

AE 检测液固两相流室内模拟研究

刘刚, 陈超, 韩金良

中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580

摘要 针对现有液固体系中固相含量检测方法上的缺陷, 研发了液固两相流声发射检测系统, 并进行室内评价试验。利用自行编写的系统软件, 在实验室条件下提取不同砂粒的浓度和粒度信息进行试验。结果表明, 在粒度不变条件下, 砂粒声发射信号的功率谱幅值随砂粒浓度增加而增加; 在浓度不变条件下, 砂粒声发射信号的功率谱幅值随砂粒粒径增加而减小。

关键词 液固两相流; 声发射信号; 信号分析

中图分类号 TE38

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.22.002

Acoustic Emission Indoor Simulation of Fluid–solid Two Phase Flow Test

LIU Gang, CHEN Chao, HAN Jinliang

School of Petroleum Engineering, Petroleum University, Qingdao 266580, Shandong Province, China

Abstract The existing solid particle detection methods for the liquid–solid flow suffer from various degrees of defects. For this reason, the acoustic emission detection device for the liquid–solid two–phase flow is proposed and developed, and the indoor evaluation tests are carried out. Using the software developed by us, the information of sand concentration and size is extracted from tests under laboratory conditions. The results show that the power spectrum amplitude of the sand acoustic emission increases with the sand mass content under a fixed sand size, but decreases with the increase of the sand size under a fixed sand concentration.

Keywords liquid–solid two–phase flow; acoustic emission; signal analysis

0 引言

声发射 (Acoustic Emission, AE) 技术起步于 20 世纪 50 年代的德国, 起初应用于材料研究, 60 年代开始应用于无损检测领域, 中国于 20 世纪 70 年代开始研究和应用声发射技术。由于实施简易、能够获取实时信息、对被检测件形状不限及接近要求不高等优点, 声发射检测技术已广泛应用于石化工业、电力工业、金属加工、质量检测等领域。

液固两相流参数在线实时测量对生产过程的计算、控制和可靠运行具有重要意义。液固体系中固相含量的检测技术主要有软测量技术、核磁共振技术、流动层析成像技术、微波技术等^[1-5], 虽然它们具有不侵入流场等优点, 但也存在不同程度的缺陷。本文利用 AE 技术检测液固体系中固相颗粒, 总结出液固体系中固相颗粒的 AE 机理, 并研发了液固两相流 AE 检测系统。该系统目前主要用于实验室评价试验, 其基本原理是利用安装于检测管路中的 AE 检测仪表来接受砂粒冲

击, 通过采集设备和系统软件对砂粒 AE 信号进行处理, 获得砂粒含量及粒度信息, 有效提升固相颗粒检测的实时性和有效性。试验证明, 该系统能有效检测质量含量达 0.2% 以上、粒度大于 100 目的砂粒, 并且能明显感应出不同砂粒含量和不同粒度砂粒的变化。

1 液固两相流 AE 检测机理

美国材料与试验协会 (ASTM) 对声发射现象的定义是: 材料内局部能量源快速释放而产生瞬态弹性波的一种现象^[6]。它是一种常见的物理现象, 大多数材料变形或断裂时都有 AE 现象产生, 但由于许多材料的 AE 信号强度很弱, 人耳不能直接听见, 需要借助灵敏的电子仪器探测和记录, 在此基础上进行信号分析, 此系统即为声发射系统, 如图 1 所示。

材料的变形、断裂是典型的 AE 源, 属于突发型 AE 源; 流体泄露、摩擦、撞击、燃烧也属于 AE 源范畴, 被称为二次

收稿日期: 2012-05-04; 修回日期: 2012-07-02

基金项目: 国家科技重大专项课题 (2011ZX05024-003-005)

作者简介: 刘刚, 教授, 研究方向为石油工程, 电子信箱: lg87323@126.com

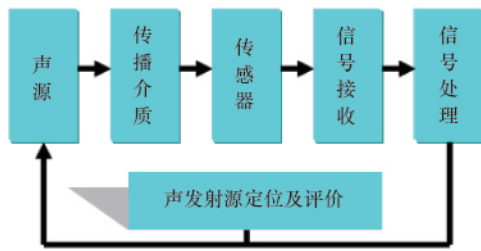


图1 声发射系统

Fig. 1 Acoustic emission system

AE源,属于连续型AE源。流体撞击或摩擦固体表面致使固体表面形状发生变化可以激发弹性波,但如果液体中含有固相颗粒,固相颗粒之间撞击或固相颗粒撞击固体表面时也可激发弹性波,故该类过程中既含有液体撞击产生的连续型AE源,也有固体颗粒撞击产生的突发型AE源,属于混合型AE源。因此,AE技术也可检测含固相颗粒的液体流动^[7-9]。

在承载和运输液固体系的管道中,AE信号主要包括固相颗粒冲击管壁、液体冲击管壁以及固相颗粒之间的相互碰撞所产生的AE信号。实验中所使用的AE传感器为高频压电加速度传感器,各种AE信号必须通过壁面传送到传感器,由于AE信号在液体中衰减很快,固相颗粒之间相互碰撞产生的AE信号很难传送到壁面,而液体撞击管壁产生的多为低频信号,通过一定处理方式提取所需固相颗粒撞击管壁的高频信号。因此,AE传感器检测到的信号主要为固相颗粒与管壁撞击所产生。

1.1 AE信号频率

管内AE信号产生的过程可以分解为许多小球与无限大平板的碰撞过程的叠加。根据Hertz的碰撞理论^[10],当一个刚性小球与无限大的平板发生碰撞时,小球与平板碰撞产生的AE信号频率*f*为

$$f = \frac{1}{\tau_H} = \frac{u}{2.94 \left[\frac{5}{4} \pi \mu_1^2 \left(\frac{1-\mu_1^2}{M_1} + \frac{1-\mu_2^2}{M_2} \right) \rho_s \right]^{\frac{2}{5}} R_s} \quad (1)$$

其中, τ_H 指小球与平板撞击时间(s);*u*是小球相对板的垂直运动速度(m/s); μ_1, μ_2 分别是板和球体的泊松比; M_1, M_2 分别是板和球体的弹性模量(Pa); R_s 是小球的半径(m); ρ_s 是小球的密度(g/mL³)。

1.2 AE信号能量

本试验主要研究单一粒径颗粒的AE特性,提出单一粒径颗粒撞击壁面产生的声压表达式,如某一粒径颗粒*i*在面积为*S*的壁面上撞击产生的声压可以表示为

$$p_i = \frac{2\eta m_i v_i f_i}{S} \quad (2)$$

式中, η 为声压转化效率;颗粒撞击壁面的频率 $f_i = C_{v,i} S v_s$ 。设撞击区域附近颗粒*i*的质量浓度为 $C_{m,i}$,而 $C_{m,i} = m_i C_{v,i}$, m_i 为颗粒*i*的质量, $C_{v,i}$ 为撞击区域附近颗粒*i*的颗粒浓度, v_s 为颗粒撞击速度(m/s),则在采样时间*t*内,颗粒*i*撞击壁面产生的声

能量*E_i*可以表示为

$$E_i = p_i S v_s = 2\eta C_{m,i} S v_s^3 t \quad (3)$$

设传感器能接收到信号的有效面积为 $S_p, S_p = \gamma S, \gamma$ 为有效面积系数,则AE有效能量可以表示为

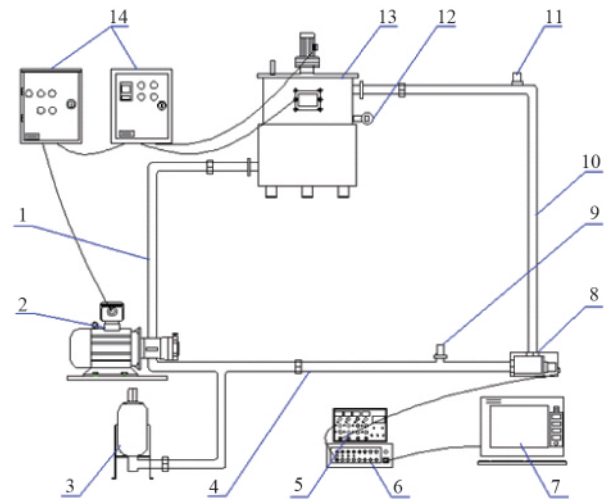
$$E_p = \gamma E_i = 2\eta \gamma C_{m,i} S v_s^3 t \quad (4)$$

从式(4)中可以看出,若检测系统恒定,即声压转换效率、AE信号感受有效面积保持不变,那么在颗粒撞击速度一定的条件下,AE有效能量大小正比于固相颗粒浓度。例如:(1)保持其他条件不变,增加固相颗粒质量浓度,AE有效能量会相应增加;(2)保持其他条件不变,颗粒在有效撞击面积上的质量浓度会随颗粒粒径增加而减小,AE有效能量会相应降低。

2 液固两相流AE检测系统结构

2.1 室内评价装置

液固两相流AE检测系统室内评价装置主要由AE检测仪表、加速度传感器、数据采集仪、信号处理软件、搅拌罐、变速柱塞泵、电动机和高压管线等组成,如图2所示。系统采用高频加速度传感器感受砂粒冲击检测仪表产生的AE信号,通过专用数据采集仪和分析软件处理信号。



1—引入管路;2—变速泵和电动机;3—蓄能器;4—检测管路;
5—电荷放大器;6—A/D采集仪;7—计算机;8—AE检测仪表;
9—压力传感器;10—返回管路;11—加速度传感器;
12—温度计;13—搅拌罐;14—电源箱

图2 液固两相流AE检测系统流程图

Fig. 2 Acoustic emission test system for liquid-solid two phase flow

2.2 AE检测仪表及传感器

AE检测仪表总成内部安装有信号放大装置,即作为阻挡物感受液体中砂粒冲击的信号感受鼓膜。信号感受鼓膜上紧密粘接有一AE传感器,用于感受液体中砂粒对信号感受鼓膜的冲击信号,并将感受到的信号通过电缆传输给外界的

二次仪表和计算机。信号感受鼓膜和加速度传感器外固定连接有一高压保护罩,高压保护罩可以防止管路高压击穿信号感受鼓膜,避免对操作人员造成伤害。沿检测管路与返回管路连接端口的内周壁设置有一流线型的喷嘴,有利于增大液体的速度和冲击力。

试验选用 AE 传感器为高频压电加速度型,压电元件在一定条件下受力后产生的电荷量与作用力成正比,故传感器产生的电荷量与 AE 信号成正比。试验通常选用高频压电加速度传感器,其电荷灵敏度一般为 $1\text{--}5.5\text{pC}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$,频响为 $0\text{--}20\text{kHz}$ 。传感器获得的 AE 信号经电荷放大和 A/D 转换,传至计算机分析系统进行时域和频域处理,得出砂粒浓度及粒度与 AE 信号特征参数之间的关系。

3 AE 信号处理方法及系统软件

3.1 处理方法

砂粒撞击 AE 检测仪表的过程实际上是确定系统受到随机力的激励作用而产生的 AE 信号,笔者采用时域分析、频域分析等方法进行信号处理。

时域分析研究 AE 信号大小随时间变化的波形,主要有滤波、概率数理统计等方法,概率数理统计包括信号幅值的概率密度、平均值、均方值、均方根值和方差等。频域分析是建立在傅里叶变换基础上的时频变换处理,所得结果是以频率为变量的函数,频域分析主要包括傅里叶变换、功率谱分析及幅值谱分析等。

虽然无限能量信号本身的 Z 变换与傅里叶变换是不存在的,但离散随机序列的自协方差序列与自相关序列存在如下性质,即

$$\begin{cases} \lim_{m \rightarrow \infty} C_x(m) = 0 \\ \lim_{m \rightarrow \infty} R_x(m) = m_x^2 \end{cases} \quad (5)$$

当 $m_x \rightarrow 0$ 时,有 $R_x(m) \rightarrow 0$ 。因此,离散随机序列的自协方差序列和自相关序列 ($m_x=0$) 的 Z 变换和傅里叶变换是存在的。

设 $C_x(m)$ 的 Z 变换为 $\Gamma_x(z)$,则按 Z 变换及反变换的定义,有

$$\begin{cases} \Gamma_x(z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_x(m)z^m, R_z < |z| < R_z \\ C_x(m) = \frac{1}{2\pi j} \oint_c \Gamma_x(z)z^{m-1}dz \end{cases} \quad (6)$$

当 $m_x=0$ 时,有

$$E\{x^2(n)\} = C_x(0) = R_x(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} P_x(w)dw \quad (7)$$

$E\{x^2(n)\}$ 表示信号平均功率,上式说明了 $P_x(w)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 频域区间内的积分面积正比于信号 $\{X(n)\}$ 的平方功率。此时, $R_x(m) = C_x(m)$,自相关函数 $R_x(m)$ 与功率谱密度 $P_x(w)$ 是一对傅里叶变换对。因此,实验系统检测到的 AE 信号能够以 Z 变换与傅里叶变换为基础,得出不同条件下的功率谱估计,为

固相颗粒检测提供直观、有效的依据。

3.2 系统软件实现

该系统采集设备由 A/D 转化仪、电荷放大器和采集分析软件构成。为满足试验要求,特开发了一套信号采集分析软件,软件包括时域分析模块(时域图、均值、方差计算)、频域分析模块(FFT 变换、功率谱图、滤波器选择)等。其中功率谱估计采用非参数化中的 Welch 方法,它属于经典谱估计——周期图法,该方法非常适合线谱估计,符合试验系统中 AE 信号的检测原则。该软件中的滤波器采用 IIR 滤波器,软件设置有低通、高通、带通和带阻 4 类滤波器,能以较低的阶数获得高选择性,有利于提高试验效率。信号采集分析软件主要界面如图 3 所示。图中横坐标为时间(s);纵坐标为时域幅值 (m/s^2)。由于系统采用高频 AE 传感器,因此软件会通过滤波处理液体撞击产生的低频 AE 信号,如图 4 所示。无砂时功率谱图显示 $0\text{--}1000\text{Hz}$ 低频段的信号来源于液体撞击管壁,而经过滤波处理后,加砂时功率谱图显示 $2000\text{--}3000\text{Hz}$ 高频段的信号是砂粒撞击管壁产生的。



图 3 信号采集分析软件界面

Fig. 3 Signal processing software interface

4 液固两相流 AE 检测试验设计及评价

4.1 试验设计

试验过程采用原油作为分散介质,一定粒度和浓度的石英砂作为分散相,进行检测试验。

试验条件:试验液体在室温条件下,黏度约为 $80\text{mPa}\cdot\text{s}$,流量为 0.556L/s ,流速为 1.768m/s 。

试验过程:(1)保持砂粒粒度相同,依次加大砂粒质量浓度至 $0.2\%、0.4\%、0.6\%、0.8\%、1\%$ 分别进行试验,采集 AE 信号;(2)保持砂粒浓度相同,依次选用 20 目、40 目、60 目、80 目、100 目砂粒进行试验,采集 AE 信号;(3)利用上述试验数据归纳砂粒粒度和浓度信息,作出拟合趋势线,并选用其他不同粒度和浓度的砂粒进行验证。

4.2 试验结果分析

在砂粒粒度一定条件下,均方根、方差、功率谱幅值等时频特征量均会随砂粒浓度增加而增加,其中功率谱幅值与砂

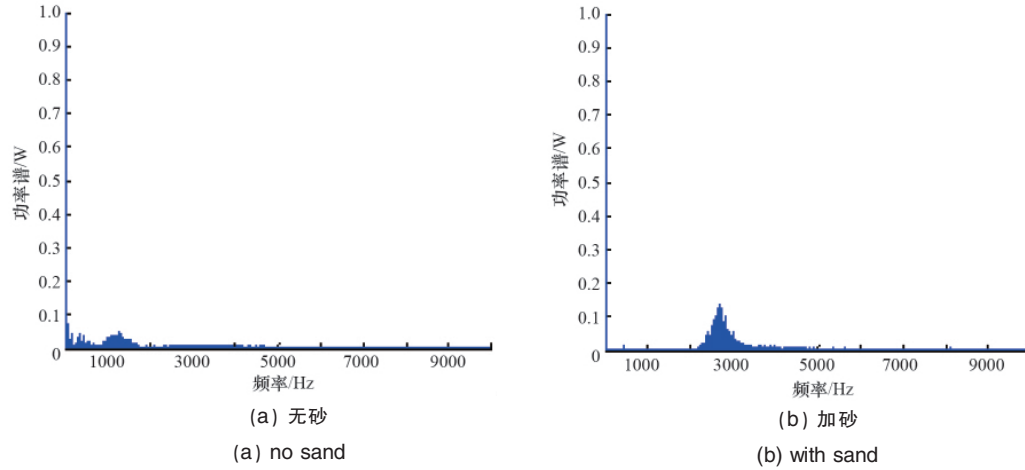


图4 实验功率谱图对比
Fig. 4 Comparison of power spectra display

粒粒度和浓度相关性最好,故选择功率谱幅值作为砂粒粒度和浓度的识别与判别标准。依次对 20 目、40 目、60 目、80 目、100 目砂粒在不同浓度条件下进行实验,得出功率谱幅值变化规律见表 1,一定砂粒浓度下功率谱幅值随砂粒粒度的变化曲线如图 5 所示,功率谱幅值单位为 W。

表 1 不同砂粒粒度和浓度的功率谱幅值
Table 1 Power spectrum amplitude of different sand sizes and concentrations

砂粒浓度	20 目	40 目	60 目	80 目	100 目
0.2%	0.0085	0.0150	0.0290	0.0480	0.0630
0.4%	0.0205	0.0290	0.0460	0.0760	0.0970
0.6%	0.0355	0.0470	0.0700	0.0980	0.1220
0.8%	0.0545	0.0740	0.0970	0.1250	0.1450
1.0%	0.0775	0.1020	0.1230	0.1580	0.1750

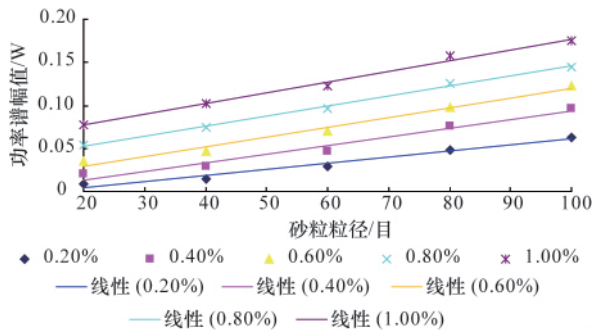


图 5 功率谱幅值随砂粒浓度的变化曲线
Fig. 5 Power spectrum amplitude changes with the increase of sand concentration

由图 5 可以看出,砂粒浓度一定时,功率谱幅值随粒度减小而增大,且两者有较好的线性关系;砂粒粒度一定时,功率谱幅值随砂粒浓度增大而增大,两者有较好的相关性。0.20%—1.00%砂粒在不同粒度下功率谱幅值变化趋势线方

程为

$$\begin{aligned} 0.20\%: & y=0.0007x-0.0099 \\ 0.40\%: & y=0.001x-0.0063 \\ 0.60\%: & y=0.0011x+0.0073 \\ 0.80\%: & y=0.0012x+0.0295 \\ 1.00\%: & y=0.0013x+0.0518 \end{aligned}$$

试验还发现,不同粒径砂粒的时域峰值频率随粒径减小而增大,这与式(1)中推导一致,砂粒半径越小,其撞击检测仪表中鼓膜的频率就越大。不用砂粒粒度的时域峰值频率如表 2 所示,该时域峰值频率为不同浓度下多次试验的平均值,其变化曲线如图 6 所示。

表 2 不同砂粒粒度的时域峰值频率
Table 2 Time-domain peak frequency of different sand sizes

粒径/目	20	40	60	80	100
时域峰值频率/kHz	1.015	1.393	1.702	2.297	3.010

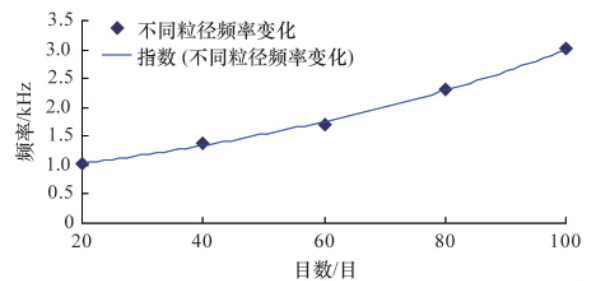


图 6 时域峰值频率随砂粒粒度的变化曲线
Fig. 6 Time-domain peak frequency changes with the decrease of sand size

由图 6 可以看出,砂粒粒度与时域峰值频率有较好的相关性,不同砂粒粒度下峰值频率的趋势线拟合方程为: $y=0.7867e^{0.0134x}$ 。综合上述试验结果分析可知,该试验条件下归纳出的不同砂粒浓度、粒度条件下的拟合方程,在未知单一粒

径颗粒条件下适用。利用时域峰值频率可识别出砂粒粒径,再通过不同砂粒粒径的功率谱幅值拟合方程可推出该粒度下的砂粒浓度,从而达到有效识别和判断砂粒粒度和浓度的检测目的。

4.3 系统精度验证

向系统中加入一定浓度未知粒度的单一砂粒,由 AE 检

测仪表测量得出时域峰值频率和功率谱幅值,并由图 6 推出砂粒粒度,利用图 5 中的功率谱幅值推出该粒度下的砂粒浓度,从而获得未知条件下的砂粒粒度和浓度信息。从 20—100 目砂粒中,随机挑选单一粒径一定浓度的砂粒进行检测,统计结果如表 3 所示,粒度和浓度相对误差均在 5% 以内,表明该系统检测较为准确。

表 3 随机挑选砂粒试验误差统计
Table 3 Error statistics of randomly selected sand

实际粒度/目	实际浓度/%	时域峰值频率/kHz	功率谱幅值/W	计算粒度/目	计算浓度/%	粒度相对误差/%	浓度相对误差/%
30	0.75	1.186	0.056	30.633	0.728	2.113	2.933
50	0.85	1.554	0.089	50.801	0.826	1.603	2.823
70	0.28	2.042	0.049	71.181	0.293	1.688	4.642
90	0.64	2.709	0.113	92.275	0.624	2.528	2.500

5 结论

(1) 阐释了液固两相流的 AE 检测机理,研发了液固两相流 AE 检测系统,其基本原理是利用安装在检测管路中的 AE 信号检测仪表接受砂粒冲击产生的 AE 信号,通过自行编写的软件程序,获得砂粒浓度和粒度信息。

(2) 试验结果表明,液固两相流 AE 检测系统设计原理可行,能够检测出浓度 0.2% 以上、粒度大于 100 目的砂粒,能够有效感知砂粒浓度及粒度变化,从而为液固体系中固相颗粒检测提供技术支持。

(3) 试验规律符合液固体系中固相颗粒的 AE 能量模型,即保持粒度不变,随着砂粒浓度的增加,砂粒声发射信号功率谱幅值逐渐增大;同样,保持浓度不变,功率谱幅值会随砂粒粒径增大而相应减小,其变化趋势基本呈线性。通过随机试验验证了系统的准确性。

参考文献 (References)

- [1] 董群, 王丽, 任东海, 等. 固体质量流量测量技术进展 [J]. 化工进展, 2010, 29(增刊): 1-4.
Dong Qun, Wang Li, Ren Donghai, et al. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2010, 29(Supp): 1-4.
- [2] 朱祥军. 声发射检测中利用能量进行定位的新方法 [J]. 中国测试, 2011, 37(1): 19-20.
Zhu Xiangjun. *China Measurement & Test*, 2011, 37(1): 19-20.

- [3] 王胜新, 佟国章, 李建萍, 等. 微地震裂缝监测技术在油水井压裂和注水评价中的应用[J]. 国外测井技术, 2011(3): 9-11.
Wang Shengxin, Tong Guozhang, Li Jianpin, et al. *World Well Logging Technology*, 2011 (3): 9-11.
- [4] Yan Y. Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines [J]. *Meas Sci Technol*, 1996, 7: 1687-1706.
- [5] Umeadi B B N, Jones K G. The development of intelligent sensor for the monitoring of pipeline system integrity[R]. SPE 115503, 2008.
- [6] Maths Halstensen, Kim Esbensen. New developments in acoustic chemometric prediction of particle size distribution—the problem is the solution [J]. *J Chemometrics*, 2000, 14: 463-481.
- [7] 马晓伟, 窦金永, 董玉辉. 气体钻井返出岩屑监测方法研究[J]. 西部探矿工程, 2011(6): 83-84.
Ma Xiaowei, Dou Jinyong, Dong Yuhui. *Western Exploration Engineering*, 2011(6): 83-84.
- [8] 刘刚, 陈超. AE 技术在石油工程中的应用 [J]. 中国科技信息, 2012(1): 45-46.
Liu Gang, Chen Chao. *China Science and Technology Information*, 2012 (1): 45-46.
- [9] Roundtree R, Miskimins J L. Experimental validation of microseismic emissions from a controlled hydraulic fracture in a synthetic layered medium[R]. SPE 140653, 2011.
- [10] Cycil M, Charles E C. Shock and vibration handbook [M]. 2nd ed. New York: King Sport Press, 2008: 278-280.

(责任编辑 马宇红, 代丽)



《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。