厚沙土层在顶板关键层上的载荷传递因子研究

Studies on load-transmitting factor of thick sandy soil layer on key roof stratum in shallow seam mining

黄庆享

（西安科技大学 能源学院，陕西 西安 710054）

摘 要：通过动态载荷相似模拟实验，得出了厚沙土层浅埋煤层工作面顶板关键层载荷的“四区”分布规律，揭示了顶板结构中A、B和C关键块的动态载荷演化规律，发现了周期来压期间二次“卸荷拱”的载荷传递机理。提出了载荷传递因子的概念，基于太沙基土压力原理建立修正的普氏拱模型，给出了卸荷拱高度计算公式，确定了载荷传递的岩性因子和时间因子计算公式。

关键词：厚沙土层；载荷传递因子；卸荷拱；顶板关键层；关键块

中图分类号：TU 411；TD 31 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2005)06－0672－05

作者简介：黄庆享(1966－)，男，博士，教授，西安科技大学能源学院副院长，博士生导师，陕西省岩石力学与工程学会理事，主要从事采矿工程和岩层控制方面的研究工作。

HUANG Qing-xiang

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

Abstract: Through the dynamic load simulating system and simulating model tests of roof structure, the general load distribution law on the mined key roof and its structure in shallow seam under thick sandy soil overburden was deduced, and the load variation law on key block A, B and C of roof structure were revealed. Furthermore, the load transmitting mechanism of the reformed “unloading arch” was found in periodic loading on roof, then the new concept of load transmitting factor was put forward, and the amendatory model of M. M. Promojiyfakonov arch combined with that of K. Terzaghi was set up. On such a basis, the formula of lithology factor and time factor of load transmitting was established.

Key words: thick sandy soil layer; load transmitting factor; unloading arch; key roof stratum; key blocks

0 引 言

我国西部广泛赋存上覆厚沙土层的浅埋煤层。实践表明，顶板来压剧烈，存在明显的动载现象[1]。根据现场实测，厚沙土层下浅埋煤层的顶板破断和来压过程中，并非其全厚的重量都传递于关键层，存在载荷传递效应[2]。对于普通采场，经典理论中老顶关键层之上的载荷按照关键层上松软岩层（载荷层）全厚度考虑[3, 4]。因此，有必要认识厚沙土层采动破坏规律，确定载荷层对关键层结构的载荷传递因子，为正确建立顶板关键层动态结构控制定量化理论奠定基础。

采动厚沙土层的破坏运动和载荷传递研究，涉及采矿、地质、岩土等交叉学科，力学上属于双动态（顶板结构块动态边界和沙土动态运动）卸荷破坏，研究具有复杂性和前沿性。该研究不仅对揭示浅埋煤层顶板来压机理，建立顶板动态结构理论有直接意义，而且对动土力学和采动水土流失的研究也有借鉴作用。

通过开发智能化毫秒级动态载荷采集系统，对顶板关键层失稳过程进行仿真模拟[5]，得出了厚沙土层的破坏规律和载荷分布规律[6]。本文在此基础上，进一步分析了厚沙土层的周期性破坏特征，给出了动态载荷分布规律，提出了载荷传递因子的概念，并给出了计算公式，解决了关键块上的载荷确定问题。

1 厚沙土层周期性“弧形岩柱”及“卸荷拱”现象

为了揭示厚沙土层的破坏特征和载荷传递规律，专门开发了智能化、毫秒级响应的动态载荷采集系统，对顶板关键层失稳过程进行了动态仿真模拟。模型以典型的浅埋煤层工作面（大柳塔1203工作面）顶板赋存特征为对象，沙土层厚度45 m，关键层厚度13 m，直接顶厚度6 m。工作面采高4 m，采用走向长壁法开采，周期来压步距16 m，推进速度8 m/d。实验采用平面应力模型，模型几何相似比例系数为1：100，模型设计高度68 cm，长200 cm，宽18 cm。实验结果按照换算成原型值进行描述。经过3次重复性实验，得出了厚沙土层的周期性破坏特征。

1.1 充分采动后的周期性“弧形岩柱”破坏

在地层充分塌陷后，随着顶板关键层“台阶岩梁”

基金项目：国家自然科学基金资助项目（50104009）；教育部科学技术研究重点项目（204183）；教育部新世纪优秀人才支持计划

收稿日期：2004－07－21

[7]结构的运动，上覆厚沙土层失去下部支撑，出现自工作面煤壁向采空区 80° 弧拱状裂缝。这种裂缝将周期性产生，形成柱状体，可形象地称为“弧形岩柱”，岩柱宽度为顶板周期性垮落步距，如图 1 所示。

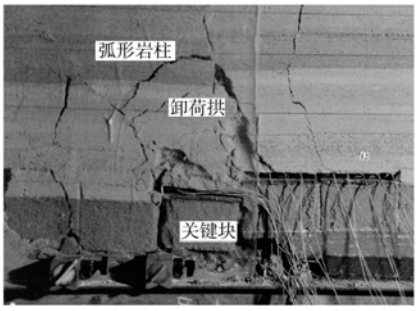

图 1 周期性“弧形岩柱”式破坏

Fig. 1 Periodic “arc pillar” failure

1.2 “弧形岩柱”内的二次“卸荷拱”

实验发现，周期性弧形岩柱形成后，随着顶板结构的进一步回转和下沉运动，弧形岩柱内出现二次冒落拱。由于该拱是因为下部关键块的运动而卸荷造成的，可以称为“卸荷拱”（见图 1）。可见，只有“卸荷拱”内的重量作用于顶板结构关键块。

2 顶板结构关键块上的动态载荷

根据工作面顶板关键块的尺寸，按照 1：100 的比例特制了 3 个测试块，每个测试块上分布 5 个测点。模型如图 2 所示，测块的测点编号沿工作面推进方向依次编为 1~5，A、B、C 为顶板结构关键块。

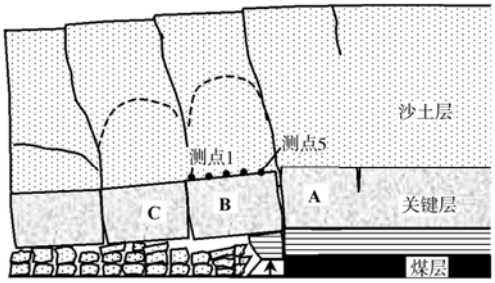

图 2 采场顶板关键块结构示意图

Fig. 2 Diagram of roof key blocks structure

2.1 顶板关键层上载荷的总体分布规律

通过对每个关键块上传感器测点平均应力与工作面位置的关系进行整理，可得工作面采动后的顶板关键层总体载荷分布曲线（图 3），有如下规律：关键层载荷分布总体上分为 4 个区，即，原岩应力区；工作面煤壁前方的载荷增高区（支承压力区）；工作面顶板结构运动区的载荷传递区（载荷降低区）；工作面后方顶板结构稳定区的载荷恢复区。这充分说明，关键层上的载荷随着工作面的开采呈现动态变化，变化最明显的区域工作面顶板结构“关键块”所处的区域，认识这种规律对于科学建立顶板结构理论和进行顶板控制具有十分重要的意义。

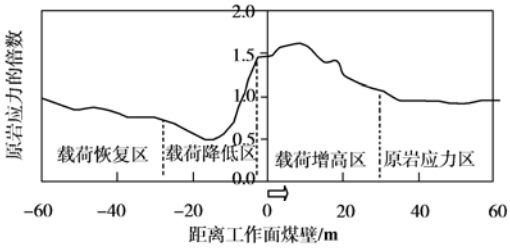

图 3 工作面顶板关键层载荷的总体分布规律

Fig. 3 General load distribution on roof key stratum of mining face

2.2 顶板结构关键块的动态载荷分布规律

掌握顶板结构关键块上的载荷变化，是正确分析顶板结构的稳定性的基础。为此，通过实测给出了顶板关键层结构在切落运动前后的典型动态载荷分布，如图 4 所示，有如下规律：①工作面前方 A 关键块位于增压区，随着接近工作面煤壁载荷逐渐增大，最大载荷达到未采动原岩应力的 1.75 倍，平均载荷达到 1.5 倍原岩应力。在顶板切落运动后，载荷峰值位置向煤壁移动；②顶板结构 B 关键块运动初期，载荷超过原岩应力（弧形岩柱作用），此刻 B 关键块载荷大于 C 关键块。B 关键块发生切落运动后，出现卸载现象（二次成拱效应），载荷降低为原岩应力的 0.5 倍左右。B 关键块上的载荷分布呈现中间大两端小的形态，载荷作用点基本上在关键块体的中部；③在 B 关键块运动初期 C 关键块的载荷很小，仅为原岩应力的 0.3 倍左右。当 B 关键块发生切落运动后，载荷转移到 C 关键块，使 C 块的载荷上升，并逐渐接近原岩应力水平。

从关键块的位置和载荷分布可以看出，当顶板运动稳定后，A、C 关键块都基本上处于压实状态，顶板关键块结构的稳定性主要体现在 B 关键块的稳定性，B 关键块的载荷下降显著，掌握这种规律对于合理确定支护控制方式具有重要意义。

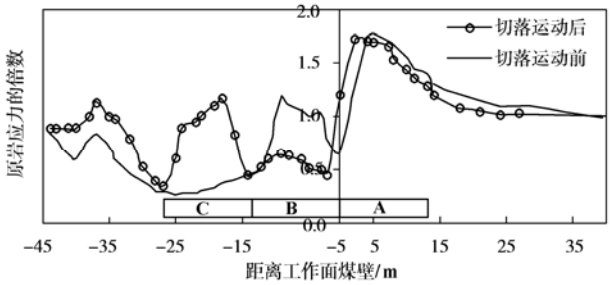

图 4 顶板结构关键块运动前后的典型载荷分布

Fig. 4 Typical load distribution on roof key blocks

2.3 B 关键块上的载荷变化的时间效应

根据浅埋煤层采场顶板“台阶岩梁”结构理论，B 关键块是决定顶板结构稳定性的关键。通过实测，得出了 B 关键块平均载荷随时间的变化规律，如图 5

所示。时间计算点自该块体推进过煤壁算起。可见，载荷传递随时间有如下变化规律：①B 关键块刚形成和随着回转运动初期，存在明显的卸荷现象，由原岩载荷降低至 30%；②随着时间的增长，B 关键块上二次“卸荷拱”形成，拱内的冒落体使关键块载荷增加至原岩的 50%，为工作面正常推进速度下的最大载荷（K_p 点）；③当工作面推进速度减慢时，随时间的增长，“卸荷拱”破坏，上部的冒落体载荷将传递到关键块而引起载荷增加，直至达到原岩载荷（进入 C 关键块）。

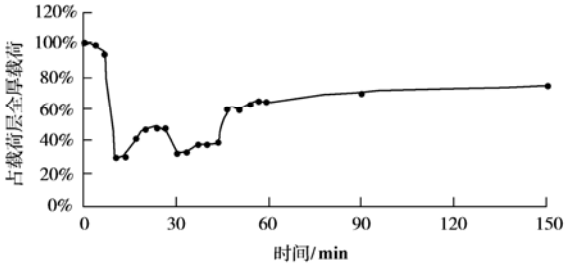

图 5 顶板关键块载荷随时间的动态变化规律

Fig. 5 Load variation of roof key block with time

3 厚沙土层的载荷传递因子确定

3.1 载荷传递因子的提出

通常，顶板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。然而，实测发现周期来压期间厚沙土层下浅埋煤层工作面地表最大下沉速度点滞后采场约 30 m，从顶板垮落到地表塌陷经历了 14 h，存在载荷传递效应，实验也发现了卸荷现象。为此，提出载荷传递因子 K_G（≤1），表示为

$$K_G = K_r K_t \quad , \tag{1}$$

式中 K_r 为岩性因子；K_t 为时间因子。

3.2 载荷传递的岩性因子

周期来压阶段，顶板关键块的载荷由关键层岩块重量 P_G 和载荷层传递的重量 P_Z 组成（图 6）。考虑到载荷传递效应，载荷层作用于关键块的载荷为

$$P_Z = K_G h_1 l \rho_1 g \quad , \tag{2}$$

式中 K_G（≤1）为载荷传递系数；h_1 为载荷层厚度；l 为关键块长度；$\rho_1 g$ 为载荷层平均容重。

对于开挖卸荷引起的土压力，可以按照太沙基公式计算[8]，$K_t = 1$ 时老顶岩块的载荷为

$$P_Z = \frac{\rho_1 g l^2}{2\lambda \tan\varphi} \qquad h_1 \geq 2.5l \quad 。 \tag{3}$$

联立式（2）和（3）可得周期来压时的载荷传递岩性因子为

$$K_r = \frac{l}{2h_1\lambda\tan\varphi} = \frac{l}{2h_1(1-\sin\varphi)\tan\varphi} \quad , \tag{4}$$

式中 φ 为载荷层的内摩擦角；λ 为载荷层的侧应力系数。可见，K_r 仅与载荷层厚度、老顶关键块长度、载荷层内摩擦角有关。

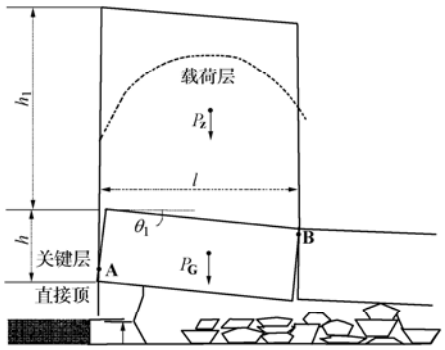

图 6 周期来压顶板载荷计算示意图

Fig. 6 Roof load calculation in periodic loading

设载荷层随关键块运动的跨度与厚度之比 $K_0 = l/h_1$，称为载荷层跨厚比，则载荷传递因子随载荷层内摩擦角的关系如图 7 所示。可见，当载荷层的内摩擦角达到 20°以上时，$K_r \approx 2l/h_1$。一般情况下，岩性因子为载荷层跨厚比的 2 倍左右。

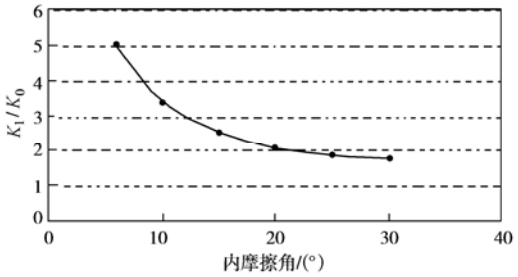

图 7 载荷传递的岩性因子随内摩擦角的变化规律

Fig. 7 Rock factor of load transmitting vs. angle of internal friction

3.3 卸荷拱的高度

根据式（3）可以看出，当载荷层厚度较大时，关键块上载荷的大小只与载荷层的性质、关键块的长度有关，与载荷层的厚度无关。即厚载荷层具有“拱”效应，这也说明了实验中出现“卸荷拱”的机理。

为了确定“拱”的高度，建立了修正的普氏拱力学模型，如图 8 所示。b 为卸荷拱的顶点，取 o 点为坐标原点，并假设卸荷拱是处于内外压力作用下，内外压力差的水平分力为 ξp，竖直分力为 ηp，p 为静止土压力强度，ξ、η 为水平压力差系数和竖直压力差系数，卸荷拱可视为是在均匀压力 ηp 和 ξp 的压力场中。图中 x、y 分别为计算点 n 的横坐标和纵坐标，h 为卸荷拱的高度，l 为卸荷拱下方关键块长度，N 为拱脚处所受的轴力，T、V 为 N 的水平和垂直分量。

在 bn 弧段上，拱顶 b 点只作用有水平轴力 T，考虑到 B 关键块上弧形岩柱运动后的侧压力很小，可以

忽略不计，则由 $\sum M_n = 0$，有 $T \cdot y = 0.5\eta p x^2$，得拱形为抛物线方程：

$$y = \frac{\eta p}{2T} x^2 \quad 。 \tag{5}$$

a 点极限平衡时，

$$T = \frac{\eta p l^2}{8h}，V = \frac{\eta p l}{2} \quad 。 \tag{6}$$

在 a 点设砂土层的内摩擦角为 φ，则 $T = V\mathrm{tg}\varphi$，可得拱高 $h = 0.25 l \cot\varphi$。考虑到实际载荷的非均匀性，引入修正系数 λ^*，则有拱高：

$$h = 0.25\lambda^* l \cot\varphi \quad 。 \tag{7}$$

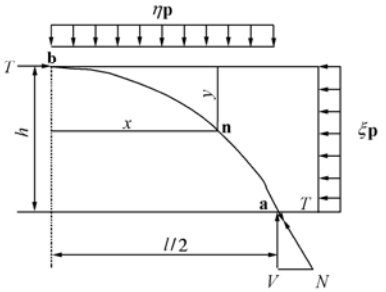

图 8 卸荷拱计算简图

Fig. 8 Calculation model of the unloading arch

联立式（5）、（6）和（7）可得修正的平衡方程为

$$y = \frac{\lambda^*}{l \tan\varphi} x^2 \quad 。$$

沙土层在关键块上传递的重量，可以通过计算拱内的载荷层重量来确定。通过积分求得卸荷拱的面积 $A = \lambda^* l^2 / 6\tan\varphi$，则作用在关键块体上的载荷为

$$P_Z = \frac{\rho_1 g \lambda^* l^2}{6\tan\varphi} \quad 。 \tag{8}$$

联立太沙基原理得出的公式（3），确定修正系数 $\lambda^* = 3/\lambda$，可以得出“卸荷拱”的高度为

$$h = \frac{3l}{4\lambda\tan\varphi} = \frac{3l}{4\tan\varphi(1-\sin\varphi)} \quad 。 \tag{9}$$

可见，卸荷拱的高度与载荷层厚度无关，与关键块长度成正比，与内摩擦角成反比。

由于载荷层的内摩擦角一般在 10º~30º之间，如图 9 所示，卸荷拱的高度为

$$h = (5 \sim 2.5)l$$

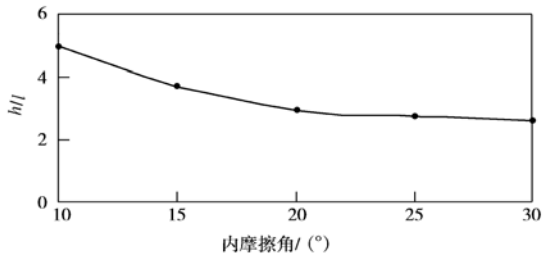

图 9 卸荷拱高度与内摩擦角的关系

Fig. 9 Height of unloading arch vs. angle of internal friction

“卸荷拱”高度与式（3）中的载荷层厚度大于 2.5l 的条件是一致的。可以按照“卸荷拱”高度判断是否存在载荷传递效应，按照“卸荷拱”载荷确定关键块在正常推进时的载荷。

3.4　载荷传递的时间因子

载荷传递的时间因子 K_t 主要反映载荷层破坏的结构将随时间而变化这一特性。由式（1）和（2）可得载荷传递时间因子的计算公式：

$$K_t = \frac{P_Z}{K_r h_1 l \rho_1 g} \tag{10}$$

根据式（6）有 $P_Z = K_r h_1 l \rho_1 g$，则 $K_{t0} = 1$；当 $P_Z = h_1 l \rho_1 g$ 时，时间因子达到最大值 $K_{t\max} = 1/K_r$；若 $K_r = 0.5$，$P_{Z\min} = 0.3 h_1 l \rho_1 g$，则有 $K_{t\min} = 0.6$。

根据上述分析，可以得出载荷传递的时间因子的变化规律，如图 10 所示，主要有：①由 A 向 B 块转化初期，由于回转运动形成载荷速降期，时间因子由 $K_{t\max} = 1/K_r$ 减小为 $K_{\min 1}$；②B 关键块相对稳定时为载荷传递的稳定期，时间因子 $K_t = K_p = 1$；③由 B 向 C 关键块转化时，出现第二次载荷速降期，$K_t = K_{\min 2}$；④在 C 关键块上载荷层的卸荷拱压实，载荷恢复上升期，最终达到 $K_{t\max} = 1/K_r$。⑤如果工作面推进过慢，将导致 B 关键块稳定期之后直接形成载荷上升期，造成工作面压力迅速上升。因此，保证正常的推进速度有利于顶板控制。

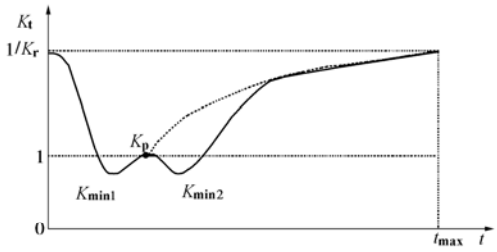

图 10 载荷传递的时间因子变化曲线

Fig. 10 Variation of time factor of load transmitting

4　结　　论

(1) 浅埋煤层顶板厚沙土层周期性“弧形岩柱”内的二次“卸荷拱”是造成 B 关键块出现载荷传递的根本原因，也是确定 B 关键块载荷的计算依据。

(2) 采动工作面顶板关键层载荷分布总体上分为 4 个区：原岩载荷区，工作面前方的载荷增高区（支承压力区），工作面附近的载荷传递区（载荷降低区），工作面后方的载荷恢复区。

(3) 顶板结构 A 关键块位于载荷增高区；B 关键块位于载荷传递区，存在卸荷拱效应，B 关键块上的载荷分布为中间大两端小；B 关键块发生切落和卸荷

后，载荷转移到 C 关键块，使 C 块的载荷升高。顶板结构中，A、C 关键块基本上处于压实状态，顶板结构的稳定性主要体现在 B 关键块的稳定性。

(4) 载荷传递因子由岩性因子和时间因子的积构成。岩性因子主要与载荷层的内摩擦角和关键块长度有关。正常推进状态下，关键块载荷为二次“卸荷拱”传递的载荷。非正常开采时，应当考虑时间因子的影响，时间因子的最小值与载荷层性质有关，时间因子的最大值是岩性因子的倒数。

(5) 保持正常的工作面推进速度，防止时间因子上升，有利于降低顶板压力。

参考文献：

[1] 黄庆享. 神府浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J]. 岩石力学与工程学报，2002, **21**(8): 1174 - 1177.

[2] 黄庆享. 浅埋煤层长壁开采顶板结构及岩层控制研究[M]. 徐州：中国矿业大学出版社, 2000. 33 - 34.

[3] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析[J]. 煤炭学报, 1994, **19**(6): 557 - 563.

[4] 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, 2000.17 - 18.

[5] 黄庆享. 浅埋煤层厚沙土层破坏规律模拟[J]. 长安大学学报, 2003, **23**(4): 25 - 28.

[6] 黄庆享. 浅埋煤层厚沙土层顶板关键块动态载荷分布规律[J]. 煤田地质与勘探, 2003, **31**(6): 22 - 25.

[7] 黄庆享, 钱鸣高, 石平五. 浅埋煤层顶板周期来压结构分析[J]. 煤炭学报, 1999, **24**(6): 581 - 585.

[8] 李世平. 岩石力学简明教程[M]. 徐州：中国矿业学院出版社, 1986. 144.

[9] 黄庆享, 张 沛, 刘文岗. 厚沙土覆盖层采动破坏形态和机理初步分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2004, **21**(专刊)：58 - 60.

茅以升科技教育基金委员会第十四届颁奖大会召开

茅以升科技教育基金委员会第十四届颁奖大会于 2005 年 5 月 28 日在唐山机车车辆厂举行。沈珠江院士等 145 人荣获茅以升土力学及岩土工程大奖等 9 个奖项的奖励。

茅以升科技教育基金于 1991 年设立，至今共奖励科技、教育领域杰出人士千余人。中国科学院院士沈珠江教授和河海大学博士生导师殷宗泽教授荣获本届土力学及岩土工程大奖；香港特别行政区政府土力工程处总工程师汪学宁、浙江大学岩土工程研究所所长陈云敏荣获土力学及岩土工程青年奖；铁道科学研究院机辆所研究员黄强等 16 人荣获铁道科技奖；柳州铁路局副总工程师谷叶民等 47 人荣获铁道工程师奖。此外，基金会还颁发了北京青年科技奖、木材科研奖及木材科技教育奖学金、工程教育学生奖、铁道教育学生奖、全国少年科技奖、家乡教育奖。

（本刊编辑部）