2011年 2月

文章编号:0253-9993(2011)02-0234-05

# 矸石倾斜条带充填体参数优化及其稳定性分析

# 郭忠平<sup>1</sup> 黄万朋<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 资源与环境工程学院 山东 青岛 266510;2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院 北京 100083)

摘 要:利用矿压理论、岩板理论及数值模拟方法,对某煤矿矸石条带充填工作面的充填参数进行 了优化,确定了充填60m、留25m的充填方案。通过数值模拟分析,得出了充填体塑性区比例系 数与充填体宽度呈下凹型的幂指数关系。将充填体视为弹塑性体,建立了充填体和上覆矩形薄板 系统的力学模型,运用板壳理论和材料力学理论,给出了顶板最大下沉量计算公式,得到基本顶岩 板的最大下沉量为8.73 cm,其结果与数值模拟相吻合。

关键词:矸石;条带充填体;参数优化;稳定性

中图分类号: TD823.7 文献标志码: A

# Parameter optimization and stability analysis of inclined gangue strip-fillings

GUO Zhong-ping<sup>1</sup> ,HUANG Wan-peng<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering Shandong University of Science and Technology Qingdao 266510 China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering China University of Mining and Technology (Beijing) Beijing 100083 China)

**Abstract**: Using mine pressure theory ,rock plate theory and method of numerical simulation ,the filling parameter of gangue strip-filling working face in a coal mine was optimized ,and the scheme filling 60 m and leaving 25 m was confirmed. According to numerical simulation ,it was obtained that the fillings plastic zone proportional coefficient and the fillings width show power exponential function of concave shape. Then the fillings were regarded as elastic-plastic body to establish the mechanics model which included rectangle thin rock plate and fillings. Using plate mechanics and material mechanics theory ,the calculation formula of the largest displacement of the roof was obtained ,and the largest displacement of main roof plate was accounted to 8.73 cm ,which shows that the result anastomoses with numerical simulation.

Key words: gangue; strip-fillings; parameter optimizing; stability

目前,我国煤矿生产中"三下"压煤问题和地面 "矸石山"的污染问题越来越严重,已成为制约矿山 企业发展的主要问题。

采用矸石充填方法,处理地面或井下产生的矸石 是最有效的解决方法之一。矸石回填采空区,不仅能 够实现绿色开采,解决矿区的矸石污染问题,而且矸 石充填体还可以作为地下结构承载体支承上覆岩层, 控制地表下沉。然而目前全部矸石充填开采还存在 着成本较高、适应性差等缺点,限制了其推广应用。 而条带充填开采方法,就能够在降低充填成本的基础 上达到较好地控制矿山压力的目的,使得在煤矿生产 中得到了广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。

倾斜条带充填试验面是某煤矿第三开采水平六 采区的一个下山工作面。走向长1150 m,倾斜宽度 180 m;煤层平均厚度1.62 m,平均倾角10°;煤层直 接顶为第四层石灰岩,平均厚度5.97 m,致密坚硬, 单向抗压强度为84.31 MPa;四灰以上为灰色粉砂 岩,平均厚度18.31 m;直接底为粉砂岩,平均厚度 0.60 m,致密性脆;基本底为细砂岩,平均厚度 5.17 m,单向抗压强度为60.68 MPa。

收稿日期: 2010-04-06 责任编辑: 柴海涛

基金项目:山东省技术创新计划项目(200830809020)

<sup>?</sup>作者符分3郭忠平(11962\-chd用n山东临朐太)教授-博士aiffel 0512sh86057046uEe mult gip57046@426vcm http://www.cnki.net

# 1.1 未充填区域宽度的确定

倾向条带充填开采的技术原理<sup>[1]</sup>:在采空区内 平行于工作面的方向布置一定宽度的充填体,即倾向 条带充填体,采用条带充填体支撑上覆岩层的重量, 只要保证未充填区域的宽度 b 小于上覆基本顶岩梁 的初次破断极限跨度 L<sub>0</sub>,上覆基本顶岩梁结构就能 保持稳定不断裂,从而可以有效控制采场矿压显现及 地表沉陷。

岩梁的初次破断极限跨度<sup>[2]</sup>L<sub>0</sub>为

$$L_0 = \sqrt{\frac{2m_i^2 \left[\sigma_i\right]}{\left(m_i + \sum m_i\right)\gamma}}$$
(1)

式中  $m_1$ 为强度较高的下部支托层的厚度  $m_i [\sigma_1]为$  $岩梁的允许抗拉强度 ,MPa; <math>m_i$  为随支托层岩梁同时 运动的上部较软弱岩层的厚度 ,m;  $\gamma$  为上覆岩层的 平均容重  $kN/m^3$ 。

根据试验工作面的煤层地质条件 基本顶岩梁上 方没有比其软弱的岩层 不会随基本顶的沉降而发生 沉降 即  $\sum m_i = 0$ ,故式(1) 简化为

$$b \leq L_0 = \sqrt{\frac{2m\left[\sigma_{t}\right]}{\gamma}} \tag{2}$$

式中 *m* 为粉砂岩的厚度 ,取 18.31 m; 粉砂岩的抗拉 强度 σ<sub>1</sub> 取 0.99 MPa; 容重 γ 取 24.1 kN/m<sup>3</sup>。

将以上数据代入式(2)中,得到粉砂岩基本顶岩 梁的断裂步距 $L_0 = 38.8 \text{ m}$ ,即未充填区域宽度 $b \leq 38.8 \text{ m}$ 。

1.2 充填条带宽度的确定

通过对充填体试件的力学试验研究表明 矸石胶 结充填体在三轴受压条件下同样具有弹性变形、屈 服、塑性变形和塑性破坏 4 个阶段 ,其应力状态沿胶 结充填体的宽度方向上呈现非均匀分布<sup>[3]</sup> ,说明条 带充填体同条带煤柱一样在上覆载荷的作用下具有 "塑性区"和"弹性核区"的存在<sup>[4-5]</sup>。其塑性区的宽 度 *R* 要结合现场的实际情况通过试验来确定。在 此 采用 FLAC<sup>3D</sup>软件结合某煤矿试验面的地质条件 进行数值模拟 ,从而确定矸石胶结充填体两侧塑性区 的宽度占充填体整体宽度的比例。

1.2.1 模型的建立

该工作面煤层倾角较小,属于近水平煤层,因此 在数值模拟计算时,按水平煤层考虑。为了保证计算 速度和精度,模型在 x 方向上取 500 m y 方向取工作 面的长度 180 m z 方向取 200 m。模型共有 59 800 21994-2016 China Academic Journal Fleetronic Publ 个单元, 68 859 个节点。三维计算模型如图 1 所示。



图 1 计算模型 Fig. 1 The calculation model

#### 1.2.2 岩石力学参数

各岩层力学参数见表1。

表1 岩层力学参数

```
Table 1 Mechanical parameters of rock seams
```

岩性	密度/ (kg•m <sup>-3</sup> )	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	黏聚力/ MPa	抗拉强 度/MPa	内摩擦 角/( °)
粉砂岩	2 500	2.7	1.6	4.0	1.35	35
四灰	2 580	5.0	3.3	8.1	1.50	38
煤层	1 470	1.2	0.7	1.2	0.40	28
中砂岩	2 400	2.5	1.4	2.5	1.00	30
泥岩	2 100	2.7	1.2	2.5	1.00	33
充填体	1 980	0.6	0.5	0.5	0.30	24

## 1.2.3 模拟方案

根据上述计算,要求未充填区域宽度 b ≤ 38.8 m,考虑到充填体在上覆岩层载荷的作用下两侧 会出现一定宽度的塑性区,导致其支撑能力下降,所 以应适当减小未充填区域的宽度,故取 b = 25 m 进行 模拟计算,具体模拟方案见表2。

表2 模拟方案

	Table 2	Schemes of numerical simulation					
模拟	采高	采深	未充填区域	充填体宽	充填率		
方案	h/m	H/m	宽度 b/m	度 a/m	$\eta / \%$		
Ι	1.6	800	25	30	54.5		
П	1.6	800	25	50	66.7		
Ш	1.6	800	25	70	73.7		

### 1.2.4 模拟结果分析

模型计算平衡后,截取充填体的塑性区分布云图 如图2所示。各充填体塑性区宽度及其占充填体整 体宽度的比例见表3。

通过图表数据显示 不同的充填率下条带充填体 的塑性区宽度不同 塑性区宽度所占充填体整体宽度 的比例 K<sub>b</sub>随充填率 η 的增大而减小。其原因在于, 条带充填的充填率越大,上覆岩层分摊到各单位充填 体条带上的载荷就越小,宽条带充填体之间的相互作 用也就越紧密,从而有效地控制了塑性区的宽度。比





#### 图 2 各方案充填体塑性区分布云图

Fig. 2 The distribution nephogram of fillings plastic zone of each scheme

表 3 不同充填方案中条带充填体的塑性区宽度

 
 Table 3
 The plastic zone width of strip-fillings in different filling schemes

模拟 方案	未充填区域 宽度	充填体宽 度 <i>a</i> /m	充填率 η <sup>/%</sup>	塑性区 宽度 <i>R</i> /m	比例系 数 <i>K</i> <sub>b</sub>
Ι	25	30	54.5	13.1	0.43
П	25	50	66.7	18.5	0.37
Ш	25	70	73.7	17.2	0.25



Fig. 3 The relation curve between  $K_{\rm b}$  and a

由图 3 可以看出,比例系数 K<sub>b</sub>与充填体宽度 a, 也即与充填率 η 的关系不是呈线性降低的关系,而 是呈现下凹型的幂指数关系,并且这种比例关系并不 会随着内摩擦角的变化而有较大的变化。

充填率的增大可以较明显地降低塑性区的宽度, 21994-2016 China Academic Journal Electronic Publi 从而提高充填体的有效支撑宽度,即"弹性核区"的 宽度。不过考虑到充填成本的因素,充填率的增大将 不可避免的加大充填的成本,使煤矿企业利润减小, 影响到条带充填技术在现场的推广应用。据研究,充 填率控制在70%以下,充填体的宽度 *a* 取60 m,就能 满足充填体控制地表下沉的要求。

# 2 充填体稳定性分析

# 2.1 充填体强度分析

# 2.1.1 理论计算

充填体实际承受的载荷<sup>[6]</sup>按下式计算即

$$\sigma_{\rm p} = \gamma H \Big[ a + \frac{b}{2} \Big( 2 - \frac{b}{0.6H} \Big) \Big] \tag{3}$$

充填体所能承受的极限载荷<sup>[6]</sup>为

$$\sigma_{s} = \left(\frac{2\cos\varphi}{1-\sin\varphi} + \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}\gamma H\right)(a-R) \quad (4)$$

根据前面的分析计算,充填体宽度 a = 60 m,未 充填区域的宽度 b = 25 m,上覆岩层平均容重  $\gamma$  取 21 kN/m<sup>3</sup>,采深 H = 800 m,代入式(3)中可得  $\sigma_p =$ 1.41 GPa;充填体的黏聚力 c = 0.5 MPa,内摩擦角  $\varphi = 24^{\circ}$ ,代入式(4)可得  $\sigma_s = 1.72$  GPa,则安全系数 f $= \sigma_s/\sigma_p = 1.72/1.41 = 1.22$ ,满足充填体的强度要 求。

### 2.1.2 数值模拟分析

取出方案 II 中充填体垂直应力及水平应力云图, 如图4所示。



图 4 充填体垂直及水平应力云图

Fig. 4 Vertical and horizontal stress nephogram of fillings

通过图 4 可以看出,在充填体两侧塑性破坏区范 围内,垂直应力载荷范围为 30~40 MPa,水平应力范 围为 20~25 MPa,说明在 800 m 的充填深度,充填体 两侧的水平应力已经达到了较大数值,侧压系数比在 浅部时有了较大的增加。此时充填体所承受的应力 载荷超过了充填体的应力极限,从而使两侧13.5 m 范围内出现了塑性破坏区。而在弹性核区范围内,充 填体所承受的垂直应力范围为20~30 MPa,水平应 力范围为10~15 MPa。

根据前面的理论计算,充填体在全宽度上所承受的垂直载荷为 1.41 GPa,则单位长度上所受到的应 力为  $\sigma_0 = \sigma_p/a = 23.5$  MPa,与数值模拟计算的结果 较为吻合,充填体仍然处于弹性阶段,有较强的支撑 能力。

2.2 充填体压缩量分析

2.2.1 理论分析

根据岩梁理论,只要保证未充填区域的宽度 b 小 于上覆基本顶岩梁的初次破断极限跨度 L<sub>0</sub>,上覆基 本顶岩梁结构就能保持稳定而不断裂,从而可以有效 控制采场矿压显现与地表沉陷。充填体的压缩量与 覆岩的下沉量是保持一致的。随着工作面沿煤层走 向持续向前推进,充填体数目也持续增加,当推进距 离与工作面的长度相当或大于工作面长度的时候,此 时若基本顶岩层持续不断裂,就不能再以梁的理论来 分析上覆岩层的运动,而应将上覆岩层视为矩形薄 板<sup>[7]</sup>,用板壳理论来分析上覆岩层的稳定性。

将采空区近似地简化成为矩形区域 將基本顶看 作一个边界固定的弹性矩形薄板 板的长度及宽度分 别为工作面走向推进长度及工作面长度。将每个充 填体视为一个弹簧和滑块串联在一起的弹塑性模型 (图 5),滑块具有塑性硬化作用,塑性硬化系数为 *K*<sub>y</sub>。当作用在模型上端的载荷小于充填体的弹性极 限强度 σ<sub>0</sub> 时 模型中仅有弹簧工作;当载荷大于 σ<sub>0</sub> 时 则滑块将产生移动,表现出持续的塑性变形。弹 塑性体的本构方程<sup>[8]</sup>为

$$\begin{cases} \sigma < \sigma_0 \ \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \\ \sigma > \sigma_0 \ \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma - \sigma_0}{K_v} \end{cases}$$
(5)

假设充填体的的平均横截面积为 A ,高度为 H<sub>s</sub> , 弹性模量为 E 岩板的厚度为 t ,作用在岩板上的均布 载荷为 q<sub>0</sub>。

基本顶岩板在上覆岩层的作用下将发生弯曲下 沉,由于岩层自身的抗弯强度,将使它自身承受相当 大的一部分载荷,另一部分由下方的充填体承 担<sup>[9-11]</sup>。假设岩层和充填体达到共同的位移挠度*w* 后,系统达到平衡状态。根据材料力学的平板弯曲理 论,建立力学平衡方程<sup>[9]</sup>为



#### 图 5 充填体 - 上覆岩板系统力学模型

Fig. 5 Mechanical model of fillings-roof plate system 其中  $E_0 \ \nu$  分别为岩板的弹性模量和泊松比;  $\nabla^2$ 为拉 普拉斯算子 即  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ ; q 为作用在充填体上 的总载荷,  $q = q_0 + \rho gt$ ,其中  $q_0$ 为上覆岩层载荷; T为 充 填 体 所 承 受 的 载 荷,  $T = wK_yH_gn + (1 - \frac{K_y}{E})\sigma_0H_gn$ ,其中 n为充填体数目。

在矩形薄板四边固支的边界条件下,解式(6)可 得顶板的最大下沉位移<sup>[7]</sup>为

$$w_{0} = \frac{441 \left[q - (1 - K_{y}/E) \sigma_{0} H_{g} n\right]}{128 \left[2K_{y} H_{g} n + 9D(7/x^{4} + 4/x^{2}y^{2} + 7/y^{4})\right]}$$
(7)

根据某矿的实际情况,表土岩层厚度 $h_0 = 800$ m 密度 $\rho_0 = 2\ 100\ \text{kg/m}^3$ ,基本顶岩板厚度 $t = 18\ \text{m}$ , 密度 $\rho = 2\ 500\ \text{kg/m}^3$ ; 工作面推进到 340 m 时,顶板 已受到了最大采动影响,顶板最大下沉值趋于稳定, 则基本顶岩板长 2 $x = 340\ \text{m}$ ,宽 2 $y = 180\ \text{m}$ ; 根据力学 实验,充填的体弹性模量 $E = 2.5\ \text{GPa}$ ,塑性硬化系数  $K_y = 0.05\ \text{GPa}$ ,弹性极限强度 $\sigma_0 = 0.12\ \text{MPa}$ ,充填体 高度 $H_g = 1.6\ \text{m}$ ; 工作面推进 340 m,充填条带数n = 340/(a+b) = 4; 基本顶岩石弹性模量 $E_0 = 18\ \text{GPa}$ , 泊松比 $\nu = 0.24$ 。

将以上数据代入式(7)中得到基本顶岩板的最 大下沉位移 。即中心挠度 w<sub>0</sub> = 0.087 3 m 即顶板的最 大下沉位移约为 8.73 cm。

2.2.2 数值模拟分析

充填体的垂直位移云图如图6所示。



#### 图 6 充填体垂直位移云图

 $D \nabla^2 \nabla^2 w + T = q$  (6) 式中 D 为岩板的抗弯刚度,  $D = E_0 t$  [12(1- $\nu$ )], 由图 6 可以看出,在上覆岩层压力载荷的作用 下,充填体核区内的位移为 5~10 cm,两侧塑性区的 位移为 10~15 cm,与理论计算吻合,说明充填体的 强度及压缩量均满足了控制上覆岩层运动的要求。

综上理论分析,设计的条带充填参数合理,有效 地控制了上覆岩层的下沉,充填体可以充分保持自身 的稳定性。

# 3 结 论

(1) 通过理论研究,确定了某矿试验工作面合理 的条带充填开采参数,即充填体宽度 a = 60 m,未充 填区域宽度 b = 25 m,充填体的安全系数为1.22。

(2) 通过数值模拟分析,得出了充填体塑性区比 例系数 K<sub>b</sub>与充填体宽度 a 的关系呈下凹型的幂指数 关系,并且这种关系不会随着内摩擦角的变化而变 化。

(3) 创建了"充填体 - 上覆岩板"力学模型,计算 得到了顶板的最大下沉量为 8.73 cm,与数值模拟结 果吻合,验证了所建力学模型的正确性。

#### 参考文献:

[1] 许家林,尤 琪,朱卫兵,等.条带充填控制开采沉陷的理论研究[J].煤炭学报 2007 32(2):119-122.

Xu Jialin ,You Qi Zhu Weibing ,et al. Theoretical study of strip-filling to control mining subsidence [J]. Journal of China Coal Society , 2007 32(2):119-122.

[2] 宋振骐. 实用矿山压力控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988:40-69.

Song Zhenqi. Applied controlling of mine pressure [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press ,1988:40-69.

[3] 周爱民. 矿山废料胶结充填[M]. 北京: 冶金工业出版社 2007: 12-13 37-40.

Zhou Aimin. Cementation filling of mining flotsam [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press 2007: 12 – 13 37 – 40.

- [4] 郭文兵, 邹友峰, 邓喀中. 条带开采的非线形理论研究[M]. 徐州:中国矿业大学出版社 2002:132-148.
  Guo Wenbing, Zou Youfeng, Deng Kazhong. Non-linear theoretical study of strip mining [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press 2002:132-148.
- [5] 邹友峰,柴华彬. 我国条带煤柱稳定性研究现状及存在问题 [J]. 采矿与安全工程学报 2006 23(2):141-146. Zou Youfeng ,Chai Huabin. Research status of strip coal pillar stability and its main problems in China [J]. Journal of Mining and Safety Engineering 2006 23(2):141-146.
- [6] 王旭春,黄福昌 涨怀新,等. A. H. 威尔逊煤柱设计公式探讨及 改进[J]. 煤炭学报 2002 27(6):604-608.
  Wang Xuchun, Huang Fuchang, Zhang Huaixin, et al. Discuss and improvement of A. H. Willson design formula [J]. Journal of China Coal Society 2002 27(6):604-608.
- [7] 贺广零 黎都春 濯志文,等. 空区煤柱 顶板系统失稳力学分析[J]. 煤炭学报 2007 32(9):897 899.
   He Guangling Li Duchun Zhai Zhiwen ,et al. Analysis of instability

of coal pillar and stiff roof system [J]. Journal of China Coal Society, 2007 32(9):897 – 899.

[8] 沈明荣,陈建峰.岩体力学[M].上海:同济大学出版社 2006: 34-36.

Shen Mingrong ,Chen Jianfeng. Rock mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press 2006:34 - 36.

 [9] 徐炳建,刘信声.应用弹塑性力学[M].北京:清华大学出版社, 1995:318-323.
 Xu Bingjian, Liu Xinsheng, Applied elastic-plastic mechanics[M].

Au Bingjian "Liu Ainsheng. Applied elastic-plastic mechanics [M]. Beijing: Qinghua University Press ,1995: 318 – 323.

- [10] 李兴尚,许家林,朱卫兵,等.条带开采垮落区注浆充填技术的 理论研究[J].煤炭学报 2008 33(11):1 205-1 210.
  Li Xingshang,Xu Jialin,Zhu Weibing,et al. Theoretical study on the backfill grouting in caving area with strip mining[J]. Journal of China Coal Society 2008 33(11):1 205-1 210.
- [11] 钱鸣高 茅献彪 缪协兴.采动覆岩中关键层上载荷的变化规律
  [J].煤炭学报 J998 23(2):135-138.
  Qian Minggao Mao Xianbiao Miao Xiexing. Variation of lods on the key layer of the overlying strata above the workings[J]. Journal of China Coal Society J998 23(2):135-138.