

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.03.005

# 煤矿岩巷掘进爆破封孔材料研究\*

胡洁<sup>①</sup> 黄文尧<sup>①</sup> 谢平<sup>②</sup> 吴国群<sup>③</sup> 牛草原<sup>①</sup> 檀鑫<sup>①</sup> 孙宝亮<sup>①</sup> 孙彦臣<sup>①</sup>

①安徽理工大学化学工程学院(安徽淮南,232001)

②淮浙煤电有限责任公司顾北煤矿(安徽淮南,232000)

③中煤科工集团沈阳研究院(辽宁抚顺,113122)

[摘要] 为解决煤矿岩巷掘进爆破施工作业中封孔工艺复杂、易冲孔以及掘进效率低等问题,设计了一种新型流体封孔材料与高效的封孔工艺。该封孔材料是由大理石粉、水与瓜尔胶三者按照 70:30:0.15 的质量比配制成的混合浆体,使用搅拌与泵送一体机,实现流体耦合封孔,并在顾北煤矿巷道掘进施工中得到应用。实验结果表明,该封孔材料具有黏度高、体系稳定和剪切变稀的流体特性,配合一体机使用,封孔工作效率提高 304%,单循环进尺提高 14.6%。封孔材料性能优良,封孔工艺简单,掘进效率与爆破效果得到明显提高。

[关键词] 煤矿岩巷;掘进爆破;封孔材料;封孔工艺;掘进效率

[分类号] TD263.3<sup>+</sup>1

## Sealing Materials Used in Excavation Blasting of Rock Drift in Coal Mine

HU Jie<sup>①</sup>, HUANG Wenyao<sup>①</sup>, XIE Ping<sup>②</sup>, WU Guoqun<sup>③</sup>, NIU Caoyuan<sup>①</sup>, TAN Xin<sup>①</sup>, SUN Baoliang<sup>①</sup>, SUN Yanchen<sup>①</sup>

①School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology (Anhui Huainan, 232001)

②Gubei Coal Mine, Huaizhe Coal Power Co., Ltd. (Anhui Huainan, 232000)

③Shenyang Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group (Liaoning Fushun, 113122)

[ABSTRACT] In order to solve the problems of complex sealing technology, easy punching and low excavation efficiency in excavation blasting of rock drift in coal mine, a new type of fluid sealing material and a high efficiency sealing technology were designed. The sealing material is a mixed slurry composed of marble powder, water, and guar gum in a mass ratio of 70:30:0.15, which is transported by a mixing pump to achieve fluid coupling sealing. It has been applied in the excavation construction of tunnels in Gubei Coal Mine. The experimental results show that the sealing material has the fluid characteristics of high viscosity, stable system and shear thinning. When used with the integrated machine, the sealing efficiency is increased by 304%, and the single cycle footage is increased by 14.6%. The sealing material has excellent performances, the sealing process is simple, and the excavation efficiency and blasting outcome are obviously improved.

[KEYWORDS] rock drift in coal mine; excavation blasting; sealing material; sealing technique; excavation efficiency

## 0 引言

由于成本较低、爆破效果较好,钻眼爆破一直被运用于掘进爆破中。然而,在实际施工中,传统炮孔的封堵工艺复杂,工作人员较多且效率低下<sup>[1-4]</sup>。井下封孔作业时,多采用柱体黄泥为封孔材料,操作时工人需用炮棍将黄泥捣入炮孔。柱体黄泥封孔时多为不耦合状态,导致炮孔密封效果差,存在较大的安全隐患,易发生冲孔和火焰外泄现象,甚至引起瓦斯

爆炸<sup>[5]</sup>。如何提高爆破过程中的封孔效率,国内外学者进行了广泛的研究。路晓荣等<sup>[6]</sup>在深孔爆破中使用硫铝酸盐水泥作为封孔材料,配合新型囊袋封孔工艺,取得良好的爆破效果;王杰等<sup>[7]</sup>采用硅酸盐水泥外加复合剂,降低封孔材料的凝固时间来提高爆破效率;杨威等<sup>[8]</sup>采用水封耦合,并配合封孔器材来提高炸药的利用率与井下爆破安全性。上述研究中的封孔技术均需要在孔口使用封孔器材,即使使用速凝水泥,仍需 1 h 以上的封孔凝固时间,大大增加了施工的时间与成本,且操作较为复杂。

\* 收稿日期:2022-10-17

第一作者:胡洁(1999-),男,硕士研究生,主要从事煤矿井下爆破技术的研究。E-mail:319966704@qq.com

通信作者:黄文尧(1964-),男,教授,主要从事煤矿井下爆破技术的研究。E-mail:2426712933@qq.com

因成本低廉、来源广泛、物理化学性质稳定,大理石粉被广泛应用于轻工、建材等领域<sup>[9]</sup>。独特的分子结构,遇水发生溶胀,使瓜尔胶迅速成为性能优越的新型环保凝胶剂,同时还被广泛应用于食品、石油和建筑等领域<sup>[10-11]</sup>。大理石粉、瓜尔胶和水三者按比例混合来制备封孔材料,材料成本每吨260元,相对于黄泥降低了20%,并且具有高黏度、剪切变稀、可泵送、水平放置不易流动的流体特性。配合搅拌泵送一体机将封孔材料送至炮孔,封孔模式为耦合封孔,并且孔口无需封孔器材,封孔完成即可爆破,从开始封孔到封孔结束仅需半个小时,大大地提高了掘进爆破作业效率与安全性<sup>[12-13]</sup>。该封孔材料及工艺以淮南顾北煤矿巷道掘进施工为应用背景,进行了现场爆破实验,炮孔利用率高,爆破效果良好,为我国煤矿快速机械化封孔提供了一个切实可行的方法。

## 1 封孔材料的制备与特性

### 1.1 封孔材料的选择

大理石粉,工业级,安徽轩朗新材料科技有限公司;瓜尔胶,食品级,郑州富太化工产品有限公司。封孔材料的质量分数配比如表1所示。

表1 封孔材料实验配比(质量分数)

Tab.1 Composition of experimental sealing materials %

样品	大理石粉	水	瓜尔胶(外加)
1-a	65	35	0
1-b	65	35	0.05
1-c	65	35	0.10
1-d	65 <td 35	0.15	
2-a	70	30	0.00
2-b	70	30	0.05
2-c	70	30	0.10
2-d	70	30	0.15
3-a	75	25	0.00
3-b	75	25	0.05
3-c	75	25	0.10
3-d	75	25	0.15

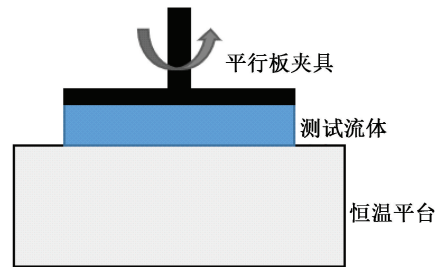
### 1.2 封孔材料流变特性和稳定性实验

大理石粉不溶于水,与水混合均匀后形成浆体。在室温、空气相对湿度(65±5)%的环境下,按表1配比,将大理石粉和瓜尔胶置于干净烧杯中搅拌混合50s,紧接着加水搅拌200s。流变测试采用美国

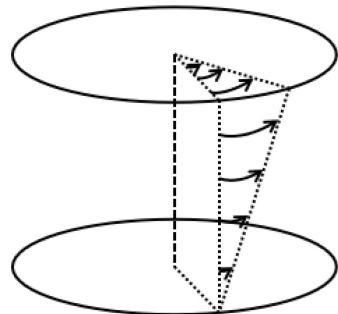
TA公司生产的HR-20混合型旋转流变仪,使用平行板夹具,恒温平台设定25℃,15min取样一次,每组样品取样3次做平行实验,对封孔材料在不同剪切速率下的剪切应力进行测定。测定原理如图1所示。上平行板以不同剪切速率旋转带动测试流体,从而得到不同剪切速率下的剪切应力<sup>[14]</sup>,随后将样品静置60min,并观察物理状态。



(a) HR-20 流变仪



(b) 平行板测试



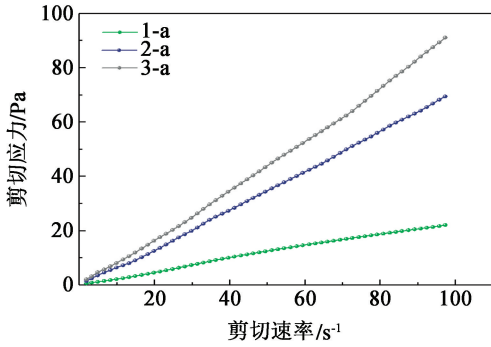
(c) 剪切原理

图1 封孔材料流变测试

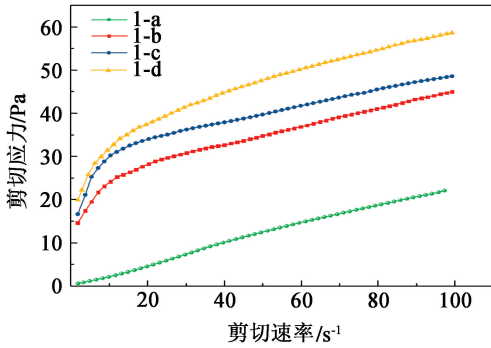
Fig.1 Rheological test of sealing materials

### 1.3 结果与分析

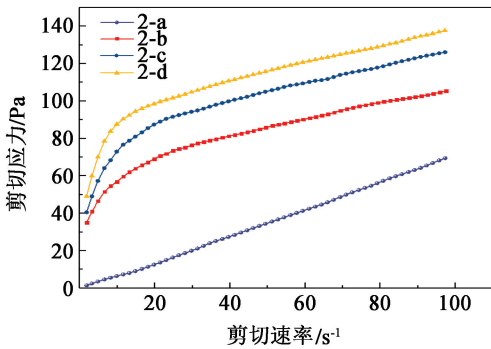
各组封孔材料的流变曲线如图2所示。其中,样品1-a、2-a、3-a没有屈服应力,剪切应力与剪切速率呈线性关系。相同条件下,剪切应力随着大理石粉含量的增加而增加,符合Newtonian模型。同时,实验中发现这3组样品均发生沉降分层。样品1-b、1-c、1-d与样品2-b、2-c、2-d存在屈服应力,当剪切



(a) 样品 1-a、2-a、3-a



(b) 样品 1-a、1-b、1-c、1-d



(c) 样品 2-a、2-b、2-c、2-d

图 2 大理石粉-水-瓜尔胶复合封孔材料流变曲线

Fig. 2 Rheological curves of marble powder-water-guar gum composite sealing materials

速率在  $20 \text{ s}^{-1}$  以下时,剪切速率与剪切应力呈曲线相关,符合 Herschel-Bulkley 模型;剪切速率在  $20 \text{ s}^{-1}$  以上时,剪切速率与剪切应力呈线性相关,符合 Bingham 模型。每组样品进行 3 次平行测试,流变曲线无明显变化。样品 3-b、3-c、3-d 不能形成连续相流体,无法测试流变性能。

图 3 为有、无瓜尔胶实验样品静置 60 min 后的对比。大理石粉受自身的重力影响,产生沉降作用,与水分层。3 种流变模型方程中<sup>[15-17]</sup>,式(1)为 Newtonian 模型;式(2)为 Herschel-Bulkley 模型;式(3)为 Bingham 模型。



图 3 封孔材料静置稳定性实验

Fig. 3 Static stability experiment of sealing materials

$$\tau = \eta \frac{dy}{dt} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + K \left( \frac{dy}{dt} \right)^n, & \tau > \tau_0; \\ \frac{dy}{dt} = 0, & \tau < \tau_0. \end{cases} \quad (2)$$

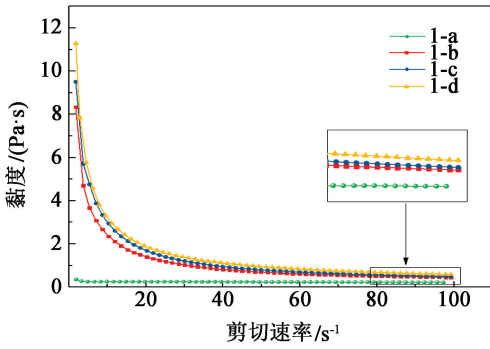
$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + \eta \frac{dy}{dt}, & \tau > \tau_0; \\ \frac{dy}{dt} = 0, & \tau < \tau_0. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\tau$  为剪切应力; $\eta$  为塑性黏度; $dy/dt$  为剪切速率; $\tau_0$  为屈服应力; $K$  为黏稠系数; $n$  为流变行为指数。

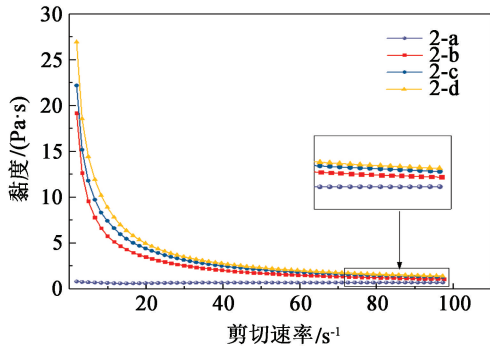
图 4 反映了大理石粉-水-瓜尔胶复合封孔材料塑性黏度的变化。未加入瓜尔胶的封孔材料塑性黏度保持恒定;大理石粉-水-瓜尔胶复合封孔材料在静态时表现出极大的黏度。当剪切速率小于  $20 \text{ s}^{-1}$  时,随着剪切速率的增大,塑性黏度迅速降低;当剪切速率大于  $20 \text{ s}^{-1}$  时,塑性黏度逐渐降低,最终趋于平衡,表现出剪切变稀的性质。大理石粉与水质量比(水灰比)相同的情况下,随着瓜尔胶含量增加,封孔材料的塑性黏度呈上升趋势,在 30 min 内封孔材料的流变性能稳定,不随时间变化。

#### 1.4 大理石粉与瓜尔胶的相互作用对封孔材料流变性能的影响

对于未加入瓜尔胶的封孔材料,大理石粉内部间隙较大,颗粒无连接性,表现出牛顿流体的性质,在短时间内由于重力作用发生沉降分层,稳定性差。图 5 为实验所用的大理石粉与瓜尔胶的 SEM 图片。大理石粉为表面粗糙、形状不规则并带有磁性的多面体颗粒;瓜尔胶未在水中溶胀时为团状颗粒。瓜尔胶在水中迅速溶胀,大分子长链结构在水中舒展,形成连续的网络结构,填补了大理石粉颗粒之间的间隙,限制了颗粒之间的相互滑动,同时给予颗粒支撑作用,有效阻止了封孔材料沉降分层,增大了封孔

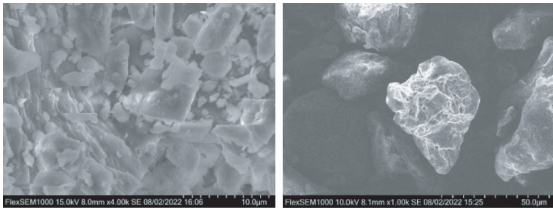


(a) 样品 1-a、1-b、1-c、1-d



(b) 样品 2-a、2-b、2-c、2-d

图4 大理石粉-水-瓜尔胶复合封孔材料塑性黏度的变化  
Fig.4 Changes of plastic viscosity of marble powder-water-guar gum composite sealing materials



(a) 大理石粉 (b) 瓜尔胶

图5 大理石粉与瓜尔胶  
Fig.5 Marble powder and guar gum

材料内部流动的阻力,形成稳定的体系(图6)。所以,加入瓜尔胶和降低封孔材料的水灰比,都会大幅度增加封孔材料的屈服应力与塑性黏度。根据制备的封孔材料样品的流变性能,以直径55 mm的一次性塑料杯装入100 g实验样品横放不流出为标准(图7),确定大理石粉、水、瓜尔胶三者质量比为70:30:0.15。以此配方配制煤矿掘进爆破最终使用的封孔材料,如需进一步提高封孔材料强度,可增加瓜尔胶含量。由于瓜尔胶的加入,新型封孔材料表现出更加稳定的物理性质;同时,极高的屈服应力与塑性黏度可有效防止冲孔现象的发生;质量分数30%的水分可以吸收炸药爆炸产生的热量并有效抑制火焰传播,使井下掘进爆破更加安全。

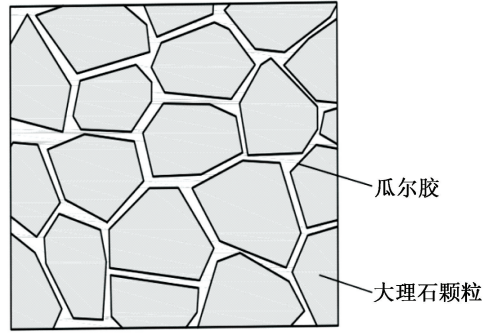


图6 大理石粉-水-瓜尔胶复合封孔材料体系  
Fig.6 Marble powder-water-guar gum composite sealing material system

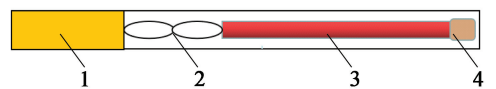


图7 封孔材料水平放置图  
Fig.7 Horizontal placement of sealing materials

## 2 机械化封孔技术的研究

### 2.1 封孔工艺

巷道掘进爆破的效率受制于封孔材料与封孔工艺,传统的封孔材料黄泥柱与水炮泥需要提前制备。采用一炮三泥封孔工艺和不耦合装药结构(图8)。封孔装药时,先用炮棍将一个长为10 cm左右的柱状固体黄泥推入炮孔底部,随后依次装入炸药、水炮泥、黄泥。其中,黄泥封孔长度不小于50 cm,整个过程需要6人配合完成。这种封孔方式的缺点在于:固体黄泥无法保证封孔的密封效果;封孔操作繁琐使得施工效率低下;不耦合的装药结构会导致炸药单耗高,掘进深度较浅。



1 - 黄泥; 2 - 水炮泥; 3 - 炸药; 4 - 底座泥。

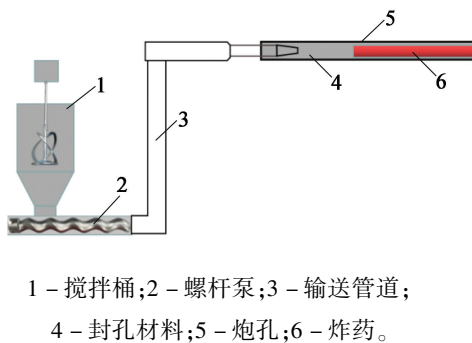
图8 一炮三泥封孔结构

Fig.8 Sealing structure with one shot and three mud sealing holes

为了提高封孔质量与掘进爆破速率,使用新型大理石粉-水-瓜尔胶复合封孔材料和自研的封孔材料搅拌与泵送一体机(简称一体机)。其中,一体机

主要由搅拌桶与输送泵组成。由于流体的封孔材料黏度高,在仰角为 90°时不易流出,同时炮掘工作面高的炮孔,封孔时阻力大,需要强大的输送压力;因此,搅拌桶选用螺纹叶轮搅拌机,输送泵选用高性能螺杆泵,两者均满足煤矿井下机械设备要求。

新型封孔工艺流程如图 9 所示。封孔在装药结束后进行。将气动泵接入一体机。把提前混合好的大理石粉、瓜尔胶与水按比例加入搅拌桶,混合搅拌 5 min。随后,将输送管插入炮孔,打开气动泵,直到封孔材料装满炮孔为止。封孔机的使用可大幅提高封孔效率,在封孔作业时仅仅需要 3 人。1 人使用自动化装药机进行装药;1 人制备封孔浆体、控制封孔机的运转;1 人控制输送管与更换炮孔。和传统的掘进爆破封孔工艺相比,新型封孔工艺大幅简化了封孔流程,减少了封孔作业人数,降低了工人劳动强度。



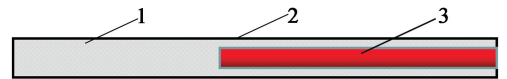
1 - 搅拌桶; 2 - 螺杆泵; 3 - 输送管道;  
4 - 封孔材料; 5 - 炮孔; 6 - 炸药。

图 9 新型封孔工艺流程图

Fig. 9 Flow chart of the new sealing process

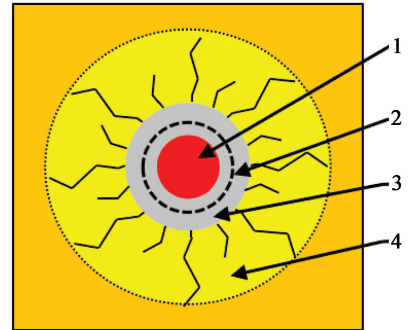
## 2.2 装药结构抗冲击分析与破岩机理

如图 10,大理石粉-水-瓜尔胶新型复合封孔材料取代了黄泥、水炮泥和座底泥,在流体材料受到炸药爆炸产生的冲击作用后,会发生弹性变形。由于流体本身的高黏度特性,与传统黄泥材料相比,非牛顿(Herschel-Bulkley)流体与孔壁贴合更加紧密。该材料的黏度在静止时很大,增大了封孔材料与孔壁之间的摩擦力,足够的封孔长度会使向外的冲击作用大幅减弱,可以有效防止冲孔现象的发生。新的封孔工艺采用流体耦合装药,封孔材料填补了炸药与炮孔之间的空隙。这种装药结构,利用非牛顿流体的流变特性,流体介质成为炸药爆轰产物与岩石间的弹性缓冲层,增加了能量传递,延长了冲击波的作用时间,加大了爆炸的作用范围。实现耦合,可以降低炸药单耗,提高单循环进尺;封孔材料的高含水量可以有效抑制炸药产生的火焰,降低瓦斯爆炸的风险,同时起到降尘的作用。



1 - 封孔材料; 2 - 炮孔; 3 - 炸药。

(a) 结构



1 - 炸药; 2 - 弹性波; 3 - 封孔材料; 4 - 岩石。

(b) 破岩机理

图 10 耦合装药的结构与破岩机理

Fig. 10 Coupling charge structure and rock breaking mechanism

## 3 工程应用

### 3.1 工程简介

顾北煤矿中央 1#煤顶板轨道巷为中央 1#煤采区的采区轨道系统巷道,设计长度 987 m,近似 1#煤层走向布置,位于 1#煤层顶板,距离 1#煤层 7~28 m,平均 15 m;断面规格 5.4 m × 4.3 m、5.8 m × 4.5 m。采用锚网索喷支护;运用钻装机、锚杆、锚索钻车施工;每个循环施工炮眼约 130 个。岩性主要为粉细砂岩、中细砂岩等,岩层裂隙,滑面发育;局部发育小褶曲。粉细砂岩抗压强度为 14.95 MPa,中细砂岩抗压强度为 22.6~76.91 MPa。巷道主要在 1#煤顶板层位施工。

### 3.2 工程实验

根据巷道岩石分布情况,对巷道掘进爆破进行参数设计:炮眼直径为 42 mm;掏槽眼孔深 2.40 m,装药 4 卷;中心眼 2.40 m,不装药;辅助眼孔深 2.40 m;底眼孔深 2.40 m,装药 3 卷;周边眼孔深 2.2 m,装药 2 卷,采用不耦合装药,封孔长度 1 m。掏槽眼、中心眼、辅助眼和底眼均使用新型封孔材料封满。炸药使用高威力煤矿三级煤矿许用水胶炸药,规格为  $\phi 35 \text{ mm} \times 330 \text{ mm} \times 330 \text{ g}$ 。将传统的一炮三泥技术与新型机械化封孔进行对比实验,爆破效果见表 2 和表 3。

表 2 与表 3 中,传统的封孔工艺进行装药、封

表2 传统装药、封孔爆破效果

Tab.2 Outcomes of traditional charge and sealing blasting

序号	平均 眼深/ m	炮眼 个数	炸药 消耗/ kg	循环 进尺/ m	炮眼 利用率/ %	冲孔率/ %	装药 时间/ min	封孔 时间/ min	装封 总时间/ min	人数
1 <sup>#</sup>	2.4	128	101.72	1.82	75.8	3	61	72	133	6
2 <sup>#</sup>	2.4	128	101.72	1.86	77.5	4	60	75	135	6
3 <sup>#</sup>	2.4	126	99.96	1.81	75.4	3	64	71	135	6
4 <sup>#</sup>	2.4	128	101.72	1.86	77.5	3	65	70	135	6
5 <sup>#</sup>	2.4	129	102.60	1.74	72.5	2	61	71	132	6
平均	2.4	128	101.54	1.82	75.8	3	62	72	134	6

表3 新型装药、封孔爆破效果

Tab.3 Outcomes of the new charge and sealing blasting

序号	平均 眼深/ m	炮眼 个数	炸药 消耗/ kg	循环 进尺/ m	炮眼 利用率/ %	冲孔率/ %	装药 时间/ min	封孔 时间/ min	装封 总时间/ min	人数
1 <sup>#</sup>	2.4	128	101.72	2.18	90.8	0	31	34	65	3
2 <sup>#</sup>	2.4	128	101.72	2.13	90.7	0	32	34	66	3
3 <sup>#</sup>	2.4	128	101.72	2.18	88.8	0	30	32	62	3
4 <sup>#</sup>	2.4	128	101.72	2.15	89.6	0	29	33	62	3
5 <sup>#</sup>	2.4	129	102.60	2.20	91.6	0	31	33	64	3
平均	2.4	128	101.89	2.17	90.4	0	31	33	64	3

孔,平均炮眼128个,需要6人操作施工,134 min完成,工作效率为9.95孔/(人·h),炮眼利用率为75.8%;采用新型封孔工艺,平均炮眼128个,2人封孔,1人装药,64 min完成,工作效率为40.18孔/(人·h),炮眼利用率达到90.4%,单循环进尺提高14.6%,工作效率提高304%。使用新型封孔工艺,在炮眼中实现耦合装药结构,单循环进尺显著提高,未发生冲孔现象,满足施工要求。

## 4 结论

1)针对掘进爆破中易冲孔、操作复杂等问题,研发了一种高黏度、可泵送的新型流体封孔材料。瓜尔胶使新型封孔材料具有良好的稳定性和剪切变稀的流体性质;随着水灰比的减小或瓜尔胶含量的增加,该材料的塑性黏度均增加。确定大理石粉、水和瓜尔胶按照70:30:0.15的质量比均匀混合,配制成高黏度、水平放置不流出的流体封孔材料。

2)采用搅拌与泵送一体机,实现了机械化封孔作业,解决了掘进爆破封孔工艺复杂、封孔效果差等难题。封孔后的装药结构为流体耦合装药,提高了炸药的利用率,同时可以改善爆破效果;配合封孔材

料的高含水量,可以降低瓦斯爆炸的风险。

3)该封孔技术在顾北煤矿巷道掘进施工中取得很好的效果,单循环进尺提高14.6%,工作效率提高304%;现已在淮南多数煤矿推广运用。

## 参考文献

- [1] 庄又军,石刚,高敬东,等.半煤岩巷道掘进爆破振动监测分析[J].煤矿安全,2020,51(11):258-262. ZHUANG Y J, SHI G, GAO J D, et al. Analysis on monitoring of blasting vibration in semi-coal rock roadway excavation [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(11): 258-262.
- [2] 陈士海.岩巷快速掘进爆破技术[J].工程爆破,1998,4(3):22-25. CHEN S H. Blasting technique of quick tunneling in rock drift [J]. Engineering Blasting, 1998, 4(3): 22-25.
- [3] 宋长茂.提高隧道钻眼爆破效率的措施探讨[J].铁道建筑,2001(1):38-39.
- [4] 黄文尧,胡少银,吴红波,等.一种煤矿爆破封孔用含水消焰炮泥的制备及其使用方法:CN113526908A [P]. 2021-10-22.
- [5] 马春德,刘泽霖,王业顺,等.大断面隧道掘进中炮孔快速堵塞新方法研究[J].矿冶工程,2020,40

- (4): 6-9.
- MA C D, LIU Z L, WANG Y S, et al. A new method for rapid blockage of boreholes in large-section tunneling excavation [J]. *Mining and Metallurgy Engineering*, 2020, 40(4): 6-9.
- [6] 路晓荣, 李西凡, 熊祖强, 等. 新型深孔爆破快速封孔材料及封孔新工艺[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(9): 148-152.
- LU X R, LI X F, XIONG Z Q, et al. New rapid sealing material of deep hole blasting and its process [J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(9): 148-152.
- [7] 王杰, 张雷林, 伍清. 新型爆破封孔材料的制备与应用[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(3): 56-59, 64.
- WANG J, ZHANG L L, WU Q. Preparation and application of new sealing material for blasting [J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(3): 56-59, 64.
- [8] 杨威, 贾茹, 李希建, 等. 采煤工作面“爆注”一体化防突理论与技术[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(4): 764-775.
- YANG W, JIA R, LI X J, et al. Theory and technology of “burst injection” integrated outburst prevention in coal face [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2021, 50(4): 764-775.
- [9] 陈显清. 掺大理石粉的混凝土流变及力学性能试验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- CHEN X Q. Study on rheology and mechanical properties of concrete with marble dust [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.
- [10] 贾卓龙, 晏长根, 李博, 等. 瓜尔豆胶固化纤维黄土的抗侵蚀特性及生态护坡试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(10): 1881-1889.
- JIA Z L, YAN C G, LI B, et al. Experimental study on erosion resistance and ecological slope protection of guar gum-treated fiber-reinforcement loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(10): 1881-1889.
- [11] 唐美芳, 方波, 苏创, 等. 羧甲基瓜尔胶水溶液流变特性研究[J]. *油田化学*, 2011, 28(2): 196-200.
- TANG M F, FANG B, SU C, et al. Rheological properties of carboxyl-methyl guar gum solutions [J]. *Oilfield Chemistry*, 2011, 28(2): 196-200.
- [12] 上官剑铭, 叶亦杰. 高效水炮泥 + 聚氨酯发泡胶新型炮孔堵塞材料试验研究[J]. *采矿技术*, 2019, 19(1): 114-116.
- [13] 孙文德, 李子全, 周军, 等. 瓦斯抽采中新型封孔材料及工艺的应用研究[J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(4): 60-63.
- SUN W D, LI Z Q, ZHOU J, et al. Research on new borehole sealing material and sealing technique applied to mine gas drainage [J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(4): 60-63.
- [14] 章军锋, 周永胜, 宋茂双. 实验流变学的发展现状与趋势[J]. *地球科学*, 2022, 47(8): 2744-2756.
- ZHANG J F, ZHOU Y S, SONG M S. Development status and trends of experimental rheology [J]. *Earth Science*, 2022, 47(8): 2744-2756.
- [15] 费祥麟. 高等流体力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.
- [16] ALI D H, MOHAMMED M A R. Studying the rheological properties of non-newtonian fluids under the effect of temperature using different chemical additives [J]. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 2020, 21(2): 47-56.
- [17] 侯悦悦, 曾晓辉, 龙广成, 等. 天然火山灰-水泥-粉煤灰复合浆体流变性能[J]. *材料导报*, 2022, 36(19): 93-98.
- HOU Y Y, ZENG X H, LONG G C, et al. Rheological properties of natural pozzolar-cement-fly ash composite slurry [J]. *Materials Review*, 2022, 36(19): 93-98.