

小秦岭井巷工程岩爆控制试验

李俊平¹, 王石², 柳才旺², 胡明³, 王永彦²

1. 西安建筑科技大学材料与矿资学院, 西安 710055
2. 河南文峪金矿, 河南灵宝 472533
3. 安徽省安全生产监督管理局, 合肥 230055

摘要 有岩爆倾向岩石遇到较高的支承压力时常发生岩爆。为了控制岩爆, 依据支承压力分布规律, 借助钻孔受压变形释放部分集中应力, 并借助爆破震动引起支承压力峰值向岩体深部转移而增加减压区的承载能力。现场爆破试验得到了巷道、马头门和竖井掘进的岩爆控制施工参数及防范卡钻的措施。试验表明: 超深钻孔与掘进进尺的比例达到 2~3 时可成功控制掘进端面的岩爆, 呈三角形布置超深钻孔可成功控制巷道、马头门及竖井掘进的端面岩爆, 间隔 1.5~2.5m 布置深 2.0~3.0m 的震动炮孔可以成功控制巷道帮墙或竖井井壁的岩爆, 光面爆破或台阶光面爆破成巷并临时锚杆支护马头门能避免冒顶或片帮。

关键词 采矿工程; 岩爆; 支承压力; 爆破卸压; 钻孔卸压; 地压控制

中图分类号 X936, TD322

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.01.007

Field Tests on Rock Burst Control of Shafts and Tunneling Engineering in Xiaoqinling Mountain

LI Junping¹, WANG Shi², LIU Caiwang², HU Ming³, WANG Yongyan²

1. College of Materials and Mineral Resources, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China
2. Henan Wenyu Glod Mine, Lingbao 472533, Henan Province, China
3. Anhui Provincial Administration of Safety Production Supervision, Hefei 230055, China

Abstract Rock burst often occurs when burst-prone rocks meet higher bearing pressure. In order to control the rock burst, based on the distribution of bearing pressure, the borehole deformation and blasting vibration are used in order to shift the peak bearing pressure to the deep rock mass, and to release some concentrated stress, therefore to increase the carrying capacity of decompression zone. Construction parameters controlling rock burst and the prevention measures for the drilling tool from jamming are obtained by using the field burst tests on tunnel, ingate, and shaft excavation. Test results show that it could successfully control the rock burst at the front end, when the ratio of crossing over cycle to excavation depth reaches at 2~3. And a triangular arrangement of super-deep hole is able to resoundingly control the rock burst in tunnel, ingate and shaft excavation face. In addition, the interval of 1.5~2.5m layout plus the deep vibration hole of 2.0~3.0m is able to successfully control the rock burst in the tunnel waist wall or in the wall of a shaft well. And then smooth blasting or bench smooth blasting with temporary rock bolting is able to avoid roof fall or wall caving in the ingate.

Keywords mining engineering; rock burst; bearing pressure; stress relief by blasting; stress relief by drilling; underground pressure control

0 引言

通渝隧道^[1]、秦岭终南山公路隧道^[2]等工程实例都证明, 岩爆是由于工程埋深过大, 引起掘进端面、巷道两帮或竖井井壁支承压力高度集中, 导致有岩爆倾向的围岩在掘进或爆破扰动后 1~48h 内突然、猛烈释放, 并引起飞石。小秦岭地

区, 当巷道或竖井穿越埋深超过 700m 的灰白色大理岩、灰岩、花岗岩等有岩爆倾向的岩石时, 在掘进端面、巷道两帮或竖井井壁常发生岩爆^[3,4]。

根据岩爆的概念及支承压力分布规律, 对应力集中不是特别大的巷道, 可以借助钻爆法卸压, 引起支承压力峰值向

收稿日期: 2012-10-25; 修回日期: 2012-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51244006); 西安建筑科技大学重点培育学科建设基金项目(XK2012005)

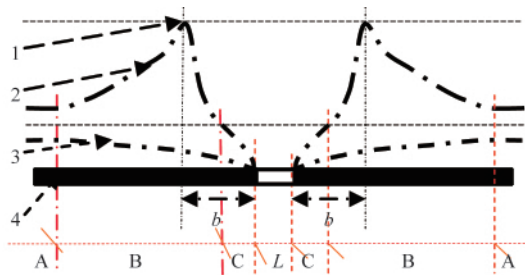
作者简介: 李俊平, 教授, 研究方向为矿山岩石力学, 电子信箱: junpingli@163.com

岩体深部转移并向钻孔空间释放部分应力,适当增大减压区的水平宽度,避免岩爆飞石^[5];对支承压力集中达到 30MPa 以上,如锦屏辅助洞西端应力集中达到 44.2~70.1MPa,除了借助钻爆法转移和释放部分应力外,还必须利用钢纤维混凝土、水胀式锚杆等联合支护巷道,保护减压区免遭破坏^[6,7]。终南山公路隧道^[2]和小秦岭矿山掘进的实践表明,小秦岭地区井巷工程的岩爆控制只需要借助钻爆法,不必支护减压区。

本研究现场了解地压显现情况后,依据支承压力分布规律,借助钻爆法成功控制了岩爆飞石,得出巷道、马头门和竖井掘进的岩爆控制施工参数。

1 支承压力分布与钻爆法卸压原理

支承压力指在岩体中开掘巷道、竖井或采矿时,围岩上形成的高于原岩应力的垂直集中应力,见图 1, B 区的垂直应力都称为支承压力。假设原岩垂直应力 σ_v 可按岩体容重 γ 与覆盖岩层总厚度 H 之乘积估算,即 $\sigma_v = \gamma H$,则支承压力 σ_b 可表示为 $k_c \sigma_v$,其中 k_c 为应力集中系数。



A—稳压区;B—增压区(支承压力区);C—减压区;L—开挖(开采)跨度
1—支承压力峰值;2—垂直应力;3—水平应力;4—巷道围岩(竖井岩壁)

图 1 支承压力分布

Fig. 1 Distribution of bearing pressure

研究表明,支承压力带的应力集中系数 k_c 可按下式估算^[9]:

$$k_c = \left(1 + \frac{1}{b/L}\right) k_L \quad (1)$$

式中, k_L 为开采空间的形状影响系数。长/宽=1 时,如圆形、方形竖井, $k_L \approx 0.7$;长/宽>3 时,如掘进巷道, $k_L \approx 1$; b 为支承带宽度,可近似认为是支承压力峰值到开挖(开采)壁面的水平距离, m; L 为开挖跨度, m, 见图 1。研究表明,支承压力带的宽度 b 视岩体性质及开采空间跨度而异,大致有如下关系: $b/L = k_L k_r$ 。其中, $L=3\text{m}$ 时 $k_L \approx 1$, L 为 30~40m 时 $k_L \approx 0.5$; k_r 为岩石性质影响系数,硬岩 $k_r \approx 0.8$,中硬岩 $k_r \approx 1.5$ 。

根据式(1)可估算出,在硬岩中掘进 4m 直径的竖井时,支承压力峰值到开挖(开采)壁面的水平距离 $b \approx 3.1\text{m}$, $k_c \approx 1.6$;在硬岩中掘进 3m 宽的巷道时, $b \approx 2.4\text{m}$, $k_c \approx 2.25$ ^[9]。在硬岩中施工直径 40mm 的垂直帮壁的宽度为 b 的钻孔,并孔底装药爆破震动,引起爆破裂纹扩展的深度分别约为 3.1、2.4m,即钻孔和裂纹扩展的深度共达到 $2b$ 时,裂纹扩展的深度几

乎贯穿了支承压力的 B 区,这时,支承压力的向围岩深部转移的效果较佳^[9]。

根据式(2),孔底紧密堵塞的爆破裂纹扩展深度为

$$R = \frac{\sqrt{6}}{2} \left[1 + 3 \sqrt{\frac{49033(0.0126z - 1.7 \times 10^4)}{S_t}} \right] r_c \quad (2)$$

对大理岩,岩石声阻抗 z 取 $(9 \sim 14) \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$; r_c 为炮孔半径,取 0.02 m; S_t 为大理岩的抗拉强度,取 4MPa。高应力状态下 z 取上限,计算得 $R \approx 3.3\text{m}$ ^[8,9]。因此,在上述直径的竖井中掘进时,在竖井井壁上钻深约 2.6~3.0m 的钻孔,并在孔底装 1/3 卷药卷实施爆破震动即可,这相当于在支承压力的峰值点附近(距离不超过 0.5m)实施爆破震动,将会加速支承压力的峰值向围岩深部转移,也会因钻孔孔壁和裂纹扩展区的压缩变形而引起部分垂直集中应力释放,从而达到降低和转移支承压力的效果,进而消除井壁岩爆。同样,在上述宽度的巷道中掘进时,在巷道腰墙处钻深约 2.0m 的钻孔,并在孔底装 1/3 卷药卷实施爆破震动,可以消除帮墙岩爆。

平巷掘进端面前方的地压分布与平巷单侧的地压分布类似。竖井掘进端面岩爆飞石是由于竖井井壁传递的支承压力的向上挤压掘进端面的结果。控制秦岭地区硬岩掘进端面的岩爆,熊祖强和贺怀建的研究表明,超深孔并不是越深卸压效果越好,而是超深达到掘进进尺的 2 倍,超深炮孔的总深度为掘进进尺的 3 倍时卸压效果最好^[10]。

2 巷道掘进的岩爆控制试验

某金矿掘进断面为 3200mm×2800mm 的长平硐。该平硐穿越交错分布的黑色煌斑岩、灰白色大理岩或灰岩。从平硐口向里延伸超过 3000m 后,山体与平硐水平的高差一般都超过 700m,局部达到 1200m,在掘进过程中当巷道穿越灰白色大理岩或灰岩时,巷道端面、巷道两帮常发生岩爆,多次导致飞石伤人事故。

由于熊祖强和贺怀建的理论研究已表明,秦岭地区硬岩中超深炮孔的总深度为掘进进尺的 3 倍时卸压效果最好^[10]。本试验根据钻爆法的卸压原理,结合现场施工条件和布孔习惯,在常规布置炮孔的基础上,采用 5m 超深 2.2m 掏槽、2.0m 布置其他炮孔而形成 1.7m 的掘进进尺,5m 超深 2.5m 掏槽、2.3m 布置其他炮孔而形成 2.0m 的掘进进尺和 4m 超深 2.5m 掏槽、2.3m 布置其他炮孔而形成 2.0m 的掘进进尺 3 种方案,从而达到超深炮孔的总深度分别为掘进进尺的 3、2.5 或 2 倍^[11],验证可以解决岩爆问题的超深炮孔的超深下线深度。又在第二圈辅助孔中间隔布置超深炮孔,或在靠近拱顶的第一、二圈辅助孔中呈近似等腰三角形布置 3 个超深炮孔^[11],验证可以解决岩爆问题的超深炮孔的布孔方式。如上正交后,共进行 6 种方案的掘进试验。每种方案至少试验 3 个掘进循环。

呈近似等腰三角形布置超深炮孔时,顶孔基本布置在巷道中轴线上,另 2 孔基本对称布置在巷道腰墙附近。为了控制卸压效果,超深孔装药时都要密实填充,并且用 10~20cm

的黄泥紧密堵塞孔口。

控制巷道两帮岩爆时,在两帮腰墙离地面高度 1.8~2.0m 处,分别沿巷道走向呈直线布置深约 2.0m 的卸压震动炮孔。孔间距分别取 1.0、1.5、2.0、2.5m。为了加速卸压或应力向岩体深部转移,分别在孔底装 1/3 卷炸药,并用 10~20cm 的黄泥紧密堵塞。每种方案同样至少试验 3 个掘进循环。

试验表明,按常规布置炮孔,并在靠近拱顶部位的第一、二圈辅助孔中呈近似等腰三角形布置 3 个满装药的紧密堵塞超深炮孔,形成 2.0m 的进尺,超深孔与进尺的比达到 2.0,可以有效控制巷道端面的岩爆飞石,仅个别时候巷道端面在出渣、凿岩时松石较多而需要反复撬毛。严格控制超深比和辅助孔中布置的超深孔数目,使超深炮孔深度与进尺的比越严格接近 3 倍关系,且超深孔布置的越多,卸压效果则越好,巷道端面也越无开裂或片帮现象发生。

在两帮腰墙离地面高度 1.8~2.0m 处,分别沿巷道走向呈直线布置孔间距约 2.0m、深约 2.0m 的仅孔底紧密堵塞 1/3 药卷的卸压震动炮孔,可有效控制巷道两帮的岩爆飞石。两帮卸压震动炮孔的间距小于 1.0m 时,常可观察到帮壁产生爆破裂纹。震动炮孔间距小于 1.5m 时,偶可观察到帮壁产生爆破裂纹。孔间距超过 2.5m 时,卸压效果不佳,偶发生飞石。

由于巷道穿过黑色煌斑岩时不发生岩爆,因此,当凿岩流出黑水时,既为了连续向深部转移峰值应力,又为了加快凿岩进度,仅保留呈三角形布置的顶端的 1 个超深炮孔,两帮卸压震动孔间距可放宽到 2.5m。

在马头门掘进中,端面岩爆的控制方式与巷道掘进完全相同,两帮岩爆的控制方式除在马头门开切的前 8~10 个循环(延伸 16~20m)略做改进外,其他完全相同。在马头门开切的前 8~10 个掘进循环中,为了避免孔底爆破震动破坏竖井井壁和码头门帮墙,不实施孔底爆破,但两帮腰墙上卸压钻孔深度加深到超过 b 值,即达到 2.5m 以上,孔间距缩小到 1.0m。考虑卸压效果和施工的方便性,码头门帮墙前 8~10 个循环的孔底不装药钻孔的深度取 3.0m。

如果端面超深孔满装药爆破后导致后续循环掘进卡钻,可采用孔底装药 1 卷并紧密堵塞 20cm 黄泥后,利用竹竿、泡水纸箱等孔内间隔,然后仅孔口 2.3~2.5m 类似非超深的辅助孔装药。为了改善掘进的爆破效果,还可在常规布置炮孔的基础上,在靠近拱顶部位的第一、二圈辅助孔中呈近似等腰三角形增加仅孔底装药 1 卷的 3 个紧密堵塞的超深炮孔。

3 竖井掘进的岩爆控制试验

某金矿在深部探矿工程中掘进直径 4m 的盲竖井。在近似东西宽约 4m 的竖井井壁及掘进端面上分布有灰白色大理岩或灰岩,其他分布的是黑色煌斑岩。放炮后 1~48h 内在白色大理岩或灰岩部位常发生岩爆飞石伤人事故。

根据钻爆法的卸压原理和巷道掘进的岩爆控制经验,结合现场施工条件和布孔习惯,采用 5m 超深 2.6m 掏槽、2.4m

布置其他炮孔而形成 2.0~2.2m 的掘进进尺控制端面岩爆,在白色大理岩或灰岩井壁采用水平间距 2.0m、深 2.6~3.0m 并孔底装药 1/3 卷的紧密堵塞钻孔来控制井壁岩爆。每掘进循环在近似东西的灰白色大理岩或灰岩井壁上各布置 4 个深约 2.6m、孔间距约为 2.0m 的孔底震动卸压钻孔,在端面掘进的第一、二圈辅助孔中东西各呈近似等腰三角形布置 3 个满装药的紧密堵塞超深炮孔。井壁卸压钻孔离掘进端面的高度依施工的方便性而定。

端面在下一掘进循环中发生卡钻时,在常规布置炮孔的基础上,将上述端面超深布孔方式改为沿第二圈辅助孔东西两侧各增加 2 个孔底装药 1 卷的紧密堵塞超深孔,这 2 对超深孔在垂直东西方向的间距约为 2m,介于灰白色大理岩或灰岩的中部。

试验表明,超深孔与进尺比例达到 2.3~2.5,基本能较好地控制竖井掘进的端面岩爆;在有岩爆倾向的岩石中东西两侧各呈三角形布置 3 个满孔装药并紧密堵塞的超深炮孔,下一掘进循环时严重卡钻。这时,在常规布置炮孔的基础上,将上述端面超深布孔方式改为沿第二圈辅助孔东西两侧各增加 2 个孔底装药 1 卷的紧密堵塞超深孔,成功控制了端面岩爆,并解决了后续掘进循环的卡钻问题。在有岩爆倾向的井壁采用水平间距 2.0m、深 2.6~3.0m 并孔底装药 1/3 卷的紧密堵塞钻孔,成功控制了井壁岩爆。

在接近码头门掘进标高的前 3~4 个竖井掘进循环,为了避免井壁孔底爆破震动破坏码头门顶板与帮墙,不实施孔底震动爆破,但井壁卸压钻孔的深度要加深到超过 b 值,即达到 3.2m 以上,孔间距缩小到 1.0m。考虑卸压效果和施工的方便性,接近码头门标高的前 3~4 个竖井掘进循环的井壁卸压钻孔深度取 3.5m。

接近码头门的竖井掘进及码头门分台阶爆破成巷中,采用光面爆破成井或分台阶光面爆破成巷,并及时布置网度为 $(1.0\sim 1.2)\times(1.0\sim 1.2)$ m 的锚杆临时支护井、巷,可确保码头门施工时不发生片帮、冒顶事故。

4 结论

(1) 在掘进端面第一、二圈辅助孔中呈三角形布置超深钻孔时,超深钻孔与掘进进尺比例达到 2~3 时可以控制掘进端面的岩爆。超深孔与进尺的比例越接近 3 时,控制岩爆的效果越好。

(2) 断面积越大,要求布置的超深孔数目越多。在辅助孔中呈三角形布置 3 个超深钻孔,可成功控制断面面积为 8m^2 以下的巷道、马头门掘进的端面岩爆。掘进直径 4m 的竖井,超深钻孔数不能少于 4 个。超深孔数目越多,控制岩爆的效果也越好,但施工成本越高。

(3) 在竖井壁或巷道拱腰布置间距约为 2.0m 的卸压震动炮孔,可成功控制井壁或帮墙岩爆。

(4) 如果巷道端面凿岩流出黑水,仅保留呈三角形布置

的顶端的 1 个超深炮孔。在竖井掘进端面如果凿岩都流出黑水,在原多发岩爆的端面东西各对称布置 1 个超深炮孔。这时,在原多发岩爆的竖井井壁或巷道帮墙的卸压震动孔间距可放宽到 2.5m。

(5) 为了避免爆破震动破坏竖井井壁或码头门,在接近码头门或马头门初切的几个掘进循环中,卸压钻孔孔底不实施震动爆破,但孔间距要适当缩小,钻孔要适当延深。

(6) 为了避免后续掘进循环在端面钻孔时卡钻,可将超深布孔方式改为在常规布置炮孔的基础上增加 3~4 个孔底装药 1 卷的紧密堵塞超超深钻孔。

参考文献 (References)

- [1] 王青海, 李晓红, 艾吉人, 等. 通渝隧道围岩变形和岩爆的数值模拟[J]. 地下空间, 2003, 23(3): 291-295.
Wang Qinghai, Li Xiaohong, Ai Jiren, et al. Underground Space, 2003, 23(3): 291-295.
- [2] 王献. 秦岭终南山特长公路隧道岩爆的治理 [J]. 铁道建筑, 2006(10): 50-51.
Wang Xian. Railway Engineering, 2006(10): 50-51.
- [3] 郭志强. 秦岭终南山特长公路隧道岩爆特征与施工对策[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(6): 58-62.
Guo Zhiqiang. Modern Tunnelling Technology, 2003, 40(6): 58-62.
- [4] 张可诚, 曾金富, 张杰, 等. 秦岭隧道掘进机通过岩爆地段的对策[J]. 世界隧道, 2000, 37(4): 34-38.
Zhang Kecheng, Zeng Jinfu, Zhang Jie, et al. The World Tunnel, 2000, 37(4): 34-38.

- [5] 李俊平, 连民杰. 矿山岩石力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 249, 277, 304.
Li Junping, Lian Minjie. Mine rock mechanics[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 249, 277, 304.
- [6] 黄晓彬, 唐剑. 锦屏辅助洞西端岩爆现象及治理 [J]. 西部探矿工程, 2008, 20(1): 154-156.
Huang Xiaobin, Tang Jian. West-China Exploration Engineering, 2008, 20(1): 154-156.
- [7] 胡威东, 杨家松, 陈寿根. 锦屏辅助洞(西端)岩爆分析及其防治措施[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 834-840.
Hu Weidong, Yang Jiasong, Chen Shougen. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(4): 834-840.
- [8] 李俊平, 卢连宁, 于会军. 切槽放顶法在沿空留巷地压控制中的应用 [J]. 科技导报, 2007, 25(20): 43-47.
Li Junping, Lu Lianning, Yu Huijun. Science and Technology Review, 2007, 25(20): 43-47.
- [9] 李俊平, 余志雄, 周创兵, 等. 水力耦合下岩石的声发射特征试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 492-498.
Li Junping, Yu Zhixiong, Zhou Chuangbing, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 492-498.
- [10] 熊祖强, 贺怀建. 深井矿山硬岩巷道岩爆治理方案研究[J]. 化工矿物与加工, 2006(9): 25-27, 37.
Xiong Zuqiang, He Huajian. Industrial Minerals & Processing, 2006(9): 25-27, 37.
- [11] 李俊平, 陈慧明. 灵宝县豫灵镇万米平洞岩爆控制试验[J]. 科技导报, 2010, 28(18): 57-59.
Li Junping, Chen Huiming. Science and Technology Review, 2010, 28(18): 57-59.

(责任编辑 吴晓丽)

· 学术动态 ·

中国科技论坛

为发挥中国科协所属学会在推动自主创新中的作用,中国科协于 2009 年 7 月起设立中国科协论坛。论坛旨在打造品牌型高端学术论坛,瞄准科学发展前沿,围绕建设创新型国家的战略目标,面向国家重大战略需求,紧密跟踪高技术发展趋势,就引领未来科技发展的关键科学问题、制约经济社会发展的瓶颈技术问题、重大工程技术中的核心科学问题,组织进行学术交流,以期提升学术交流层次,推动学科的交叉和融合,营造和谐学术环境,提高学术交流的质量和成效,促进自主创新和高层次人才成长,打造新的学术交流品牌,优化学术交流格局。

中国科协论坛强调主题前沿性、人员高端性、规模小型性和学科交叉性。主题采取学会申报、个人申报与专家推荐相结合的形式确定,要求在充分调研基础上确定主题发言,并形成基本完整的文本资料;实行首席科学家负责制,参会人员为相关领域的一线主流科学家和专家学者,采用主题报告与交流互动相结合、专家讨论与学者旁听相结合等多种交流形式,要求讨论时间应大于 50%;每期论坛完成后,由首席科学家牵头写出相关的学术备忘录,由中国科协视情报有关领导及相关部门。至 2012 年 11 月 20 日已成功举办 22 次。

信息来源: www.cast.org.cn。