

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0266-04

构造带综放工作面支架异常压力机理探讨

史 红^{1 2 3}, 姜福兴², 李连祥⁴

(1. 山东交通学院 土木工程系 济南 250023; 2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 3. 山东农业大学 水利土木工程学院 泰安 271018; 4. 山东科技大学 泰安 271019)

摘 要: 针对多个综放采场出现的支架立柱压爆、油缸变形等异常矿压显现, 通过对综放采场上覆岩层的运动范围及运动特点、顶板结构动态稳定性的分析, 探讨了综放工作面异常压力产生的机理。得出了顶板结构局部铰接失稳(滑落失稳)是造成异常压力主要原因的结论。由于滑落失稳的原因不同, 可分为水浸蚀型、地质构造型和顶板失稳型。通过对综放采场支架作用力的分析, 给出了计算异常压力的公式。利用顶板结构动态稳定性判断准则, 可对异常压力的类型进行判别, 从而进一步确定异常压力的计算方法, 为采场支架选型和现场控制异常压力提供理论依据。

关 键 词: 综放采场; 顶煤放出率; 顶板结构动态稳定性; 滑落失稳; 异常压力

中图分类号: TD 35

文献标识码: A

Study on mechanism of abnormal pressure on support in fully mechanized sublevel caving face at geologic changing

SHI Hong^{1,2,3}, JIANG Fu-xing², LI Lian-xiang⁴

(1. Department of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250023, China; 2. Beijing University of Science & Technology, Beijing 100083, China; 3 College of Hydraulic and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 4. Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China)

Abstract: Aimed at phenomena of support's being pressed to burst or be unable to work in a few fully mechanized sublevel caving longwall faces, according to the analysis of the roof structures, their movement characteristics and the dynamic stability in fully-mechanized sublevel caving face, the mechanism of abnormal pressure on support in fully mechanized sublevel caving face is studied. The conclusion is that the main cause of abnormal pressure is sliding of roof structure. Because of the difference of sliding of roof structure, there are three of abnormal pressure. According to the analysis of the pressure on support, the computation formulae of abnormal pressure on support are presented. Using the dynamic stability judgement rules of roof structures, the types of abnormal pressure on support are distinguished and the computation means of abnormal pressure are defined; and the theoretical foundation about the selection of support in fully mechanized sublevel caving face and controlling abnormal pressure at field experiments are provided.

Key words: fully mechanized sublevel caving face; top coal's recovery ratio; dynamic stability; sliding of roof structure; abnormal pressure

1 引 言

我国综采放顶煤成套技术和相关理论总体上处于国际领先水平, 然而, 近年来, 国内多家矿井相继出现了立柱压爆、油缸变形等矿压显现异常的情况, 严重影响了正常生产, 给煤矿企业带来了重

大经济损失。这类事故的发生频率随采深的增加而呈逐渐增加的趋势。虽然国内外学者对放顶煤开采的顶板运动规律及支架围岩关系的研究取得了大量成果^[1-6], 但是, 目前对综放工作面出现的矿压显现异常的机理还未有系统的理论研究。本文利用综放采场顶板结构动态稳定性与顶煤放出率关系的研究结果, 探讨综放采场矿压显现异常的力学机理。

收稿日期: 2006-04-21

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作基金(50320120001); 山东农业大学青年科技创新基金

作者简介: 史红, 女, 1968 年生, 博士, 在站博士后, 副教授, 主要研究方向为矿山岩体力学与工程。

2 综放采场顶板结构的动态稳定性

随顶煤放出率的变化, 综放采场上覆岩层的运动范围及其稳定性是变化的, 由此引起“支架-围岩”关系将发生较大变化。

2.1 综放工作面上覆岩层的运动范围

放顶煤采场的顶煤和直接顶垮落后充满采空区, 下位岩层为呈不规则垮落的直接顶, 上位岩层为呈大块较规则排列的老顶。随顶煤的放出, 散矸面下降, 上位岩层可不规则垮落, 直接顶厚度增加, 由顶煤放出率控制的直接顶厚度为

$$M_z = \frac{0.8H + T(\eta - 0.2)}{K_A - 1} \quad (1)$$

式中 H 为采高 (m); η 为顶煤的放出率; T 为顶煤的厚度 (m); K_A 为直接顶的碎胀系数。

直接顶厚度的变化, 表明随顶煤放出率的增加, 老顶向高位移动, 采空区顶板活动空间增加。根据文[7], 顶板总厚度大约是采高 (采出的净厚度) 的 6 倍左右, 老顶的厚度为

$$h = 6(H + \eta T) - \frac{0.8H + T(\eta - 0.2)}{K_A - 1} \quad (2)$$

放顶煤开采上覆岩层的运动范围变大, 不但表现在岩层厚度方向运动范围增加, 同时也表现在推进方向上: 与综采相比, 老顶在采空区的触矸点离工作面的距离变大, 可将此距离定义为老顶的跨度。根据现场测试, 对于分层综采, 采高为 3 m, 则老顶的跨度约为 30~40 m; 但根据 2003 年在兖矿集团南屯煤矿的观测, 对综放工作面, 当煤层厚度为 7 m 时, 老顶的跨度一般为 60~80 m, 是综采面老顶触矸点距离的 2~3 倍。

2.2 综放采场顶板结构的动态稳定性

放工作面顶煤放出率影响着顶板空间结构的形成、发展和稳定性。顶板结构的失稳包括由于顶煤放出率的增加造成顶板结构变形过大的整体变形失稳和由于工作面推进距离增大或上覆岩层存在断层等构造造成顶板岩块沿铰接面滑落的局部铰接失稳。

在周期来压期间, 受老顶厚度、周期来压步距和老顶在采空区触矸点的位置影响, 老顶在运动过程中可能形成三块结构 (组成老顶的岩块两块悬空, 一块触矸), 如图 1 所示。

根据文[8]可知, 利用最小势能原理求得顶板结构的整体变形稳定容许下沉量为

$$SA'_3 \leq \frac{5 \left(h - \sqrt{h^2 + l^2 - (h^4 l^2 + 2h^2 l^4 + l^6)^{\frac{1}{3}}} \right)}{4} \quad (3)$$

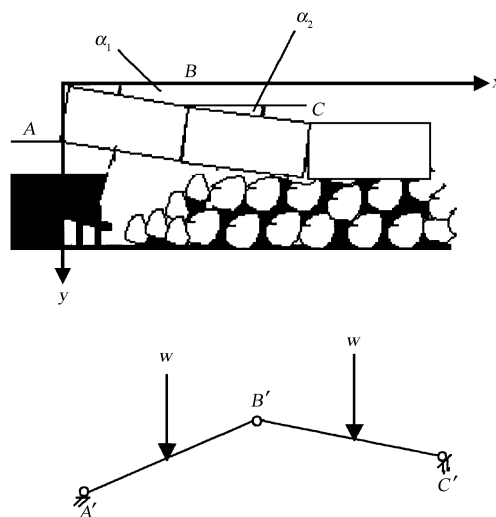


图 1 综放采场顶板结构计算模型

Fig.1 Compute model of roof structure in fully mechanized sublevel caving face

利用强度理论可求得结构局部铰接稳定容许下沉量为

$$SA''_3 \leq \frac{5}{4} \left(\frac{7fh\eta_0\sigma_0}{6f\eta_0\sigma_0} + \frac{-\sqrt{12lw^2 - 10fhw\eta_0\sigma_0 + f^2h^2\eta_0^2\sigma_0^2} - 11w}{6f\eta_0\sigma_0} \right) \quad (4)$$

式中 $w = \rho gh$ 其中 l 为岩块的长度 (m); h 为岩层的厚度 (m); ρg 为岩块的单位体积力 (N/m^3); η_0 为岩块端角挤压系数, 根据文[6], $\eta_0 = 0.3$; f 为岩块与煤壁挤压接触面的摩擦系数, $f = 0.4$; σ_0 为岩块的单轴抗压强度 (N/m^2)。

因此, 保证顶板结构整体变形稳定和局部铰接稳定相统一的力学稳定条件为由顶板运动几何状态决定的下沉量 (由顶煤放出率控制) SA 应小于顶板保持稳定的容许下沉量:

$$SA \leq \text{Min} (SA'_3, SA''_3) \quad (5)$$

其中: 由文[1]知, $SA = (0.15 - 0.25)(H + \eta T)$

3 支架异常压力产生的力学机理

3.1 综放工作面上覆岩层的运动范围

根据综放工作面顶板结构的动态稳定性分析,

顶板结构的失稳有两种可能：整体变形失稳和局部铰接失稳。顶板结构在整体变形失稳的过程中，其运动是逐渐发展的，老顶在运动过程中有一定的自承载能力，采场矿压显现比较缓和，支架上受载以静压为主，不会在支架上产生较大的冲击作用，因此，顶板结构整体变形失稳不会造成工作面的异常压力。局部铰接失稳是指顶板结构沿煤壁切落，其运动迅猛，支架将承受巨大的顶板压力，该压力将压坏支架，危及工作面安全，因此，综放工作面的异常压力主要由顶板结构的滑落失稳造成。

根据文^[9, 10]，综放采场异常压力是指由顶板运动规律变化导致的高出正常压力数倍的、对采场安全生产造成较大危害的“压架”力源。根据现场调研，矿压显现异常现象发生时，采场往往处于地质异常带，如褶皱的向斜、背斜处，断层附近、构造应力集中的地质破碎带等，且来压前常伴有顶板淋水、采空区涌水、煤壁严重片帮等预兆。因此，异常压力可分为水浸蚀型、地质构造型和顶板失稳型 3 种类型。水浸蚀型和地质构造型是由于老顶断裂线附近铰接岩块间的力学性质弱化，岩块间的摩阻力减小，不满足抗滑稳定性条件，顶板沿煤壁切落。地质构造带岩体裂隙发育，更容易沟通采场与含水层之间的联系，因此，水浸蚀型和地质构造型异常压力往往是伴生的。顶板失稳型即为前面所述的随顶煤放出率增大、工作面推进距离增大，顶板结构的滑落失稳。

由此可见，尽管综放工作面异常压力是由顶板结构滑落失稳造成的，但由于滑落失稳的机理不同，产生的异常压力有不同的类型，在估算产生异常压力的工作面支架作用力时应区别对待。

3.2 综放工作面异常压力的计算

前人的研究认为，综放采场直接顶的上方存在一个传递力的“类拱”结构。因为直接顶内部可能存在“类拱”机构，直接顶的作用力无需支架全部承担。支架只承担“类拱”结构下部未成拱部分的直接顶重量。当煤层上覆直接顶较薄、直接顶上方存在厚层坚硬岩层时，直接顶内的类拱结构将失稳，此时，其作用力必须由支架全部承担。若顶煤的放出率过大，采空区充填不满，老顶在运动过程中失稳后，支架则还应承担老顶的作用力。

综放工作面的正常压力（最不利情况）是指当“类拱”结构失稳但老顶没有失稳的情况。由于老顶未失稳，有一定的自承载能力，老顶对支架的作用力可不考虑。支架上的压力主要来自顶煤和全部直接顶。根据文献^[9, 10]，以山东兖矿集团开采的 3

层煤为例，采高为 2.5 m，顶煤厚度为 4.5 m，矸石碎胀系数取为 1.3，顶煤放出率取为 0.8。经计算，综放面的正常压力 453.25 kN/m²。

与综放采场支架正常压力对比分析，当工作面矿压显现异常时，支架上的作用力除考虑顶煤、直接顶的作用外，还应考虑老顶失稳在支架上产生的作用力。因此，综放工作面产生异常压力时，支架上的载荷由 3 部分组成：顶煤重量、直接顶的作用力和老顶的作用力。即：

$$P = \gamma_z M_z + \gamma_m T + P_c \quad (6)$$

式中 γ_m 为顶煤重度，一般取 $1.35 \times 10 \text{ kN/m}^3$ ； γ_z 为直接顶的重度， kN/m^3 ； P_c 为老顶的作用力， kN/m^2

由文[8]可知，根据图 1 所示的力学模型进行分析得到：支架上承担的老顶作用力为铰接面上的摩阻力与切向力二者的差值。支架上所承担的老顶的作用力为

$$p_c = \frac{(12h - 11l\alpha_1)w}{8h - 6l\alpha_1} - \frac{4lw}{4h - 3l\alpha_1} f \quad (7)$$

将式 (7) 代入公式 (6)，单位面积的支架作用力为

$$P = \gamma_m T + \gamma_z M_z + \left[\frac{(12h - 11l\alpha_1)w}{8h - 6l\alpha_1} - \frac{4lw}{4h - 3l\alpha_1} f \right] / L_K \quad (8)$$

式中 L_K 为控顶距 (m)。

将式 (8) 代入式 (6) 中，可确定产生异常压力时支架上的作用力。

仍以山东兖矿集团开采的 3 层煤为例，将相关参数代入式 (2) 计算知，老顶的厚度为 20.9 m。假定组成老顶的岩层较完整，周期来压步距为 33 m，即老顶岩块的长度约为 $l = 33 \text{ m}$ 。

若控制顶煤的放出率为 80%，首先判断在周期来压阶段顶板结构的滑落失稳是否由于顶板结构的下沉量过大而造成的。将相关参数代入顶板结构局部铰接稳定的条件公式 (4)，(5) 中，经验证，由顶板结构回转几何状态决定的下沉量小于顶板结构保持局部铰接稳定的容许下沉量，表明在周期来压阶段不会产生因顶板下沉量过大而造成滑落失稳。因此，此异常压力不是顶板失稳型。

根据前述顶板结构滑落失稳的类型分析可知，老顶的滑落失稳是由于岩块接触面上的摩阻力减小，不足以抵抗岩层运动在铰接面上产生的切向力

而造成的,因此,异常压力是水浸蚀型或地质构造型或二者共生。当顶板结构在推进过程中遇到顺面断层、相变线及水浸蚀区域时,岩块接触面上的摩阻力减小,甚至趋近于 0,因此,取最不利情况,假定摩擦系数 $f = 0$,则单位面积支架上的作用力为

$$P = \gamma_m T + \gamma_z M_z + \frac{(12h - 11l\alpha_1)w}{8h - 6l\alpha_1} / L_K \quad (9)$$

将以上采场参数代入式(9),单位面积支架上的作用力为 $P = 6\,153 \text{ kN/m}^2$ 。

根据以上计算可以看出,当工作面异常来压时,其压力值是日前北京煤机厂为兖矿集团生产的综放支架中最大工作阻力(6 800 kN/架,支架宽 1.5 m,长 4.5 m)的六倍多。一般支架难以承受如此大的压力,必然造成压垮工作面的事故。

4 结 语

(1)通过对综放采场上覆岩层的运动范围及运动特点、顶板结构动态稳定性的分析,探讨了综放工作面异常压力产生的机理。异常压力是由顶板结构局部铰接失稳(滑落失稳)造成的。由于滑落失稳的原因不同,可分为水浸蚀型、地质构造型和顶板失稳型。

(2)通过对综放采场支架作用力的分析,给出了计算异常压力的公式。

(3)利用顶板结构动态稳定性判断准则,对异常压力的类型进行判别,从而进一步确定异常压力的计算方法,为采场支架选型和现场控制异常压力提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 姜福兴. 采场顶板控制设计及其专家系统[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995. 205—213.
- [2] 宋振骐. 实用矿山压力[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988. 41—78.
- [3] 钱鸣高, 刘听成. 矿山压力及其控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984. 32—87.
- [4] 张顶立, 王悦汉. 综采放顶煤工作面岩层结构分析[J]. 中国矿业大学学报, 1998(4): 340—343.
ZhANG Ding-li, WANG Yue-han. Analysis of strata structure in fully-mechanized sublevel caving face[J]. **Journal of China University of Mining And Technology**, 1988(4): 340—343.
- [5] 杨淑华, 姜福兴. 综采放顶煤支架受力与顶板结构的关系探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 1999(3): 287—290.
YANG Shu-hua, JIANG Fu-xing. Research on The Relationship Between Sublevel Caving Support Load And Roof Structure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**. 1999(3): 287—290.
- [6] 钱鸣高, 缪协兴. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000. 30—86.
- [7] 史红, 姜福兴. 巨厚砾岩下孤岛综放面顶板结构的动态稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2005(增刊): 1—4.
- [8] 史红, 姜福兴. 综放采场周期来压阶段顶板结构稳定性与顶煤放出率的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(23).
SHI Hong, JIANG Fu-xing. Study on relationship between roof stability and top coal's recovery ratio during cyclic weighting in fully-mechanized sublevel caving face[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**. 2005(23):
- [9] 姜福兴, 汪华君. 综放采场支架“异常压力”的力源研究[J]. 煤炭学报, 2004(5): 523—526.
- [10] 史红. 综采放顶煤采场厚层坚硬顶板稳定性分析及应用[D]. 泰安: 山东科技大学, 2005.