

# 陕北矿区荒漠化防治的固液耦合实验分析

张 杰, 侯忠杰

(西安科技大学能源学院, 西安 710054)

**摘要:** 矿山开采中涌水、突水、涌沙、淹井实验研究都需进行固液耦合相似材料的实验, 但长期以来由于没有寻找到合适的相似材料, 井工采矿固液耦合实验一直没有突破性进展。以陕北工程地质资料为基础, 通过固液耦合实验模拟了多个开采带对防水安全岩柱保护层及煤柱稳定性的影响, 确定了榆神府矿区在保护水条件下的最大安全推进距离, 提高了煤的采出率; 为防治陕北矿区土地荒漠化, 提出了不同工程地质条件下的保水采煤方案。研究结果对指导该区煤炭资源合理开发规划设计和环境保护具有重大意义。

**关键词:** 采矿工程; 陕北矿区; 土地荒漠化; 耦合实验; 保水采煤

**中图分类号:** TD321.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-2850(2008)00-0676-6

## The solid-liquid coupling experimental analysis of controlling desolate in the mining area of Northern Shaanxi

ZHANG Jie, HOU Zhongjie

(School of Energy Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054)

**Abstract:** Studying flash flood, sand gushing and mine flooding during mining is in need of taking solid-liquid coupling simulation material experiments. The great progress has not been made in solid-liquid coupling experiment for the underground mining because the suitable coupling materials have not been found in long-term. Based on the study of the engineering geological conditions and solid-liquid coupling experiment, this paper analyzed the Yushenfu Mine Areas' desertification, soil and water erosion, water environment which whether be affected by the coal mining. For combating desertification, it analyzed the control problem of rock stratum of this area, and put forward the scheme realizing water resources preservation during mining under the different engineering geology conditions. The obtained results are of great meaning to guide the reasonable exploitation planning of the coalfield and environmental protections.

**Key words:** mining engineering; the mining area of Northern Shaanxi; desertification; coupling experiment; water resources preservation during mining

## 0 引言

土地荒漠化是影响我国环境保护、经济发展的重大问题之一, 已严重威胁到人类的生存和发展。尤其是以前, 煤炭工业开采方针是“尽最大可能地采出煤炭资源”, 而很少去考虑煤炭开采引起的地质环境变化及其对人类的危害, 这使得土地荒漠化呈直线上升的趋势。由于陕北榆神府矿区属于浅埋煤层, 煤层顶板基岩薄(最薄处仅2 m), 基岩上为厚度很大的风积沙(30~60 m), 沙层之下富含潜水, 矿井开采破坏波及基岩面和地表, 从而导致地下潜水水位大幅度下降, 植物枯死、农作物旱死、荒漠化面积扩展, 生态环境进一步恶化。因此保护这些供水含水层免遭污染和破坏, 防治局部地质环境的恶化及沙漠化扩展, 寻求合理的预防对策, 控制土地沙化的扩展, 减少地质灾害, 维持本地区的持续发展具有重要意义。我国虽有水体下采煤的成功经验, 但不适于煤层顶板基岩总厚度远小于《规程》

**基金项目:** 国家自然科学基金(50074023); 高等学校博士学科点专项科研基金(20050704003)

**作者简介:** 张杰(1978—), 男, 讲师, 主要研究方向: 浅埋煤层研究和教学, E-mail: zhangjie655@163.com

公式所计算的浅埋煤层。原煤炭工业部 95 重点项目“我国西部侏罗纪煤田（榆神府矿区）保水采煤及地质环境综合研究”也对保水采煤做了大方向的研究<sup>[1]</sup>，但对导致土地荒漠化的上覆岩层破坏机理研究不够详细。在厚松散层富水的作用下，上覆岩层的破坏规律还需要进一步研究。

## 1 模拟实验设计

### 1.1 模型框架制作

模型框架设计和制作是相似材料模拟实验中最重要内容之一<sup>[2]</sup>。模型框架由钢座和密封框两大部分组成，密封框长 60 cm，宽 12 cm，高度根据实验需要进行调整。为了清晰地观察实验过程中覆岩的破坏情况和潜水沿裂隙的渗流情况，模型框架前后用 1 cm 厚的有机玻璃板，在框架和玻璃板的接触面上涂防水胶体，在模型基岩风化层层面和有机玻璃板间用防水胶体密闭，这种胶体将水隔离在顶板基岩风化层之上，只有开采裂隙发展到水层时潜水才能下泻，另一方面，胶体充填又不影响顶板基岩在开采时的移动及破断。为了使潜水可视，在模型中安置有潜水水位显示管，管中的潜水染成红色，开采中能将水位的变化显示得一清二楚。由于涌水溃沙模拟实验难度大，具有一定的探索性，为了使实验接近原型，结论能达到指导现场保水开采的目的，考虑到相似模拟实验模型密封难度和相似材料装模时工艺方面的特殊要求，本实验几何比例确定为 1 : 200。

### 1.2 相似材料的选取

通过查阅资料，总结以前相关实验的教训，反复进行不同实验材料、不同配比和不同胶凝剂试件的实验，最终筛选了固液耦合实验相似材料的骨料和胶凝剂，并从大量试件试验的数据中得出试件物理力学参数随配比不同的变化规律，从而获得与榆神府矿区煤层覆岩岩层力学参数相似的模型材料配比。模型选择非清水性有机胶凝材料——石蜡作为胶凝剂。对于实验中的液体和沙，为了达到相似的目的，把以几何比例计算出的模型潜水水柱高度按照相应的比例减小，用减小水柱高度来补偿潜水模拟材料未考虑容重比例所引起的误差，对于沙也以同样的方法进行处理。

## 2 试验方案

### 2.1 模拟试验的回采工艺设计

李文平等<sup>[3]</sup>根据榆神府矿区主采煤层之上松散含水层、隔水层及上覆基岩的空间分布及其组合形态，将保水采煤工程地质条件分为 5 类：砂土基型（Ⅰ）、砂基型（Ⅱ）、土基型（Ⅲ）、基岩型（Ⅳ）、烧变岩（Ⅴ）。本实验又将砂基型分为两类：1) 基岩厚 30~70 m；2) 基岩厚 < 30 m。用固液耦合实验分别模拟这两类工程地质特征下间歇方法开采时覆岩的稳定性和运动情况。根据近十年对浅埋煤层的研究表明，上覆有富水风积沙层的煤层，长壁开采工作面来压使覆盖层全厚切落，矿山压力非常剧烈，潜水必然溃入工作面，这不仅会使地下水位下降，而且会对矿井安全生产造成严重威胁。间歇式开采方法在参数确定合理时，就会避免这种对地面环境破坏和井下安全有严重危害的覆岩全厚度切落现象。为了寻找间歇开采方法不同参数与覆岩稳定性的关系，实验拟分为两个阶段进行。

(1) 长壁工作面由开切眼推进，直到覆岩中防水安全岩柱保护层失稳前停采，以此来确定工作面既能保水又能提高采出率的安全推进距离；

(2) 留设煤柱后，新掘开切眼，依此模拟多个开采带对防水安全岩柱保护层的影响及煤柱的稳定性。

### 2.2 模拟实验原型的地质特征

按照沙基型长壁开采发生涌水上覆岩层厚度的界定条件，实验设计了 15、30、42、54、60 m 五种不同基岩厚度的实验原型。对于沙基型地区的地质特征主要来源于大柳塔 1203 工作面，开采 1~2 煤层，煤层平均厚 6.3 m，倾角 1°~3°，埋藏深度 50~80 m，顶板基岩厚 15~60 m，松散层 20~30 m。直接顶为粉砂岩、泥岩、炭质泥岩和煤线互层，平均抗压强度 35.04 MPa。老顶为细砂岩，其上为厚松散层，松散层下有丰富潜水，工作面采高 4.0 m<sup>[4]</sup>。模拟实验原型及模型岩层对照如表 1 所示，其

中配比选型是根据“固液耦合实验材料研究”所做试件选用的。

表1 原型与模型的主要岩性参数及配比  
Tab.1 The major rock parameter of model and prototype

岩层	原型		模型		配比选型 砂:石蜡:大白粉
	容重/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	抗压强度/MPa	容重/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	抗压强度/MPa	
松散层	15.0		9.6		
风化层	23.3	14.4	14.9	0.078	试件 No. 35
泥岩	39.8	29.6	15.6	0.133	试件 No. 25
中粒砂岩	38.8	28.7	15.1	0.129	试件 No. 27
细砂岩	39.8	29.6	15.6	0.133	试件 No. 25
粉砂岩	44.0	30.2	16.3	0.147	试件 No. 20
2 <sup>-2</sup> 煤层	13.0	20.4	9.4	0.260	(煤) 9:2:8

### 2.3 实验过程

对于模型的开挖,都是在距边界 15 cm (原型 30 m) 处掘开切眼,这样能保证模拟实验不受边界的影响。根据现场实际来压情况,在估计发生来压之前停采观察。在第一次开挖的基础上留设保水煤柱,另掘开切眼,在工作面向前推进的过程中,继续观察上一工作面和正在采的工作面的覆岩运动情况,如图 1 所示。

在基岩厚度不同的实验过程中,直接顶的垮落一般都是在工作面推进到 10~20 m 时发生。在 15 m 基岩实验中工作面推进到 30 m 时,老顶初次来压,不仅使老顶岩层破断,而且使上覆岩层整体全厚切落。在全厚切落过程中,



图1 未开挖前的模型

Fig.1 The model before mining

裂隙贯通含水层,潜水沿裂隙迅速泄入工作面,实验中观测到煤层变潮湿,采空区的有机玻璃板上出现水滴,潜水位下降。覆岩整体最大下沉量约 0.6 m。在 30 m 基岩模拟的第一工作面中,工作面推进到 35 m 时,老顶第一次周期来压,垮落高度达 15 m,上覆基岩还有 15 m 未垮,未垮基岩悬梁长 20 m,潜水水位保持不变。在第二工作面中,当老顶第二次周期来压之前,上覆基岩还有 15 m 未垮时也没发现水位下降。在第二个工作面推过第二个周期来压(推进 40 m)后,又推进了 4 m 就发生整体切落,地表形成较大的凹形沉陷境,潜水进入工作面的时间是在覆岩整体切落后大约 3 min。在 42、54、60 m 的基岩中,推进 58 m 时,悬梁长达 39.6 m,停采 5 min 后,冒落向上发展悬梁长仍达 34 m,未充满空隙高 3.6 m;工作面推进到 74 m 时,冒高达 30 m,这时冒落处基岩尚有 3.5 m,冒落矸石之上仍留有一定的充填间隙,在工作面推进方向,开切眼侧岩石垮落线与水平面夹角为 69°,但在工作面侧形成倒台阶状,角度约 60°。在垮落过程中,矿压显现明显,在开切眼处和工作面侧都有被压垮现象。不同厚度基岩开采过程的实验数据对照,如表 2 所示。

表2 不同厚度基岩开采过程实验参数  
Tab.2 The experiment parameter of bed rock with different thickness

基岩厚/m	工作面推进距离/m			最小保护层/m	最大悬梁长/m
	初次来压	周期来压	整体切落		
15	30		30		
30	29	40	44	15	20
42	20	34	60	15	28
54	20	36	76	15	34
60	29	40	78	15	39.8

### 3 实验结果分析

#### 3.1 上覆岩层的破坏规律及矿压显现

基岩厚度小时，在工作面初次来压时覆岩就产生整体全厚台阶切落，基岩厚度大时，最终的破坏也是整体切落，即上覆岩层全部参与了工作面的矿压显现，尽管埋深浅，但矿山压力不是减小，而是增大，且工作面矿山压力表现十分剧烈<sup>[5]</sup>。实验表明基岩厚度小于 15 m 时，由于风积沙、潜水、沙砾和基岩表面组成散体岩层厚度很大，顶板基岩在有散体载荷的作用下，其破断方式与一般开采条件下（厚基岩顶板）破断方式完全不同，不再是自下而上逐层产生冒落或各裂隙老顶自下而上依次失稳，而是基岩顶板全厚切落。当基岩厚度大于或等于 30 m 时，下位岩层的破坏是逐层产生冒落，裂隙带不明显，而上位岩层的破坏仍然是整体全厚切落。工作面顶板基岩单向加权平均抗压强度 35.04 MPa，根据“三下”中硬岩层工作面冒落带高度的经验计算公式（1），在 4 m 采高时冒落带高度 12.8 m，而实验基岩厚度最小为 15 m，比计算值大 2.2 m，因此冒高不会发展到地表<sup>[6]</sup>。而由实验知，实际上顶板的破断方式是全厚切落，即破断岩柱与主体岩层断裂一起下落，但因其与母体岩层失去联系，显然仍属于冒落带。这样在一般开采条件下采空区覆盖岩层的冒落带、裂隙带和下沉带在厚风积沙富水浅煤层中只剩下冒落带，而无裂隙带和缓慢下沉带。一般条件下冒落带高度计算公式已不适用于地表厚风积沙浅埋煤层，与传统矿压理论“埋深浅，矿压小”相反。

冒落带高度计算公式为

$$H = \frac{100 \sum M}{4.7 \sum M + 19} \pm 2.2 \quad (1)$$

其中， $\sum M$  为煤层采高。

#### 3.2 保水的可能性

通过不同的回采工艺模拟不留设保水煤柱和在可能发生来压前留设保水煤柱。在基岩厚度小于 30 m 时，上覆岩层来压均在煤壁产生贯通覆岩全厚的裂隙，基岩表面潜水沿这些裂隙涌入工作面，在 30 m 基岩模拟的第一工作面中，上覆基岩还有 15 m 未垮，潜水水位保持不变。在第二工作面中，也没发现水位下降。第二个工作面推过第二个周期来压也仅仅 4 m 就发生整体切落，因此不难看出：随着时间的推移在第二个周期来压期间覆岩仍然易于沿煤壁全厚切落。同时也证明潜水不沿裂隙涌入的最小基岩保护层是 15 m，对于 40 m 以上的基岩实验中也有同样的结果，上覆基岩还有 15 m 未垮时，未见上位岩层产生裂隙，也未见潜水水位变化。在停采 1 h 后，垮落没有向上发展的趋势，上位岩层保持相对稳定，水位仍然保持不变（如图 2 所示）。通过不同厚度基岩模型的实验可以看出：只要还有 15 m 基岩保护层，潜水就不会进入工作面，也就是说在基岩等于或大于 30 m 时，都可以实现保水采煤。根据“三下”导水裂隙带高度计算公式即式（2）可得，4 m 采高时，导水裂隙带高为 34.4~45.6 m，因此要实现长壁保水开采的基岩厚度不得小于 30 m。

导水裂隙带高度公式为

$$H = \frac{100 \sum M}{1.6 \sum M + 3.6} \pm 5.6 \quad (2)$$



图 2 15 m 基岩保护层  
Fig. 2 15 m bedrock protective coating

其中,  $\sum M$  为煤层采高。

### 3.3 基岩厚度及岩性对保水可能性的影响

在保水采煤中基岩厚度是一个不可忽视的重要因素,在同样的开采和支护条件下,顶板基岩越薄,裂隙越容易贯通。由表2可知,在15、30、42、54、60 m不同厚度基岩的工作面,它们上覆岩层发生整体切落时的推进距离分别是:30、44、60、76、78 m,显然随着基岩厚度的增加,发生涌水的推进距离也在增加。在60 m基岩模拟实验中,尽管发生了上覆岩层整体切落,但潜水水位下降缓慢,垮落裂缝的发育程度和连通、导水性也大大减弱,垮落裂缝发育的速度较快,但采后被压密、压合也快,说明基岩越厚在垮落过程中裂隙越容易闭合。另一方面,上覆岩层在水的作用下岩性发生了质的变化,岩性变软,强度降低,而岩层的抗裂能力增强,特别是当断裂带发展到强风化带以上的泥岩和砂质泥岩时,由于其抗裂能力更强,裂缝不易产生,基岩风化带的岩石,受采动影响后,具有阻隔含水层的下渗和抑制导水裂缝继续向上发展的双重作用,煤层开采导水裂隙带不易沟通含水层,这也为保水采煤提供了工程地质条件保证。

## 4 结论

本文针对榆神府矿区沙基型覆岩及富水特点,从煤炭开发、水资源保护以及生态环境等方面进行实验研究,证明了该区沙基型覆岩保水采煤的可行性。实验以1203工作面实地工程地质条件为基础,结合煤层开采对覆岩破坏和覆岩阻水性的变化,得出了不同厚度基岩在两相耦合条件下的破坏规律,为留设一定高度防水煤柱提供了理论依据,达到既保护水资源和生态环境,又减少压煤量,实现保水采煤的目的。在现场中基岩的厚度在14 m左右,初次来压上覆岩层发生整体切落的距离是27~29 m,在固液耦合模拟试验中,15 m基岩发生整体切落的距离是30 m,与现场的结果基本一致,从而证明了试验的可靠性。另外,试验所得的安全推进距离在南梁煤矿的间歇式开采实践中也得到了证实。因此,对榆神府矿区沙基型这一特殊上覆岩层的开采,要实现“既要采煤,又要保护环境”的可持续发展战略,防治陕北矿区荒漠化,提出以下几点结论和建议:

1) 在上覆基岩为沙基型富水条件下的浅埋煤层,要实现长壁间歇式保水开采,基岩的最小保护层厚度是15 m,如果再小就会发生整体切落,出现贯通裂隙。

2) 对于基岩厚度小于30 m的地区,适宜采用房柱式开采或充填开采,只有这样才能减少对上部水体的扰动,从而达到保水的目的。

3) 对于基岩厚度大于30 m的地区,根据基岩厚度合理确定防水煤柱高度,留设保水煤柱,进行间歇式保水采煤,保护和利用萨拉乌苏组含水层水资源,使其免受采动影响而破坏。在实验中得到的安全推进距离是40 m,这一安全推进距离在南梁煤矿间歇式开采的实践中得到了证实,所以建议在该区实行推进40 m留12 m保留煤柱。

4) 在陕北矿区上层基岩(泥岩和砂质泥)风化比较严重,由于风化带在水的作用下岩性易发生质变,在受采动影响后,具有阻隔含水层的下渗和抑制导水裂缝继续向上发展的作用,因此风化带比较严重的区域将保留煤柱尺寸缩小到10 m,但安全推进距离不宜增加。

### [参考文献] (References)

- [1] 煤炭科学研究院西安分院. 矿井水、地表塌陷与采矿相关性初期研究[R]. 西安: 煤炭科学研究总院西安分院出版社, 1995.  
The Xi'an Academy of Mining Research. The preliminary research of earth's surface subsidence and mining[R]. Xi'an: Xi'an Academy of China coal Research Institute Publishing House, 1995. (in Chinese).
- [2] 林韵梅. 实验岩石力学——模拟研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.  
LIN Y M. Experiment rock mechanics—simulate studying[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House,

1984. (in Chinese)
- [3] 李文平, 叶贵钧, 张莱, 等. 陕北榆神府矿区保水采煤工程地质条件研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25 (5): 449~454.  
LI W P, YE G J, ZHANG L, et al. Study on the engineering geological conditions of protected water resources during coal mining action in Yushenfu mine area in the Northern Shaanxi Province[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(5): 449~454. (in Chinese)
- [4] 侯忠杰. 浅埋煤层关键层研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24 (4): 359~363.  
HOU Z J. Study on key stratum in shallow seam[J]. Journal of China Coal Science and Engineering, 1999, 24(4): 359~363. (in Chinese)
- [5] 侯忠杰. 地表厚松散层浅埋煤层组合关键层的稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2000, 25 (2): 127~131.  
HOU Z J. Analysis of combinatorial key strata stability in shallow coal seam with thick loose bed[J]. Journal of China Coal Science and Engineering, 2000, 25(2): 127~131. (in Chinese)
- [6] 张杰, 侯忠杰, 石平五. 地下工程中渗流场与应力场耦合的相似材料模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24 (5): 639~642.  
ZHANG J, HOU Z J, SHI P W. Simulation materials experiment of coupling seepage field and stress field in underground engineering[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(5): 639~642. (in Chinese)