

文章编号:1000-582X(2011)07-076-07

煤层瓦斯吸附解吸过程中温度信号的小波去噪方法

许江, 吴鑫, 彭守建, 杨红伟

(重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要:研究地应力与瓦斯压力共同作用下煤体吸附解吸煤层瓦斯时的温度演化趋势有重要意义,但也发现实验数据因含有较多的噪声而很难获得其真实信号,为此,针对不同实验条件下获得的煤体吸附解吸煤层瓦斯时的温度信号演化的特点,拟采用基于 MATLAB 的小波去噪方法剔除噪声还原真实信号,以得到真实温度演化曲线。通过对几种常用小波基函数和不同分解层数的对比分析,选用了消失矩阶数较高、光滑性较好的 sym8 小波基函数中的 8 层分解,其重构后的温度信号基本去除了高频的噪声信号,且较好地保留了低频以及平稳信号。结果表明,其去噪效果好,能够较好地反映煤体在吸附、解吸煤层瓦斯过程中温度的演化规律。

关键词:小波去噪;煤层瓦斯;吸附解吸;温度

中图分类号:TD713

文献标志码:A

Wavelet denoising method of temperature signal in the process of coal gas absorption and desorption

XU Jiang, WU Xin, PENG Shou-jian, YANG Hong-wei

(Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The study on the temperature evolutionary trend under both the ground stress and gas pressure is significant in the process of coal gas absorption and desorption. However, the valid signal is difficult to gain because of much noise in the experimental data, so according to the characteristics of the temperature signal gained under different experimental conditions of coal gas absorption and desorption, this essay filtrates noise and restores the valid signal by using the wavelet denoising of MATLAB to obtain the valid temperature evolutionary curve. Through contrasting and analyzing wavelet basis function and different decomposition levels, the essay chooses the sym8 wavelet basis function which has a higher order of vanishing moments and better smoothness. The reconstructed signal filtrates most of high frequency signal, and keep low frequency, as well as smooth signal. The result shows that the de-noising effect is good and the temperature evolution rule can be well reflected in the process of the coal gas absorption and desorption.

Key words: wavelet denoising; coal gas; absorption and desorption; temperature

煤是一种复杂的多孔介质,煤层瓦斯在煤的孔隙中储集与运移。前人研究表明,煤层中的瓦斯气体约 90% 以吸附状态存在,约 10% 以游离态存在。针对等温过程中煤对瓦斯的解吸和吸附,前人已做

收稿日期:2011-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(50974141);国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011CB201203);国家科技重大专项项目(2011ZX05034-004);中央高校基本科研业务费资助(CDJXS11240001);重庆大学“211 工程”三期创新人才培养计划建设项目(S-10220)

作者简介:许江(1960-),男,博士,重庆大学教授、博士生导师,主要从事岩石力学、煤与瓦斯突出机理及预测研究,(E-mail)jiangxu@cqu.edu.cn。

了大量研究^[1-8], 但对煤层瓦斯吸附解吸过程中煤体温度变化的研究相对较少, 且在此类研究中, 采集数据时带有大量噪声必定影响传感器的采集精度和分辨率。为了更好的研究煤岩体吸附和解吸瓦斯全过程中温度的变化趋势, 笔者拟采用小波分析的方法剔除噪声, 还原信号, 为进一步的研究提供依据。

传统的滤波去噪方法是基于 Fourier 变换, 但是由于 Fourier 变换不具有频率局部化特性, 因此该方法在处理非平稳信号时有局限性。而小波变换处于具有多分辨率, 且在时频两域都具有局部特性, 适合分析非平稳信号, 所以对充瓦斯时的温度演化曲线(信号)的分析是很适合的。

1 煤的吸附与解吸实验及温度信号采集

煤层瓦斯吸附解吸实验是在重庆大学自主研发的煤与瓦斯突出模拟实验台^[9]上进行的, 实验示意图见图 1, 煤样采自重庆松藻煤电有限责任公司打通一矿。实验煤样经破碎筛分后选用适用粒径煤粉约 100 kg 装入突出模具进行实验, 同时施加相应的垂直应力、水平应力, 抽取真空后充入恒定压力瓦斯进行吸附, 同时打开温度压力监测系统进行温度信号采集^[10]。

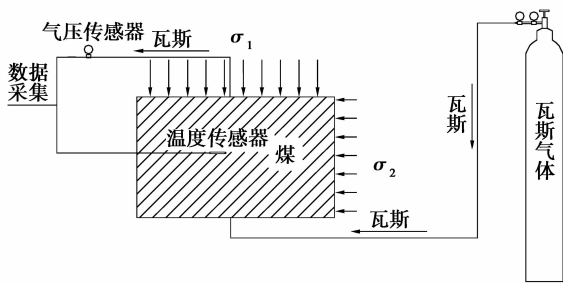


图 1 煤的吸附及解吸实验示意图

温度信号采集系统利用温度传感器探测煤体温度, 温度感应模块将温度变化转化为电压信号, 再经过 A/D 转换成数字信号, 单片机模块对数字信号进行处理, 最后利用计算机系统采集并记录温度变化信号(图 2)。传感器采用 Pt100 铂热电阻, 理论测量范围: $-200 \sim +850$ °C, 热响应时间 < 30 s, 具有抗振动、稳定性好、准确度高、耐高压等优点。单片机模块和计算机采集系统分别利用煤与瓦斯突出实验室现有的 MaxTC 测控仪和 MaxTest-Load 试验控制软件。

实验条件参数参见表 1, 数据的自动收集提高了效率及数据丰富性, 但这些采样信号不可避免的

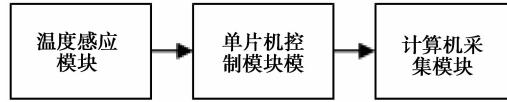


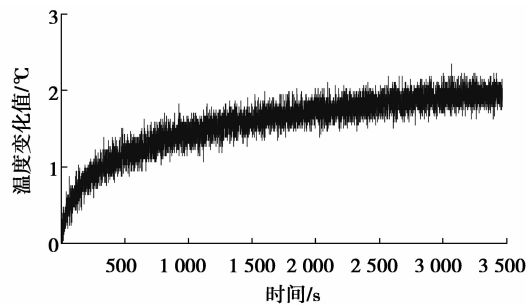
图 2 温度信号采集示意图

受到噪声污染(图 3、4)。

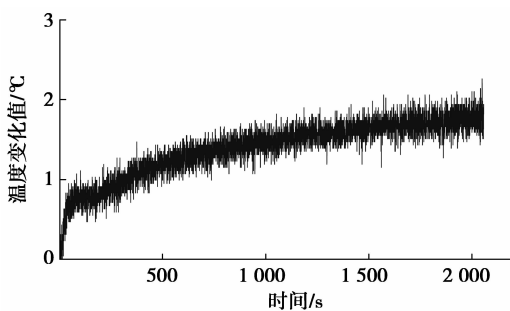
表 1 煤的吸附与解吸实验参数

含水量/%	成型压力 /MPa	煤层垂直应力 /MPa	煤层水平应力 /MPa	瓦斯压力 /MPa	采样频率 /Hz
4	4	4	2.4	1	5

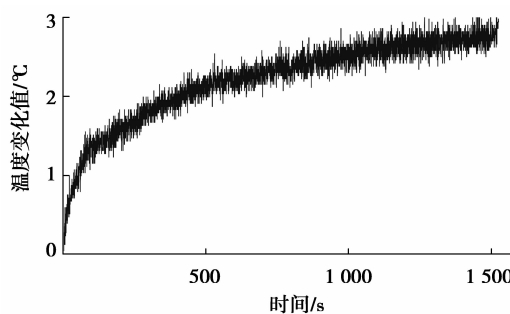
说明: 瓦斯压力为绝对压力



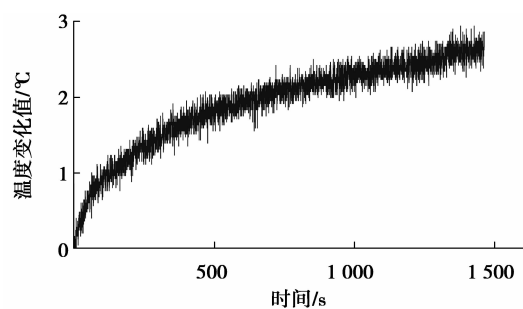
(a) 0.50 MPa



(b) 0.75 MPa

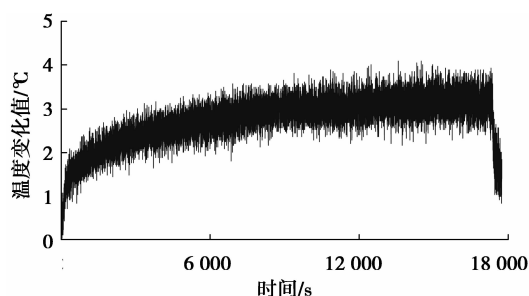


(c) 1.00 MPa

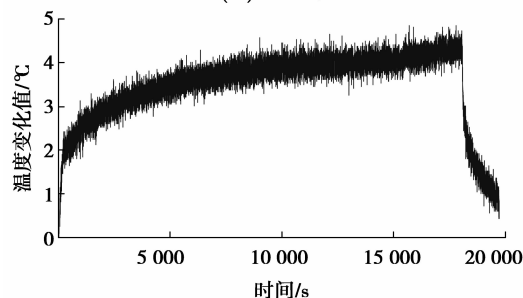


(b) 1.25 MPa

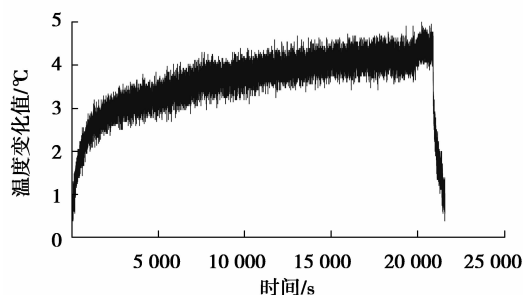
图 3 不同瓦斯压力吸附时的温度信号



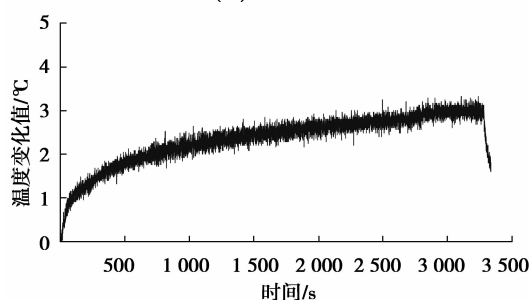
(a) 5~10 目



(b) 10~40 目



(c) 40~80 目



(d) 10~40 目 : 40~80 目=1 : 1

图 4 不同粒径煤粉吸附时的温度信号

2 温度信号小波去噪

2.1 小波去噪原理

小波去噪是将信号映射到小波域,根据噪声和噪声的小波系数在不同尺度上具有不同的性质和机理,对含噪信号的小波系数进行处理^[11-12]。此系统中温度信号主要受铂热电阻技术允许偏差、电桥电压波动系数、A/D 转换器非线性及电路和环境噪声影响,噪声在各个频段上的功率基本一致,故将该信号的噪声模型近似认为是叠加性高斯白噪声。

白噪声是指功率谱密度在整个频域内均匀分布的噪声,是一种功率频谱密度为常数的随机信号或随机过程。叠加性高斯白噪声是常见的噪声模型,受到叠加性高斯白噪声“污染”的观测信号可以表示为

$$d_i = f_i + \epsilon \cdot z_i, i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

式中: d_i 为含噪信号, f_i 为“纯净”采样信号, z_i 为独立同分布的高斯白噪声 $N(0, 1)$, ϵ 为噪声水平, N 为信号长度。为了从含噪信号 d_i 中还原出真实信号 f_i ,可以利用信号和噪声在小波变换下的不同的特性,通过对小波分解系数进行处理来达到信号和噪声分离的目的。在上述含噪温度曲线中,有用信号通常表现为低频信号或是一些比较平稳的信号,而噪声信号则通常表现为高频信号,所以,可先对含噪信号进行小波分解(图 5),图中的 a_i 为第 i 层分解的近似部分、 d_i 为第 i 层分解的细节部分,则噪声部分通常包含在 d_1, d_2, d_3 中,用门限阈值对小波系数进行处理,重构信号即可达到去噪的目的。

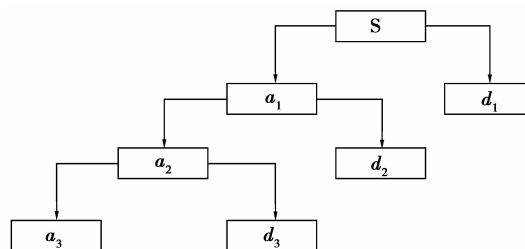


图 5 三层小波分解示意图

2.2 小波去噪过程

1) 对观测数据作小波分解变化,选择合适的小波基并确定小波分解的层次 N ,然后对信号 S 进行 N 层小波分解;

2) 小波分解高频系数的阈值量化,对第 1 层到第 N 层的每一层高频系数,选择一个阈值进行量化处理。对含噪信号的小波系数进行处理,实质是减少剔除噪声产生的小波系数,最大限度的保留真实

信号的系数;

3) 小波的重构, 根据小波分解的第 N 层的低频系数和经过量化处理后的第 1 层到第 N 层的高频系数, 进行信号的小波重构即可得到受污染采样信号去噪后的信号。

2.3 小波函数选取

小波去噪过程中要解决的首要任务就是选择合适的小波基和小波分解层数。一般来说, 小波基函数选取的原则有 5 个方面^[13]: 正交性、对称性、紧支性、正则性、消失矩。正交性可以使分析简便, 有利于信号的精确重构; 对称的小波基函数使得小波滤波呈线性相位, 这样信号不会失真; 紧支集长度决定着信号局部特性的好坏; 正则性决定着信号重构后的平滑效果; 小波基函数的消失矩愈高, 在高频的衰减也就愈快, 变换后信号的能量就越集中。

在实际选取时不仅要考虑不同小波基函数的特点, 还要根据具体的信号确定最优分解层数。根据对该受噪声污染的信号初步分析, 应采用消失矩阶数较高、光滑性也较好的小波基, 如 db4、db8、sym6、sym8 和 coif5 等小波比较符合条件, 一般都可获得较好的去噪效果。这里具体给出几种常用小波基函数的主要性质^[14]。

1) Haar 函数是在小波分析中最早用到的一个具有紧支撑的正交小波函数, 同时也是最简单的一个函数, 但 Haar 小波在时域上是不连续的, 应用比较有限;

2) Daubechies(db N) 小波是紧支正交、近似对称的小波, 具有 N 阶消失矩, 消失矩阶数不同, 对应小波的性质也不同, 当 $N=1$ 时, db1 即是 Haar 小波;

3) Symlet(sym N) 小波是对 db N 小波的改进, 小波函数近似对称, 运用起来更方便些;

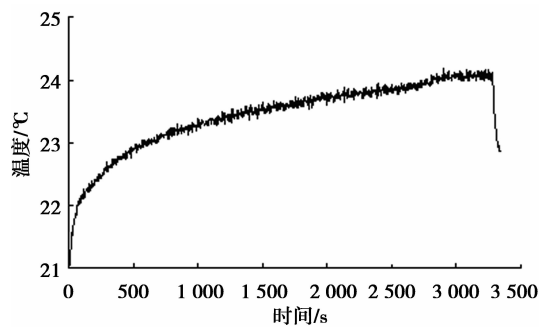
4) Coiflet(coif N) 小波具有 $2N$ 阶消失矩, 比 db N 小波对称。

综合比对以上小波基函数, 鉴于 Symlet 小波具有近似对称小波、重构时相移较小、使用方便等优点, 笔者选用了其中具有最大消失矩的 sym8 对瓦斯吸附时温度信号进行去噪。

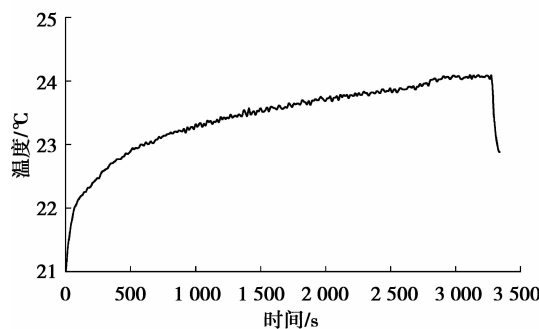
3 小波分解层数选取及依据

3.1 sym8 小波各层分解结果

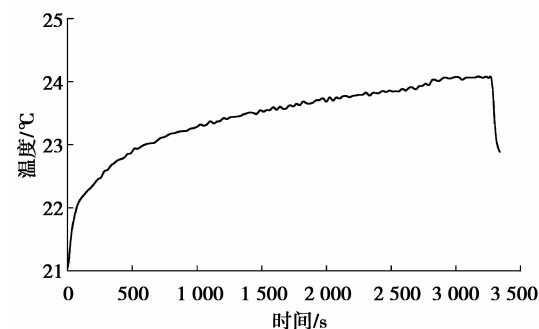
为确定 sym8 小波最优分解层数, 以图 4(d) 所示的 10~40 目: 40~80 目 = 1:1 混合型煤吸附解析瓦斯时温度曲线为例, 进行 4、6、7、8、9、10、12 层的小波去噪, 去噪结果如图 6 所示。对比分析发现, 分解层数越多光滑性越好, 但信号失真也越严重。



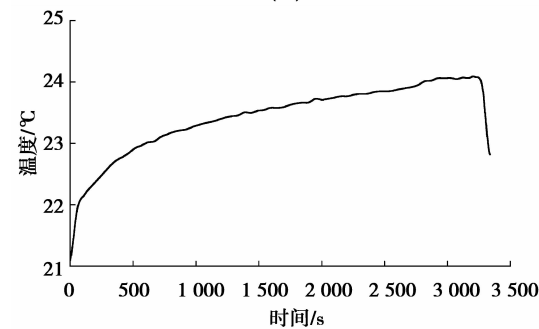
(a) 4层



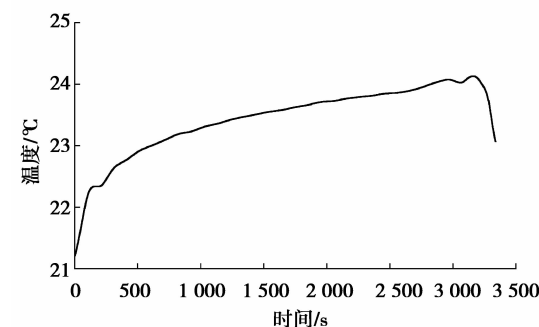
(b) 6层



(c) 7层



(d) 8层



(e) 9层

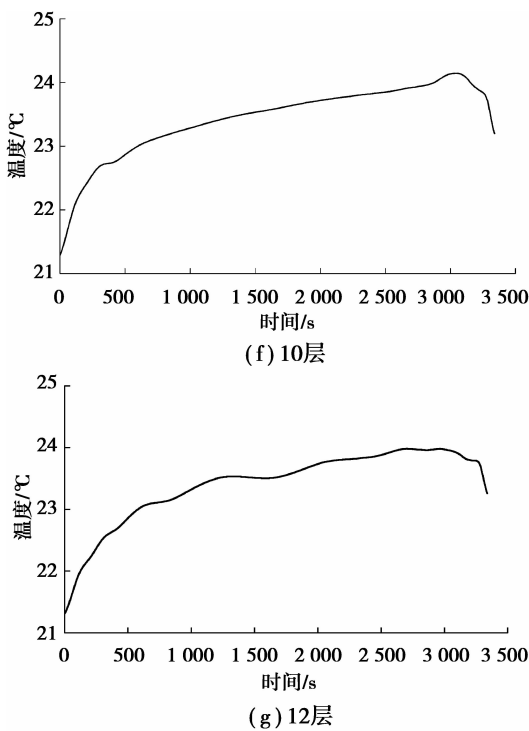


图 6 sym8 小波不同层数去噪结果

3.2 小波去噪结果评价

影响小波去噪效果的因素很多,因此需要选取合理的评价指标来达到对最优参数的选取,一般常用的评价指标有信噪比(SNR)和均方差(RMSE)^[15-20]。但在本实验中由于无法获取温度的真实信号,以上评价指标均不能满足评价要求,考虑到瓦斯吸附时温度变化是一个连续的、平稳的上升过程,笔者利用去噪信号方差对分层结果进行评价:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}(i) - \bar{\hat{x}})^2 \quad (2)$$

显然,方差越小,数据的波动越小,去噪信号就越好。利用式(2),对图 6 所示的 4、6、7、8、9、10、12 小波去噪后的信号进行方差计算,结果分别为 0.306 9、0.305 7、0.305 6、0.305 4、0.305 5、0.309 6、0.329 0 (如图 7 所示),比对后不难看出其中的 8 层去噪信号具有最小的方差,所以,利用 sym8 小波 8 层分解的去噪方法可以对煤层瓦斯吸附解吸实验温度信号进行较好的去噪处理。

4 温度信号去噪的应用

小波去噪能去除噪声的高频信号,保留低频以及平稳信号。对不同瓦斯压力下型煤吸附温度曲线进行 sym8 小波基函数 8 层分解,其数据重构后可以得到如图 8、9 所示的光滑温度曲线,经小波去噪前后温度信号的对比不难发现,小波去噪可以大大

地提高煤体在吸附解吸煤层瓦斯过程中温度信号的精确性及可分析性,为后续分析及比较提供了依据。分析去噪后的温度信号可以发现,煤层瓦斯吸附时间-温度演化曲线为一条近似抛物线;在其他实验条件相同时,煤层瓦斯压力越大、煤颗粒粒径越小,煤体在吸附解吸煤层瓦斯过程中的温度增加量越大。

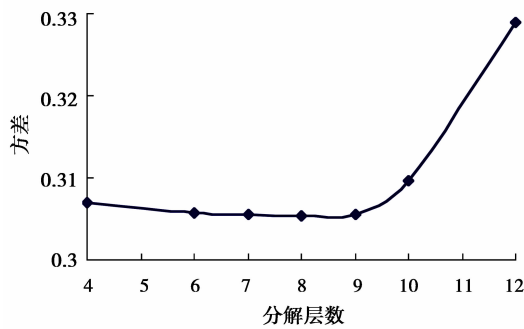
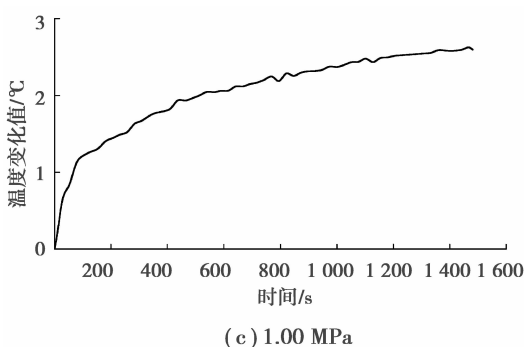
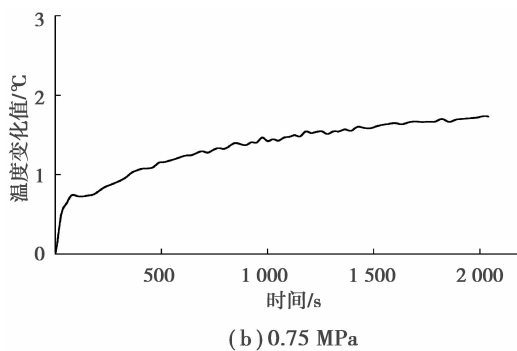
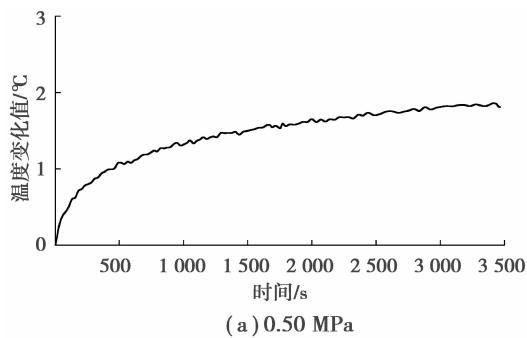


图 7 不同分解层数信号方差



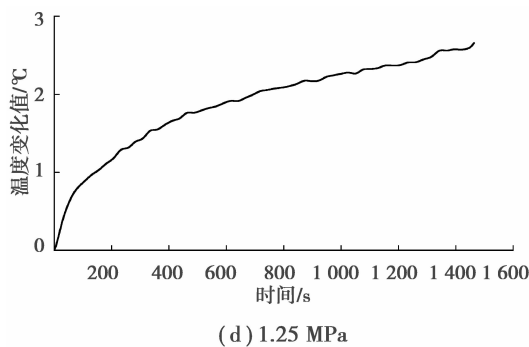


图 8 不同瓦斯压力吸附温度信号去噪结果

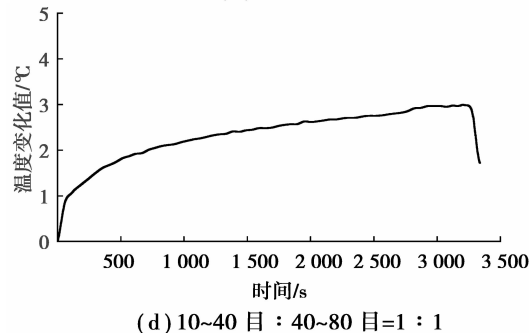
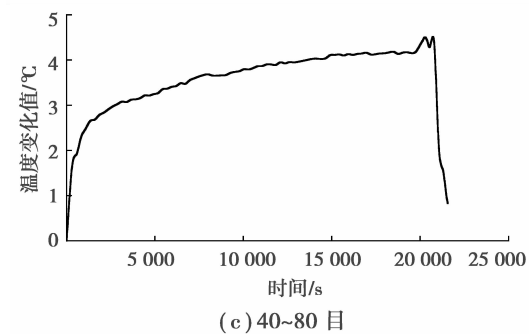
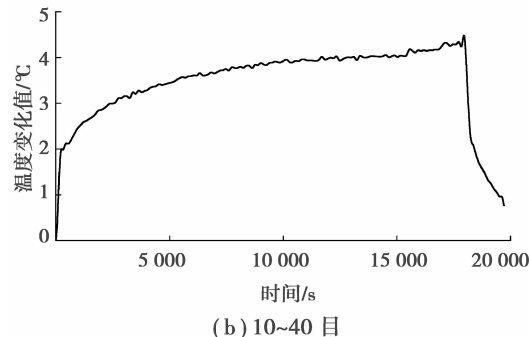
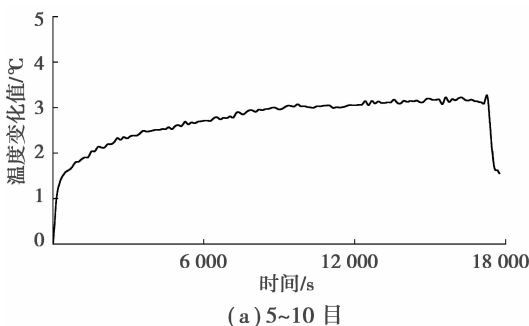


图 9 不同粒径煤粉吸附时的温度信号去噪结果

5 结 语

1) 采用 Pt100 热传感器、MaxTC 测控仪、MaxTest-Load 试验控制软件成功构建了瓦斯吸附解吸过程温度信号采集系统;

2) 为最大程度的剔除噪声信号, 还原真实信号, 经分析比对最终选用消失矩阶数较高、光滑性较好的 sym8 小波 8 层分解的去噪方法, 并取得良好的去噪效果;

3) 实验表明, 针对煤体在吸附解吸煤层瓦斯过程中温度演化曲线进行小波去噪是合理可行的, 可以较好地处理煤体在煤层吸附煤层瓦斯过程中的温度信号, 为进一步研究其温度演化规律提供了可靠的依据。

参考文献:

- [1] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1993.
- [2] 牛国庆, 颜爱华, 刘明举. 煤与瓦斯突出过程中温度变化的实验研究[J]. 西安科技学院学报, 2003, 23(3): 245-248.
NIU GUO-QING, YAN AI-HUA, LIU MING-JU. Experimental study on temperature variation of coal and gas outburst[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2003, 23(3): 245-248.
- [3] 郭立稳, 俞启香, 蒋承林, 等. 煤与瓦斯突出过程中温度变化的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 366-368.
GUO LI-WEN, YU QI-XIANG, JIANG CHENG-LIN, et al. Testing study on the variation of coal temperature during the process of coal and gas outburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 366-368.
- [4] PINI R, OTTIGER S, BURLINI L, et al. Sorption of carbon dioxide, methane and nitrogen in dry coals at high pressure and moderate temperature [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(1): 90-101.
- [5] SAKUROVS R, DAY S, WEIR S, et al. Temperature dependence of sorption of gases by coals and charcoals[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 73(3/4): 250-258.
- [6] LI D Y, LIU Q F, WENIGER P, et al. High-pressure sorption isotherms and sorption kinetics of CH₄ and CO₂ on coals[J]. Fuel, 2010, 89(3): 569-580.
- [7] PINI R, OTTIGER S, BURLINI L, et al. Sorption of carbon dioxide, methane and nitrogen in dry coals at high pressure and moderate temperature [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(1): 90-101.

- [8] YI J, AKKUTLU I Y, KARACAN C O, et al. Gas sorption and transport in coals: a poroelastic medium approach[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 77(1/2): 137-144.
- [9] 许江, 陶云奇, 尹光志, 等. 煤与瓦斯突出模拟试验台的研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(11): 2354-2362.
- XU JIANG, TAO YUN-QI, YIN GUANG-ZHI, et al. Development and application of coal and gas outburst simulation test device [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(11): 2354-2362.
- [10] 吴鑫, 许江, 陶云奇, 等. 煤粉粒径对比对煤与瓦斯突出影响的实验研究[C]//第十一届中国科协年会论文集. 北京: 中国科学技术学会, 2009.
- [11] SINGH N K, SNOUSSI H, HEWSON D, et al. Wavelet transform analysis of the power spectrum of centre of pressure signals to detect the critical point interval of postural control[J]. *Communications in Computer and Information Science*, 2010, 52: 235-244.
- [12] LI H, LIN Q Z, WANG Q J, et al. Research on spectrum denoising methods based on the combination of wavelet package transformation and mathematical morphology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(3): 644-648.
- [13] 万红, 姜凤茹. 心电信号的小波阈值去噪算法研究[J]. *微计算机信息*, 2008, 7(3): 156-158.
- WAN HONG, JIANG FENG-RU. An algorithm study of electrocardiogram signal de-noising by using wavelet thresholding method [J]. *Microcomputer Information*, 2008, 7(3): 156-158.
- [14] 王大凯, 彭进业. 小波分析及其在信号处理中的应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [15] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Ideal spacial adaption by wavelet shrinkage[R]. Stanford: Stanford University, 1992.
- [16] 董小刚, 秦喜文. 信号消噪的小波处理方法及 Matlab 实现[J]. *长春工业大学学报*, 2003, 24(2): 1-4.
- DONG XIAO-GANG, QIN XI-WEN. The elimination of signal noise by wavelet analysis and its demonstration by Matlab [J]. *Journal of Changchun University of Technology*, 2003, 24(2): 1-4.
- [17] 杜浩藩, 丛爽. 基于 MATLAB 小波去噪方法的研究[J]. *计算机仿真*, 2003, 20(7): 119-122.
- DU HAO-FAN, CONG SHUANG. The study on wavelet de-noising under the environment of MATLAB [J]. *Computer Simulation*, 2003, 20(7): 119-122.
- [18] 史振江, 安建龙, 赵玉菊. 基于 MATLAB 的小波消噪仿真实现[J]. *石家庄铁路职业技术学院学报*, 2008, 7(1): 63-66.
- SHI ZHEN-JIANG, AN JIAN-LONG, ZHAO YU-JU. Simulation implement of wavelet denoise based on MATLAB [J]. *Journal of Shijiazhuang Institute of Railway Technology*, 2008, 7(1): 63-66.
- [19] 吴伟, 蔡培升. 基于 MATLAB 的小波去噪仿真[J]. *信息与电子工程*, 2008, 6(3): 220-229.
- WU WEI, CAI PEI-SHENG. Simulation of wavelet denoising based on MATLAB [J]. *Information and Electronic Engineering*, 2008, 6(3): 220-229.
- [20] 申永军, 杨绍普, 孔德顺. 一种改进的信噪比增强方法及应用[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(7): 18-20.
- SHEN YONG-JUN, YANG SHAO-PU, KONG DE-SHUN. Improved method to enhance signal-to-noise ratio and its application [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(7): 18-20.

(编辑 郑洁)