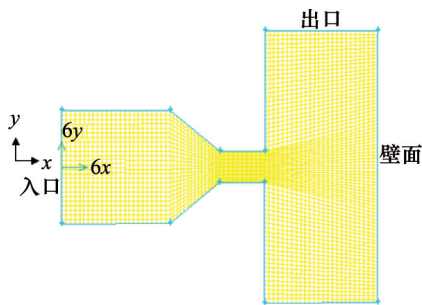


图3 网格划分  
Fig. 3 Grid texture

### 2.2 砂粒质量浓度与质量流量的关系

在粒径不变条件下,依次对2~6 m/s流速下,10~40 g/s砂粒流量范围内进行模拟,绘出砂粒质量浓度随质量流量的变化曲线如图4所示。可以看出,砂粒粒径和流速保持不变时,砂粒质量流量增大,质量浓度随之增大,质量浓度与质量流量成正比。

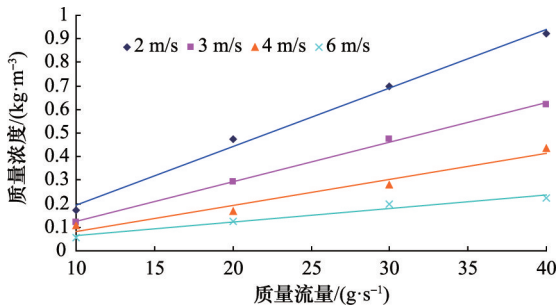


图4 75 μm 砂粒质量浓度随质量流量变化曲线  
Fig. 4 Mass concentration changes of 75 μm sands with mass flow rate

### 2.3 砂粒质量浓度与砂粒粒径的关系

在质量流量不变条件下,依次对2~6 m/s流速下,38~100 μm粒径范围内进行模拟,绘出砂粒质量浓度随粒径的变化曲线如图5所示。可以看出,砂粒质量流量和流速保持不变时,砂粒粒径增大,质量浓度随之增大,质量浓度与粒径之间成正比。

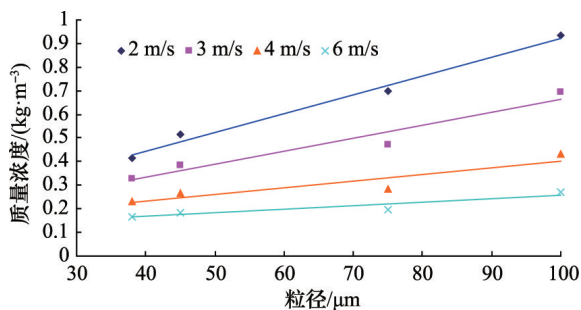


图5 30 g/s 砂粒质量浓度随粒径变化曲线  
Fig. 5 Mass concentration changes of 30 g/s sands with size

### 2.4 砂粒质量浓度与油流速度的关系

在粒径不变条件下,依次对10~40 g/s质量流量条件下,2~6 m/s流速范围内进行试验,绘出砂粒质量浓度随流速的变化曲线,如图6所示。可以看出,砂粒粒径和质量流量保持不变时,流速增大,质量浓度随之减小,质量浓度与流速成反比。

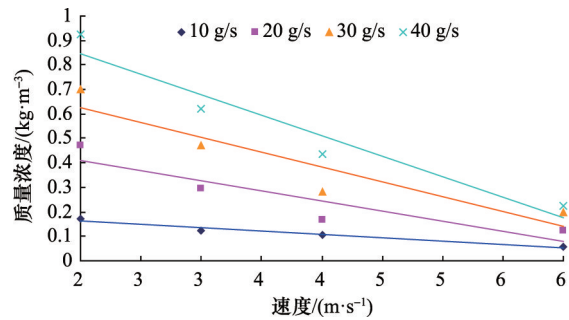


图6 75 μm 砂粒质量浓度随流速变化曲线  
Fig. 6 Mass concentration changes of 75 μm sands with velocity

### 2.5 砂粒质量流量模型建立

根据图4~图6趋势线规律可以看出,砂粒质量浓度与质量流量、粒径成正比,与流速成反比,因此可以构建一个与质量流量、粒径和流速相关的砂粒质量浓度模型:

$$\bar{c}_m = \frac{Q_m R_s}{u V_i} \quad (1)$$

式中,  $Q_m$  为砂粒质量流量, kg/s;  $c_m$  为质量浓度, kg/m<sup>3</sup>;  $u$  为流速, m/s;  $V_i$  为靶体体积, m<sup>3</sup>;  $R_s$  为砂粒粒径, m。

将计算得到的模拟质量浓度因子与试验质量浓度对比,绘出二者关系散点图并拟合趋势线,如图7所示。

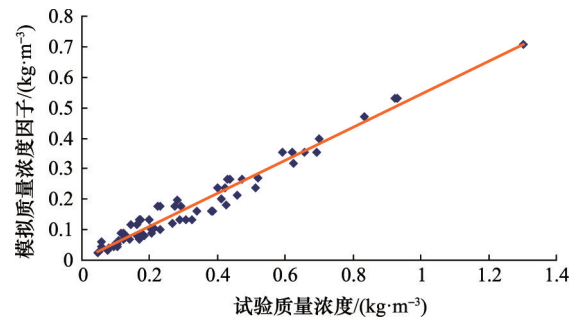


图7 模拟质量浓度因子与试验质量浓度拟合曲线  
Fig. 7 Fitted curve between simulation concentration factor and test concentration

由图7可得,拟合的线性趋势线方程为

$$\begin{aligned} \bar{c}_m &= 0.5399c_m + 0.0034 \\ \Rightarrow \frac{Q_m R_s}{u V_i} &= 0.5399c_m + 0.0034 \end{aligned} \quad (2)$$

将式(2)转化为砂粒质量流量模拟模型

$$Q_m = \frac{(0.5399c_m + 0.0034)u V_i}{R_s} \quad (3)$$

### 2.6 砂粒质量流量模型验证

选在一定速度、粒径条件下的砂粒质量流量数据进行模型验证,结果拟合程度较好,如图8所示。

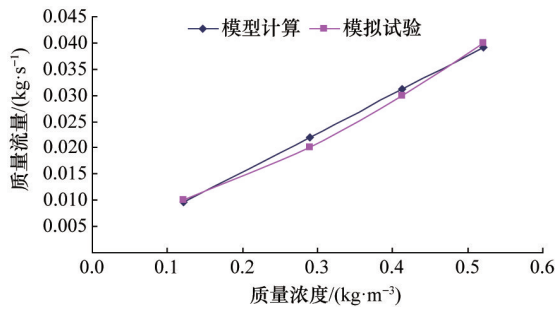


图8 模型计算和模拟试验质量流量对比

Fig. 8 Mass flow contrast between model calculation and simulation test

## 3 检测系统实验评价

### 3.1 实验设计

实验油样室温下黏度为95 mPa·s,实验采用三因素五水平设计(表1),3个因素分别为砂粒质量、砂粒粒径和油流流速。利用Dephi编写声发射信号处理软件,软件有滤波处理(图9)、频域分析和时域分析(图10)3个主要部分。对于滤波的选择需要大量试验选择和验证,由于砂粒粒径太小,信号属于微弱信号,加之噪声干扰影响,淹没了砂粒撞击产生的有效信号,故对相同条件下试验进行滤波处理,通过反复试验,得出10~12 kHz的带通频段下砂粒信号尤为明显,不仅滤除了工频噪声、泵噪声等外界干扰,而且还有效抑制了流体撞击产生的信号干扰。

表1 实验因素

Table 1 Experimental parameters

黏度/(mPa·s)	质量/g	粒径/ $\mu\text{m}$	流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
95	1.5	75	0.17
	3.0	88	0.34
	4.5	100	0.51
	6.0	150	0.68
	7.5	170	0.85



图9 滤波设置

Fig. 9 Filter setup

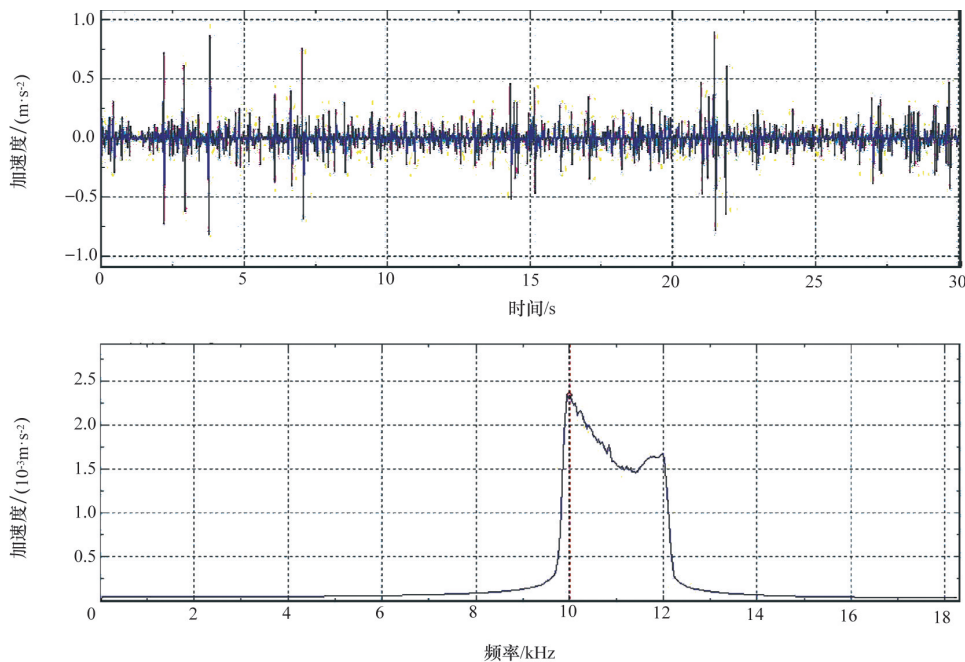


图10 时频分析界面

Fig. 10 Interface of the time-frequency domain analysis

### 3.2 信号功率谱与砂粒质量之间关系

在流速不变条件下,依次对 75~170 μm 砂粒在 1.5~7.5 g 质量范围内进行实验,得出对应的功率谱幅值,以其中一组功率谱图为例,并绘出不同粒径砂粒的功率谱幅值随砂粒质量变化的关系曲线(图 11)。可以看出,砂粒粒径保持不变时,砂粒质量增加,其功率谱幅值也随之增加,而且两者线性关系较好。

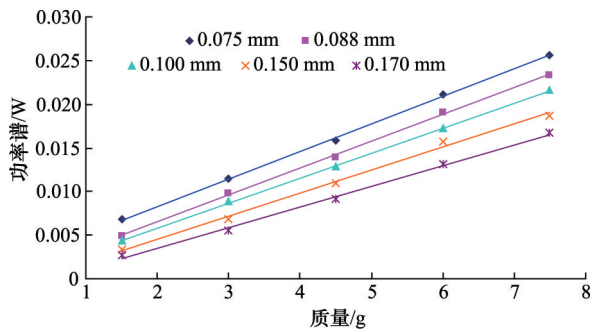


图 11 流速 0.17 m/s 时功率谱幅值随砂粒质量的变化曲线  
Fig. 11 Power spectrum amplitude changes with sand mass under velocity of 0.17 m/s

### 3.3 信号功率谱与砂粒粒径之间关系

在流速不变条件下,依次对 1.5~7.5 g 砂粒在 75~170 μm 粒径范围内进行实验,得出对应的功率谱幅值,以其中一组功率谱图为例,并绘出不同质量砂粒的功率随砂粒粒径变化的关系曲线(图 12)。可以看出,砂粒质量保持不变时,砂粒粒径增大,其功率随之减小,而且二者线性关系较好。

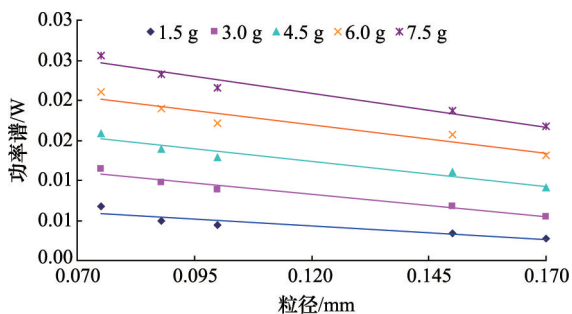


图 12 流速 0.17m/s 时功率谱幅值随砂粒粒径的变化曲线  
Fig. 12 Power spectrum amplitude changes with sand size under velocity of 0.17 m/s

### 3.4 信号功率谱与油流速度之间关系

在质量不变条件下,依次对 75~170 μm 砂粒在 0.17~0.85 m/s 流速范围内进行实验,得出对应的功率谱幅值,以其中一组功率谱图为例,并绘出不同粒径砂粒的功率谱幅值随油流速度的关系曲线(图 13)。可以看出,砂粒粒径保持不变时,液流速度增加,其功率谱幅值也随之增加,而且二者线性关系较好。

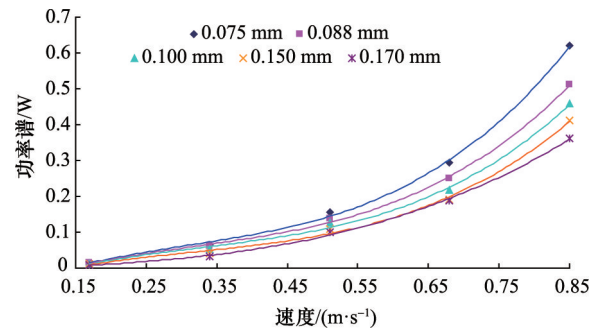


图 13 4.5 g 砂粒的功率幅值随液流速度的变化曲线  
Fig. 13 Power spectrum amplitude changes of 4.5 g sands with fluid velocity

### 3.5 砂粒声发射功率实验模型

为找出砂粒声发射功率的准确关系,特构建实验声发射功率因子,即

$$\bar{W}_i = \frac{mu^3}{R_s} \quad (4)$$

其中,  $\bar{W}_i$  为功率谱值, W;  $m$  为加入系统砂粒质量, kg;  $u$  为实验流速, m/s;  $R_s$  为实验砂粒粒径, m。

按照式(4)计算不同质量、流速和粒径下的砂粒实验声发射功率因子,绘出实验功率谱幅值与功率因子对应的散点图,并作出拟合二次线性趋势线,如图 14 所示。

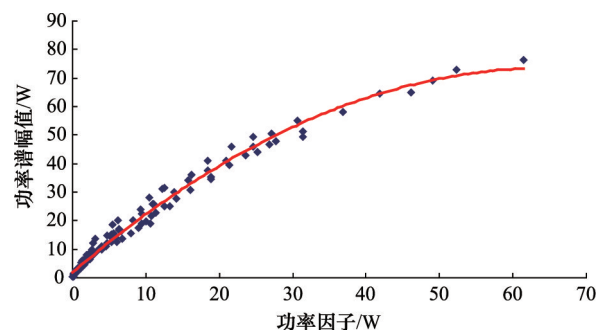


图 14 实验功率谱与功率因子拟合曲线  
Fig. 14 Fitted curve between experimental power and power factor

由图 14 可得,实验功率谱幅值与功率因子之间的趋势线方程为

$$W_i = -0.017 \times (\bar{W}_i)^2 + 2.209 \times (\bar{W}_i) + 1.8412 \quad (5)$$

故得到砂粒声发射功率实验模型,即

$$W_i = -0.017 \times \left(\frac{mu^3}{R_s}\right)^2 + 2.209 \times \left(\frac{mu^3}{R_s}\right) + 1.8412 \quad (6)$$

### 3.6 实验模型验证

选取 0.17 m/s 流速和 75 μm 粒径砂粒实验数据与式(6)计算所得数据进行对比,并做出功率谱实验数据与模型计算数据对比曲线图(图 15)。

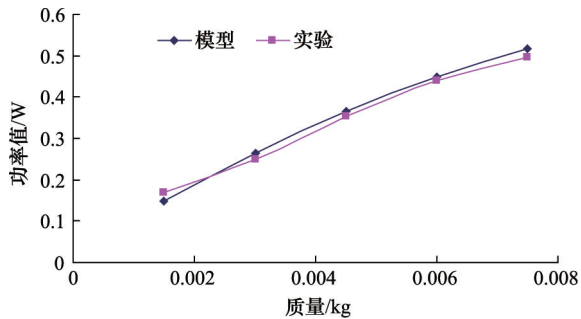


图 15 功率谱模型验证曲线

Fig. 15 Verification curve of the power spectrum model

### 3.7 油砂两相流量模型

由于实验测量砂粒粒径很小,难以验证砂粒的质量流量,故结合 Fluent 模拟与室内实验结果对比分析,建立适合于该系统的砂相质量流量模型。将式(3)转化为功率模型,即  $W_f = Q_m u^2$ , 其中  $W_f$  指模拟声发射功率,与式(6)拟合得

$$W_f = -5.85(Q_m u^2) + 3.79(Q_m u^2) + 0.0175 \quad (7)$$

由式(7)可看出,声发射功率只与砂粒质量流量和液流速度有关,其中声发射功率和液流速度均由系统测量得出,通过该模型可直接得出砂粒的质量流量。

## 4 结论

在室内条件下,对油砂两相流声发射检测进行评价研究,采用理论分析、数值模拟和实验研究相结合的方法,得到以下结论:

- 1) 调研了国内外关于固相流量检测方法现状,提出了一种利用声发射技术检测油砂两相流量的方法;
- 2) 设计了在油砂两相流中测量砂相流量的冲击检测组件和测量油相流速的超声检测组件,在此基础上构建了一套基于声发射技术的油砂两相流流量检测系统;
- 3) 利用 Fluent 软件对声发射检测组件进行仿真模拟,建立了砂粒质量流量与砂粒浓度、砂粒粒径和油流速度之间的模拟模型,且验证了该模型的准确性;
- 4) 设计并完成了油砂两相流流量检测系统室内实验,建立了声发射功率与砂粒质量、砂粒粒径和油流速度之间的实验模型,且验证了该模型的准确性。

### 参考文献 (References)

[1] 王泽勇. 液固两相流参数测量方法研究[J]. 科协论坛, 2011(11): 95.  
Wang Zeyong. Liquid-solid two-phase flow parameter measurement method research [J]. Journal of Association for Science and Technology BBS, 2011 (11): 95.

[2] 丁馨, 赵刚. 多相流计量技术现状[J]. 辽宁化工, 2010, 39(11): 1159-1160.  
Ding Xin, Zhao Gang. Multiphase flow metering technology status [J]. Journal of Liaoning Chemical Industry, 2010, 33 (11): 1159-1160.

[3] 吕宇玲, 何利民. 多相流计量技术综述[J]. 天然气与石油, 2004, 22(4): 78-85.  
Lü Yuling, He Limin. Multiphase flow metering technology review [J]. Journal of Natural Gas and Oil, 2004, 22(4): 78-85.

[4] 冯定, 徐冠华, 袁咏心, 等. 多相流量计的现状以及发展趋势[J]. 机械与电子, 2010(2): 77.  
Feng Ding, Xu Guanhua, Yuan Yongxin, et al. The Status Quo and Development Trend of the Multiphase Flow Meter [J]. Machinery and Electronics, 2010 (2): 77.

[5] 薛国民, 沈毅. 弯管流量计测量多相流实验研究[J]. 油气田地面工程, 2006, 10(25): 10-11.  
Xue Guomin, Shen Yi. Elbow flowmeter measurement of multiphase flow experimental study[J]. Oil and Gas Field Surface Engineering, 2006, 10(25): 10-11.

[6] 赵延军, 李国光, 王式民. 双弯管法测量气固两相流质量流量的研究[J]. 计量学报, 2005, 26(2): 147-149.  
Zhao Yanjun, Li Guoguang, Wang Shimin. Double bend method of mass flowrate measurement of gas-solid two-phase flow research[J]. Journal of Measurement, 2005, 26(2): 147-149.

[7] 刘刚, 陈超. 声发射技术在石油工程中的应用[J]. 中国科技信息, 2012, 1(1): 45-46.  
Liu Gang, Chen Chao. Acoustic emission technique in petroleum engineering [J]. China Science and Technology Information, 2012(1): 45-46.

[8] Ibrahim M, Haugsdal T. Optimum procedures for calibrating acoustic sand detector, gas field case[C]// Canadian International Petroleum Conference; Petroleum Society's 59th Annual Technical Meeting. Calgary: Petroleum Society of Canada, 2008: 191-201.

[9] Fan C L, McLaury B S, Shirazi S A. Evaluation of electrical resistance probes to detect pipeline erosion and sand production in low liquid loading flow conditions[C]. SPE Eastern Regional Meeting, Columbus, Ohio, USA, August 17-19, 2011.

[10] Earles D M, Stoesz C W, Amaral A S, et al. Real-time strain monitoring of sand-control completions[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, September 19-22, 2010.

[11] 程文杰. 超声波流量计在输气管道现场应用的情况[D]. 成都: 西南石油大学, 2011.  
Cheng Wenjie. Field application of the ultrasonic flowmeter in the pipeline[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2011.

[12] 刘刚, 陈超, 韩金良, 等. 液固两相流声发射检测系统设计及实验室评价[J]. 振动与冲击, 2012, 31(22): 178-182.  
Liu Gang, Chen Chao, Han Jinliang, et al. Acoustic emission device design and laboratory evaluation for fluid-solid two phase flow[J]. 2012, 31(22): 178-182.

[13] 殷祥超. 振动理论与测试技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.  
Yan Xiangchao. Vibration theory and testing techniques[M]. Xuzhou: China University of Mining Press, 2007.

[14] 杨西侠, 柯晶. 信号分析与处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.  
Yang Xixia, Ke Jing. Signal analysis and processing[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007.

[15] 刘刚, 陈超, 韩金良. AE检测液固两相流室内模拟研究[J]. 科技导报, 2012, 30(22): 25-27.  
Liu Gang, Chen Chao, Han Jingliang. Acoustic emission indoor simulation of fluid-solid two phase flow test [J]. Science & Technology, 2012, 30(22): 25-27.

[16] 刘刚, 陈超, 韩金良, 等. 用于液-固两相体系中固相颗粒质量计量的冲击检测装置, 中国: 202596701[P]. 2012-12-12.  
Liu Gang, Chen Chao, Han Jingliang et al. The compact detection device used for measuring the solid phase quality in the liquid-solid two-phase system, China: 202596701[P]. 2012-12-12.

[17] 刘刚, 陈超, 钱致颖, 等. 用于液-固两相体系中液流流量计量的超声波检测装置, 中国: 202599456[P]. 2012-12-12.  
Liu Gang, Chen Chao, Qian Zhiying, et al. The ultrasonic testing device used for measuring the fluid flowrate in the liquid-solid two-phase system, China: 202599456[P]. 2012-12-12.

(责任编辑 刘志远)