

斜井穿越采空区注浆加固技术可行性分析

陈旭¹, 王卫军^{1,2}, 王东洋¹, 凌涛¹

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭, 411201;
2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭, 411201)

摘要:结合平煤六矿新明斜井成功穿越采空区工程实例,在分析巷道围岩破坏机理及注浆加固机理的基础上,对斜井穿越采空区拟采用注浆加固技术的参数尤其是最佳加固范围进行研究计算.运用FLAC^{3D}数值模拟软件对巷道穿越采空区时不同注浆范围下巷道围岩变形及应力分布进行模拟分析,并最终确定新明斜井穿越采空区冒落带注浆孔深3 m,注浆半径1.5 m,最佳注浆加固范围为4.5 m.对于该类巷道围岩注浆加固工程实践具有一定参考价值.

关键词:斜井;冒落带;注浆;数值模拟

中图分类号:TD265.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-5876(2014)01-0005-04

Research on treatment range of grouting and parameters of inclined shaft crossing goaf and caving zone

CHEN Xu¹, WANG Weijun^{1,2}, WANG Dongyang¹, LING Tao¹

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Taking the Pingdingshan No. 6 Mine New Ming inclined shaft engineering as an example, and on the basis of the analysis of the surrounding rock failure mechanism and grouting reinforcement mechanism, this paper studies the inclined shaft through the goaf grouting reinforcement parameters, especially the best reinforcement range. Through analyzing the different grouting range surrounding rock deformation and stress distribution of roadway across the caving zone by using FLAC^{3D} numerical simulation software, this paper determines that the Ming inclined shaft through the goaf caving with best grouting reinforcement is 4.5 m, in which grouting hole deep is 3 m, and radius of grouting is 1.5 m.

Key words: inclined shaft; caving zone; grouting; numerical simulation

随着我国煤炭资源开发逐渐向深部延伸,矿井产能不断提高,有些巷道不得不穿越采空区来转移开采,而目前,关于巷道穿越采空区的施工技术和施工经验较少,且没有成熟的规范,从而严重制约矿井高产高效建设.在煤矿改扩建工程过程中井筒穿越采空区支护成为首要解决的问题.巷道穿越采空区“三带”尤其是冒落带时,围岩松散破碎,积水探放、瓦斯治理以及巷道顶板支护等成为困扰巷道

成功穿越采空区并保证服务年限内安全可靠的主要难题^[1].针对该情况,优先选择注浆加固技术,而注浆介质的选择以及注浆参数的确定则是率先解决的问题.理论上,注浆范围越大,巷道围岩越稳定,支护效果也越好,但大范围的注浆势必带来成本增加,施工量大,施工时间长等一系列负面影响;注浆范围过小则难以保证巷道围岩稳定,变形量大,支护困难^[2,3].

收稿日期:2013-10-08

基金项目:湖南科技大学研究生创新基金资助项目(S130003)

通信作者:王卫军(1965-),男,湖南涟源人,博士,教授,研究方向:巷道围岩控制. E-mail: wjwang@hust.cn

1 工程概况

平煤神马集团六矿新掘皮带明斜井开口坐标： $X=3\ 740\ 575, Y=38\ 429\ 765, Z=+179\ \text{m}$ 。斜井斜长 $2\ 040\ \text{m}$ ，倾角 $17^\circ 47'$ ，斜井净宽 $6\ 030\ \text{mm}$ ，净断面： $23.1\ \text{m}^2$ ，落底标高 $-450\ \text{m}$ 。根据相关地质资料，新明斜井（上段）地层自下而上有：二叠系下石盒子组（P12）、二叠系上石盒子组（P21）；第四系（Q）。新明斜井上段在井筒斜长为 $1\ 137\ \text{m}$ 处揭露了5-6煤层，该煤层已经于1993~1995年采过，厚度为 $1.9\ \text{m}$ ，黑色粉末状及片状，弱玻璃光泽，顶底板均为泥岩，经现场观察，采空区已经压实，经巷道开挖岩体再次扰动，裂隙充分发育如图1。工程中拟采用注浆加固技术以保证巷道成功穿越采空区。



图1 采空区破碎岩体

2 巷道围岩破坏机理

由于丁5-6煤层已经于1993~1995年采过，时间间隔长，冒落带岩体已经压实。巷道开挖引起巷道围岩应力再次重新分布，冒落带岩体松散破碎，巷道周边岩体应力集中，自承能力大大降低，导致巷道产生大变形而难以自稳。破碎岩块抗抗压强度尤其是抗剪强度低，破碎岩块在重力作用下，全部作用于承载结构，从而加剧巷道变形破坏^[4-6]。

3 注浆加固机理

冒落带岩体为各种纹理所切割，松散破碎。断裂力学认为连续介质内部随机存在有很多微裂隙，在外力作用下处于不利方位的裂隙尖端会产生应力集中，当应力集中达到相应强度裂纹就会失稳直至材料破坏。C E Inglis（英格列斯）将裂纹（缺陷）简化为椭圆形切口，用线弹性方法研究了含椭圆孔无限大板受均匀拉伸问题——按应力集中观点解释了材料实际强度远低于理论强度是由于固体材

料存在微裂隙的缘故。根据裂纹赋存状态不同将裂纹分为穿透裂纹（贯穿裂纹）、表面裂纹和深埋裂纹（如图2所示）。实际上岩体多为3种裂纹的复合体。

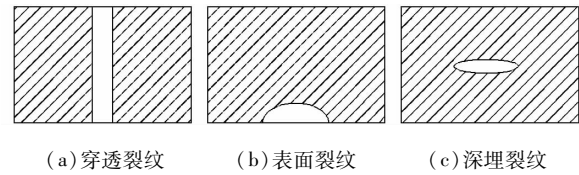


图2 各裂纹产状简化模型

在泵压作用下，对于穿透裂纹和表面裂纹，浆液主要以渗透、填充方式扩散，而对于深埋裂纹则主要以挤密方式扩散。浆液赶走岩体裂隙间的水分和空气并占据其位置并通过凝结、硬化从而形成一个强度高、整体性好的“结石体”，改变尖端应力破坏机制。

根据轴对称圆形巷道的弹塑性分析卡斯特纳方程得到下式：

$$u_0 = \frac{\sin\varphi}{2Ga}(p_0 + c\cot\varphi)R^2; \quad (1)$$

$$R = a \left[\frac{(p_0 + c\cot\varphi)(1 - \sin\varphi)}{p_i + c\cot\varphi} \right]^{\frac{1 - \sin\varphi}{2\sin\varphi}}. \quad (2)$$

式中， R ：塑性区半径； a ：巷道半径； P_0 ：原岩应力； P_i ：支护阻力； c ：岩石内聚力； φ ：岩石内摩擦角； u_0 ：巷道周边位移； G ：围岩剪切模量。

由式(1)知：巷道塑性区半径 R 和周边位移 u_0 随着影响围岩强度的内聚力 c 和内摩擦角 φ 的增大而减小。破碎围岩注浆正是通过提高巷道围岩的内聚力(c)、内摩擦角(φ)，提高围岩强度，从而减小塑性区半径及巷道周边位移量。同时根据文献[7]，浆液在泵压作用下对于充填不到的封闭裂隙及小裂隙进行压缩，甚至使其闭合，从而提高围岩弹性模量和强度。

因此，围岩注浆加固利用浆液充填围岩内的裂隙，把松散围岩的各种弱面充实，将破碎围岩固结起来，改善围岩结构、强化围岩强度和改善其力学性能，提高围岩整体性和自承能力。同时在配合锚杆、锚索巷道支护时可有效改善锚杆的锚固条件、提高锚杆的锚固力，从而达到提高围岩的整体稳定性的目的^[7-10]。

4 注浆参数

注浆参数的选择是影响注浆效果的重要因素。在考虑设计参数的基础上还应考虑施工条件，注浆时机等因素。

4.1 注浆材料

综合经济性、流动性、结实率、结实强度等因素,优先选择高水速凝材料。

4.2 注浆孔深

通常情况下,注浆孔的深度一般等于或略大于巷道围岩松动圈厚度。松动圈厚度可由现场观测得到也可用式(2)(修正芬纳公式)进行估算。根据平煤六矿新明斜井地质资料及现场测得数据如下: $p_0 = \gamma h = 25\ 000 \times 340.4 = 8.51\ \text{MPa}$,岩石内聚力 $c = 5.66\ \text{MPa}$,内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$,支护反力 $p_i = 0$,巷道主顶拱半径 $a = 3.1\ \text{m}$ 。根据公式求得松动圈厚度:

$$R = 3.1 \times \left[\frac{(8.51 + 5.66 \cot 30^\circ)(1 - \sin 30^\circ)}{0 + 5.66 \cot 30^\circ} \right]^{\frac{1 - \sin 30^\circ}{2 \sin 30^\circ}} = 2.996\ \text{m}. \quad (3)$$

因此,注浆孔深度取为 3 m。

经巷道开挖,采空区破碎岩体充分扰动,岩体裂隙充分发育,浆液在该类岩体中可均匀扩散。

4.3 注浆压力

巷道穿越采空区时,围岩松散破碎,该工程采用渗透注浆形式,即采用相对较小的压力使浆液渗透到岩体裂隙,使岩体胶结,从而提高岩体强度和防渗能力。由于注浆压力受到注浆岩层地质条件、注浆形式、浆液粘度以及围岩裂隙开度等诸多因素影响,一般而言很难通过计算确定注浆压力大小。为避免过压力过高将使岩层产生劈裂现象,因而通常采用注浆试验来确定最大允许注浆压力。根据文献[3],逐步升高注浆压力可的到注浆压力与注浆量的关系曲线如图 3 所示。当注浆量突然增大即注浆压力达到 P_i 时,表明岩层在高注浆压力下产生劈裂,该压力定为最大允许压力。事实上对于破碎的冒落带而言必须考虑注浆边界问题否则很可能导致浆液向围岩深部无限流动造成浪费,因此该工程中注浆压力不宜太大。根据经验公式

$$P_0 = KR. \quad (4)$$

式中, K :注浆压力系数, $\text{kg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{m})$,深度小于 200 m 时, K 取 0.23 ~ 0.21,深度为 200 ~ 300 m 时, K 取 0.21 ~ 0.20,深度为 300 ~ 400 m 时, K 取 0.20 ~ 0.18; R :注浆孔有效长度,即:巷道围岩松动圈半径,m。

根据地质资料巷道埋深 300 ~ 400 m,因此 K 取 0.19,巷道松动圈半径为 3 m,由此可求得:

$$P_0 = 3 \times 0.19 = 0.57\ \text{MPa}.$$

根据文献[3],在松散岩体内注浆压力一般在

0.3 ~ 0.5 MPa,故此处取为 0.5 MPa。

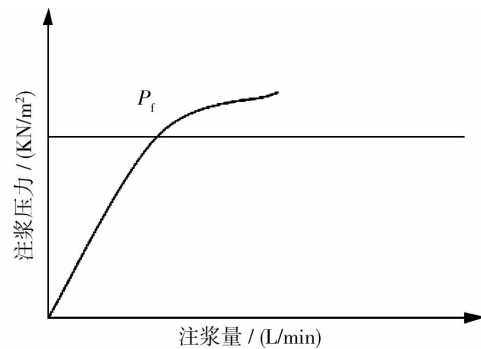


图 3 注浆压力与注浆量的关系曲线

4.4 注浆孔间排距

注浆孔间排距是根据浆液扩散半径设计的。由于浆液扩散半径受施工工艺、岩层产状、裂隙开度、浆液流动性等的影响,理论研究尚不成熟。一般而言松散破碎岩层浆液扩散半径在 0.5 ~ 3.0 m,不同注浆孔的浆液扩散半径变化很大。根据六矿实际情况,丁 5-6 煤层是在 1995 年采过,冒落带岩层已经渐趋压实,深部裂隙闭合,在此我们取浆液扩散半径为 1.5 m。注浆孔采用等距布置,孔间排距按经验公式计算:

$$\begin{cases} L_1 = 0.8R; \\ L_2 = 0.85L_1. \end{cases} \quad (5)$$

式中, L_1 :注浆孔距,m; R :浆液扩散半径,m; L_2 :注浆孔排距,m。

于是求得注浆孔间距 1.2 m,排距 1.0 m。

5 数值模拟分析

本文运用 FLAC^{3D} 数值模拟软件模拟分析不同注浆处理范围下巷道围岩应力及位移变化情况,模拟注浆处理范围 R 分别包括 3.0,3.5,4.0,4.5,5.0,6.0,7.0 m。模拟采用 Mohr - Coulomb 破坏准则,由于单一支护形式难以控制巷道围岩变形,对于 7 个处理范围均取 3 000 时步^[11]。

经过一定时步的迭代,得到围岩变形曲线、应力分布图如图 4 和图 5。从位移变化曲线来看,经过注浆加固后的巷道围岩变形量明显减小,尤其是对于顶板而言效果更为显著。加固范围在 3 m 时顶板下沉量 572.92 mm;底板变形为 22.5 mm;帮部变形量 12.04 mm;加固范围为 4.5 m 时顶板下沉量 469.11 mm;底板变形为 26.88 mm;帮部变形量 90.66 mm;顶板和两帮控制效果明显。4.5 m 后进一步加大加固范围,控制效果不明显。从应力分布云图来看,应力释放范围明显减小。

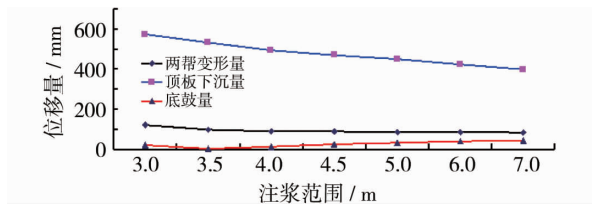


图4 不同注浆处理范围下巷道位移变形量

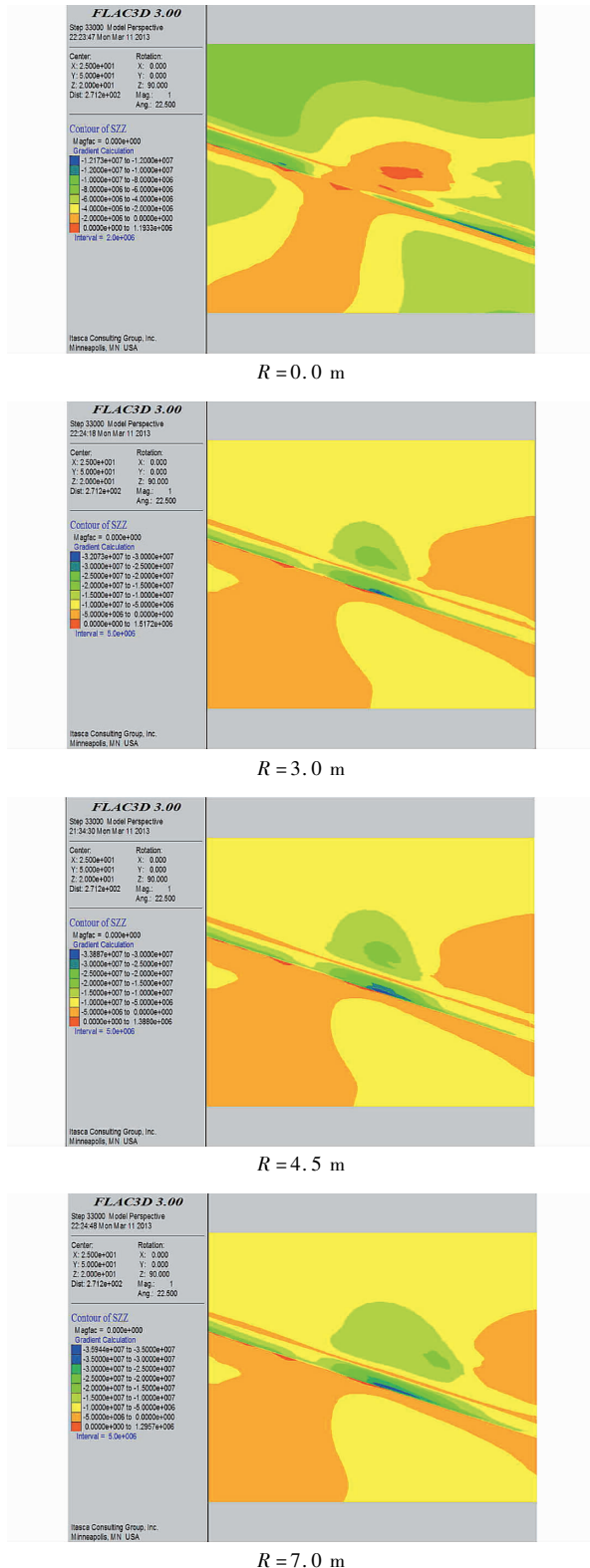


图5 不同注浆处理范围下巷道围岩垂直应力

6 结论

1) 井筒穿越采空区松散岩体时,注浆工艺将松散岩块固结为一个整体,提高了整体性和自承能力,有利于巷道围岩自身形成稳定的承载结构。

2) 单一支护形式下难以控制巷道围岩稳定,注浆加固还需配合锚、网、喷、索等支护形式共同控制巷道变形,以保证巷道在正常服务年限内的正常使用。

3) 注浆加固范围小则导致加固效果不明显,加固范围过大则会使成本、人力的耗费增加,经计算分析该巷道注浆孔深宜为3 m;扩散半径为1.5 m。

4) 经斜井穿越采空区可行性分析知,注浆加固技术对该类巷道是可行的。

参考文献:

- [1] 周树清,陈志文. 超高大范围冒落巷道喷注法治理技术[J]. 建井技术,2002,23(4):13-15.
- [2] 孙森,杨双锁,武剑. 井筒穿越单层采空区井壁周围合理填充范围的确定[J]. 山西煤炭,2010,30(2):41-43,73.
- [3] 王杰. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [4] 朱永建,余伟健. 构造带极不稳定围岩注浆加固效果数值分析[J]. 煤炭科学技术,2011,39(3):14-17.
- [5] 张元,武剑. 不同层数采空区岩层移动变形特征对比分析[J]. 山西煤炭,2011,31(10):39-41.
- [6] 武剑. 大同矿区立井井筒穿越多层采空区稳定性控制理论技术研究[D]. 太原:太原理工大学,2011.
- [7] 杨坪,彭振斌,李奋强. 巷道注浆加固作用机理及计算模型研究[J]. 矿冶工程,2005,25(1):3-5.
- [8] 苏培莉. 裂隙煤岩体注浆加固渗流机理及其应用研究[D]. 西安:西安科技大学,2010.
- [9] 张耀平,曹平,袁海平,等. 复杂采空区稳定性数值模拟分析[J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(2):233-238.
- [10] 邓洪亮,谢向文,郭玉松. 公路隧道穿越采空区注浆加固技术研究[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(6):1182-1186.
- [11] 付亚男,朱川曲,李青峰. 回风石门跨采变形同上覆岩层垂距关系的数值模拟[J]. 矿业工程研究,2012,27(4):27-31.