

回采巷道煤柱与底板稳定性分析

王卫军¹, 侯朝炯²

(1. 湘潭工学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 将老顶和老底视为加载系统, 分析了回采巷道煤柱和底板岩层的相互作用及稳定性, 并提出了底板岩层产生滑移的条件。认为回采巷道底鼓一般不是底板岩层在垂直应力作用下向巷道内滑移所致。

关 键 词: 回采巷道; 底板; 煤柱; 稳定性

中图分类号: TD 32 **文献标识码:** A

Stability analysis of coal pillar and immediate bottom of extraction opening

WANG Wei-jun, HOU Chao-jiong

(1. Xiangtan Polytechnic University, Xiangtan 411201, China; 2. China University of Mining and technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The system consisted of main roof and hard floor is considered as a load system; the interaction and stability of coal pillar and immediate bottom of extraction opening are analyzed. The condition that immediate bottom produces slump is proposed. It is put forward that the reason of floor heave of extraction opening isn't slump of immediate bottom but effect of horizontal stress.

Key words: extraction opening; immediate bottom; coal pillar; stability

1 引 言

在一些研究底鼓的文献中, 作者常运用滑移线场理论来解释地下工程或巷道底鼓机理, 认为底鼓是底板岩层在两帮集中应力作用下向巷道内滑移所致。在一定条件下, 底板岩层的滑移确实是巷道底鼓的主要原因之一, 然而, 并不是所有的底鼓都是底板岩层的滑移引起的, 底板岩层产生滑移必须满足一定的条件。本文在分析回采巷道两帮和底板稳定性的同时, 提出了底板岩层产生滑移的条件。

2 岩石加载破坏过程分析

在支承压力作用下, 回采巷道两帮向巷道内大量移进, 围岩由弹性状态变为破碎状态。从岩石的加载破坏过程可知, 随着加载位移的增加, 煤岩承受的载荷逐渐增加, 煤岩体内原有裂隙被压密并不断产生新的裂隙; 当加载位移达到其极限位移时, 也达到其峰值强度, 煤岩体内裂隙继续发展; 加载

位移继续增加, 煤岩体将发生宏观破坏, 进入峰后区, 承载能力逐渐下降, 最后进入应变软化区。因此, 巷道围岩的破坏过程与岩石试块的位移加载破坏过程是相同的。下面利用岩石全应力-应变曲线来分析煤柱和底板岩层共同作用系统的稳定性。

大量岩石力学试验表明, 无论是在普通实验机或是在刚性实验机上进行试验, 岩石试块的破坏不是在应力峰值点, 而是在峰后的某一点上。在普通实验机上, 岩石试件表现为突然失稳, 而在刚性实验机上岩石的失稳方式转为稳态破坏形式。

根据文献[1], 在实验机的刚度与试样的应力-应变曲线斜率方面存在某种关系, 将试件和实验机看成一个系统, 如果荷载超过了试件刚度的强度极限点而仍能满足式(1)时, 则系统就能使试件保持稳定破坏。

$$\Delta w_r - \Delta w_m > 0 \quad (1)$$

式中 Δw_r 为试件产生变形 ΔU_r 所需外界提供的能量; Δw_m 实验机弹性储存能的释放。

Salamon 据此推出的岩石破坏后实验机-试件系统稳定的条件是：

$$K_m + f'(U_r) \geq 0 \quad (2)$$

式中 K_m 为实验机的刚度； $f'(U_r)$ 为岩石荷载-位移曲线的斜率。

因此，采用刚性实验机进行岩石加载实验时， $K_m + f'(U_r) > 0$ ，采用普通实验机时 $K_m + f'(U_r) < 0$ 。如图 1 所示。

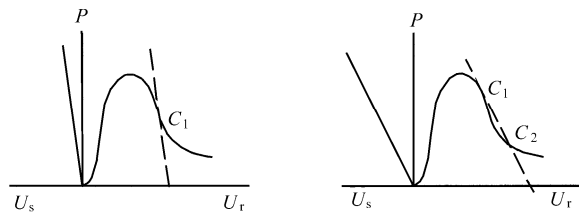


图 1 实验机刚度与岩石荷载-位移曲线斜率的关系
Fig.1 The relationship between test machine stiffness and slope of rock load-displacement curve

3 煤柱与底板的相互作用分析

如把老顶与老底看成加载系统，从上述分析和回采巷道围岩的变形破坏过程可知，老顶和老底的加载可视为刚性加载，煤岩的破坏过程为稳定破坏过程。下面分析煤体与底板的相互作用。

如图 2(a) 所示，假设煤柱上支承压力为均匀分布，从巷帮煤岩接触面两边分别取出一个单元体，一个是煤单元体（单元体 1），一个是底板岩单元体（单元体 2）。图 2(b) 为两个单元体共同作用系统，图中 P 为支承压力。

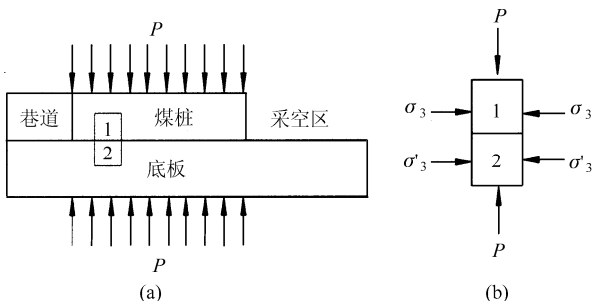


图 2 煤体与底板共同作用系统
Fig.2 Interaction system of coal pillar and immediate bottom

设在支承压力 P 的作用下，两个单元体处于一个平衡系统中，且它们的荷载-位移关系可表示如下：

$$P_m = f_m(U_m) \quad (3)$$

$$P_d = f_d(U_d) \quad (4)$$

显然 $P_m = P_d$

式中 U_m 和 U_d 为单元体 1 和单元体 2 在支承压力作用下的位移量。

对于支承压力的增量 ΔP_m ，由式 (3)，(4) 有：

$$\Delta P_m = f'_m(U_m) \Delta U_m \quad (5)$$

$$\Delta P_d = f'_d(U_d) \Delta U_d \quad (6)$$

式中 ΔU_m ， ΔU_d 为单元体 1 和单元体 2 的位移增量，设两个单元体的全位移增量为 ΔU ，则：

$$\Delta U = \Delta U_m + \Delta U_d = \Delta U_m \left(\frac{\Delta U_d}{\Delta U_m} + 1 \right) \quad (7)$$

由式 (5)，(6)，(7) 整理得：

$$\Delta U_m = \frac{\Delta U}{\frac{f'_m(U_m)}{f'_d(U_d)} + 1} \quad (8)$$

由式 (8) 对单元体 1 和单元体 2 的相互作用关系如图 3 所示

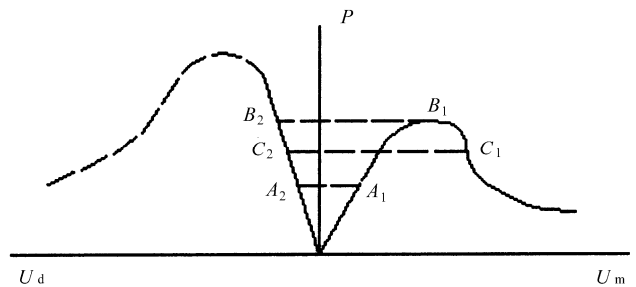


图 3 底板岩体与煤体荷载位移关系
Fig.3 Relationship between load and displacement of immediate bottom and coal

① 随支承压力 P 的逐渐增大，单元体 1 和 2 沿曲线分别达到 A_1 点和 A_2 点，两个单元体均处于弹性储能阶段， $f'_m(U_m)$ ， $f'_d(U_d)$ 为常数。

② 单元体 1 开始偏离弹性阶段，进入非弹性变形阶段，并达到峰值 B_1 点， $f'_m(U_m) = 0$ ，而单元体 2 仍处于弹性阶段或稍有非弹性变形， $f'_d(U_d)$ 基本不变， $\Delta U_m / \Delta U \rightarrow 1$ ，两个单元体仍处于弹性储能阶段。

③ 单元体 1 逐渐破坏，丧失承载能力而产生应力降，破坏过程所需的能量一部分由单元体本身的储能释放提供，一部分由单元体 2 释放的弹性能提供（单元体 2 恢复到 C_2 点，释放弹性能），当单元体 2 释放能量的速率小于单元体 1 吸收的能量时，

单元体 1 表现为稳定破坏, 当单元体 2 释放能量的速率大于或等于单元体 1 吸收的能量时, 单元体 1 表现为突然失稳。

从上述分析可知, 在支承压力作用下, 当老顶的刚度小于等于下部煤岩体荷载-位移曲线的斜率时, 巷帮煤体将发生突然失稳, 当老顶的刚度大于下部煤岩体荷载-位移曲线的斜率时, 巷帮煤体将发生稳定破坏。

从底板与煤体相互作用分析可知, 当底板岩体的极限强度大于煤体的极限强度时, 煤体将先破坏, 而底板则仍处于弹性阶段; 反之, 底板可能先破坏。一般均为稳定破坏。

因此, 当底板的极限强度大于煤体的极限强度时, 煤柱将先破坏而不能压入底板。只有当底板先破坏, 此时煤体才会压入底板, 产生滑移。

4 底板岩层产生滑移的条件

假设煤体作用于底板的压力均匀分布, 底板为理想塑性材料, 根据滑移线场理论, 在均匀分布载荷作用下, 由文献[2]可知, 底板极限载荷为:

$$q = k(2 + \pi) \quad (9)$$

式中 q 为底板极限载荷; k 为底板纯剪屈服应力。由屈雷斯加屈服条件可知:

$$k = \tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (10)$$

根据莫尔-库仑理论有

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (11)$$

式中 φ 为底板岩体内摩擦角; σ_c 为底板岩层单轴抗压强度。

整理式 (9) ~ (11) 得:

$$q = \frac{1}{2}(\sigma_c + \sigma_3 \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi})(2 + \pi) \quad (12)$$

底板上的压力 q 是煤柱传递给底板的, 煤柱可传递的最大应力为:

$$q = \sigma_{m1} = \sigma_{mc} + \sigma_{m3} \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m} \quad (13)$$

式中 σ_{m1} 为煤柱可传递的应力; σ_{mc} 煤体单轴抗压强度; σ_{m3} 煤柱围压; φ_m 为煤体内摩擦角。

将整个煤柱作为研究对象, 则 $\sigma_{m3} = 0$, 因此, 底板岩层产生滑移的条件为:

$$\sigma_{mc} = \frac{1}{2}(\sigma_c + \sigma_3 \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi})(2 + \pi) \quad (14)$$

假设底板岩层的围压 $\sigma_3 = 0$, 则式 (14) 变成:

$$\sigma_{mc} = \sigma_c (1 + \frac{\pi}{2}) \quad (15)$$

由式 (15) 可知, 在一般情况下, 煤柱下的底板岩层是难以在煤柱传递的应力作用下产生滑移的, 只有当底板岩层特别松软, 上式得到满足时,

77

底板岩层被剪切破坏, 底板岩层产生向巷道内的滑移, 煤柱才可能嵌入底板。

5 数值模拟分析

5.1 模拟条件^[3,4]

某矿 3 号煤层, 采深 300 m, 回风巷尺寸 3.5 m × 3 m, 与上工作面之间留煤柱 10 m, 煤系地层岩石力学参数如表 1 所示。

表 1 煤层及顶底板主要岩石力学参数
Table 1 Mechanical parameters of surrounding rock

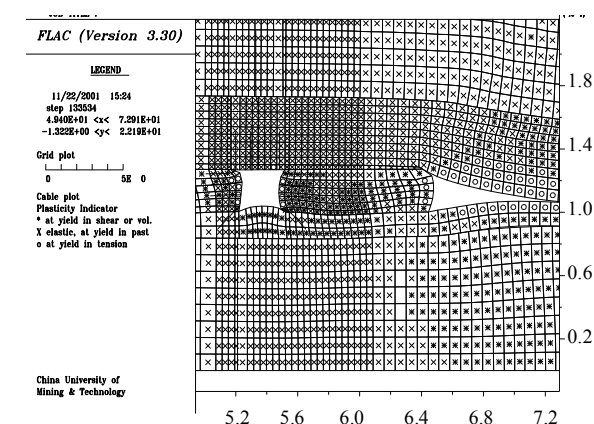
岩层	厚度 / m	单轴 抗压 强度 / MPa	密度 / g·m ⁻³	弹模 / GPa	内聚力 / MPa	内摩 擦角 / (°)
中砂岩	22.02	62.4	2.54	25.2	7.6	38
粉砂岩	2.06	48.3	2.5	20.1	5.8	35
泥岩	2.0	25.5	2.4	15.3	4.6	30
煤层	3.0	18.7	1.56	5.54	3.2	28
泥岩	1.98	25.5	2.4	15.3	5.8	30
细砂岩	10.4	51.6	2.53	23.2	6.3	34

5.2 模拟方法

采用 FLAC3.3 大型数值模拟软件, 岩层范围 180 × 70 m, 网格 190 × 80, 采用应力边界条件, 上覆岩层应力按自重考虑, 工作面超前支承压力集中系数为 3。模拟顺序为上工作面开采、巷道开挖、施加超前支承压力。

5.3 模拟结果及分析

模拟结果如图 4、5 所示, 图 4 为巷道围岩及煤柱塑性区分布, 图 5 为水平位移分布。从图 4 中看到, 煤柱单元基本为剪切破坏, 只有中间存在少量的弹性单元, 而煤柱及巷道底板只有泥岩受到剪切破坏, 而细砂岩则仍为弹性, 煤柱的破坏程度远超过巷道底板。从图 5 中看到, 煤柱或底板岩层均发生向采空区的位移, 以煤柱右侧位移最大, 达 870



78

图 4 煤柱及底板塑性区分布

Fig.4 Plastically deforming area of coal pillar and floor

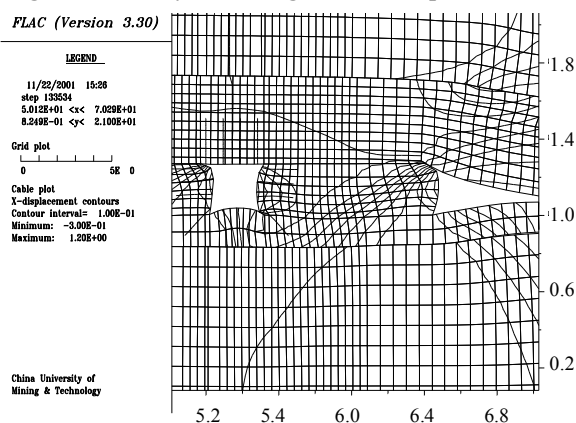


图 5 煤柱及底板水平位移分布

Fig.5 Horizontal displacement distribution of coal pillar and floor

mm；巷道实煤体侧底板岩层(2 m 以下)中垂直应力达 25.6 MPa，最大水平应力达 12.8 MPa，而煤柱中最大垂直应力为 7.5 MPa，最大水平应力为 3.8 MPa。因此，巷道底板岩层是在水平应力作用下破坏，而向巷道内鼓起和向采空区移动的。

6 结 论

(1) 对回采巷道，由于煤体的强度一般小于底板的强度，在支承压力的作用下煤柱先于底板破坏，且难以使底板岩层产生滑移，因此，用滑移线场理论分析回采巷道底鼓是不全面的。

(2) 回采巷道煤帮破坏后，底板岩层“暴露”宽度增加，更容易被水平应力挤压破坏，因此，加固两帮有利于控制底鼓，这也被现场实践所证实。

参 考 文 献

- [1] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [2] 杨桂通. 塑性力学[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000.
- [3] 李学华. 综放沿空掘巷围岩大小结构稳定性的研究[博士学位论文 D]. 徐州: 中国矿业大学, 2000.
- [4] 柏建彪, 王卫军, 侯朝炯. 综放沿空掘巷围岩控制机理及支护技术研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(5): 478 - 481.

第五届全国塑料排水工程技术研讨会暨塑料排水学术委员会年会纪要

由中国土木工程学会港口工程学会塑料排水委员会主办的“第五届全国塑料排水工程技术研讨会暨塑料排水学术委员会年会”于 2002 年 10 月 12~16 日在天津召开，本次会议由天津港湾工程研究所承办，来自日本、香港及我国高校、科研、设计、施工单位和有关厂家 80 多位代表出席了本次会议。

总结技术进步，规划未来发展，讨论加强质量监督和规范市场秩序的措施，是本次会议的主要任务。本次研讨会的主要内容有：(1) 排水板及其他排水材料、反滤和排水兼顾加筋新产品的研制；(2) 检测技术与标准研究；(3) 施工技术与规程研究；(4) 加固机理与设计方法研究；(5) 现场试验研究和工程应用实录。会议期间还与日本专家学者进行了学术交流，着重讨论了在国际标准制定方面进一步合作的有关措施。

会议出版了《第五届全国塑料排水工程技术研讨会论文集》，收入国内外近年来有关塑料排水工程技术的实践经验和科研成果及工程实录等，包括综述、理论计算分析、试验研究、工程实践与应用等内容，

这些论文较全面反映了我国及日本等地塑料排水工程技术的应用现状及发展水平。

会议期间同时召开了第五届塑料排水学术委员会年会，选举产生了新一届学术委员会组成人员。由于新一届学术委员会的主任委员和秘书长分别由南京水利科学研究院赵维炳教授和郑培成教授级高工担任，为了便于开展学会的各项工作，经协商一致并经上级学会批准，学会办事机构的挂靠单位由河海大学变更为南京水利科学研究院（秘书处联系电话：025-5829520、5829527）。同时学术委员会商定“第六届全国塑料排水工程技术研讨会”将于 2005 年 10 月在南京举行，并由南京水利科学研究院承办。

（中国土木工程学会港口工程学会塑料排水委员会秘书处供稿）