

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.09.029

典型浅埋煤层长壁开采覆岩采动响应与控制研究

汪北方^{1,2}, 梁 冰¹, 孙可明¹, 武占超², 孙维吉¹, 姜利国¹, 王俊光¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 为了进一步完善典型浅埋煤层长壁开采覆岩运动与控制理论, 以神东矿区 22616 工作面为工程背景, 采用试验模拟、理论分析与现场应用相结合的方法, 研究典型浅埋煤层长壁开采老顶破断特征及地表砂土层载荷传递效应, 提出采场支架合理工作阻力计算方法, 并成功应用于工程实践。研究结果表明: 浅埋采场老顶滑落失稳瞬间, 动载显现剧烈, 覆岩台阶下沉明显, 砂土层间的摩擦作用导致地表砂土层载荷存在一定的传递效应, 并非以其全部自重作用于基岩老顶。基于这一特性, 引入岩柱法修正老顶结构经典力学模型参数, 改进浅埋采场来压顶板支护力数学模型。理论计算采场初次来压控顶支架最大工作阻力为 10 506.8 kN/架, 周期来压控顶支架最大工作阻力为 7 475.26 kN/架, 均与现场观测数据较为吻合, 采场 ZY11000/24/50 型液压支架刚好满足控顶要求, 保障了工作面安全、高效开采, 为典型浅埋煤层长壁开采工作面支架工作阻力确定及选型提供了重要参考。

关 键 词: 浅埋煤层; 相似模拟试验; 老顶结构; 砂土层载荷; 支架工作阻力

中图分类号: TD 325

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2017) 09—2693—08

Research on overlying strata response and control during typical shallow coal seam longwall mining

WANG Bei-fang^{1,2}, LIANG Bing¹, SUN Ke-ming¹, WU Zhan-chao²,
SUN Wei-ji¹, JIANG Li-guo¹, WANG Jun-guang¹

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

2. School of Mines, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: This study is to improve the theory of overlying strata response and control during typical shallow coal seam longwall mining. A total of 22616 working face of Shendong coalfield was taken as an example. Similarity simulation experiment, theoretical analysis and field application were used to investigate the fracture characteristics of the overlying main roof and the load transfer effect of sandy soil stratum during the typical shallow buried coal seam longwall mining. A new method was proposed for calculating the supporting force in the period of roof weighing of the shallow stope, and it was further applied to determine the working resistance of support on site. Research results show that at the moment of the instability of the breaking main roof sliding, the dynamic loading occurs violently and the bench of overlying strata subsides obviously. The friction between sandy soil column leads to a certain transfer effect on the surface sand load but not its total self-weight acting on the bedrock. Hence, the load transfer effect of sandy soil stratum and the conditions of bedrock weight were taken into full account in this study. The rock column method was introduced to correct the classical mechanics model parameters of the main roof structure. Moreover, mathematical models of roof supporting force were improved during weighting in the shallow stope. Results show that the maximum working resistance of support is 10 506.8 kN per support during the first weighting of stope roof and the value is 7 475.26 kN per support during periodic weighting. It is proven that calculated results agree well with the field observation data. ZY11000/24/50 type hydraulic support is adopted to control the roof of stope, which perfectly meets the requirements of support force. Thus, both the safety and high-efficiency of mining in working face are well achieved. Therefore, this study provides important references for the determination and selection of the working resistance in the typical shallow coal seam of the longwall working face.

Keywords: shallow coal seam; similarity simulation experiment; main roof structure; sandy soil stratum load; support working resistance

收稿日期: 2015-09-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No.51374124); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (No.51704139)。

This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (51374124) and the Youth Science Fund Program of National Natural Science Foundation of China (51704139).

第一作者简介: 汪北方, 男, 1988 年生, 博士后, 主要从事矿山灾害防治方面的研究工作。E-mail: wang_beifang@126.com

1 引言

神东矿区赋存大量浅埋煤层, 浅埋深、薄基岩、厚松砂, 地质构造简单, 开采条件极为优越; 同时, 可采煤层众多, 煤质优良, 开采效益十分显著^[1]。但在浅埋煤层规模长壁开采过程中, 工作面顶板台阶下沉明显、地表塌陷严重、矿压显现剧烈等诸多顶板灾害问题, 已严重制约了矿井高产、高效生产^[2]。为此, 我国学者针对浅埋煤层长壁开采覆岩运动及控制展开了大量研究。黄庆享^[3]最早定义浅埋煤层概念, 运用关键层理论探讨浅埋煤层长壁开采顶板结构特征, 提出顶板支护技术。侯志杰^[4]利用固支梁和悬臂梁力学模型, 研究浅埋煤层开采老顶拉、剪破断原理确定老顶支护强度。石平五等^[5]系统总结浅埋煤层开采基岩全厚切落特点, 发现地表松散层大结构可有效改善基岩载荷状态。王锐军^[6]建立浅埋长壁大采高工作面顶板结构模型, 深入讨论采动覆岩大、小周期来压诱因。董爱菊等^[7]用试验模拟浅埋煤层上覆厚砂土层周期来压破坏过程, 详细论述覆岩动载破坏机制。杨治林^[8]根据初始后屈曲和突变理论, 分析浅埋煤层长壁开采初次来压老顶失稳条件, 补充老顶岩块台阶下沉判据。而国外文献罕见浅埋煤层长壁开采覆岩运动与控制方面的研究, 仅对采场矿压显现进行了叙述。前苏联秦巴列维奇^[9]认为, 浅埋采场均质顶板呈斜六面体破断、切落, 支架承受载荷为控顶区覆岩重量。Bodrac^[10]指出, 浅埋煤层放顶开采顶板来压迅猛, 与普通采场覆岩缓和来压显著不同。Holla 等^[11]重点分析了新南威尔士浅埋煤层开采覆岩移动、断裂及垮落特征。印度江基拉矿浅埋煤层长壁综采覆岩周期垮落步距较短, 垮落带与裂隙带交叉, 裂隙带厚且裂隙发育^[12-13]。南美一些国家因缺乏浅埋煤层长壁开采技术而较多采用房柱式采煤^[14-16]。

综上所述, 浅埋煤层开采覆岩运动规律明显有别于一般埋深煤层, 可借鉴经验相对较少, 尽管国内外学者已经开展了较为全面、细致的研究工作, 但各界对于浅埋煤层开采老顶运动机制的认识还未统一, 覆岩控制理论仍需进一步完善。为此, 本文以神东矿区 22616 工作面为工程背景, 利用相似试验模拟浅埋煤层长壁开采覆岩采动响应, 用理论分析了地表砂土层载荷, 计算了采场支架工作阻力, 为矿井安全、高效开采提供理论支持。

2 工程背景

22616 综采工作面走向长度为 1 000.94 m, 倾

向长度为 350.95 m, 埋深为 41.82~96.43 m, 采用走向长壁后退式开采, 全部垮落法管理顶板, 7LS6/LWS536 型采煤机割煤, 3×1 000 kW 型刮板输送机运煤, ZY11000/24/50 型液压支架控制顶板。主采 2⁻² 煤层结构简单, 倾角为 1~3°, 厚度为 5.3 m, 煤层上部为 3.0~26.5 m 厚基岩层, 基岩上覆为 0.00~10.24 m 强弱不等风化层, 风化层上部赋存 20~62 m 厚第四系松散层, 松散层局部伴有 0.00~7.11 m 含水砂砾石层。由于基岩顶界面占地貌形态, 尤其是小型古冲沟地貌变化大、无明显规律性的特点, 极易形成大面积薄基岩区, 并且局部基岩风化强度低, 很可能发生溃水、溃沙、溃砾等事故, 给工作面开采造成极大的安全隐患。

3 相似模拟试验

3.1 相似模拟试验设计

3.1.1 相似常数与材料选取

依据相似准则和试验要求, 确定模型几何相似常数 $C_L = 1:100$, 重度相似常数 $C_\gamma = 1:148$, 时间相似常数 $C_t = 1:10$, 位移相似常数 $C_w = 1:100$, 应力相似常数 $C_\sigma = 1:148$ 。借鉴类似开采条件工作面老顶来压步距, 结合模拟试验台尺寸确定模型走向长度为 300 cm。模型长×宽×高为 300 cm×30 cm×102 cm, 煤岩层沿水平方向分层铺设, 直接铺装至地表, 仅考虑自重, 无需外加载荷。地表砂土层厚为 54 cm, 含水砂砾石层厚为 7 cm, 基岩层厚为 22 cm, 2⁻² 煤层厚为 5 cm, 底板岩层厚为 14 cm, 如图 1 所示。

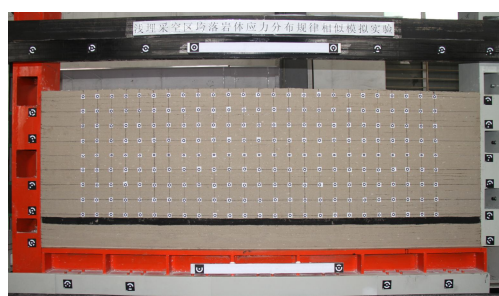


图 1 相似材料模型

Fig.1 Similar material model

$$L_M = L_H C_L \quad (1)$$

式中: L_M 为模型煤岩层厚度 (cm); L_H 为原型煤岩层厚度 (m); C_L 为几何相似常数。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_M &= \frac{L_M}{L_H} \frac{\gamma_M}{\gamma_H} \\ \sigma_H &= C_\sigma C_L C_\gamma = C_\sigma \sigma_M \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： σ_M 为模型煤岩体强度（MPa）； σ_H 为原型煤岩体强度（MPa）； γ_M 为模型煤岩体重度（kN/m³）； γ_H 为原型煤岩体重度（kN/m³）。

根据式（1）、（2）换算出模型煤岩层厚度和强度，选定河砂、石英砂和云母骨料，胶结物为碳酸钙和石膏进行配比试验，选取合理配比，如表1所示。

表1 原岩和模型材料力学参数

Table 1 Mechanical properties of protolith and model materials

岩性	模型厚度 / cm	岩石强度/MPa		原型视密度 / (g/cm ³)	模型强度/MPa		模型视密度 / (g/cm ³)	配比号
		抗压 σ_c	抗拉 σ_t		抗压 σ_c	抗拉 σ_t		
风积沙	8			1.28			0.86	
黄黏土	46	26	1.5	1.62	0.18	0.010	1.09	773
砂砾石	7	54	3.7	1.95	0.36	0.025	1.32	555
细粒砂岩	8	63	3.6	2.39	0.43	0.024	1.61	637
中粒砂岩	4	48	2.7	2.18	0.32	0.018	1.47	755
细粒	6	63	3.6	2.39	0.43	0.024	1.61	637
粉砂岩	2	66	3.3	2.45	0.45	0.022	1.66	737
泥岩	2	43	2.5	2.45	0.29	0.017	1.66	755
2煤	5	34	0.9	1.30	0.23	0.006	0.88	873
粉砂岩	8	66	3.3	2.45	0.45	0.022	1.66	737
砂质泥岩	6	51	3.1	2.43	0.34	0.021	1.64	737

3.1.2 观测方案确定

鉴于浅埋煤层开采覆岩不同层位运动差异，在风干模型正面绘制水平线和铅垂线，横、竖线间距为10 cm，两线交点设定非编码点，重点观测基岩老顶非编码点位移，如图1所示；考虑采动过程中地表砂土层载荷变化，在模型中部地表砂土层与基岩层间埋设压力盒，实时监测地表砂土层应力。

3.2 试验现象分析

3.2.1 浅埋煤层开采覆岩运动特征

模型两端各留30 cm煤柱，按照时间相似常数从左向右循环开采，总长度为240 cm，相当于原型长度为240 m。为方便理解，以下均以原型数值描述模拟开采现象。

当工作面推进36 m时，直接顶初次垮落，覆岩出现水平裂隙，如图2所示，工作面持续推进，覆岩悬顶面积逐渐增大，直接顶随采随垮，离层向上发展，基岩老顶不断下沉直至断裂形成“三铰拱”结构。工作面推进48 m，基岩老顶悬顶跨度达到破断极限，发生初次垮落，动载现象明显，破断基岩老顶沿煤壁切落，发生台阶下沉，形成“单斜岩块”结构，裂隙向两侧煤壁斜上方延伸，覆岩整体呈“拱”形垮落，“断裂拱”前、后拱脚分别落在工作面前方

煤体和开切眼后方煤体上，如图3所示。



图2 直接顶初次垮落

Fig.2 First caving of immediate roof

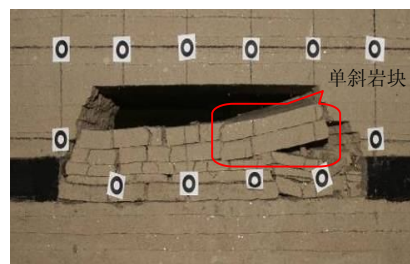


图3 老顶初次垮落

Fig.3 First caving of main roof

当工作面推进55 m时，覆岩裂隙迅速向上发展，离层较为发育，基岩老顶第1次周期垮落，步距为7 m，形成“短砌体梁”或“台阶岩梁”结构，如图4所示。“断裂拱”后拱脚基本不动，前拱脚随工作面推进不断前移，覆岩“拱”形垮落范围逐渐扩大。在向上、向前扩展过程中，“断裂拱”每前移12~19 m，基岩老顶都将发生周期垮落。直至工作面推进115 m，基岩老顶发生第5次周期垮落，裂隙直达地表，“断裂拱”结构破坏，依附基岩上的地表砂土层同步下沉，产生走向30 m范围地表移动盆地，如图5所示。当工作面推进至127 m时，基岩老顶第7次周期垮落，裂隙带再次贯通地表，基岩层全厚切落，地表砂土层整体下沉，来压剧烈、步距较小，地表移动盆地走向范围扩大近10 m，如图6所示。

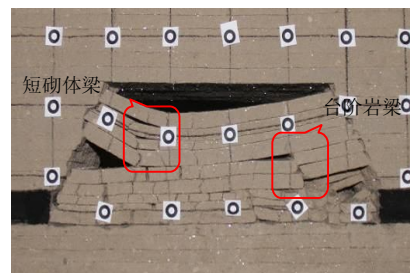


图4 老顶周期垮落

Fig.4 Periodic caving of main roof

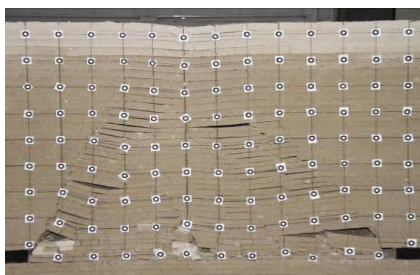


图5 裂隙初次贯通地表

Fig.5 First connecting to surface of crack

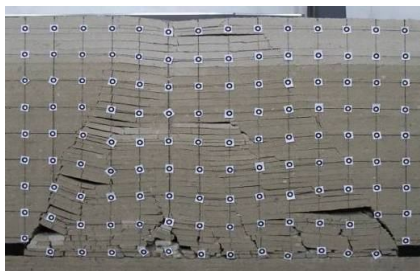


图6 裂隙周期贯通地表

Fig.6 Periodic connecting to surface of crack

模拟开采完毕,覆岩仅存在裂隙带和垮落带。裂隙带下宽上窄,近似正梯形分布,垂向高度为 57 m;垮落带两边稍凸、中间微凹,大致呈枕形分布,开切眼处垮落角为 66° ,停采线处垮落角为 56° ,垂向高度为 30 m,最终形成走向长度为 160 m 地表盆地,如图 7 所示。

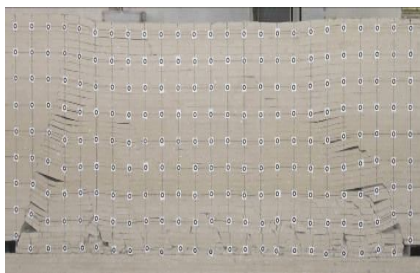


图7 覆岩“两带”结构

Fig.7 Structure of 'two zone' in overlying strata

3.2.2 浅埋煤层开采基岩老顶位移变化

利用 XJTUDP 三维光学摄影测量系统观测模拟采动基岩老顶非编码点位移变化曲线,如图 8 所示,工作面推进 36 m,直接顶垮落,老顶产生少量离层,下沉位移不明显;工作面推进 48 m,老顶初次来压,由于垮落岩体碎胀特性,垮落老顶最大下沉位移为 2.35 m;工作面推进 55 m,老顶周期来压,垮落范围增大,最大下沉位移为 2.47 m;工作面推进 115 m,覆岩整体切落,裂隙直达地表,垮落岩体被压实,老顶最大下沉位移为 2.57 m;工作面推进为 127 m,覆岩再次全厚切落,裂隙周期贯通地表,老顶最大下沉位移基本不变;直至开采完毕,

老顶最大下沉位移仍为 2.57 m。整个开采过程,来压老顶瞬间垮落,下沉位移明显,台阶下沉特征显著。

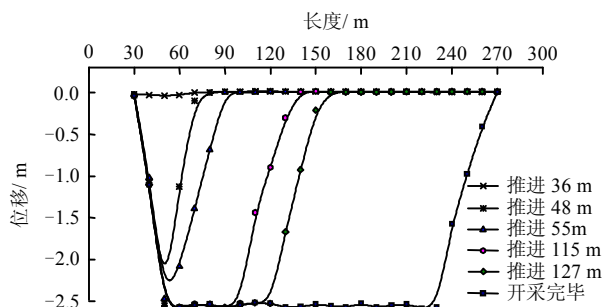


图8 采动基岩老顶位移变化曲线

Fig.8 Variation curves of main roof displacement during mining

3.2.3 浅埋煤层开采地表砂土层载荷分布

为了直观反映采动地表砂土层载荷集中程度,通常用载荷系数表示,即压力盒监测数值经应力相似常数转换为原型应力后与原岩应力 $\gamma_s H$ 的比。模拟开采地表砂土层载荷系数分布如图 9 所示,地表砂土层载荷系数随工作面推移呈动态分布。工作面前方超前支承压力区砂土层应力由原岩应力迅速增至 $1.56\gamma_s H$,载荷系数大于 1.00;而工作面附近地表砂土层载荷系数骤然降至 0.81;工作面后方采空区地表砂土层载荷系数逐渐趋于 1。由此可以看出,浅埋煤层工作面上覆地表砂土层并非以其全部重量作用于基岩老顶,而是存在一定的载荷传递效应。

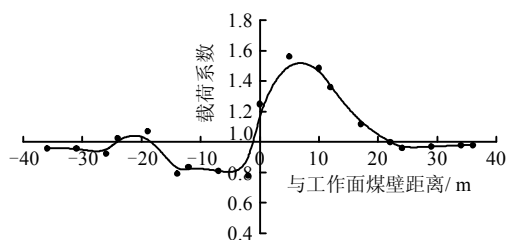


图9 采动地表砂土层载荷系数分布

Fig.9 Load coefficient distribution of surface and soil during mining

综上所述,22616 工作面埋深浅、基岩薄、地表砂土层厚度大,基载比明显小于 1;顶板呈现单一关键层结构特征,基岩全厚切落,发生台阶下沉,直接波及地表,来压步距小,动载现象明显。且覆岩仅存在“两带”结构,所以,22616 工作面为典型浅埋煤层工作面。

4 典型浅埋煤层长壁开采覆控制研究

4.1 老顶结构力学分析

4.1.1 基岩老顶初次垮落

根据相似模拟试验现象,基岩老顶初次破断具

有不对称性, 靠近工作面侧岩块长度较大, 岩块触矸前形成非对称“三铰拱”结构, 简化为动态平衡结构力学模型如图 10 所示。图中 P_1 、 P_2 为砂土层载荷; G_1 、 G_2 为块体自重; θ_1 、 θ_2 为块体转角; Q_A 、 Q_B 为块体铰上剪力; l_1 、 l_2 为块体长度; a 为接触面高度; T 为块体水平力。破断老顶岩块触矸后存在两种运动状态: 一种刚触矸无回转运动; 另一种触矸后逆向回转运动。而岩块逆向回转运动则是触矸后最危险状态, 该状态下的“单斜岩块”结构力学模型如图 11 所示。

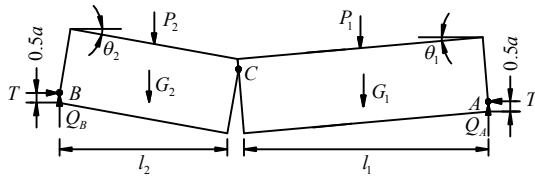


图 10 非对称“三铰拱”结构力学模型
Fig.10 Mechanical model of asymmetric ‘three hinge arch’ structure

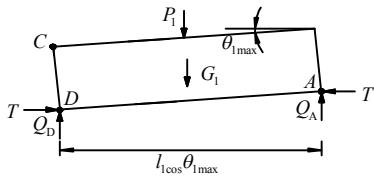


图 11 “单斜岩块”结构力学模型
Fig.11 Mechanical model of ‘monoclinic rock’ structure

4.1.2 基岩老顶周期垮落

基岩老顶周期破断基本为拉破坏, 而断裂岩块“短砌体梁”或“台阶岩梁”结构铰接运动则是以剪破坏为主。老顶块度接近于 1 的破断岩块彼此铰接构成“短砌体梁”结构, 其动态平衡结构力学模型如图 12 所示。图中 R_2 为块体支承反力; W_1 、 W_2 为块体下沉量。基岩老顶架后切落失稳形成“台阶岩梁”结构, 破断岩块相互挤压形成动态平衡结构力学模型如图 13 所示。图中 b 为块体两端下沉差。

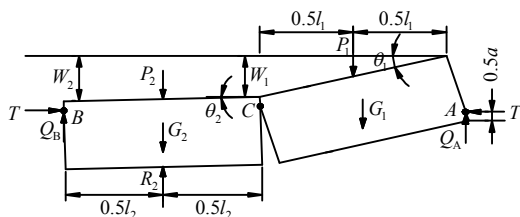


图 12 “短砌体梁”结构力学模型
Fig.12 Mechanical model of ‘short voussoir beam’ structure

模拟开采周期来压期间, 基岩老顶“短砌体梁”

和“台阶岩梁”结构均难以维持自身平衡状态而发生回转或滑落失稳。根据文献[17], 22616 工作面地表砂土层厚为 54 m, 破断老顶块度为 1.38, 基岩老顶“短砌体梁”和“台阶岩梁”结构极易发生滑落失稳, 这是浅埋煤层开采工作面周期来压强烈和台阶下沉明显的根本原因, 也是顶板溃水、溃沙灾害的直接诱因。

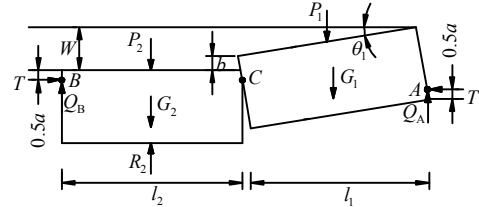


图 13 “台阶岩梁”结构力学模型
Fig.13 Mechanical model of ‘bench rock beam’ structure

4.2 地表砂土层载荷确定

根据浅埋采场老顶结构经典力学模型可知, 覆岩稳定性主要取决于破断老顶块度、垮落角以及地表砂土层载荷。一般情况下, 老顶块度和垮落角已知, 地表砂土层载荷通常采用其自重代替, 而试验结果表明, 砂土层载荷具有一定的传递效应, 并非简单的等于其自重, 所以地表砂土层载荷计算结果误差较大, 严重影响采场控顶效果。因此, 确定地表砂土层载荷对于浅埋采场顶板控制具有重要的意义。研究表明^[18], 普氏理论计算砂土层载荷最大, 岩柱法居中, 泰沙基法最小。当长壁开采工作面覆岩垮落跨度过大时, 普氏理论便不再适用。所以就其余两种算法, 保守选取岩柱法计算砂土层载荷。同时, 地表砂土层厚度为 54 m、内摩擦角为 27° 的赋存条件完全满足岩柱法适用要求。

浅埋煤层开采老顶形成“短砌体梁”和“台阶岩梁”结构, 砂土层受拉力作用, 从工作面煤壁正上方地表向采空区产生斜向下贯通裂缝, 这种周期性产生的贯通裂缝切分地表砂土层成柱状体, 宽度近似老顶垮落步距。岩柱法即将地表砂土层克服摩擦阻力后的自重近似为地表砂土层载荷。

地表砂土层总摩擦力 F 为

$$F = \gamma_s H^2 \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2}) \tan \varphi_s \quad (3)$$

地表砂土层自重为

$$N = \gamma_s H \left[l + 2m \tan(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2}) \right] \quad (4)$$

式中: γ_s 为砂土层重度 (kN/m^3); H 为砂土层厚度 (m); m 为工作面采高 (m); φ_s 为砂土层内摩擦角 ($^\circ$)。

最终, 地表砂土层载荷为

$$P = \frac{N - F}{l + 2m \tan(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2})} = \gamma_s H \left[1 - \frac{H \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2}) \tan \varphi_s}{l + 2m \tan(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2})} \right] \quad (5)$$

4.3 采场顶板支护力计算

浅埋煤层开采老顶来压期间, 控制顶板滑落失稳所需的支护力为

$$T \tan \varphi_j + R_m \geq (P + G) \quad (6)$$

式中: T 为铰接处水平力 (kPa); R_m 为顶板单位面积支护力 (kPa); G 为基岩层单位面积自重 (kPa)。

在充分考虑地表砂土层载荷传递效应的前提下, 通过引入岩柱法修正老顶结构经典力学模型中的参数 P_1 , 最终改进浅埋采场来压控顶支护力数学模型。

4.3.1 老顶初次来压

(1) 控制老顶“三铰拱”结构滑落失稳的支护力为

$$R_1 \geq \frac{1}{K(1+K)} \left(\frac{2K^2 + K + 1}{2} - \frac{2K \tan \varphi_j}{i - \sin \theta_1} \right) \cdot \left\{ G + \gamma_s H \left[1 - \frac{H \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2}) \tan \varphi_s}{l + 2m \tan(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2})} \right] \right\} \quad (7)$$

式中: K 为影响系数, $K = l_1 / l_2 = P_1 / P_2$; φ_j 为岩块间摩擦角 ($^\circ$); i 为破断岩块块度 ($i = h / l_1$); θ_1 为基岩块初始回转角 ($^\circ$)。

(2) 控制老顶“单斜”结构滑落失稳的支护力为

$$R_2 \geq \left[1 - \frac{(1 + 2i \tan \theta_{1\max})(1 + \tan \varphi' \tan \varphi_j)}{2(1 - \tan \varphi' \tan \theta_{1\max})} \right] \cdot \left\{ G + \gamma_s H \left[1 - \frac{H \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2}) \tan \varphi_s}{l + 2m \tan(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2})} \right] \right\} \quad (8)$$

式中: $\theta_{1\max}$ 为基岩块最大回转角; φ' 为岩块与矸石间摩擦角 ($^\circ$)。

4.3.2 老顶周期来压

(1) 控制老顶“短砌体梁”结构滑落失稳的支护力为

$$R_3 \geq \frac{4i(1 - 2 \sin \theta_{1\max} \tan \varphi_j) - 3 \sin \theta_{1\max} - 4 \cos \theta_{1\max} \tan \varphi_j}{4i + 2 \sin \theta_{1\max} (\cos \theta_{1\max} - 2)} \cdot \left\{ G + \gamma_s H \left[1 - \frac{H \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2}) \tan \varphi_s}{l + 2m \tan(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2})} \right] \right\} \quad (9)$$

(2) 控制老顶“台阶岩梁”结构滑落失稳的支护力为

$$R_4 \geq \frac{i - 2 \sin \theta_{1\max} + \sin \theta_1 - \tan \varphi_j}{i - 2 \sin \theta_{1\max} + \sin \theta_1} \cdot \left\{ G + \gamma_s H \left[1 - \frac{H \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2}) \tan \varphi_s}{l + 2m \tan(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2})} \right] \right\} \quad (10)$$

5 工程应用

浅埋煤层长壁开采矿压显现剧烈, 覆岩全厚度切落, 确定支架合理工作阻力对控制采场稳定具有重要意义。本节以相似模拟试验原型 22616 工作面为例, 已知地表砂土层厚 $H = 54$ m, 砂砾层厚 $h_l = 7$ m, 平均重度 $\gamma_s = 16.1$ kN/m³, 内摩擦角 $\varphi_s = 27^\circ$, 基岩老顶厚 $h_j = 18$ m, 重度 $\gamma_j = 23.4$ kN/m³, 老顶初次垮落步距 $L = 48$ m, 周期垮落步距 $l_1 = 13$ m, 基岩块初始回转角 $\theta_1 = 3^\circ$, 岩块间摩擦系数 $\tan \varphi_j = 0.55$, 直接顶厚 $\sum h = 4$ m, 重度 $\gamma_z = 24.5$ kN/m³, 碎胀系数 $K_p = 1.3$, 岩块与矸石间摩擦系数 $\tan \varphi' = 0.6$, 采高 $m = 5$ m, 液压支架宽 $b = 1.75$ m, 控顶距 $l_k = 5.4$ m, 支护效率 $u = 0.9$, 计算采场来压控顶所需支架工作阻力。

5.1 采场支架工作阻力计算

5.1.1 老顶初次来压

(1) 老顶“三铰拱”结构稳定所需支护力计算

影响系数 $K = \frac{l_1}{l_2} = 1.4$, 基岩块长度 $l = \frac{K}{1+K} L =$

28 m, 基岩块块度 $i = \frac{h}{L} = 0.64$, 则有

$$R_1 \geq \frac{1}{K(1+K)} \left(\frac{2K^2 + K + 1}{2} - \frac{2K \tan \varphi_j}{i - \sin \theta_1} \right) b \cdot \left\{ \gamma_s l (H + h_j) \left[1 - \frac{(H + h_j) \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2}) \tan \varphi_s}{L + 2m \tan(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2})} \right] + 1 \gamma_j l h_j + \gamma_z l_k \sum h \right\} = 9\,456.12 \text{ kN/架}$$

(2) 老顶“单斜岩块”结构稳定所需支护力计算

$$\sin \theta_{1\max} = \frac{m - (k_p - 1) \sum h}{L} = 0.14, \quad \theta_{1\max} = 8^\circ,$$

则有

$$R_2 \geq \left[1 - \frac{(1 + 2i \tan \theta_{1\max})(1 + \tan \varphi' \tan \varphi_j)}{2(1 - \tan \varphi' \tan \theta_{1\max})} \right] b \cdot \left\{ \gamma_s l (H + h_l) \left[1 - \frac{(H + h_l) \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2}) \tan \varphi_s}{L + 2m \tan(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2})} \right] + 1\gamma_j l h_j + \gamma_z l_k \sum h \right\} = 8\,274.11 \text{ kN/架}$$

5.1.2 老顶周期来压

(1) 老顶“短砌体梁”结构稳定所需支护力计算

$$\text{基岩块块度 } i = \frac{h}{l_1} = 1.38; \quad \sin \theta_{1\max} =$$

$$\frac{m - (K_p - 1) \sum h}{l} = 0.29, \quad \theta_{1\max} = 16.9^\circ, \quad \text{则有}$$

$$R_3 \geq \frac{4i(1 - 2 \sin \theta_{1\max} \tan \varphi_j) - 3 \sin \theta_{1\max} - 4 \cos \theta_{1\max} \tan \varphi_j}{4i + 2 \sin \theta_{1\max} (\cos \theta_{1\max} - 2)} b \cdot \left\{ \gamma_s l_1 (H + h_l) \left[1 - \frac{(H + h_l) \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2}) \tan \varphi_s}{l_1 + 2m \tan(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2})} \right] + 1\gamma_j l_1 h_j + \gamma_z l_k \sum h \right\} = 3\,075.53 \text{ kN/架}$$

(2) 老顶“台阶岩梁”结构稳定所需支护力计算

$$R_4 \geq \frac{i - 2 \sin \theta_{1\max} + \sin \theta_1 - \tan \varphi_j}{i - 2 \sin \theta_{1\max} + \sin \theta_1} b \cdot$$

$$\left\{ \gamma_s l_1 (H + h_l) \left[1 - \frac{(H + h_l) \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2}) \tan \varphi_s}{l_1 + 2m \tan(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2})} \right] + 1\gamma_j l_1 h_j + \gamma_z l_k \sum h \right\} = 6\,727.73 \text{ kN/架}$$

采场支架工作阻力指支架提供顶板有效支护力, 在考虑支架支护效率 u 的前提下, 为保证采场安全, 取顶板来压维持老顶稳定所需最大支护力计算支架工作阻力:

$$R_G = R_m / u = 10\,506.8 \text{ kN/架}$$

5.2 采场支架工作阻力现场观测

22616 工作面推进至 126 m 过程中采场测站支架工作阻力观测结果如图 14 所示, 工作面初次来压步距为 46.5 m, 支架工作阻力为 10 412 kN/架, 工作面周期来压平均步距为 15 m, 支架工作阻力为 7 238 kN/架。

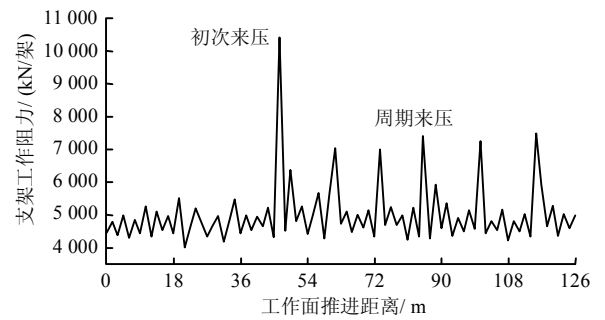


图 14 工作面支架工作阻力变化曲线

Fig.14 Variation of support resistance in the working face

现场来压观测数据与模拟试验和数学分析结果较为吻合, 选用 ZY11000/24/50 型液压支架额定工作阻力为 11 000 kN/架刚好满足顶板支护力要求, 整个回采期间并未出现顶板事故, 保证了工作面安全、高效开采。

6 结 论

(1) 22616 工作面覆岩基载比小于 1, 模拟开采初次来压步距为 48 m, 周期来压步距为 13 m, 基岩老顶台阶下沉, 动载现象明显, 覆岩仅存在“两带”结构, 属于典型浅埋煤层工作面。

(2) 试验与分析结果一致表明, 砂土柱间的摩擦作用导致地表砂土层载荷具有一定的载荷传递效应, 并非以其全部重量作用于基岩老顶。

(3) 结合地表砂土层载荷传递效应及基岩自重条件, 利用岩柱法修正浅埋采场老顶结构经典力学模型参数, 改进浅埋采场来压顶板支护力数学模型。

(4) 根据改进模型计算采场来压控顶所需支架最大工作阻力为 10 506.8 kN/架, 与现场观测数据较为吻合, 验证了模型的准确性, 为典型浅埋煤层长壁开采工作面支架选型提供了参考。

参考文献

- [1] 宣以琼. 薄基岩浅埋煤层覆岩破坏移动演化规律研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 512—516.
XUAN Yi-qiong. Research on movement and evolution law of breaking of overlying strata in shallow coal seam with a thin bedrock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 512—516.
- [2] 杨敬虎, 孙少龙, 孔德中. 高强度开采工作面矿压显现的面长和推进速度效应[J]. 岩土力学, 2015, 39(增刊 2): 333—339.
YANG Jing-hu, SUN Shao-long, KONG De-zhong. Effect of working face length and advancing speed on strata behaviors in high-intensity mining[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 39(Supp.2): 333—339.
- [3] 黄庆享. 浅埋煤层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.
HUANG Qing-xiang. Ground pressure behavior and definition of shallow seam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(8): 1174—1177.
- [4] 侯忠杰. 厚砂下煤层覆岩破坏机制探讨[J]. 矿山压力与顶板管理, 1995, (1): 37—40.
HOU Zhong-jie. Discussion on mechanism of overlying strata under thick sandy layer[J]. **Ground Pressure and Strata Control**, 1995, (1): 37—40.
- [5] 石平五, 侯忠杰. 浅埋煤层矿压显现与岩层控制规律研究[R]. 西安: 西安矿业学院, 1996.
SHI Ping-wu, HOU Zhong-jie. Study on strata pressure behavior and control of shallow coal seam[R]. Xi'an: Xi'an Mining College, 1996.
- [6] 王锐军. 浅埋煤层大采高综采工作面覆岩结构与来压机制研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
WANG Rui-jun. Shallow seam and large mining height fully-mechanized working face overburden structure and pressure mechanism[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [7] 董爱菊, 张沛, 黄庆享, 等. 浅埋煤层周期来压动载机制研究[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2006, 25(2): 39—43.
DONG Ai-ju, ZHANG Pei, HUANG Qiang-xiang, et al. Study of dynamic load mechanism during periodic weighting in shallow buried coal seam[J]. **Journal of Yanan University(Natural Science Edition)**, 2006, 25(2): 39—43.
- [8] 杨治林. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层灾害控制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 459—463.
YANG Zhi-lin. Study of controlling catastrophe for roof strata in shallow seam longwall mining[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.1): 459—463.
- [9] 秦巴列维奇 M. 矿井支护[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1957.
Цимбарович M. Mine support[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1957.
- [10] BODRAC B B. Rock pressure features of Moscow suburb coal-field[J]. **Coal**, 1998, (2): 12—17.
- [11] HOLLA L, BUIZEN M. Strata movement due to shallow longwall mining and the effect to ground permeability[J]. **Aus IMM Bulletin and Proceedings**, 1990, 295(1): 11—18.
- [12] SINGH R P, YADAV R N. Subsidence due to coal mining in India[C]//Proceedings of the 1995 5th International Symposium on land Subsidence. [S. l.]: IAHS Publication, 1995.
- [13] RAJENDRA SINGLY, SINGH T N, BHARAF B DHAR. Coal pillar Loading in shallow mining conditions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1996, 33(8): 757—768.
- [14] BILL REID. Longwall mining in South America[J]. **Elsevier Science**, 1995, 32(3): 140—148.
- [15] SWART A H, HANDLEY M F. The design of stable stope spans for shallow mining operations[J]. **Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy**, 2005, 105(4): 275—286.
- [16] NAPIER J A L, MALAN D F. The computational analysis of shallow depth tabular mining problems[J]. **Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy**, 2007, 107(11): 725—742.
- [17] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu. Mine pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.
- [18] 张镇. 薄基岩浅埋采场上覆岩层运动规律研究与应用[D]. 青岛: 山东科技大学, 2007.
ZHANG Zhen. Study and application on overburden moving law of shallow stope in thin bedrock[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2007.