

# 大倾角松软厚煤层巷道优化设计及数值分析

杨仁树<sup>1</sup>, 朱衍利<sup>1,2</sup>, 吴宝杨<sup>1</sup>, 郭东明<sup>1</sup>, 王雁冰<sup>1</sup>, 韩鹏飞<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 山西大远煤业有限责任公司, 山西 忻州 035100)

**摘 要:** 以大远煤业有限公司杜家村煤矿 2 号开采煤层 1201 回采平巷的工程条件为背景, 分析了大倾角松软厚煤层在不同断面形状和支护方式下稳定性问题。采用工程类比法及 FLAC3D 数值分析软件, 对三种方案在不同的巷道断面、支护方式下, 巷道围岩的位移变形情况、应力分布情况进行了模拟分析比较, 研究结果表明, 在同样采用锚网索+钢带的联合支护形式下, 直墙圆拱形巷道形状的垂直和水平变形量比其他两个方案分别低 78% 和 23%, 且应力分布较均匀, 更加适合大倾角松软煤层巷道的开挖支护。论文研究结果可为工程设计和实际应用提供依据。

**关键词:** 大倾角; 松软厚煤层; 断面形状; 支护; FLAC3D

**中图分类号:** TD353<sup>+</sup>.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4051 (2010) 09-0073-05

## Numerical analysis and optimization design of large angle soft thick coal seam roadway

YANG Ren-shu<sup>1</sup>, ZHU Yan-li<sup>1,2</sup>, WU Bao-yang<sup>1</sup>, GUO Dong-ming<sup>1</sup>, WANG Yan-bing<sup>1</sup>, HAN Peng-fei<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Shanxi Grand Yuan Coal Co., Ltd., Xinzhou 035100, China;)

**Abstract:** Against the background of 1201 return airway of Dujiacun coal seam mining 2<sup>nd</sup> Coal, the large dip angle Soft coal seam roadway that in different section shape and supporting mode stability problem is analyzed. By using the Engineering analogy method, and FLAC3D numerical simulation software, the three cross-section shape and supporting scheme is simulated. The results show that, under the joint form of mesh-anchor + steel supporting, the vertical wall round arched roadway vertical and horizontal deformation smaller than the other two programs were 78% and 23%. the stress distribution more uniform and more suitable for excavation and support in the large inclination soft coal seam roadway, and provides a theoretical basis for practical application.

**Key words:** large dip angle; soft and thick seam; section profile; supporting; FLAC3D

煤炭作为我国的主要能源, 在国民经济建设中具有重要的战略地位。在我国矿井中, 大倾角松软煤层储量丰富、分布范围广, 现已形成规模开采。据不完全统计, 在全国统配煤矿和重点煤矿中, 开采大倾角煤层的矿井数约占总数的六分之一<sup>[1-3]</sup>。大倾角松软煤层巷道, 由于煤层倾角较大, 岩石重力作用方向与岩石层理面方向所成的夹角变小, 重力沿层理方向的作用力大大增加, 这就使围岩移动、顶板冒落的形态以及巷道变形和支架受载的特征具有新的特点, 其对巷道的支

护效果要求更高。巷道支护效果的好坏与巷道断面形式是分不开的, 巷道断面形式的不同, 对巷道变形、支护的受力等影响就更大<sup>[4-6]</sup>。因此, 研究这种复杂条件下, 煤层巷道的合理断面形状和支护方式具有实际意义。就国内外的研究情况来看, 大倾角煤层平巷掘进虽然进行了一定研究与试验, 但相关文献较少, 尤其是断面形状对大倾角煤尘巷道稳定性的影响, 缺乏系统而深入的研究。因而, 将断面形状优化、锚网支护理论和技术有效地应用于大倾角厚煤层这类复杂条件下巷道掘进的支护实践, 具有很大的现实意义<sup>[7-10]</sup>。本文拟通过 FLAC3D 数值分析软件, 研究不同巷道断面形状对巷道四周受力及变形的影响, 并对巷道断面进行优化, 最终获得能较好适应于大倾

收稿日期: 2010-04-09

作者简介: 杨仁树 (1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山建设工程方面的教学与研究工作。

角软岩或高地应力条件的巷道断面,以期有效控制巷道的变形,提高支护效果。

## 1 工程概况

井田整体地质构造为单斜构造,煤层走向北东 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ,倾向北西,倾角 $40^{\circ}$ 。巷道布置在2号煤层,上距K3砂岩 $3\sim 5\text{m}$ ,下距L3石灰岩 $30\sim 50\text{m}$ 。煤厚 $0.40\sim 11.25\text{m}$ ,平均 $7.13\text{m}$ 属厚煤层,结构简单,不含夹矸,顶板为泥岩及砂质泥岩,底板为砂质泥岩或泥岩,此煤层属全井田基本可采的较稳定煤层。煤岩的单轴饱和抗压强度 $R_c$ 为 $1.00\sim 1.20\text{MPa}$ ,平均值 $R_c$ 为 $1.118\text{MPa}$ 。煤岩的定性特征和定量指标均表明,该煤质属极软煤<sup>[11]</sup>。该矿井最大主应力与水平方向的夹角平均为 $14.5^{\circ}$ ,最大主应力大小为竖直应力的 $1.04\sim 1.38$ 之间,矿井的地应力场以水平构造应力为主,巷道在倾向上与最大水平应力具有一定的夹角,对巷道破坏造成一定的影响。

## 2 数值模拟研究

FLAC3D程序能较好地模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏或塑性流动的力学行为,特别适用于分析渐进破坏和失稳以及模拟大变形。连续介质快速拉格朗日差分法(Fast Lagrangian analysis of Continua),是近年来逐步成熟完善起来的新型数值分析方法。在采矿工程中,许多学者利用FLAC软件对采矿过程中,围岩活动规律及巷道围岩稳定性问题涉及到的岩体力学特性、围岩压力、支护围岩相互作用关系及巷道与工作面的时空关系等一系列复杂的力学问题,进行了系列研究,取得了显著的成果<sup>[12-13]</sup>。因此,本文采用FLAC3D大型数值分析软件,对巷道的不同的支护方式、断面形状时进行数值模拟分析研究,对比在不同方案下,巷道围岩的位移变形情况、应力分布情况、塑性区分布情况等,以确定最佳方案。

### 2.1 设计方案及比较

根据巷道的用途和服务年限、矿山压力和岩石的物理学性质、巷道的支护形式和支护材料、施工技术及其装备情况,选取三种断面形状形式进

行模拟分析。如图1所示。

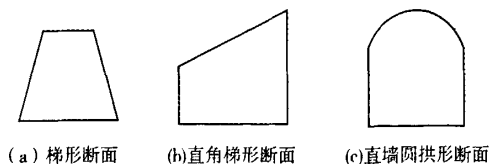


图1 巷道断面

三个方案分别为:梯形断面+架棚支护;直角梯形断面+锚索锚杆联合支护;直墙圆拱形断面+锚索网钢带支护。从受力方面分析:方案二有明显的缺点,上帮尖角处会产生应力集中,有可能产生大变形导致巷道的失稳;相比方案二,方案三的马蹄形断面受力好得多,围压可以沿巷道周边分散,在一定程度上可以有效的防止应力集中造成的大变形;方案一,顶板暴露面积较小,可减少顶压能承受稍大的测压。在掘进方面:方案一、二占有明显的优势,梯形断面好掌握尺寸,断面课轻松掘出,架棚子、挂网和安设锚杆、锚索都没有太大的难题;而方案三的断面比较难掘出,弧形断面不好把握,另外,钢带也要加工成有一定弧度。但从返修率来说,方案三还是有优势的,大量的工程实例说明,直墙圆拱断面的返修率远小于梯形断面。以下通过应用FLAC3D软件对以上三个方案进行数值模拟分析,以确定最利于巷道稳定和力学效应的方案。

### 2.2 模型建立

考虑模型尺寸为巷道宽度 $3\sim 5$ 倍影响范围,模型尺寸为 $40\text{m}\times 25\text{m}\times 30\text{m}$ 。程序中,为了减少因网格划分引起的误差,网格的长宽比不大于5,对于重点研究区域,可以进行网格加密处理。本次模拟分析所用的模型网格数目,大致都在1200个单元网格。综合考虑计算的速度和精确度,岩层的网格尺寸要大于煤层的网格尺寸。对于需要开挖或者支护的工程,在建模过程中先进行规划,调整网格结点,安排开挖以及支护的位置等,然后根据实际工程确定本构关系,给模型赋以相应的力学参数,见表1所示。

表1 巷道围岩物理力学参数

围岩	岩性	密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	体积模量/ $\text{MPa}$	剪切模量/ $\text{MPa}$	内摩擦角/ $^{\circ}$	抗拉强度/ $\text{MPa}$	黏聚力/ $\text{MPa}$
顶板	砂岩	2640	$7.32\times 10^3$	$7.63\times 10^3$	35	1.36	2.4
煤层	煤	1450	$1\times 10^3$	$1.14\times 10^3$	20	1	1.5
底板	砂岩	2580	$7.32\times 10^3$	$7.63\times 10^3$	35	1.36	2.4

模型的边界条件，包括位移边界和应力边界两种。模型边界的处理方法是：左右边界只约束  $x$  方向上的位移，前后边界只约束  $y$  方向上的位移，即单约束边界；下部边界为全约束边界；上部边界不约束，为自由边界；模型的垂直压应力，按巷道上覆岩体的自重考虑，根据地应力测试结果，岩体的垂直应力为  $6.75\text{MPa}$ ，岩体的水平应力为  $13.36\text{MPa}$ 。其中，围岩的杨氏模量为  $18\text{GP}$ ，泊松比为  $0.18$ 。煤层的杨氏模量为  $2.6\text{GP}$ ，泊松比  $0.14$ 。模型见图 2 所示。

2.3 模拟情况及分析

利用弹性本构模型，对计算模型施加重力加速度，在小变形模式下运算至平衡后，得到计算模型的初始应力状态。然后，将模型设为库伦摩尔模型，运用 Apply 命令，在模型四周表面施加原岩应力，运算至塑性平衡状态。再将模型位移置零，对巷道进行全断面一次开挖，然后建立

适当的结构单元模拟相应的巷道支护方式，运算至平衡后，监测到巷道的最大不平衡力、竖直方向上的位移分布图、水平方向上的位移分布图、塑性区分布图以及最大主应力分布图。

图 3 反映了巷道开挖后的最大不平衡力的变化过程。从曲线可以看出：方案一中，巷道最大不平衡力达到了  $16.73\text{MPa}$ ，运算至 9680 时步趋于稳定；方案二中，巷道最大不平衡力达到了  $10.83\text{MPa}$ ，运算至 16060 时步趋于稳定；方案三中，巷道最大不平衡力达到了最大值  $10.5\text{MPa}$ ，运算至 12940 时步趋于稳定。可见方案三在模型达到平衡过程中显现的最大不平衡力最小，即最不易失稳。这里需要指出的是，力平衡状态仅表示所有网格节点的合力为零，并非表明体系处于真实的物理平衡状态，因为在力平衡状态下，体系也有可能正在发生稳定的塑性流动。

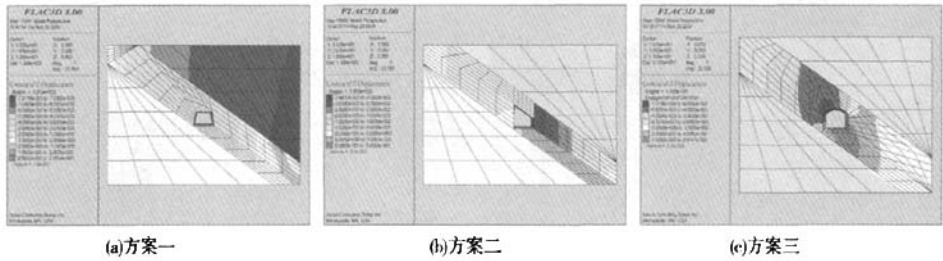


图 2 各方案模型图

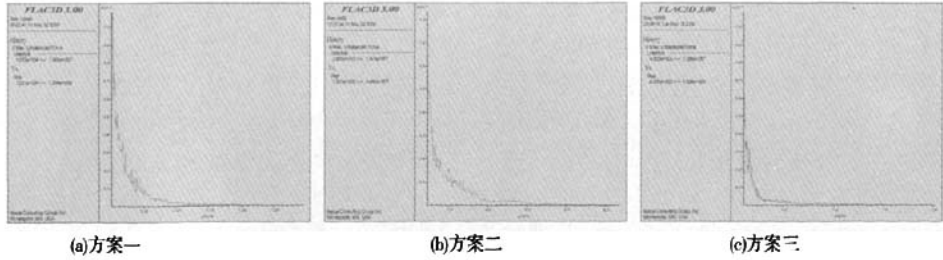


图 3 巷道最大不平衡力监测图

图 4 为放大 100 倍后的巷道围岩，在竖直方向和水平方向上的位移分布云图。从图 4 (a) 可看出，梯形断面巷道在采用工字钢架棚的支护方式下，巷道顶板沉降量较大，整个模型的最大沉降量为  $11.83\text{mm}$ 。水平变形方面，各点的位移量均不大，整个模型的最大水平位移为  $3.9\text{mm}$ 。由图 4 (b) 可以看出，直角梯形断面巷道在采用锚网索+钢带的联合支护方式下，巷道左帮上角沉降量较大，最大沉降量为  $34.47\text{mm}$ ，底板有轻微鼓起，

大约在  $5\text{mm}$  左右，距巷道的巷帮及顶底越近，围岩的水平位移越大，巷道右帮水平位移量较大，最大水平位移量为  $32.03\text{mm}$ 。图 4 (c) 反映了直墙圆拱形断面的巷道变形情况，竖向变形方面可看出巷道左帮上角沉降量较大，为  $7.57\text{mm}$ ，底板右下角有轻微的鼓起，大约在  $4\text{mm}$  左右。巷道左下角和右上角的水平位移较大，都在  $3\text{mm}$  左右，只是二者的位移方向相反；另外，不论是垂直位移量还是水平位移量，都比前两者方案较小。

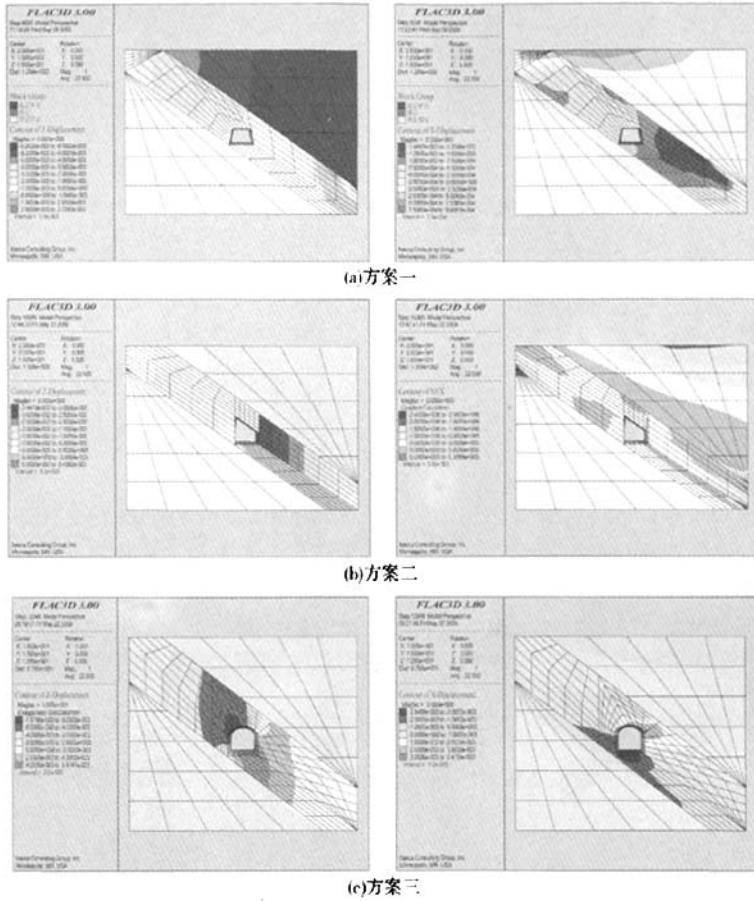


图 4 不同方案的巷道围岩变形云图

图 5 为巷道竖直、水平方向上的应力分布图。从图 5 (a) 可看出,采用锚网索+钢带的联合支护方式下,模型中竖直方向上的应力最大为 71MPa,在模型左下角出现应力集中。巷道周围应力最大处发生在左下帮,约为 20MPa。从图 5 (b) 可看出,巷道四周的水平应力均较小,模型中的最大应力发生在左上角,最大值为 12MPa,巷道周围应力较大处发生在左底脚,约为 5MPa,与前者方案相比相比应力绝对值较大,但是应力集

中的现象较轻,有利于巷道及支护的稳定性。

FLAC 中设定拉应力为正,压应力为负,而围岩的抗压强度一般远大于抗拉强度,巷道的稳定性主要取决于最大主应力的方向和大小。图 6 为巷道围岩最大主应力分布图,由图 6 可见:方案一中,最大主应力为 1.3MPa;方案二中,最大主应力为 1.2MPa;方案三中,最大主应力为 2.0MPa。易见方案三比方案一、二稍大。

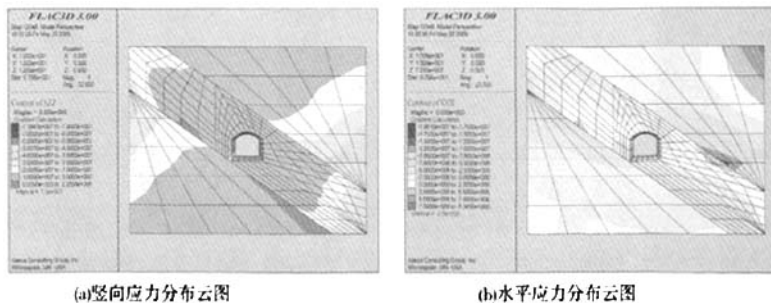


图 5 巷道围岩应力云图

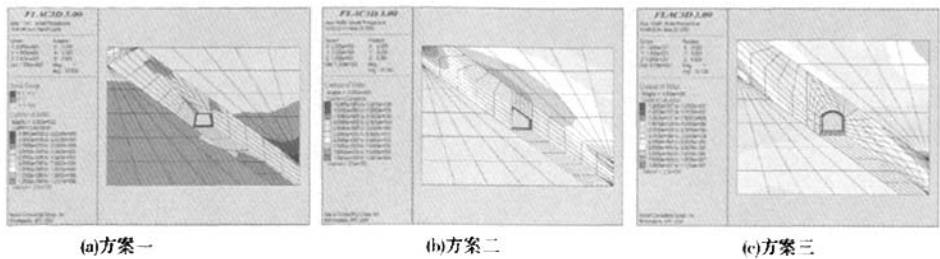


图 6 巷道围岩最大主应力分布云图

综合以上分析可见，虽然在应力方面方案三的巷道围岩各应力值相对前两个方案较大，但是由于直角圆拱形断面的尖角较少，应力集中效应相对前两方案也相对较小，因此巷道围岩的变形量较小（表 2），也不易发生脆性破坏。

表 2 方案变形量比较表

方案号	方案一	方案二	方案三
最大水平变形量/mm	11.83	34.47	7.53
最大垂直变形量/mm	3.9	32.03	3

3 工程应用

为验证以上数值模拟的结果，在 1201 回风巷道施工中，分段采用以上三种方案，分别进行了现场试验并进行了矿压观测，在巷道内布置矿压测站 6 个，测站的间距为 40m。截至 2009 年 8 月 16 日，方案一的监测数据为：各观测点的平均顶底板相对移近量为 102mm，两帮相对移近量为 78mm；方案三的监测数据为：个观测点的平均顶底板移近量 33mm，两帮移近量为 21mm；方案二施工中，出现较大变形甚至垮落，故不再进行变形监测。由此可见，巷道表面变形量与数值分析结果基本吻合，说明了方案三比方案一、方案二在控制表面变形具有优势。

4 结 论

通过对杜家村煤矿 1201 回风巷道三种不同断面布置形式、支护方式进行的数值模拟分析试验可知，锚网索+钢带的联合支护形式下，直墙圆拱形巷道整体变形量较小，应力集中效应较轻，该方案更适合大倾角松软煤层巷道的开挖支护。

结果表明，大倾角煤层巷道采用矩形或斜梯

形断面受力情况不好，支护效果差，巷道变形量大，易导致巷道支护失效；而采用直墙切圆拱或直墙半圆拱断面，在对巷道受力大的部位，如巷道的上帮顶角和下帮底角采取加强支护等措施后，可解决大倾角巷道的支护问题。

参考文献

[1] 王红卫. 急倾斜煤层回采巷道维护方法探讨 [J]. 甘肃科技纵横, 2003, 32 (5): 50-51.

[2] 东兆星, 吴士良. 井巷工程 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1999: 325-327.

[3] 何满潮, 邹正盛. 软岩巷道工程概论 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2001: 265-267.

[4] 范公勤. 缓倾斜煤层回采巷道断面选择研究 [J]. 西安矿业学院学报, 1994 (3): 13-14.

[5] 俞万禧. 急倾斜煤系岩层中巷道地压与支护 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1998, 15 (2): 31-33.

[6] 石平五, 高召宁. 急斜特厚煤层开采围岩与覆盖层破坏规律研究 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (1): 13-16.

[7] 邵祥泽, 潘志存, 张培森. 高地应力巷道围岩的蠕变数值模拟 [J]. 采矿安全工程学报, 2006, 23 (2): 23-26.

[8] 孙晓明, 何满潮. 深部开采软岩巷道耦合支护数值模拟研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34 (2): 166-169.

[9] 任德惠, 聂豪权, 刘双关. 急倾斜煤层矿压分布规律 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1987, 4 (2): 50-53.

[10] 方伯成. 大倾角工作面矿压显现分析 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1995, 12 (4): 26-30.

[11] 李宁, G. Swoboda. 当前岩石力学数值方法的几点思考 [J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16 (5): 502-505.

[12] 陈育民, 徐鼎平. FLAC3D 基础工程与实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 408-410.

[13] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 367-368.