

浅埋煤层条带充填 保水开采岩层控制

黄庆享 张文忠 著



科学出版社

浅埋煤层条带充填保水开采技术

黄庆享 张文忠 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在分析陕北侏罗纪煤田浅埋煤层特殊保水开采区地质条件的基础上,通过充填材料实验、物理相似模拟、数值计算和理论分析的方法,研究砂基膏体充填材料及其性质,揭示条带充填开采的隔水岩组变形、破坏和运移规律和机理;建立两个充填条带对称分布条件下的“边界煤柱-充填条带-隔水岩组”力学模型,给出上行裂隙、下行裂隙发育高度和隔水岩组最大下沉量计算公式,分析了充填体压缩量与隔水岩组稳定的关系,揭示了条带充填开采的隔水层稳定性控制机理;建立条带充填开采隔水岩组稳定性判据,提出合理的充填间隔宽度和充填宽度计算方法,为浅埋煤层特殊保水开采提供了理论基础。

本书可供采矿工程、生态环境、岩土工程、地质工程等学科研究人员、专业技术人员和生产管理者参考。

图书在版编目(CIP)数据

浅埋煤层条带充填保水开采岩层控制/黄庆享, 张文忠著. —北京: 科学出版社, 2014. 2

ISBN 978-7-03-037045-7

I. ①浅… II. ①黄…②张… III. ①薄煤层-条带开采-岩层控制-研究 IV. ①TD823. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 268314 号

责任编辑: 张妮华/责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴/封面设计: 范璧合

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 2 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2014 年 2 月第一次印刷 印张: 8 3/4

字数: 174 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

我国西部浅埋煤层资源丰富。浅埋煤层开采易诱发地表生态环境恶化，根源是开采引起煤层上覆隔水岩组失稳而导致浅层潜水流失。在隔水岩组厚度小于18倍采高的特殊保水开采区，采取条带充填是控制潜水流失的根本途径之一。建立条带充填条件下的煤层上覆隔水岩组力学模型，确定合理充填间隔宽度和充填带宽度的计算方法，是条带充填保水采煤技术的关键和基础。

本书以陕北侏罗纪煤田浅埋煤层特殊保水开采区地质条件为背景，选取最常见的基岩黏土型隔水岩组进行研究。研究配制出砂基膏体充填材料，测试砂基膏体充填材料和黏土层的基本力学参数，开发砂基膏体充填材料和黏土层的相似材料和相似模拟技术，实现全应力应变相似。在此基础上，还开展走向长壁条带充填开采的物理相似模拟实验，分析走向长壁双条带等间距充填开采模式下隔水岩组稳定性条件，得出不同充填间隔宽度和充填条带宽度对上行裂隙与下行裂隙发育高度的影响规律，获得不同充填间隔宽度和充填条带高宽比对隔水岩组下沉量的影响规律。采用数值模拟技术，进一步研究不同充填间隔宽度和充填条带高宽比的充填条带载荷量分布规律、条带充填采场应力分布特征和塑性破坏区分布特征。

本书基于相似模拟和数值计算，建立了两个充填条带对称分布条件下的“边界煤柱-充填条带-隔水岩组”力学模型，给出了上行裂隙、下行裂隙发育高度和隔水岩组最大下沉量计算公式，揭示了条带充填开采的隔水层稳定性控制机理。研究发现：①充填条带高宽比越大，充填条带的压缩量就越显著，隔水岩组下沉量越大。②随着充填间隔宽度和充填宽度之比（隔充比）增大，隔水岩组最大下沉量非线性增加。③隔水岩组支撑岩柱弹性模量越大，隔水岩组下沉量越小。④随着充填间隔宽度和采高的增大，上行裂隙发育高度呈非线性增大。⑤充填条带（及岩柱）压缩量越大、充填间隔宽度越大，下行裂隙发育越深。总体上，充填条带高宽比越大和隔充比越大，隔水岩组的上行裂隙和下行裂隙发育越充分，隔水岩组越不稳定。

根据“边界煤柱-充填条带-隔水岩组”力学模型及上行裂隙、下行裂隙高度计算公式，建立了条带充填条件下上覆隔水岩组稳定性判据，提出了合理的充填间隔宽度和充填宽度计算方法，为陕北侏罗纪煤田特殊保水开采提供了理论基础。

本研究及出版得到国家自然科学基金项目（51174156，51174278）、陕西省科技统筹创新工程计划项目（2011KTCQ01-41）、榆林市科技计划项目（榆政财

教发〔2010〕4号-12)和陕西省教育厅重点实验室科学研究计划项目(2010JS019)资助。全书共7章,第1~2章由黄庆享完成,第3~7章由黄庆享和张文忠共同完成,黄庆享对全书进行了审定。同时,陈杰教授、张沛博士、李亮硕士、刘素花硕士、黄克军硕士和赖锦琪硕士也参与了本书的相关研究,在此一并致谢。

本书仅对柔性充填条件下隔水岩组稳定性及控制因素进行初步研究,书中不足和谬误之处,恳请读者批评指正。



2013年7月于西安

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 浅埋煤层岩层控制理论	3
1.1.1 浅埋煤层的矿压特征	3
1.1.2 浅埋煤层的特征与分类	5
1.1.3 浅埋煤层顶板结构理论	6
1.2 浅埋煤层保水开采研究	11
1.2.1 浅埋煤层顶板破断的空间结构形态	11
1.2.2 保水开采条件与隔水层稳定性	14
1.3 部分开采顶板控制理论	15
1.4 充填开采方法与技术	19
1.4.1 充填开采技术进展	19
1.4.2 充填材料及其力学特性	22
1.4.3 充填体的力学作用机理	24
1.4.4 条带充填开采岩层控制理论	25
2 覆岩地质条件及保水开采分类	26
2.1 煤层赋存条件	26
2.1.1 自然地理	26
2.1.2 地质构造特征	27
2.1.3 煤层赋存特征	28
2.1.4 煤层顶板基岩特征	31
2.2 覆岩工程地质特征	33
2.2.1 煤层覆岩结构类型	33
2.2.2 风化带工程地质特征	34
2.2.3 顶板基岩工程地质特征	35
2.2.4 隔水层工程地质特征	37
2.2.5 黏土隔水层应力应变及渗透系数变化规律	39
2.3 煤与水赋存的空间组合关系	42
2.4 萨拉乌苏组及其地下水水资源	45
2.5 保水开采分类与分区	46

2.5.1	保水开采分类	46
2.5.2	保水开采分区	47
2.6	特殊保水开采区覆岩类型	49
2.6.1	特殊保水区分布状况	49
2.6.2	覆岩结构类型	49
3	柔性条带充填原理及充填材料研究	52
3.1	柔性条带充填开采原理	52
3.1.1	条带充填方法	52
3.1.2	柔性条带充填开采技术原理	54
3.1.3	柔性条带充填方式	55
3.1.4	条带充填工艺	56
3.2	陕北风积沙的工程特性	57
3.2.1	陕北风沙滩地区分布状况	57
3.2.2	陕北风积沙物理特性	57
3.3	膏体充填材料的特点及可泵性	62
3.3.1	膏体充填材料的特点	62
3.3.2	膏体充填材料的可泵性	65
3.4	充填体强度的确定	67
3.4.1	早期强度	67
3.4.2	后期强度	69
3.4.3	膏体充填材料强度的确定	71
4	条带充填的隔水岩组稳定性实验研究	73
4.1	条带充填物理相似模拟实验设计	73
4.1.1	相似条件及相似参数	73
4.1.2	黏土隔水层的相似性研究	75
4.1.3	柔性充填材料的相似性研究	78
4.1.4	模型布置	80
4.2	条带充填开采隔水岩组稳定性的物理模拟	81
4.2.1	柔性条带充填开采上行裂隙和下行裂隙发育规律	82
4.2.2	中部基岩下沉规律	84
4.2.3	隔水层及其支撑岩柱移动规律	84
4.2.4	充填材料强度对覆岩的控制作用	86
4.2.5	充填条带载荷量及压缩量变化规律	89
4.3	条带充填开采数值模拟研究	90
4.3.1	条带充填数值计算模型	91

4.3.2 覆岩应力场和塑性区分布特征	91
5 条带充填保水开采的隔水岩组力学模型	95
5.1 隔水岩组结构力学模型	95
5.2 隔水岩组下沉曲线分析	98
5.3 上行裂隙发育高度分析	106
5.4 下行裂隙发育分析	110
5.4.1 下行裂隙发育深度	110
5.4.2 下行裂隙发育位置	110
6 充填条带和隔水岩组稳定性控制因素	113
6.1 岩柱载荷量及岩柱压缩量	113
6.2 充填条带载荷和压缩量	115
6.2.1 充填条带载荷量及充填条带压缩量	115
6.2.2 充填条带压缩量的相似材料试验	115
6.2.3 充填条带压缩量影响因素	117
6.3 隔水岩组下沉量影响因素	118
6.4 上行裂隙发育高度影响因素分析	120
6.5 下行裂隙发育深度影响因素分析	121
6.6 隔水岩组稳定性影响因素总结	123
7 条带充填开采隔水岩组稳定性判据	124
7.1 隔水岩组稳定性判据	124
7.2 基岩黏土型覆岩合理充填参数确定方法	125
参考文献	128
附图	

1 绪 论

煤炭是我国主要的能源,煤炭开采与环境保护协调发展是煤炭科学开采的重要发展方向。我国西部广泛赋存浅埋煤层,但浅埋煤层开采造成的环境问题十分突出,因此保水开采成为西部煤炭开采的主要研究方向之一。浅埋煤层开采后覆岩垮落和地表塌陷明显,隔水层的稳定性控制难度大,条带充填技术为浅埋煤层保水开采提供了一条经济有效的途径。因此,浅埋煤层的顶板控制理论、保水开采技术、部分开采控制理论和充填开采方法与技术都为条带充填保水开采岩层控制理论与技术提供了一定地研究基础。

煤炭在我国一次能源消费构成中占 65%~70%,是支撑国民经济可持续发展和国家能源安全的重要支柱。陕北侏罗纪煤田煤炭资源约占全国保有量的 14% (王双明等, 2010a),该区储量丰富、煤质优良、地质构造简单、开采技术条件优越。对陕北侏罗纪煤田煤炭大规模地开发始于 1987 年,截至 2008 年年底区内生产矿井达 260 余处,占陕西省矿井总数的 59%,原煤产量占全省的 67% 以上,成为陕西省乃至全国最重要的煤炭生产基地,2007 年原煤产量达到 1.32 亿 t,2008 年增至 1.55 亿 t,近年来仍以每年约 2000 万 t 的速度递增。

陕北侏罗纪煤田地处我国西北内陆干旱地区、毛乌素沙漠与陕北黄土高原的接壤地带,水资源贫乏,生态环境脆弱。随着矿区被大规模开发,采动裂隙带直接影响含水层,水源地直接遭到破坏,并导致原来接受该含水层补给的井泉、河流和水库干涸。以陕北风沙滩地区内陆湖——红碱淖为例,该湖位于沙丘区的相对低处,除汛期有一定的地表径流入湖外,大多数情况下主要接受周边地下水排泄补给。地下水位的变化直接影响红碱淖湖面的消长和水位的升降。从 1992~2000 年,红碱淖周围 506 孔、508 孔、509 孔地下水位埋深均持续下降,其中 506 孔下降达 1.1 m,湖面面积从 55 km² 萎缩到 48 km²,湖水水位下降了 1.4 m (唐克旺等, 2003)。自 2000 年以来,红碱淖 (图 1.1) 面积已经缩小了近 1/3。

据统计,神木县目前已有数十条河流地表径流断流,黄河的主要支流之一——窟野河一年 2/3 以上时间处于断流状态。煤田开发前的夏季枯水期,永兴沟水流量为 0.2 m³/s、黄羊城沟为 0.1 m³/s、西沟为 0.3 m³/s、孙家岔沟为 0.15 m³/s、朱盖沟为 0.3 m³/s、活鸡兔沟为 0.3 m³/s、石窑店沟为 0.25 m³/s,目前这些河流在夏季枯水期全部处于断流状态。中鸡镇束鸡河村,因受到活鸡兔煤矿开采的影响,村内 3 座大型水库、18 眼水井全部干涸,当地群众被迫到数十里之外拉水吃,水价涨到每吨 3~6 元。大柳塔镇母河沟村、双沟村受大柳塔煤矿开采的

影响,两村原来水流量分别为 $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ 的浇灌用水已全部枯竭,两村上下游超过 13 hm^2 水浇地弃耕,超过 6 hm^2 果园也因地表水下降,出现果木死亡现象。窟野河两岸的大小煤矿连片开发,造成窟野河支流母河沟、主渠、三不拉沟等较大沟流自 1997 年开始陆续干枯断流,导致黄河一级支流窟野河从 2000 年陆续开始断流。原水流量可达 $5000 \text{ m}^3/\text{d}$ 的双沟,现已完全干枯, 26 km^2 以上水浇地变成了旱地,大量乔木(旱柳、沟头杨树等)由于缺水而旱死(图 1.2)。根据 1997 年探测,地下水位已降至基岩面附近,萨拉乌苏组含水层已接近疏干(王双明等, 2010b)。

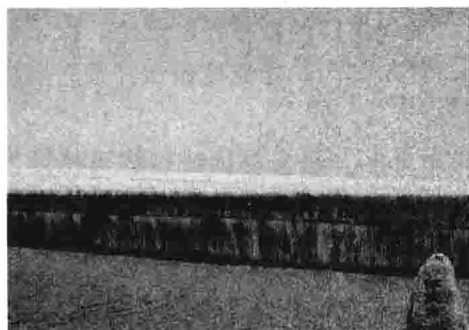


图 1.1 红碱淖(面积日益缩小)



图 1.2 衰败的乔木

多年的煤矿开采实践证明,大规模开采会引起一系列矿山环境地质效应和水文生态效应,如地面塌陷、地裂缝、地下水水位下降、地表河流断流、土地沙化、水土流失、植被退化等,这无疑加剧了矿区原本脆弱的生态环境进一步恶化。同时,又使矿山环境地质问题的危害性日渐凸现,成为社会广泛关注的焦点。

对于目前由采矿工业发展而导致的重大环境问题,钱鸣高等(2010)指出,在我国西北地区必须研究开采对隔水带的破坏与重新恢复的条件。开采形成的岩层裂隙场以及地形的改变,将对地表水、地面植被以及地下水径流产生严重影响。研究充填采空区保护隔水带的可能性,确定保水开采的约束条件,是陕北煤炭资源绿色开采的技术关键。针对由浅埋煤层开采引起的环境问题,黄庆享(2010)从宏观上按照保水开采的条件,将保水开采分为三种类型,分别为自然保水开采、特殊保水开采和可控保水开采。其中,特殊保水开采是最难实现保水的类型,其隔水岩组的厚度小于 18 倍采高,按照正常的长壁垮落法开采,导水裂隙带高度将突破隔水岩组而导致漏水,必须采用充填等特殊开采方式才能实现保水开采。

陕北矿区目前主要采用长壁垮落法开采,对含水层来讲,相当于一次大面积的疏干行为。针对开采引起的环境问题,一方面要研究浅埋煤层条带充填开采的

隔水层控制技术, 另一方面还要研究条带充填开采参数设计的科学性, 保证充填开采的效率和经济性。

1.1 浅埋煤层岩层控制理论

浅埋煤层的埋深较浅, 采动覆岩垮落直接波及地表, 顶板垮落运动规律和顶板控制理论与普通采场有较大差异。浅埋煤层岩层控制理论的研究大概经历了三个阶段: 1996 年以前主要是浅埋煤层的矿山压力实测研究; 1996~2005 年为浅埋煤层顶板控制理论研究阶段, 主要包括浅埋煤层的科学定义、“短砌体梁”和“台阶岩梁”模型的建立; 2005 年以后研究重点逐步转向环境友好的绿色开采技术。

1.1.1 浅埋煤层的矿压特征

我国赋存大量埋深在 150 m 以内的浅部煤田, 如神府-东胜、灵武、黄陵等煤田。其中, 最典型的是神府-东胜煤田。神府-东胜煤田探明储量 2 236 亿 t, 占全国探明储量的 1/3, 是我国目前探明储量最大的煤田。神东矿区开采区域大部分集中于埋深在 100~150 m 的浅部, 煤层的典型赋存特点是埋深浅、基岩顶板比较薄、表土覆盖层比较厚。由于浅埋煤层工作面的矿压显现规律具有明显的特点, 为了区别于其他煤层, 通常将具有埋深浅、基岩薄、上覆厚松散层赋存特征的煤层称为浅埋煤层(黄庆享, 2000; 侯忠杰等, 1994)。

自 1990 年以来, 神东矿区浅埋煤层生产实践表明, 煤层埋深浅, 顶板压力明显, 工作面普遍出现台阶下沉现象, 支架易被压毁(图 1.3)。因此, 掌握浅埋煤层工作面矿压显现规律、认识上覆岩层的活动特点, 是进行浅埋煤层顶板控制的基础。

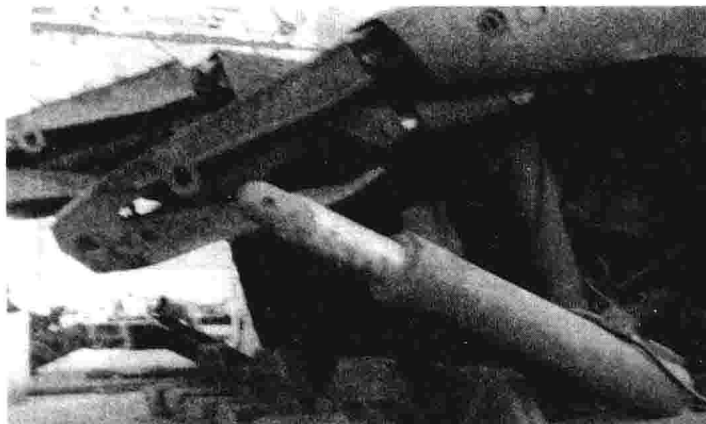


图 1.3 浅埋煤层工作面被压坏的液压支架

1. 薄基岩浅埋煤层工作面矿压显现规律

大柳塔煤矿 1203 工作面是神东矿区第一个机械化工作面, 开采 1^{-2} 煤层, 地质构造简单。煤层平均倾角 3° , 平均厚度 6 m, 埋深 50~65 m。地表风积沙松散层 15~30 m, 其下为约 3 m 厚的风化基岩。顶板基岩厚度 15~40 m。直接顶为粉砂岩和泥岩。老顶主要为砂岩, 岩层完整。工作面长度 150 m, 采高 4 m, 循环进尺 0.8 m, 日进 2.4 m。顶板支护采用 YZ3500-23/45 掩护式液压支架, 支架初撑力 2700 kN/架, 工作阻力 3500 kN/架。实测综采工作面主要来压特征如下 (黄庆享, 2002):

(1) 工作面顶板台阶下沉: 初次来压步距 27 m。来压的主要特征是工作面中部约 91 m 范围顶板沿煤壁切落, 台阶下沉量高达 1000 mm, 来压迅猛, 造成大部分液压支架损坏。周期来压步距 9.4~15.0 m, 平均为 12 m。来压历时较短, 支架动载明显。支架初撑力为额定工作阻力的 74%, 初撑力正常。支架工作阻力为额定工作阻力的 80%。支架平时的工作阻力不大, 只有来压时才超过额定工作阻力。

(2) 顶板垮落运动直接波及地表: 初次来压时在对应煤壁的地表出现高差约 20 cm 的地堑, 表明覆岩破断是贯通地表的。工作面周期来压时上覆岩层也发生了类似的破断 (图 1.4)。工作面台阶下沉是顶板基岩沿全厚切落的结果。

(3) 覆岩垮落呈现冒落带和裂隙带“两带”: 浅埋煤层工作面地表岩移观测表明, 基岩顶板破断失稳表现出单组老顶关键层结构特征, 工作面覆岩将表现为冒落带和裂隙带“两带” (图 1.4)。

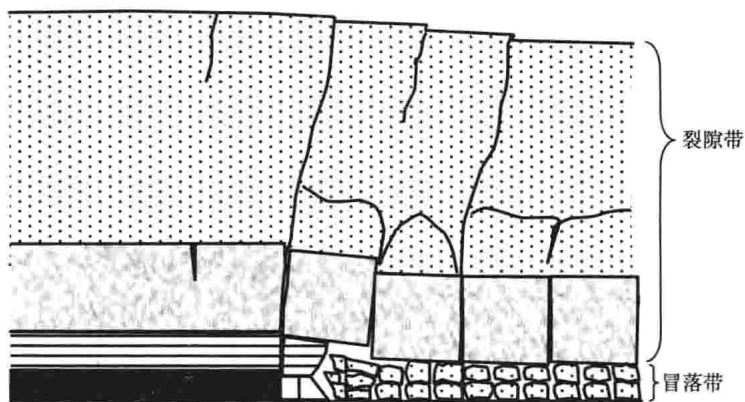


图 1.4 工作面上覆岩层整体切落与台阶下沉

2. 厚基岩浅埋煤层工作面矿压显现规律

大柳塔煤矿 20604 工作面埋深 80~110 m, 开采 2^{-2} 煤层, 煤层倾角 0.5° ~

2.6°, 煤层厚度 4.5 m, f 为 1~3。顶板基岩厚度 42.6 m, f 为 2~7。基岩风化层和地表沙土层平均厚度 56 m。工作面煤壁长 220 m, 采用美国久益公司生产的 6LS-03 型双滚筒电牵引采煤机割煤, 采高 4.3 m, 循环进尺 0.8 m。采用德国 D.D.T. 公司生产的 WS 1.7 型掩护式液压支架支护顶板, 支架初撑力 4 098 kN/架, 工作阻力 6 708 kN/架。工作面正常推进速度为 22 循环/天 (17.6 m/d), 最快推进速度 34 循环/天 (29 m/d), 日产煤 3.7 万 t。

(1) 来压步距增大: 在工作面推进速度加大的条件下, 工作面来压步距增大。初次来压步距为 54.2 m, 周期来压步距平均为 16 m。工作面推进速度加快, 工作面压力减缓。当工作面推进速度小于 15 循环/天时, 初撑力平均为额定值的 84%, 工作阻力为额定值的 81%。当推进速度快时, 工作面压力减缓, 初撑力仅为额定值的 58%, 工作阻力为额定值的 69%。

(2) 大小周期来压: 在基岩变厚条件下, 周期来压存在大小周期现象, 小周期步距为 12 m, 大周期步距为 20 m, 动载系数为 1.58。工作面顶板基岩为 28 m 厚的砂岩, 分为下组 16 m 厚和上组 12 m 厚的两组关键层 (图 1.5)。下组关键层失稳导致工作面小周期来压, 上组关键层的破断一般滞后下组关键层一个周期, 2 组关键层的叠合运动构成工作面大小周期来压 (黄庆享, 2002, 2000)。

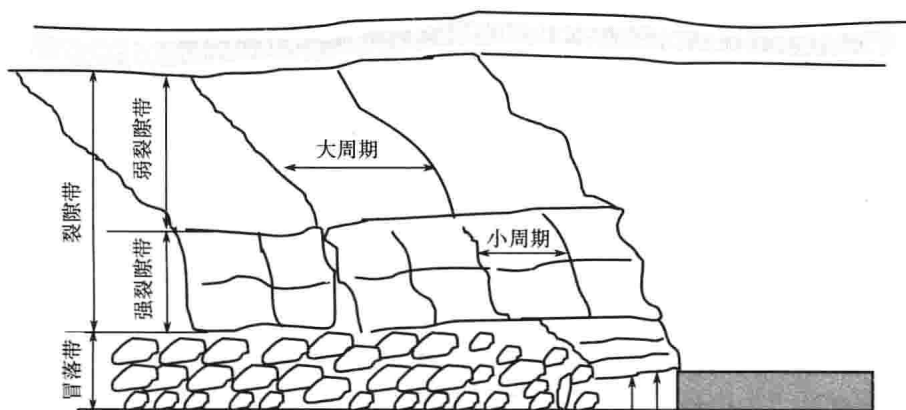


图 1.5 厚基岩顶板双关键层的大小周期来压及覆岩“两带”

1.1.2 浅埋煤层的特征与分类

1. 浅埋煤层上覆岩层运动的基本特征

- (1) 工作面来压动载明显, 顶板为切落式破坏, 存在台阶下沉特征。
- (2) 工作面顶板垮落直接波及地表, 覆岩垮落为冒落带和裂隙带“两带”。
- (3) 工作面顶板一般为 1~2 组关键层, 老顶岩块不易形成稳定的“砌体梁”

结构。

2. 浅埋煤层的分类

浅埋煤层出现来压强力的主要原因和其关键层的构成有关。普通采场顶板基岩较厚,存在多组关键层,最接近采场的下组关键层受其上部多组关键层的保护而处于减压区,因此采场压力并不大。而浅埋煤层仅有1~2组关键层,其上部直到地表均为脆弱的载荷层,顶板结构不易稳定,导致来压迅速。为此,根据关键层的特征,浅埋煤层可分为两类:典型浅埋煤层和近浅埋煤层(黄庆享,2002)。

(1) 典型浅埋煤层:对于基岩比较薄、松散载荷层厚度比较大的浅埋煤层,其顶板破断运动表现为整体切落形式,易于出现顶板台阶下沉。此类厚松散层、薄基岩浅埋煤层称为典型浅埋煤层,可以概括为埋深浅、老顶为单一关键层结构的煤层。

(2) 近浅埋煤层:对于基岩厚度比较大、松散载荷层厚度比较小的浅埋煤层,其矿压显现规律介于普通工作面与浅埋煤层工作面之间,顶板结构呈现两组关键层,存在轻微的台阶下沉现象,可称为近浅埋煤层(黄庆享等,2003)。

总体上,浅埋煤层工作面的主要矿压特征是:老顶破断运动直接波及地表,顶板不易形成稳定的结构,来压存在明显动载现象,支架处于给定失稳载荷状态。

1.1.3 浅埋煤层顶板结构理论

陕北侏罗纪煤田的开采过程中出现了顶板台阶下沉、支架压毁等强烈矿压灾害,引发了对浅埋煤层岩层控制的探索。20世纪90年代初,国内外研究者基于大量的现场实测,掌握了长壁工作面矿压显现的基本规律与特征。90年代末,黄庆享等(1999)开展了来压机理和顶板结构理论研究,提出了浅埋煤层老顶初次来压“非对称三铰拱结构”模型和周期来压的“台阶岩梁结构”模型,揭示了浅埋煤层顶板来压强烈和顶板台阶下沉是顶板结构滑落失稳造成的。根据滑落失稳型顶板的特点,提出了给定失稳载荷的“支架-围岩”作用关系,建立了以顶板结构力学模型及以稳定性为基础的浅埋煤层顶板控制理论。

1. 浅埋煤层采场老顶初次来压的结构理论

1) 初次来压的“非对称三铰拱结构”模型

长期以来,关于老顶的结构分析主要集中于解决周期来压问题,初次来压仅有少量研究。初次来压期间,老顶岩块结构的回转运动状态基本可以分为老顶触矸前的空间回转运动和岩块触矸后的运动。老顶在岩块触矸前的空间回转运动时刻对采场构成最大威胁。下面对此刻的顶板结构稳定性进行分析。

根据实测与模拟研究,初次来压期间,由于分步开挖损伤积累,老顶破断后形成“非对称三铰拱”结构,靠工作面侧的Ⅰ岩块长度 l_{01} 与开切眼侧的Ⅱ岩块长度 l_{02} 之比为1.5。力学模型如图1.6所示(黄庆享,1998),由于铰接处为塑性铰,故该结构为动态平衡结构。

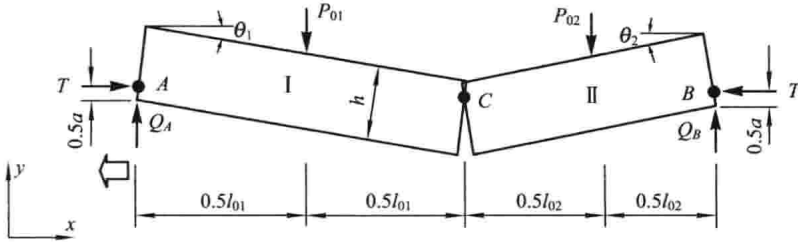


图 1.6 老顶初次来压的非对称三铰拱结构力学模型

P_{01} 、 P_{02} 分别为Ⅰ、Ⅱ岩块承受的载荷； θ_1 、 θ_2 分别为Ⅰ、Ⅱ岩块的转角；

a 为接触面高度； Q_A 、 Q_B 为A、B接触铰上的摩擦剪力； l_{01} 、 l_{02} 分别为Ⅰ、Ⅱ岩块长度；

h 为岩块厚度； T 为接触铰上的水平挤压力

2) 初次来压顶板结构的“S-R”稳定性

老顶非对称三铰拱结构为瞬变结构,失稳是必然的。根据顶板结构“S-R”稳定性分析,浅埋煤层工作面顶板块度大,初次来压顶板结构容易出现滑落失稳,这是工作面初次来压强烈的根本原因。防止顶板滑落失稳的条件为

$$T \tan \varphi + R_{01} \geq Q_A \quad (1.1)$$

式中, T ——接触铰上的水平挤压力,N;

$\tan \varphi$ ——接触铰上的摩擦系数;

R_{01} ——初次来压的合理支护力,N;

Q_A ——A接触铰上的摩擦剪力,N。

由此确定的合理支护力 R_{01} 为

$$R_{01} \geq (0.54 - \frac{0.24}{i - \sin \theta_1}) P_{01} \quad (1.2)$$

式中, i ——岩块的块度, $i=h/l_{01}$ (其中, h 为岩块厚度,m; l_{01} 为Ⅰ岩块长度,m);

θ_1 ——Ⅰ岩块的转角,(°);

P_{01} ——Ⅰ岩块承受的载荷,N。

初次来压的“非对称三铰拱结构”模型,改变了以往按对称结构带来的误差,提高了初次来压顶板控制定量分析的准确性。

2. 浅埋煤层采场老顶周期来压的结构理论

浅埋煤层顶板结构理论是揭示来压机理、确定支护参数的岩层控制核心理论。

关于顶板结构理论有大结构、小结构假说，组合关键层理论，“台阶岩梁”结构理论，载荷传递与顶板动态结构理论。其中，最具代表性的是“台阶岩梁”结构理论。

1) 浅埋煤层老顶“台阶岩梁”的结构模型

根据现场实测发现，浅埋煤层采场关键块度比较大（1.0~1.4），顶板结构将形成“短砌体梁”结构，该结构难以保持稳定，将出现滑落失稳，容易导致架后切落。正常情况下，形成的顶板结构形态，可以形象地称“台阶岩梁”结构，如图 1.7 所示（黄庆享等，1999）。

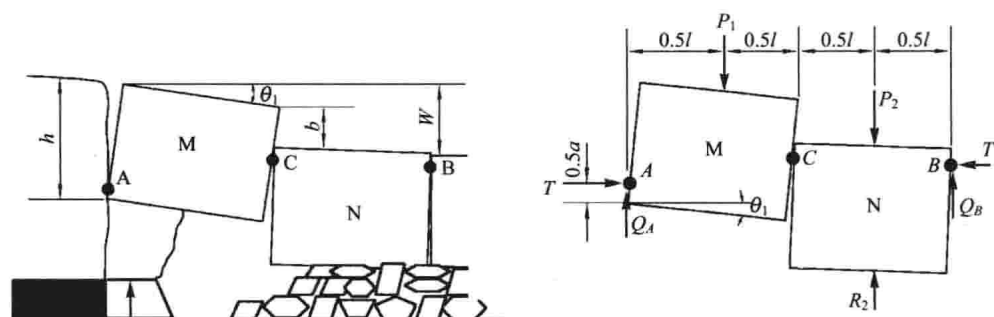


图 1.7 老顶周期来压的“台阶岩梁”结构模型

P_1 、 P_2 分别为 M、N 块体承受的载荷； R_2 为 N 块体的支承反力； θ_1 为 M 块体的转角； b 为 M、N 岩块间的落差； h 为岩块厚度； a 为接触面高度； Q_A 、 Q_B 分别为 A、B 接触铰上的剪力； l 为岩块长度； W 为 N 岩块的下沉量

2) 浅埋煤层周期来压的合理支护力

通过“台阶岩梁”结构的“S-R”稳定性分析，该结构的水平力 T 随回转角 θ_1 的增大而减小，随块度 i 的增大明显下降，结构失稳形式为滑落失稳，这是浅埋煤层工作面来压强烈和台阶下沉的根本原因。必须对顶板提供一定的支护力才能维持顶板结构的平衡，保持顶板“台阶岩梁”结构稳定的支护力 R_t 为

$$R_t \geq \frac{i - \sin\theta_{1\max} + \sin\theta_1 - 0.5}{i - 2i\sin\theta_{1\max} + \sin\theta_1} P_1 \quad (1.3)$$

式中， R_t ——周期来压的合理支护力，N；

i ——岩块的块度， $i=h/l$ （其中， l 为岩块厚度，m； l 为岩块长度，m）；

$\theta_{1\max}$ ——M 块体的最大转角， $(^\circ)$ ， $\sin\theta_{1\max} = \frac{W}{l}$ （ W 为 N 岩块的下沉量，m；

l 为岩块长度，m）；

P_1 ——M 块体承受的载荷，N。

3. 浅埋煤层工作面合理支护阻力确定

1) 工作面支架围岩的“给定失稳载荷”

由于浅埋煤层工作面顶板来压期间都将出现滑落失稳,老顶难以形成稳定的岩梁结构,支架围岩关系不再是经典的给定变形状态,支架主要承受结构失稳载荷,支架围岩为“给定失稳载荷”状态。来压期间,工作面支架主要提供防止结构滑落失稳的必要支护阻力(图 1.8)(黄庆享,2000)。工作面支护阻力 P_m 为

$$P_m = W + R_D \quad (1.4)$$

式中, W ——直接顶岩柱质量, kg;

R_D ——老顶滑落失稳所传递的压力, N, $R_D = bR_i$ ($i=01$ 或 t) (其中 b 为支架宽度, m; R_i 为初次来压或周期来压的合理支护力, N)

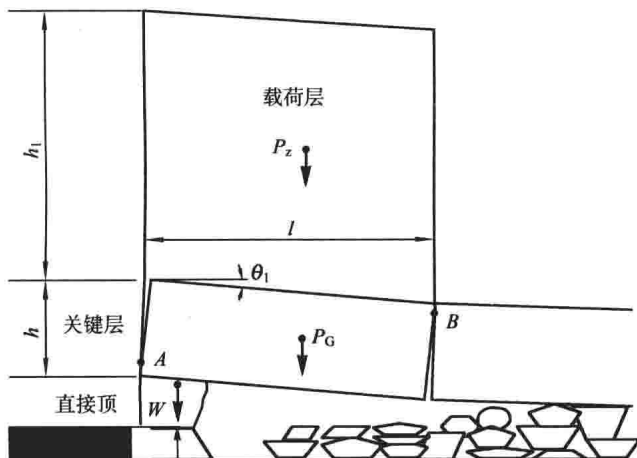


图 1.8 周期来压顶板载荷构成

2) 载荷传递因子的提出与合理支护阻力确定

对于普通采场,老顶关键层上的载荷层为附着于其上的软弱岩层,载荷层随关键层的运动而运动,载荷层的重量几乎全部传递于关键层。浅埋煤层工作面老顶距离地表近,基岩上部直至地表的沙土层都是载荷层,厚度大。根据实测,并非所有载荷层的重量都传递于老顶岩块,不能简单按经典理论 $P_1 = \rho g (h + h_1) l_1$ 计算。厚松散覆盖层对老顶的载荷作用有一个时间和空间传递过程,可以用载荷传递系数 K_G ($K_G \leq 1$) (黄庆享,2005a,2005b,2005c,2000) 表示为

$$K_G = K_r K_t \quad (1.5)$$

式中, K_r ——与岩块长度、载荷层岩性有关的岩性因子;