

文章编号:0253-9993(2007)04-0373-04

深部岩巷爆破机理分析和爆破参数设计

王汉军^{1,2}, 杨仁树², 李 清²

(1. 北京工业职业技术学院 建筑工程系, 北京 100042; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘 要: 分析了深部岩巷端部的高应力分布特征和爆破应力场的分布规律, 采用数值计算和模型试验的手段对预加应力条件下的岩巷爆破作用机理进行了探讨. 研究表明, 深部岩石的水平应力大于垂直应力, 因而岩巷掘进时爆破应力场分布是不均匀的, 爆破裂纹的扩展具有方向性, 优先朝应力小的方向扩展; 深部岩巷的炮孔周围夹制作用增强, 岩石强度增加. 提出了适用于深部高应力岩巷掘进的爆破参数设计方法, 使深部岩巷爆破效果得到改善.

关键词: 深部岩巷; 爆破机理; 爆破参数; 高应力

中图分类号: TD235.33 文献标识码: A

Analysis of blasting mechanism for deep rock tunneling and blasting parameters design

WANG Han-jun^{1,2}, YANG Ren-shu^{1,2}, LI Qing¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Analyzed the high stress distribution characteristics of the deep tunnels and studied the mechanism of the blasting by numerical calculation and model test. The results show that the stress field distribution of blasting is not symmetrical because the level stress is bigger than the vertical stress in deep rock tunneling. Cracks of blasting extend in the direction of less stress first. Clamping effect boosts up around the boreholes and the intensity of rock increase. Put forward the principle of blasting parameters design and improved the quality of rock blasting about the deep rock excavation.

Key words: deep rock tunneling; mechanism of blasting; blasting parameter; high stress

随着对能源需求的增加和煤矿开采深度的不断加大, 国内外矿山相继进入深部能源开采状态, 我国煤矿开采深度正以每年 8~12 m 的速度增加. 深部岩体由于受到高地应力、特别是侧向高地应力的作用, 使其具有不同于浅部岩石的特征^[1]; 浅部岩体由于承受的地应力较小, 采用常规的光面爆破、微差爆破技术就可以使岩巷的爆破质量得到较大提高. 而深部高应力岩巷, 由于岩石的破坏机理由浅部的脆性能或断裂韧度控制的破坏转化为深部开采条件下的岩性力学响应行为^[1], 岩石强度明显增加, 岩体处于高压压缩变形或破坏极限状态; 爆破对围岩产生的破坏和扰动范围加大, 甚至会引起岩爆灾害. 因此, 研究适用于高应力条件下深部岩巷掘进爆破机理和爆破参数, 对于煤矿安全高效生产具有重要意义.

本文采用数值计算和试验研究方法探讨了高应力下的爆破应力场的特征, 探讨了高应力岩巷掘进爆破

机理, 提出适用于矿井深部岩巷掘进的爆破参数和设计技术, 以达到提高爆破效果, 保证巷道成型质量, 减少安全隐患的目的.

1 深部岩巷的应力特征

测量结果表明^[2], 绝大多数情况下, 深部岩体中天然水平应力与天然垂直应力的比值为 1.5 ~ 10.6. 深部岩巷开挖破坏了岩体原有的应力平衡, 将引起岩巷附近岩体应力状态的改变并发生应力的重新分布, 在一定范围内形成承压和应力集中. 由于岩巷端部承压、扰动范围与原岩应力成正比, 因而深部岩巷的端部其承压和扰动范围较大.

根据弹塑性力学理论分析, 开掘的巷道端面通过位移释放了部分原岩压缩变形势能; 随着应力状态的改变和围岩发生较大变形, 巷道端面的轴向应力降为 0, 而垂直应力 σ_v 和水平应力 σ_h 在距端面一定距离 L 处达到最大稳定值, 并随着距离的增加又趋于原岩应力 σ_{v0} 和 σ_{h0} . 最大扰动应力距巷道端部的距离可按下列式估算, 即

$$L = B[(1 - \sin \varphi)(\sigma_c + \sigma_0)/\sigma_c]^{1/(k+1)}, \quad (1)$$

式中, L 为最大应力距巷道端面的距离, m; B 为掘进巷道高度, m; φ 为掘进岩石的内摩擦角; σ_0 为原岩应力值; σ_c 为岩石的单向抗压强度; k 为岩石单向抗压强度与抗拉强度的比值.

巷道端部的应力分布状态如图 1 所示. 根据对巷道端部扰动区的超声波探测数据分析, 在距巷道端部 L 处岩石承受了最大应力, 在其扰动范围内, 岩石承受高应力作用而发生大变形或局部破裂, 处于峰压扰动之后的应变软化状态. 因此, 在该范围内实施爆破, 不仅要考虑高应力的夹制作用, 而且还要考虑应变能的大面积突然释放可能引发的岩爆. 因此, 合理的选取高应力岩巷的爆破参数, 不仅可以提高爆破效果, 而且可以防止发生岩爆.

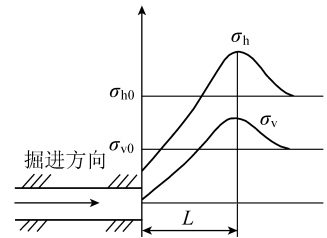


图 1 开挖巷道高应力分布状态

Fig. 1 The high stress situation of excavating tunnel

2 深部岩石爆破应力场分布

探讨深部岩石的爆破机理, 关键是了解爆破应力场在高应力条件下的分布特征以及初始应力的大小对爆破的影响. 为此, 本文使用 LS-DYNA 有限元程序, 采用 ALE 算法, 分别计算了平面应力状态和模拟深部岩巷开挖状态的爆破应力场分布. 平面应力状态分为自由边界和边界预加不同应力值 ($\sigma_h = 5$ MPa, $\sigma_v = 25$ MPa) 两种工况计算, 模型尺寸为 1.0 m × 1.0 m, 厚度为 0.01 m, 中心炮孔直径为 35 mm; 深部岩巷模型预加应力 $\sigma_h = 10$ MPa, $\sigma_v = 50$ MPa, 巷道为半圆拱形, 高 3.6 m, 宽 4.0 m. 岩石的物理力学参数: 密度为 2 261 kg/m³; 弹性模量为 17.83 GPa; 泊松比为 0.271; 抗拉强度为 10 MPa; 屈服应力为 106 MPa; 声波波速为 4 100 m/s. 使用乳化炸药, 耦合装药, 密度为 1 160 kg/m³, 爆速为 5 500 m/s. 计算模型如图 2 所示, 计算结果如图 3, 4 所示.

由图 3 可以看出: 对于平面应力状态, 自由边界爆破时炮孔附近应力分布为一簇规则的同轴圆, 但预加初始应力后改变了爆破应力场的均匀传播特征, 由不均匀的静态应力场与爆破应力场迭加, 最终的应力分布不是同心圆, 而是在施加压力大的方向应力线分布密集, 在施加压力小的方向应力线分布稀疏, 这说明未加压方向或压力小的方向是爆破变形和压缩能的释放方向.

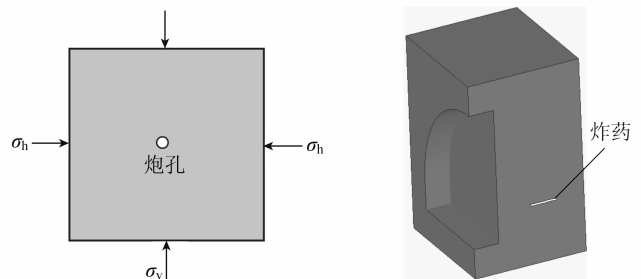


图 2 平面应力状态和深部岩巷掘进计算模型

Fig. 2 Calculation models of plane stress and deep rock blasting

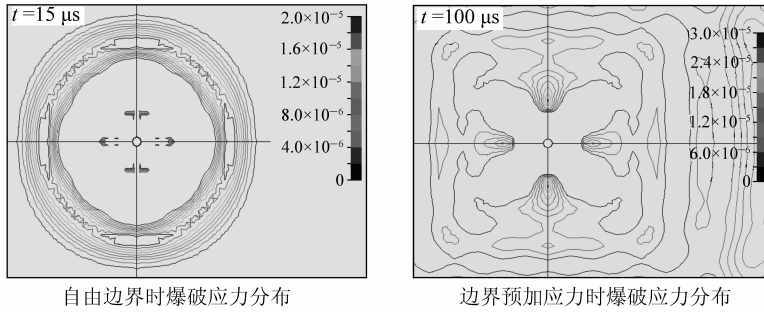


图 3 平面应力状态爆破应力场分布

Fig. 3 Blasting stress fields distribution at plane stress condition

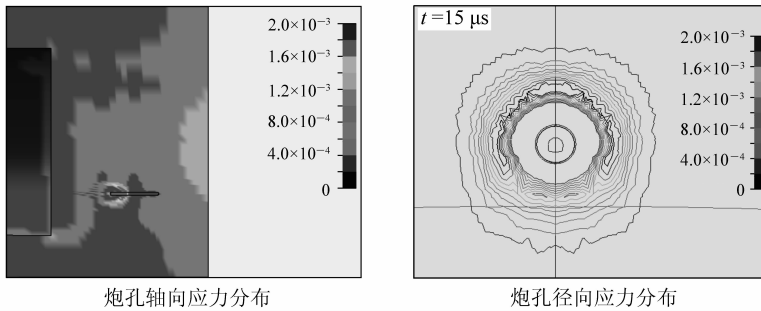


图 4 深部岩巷掘进爆破应力场分布

Fig. 4 Blasting stress fields distribution at deep rock excavating

深部岩巷掘进爆破应力分布的数值计算结果也具有相同的规律，说明当深部岩石的水平应力与垂直应力比值较大时，爆破裂纹的扩展具有方向性，优先朝应力小的方向扩展；岩石承受高应力作用时，其抗拉强度有所增加，因而爆破时的夹制作用也相应加大。

平板有机玻璃的预加应力动光弹爆破实验研究表明^[4]，初始应力状态不同，爆破后的应力场扩展状态明显不同。当双向应力比值较大时，初始应力场引起的非均匀变形对爆破应力场的扩展导向十分明显，应力边界在一定程度上抑制了反射拉伸波发生与发展，介质的破坏是以挤压和压剪破坏为主，以自由面反射拉伸为主的爆破机理并不完全适合于高应力条件下的岩石爆破。

3 深部岩巷掘进爆破参数的设计

通过对深部岩巷端部的高应力分布特征分析和爆破应力场的分布规律的研究，说明在深部高应力岩体实施巷道掘进爆破时，炮孔周围夹制作用增强，爆炸应力波在炮孔间的相互反射作用减弱，因此爆破参数应采用挤压破坏和压剪平衡原理进行合理设计。

3.1 炮眼深度

高应力条件下在巷道端部一定范围内的岩石处于变形极限或塑性应变状态，由图 1 可知，最大应力值在距端面 L 处。因此，为了减少每次爆破对原岩的扰动，防止触发岩爆，合理的炮眼深度应小于 L ，即 $L_0 < L$ 。从理论上讲，炮眼深度愈小，爆破对岩石的扰动愈小，愈有利于围岩的稳定；但考虑到岩巷掘进的实际情况，炮孔深度应适当加大，合理的炮孔深度应满足爆破后岩石的变形能由新端面稳定释放，且炮眼底部的应力值小于岩石单轴抗压强度的 $2/3$ 。合理的炮眼深度计算式为

$$L_0 = \beta L [(\sigma_c - \sigma_0) / \sigma_c]^2,$$

式中， L_0 为合理炮眼深度，m； β 为与巷道形状有关的修正系数，可取 1.2 ~ 1.5，圆形巷道取较大值。

根据现场试验结果，在深部高地应力条件下，岩巷掘进爆破的炮孔深度不应超过 3.5 m；合理的炮眼

深度为 1.8 ~ 2.6 m.

3.2 掏槽方式

掏槽爆破效果直接影响炮眼利用率和循环进尺. 由于深部岩巷具有高应力的特征, 岩石的强度高, 夹制作用增强, 因而掏槽爆破难度增加. 以斜眼掏槽方式为主, 建议采用双楔型复式掏槽形式, 这样有利于克服高应力岩石的夹制作用, 便于槽腔内岩石的抛出; 当岩巷断面较小或钻眼机具受限而不便采用斜眼掏槽时, 应利用大直径的空孔提供自由面或增加掏槽眼数目、减小掏槽眼孔距的方式进行直眼掏槽爆破, 并增加直眼掏槽爆破的装药量.

3.3 光爆参数

在高应力条件下, 若周边眼爆破方法不当, 不仅会造成超欠挖, 而且会加大围岩的损伤和应力扰动范围, 给后续的支持增加困难. 爆破时要采用不耦合装药或空气间隔装药, 同时在岩石承受最大应力方向的周边眼间距应适当减小, 以保证光爆效果.

炮眼间距 $a = \left(\frac{2bp_2}{\sigma_1} \right)^{1/\alpha} d_b$, 其中 b 为侧向应力系数; p_2 为炮眼中的准静态压力; σ_1 为岩石抗压强度;

α 为应力衰减指数; d_b 为炮孔直径. 每米炮眼的装药长度 $l_c = \frac{8k_b\sigma_c}{n\rho_0 D^2} \left(\frac{d_b}{d_c} \right)^6$, 其中 k_b 为岩石抗拉强度; n 为炸药爆炸产物碰撞炮孔壁时的压力增大系数; ρ_0 为装药密度; D 为炸药爆速; d_c 为装药直径; k_b 为装药不耦合系数.

3.4 起爆方式

由巷道端面的应力分布特征可知, 随着炮孔深度的增加, 分布应力值逐渐增大. 因此, 掏槽眼爆破时除加大装药量以外, 应采用反向起爆, 使炸药爆破作用时间延长, 破碎和抛掷作用加大. 辅助眼由于是在掏槽眼爆破后起爆, 利用了槽腔提供的新自由面, 其炮眼周围的高应力已重新分布, 围岩应力较掏槽眼爆破时大为降低, 因此不必增加装药量, 可采用正向起爆, 以减少爆破冲击扰动, 提高施工安全性.

4 结 论

深部岩巷开挖破坏了岩体原有的应力平衡, 岩巷端部的应力和扰动范围较大. 数值计算和实验结果表明: 深部高应力岩巷掘进爆破时, 由于岩石的水平应力大于垂直应力, 爆破应力场分布是不均匀的, 爆破裂纹的扩展具有方向性, 优先朝应力小的方向扩展; 岩石承受高应力作用时, 其强度也相应地增加, 炮孔间的爆破作用以挤压或压剪破坏为主; 深部岩巷掘进爆破的炮眼深度应小于最大应力值点到岩巷端面的距离 L ; 利用爆破应力场的不均匀性, 可适当加大垂直方向的炮眼间距 (大于水平方向的炮眼间距), 减少炮眼数目; 岩石夹制作用增强, 掏槽爆破难度加大, 应增加掏槽爆破装药量.

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]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (16): 2 804 ~ 2 811.
- [2] 吴德伦, 黄质宏, 赵明阶. 岩石力学 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002. 111 ~ 115.
- [3] Clary M. Effects of depth on rock fracture [A]. In: Rock at Great depth [C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989. 1 153 ~ 1 163.
- [4] 龚 敏. 于亚伦. 爆破动态应力场量化研究原理与初步实验 [J]. 爆炸与冲击, 1997 (1): 43 ~ 49.