

矸石-粉煤灰充填采煤覆岩结构与变形规律*

范超军¹,李胜¹,海龙^{2,3},杜文璋¹,杨振华¹

(1.辽宁工程技术大学 矿业学院,辽宁 阜新 123000,2.冀中能源集团有限责任公司 国家能源充填采煤技术
重点实验室,河北 邢台 054000,3.辽宁工程技术大学 力学与工程学院,辽宁 阜新 123000)

摘 要:矸石-粉煤灰充填采煤可解决“三下”压煤和固体废弃物排放造成的环境污染问题。根据充填采煤工作面覆岩移动规律,提出矸石-粉煤灰充填采煤覆岩存在 3 类结构;在弹性地基薄板理论基础上,建立了基本顶力学模型,推导出了基本顶弯曲下沉的理论公式,给出了基本顶破断的临界条件;据此,分析了基本顶变形影响因素,并进行了工程实践。结果表明,基本顶最大下沉量理论计算值与实测值基本一致,各因素对基本顶弯曲下沉影响大小依次为:基本顶弹性模量、覆岩载荷、直接顶弹性模量、充填体弹性模量。邢台矿 7606 工作面采空区基本顶的最大下沉量为 234 mm,沿专用铁路线地表最大下沉量为 16 mm,仅直接顶产生了局部裂隙和离层,基本顶完整性较好,覆岩属于第 II 类结构,地表变形得到了有效控制。

关键词:矸石-粉煤灰;充填开采;覆岩结构;变形规律;力学模型

中图分类号:X752;TD73;TD327 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-0836(2018)01-0117-07

Structure and Deformation Law of Overlying Strata for Waste
Rock-fly Ash Backfilling Mining

Fan Chaojun¹, Li Sheng¹, Hai Long^{2,3}, Du Wenzhang¹, Yang Zhenghua¹

(1.College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, P.R.China; 2. National Energy Backfilling
Mining Technology Key Laboratory, Jizhong Energy Group Co., Ltd., Xingtai, Hebei 054000, P.R.China; 3. College of
Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, P.R.China)

Abstract: Waste rock-fly ash backfilling mining can solve problems of “three unders” mining and environmental pollution caused by solid waste emissions. According to overlying strata movement law, three kinds of structure of overlying strata in waste rock-fly ash backfilling mining face were put forward, and which were verified by a physical simulation experiment. Mechanical model of basic roof was built on the basis of thin plate with elastic foundation theory. Then subsidence formula and breakage critical condition of basic roof were given out. Then the factors of basic roof subsidence were analyzed. Results show that the largest basic roof subsidence theoretical calculation formula is in keeping with measured values in field. According to the influence level, factors of basic roof subsidence as follows: the basic roof elastic modulus, overlying strata load, immediate roof elastic modulus and backfilling body elastic modulus. As an artificial controllable factor, backfilling body elastic modulus plays an important role on strata structure and ground surface deformation. Practice shows that the maximum basic roof subsidence of 7606 working face in Xingtai mine is 234 mm and ground subsidence is 16 mm. The immediate roof appears crack and delimitation and basic roof is integral. So, the overlying strata structure belongs to the class II. Ground surface deformation has been

* 收稿日期:2017-08-24(修改稿)
作者简介:范超军(1990-),男,四川资中人,博士生,主要从事矿山压力与矿井动力灾害防治等方面的研究。
E-mail:chaojunfan@139.com
基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0801407-2);国家自然科学基金(51004063,51674132);辽宁省百千万人才工程资助项目(201575)

effectively controlled.

Keywords: waste rock-fly ash; backfilling mining; overlying strata structure; deformation rule; mechanical model

0 引言

矸石-粉煤灰充填采煤技术将煤矿产生的矸石与电厂产生的粉煤灰等固体废弃物按一定比例混合充填采空区,以控制覆岩移动和地表沉陷,解放大量“三下”压煤,是实现煤矿绿色开采的重要环节以及煤矿安全生产的有效途径^[1-4]。地表沉陷控制效果与采场覆岩结构密切相关,研究矸石-粉煤灰充填采煤覆岩结构与变形规律具有重要意义^[5]。

余伟健等^[6]研究了由充填体、煤柱和承重岩层组成的充填开采协作支撑系统;韩兴华等^[7]分析了垮落法开采和具有膨胀特性的膏体材料充填开采下地表及顶板的移动变形和围岩的稳定性;张立亚等^[8]研究了超高水材料长壁充填开采过程中地表的动、静态移动变形特征;刘长友等^[9]研究了充填体压缩率和关键层稳定性对上覆岩层活动的影响规律;张吉雄等^[10]、Li 等^[11]运用弹性地基梁理论分析了关键层弯曲变形的特征;黄艳利^[12-13]分析了固体充填开采采场围岩变形特征;王家臣等^[14]模拟了不同充填率情况下上覆岩层应力变化和岩层移动特征。

以上研究较多基于弹性梁理论,对于充填开采覆岩空间结构变形解释较困难。笔者提出矸石-粉煤灰充填采煤覆岩存在 3 种结构,建立了基本顶弹性地基薄板力学模型并求解,据此分析了基本顶变形影响因素,并进行了工程实践,可为矸石-粉煤灰充填采煤覆岩和地表变形控制提供理论依据。

1 矸石-粉煤灰充填开采覆岩结构

传统采煤工作面以垮落法管理顶板,当工作面推过后,采空区顶板发生周期性破断,覆岩随之移动,并在地表形成下沉盆地,引起地表重要建(构)筑物破坏。充填采煤是在煤炭采出后将充填料充入采空区,使其与采空区周围煤壁共同支撑上覆岩层,可限制覆岩移动,减小地表下沉。

根据固体充填采煤覆岩移动规律^[13,15],提出矸石-粉煤灰充填采场上覆岩层可能存在 3 类结构(图 1)。第 I 类结构:当采空区充实率较小时,直

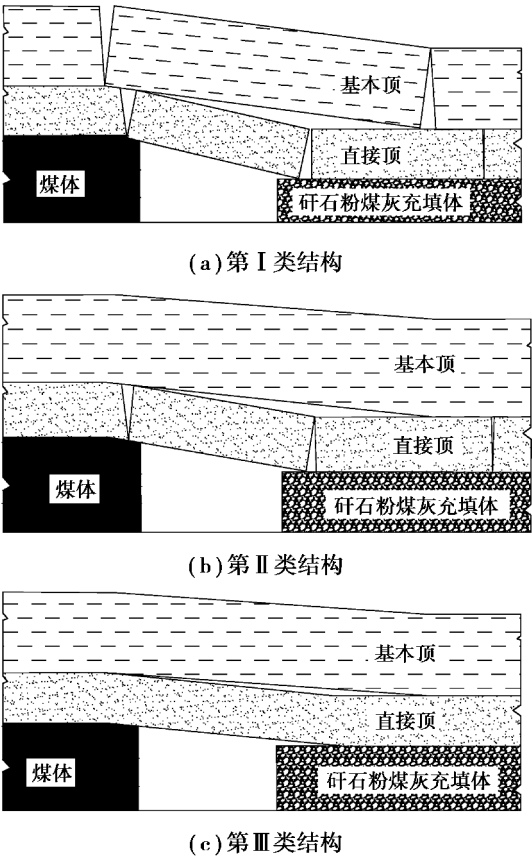


图 1 矸石-粉煤灰充填开采覆岩结构模型
Fig.1 Structure model of overlying strata in backfilling mining with waste rock-fly ash

接顶和基本顶的活动空间较大,基本顶之下的充填体与直接顶组合弹性地基系数较小。随工作面推进,直接顶和基本顶均发生周期性破断,其矿压显现较明显,上覆岩层结构与垮落法采煤工作面基本一致,称为直接顶破断-基本顶破断结构。第 II 类结构:当采空区充实率较大时,组合弹性地基系数较大,基本顶只产生弯曲下沉,并不存在来压过程。此时,直接顶虽然受到充填体一定的约束作用,但也会发生破断,产生初次来压和周期来压。其矿压显现较第 I 类结构缓和,称为直接顶破断-基本顶弯曲下沉结构。第 III 类结构:当采空区充实率特别高时,组合弹性地基系数特别大,直接顶受到充填体较高的约束,直接顶和基本顶只产生弯曲下沉,不发生初次来压和周期来压,工作面矿压显现较小,称为直接顶弯曲下沉-基本顶弯曲下沉结构。

第Ⅰ类结构情况下,采场矿压显现明显,覆岩移动量大,地表沉陷严重,造成地面建(构)筑物严重损害;第Ⅱ、Ⅲ类结构情况下,作为亚关键层的基本顶不发生破断,仅产生弯曲下沉,采场矿压较缓和,可使地表沉陷量保持在允许的范围内。从技术经济最优的角度来说,第Ⅱ类覆岩结构较第Ⅲ类结构更合理。因此,本文重点研究第Ⅰ、Ⅱ类结构,分析基本顶的破断和弯曲下沉规律。

2 基本顶弯曲变形理论计算

2.1 基本顶弯曲变形量计算

矽石-粉煤灰充填采煤工作面推过后,直接顶与充填体相互接触,并逐步被压实,离层裂隙仅出现在采空区上方靠近采煤工作面侧的小范围内,小于一个周期来压步距,相对于工作面走向长度为较小值,可近似将充填体、直接顶共同视为变形相互协调的弹性地基^[10]。弹性地基系数 k 由直接顶和矽石-粉煤灰充填体的物理力学特征决定(图2)。

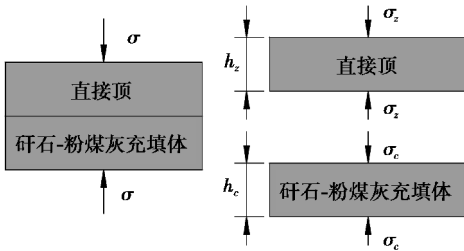


图2 弹性地基力学模型

Fig.2 Mechanical model of elastic foundation

假设直接顶和充填体为弹性体,有本构关系:

$$\begin{cases} \sigma_c = E_c \frac{\Delta h_c}{h_c} \\ \sigma_z = E_z \frac{\Delta h_z}{h_z} \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_c 为充填体所受垂直应力,MPa; σ_z 为直接顶所受垂直应力,MPa; E_c 为充填体弹性模量,MPa; Δh_c 为充填体弹性模量,MPa; Δh_c 为充填体变形量,m; Δh_c 为直接顶变形量,m; Δh_z 为充填高度,m; h_z 为直接顶厚度,m。

根据 Winkler 弹性地基假设,弹性地基所受应力为:

$$\sigma = kw = k(\Delta h_c + \Delta h_z) \quad (2)$$

令 $\sigma = \sigma_c = \sigma_z$,将式(1)代入式(2),解得充填体和直接顶组合弹性地基系数为:

$$k = \frac{E_z E_c}{E_z h_c + E_c h_z} \quad (3)$$

根据板壳理论,板的厚度 h_b 等于或小于板中面最小尺寸 a 或 b 的 $1/5$,可称为薄板。一般情况下,矽石-粉煤灰充填开采工作面的倾向长度为 $40 \sim 120$ m,基本顶厚度为 $3 \sim 20$ m。因此,可将基本顶视为四边固支的弹性地基薄板^[15-16]。薄板的上部承受覆岩载荷作用,下部受矽石-粉煤灰和直接顶组成的弹性地基支承作用,建立矽石-粉煤灰充填基本顶力学模型如图3所示。模型中,以基本顶在开切眼处的倾向中点为原点,沿走向方向为 x 轴,倾向方向为 y 轴。

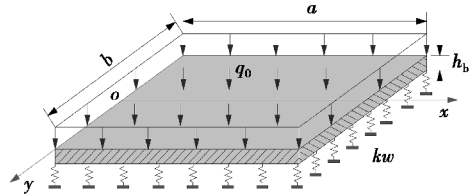


图3 矽石-粉煤灰充填基本顶力学模型

Fig.3 Mechanical model of basic roof in gangue and fly ash filling

在弹性地基条件下,基本顶弯曲微分方程为^[16]:

$$D_b \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2D_b \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_b \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q_0 - kw \quad (4)$$

式中: w 为基本顶挠度,m; D_b 为基本顶的抗弯刚度, $\text{MN} \cdot \text{m}$, $D_b = E_b h_b^3 / [12(1 - \mu^2)]$; E_b 为基本顶弹性模量,MPa; h_b 为基本顶厚度,m; μ 为基本顶泊松比; q_0 为覆岩载荷,MPa; k 为组合弹性地基系数。

因求解四边固支板十分困难,将模型简化为等效弯矩分布在 $x = 0$ 和 a 、 $y = \pm b/2$ 的四边简支模型。基本顶的四边简支边界条件为:

$$\begin{cases} w = 0, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 & (\text{当 } x = 0, a) \\ w = 0, \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 & (\text{当 } y = \pm \frac{b}{2}) \end{cases} \quad (5)$$

采用单三角级数作为挠曲方程^[15],其表达式为:

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} f_m(y) \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (6)$$

式中: $f_m(y)$ 为关于 y 的函数, m 为正整数。

式(6)满足边界条件(5),将式(6)代入式(4)得:

$$D_b \sum_{m=1}^{\infty} \left[f_m^{(4)}(y) - 2 \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 f_m^{(2)}(y) + \left(\frac{m\pi}{a} \right)^4 f_m(y) \right] \sin \frac{m\pi x}{a} = q_0 - k \sum_{m=1}^{\infty} f_m(y) \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (7)$$

将式(7)中的 q_0 展开为单三角级数:

$$q_0 = \sum_{m=1}^{\infty} q_m(y) \sin \frac{m\pi x}{a} \tag{8}$$

式中, $q_m(y) = \frac{2}{a} \int_0^a q_0 \sin \frac{m\pi x}{a} dx = \frac{2q_0}{m\pi} (1 - \cos m\pi)$

将式(8)代入式(7),且式(7)满足对任意 x 值都成立,则

$$\begin{aligned} f_m^{(4)}(y) - 2 \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 f_m^{(2)}(y) + \left(\frac{m\pi}{a} \right)^4 f_m(y) = \\ \frac{q_m(y) - kf_m(y)}{D_b} \end{aligned} \tag{9}$$

式(9)为四阶线性常系数微分方程,设 A 、 B 为待定系数,其解为:

$$w = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{2q_0 a^4 (1 - \cos m\pi)}{D_b m^5 \pi^5 + k\pi m a^4} \left[\frac{\beta_m \cosh \alpha_m y}{\alpha_m \sinh(\alpha_m b/2) \coth(\beta_m b/2) - \beta_m \cosh(\alpha_m b/2)} + \frac{\alpha_m \cosh \beta_m y}{\beta_m \sinh(\beta_m b/2) \coth(\alpha_m b/2) - \alpha_m \cosh(\beta_m b/2)} + 1 \right] \tag{11}$$

由式(11)可知,最大挠度发生在基本顶中心处。令 $x=a/2, y=0$,得:

$$(w)_{\max} = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4q_0 a^4}{D_b m^5 \pi^5 + k\pi m a^4} \left[\frac{\beta_m}{\alpha_m \sinh(\alpha_m b/2) \coth(\beta_m b/2) - \beta_m \cosh(\alpha_m b/2)} + \frac{\alpha_m}{\beta_m \sinh(\beta_m b/2) \coth(\alpha_m b/2) - \alpha_m \cosh(\beta_m b/2)} + 1 \right] \tag{12}$$

基本顶中心位置的最大应力:

$$(\sigma_x)_{\max} = \frac{6D_b}{h_b^2} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4q_0 a^4}{D_b m^5 \pi^5 + k\pi m a^4} \left[\frac{\mu \beta_m \alpha_m^2 a^2 - \beta_m m^2 \pi^2}{a^2 \alpha_m \sinh(\alpha_m b/2) \coth(\beta_m b/2) - a^2 \beta_m \cosh(\alpha_m b/2)} + \frac{\mu \alpha_m \beta_m^2 a^2 - \alpha_m m^2 \pi^2}{a^2 \beta_m \sinh(\beta_m b/2) \coth(\alpha_m b/2) - a^2 \alpha_m \cosh(\beta_m b/2)} - \frac{m^2 \pi^2}{a^2} \right] \tag{14}$$

$$(\sigma_y)_{\max} = \frac{6D_b}{h_b^2} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4q_0 a^4}{D_b m^5 \pi^5 + k\pi m a^4} \left[\frac{\beta_m \alpha_m^2 a^2 - \mu \beta_m m^2 \pi^2}{a^2 \alpha_m \sinh(\alpha_m b/2) \coth(\beta_m b/2) - a^2 \beta_m \cosh(\alpha_m b/2)} + \frac{\alpha_m \beta_m^2 a^2 - \mu \alpha_m m^2 \pi^2}{a^2 \beta_m \sinh(\beta_m b/2) \coth(\alpha_m b/2) - a^2 \alpha_m \cosh(\beta_m b/2)} - \mu \frac{m^2 \pi^2}{a^2} \right] \tag{15}$$

根据弹性薄板中应力与挠度的关系,可求得基本顶中心位置的最大应力 $(\sigma_x)_{\max}$ 和 $(\sigma_y)_{\max}$,当基本顶抗拉强度为 σ_s 时,其不发生破断的条件为:

$$\{(\sigma_x)_{\max}, (\sigma_y)_{\max}\}_{\max} \leq \sigma_s \tag{16}$$

2.2 实例计算

根据现场实际情况,7606 工作面采深 $H=320$ m,采高 $M=5.2$ m,煤体容重 $\gamma_m=15$ kN/m³,基本顶厚度 $h_b=19.37$ m,基本顶弹性模量 $E_b=15$ GPa,泊松比 $\mu=0.22$,抗拉强度 $\sigma_s=6.5$ MPa,直接顶厚度 $h_z=17.3$ m,直接顶弹性模量 $E_z=3$ GPa,矽石-粉煤灰充填体弹性模量 $E_c=1.5$ GPa,工作面走向长度 $a=460$ m,倾斜长度 $b=50$ m,覆岩载荷 $q_0=$

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{A \cosh \alpha_m y + B \cosh \beta_m y}{D_b m^5 \pi^5 + k\pi m a^4} + \frac{2q_0 a^4 (1 - \cos m\pi)}{D_b m^5 \pi^5 + k\pi m a^4} \right] \sin \frac{m\pi x}{a} \tag{10}$$

式中:
$$\begin{cases} \alpha_m = \sqrt{\frac{a^2 \sqrt{-D_b k} + \pi^2 D_b m^2}{a^2 D_b}} \\ \beta_m = \sqrt{-\left(\frac{a^2 \sqrt{-D_b k} - \pi^2 D_b m^2}{a^2 D_b} \right)} \end{cases}$$

由式(10)和四边固支条件 $\frac{\partial w}{\partial y} \Big|_{y=\pm \frac{b}{2}} = 0$,

$\frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=0,a} = 0$,可得:

7.8 MPa(覆岩平均容重 25 kN/m³),具体煤层名称及相关基本参数见第 5 节。将上述参数代入式(11)、式(14)和式(15),可得基本顶最大挠度为 219.2 mm,基本顶在 x, y 方向上的最大应力分别为 5.21 MPa 和 3.38 MPa。根据式(16),基本顶不发生破断,覆岩结构属于第 II 类结构。

3 基本顶变形影响因素分析

以 7606 工作面的实际情况为基准,结合煤系地层中煤岩体物理力学特性和充填体参数,给出各影响因素的变化范围(表 1)。为便于分析,在保持其他参数不变的基础上,根据最大挠度和最大应力

计算公式,讨论某一因素在变化范围内与基本顶弯曲下沉量之间的关系。

表 1 影响因素的变化范围				
Table 1 Variations of influencing factors				
影响因素	E_b/GPa	q_0/MPa	E_c/GPa	E_z/GPa
基准值	15	7.85	1.5	3
变化范围	0~30	3~13	0~4	0~6

采用最小二乘法进行拟合,充填体弹性模量与组合弹性地基系数、基本顶弯曲下沉量、基本顶最大应力呈指数关系(图 4(a))。组合弹性地基系数随充填体弹性模量的增加而增加,基本顶的弯曲下沉量和最大应力随充填体弹性模量的增加而降低。当充填体弹性模量小于 0.8 GPa 时,基本顶最大应力超过 6.5 MPa,基本顶产生破断,覆岩属于第 I 类结构,不利于地表沉陷控制,此时基本顶弯曲下沉量为 265 mm,组合弹性地基系数为 80 MN/m;当充填体弹性模量大于 0.8 GPa 时,覆岩属于第 II 类结构。充填体弹性模量为 0.8~2.5 GPa 时,组合弹性地基系数、基本顶弯曲下沉量、基本顶最大应力的变化幅值较大;当大于 2.5 GPa 时,其值变化较平缓,若继续增大充填体弹性模量,对覆岩控制作用不大。

直接顶弹性模量与组合弹性地基系数呈指数增加关系,与基本顶弯曲下沉量、最大应力呈指数减小关系(图 4(b))。当直接顶弹性模量小于 1.8 GPa 时,基本顶破断,覆岩为第 I 类结构;大于 1.8 GPa 时,覆岩为第 II 类结构。

基本顶弹性模量与基本顶弯曲下沉量、最大应力均呈二次方关系(图 4(c))。基本顶最大应力随基本顶弹性模量增加而增加,其峰值为 6.2 MPa,低于抗拉强度,即基本顶不会发生破坏,覆岩属于第 II 类结构。基本顶弯曲下沉量随基本顶弹性模量的增加而降低,降低幅值较大。

覆岩载荷与基本顶弯曲下沉量和最大应力值均呈线性增加关系(图 4(d))。当覆岩载荷大于 10 MPa 时,基本顶发生破断,覆岩为第 I 类结构;小于 10 MPa 时,基本顶不发生破断,覆岩为第 II 类结构。

根据基本顶弯曲下沉变化范围,各因素对基本顶弯曲下沉影响大小依次为:基本顶弹性模量、覆岩载荷、直接顶弹性模量、充填体弹性模量。充填采煤覆岩结构受地质条件影响较大,基本顶弹性模量、直接顶弹性模量越大,覆岩载荷越小,基本顶弯

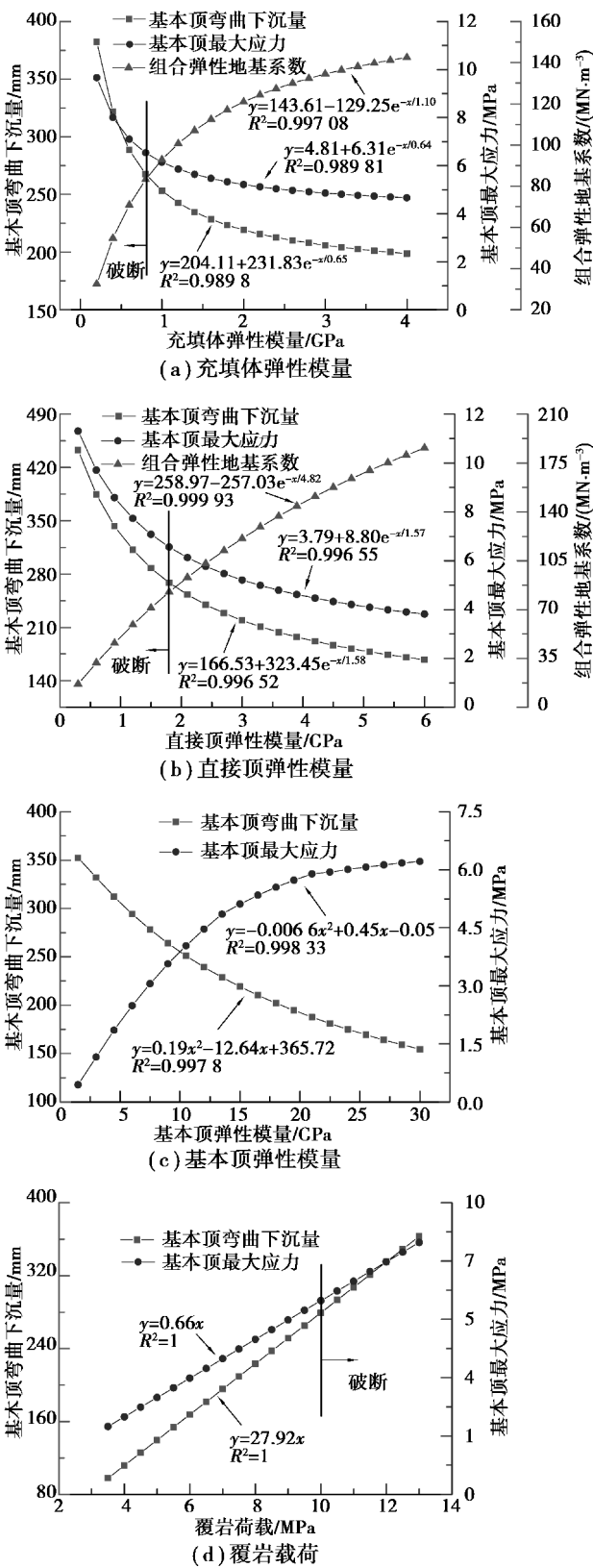


图 4 基本顶变形量与相关影响因素的关系

Fig.4 Relationship between basic roof deformation and relative important influencing factors

曲下沉量越小,越有利于控制覆岩和地表变形,在该地质条件下实施矸石-粉煤灰充填采煤,可降低

充填体强度要求,降低采煤成本。

4 工程实践

邢台矿 7606 工作面位于工业广场西北部的保护煤柱内,有矿区专用铁路线和南三环公路穿过,工作面东北部为已开采完毕的 7602 工作面,西北部为 F10 断层,南部距-210 西大巷 50 m,东部距井底车场 100 m,属于“三下”采煤,采用矸石-粉煤灰充填开采。工作面走向长度 460 m,倾斜长度 50 m,埋深为 295~335 m,平均为 320 m。工作面开采 2 号煤,煤层平均倾角为 9°,煤的容重为 1.5 t/m³,煤层平均厚度为 5.2 m。如表 2 所示,工作面基本顶为细粒砂岩(序号 2),厚度为 19.37m;直接顶为 2 号煤与基本顶之间的组合煤岩层(序号 3~7),厚度为 17.3 m;直接底为砂质页岩(序号 9),平均厚 6.6 m。

在 7606 充填开采工作面上方有-210 西翼大巷通过,该大巷离工作面垂直距离为 38 m,位于基本顶上方 2 m 的岩层内。为观测基本顶变形量和覆岩结构,在-210 m 西翼大巷底板布置岩层移动观测线和探测钻孔。同时,沿专用铁路线布置观测线,观测地表下沉值。

表 2 7606 工作面煤系地层基本情况

Table 2 Basic conditions of coal measures strata in 7606 working face

序号	岩层	厚度/m	岩性描述
1	细粒砂岩	7.51	细砂云母片为主,颗粒分布均匀
2	粗粒砂岩	19.37	泥质胶结,以石英长石为主
3	砂质页岩	3.00	以泥质为主,含植物化石
4	1 号煤	0.59	质硬,呈块状
5	砂质页岩	6.40	含植物化石,以泥质为主
6	细砂岩	2.80	含云母,泥质胶结
7	砂质页岩	4.50	含植物化石,以泥质为主
8	2 号煤	5.20	煤质良好,含植物化石,中部有一层夹矸
9	砂质页岩	6.60	含植物化石,以泥质为主

工作面走向推过 18 m 时,基本顶下沉受采动影响最活跃,推过 100 m 后,基本顶下沉开始趋于稳定。沿工作面倾向方向,基本顶下沉量呈一条高

斯曲线,最大值位于倾向方向中部,为 234 mm,最大下沉速度约为 14 mm/d(图 5)。从底板钻孔窥视结果看,受采动应力影响,7606 工作面上方 15 m 和 20 m 处出现局部裂隙和离层,超过 20 m 以上的岩层较完整。在矸石-粉煤灰充填体的支承下,直接顶中局部裂隙和离层被压实、闭合,基本顶没有发生破断现象,覆岩属于第 II 类结构。沿专用铁路线地表最大下沉量为 16 mm,出现在工作面东侧水平距离 37 m 位置,最大水平变形为 0.01 mm/m,矸石-粉煤灰充填采煤对地表的建(构)筑物几乎没有造成影响。

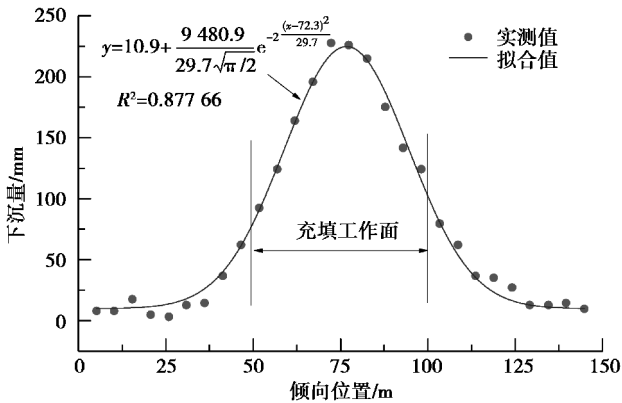


图 5 基本顶弯曲下沉实测值

Fig.5 Measured subsidence of basic roof

5 结论

(1)提出矸石-粉煤灰充填采煤覆岩存在直接顶破断—基本顶破断结构、直接顶破断—基本顶弯曲下沉结构、直接顶弯曲下沉—基本顶弯曲下沉结构 3 类结构。

(2)建立了弹性地基力学模型和基本顶力学模型,推导出了组合弹性地基系数、基本顶弯曲下沉的理论公式,给出了基本顶破断的临界条件。

(3)地质条件对充填采煤覆岩结构影响较大,基本顶弹性模量、直接顶弹性模量越大,覆岩载荷越小,基本顶弯曲下沉量越小,越有利于控制覆岩和地表变形。

(4)邢台矿 7606 工作面采用矸石-粉煤灰充填开采后,基本顶最大下沉量实测值与理论值基本相符,覆岩属于第 II 类结构,地表变形得到了有效控制。

参考文献(References)

[1] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 1-5. (Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin. Resources and

- environment compromise mining [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 1-5. (in Chinese))
- [2] 刘建功, 赵庆彪. 综合机械化充填采煤[J]. 煤炭学报, 2010, 35(9): 1413-1418. (Liu Jiangong, Zhao Qingbiao. Comprehensive mechanized filling coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(9): 1413-1418. (in Chinese))
- [3] 王磊, 张鲜妮, 郭广礼, 等. 固体密实充填开采地表沉陷预计模型研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1973-1978. (Wang Lei, Zhang Xianni, Guo Guangli, et al. Research on surface subsidence prediction model of coal mining with solid compacted backfilling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1973-1978. (in Chinese))
- [4] 徐俊明, 张吉雄, 黄艳利, 等. 充填综采矸石-粉煤灰压实变形特性试验研究及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 22(1): 158-162. (Xu Junming, Zhang Jixiong, Huang Yanli, et al. Experimental research on the compress deformation characteristic of waste-fly ash and its application in backfilling fully mechanized coal mining technology [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 22(1): 158-162. (in Chinese))
- [5] 缪协兴, 张吉雄. 矸石充填采煤中的矿压显现规律分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 379-382. (Miao Xiexing, Zhang Jixiong. Analysis of strata behavior in the process of coal mining by gangue backfilling [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4): 379-382. (in Chinese))
- [6] 余伟健, 冯涛, 王卫军, 等. 充填开采的协作支撑系统及其力学特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增1): 2803-2813. (Yu Weijian, Feng Tao, Wang Weijun, et al. Coordination support systems in mining with filling and mechanical behavior [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supp.1): 2803-2813. (in Chinese))
- [7] 韩兴华, 梁卫国, 张建功. 特殊膏体材料充填对开采沉陷控制的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 788-795. (Han Xinghua, Liang Weiguo, Zhang Jiangong. Numerical analysis of mining subsidence control by special paste material backfill [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 788-795. (in Chinese))
- [8] 张立亚, 张宏梅, 刘辉, 等. 超高水材料长壁充填开采地表移动特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增1): 312-316, 331. (Zhang Liya, Zhang Hongmei, Liu Hui, et al. Character analysis of surface displacement due to long-wall backfill mining with super-high water content material [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(Supp.1): 312-316, 331. (in Chinese))
- [9] 刘长友, 杨培举, 侯朝炯, 等. 充填开采时上覆岩层的活动规律和稳定性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 166-169. (Liu Changyou, Yang Peiju, Hou Chaojiong, et al. Movement law and stability analysis of overlaying strata under the condition of mining with filling [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 166-169. (in Chinese))
- [10] 张吉雄, 李剑, 安泰龙, 等. 矸石充填综采覆岩关键层变形特征研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 357-362. (Zhang Jixiong, Li Jian, An Tailong, et al. Deformation characteristic of key stratum overburden by raw waste back filling with fully-mechanized coal mining technology [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 357-362. (in Chinese))
- [11] Li J, Zhang J X, Huang Y L, et al. An investigation of surface deformation after fully mechanized, solid back fill mining [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(4): 453-457.
- [12] Huang Y L, Zhang J X, An B F, et al. Overlying strata movement law in fully mechanized coal mining and backfilling long wall face by similar physical simulation [J]. Journal of Mining Science, 2011, 47(5): 618-627.
- [13] 黄艳利. 固体密实充填采煤的矿压控制理论与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012. (Huang Yanli. Ground control theory and application of solid dense backfill in coal mines [D]. XuZhou: China University of Mining & Technology, 2012. (in Chinese))
- [14] 王家臣, 杨胜利, 杨宝贵, 等. 长壁矸石充填开采上覆岩层移动特征模拟实验[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1256-1262. (Wang Jiachen, Yang Shengli, Yang Baogui, et al. Simulation experiment of overlying strata movement features of longwall with gangue backfill mining [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1256-1262. (in Chinese))
- [15] 李猛, 张吉雄, 姜海强, 等. 固体密实充填采煤覆岩移动弹性地基薄板模型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2369-2373. (Li Meng, Zhang Jixiong, Jiang Haiqiang, et al. A thin plate on elastic foundation model of overlying strata for dense solid backfill mining [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2369-2373. (in Chinese))
- [16] 何福保, 沈亚鹏. 板壳理论[M]. 西安: 西安交通大学, 1993. (He Fubao, Shen Yapeng. Plate theory [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1993. (in Chinese))