

# 松软煤层加固用泡沫水泥浆的实验研究

李子硕<sup>1</sup>, 薛曼<sup>1</sup>, 李智<sup>1</sup>, 张杰<sup>1</sup>, 胡豪飞<sup>1</sup>, 杨现禹<sup>\*1,2</sup>, 蔡记华<sup>\*1,2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学深圳研究院, 广东 深圳 518000)

**摘要:**针对松软煤层顺层钻进长钻孔成功率低、煤层机械强度低的难题,提出将机械发泡式泡沫水泥浆通过高压旋喷的方式注入松软煤层进行随钻加固的技术思路。室内试验中,通过改变松软煤岩与泡沫水泥浆的比例,模拟注浆后形成不同固结效果的松软煤岩-泡沫水泥固结体。以抗压强度和气体渗透率作为主要评价指标,研究了松软含煤量对固结体性能的影响规律。结果表明:(1)与纯泡沫水泥浆的固结体相比,当松软煤岩含量(以下简称“含煤量”)为5%时,固结体的气体渗透率略有降低,气体渗透率随养护时间增加而降低;(2)含煤量 $\geq 10\%$ ,固结体气体渗透率随含煤量增大而升高;(3)固结体的早期抗压强度(养护1 d)随含煤量的升高先升高后降低。养护时间增加至7 d后,固结体强度随含煤量升高而降低;(4)含煤量在20%~25%之间的固结体养护7 d后,抗压强度在8.65~9.94 MPa,气体渗透率在9.08~36.52 mD之间。研究成果可以为松软煤层的随钻护壁与瓦斯抽采提供有益借鉴。

**关键词:**泡沫水泥浆;松软煤层;固结体;气体渗透率;抗压强度

**中图分类号:**P634;TD7 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)03-0130-09

## Experimental study of foamed cement slurry for soft coal seam reinforcement

LI Zishuo<sup>1</sup>, XUE Man<sup>1</sup>, LI Zhi<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, HU Haofei<sup>1</sup>, YANG Xianyu<sup>\*1,2</sup>, CAI Jihua<sup>\*1,2</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

2. Shenzhen Research Institute, China University of Geosciences, Shenzhen Guangdong 518000, China)

**Abstract:** In view of the problems of low success rate and low mechanical strength of long drilling holes along the soft coal bedding, the technical idea of injecting mechanical foamed cement slurry into the soft coal seam by the way of high-pressure rotary spraying while drilling to inforce the fotation is proposed. In the laboratory test, the proportion of soft coal rock and foamed cement slurry was changed to simulate the soft coal rock and foamed cement consolidation body which has different consolidation effects after grouting. In addition, taking compressive strength and gas permeability as the main evaluation indicators, the influence of soft coal content on the performance of the consolidated body was studied. The results show that: (1) Compared with the consolidated body of pure foamed cement slurry, when the content of soft coal rock (hereinafter referred to as “coal content”) was 5%, the gas permeability of the consolidated body decreases slightly, and the gas permeability decreased with the increase of curing time; (2) When the coal content was greater than or equal to 10%, the gas permeability of the consolidated body increased with the increase of coal content; (3) The early compressive strength (cured for 1d) of the consolidated body increases first and

收稿日期:2022-11-23; 修回日期:2023-04-01 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.03.017

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目“纳米颗粒钻井液离散元流固耦合模拟与页岩孔隙封堵机理研究”(编号:42002311);中央引导地方科技发展资金自由探索类基础研究项目“南海深水环保型纳米水基钻井液体系研究”(编号:2021Szvup156)

第一作者:李子硕,男,汉族,1998年生,硕士研究生,地质工程专业,从事钻井液与工程浆液的研究,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, zishuoli@cug.edu.cn.

通信作者:杨现禹,男,汉族,1992年生,特任副教授,地质工程专业,博士,从事钻井液与井壁稳定、离散元流体动力学研究工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, yxy@cug.edu.cn.

蔡记华,男,汉族,1978年生,教授,博士,从事钻井液、工程浆液和完井液等方面的教学与研究工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, caijh@cug.edu.cn.

引用格式:李子硕,薛曼,李智,等.松软煤层加固用泡沫水泥浆的实验研究[J].钻探工程,2023,50(3):130-138.

LI Zishuo, XUE Man, LI Zhi, et al. Experimental study of foamed cement slurry for soft coal seam reinforcement[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3):130-138.

then decreases with the increase of coal content. After 7 d of curing time, the strength of the consolidated body decreased with the increase of coal content; (4) After the coal content was between 20%~25% and the consolidation body was cured for 7 d, the compressive strength was 8.65~9.94 MPa, and the gas permeability was 9.08~36.52 mD. The research results can provide useful reference for the wall protection while drilling and gas extraction in soft coal seam.

**Key words:** foamed cement; soft coal seam; consolidated body; gas permeability; compressive strength

## 0 引言

煤炭是我国的主体能源,我国正在构建清洁低碳、安全高效的能源体系<sup>[1]</sup>。在我国,煤层瓦斯含量普遍较高,50%以上的煤层为高瓦斯煤层,在煤炭开采过程中容易喷出大量煤和瓦斯,是影响煤炭安全生产的关键难题之一<sup>[2-6]</sup>。瓦斯抽采既可以解决煤矿安全生产问题,还可加速我国能源体系转型,如今在“碳达峰”和“碳中和”政策背景下,瓦斯抽采已成为我国煤炭行业“减碳”的重要一环。煤矿井下瓦斯抽采的主要方法是钻探<sup>[7-9]</sup>,在我国高瓦斯煤层中60%的开采煤层为松软、低渗煤层<sup>[10]</sup>。松软煤层中采用钻探手段进行顺层钻进长钻孔,受煤体结构、地应力、孔隙压力(主要是瓦斯压力)以及钻进工艺的影响<sup>[11-12]</sup>,松软煤层钻孔易发生失稳,容易塌孔,且钻孔轨迹不可控,钻孔排渣困难<sup>[13-15]</sup>。

针对松软煤层瓦斯抽采孔钻孔失稳难题,国外多采用下筛管的方式,国内学者们做出了大量研究,凌标灿等<sup>[16]</sup>开发出新型的三棱钻杆,提高了成孔率;路桂英<sup>[17]</sup>建立了孔壁浆液渗流模型,采用随钻注浆加固的方式解决钻孔失稳问题;胡艳丽等<sup>[18]</sup>提出了将泡沫混凝土作为沿空留巷填充材料的方法;岳文萍等<sup>[19]</sup>提出了利用泡沫混凝土支护松软煤层钻孔,为瓦斯流动提供通道的方法。

为进一步提高松软煤层加固效果,我们提出在松软煤层顺层钻进时,使用高压旋喷装置将机械发泡式泡沫水泥浆注入孔内,泡沫水泥浆与松散煤粉或煤块混合后,在钻孔周围一定范围内以近水平的方式形成圆柱状固结体,固结体强度会明显高于松软煤岩,实现增强孔壁稳定性的目的。同时,松软煤岩-泡沫水泥浆固结体(以下简称“固结体”)还保持较高的气体渗透率,为后续的瓦斯抽采提供可靠通道。此时,固结体的性能应满足如下要求:(1)气体渗透率尽可能高。我国低渗煤层气体渗透率多在 $10^{-2}$ ~ $10^{-1}$  mD之间,有的气体渗透率甚至低于 $10^{-2}$

mD<sup>[20]</sup>。固结体气体渗透率越高,对后期的瓦斯抽采越有利;(2)抗压强度尽可能高,以维持松软煤层的稳定性。若固结体的抗压强度不足,钻孔易发生失稳。

基于气体渗透率测试、抗压强度测试、孔隙结构分析、扫描电镜(SEM)与电子计算机断层扫描(CT)等实验手段,研究了松软含煤量对固结体性能的影响规律,研究成果可为松软煤层随钻护壁与瓦斯抽采提供有益参考。

## 1 实验

### 1.1 实验材料与仪器

G级油井水泥,发泡剂J20L,稳泡剂TW703,空心玻璃微球,稳定剂,降失水剂CG80S,松软煤样取自山西晋城天地王坡矿,去除粒径较大的颗粒后,选取0~2.36 mm(8目以上)煤粉占55%,2.36~3.35 mm(8~6目)煤粉占20%,3.35~8 mm(6~2目)煤粉占25%。

实验仪器:JHGP型气体渗透率测定仪、ZCYA-W300C型微机控制抗压抗折试验机、Auto-pore IV 9520型高压压汞仪、nano Voxel-3000型CT扫描仪、OWC-9360型恒速搅拌机等。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 机械发泡式泡沫水泥浆制备

经过大量的配方遴选,获取一套可用于松软煤层顺层钻进加固用的机械发泡式泡沫水泥浆体系,配方(外加材料均按水泥干重占比计算)及水泥浆基本性能如表1和表2所示。

表1 机械发泡式泡沫水泥的配方

Table 1 Formulation of mechanical foamed cement

水灰比	空心玻璃微球/%	发泡剂J20L/%	稳定剂/%	降失水剂CG80S/%	稳泡剂TW703/%
0.55	8.4	0.4	1	1.5	1.5

表2 机械发泡式泡沫水泥浆基本性能

Table 2 Basic properties of mechanical foamed cement slurry

表观粘度/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	塑性粘度/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	动切力/ $\text{Pa}$	稠化( $65\text{ }^{\circ}\text{C}/35\text{ MPa}$ )	
			初稠/Bc	时间/min
110	92	18	17	165

### 1.2.2 固结体制备

制备好泡沫水泥浆,然后按照松软煤样相对泡沫水泥浆质量的不同比例(0%、5%、10%、20%、

25%、33%、50%),将配制好的泡沫水泥浆与松软煤粉进行充分混合,在 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 常压条件下水浴养护,得到固结体。为增加结果的可靠性,每个比例重复制样3个。

### 1.2.3 气体渗透率测试

使用岩心钻机制备直径为 $25\text{ mm}$ 的圆柱形固结体样品(图1),并将两端打磨光滑平整,干燥处理后,按照操作规程使用JHGP型气体渗透率测定仪进行气体渗透率测试。

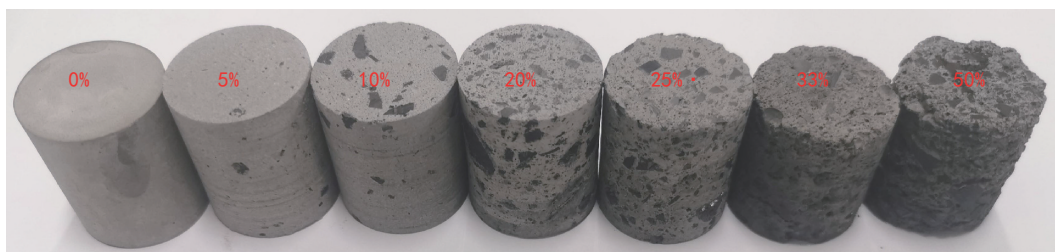


图1 不同含煤量(0~50%)的固结体岩心

Fig.1 Consolidated bodies with different coal content (0~50%)

### 1.2.4 抗压强度测试

泡沫水泥浆与固结体 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 常压水浴养护,达到养护龄期后,使用ZCYA-W300C型微机控制抗压抗折试验机测试其抗压强度。

### 1.2.5 孔隙结构分析

从固结体上切割下若干体积为 $1\text{ cm}^3$ 的小块,抛光清洗干净后在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下干燥 $4\text{ h}$ ,烘干后立即将试样放入干净干燥的样品膨胀计内并抽真空,然后利用Autopore IV 9520型高压压汞仪依次进行低压实验和高压实验。

### 1.2.6 扫描电子电镜(SEM)与CT扫描分析

将养护至龄期的样品破碎,取其内部较平整的碎块放入无水乙醇中浸泡终止水化,烘干后,将试样表面处理平整,使用分析型扫描电镜对其微观形貌进行观察分析。取圆柱形固结体样品,利用nano Voxel-3000型CT扫描仪进行扫描,观察固结体的微观结构特点。

## 2 结果与讨论

### 2.1 含煤量与养护时间对固结体气体渗透率的影响

经测试,晋城地区王坡矿的原始煤样平均气体渗透率为 $0.21\text{ mD}$ ,因此,所形成的松软煤岩-机械

发泡式泡沫水泥浆固结体的气体渗透率应大于该值,确保不会影响后期的瓦斯抽采效率。

如图2(a)所示,在 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 常压水浴养护 $1\text{ d}$ 后,泡沫水泥石气体渗透率在 $0.71\sim 1.49\text{ mD}$ 之间;含煤量超过 $5\%$ 后,固结体气体渗透率开始上升。含煤量越高,固结体气体渗透率越高,提升幅度越大。含煤量为 $50\%$ 时,固结体中气泡变为开孔泡沫,气体渗透率最高可达到 $197.59\text{ mD}$ 。

由图2(b)可知,在养护 $7\text{ d}$ 后,泡沫水泥石和含煤量较低( $5\%$ )的固结体,其气体渗透率随着水泥水化程度的加深而降低。含煤量 $\geq 10\%$ 的固结体,气体渗透率开始升高,含煤量越高提升幅度越大。含煤量达到 $50\%$ 时,固结体气体渗透率超过 $260\text{ mD}$ ,最高可达到 $284.58\text{ mD}$ 。

由图2和图3可知,泡沫水泥石与含煤量为 $5\%$ 的固结体的气体渗透率均随养护时间的增加而降低。当含煤量 $\geq 10\%$ 时,固结体气体渗透率随含煤量的升高、养护时间的增加而升高。养护 $1\text{ d}$ 时,固结体气体渗透率变化规律可分为3个阶段:(1)含煤量在 $0\%\sim 20\%$ 之间时,固结体气体渗透率增速较为缓慢;(2)含煤量在 $25\%\sim 33\%$ 之间时,固结体气体渗透率增速最快;(3)含煤量 $> 33\%$ ,固结体气体渗透率增速略有降低。养护 $7\text{ d}$ 时,受水泥水化进程

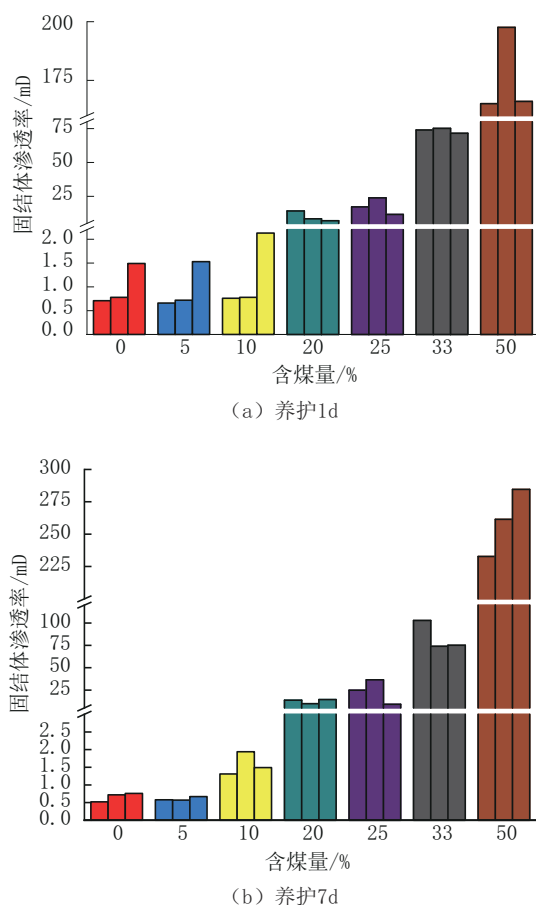


图2 养护1d和7d后不同含煤量固结体的气体渗透率

Fig.2 Gas permeability of consolidated bodies with different coal content after 1d and 7d curing time

影响,含煤量超过25%后,固结体气体渗透率提升速度最快。

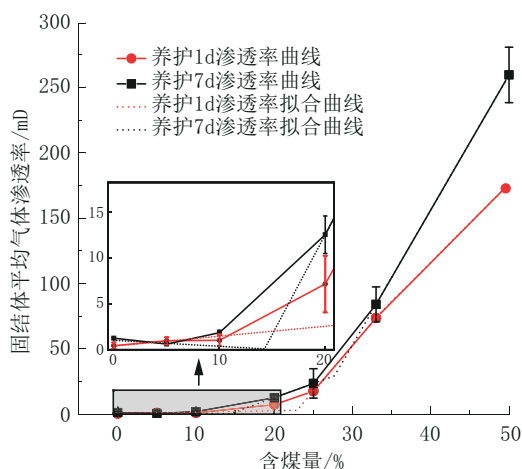


图3 不同含煤量固结体的平均气体渗透率

Fig.3 Average gas permeability of consolidated bodies with different coal content

## 2.2 含煤量与养护时间对固结体抗压强度的影响

如图4(a)所示,养护1d后,含煤量升高,固结体抗压强度逐渐升高,含煤量为20%时,固结体抗压强度开始下降,含煤量为25%时,固结体强度低于泡沫水泥。养护7d的固结体抗压强度如图4(b)所示,固结体抗压强度随含煤量升高而降低。从图5中可以看出,固结体抗压强度随养护时间增加而增加。含煤量>20%后,固结体抗压强度大幅降低。

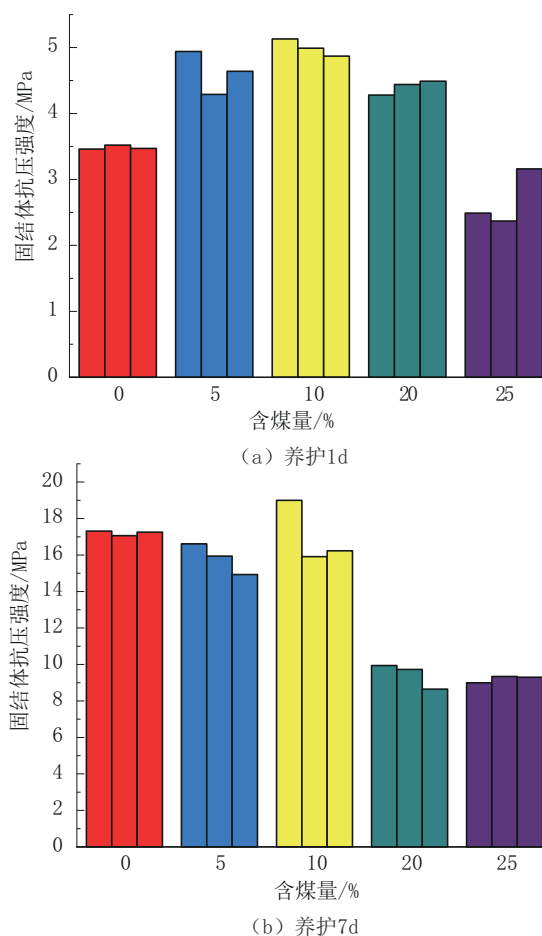


图4 养护1d和7d后不同含煤量固结体的抗压强度

Fig.4 Compressive strength of consolidated bodies with different coal content after 1d and 7d curing time

## 2.3 固结体的孔隙结构分析

从图6中可以看出,随着含煤量的增加,大毛细孔和过渡孔的含量逐渐减低,固结体孔径峰值逐渐右移,孔径>100  $\mu\text{m}$ 的大孔占比逐渐升高。

固结体内各类孔隙含量如图7所示。含煤量的增加使孔径为10~100 nm的过渡孔含量降低,孔径



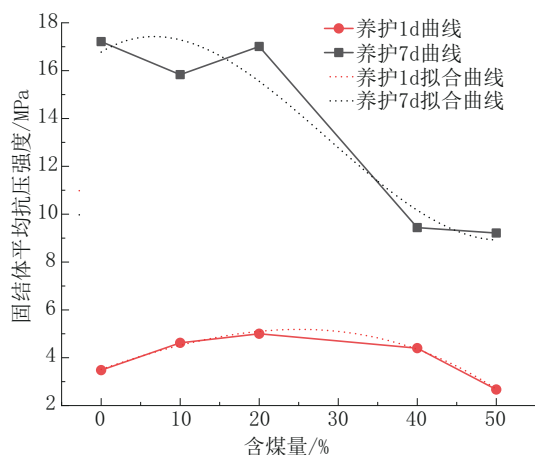


图5 不同含煤量固结体的平均抗压强度

Fig.5 Average Compressive strength of consolidated bodies with different coal content

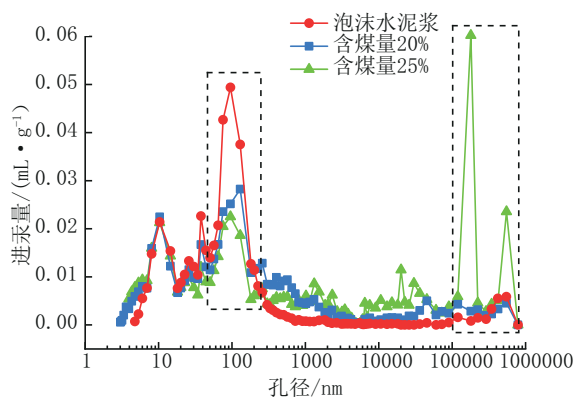


图6 不同含煤量固结体的孔径分布曲线

Fig.6 Pore size distribution curves of consolidated bodies with different coal content

$>1\ \mu\text{m}$ 的大孔含量升高,  $100\ \text{nm}\sim 1\ \mu\text{m}$ 的毛细孔含量先增加后减小, 说明含煤量高的固结体中的孔隙变主要是过渡孔和毛细孔减少, 大孔含量升高。

## 2.4 固结体的微观结构分析

### 2.4.1 固结体的SEM图像分析

为探究固结体气体渗透率和抗压强度降低的机理, 选择养护时间分别为1、7 d的泡沫水泥与含煤量25%的含煤固结体, 对其进行电镜扫描。从图8可看出含煤固结体中水泥与煤之间存在明显界面过渡区(ITZ)。图9(a)中可以看出, 养护时间为1 d的泡沫水泥水化产物中有明显的板状氢氧化钙, 图9(b)可以看到针状和不规则球形颗粒形态的C-S-H。水泥水化产物向固结体中的气泡和裂隙内生长。如图10(a)所示, 养护1 d的含煤固结体中, 原本均匀

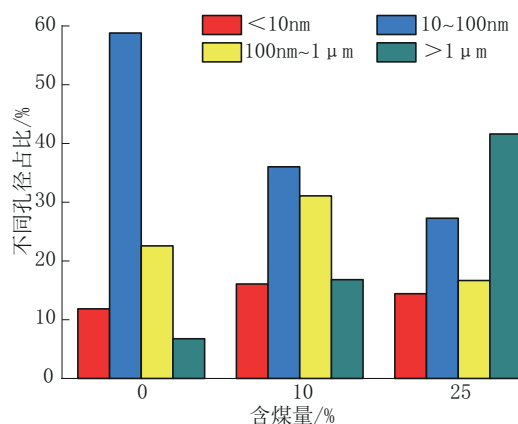


图7 不同含煤量固结体中的孔隙构成

Fig.7 Pore composition in consolidated bodies with different coal content

分散的气泡发生串联, 且产生了裂隙; 图10(b)和图10(c)中, 煤颗粒与破碎的玻璃微球、水泥水化产物、未水化的水泥颗粒掺杂在一起, 松散排布。

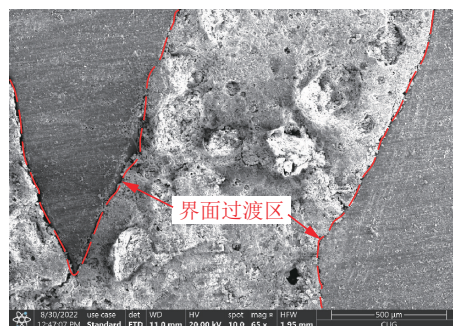


图8 养护7d含煤量25%的含煤固结体SEM图像

Fig.8 SEM image of a coal-containing consolidated body with 25% coal content after cured for 7 d

养护时间7 d时, 气泡中板状氢氧化钙数量增加(见图9c), C-S-H凝胶将氢氧化钙紧密联结, 气泡被不断填充。图9(d)中可以观察到大量六方棱柱状晶体, 通过EDS分析, 六方棱柱状晶体中氧原子与钙原子占比最高, 金原子为进行电镜扫描前喷金所致, 硅原子含量极低, 氧原子与钙原子的原子比例约为5:2, 因此判断其为氢氧化钙晶体, 六方棱柱状氢氧化钙与C-S-H凝胶交叉搭接。养护7 d的含煤固结体中, 水化产物对煤颗粒等组分的粘结效果差, 其结构致密程度明显低于泡沫水泥浆固结体。图10(d)中, 含煤固结体中气泡联通。图10(e)中, 煤颗粒与气泡发生接触, 裂隙尺寸增大。图10(f)中水

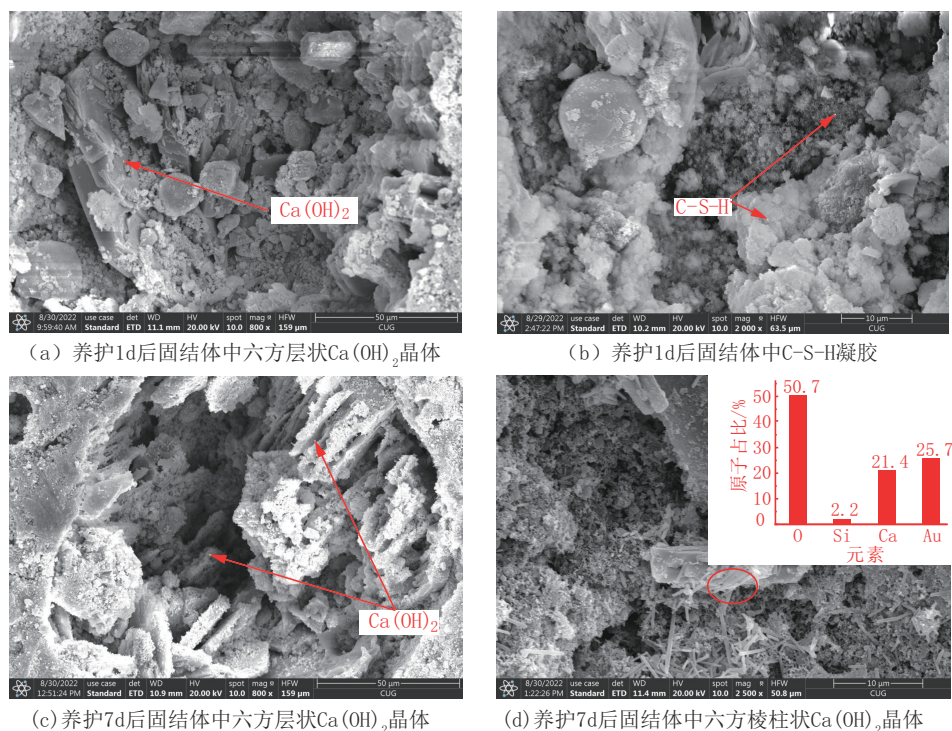


图9 泡沫水泥的SEM图像

Fig.9 SEM image of the foamed cement consolidated body

泥水化产物、煤等松散分布。

#### 2.4.2 固结体的CT扫描分析

含煤量 $>20\%$ 后,固结体中煤的存在使原本分散的气泡发生聚集、联通。可以从图11固结体的CT扫描图中明显观察到,固结体内部气泡均匀分布,在较大煤块周围出现气泡聚集和联通现象。此现象导致煤块与泡沫水泥浆体胶结强度降低,界面过渡区扩大,固结体气体渗透率增加。

### 3 作用机理分析

#### 3.1 固结体气体渗透率升高机理分析

结合压汞实验数据与固结体微观形貌(图6~11),对含煤量升高导致固结体气体渗透率升高的主要原因进行分析。宏观上,煤的加入,使固结体中的过渡孔与毛细孔减少,大孔增多。煤颗粒使气泡发生聚集或联通。大气泡与小气泡之间存在Laplace压力差,这一压力差驱动着小气泡向大气泡扩散,进而发生联通<sup>[21]</sup>。微观上,水泥与煤之间存在界面过渡区,界面过渡区的气体渗透率高于泡沫水泥和煤<sup>[22]</sup>。煤颗粒与气泡接触后,裂隙数量增加、尺寸增大。煤颗粒与水泥水化产物、未水化的水泥颗粒

等掺杂在一起,导致水泥水化产物生长空间环境有限的情况下,水化产物无法联结起来填充裂隙和气泡。

#### 3.2 固结体抗压强度变化机理分析

在养护1d时,煤本身具有一定的抗压强度,少量煤在水泥中可充当骨架结构,在水泥中被水泥水化产物C-S-H粘结在一起,并抑制了水泥石中裂纹的扩展,从而提高了固结体的抗压强度;含煤量继续上升,固结体内界面过渡区增加。因为界面过渡区存在原始裂纹,在受力过程中易发生应力集中,产生贯通的裂缝,最终导致固结体受力破坏。含煤量升高的同时,固结体中水泥占比降低,导致水泥水化产物减少。因此含煤量 $\geq 20\%$ 的固结体中,界面过渡区增加,水泥水化产物减少,水泥水化产物与煤之间的粘结效果变差,固结体的早期抗压强度开始降低。

养护时间增加至7d后,泡沫水泥水化凝结硬化程度加深,泡沫水泥浆体的抗压强度高于煤。含煤固结体中存在界面过渡区,煤颗粒与气泡的接触使裂隙数量增加,水化产物无法有效地将各组份粘结,因此在养护7d时含煤固结体的抗压强度低于泡沫水泥浆固结体,随着含煤量升高,固结体抗压强度降



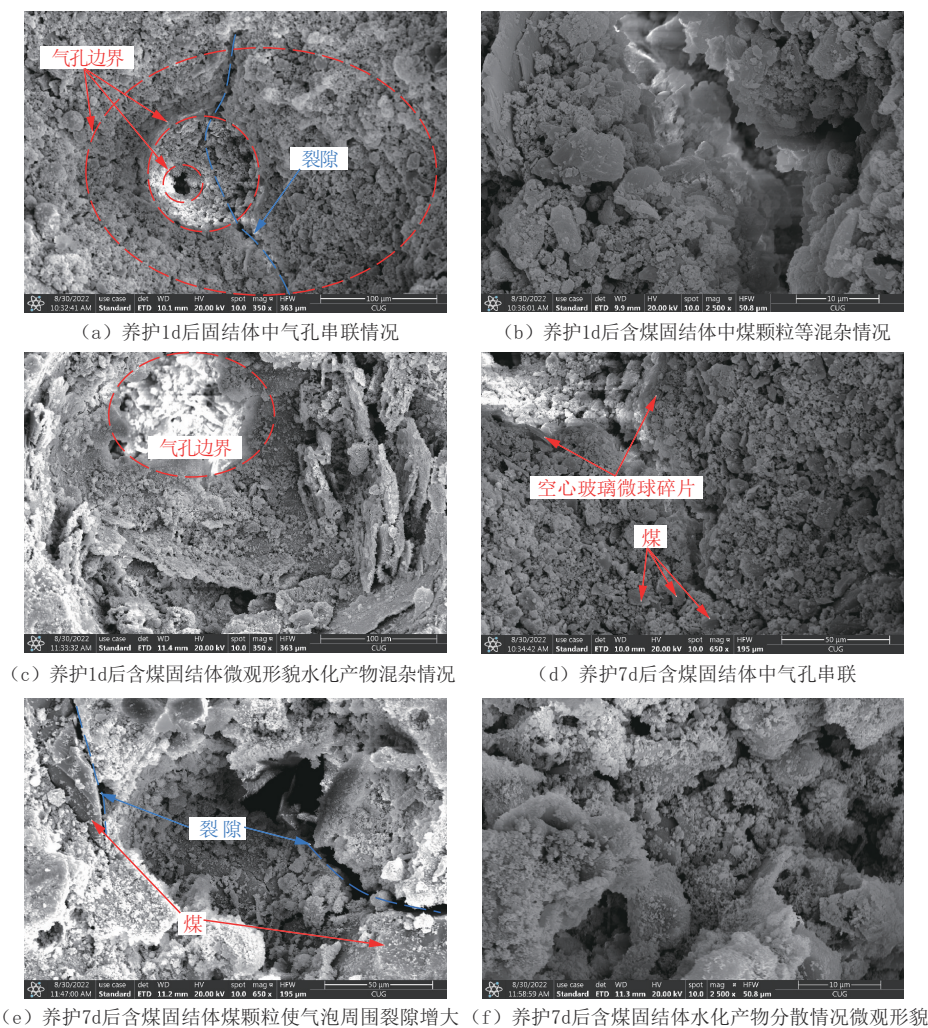


图 10 不同养护时间下含煤量 25% 的含煤固结体的 SEM 图像

Fig.10 SEM image of a coal-containing consolidated body with a coal content of 25% at different curing time

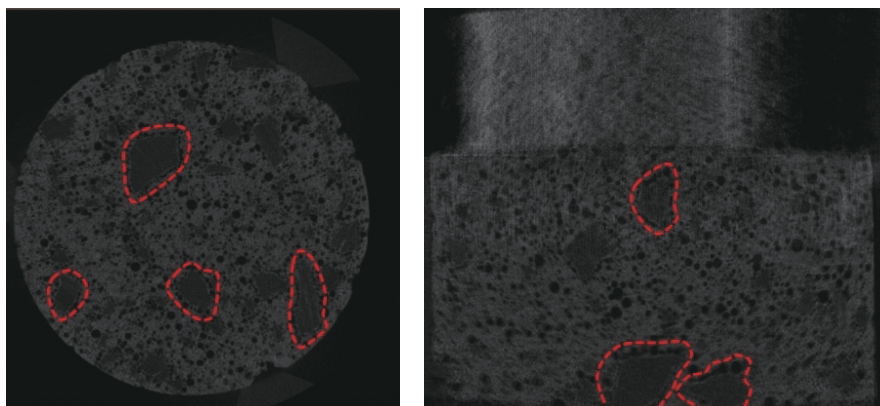


图 11 含煤量为 25% 的含煤固结体的 CT 扫描图像

Fig.11 CT scan image of a coal-containing consolidated body with 25% coal content

低。含煤量 $>33\%$ 后,煤的含量过高,水泥水化起到的粘结作用降低,固结体机械强度下降严重。

#### 4 结论

(1)一套可用于松软煤层随钻加固的机械发泡

式泡沫水泥浆配方:0.55水灰比+8.4%空心玻璃微球+0.4%发泡剂J20L+1.0%稳定剂+1.5%降失水剂CG80s+1.5%稳泡剂TW703。泡沫水泥浆表观粘度110 mPa·s,塑性粘度92 mPa·s,动切力18 Pa,初稠17 Bc,稠化时间165 min。养护1 d后,气体渗透率在0.71~1.49 mD之间,平均抗压强度为3.48 MPa;养护7 d后,气体渗透率有所降低,平均抗压强度上升至17.21 MPa。

(2)含煤量对固结体的气体渗透率影响最大。含煤量 $\geq 10\%$ 的固结体气体渗透率明显提升,有利于提高瓦斯抽采效率,固结体能够为瓦斯提供流动通道。

(3)含煤量 $< 10\%$ 时,煤在其中充当骨架结构,固结体的早期强度较高,高含煤量的固结体中存在大量界面过渡区,界面过渡区低强度的特点使固结体抗压强度降低。随着养护时间增加,水泥水化凝结硬化进程加深,固结体内部不断致密,泡沫水泥浆体抗压强度远高于煤,加之界面过渡区的存在,固结体抗压强度低于泡沫水泥;含煤量 $\geq 20\%$ 的固结体的早期抗压强度在2 MPa以上,随着养护时间增加,其抗压强度升高,达到设计要求。

(4)宏观上,煤的加入使固结体泡沫联通,使小孔聚集在煤块附近扩散成大孔,固结体内毛细孔和过渡孔含量减少,大孔含量增加。微观上,高煤含量的固结体中煤与水泥浆体周围存在的界面过渡区,煤的加入减缓了水泥水化进程,影响了水泥水化产物粘结,产生了更多、更大的裂隙。因此,煤含量 $> 10\%$ 的固结体气体渗透率升高。

(5)煤含量在 $20\% \sim 25\%$ 之间的固结体,其气体渗透率高于松软煤岩,且抗压强度符合设计要求。因此,可根据实际需求,调整旋喷时间、压力和泵量等参数,以更好地满足松软煤层加固的需求。

## 参考文献(References):

- [1] 吕清刚,柴祯.“双碳”目标下的化石能源高效清洁利用[J].中国科学院院刊,2022,37(04):541-548.  
LÜ Qinggang, CHAI Zhen. Highly efficient and clean utilization of fossil energy under carbon peak and neutrality targets[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 541-548.
- [2] 姚宁平,姚亚峰,张杰,等.煤矿井下梳状定向孔钻进技术与装备[J].煤炭科学技术,2012,40(10):12-16,21.  
YAO Ningping, YAO Yafeng, ZHANG Jie, et al. Technology and equipment of pectination directional drilling in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(10): 12-16, 21.
- [3] 袁亮,王伟,王汉鹏,等.巷道掘进揭煤诱导煤与瓦斯突出模拟试验系统[J].中国矿业大学学报,2020,49(2):205-214.  
YUAN Liang, WANG Wei, WANG Hanpeng, et al. A simulation system for coal and gas outburst induced by coal uncovering in roadway excavation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(2): 205-214.
- [4] Black D J. Review of coal and gas outburst in Australian underground coal mines[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(6): 815-824.
- [5] Karacan C O, Ruiz F A, Cote M, et al. Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(2-3): 121-156.
- [6] 张超林,王奕博,王恩元,等.煤与瓦斯突出煤粉在巷道内运移分布规律试验研究[J].煤田地质与勘探,2022,50(06):11-19.  
ZHANG Chaolin, WANG Yibo, WANG Enyuan, et al. Experimental study on the migration and distribution law of pulverized coal in roadway during coal and gas outburst[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(6): 11-19.
- [7] Flores R M, Wang G Q, Qin D F, et al. Advancing CMM drainage, quality, and utilization with horizontal directional-drilled boreholes in Duanshi Coal Mine, southern Qinshui Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 209: 1-13.
- [8] Gentzis T, Deisman N, Chalaturmyk R J. Effect of drilling fluids on coal permeability: Impact on horizontal wellbore stability[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 78(3): 177-191.
- [9] Hungerford F, Ren T, Aziz N. Evolution and application of in-seam drilling for gas drainage[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(4): 534-544.
- [10] 张杰,王毅,黄寒静.软煤气动螺杆钻具定向钻进技术与装备[J].煤田地质与勘探,2020,48(2):36-41.  
ZHANG Jie, Wang Yi, HUANG Hanjing. Directional drilling technology and equipment of pneumatic screw motor in soft seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(2): 36-41.
- [11] 韩颖,张飞燕,杨志龙.煤层钻孔孔壁稳定性分析[J].中国安全科学学报,2014,24(6):80-85.  
HAN Ying, ZHANG Feiyan, YANG Zhilong. Analysis of stability of coalbed borehole wall[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(6): 80-85.
- [12] 刘建林,刘飞,李泉新,等.碎软煤层瓦斯抽采钻孔孔壁稳定性分析[J].煤矿安全,2018,49(8):189-193.  
LIU Jianlin, LIU Fei, LI Quanxin, et al. Stability analysis of borehole wall for gas drainage boreholes in broken soft coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(8): 189-193.
- [13] 方俊,刘飞,李泉新,等.煤矿井下碎软煤层空气复合定向钻进技术与装备[J].煤炭科学技术,2019,47(2):224-229.



- FANG Jun, LIU Fei, LI Quanxin, et al. Air compound directional technology and equipment for soft-fragmentized seam underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2):224-229.
- [14] 张群,葛春贵,李伟,等.碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采模式[J].煤炭学报,2018,43(1):150-159.
- ZHANG Qun, GE Chungui, LI Wei, et al. A new model and application of coalbed methane high efficiency production from broken soft and low permeable coal seam by roof strata-in horizontal well and staged hydraulic fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1):150-159.
- [15] 聂超,王毅,姚亚峰,等.碎软煤层气动双管定向钻进排粉特性分析及应用[J].煤田地质与勘探,2022,50(0):159-166.
- NIE Chao, WANG Yi, YAO Yafeng, et al. Powder discharge characteristics of pneumatic double pipe directional drilling in broken soft coal seams and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(5):159-166.
- [16] 凌标灿,戴世鑫,曹承平,等.三棱钻杆在中软煤层顺层瓦斯抽排钻孔的应用[J].煤炭科学技术,2009,37(10):44-46,111.
- LING Biaocan, DAI Shixin, CAO Chengping, et al. Application of triangular drilling rod to gas drainage borehole drilling in medium soft seam[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(10):44-46,111.
- [17] 路桂英.井下煤层气抽采钻井松散段随钻注浆护壁关键技术研究[D].武汉:中国地质大学,2014.
- LU Guiying. Study of Grouting while Drilling in loose underground coal bed methane extraction[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.
- [18] 胡艳丽,郝晋高,赵向敏,等.泡沫轻质混凝土性能与孔结构关系研究[J].南京理工大学学报,2019,43(3):363-366.
- HU Yanli, HAO Jingao, ZHAO Xiangmin, et al. Relationship between properties and pore structure of foamed lightweight concrete[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2019, 43(3):363-366.
- [19] 岳文萍,凌伟,刘超.不同发泡剂对抽采钻孔护孔泡沫混凝土性能的影响研究[J].煤矿安全,2020,51(2):25-28,33.
- YUE Wenping, LING Wei, LIU Chao. Study on influence of different foaming agents on properties of foamed concrete for extraction drilling[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(2):25-28,33.
- [20] 许文韬.高瓦斯低透气性煤层瓦斯抽采钻孔群孔优化布置研究[D].合肥:安徽建筑大学,2022.
- XU Wentao. Study on optimal arrangement of gas drainage boreholes in high gas and low permeability coal seams[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2022.
- [21] 顾军,尹会存,高德利,等.泡沫水泥稳定性研究[J].油田化学,2004(4):307-309.
- GU Jun, YIN Huicun, GAO Deli, et al. A study on foamed-admixed oil well cement[J]. Oilfield Chemistry, 2004(4):307-309.
- [22] Li K, Stroeven P, Stroeven M, et al. A numerical investigation into the influence of the interfacial transition zone on the permeability of partially saturated cement paste between aggregate surfaces[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 102:99-108.

(编辑 王文)