



蔡音飞,刘健松,冀哲,等.以煤层倾向为参考方向的锐角优化垂线法煤柱设计方法[J].矿业安全与环保,2024,51(4):127-132.

CAI Yinfei,LIU Jiansong,JI Zhe,et al.Acute-angle optimized perpendicular line method for protective coal pillar design with a reference orientation of seam dip direction[J].Mining Safety & Environmental Protection,2024,51(4):127-132.

扫码阅读下载

DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20230247

以煤层倾向为参考方向的锐角优化垂线法 煤柱设计方法

蔡音飞¹,刘健松¹,冀哲¹,李晓静²

(1. 太原理工大学 矿业工程学院,山西 太原 030024; 2. 山西财经大学 公共管理学院,山西 太原 030031)

摘要:垂线法广泛应用于我国矿区地表建(构)筑物的保护煤柱的设计,但其原理中存在走向方向不明确导致计算时需人工干预和小角值拐角处保护煤柱过估等问题。针对村庄尺度的建筑物群,提出应按位置给出不同的开采参数和松散层参数;用煤层倾向作为垂线法的参考方向,代替指向不明确的走向,实现垂线计算公式选择、垂线长度计算的自动化;提出锐角优化算法,解决煤柱角点角值较小时出现的煤柱留设尺寸过大问题。基于上述优化,通过 MATLAB 编程实现煤柱自动化计算,并一定程度上减小了煤柱的尺寸。优化后的垂线法能够更好地应用于矿山保护煤柱设计。

关键词:保护煤柱设计;垂线法;煤层倾向;锐角优化法;村庄尺度

中图分类号:TD73

文献标志码:A

文章编号:1008-4495(2024)04-0127-06

Acute-angle optimized perpendicular line method for protective coal pillar design with a reference orientation of seam dip direction

CAI Yinfei¹,LIU Jiansong¹,JI Zhe¹,LI Xiaojing²

(1. College of Mining Engineering,Taiyuan University of Technology,Taiyuan 030024,China;

2. School of Public Administration,Shanxi University of Finance and Economics,Taiyuan 030031,China)

Abstract:The perpendicular line method is widely used in the design of protective coal pillars for surface buildings or other structures above coal seams,but there are some unsolved problems regarding on its principle,such as the strike direction of the seam is ambiguous,which leads to the need for manual intervention,and the overestimation of the coal pillar at the corners with small angles.Aiming at the buildings of the scale of a village,the mining and loose layer parameters should be given according to the locations.Taking the coal seam dip direction as the reference orientation for the perpendicular line method instead of the unclear seam strike direction,which allows for the automatic selection of the perpendicular line equations and the calculation of the line lengths.An acute-angle optimization algorithm has been proposed to solve the problem of leaving too-large coal pillars at corners with small angle values.Based on the above improvements,the calculation of coal pillars is automated using MATLAB programming,resulting in a certain reduction in coal pillar size.The optimized perpendicular line method can be better applied to the design of protective coal pillars.

Keywords: design of protective coal pillar;
perpendicular line method;dip direction of coal seam;acute-angle optimization;village-scale

收稿日期:2023-03-27;2023-05-11 修订

基金项目:山西自然科学基金项目(20210302124437,201901D111074)

作者简介:蔡音飞(1983—),男,浙江嘉兴人,博士,副教授,主要从事矿山开采沉陷、环境评估与保护方面的研究工作。E-mail:caiyinfei@tyut.edu.cn。

煤炭资源的开发利用对社会经济稳定发展起着至关重要的作用。据国家自然资源部统计,我国2021年一次能源消费总量中煤炭占56%^[1],预测到

2030 年仍将占 50% 左右^[2]。我国 85% 以上的煤炭产量来自地下开采^[3], 由于现在大部分煤矿采用综合机械化开采、全部垮落法管理顶板的生产工艺, 不可避免会对地表造成较为严重的损害。国有煤矿“三下”(建筑物、铁路、水体下)压煤总量超过 133 亿 t, 其中建筑物下压煤占 58.8%^[4], 因此十分有必要采取包括留设保护煤柱在内的各种保护性开采措施, 对地表沉陷进行控制, 对地物进行保护。

保护煤柱是指专门留在井下不予开采的、承担隔离和支撑作用、保护影响范围内受护对象不受损害的那部分煤炭或矿床。“三下”开采指南^[5]推荐的保护煤柱留设方法有 3 种, 分别是: 垂直剖面法、垂线法和数字标高投影法, 总体而言前两者更为常用。

垂直剖面法一般采用图解法, 通过做沿煤层走向和倾向的垂直剖面, 在剖面上确定受护对象的煤柱宽度, 再投影至平面图上获得保护煤柱范围。有学者根据该方法原理, 建立了相应的解析数学模型, 给出了保护煤柱角点坐标的计算公式^[6-7]。

垂线法采用解析法(结合图解), 先确定考虑围护带、松散层(如有)后的保护范围, 再过该保护范围各边界的端点向外做垂线并用公式计算其长度, 然后分别用直线连接各边界 2 条垂线的外侧端点, 围成煤柱范围。有学者对垂线法实现过程中的若干步骤进行优化, 简化了计算过程^[8-9]; 还有学者基于 ArcEngine, 开发了基于垂线法的煤柱计算和可视化系统^[10-11]。

对比上述 2 种煤柱留设方法, 垂直剖面法原理上要求受护范围的边界平行(或垂直)于煤层的走向、倾向, 往往需要扩大实际的受护对象范围使该条件成立, 会造成资源浪费; 而垂线法无此要求, 相比前者可以减少压煤量, 特别是对于受护范围与煤层斜交或者狭长建(构)筑物的情况。

此外, 学者们也尝试对各种特殊条件或者指定对象的保护煤柱留设方法(参数)进行修正和优化, 例如深部开采煤柱^[12]、顶板巷道煤柱^[13]、工业场地煤柱^[14]、井筒煤柱^[15]、井下隔离承压煤柱^[16-18]等。这些优化是在了解项目(区)详细条件的基础上作出的煤柱调整设计, 往往还辅以其他实测、实验手段, 针对性强、准确性高, 但适用性有限。

笔者针对垂线法保护煤柱设计原理进行优化, 对输入数据进行更替、选择煤层倾向(即下山方向)

为参考方向计算垂线长度, 并对锐角处的煤柱留设算法进行优化, 通过 MATLAB 编程实现自动化煤柱范围计算和煤柱尺寸缩减。

1 村庄尺度的垂线法保护煤柱留设原理

垂线法保护煤柱留设的基础理论成熟, “三下”开采指南^[5]和高校教材^[19-20]都对其进行了介绍。本节简要介绍现有方法及其应用于村庄尺度时需要考虑变化的参数。

1.1 保护对象的外界

普通的矿区建筑物, 一般都是矩形外界, 可直接用作保护对象的外界; 对于矿区普遍存在的村庄尺度的建筑物群来说, 其边界一般不规则, 可用人工判断的方法重新圈定整体外界或者用凸包算法计算其最小外接凸多边形作为保护对象的外界。凸包算法有时候会造成保护对象范围扩大的问题, 可以采用折半分治法进行凸包算法的优化^[10], 以取得较好的效果。

如图 1 所示, 设点 j_1, j_2, j_3, j_4 所围多边形为村庄外界, 即垂线法的保护对象。使用垂直剖面法时, 需将保护对象的外界调整为平行(或垂直)煤层走向、倾向的多边形, 一般大于垂线法确定的外界, 将造成资源浪费。

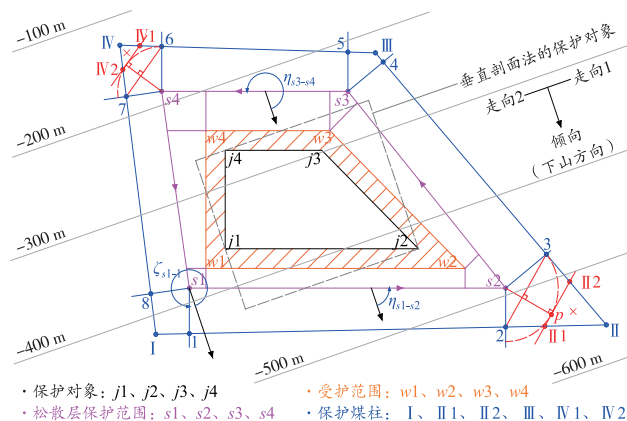


图 1 垂线法保护煤柱设计及优化原理

Fig. 1 Design and optimization principle of perpendicular line method for protective coal pillars

1.2 受护范围

根据“三下”开采规范^[21]中规定的建筑物等级和围护带宽度, 对保护对象的边界进行外扩, 得到围护带的边界, 圈定受护范围。受护范围包含保护对象和围护带, 如图 1 中点 w_1, w_2, w_3, w_4 所围的多边形。

1.3 松散层保护范围

从受护范围边界向外按宽度 s 进行外扩,得到松散层保护边界。宽度 s 的计算公式如下:

$$s = h \cot \varphi \quad (1)$$

式中: h 为计算点处松散层厚度; φ 为矿区松散层移动角。

村庄尺度的建筑物群范围较大,松散层厚度有可能发生变化,应考虑按位置(如村庄的角点)给出厚度参数。此时,各角点外扩的宽度不再相等,应从受护范围边界的各角点向外分别做各边界的垂线,垂线长度仍用式(1)计算,用直线连接各边界 2 条垂线的外侧端点,围成松散层保护范围,如图 1 中点 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 所围多边形。

1.4 保护煤柱范围

从松散层保护边界的各角点向外分别做各边的垂线。垂线偏向上山方向取长度 q ,垂线偏向下山方向取长度 l ,垂线长度 q 、 l 的计算公式分别见式(2)、式(3)。用直线连接各边界 2 条垂线的外侧端点,围成保护煤柱范围,如图 1 中点 I、II、III、IV 所围多边形。

$$q = \frac{(H-h) \cot \beta'}{1 + \cot \beta' \tan \alpha \cos \theta} \quad (2)$$

$$l = \frac{(H-h) \cot \gamma'}{1 - \cot \gamma' \tan \alpha \cos \theta} \quad (3)$$

$$\cot \beta' = \sqrt{\cot^2 \beta \cos^2 \theta + \cot^2 \delta \sin^2 \theta} \quad (4)$$

$$\cot \gamma' = \sqrt{\cot^2 \gamma \cos^2 \theta + \cot^2 \delta \sin^2 \theta} \quad (5)$$

式中: H 为计算点处煤层埋藏深度; h 为计算点处松散层厚度; α 为计算点处煤层的倾角; θ 为各受护边界与煤层走向所夹的锐角; γ 、 β 、 δ 分别为该矿区倾向上山、下山、走向移动角(若保护对象的等级为特级,则上述公式中应使用对应方向的边界角 γ_0 、 β_0 、 δ_0 进行计算); β' 、 γ' 分别为各垂线方向的下山斜向移动角和上山斜向移动角(若保护对象的等级为特级,则这 2 个角为斜向边界角)。

对于村庄尺度的建筑物群而言,由于其范围比单体建筑物大得多,煤层倾角、煤层埋藏深度、松散层厚度可能发生变化,应考虑按位置(如村庄的角点)输入;而单体建筑物范围较小,上述参数可以取固定值。岩移参数(倾向上山、下山及走向移动角和松散层移动角)可从已有的观测站或者附近矿区资料获取,对于一个矿区而言,可取固定值。

2 垂线法保护煤柱留设原理的缺陷与优化方法

垂线法保护煤柱留设原理主要有以下缺陷:

1) 使用煤层走向作为参考方向,指向不明确,计算过程中需辅以人工判断,影响自动化流程。

煤层走向和倾向是矿山常用的 2 个参考方向。相比而言,走向方向的指向不明确,有 2 个相差 180° 的方位角(如图 1 所示),而倾向方向(即倾向下山方向)的指向是唯一确定的。如果仅已知走向方向,无法判断煤层的上、下山方向(需 2 条以上带高程值的走向等高线才能求解倾向,而该过程很难自动化实现),若已知倾向则可以反算走向。因此,本次研究使用煤层倾向(即下山方向)代替原垂线法中的走向作为参考方向。当然,煤层上山方向也是明确的唯一方向,也可以作为参考方向。

① 用煤层倾向选择垂线长度(q 或 l) 计算公式。选择式(2)或式(3)计算垂线长度 q 或 l 时,需判断垂线是偏向上山还是偏向下山方向,无法仅根据走向方向确定。定义角 ζ 为煤层倾向逆时针旋转到垂线方向(将垂线方向定义为垂线从松散层保护边界角点指向外的方向)的角度,可由煤层倾向和垂线方向的方位角相减求得,角值定义在区间 $[0^\circ, 360^\circ)$ 。当 ζ 的值在 $[90^\circ, 270^\circ)$ 时,垂线长度应使用公式(2)计算,反之则用式(3)。例如,图 1 中煤层倾向到垂线 s_1-1 的角度为 ζ_{s_1-1} (数值为 341°),应使用式(3)计算该条垂线的长度。

② 用煤层倾向修正垂线长度(q 或 l) 计算公式。定义角 η 为煤层倾向逆时针旋转到松散层受护边方向(将受护边方向定义为各边逆时针旋转时的方向)的角度,可由 2 个方向的方位角相减求得,角值定义在区间 $[0^\circ, 360^\circ)$ 。例如,图 1 中煤层倾向到松散层受护边 s_1-s_2 和 s_3-s_4 的角度分别为 $\eta_{s_1-s_2}$ 和 $\eta_{s_3-s_4}$ 。由角 η 和角 θ 的定义,得两者关系:

$$\theta = \begin{cases} 90^\circ - \eta, & 0^\circ \leq \eta < 90^\circ \\ \eta - 90^\circ, & 90^\circ \leq \eta < 180^\circ \\ 270^\circ - \eta, & 180^\circ \leq \eta < 270^\circ \\ \eta - 270^\circ, & 270^\circ \leq \eta < 360^\circ \end{cases} \quad (6)$$

需要说明的是:角 η 是方向到方向(矢量到矢量)的转角,而角 θ 是 2 条无方向线的 2 个夹角中的锐角(由于走向方向不明确,无法定义矢量转角,需要在 2 个夹角中选择其一作为确定值);如果煤层倾

向是按照角点提供的,则边的倾向可定义为 2 个角点倾向的平均方向(非平均值)。

由式(6),根据三角函数诱导公式,可导出式(7)和式(8)。再将两式代入式(2)和式(3)即可用角 η 计算垂线长度 q 、 l 。

$$\cos \theta = |\sin \eta| \quad (7)$$

$$\sin \theta = |\cos \eta| \quad (8)$$

以上过程可用矢量计算实现,无需人工判断垂线与煤层上、下山的关系及受护边与走向所夹的锐角 θ ,只需给出煤层倾向(下山方位角)即可。对于村庄尺度的建筑物群来说,煤层倾向应考虑按位置(如村庄的角点)给出。

2) 保护对象的拐角较小时,会造成煤柱范围过估。

当建筑物拐角的角度较小时,垂线法所留设的煤柱会呈现狭长的形态(如图 2 所示),造成煤柱留设面积过大,浪费了煤炭资源。拐角的角度越小,煤柱越狭长,此时不只是浪费了边角煤炭资源,狭长的煤柱还将割裂资源的分布,不利于工作面的布置。

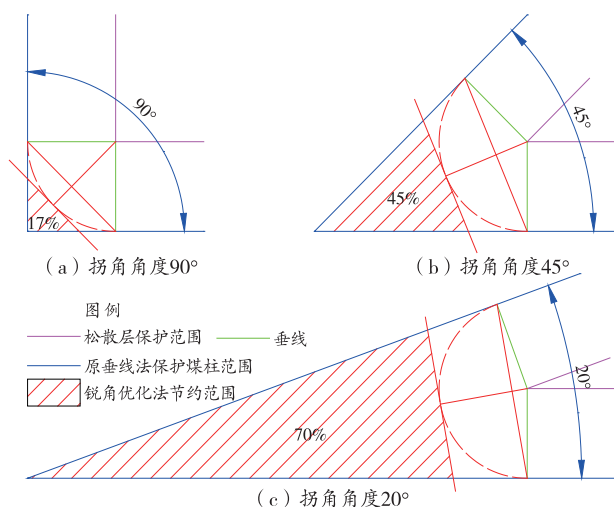


图 2 不同角度下锐角优化法效果

Fig. 2 The effect of acute angle optimization algorithm at different angles

本次研究提出锐角优化法,对拐角为锐角处的保护煤柱范围进行缩减。理论上,拐角为钝角也可以优化,但角度越大效果越不明显,可以根据实际需要确定需要优化的拐角角度。优化的实现原理如下(参见图 1):

①按照优化前的垂线法圈定煤柱范围,如图 1 中点 I、II、III、IV 所围多边形。

②遍历煤柱范围的每个拐角,判断其是否为锐角。例如:图 1 中,角点 II 和角点 IV 处的拐角为锐

角,以下以角点 II 处的煤柱优化过程为例,说明锐角优化法的算法。

③比较角点 II 对应的松散层保护边界 s_2 处的 2 条垂线 s_2-2 、 s_2-3 的长度,将较长的垂线 s_2-3 保存。

④求 2 条垂线的外侧端点 2 和 3 连线的直线方程 $L(2-3)$ 。

⑤过 s_2 向直线 $L(2-3)$ 做垂线,并在其延长线上找到点 p ,使 s_2-p 的长度等于 s_2-3 。

⑥过 p 点做 s_2-p 的垂线(或 $L(2-3)$ 的平行线),与原保护煤柱边界相交于点 II 1、II 2。

⑦用点 II 1、II 2 替换原保护煤柱边界的角点 II,点 II 1、II 2 所围范围为优化后可以开采的范围(从原煤柱范围剔除)。

⑧圈定优化后的煤柱范围,为点 I、II 1、II 2、III、IV 1、IV 2 所围多边形。

上述优化过程的基本思想是,只要开采位于以点 s_2 为圆心、 s_2-3 (s_2 处较长的垂线)为半径的圆形区域以外,就不会影响到 s_2 点。因此,II 1、II 2 连线以外资源可以开采,缩减了原垂线法得到的煤柱尺寸。

如图 2 所示,为了对比不同角度拐角处的优化效果,取保护煤柱拐角的角度分别为 90° 、 45° 、 20° 进行对比,令垂线长度相等,则使用锐角优化法缩小的煤柱面积占垂线外侧煤柱总面积的 17%、45%、70%,即角度越小,优化效果越明显。上述优化面积占比与垂线绝对长度无关;如果 2 条垂线长度不相等,该占比的数值会有所变化,但角度越小效果越好的趋势不会改变。假设垂线长度均为 100 m,压覆煤层为水平、厚度 2 m、密度 1.3 t/m^3 ,则锐角优化法节约的煤炭资源量分别为 0.45 万、2.80 万、13.28 万 t。

综合考虑优化面积占比和节约资源量,认为仅对锐角拐角进行优化即可。

3 垂线法保护煤柱优化设计

沿用传统垂线法煤柱设计的主要流程,本次研究主要对输入数据的要求进行更替(部分数据按照位置输入),以煤层倾向为参考方向选择垂线计算公式并计算垂线长度,对锐角处的煤柱留设算法进行优化。优化算法的设计流程见图 3,优化算法在 MATLAB 中实现。

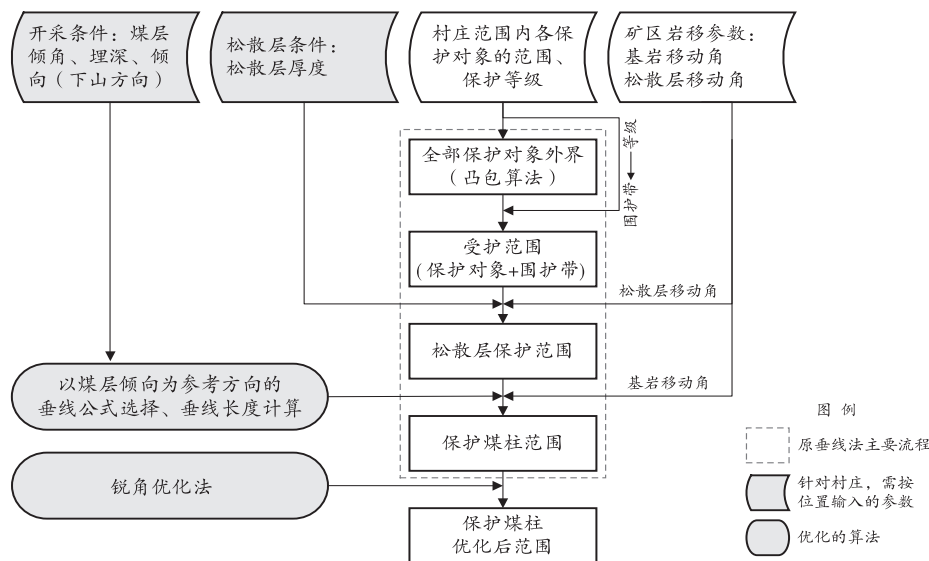


图 3 垂线法保护煤柱优化设计流程

Fig. 3 Optimization design process of vertical line method for protecting coal pillars

1) 对于村庄尺度的建筑物群而言,由于其范围较大,应允许开采条件(煤层倾向 α 、煤层埋深 H 、煤层倾向)、松散层条件(松散层厚度 h)随位置变化。在算法实现时,将这些条件随村庄的角点坐标一起

输入(如是小范围,可考虑输入相同的值)。矿区的岩移参数(倾向上山 γ 、下山 β 及走向移动角 δ 、松散层移动角 φ)可使用统一数值,无需随位置变化。输入数据及要求见表 1、表 2。

表 1 按保护对象角点输入的数据
Table 1 Data inputted by protected object corner points

数据	点号	坐标 X/m	坐标 Y/m	松散层厚度 h/m	采深 H/m	煤层倾向 $\alpha/(^\circ)$	煤层倾向 $\gamma/(^\circ)$
要求	按逆时针或顺时针顺序					$[0,90]$	$[0,360]$

表 2 按矿区统一输入的数据
Table 2 Data inputted uniformly by mining area

数据	走向移动角 $\delta/(^\circ)$	下山移动角 $\beta/(^\circ)$	上山移动角 $\gamma/(^\circ)$	松散层移动角 $\varphi/(^\circ)$
要求	特级建筑物用走向边界角 δ_0	特级建筑物用下山边界角 β_0	特级建筑物用上山边界角 γ_0	

2) 计算考虑围护带的受护范围。

3) 计算松散层保护范围,计算时考虑各角点按照输入的松散层厚度和松散层移动角外扩。

4) 以煤层倾向(输入数据)为参考方向,计算保护煤柱的范围。使用矢量计算方法求煤层倾向逆时针旋转到垂线方向的角度 ζ 、旋转到松散层受护边方向的角度 η ;利用角 ζ 判断垂线的方向、选择垂线计算公式,利用角 η (代替原方法中的角 θ) 计算垂线长度。

设计煤层倾向按角点输入,因此,角 ζ 应使用角点处的煤层倾向计算,角 η 应使用受护边 2 个端点的煤层倾向的平均方向计算。注意,平均方向不是简单的算数平均数,如 359° 和 3° 的平均方向不是 181° ,而是 1° ,需进行判断。

5) 对计算得到的煤柱边界的拐角进行判断,选择小角值的拐角处的煤柱进行优化,剔除过于狭长的保护范围。算法实现时,将锐角判断为小角值进行优化。

4 实例应用

以山西高平古寨村保护煤柱留设为例。该村庄由 15 个拐点圈定,运用凸包算法简化后,村庄拐点缩减为 5 个,保护级别为 3 级(对应围护带宽度 15 m);受 3 号煤层开采影响(综合机械化开采、全部垮落法管理顶板),煤层平均倾向 4.5° ,平均采厚 6.09 m,密度 1.43 t/m^3 ,下山方位角 $45^\circ \sim 60^\circ$;村庄范围松散层厚度 15~30 m,采深 120~175 m;资料显示,走向和倾向上山移动角为 72° ,倾向下山移动角为 70° ,松散层移动角 45° 。

使用基于煤层倾向为参考方向的锐角优化垂线法开发的 MATLAB 程序,计算得到煤柱留设参数见表 3。围护带范围、松散层保护范围、保护煤柱范围见图 4、图 5(MATLAB 程序算出了上述 3 个范围的坐标)。压煤量为 135.34 万 t,较锐角优化前减少压煤 2.05 万 t,占松散层保护范围角点 2'、3'处垂线外侧煤柱资源的 36%。

表 3 村庄煤柱留设垂线计算数据(由程序导出)
Table 3 Calculation data for vertical line setting of coal pillars in villages (exported by the program)

松散层保护范围角点编号	H/m	$(H-h)/m$	倾向方位角/ $(^{\circ})$	垂线	$\eta/(^{\circ})$	$\theta/(^{\circ})$	$\beta'/(^{\circ})$	$\gamma'/(^{\circ})$	q/m	l/m
1'	160	130	60	1'15	35.87	54.13		72.00		42.88
				1'6	84.53	5.47		72.00		43.34
2'	175	145	60	2'7	84.53	5.47		72.00		48.34
				2'8	204.70	65.30	71.63		47.63	
3'	120	105	45	3'9	204.70	65.30	71.63		34.49	
				3'10	303.95	33.95	70.59		36.16	
4'	125	110	45	4'11	303.95	33.95	70.59		37.88	
				4'12	0.10	89.90		72.00		35.74
5'	140	125	45	5'13	0.10	89.90		72.00		40.62
				5'14	35.87	54.13		72.00		41.23

注:传统垂线法中的角 θ 在本优化方法中并不使用,列入此表是为了与角 η 对照、检查。

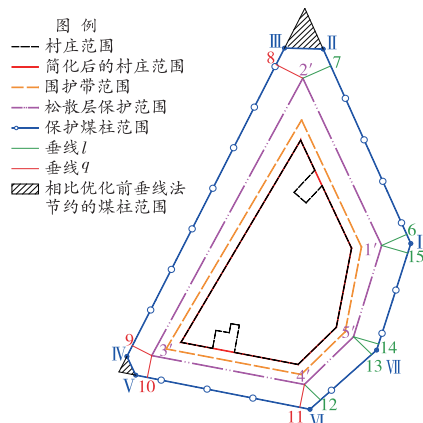


图 4 村庄保护煤柱留设二维结果

Fig. 4 Two dimensional results of protective coal pillars for a village

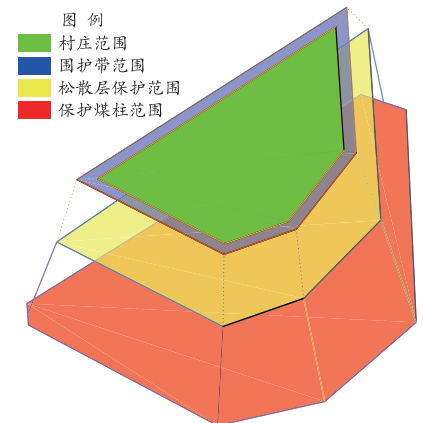


图 5 村庄保护煤柱留设三维结果

Fig. 5 Three dimensional results of protective coal pillars for a village

5 结论

1) 提出以煤层倾向(即煤层下山方向)为参考方向,代替原垂线法中指向不明确的走向方向,用于

选择垂线计算公式并计算垂线长度。去除了垂线法中的人为干涉因素,可实现自动化煤柱设计。

2) 提出锐角优化法,对用原垂线法计算得到的小角值煤柱拐角处进行优化,剔除以垂线为半径的范围以外过于狭长的保护区域,缩减了煤柱尺寸。

3) 针对村庄尺度的建筑物群,提出应按位置给出变化的煤层倾角、埋深、倾向和松散层厚度等参数。

4) 优化后的垂线法一定程度上减小了煤柱的尺寸,实现了煤柱自动化计算,能够更好地应用于单体或者村庄尺度建筑物的煤柱设计。该优化方法是通用的煤柱留设方法,对于高要求的特定工程项目,应详细掌握地质采矿资料,必要时辅以实测和实验进行更精确的煤柱规划。

参考文献(References):

[1] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告-2022[M]. 北京:地质出版社,2022.

[2] 钱鸣高,许家林,王家臣. 再论煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2018,43(1):1-13.

QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018,43(1):1-13.

[3] 胡振琪,肖武,赵艳玲. 再论煤矿区生态环境“边采边复”[J]. 煤炭学报, 2020,45(1):351-359.

HU Zhenqi, XIAO Wu, ZHAO Yanling. Re-discussion on coal mine eco-environment concurrent mining and reclamation[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(1):351-359.

[4] 胡海峰. 变形监测及沉陷工程学[M]. 北京:煤炭工业出版社,2019.

[5] 胡炳南,张华兴,申宝宏. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采指南[M]. 北京:煤炭工业出版社,2017.

[6] 魏峰远,陈俊杰,邹友峰. 垂直剖面法保护煤柱设计的解析模型[J]. 煤炭学报, 2008,33(3):256-258.

WEI Fengyuan, CHEN Junjie, ZOU Youfeng. Analytical model of protective coal pillar design for vertical section method[J]. Journal of China Coal Society, 2008,33(3):256-258.

(下转第 138 页)

- [8] 兰世瑞,宋大钊,李振雷,等.基于损伤因子的断层滑移过程声发射特征试验研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2021,3(3):78-86.
LAN Shirui, SONG Dazhao, LI Zhenlei, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of fault slip process based on damage factor[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(3):78-86.
- [9] 张晨阳,潘俊锋,夏永学,等.真三轴加卸载条件下组合煤岩冲击破坏特征研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(8):1522-1533.
ZHANG Chenyang, PAN Junfeng, XIA Yongxue, et al. Research on impact failure characteristics of coal-rock combination bodies under true triaxial loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8):1522-1533.
- [10] 陈光波,李谭,杨磊,等.不同煤岩比例及组合方式的组合体力学特性及破坏机制[J].采矿与岩层控制工程学报,2021,3(2):80-90.
CHEN Guangbo, LI Tan, YANG Lei, et al. Mechanical properties and failure mechanism of combined bodies with different coal-rock ratios and combinations[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(2):80-90.
- [11] 李晓璐.基于 FLAC3D 的煤岩组合模型冲击倾向性研究[J].煤炭工程,2012,44(6):80-82.
LI Xiaolu. Study on bumping tendency of coal and rock combined model base FLAC3D[J]. Coal Engineering, 2012, 44(6):80-82.
- [12] 李鹏.煤岩渗流—蠕变耦合作用下声发射试验研究[J].矿业安全与环保,2017,44(4):19-23.
LI Peng. Experimental study on acoustic emission of coal and rock under seepage - creep coupling action [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2017, 44(4):19-23.
- [13] 李成杰,徐颖,叶洲元.冲击荷载下类煤岩组合体能量耗散与破碎特性分析[J].岩土工程学报,2020,42(5):981-988.
LI Chengjie, XU Ying, YE Zhouyuan. Energy dissipation and crushing characteristics of coal-rock-like combined body under impact loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5):981-988.
- [14] 卢志国,鞠文君,高富强,等.基于非线性储能与释放特征的煤冲击倾向性指标[J].岩石力学与工程学报,2021,40(8):1559-1569.
LU Zhiguo, JU Wenjun, GAO Fuqiang, et al. Bursting liability index of coal based on nonlinear storage and release characteristics of elastic energy [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(8):1559-1569.
- [15] 卢志国,鞠文君,高富强,等.结构性煤体间歇性破坏行为的实验及数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(5):971-983.
LU Zhiguo, JU Wenjun, GAO Fuqiang, et al. Experimental and numerical simulation research on intermittent failure of structural coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(5):971-983.
- [16] 潘永泰,李泽康,周强,等.点载荷作用下煤岩颗粒断裂强度的试验研究[J].煤炭工程,2022,54(8):97-101.
PAN Yongtai, LI Zekang, ZHOU Qiang, et al. Experiment on fracture strength of coal and rock particles under point load [J]. Coal Engineering, 2022, 54(8):97-101.
- [17] 徐遵玉.松散煤体声发射特征与损伤本构模型[J].煤炭工程,2022,54(9):112-116.
XU Zunyu. Acoustic emission characteristics and damage constitutive model of soft coal [J]. Coal Engineering, 2022, 54(9):112-116.
- [18] 杨丽荣,黎嘉骏,江川,等.岩样破裂过程声发射参数特征与时频特性分析[J].采矿与岩层控制工程学报,2023,5(1):013015.
YANG Lirong, LI Jiajun, JIANG Chuan, et al. Analysis of acoustic emission parameters and time - frequency characteristics in the process of rock sample fracture [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(1):013015.

(责任编辑:林桂玲)

(上接第 132 页)

- [7] 胡海峰,张文波,秦韶芬.铁路保护煤柱设计的垂直断面法修正[J].煤炭技术,2015,34(10):12-14.
HU Haifeng, ZHANG Wenbo, QIN Shaofen. Correction of vertical section method of protective coal - pillar for railway [J]. Coal Technology, 2015, 34(10):12-14.
- [8] 刘海青,张华兴,李凤明,等.垂线法留设保护煤柱的改进[J].煤矿开采,2010,15(4):15-16.
LIU Haiqing, ZHANG Huaxing, LI Fengming, et al. Improvement of protective coal pillar design with vertical line method [J]. Coal Mining Technology, 2010, 15(4):15-16.
- [9] 朱庆伟,信泰琦.垂线法保护煤柱设计的完全解析模型[J].煤矿安全,2015,46(3):44-47.
ZHU Qingwei, XIN Taiqi. Complete analytical model for protective coal pillar design by vertical method [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(3):44-47.
- [10] 张文波.基于 ArcGIS Engine 的保护煤柱留设自动化研究[D].太原:太原理工大学,2015.
- [11] 张杰.基于 ArcEngine 建筑物保护煤柱留设自动化及三维可视化研究[D].淮南:安徽理工大学,2016.
- [12] 柴华彬,王云广,邹友峰,等.深部开采保护煤柱的设计方法[J].测绘科学,2012,37(2):69-70.
CHAI Huabin, WANG Yunguang, ZOU Youfeng, et al. Design of protective coal pillar for deep mining [J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(2):69-70.
- [13] WANG F, CHEN S J, XU J L, et al. New method to design coal pillar for lateral roof roadway based on mining-induced stress: A case study [J]. Advances in Civil Engineering, 2018:4545891.
- [14] 胡锡奎,高文政.矿井工业场地保护煤柱圈定方法的理论研究[J].煤炭学报,1993,18(6):56-62.
HU Xiluan, GAO Wenzheng. Study of method for defining the boundary of protection pillar for surface structures [J]. Journal of China Coal Society, 1993, 18(6):56-62.
- [15] HAN J H, ZOU J Q, HU C C, et al. Study on size design of shaft protection rock/coal pillars in thick soil and thin rock strata [J]. Energies, 2019, 12(13):2553.
- [16] 刘金海,郑学军,刘虎,等.冲击地压矿井采区下山保护煤柱合理宽度研究[J].煤炭科学技术,2021,49(2):52-60.
LIU Jinhai, ZHENG Xuejun, LIU Hu, et al. Study on rational width of protective coal pillar for district dip in rock burst mine [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2):52-60.
- [17] ZHANG S, WANG X F, FAN G W, et al. Pillar size optimization design of isolated island panel gob - side entry driving in deep inclined coal seam—Case study of Pingmei No. 6 coal seam [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2018, 15(3):816-828.
- [18] GHASEMI E, SHAHRIAR K. A new coal pillars design method in order to enhance safety of the retreat mining in room and pillar mines [J]. Safety Science, 2012, 50(3):579-585.
- [19] 何国清.矿山开采沉陷学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1991.
- [20] 邓喀中.变形监测及沉陷工程学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2014.
- [21] 国家安全监管总局,国家煤矿安监局,国家能源局,等.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[S].北京:煤炭工业出版社,2017.

(责任编辑:陈玉涛)