

煤田地质与勘探
Coal Geology & Exploration
ISSN 1001-1986, CN 61-1155/P

《煤田地质与勘探》网络首发论文

题目：采后覆岩分带模型及工程意义探讨
作者：吕玉广，乔伟，程建远，崔平
收稿日期：2021-05-01
网络首发日期：2021-07-01
引用格式：吕玉广，乔伟，程建远，崔平. 采后覆岩分带模型及工程意义探讨[J/OL]. 煤田地质与勘探.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.P.20210701.1422.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

采后覆岩分带模型及工程意义探讨

吕玉广^{1,2}, 乔伟¹, 程建远³, 崔平²

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 内蒙古上海庙矿业有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 016299; 3. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 采后覆岩力学状态与顶板事故、顶板水害等直接相关, 有必要对采后覆岩结构进行深入研究。提出了覆岩结构“新四带”模型: 垮落带、裂隙带、基岩离层带、松散冲积层带。结合前人的“三带”模型、“四带”模型进行了空间上对比分析, 厘清了 3 种分带模型的空间关系。重点从覆岩内含水层水位受采动影响、光纤探测、顶板淋水现象等几个方面探讨了“新四带”模型的科学性, 得出煤层上覆基岩内任何层段都可能产生离层裂隙(达到一定宏观尺度时称为离层空间)的结论。“三带”主要用来校核采煤支架的额定工作阻力以及指导防隔水煤(岩)柱的设计;“四带”可在一定程度上指导离层带注浆工程实践, 但存在井下溃浆安全风险以及弱化“三带”原有工程价值的缺点;“新四带”传承了“三带”的工程意义, 同时可有效指导顶板离层水害的防治。

关键词: 采后覆岩; “三带”模型; “四带”模型; “新四带”模型; 工程意义; 离层水害防治
中图分类号: TD713 **文献标志码:** A

Discussion on zoning model of overburden after mining and its engineering significance

LYU Yuguang^{1,2}, QIAO Wei¹, CHENG Jianyuan³, CUI Ping²

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

2. Inner Mongolia Shanghai Temple Mining Co. Ltd., Ordos 016299, China; 3. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: The mechanical state of overburden after mining is directly related to roof accidents and roof water disasters, so it is necessary to study the overburden structure after mining. The "new four zones" model of overburden structure is proposed: caving zone, fracture zone, bedrock separation zone and loose alluvium zone. Combined with the previous "three belt" model and "four belt" model, this paper makes a spatial comparative analysis, and clarifies the spatial relationship of the three zonation models. This paper mainly discusses the scientificity of the "new four zones" model from the aspects of the water level of the aquifer in the overlying strata affected by mining, optical fiber detection, roof water drenching phenomenon, etc., and comes to the conclusion that any interval in the overlying bedrock of the coal seam may produce separation fissures (called separation spaces when reaching a certain macro scale). "Three belt" is mainly used to check the rated working resistance of coal mining support and guide the design of water proof coal (rock) pillar. The "four zones" can guide the grouting engineering practice in the separated zone to a certain extent, but there are some disadvantages, such as the safety risk of underground grouting and weakening the original engineering value of the "three zones". The "new four zones" inherits the engineering significance of "three zones", and can effectively guide the prevention and control of roof separation water disaster.

Keywords: Overburden after mining; "Three belt" model; "Four belt" model; "New four belt" model; Engineering significance; Prevention and control of separated layer water disaster

20 世纪 60 年代以前, 我国对导水裂隙的研究基本上处于概念化阶段^[1]; 20 世纪 70 年代以来, 通过观测孔来研究覆岩内导水裂隙带高度, 基于观测孔中水

位变化及水的漏失量等, 区分有效和无效导水裂隙^[2]; 二十世纪八九十年代刘天泉院士提出的覆岩移动“三带”模型, 具有划时代的意义, 相关的经验公式被写

收稿日期: 2021-05-01; 修回日期: 2021-06-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574250, 41772302); 鄂尔多斯市 2019 年度科技计划资助项目

第一作者: 吕玉广, 1969 年生, 男, 江苏宿迁人, 博士研究生, 研究员, 从事煤矿水害防治与技术管理工作. E-mail: lvyg691208@126.com

通信作者: 乔伟, 1984 年生, 男, 山东蒙阴人, 教授, 博士生导师, 从事水文地质与工程地质科研与教学工作. E-mail: qiaowei@cumt.edu.cn

入《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》(以下简称“三下”开采规范),并且沿用至今。此后,国内学者围绕岩层物理力学性质、岩层结构、采煤方法、采高、煤层赋存状态等方向继续探索。康永华^[3]提出减小开采厚度可以降低导水裂隙发育高度的观点;朱庆伟等^[4]、王晓振等^[5]认为导水裂隙的发育高度同时受到采高和覆岩关键层结构的影响;许家林等^[6]、钱鸣高等^[7]提出通过覆岩关键层位置来预计导水裂隙带高度的方法;柴华彬等^[8]提出基于GA-SVR的采动覆岩导水裂隙高度预测方法。上述研究成果均在“三带”模型框架内展开,是对经验公式的完善和补充。20世纪90年代,高延法^[9]采用有限元数值模拟计算方法,通过位移反分析,提出“四带”模型观点,为离层带注浆工程实践提供理论基础^[10]。近年来,顶板离层水害多发,原有的分带模型难以有效指导离层水害防治,笔者透过含水层水位受采动影响、光纤(缆)破断、顶板淋水规律等工程实践现象,分析认为采场上覆基岩内任何层段均可能产生离层。为区别于前人“四带”观点,本文提出“新四带”观点;探讨了3种分带模型的空间关系及其工程意义,为离层水害防治提供理论依据。

1 采后覆岩分带模型

1.1 “三带”模型

根据覆岩变形破坏特征及其导水性能,将采场上覆岩层由下至上依次划分为垮落带、裂隙带和弯曲下沉带(图1)。

垮落带:位于覆岩的最下部,紧贴煤层。煤层采出后,上覆岩层失去平衡,直接顶板岩层开始垮落,并逐渐向上发展;垮落岩块由于碎胀,体积较垮落前增大。

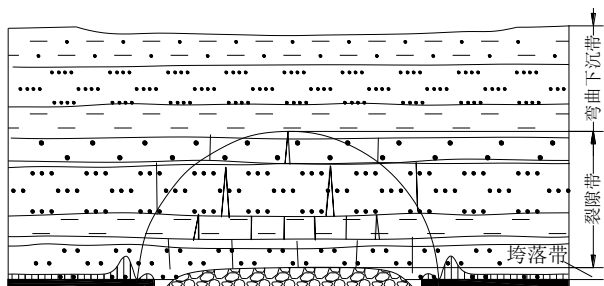


图1 “三带”模型

Fig.1 "Three belt" model

导水裂隙带:位于垮落带之上,由于岩层向下弯曲受拉,在裂隙带内产生垂直或斜交于岩层的新生张裂隙,部分或全部穿过岩石分层,但其连续性未受破

坏;岩层向下弯曲移动不同步引起沿层面产生离层裂隙。

弯曲下沉带:基本上为整体移动,其下部在软、硬岩层交替接触处可出现离层,但离层与下伏导水裂隙带不连通。

1.2 “四带”模型

高延法^[9]认为:地表松散层的沉降变形规律不同于基岩段,单独划分出松散层沉降带;岩体的垮落与岩体内部产生裂隙,其本质都是物理损伤,故将垮落带与裂隙带合并称为破裂带。此外,运用有限元数据模拟方法,计算地表最大下沉量和最大水平移动量,所建立的本构方程为:

$$u_i = \frac{F}{E} [f_1(x_i, y_i, z_i, t) + \mu f_2(x_i, y_i, z_i, t)] + u_c(x_i, y_i, z_i) \quad (1)$$

式中: u_i 为岩层内任一点的位移; F 为外载荷; E 为材料的变形模量; x_i, y_i, z_i 为第 i 点的坐标; μ 为泊松比; u_c 为物体的体位移; f_1 和 f_2 函数是与 F, E, μ 等无关的坐标点和时间 t 的函数。

将模拟计算结果与现场实测值进行对比后发现:假定不考虑离层带,则地面下沉盆地边缘过长,拐点处倾斜值过小。破裂带上覆岩层的离层是地表能够充分下沉的先决条件,离层带与弯曲带之间存在滑动层面,彼此层面的水平移动是无关的。因此,应在弯曲带下部单独划分出离层带;表土层松散软弱,其变形模量较小,内部不会产生离层。为此提出“四带”模型观点,包括破裂带、离层带、弯曲带、松散冲积层带(图2)。

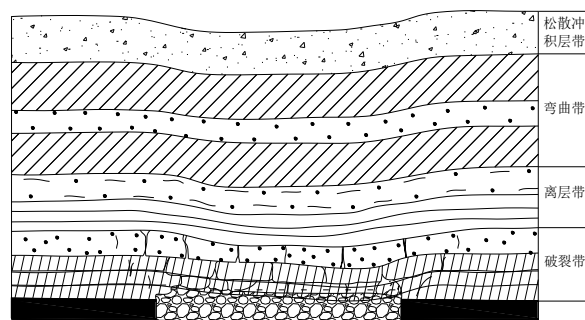


图2 “四带”模型

Fig.2 "Four belt" model

1.3 “新四带”模型

煤层开采过程中,覆岩变形、破断并形成大量裂隙,包括水平裂隙、顺层裂隙、垂直裂隙和斜交裂隙等,沿岩层层理或层内顺层方向拉开的裂隙称为离层

裂隙(简称离层),当离层裂隙达到一定宏观尺度时称为离层空间^[11-12]。

岩层间物理力学性质上的差异决定其下沉运动存在不协调性;既然从垮落带岩层直至地表都有一个下沉运动过程,则煤层上覆基岩内任何层段上都可能产生离层。离层的产生是绝对的,离层宏观尺度大小是相对的;低位基岩内离层裂隙发育程度可能优于高位基岩,但不宜在弯曲下沉带的下部单独划出离层带,故将裂隙带上部基岩段统称为基岩离层带;松散层内不能产生离层,故单独分为一带。为区别于前人的四带,称为“新四带”,即垮落带、裂隙带、基岩离层带、松散冲积层带(图3)。

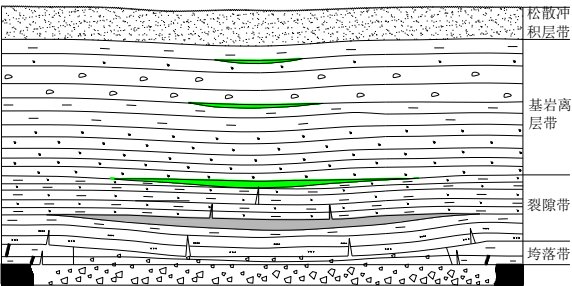


图3 “新四带”模型
Fig.3 “New four belt” model

上述3种分带模型空间关系对比如图4所示。当地表有松散冲积层时,将其单独分带本身意义不大,仅是为了突出覆岩内基岩部分,强调基岩内任何层段上都有可能产生离层的特点。

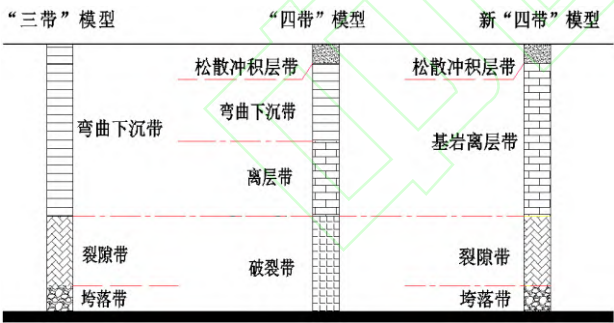


图4 3种分带模型空间关系比较
Fig.4 Comparison of spatial relations among three zonation models

2 “新四带”模型划分依据

2.1 含水层水位观测

某矿开采侏罗系延安组煤层,从上至下地层为:第四系风积砂(厚度1.0~6.5 m/均厚2.7 m)、古近系砂岩及泥岩互层(9.2~75.3 m/35.1 m)、白垩系砂砾及泥岩(厚度106.5~261.7 m/均厚153.8 m)、侏罗系延安组含

煤岩系。基岩中砂岩为含水层,泥质岩层为隔水层。矿井为多煤层开采,其中8煤回采了111082、113082、113081、111084共4个工作面,15煤开采了114152工作面。采场附近有Z1、G1两个水文观测孔,工作面及水文观测孔相对位置见采掘工程平面图(图5);工作面(煤层)与上覆含水层空间关系如图6所示。

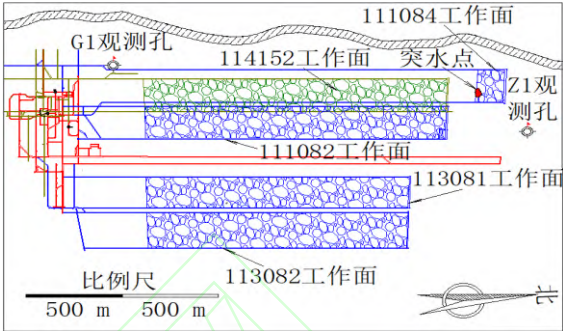


图5 采掘工程平面图
Fig.5 Plane layout of excavation engineering

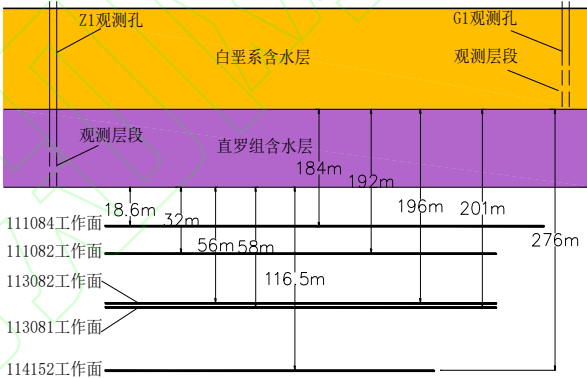


图6 工作面(煤层)与含水层空间关系
Fig.6 Spatial relationship between working face (coal seam) and aquifer

1) Z1孔水位受采动影响

Z1观测孔位于111084工作面切眼附近,观测侏罗系直罗组下段砂岩含水层水位,该段砂岩俗称“七里镇砂岩”,富水性弱至中等。岩石单轴抗压强度3.8~25.4 MPa,多小于6.0 MPa;软化系数0~0.6,多小于0.3。选择“三下开采规范”中的软岩适用公式计算导水裂隙带高度(表1),计算结果表明,111084工作面的导水裂隙可以波及“七里镇砂岩”,其他工作面的导水裂隙均波及不到上覆含水层。

表1 工作面相关参数统计

Table 1 Related parameters statistics of working face				
工作面	最大采高/ m	导裂高度/ m	隔水层厚度 /m	工作面 涌水量/m ³
111082	3.7	26.5	32	0
111084	3.4	25.9	18.6	突水
113082	3.6	26.3	56	0
113081	3.8	26.6	58	0
114152	3.8	26.6	116.5	0

根据 Z1 孔多年持续观测的水位数据绘制水位历时曲线(图 7)。111084 工作面导水裂隙波及“七里镇砂岩”突水,水位下降明显,堵水后水位快速回升;其他 4 个工作面导水裂隙均波及不到该含水层,尤其是 114152 工作面上距“七里镇砂岩”116.5 m,远大于导水裂隙带发育高度;回采过程中采空区无涌水,即含水层没有水的损失。但各工作面回采过程均引起含水层水位有规律的变化,先是快速下降,随后缓慢回升。

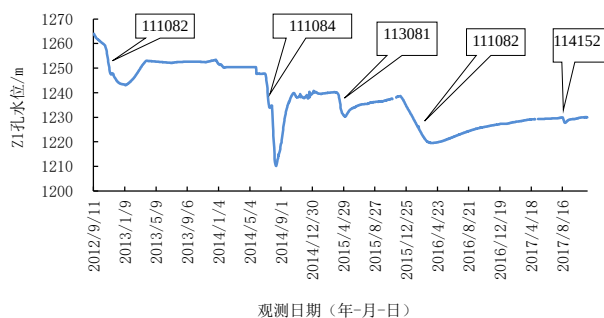


图 7 Z1 孔水位历时曲线
Fig.7 Water level duration curve of borehole Z1

2) G1 孔水位变化

G1 孔观测白垩系下段砾岩含水层,该含水层富水性弱-中等。根据图 6,工作面(煤层)上距白垩系砾岩底界 184~276 m。经计算,导水裂隙带均波及不到白垩系含水层(表 2)。

表 2 工作面相关数据统计
Table 2 Related data statistics of working face

工作面	最大采高/ m	导裂高度/ m	隔水层厚度/ m	工作面涌水量/ m ³
111082	3.7	26.5	184	0
111084	3.4	25.9	192	突水
113082	3.6	26.3	196	0
113081	3.8	26.6	201	0
114152	3.8	26.6	276	0

根据 G1 孔持续多年观测的水位数据绘制水位历时曲线(图 8)。从图 8 可以看出,每个工作面回采过程中白垩系水位均有明显的响应,先是快速下降,然后缓慢回升,水位变化曲线似“√”。

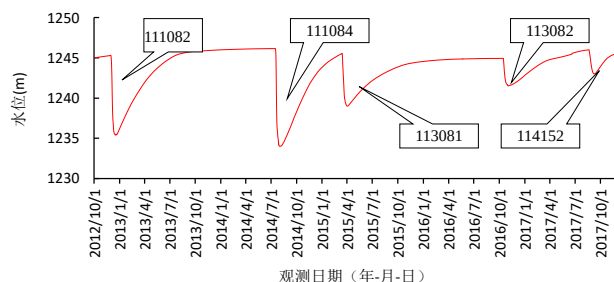


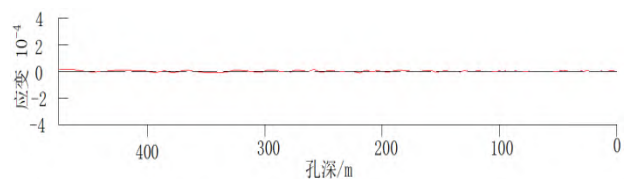
图 8 G1 孔水位历时曲线
Fig.8 Water level duration curve of hole G1

Z1 孔观测直罗组下部约 80 m 层段的水位,说明 8 煤层顶板上方 32~138 m 的岩层受到采动影响;G1 孔观测白垩系底部约 120 m 层段的水位,说明 15 煤顶板上方 184~396 m 的岩层受到采动影响。由此得到如下结论:覆岩内低位、中高位及高位上均产生了离层裂隙;离层裂隙吸收了砂岩裂隙水,引起含水层水位暂时性快速下降;离层的发育、发展是一个动态演化过程,覆岩持续压缩离层空间并趋于闭合,离层内汇集的水体在挤压作用下最终回归砂岩层内,这个过程是缓慢的,表现为水位缓慢回升并趋近于原始水位。

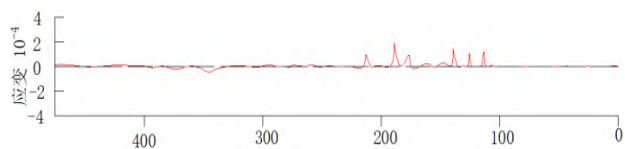
2.2 光纤探测

2019 年,在 113082 工作面上方(地表)预先施工一个钻孔,终孔于 8 煤层,全孔取岩心并做力学测试。孔内安置一套特制光纤传感器,包括金属基索状应变感测光缆($\phi=5$ mm)、定点式应变感测光缆、GFRP 传感光缆($\phi=3.5$ mm)、电法线缆($\phi=10$ mm),最后用水泥浆液封闭全孔。工作面回采至监测孔 160 m 时开始采集数据,直至工作面推过监测孔 210 m 时止,历时 43 d,共采集光纤数据 44 组。力学测试数据表明,天然状态下,岩石单轴抗压强度普遍小于 20 MPa(图 10),部分岩层甚至无法做成试块,但也有抗压强度较高的岩石。

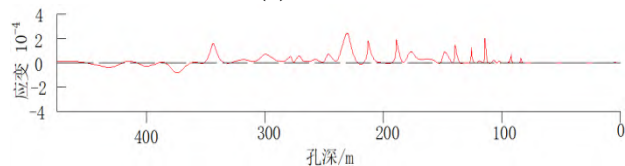
在工作面距离监测钻孔 130.5 m 时,孔内上部首先监测到拉应力变化,中下部则以压应力为主;随着工作面向监测钻孔靠近,应力值逐渐增加,拉应力范围向下延深(图 9),下部由受压逐渐过渡为受拉。



(a) 160 m



(b) 130.5 m



(c) 101 m

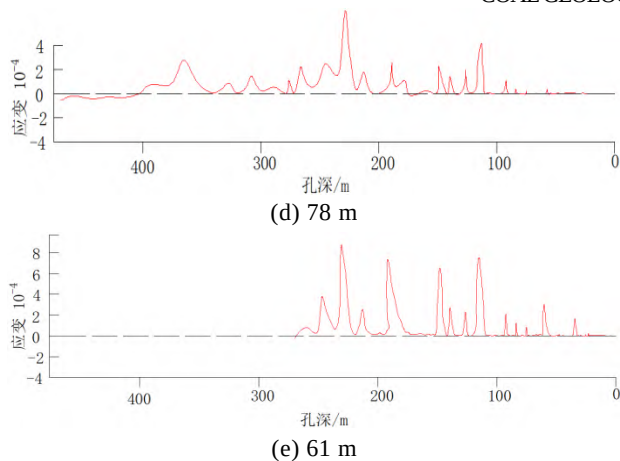


图9 工作面距离监测孔不同距离时的应力曲线
Fig.9 Stress curve when working face is 160 m away from monitoring hole

工作面距离监测钻孔 61 m 时, 传感线缆在孔深 375 m 处首次被拉断(下部不再有监测数据), 最后一次破断发生在工作面推过监测钻孔 36.5 m 时, 线缆共发生 5 次破断(表 3)。

表 3 孔内线缆破断位置统计

Table 3 Statistics of broken position of cable in hole

破断次数	与监测孔相对位置/m	埋深/m	破断点位于煤层上方位置/m
1次	61.0	375.0	97.72
2次	47.3	300.0	172.42
3次	32.6	220.0	252.42
4次	16.7	105.0	367.42
5次	-43.5	30.0	442.42

线缆第 1 次破断位置位于煤层顶板 97.72 m 处, 显然破断点位于导水裂隙带以上, 此次探测可以得出如下结论:

① 在工作面到监测孔尚有一定距离时, 孔内上部首先监测到拉应力, 下部监测到压应力。由于远处煤层被采空, 上覆岩层向采空区方向反转, 在高位基岩内产生拉应力, 低位基岩则承受岩层反转施加的压应力。

② 随着工作面向监测孔靠近, 低位岩层受到采场直接扰动, 下部压应力转变为拉应力。虽然因为线缆破断未能监测到下部完整的数据, 可以推测工作面采过监测孔时, 下部岩层受到的拉应力应该更为剧烈。

③ 上述 5 次破断位置均处于软、硬岩层交界面附近(图 10 中标黄色岩层), 说明岩性不同在同等应力作用下产生应变不同, 这是离层产生的物理原因。

拉应力是产生离层的动力源, 高位覆岩内首先监测到拉应力, 且 5 次破断均发生导水裂隙带以上, 说明高位基岩内产生了离层。

地层	岩性	累深/m	柱状 1:500	比重 g/cm ³	天然抗压强度/MPa		内摩擦角/°	泊松比 (μ)
					最小~最大/平均			
第四系	风积沙	6.21						
古近系	粗砂岩	20.1						
	砾岩	29.9		2.26	40.4~44.4/42.8		39° 22'	0.2
	细砂岩	57.31		2.04	5.2~5.6/5.5		26° 22'	0.34
	中砂岩	68.79		2.23	12.0~13.6/12.8		30° 27'	0.46
白垩系	粉砂岩	89.32		2.24	10.0~12.0/10.8		31° 22'	0.42
	细砂岩	108.69		2.44	35.6~38.0/36.8		38° 32'	0.21
	粉砂岩	113.74		2.29	16.0~17.6/16.5		32° 51'	0.34
	砂质泥岩	124.23		2.32	12.8~14.0/13.5		31° 34'	0.43
	细砂岩	131.72		2.11	6.8~7.2/6.9		24° 57'	0.51
	粉砂岩	165.2		2.12	16.0~19.6/17.7		32° 44'	0.29
	粗砂岩	179.10		2.03	7.2~8.4/7.9		27° 22'	0.51
	细砂岩	189.9		2.24	17.6~20.0/18.8		31° 34'	0.47
	砾岩	222.3		2.47	60.8~66.8/63.9		20° 42'	0.68
	砂质泥岩	228.4		2.29	8.0~9.6/8.8		26° 47'	0.58
	中砂岩	240.1		2.48	16.0~18.8/17.1		33° 25'	0.26
	泥岩	258.12		2.32	6.0~6.4/6.3		20° 42'	0.31
侏罗系 直罗组	粉砂岩	283.72		2.45	20.0~22.8/21.9		34° 39'	0.36
	砂质泥岩	301.23		2.41	52.1~58.8/55.3		40° 22'	0.47
	粗砂岩	325.14		2.24	17.6~20.0/18.8		31° 34'	0.47
	中砂岩	351.10		2.03	7.2~8.4/7.9		27° 22'	0.51
	泥岩	353.22		2.22	8.4~12.6/10.9		29° 12'	0.29
	粗砂岩	375.02		2.46	55.0~58.8/56.6		43° 39'	0.17
侏罗系 延安组	泥岩	386.54		2.3	9.6~10.0/9.9		28° 44'	0.23
	粉砂岩	393.21		2.24	8.9~12.2/10.4		31° 12'	0.40
	煤	397.15						
	细砂岩	420.12		2.3	5.2~5.6/5.5		25° 42'	0.4
	煤	420.58		2.47	42.8~45.2/44.4		39° 22'	0.31
	砂质泥岩	423.38		2.18	20.0~24.0/22.0		33° 27'	0.28
	煤	423.7						
	细砂岩	455.79		2.23	5.6~9.5/7.8		29° 27'	0.23
	泥岩	472.42		2.21	18.8~20.4/19.7		26° 46'	0.27
	8煤	476.18						

图 10 监测孔地层柱状图及力学参数测试结果
Fig.10 Stratum histogram and mechanical test results of monitoring hole

2.3 顶板淋水现象

煤层顶板砂岩含有或多或少的裂隙水, 采场经常可以看到淋水现象, 且顶板淋水多出现在工作面下部端头附近。根据山东济宁、内蒙古上海庙等矿区顶板淋水情况统计数据(表 4), 检修班或因故停产期间, 淋水区会从工作面下端头向工作面中上部扩大, 停产时间越长, 淋水面积向上部扩大范围越广, 可见淋水面积大小与工作面推进速度有关。

表 4 采煤工作面顶板淋水情况统计

Table 4 Statistics of roof drenching in coal mining face

推进速度 v/(m d ⁻¹)	顶板不同位置淋水情况占比/%		
	下端头	中部	上部
v≥6	21	9	0
4≤v<6	34	19	6
v<4	41	37	9

岩层在断裂、垮落以前(超前于煤壁)向采空区方向弯曲、反转, 高位上产生顺层裂隙(离层)。裂隙水从起到到进入采场过程可分为 2 个时间段, 岩层断裂以前渗流时间为 t_1 , 岩层断裂以后进入采场以前运动时间 t_2 。在 t_1 时间内, 裂隙水沿离层裂隙渗流; 在 t_2 时间内, 裂隙水一方面沿离层裂隙渗流, 同时在遇到穿层裂隙时又会沿穿层路径渗流。则沿着顺层方向渗流总时间为 t_1+t_2 , 沿着垂直于岩层面方向的渗流时间

为 t_2 。由于 2 个方向上渗流时间不等, t_1+t_2 恒大于 t_2 , 因此, 裂隙水优先到达采场下部以顶板淋水形式出现, 水渗流路径(时间)如图 11 所示。可见, 即便是在垮落带内, 在其变形、垮落过程中也曾出现过离层裂隙。

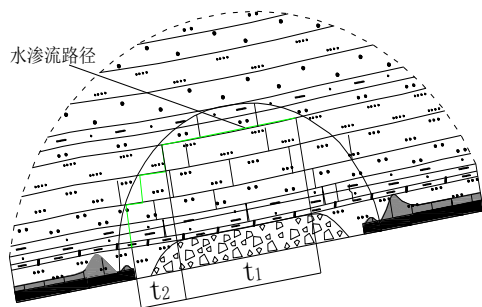


图 11 水渗流路径(时间)示意图
Fig.11 Water seepage path decomposition

综上, 基岩任何层段上均可能产生离层, 产生离层裂隙是绝对的, 离层裂隙的宏观尺度是相对的, 可以合理推测下部基岩内离层裂隙较为发育, 若在弯曲下沉带的底部单独划出“离层带”值得商榷。

3 工程意义探讨

3.1 “三带”模型工程意义

覆岩“三带”结构模型的工程意义主要体现在指导防隔水煤(岩)柱设计、校核采煤支架的工作阻力等。

1) 当煤层顶板存在富水性中等及以上间接充水含水层, 又不易疏干或疏干不经济时, 需要留设防隔水煤(岩)柱, 防隔水煤(岩)柱的高度必须满足下式:

$$H_f > H_m + H_{li} \quad (2)$$

式中: H_f 为防隔水煤柱高度(采空顶界到含水层之间隔水层厚度), m; H_m 为垮落带高度, m; H_{li} 为导水裂隙带高度, m。

由于地层结构的复杂性、物理力学性质各向异性、各层异性, 精准探测“两带”高度在实践中是很困难的。为了确保隔水煤(岩)柱有效的隔水性, 通常在垮落带、导水裂隙带之上应再增加一定的隔水层厚度, 即通常所说的保护层。

2) 采煤支架额定工作阻力必须适应采场围岩条件, 支架工作阻力过小, 容易在生产中发生切顶压架事故, 甚至引起顶板突水等连锁反应。支架额定工作阻力必须满足下式:

$$F_g > 9.8h\gamma kS \quad (3)$$

式中: F_g 为支架额定工作阻力, kN/m²; h 为最大采高, m; γ 为上覆岩层平均容重, kN/m³; S 为支架控顶面积, m²; k 为采高倍数。

应用式(3)时以垮落带高度与采高成倍数关系为前提, 垮落带岩层的重量全部由采煤支架承担。

3.2 “四带”模型工程意义

为了减少地面下沉量、减轻地表变形量, 保护地面建筑, 从 20 世纪 90 年代开始, 向采后覆岩内高压灌注粉煤灰、黏土、水泥浆液或复合浆液的注浆工程在全国多地都有开展; 近年在环境保护要求下, 将煤矸石球磨后制成浆液作为充填材料以消化煤矸石为主要目的的工程在山东省、内蒙古自治区等地均有尝试。“四带”模型一度被用来指导离层带注浆, 抓住离层带的有利空间提高浆液注入量。

但“四带”模型没有给出离层带的计算方法或量化判据。离层带邻近导水裂隙带, 在此层段内实施高压注浆存在着溃浆的安全风险, 实践中均在裂隙带上方保留至少 60 m 的隔浆岩层, 即注浆层段与所谓的离层带在空间上并不对应; 同时, “四带”将垮落带与导水裂隙带合并为破裂带, 弱化了“三带”模型原有的工程意义。

3.3 “新四带”模型工程意义

“新四带”与“四带”在基岩内存在离层、表土松散层变形机理与基岩变形机理不同等观点上是一致的, 但“新四带”认为离层可能产生在基岩的任何层段上。“新四带”传承了垮落带、导水裂隙带的观点, 使“三带”原有的工程意义得以强化, 同时还可以指导离层水害的防治。

离层水害需要同时具备 4 个条件^[13]: 富水性(水源)条件、导水通道条件、汇水时间条件、离层空间条件。离层空间所在的围岩必须具备一定的富水性, 通过一定时间的渗透汇集才可以在离层空间内形成自由水体, 富水性越好所需要的汇水时间越短, 这是发生离层水害的物质基础。缺少导水通道条件, 离层水体无法溃入采场, 而采矿扰动形成的导水裂隙是其必然的导水通道, 断层或其他劣化岩层完整性的构造只会破坏离层空间的封闭性, 开放的离层空间无法汇集水源。

关于离层水害的突水通道, 有学者认为多煤层开采对顶板重复扰动使导水裂隙上延^[14]而导水; 有学者认为离层水体下方相对隔水层可视为板状隔水岩梁, 在离层水体重力作用下, 隔水岩梁破断而突水, 即“静水压涌”观点^[15-17]; 也有学者认为采煤支架工作阻力

不足,导致“压架切顶”形成贯通性导水裂隙^[18-19];导水裂隙发育高度一方面受关键层控制^[20],一方面又随着采高变化而呈台阶式发育。作者认为,导水裂隙是基于岩体损伤和导水性而作出的定义,导水裂隙带高度是特定的开采条件下导水裂隙能够发育的最大高度,任何形式下的岩体破断,只要破断产生的裂隙具备导水能力,均应归入导水裂隙范畴。因此,上述关于离层水害突水通道的各种观点均无法回避导水裂隙这个关键点,导水裂隙是离层水害必然的导水通道。

可以合理推测,高位覆岩内的离层空间虽然具备汇水时间条件,因缺少导水裂隙这个导水通道条件,无法形成离层突水(如图12的离层1);低位覆岩内形成的离层裂隙很快会被导水裂隙“刺穿”,即不具备汇水的时间条件,无法在短时间内汇集一定量的水体,通常表现为老塘涌水(如图12的离层3);导水裂隙带顶部附近的离层相对汇水时间相对较长,即具备汇水时间条件;同时具备导水通道条件。综上可以得出结论:只有位于导水裂隙带顶部附近的离层空间才能形成离层水害(如图12的离层2)。得出的这个结论很重要,为离层水害的防治提供了靶域。

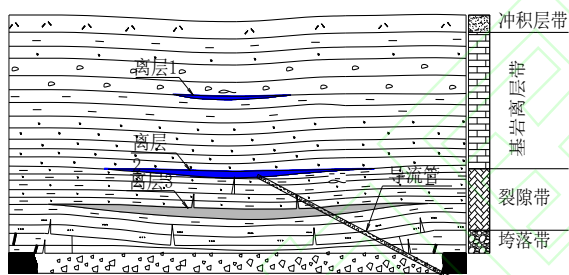


图12 覆岩离层与导流管示意图

Fig.12 Schematic diagram of overburden separation layer and diversion pipe

以下2种措施可有效防范离层水害的发生:

1) 疏干开采

疏干措施是改变地层富水性条件,使得离层空间形成后因水源不足难以在一定时间内形成离层水体,疏干高度以“新四带”模型为指导,即导水裂隙带高度,在工作面上方及其附近形成疏干区(对应导水裂隙带高度)、半疏干区(对应保护层厚度)、未疏放区(图13)。在工作面上下2条巷道内施工放水孔,按“双层双向扇形”布孔法,向煤层顶板打钻孔疏放水,钻孔均终孔于导水裂隙带顶界附近。

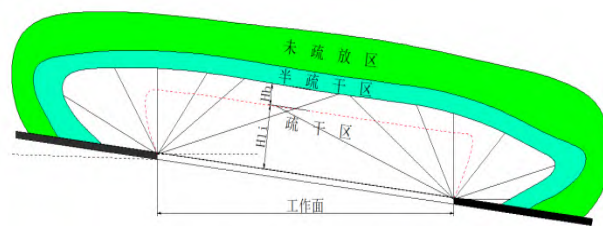


图13 疏干范围示意图(剖面)

Fig.13 Schematic diagram of drainage range (section)

2) 预设导流管

由于地层沉积结构的复杂性和力学性质的各向异性,难以准确预测离层水害发生的时间、地点,根据“只有位于导水裂隙带顶部附近的离层才可能发生离层水害”的观点,可以预先埋设导流管,只要出现离层水体即可及时导出,不至于瞬时溃入采场(图12)。

具体做法是在工作面下巷内每隔100m左右打钻孔并安装1根导流管,直达导水裂隙带顶端附近。导流管前部做成花管便于导水,后部可为实管。

4 结论

a. 覆岩内任何层段上均可能产生离层裂隙,产生离层裂隙是绝对的,离层裂隙宏观尺度大小是相对的,下部离层的发育程度可能会优于上部,但绝不限于弯曲下沉带的下部;覆岩下沉运动是产生离层的动力源,物理力学性质的差异性控制着离层裂隙产生的空间位置。

b. “三带”模型的工程意义主要在于指导防隔水煤(岩)柱设计和校核综采支架的工作阻力;“四带”模型中单独划分的离层带为离层注浆工程实践提供了理论指导,但存在溃浆的安全风险,同时弱化了垮落带和导水裂隙带原有的工程应用价值。

c. “新四带”模型传承了“三带”模型原有工程应用价值,“新四带”关于“只有位于导水裂隙带顶部附近的离层空间才能发生离层水害”的观点,使离层水害的防治能够做到有的放矢,是对“三带”观点的拓展和补充。

参考文献(Reference)

- [1]王双美. 导水裂隙带高度研究方法概述[J]. 水文地质工程地质, 2006(5): 126-128.
WANG Shuangmei. A brief review of the methods determining the height of permeable fracture zone[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006(5): 126-128.
- [2]钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
QIAN Minggao, MIU Xiexing, XU Jialin, et al. Dominant stratum theory for control of strata movement[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.

- [3] 康永华. 采煤方法变革对导水裂缝带发育规律的影响[J]. 煤炭学报, 1998, 23(3): 40-44.
KANG Yonghua. The effect of various mining methods on development law of water flowing fractured zone[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(3): 40-44.
- [4] 朱庆伟, 李航, 杨小虎, 等. 采动覆岩结构演化特征及对地表沉陷的影响分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(增刊 1): 9-17.
ZHU Qingwei, LI Hang, YANG Xiaohu, et al. Influence analysis of between subsidence and structure evolution in overburden rock under mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(Sup.1): 917.
- [5] 王晓振, 许加林, 韩红凯, 等. 顶板导水裂隙高度随采厚的台阶式发育特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3740-3748.
WANG Xiaozhen, XU Jialin, HAN Hongkai, et al. Stepped development characteristic of water flowing fracture height with variation of mining thickness[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3740-3748.
- [6] 许家林, 王晓振, 刘文涛, 等. 覆岩主关键层位置对导水裂隙带高度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 380-385.
XU Jialin, WANG Xiaozhen, LIU Wentao, et al. Effects of primary key stratum location on height of water flowing fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 380-385.
- [7] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996(3): 2-7.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 1996(3): 2-7.
- [8] 柴华彬, 张俊鹏, 严超. 基于 GA-SVR 的采动覆岩导水裂隙带高度预测[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(2): 359-365.
CHAI Huabin, ZHANG Junpeng, YAN Chao. Prediction of water-flowing height in fractured zone of overburden strata based on GA-SVR[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(2): 359-365.
- [9] 高延法. 岩移“四带”模型与动态位移反分析[J]. 煤炭学报, 1996(1): 51-56.
GAO Yanfa. “Four-zone” model of rockmass movement and back analysis of dynamic displacement[J]. Journal of China Coal Society, 1996(1): 51-56.
- [10] 高延法, 邓智毅, 杨忠东, 等. 覆岩离层带注浆减沉的理论探讨[J]. 矿山压力与顶板管理, 2001(4): 65-67.
GAO Yanfa, DENG Zhiyi, YANG Zhongdong, et al. Theoretical discussion on grouting settlement reduction in overburden separation zone[J]. Mine Pressure and Roof Management, 2001(4): 65-67.
- [11] 吕玉广, 肖庆华, 程久龙. 弱富水软岩水-沙混发型突水机制与防治技术研究: 以上海庙矿区为例[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 3154-3163.
LÜ Yuguang, XIAO Qinghua, CHENG Jiulong. The mechanism and prevention of water-sand inrush in soft rock with weakly abundant water: A case study in Shanghai temple mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(10): 3154-3163.
- [12] 吕玉广, 赵仁乐, 彭涛, 等. 侏罗纪巨厚基岩下采煤突水溃砂典型案例研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3903-3912.
LÜ Yuguang, ZHAO Renle, PENG Tao, et al. A typical case analysis of water-sand inrush in mining under thick over-burden rock in Jurassic coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3903-3912.
- [13] 吕玉广, 肖庆华, 韩港. 软岩矿区顶板弱含水层高强度携沙突水机理研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(1): 38-42.
LÜ Yuguang, XIAO Qinghua, HAN Gang. Study on mechanism of high-strength water-inrush with sand cause by weak aquifer in soft rock mining area[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(1): 38-42.
- [14] 杨庆, 乔伟, 乐建, 等. 巨厚煤层综采工作面顶板离层水形成条件分析及危险性评价[J]. 矿业安全与环保, 2014, 41(3): 64-66.
YANG Qing, QIAO Wei, LE Jian, et al. Analysis on formation condition of water in roof bed separation in fully mechanized face of extra-thick seam and evaluation of its risk[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2014, 41(3): 64-66.
- [15] 乔伟, 李文平, 李小琴. 采场顶板离层水“静水压涌突水”机理及防治[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 96-104.
QIAO Wei, LI Wenping, LI Xiaoqin. Mechanism of “hydrostatic water-inrush” and counter measures for water inrush in roof bed separation of a mining face[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(1): 96-104.
- [16] 曹丁涛. 离层静水压突水及其防治[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(2): 9-12.
CAO Dingtao. Hydrostatic water-inrush in bed separation and its prevention and control[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(2): 9-12.
- [17] 李文平, 李小琴, 孙如华. 巨厚坚硬岩层下煤层开采“动力突水”初步研究[J]. 工程地质学报, 2008(增刊 1): 446-450.
LI Wenping, LI Xiaoqin, SUN Ruhua. Preliminary study on “dynamic water inrush” in coal mining under extremely thick and hard strata[J]. Journal of Engineering Geology, 2008(Sup.1): 446-450.
- [18] 彭涛, 冯西会, 龙良良, 等. 厚覆基岩下煤层开采突水溃砂机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 260-264.
PENG Tao, FENG Xihui, LONG Liangliang, et al. Study on mechanism of water inrush and sand inrush in mining of coal seam with thick overlying bedrock[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 260-264.
- [19] 柳昭星, 董书宁, 靳德武, 等. 深埋采场压架切顶诱发井下泥石流形成机理与防控[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3515-3528.
LIU Zhaoxing, DONG Shuning, JIN Dewu, et al. Formation mechanism and prevention and control of underground debris flow induced by roof-cutting of pressured support in deep-buried face[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3515-3528.
- [20] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin. Mine Pressure and Strata Control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.