

基于塑性铰理论的导水裂隙带发育高度预判*

周泽¹, 赵维生¹, 朱川曲², 张开智¹, 段瑜¹

(1. 贵州理工学院 矿业工程学院, 贵阳 550007;
2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:为更客观和准确地对导水裂隙带发育高度进行预判提供理论支撑。以塑性铰理论为基础结合关键层对岩层移动的控制作用,从理论上阐述了导水裂隙带的形成本质是岩层竖向破断裂隙导气导水能力的形成,并通过数值模拟和工程算例对覆岩结构对导水裂隙带发育的影响进行了分析和验证。研究表明:覆岩结构对导水裂隙带的形成和发育有较大影响,处于垮落带范围的关键层破断后若能形成稳定的承载结构,则能有效阻止垮落带向上发展,此时应以关键层所在层位作为垮落带的发育高度;同时,由于导水裂隙带上部岩层下沉空间有限,处于导水裂隙带中上部的关键层在弯曲下沉过程中往往不会发生弯曲破断,从而形成塑性铰结构。此时,可采用塑性铰理论对其竖向贯通裂隙进行分析,确定其导气导水能力,从而对其是否为导水裂隙带的上边界进行判断,进而确定导水裂隙带的发育范围。

关键词:关键层;塑性铰;导水裂隙带;裂隙贯通度

中图分类号:TD325

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)05-1305-08

Prediction of Water Flowing Fracture Zone Height Based on the Plastic Hinge Theory

Zhou Ze¹, Zhou Weisheng¹, Zhu Chuanqu², Zhang Kaizhi¹, Duan Yu¹

(1. Institute of Mining Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550007, P.R. China; 2. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, P.R. China)

Abstract: In order to provide a theoretical foundation for accurate prediction of water flowing fracture zone height. According to the control effect of key stratum on movement of strata, and based on the plastic hinge theory, this paper theoretically explains the formation mechanism of water flowing fracture zone is the formation of the vertical fracture fissure of stratum, and study the influences of stratum construction on water flowing fracture zone height. The research results show that: the stratum construction has a great influence on the formation of water flowing fracture zone. When the bottom key stratum is in the caving zone and it can form stable bearing structure after its broking, the key stratum can prevent the caving zone development, then the height of caving zone is the position of the bottom key stratum. And because of the sinking space of the stratum in the upper part of water flowing fracture zone is limited, the key stratum in the upper part of water flowing fracture zone will not break completely and can form plastic hinge structure in its process of bending and sinking. Then, the plastic hinge theory could be applied to analyze the vertical fracture of key strata, thus, the water transmitting ability of the key strata can be determined, then the upper boundary of the water flowing fracture zone can be judged. Finally the range of water flowing fracture zone can be estimated.

Keywords: key stratum; plastic hinge; water flowing fracture zone; degree of joint across

* 收稿日期:2018-04-11(修改稿)

作者简介:周泽(1990-),男,湖南邵阳市人,讲师,主要从事南方复杂煤层开采的研究。E-mail: 675140761@qq.com

基金项目:国家自然科学基金(51474104);贵州学院学术新苗培养及探索创新项目(黔科合平台人才[2017]5789-14);贵州省科学技术基金(黔科合基础[2017]1072);贵州省教育厅基金(黔教合KY字[2017]219)

0 引言

采用全部垮落法管理采空区时,岩层移动变形由下往上会出现垮落带、断裂带以及弯曲下沉带,其中垮落带和断裂带由于采动裂隙较为发育,又合称为导水裂隙带^[1]。导水裂隙带发育高度的预判对水体下采煤、近距离煤层开采以及上行开采等具有十分重要的意义^[2]。

目前,垮落带以及断裂带发育高度的计算公式应用最广泛的是《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》(简称《规程》)中的经验公式^[3]。《规程》中经验公式的主要计算参数为采高以及碎胀系数,忽略了采场上覆岩层的岩性及结构差异,同时大量的工程实践表明,《规程》中的经验公式的准确性并不高^[4]。因此,我国采矿学者对垮落带以及断裂带的发育高度进行了大量的研究。夏小刚等^[5]研究认为冒落带岩块的碎胀系数决定了冒落带的空隙率,建立了冒落带空隙率的分形计算模型。胡小娟等^[6]采用多元回归方法,建立了综采导水裂隙带高度与硬岩岩性系数、煤层采高、工作面斜长等多因素之间的非线性关系式。尹茂森等^[7]和许家林等^[8-9]研究认为当关键层所在层位小于7~10倍采高时,不能按照《规程》中的公式对导水裂隙带的发育高度进行计算。王志强等^[10,11]基于关键层理论的采场“三带”划分方法,结合实践数据分析了被保护层在“三带”中的层位及相应的卸压效果。冯国瑞等^[12]对长壁开采采场覆岩垂直方向上的损伤程度进行了分析讨论,根据损伤程度的大小将采场覆岩划分了破损垮落带,损伤扰动带以及无损变形带。

综上所述,我国采矿学者采用不同的理论和方法对导水裂隙带的发育进行了研究,取得了丰富的成果。同时,大部分研究成果计算过程相对繁琐,限制了其在工程现场的应用。关键层是在岩层移动过程中对其控制范围内的岩层的移动变形起控制作用的岩层,以关键层理论为基础对导水裂隙带高度进行预判的方法简便可行,且更具客观性。然而,在关键层对导水裂隙带发育的影响研究中多是对其现象的描述,缺乏相应的理论支撑。本文以塑性铰为理论基础并结合关键层理论,对导水裂隙带的发育高度及过程进行分析和判断。

1 导水裂隙带岩层移动特征

1.1 垮落带岩层破断特征及稳定性分析

垮落带即是煤层开采过后,顶板岩层在自重作用下发生断裂且不能自稳,最终垮落的岩层。由于岩层碎胀性的存在,当垮落后的岩层最终充满采空区时,则垮落带不再向上发育。因此,垮落带的发育高度一般计算公式为:

$$h_k = \frac{M}{(k-1)\cos\alpha} \quad (1)$$

式中: h_k 为冒落带高度,m; M 为煤层采高,m; k 为岩体碎胀系数; α 为煤层倾角($^\circ$)。

式(1)将岩层作为均质岩层,忽略了岩层岩性差异以及岩层断裂后的结构稳定性,岩层在发生断裂后并不一定会发生垮落,岩块与岩块有可能形成稳定的承载结构^[13]。若岩层断裂后能形成稳定结构,则其上覆岩层能形成规则破断,垮落带停止发育,岩层破坏进入断裂带。故可将破断后能够形成稳定结构的岩层作为断裂带的下边界,也即垮落带的上边界。岩块不发生滑落失稳和回转失稳需分别满足式(2)和(3)^[14]:

$$h/L \leq 0.25\tan\varphi \quad (2)$$

$$\Delta \leq h(1 - \sqrt{\frac{1}{3n \cdot K \cdot \bar{K}}}) \quad (3)$$

式中: Δ 为岩层极限下沉量, $\Delta = M - (k'-1)H$, M 为采高; k' 为残余碎胀系数; H 为岩层所在层位,即距离煤层的距离,m; h 为岩层厚度,m; L 为岩梁跨距,m; n 为岩石抗压强度和抗拉强度的比值,10~20; K 为根据梁的固支或简支等状态而定,一般为1/2~1/3,简支取1/2,固支取1/3; φ 为岩块间的摩擦角,38°~45°。 \bar{K} 为岩块间挤压强度与抗压强度的比值,其取值范围0.36~0.42^[15]。

当某一岩层断裂后,若能满足式(2)和(3),则该岩层所处层位即为垮落带的发育高度,同时,该岩层也为断裂带的下边界。

1.2 断裂带岩层裂隙发育特征

岩层中的裂隙一般分为2种:一种是竖向破断裂隙,一种是横向离层裂隙。垂直或斜交岩层的竖向破断裂隙会破坏岩层的完整性,控制着岩层的破断,是导气导水的主要通道。断裂带岩层的主要特征是其范围内的岩层产生了破断裂隙,具有导气导

水的能力。当岩层不能产生导气导水的通道时,则可认为该岩层处于断裂带范围外,故断裂带发育范围的确定可认为是对采动覆岩岩层导气导水能力的确定,也即对岩层竖向破断裂隙的分析。

设岩梁为均质无缺陷的等截面梁,随着工作面向前推进,上覆岩梁达到极限跨距时,研究表明岩梁弯矩的极限值分别出现于岩梁的两端(开采区域边缘)以及中部,如图 1 所示。对于初次破断的两端固支岩梁,其破断往往发生在岩梁两端,即虽然导气导水裂缝会出现在采动覆岩的任何区域,但岩梁的两端是贯通裂隙最容易出现的,也即覆岩全范围内最容易发生导气导水的区域。

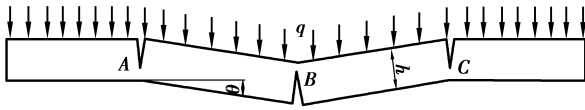


图 1 岩梁断面形成示意图

Fig 1 Formation of rock beam fracture surface

当岩梁断面形成但并未完全破坏时,岩梁以断面为铰发生回转变形,该岩梁变形结构可认为是塑性铰结构^[16]。选取断面 A 为研究对象,建立力学模型,如图 2 所示。

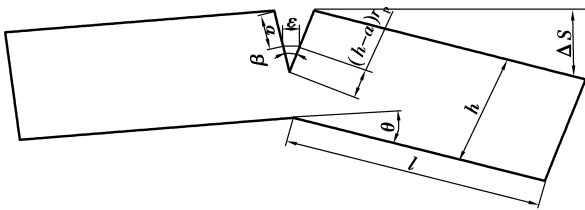


图 2 塑性铰弯曲下沉变形图

Fig 2 Bending deformation of plastic hinge

如图 2 中几何关系可知: $\Delta S = l \times \sin \theta$ 。当岩层破断竖向裂隙不断增大时,有 $2\theta \approx \beta$, 则 $\Delta S = l \times \sin(0.5\beta)$, 根据塑性铰理论^[16], 有:

$$\beta = \frac{\varepsilon}{(h-a)r_p} \quad (4)$$

则: $\Delta S = l \times \sin \frac{2\varepsilon}{(h-a)r_p}$, 解得:

$$a = h - \frac{2\varepsilon}{r_p \arcsin(\Delta S/l)} \quad (5)$$

式中: a 为竖向破断裂隙在层厚方向的长度, m; r_p 为塑性铰转动因子; l 为岩块长度, m; ε 为裂纹尖端张拉位移, m; h 为岩层厚度, m; θ 为岩梁回转角; β 为破断裂缝张开角。 ΔS 为岩层下沉量, 岩层的

自由变形空间, m。设岩层层位(距煤层高度)为 H , 则岩层的自由变形空间为: $\Delta S = M - (k_1 - 1)H_k - (k_2 - 1)(H - H_k)$ 。 l 约为岩梁某处产生的拉应力超过其抗拉强度时的跨距的一半, $l = H \cot \varphi + 0.5L$ 。 φ 为覆岩破断角; L 为岩层的极限破断距; H_k 为垮落带高度, m; k_1 为垮落带岩层残余碎胀系数; k_2 为断裂带岩层碎胀系数。

为描述岩层的破断程度, 国内学者提出了岩层破断度的概念^[17]。当岩层没有产生竖向破断裂隙时, 对应的贯通度为 0; 当岩层的竖向破断裂隙完全贯穿岩层时, 其对应的贯通度为 1。即:

$$D = a/h = 1 - \frac{2\varepsilon}{r_p h \arcsin(\Delta S/l)} \quad (6)$$

式中: D 为岩层破断度, $0 \sim 1$ 。应值得注意的是, 裂隙贯通度的计算是基于岩层未完全破断的基础上。当岩层下部自由空间 ΔS 足够大, 岩层会发生断裂, 则裂隙贯通度计算公式不适用。因此, 裂隙贯通度的计算方法只适用于岩层下部自由空间 ΔS 较小时, 即断裂带的上部或者弯曲下沉带。

对于不同性质的岩层存在有导气导水的阈值 f , 当 $D < f$ 时, 该岩层不导水, 则该岩层处于采场导水裂隙带范围外; 当 $D \geq f$ 时, 该岩层就产生了导气导水裂隙, 则该岩层处于采场导水裂隙带范围内。

2 覆岩结构对导水裂隙带发育影响数值模拟分析

2.1 模拟思路

由前文理论分析可知覆岩结构的稳定性对采动裂隙发展有重大影响。为分析覆岩的岩性、结构差异对导水裂隙带发育的影响。本文采用 UDEC 模拟煤层开采后的覆岩移动, 设计 4 种模拟方案。

方案 A: 煤层为水平煤层, 采高为 3 m, 上覆岩层为均质, 岩块大小一致的泥岩, 模型尺寸为 $240 \text{ m} \times 130 \text{ m}$, 上边界为应力边界, 如图 3(a) 所示。

方案 B: 煤层为水平煤层, 采高为 3 m, 直接顶为 9 m 厚度泥岩, 基本顶为厚度为 4 m 主关键层, 基本顶岩块的划分以保证基本顶在断裂后能够形成有效的承载结构, 其余岩层均为泥岩, 模型尺寸为 $240 \text{ m} \times 130 \text{ m}$, 上边界为应力边界, 如图 3(b) 所示。

方案 C: 煤层为水平煤层, 采高为 3 m, 直接顶为 9 m 厚度泥岩, 基本顶为厚度为 4 m 主关键层,

应注意的是方案 C 中基本顶岩块的划分是 4 种模拟方案中唯一保证基本顶在断裂后不能够形成有效的承载结构,其目的是为了对比分析关键层破断后能否形成稳定的承载结构对导水裂隙带发育的影响。其余岩层均为泥岩,模型尺寸为 240 m×130 m,上边界为应力边界,如图 3(c)所示。

方案 D:煤层为水平煤层,采高为 3 m,直接顶为 9 m 厚度泥岩,上覆岩层存在 3 层关键层,由下往上其厚度分别为 4 m、6 m、10 m;所处层位(与煤层的垂直距离)分别为 9 m、27 m、77 m。其余均为泥岩,模型尺寸为 240 m×130 m,上边界为应力边界,如图 3(d)所示。

在各模拟方案中岩层岩石力学参数均保持一致,只有模拟方案 C 中通过改变基本顶的内聚力和内摩擦角以保证基本顶在破断后不能够形成稳定的承载结构。具体的岩层岩石力学参数如表 1 所示:

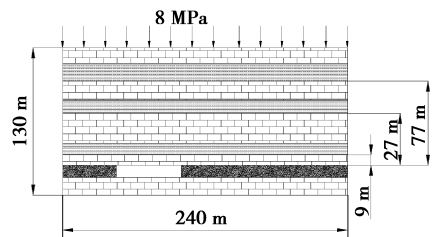
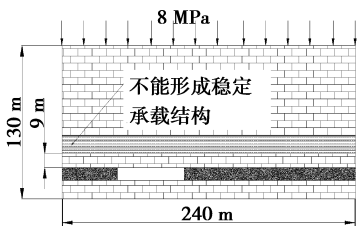
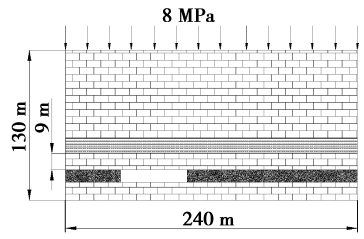
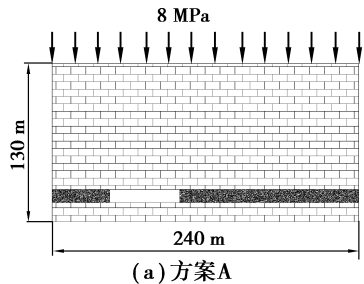


图 3 模拟方案示意图

Fig 3 Numerical simulation scheme

表 1 各模拟方案岩(煤)参数取值

Table 1 Rock mechanics parameters

岩层	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa
页岩	2 145	8.0	6.3	30	1.5	2.2
煤层	1 432	3.3	2.5	27	1.0	0.8
泥岩	2 250	10.0	6.0	30	1.8	3.2
细砂岩	2 513	17.3	9.9	40	3.0	7.2
细砂岩 (方案 C)	2 513	17.3	9.9	35	2.5	7.2

当水平煤层采高为 3 m,取碎胀系数为 1.2 时,根据垮落带发育高度计算公式(1)可知垮落带的理论发育高度为 15 m;根据《规程》中硬岩裂隙带发育高度的计算公式可知导水裂隙带的最大发育高度为 61.9 m。

2.2 关键层对垮落带的影响

由于充分采动后采动裂隙在上覆岩层的重力作用下会重新被压实,使得充分采动时裂隙发育高

度有所降低。因此,为更鲜明地考察煤层开采过后垮落带的发育情况,选用未达充分采动时的覆岩裂隙发育进行分析。各模拟方案采场垮落带发育情况如图 4 所示,图 4 中黑色的为张开的裂隙。

如图 4(a)所示,方案 A 在煤层被开采过后,当破碎岩块充满采空区后,垮落带停止发育。采动覆岩裂隙距离煤层高度大于 20 m 后,裂隙的密度明显变小。故可认为垮落带的发育高度约距煤层

20 m,理论计算的垮落带的发育高度为 15 m。理论计算结果与数值模拟结果较为吻合。

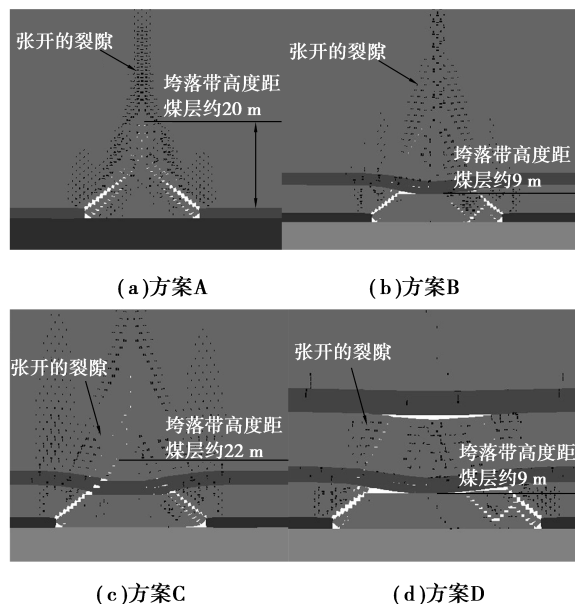


图4 各模拟方案垮落带发育情况

Fig. 4 The caving zone development of each simulation

如图4(b)和(d)所示,在相同的采高条件下,采场顶板岩层存在一层关键层,其距离煤层约9 m,小于垮落带的理论发育高度,且该关键层在破断后能够形成稳定的承载结构。由图4(b)和(d)中能明显看出岩层的垮落发育到关键层后不再向上发育,关键层及其以上岩层呈规则破坏,属断裂带特征。因此,图4(b)和(d)中垮落带的发育高度即为关键层所在层位,距煤层约9 m。由此可知,采场上覆岩层结构对采场垮落带的发育高度有较大影响。

如图4(c)所示,在相同的采高条件下,采场上覆岩层存在一层关键层,距煤层约9 m,小于垮落带理论发育高度。然而方案C中的关键层在断裂后不能形成有效的承载结构,由图4(c)中能明显看出关键层同样发生了垮落,说明虽然采场上覆岩层垮落带内存在关键层,但由于其断裂后不能形成有效的承载结构,方案C中关键层不能有效阻止垮落带的发育,其垮落带发育高度与图4(a)中类似,约距煤层为20 m。由此可见,关键层在断裂后能否形成稳定的承载结构对垮落带发育高度有着重要作用。

综上所述,上覆岩层结构对垮落带的发育高度具有较大影响。当存在有关键层处于垮落带的理论发育高度范围内时,若关键层在断裂后能够形成

有效的承载结构,则垮落带发育高度即为该关键层所在层位;若该关键层不能形成有效的承载结构,则垮落带发育高度与均质块体大小的覆岩结构下的垮落带发育类似。

2.3 关键层对断裂带的影响

为考察采动裂隙的最终发育形态,选取充分采动条件下各模拟方案充分采动条件下断裂带发育情况,如图5所示。

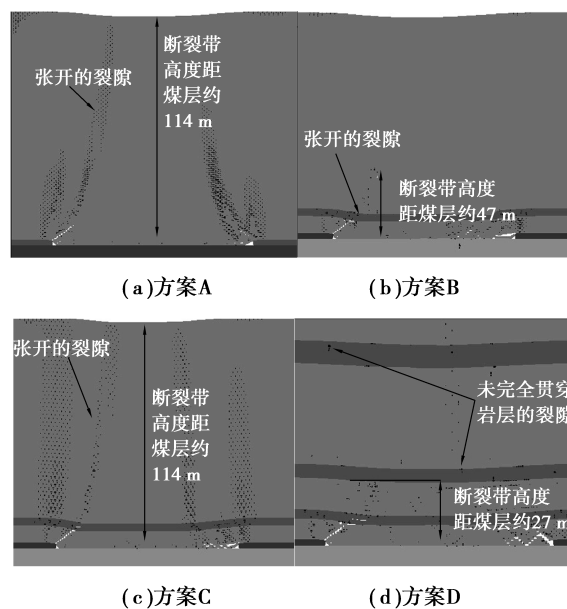


图5 各模拟方案断裂带发育情况

Fig. 5 The fissure zone development of each simulation

由图5(a)可知,在煤层被开采过后,张开裂隙贯穿了整个模型高度,距煤层约为114 m,与《规程》中计算高度差距较大。造成这种巨大差异的原因是由于在数值模拟的过程中,上覆岩层的岩块大小是完全按照均匀的块体大小划分的。而在实际工程中由于采动作用是由近及远的,离工作面较近的岩层更加破碎,离工作面较远的岩层破碎后岩块较大。故而造成了数值模拟断裂带的发育高度大大超过了导水裂隙带的理论发育高度。虽然数值模拟结果与理论计算结果出入较大,但是在相同的模拟环境和参数下,不妨碍4种模拟方案相互比较以研究覆岩结构对断裂带发育的影响。

由图5(b)可知,在相同的采高条件下,采场上覆岩层存在有一层关键层,其距离煤层约9 m,小于垮落带的理论发育高度。且关键层在断裂后能够形成有效的承载结构,使得垮落带的发育高度大大减小,有效抑制了采动作用向上发展,最终造成了模拟方案B中断裂带的发育高度降低,约距煤层47 m。由此可知,处于垮落带理论高度范围内

的关键层在破断后若能形成稳定的承载结构,则能有效阻止采动作用向上发展。

如图5(c)所示,在相同的采高条件下,采场上覆岩层存在有一层关键层,其距离煤层约9 m,小于垮落带的理论发育高度。虽然采场上覆岩层垮落带范围内存在关键层,但由于其断裂后不能形成有效的承载结构。因此,图5(c)中关键层不能有效阻止垮落带的发育,最终造成了模拟方案C中张开裂隙与模拟方案A类似,也贯穿了整个模型,距煤层约为114 m。同时,由图5(c)可知在达到充分采动后采场两端裂隙最为发育,验证了采场两端为最容易形成导气导水通道。综合图5(a)、(b)和(c)可知,关键层处于采场垮落带范围内时,其破断后是否能形成稳定的承载结构直接影响到导水裂隙带的发育。

如图5(d)所示:在煤层开采过后,第1层关键层(距煤层9 m)破断后形成稳定的承载结构,有效的阻止了采动作用向上发展,第1层关键层及其控制范围内岩层即进入断裂带。当岩层移动发展到第2层关键层时(距煤层27 m),第2层关键层的裂隙并未完全贯通关键层,同样的其上方第3层关键层也未被裂隙贯通,如图5(d)所示。因此,模拟方案D中断裂带的发育高度即为第2层关键层所在层位,距煤层约为27 m。由此可见,对于处于断裂带上部或者弯曲下沉带未完全发生破断的关键层,其纵向裂隙并不一定贯穿整个岩层,可以采用塑性铰理论对其贯通度进行分析,确定其导气导水能力,进而确定其是否为导水裂隙带的上边界。

综上所述,关键层对垮落带以及断裂带的发育均有着重要影响,关键层对垮落带发育能否产生影响主要考察其在破断后能否形成稳定结构;关键层对断裂带能否产生影响则主要考察其纵向破断裂隙能否贯穿岩层。

3 导水裂隙带发育高度预计

3.1 垮落带发育高度预计

结合岩层稳定性分析,对垮落带发育高度进行预计的具体步骤为:

(1)根据采高 M 和顶板岩层碎胀系数,代入式(1)求得当采场上覆岩层均质时垮落带的理论高度 H_k 。

(2)根据关键层判别公式^[18],确定关键层位置。

(3)当第1层关键层层位 $H_1 \geq H_k$ 时,则采场垮落带的高度为 H_k 。

(4)当 $H_1 < H_k$,将下方第一层关键层力学参数代入式(2)和式(3)中,对第一层关键层是否失稳进行判断,若第一层关键层能够保持稳定,则垮落带的高度即为第一层关键层的层位 H_1 。

(5)当第一层关键层不能保持稳定时,则对第二层关键层进行判断,重复(1)~(4)步,直至求得垮落带的高度。

3.2 断裂带发育高度预计

根据断裂带裂隙导气导水特征,断裂带发育高度预计的具体步骤为:

(1)根据第 i 层关键层的层位 H_i 求出第 i 层关键层的极限下沉值 ΔS 。

(2)将第 i 层关键层相关参数代入式(6),求得第 i 层岩层裂隙贯通度 D_i ,

(3)当 $D_i < f_i$,第 i 层关键层处于断裂带范围外,断裂带的临界高度在第 $i-1$ 层关键层的控制范围内。

(4)当 $D_i \geq f_i$,则第 i 层关键层完全被裂隙,第 i 层关键层处于断裂带范围内。对第 $i+1$ 层关键层的裂隙贯通度进行判断,重复(1)~(3)步,最终求得断裂带的发育高度 H_i 。

(5)当主关键层处于垮落带范围,且在破断后不能形成稳定的承载结构时应以《规程》中经验公式对导水裂隙带发育高度进行预判。

4 实例分析

文献[8]对祁东煤矿多个工作面的岩层进行了考察,取得了多个工作面的钻孔柱状图,并对采场导水裂隙带的发育高度进行了实测,以及对上覆岩层的关键层进行了判别,如表2所示。为阐述和验证本文理论计算公式和数值模拟结果,引用祁东煤矿的地层资料,对祁东矿导水裂隙带发育高度进行计算。

4.1 祁东煤矿多个工作面垮落带发育高度计算

关键参数取值:取顶板岩层碎胀系数为1.25,残余碎胀系数为1.15,岩层平均容重 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$,岩块间摩擦角 φ 一般取 $38^\circ \sim 45^\circ$,则 $\tan\varphi$ 取平均值0.9。

4.1.1 7₁30工作面D5垮落带发育高度分析

计算参数: $M=2.85 \text{ m}$;第1层关键层层位 $H_1=2.5 \text{ m}$,厚度 $h_1=3.5 \text{ m}$,抗拉强度 $\sigma_t=7 \text{ MPa}$,根据式(1)可得垮落带的理论发育高度为: $H_k=11.4 \text{ m}$,则 $H_1 < H_k$ 。应当对第1层关键层断裂后的稳定性进行判断。由式(2)可知 $h_1/L=0.228 > 0.25\tan\varphi=0.225$ 。因此,第1层关键层将发生滑落失稳。而

第 2 层关键层的层位 $H_2 = 31.88 \text{ m} > H_k$, 因此, 7₁30 工作面 D5 垮落带的最终高度为 11.4 m。

表 2 祁东煤矿多个工作面钻孔岩性

Table 2 Lithology of different drills in Qidong coal mine

层号	厚度/m	岩性	备注	层号	厚度/m	岩性	备注
13	342.60	松散层		13	379.60	松散层	
12	21.20	基岩		12	25.1	基岩	
11	3.25	细砂岩	主关键层	11	4.41	细砂岩	
10	2.30	泥岩		7 ₁ 30 10	1.74	粉砂岩	
9	0.50	6-1煤		9	17.82	6-2煤	
8	7.45	泥岩		8	13.45	泥岩	
7	3.10	6-2煤		7	1.67	粉砂岩	
6	0.55	泥岩		D9 6	11.96	细砂岩	
5	1.60	细砂岩		5	5.52	粉砂岩	主关键层
4	10.38	泥岩		4	1.10	细砂岩	
3	3.50	粉砂岩	亚关键层	3	1.19	粉砂岩	
2	2.50	泥岩		2	5.20	泥岩	
1	2.85	7 ₁ 煤		1	2.30	7 ₁ 煤	

4.1.2 7₁21 工作面 D9 垮落带发育高度分析

计算参数: $M = 2.3 \text{ m}$; 第 1 层关键层层位 $H_1 = 7.49 \text{ m}$, 厚度 $h_1 = 5.52 \text{ m}$, 抗拉强度 $\sigma_1 = 7 \text{ MPa}$ 。根据式 (1) 可得垮落带的理论发育高度为: $H_k = 9.2 \text{ m}$ 。 $H_1 < H_k$, 因此, 应当对第 1 层关键层断裂后的稳定性进行判断。将相关参数代入式 (2) 可得 $h_1/L = 0.705 > 0.25 \tan \varphi = 0.225$ 。因此, 第 1 层关键层将发生滑落失稳。故 7₁21 工作面 D9 垮落带发育高度为 $H_k = 9.2 \text{ m}$ 。

4.2 祁东煤矿多个工作面断裂带发育高度计算

关键参数取值: 设各岩层导气导水的裂隙贯通度阈值 $f = 0.9$ 。根据文献 [19] 研究结论可取 $r_p = 0.46$, 根据文献 [17] 所述可取裂纹尖端极限位移取 3 mm , 垮落带的残余碎胀系数 $k_1 = 1.15$, 断裂带的残余碎胀系数 $k_2 = 1.05$, 取岩层的平均断裂角为 62° 。

4.2.1 7₁30 工作面 D5 断裂带发育高度分析

7₁30 工作面 D5 导水裂隙带发育实测高度为 29.51 m [8]。

根据表 2 可知第 2 层关键层为主关键层, 距离煤层 $H_2 = 31.88 \text{ m}$ 、厚度 $h_1 = 3.25 \text{ m}$ 。主关键层的抗拉强度为 7 MPa , 代入式 (6) 得其贯通度为 $D_2 = 0.31 < 0.9$ 。因此, 断裂带发育高度即为第 2 层关键层所在层位, $H_1 = H_2 = 31.88 \text{ m}$ 。其实测高度为 29.51 m , 误差为 8% 。按照《规程》中硬岩的导水裂隙带计算公式, 其最大发育高度为 61.4 m , 其误差为 108% , 可见按照《规程》中对导水裂隙带高度计算误差非常大。

4.2.2 7₁21 工作面 D9 断裂带发育高度分析

7₁30 工作面 D5 导水裂隙带发育实测高度为

66.48 m [8]。

由前文分析可知, 7₁21 工作面 D9 的主关键层在采场垮落带范围内且会发生滑落失稳, 因此, 可以采用规程里的经验公式对导水裂隙带的发育高度进行预计。7₁21 工作面 D9 钻孔覆岩多为细砂岩和粉砂岩, 为坚硬岩层。根据《规程》中硬岩的导水裂隙带发育高度计算公式, 计算可得 7₁21 工作面 D9 导水裂隙带的最大发育高度为: 57.2 m 。其实测高度为 66.48 m , 误差为 13.9% 。

综上所述, 当上覆岩层存在结构和岩性差异时, 若采用《规程》中的导水裂隙带公式进行计算时, 其误差较大。此时, 应当充分考虑到覆岩结构对导水裂隙带的影响, 如祁东矿 7₁30 工作面 D5 钻孔; 同时, 当覆岩主关键层位于采场垮落带范围内, 且破断后不能形成稳定的承载结构时, 其上覆岩层的结构的影响变得微小, 此时, 可按照《规程》中导水裂隙带发育高度计算公式对其进行计算, 如祁东矿 7₁21 工作面 D9 钻孔。

5 结论

(1) 当关键层处于覆岩垮落带范围内时, 若其能在断裂后形成稳定的承载结构则其能有效阻止垮落带向上发展, 垮落带的发育高度为第 1 层关键层所在层位, 同时也为断裂带的下边界。

(2) 导水裂隙带的本质是岩层竖向破断裂隙导气导水能力的形成。对于处于导水裂隙带上边界未完全破断的岩层, 其下部自由空间较小, 可以采用塑性铰理论分析其竖向破断裂隙, 确定其导气导水能力, 进而确定导水裂隙带的高度。

(3) 应用塑性铰理论揭示了关键层对导水裂隙带发育的影响, 并采用数值模拟和实例分析验证了关键层稳定性对导水裂隙带发育的影响。

参考文献 (References)

[1] 余学义. 开采损害学. [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010. (Yu Xueyi. Mining damage science [M]. Beijing: China Coae Industry Press, 2010. (in Chinese))

[2] Peng S S. Surface subsidence engineering [M]. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and exploration, 1992.

[3] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002. (State Coal Industry Administration. Regulations of pillar arranged and mining underlying buildings, water bodies, railways and main roadways [M]. Beijing: China Coal Industry Press, 2002. (in Chinese))

[4] 李佩全. 淮南矿区水体下采煤的实践与认识 [J]. 中国

- 煤炭, 2001, 27(4): 30-32. (Li Peiquan. Coal mining under surface water bodies in Huainan mining area: Practice and inspiration [J]. China Coal, 2001, 27(4): 30-32. (in Chinese))
- [5] 夏小刚, 黄庆亨. 基于空隙率的冒落带动态高度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1): 102-107. (Xie Xiaogang, Huang Qingheng. Study on the dynamic height of caved zone based on porosity [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(1): 102-107. (in Chinese))
- [6] 胡小娟, 李文平, 曹丁涛, 等. 综采导水裂隙带多因素影响指标研究与高度预计[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 613-620. (Hu Xiaojuan, Li Wenping, Cao Dingtao, et al. Index of multiple factors and expected height of fully mechanized water flowing fractured zone [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 613-620. (in Chinese))
- [7] 伊茂森, 朱卫兵, 李林, 等. 补连塔煤矿四盘区顶板突水机理及防治[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 241-245. (Yi Maosen, Zhu Weibin, Li Lin, et al. Water-inrush mechanism and prevention for fourth panel roof in bulianta coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 241-245. (in Chinese))
- [8] 许家林, 王晓振, 刘文涛. 覆岩主关键层位置对导水裂隙带高度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 380-385. (Xu Jialin, Wang Xiaozhen, Liu Wentao. Effects of primary key stratum location on height of water flowing fracture zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 380-385. (in Chinese))
- [9] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 762-769. (Xu Jialin, Zhu Weibin, Wang Xiaozhen. New method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key strata [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 762-769. (in Chinese))
- [10] 王志强, 冯锐敏, 高运, 等. 突出煤层实现连续卸压的倾斜近距下保护层开采技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2): 3795-3803. (Wang Zhiqiang, Feng Ruimin, Gao Yun, et al. Research on mining technology of nether protective seam in inclined contiguous seams with continuous pressure-relief on outburst coal seam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.2): 3795-3803. (in Chinese))
- [11] 王志强, 李鹏飞, 王磊, 等. 再论采场“三带”的划分方法及工程应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增2): 287-293. (Wang Zhiqiang, Li Pengfei, Wang Lei, et al. Method of division and engineering use of “three band” in the stope again [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(Supp. 2): 287-293. (in Chinese))
- [12] 冯国瑞, 闫永敢, 杨双锁, 等. 长壁开采上覆岩层损伤范围及上行开采的层间距分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1032-1036. (Feng Guorui, Yan Yonggan, Yang Shuangshuo, et al. Analysis on the damage zone of overlying strata and safety layer distance on the upward mining above the longwall goaf [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1032-1036. (in Chinese))
- [13] 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. (Qian Minggao, Miao Xiexing, He Fulian. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in longwall mining [J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 557-563. (in Chinese))
- [14] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010. (Qian Minggao, Shi Pingwu, Xu Jialin. Strata pressure and Surrounding rock Controlling [M]. Xuzhou: China University of Mining and Tehnology Press, 2003. (in Chinese))
- [15] 黄庆亨, 石平五, 钱鸣高. 老顶岩块端角摩擦系数和挤压系数实验研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 60-63. (Huang Qingheng, Shi Pingwu, Qian Minggao. Experiment study on the coefficients of friction and inserting of main roof block corner [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 60-63. (in Chinese))
- [16] 朱锡. 塑性动态断裂过程中梁的塑性转动因子的确定方法[J]. 强度与环境, 1996(4): 28-36. (Zhu Xi. The calculating method about the plastic rotational factor of beam during the process of dynamic plastic fracture [J]. Structure & Environment Engineering, 1996(4): 28-36. (in Chinese))
- [17] 黄炳香, 刘长友, 许家林. 采动覆岩破断裂隙的贯通度研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 45-49. (Huang Bingxiang, Liu Changyou, Xu Jialin. Research on through degree of overlying strata fracture fissure induced by mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 45-49. (in Chinese))
- [18] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(3): 225-230. (Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control [J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3): 225-230. (in Chinese))
- [19] 张莉, 姜越. 三点弯曲试件塑性转动因子的试验研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 1999, 4(4): 105-107. (Zhang Li, Jiang Yue. Effect of yield strength on the plastic rotational factor of three-point bend specimen [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 1999, 4(4): 105-107. (in Chinese))