

文章编号: 1001-4888(2017)01-0123-08

深孔预裂爆破注浆封孔材料力学特性实验^{*}

梁冰¹, 贾立锋², 孙维吉¹, 石占山², 赵航¹, 董擎¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 针对深孔预裂爆破注浆封孔材料配比选择问题, 以水泥、速凝剂、水为注浆原料, 开展不同材料配比、不同养护时间的单轴抗压强度实验, 分析封孔长度与材料力学特性的关系。结果表明: 不同配比深孔预裂爆破注浆材料的抗压强度范围为 0.60~4.49MPa, 最大弹性模量为 0.527GPa; 注浆材料的抗压强度和弹性模量与水灰比呈负相关关系, 与速凝剂和水泥的比例 (A/C) 呈正相关关系; 同一配比条件下, 注浆材料抗压强度随养护时间增加而增大, 6h 后趋于平稳。计算得出封孔长度与材料抗压强度、侧压系数呈负相关关系。综合实验及分析得出, 深孔预裂爆破施工中可选用水泥、速凝剂、水为 1:1:1 的比例配比封孔, 封孔后养护 6h 放炮。

关键词: 深孔预裂爆破; 注浆; 封孔材料; 抗压强度; 封孔长度

中图分类号: TD823

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-068

0 引言

深孔预裂爆破是爆破孔深度在 10 米以上, 为增加煤岩体裂隙而在实体煤岩体中进行的非落煤岩的爆破。深孔预裂爆破应用在过岩墙^[1]、煤层增透^[2-5]、揭煤^[6,7]等施工过程中。爆破的效果与封孔方式有关, 封孔是否优良直接影响着深孔预裂爆破的效果。

目前深孔预裂爆破常用的封孔方式有黄泥封孔^[8,9]、黄泥+黄沙封孔^[10]、水泥卷+炮泥+水泥卷封孔^[11]等。上述封孔方式的封缺点是孔长度长, 施工工艺复杂, 封孔效率低。注浆封孔是一种高效率的封孔方式, 按其化学成分可大致分为粘土材料、水泥基材料、高水材料、高分子材料四大类^[12]。注浆封孔常用于瓦斯抽采^[13-15]、煤层注水^[16,17]、封堵裂隙^[18]和固定锚杆围岩^[19]等, 极少应用于深孔预裂爆破封孔中, 原因是原有注浆材料凝固时间长, 炸药长时间存放在炮孔中安全性无法保证。采用注浆的方式封堵深孔预裂爆破孔, 注浆封孔材料需要满足两个条件: (1) 注浆完成后浆液能够快速凝固; (2) 养护后达到一定的力学特性。因此, 注浆封堵深孔预裂爆破钻孔, 需对注浆封孔材料的力学特性进行研究。本文以水泥、速凝剂、水为原料, 研究在满足浆液可泵性的条件下, 不同配比注浆封孔材料力学特性, 讨论了材料的力学特性与封孔长度的关系。本研究可为深孔预裂爆破注浆封孔材料的选择配比提供依据。

1 试验材料及方法

1.1 封孔注浆材料

深孔预裂爆破注浆封孔要求浆料具有流动性, 即具有一定的可泵性, 注浆后在一定的时间内达到较高强度。试验选用的材料为 PO. 32.5 水泥和速凝剂。PO. 32.5 水泥初凝时间约为 180min, 终凝时间约为 320min。速凝剂是北京世纪蓝箭公司生产的 SPT-400 高效堵漏防水剂 (速凝型), 它是一种凝结硬

^{*} 收稿日期: 2016-04-19; 修回日期: 2016-06-01

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51304111)资助

通讯作者: 贾立锋(1988-), 男, 博士研究生。Email: zqbxwls@126.com

化快,固化强度高,具有微膨胀的速凝型材料,其凝结时间大于 2min,小于 10min,终凝时间小于 15min,1h 的抗压强度大于 4.5MPa,3d 的抗压强度大于 15MPa。

1.2 试验参数的确定

依据《建筑工程水泥-水玻璃双液注浆技术规程》(JGJ/T 211—2010)规定,建议使用水灰比为 0.5 的水泥浆。依据《注浆技术规程》(YSJ211—92)规定:采用水泥注浆时,水灰比宜为 3 : 1~0.6 : 1。由于炮孔封孔要求浆液前期具有可泵性,养护数小时达到一定强度,所以选用水灰比较小的 0.5 : 1 和 0.6 : 1 进行试验。

水泥和速凝剂的比例决定了注浆材料的初凝和终凝时间。为了得到符合注浆要求的速凝剂与水泥比例(A/C),利用维卡仪对大量不同 A/C 材料的初凝、终凝时间进行测定。筛选出三种 A/C,分别为 1 : 1、1 : 1.5、1 : 2(质量比)。

1.3 试验方法

依据试验参数确定 6 个不同的试验方案(表 1)。

表 1 不同材料配比及初终凝时间

Tab.1 Different ratios materials and initial and final setting time

方案序号	速凝剂 : 水泥 : 水	水灰比	初凝时间(min)	终凝时间(min)
1	1 : 1 : 1	0.5	21	28
2	1 : 1.5 : 1.25	0.5	28	34
3	1 : 2 : 1.5	0.5	44	51
4	1 : 1 : 1.2	0.6	24	36
5	1 : 1.5 : 1.5	0.6	38	48
6	1 : 2 : 1.8	0.6	60	73



图 1 单轴压缩破坏试件

Fig.1 Failure specimens of uniaxial compression

试验步骤:依据各方案材料的质量比称取水泥和速凝剂,放入搅拌桶混合均匀,加所需质量水后快速搅拌,并记录加水时间。将混合均匀的封孔注浆材料倒入模具中,制成尺寸为 $\Phi 50\text{mm} \times H100\text{mm}$ 的圆柱试件。对试件进行编号,编号形式为“方案-养护时间-试件块数”,例如编号 3-4-2 表示配比为 3 养护 4h 的第 2 块试件。试件脱模养护 2h、4h、6h、8h、10h,然后将养护好的试件放置在型号为 YAW-2000 的试验机上,调整球形座使试件上端与上压板平行,下降上压板至紧贴试件上端,启动试验机,以 0.02mm/s 的加载速度加载至破坏,并记录试验过程中的应力和应变数据,图 1 为单轴压缩破坏试件。

2 试验结果分析

2.1 破坏形式分析

试件的破坏形式是表现试件破坏机理的重要特征。对试件的破坏形式进行观察,可以分为三种:

- (1) 剪切滑移拉张破坏:存在一个剪切滑移面和一条劈裂面贯通(图 2(a))。
- (2) 双面剪切拉张破坏:存在两条剪切滑移面与一条劈裂面贯通,形成“Y”字型破坏(图 2(b))。
- (3) 劈裂破坏:存在一条或者多条劈裂面(图 2(c))。

破坏形式 1 和破坏形式 2 均有明显的剪切面和拉张面。尤明庆等^[20]认为岩样内拉张破坏的根源在于剪切滑移。破坏形式 1 为单面滑移引起的拉张破坏,形式 2 为双面滑移引起的拉张破坏。破坏形

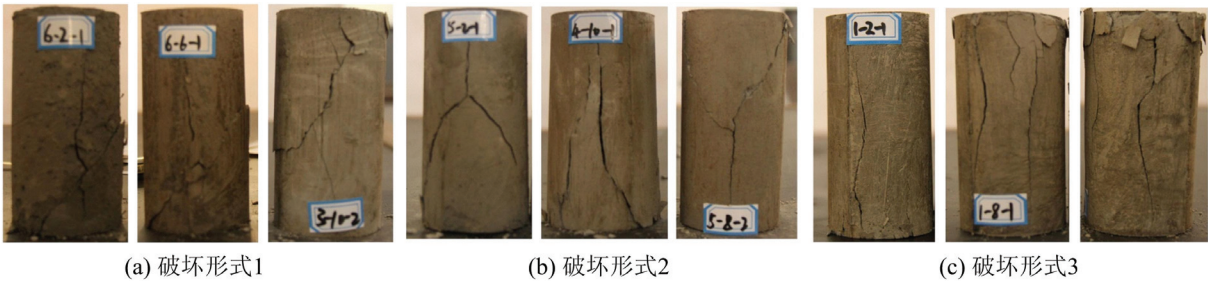


图 2 不同破坏形态的试件

Fig. 2 Specimens of different failure forms

式 3 不同于岩石与轴线近乎平行的劈裂面,劈裂面为曲面(图 2(c))。这种注浆材料的破坏形式与岩石的破坏有相似性,而拉张破坏又不完全与岩石相同。原因是在 10h 的养护时间内,试件的各部分达到的强度不均匀,破坏时会出现微小的剪切滑移面和微小的拉张面,微拉张面和微滑移面连接起来形成了弯曲的拉张面。若试样养护更长时间,试件破坏形式应该与岩石相同,出现与轴线近乎平行的劈裂面。

2.2 抗压强度分析

不同配比注浆材料试件抗压强度如表 2。

表 2 试件抗压强度(单位:MPa)

Tab. 2 Compression strength of specimens (unit: MPa)

方案	养护时间(h)-块数									
	2-1	2-2	4-1	4-2	6-1	6-2	8-1	8-2	10-1	10-2
1	3.25	3.65	4.38	3.97	4.42	4.41	4.49	4.08	4.15	4.36
2	1.40	1.58	2.18	2.31	2.99	2.88	3.15	3.03	3.16	3.01
3	0.7	0.82	1.77	1.41	1.99	1.43	2.06	1.97	2.01	1.97
4	1.71	1.72	2.53	2.70	2.87	2.94	3.07	3.17	2.99	3.02
5	0.98	0.97	1.44	1.12	1.39	1.60	1.58	1.54	1.66	1.60
6	1.02	0.60	0.79	1.31	1.26	1.23	1.20	1.28	1.55	1.28

由表 2 可知:试件 6-2-2 抗压强度最小,为 0.60MPa,试件 1-8-1 抗压强度最大,为 4.49MPa。试件抗压强度范围为 0.60~4.49MPa;方案 1 试件抗压强度均在 3.20MPa 以上,明显高于其他方案;方案 6 试件抗压强度明显低于其他方案,最高强度不超过 1.55MPa。

注浆材料由水泥、速凝剂、水组成,其抗压强度受 A/C、水灰比、养护时间的影响。将同一配比、相同养护时间的两块试件的抗压强度取平均值,绘制出不同方案的试件抗压强度随养护时间的变化曲线(如图 3)。

由图 3 可知:采用方案 3 配比的注浆材料在养护 2h 的抗压强度最小,为 0.76MPa。采用方案 1 配比的注浆材料养护 6h 的抗压强度最大,为 4.42MPa。当水灰比和养护时间相同时,注浆材料的抗压强度大小顺序分别为方案 1>方案 2>方案 3,方案 4>方案 5>方案 6,即随着速凝剂含量减小,水泥含量增加,材料抗压强度逐渐减小。当养护时间和 A/C 相同时,注浆材料的抗压强度大小顺序分别为方案 1>方案 4、方案 2>方案 5、方案 3>方案

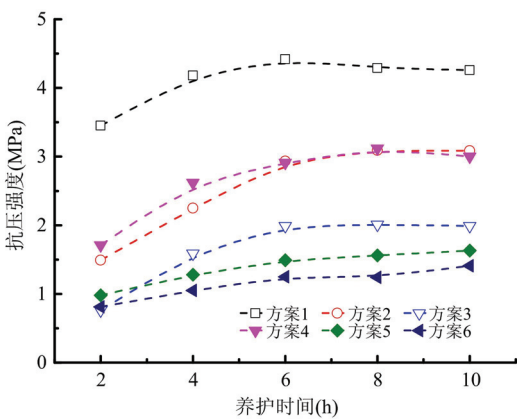


图 3 抗压强度随养护时间的变化曲线

Fig. 3 The change curve of compressive strength with curing time

6,即随着水灰比增加,注浆材料抗压强度逐渐减小。这说明增加速凝剂,减小水灰比可以增加注浆材料的抗压强度。因为速凝剂和水泥遇水后会发生水解或水化反应而生成水化物,这些水化物按照一定的方式相互搭接形成水泥石结构,进而产生强度。而速凝剂的增加加速了水化反应,水灰比的减小加速了注浆混合材料凝固速度,所以试件抗压强度较大。

抗压强度随养护时间增加呈现先增加后趋于平稳,在养护 6h 后分别达到较大强度。方案 5 和 6 随着养护时间增加强度逐渐增加,在养护 6h 后强度增加不明显。当水灰比和 A/C 一定时,注浆材料养护 6h 已经具有较高的抗压强度。

2.3 注浆封孔材料应力—应变曲线分析

应力—应变曲线是表示材料变形特性的一种重要形式,图 4 为 60 块试件中有代表性的应力—应变曲线。

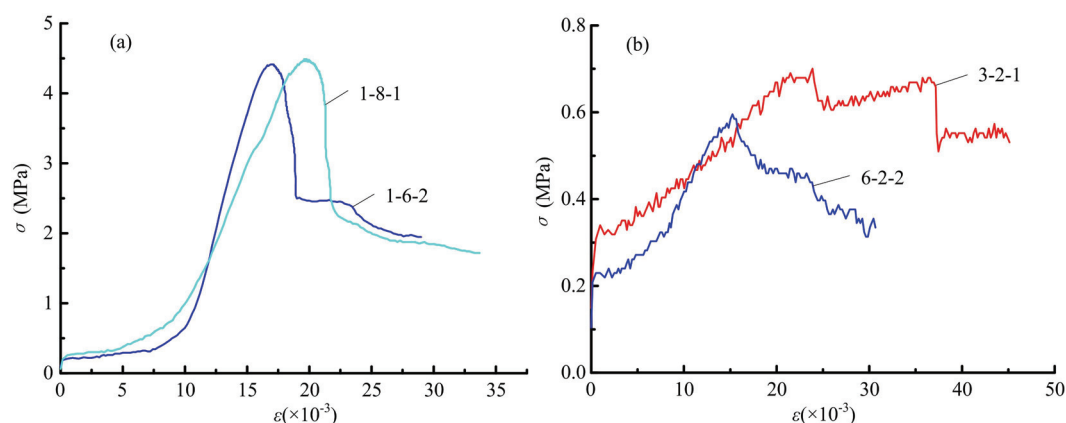


图 4 部分试件应力—应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of some specimens

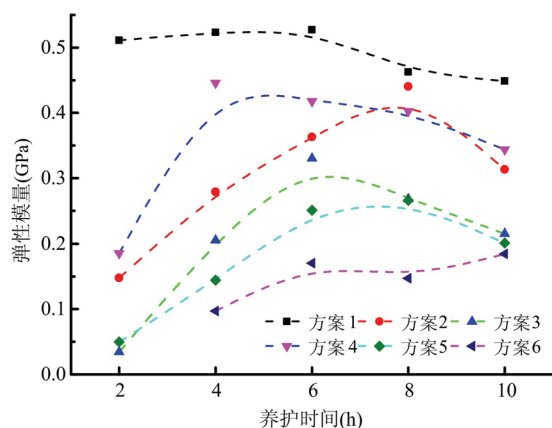


图 5 弹性模量与养护时间的关系

Fig. 5 The relation between elastic modulus and curing time

图 4(a)中 1-8-1 是抗压强度值最大的曲线,破坏强度为 4.49MPa;1-6-2 是弹性模量最大的曲线,弹性模量为 0.606GPa。图 4(b)中 6-2-2 是抗压强度值最小的曲线,抗压强度为 0.60MPa。图 4(a)中曲线是典型的应力—应变曲线,具有明显的压密阶段、弹性阶段、塑性阶段、峰后破坏阶段、残余变形阶段。图 4(b)中曲线和典型应力—应变曲线不同,随着压力的增加,应变逐渐增加,且曲线呈锯齿状波动,没有弹性阶段,说明在加载过程中试件的承载能力不稳定。对 60 个试件应力—应变曲线进行统计发现:表现如图 4(a)的试件有 87%,具有典型应力—应变曲线特征;表现如图 4(b)的试件有 13%,这些试件中速凝剂含量少,水灰比大,养护时间短,且破坏强度小于 1.20MPa。由于

试件内速凝剂少,水灰比大,造成水泥和速凝剂水化时间长,在短养护时间内材料内部尚未形成稳定的水泥石结构,试件在加载过程中应力出现波动,抗压强度低。

2.4 注浆封孔材料弹性模量分析

依据不同配比试件应力—应变曲线计算弹性模量。将同一配比相同养护时间的两个试件的弹性模量取平均值(无弹性阶段的舍去),绘制出不同方案试件弹性模量与养护时间的关系图(如图 6)。

由图 5 可知:采用方案 5 配比的注浆材料在养护 2h 的弹性模量最小,为 0.050GPa。采用方案 1 配比的注浆材料养护 6h 的弹性模量最大,为 0.527GPa。当水灰比和养护时间相同时,注浆材料的弹性模

量大小顺序分别为方案1>方案2>方案3,方案4>方案5>方案6,即随着速凝剂含量的减小,水泥含量的增加,材料的弹性模量逐渐减小。当养护时间和A/C相同时,注浆封孔材料的弹性模量大小顺序分别为方案1>方案4、方案2>方案5、方案3>方案6,即随着水灰比的增加,材料的弹性模量逐渐减小。

注浆材料的弹性模量随时间的变化规律各个方案均不相同,方案1在养护2h、4h、6h时弹性模量较大,随后减小。方案2、3、4、5的弹性模量随着养护时间的增加呈现先增大后减小,在8h、6h、4h、8h分别达到最大值0.440GPa、0.330GPa、0.440GPa、0.270GPa。封孔材料由速凝剂、水泥、水三种材料混合而成,弹性模量不仅受到速凝剂、水泥的影响,也受到水灰比的影响。

3 封孔材料受力及算例分析

3.1 封孔材料受力分析

封孔材料的力学特性影响封孔的长度,封孔的长度影响爆破的效果。郭德勇等^[8]认为封孔时封孔物质已经捣实,可忽略封孔材料的压缩变形,封孔物质在钻孔中的移动相当于刚体运动。根据上述假设推导了封孔物质在钻孔中运动受到的摩擦阻力公式:

$$F = 2\pi RLf\lambda P \quad (1)$$

式中, F 为摩擦力; R 为炮孔半径; L 为封孔长度; f 为封孔材料与钻孔壁之间的摩擦系数; λ 为侧压系数; P 为炸药爆炸作用在封孔材料上的压力。

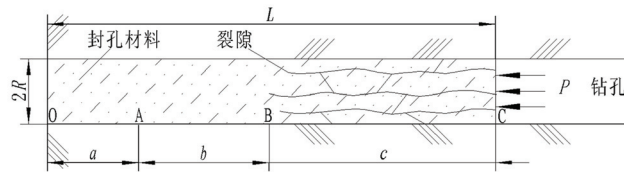


图6 封孔结构及受力分析

Fig. 6 Sealing structure and force analysis

而事实上,在封孔效果良好的情况下,封孔材料与孔壁之间不会产生相对运动。假设封孔材料受到的压力大于抗压强度时,封孔材料破坏,产生裂隙,则长度为 L 的封孔物质在受到压力为 P 的冲击力时可分为三部分(图6):图中BC为裂隙段,封孔材料受到的压力大于抗压强度 σ ;图中AB为不破裂段,封孔材料受到的压力小于抗压强度 σ ;图中OA为封孔材料不受摩擦段,封孔材料受到的压力为0。爆炸冲击力 P 产生的力等于AB段产生的摩擦力与BC段产生的摩擦力之和。封孔材料在A截面受到的压力为0,在B截面受到的压力为 σ 。

假设在AB段内,B截面上受到压力 σ 均匀传递至A截面,AB段侧压系数为 λ_1 ,则AB段单位长度上的压力为 σ/b ,距离A截面为 x 的截面受到的应力为 $\sigma x/b$ 。AB段封孔材料受的摩擦力可表示为:

$$F_{AB} = \int_0^b 2\pi R f \lambda_1 \frac{\sigma x}{b} dx = \pi R b f \lambda_1 \sigma \quad (2)$$

AB段内材料受力处于平衡状态:

$$F_{AB} = \pi R^2 \sigma \quad (3)$$

假设在BC段内,C截面上受到压力 P 均匀传递至B截面,BC段侧压系数为 λ_2 ,则距离B截面为 x 的截面受到的应力为 $\sigma + (P - \sigma)x/c$ 。BC段封孔材料受的摩擦力可表示为:

$$F_{BC} = \int_0^c 2\pi R f \lambda_2 \left[\sigma + \frac{(P - \sigma)x}{c} \right] dx = \pi R c f \lambda_2 (\sigma + P) \quad (4)$$

爆破产生的冲击压力可表示为:

$$P = \frac{\pi R b f \lambda_1 \sigma + \pi R c f \lambda_2 (\sigma + P)}{\pi R^2} = \frac{b f \lambda_1 \sigma + c f \lambda_2 (\sigma + P)}{R} \quad (5)$$

由公式(2)和(3)可计算出 b :

$$b = \frac{R}{f \lambda_1} \quad (6)$$

将公式(6)代入公式(5)可计算出 c :

$$c = \frac{R}{f\lambda_2} \left(1 - \frac{2}{1 + \frac{P}{\sigma}}\right) \quad (7)$$

炮孔的封孔长度 L 为 a, b, c 之和, 当 $a \geq 0$ 时, 封孔材料可以封住深孔预裂炮孔。所以封孔长度 L 可表示为:

$$L \geq \frac{R}{f\lambda_1} + \frac{R}{f\lambda_2} \left(1 - \frac{2}{1 + \frac{P}{\sigma}}\right) \quad (8)$$

由公式(6)可知, AB 段的封孔长度 b 与孔的半径、封孔材料与钻孔壁之间的摩擦系数 f 及侧压系数有关, 与材料的抗压强度无关。由公式(7)可知, BC 段封孔长度 c 与封孔材料与钻孔壁之间的摩擦系数 f 、侧压系数 λ_2 、材料抗压强度 σ 呈负相关关系。综合 AB 和 BC 段而言, 注浆封孔长度 L 与孔的半径 R 、冲击力 P 呈正相关关系, 与封孔材料与钻孔壁之间的摩擦系数 f 、侧压系数 (λ_1, λ_2)、材料抗压强度 σ 呈负相关关系。

由上述分析可知封孔长度与材料抗压强度、侧压系数 λ 有关。试件的破坏形式影响材料的侧压系数, 劈裂破坏保持了材料的连续性, 且材料膨胀性大于其他两种破坏形式, 因此劈裂破坏的侧压系数高于其他两种破坏形式。

3.2 算例分析

假设某深孔预裂爆破中, 爆炸产物在炮孔中完成等熵膨胀后的静压力 $P=100\text{MPa}$, 钻孔半径 $R=37.5\text{mm}$, 这种封孔材料与孔壁的摩擦系数 $f=0.1$, 侧压系数 $\lambda_1=0.2$, 侧压系数 λ_2 取值范围 $0.21 \sim 0.25$ (破坏形式 1 为 0.21, 破坏形式 2 为 0.23, 破坏形式 3 为 0.25)。结合试件的破坏形式和抗压强度, 将上述参数代入公式(8), 可以得到不同配比、不同养护时间材料对应的封孔长度, 如表 3。

表 3 注浆封孔长度 (单位: m)
Tab. 3 Grouting sealing length (unit: m)

方案	养护时间 (h)				
	2	4	6	8	10
1	3.275	3.255	3.248	3.252	3.252
2	3.458	3.434	3.289	3.285	3.408
3	3.352	3.454	3.316	3.590	3.591
4	3.325	3.298	3.413	3.284	3.288
5	3.474	3.337	3.458	3.455	3.453
6	3.632	3.472	3.465	3.465	3.460

封孔长度越短, 越节省注浆材料, 炮孔长度方向致裂范围越大。结合表 3 可以看出, 方案 1 配比养护 6h 的封孔注浆材料试件封孔长度最短, 为 3.248m。因此, 在深孔预裂爆破施工过程中选用水泥、速凝剂、水比例为 1:1:1 进行配比材料, 注浆封孔养护 6h 后进行放炮比较合理。

4 结论

(1) 注浆材料试件的破坏形式和应力—应变曲线与煤岩具有相似性。87% 的试件具有典型应力—应变曲线, 部分曲线出现锯齿状波动, 且无弹性阶段, 原因是试件中速凝剂含量少, 水灰比大, 养护时间短。

(2) 材料的抗压强度和弹性模量受水灰比、A/C、养护时间的影响。随 A/C 的减小, 材料抗压强度和弹性模量逐渐减小; 随水灰比增加, 材料抗压强度和弹性模量逐渐减小; 当水灰比和 A/C 一定时, 注浆材料的抗压强度随养护时间的增加而增加, 在凝固 6h 后增加速度放缓并趋于平稳。

(3) 注浆封孔长度 L 与孔的半径 R 、冲击力 P 呈正相关关系, 与封孔材料与钻孔壁之间的摩擦系数

f 、侧压系数(λ_1 、 λ_2)、材料抗压强度 σ 呈负相关关系。

(4) 在深孔预裂爆破施工过程中选用水泥、速凝剂、水比例为1:1:1进行配比材料,注浆封孔养护6h进行放炮比较合理。

参考文献:

- [1] 颜超,王树静,薛广峰.综采工作面深孔预裂爆破过火成岩岩墙[J].山东煤炭科技,2013(5):23-24 (YAN Chao, WANG Shujing, XUE Guangfeng. Fully mechanized working face through igneous dyke with deep hole blasting[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2013(5):23-24 (in Chinese))
- [2] 刘健.低透气煤层深孔预裂爆破增透技术研究及应用[D].淮南:安徽理工大学,2008 (LIU Jian. Technic study on increasing permeability of deep-hole presplitting blasting and its application in low permeability coal seam[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2008 (in Chinese))
- [3] 蔡峰.高瓦斯低透气性煤层深孔预裂爆破强化增透效应研究[D].淮南:安徽理工大学,2009 (CAI Feng. Study on effect of intensified increasing permeability by deep-hole presplitting blasting in high gas and low permeability coal seam[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2009 (in Chinese))
- [4] 王海东.深部开采低渗透煤层预裂控制爆破增透机理研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2012 (WANG Haidong. Study on mechanism of enhancing permeability of high stressed and low permeable coal seam in deep mining by pre-splitting[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012 (in Chinese))
- [5] CAO Shugang, LI Yong, LIU Yanbao, et al. Effectiveness analysis of methane-drainage by deep-hole controlled pre-splitting blasting for preventing coal and gas outburst[J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2009, 15 (2):166-170.
- [6] 刘健,刘泽功,蔡峰.石门揭煤深孔预裂爆破增透效果试验研究[J].煤炭科学技术,2011,39(6):30-32,128 (LIU Jian, LIU Zegong, CAI Feng. Experiment study on pre-cracking blasting and permeability improvement effect with deep borehole for seam opening of crosscut[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(6):30-32, 128 (in Chinese))
- [7] 刘健,刘泽功.深孔预裂爆破技术在井筒揭煤中的应用研究[J].煤炭科学技术,2012,40(2):19-21,24 (LIU Jian, LIU Zegong. Study on application of deep borehole pre-fracturing blasting technology to seam opening in mine shaft[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(2):19-21, 24 (in Chinese))
- [8] 郭德勇,宋文健,李中州,等.煤层深孔聚能爆破致裂增透工艺研究[J].煤炭学报,2009,34(8):1086-1089 (GUO Deyong, SONG Wenjian, LI Zhongzhou, et al. Research on splitting technical of coal bed deep-hole cumulative blasting to improve permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8):1086-1089 (in Chinese))
- [9] 田鹏.综采工作面开切眼深孔预裂爆破技术研究[D].太原理工大学,2013 (TIAN Peng. Deep hole pre-splitting blasting technology research during the first cut on comprehensive mechanized coal mining face[D]. Taiyuan University of Technology, 2013 (in Chinese))
- [10] 郭德勇,杨雄,单智勇,等.煤层深孔聚能爆破封孔技术[J].北京科技大学学报,2011,33(7):785-789 (GUO Deyong, YANG Xiong, SHAN Zhiyong, et al. Sealing technology of coal bed deep-hole cumulative blasting[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(7):785-789 (in Chinese))
- [11] 刘思佳,王直亚,赵荣阔.深孔预裂爆破封孔技术的研究[J].煤矿安全,2014,45(11):72-73 (LIU Sijia, WANG Zhiya, ZHAO Rongkuo. Study on deep-hole pre-splitting blasting hole sealing technique[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(11):72-73 (in Chinese))
- [12] 王辉,王庆平,闵凡飞,等.注浆封孔材料的研究进展[J].材料导报,2013,27(7):103-106 (WANG Hui, WANG Qingping, MIN Fanfei, et al. Research progress of grouting sealing materials[J]. Materials Review, 2013, 27(7):103-106 (in Chinese))
- [13] 张金山,王政伟,周连春,等.注浆封孔法测定煤层瓦斯压力在平沟煤矿的应用[J].中国煤层气,2010,7(3):23-26 (ZHANG Jinshan, WANG Zhengwei, ZHOU Lianchun, et al. Application of method for measurement of CBM pressure by sealing grouting bore hole in pinggou coal mine[J]. China Coalbed Methane, 2010, 7(3):23-26 (in Chinese))

- [14] 王振锋, 周英, 孙玉宁, 等. 新型瓦斯抽采钻孔注浆封孔方法及封堵机理[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3):588—595 (WANG Zhengfeng, ZHOU Ying, SUN Yuning, et al. Novel gas extraction borehole grouting sealing method and sealing mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3):588—595 (in Chinese))
- [15] Zhai Cheng, Hao Zhiyong, Lin Baiquan. Research on a new composite material of gas drainage borehole and its sealing performance[J]. Procedia Engineering, 2011, 26:1406—1416.
- [16] 田向红, 周波, 李志勇. 煤层注水钻孔快速高效封孔工艺研究[J]. 山东煤炭科技, 2015(3):161—162, 165 (TIAN Xianghong, ZHOU Bo, LI Zhiyong. Research on fast and efficient sealing borehole technology of the coal seam water injection[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2015(3):161—162, 165 (in Chinese))
- [17] 张英华, 梁铜柱, 崔景昆. 高水材料在“三软”煤层注水、防尘、封孔技术中的应用研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(1):46—49 (ZHANG Yinghua, LIANG Tongzhu, CUI Jingkun. Applied research on the sealing technology of injection in “weak seam, roof and floor” for dust control with high-water rapid-solidifying material[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(1):46—49 (in Chinese))
- [18] 杨米加, 陈明雄, 贺永年. 裂隙岩体注浆模拟实验研究[J]. 实验力学, 2001, 16(1):105—112 (YANG Mijia, CHEN Mingxiong, HE Yongnian. Simulating experiment for grouting seepage in rockmass[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(1):105—112 (in Chinese))
- [19] 范俊奇, 董宏晓, 高永红, 等. 全长注浆锚杆固段剪应力分布特征试验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(2):250—256 (FAN Junqi, DONG Hongxiao, GAO Yonghong, et al. Experimental study of shear stress distribution in internal anchoring section of a full-length grouting anchor[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(2):250—256 (in Chinese))
- [20] 尤明庆, 华安增. 岩石试件单轴压缩的破坏形式与承载能力的降低[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3):292—296 (YOU Mingqing, HUA Anzeng. Fracture of rock specimen and decrement of bearing capacity in uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3):292—296(in Chinese))

Experimental Study of Mechanical Properties for Grouted Sealing Material in Deep Hole Pre-Splitting Blasting

LIANG Bing¹, JIA Li-feng², SUN Wei-ji¹, SHI Zhan-shan², ZHAO Hang¹, DONG Qing¹

(1. Institute of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. Institute of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Aiming at the selection of grouted sealing material ratio in deep hole pre-splitting blasting, taking cement, quick setting agent and water as grouting material, uniaxial compression strength experiment was carried out by adopting different material ratios and different curing time durations, the relations among hole sealing length and material mechanical properties were analyzed. Results show that the compression strength of grouting material with different ratios in deep hole pre-splitting blasting is in a range from 0.60MPa to 4.49MPa, and the maximum elastic modulus is 0.527GPa. Compression strength and elastic modulus of grouting material is negatively correlated with water-cement ratio, and positively related to quick setting agent-cement (A/C) ratio. Under the same material ratio condition, the compression strength of grouting material increases with the increase of curing time, and tends to be stable after 6 hours. Calculation shows that there are negative relations among sealing length and material compression strength and lateral pressure coefficient. Combining experimental and calculation results, the best ratio of cement, quick setting agent and water is 1 : 1 : 1 for deep hole pre-splitting blasting grouted sealing material. Blasting should be arranged after 6 hours curing time.

Keywords: deep hole pre-splitting blasting; grouting; sealing material; compression strength; sealing length