

井下单自由面深孔爆破堵塞结构运动规律及长度确定

王姝媛,张昌锁,韩秉呈

(太原理工大学 矿业工程学院,山西 太原 030024)

摘要:为确定井下单自由面深孔爆破合理堵塞长度,采用理论分析和数值计算的方法研究了堵塞结构运动规律,完善了堵塞结构运动的力学模型,计算中考虑了粉碎区扩腔作用和爆生裂纹扩展导致的爆生气体压力变化,并考虑了裂纹扩展中地应力的抑制作用。研究表明,岩石单轴抗压强度和地应力越大,堵塞结构越容易冲出炮孔,且堵塞长度与线装药密度之间有较强的相关性。同时,计算得到了线装药密度分别为1、3及9 kg/m时不同炮孔长度的合理堵塞长度,在工作面硬岩预弱化及预裂爆破切顶卸压工程实践中得到了验证,成功解决了井下单自由面深孔爆破关于堵塞的技术难题,研究成果为类似工程中堵塞长度的准确确定提供了借鉴。

关键词:井下单自由面;深孔爆破;堵塞结构;堵塞长度;爆生气体压力

中图分类号:TD235

文献标志码:A

Motion law and length determination of stemming structures in underground mine's single free-face deep-hole blasting

WANG Shuyuan, ZHANG Changsuo, HAN Bingcheng

(College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To determine the optimal stemming length for underground mine's single free-face deep-hole blasting, theoretical analysis and numerical calculations were employed to investigate the motion law and perfect the mechanical modeling of the stemming structure. In the calculation, the variations in detonation gas pressure resulting from cavity expansion and crack propagation in the crushing zone as well as the suppression of in-situ stress on the propagation of the cracks were considered. The results indicate that the greater the uniaxial compressive strength and in-situ stress of the rock are, the easier it becomes for the stemming structure to be punched out of the hole, and there is a strong correlation between the stemming length and the linear charge density. The optimal stemming lengths for various borehole depths under line charge densities of 1, 3, and 9 kg/m were obtained from calculations and were validated in the engineering practice of hard rock weakening at the working face and the top-cutting pressurization during pre-fracture blasting. This approach successfully addressed the technical challenge of stemming in underground mine's single free-face deep-hole blasting. The findings of this research offer valuable reference for accurately determining stemming lengths in similar projects.

Key words: underground mine's single free face; deep-hole blasting; stemming structure; stemming length; detonation gas pressure

收稿日期:2024-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(52374134);山西省自然科学基金项目(202203021221082);爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金项目(KFJJ20-05M)

作者简介:王姝媛(2000—),女,山西临汾人,硕士研究生,主要从事深孔爆破等方面的研究。

张昌锁(1968—),男,山西忻州人,教授,博士,主要从事工程爆破及岩土力学等方面的研究,本文通信作者。

E-mail: zhangchangsuo@tyut.edu.cn

井下单自由面爆破的应用场景比较广泛,例如沿空留巷预裂爆破切顶、坚硬顶板的弱化和工作面硬岩预弱化以及煤层弱化防突等均为单自由面爆破。相较两自由面台阶爆破,单自由面爆破受到的夹制作用较大,岩石较难破坏,且受地应力影响很难在炮孔间形成贯穿裂纹^[1-3],需要保证爆生气体作用时间来促进裂纹扩展,凸显了井下单自由面深孔爆破合理堵塞的重要性^[4-6]。

目前关于堵塞长度和堵塞结构运动规律已有大量理论和实验研究。宗琦^[7]分析了堵塞物的运动规律,得到了浅孔崩落爆破和光面爆破的合理堵塞长度。秦声等^[8]结合实验指出堵塞结构的变加速运动不可忽略。张艳军等^[9]采用理论分析和数值模拟相结合的方法对炮孔堵塞机理进行分析,考虑了堵塞物的压缩变形。梁瑞等^[10]推导出确定采场多自由面爆破炮孔堵塞长度取值范围的函数。杨才亮^[11]采用动力分析软件 LS-DYNA 及任意拉格朗日-欧拉(arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)算法直观演示了单自由面无限岩体中深孔微差爆破应力波的传播。吴再海等^[12]基于 LS-DYNA 和颗粒流(particle flow code, PFC)程序,建立了改进的岩体爆破离散元模拟方法。Chen 等^[13]考虑了滑动摩擦阻力沿轴向的不均匀分布,提出了将堵塞结构分时分段求解的新方法。

但对于堵塞结构力学机理和运动规律等方面的研究仍存在不足。首先,在堵塞结构运动模型的研究中,大多学者将堵塞结构视为整体,忽略滑动摩擦力沿轴向的变化,未考虑堵塞结构部分冲出后引起的摩擦力下降。其次,在确定爆炸压力时程曲线时,多采用经验公式对爆生气体作用时间进行估算,估算结果与实际相差较大,且在确定最佳堵塞长度时未考虑与周围炮孔的相互作用。此外,当前对堵塞结构研究的应用场景多为露天两台阶爆破,无需考虑井下单自由面的强夹制作用以及地应力对裂纹扩展的抑制作用,堵塞长度大多在几米范围内,然而井下深孔爆破的炮孔长度长达几米到数十米,爆生气体作用时间长,根据现有经验公式和理论计算无法准确确定井下单自由面深孔爆破的最佳堵塞长度。

针对井下单自由面深孔爆破最佳堵塞长度确定的技术难题,基于 Chen 等^[13]提出的分时分段求解方法,克服其使用半理论半经验双指数衰减公式确定爆生气体推力的不足,进一步完善了堵塞结构力学模型,优化了最佳堵塞长度确定准则。结合工程需要,计算了井下单自由面围岩弱化爆破和切顶卸压爆破的堵塞长度建议值,并在现场工程中得到验证,编写出一套可用于确定合理堵塞长度且相对可靠的计算程序。

1 堵塞结构的力学机理

1.1 堵塞结构力学模型

堵塞结构在炮孔中的运动大致可分为两个阶段,一是爆炸应力波作用下的微观波动,二是爆生气体作用下的宏观运动。图 1 是堵塞结构运动的力学模型,在运动过程中堵塞结构受到爆炸荷载 F_x 、堵塞结构与孔壁之间的滑动摩擦力 F_f 以及孔壁施加的侧向压力 F_k 。为了便于对堵塞结构运动进行分析,提出以下模型假设:①第一阶段堵塞结构的压缩过程为应力波传播过程,时间很短,在计算中忽略不计,其效应作为第二阶段计算的初始条件;②第二阶段经压实后的堵塞结构运动视为刚体运动。

1.2 应力波作用阶段

第一阶段作用效应主要有两方面,一是压缩堵塞结构并使其产生初速度,二是在炮孔周围形成粉碎区。

1.2.1 堵塞结构压缩并产生初速度

第一阶段堵塞结构与炮孔间的滑动摩擦阻力可根据牛顿第三定律和泊松效应由式(1)得到。

$$F_f^1 = P_w \cdot \lambda f \cdot 2\pi r_b l_s. \quad (1)$$

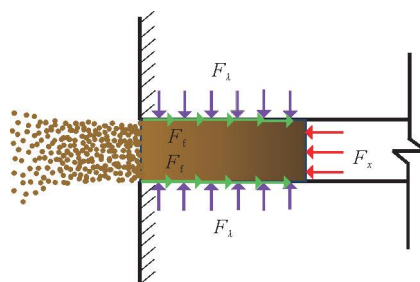


图 1 堵塞结构运动的力学模型

Fig. 1 Mechanical model of stemming structure movement

式中: F_f^1 为第一阶段的滑动摩擦阻力, N; λ 为侧压系数, $\lambda = \mu_d / (1 - \mu_d)$; μ_d 为动态泊松比; f 为滑动摩擦系数; r_b 为炮孔半径, m; l_s 为堵塞长度, m; 爆轰压力 $P_w = \frac{\rho_0 D^2}{4}$, Pa; ρ_0 为炸药密度, kg/m³; D 为爆速, m/s。

第一阶段利用动量定理根据式(2)可以得到堵塞结构运动的初速度 v_0 。

$$I_p - I_f = M_s v_0 \quad (2)$$

式中: $I_p = P_w \cdot \pi r_b^2 \cdot T_0$, N · s; T_0 是爆炸应力波在堵塞结构中的传播时间, 可以通过堵塞长度和应力波在堵塞结构中的传播速度得到; $I_f = F_f^1 T_0$, N · s; M_s 为堵塞结构的质量, kg; v_0 为宏观运动阶段的初始速度, m/s。

1.2.2 粉碎区的扩腔效应

现有井下单自由面爆破堵塞结构运动的计算均未考虑粉碎区体积, 导致计算的气体压力比实际偏大。不耦合装药炮孔粉碎区直径 D_{b1} 和耦合装药时的炮孔粉碎区直径 D_{b2} , 可分别利用式(3)和式(4)计算^[14], 根据粉碎区的直径 D_b (D_{b1} 或 D_{b2}), 利用式(5)可以得到粉碎区体积 V 。

$$D_{b1} = \left(\frac{\rho_0 D^2 n B k_d^{-2\gamma} l_c}{8 \sqrt{2} \sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \cdot d_b \quad (3)$$

$$D_{b2} = \left(\frac{\rho_0 D^2 A B}{4 \sqrt{2} \sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \cdot d_b \quad (4)$$

$$V = \frac{1}{4} \pi D_b^2 (l_b - l_s + \Delta l) \quad (5)$$

式中: n 为爆炸产物碰撞孔壁时压力增大系数, 一般取 10; k_d 为径向不耦合系数, $k_d = r_b / r_c$; r_c 为装药半径, m; γ 为等熵或绝热指数; l_c 为轴向装药系数, $l_c = l_e / (l_e + l_a)$; l_a 为空气间隔长度, m; l_e 为装药长度, m; d_b 为炮孔直径, m。 σ_{cd} 为岩体单轴动态抗压强度, Pa; $\alpha = 2 + \lambda$, α 为冲击波区载荷传播衰减指数; A 为应力波折射系数, $A = \frac{2\rho_c C_p}{\rho_c C_p + \rho_0 D}$; ρ_c 为岩体密度, kg/m³; C_p 为弹性纵波速度, m/s; $B = \sqrt{(1 + \lambda)^2 + (1 + \lambda^2) - 2\mu_d(1 - \mu_d)(1 - \lambda)^2}$; Δl 为第一阶段堵塞结构的压缩量, m, 由结构初始孔隙率和压实后的孔隙率得到。

计算得到的粉碎区体积包含留在腔内的破碎岩体体积, 不等于粉碎空腔体积, 需要进行折减, 折减系数与岩体强度有关, 岩体强度越高, 岩石越难被压缩, 折减系数越小。

1.3 爆生气体作用阶段

爆生气体压力是第二阶段堵塞结构运动的主动动力, 压力下降的原因是爆生气体膨胀做功导致体积增大, 增大的体积主要来源于两部分, 一是爆生裂纹扩展, 二是堵塞结构运动。

爆生气体密度很大, 理想气体状态方程已不再适用, 计算时需考虑爆生气体本身不可压缩的体积, 因此采用阿贝尔状态方程根据式(6)计算爆炸产物在炸药初始体积内达到热平衡后的气体压力 P_0 。由于爆生气体膨胀迅速, 认为膨胀过程等熵绝热^[15]。

$$P_0 = \frac{n_m R T}{V_{sp} - \alpha_c} \quad (6)$$

式中: n_m 是气体物质的量; R 是摩尔气体常数, $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 是爆温, K; V_{sp} 是炸药比容, α_c 是气体分子的余容。

1.3.1 裂纹扩展引起体积增加

裂纹扩展较复杂且实际扩展速度难以测得, 目前已知裂纹扩展的峰值速度是纵波波速的 0.38 倍^[16], 裂纹长度可以利用裂纹扩展的平均速度和时间得到。根据 Schmidt 的岩石断裂力学理论^[17], 当岩体裂纹尖端的应力强度因子 K_I 大于岩石的动态断裂韧性 K_{Ic} 时, 裂纹开始扩展, 反之则止裂。裂纹尖端的应力强度因

子根据式(7)计算^[16]。

$$K_1 = F\sigma \sqrt{\pi(r_b + a_{l0})}。 \quad (7)$$

式中: K_1 为裂纹尖端应力强度因子; F 为应力强度因子修正系数,是关于炮孔半径和裂纹长度的函数, $F = f\left[\frac{r_b + a_{l0}}{r_b}\right]$; a_{l0} 为初始导向裂纹长度^[18],m; $a_{l0} = \left(\frac{\lambda P_w}{\sigma_t}\right)^{1/\beta} r_b$, σ_t 为岩石动态单轴抗拉强度,Pa; β 为应力波衰减指数; σ 为裂纹尖端受到的应力,Pa。因为埋深较大,所以地应力不可忽略,认为 σ 是爆炸压力与垂直于裂纹扩展面的地应力之差。

通过裂纹数量、裂纹宽度和长度根据式(8)可以得到裂纹体积 V_1 。

$$V_1 = y \cdot 0.5a_1b_1l_e。 \quad (8)$$

式中: y 为裂纹数量; a_1 为裂纹长度,m; b_1 为裂纹宽度,本研究设定为0.008 m。

1.3.2 堵塞结构运动引起体积增加

影响堵塞结构运动的主要因素是爆生气体推力和滑动摩擦阻力,爆生气体推力是堵塞结构运动的主动动力,同时堵塞结构的运动会导致爆生气体推力下降,部分堵塞结构冲出后还会导致滑动摩擦阻力下降。爆生气体作用阶段的滑动摩擦阻力由 F_{f1}^2 和 F_{f2}^2 两部分组成^[13],分别通过式(9)、式(10)计算。

$$F_{f1}^2 = E_s \epsilon \cdot \lambda f \cdot 2\pi r_b l_s。 \quad (9)$$

$$F_{f2}^2 = P_x(t) \cdot \lambda f \cdot 2\pi r_b l_s。 \quad (10)$$

式中: F_{f1}^2 为第二阶段滑动摩擦力第一部分,N; E_s 为压缩模量,Pa; ϵ 为应力波作用下的轴向应变。 F_{f2}^2 为第二阶段滑动摩擦力第二部分,N; $P_x(t)$ 为不同时刻下的爆生气体压力,Pa。

基于Chen等^[13]提出的分时分段求解方法,在任意微小时间段 t 内各个微小堵塞段之间的受力通过式(11)求解。

$$\begin{cases} F_{x1}(t) - F_{f1-1}^2(t) - F_{f2-1}^2(t) = M_1 a_2(t), \\ F_{x2}(t) - F_{f1-2}^2(t) - F_{f2-2}^2(t) - F'_{x1}(t) = M_2 a_2(t), \\ F_{x3}(t) - F_{f1-3}^2(t) - F_{f2-3}^2(t) - F'_{x2}(t) = M_3 a_3(t), \\ \dots \\ F_{xn}(t) - F_{f1-n}^2(t) - F_{f2-n}^2(t) - F'_{x(n-1)}(t) = M_n a_n(t)。 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $F_{xn}(t)$ 为第 n 微小空间段的轴向力,N; F_{f1-n}^2 和 F_{f2-n}^2 分别为宏观运动阶段的第一部分滑动摩擦阻力和第二部分滑动摩擦阻力,N; $F'_{x(n-1)}(t)$ 为第 $n-1$ 微小空间段对第 n 微小空间段施加的力,N; M_n 为第 n 微小堵塞段的质量,kg; a_n 为第 n 微小堵塞段的加速度,m/s²。

因堵塞结构运动引起的体积增量由式(12)求得。

$$V_s = \pi r_b^2 x。 \quad (12)$$

式中: V_s 是因堵塞结构运动引起的体积增量,m³; x 是堵塞结构的位移,m。

1.3.3 爆生气体作用阶段气体压力计算

爆生气体作用阶段气体压力 P 通过式(13)计算。

$$P = P_1 \left(\frac{V}{V + V_1 + V_s} \right)^k。 \quad (13)$$

式中: P_1 为形成粉碎区后瞬间炮孔的气体压力,Pa; V_0 为炸药的初始体积,m³; V 为形成粉碎区后的炮孔体积,m³; $P_1 = P_0 \times \left(\frac{V_0}{V} \right)^k$; $V_0 = \pi r_c^2 l_c$ 。

2 堵塞结构运动影响因素

文献[13]研究了爆生气体持续时间、滑动摩擦系数、炮孔直径、堵塞长度等对堵塞结构运动的影响。本研究对岩石单轴抗压强度和地应力的影响进行了分析,此处讨论的地应力为不同埋深引起的原岩应力。采

用控制变量法,分别计算了岩石单轴抗压强度 40~100 MPa 和地应力 0~8 MPa 时堵塞结构的运动情况。计算中炮孔长度取 35 m、直径 94 mm,炸药为煤矿许用 2[#] 乳化炸药,爆速 $D_v=3\ 000$ m/s。堵塞材料选用黄土,压缩模量为 107 MPa^[19],动态泊松比为 0.29。炸药的线装药密度为 3 kg/m,堵塞长度为 6 m。在研究岩石单轴抗压强度的影响时,控制地应力为 7 MPa;研究地应力的影响时,控制单轴抗压强度为 80 MPa。

图 2 为不同岩石单轴抗压强度下堵塞结构速度和位移随时间变化的曲线。岩石单轴抗压强度会直接影响第一阶段产生粉碎区体积的大小,单轴抗压强度越大,岩石越难破碎,产生的粉碎区体积越小,爆生气体压力就越大。当岩石单轴抗压强度较大时,堵塞结构将加速运动直至冲出炮孔;当岩石单轴抗压强度较小时,堵塞结构会先加速后减速,若堵塞结构冲出炮孔后导致后续滑动摩擦阻力小于爆生气体压力,堵塞结构就会加速运动,否则会一直减速至速度为 0。

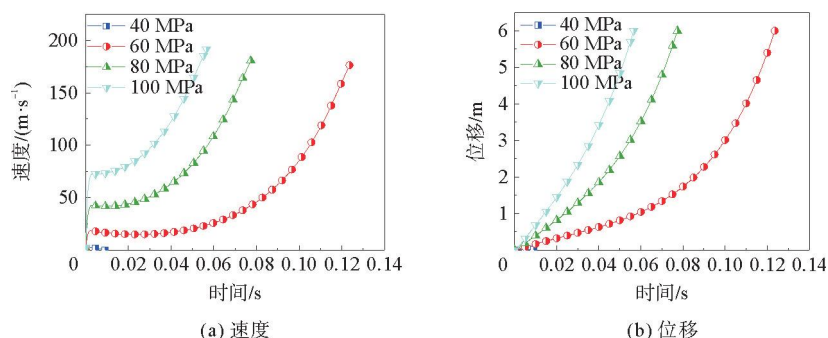


图 2 不同单轴抗压强度下堵塞结构的速度和位移曲线

Fig. 2 Velocity and displacement curves of the stemming structure under different uniaxial compressive strengths

图 3 为垂直于裂纹扩展方向不同地应力下堵塞结构的速度和位移随时间变化的曲线。当地应力较大时,产生的夹制作用也较大,裂纹较难扩展,产生的体积较小,因此爆生气体压力下降的速度较慢,堵塞结构更容易冲出炮孔;当地应力较小时,堵塞结构最终会停止运动。

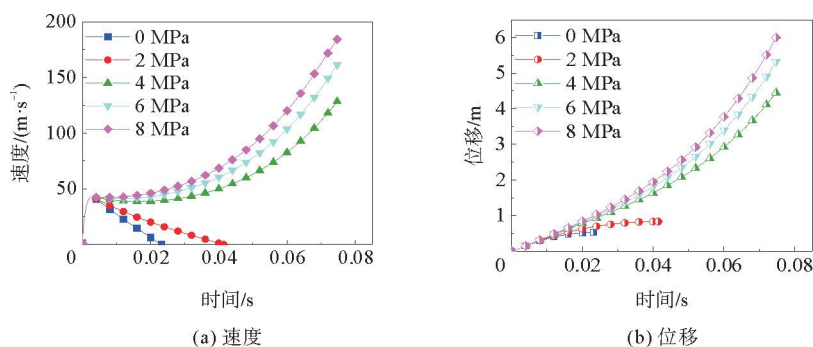


图 3 不同地应力下堵塞结构的速度和位移曲线

Fig. 3 Velocity and displacement curves of the stemming structure under different in-situ stresses

3 不同线装药密度下堵塞长度建议值及现场应用

3.1 最佳堵塞长度确定准则

在现场爆破作业中,炮孔不可能单独起爆,而现有研究中关于堵塞结构的运动都没有考虑炮孔间的相互作用。针对这种不足,提出以两个炮孔贯通时堵塞结构还没有完全冲出炮孔作为确定最佳堵塞长度的依据。模型中堵塞结构的运动情况分三种:第一种是在爆生气体作用下最终停止运动,此时堵塞结构速度降为 0;第二种是在运动过程中相邻两个炮孔已经贯通,程序停止运算;第三种是相邻两个炮孔在没有贯通时堵塞结

构就已经冲出炮孔,此时堵塞结构的位移值等于堵塞长度,程序停止运算,这种情况下堵塞结构失效。

3.2 井下围岩弱化和切顶卸压预裂爆破堵塞长度建议值及现场应用

目前对于井下单自由面深孔爆破堵塞长度的确定缺乏文献参考,在工程上只能通过经验尝试。因此,根据实际工程需要对井下围岩弱化和切顶卸压预裂爆破常见线装药密度下堵塞结构运动进行计算,给出了不同炮孔长度下堵塞长度建议值,并进行了现场验证。

3.2.1 3 kg/m 的线装药密度下围岩弱化预裂爆破

山西焦煤集团西曲矿 18405 工作面范围存在无煤带异常区,过 E1406 陷落柱,钻探显示揭露异常区为坚硬石灰岩体,综合考虑后决定采用深孔松动预裂爆破对无煤带范围进行预弱化。工作面埋深 169~258 m,工作面所在 8[#] 煤层为厚煤层,煤层厚度 3.85~4.15 m。根据上组煤及相邻工作面开采资料分析,18405 工作面掘进至距开口 345 m 会揭露陷落柱 E1406,预计充填物以细砂岩、灰岩、砂质泥岩为主,夹少量煤屑。砂岩钙质胶结,中厚层,中细粒砂岩,裂隙不发育,岩石单轴抗压强度 60~80 MPa,在施工方向长 42 m;巷道采用矩形断面,净宽 4.8 m,净高 3.5 m。根据西山矿区地应力实测资料^[20],该位置的竖直地应力为 3~5 MPa,水平地应力为 5~8 MPa。炮孔沿水平方向 0°打设,炮孔长度根据侵入岩体范围确定,直径 94 mm,当钻孔遇煤及时停钻。陷落柱在副巷范围内的长度为 42 m,因此布置 29 个炮孔,炮孔间距设置为 1.5 m,图 4 为 18405 工作面巷帮炮孔布置图。

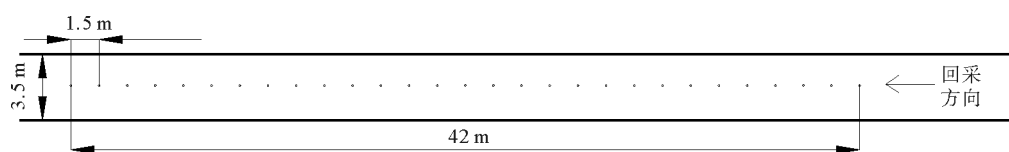


图 4 西曲矿 18405 工作面巷帮炮孔布置图

Fig. 4 Borehole layout of 18405 working face roadside in Xiqu Mine

根据爆破对象的岩石力学性质,选用煤矿许用 2[#] 粉状乳化炸药被筒装药,被筒壳体为聚氯乙烯材质,内含阻燃、防静电材料,药卷规格为 $\Phi 35 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 0.3 kg/卷,3 卷捆绑后放入被筒内,线装药密度为 3 kg/m,堵塞材料选用较潮湿的黄土,滑动摩擦系数为 0.03^[21]。

对炮孔长度 10~20 m 的堵塞结构运动进行了数值计算,得到炮孔长度为 10 m 时,最佳堵塞长度为 4 m;炮孔长度为 15 m 时,最佳堵塞长度为 5 m;当炮孔长度为 20 m 时,最佳堵塞长度也为 5 m。在西曲矿 18405 工作面选用 35 m 的炮孔进行实验,计算得到当炮孔长度为 35 m 时,最佳堵塞长度为 7 m,如图 5 所示。现场试验首先根据经验选取堵塞长度为炮孔直径的 100 倍,即 10 m 进行试爆,堵塞效果较好。随后采用 7 m 的堵塞长度试爆,堵塞结构仍然没有冲孔,如图 6(a)所示,但是在堵塞长度为 6 m 时出现了冲孔,如图 6(b)所示,计算结果与现场试验相符。图 7 为爆破结束割煤机切割后的效果图,可以看出炮孔相对完整,破碎效果较差。

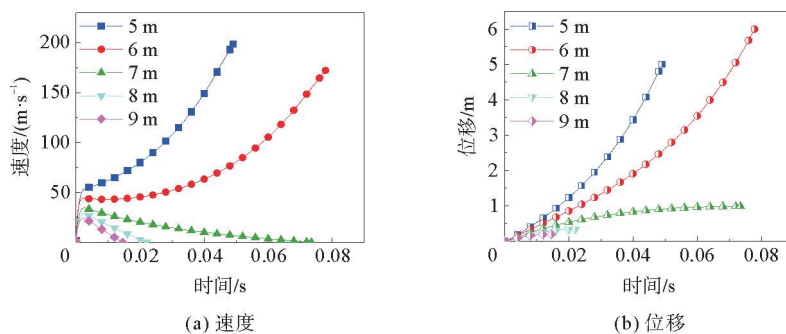


图 5 炮孔长度为 35 m 时堵塞结构的速度和位移曲线

Fig. 5 Velocity and displacement curves of the stemming structure for a borehole length of 35 m

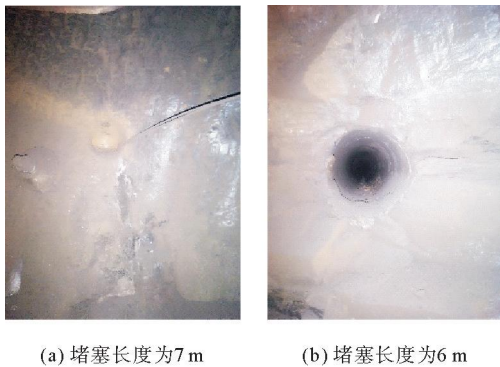


图6 炮孔长度为35 m时不同堵塞长度的堵塞效果

Fig. 6 Stemming effects at different stemming lengths for a borehole length of 35 m



图7 西曲矿18405工作面爆破后效果图

Fig. 7 Blasting effect of 18405 working face in Xiqu Mine

3.2.2 9 kg/m 的线装药密度下围岩弱化预裂爆破

西曲矿18501(2)工作面范围也存在无煤带异常区,通过工作面的阶梯布置虽避开了E1522无煤区但无法避开F15136断层,同样采取深孔松动预裂爆破进行预弱化。18501(2)工作面埋深200~230 m,根据工作面掘进、上覆4[#]煤回采掘进资料分析,工作面地质构造条件中等,预计回采中会受到落差为2.8~3.5 m和3.0~5.1 m正断层影响。其中,落差为2.8~3.5 m断层贯穿正副巷90 m,预计推进方向影响45 m,5.1 m断层靠近副巷一侧延伸长63 m,对回采影响较大。受断层影响,构造附近顶板节理、裂隙发育。被爆破弱化的岩体埋藏较深且处于三向受压状态,砂岩硅质胶结,厚层,石英质砂岩,裂隙不发育,未风化岩石单轴抗压强度80~140 MPa,无原始碎胀空间。

18405工作面采用3 kg/m的线装药密度时没有达到预期工程目标。为了改善破碎效果,加大炮孔装药量,炮孔直径和选用的炸药类型不变,堵塞材料为黄土,采用全耦合装药,将粉状乳化炸药去除外包装后过筛,利用风压进行装药,增加了炸药密度,现场根据总体装药量与炮孔长度计算,得到线装药密度为9 kg/m,但在炮孔较浅处装药时会出现返药现象,导致有小部分药量损失,这部分药量无法准确确定。本次爆破方案共打设两排炮孔,第一排距底板1.3 m打15个炮孔,第二排距底板1.8 m打15个炮孔,采用三花型布置,每个炮孔设计长度40 m,间距1.5 m,共计打设30个炮孔。工作面炮眼布置剖面图如图8所示。

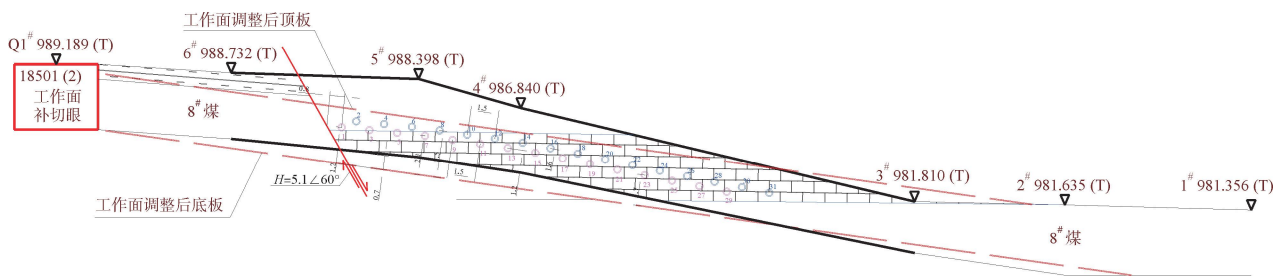


图8 西曲矿18501(2)工作面炮眼布置剖面图

Fig. 8 Cross-section of 18501(2) working face gunnel arrangement in Xiqu Mine

为了确定炮孔合理堵塞长度,对30~60 m的炮孔进行了计算,得到炮孔长度为30 m时,最佳堵塞长度为20 m;炮孔长度为40 m时,最佳堵塞长度为22 m,如图9所示,此时相邻两炮孔已经贯通,程序停止计算;炮孔长度为50 m时,最佳堵塞长度为25 m;堵塞长度为60 m时,最佳堵塞长度为29 m。炮孔长度在上述范围时可以采用插值法进行选取。同时发现,采用9 kg/m的线装药密度时,炮孔长度30 m的堵塞长度需要20 m,此时弱化长度只有10 m。说明采用9 kg/m的线装药密度时炮孔长度不宜过短,否则不仅会造成炸药浪费,且工程弱化效果也较差。

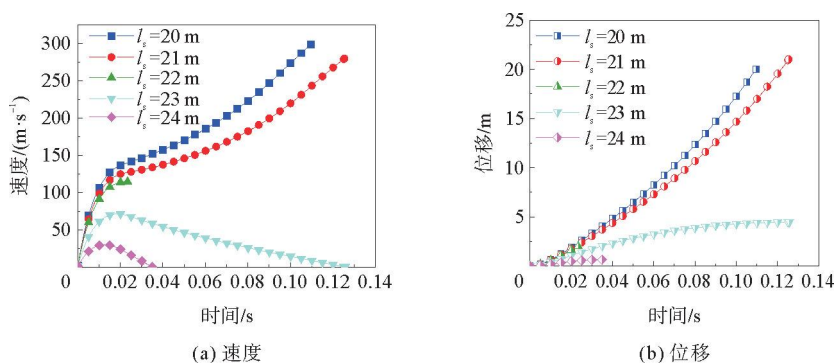


图9 炮孔长度为40 m时堵塞结构的速度和位移曲线

Fig. 9 Velocity and displacement curves of the stemming structure for a borehole length of 40 m

根据《煤矿安全规程》^[22]规定,首先选取16 m的堵塞长度试爆,堵塞结构全部冲出炮孔。图10(a)为爆破后效果图,可以看出孔口出现了很长的裂缝,说明爆生气体作用时间较长,在堵塞结构冲出炮孔的过程中裂纹也不断扩展,对孔口造成很强的冲击力,堵塞结构完全失效。计算得到炮孔长度40 m时最佳堵塞长度为22 m,图10(b)为炮孔爆破后的效果图,导爆索仍留在孔内,堵塞结构部分冲出炮孔,堵塞效果较好。图11为爆破后割煤机截割观察到的图片,可以看出炮孔周围岩体破碎,没有截割后齿轮的痕迹,说明经过爆破后的岩体较软,比较破碎,达到了预期的工程效果。

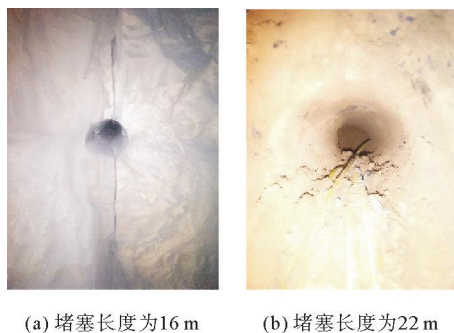


图10 炮孔长度40 m时不同堵塞长度的堵塞效果

Fig. 10 Stemming effects at different stemming lengths for a borehole length of 40 meters



图11 西曲矿18501(2)工作面爆破后效果图

Fig. 11 Blasting effect of 18501(2) working face in Xiqu Mine

《煤矿安全规程》^[22]规定,井下深孔爆破封泥长度不得小于孔深的1/3。但从实际工程效果来看,线装药密度为3 kg/m时,35 m的炮孔只需7 m堵塞,无需采用1/3炮孔长度,而线装药密度为9 kg/m时,40 m的炮孔需要22 m堵塞,远超1/3炮孔长度。可见堵塞长度与线装药密度之间有很强的相关性,因此当线装药密度增加时,应考虑在安全规程的基础上适当增加堵塞长度。

3.2.3 1 kg/m的线装药密度下切顶卸压预裂爆破

与围岩弱化爆破的水平炮孔不同,切顶卸压爆破的炮孔方向与竖直方向有一定夹角,重力成为堵塞结构运动的主动动力之一,且切顶爆破的装药量较小,不耦合系数较大,不能简单采用弱化爆破堵塞长度的建议值^[23]。古城矿N1303工作面砂岩老顶岩性较硬,悬顶面积较大,造成巷旁充填体应力集中,易压垮,后期巷道维护困难。为了保证留巷成功,决定超前工作面进行预裂爆破切顶卸压。工作面埋深550 m左右,总计约20 m的顶板除2.69 m的泥岩外全部为强度较高的砂岩,最顶部为0.5 m厚的煤层,抗拉强度与黏结强度很低。而剩余的17 m厚砂岩由粉砂岩、细砂岩、粗砂岩互层,层间的抗剪切强度与黏结强度均较大,组合

形成第一关键层。经试验,砂岩单轴抗压强度在 40~102 MPa。炮孔深度取 18 m,沿 N1303 回风顺槽里帮煤墙肩角布置,间距 750 mm,直径 50 mm,倾角 75°,如图 12 所示,采用煤矿许用 2# 乳化炸药,药卷直径 32 mm,线装药密度为 1 kg/m。

图 13、图 14 分别给出了切顶卸压爆破炮孔长度为 10 m 和 20 m 的计算结果,由于重力影响,相较于水平炮孔堵塞较长。可以看出,炮孔长度为 10 m 时,最佳堵塞长度为 5 m;炮孔长度为 20 m 时,最佳堵塞长度为 7 m。此外,计算得炮孔长度为 15 m 时,最佳堵塞长度为 6 m;炮孔长度为 25 m 时,最佳堵塞长度为 8 m。炮孔长度在两者之间时可以采用插值法进行选取。

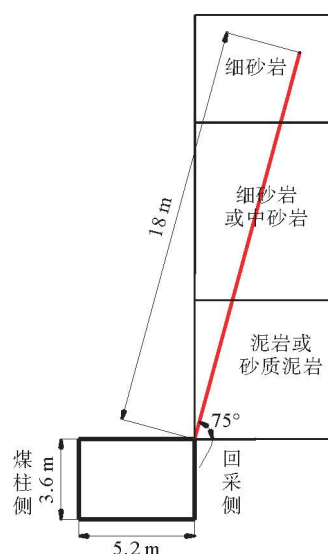


图 12 古城矿 N1303 工作面炮眼布置图

Fig. 12 Gunnel layout of N1303 working face in Gucheng Mine

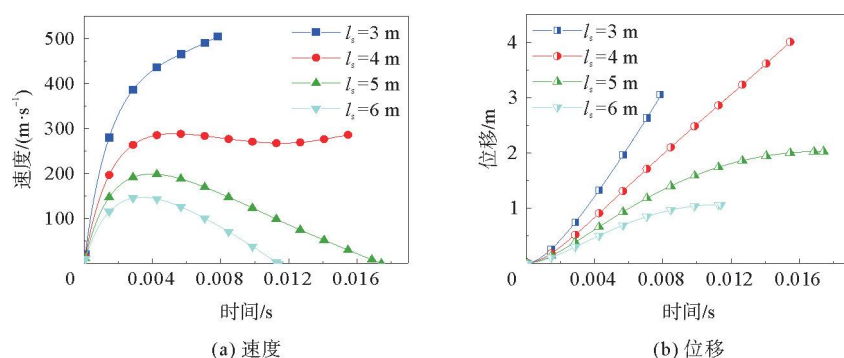


图 13 炮孔长度为 10 m 时堵塞结构的速度和位移曲线

Fig. 13 Velocity and displacement curves of the stemming structure for a borehole length of 10 m

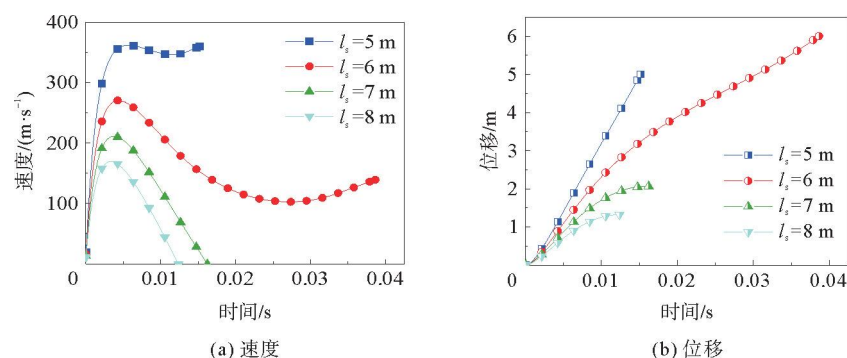


图 14 炮孔长度为 20 m 时堵塞结构的速度和位移曲线

Fig. 14 Velocity and displacement curves of the stemming structure for a borehole length of 20 m

经计算,18 m 的炮孔堵塞长度约为 6 m,孔内窥视结果如图 15 所示,消除了悬顶现象,降低了沿空巷道顶板悬臂梁上覆荷载以及旋转变形压力,很大程度上减小了岩梁传递到巷旁和巷内支护的荷载,从根本上改善了巷道的力学环境。

4 结论

1) 基于井下单自由面深孔爆破的特点,在爆生裂纹扩展中考虑了地应力的抑制作用,完善了堵塞结构力学模型,计算中的爆生气体压力荷载与实际更加相符,并优化了最佳堵塞长度确定准则。

2) 计算结果表明,岩石单轴抗压强度和地应力对堵塞结构的运动有较大影响,岩石单轴抗压强度和地应力越大,堵塞结构越容易冲孔,进一步说明了在井下单自由面深孔爆破堵塞结构力学模型构建中考虑地应力的必要性。

3) 通过计算分别给出了线装药密度 3、9 kg/m 时围岩弱化预裂爆破和线装药密度 1 kg/m 时切顶卸压预裂爆破在常用炮孔长度下的堵塞长度建议值,并进行了现场试验验证,为类似井下深孔爆破堵塞长度的准确确定提供了借鉴。

4) 2022 年修正的《煤矿安全规程》规定井下深孔爆破的封泥长度不得小于孔深的 1/3,但根据计算结果和实际工程效果发现,井下深孔爆破线装药密度为 9 kg/m 时所需堵塞长度远超孔深的 1/3,故结合《煤矿安全规程》,进一步完善了该条件下堵塞长度的确定方法。



图 15 炮孔长度 18 m 堵塞长度 6 m 时爆破后孔内窥视图

Fig. 15 Peephole view of a stemming length of 6 m in a borehole length of 18 m

参考文献:

- [1] 金解放,杨益,廖占象,等. 动荷载与地应力对岩石响应特性的影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(10):1990-2002.
JIN Jiefang, YANG Yi, LIAO Zhanxiang, et al. Effect of dynamic loads and geo-stresses on response characteristics of rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 1990-2002.
- [2] 杨建华,孙文彬,姚池,等. 高地应力岩体多孔爆破破岩机制[J]. 爆炸与冲击,2020,40(7):118-127.
YANG Jianhua, SUN Wenbin, YAO Chi, et al. Mechanism of rock fragmentation by multi-hole blasting in highly-stressed rock masses[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(7): 118-127.
- [3] 皇新宇,纪强,张宪堂,等. 地应力作用下四孔掏槽爆破破岩机理数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 60-69.
HUANG Xinyu, JI Qiang, ZHANG Xiantang, et al. Numerical simulation research on rock breaking mechanism of four-hole cut blasting under ground stress[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(2): 60-69.
- [4] 汪传松. 论加强单自由面爆破炮孔堵塞的必要性[J]. 广西水利水电, 1999(1): 23-25.
WANG Chuansong. Essentiality of strengthening to plug blasthole under single free face[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 1999(1): 23-25.
- [5] 杨才亮,熊炎飞,李翔. 爆破自由面数目变化对岩石爆破影响的有限元研究[J]. 采矿技术, 2022, 22(5): 175-181.
YANG Cailiang, XIONG Yanfei, LI Xiang. Finite element study on the influence of variation of the number of blasting free surfaces on rock blasting[J]. Mining Technology, 2022, 22(5): 175-181.
- [6] ZHANG Z X. Rock fracture and blasting[M]. Cambridge, Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 2016.
- [7] 宗琦. 炮孔堵塞物运动规律的理论探讨[J]. 爆破, 1996, 13(1): 8-11.
ZONG Qi. Investigation into move regularity about stemmed material in hole charge blasting[J]. Blasting, 1996, 13(1): 8-11.
- [8] 秦声,吴德义,樊凌川. 巷道爆破掘进炮孔堵塞长度合理确定[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(4): 1-4.
QIN Sheng, WU Deyi, FAN Lingchuan. Reasonable calculating stemming length in the bore hole of blasting roadway[J].

- China Mine Engineering, 2021, 50(4):1-4.
- [9] 张艳军,陈岩武,雷美荣,等. 钻孔爆破炮孔堵塞长度分析[J]. 爆破, 2021, 38(3):45-49.
ZHANG Yanjun, CHEN Yanwu, LEI Meirong, et al. Analysis of stemming length of borehole in blasting[J]. Blasting, 2021, 38(3):45-49.
- [10] 梁瑞,吕亚茹,周文海,等. 地下采场爆破炮孔堵塞效应及长度研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(5):1546-1554.
LIANG Rui, LÜ Yaru, ZHOU Wenhai, et al. Study on blockage effect and the stem length in underground stope blasting[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(5):1546-1554.
- [11] 杨才亮. 单自由面无限岩体中深孔微差爆破数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2010, 30(4):93-96.
YANG Cailiang. Numerical simulation on medium long-hole millisecond blasting in infinite rock mass with single free face[J]. Mining Research and Development, 2010, 30(4):93-96.
- [12] 吴再海,安龙,齐兆军,等. 基于 LS-DYNA 与 PFC 联合的岩体爆破数值模拟方法分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(3):609-614.
WU Zaihai, AN Long, QI Zhaojun, et al. The numerical simulation method of rock mass blasting based on PFC combined with LS-DYNA[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 38(3):609-614.
- [13] CHEN M, YE Z W, WEI D, et al. The movement process and length optimization of deep-hole blasting stemming structure[J/OL]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 146. DOI:10.1016/j.ijrmms.2021.104836.
- [14] 罗勇,沈兆武. 钻孔爆破中炮孔堵塞效果及堵塞长度的研究[J]. 力学与实践, 2006, 28(2):48-52.
LUO Yong, SHEN Zhaowu. Investigation on length of stemming material and its effect in hole-charged blasting[J]. Mechanics in Engineering, 2006, 28(2):48-52.
- [15] 宗琦. 爆生气体的准静态破岩特性[J]. 岩土力学, 1997, 18(2):73-78.
ZONG Qi. Investigation on features of rock quasi-static fragmentation by gaseous explosion product[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(2):73-78.
- [16] 宗琦,曹光保,付菊根. 爆生气体作用裂纹传播长度计算[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1994, 13(3):18-21.
ZONG Qi, CAO Guangbao, FU Jugen. Calculations of crack spread length in explosive gas[J]. Journal of Fuxin Mining Institute(Natural Science), 1994, 13(3):18-21.
- [17] SCHMIDT R A, ROSSMANITH H P. Basics of rock fracture mechanics[M]. Vienna:Springer Vienna, 1983:1-29.
- [18] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京:冶金工业出版社, 2002.
- [19] 张振南,茅献彪,葛修润. 松散岩块侧限压缩模量的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18):3049-3054.
ZHANG Zhennan, MAO Xianbiao, GE Xiurun. Testing study on compressive modulus of loose rock blocks under confining constraint[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18):3049-3054.
- [20] 张剑,康红普,刘爱卿,等. 山西西山矿区井下地应力场分布规律[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12):4006-4016.
ZHANG Jian, KANG Hongpu, LIU Aiqing, et al. Distribution law of underground in-situ stress field in Xishan coal mine field, Shanxi Province[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12):4006-4016.
- [21] 宗琦. 炮孔中炮泥运动规律及合理炮泥长度研究[J]. 工程爆破, 1995, 1(2):35-40.
ZONG Qi. Investigation into the movement of stemming and its optimum length in blast hole[J]. Engineering Blasting, 1995, 1(2):35-40.
- [22] 应急管理部. 煤矿安全规程[EB/OL]. (2022-01-06)[2024-12-18]. https://www.gov.cn/zhengce/2022-11/15/content_5712798.htm.
- [23] 段宝福,陈佳华,柴明星,等. 深孔聚能预裂爆破切顶卸压机理与应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2024, 43(1):1-10.
DUAN Baofu, CHEN Jiahua, CAI Mingxing, et al. Mechanism and application of roof cutting and pressure relief in deep-hole shaped charge presplit blasting[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2024, 43(1):1-10.

(责任编辑:吕海亮)