

文章编号: 1673 3363(2006)04 0489 05

冲击地压应力状态及卸压治理数值模拟

熊祖强, 贺怀建

(中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 深部开采中的冲击地压现象与巷道、采场围岩的应力状态密切相关, 通过爆破卸压改变围岩的应力状态是最为直接和有效的治理措施. 采用 FLAC^{3D} 对典型冲击地压巷道的应力状态进行了数值模拟, 结果显示由于开挖卸荷作用引起的应力集中区域是冲击地压现象频发的部位. 提出了两种孔深 10 m 以及延伸辅助眼浅孔 3 种卸压治理方案, 分别模拟卸压后围岩的应力分布状态, 结果表明: 3 种方案都起到了缓解区域应力集中的效果, 但延伸辅助眼浅孔方案卸压效果更明显, 且打孔及装药容易, 与掘进工作同步, 是一种经济有效的治理方案.

关键词: 冲击地压; 爆破卸压; 数值模拟; FLAC^{3D}

中图分类号: TD 353 **文献标识码:** A

Numerical Simulation of Rock Burst Stress and Its Control by Stress Relief

XIONG Zu qiang, HE Huai jian

(Institute of Rock and Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Rock burst in deep mining is closely related with the stress of surrounding rocks of roadways and stopes and the stress relief by blasting to change the stress of surrounding rocks is a direct and effective way to control it. The stress of a typical rock burst roadway was simulated by FLAC^{3D}, showing that in the stress concentrated area, the rock burst takes place frequently. Three relieving shot schemes an extending assistant shallow boring hole two deep boring holes (10 m) with different layout were presented to simulate the stress of surrounding rocks after pressure relief. The simulation result shows that all the three schemes can release the concentrated stress to a certain extent. However the scheme of extending assistant boring hole is more effective than and has many advantages over the other two. In addition, it is easy in drilling and filling, and in step with tunnel excavation. Therefore, it is a cost effective scheme.

Key words: rock burst; stress relief by blasting; numerical simulation; FLAC^{3D}

在深部开采条件下, 地质构造变得复杂、自重应力增大, 煤岩体积聚了大量的固体能量, 在深部地应力、构造应力以及工程扰动的作用下, 使得积聚的能量大于矿体失稳和破坏所需要的能量, 这样由于开挖卸荷导致储存于硬脆性围岩中的弹性应变能突然释放, 极易产生爆裂、松脱、剥离、弹射甚

至抛掷等破坏现象的动力失稳地质灾害, 即发生冲击地压. 它直接威胁施工人员及设备的安全, 影响工程进度, 已成为地下工程特别是深部开采中的一大地质灾害^[1,2]. 各国学者就其发生机理进行了广泛深入的探讨, 已经形成了“强度理论”^[3], “刚度理论”^[4], “能量理论”^[5], “失稳理论”^[6,7], “三因素理

收稿日期: 2006-05-09

作者简介: 熊祖强(1978), 男, 河南省南阳市人, 博士, 从事矿山压力及岩土工程方面的研究.

E-mail: xzqjzt@163.com Tel: 027 87198425

论”^[8]等众多理论来解释冲击地压的产生机理,但是由于冲击地压发生的复杂性,迄今为止,对其产生机理还没有统一认识,在实际的工程实践中选择合理经济的治理方案显得尤为重要。

一些浅部没有冲击倾向性的矿井,进入深部后转变为冲击地压频发的冲击矿井。平顶山矿区随着开采深度的增加,围岩应力增高,冲击地压问题已经逐步暴露出来,据统计,在十二矿三水平皮带下山掘进过程,仅在 2005 年的 3 月 15 日到 4 月 7 日的短短 23 d 时间内,冲击地压累计发生了 27 次,严重影响了施工进度,甚至被迫停工。本文采用有限差分软件 FLAC^{3D}对围岩的应力状态,以及爆破卸压解危方案的效果进行模拟及工程试验。

1 工程概况

平顶山十二矿三水平皮带下山设计全长 1 850 m,主要服务于运输通风等,发生冲击地压段巷道地面标高 272 m,巷道标高 - 835 m,巷道埋深达到 1 107 m,属深部开采巷道,垂直应力达 30 MPa;巷道接近平顶山矿区主要大构造——李口向斜轴部,存在较高的残余构造应力,加剧了应力的积累;巷道所处的 L₂ 灰岩坚硬完整,厚度 8 m,围岩体强度高,弹性模量大,试验单轴抗压强度 206.63 MPa,弹性模量 34.62 GPa,属脆性岩石,极易形成较大的集中应力和集聚较多的弹性能,具备冲击倾向性。冲击地压现象多以震动发出声响和抛掷岩石为主,统计的 27 次中 18 次发生在掘进头顶部,其余发生在巷道两帮及底板,很少发生在拱顶。

2 围岩应力状态及卸压数值模拟

众多的研究和实践证明,分析冲击矿压区域内的应力分布状态和应力值的大小是防治冲击矿压

的基础。一般情况下,应力高、围岩强度大的硬岩区域更容易聚积弹性能。因此,在一定的采掘区域,分析和确定应力和应力集中程度的大小,就可以分析冲击矿压危险程度,以及确定冲击矿压危险区域,有利于主动而又积极地采取有效措施进行预防^[2,9]。随着岩土工程数值计算软件的逐渐成熟,可以采用数值模拟的方法确定采掘区域的应力分布,目前较常用的分析模拟程序有 FLAC^{3D}, UDEC, ANSYS, ABQUS 等,其采用的方法主要是有限差分法、有限元法、离散元法、边界元法等。本文利用 FLAC^{3D}对开挖引起的围岩应力二次分布进行模拟;根据现场冲击地压主要集中在掘进面上的事实,将研究重点放在掘进工作面及其前方区域。

2.1 FLAC^{3D}简介

FLAC^{3D}是由美国 Itasca Consulting Group Inc 开发的三维显式有限差分法程序,可模拟岩土或其它材料的三维力学行为,是围岩稳定性分析常用的软件之一,适用于解决大变形的非线性岩土力学问题。在 FLAC^{3D}程序中,采用混合离散化方法,能有效地模拟计算材料的塑性破坏和流动。在求解过程中,采用迭代法求解,不需要存储较大的刚度矩阵,可大大节省内存。FLAC^{3D}采用显式差分求解,在求解线性应力-应变本构方程的同时,可以求解任意的非线性应力-应变本构方程,因此,FLAC^{3D}比一般差分法提高了求解的速度,同时,可以根据施工过程,对计算模型和参数取值等进行调整。

2.2 模型及参数

根据巷道所处的实际地质条件,进行地质简化,合并一些较薄的软弱夹层,最终确定的计算模型共包括 13 层岩层;并对主要岩层取样做室内单、三轴压缩试验,确定其主要力学参数,其余岩层根据工程类比赋值,结果见表 1 所示。

表 1 数值模拟计算岩体力学参数表

Table 1 Mechanical parameters for the numerical simulation

岩土种类	抗压强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	黏聚力 / MPa	摩擦角 / (°)	弹性模量 / GPa	泊松比	密度 / (kg · m ⁻³)
细砂岩	*56.20	*1.03	*4.00	*42.0	*6.10	*0.13	2 660
泥岩	*37.80	*0.07	*1.40	*32.0	*5.10	*0.14	2 635
煤层	18.44	0.03	1.00	32.0	1.986	0.36	1 370
L ₁ 灰岩	204.00	7.16	43.41	47.6	29.67	0.25	2 700
L ₂ 灰岩	206.63	4.96	23.78	53.3	34.62	0.25	2 700
L ₃ 灰岩	208.80	5.26	40.20	48.5	40.23	0.25	2 700
L ₄ 灰岩	*210.36	*6.23	*41.20	*52.1	*35.98	*0.25	2 710

*. 工程类比数据

巷道所处岩层倾角 0°~5°,冲击地压发生部位巷道倾角 5°,模拟时做了简化处理,岩层和巷道均不考虑倾角。截取的模型几何尺寸是沿巷道纵深长

度 200 m,截面尺寸为 60 m×80 m;巷道按照实际的几何参数模拟,形状为半圆拱,墙高 1.7 m,拱半径 2.1 m。巷道采用锚喷网支护,锚杆为 φ20 mm,

长 2.2 m 的螺纹钢树脂锚杆, 间排距 0.7 m, 支护工艺是两掘一锚. 计算时采用结构单元 Cable 模拟锚网, 采用 Shell 单元模拟喷射混凝土. 计算模型采用 Mohr Coulomb 模型, 适用于塑性和脆性岩体的剪切破坏.

2.3 围岩应力数值模拟

根据所建物理模型, 对由巷道开挖产生的围岩应力重新分布进行了数值解算, 根据计算结果可以看出, 在巷道的腮部产生了较大的应力集中, 这与现场是十分吻合的. 这也充分说明利用数值模拟围岩应力分布情况, 预测冲击危险区域、冲击强度等具备一定的可行性^[10-11]. 但是由于对煤岩体进行了简化处理, 而且对于模拟中的煤岩体特性, 特别是

弹性模量和泊松比等力学基本参数没有考虑局部非均质性和各向异性, 所以只能作为近似的方法使用. 图 1 为模拟开挖长度 120 mm 时, 巷道掘进面及巷道腮部纵切面上的应力分布等值线. 需要说明的是 FLAC^{3D} 的后处理功能并不是很强, 只能得到应力场、位移场等的云图, 并不直观, 但是提供的 fish 语言却为我们实现特别的功能提供了可能, 本文得到的等值线图, 就是利用 fish 语言编写数据转换模块, 提取单元坐标、应力、位移等参量, 并保存为 Surfer, TecPlot 等优秀的等值线绘制软件能够读取的数据格式文件, 再在 TecPlot 环境中做切面上的应力等值线所得.

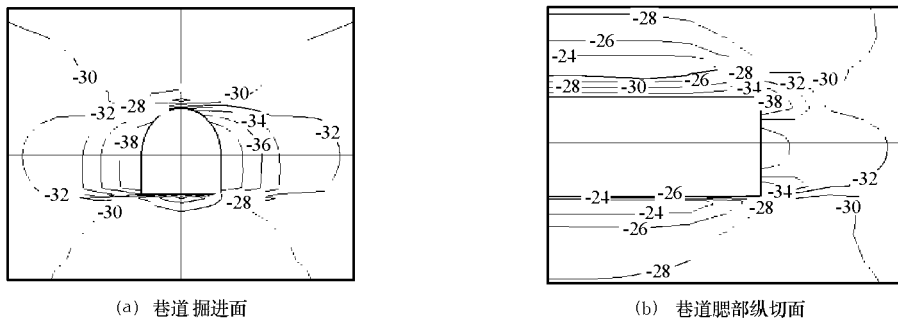


图 1 应力分布等值线 (MPa)
Fig.1 Stress state

从图 1b 可以看出, 由于巷道所处的围岩 L₂ 灰岩, 强度比较大, 在掘进前方并没有形成一定的应力降低区, 反而在很短的距离内 (0~3 m), 产生了较大的应力集中, 特别是在冲击地压的频发部位——腮部, 应力集中现象更加明显, 应力集中系数较大, 约为 42 MPa/30 MPa=1.4, 模拟开挖的长度仅为 120 m, 实际开挖的长度将近 2 000 m, 应力集中系数远比 1.4 大.

2.4 爆破卸压治理模拟

从围岩应力状态模拟结果可以看出, 在冲击地压频发部位, 压力梯度较大, 应力集中明显, 再加上

巷道地处深部、构造条件复杂、围岩强度大, 具备了冲击地压发生的应力状态和冲击倾向性两个必备条件. 因此, 防治冲击矿压发生的实用有效的方法就是改变上述条件, 破坏冲击地压危险区域煤岩体的结构, 减少煤岩体中聚积弹性能的能力, 减少其发生的可能性, 甚至在人员撤离的情况下诱发冲击矿压. 目前应用的措施主要有高压注水、放震动炮、孔槽卸压、爆破卸压等, 其中最直接有效的方法就是爆破卸压法^[2].

根据工程实际情况, 提出 3 种爆破卸压方案, 并分别进行模拟计算, 如图 2.

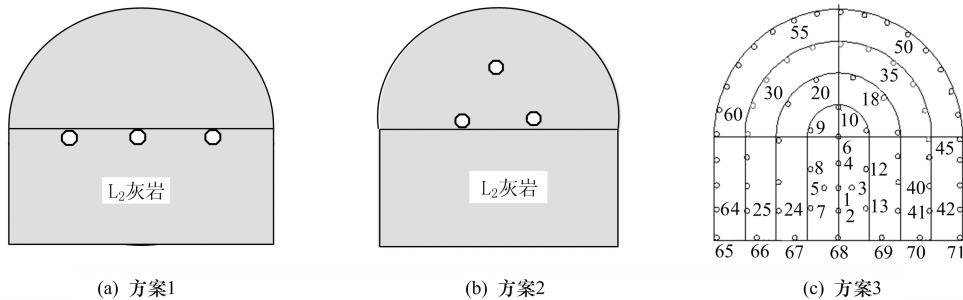


图 2 卸压方案
Fig.2 Stress relief model

方案 1 是钻 3 个卸压孔, 沿巷道的中线成线形布置, 孔深 10 m, 孔间距 1 m, 掘进 5 m 后再次爆破卸压, 保证超前爆破 5 m; 方案 2 是 3 个孔成三角形布置, 爆破方案如方案 1; 方案 3 是延伸巷道掘进时拱部周边眼内侧的辅助眼(图 2c 中编号为 28-38), 并依照奇偶循环原则, 即每次只延伸编号为奇数或偶数的钻孔作为卸压, 延伸为 3.6 m, 装药量适当加大. 巷道掘进循环进尺为 1.2 m, 始终保持掘进工作面前方有两个循环进尺的爆破松动区.

FLAC^{3D}在模拟爆破卸压后的围岩应力状态时, 采用的方法是先模拟正常开挖情况, 计算稳定平衡后, 利用 FLAC^{3D}可以改变模型材料常数的特点, 将爆破破碎区内的围岩岩体力学参数降为原来的 1/5, 再次解算, 解算的应力结果就是爆破卸压后的围岩应力状态^[12].

根据模拟结果分析, 3 种方案都起到一定的卸压解危效果, 消除了巷道腮部明显的应力集中程度, 减弱了煤岩体的冲击倾向性. 图 3 所示为卸压前后掘进工作面前方垂直应力分布情况, 可以看出, 3 种方案都能起到了减弱应力集中程度的作用, 但方案 3 卸荷作用更加明显, 在掘进头前方 0~3 m 的范围内形成了较大的应力降低区, 并将表面形成的应力峰值向后转移, 应力峰值也减小了.

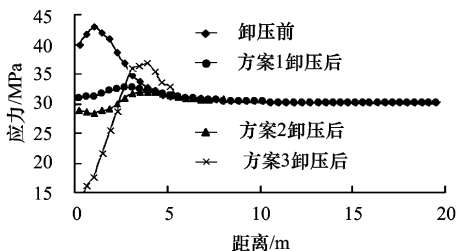


图 3 卸压前后掘进头前方垂直应力分布
Fig. 3 Vertical stress state on a line in front of the tunnel development face before and after distressing

图 4 为采用方案 3 模拟的爆破卸压后的围岩应力等值线图, 可以看出原本在腮部的边角位置产生了较大的应力集中, 卸压后应力等值线趋于缓和, 应力值比原岩应力几乎小了一个数量级; 另外方案 3 与其他方案比较, 这种方法和掘进同步进行, 工程量小, 是一种经济又实用的卸压方案. 在平顶山十二矿三水平皮带下山巷道冲击地压治理中对 3 种卸压治理方案都进行了实践, 3 种方案都一定程度的消除了冲击地压的安全隐患, 但是深孔爆破卸压存在着打孔困难、装药困难, 以及影响正常的掘进施工等弊端, 不受施工部门的欢迎. 方案 3 克服了这些缺点, 并且有效的消除了区域应力集中

现象, 自从采取该措施后达到了安全掘进的目的, 深受施工单位的欢迎.

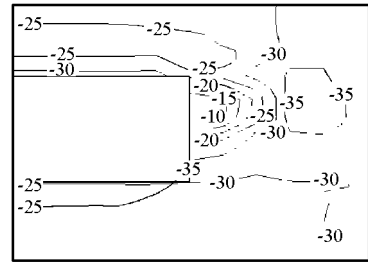


图 4 卸压后肋部纵切面上的应力等值线(方案 3)(MPa)
Fig. 4 Stress state on the vertical slice of the tunnel's cheek after distressing

3 结 论

冲击地压是矿井深部采掘中即将面临的重大安全隐患, 采用 FLAC^{3D}对典型冲击地压巷道的围岩应力状态, 以及爆破卸压治理措施进行数值模拟, 主要得出以下结论:

- 1) 巷道掘进后围岩应力状态的模拟结果显示, 产生于硬脆性围岩近距离范围内的应力集中现象是导致冲击地压的重要因素.
- 2) 通过爆破卸压改变围岩体结构, 消除区域应力集中, 是冲击地压治理的有效措施.
- 3) 延伸辅助眼爆破卸压方案, 可以起到消除冲击地压隐患作用, 同时具备工程上的优点, 具备一定的实用价值.

参考文献:

- [1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2811. HE Man chao, XIE He ping, PENG Su ping, et al. Study on rock mechanics in deeping engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2811.
- [2] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001: 1-30.
- [3] BIENIAWSKI A T, DENKHAUS H G, VOGLER U W. Failure of fracture rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1969(2): 323-341.
- [4] COOK N G W. A note on rockbursts considered as a problem of stability[J]. South Africa Inst Mining Metall, 1965, 65: 437-446.
- [5] COOK N G W, HOEK, et al. Rock mechanics applied to the study of rock bursts[J]. South Africa Inst Mining Metall, 1966, 66: 436-528.
- [6] 徐曾和, 章梦涛. 冲击地压失稳理论及其应用[C] // 第二届全国岩石动力学学术会议论文集. 武汉: 武

- 汉测绘科技大学出版社, 1990: 332-339.
- [7] 齐庆新, 刘天泉, 史元伟. 冲击地压的摩擦滑动失稳机理[J]. 矿山压力与顶板管理, 1995, 12(3/4): 174-177.
QI Qing xin, LIU Tian qian, SHI Yuan wei. Mechanism of friction sliding instability of rock burst[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1995, 12(3/4): 174-177.
- [8] 周晓军, 鲜学福. 煤矿冲击矿压理论与工程应用研究的进展[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 1988, 21(1): 126-132.
ZHOU Xiao jun, XIAN Xue fu. Research advance on rockburst theory and its engineering application in collieries[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 1988, 21(1): 126-132.
- [9] 尹光志, 鲜学福, 金立平, 等. 地应力对冲击地压的影响及冲击危险区域评价的研究[J]. 煤炭学报, 1997, 22(2): 132-137.
YIN Guang zhi, XIAN Xue fu, JIN Li ping, et al. The effect of crustal stresses on rock burst and evaluation of zone prone to rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(2): 132-137.
- [10] 章梦涛. 冲击地压失稳理论与数值模拟计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(3): 197-204.
ZHANG Meng tao. The instability rockburst theory and the numerical simulation[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987, 6(3): 197-204.
- [11] DOU L M, WANG B. Risk evaluation of rock burst by use of a numerical simulation method[C] // Computer Applications in the Minerals Industries. Rotterdam: Balkema, 2001.
- [12] 周林生, 樊克恭, 刘军, 等. 冲击地压工作面爆破卸压效果的数值模拟[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2005, 24(4): 77-80.
ZHOU Lin sheng, FAN Ke gong, LIU Jun, et al. Numerical simulation of the effect on pressure relief by blasting in working face with rock burst[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2005, 24(4): 77-80.

《采矿与安全工程学报》 获首届中国高校特色科技期刊奖

日前, 由教育部科学技术司组织的“首届中国高校精品·优秀·特色科技期刊奖评比活动”落下帷幕。经评审, 由中国矿业大学和中国煤炭工业劳动保护科学技术学会联合主办的《采矿与安全工程学报》获首届中国高校特色科技期刊奖。

《采矿与安全工程学报》原名《矿山压力与顶板管理》, 是全国中文核心期刊(位列矿业类第7位), 《CAJ-CD规范》执行优秀期刊, 《中国科技论文在线》来源期刊, 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊, 被中国期刊网, 中国学术期刊《光盘版》, Ulrich, 矿业文摘, 中国学术期刊文摘, 中国期刊全文数据库(CJFD), 万方, 维普等国内外多家数据库或文摘收录。在学报刊登的论文中, 有省部级以上基金资助的科研项目的论文占60%, 《中国期刊引证报告(2006年版)》中《采矿与安全工程学报》的影响因子(0.170)和总被引频次(207)均居全国矿业类期刊前列。

在办刊过程中, 紧密配合学校的科研工作, 一方面坚持办刊宗旨, 提高学报的学术质量, 及时将相关重点学科的国家科技攻关项目、国家自然科学基金项目和省部级科研项目等的最新研究成果或阶段性成果予以发表; 另一方面积极促进煤炭科技研究成果向生产力转化。在所刊登的由学校教职员撰写的论文中, 其中属采矿工程等国家及省、部级重点学科的论文占100%。同时, 这些重点学科高水平的研究成果又确保了学报的质量。《采矿与安全工程学报》刊登的论文, 由于始终保持着较高的学术水平、创新性以及较强的应用价值, 所以经常被国内外有关科技人员参考、引用、应用, 产生了巨大的社会效益和经济效益; 同时, 《采矿与安全工程学报》也把学校相关重点学科的最新科研成果介绍给了国内外同行, 促进了学校对外学术交流及科研合作, 促进了学校科研工作的发展。