

深部巷道围岩承载结构的数值分析

李树清^{1,2}, 王卫军^{1,2}, 潘长良²

(1. 湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 围岩承载结构的稳定是深部巷道支护成功的关键。应用岩石峰后应变软化本构模型对深部巷道进行数值模拟研究, 分析了深部巷道与浅部巷道围岩承载结构的差别, 探讨了支护阻力对深部巷道围岩承载结构的影响。研究结果表明: 深部巷道围岩中存在围岩强度高、弱软化区域交替出现的现象; 而提高支护阻力可以缩小围岩强度软化区域范围, 减小围岩强度软化程度, 改善巷道围岩应力分布状况。得出了支护阻力通过控制围岩强度软化, 提高围岩自承能力, 实现深部巷道围岩承载结构稳定的目的结论。

关键词: 深部巷道; 承载结构; 应变软化; 数值分析

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)03-0377-05

作者简介: 李树清(1969-), 男, 湖南湘阴人, 副教授, 博士研究生, 主要从事巷道围岩控制和矿山安全工程方面的研究工作。

Numerical analysis on support structure of rock around deep roadway

LI Shu-qing^{1,2}, WANG Wei-jun^{1,2}, PAN Chang-liang²

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The stabilization of the rock support structure is the key to the success in the deep roadway supporting process. Numerical simulations of the deep roadway were carried out through application of the strain-softening constitutive model. Differences between the deep and shallow roadways of the rock support structure were analyzed. Influences of the support resistance on the rock support structure at the deep roadway were discussed. It was shown that there was alternation of strong and weak strength-softening region in the surrounding rock of deep roadways. However, the increase in the support resistance cut down the size of strength-softening region of surrounding rock, decreased its strength-softening degree, and improved the stress distribution condition of the surrounding rock mass. It was concluded that the support resistance would raise the self supporting ability of surrounding rock through controlling its strength-softening so as to make the rock support structure of deep roadways stable.

Key words: deep roadway; support structure; strain-softening; numerical analysis

0 引言

深部巷道支护是深部开采必须解决的关键问题。深部巷道围岩中原岩应力高, 必须调动围岩的自身承载能力才能维护巷道的稳定。为研究巷道围岩的自承能力, 将承载结构分为巷道支护承载结构和巷道围岩承载结构, 支护承载结构指锚固体、注浆体及支架等巷道支护结构, 围岩承载结构指巷道围岩应力峰值线附近, 以部分塑性硬化区和软化区岩体为主体组成的承载结构。近年来, 对巷道围岩承载结构的研究成为巷道支护的一个重要研究领域, 已有的研究成果包括: 支护与围岩的相互作用原理阐释了不同支架特性、不同支护时机与围岩的相互作用关系^[1]; 主次承载区理论认为巷道周边存在主要和次要承载区, 它们相互作

用, 共同维护巷道的稳定^[2, 3]; 关键承载圈理论认为巷道围岩内部存在一个起主要承载作用的岩石圈^[4, 5]; 隧道围岩的自承体系认为隧道围岩中存在压密区和松动带, 压密区围岩对围岩应力取主要支承作用^[6, 7]; 软岩巷道弹塑性状态圈状模型将巷道周边岩体分为4个区, 即塑性流动区、塑性软化区、塑性硬化区和弹性区, 塑性硬化区是围岩承载的主体, 塑性软化区和塑性流动区是实施支护的对象^[8, 9]; 支护阻力对软岩巷道围岩岩性和围岩应力的控制作用^[10]; 支护对巷道

基金项目: 湖南省教育厅青年基金资助项目(04B020); 湖南省教育厅一般项目(05C174); 中国博士后科学基金资助项目(2004035651)

收稿日期: 2005-05-16

周边大范围围岩性状的控制作用^[11, 12]。在与上述理论或成果相关的文献中,文献[1~5]利用弹塑性理论和摩尔-库仑本构模型对圆形巷道的围岩承载结构进行了分析;文献[6, 7]利用弹塑性理论和 Drucker-Prager 本构模型对隧洞围岩承载结构进行了数值分析;文献[8, 9]利用弹塑性理论和岩石峰后应变软化本构模型研究了软岩巷道支护载荷;文献[10]利用弹塑性理论和岩石峰后应变软化本构模型对不同支护阻力下软岩巷道围岩岩性和围岩应力进行了数值分析;文献[11, 12]通过理论分析和数值计算手段探讨了加固帮角对巷道周边大范围围岩性状的影响。由于深部巷道围岩变形的过程伴随着围岩强度的弱化,因此仅考虑岩石峰前强度特征的计算分析不能全面揭示深部巷道围岩承载结构的特征。基于此,本文利用 FLAC 数值模拟软件中的岩石峰后应变软化本构模型对深部巷道围岩承载结构进行了深入研究,这对揭示深部巷道支护机理有着重要意义。

1 数值计算模型的建立

为分析深部巷道围岩承载结构的特点及支护的作用,本文考虑了浅部、深部两种开采条件,采深分别为 300 m 和 800 m,对不同支护阻力下的巷道进行了模拟。建立的几何模型尺寸为宽×高=60 m×60 m,网格为 120×120,模型中原岩处于侧压系数近似为 1 的静水压力状态,原岩应力的大小按巷道上方覆岩体的自重考虑,分别为 7.5 和 20 MPa。采用平面应变模型,约束条件是左右边界水平约束,铅垂自由,上边界承受垂直应力,水平自由,底边界铅垂约束,水平自由。拱形断面巷道,宽 4.0 m,墙高 1.4 m,巷道顶板和两帮恒阻支护,底板不支护,支护阻力分别为 0、0.1、0.2、0.3、0.5、0.7、1.0 MPa。模拟采用的本构模型为应变软化模型,岩性参数参考文献[13]为:岩石容重 25 kN/m³,弹性模量 3 GPa,泊松比 0.25,其他参数见表 1。

表 1 岩石力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock					
塑性剪应变	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	粘聚力 c/MPa	剪胀角 $\psi/(^{\circ})$	塑性拉应变	抗拉强度 α_t/MPa
0.0000	23	1.5	0	0.0000	0.550
0.0005	30	1.5	15	0.0005	0.430
0.0100			15	0.0100	0.299
0.0404		0.15		0.0400	0.180
0.0300			5	0.0800	0.120
0.0370	30			0.1000	0.120
0.1000		0.15			

2 深部巷道围岩承载结构的特点

2.1 深部巷道围岩变形分析

图 1 是无支护时深部巷道围岩深基点位移及应变

的数值模拟结果。没有支护的情况下,巷道围岩位移主要发生在巷道 5 m 范围内的围岩,巷帮围岩和顶板围岩位移主要集中在离巷道周边 2.0 m 范围内,而巷道底板发生位移主要集中在 0~2.3 m 的范围。巷道顶板深部围岩(5 m 以外)仍然有较大的位移,而巷道两帮和底板深部围岩(5 m 以外)则基本没有位移。图 2 是图 1 中围岩位移相对应的应变分析结果。深部巷道围岩应变存在波动现象,一个区域的大应变又接着一个区域的较小应变,直至发展到小应变区域。与巷道围岩位移对应,巷道围岩的大应变区域均集中在 5 m 范围的围岩内,其中,巷道顶板围岩大应变区域在周边 1 m 范围的岩体内,巷帮围岩大应变区域在离周边 0.5~1.5 m 范围的岩体内,巷道底板围岩大应变区域在离周边 1~2.3 m 范围的岩体内。

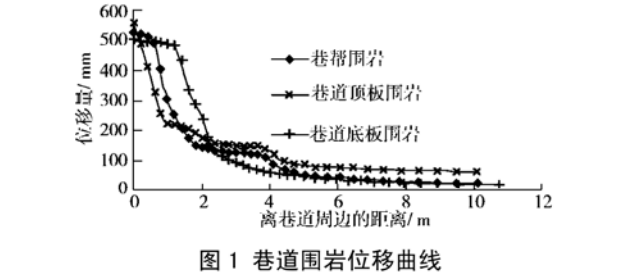


Fig. 1 Displacement curves of surrounding rock of roadway

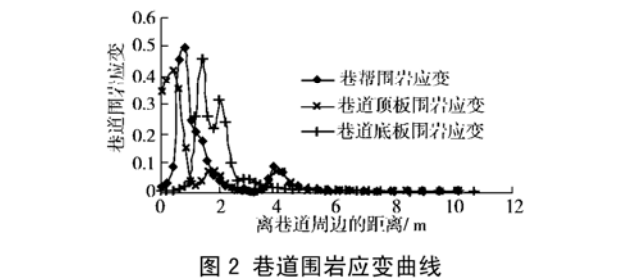


Fig. 2 Strain curves of surrounding rock of roadway

2.2 深部巷道围岩赋存状态分析

图 3 和图 4 是深部巷道和浅部巷道对应的塑性区分布图,深部巷道围岩的塑性区范围达 10 m 以上,而与其他条件相同的浅部巷道围岩的塑性区范围只有 1 m 左右。强度软化是软岩峰后变形的重要特征,图 5 和图 6 是深部巷道和浅部巷道对应的围岩粘聚力软化分布图。尽管两者均存在软化现象,但在软化区的范围,软化区的分布方面存在很大的差别。一是深部巷道围岩粘聚力软化区范围较大,比塑性区范围略小,而浅部巷道围岩粘聚力软化区范围较小。二是在深部巷道围岩中存在粘聚力强软化区和弱软化区交替出现的现象,一个高粘聚力的区域接着一个低粘聚力的区域,然后又接着一个高粘聚力的区域,甚至粘聚力高低区域多次交替出现。

2.3 深部巷道围岩应力分析

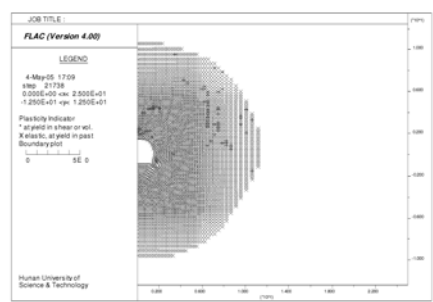


图 3 深部巷道围岩塑性区

Fig. 3 Plastic region in surrounding rock of deep roadway

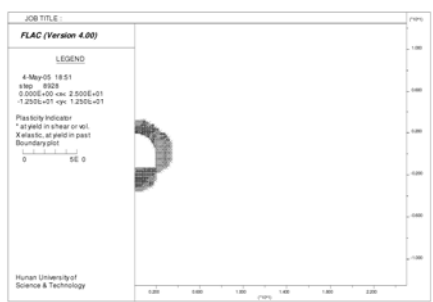


图 4 浅部巷道围岩塑性区

Fig. 4 Plastic region in surrounding rock of shallow roadway

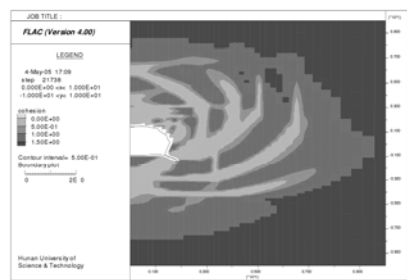


图 5 深部巷道围岩粘聚力软化分布

Fig. 5 Distribution of cohesion-softening region in surrounding rock of deep roadway

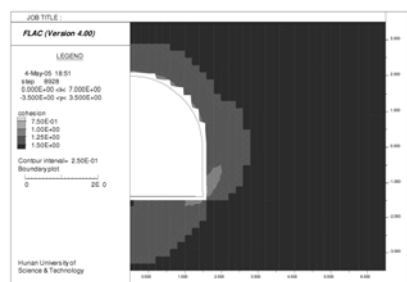


图 6 浅部巷道围岩粘聚力软化分布

Fig. 6 Distribution of cohesion-softening region in surrounding rock of shallow roadway

图 7、9 是浅部巷道围岩垂直应力和水平应力分布, 图 8、10 是深部巷道围岩垂直应力和水平应力分布。与浅部巷道相比, 深部巷道围岩应力等值线远离

巷道周边, 而且分布规律性差。

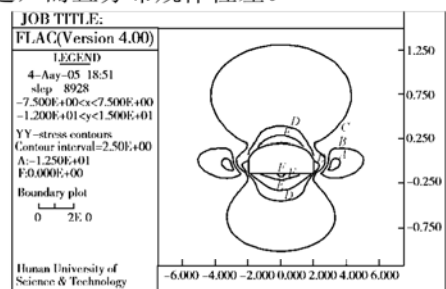


图 7 浅部巷道围岩垂直应力等值线

Fig. 7 Vertical stress contours around shallow roadway

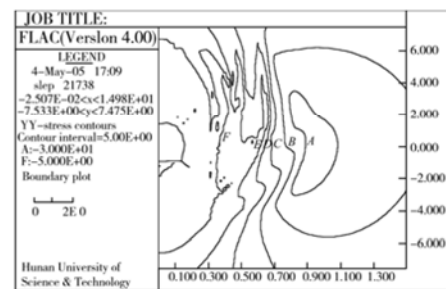


图 8 深部巷道围岩垂直应力等值线

Fig. 8 Vertical stress contours around deep roadway

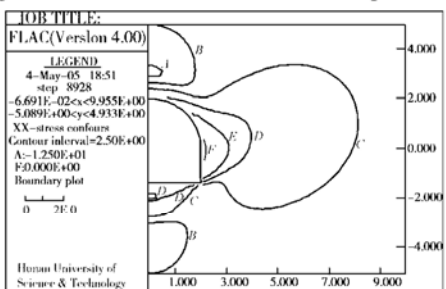


图 9 浅部巷道围岩水平应力等值线

Fig. 9 Horizontal stress contours around shallow roadway

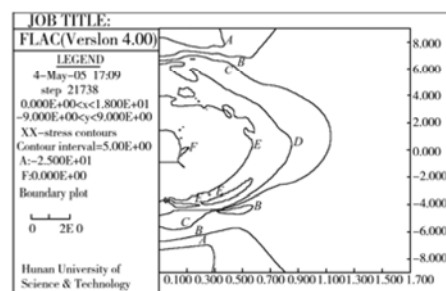


图 10 深部巷道围岩水平应力等值线

Fig. 10 Horizontal stress contours around deep roadway

3 支护阻力对深部巷道围岩承载结构的影响

3.1 支护阻力对围岩变形的影响

图 11 是巷道周边位移的模拟结果。可见, 支护阻力能够显著减少巷道顶板和巷帮围岩的位移, 但在底板无支护的情况下, 提高支护阻力对减少巷道底板位

移几乎没有作用。

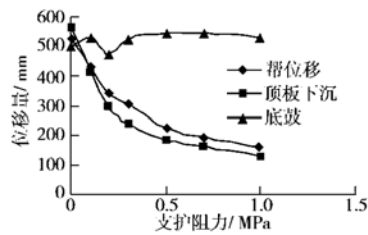


图 11 巷道变形量与支护阻力关系

Fig. 11 Relationship between deformation of roadway and support resistance

3.2 支护阻力对围岩赋存状态的控制作用

由图 12 可知, 提高支护阻力能够减小塑性区范围, 巷道顶板围岩塑性区范围减小幅度最大, 其次为巷帮围岩, 尽管巷道底板不支护, 但其塑性区范围也有一定的减小, 只是减小的幅度比巷道其他部位小。对比图 11 和图 12, 可见支护阻力能显著减小围岩变形, 而对围岩塑性区范围的控制作用则不如对围岩变形的控制作用明显。

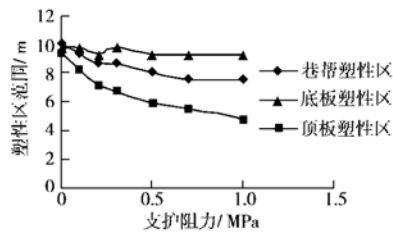


图 12 塑性区范围与支护阻力关系

Fig. 12 Relationship between scope of plastic region and support resistance

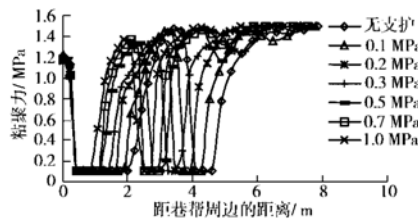


图 13 支护阻力与巷帮围岩粘聚力软化的关系

Fig. 13 Relationship between cohesion-softening of surrounding rock in sidewall of roadway and support resistance

支护阻力对围岩赋存状态的另一个作用是能够减少巷道围岩深部岩体的软化。图 13~15 都是巷道围岩粘聚力软化曲线图。在不同支护状况下, 巷帮围岩和巷道顶板围岩均存在高粘聚力区域和低粘聚力区域, 而且交替出现, 不同的是高支护阻力时, 低粘聚力区域的范围较小, 而且粘聚力软化程度较小, 这在巷道深部围岩表现尤其突出, 当支护阻力达到一定值后, 深部围岩几乎不再软化, 说明提高支护阻力能够有效地控制巷道深部围岩的软化。巷道底板没有支护, 作用在巷帮和巷道顶板的支护阻力不能减少巷道底板深

部围岩的软化, 而且使得底板围岩中的软化区域范围有所加大。

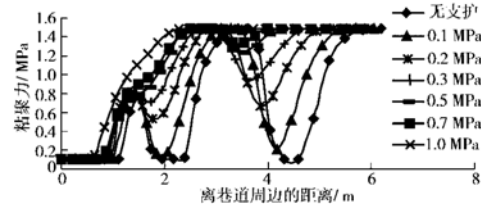


图 14 支护阻力与巷道顶板围岩粘聚力软化的关系

Fig. 14 Relationship between cohesion-softening of surrounding rock in roadway roof and support resistance

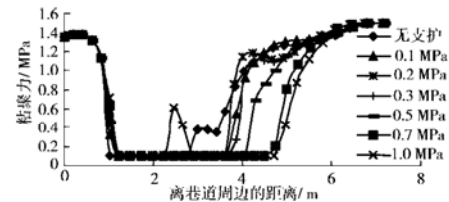


图 15 支护阻力与巷道底板围岩粘聚力软化的关系

Fig. 15 Relationship between cohesion-softening of surrounding rock in roadway floor and support resistance

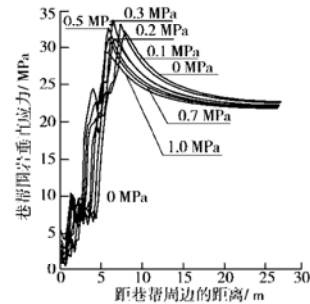


图 16 巷帮围岩垂直应力分布

Fig. 16 Vertical stress distribution of surrounding rock in sidewall of roadway

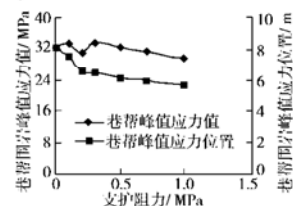


图 17 巷帮围岩峰值应力大小及其位置与支护阻力的关系

Fig. 17 Peak value of vertical stress in surrounding rock of roadway and its position versus support resistance

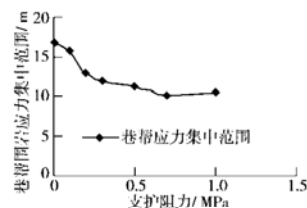


图 18 巷帮围岩应力集中范围与支护阻力的关系

Fig. 18 Scope of vertical stress concentration in surrounding rock of roadway versus support resistance

3.3 支护阻力对围岩应力的影响

图 16~18 反映了支护阻力对巷帮围岩垂直应力的影响,提高支护阻力使巷帮围岩垂直应力峰值更靠近巷道周边,垂直应力集中范围减小,垂直应力分布趋于平缓,但对垂直应力峰值的大小影响不很明显。

4 结 语

(1) 无支护的深部巷道围岩应变软化区域范围大,围岩强度强软化区域和弱软化区域交替出现,导致巷道围岩中应力分布规律性差,不能形成稳定的巷道围岩承载结构,巷道变形量大。

(2) 提高支护阻力能够缩小巷道围岩应变软化区域范围,减小围岩强度软化程度,提高围岩自承能力,改善巷道围岩中的应力分布状况,从而形成稳定的巷道围岩承载结构,实现控制围岩变形的目的。

(3) 深部巷道与浅部巷道围岩控制原理不同。浅部巷道围岩控制的重点是控制围岩塑性区的发展,而深部巷道围岩控制的重点是控制围岩的软化。

(4) 应用岩石峰后应变软化本构模型能够深入研究深部巷道围岩承载结构,探讨支护与围岩的相互作用关系。不同应力环境、不同的围岩赋存条件、不同支护方式与支护参数和不同支护时机的巷道围岩承载结构是值得继续研究的课题。

参考文献:

- [1] 陈炎光,陆士良.中国煤矿巷道围岩控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,1994. (CHEN Yan-guang, LU Shi-liang. Strata control around coal mine roadways in China[M]. Xuzhou: Publishing House of China University of Mining and Technology, 1994.)
- [2] 方祖烈.拉压域特征及主次承载区的维护理论[C]//世纪之交软岩工程技术现状与展望.北京:煤炭工业出版社,1999:48 - 51. (FANG Zu-lie. The features of tensile and compressive and the supporting principle of the primary and secondary bearing zone[C]// The Current Conditions and Prospects on the Soft Engineering Technique, Beijing: Coal Industry Publishing House, 1999: 48 - 51.)
- [3] 朱建明,徐秉业,任天贵,等.巷道围岩主次承载区协调作用[J].中国矿业,2000,9(2):41 - 44. (ZHU Jian-ming, XU Bing-ye, REN Tian-gui, et al. Coordination between primary and secondary support zones of drift's surrounding rock[J]. China Mining Magazine, 2000, 9(2): 41 - 44.)
- [4] 康红普.巷道围岩的承载圈分析[J].岩土力学,1996,17(4):84 - 89. (KANG Hong-pu. Analysis of loading-bearing ring in surrounding rock of roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, 17(4): 84 - 89.)
- [5] 康红普.巷道围岩的关键圈理论[J].力学与实践,1997,19(1):34 - 36. (KANG Hong-pu. The supporting theory based on key-ring of surrounding rock of roadway[J]. Mechanics in Engineering, 1997, 19(1): 34 - 36.)
- [6] 钟世航,刘艳情.隧道围岩的自承体系[C]//1994 年度学术报告论文集.北京:铁道部科学研究院铁道建设研究所,1994. (ZHONG Shi-hang, LIU Yan-qing. Self-supporting System of Surrounding Rock around Tunnel[C]// Papers of Annual Academic Session in 1994. Beijing: Railway Architecture Research Institute of China Academy of Railway Sciences, 1994.)
- [7] 卢汝绥,钟世航.隧道自承体系形成机理的分析[J].隧道及地下工程,1997,18(4):5 - 9,24. (LU Ru-sui, ZHONG Shi-hang. Analysis of formation mechanism of self-supporting system of tunnels[J]. Tunnels and Underground Engineering, 1997, 18(4): 5 - 9,24.)
- [8] 何满潮,景海河,孙晓明.软岩工程力学[M].北京:科学出版社,2002. (HE Man-chao, JING Hai-he, SUN Xiao-ming. Soft rock engineering mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2002.)
- [9] 何满潮,李春华,王树仁.大断面软岩洞室开挖非线性力学特征数值模拟研究[J].岩土工程学报,2002,19(4):34 - 36. (HE Man-chao, LI Chun-hua, WANG Shu-ren. Research on the non-linear mechanics characters of large section cavern excavating within soft rock by numerical simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 19(4): 34 - 36.)
- [10] 杨超,陆士良,姜耀东.支护阻力对不同岩性围岩变形的控制作用[J].中国矿业大学学报,2000,29(2):170 - 173. (YANG Chao, LU Shi-liang, JIANG Yao-dong. Controlling effects of support resistance on roadway deformation under different rock conditions[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(2): 170 - 173.)
- [11] WANG Wei-jun. Study of mechanical principle of reinforcing sidewalls and corners of gateway to control floor heave by anchors[J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2003, 9(1): 17 - 21.
- [12] WANG Wei-jun. Study of mechanical principle of floor heave of roadway driving along next goaf in fully mechanized sub-level caving face[J]. Journal of Coal Science & Engineering. 2001, 6(1): 13 - 17.
- [13] Salah A E Badr. Numerical analysis of coal yield pillars at deep longwall mines [D]. Colorado: Colorado School of Mines, 2004.