

徐亚军, 王国法, 任怀伟. 液压支架与围岩刚度耦合理论与应用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2528–2533. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.7023

Xu Yajun, Wang Guofa, Ren Huaiwei. Theory of the coupling relationship between surrounding rocks and powered support [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2528–2533. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.7023

液压支架与围岩刚度耦合理论与应用

徐亚军^{1,2}, 王国法^{1,2}, 任怀伟^{1,2}

(1. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院 开采设计研究分院, 北京 100013)

摘 要: 从刚度耦合方面对液压支架与采场围岩耦合关系进行了研究, 给出了液压支架刚度定义并进行了增阻刚度测试, 分析了液压支架与煤壁及顶底板刚度耦合关系, 建立了相应的耦合方程, 修正了现有液压支架支护强度计算公式, 将液压支架与采场围岩的耦合关系由目前的定性分析深入到定量研究。结果表明, 液压支架增阻刚度主要与立柱刚度有关, 液压支架应当与采场围岩条件协调匹配, 传统的液压支架支护强度计算是基于煤壁和支架都为刚体的假定前提条件下得出的结论, 没有考虑支架刚度、顶板岩性和煤层硬度的耦合作用与影响, 计算结果偏低。实践表明, 刚度耦合理论能够很好地揭示液压支架与采场围岩的相互作用关系, 可以对液压支架设计提供指导。

关键词: 液压支架; 围岩; 刚度耦合; 协调支护

中图分类号: TD355.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2015)11-2528-06

Theory of coupling relationship between surrounding rocks and powered support

XU Ya-jun^{1,2}, WANG Guo-fa^{1,2}, REN Huai-wei^{1,2}

(1. Coal Mining Technology Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. Mining Design Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: The paper studied the coupling stiffness relationship between the powered support and the surrounding rock field, defined the stiffness and tested the vertical stiffness of the hydraulic powered support, analyzed the coupling stiffness relationship among the hydraulic powered support, rib, roof and floor. Accordingly, we established corresponding coupled equations and revised the existing calculation formula of support load of powered support, the mining coupling relationship study was progressed from qualitative analysis to quantitative analysis. The result indicates that the vertical stiffness of the powered support between the set pressure to yield pressure is mainly decided by the stiffness of leg, which means that the support load of the powered support should be well matched with surrounding rock field characteristics such as coal stiffness and mining height and roof strata stiffness and et al. and the calculation result of supporting density is at a relatively low level by adopting traditional calculation method, because the calculation method is based on the assumption that the coal wall and the powered support are rigid body, without considering the coupling effect and influence among the support stiffness of the property of roof strata and coal seam hardness. Application results show the coupling theory, which well revealed the relationship between the powered support and surrounding rock field, can provide a guidance for the design of the powered supports.

Key words: powered support; surrounding rocks; coupling stiffness; coordinated support

收稿日期: 2015-06-26 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2014CB046302); 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2012AA06A407)

作者简介: 徐亚军(1971—), 男, 安徽枞阳人, 研究员, 博士。Tel: 010-84262987, E-mail: bjxuyz@126.com。通讯作者: 任怀伟(1980—), 男, 河北廊坊人, 副研究员, 博士后。E-mail: renhuaiwei@tdkcsj.com

液压支架作为综采工作面重要支护设备,任务之一就是研究其与工作面顶板、底板、煤壁和采空区冒落矸石所构成的采场围岩系统间耦合关系。液压支架与采场围岩系统的耦合关系非常复杂,是一个相互作用、相互影响、相互依存、相互制约的系统。针对液压支架与采场围岩的耦合关系,国内外学者进行了广泛研究。文献[1]首次建立了液压支架与围岩耦合关系模型,分别将基本顶、直接顶、液压支架和底板简化为可滑移的刚体、损伤破裂体、弹性滑移体和刚体(或弹性体),建立了综放采场围岩与液压支架整体力学模型。文献[2]研究了支架与围岩间的耦合作用,揭示了综放工作面支架载荷与顶板下沉量之间的耦合关系。文献[3]研究了液压支架与采场围岩系统的刚度关系,认为在基本顶、直接顶、液压支架和底板组成的系统中,系统的刚度主要由直接顶、支架和底板的刚度决定。文献[4]根据液压支架与采场围岩耦合作用形式的不同,将其分为刚度耦合、强度耦合和稳定性耦合3种耦合关系。笔者在文献[5]中将液压支架等效为弹性基础,得出了顶梁载荷和底座比压近似指数函数分布,该结果与实测数据基本一致,初步验证了支架与围岩耦合模型的合理性。

目前液压支架与采场围岩的耦合作用研究尚处于起步阶段,没有建立相对完善的耦合方程,理论缺乏深度。限于篇幅,本文主要对液压支架与采场围岩刚度耦合问题的本质与作用机理进行了研究,选取有代表性的特征参数,建立了液压支架与采场围岩刚度耦合方程,修正了现有支护强度计算公式,为液压支架与围岩耦合理论的深入开展创造条件。

1 液压支架刚度耦合定义

1.1 液压支架刚度定义及测试结果

液压支架具有增阻升压、恒阻承载、溢流卸压和刚性接触冲击的特性,与之相对应的是液压支架的垂向刚度可分为增阻刚度、恒阻刚度和冲击刚度(如没有特别说明,本文所说的刚度皆为垂向刚度)。支架恒阻时,工作阻力相对恒定,其刚度可用广义结构刚度公式 $k = \frac{F}{\delta}$ 来表示^[6],其中 F 为支架所受垂向外力(广义力); δ 为对应广义力 F 的垂向位移。广义结构刚度主要考核支架结构体抵抗变形的能力,要求支架要具备足够的强度和刚度以支承外部载荷,在支架设计中主要通过强度计算来保证。支架刚性接触冲击时,立柱没有行程,结果是支架主体结构可能会发生破坏,因此对液压支架来说,最有意义的是增阻刚度(下文若没有特别说明,则液压支架刚度特指增阻

刚度)。笔者采用 ZFY18000/28/53D 型两柱掩护式放顶煤支架测试了液压支架增阻刚度,具体结果如图 1 2 所示。图 1 中线段 a 为液压支架支护阻力与垂直位移关系曲线,线段 b 为单根立柱支护阻力与沿立柱轴向位移关系曲线。不难发现,在支架增阻时,支架支护阻力与垂直位移为线性关系。对两柱掩护式液压支架来说,两根立柱并联后在垂直方向等效刚度 $K' = 2k \sin \alpha$ (式中 k 为立柱增阻刚度; α 为立柱与水平方向夹角)。图 2 为支架增阻刚度和立柱等效刚度测试结果,其中支架刚度 K 的均值为 -332.2 MN/m ,立柱等效刚度 K' 的均值为 -327.8 MN/m , $K' = 0.99K$,两者结果十分接近。该结果说明,液压支架增阻刚度主要取决于立柱垂向等效刚度。

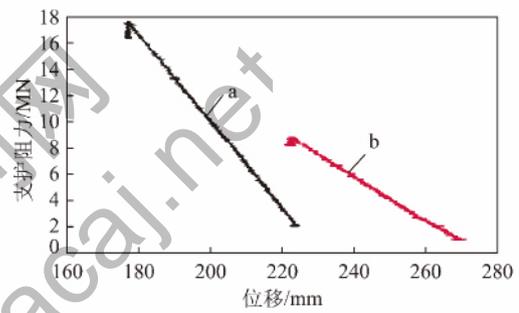


图 1 支护阻力与位移关系曲线

Fig. 1 Curve of resistance and displacement

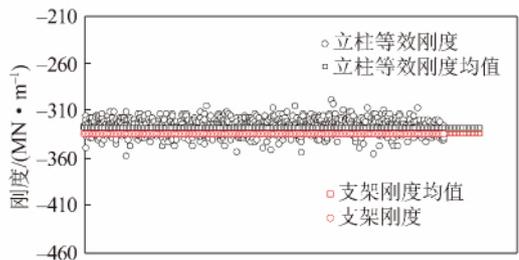


图 2 液压支架和立柱增阻刚度值

Fig. 2 Stiffness value of powered support and leg

由于液压支架增阻刚度主要取决于立柱刚度大小,因而液压支架的增阻刚度可用立柱的刚度进行估算。将立柱内部高压乳化液和立柱缸体视为不同刚度弹性元件串联,则立柱等效刚度为

$$K = \frac{k_q k_p}{k_q + k_p}$$

其中 k_q 、 k_p 分别为立柱内部高压乳化液刚度和立柱缸体刚度。由于乳化液有抗压缩能力,其刚度可用体积弹性模量来表征。由文献[7]可知,对于单伸缩立柱,其等效刚度可用下式进行估算:

$$K = \frac{2A\delta E_p}{A + 2Lk_v\delta E_p} \quad (1)$$

式中 A 为立柱液压缸内径(液柱横截面积); L 为液柱高度; δ 为立柱缸体厚度; E_p 为立柱缸体弹性模量; k_v 为高压乳化液体积压缩系数,

$$k_v = \frac{Y_m - Y_0}{L(P_m - P_0)}$$

其中 P_m 、 P_0 分别为对应于工作阻力和初撑力的液压缸内部油体压力,即安全阀开启压力和泵站压力; Y_m 、 Y_0 分别为对应于工作阻力和初撑力立柱行程。

由式(1)可知,

$$K = \frac{2A\delta}{\frac{A}{E_p} + 2Lk_v\delta}$$

由于 $E_p \gg k_v$, $\frac{A}{E_p} \rightarrow 0$, 上式可简化为

$$K = \frac{A}{Lk_v} = \frac{F_m - F_0}{Y_m - Y_0}$$

易知, 支架增阻刚度主要与立柱缸径和乳化液性质有关, 立柱缸径越大, 则支架增阻刚度越大。

1.2 液压支架刚度耦合定义

耦合是指多个相互作用系统(介质)间互相依赖对方的一个量度^[8]。从物理上讲, 耦合就是在不同物理系统间构建本构方程。如果将系统视为区域, 从数学上讲, 耦合就是在多个区域间建立函数关系, 函数中来自不同区域、表征不同物理现象的参数有两个特点: 一个区域的问题不能单独求解; 非独立参数不能单独消去^[9]。根据系统间相互作用方式的不同, 可将耦合问题分为两类: ① 不同物理系统相互重叠的耦合问题, 如结构与热场的耦合; ② 不同物理系统相互作用的耦合问题, 如流固耦合、结构与结构耦合等。为寻求耦合问题的本质, 1981 年和 1984 年先后在英国和意大利召开了第一届、第二届国际耦合问题会议, 会议把耦合问题分为 8 种类型, 岩土与结构为八大耦合问题之一。显然, 液压支架与采场围岩的耦合问题属岩土与结构耦合范畴。

2 液压支架刚度耦合方程的建立与应用

2.1 液压支架与顶底板刚度耦合

若将顶板、液压支架和底板都视为不同刚度的弹性体, 便得到图 3 所示力学模型。由图 3 可知, 支架与煤壁相当于不同刚度的弹性材料并联, 而支架与顶板和底板则相当于不同刚度弹性材料串联。单就支架与顶板和底板组成的系统来说, 若不考虑底板影响, 则底板的作用力主要取决于液压支架的支撑力。当液压支架支撑力达到支架工作阻力时, 支架对底板的作用力最大。而支架对顶板的作用力则不同, 支架

对顶板的作用效果取决于液压支架工作阻力和外部载荷的大小, 当外载超过支架工作阻力时, 立柱安全阀开启, 支架卸载让压, 顶板下沉, 超过支架支护能力部分的载荷主要通过乳化液释放和油温升高等方式进行耗散。因此, 对液压支架、底板和顶板组成的系统来说, 其刚度主要取决于液压支架和顶板的刚度。

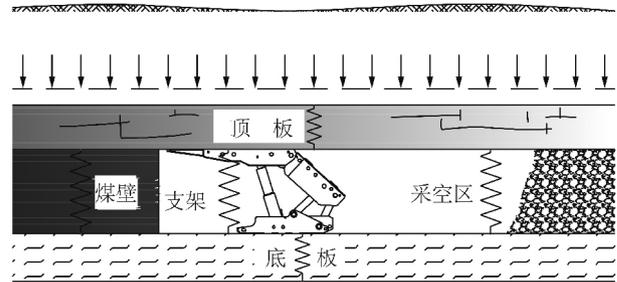


图 3 液压支架与围岩刚度模型

Fig. 3 Stiffness model of powered support and surrounding rock

对支架上方的上覆岩层来说, 由于基本顶相对稳定, 相当于刚体, 因此支架和顶板组成的系统刚度主要与直接顶有关。在实际分析时, 可着重分析支架与直接顶组成的系统刚度。若直接顶刚度为 k , 液压支架刚度为 x , 二者的等效刚度为

$$f(x) = \frac{kx}{k+x}$$

若将支架的刚度 x 视为变量, 导数

$$f'(x) = \frac{k^2}{(k+x)^2} > 0$$

函数 $f(x)$ 为增函数, 显然, 对液压支架和顶板来说, 增大支架刚度可以提高系统等效刚度。若上覆岩层作用在直接顶上的载荷不变, 则等效刚度越大, 顶板下沉量越小。不难发现, 提高支架刚度, 可有效防止顶板早期离层。

由式(1)可知, 加大立柱缸径, 可提高支架初撑力, 能有效防止顶板早期离层。特别当 $k \rightarrow \infty$ 时,

$$\lim_{k \rightarrow \infty} f(x) = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{kx}{k+x} = x$$

说明若顶板致密坚硬, 刚度很大, 则顶板与支架的系统等效刚度主要取决于支架。

2.2 液压支架与煤壁刚度耦合

若将支架和煤壁视为不同刚度的弹性基础, 则可用弹性基础梁对有关问题进行分析^[10]。研究表明^[11-12], 煤壁在没有发生塑性变形时其超前压力近似指数函数分布。建立图 4 所示模型, 直接顶厚度为 h , 顶板悬顶长度为 L_1 , 煤层厚度为 M , 液压支架支护阻力为 F , 上覆岩层为均布荷载 q 。将煤壁视为弹性模量为 E_c 的弹性体, 煤壁不同位置处的挠度(下沉量)为 $h(x)$, 则在煤体弹性变形阶段, 厚度为 M 的煤

壁上方压力为

$$\sigma_c(x) = E_c \varepsilon_c = \frac{E_c}{M} h(x)$$

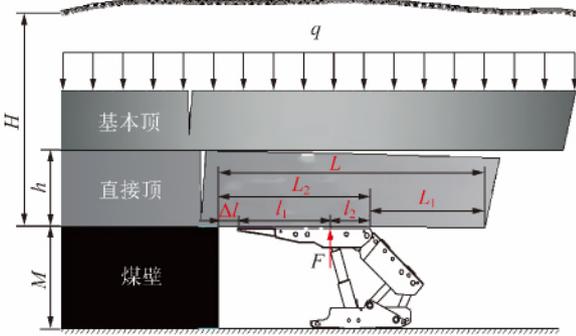


图 4 液压支架支护作用示意

Fig. 4 Schematic diagram of powered support

若上覆岩层为均布载荷 q , 由弹性基础梁假设可求在支架作用下煤壁上方顶板挠曲线方程^[13]:

$$h(x) = \frac{e^{-\beta x}}{4\beta^2 EI} \left\{ [F(l_1 + \Delta l) - qL^2] \sin(\beta x) - \frac{2\beta^3 [qL^2 - 2F(l_1 + \Delta l)] + 4q\beta^2 EI}{E_c + 2\beta^3} \cos(\beta x) \right\} + \frac{Mq}{E_c} \quad (2)$$

式中, $\beta = \sqrt[4]{\frac{E_c}{4EIM}}$; EI 为单位宽度顶板岩梁抗弯刚度。

将式(2)左右两边乘以 E_c/M , 即得在支架作用下煤壁超前压力:

$$\sigma_c(x) = \beta^2 e^{-\beta x} \left\{ [F(l_1 + \Delta l) - qL^2] \sin(\beta x) - \frac{2EI\beta^3 [qL^2 - 2F(l_1 + \Delta l)] + 4q\beta^2 EI}{E_c + 2\beta^3} \cos(\beta x) \right\} + q \quad (3)$$

同理, 若将液压支架视为弹性模量为 E_p 的弹性基础, 若上覆岩层载荷为均布载荷 q , 在支架增阻阶段(此时支架高度为 M), 支架上方顶板挠曲线方程 $v(x)$ ^[14] 为

$$v(x) = \frac{qL_1}{4\alpha^2 EI} e^{-\alpha(l-x)} \left\{ -L_1 \sin[\alpha(l-x)] + \left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) \cos[\alpha(l-x)] \right\} + \frac{Mq}{E_p} \quad (4)$$

式中, $\alpha = \sqrt[4]{\frac{E_p}{4EIM}}$ 。

将式(4)左右两边乘以 E_p/M , 即得支架对上方岩层作用力:

$$\sigma_p(x) = \alpha^2 q L_1 e^{-\alpha(l-x)} \left\{ -L_1 \sin[\alpha(l-x)] + \left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) \cos[\alpha(l-x)] \right\} + q \quad (5)$$

由式(3)和(5)可知, 煤壁和液压支架对上覆岩层的作用力都近似指数函数, 从对上覆岩层支护效果角度来说, 可以认为液压支架是“向外延伸”的煤壁。由图 5(a)可知, 当液压支架刚度低于煤壁刚度时, 在相同载荷状态下, 支架上方的岩层下沉量加大; 同理, 当液压支架支撑力小于煤壁支撑力时, 煤壁将承受更大的压力。因而当煤壁和支架的刚度特性及支护能力不匹配时, 两者间的上覆岩层将产生剪切力, 煤壁发生塑性破坏(图 5(a)中红线所示部分), 上覆岩层容易在此附近断裂, 出现片帮、冒顶, 进而对支架造成严重冲击。提高液压支架刚度和支护强度, 煤壁和支架间的上覆岩层剪切力会减小, 上覆岩层断裂线的位置将逐渐后移, 可有效防止围岩过早断裂失稳, 减小围岩对支架的冲击。理论上理想的液压支架支护效果应如图 5(b)所示, 即在煤壁弹性变形阶段, 支架上方岩层顶板挠度和应力与煤壁上方顶板挠度和应力应保持一致, 即当 $x = 0$ 时, 式(3)和式(5)中的两条应力曲线应平滑过渡。

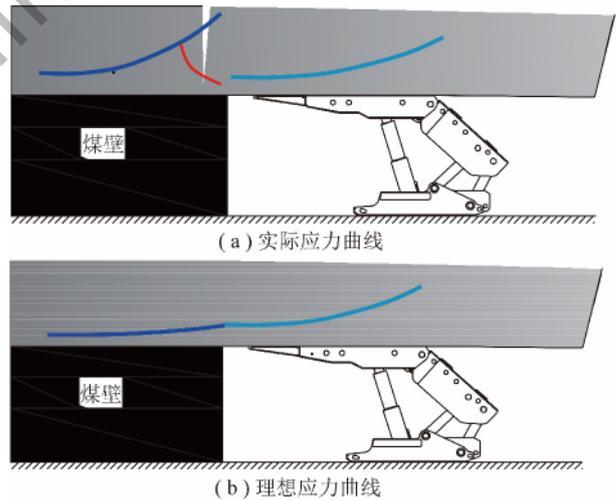


图 5 支架和煤壁上方应力曲线

Fig. 5 Stress curves of top support and rib

分别将 $x=0$ 代入式(3)和式(5), 得支架与围岩耦合作用关系:

$$F = \frac{qL^2}{2l_1} + \frac{q}{\beta l_1} + \frac{qL_1 \alpha \left(\frac{E_c}{M} + 2EI\beta^3 \right) (\alpha + 2) \cos(\alpha l)}{4EI\beta^5 l_1 e^{\alpha l}} \quad (6)$$

若将 $\eta = \frac{E_p}{E_c}$ 表示液压支架与煤壁刚度比, 设顶梁

长度为 L_2 , 令 $\xi = \frac{L_1}{L_2}$, $l = l_1 + l_2$, 由于 $\frac{\Delta l}{l} < 0.1$, 特别是拉架后且伸缩梁伸出时有 $\Delta l = 0$, $L_2 = l$, 式(6)转化为

$$F = \frac{q(\xi + 1)^2 l^2}{2l_1} + \Gamma q \quad (7)$$

式中 Γ 为修正因子,

$$\Gamma = \frac{1}{\beta l_1} + \frac{\sqrt[4]{\eta l (E_c + 2\beta^3 EIM)} (\alpha + 2) \cos(\alpha l)}{E_c l_1 e^{\alpha l}}$$

若将支架和煤壁视为刚体, 即 $\alpha \rightarrow \infty$, $\beta \rightarrow \infty$, 则修正因子 $\Gamma = 0$, 有

$$Fl_1 = \frac{q(\xi + 1)^2 l^2}{2} \quad (8)$$

对于两柱掩护式液压支架, $\delta = l_1/l_2$ 为顶梁前后比(即图4中液压支架顶梁前端到柱帽距离 l_1 与顶梁末端到柱帽距离 l_2 的比值), 该数值解析值为 $8/3$ ^[15-16], 这时 $\xi = 1$, 且 Fl_2 有最大值 $(Fl_2)_{\max} = 3ql^2/4$ 。将 $\xi = 1$ 和 $\delta = 8/3$ 代入式(8) 换算得 $F = 2.75ql$ 。若支架宽度为 B , 支架工作阻力 F 与支护强度 P 存在下述关系: $F = PBl$; 假设工作面采高为 M , 岩石容重为 γ , 岩体碎胀系数为 K_p , 将上述各值代入式(8) 得支架所需支护强度为

$$P = 2.75 \frac{\gamma M}{K_p - 1} \quad (9)$$

若 K_p 取 $1.3 \sim 1.6$, 则支架所需支护强度为 $4.6 \sim 9$ 倍采高岩柱自重(岩石比重取 2.5 t/m^3)。这是目前常用的液压支架支护强度估算公式, 易知现有的计算隐含了支架和煤壁都为刚体的假定条件。

2.3 刚度耦合对支护强度的影响

由式(7)可知, 若考虑围岩的影响, 则支架所需支护强度为

$$P = \left[\frac{(\xi + 1)^2 l}{2l_1} + \Gamma \right] \frac{\gamma M}{K_p - 1}$$

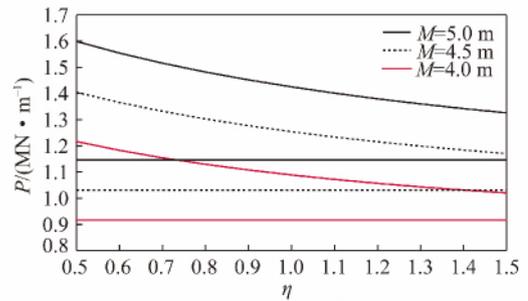
将顶梁前后比为 $8/3$, $\xi = 1$ 代入上式, 得支架所需支护强度为

$$P = (2.75 + \Psi) \frac{\gamma M}{K_p - 1} \quad (10)$$

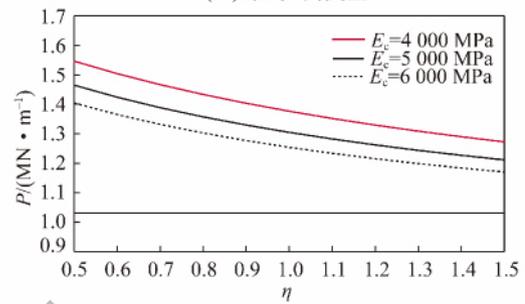
式中, $\Psi = \frac{11l}{8\beta} + \frac{11\sqrt[4]{\eta (E_c + 2\beta^3 EIM)} (\alpha + 2) \cos(\alpha l)}{8E_c e^{\alpha l}}$ 。

图6为采用式(10)求出的不同条件下液压支架所需支护强度, 图中横坐标为液压支架和煤体弹性模量比值 $\eta = \frac{E_p}{E_c}$, 顶梁长度取 5 m , 岩石容重为 2.5 t/m^3 。图中直线为式(9)求得的结果, 曲线为式(10)求得的结果。

由式(10)和图6可以得出下述结论: ① 传统支



(a) 采高 M 为变量



(b) 煤层弹性模量 E_c 为变量(采高 4.5 m)

图6 不同条件下液压支架所需支护强度

Fig. 6 Supporting intensity of powered support under different conditions

护强度计算方法由于没有考虑围岩的耦合作用, 支护强度为一条直线, 而实际上, 液压支架所需支护强度与支架刚度、顶板岩性以及煤层硬度等围岩条件密切相关, 呈曲线变化。由图6可知, 考虑围岩耦合作用后, 现有支护强度计算结果普遍偏低。② 液压支架所需支护强度和刚度要与所支护的围岩条件协调匹配, 基本原理是: 在支架刚度不变的情况下, 煤层越松软或顶板越坚硬, 支架所需支护强度应越大。③ 液压支架刚度应当与煤层和顶板岩层等围岩条件协调匹配, 当支架刚度低于煤层刚度时(低刚度匹配), 支架刚度越小, 所需支护强度越大; 当支架刚度大于煤层刚度时(高刚度匹配), 支架刚度越大, 所需支护强度可适当减小, 因此对于硬顶或软岩工作面, 应加大立柱缸径, 增大支架刚度, 提高支架初撑力和工作阻力, 以增强支架适应性。

2.4 应用实例

山东能源淄博矿业集团唐口煤矿 630 采区主采山西组 $3(3_{\pm})$ 煤, 煤层厚度 $1.34 \sim 10.25 \text{ m}$, 平均厚度 7.51 m , 合并区平均煤厚 9.3 m , 煤层倾角 $2^\circ \sim 9^\circ$, 煤层埋深 $687 \sim 1105 \text{ m}$, 直接顶为泥岩, 平均厚度 3.68 m , 基本顶为中砂岩, 平均厚度 8.47 m , 底板为泥岩, 平均厚度 2.13 m , 工作面长度 60 m 。采用 ZF15600/24/45 型综放支架进行开采, 支护强度 $1.54 \sim 1.56 \text{ MPa}$, 最大机采高度 4.3 m , 液压支架主要技术参数见表 1。

表 1 ZF15600/24/45 型液压支架主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of hydraulic support ZF15600/24/45

参 数	数 值
结构高度/m	2.4~4.5
初撑力/kN	12 778
工作阻力/kN	15 600
支护强度/MPa	1.54~1.56

煤层弹性模量 2 500 MPa, 岩石容重 2.5 t/m³, 顶梁长度 5.7 m, 当支架与煤层刚度比值在 [0.5, 1.5] 变化时, 由式(10)得支架所需支护强度为 1.34~1.67 MPa(支架与煤壁刚度比值为 1 时, 支护强度为 1.48 MPa)。结合现有工作面开采经验, 将支护强度确定为 1.54~1.56 MPa, 以提高支架适应性。开采期间, 基本顶来压期间, 前梁千斤顶安全阀开启频繁, 将前梁千斤顶安全阀流量由 100 L/min 更换为 200 L/min, 同时将安全阀整定压力由 38 MPa 提高到 40 MPa, 调整后, 支架整体工况良好, 工作面很少出现片帮冒顶现象, 较好地满足了工作面支护需要, 初步验证了本文所提公式的正确性。

4 结 论

(1) 液压支架增阻刚度主要与立柱刚度有关, 在缺乏实验数据的情况下, 支架增阻刚度可用立柱等效刚度进行估算。

(2) 液压支架所需支护强度与采场围岩条件密切相关。传统的液压支架支护强度计算方法是基于煤壁和支架都为刚体的假定前提下得出的结论, 没有考虑支架刚度、顶板岩性和煤层硬度的耦合作用与影响, 计算结果偏低。在工程实际应用时, 应考虑支架与围岩耦合作用, 可在本文推导的支护强度公式的基础上, 对传统方法计算结果进行适当修正。

(3) 液压支架应当与采场围岩条件协调匹配, 为了维护顶板或煤壁的稳定性, 相对煤层刚度来说, 支架应采用高刚度或等刚度匹配。

参考文献:

- [1] 缪协兴, 钱鸣高. 综放采场围岩-支架整体力学模型及分析[J]. 煤, 1998, 7(6): 1-6.
Miao Xiexing, Qian Minggao. Fully mechanized top coal caving mining model and analysis of surrounding rock and support the whole mechanical field[J]. Coal, 1998, 7(6): 1-6.
- [2] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连, 等. 采场支架与围岩耦合作用机理研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(1): 40-43.
Qian Minggao, Miao Xiexing, He Fulian, et al. Mechanism of coupling effect between supports in the working and the rocks[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(1): 40-43.
- [3] 刘长友, 钱鸣高, 曹胜根. 采场支架与围岩系统刚度的研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 1998(3): 2-4.
Liu Changyou, Qian Minggao, Cao Shenggen. Study on stiffness of support and surrounding rock system of mining face[J]. Mine Pressure and Roof Management, 1998(3): 2-4.
- [4] 王国法. 工作面支护与液压支架技术理论体系[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1593-1601.
Wang Guofa. Theory system of working face support system and hydraulic roof support technology[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1593-1601.
- [5] 徐亚军. 液压支架底板比压特性研究[J]. 煤矿开采, 2014, 19(4): 45-47.
Xu Yajun. Study on the floor pressure characteristics of powered support[J]. Coal Mining Technology, 2014, 19(4): 45-47.
- [6] 叶列平, 林旭川, 曲哲, 等. 基于广义结构刚度的构件重要性评价方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(1): 1-6.
Ye Lieping, Lin Xuchuan, Qu Zhe, et al. Evaluating method of element importance of structural system based on generalized structural stiffness[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(1): 1-6.
- [7] 刘欣科, 赵忠辉, 赵锐. 冲击载荷作用下液压支架立柱动态特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(12): 66-69.
Liu Xinke, Zhao Zhonghui, Zhao Rui. Study on dynamic features of leg applied to hydraulic powered support under bumping load[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(12): 66-69.
- [8] 王明红. 面向制作精度的成形模具与装备耦合刚度分析[D]. 天津: 天津大学, 2007: 8-10.
- [9] 王其政, 黄怀德, 姚德源. 结构耦合动力学[M]. 北京: 宇航出版社, 1999: 3-4.
- [10] 马庆云, 赵晓东, 宋振骥. 采场老顶岩梁的超前破断与矿山压力[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 473-477.
Ma Qingyun, Zhao Xiaodong, Song Zhenqi. Break of main roof ahead of workface and ground pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5): 473-477.
- [11] 刘宝琛. 矿山岩体力学概论[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1982: 232-236.
- [12] 史元伟. 采煤工作面围岩控制原理和技术(上)[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 305-314.
- [13] 徐亚军. 两柱掩护式液压支架与围岩耦合关系研究与相关参数优化[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2013: 19-26.
- [14] 徐亚军. 液压支架与工作面顶板耦合分析[J]. 煤矿开采, 2015, 20(3): 39-42.
Xu Yajun. Coupling analysis of powered support and roof in mining face[J]. Coal Mining Technology, 2015, 20(3): 39-42.
- [15] Xu Yajun, Wang Guofa. The reasonable analytical value of canopy aspect ratio of the two-leg shield powered support[A]. 30th Annual International Pittsburgh Coal Conference[C], 2013.
- [16] 徐亚军. 液压支架顶梁外载作用位置理论研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(7): 102-106.
Xu Yajun. Research and application external load position of powered support's canopy[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(7): 102-106.