

厚煤层分层开采采空区自燃“三带”规律及防治研究

张辛亥^{1,2}, 万旭^{1,2}, 许延辉^{1,2}, 丁峰^{1,2}, 毛文龙^{1,2}

(1. 西安科技大学 西部矿山开采及灾害防治教育部重点实验室 陕西 西安 710054;

2. 西安科技大学 安全科学与工程学院 陕西 西安 710054)

摘要: 针对陕北某矿5101工作面易自燃厚煤层分层开采采空区遗煤自燃危险性大的问题,通过现场监测其上、下分层采空区气体成分变化并进行该工作面煤样的自然发火试验,研究下分层开采时采空区自燃的极限参数及自燃“三带”分布规律。研究表明:下分层回采时,原来为窒息带的上分层采空区以及下分层工作面后的采空区形成了2个自燃“三带”,且上分层次次氧化的遗煤经二次氧化自燃危险性会大幅增加,同时采空区自燃危险区域宽度增大了100 m以上,初始CO浓度增长较快。在回采期间采取了注氮、采空区两侧堵漏、注浆等防火技术措施,并进行了效果检验以保证工作面的正常回采。

关键词: 分层开采; 厚煤层; 自燃; 防火技术

中图分类号: TD75

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)10-0024-05

Study on the law of heat dissipation zone, oxidization and heat accumulation zone, suffocative zone in goaf and spontaneous combustion prevention in slicing mining of thick seam

Zhang Xinhai^{1,2}, Wan Xu^{1,2}, Xu Yanhui^{1,2}, Ding Feng^{1,2}, Mao Wenlong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Western Mine Exploration and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: According to the problem of high spontaneous combustion danger of left coal in the goaf of No. 5101 coal mining face with the slicing mining in the easy spontaneous combustion and thick seam, with the site monitoring on the gas components variation of the goaf in the top and low slices and the spontaneous combustion experiments of the coal samples from the coal mining faces, the paper had a study on spontaneous combustion limit parameters of the goaf during the slicing mining and the distribution law of heat dissipation zone, oxidization and heat accumulation zone, suffocative zone. The study showed that during mining the low slicing, the previous suffocative zone of goaf in the top slice and the goaf of the low slice coal mining face would form two heat dissipation zone, oxidization and heat accumulation zone, suffocative zone. The spontaneous combustion danger of the primary oxidized left coal would be highly increased after the secondary oxidization. Meanwhile, the width of the spontaneous combustion danger area in the goaf would be increased over 100 m and the primary CO concentration would be rapidly increased. During the coal mining period, the nitrogen injection, leakage sealing at the two sides of the goaf, grouting and other fire prevention technical measures were conducted, and the effect inspection was conducted to ensure the normal mining operation of the coal mining face.

Key words: slicing mining; thick seam; spontaneous combustion; fire prevention technology

0 引言

据统计,我国有自燃危险的煤矿占煤矿总数的

1/2以上,其中80%的自燃火灾发生在厚煤层开采中^[1-2]。陕北神府矿区蕴藏煤炭资源量大,煤层普遍较厚,属于陕北侏罗纪煤田^[3]。陕北某矿5101工

收稿日期: 2016-05-17; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.10.005

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1361129); 陕西省科学技术研究发展计划资助项目(2012KW-27-01)

作者简介: 张辛亥(1971—),男,陕西蓝田人,教授,博士。Tel: 13299036319, E-mail: 97604765@qq.com

引用格式: 张辛亥, 万旭, 许延辉, 等. 厚煤层分层开采采空区自燃“三带”规律及防治研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(10): 24-28.

Zhang Xinhai, Wan Xu, Xu Yanhui, et al. Study on the law of heat dissipation zone, oxidization and heat accumulation zone, suffocative zone in goaf and spontaneous combustion prevention in slicing mining of thick seam[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(10): 24-28.

作面位于神府矿区,属于易自燃特厚煤层。而目前特厚煤层开采方法主要有综放和分层综采,综放开采产生大量遗煤,冒落高度大,漏风严重,因此陕北某矿采用分层综采。但分层开采时上部采空区遗煤存在一次或多次氧化情况,自燃危险性大幅增加。开采连成的大片采空区在采掘期间极易发生自燃,且有毒有害气体可能会波及整个采空区甚至是工作面,难以控制,造成采面被封^[3-5]。通过对采空区自燃“三带”的科学划分,可以有效地对其自燃危险进行防治。很多学者进行了相关的研究:陈全等^[6]研究了利用多点升温率值法来划分自燃“三带”,但所使用温度为间接获得,误差较大;文献^[7-8]通过在采空区的不同高度布点对采空区三维自燃“三带”进行了研究;杨永良等^[9]利用顶板冒落规律研究了自燃“三带”分布;周英等^[10]依据现场监测数据和线性回归方程的方法研究了特厚煤层的自燃“三带”;徐精彩等^[11]通过综合考虑浮煤自燃极限参数等因素提出了完整、普遍认同的自燃“三带”划分理论。

但目前对一般厚度单层开采的采空区“三带”研究较多,对特厚煤层采空区“三带”的研究则主要集中在综放开采,而分层综采研究较少,且主要集中在工作面后部的采空区,而没考虑位于工作面前方已经变成窒息带的上分层采空区,显然这样的划分不够全面和科学。

因此,笔者通过对陕北某矿5101分层开采工作面的监测研究,综合考虑下分层开采时支架后采空区及工作面前的上分层采空区所形成的2个自燃“三带”,以期得到分层开采采空区自燃“三带”分布规律。

1 分层开采采空区自燃“三带”划分

1.1 采空区浮煤自燃的要素

采空区遗煤自燃是煤矿井下发生煤自燃的主要区域之一,而引起采空区松散遗煤升温的热量主要来源于煤与氧的复合作用。采空区内松散煤体的厚度、漏风动力与漏风强度、氧浓度分布等构成了其自燃的主要要素。

1.2 分层开采自燃“三带”划分依据

采空区自燃“三带”可划分为散热带、氧化升温带、窒息带。散热带漏风强度大,煤氧化放出的热量被很快带走,煤体不会升温;窒息带氧浓度较低,氧化放热少,煤体也不会升温;只有氧化升温带氧浓度

较高,漏风强度小而能够蓄热升温。根据文献^[12-14],只要测得采空区自燃的下限氧浓度 C_{\min} 、上限漏风强度 Q_{\max} 和极限浮煤厚度 h_{\min} ,就可根据松散煤体中氧浓度 C 、浮煤厚度 h 和漏风强度 Q 的分布划分其自燃“三带”,具体划分依据为:散热带 $Q > Q_{\max}$;窒息带 $(C < C_{\min})$;氧化升温带 $(h > h_{\min}) \cap (C > C_{\min}) \cap (Q < Q_{\max})$ 。

1.3 分层开采自燃“三带”划分方案

1) 工作面前。预先在工作面前的进、回风巷铺设钢管保护的束管,每侧设置3个测点,同侧相邻测点间距50 m,共6个测点(1—6)。随着测点进入采空区深度不断增大,取气分析其变化。测点铺设情况如图1所示。

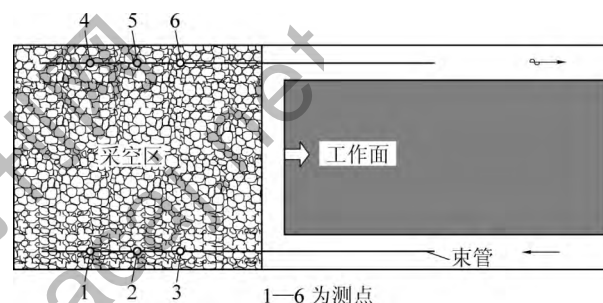


图1 测点布置

Fig. 1 Arrangement of measuring points

2) 工作面后。5101工作面采用先上下均为综采的回采方式,每次采高3.8 m,中间留煤厚约1 m,可得出下分层遗煤厚度为1.76 m。其中93%为该工作面的采出率,30%为采空区内部孔隙率的取值。

结合5101工作面煤样自然发火试验可得到:在浮煤厚度1.76 m时自燃极限漏风强度为 $2.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$,对应的极限氧体积分数为7%。

2 5101工作面分层开采自燃危险区域分布规律

5101工作面与一般单层开采不同,下分层开采时其上分层已是采空区,形成工作面前、后2个自燃“三带”。上分层底板自然垮落到下分层采空区,上下分层形成倒阶梯形采空区。上分层采空区内气体向下分层扩散,下分层的氧气会向上分层涌进,上、下分层发生物质、能量的扩散和交换。工作面持续通风以及下分层夹矸多、回采速度慢(5 m/d),使得下分层 O_2 浓度下降较慢(图2a)。

2.1 遗煤二次氧化自燃性变化

下分层回采时采空区内初始 CO 浓度较高,随着回采,CO 浓度迅速增加,其最高浓度远高于上分层。上分层采空区遗煤在下分层回采时存在二次氧化,其自燃危险性也会有变化。有些学者研究指出,煤在低温氧化阶段前期,遗煤二次氧化时的 CO 生成率、耗氧速率、放热强度均较一次氧化有所升高,且预氧化的温度越高,生成 C_2H_4 和 C_3H_6 所需的温度越低,更容易自燃^[15-19]。这说明初次氧化的遗煤经过二次氧化,其氧化速度加快,产生的 CO 向下分层工作面及采空区扩散,可能会影响下分层的安全回采(图 2b)。

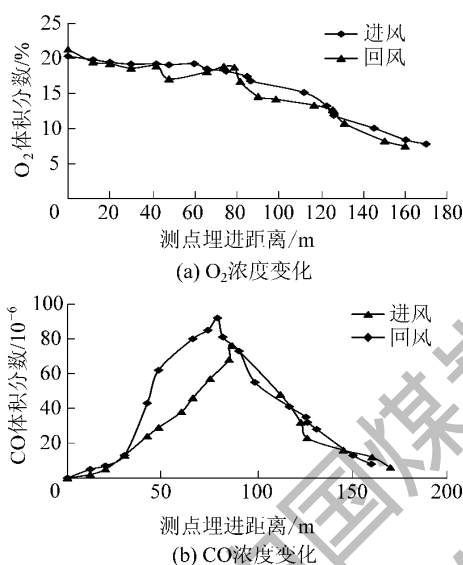


图 2 进、回侧采空区 O_2 、CO 浓度变化

Fig. 2 O_2 、CO percentage changes in goaf of intake airflow side and return airflow side

2.2 5101 工作面分层开采自燃“三带”分布规律

在浮煤厚度 1.76 m 时自燃极限漏风强度 2.4×10^{-3} m/s,对应的极限氧体积分数为 7%。将下分层采空区的最小氧浓度 C_{min} 、最大漏风强度 Q_{max} 的等值线绘制在同一张平面图上,即下分层采空区自燃“三带”分布,如图 3 所示。

同理,结合束管监测数据、自燃“三带”划分依据和遗煤自燃极限参数,同样可确定出位于工作面前的上分层采空区自燃“三带”分布,将前、后 2 个自燃“三带”投影到同一平面图上得到下分层回采时整体的自燃“三带”分布情况,如图 4 所示。

无论进风侧还是回风侧, O_2 浓度下降明显较慢,且具有较大起伏;而初始 CO 浓度上升较快、体

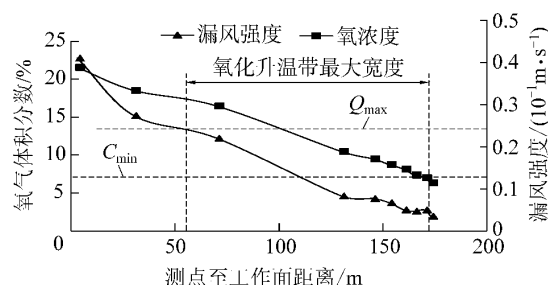


图 3 采空区最大漏风强度及最小氧浓度

Fig. 3 The maximum intensity of air leakage and minimum O_2 concentration in goaf

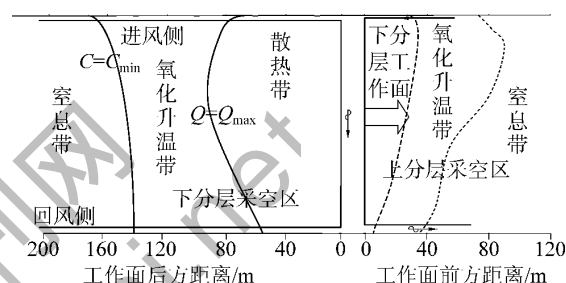


图 4 采空区自燃“三带”平面示意

Fig. 4 Plan of heat dissipation zone, oxidation and heat accumulation zone, suffocative zone of goaf

积分数较大,达到 90×10^{-6} 。与上分层相比,下分层采空区氧化升温带在进、回风两侧都变宽,宽度增加量都在 50 m 以上,且下分层氧化升温带两侧宽度的差值也减小了约 10 m。

2.3 自燃危险区域及最小安全回采速度

采空区自燃“三带”分布剖面如图 5 所示。采空区自燃危险区域包括工作面前、后方的散热带、氧化升温带,即 2 个散热带和 2 个氧化升温带长度之和约为 242 m。而该煤层自然发火期约为 34 天,则工作面最小安全回采速度 V_{min} 为 7.1 m/d,大于实际回采速度 5 m/d,也说明采空区具有自燃危险性,应加快回采。

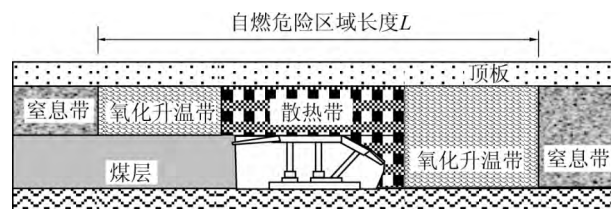


图 5 采空区自燃“三带”分布剖面

Fig. 5 Section of heat dissipation zone, oxidation and heat accumulation zone, suffocative zone of goaf

工作面前的上分层采空区由原来的窒息带再次变为氧化带,其温度已有所升高,经二次氧化,更易

自燃,特别是停采时,持续供氧,自燃危险区域长度将增大,且下分层终采线位于上分层终采线外约15 m,而撤架时间约为1个月,撤架期间顶部采空区“O型圈”范围内自燃危险更大。

上分层采空区内CO的释放使工作面附近初始CO浓度偏高,进风侧氧浓度低于回风侧,可能导致进风隅角风量减小。下分层进、回风巷位于上分层煤柱下部,可能与顶部采空区存在漏风裂隙,顶部采空区压酥、破碎的煤柱经长期氧化后有自燃危险。

3 回采期间防火技术措施及效果检验

5101工作面上分层已安全回采完毕,基于上述自燃危险区域分析,下分层回采必须采取有针对性的综合防火措施:①加快工作面回采速度。②注氮。从工作面前方(终采线附近)进风侧经钻孔向顶部采空区注氮气。③采空区两侧堵漏。用砂土装袋垒成墙,墙体长、宽都不小于2 m,高度上要接顶,如图6所示。④注浆。在上分层到达终采线撤架、下分层回采前准备或回采中根据情况调整注粉煤灰浆的流量,如图7所示。此外还采取了减少遗煤、及时密闭联络巷等防火措施。

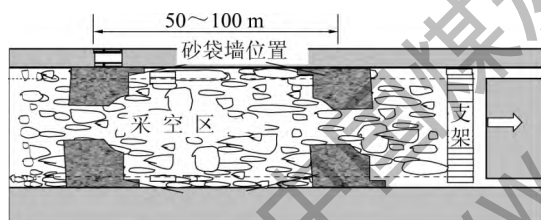


图6 工作面两侧砂袋墙平面示意

Fig. 6 Plan of sandbags wall in two sides of working face

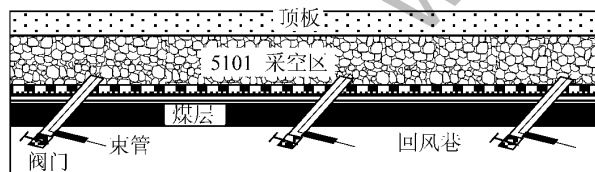


图7 监测孔及注浆孔截面

Fig. 7 Section of monitor and grouting hole

通过采取上述防火技术措施后用束管监测系统、红外热成像仪对气体、温度进行检验,都显示没有发火危险,但后续回采中仍要持续检测。

4 结 论

1) 分层开采容易导致上分层采空区遗煤自燃。上分层遗煤经二次氧化,温度升高,垮落到下分层,浮煤厚度增大、氧浓度增加,下分层采空区更易

自燃。

2) 下分层回采导致上分层原窒息带及支架后的采空区在工作面前、后形成2个自燃“三带”,采空区自燃危险区域扩大,且其宽度增加在100 m以上。

3) 分层开采下分层时,采空区O₂浓度下降较慢且波动较大,而初始CO浓度较高且升高较快,达到90×10⁻⁶,两巷道氧化升温带宽度较上分层增加了50 m以上。

4) 对易自燃特厚煤层分层开采存在的自燃危险性大的情况,应采取综合防火技术措施。

参考文献(References):

- [1] 方树林.中国煤矿灾害防治技术的研究现状与发展趋势[J].洁净煤技术,2012,18(1):91-94.
Fang Shulin. Research status and development tendency of coal mine disaster prevention and control technology in China[J]. Clean Coal Technology, 2012, 18(1): 91-94.
- [2] 戚旭鹏,郝朝瑜,王雪峰,等.特厚易自燃煤层综放开采技术采空区防火技术[J].金属矿山,2015,44(4):162-165.
Qi Xupeng, Hao Chaoyu, Wang Xuefeng, et al. Fire prevention technology of mined-out area under the fully mechanized caving for extremely thick spontaneous combustion coal seam[J]. Metal Mine, 2015, 44(4): 162-165.
- [3] 王志扬,张振鹏.厚煤层无煤柱分层开采防火技术探讨[J].煤矿现代化,2009,5(S1):16-17.
Wang Zhiyang, Zhang Zhenpeng. Study on thick coal seam with no slicing coal pillar fire-fighting technology, 2009, 5(S1): 16-17.
- [4] 高军伟.下分层煤体及顶板发火区现场探测与防控途径[J].煤矿安全,2014,45(1):106-108.
Gao Junwei. Site detection and prevention approach for lower layered coal and its roof combustion zone[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(1): 106-108.
- [5] 李强,鄢剑明,吴玉国,等.近距离煤层开采上覆煤层采空区气体分布规律[J].中国煤炭,2015,41(2):104-109.
Li Qiang, Wu Jianming, Wu Yuguang, et al. Gas distribution law in the goaf of upper slice in close distance coal seams[J]. China Coal, 2015, 41(2): 104-109.
- [6] 陈全.采空区“三带”划分指标研究[J].煤炭工程师,1997(3):12-15.
Chen Quan. Study of three zones division index[J]. Coal Engineer, 1997(3): 12-15.
- [7] 谢军,程卫民,崔洪义,等.综放采空区空间自燃“三带”的观测和划分[J].煤矿安全,2011,42(4):137-139.
- [8] 完颜晓亮,齐俊德,史庆科.特厚煤层综放工作面自燃立体“三带”分布规律研究[J].矿业安全与环保,2014,41(4):69-72.
Wanyan Xiaoliang, Qi Junde, Shi Qingke. Research on 3D distribution of spontaneous combustion "three zones" in fully mechanized top-coal caving face in extra-thick seam[J]. Mine Safety and En-

- vironmental Protection 2014 41(4): 69-72.
- [9] 杨永良,李增华,陈奇伟,等.利用顶板冒落规律研究采空区自燃“三带”分布[J].采矿与安全工程学报,2010,27(2): 205-209.
Yang Yongliang, Li Zenghua, Chen Qiwei *et al.* The study of distribution of spontaneous combustion “three zone” in gob using the law of the roof caving [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010 27(2): 205-209.
- [10] 周英,南华.特厚易自燃煤层综放开采采空区“三带”划分研究[J].中国煤炭,2006,32(2): 32-34.
Zhou Ying, Nan Hua. Study on the division of goaf “three zone” in mechanized mining of ultra thick seam [J]. China Coal, 2006 32(2): 32-34.
- [11] 徐精彩.煤自燃危险区域判定理论[M].北京:煤炭工业出版社,2001: 199-207.
- [12] 张辛亥,席光,陈晓坤,等.近距离煤层群开采自燃危险区域划分及自燃预测[J].煤炭学报,2005,30(6): 733-736.
Zhang Xinhai, Xi Guang, Chen Xiaokun *et al.* Determining spontaneous combustion danger zones and predicting spontaneous combustion during mining near neighbored coal seams [J]. Journal of China Coal Society, 2005 30(6): 733-736.
- [13] 付田田,武光辉,许永刚,等.易自燃特厚煤层分层开采工作面自燃“三带”划分及防治措施[J].煤矿安全,2015,46(3): 126-129.
Fu Tiantian, Wu Guanghui, Xu Yonggang *et al.* The division of spontaneous combustion “three zone” and prevention measures in spontaneously inflammable and specially thick coal seam layering mining face [J]. Safety in Coal Mines, 2015 46(3): 126-129.
- [14] 李东印,蒋东杰,贾海林.不连沟煤矿特厚煤层综放面采空区自燃“三带”分布规律[J].煤炭工程,2011(5): 86-88.
Li Dongyin, Jiang Dongjie, Jia Hailin. The division law of fully mechanized face of goaf spontaneous combustion three zone in Bu-lianta Coal Mine [J]. Coal Engineer, 2011 5: 86-88.
- [15] 文虎,张建业,程方明,等.煤二次氧化的自燃特性试验研究[J].煤炭技术,2015,34(10): 290-292.
Wen Hu, Zhang Jianye, Cheng Fangming *et al.* Coal spontaneous combustion characteristics of secondary oxidation experiment [J]. Coal Technology, 2015 34(10): 290-292.
- [16] 文虎,姜华,翟小伟,等.煤二次氧化气体特征试验研究[J].煤矿安全,2013,44(9): 38-40.
Wen Hu, Jiang Hua, Zhai Xiaowei *et al.* Experiment study on gas characteristics of coal secondary oxidation [J]. Safety in Coal Mines, 2013 44(9): 38-40.
- [17] 邓军,赵婧昱,张婉妮,等.陕西侏罗纪煤二次氧化自燃特性试验研究[J].中国安全科学学报,2014,24(1): 34-40.
Deng Jun, Zhao Jingyu, Zhang Yanni *et al.* Experimental study on spontaneous combustion characteristics of secondary oxidation of Jurassic coal [J]. China Safety Science Journal, 2014 24(1): 34-40.
- [18] 文虎,李成会,费金彪,等.高硫煤二次氧化自燃特性参数的试验研究[J].矿业安全与环保,2015,42(3): 1-4.
Wen Hu, Li Chenghui, Fei Jinbiao *et al.* Experimental study on characteristic parameters of high-sulfur coal spontaneous combustion in secondary oxidation [J]. Mine Safety and Environmental Protection, 2015 42(3): 1-4.
- [19] 马励,向崎,任立峰.阻化煤样的初次/二次氧化特性试验研究[J].西安科技大学学报,2015,35(6): 702-707.
Ma Li, Xiang Qi, Ren Lifeng. Experimental study on the primary/secondary oxidation characteristics of inhibited coal sample [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015 35(6): 702-707.
- [20] 孟召平,张吉昌, Tiedemann J. 煤系岩石物理学参数与声波速度之间的关系[J].地球物理学报,2006,49(5): 1505-1510.
Meng Zhaoping, Zhang Jichang, Tiedemann J. Relationship between physical and mechanical parameters and acoustic wave velocity of coal measures rocks [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006 49(5): 1505-1510.
- [21] 石瑛,王赞,芦俊.煤田地震多属性分析技术的应用[J].煤炭学报,2008,33(12): 1397-1402.
Shi Ying, Wang Yun, Lu Jun. Application of seismic multi-attribute analysis technique in coal field [J]. Journal of China Coal Society, 2008 33(12): 1397-1402.

(上接第171页)

coalfield [J]. Zhongzhou Coal, 2015(9): 126-128.

- [18] 刘斌,席道瑛,葛宁洁,等.不同围压下岩石中泊松比的各向异性[J].地球物理学报,2002,45(6): 880-890.
Liu Bin, Xi Daoying, Ge Ningjie *et al.* Anisotropy of Poisson's ratio in rock samples under confining pressures [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002 45(6): 880-890.
- [19] 彭真明,李亚林,巫盛洪,等.碳酸盐岩储层多角度弹性阻抗流体识别方法[J].地球物理学报,2008,51(3): 881-885.
Peng Zhenming, Li Yalin, Wu Shenghong *et al.* Discriminating gas and water using multi-angle extended elastic impedance inversion in carbonate reservoirs [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008,