

以米兰科维奇周期为约束的层序地层划分研究

袁学旭^{1,2} 郭英海^{1,2} 沈玉林^{1,2} 邵玉宝^{1,2}

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院 江苏 徐州 221116; 2. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室 江苏 徐州 221008)

摘要: 基于层序地层学和旋回地层学理论,以贵州盘县3井为例,采用db5小波对其自然伽马(GR)测井数据进行小波变换,并对各小波系数曲线进行快速傅里叶变换,选用米兰科维奇周期最佳匹配分析方法,根据其比值与米兰科维奇天文周期比例关系的对应性,对识别出来的优势周期进行剔除和选择,确定了与各米兰科维奇周期相关的小波曲线分别为d3、d5、d6和d8。基于米兰科维奇周期对高频层序的控制作用,将米兰科维奇旋回的识别和层序地层的划分对比相结合,以识别出来的米兰科维奇旋回作为约束条件,进行测井层序的划分研究。结果表明,在钻井中米兰科维奇旋回曲线特征清晰,划分出4个三级层序和2种体系域,所划分的层序地层与实际地质情况是基本吻合的。

关键词: 米兰科维奇周期; 层序地层; 小波变换; 快速傅里叶变换

中图分类号: P618.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2013)12-0105-05

Study on Sequence Stratigraphic Division by Using Milankovitch Cycles as Constraints

YUAN Xue-xu^{1,2}, GUO Ying-hai^{1,2}, SHEN Yu-lin^{1,2}, SHAO Yu-bao^{1,2}

(1. School of Resource and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. MOE Key Laboratory of CBM Resource and Reservoir Formation Process, Xuzhou 221008, China)

Abstract: On the basis of the sequence stratigraphic theory and cyclic stratigraphic theory, the data of GR well logging curve from Well Panxian 3 were processed through db5 wavelet analysis and fast fourier transformation. According to Milankovitch cycles best matching method and the corresponding relations between the ratio of Milankovitch cycles, the wavelet scales of Milankovitch cycles which have been determined by rejecting and selecting the dominant periods in the strata were d3, d5, d6 and d8. Based on the control action for the high frequency sequence and combined the recognition of Milankovitch cycles with the division and correlation of sequence stratigraphy, the stratigraphy division and correlation of the wells were carried out by using Milankovitch cycles as rulers. The results show that the features of Milankovitch curves were made clear, four third-order sequences and two system tracts were classified, the divided sequence stratigraphy basically tallied with the actual geological situation.

Key words: Milankovitch cycle; sequence stratigraphy; wavelet transform; fast fourier transform

0 引言

层序地层学是地层学和沉积学相结合形成的一个分支学科,其综合应用生物地层和年代地层,以及钻井垂向沉积序列、测井响应、地球化学特征等资料,研究沉积地层空间分布规律及演化过程,建立盆地各级等时层序地层格架,指导沉积盆地矿产资源勘查与开发^[1-3]。在实际应用过程中,层序划分和

对比受到人为因素的严重干扰,不同的研究者常提出不同的方案,造成层序划分与对比结果存在着较大的不确定性。因此,识别各级层序界面及合理开展地层等时对比成为目前的突出问题。在层序划分过程中,如果能够找到一个绝对的标准,则可大幅减少人为因素在研究区层序划分过程中的影响。迄今已有不少学者从天文地质学方面探讨了天体运行轨道周期对沉积盆地层序地层形成的控制作用,并建

收稿日期:2013-06-09;责任编辑:曾康生

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41072076);国家自然科学基金青年基金资助项目(41102100)

作者简介:袁学旭(1986—),男,山东济宁人,博士研究生。Tel:13407531126, E-mail: yuanxuexu860324@163.com

引用格式:袁学旭,郭英海,沈玉林,等.以米兰科维奇周期为约束的层序地层划分研究[J].煤炭科学技术,2013,41(12):105-109,59.

立了各天文周期与地层基准面旋回之间的相对对应关系^[3-5],由于层序地层学从沉积学的角度来研究地层中记录的基准面旋回变化^[6],这也为开展层序地层的划分与对比提供了理论的依据。作为一种天然存在于地层中地质时间标尺的米兰科维奇(简称米氏)旋回,其稳定的周期变化和对高级别层序的控制作用能保证研究区层序地层划分方案的统一性。

1 米氏周期

随着沉积地层学研究的不断深入,人们不断发现地层记录中蕴涵大量的地质时间信息,这些地质时间信息主要受控于宇地系统运动规律和圈层尺度因素制约形成的旋回层、韵律层和事件层^[7],如米氏旋回。米兰科维奇理论^[8-10]最早由前南斯拉夫学者米兰科维奇提出,米氏旋回与地球天文轨道要素周期性变化有关,轨道参数周期性的变化影响地球表层所接收到的日照量,日照量的变化引起气候的变化,所以米氏周期的变化具有全球效应,引起气候变化,进而在沉积物的结构、构造及沉积层的厚度变化上反映出来^[11]。

目前已确定的米氏周期中日地公转轨道参数周期,包括偏心率长周期(0.405 Ma)、偏心率短周期(0.10~0.13 Ma)、黄赤交角周期(0.029~0.045 Ma)及岁差周期(0.017~0.022 Ma)^[12]。根据 Berger 对地质历史时期米氏旋回周期变化作的深入研究^[13-15],计算出上二叠统各地球轨道参数^[16]见表 1。因为米氏旋回在地质历史时期具有相对的稳定性,其各周期之间的比率关系在一定的地质历史时期是稳定的,如果能够在地层所包含的各种旋回中找到与米氏周期比率相等的关系,就认为研究层段的各旋回对应各米氏旋回^[17-20]。

表 1 上二叠统米氏周期、频率及其频率比值

名称	周期/ Ma	频率/ Hz	频率比值					
			e_1	e_2	α_1	α_2	p_1	p_2
e_1	0.405	2.47	1.00	—	—	—	—	—
e_2	0.123	8.13	3.29	1.00	—	—	—	—
α_1	0.045	22.28	9.02	2.74	1.00	—	—	—
α_2	0.035	28.48	11.54	3.50	1.28	1.00	—	—
p_1	0.021	47.26	19.14	5.81	2.12	1.66	1.00	—
p_2	0.018	56.43	22.86	6.94	2.53	1.98	1.19	1.00

注: e_1 为长偏心率; e_2 为短偏心率; α_1 为黄赤交角 1; α_2 为黄赤交角 2; p_1 为岁差 1; p_2 为岁差 2。

2 层序级次的划分和控制因素

沉积层序主要由全球性海平面变化所产生,具有明显的周期性。虽然沉积层序常会不同程度地受到地区性构造运动和其他地质因素的影响和叠加,但其根本原因可能在于不同规模和级别的米氏周期的控制^[21]。沉积层序级别大致可划分为 7 级^[22],分述如下:①一级巨层序,时限 200~400 Ma,泛大陆形成与解体引起全球海平面变化;②二级超层序,时限 10~40 Ma,大洋中脊扩张体系,引起的全球海平面变化;③三级层序,时限 1~10 Ma,洋中脊变化及大陆冰川消长引起的全球海平面变化,板块内构造沉降与抬升作用对地区性海平面变化的影响;④四级准层序组或体系域,时限 0.4 Ma,长偏心率周期;⑤五级准层序,时限 0.1 Ma,短偏心率周期;⑥六级韵律层,时限 0.02~0.04 Ma,岁差周期或黄赤交角周期;⑦七级交替纹层,时限 0.002~0.005 Ma,冰川消融与大地水准面变化。其中由米氏周期所引起的气候变化及冰川消长型海平面变化形成四—六级的高频层序(表 1)^[23]。

以米氏旋回作为高级别层序划分的标尺,可为层序的划分提供不受人为影响的标准,保证层序划分方案的科学和统一性,大幅提高其准确性^[24],对于深入研究三级层序及其体系域的划分、岩相时空分布预测等具有十分重要的意义,是层序地层深化研究与经典层序地层研究方法的重要补充与完善。

3 米氏周期的识别与层序地层的划分

3.1 米氏周期的识别

测井数据是迄今为止所能获得的分辨率最高、连续性最好的地质数据,不同的测井数据在不同程度上记录着地质演化的历史,从不同侧面反映着地层形成演化的条件和影响因素^[25-26]。自然伽马(GR)曲线被认为可以作为气候变迁的代用指标,并被用于反演古气候的变迁,因此,在进行米氏旋回识别的过程中,选择自然伽马数据作为主要参数。

小波变换技术被誉为“数学显微镜”,它具有能够应用小波函数对复杂信号进行多级分解,从而获得复杂信号在时间域的不同周期特征。即小波变换能够将复杂信号分解为不同频率或者周期的曲线旋回,这是利用测井曲线的小波分析划分不同周期的沉积旋回或者对应的不同级别层序单元的基础。另

外,快速傅里叶变换技术具有较强的频率分辨能力,通过对复杂信号或者其分解后的信号进行频谱分析,能够获得信号中的频率信息^[3]。笔者则通过这 2 种方法的结合开展分析研究。利用 MATLAB 软件的小波分析工具箱所提供的小波变换和频谱分析工具对贵州盘县 3 井自然伽马曲线进行离散小波变换及快速傅里叶变换。由于自然伽马测井曲线包含多种频率成分,因此在选择小波类型时考虑了尺度及平移距变化范围较大的 Daubechies(简称 db)小波,它是由世界著名小波分析学者 Ingrid Daubechies 发明的,这一系列的小波简称为 db N ,其中 N 表示阶

数^[27],阶数太短或太长都不利于测井信号能量的集中,实际工作中常用的 db5 小波对能量的集中较好,并且在划分沉积旋回时具有较好的适用性^[28]。通过多次试验分析,也表明 db5 小波对测井信号进行 11 层分解可以得到满意的结果。因此,应用离散小波变换的方法,选择 db5 小波对贵州盘县盘 3 井自然伽马(GR)曲线进行 11 层的分解,即可得到 11 条不同级次的小波系数 K 曲线(图 1)。其中 d1、d2 曲线为频率大于岁差周期的小波系数曲线,d9、d10、d11 曲线为频率低于偏心率长周期的小波系数曲线,与米氏周期相关的信息主要在 d3 ~ d8 曲线之中。

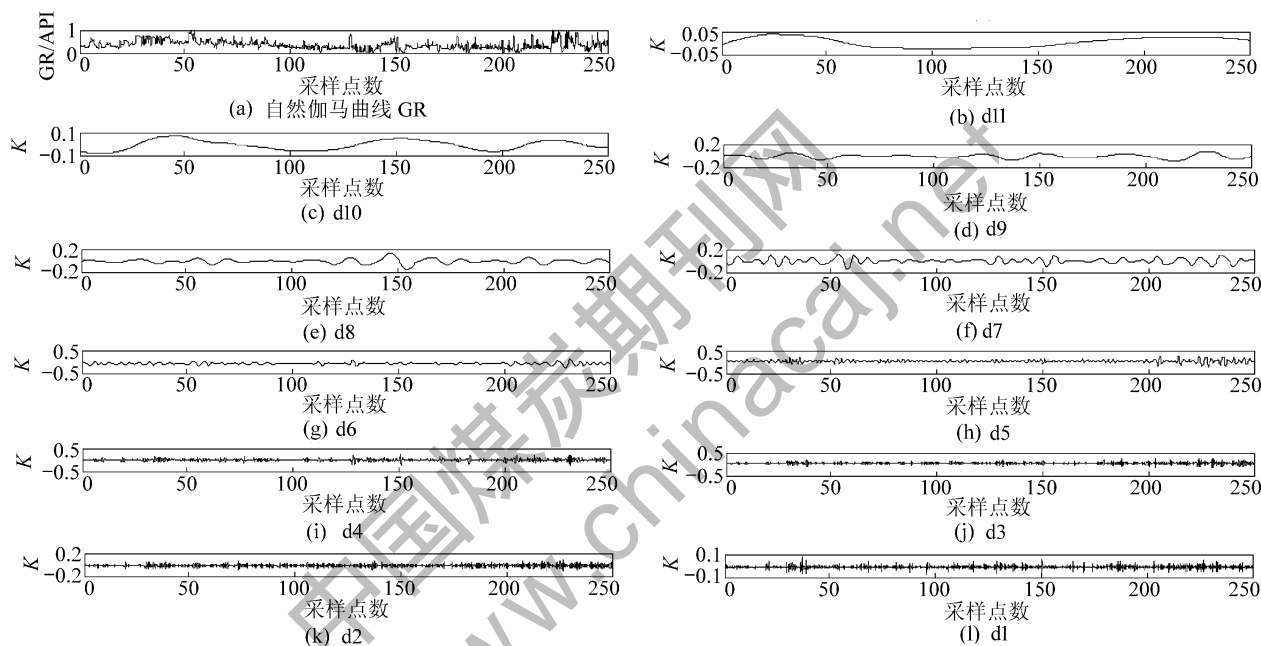


图 1 盘县 3 井 GR 曲线 db5 离散小波变换分解结构

对 d3 ~ d8 曲线各小波系数曲线开展频谱分析,根据各曲线频谱簇的能量特征筛选出一系列能量相对集中的优势频率。从对各小波系数曲线的频谱结

果分析表明,d3、d5、d6 和 d8 曲线的优势频率(图 2、表 2)与表 1 中各已知天文周期的频率比相对比,可判断各沉积旋回所对应的米氏周期。

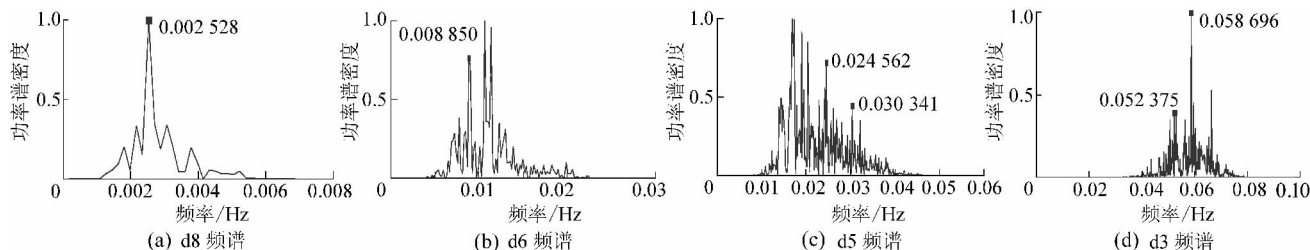


图 2 盘县 3 井 GR 曲线 db5 离散小波变换系数曲线频谱

3.2 层序地层的划分

测井曲线的小波变换,其地质意义在于测井数据经小波变换后所得的各小波系数曲线周期性震荡

的位置,代表了各级的突变点和突变区域,这反映地质上形成环境的突变,是一种界面的响应^[29]。研究表明,测井信号经过小波变换之后,通过考察多种伸

缩尺度下小波系数曲线表现出的明显周期性震荡特征,可与各级层序分界面建立一定对应关系,作为测井层序分析的依据。

表 2 d3、d5、d6 和 d8 的优势频率及其比值

小波变换 系数曲线	米氏 周期	优势频 率/Hz	优势频率比值					
			e_1	e_2	α_1	α_2	p_1	p_2
d8	e_1	0.002 528	1.00	—	—	—	—	—
d6	e_2	0.008 850	3.50	1.00	—	—	—	—
d5	α_1	0.024 562	9.72	2.78	1.00	—	—	—
	α_2	0.030 341	12.00	3.43	1.24	1.00	—	—
d3	p_1	0.052 375	20.72	5.92	2.13	1.73	1.00	—
	p_2	0.058 696	23.22	6.63	2.39	1.98	1.11	1.00

选择合适的曲线可以直接用来划分沉积旋回,代表不同的层序单元。表 2 中经过小波变换所得到的 d8 和 d6 曲线,分别对应准层序组和准层序级别的层序单元。因此,可以使用这些曲线进行层序单元的划分和对比。

依据小波系数振荡幅度和频率的不同,以及小波变换系数曲线中同一尺度旋回内小波系数振荡趋势相似的原则,从大到小进行划分,先在 d8 曲线中识别出盘县 3 井中的 4 个三级层序。由于沉积旋回的变化特征可以由不同尺度下的高频和低频小波系数曲线的变化趋势所反映^[30],则在层序内部结合 d6 曲线高低频变化趋势,对其进行高频和低频小波系数分析,划分出各体系域界面,结果如图 3 所

示。由图 3 可知,小波系数曲线的振荡趋势所反映的界面信息与不同级别的层序地层界面有很好的对应关系。所划分的层序地层与岩性变化、测井响应和稀土元素分布的特征^[31]也有很好的对应性。

4 结 语

在层序划分过程中,以不同级别的米氏旋回来作为划分不同级别层序地层的标准,可以大幅减少人为因素的影响,保证整个研究区各条剖面高级别层序划分方案的科学和统一性。测井数据经离散小波变换得出的各小波系数曲线,应用快速傅里叶变换识别其中的优势频率并确定其比例关系,确定各旋回曲线所对应的米氏旋回,以此开展层序地层的研究。基于米氏周期对沉积旋回的控制作用,使用小波变换和频谱分析相结合的方法,对贵州盘县 3 井进行的层序地层划分结果与区域地质研究认识基本吻合。

参考文献:

[1] 叶泰然,郑荣才,刘兴艳.高分辨率层序地层学在川西须家河组砂体分布研究中的应用[J].天然气工业,2008,28(2):44-47.

[2] 彭军,汪彦,张齐,等.保山盆地羊邑组二—三段高分辨率层序地层分析[J].西南石油大学学报:自然科学版,2008,30(1):27-29.

[3] 王鸿桢,史晓颖.沉积层序及海平面旋回的分类级别:旋回周期的成因讨论[J].现代地质,1998,12(1):1-16.

[4] 徐道一,杨正宗,张勤文,等.天文地质学概论[M].北京:地质出版社,1983.

[5] 王起琼.天文周期与地层基准面旋回及其识别技术[J].西南石油大学学报:自然科学版,2009,31(4):24-30.

[6] 邓宏文,王红亮,宁宁.沉积物体积分配原理:高分辨率层序地层学的理论基础[J].地质前缘,2000,7(4):305-313.

[7] 孟祥化.沉积节律性及其动力学研究[J].地质前缘,1997,4(3/4):147-153.

[8] Loutre M F. Pre-Quaternary Milankovitch Frequencies[J]. Nature, 1989, 342: 9.

[9] Berger A L. Milankovitch Theory and Climate[J]. Review of Geology, 1988, 26(4): 624-657.

[10] 戴新刚,尚可政,丑纪范.天文古气候理论及其进展—从米兰柯维奇到贝尔杰[J].地球科学进展,1997,12(5):488-491.

[11] 李斌,孟自芳,李相博.靖安油田延长组米兰柯维奇沉积旋回分析[J].地质科技情报,2005,24(2):64-70.

[12] 顾震年.古气候记录指示的天文周期分析[J].天文学报,2002,43(4):432-443.

[13] Berger A. Milankovitch Theory and Climate[J]. Reviews of Geophysics, 1988, 26(4): 624-657.

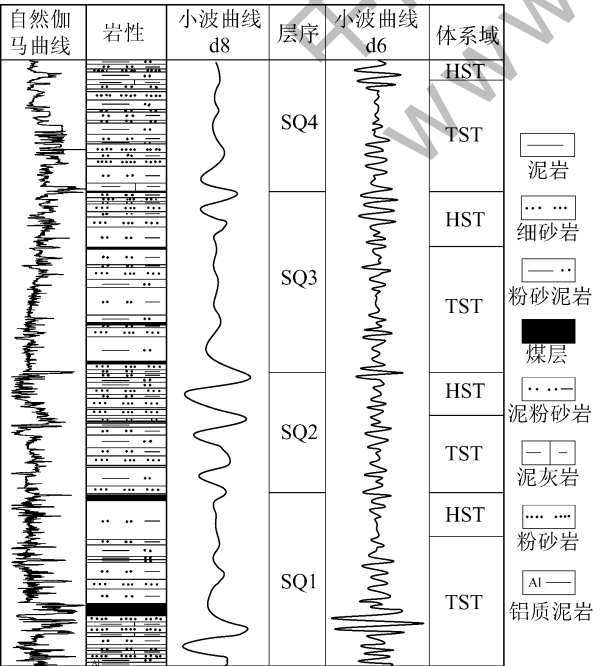


图 3 GR 曲线 db5 离散小波变换曲线 d6、d8 与层序划分

- [14] Berger A. Pre - quaternary Milankovitch Frequencies [J]. Nature, 1989, 342: 133.
- [15] Berger A, Loutre M F, Asker J. Stability of the Astronomical Frequencies Over the Earth's History for Palaeoclimates [J]. Science, 1992, 255: 560 - 565.
- [16] 李凤杰, 郑荣才, 罗清林, 等. 四川盆地东北地区长兴组米兰科维奇周期分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(6): 805 - 810.
- [17] 金之钧, 范国章, 刘国臣. 一种地层精细定年的新方法 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1999, 24(4): 379 - 382.
- [18] 李保利, 姚益民, 张守鹏, 等. 山东东营凹陷沙河街组纹层年龄估算方法探讨 [J]. 地层学杂志, 2007, 31(S1): 449 - 457.
- [19] 徐道一, 张海峰, 韩延本, 等. 陆相沉积的天文地层研究方法简介: 以井下地层为例 [J]. 地层学杂志, 2007, 31(S0): 431 - 442.
- [20] 姚益民, 徐道一, 张海峰, 等. 东营凹陷东辛 224 井上新世至全新世天文地层的研究 [J]. 地层学杂志, 2007, 31(S0): 458 - 470.
- [21] 王鸿祯, 史晓颖. 沉积层序及海平面旋回的分类级别: 旋回周期的成因讨论 [J]. 现代地质, 1998, 12(1): 1 - 16.
- [22] 赵宗举, 陈 轩, 潘 懋, 等. 塔里木盆地塔中 - 巴楚地区上奥陶统良里塔格组米兰科维奇旋回性沉积记录研究 [J]. 地质学报, 2010, 84(4): 518 - 536.
- [23] 郑荣才, 彭 军, 吴朝容. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义 [J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 249 - 254.
- [24] 张海峰. 以米氏旋回为标尺进行高级别层序地层划分与对比: 以准噶尔盆地中 I 区块为例 [J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(4): 18 - 20.
- [25] 刘 财, 张海江, 杨宝俊, 等. 小波变换在高分辨率地震勘探数据处理中的应用 [J]. 长春地质学院学报, 1996, 26(1): 78 - 82.
- [26] 侯遵泽. 小波分析及其在勘查地球物理中的应用 [J]. 物探与化探, 1998, 22(1): 71 - 75.
- [27] 杨建国, 夏松波, 须根法, 等. 小波分解与重建中产生频率混淆的原因与消除算法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(2): 61 - 64.
- [28] 赵 伟, 姜在兴, 邱隆伟, 等. 小波分析划分层序单元的地质学理论基础、方法与应用 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 436 - 441.
- [29] 余继峰, 李增学. 测井数据的小波变换及其地质意义 [J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(3): 336 - 339.
- [30] 房文静, 范宜仁, 邓少贵, 等. 测井数据小波变换用于层序研究 [J]. 地层学杂志, 2007, 31(3): 303 - 308.
- [31] SHAO Yu - bao, GUO Ying - hai, QIN Yong *et al.* Distribution Characteristic and Geological Significance of Rare Earth Elements in Lopingian Mudstone of Permian, Pan Country, Guizhou Province [J]. Mining Science and Technology(China), 2011, 21(4): 469 - 476.

(上接第 59 页)

次爆破揭开煤层, 放炮后回风流中瓦斯体积分数 0.20% ~ 0.50%, 平均为 0.32%, 低于《煤矿安全规程》的规定, 验证了采取的措施是有效的。

4 结 语

采用渐进式安全揭煤技术并配合注浆加固揭煤点煤体、使用金属骨架增加过煤门时顶板煤体的强度, 对成功揭穿具有高突出危险性的煤层有很好的保障作用。与以往揭煤工程采用在井筒内直接打钻抽采进行比较, 在揭 19 号煤层时采用两帮钻场交叉钻孔布置方式进行瓦斯抽采, 能提高瓦斯抽采率, 抽采效果好, 同时对将揭开的巷道两帮煤体的瓦斯进行截流, 使涌入巷道的瓦斯减少, 能连续抽采揭煤过程中不断释放补给的瓦斯量。采用斜井揭煤综合防突技术成功通过马依西一井回风斜井 19 号煤层, 形成了安全揭煤技术体系, 加强了该矿今后井筒(石门)揭煤的可操作性和指导性。

参考文献:

- [1] 王省身. 矿井灾害防治理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业学院出版社, 1986.

- [2] 俞启香. 矿井瓦斯防治 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [3] 林柏泉, 张建国. 矿井瓦斯抽采理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996.
- [4] 卢义玉, 葛兆龙, 李晓红, 等. 脉冲射流割缝技术在石门揭煤中的应用研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 55 - 58.
- [5] 刘 健, 刘泽功, 石必明. 低透气性突出煤层巷道快速掘进的试验研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 85 - 88.
- [6] 刘祥先. 贵州省盘县马依西一井田煤矿勘探地质报告 [R]. 贵阳: 贵州省西能煤炭勘查开发有限公司, 2006.
- [7] 练友红, 邓 涛, 董钢锋. 复杂地质条件近水平煤层石门揭煤瓦斯防治技术研究 [J]. 矿业安全与环保, 2010, 35(1): 85 - 88.
- [8] 国家煤矿安全监察局. 防治煤与瓦斯突出规定 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- [9] 张铁岗. 矿井瓦斯综合治理技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [10] 李建铭. 煤与瓦斯突出防治手册 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.
- [11] 何学秋, 申宝宏, 罗海珠, 等. 煤矿瓦斯防治技术与工程实践 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
- [12] 张银振. 石门揭煤综合消突技术研究及应用 [J]. 中州煤炭, 2011(7): 111 - 113.
- [13] 蔡寒宇, 魏国营, 辛新平. 石门短导硐快速揭煤防突技术研究及应用 [J]. 河南理工大学学报, 2007, 26(5): 489 - 492, 515.
- [14] 李永强, 涂经辉. 导硐揭煤技术初探及实践 [J]. 煤炭工程, 2011(10): 26 - 27, 30.