

# 双塔真空变压吸附富集煤矿乏风瓦斯的流程参数研究

杨海军, 刘应书, 李永玲, 杨 雄, 张传钊, 孟 宇

(北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

**摘 要:**在以活性炭为吸附剂的双塔真空变压吸附实验装置上,研究了双塔真空变压吸附法富集煤矿乏风瓦斯实验中流程参数对富集效果的影响。结果表明:在半周期、充压时间、上均压时间和下均压时间等四个流程参数中,半周期和上均压时间对产品气甲烷体积分数影响最大,其次为充压时间,对结果影响最小的是下均压时间;最好的均压方式是只有上均压,均压时间为 0.5 s;节流子孔径越小,产品气体积分数越高,减小节流孔径是提高产品气甲烷体积分数的方法之一。

**关键词:**煤矿乏风瓦斯;真空变压吸附;半周期;均压;节流子

中图分类号:TQ028.1

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)05-0016-06

## Study on the Process Parameters of VPSA for Gas Enrichment from Return Air of Coalmines

YANG Haijun, LIU Yingshu, LI Yongling, YANG Xiong, ZHANG Chuanzhao, MENG Yu

(College of Mechanical Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The influence of process parameters on the effect of gas enrichment from return air of coalmine with double-tower VPSA method taking the activated carbon as the absorbent was studied. The results showed that in four parameters, such as half-cycle, pressurization time, times of upper even air pressure and lower even air pressure, etc. the both of half-cycle time and time of upper even air pressure at the outlet end had most important influence on the methane concentration of the gas product, next was the pressurization time and the last was the time of lower even air pressure. The best mode of even air pressure was upper even air pressure with 0.5 s of time and, the smaller diameter of orifice, the higher methane concentration of the gas product was. In order to increase the methane concentration of the gas product, a usable method is to decrease the diameter of orifice.

**Key words:** gas in return air of coalmine; vacuum pressure swing adsorption (VPSA); half-cycle; even air pressure; orifice

在地下采煤过程中,煤层工作面的瓦斯气体要释放到通风空气中,形成乏风瓦斯气体。其重要成分甲烷既是一种优质的清洁能源,又是一种温室气体,所产生的温室效应是二氧化碳的 21 倍,对臭氧层的破坏力是二氧化碳的 7 倍<sup>[1-2]</sup>。煤矿乏风瓦斯的直接排放,一方面造成了有限的不可再生资源的严重浪费,另一方面也加剧了大气污染和温室效应。因此,治理和利用煤矿乏风瓦斯,是我国充分利用能源、保护大气环境的需要,具有重要意义。

真空变压吸附法因投资小,成本低等优势在富集乏风瓦斯方面受到广泛关注。Krzysztof 等<sup>[3]</sup>对含有低于 50% (体积分数) 甲烷的瓦斯利用变压吸附技术进行了富集研究,变压吸附过程在两个柱状装置中进行,

收稿日期:2011-04-02

基金项目:北京市自然科学基金项目(3113031)。

作者简介:杨海军(1989—),男,内蒙古乌兰察布人,硕士研究生,主要从事煤层气分离方面的研究。

E-mail:szwqhajun@163.com.cn.

刘应书(1960—),男,湖南新化人,教授,博士,主要从事气体分离及人工环境方面的研究。

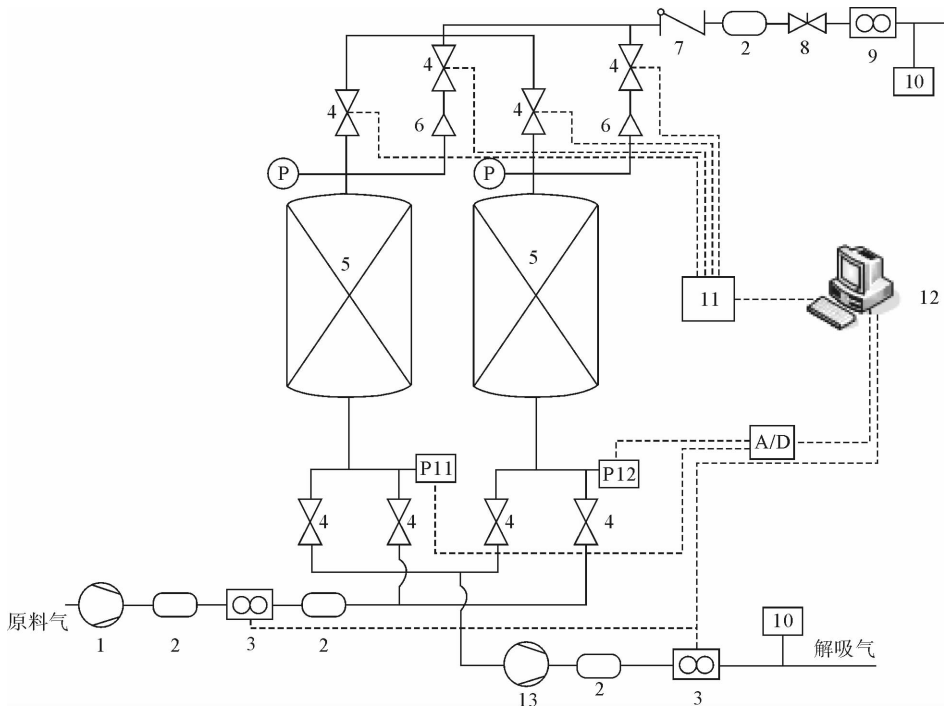
E-mail:ysliu@ustb.edu.cn.

装置中堆积了 5 A 碳分子筛,获得的气体甲烷体积分数达到 55%。鲜学福院士领导的研究小组<sup>[4-5]</sup>以活性炭或是改性的活性炭为吸附剂采用平衡效应浓缩 CH<sub>4</sub>,能够将 CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>中甲烷的浓度提高约 18%~27%。北京科技大学刘应书等<sup>[6]</sup>针对低浓度含氧煤层气吸附过程进行了安全性分析,得出了一种安全的吸附分离方法,以活性炭和碳分子筛的混合吸附剂进行吸附分离,富集瓦斯效果十分明显。但在富集瓦斯方面,针对工艺流程的选择及优化方面的研究较少。正交实验方法是根据因子设计的分式原理,采用由组合理论推导而来的正交表来安排试验,并对结果进行统计分析的多因子试验方法。运用正交实验法可大大减少工作量。本实验着重研究了甲烷体积分数 0.3%的煤矿乏风瓦斯富集情况,采用正交实验法研究了半周期、充压时间、上均压时间和下均压时间 4 个流程参数对产品气甲烷体积分数的影响,同时研究了节流子对乏风瓦斯富集效果的影响。旨在为煤矿乏风瓦斯的吸附富集工艺流程的选择和优化提供科学依据。

## 1 实验装置与方法

### 1.1 实验装置

实验使用的活性炭比表面积为 1 706 m<sup>2</sup> · g<sup>-1</sup>,对氮气和甲烷二元组分的分离因子为 4.6。图 1 为真空变压吸附分离模拟煤矿乏风瓦斯的实验原理图。该装置由压缩机、真空泵、吸附塔、控制系统、切换阀门、数据检测与采集系统等几个部件组成,通过 PLC 控制电磁阀的开关,实现煤矿乏风瓦斯分离过程的循环连续进行。实验以甲烷与空气的混合气模拟煤矿乏风瓦斯,原料气储存在气囊中,其中甲烷体积分数为 0.3%。实验过程中甲烷和部分空气被吸附剂吸附停留在吸附塔内,甲烷体积分数较低的瓦斯气体从吸附塔的排气端排出。甲烷体积分数升高的产品气通过抽真空的方法从吸附塔下端解吸出来,解吸压力约为 25 kPa。为使解吸气流量和体积分数稳定,在真空泵的出口设置了一个缓冲罐。在解吸气和排放气出口分别设两个取气口,用于在线分析解吸气和排放气中甲烷的体积分数。图中 6 为节流子,被设置在吸附塔的排气出口处。



1. 压缩机;2. 缓冲罐;3. 质量流量计;4. 电磁阀;5. 吸附塔;6. 节流子;7. 单向阀;8. 限压阀;9. 浮子流量计;  
10. 甲烷体积分数检测仪;11. PLC;12. 上位计算机;13. 真空泵;P. 压力表;PI. 压力传感器;A/D. 采集卡

图 1 双塔真空变压吸附富集乏风瓦斯实验装置图

Fig. 1 Double-tower VPSA experimental device for gas enrichment from return air

### 1.2 循环步骤

双塔真空变压吸附过程的循环时序如表 1 所示,每个吸附塔都要经历充压、吸附、均压降、抽真空、均压升 5 个步骤,其中均压升和均压降同为均压。因此,每个塔在半周期时间内要经过 4 个流程。

### 1.3 实验内容与方法

主要研究双塔真空变压吸附法富集煤矿乏风瓦斯,运用正交实验探索影响实验结果各流程的重要性,并且确定各流程最佳参数的大体范围,正交实验条件如表 2 所示。在此基础上进一步对有重要影响的流程参数进行最优实验,考察了各流程对实验结果的影响趋势;同时研究了节流子孔径大小对乏风瓦斯富集效果的影响。

表 1 循环时序表

Tab. 1 Time sequence table of circulation

吸附塔	充压	吸附	均压降	抽真空	均压升
吸附塔	抽真空	均压升	充压	吸附	均压降

表 2 正交实验  $L_9(3^4)$  数据表

Tab. 2 The data of orthogonal experiments  $L_9(3^4)$

因素 水平	半周期	充压时间	上均压时间	下均压时间
	1	2	3	4
1	8	0.5	0	0
2	11	1.0	0.4	0.4
3	14	1.6	0.8	0.8

## 2 实验结果与分析

### 2.1 正交实验结果

实验有半周期时间、充压时间、上均压时间和下均压时间 4 个流程参数影响最后的实验结果。如果进行全面实验,通过数据分析可以获得较为丰富的结果。但实验中流程参数多,每个流程参数水平变化范围大,例如本实验有 4 个流程参数,每个参数有 7 个水平的全面实验要做  $4^7=16\ 384$  次,在实际有限的时间内根本不可能。因此,运用正交实验法筛选对结果有显著影响的流程,而简便设定无显著影响的流程参数显得尤为重要,并且可以确定每组流程参数的最优值范围。

每组参数选取 3 个适当的水平,进行正交实验,得到不同甲烷体积分数的产品气。如表 3 所示,偏差平方和  $S_1 > S_3 > S_2 > S_4$ ,说明因素 1 半周期是所有因素中对结果影响最大的流程,因素 3 上均压时间的影响位居其次;因素 4 下均压时间的影响力最小。并且由于  $S_1/S_3=1.899$ ,说明半周期和上均压时间对结果的

表 3 正交实验结果表

Tab. 3 Results of orthogonal experiments

列号 试验号	半周期/s	充压/s	上均压/s	下均压/s	产品气甲烷 体积分数/%
	1	2	3	4	
1	8	0.5	0	0	0.356
2	8	1.0	0.4	0.4	0.434
3	8	1.6	0.8	0.8	0.458
4	11	0.5	0.4	0.8	0.488
5	11	1.0	0.8	0	0.532
6	11	1.6	0	0.4	0.442
7	14	0.5	0.8	0.4	0.586
8	14	1.0	0	0.8	0.506
9	14	1.6	0.4	0	0.530
<i>m</i>	$m_{11}=0.416\ 0$ $m_{21}=0.487\ 3$ $m_{31}=0.540\ 7$	$m_{12}=0.476\ 7$ $m_{22}=0.490\ 7$ $m_{32}=0.476\ 7$	$m_{13}=0.434\ 7$ $m_{23}=0.484\ 0$ $m_{33}=0.525\ 3$	$m_{14}=0.472\ 7$ $m_{24}=0.487\ 3$ $m_{34}=0.484\ 0$	$T=4.332\ 0$ $Y=T/9=0.481\ 3$
<i>S</i>	$S_1=0.023\ 48$	$S_2=0.000\ 392$	$S_3=0.012\ 363$	$S_4=0.000\ 355$	—

影响力属于同一量级,在以后的实验中同等重要; $S_1/S_2 = 59.898$ , $S_1/S_4 = 66.149$ ,说明充压时间和下均压时间比半周期对产品气浓度的影响力小很多,在实验中属于次要地位。因此,对于有显著影响的半周期和上均压时间,要进行重点实验选取它的最好水平;而对于无显著影响的充压时间和下均压时间,则可以任意选取一个水平,以缩减实验次数和时间,提高实验效率。

表3中  $m$  是各个试验的均值,反映每个参数中各水平之间的差异。对于因素1(半周期), $m_{31} > m_{21} > m_{11}$ ,说明半周期取14 s最好;而因素3(上均压时间), $m_{33} > m_{23} > m_{13}$ ,说明上均压取0.8 s最好;同样,在影响力较小的因素2和因素4中,充压时间和下均压时间分别取1.0和0.4 s最好。因此,最佳实验参数依次为14,1.0,0.8和0.4 s。在后续实验中可以有针对性地围绕最优值附近展开实验,快速寻找每个因素的最好水平,更好地优化参数结构。

### 2.2 半周期对产品气甲烷体积分数的影响

半周期对实验结果影响最大,因此,寻找最好的半周期参数对实验结果很重要。图2为在充压时间、上均压和下均压时间分别为1.0,0.8和0.4 s情况下,产品气甲烷浓度在最优半周期14 s附近数据变化的结果。由图可知,产品气甲烷体积分数随着半周期从10 s时的0.422%开始增加,在16 s时刻达到最大值0.599%,是原料气甲烷体积分数的2倍。此外,从曲线坡度可以看出,甲烷体积分数随着半周期增大的趋势越来越缓慢,最终达到稳定的水平。因此,在本实验条件下,双塔真空变压吸附富集乏风瓦斯的半周期最优值为16 s。

根据吸附理论,在一定的压力下,每个塔整个周期的吸附量是一定的,当原料气进入吸附塔内时,吸附剂快速吸附甲烷气体。随着半周期增大,吸附时间增加,通入的原料气越多,吸附剂吸附的甲烷气体量越多,解吸气中甲烷体积分数越大;而随着半周期越来越长,超过吸附平衡时间,通入的甲烷量超过吸附剂的吸附能力,吸附剂达到饱和,即使再增加抽真空时间,解吸气甲烷含量维持恒定的水平。因此,在适当的范围内半周期越大实验效果越好。但是,当半周期超出吸附平衡时间后,产品气甲烷体积分数将不再随之上升并维持一定的水平不变。本实验中半周期最优值是16 s。

### 2.3 均压对产品气甲烷体积分数的影响

均压过程可使吸附塔的压力快速升高,能回收部分的产品气和机械能,提高甲烷体积分数<sup>[5]</sup>。均压步骤按均压过程中双塔接通的方式不同,可分为上均压、下均压、同时均压三种情况。上均压是指均压过程中只将吸附塔的上端相连通;下均压是指均压过程中只将吸附塔下端连通;同时均压是指均压过程中吸附塔上端和下端同时连通。均压时间和均压方式不一样,产生的效果也不一样。

如图3所示,每种均压方式都有最优值,但最优值不一样。单独上均压实验效果最好,在0.5 s时产品气甲烷体积达到0.547%,而单独下均压方式效果最差,最高只能到0.505%,而

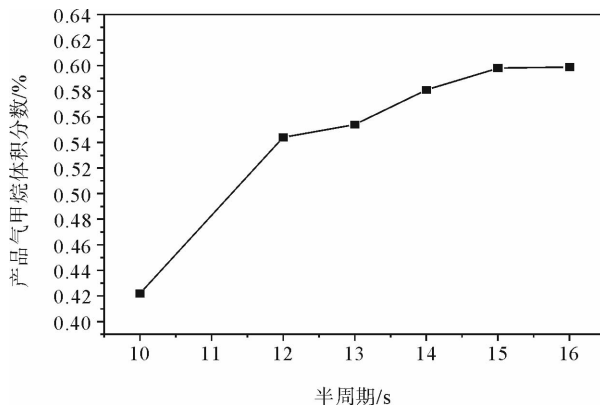


图2 半周期对产品气甲烷体积分数影响图

Fig. 2 Effect of half-cycle on methane concentration of gas product

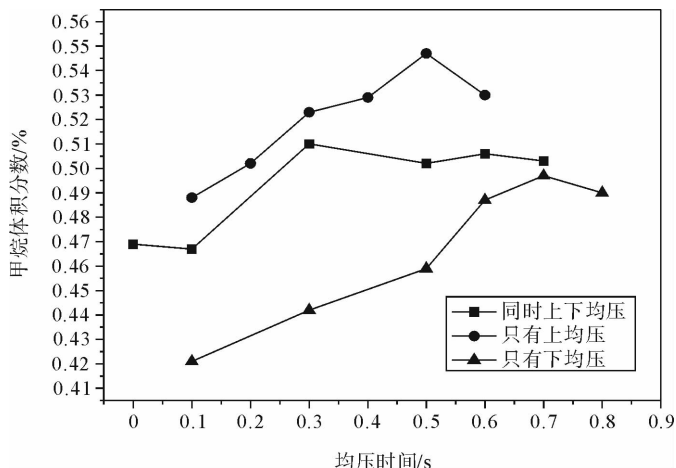


图3 均压时间对产品气甲烷体积分数影响图

Fig. 3 Effect of even air pressure time on methane concentration of gas product

同时上下均压效果介于两者之间。

出现以上情况的原因是：在以甲烷气体为强吸附组分的分离过程中，下均压时间太长会使得甲烷解吸，流入另一吸附塔，导致产品气中甲烷体积分数下降。通过对实验数据的分析，与同时上下均压相比，适当延长上均压时间可以提高产品甲烷的体积分数。上均压相当于一个顺放过程，顺放时吸附塔上端的弱吸附组分从吸附塔中流出，使得吸附塔中强吸附组分增加，解吸气中强吸附组分体积分数增大。上均压时吸附塔排气端大量的含浓度较低甲烷的空气流出吸附塔，抽真空解吸气中甲烷体积分数提高；而下均压时只有少部分含甲烷浓度较低的空气和原料气流出吸附塔，解吸气中甲烷体积分数相对较低。因此单独上均压流程比下均压流程对提高甲烷体积分数的效果好。

### 2.4 节流子孔径对产品气浓度的影响

吸附压力是变压吸附过程中十分重要的参数，它直接影响到吸附剂对气体的吸附量，从而影响到整个系统的运行效果。而吸附压力可以通过节流子的孔径大小控制，吸附压力与孔径大小的关系如表 4 所示。由吸附等温线<sup>[7-8]</sup>可知吸附压力越高则活性炭对甲烷的吸附量越大，甲烷与空气中氮气和氧气的吸附量的差值也越大。图 4 为排放气甲烷体积分数相同的情况下，通过改变节流阻力来改变吸附压力时，产品气甲烷的体积分数的变化。

由图 4 可得，当节流子孔径为 1.2 mm 时，吸附压力仅有 135.22 kPa，相应的产品气甲烷体积分数只有 0.388%；随着节流子孔径逐渐减小，产品气中甲烷体积分数随着增大；当节流子孔径减小为 0.4 mm 时，吸附压力升高到 284.46 kPa，相应的产品气甲烷体积分数上升到 0.717%。节流子孔径减小了 0.8 mm，产品气甲烷体积分数上升了 0.229%，效果十分明显。这是因为随着节流子孔径的减小，吸附床的吸附压力增加，吸附剂的吸附量增大，且吸附剂对甲烷的饱和吸附量显著增加，在相同的真空度下解吸出的产品气甲烷体积分数增大。因此，为了提高产品气甲烷的体积分数，通过减小节流子孔径增大吸附压力的方法是十分有效的。

### 3 结论

1) 通过正交实验可以得出，在双塔真空变压吸附法富集煤矿乏风瓦斯时，半周期和上均压时间是影响实验结果最重要的两个流程参数，而充压时间和下均压时间属于次要因素。同时可以得出每个流程最佳参数的大体范围。在本实验条件下最佳工艺参数参考值为半周期、充压时间、上均压和下均压时间分别为 14、1.0、0.8 和 0.4 s。

2) 半周期对实验结果有决定性作用。产品气甲烷体积分数随着半周期的增大而增加，增加的速度逐渐趋于缓慢，最终达到一个稳定水平。在本实验条件下半周期的最佳值是 16 s。

3) 在三种均压方式中，产品气甲烷体积分数都随着均压时间的增大而增大，到某一时刻达到最大值，继而随着均压时间的增大而开始下降；只有上均压时的效果最好，并且上均压时间最佳值为 0.5 s 时，产品气甲烷体积分数可以达到最高值 0.547%。

表 4 节流子孔径对应的吸附压力表

Tab. 4 Table of operation pressures corresponding to the diameters of orifices

节流子孔径/mm	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4
压力/kPa	135.22	146.99	193.32	235.73	284.45

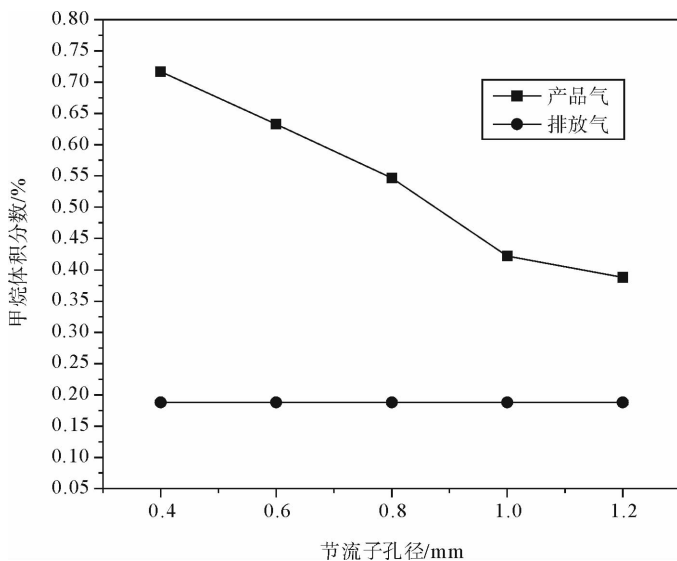


图 4 节流子孔径对产品气甲烷浓度影响图

Fig. 4 Effect of the diameter of orifice on methane concentration of gas product

4)除了调节参数可以提高富集煤矿乏风瓦斯的效果外,通过减小节流子孔径也可以有效提高产品气中甲烷的体积分数,随着节流子孔径的减小而逐步增大。当节流子孔径为 0.4 mm 时,吸附压力可以达到 284.45 kPa,产品气甲烷体积分数可以上升到 0.717%,为原料气甲烷体积分数的 2.4 倍多。但随着压力的升高,相应的能耗也将成倍增加。因此,要根据合理的能耗指标选取合适的节流子孔径。

#### 参考文献:

- [1]崔乐雨,张东辉,苏伟,等. 变压吸附法回收氮气中的微量甲烷:实验与模型[J]. 天然气化工,2008,33(6):1-5.  
CUI Leyu,ZHANG Donghui,SU Wei,et al. Recovery of trace methane from nitrogen by PSA:experiment and model[J]. Natural Gas Chemical Industry,2008,33(6):1-5.
- [2]崔荣国. 国内外煤层气开发利用现状[J]. 国土资源情报,2005(11):22-26.  
CUI Rongguo. Exploring and utilizing situation of coalbed methane at home and abroad[J]. Land and Resources Information,2005(11):22-26.
- [3]KRZYSZTOF W,MAREK T. Multicomponent pressure swing adsorption part modelling of large-scale PSA installations [J]. Chemical Engineering and Processing,1997,36:89-99.
- [4]鲜学福. 我国煤层瓦斯渗流力学的研究现状及进一步发展和应用的展望[R]. 重庆大学:矿山工程物理研究所,1997.
- [5]辜敏. 提高抽放煤层气中甲烷浓度的变压吸附基础研究[D]. 重庆:重庆大学,2000.
- [6]刘应书,李永玲,张辉,等. 煤矿低浓度瓦斯及其分离富集技术[J]. 气体分离,2010(1):53-59.
- [7]DELGADOA J A,RODRIGUESB A E. Analysis of the boundary conditions for the simulation of the pressure equalization step in PSA cycles[J]. Chemical Engineering Science,2008,63(18):44-52.
- [8]辜敏,鲜学福. 提高煤层气甲烷浓度的吸附剂的选择研究[J]. 矿业安全与环保,2006,33(3):11-13.  
GU Min,XIAN Xuefu. Selective study on adsorbent for improving coal-bed methane concentration[J]. Mining Safety and Environmental Protection,2006,33(3):11-13.

#### (上接第 11 页)

- [3]缪协兴,孙海,吴志刚. 徐州东部软岩矿区冲击矿压机理分析[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(4):428-431.  
MIAO Xiexing SUN Hai,WU Zhigang. Mechanism analysis of rockburst in softrock mines in eastern of Xuzhou[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,1999,18(4):428-431.
- [4]窦林名,陆菜平,牟宗龙,等. 冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J]. 煤炭学报,2005,30(5):690-694.  
DOU Linming,LU Caiping,MU Zonglong,et al. Intensity weakening theory for rockburst and its application[J]. Journal of China Coal Society,2005,30(5):690-694.
- [5]张健全,闫保全,廖国华. 采动覆岩移动规律的相似模拟实验研究[J]. 金属矿山,2002(8):10-12.  
ZHANG Jianquan,YAN Baojin,LIAO Guohua. Study on the rules of the overlying rock movement by equivalent material simulation[J]. Metal Mine,2002(8):10-12.
- [6]李鸿昌. 矿山压力的相似模拟试验[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1987.
- [7]刘德乾,姜振泉,冯海英,等. 深埋煤层开采覆岩压力变化的相似材料试验研究[J]. 矿业研究与开发,2010,30(1):29-32.  
LIU Deqian,JIANG Zhenquan,FENG Haiying,et al. Study on the pressure chang of overlying rock in mining of deep buried coal seam by similar material simulation experiment[J]. Mining Research and Development,2010,30(1):29-32.
- [8]温国惠,李秀山,浦志强,等. 孤岛煤柱骨体充填开采覆岩运动规律研究[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2010,29(4):46-50.  
WEN Guohui,LI Xiushan,PU Zhiqiang,et al. Study on the law of overburden movement during isolated coal pillar mining with paste Filling[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2010,29(4):46-50.
- [9]王庆照,蒋升,司马俊杰. 厚煤层重复采动覆岩破裂发育规律研究[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2010,29(4):67-71.  
WANG Qingzhao,JIANG Sheng,SIMA Junjie. Study on fracturing and development rules of overlying strata under repeated mining in thick coal[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2010,29(4):67-71.