

# 改性纳米二氧化硅材料特征及其渗流特性研究

李康<sup>1</sup>,王恩茂<sup>2</sup>,韩飞<sup>1</sup>,高鹏<sup>1</sup>,王刚<sup>2,3</sup>

(1. 国家能源集团新疆能源有限责任公司,新疆乌鲁木齐 830000;

2. 山东科技大学 安全与环境工程学院,山东青岛 266590;

3. 山东科技大学 露天煤矿灾害防治与生态保护全国重点实验室,山东青岛 266590)

**摘要:**煤层注水技术是工作面降尘、除尘和防止瓦斯涌出的重要手段之一,而煤层注水的润湿范围是影响瓦斯抽采的重要因素。为了提高煤层注水的润湿范围进而提高瓦斯抽采效率,利用实验室试验和现场工程验证等技术手段,首先对纳米二氧化硅进行改性,并利用沉降体积、扫描电镜、透射电镜、傅里叶红外光谱等手段对改性材料进行理化特性测试,然后借助三轴渗流实验设备探究改性纳米材料对煤层注水的促进效果,最后在屯宝煤矿进行了现场试验,通过现场煤层注水增效瓦斯抽采试验验证改性纳米二氧化硅流体对瓦斯抽采的增强效果。研究表明:选用二氯二甲基硅烷对纳米二氧化硅进行改性,能够制备出具有稳定分散均匀性质的改性纳米材料;加入纳米改性材料后,溶液更易通过渗透孔隙,渗流时间减少,润湿效果更强。现场应用效果显示,加入改性纳米二氧化硅流体后,使屯宝煤矿W II 02040502综放工作面平均瓦斯抽采量由52.14 m<sup>3</sup>/d提高到59.70 m<sup>3</sup>/d,瓦斯抽采效率提高14.5%,明显提高了瓦斯抽采效率。研究结果可以为煤矿煤层注水增效瓦斯抽采提供新的参考资料。

**关键词:**煤层注水;改性纳米材料;渗流;瓦斯抽采;润湿范围

中图分类号:TD713

文献标志码:A

## Study on characteristics and seepage properties of modified nanosilica materials

LI Kang<sup>1</sup>, WANG Enmao<sup>2</sup>, HAN Fei<sup>1</sup>, GAO Peng<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>2,3</sup>

(1. National Energy Group Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumqi 830000, China;

2. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Ecology Protection in Open-pit Coal Mines, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** Coal seam water injection technology is one of the important means for dust reduction, dust removal and gas outburst prevention at the working face, and the wetting range of coal seam water injection is one of the important factors affecting gas extraction. To improve the wetting range of coal seam water injection and enhance the efficiency of gas extraction, laboratory experiments and field engineering verification techniques were used to modify nano-silicon dioxide, and the detection methods such as sedimentation volume, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, and Fourier transform infrared spectroscopy were used to test the physical and chemical properties of the modified materials. Then, with the help of triaxial seepage experimental equipment, the promoting effect of modified nano-materials on coal seam water injection was explored. Finally, field tests were conducted in Tunbao Coal Mine, and the enhanced effect of nano-modified materials on gas extraction was verified through field coal seam water injection efficiency gas extraction tests. The study shows

收稿日期:2024-11-08

基金项目:国家自然科学基金项目(52174194)

作者简介:李康(1986—),男,新疆乌鲁木齐人,高级工程师,主要从事矿井灾害治理工作。

王恩茂(1994—),男,山东烟台人,博士研究生,主要从事矿井灾害治理工作,本文通信作者。

E-mail:17854257478@163.com

that modifying nano-silicon dioxide with dichlorosilane can produce modified nano-materials with stable dispersion uniformity. After the addition of nano-modified materials, the solution is easier to pass through permeable pores, the seepage time is reduced, and the wetting effect on coal bodies is enhanced. Field application results show that after nano-modified materials were added, the average gas extraction volume of the W II 02040502 fully mechanized top coal caving face in Tunbao Coal Mine increased from 52.14 m<sup>3</sup>/d to 59.70 m<sup>3</sup>/d, and the gas extraction efficiency increased by 14.5%, that significantly improving the efficiency of coal mine gas extraction. The results of this study can provide new references for improving the efficiency of coal mine gas extraction through coal seam water injection.

**Key words:** coal seam water injection; modified nanomaterials; seepage; gas extraction; wetting range

煤层注水通过压裂煤体、驱替瓦斯、置换作用以及改善煤层结构等多种机制,能够有效促进瓦斯抽采,在瓦斯治理领域取得了较好的应用效果,被多数矿井采用<sup>[1]</sup>。但随着煤炭开采深度的增加,煤体孔隙率受到高地应力的作用而降低,造成煤层注水润湿范围减小,降低了煤层注水治理灾害的效果<sup>[2-3]</sup>。

为了提高煤层注水促进瓦斯抽采效果,不少学者从注水方式、煤体力学特性等方面开展了大量研究。在注水方式方面,目前主要有短钻孔注水、长钻孔注水、深钻孔注水和巷道钻孔注水等四种方式<sup>[4]</sup>。注水动力分为动压、静压注水两种方式<sup>[5]</sup>。张文康等<sup>[6-7]</sup>提出了动静压联合注水工艺、“静压+一组多孔”大区域注水方式,现场应用表明能够降低煤体对瓦斯吸附的能力,提高煤层注水增效瓦斯抽采的效果。在煤体力学特性方面,岳基伟等<sup>[8-9]</sup>探究了煤岩体原生孔裂隙、矿物质、强度、硬度和弹性等因素对煤层注水增效瓦斯的影响规律和作用机理<sup>[10-12]</sup>。除此之外,加入表面活性剂和纳米材料改变液体理化特性同样能够增强煤层注水效果。如王刚等<sup>[13-14]</sup>通过对不同离子型表面活性剂的特性进行分析,研发了增效煤层注水的新型表面活性剂;陈绍杰等<sup>[15-17]</sup>研究了表面活性剂对煤层注水润湿和渗流特性的影响规律和作用机理,为现场应用提供了理论依据;Zhang 等<sup>[18-19]</sup>通过实验室和现场试验分析了纳米流体对煤层注水的应用效果,提出以水为介质的纳米流体的减阻机制。

虽然表面活性剂和纳米改性材料在煤层注水过程中展现出一定的增效作用,但也存在一定的局限性。表面活性剂主要是通过降低界面张力、改变岩石表面润湿性来增强煤层注水效果,但由于表面活性剂分子与煤层孔隙壁面之间的相互作用主要依赖较弱的分子间作用力(如范德华力)以及氢键等非共价键连接方式,导致表面活性剂在孔隙壁上形成的吸附层不够稳定,在持续水流冲击下很容易被冲刷掉。纳米颗粒能量不稳定,会相互靠近形成团聚体而降低表面能,导致了纳米颗粒构成的纳米流体处于热力学不稳定状态,如图 1 所示。当直接采用纳米颗粒制备水基溶液进行互斯驱替时会出现颗粒不能均匀分布于溶液中,不仅无法充分发挥其应有的性能,而且会因为堵塞煤层细微孔隙而增加注入压力,降低注水系统的整体运行效率。此外,一旦形成较大的聚集体,还会对设备造成损害,加剧操作难度,提高注水成本。针对表面活性剂和纳米材料存在的上述问题,本研究受参考文献<sup>[20]</sup>启发并借鉴其纳米二氧化硅改性工艺,利用表面活性剂对纳米材料进行复配:首先,使用二氯二甲基硅烷对纳米二氧化硅改性;其次,利用沉降体积测定、扫描电子显微镜观测、透射电镜观测以及傅里叶红外光谱观测等技术手段,分析其分散性、润湿性特征;

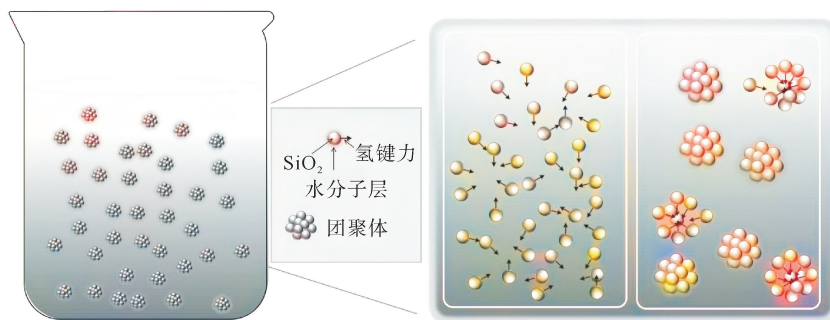


图 1 纳米粒子团聚体形成过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the formation process of nanoparticle aggregates

然后,借助三轴渗流实验装备探究改性纳米二氧化硅对煤层注水渗流过程的影响规律;最后,以屯宝煤矿为背景进行了现场验证。研究结果可为煤层注水表面活性剂的选择提供新参考,从而提高煤矿瓦斯抽采效果。

## 1 纳米材料改性方法与特征分析

### 1.1 改性纳米材料的制备

由于二氯二甲基硅烷硅氯键能与二氧化硅表面羟基反应形成稳定的化学键,可保障溶液长期均匀分散与稳定。甲基赋予其疏水性,有利于在有机介质或浆液中分散,实现表面改性。同时,二氯二甲基硅烷表面氯原子具有较高活性,能够消除纳米二氧化硅上孤立的羟基,且发生化学反应产生的氯化氢气体在一定温度下能够逸散出去,避免引入其他杂质粒子<sup>[20]</sup>。因此,使用二氯二甲基硅烷对纳米二氧化硅进行改性,改性分子式如图 2 所示。具体实验制备方法如下。

1) 分别称取 5 g 纳米二氧化硅颗粒,放入三口烧瓶中并缓慢搅拌,搅拌过程中为减少环境水分影响,利用保鲜膜对烧杯进行包覆,然后放入真空干燥器中,去掉保鲜膜加热至 120 °C。

2) 在 120 °C 的恒温条件下搅拌 50 min 使其完全干燥后,加入无水乙醇,静置 10 min 后缓慢搅拌,配制成质量分数为 4.8% 的纳米颗粒悬浮溶液。

3) 继续搅拌 10 min 后,分别加入质量分数 15% 的改性剂二氯二甲基硅烷和 4% 的去离子水。

4) 升温至 130 °C,保持该温度持续加热并开启冷凝回流装置,使蒸发的溶剂经冷凝器冷却后回流至反应体系内。回流 50 min 后结束反应,得到高浓度的纳米分散液。

5) 使用无水乙醇离心洗涤 2~3 次后,置于恒温箱中 100 °C 恒温烘干,最后进行研磨并密封保存在真空干燥器中。

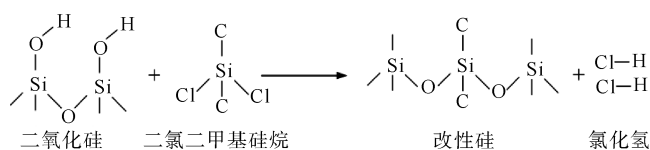


图 2 纳米 SiO<sub>2</sub> 的改性原理

Fig. 2 The nano-SiO<sub>2</sub> modification principle

### 1.2 改性纳米材料颗粒特性测定

为了确定改性后纳米材料的性能优势,分别使用 NDJ-79 黏度仪、SEM3200 扫描电子显微镜、LVEM 5 透射电镜、Nicolet iS10 傅里叶红外光谱仪,对改性后的纳米材料基础性能进行测定。

#### 1.2.1 沉降体积测定

分别配制同等质量改性前和改性后的纳米二氧化硅颗粒乙醇溶液,在 300 r/min 转速下搅拌 10 min;将搅拌好的溶液存放在两只相同刻度的 50 mL 磨口量筒中,在室温下记录不同时刻的改性前、后纳米二氧化硅颗粒乙醇溶液沉降体积数据(以下分别简称改性前溶液、改性后溶液),结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,随着时间的推移,改性前和改性后的纳米二氧化硅颗粒均发生了沉降,但沉降高度明显不同。静置 5 h 时,改性前溶液沉降高度为 0.2 mm,而改性后未发生沉降。静置 30 h 时,改性前溶液沉降高度由 0.2 mm 增长到 1.0 mm,而改性后的溶液才开始出现沉降现象,

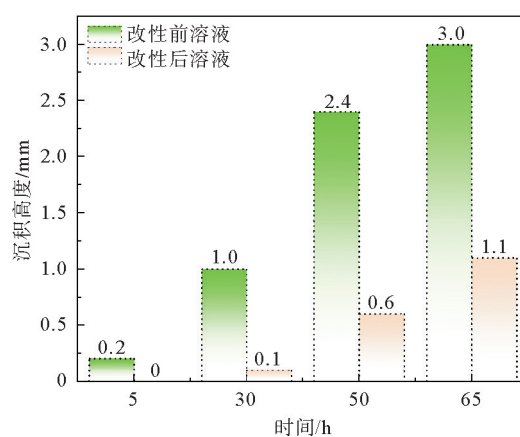


图 3 沉降高度对比图

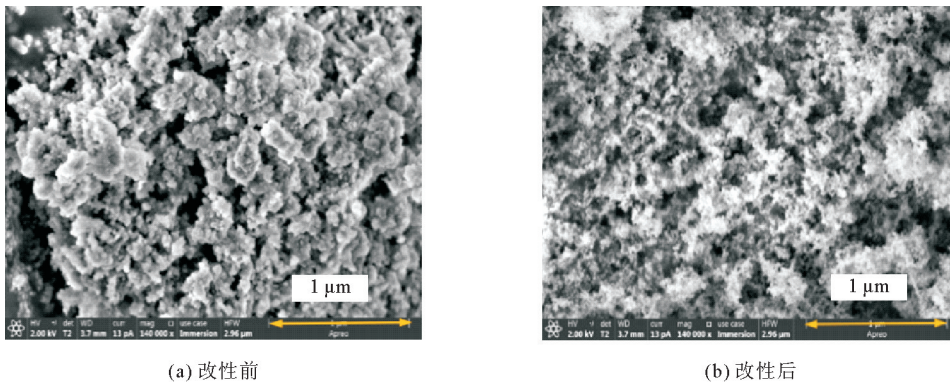
Fig. 3 Comparison of settling height

沉降高度为 0.1 mm。静置 65 h 后,改性前溶液的沉降高度继续增长到 3.0 mm,改性后溶液沉降高度由 0.1 mm 增长到 1.1 mm。在 65 h 时间内,改性后溶液的沉降高度是改性前溶液沉降高度的 0.37 倍,表明改性后的纳米二氧化硅在溶剂中分散较为均匀,不会发生大面积颗粒团聚和黏结。

### 1.2.2 扫描电子显微镜观测

扫描电子显微镜下能直观地看到团聚体的粒径大小,可以对比观察纳米二氧化硅改性前后团聚物的大小和分散情况。

图 4 为纳米二氧化硅改性前后扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)图像。由图 4 可以看出,未改性纳米二氧化硅颗粒呈现出明显的结块现象,而改性后的纳米颗粒虽然仍有一定程序的团聚现象,但较改性前已经不存在大的结块。这表明改性前的纳米二氧化硅颗粒间团聚较严重,而改性后纳米二氧化硅虽然也存在较小的团聚,但这种团聚为软团聚,可以通过有机物清洗法、共沸蒸馏法等化学手段消除<sup>[21]</sup>。说明改性后的二氧化硅粒子具有良好的分散性,可以满足后续试验要求。



(a) 改性前

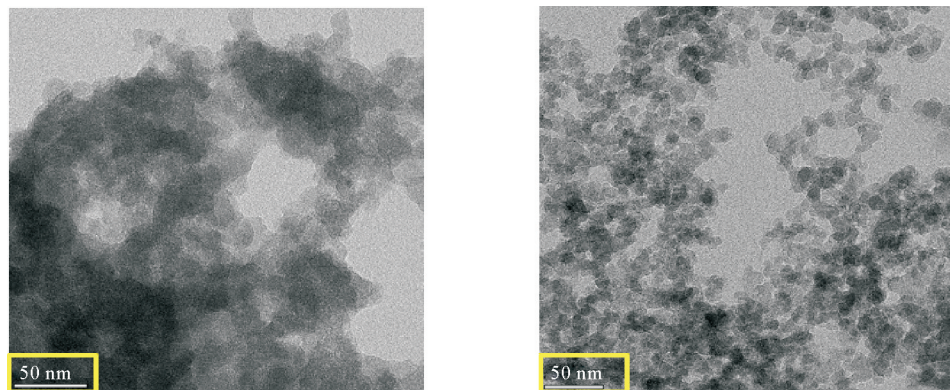
(b) 改性后

图 4 纳米二氧化硅改性前后 SEM 图

Fig. 4 SEM image of nano-silica before and after modification

### 1.2.3 透射电镜观测

为了使实验结果更有说服力,利用透射电镜(transmission electron microscope, TEM)对改性前后纳米二氧化硅团聚作用进行观测。蘸取少量的纳米二氧化硅加入准备好的乙醇溶剂中,用超声分散仪超声分散 30 min,取少量分散均匀溶液滴于微栅上烘干,然后将其放入透射电镜中观察,如图 5 所示。



(a) 改性前

(b) 改性后

图 5 改性前后纳米二氧化硅 TEM 图

Fig. 5 TEM images of nano-silica before and after modification

如图 5(a)所示,未改性纳米二氧化硅因表面能较高,在机械分散后仍呈现显著团聚现象。颗粒间因强黏附力形成致密聚集体,如图中大块深色区域,表明其分散稳定性不足。该现象源于未改性颗粒表面羟基的强极性作用,导致二次团聚难以通过物理手段消除。图 5(b)显示改性后纳米颗粒分散均匀性显著提升,深色团聚区域基本消失。表面能降低与有机基团的空间位阻效应共同抑制了颗粒间黏附,使得软团聚比例增加且易通过后续处理解聚。

#### 1.2.4 傅里叶变换红外光谱观测

通过傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)技术,探究纳米二氧化硅表面经改性处理前后的化学组成变化,并从化学键角度阐释其分散性改善的机理。首先用纯溴化钾粉末压片后测其基准曲线,然后取少量改性前后样品与溴化钾混合压片,放入傅里叶红外光谱仪中对样品进行测定。

结果如图 6 所示,改性后样品在  $470\text{ cm}^{-1}$  处(O—Si—O 键弯曲振动)、 $795\text{ cm}^{-1}$  处(Si—O—Si 对称伸缩振动)及  $1\ 016\text{ cm}^{-1}$  处(Si—O—Si 反对称伸缩振动)的特征峰强度显著增强,表明改性过程中 Si—O 键含量增加。此外, $3\ 450\text{ cm}^{-1}$  处 C—H 对称伸缩振动峰及  $2\ 965\text{ cm}^{-1}$  处新出现的 C—H 非对称伸缩振动峰,证实改性剂中的甲基(—CH<sub>3</sub>)成功接枝至纳米颗粒表面,导致表面羟基部分被取代。上述结果从化学键层面揭示了表面有机化改性的有效性。

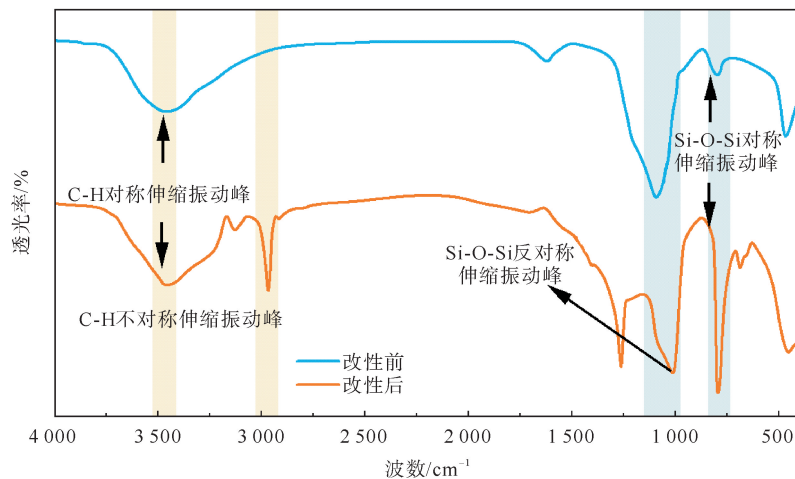


图 6 表面改性前后纳米二氧化硅红外谱图

Fig. 6 Infrared spectra of nano silica before and after surface modification

结合沉降体积、SEM、TEM 和 FTIR 等方法的对比分析可知,未改性样品沉降高度为 3.0 mm,改性后降至 1.1 mm(差值 1.9 mm),宏观上表明分散稳定性显著改善。SEM 和 TEM 分析显示,改性前样品呈硬团聚态(平均尺寸  $0.58\ \mu\text{m}$ ),而改性后转为软团聚(平均尺寸  $0.31\ \mu\text{m}$ ),颗粒分布均匀性提高。FT-IR 分析中羟基振动峰( $\sim 3\ 450\text{ cm}^{-1}$ )强度的减弱与有机官能团特征峰的出现,进一步从化学组成角度验证了表面性质的转变,阐明分散性提升的微观机制。

#### 1.3 纳米流体润湿性表征

接触角是润湿程度的度量,探究流体接触角变化有利于了解流体在煤中的渗流情况。由于原煤表面抛光可能破坏煤的原有结构,而采用煤粉压制的煤饼可增加比表面积,使测量更准确可靠,减少表面粗糙度影响,便于操作和测量,且能提高重复性和可比性<sup>[22]</sup>。

试验用煤样取自屯宝煤矿 W II 02040502 综放工作面。试验时先将煤样研磨成煤粉并用标准筛筛选出 20~40 目(0.850~0.425 mm)的煤颗粒,再使用煤片压力机将其压成煤片,从而进行接触角测试,对比样品流体对煤润湿特性的影响。测试结果如图 7 所示。

接触角测定结果表明,20 ℃条件下,去离子水、改性前纳米二氧化硅流体在煤样上的接触角分别约为 76.9°、43.0°,而改性后纳米二氧化硅流体的接触角为 24.0°,与去离子水相比降低了 52.9°,与改性前纳米二氧化硅流体相比降低了 19°。表明改性后纳米二氧化硅流体对液体表面张力的降低能力更强,使液体能够进入更小的孔裂隙中,扩大煤层注水的润湿范围。

## 2 煤层注水渗流试验

### 2.1 煤样试件和纳米流体制备

1) 煤样试件的制备。试验用煤样工业分析数据如表 1 所示。由于煤体原生孔裂隙复杂多样,采用原生孔裂隙进行试验,渗流通道的不一致会造成试验误差,因此对煤样进行处理,并制作人造裂隙通道。处理流程如图 8 所示,具体为:首先利用取芯机在煤块上钻取  $\Phi 5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  的圆柱形煤样,并沿竖直方向将煤样光滑分割成相同大小的两半,然后将两半煤样贴合,在贴合的边缘处利用防水胶带进行密封成为试件。

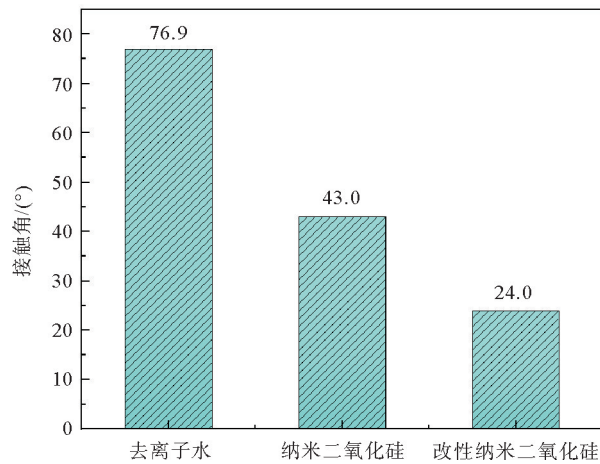


图 7 接触角测定图

Fig. 7 Contact angle determination diagram

表 1 煤样工业分析

Table 1 Industrial analysis of coal sample %

煤样	镜质组	惰质组	壳质组	矿物质
烟煤	63.6	30.3	2.5	3.6

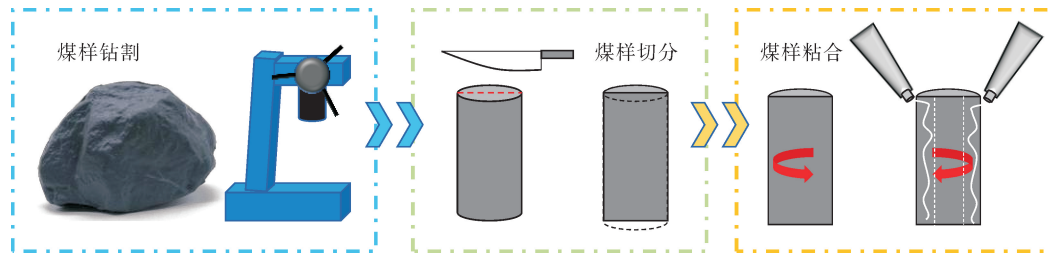


图 8 煤样制作流程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of coal sample production process

2) 纳米流体的制备。分别称取一定量改性前和改性后纳米二氧化硅颗粒放置于两个烧瓶中,以水为溶剂,分别配制成质量分数为 4.8%的改性前和改性后纳米二氧化硅流体。

### 2.2 试验设备及方案

如图 9 所示,为了在试验室模拟煤层注水渗流环境,满足外力条件、三轴压力、注水等条件,选用三轴渗流试验装置进行试验。试验过程中,CO<sub>2</sub> 气瓶释放出的气体通过输气管路进入气压泵中,推动气压泵内部的活塞,活塞挤压前方的液体进入

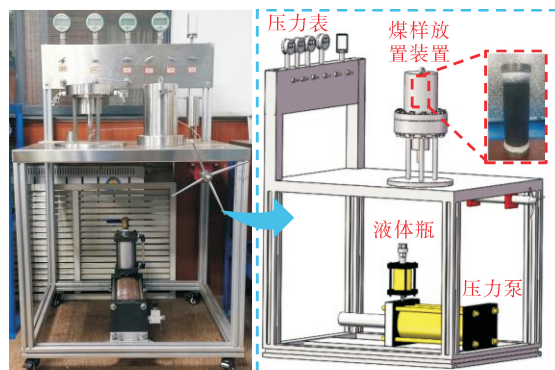


图 9 三轴渗流装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the three-axis seepage device

纳米流体输送管路,最后流入煤样的人造裂隙中,实现煤层注水的渗流。在整个试验过程中,基于三轴渗流装置集成的压力传感器实时反馈数据,同步调节气源流量控制阀开度,确保注水压力梯度与预设试验条件一致。

影响煤层注水的关键参数较多,如注水压力、表面活性剂种类、表面活性剂浓度、裂隙开度、煤体工业化参数以及人造裂隙表面粗糙度等。本研究主要对比改性前、后纳米二氧化硅流体对煤层注水渗流的影响,因此仅对注水压力进行了定量控制。根据屯宝煤矿实际煤层注水的现场参数以及试验设备所允许的参数设定范围,设计试验方案的轴压为 5 MPa、围压 5 MPa,注水压力分别为 4、6、8、10 MPa。

### 2.3 纳米流体渗流效果

对比改性前后纳米二氧化硅流体在不同流体压力条件下渗流 1 mL 液量所需时间,试验结果如图 10 所示。从图 10 可以看出,改性前后纳米二氧化硅流体在煤柱中的渗流规律相同,即随着注入压力由 4 MPa 提高到 10 MPa,改性前纳米二氧化硅流体渗流 1 mL 液量所需时间由 37 s 降低至 12 s,改性后纳米二氧化硅流体渗流 1 mL 液量所需时间由 35 s 降低至 11 s,表现为明显的负相关性。但同压力条件下,改性后纳米二氧化硅流体渗流 1 mL 所需时间比改性前所需时间小,主要原因是加入改性纳米材料后,液体表面张力减小,同时溶液团聚作用降低,通过渗透孔隙时,会润湿煤孔表面,吸附在煤孔表面形成一层滑移膜,使溶液更容易通过煤孔<sup>[23]</sup>,达到润湿煤柱内部的效果。

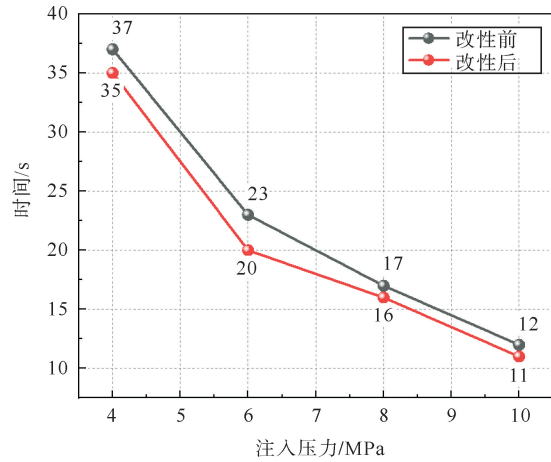


图 10 改性前后纳米流体不同流压下渗流 1 mL 液量所需时间图

Fig. 10 Time required for the permeation of 1 mL liquid volume by nanofluid and modified nanofluid under different flow pressures

## 3 改性纳米材料在瓦斯抽采现场试验

为了考察改性后纳米二氧化硅对现场煤层注水的效果,以屯宝煤矿 W II 02040502 综放工作面为研究背景,进行煤层注水增效瓦斯抽采现场试验。

### 3.1 试验工作面概况

屯宝煤矿 W II 02040502 综放工作面采用走向长壁后退式综合机械化放顶采煤方法,工作面范围内 M<sub>4-5</sub> 煤层平均厚度为 7.9 m,采高为 3.2 m,采放比为 1 : 1.46,采用全部垮落法管理顶板。工作面最大瓦斯含量为 2.86 m<sup>3</sup>/t,最小瓦斯含量 2.09 m<sup>3</sup>/t,平均瓦斯含量为 2.47 m<sup>3</sup>/t,属于高瓦斯矿井。

### 3.2 煤层注水方案设计

煤层注水采用动静压配合的注水方式,利用 3BZ9.5-18-55 煤层注水泵进行注水。注水组件由有引斜、单向阀、封隔器、节流器、压裂管柱、高压胶管组成,如图 11 所示。在施工过程中,首先,按照引斜、单向阀、节流器、封隔器、压裂管柱的顺序依次连接并送入钻孔中;然后,利用高压胶管将压裂管柱与注水泵连接;最后,开启泵组进行注水。为了防止煤体被破坏,注水压力保持在 6 MPa 左右,在注水过程中以质量分数 1.0%~1.5%加入改性后纳米二氧化硅材料。钻孔布置方案如图 12 所示,钻孔参数如表 2 所示。

### 3.3 注水工艺增效瓦斯抽采效果考察

在同一钻场相邻的两个孔分别使用改性前后纳米二氧化硅流体作为煤层注水流体,对比相同时间条件下瓦斯抽采量,结果如图 13 所示。

由图 13 可以看出,当注入改性前纳米二氧化硅流体时,瓦斯最大抽采量达 58.6 m<sup>3</sup>/d,最小抽采量为 47.23 m<sup>3</sup>/d,平均抽采量为 52.14 m<sup>3</sup>/d,26 d 总抽采量为 1 355.64 m<sup>3</sup>;当注入改性后纳米二氧化硅流体后,瓦斯最大抽采量达 67.5 m<sup>3</sup>/d,最小抽采量为 54.7 m<sup>3</sup>/d,平均抽采量为 59.7 m<sup>3</sup>/d,26 d 总抽采量为

1 552.2 m<sup>3</sup>,抽采效率提升了 14.5%。证明了改性后纳米二氧化硅在提高煤层注水的能力上优于改性前纳米二氧化硅,增大了煤层注水润湿范围,从而提高了瓦斯的抽采量。

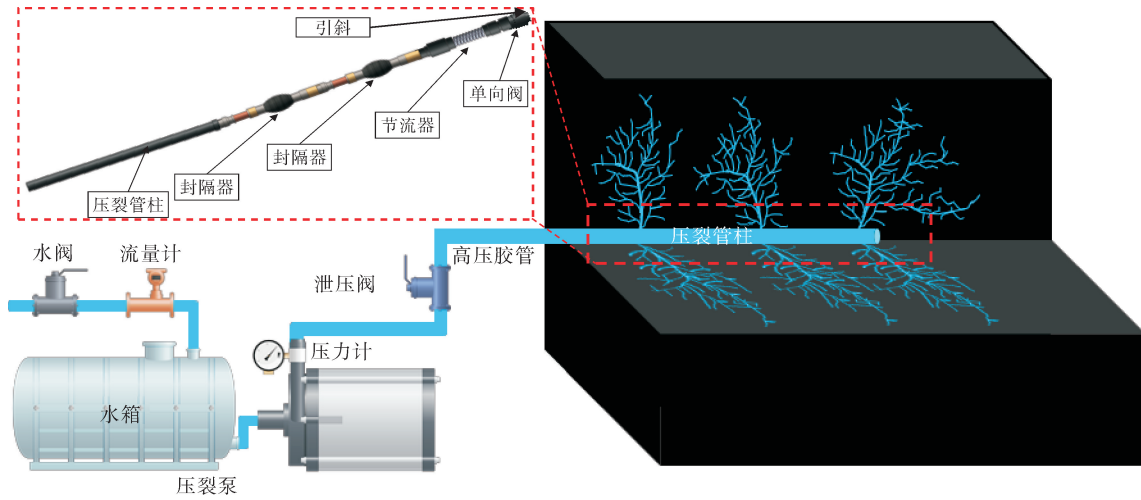


图 11 压裂设备连接示意图

Fig. 11 Connection diagram of fracturing equipment

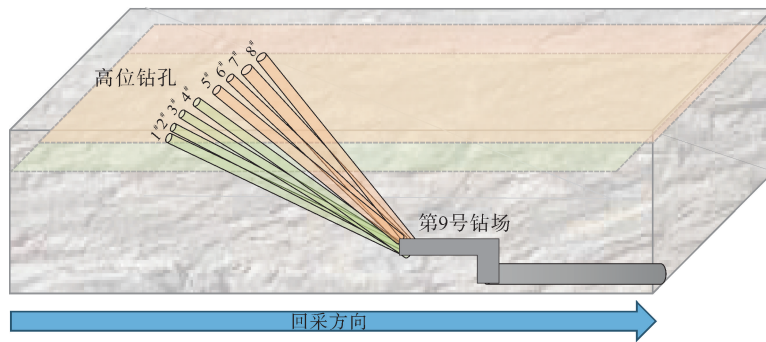


图 12 煤层注水钻孔布置方案图

Fig. 12 Layout plan for coal seam water injection drilling

表 2 煤层注水钻孔参数表

Table 2 Parameters for coal seam water injection drilling

钻孔编号	偏角/(°)	设计仰角/(°)	钻孔长度/m	终孔孔径/mm	开口高度/m	与底板终孔高差/m	封孔长度/m
1	-1	13	128	113	2.0	25	10
2	0	11	126	113	1.5	21	10
3	4	12	126	113	2.0	25	10
4	5	9	126	113	1.5	21	10
5	9	10	126	113	2.0	25	10
6	10	8	126	113	1.5	21	10
7	14	8	127	113	2.0	25	10
8	15	6	127	113	1.5	21	10

为了进一步分析纳米二氧化硅改性前后对煤层注水范围的影响,对两个孔的瓦斯抽采流速进行比较,如图 14 所示。从图 14 可以看出,瓦斯的抽采速率演化规律基本一致,但加入改性后纳米二氧化硅流体后,瓦斯抽采流速比改性前纳米二氧化硅流体的高。进一步表明加入改性后纳米材料能够有效增大煤层

注水范围,提高瓦斯的抽采效率。

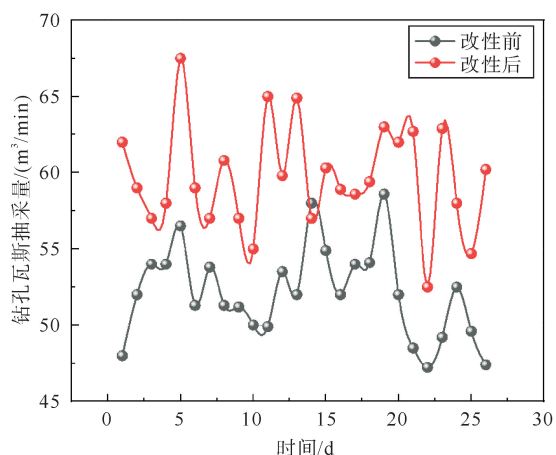


图 13 加入改性前后纳米材料瓦斯抽采量对比图

Fig. 13 Comparison chart of gas extraction amount before and after the addition of nano-modified materials

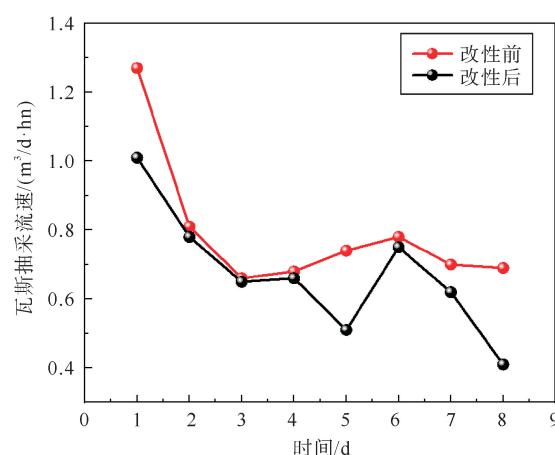


图 14 加入改性前后纳米材料瓦斯抽采流速对比图

Fig. 14 Comparison chart of gas extraction flow rate before and after the addition of nano-modified materials

## 4 结论

1) 选用二氯二甲基硅烷对纳米二氧化硅进行改性,改性后的纳米二氧化硅溶液沉降高度是改性前的 0.37 倍,接触角平均降低了  $19^\circ$ ,表面纳米改性材料分散均匀,能有效降低液体表面张力。

2) 由于改性后纳米二氧化硅溶液团聚作用减小,通过渗透孔隙时会湿化煤孔表面,吸附在煤孔上形成一层滑移膜,使溶液更容易通过煤孔,加快了煤层注水渗流速度。

3) 屯宝煤矿 W II 02040502 综放工作面现场使用改性后纳米二氧化硅流体后,提高了瓦斯抽采量和抽采效率,使瓦斯平均抽采量由  $52.14 \text{ m}^3/\text{d}$  升高到  $59.7 \text{ m}^3/\text{d}$ ,抽采效率提高 14.5%。

## 参考文献:

- [1] 刘会强,张福伟.煤层注水在矿井深部开采灾害防治中的应用[J].中州煤炭,2012,34(1):87-90.  
LIU Huiqiang,ZHANG Fuwei. Application of coal seam water infusion in deep mining disaster prevention[J]. Zhongzhou Coal,2012,34(1):87-90.
- [2] 岳基伟,韩奇峻,梁跃辉,等.含瓦斯煤与水之间接触动态演化特性及微观机制[J].煤炭学报,2025,50(4):2146-2156.  
YUE Jiwei,HAN Qijun,LIANG Yuehui,et al. Dynamic evolution characteristics and microscopic mechanisms of contact between gas-bearing coal and water[J]. Journal of China Coal Society,2025,50(4):2146-2156.
- [3] 王忠伟,冉庆雷,刘军.复合煤层综放工作面瓦斯涌出分析及精准瓦斯治理技术[J].能源与环保,2024,46(7):8-14.  
WANG Zhongwei,RAN Qinglei,LIU Jun. Analysis of gas emission and accurate gas control technology in composite coal seam fully-mechanized caving face[J]. China Energy and Environmental Protection,2024,46(7):8-14.
- [4] 秦文龙,张志强,侯宝东,等.纳米技术在提高原油采收率方面的应用新进展[J].断块油气田,2013,20(1):10-13.  
QIN Wenlong,ZHANG Zhiqiang,HOU Baodong,et al. Advance of nanotechnology application in enhancing oil recovery [J]. Fault-Block Oil and Gas Field,2013,20(1):10-13.
- [5] 李小超,李东涛,尚学锋,等.基于高分子改性的煤层注水增透剂研发及性能研究[J].中国矿业,2023,32(12):177-183.  
LI Xiaochao,LI Dongtao,SHANG Xuefeng,et al. Development and performance study of coal seam water injection permeation enhancer based on polymer modification[J]. China Mining Magazine,2023,32(12):177-183.
- [6] 张文康,丁志权,刘涛,等.瓦斯抽放钻孔动静压煤层注水降尘技术研究[J].煤炭技术,2023,42(3):196-199.  
ZHANG Wenkang,DING Zhiquan,LIU Tao,et al. Study on water injection and dust reduction technology of dynamic and static pressure coal seam in gas drainage borehole[J]. Coal Technology,2023,42(3):196-199.
- [7] 王惠风,陈殿赋.基于一组多孔大区域注水技术的工作面粉尘综合治理[J].煤矿安全,2020,51(11):66-69.  
WANG Hui Feng,CHEN Dianfu. Comprehensive dust management of working face based on a group of porous large area

- water injection technology[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(11): 66-69.
- [8] 岳基伟,王兆丰,董家昕,等. 受载煤自发渗吸过程水分运移规律及其影响机理[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(11): 4069-4082.  
YUE Jiwei, WANG Zhaofeng, DONG Jiixin, et al. Law of water migration during spontaneous imbibition in loaded coal and its influence mechanism[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(11): 4069-4082.
- [9] 魏建平,王洪洋,司磊磊,等. 瓦斯氛围下煤水固液接触特征[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 323-332.  
WEI Jianping, WANG Hongyang, SI Leilei, et al. Characteristics of coal water solid liquid contact in gas atmosphere[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 323-332.
- [10] 房新亮,武国胜,徐云辉,等. 单一低渗透煤层注水促抽瓦斯效果评价及其应用[J]. *煤炭技术*, 2021, 40(7): 87-92.  
FANG Xinlang, WU Guosheng, XU Yunhui, et al. Application and effect evaluation of water infusion in low permeability coal seam to control gas[J]. *Coal Technology*, 2021, 40(7): 87-92.
- [11] 张文康,丁志权,刘涛,等. 瓦斯抽放钻孔动静压煤层注水降尘技术研究[J]. *煤炭技术*, 2023, 42(3): 196-199.  
ZHANG Wenkang, DING Zhiquan, LIU Tao, et al. Study on water injection and dust reduction technology of dynamic and static pressure coal seam in gas drainage borehole[J]. *Coal Technology*, 2023, 42(3): 196-199.
- [12] 王刚,陈昊,陈雪畅,等. 基于CT三维重构煤体变开度裂隙渗流特性研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(1): 59-67.  
WANG Gang, CHEN Hao, CHEN Xuechang, et al. Study on seepage characteristics of coal fissures with variable apertures based on CT 3D reconstruction[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2024, 53(1): 59-67.
- [13] WANG G, WANG E M, HUANG Q M, et al. Experimental studies on the influence of sodium lauryl sulfate on seepage and wetting of water in fusion of coalbeds[J/OL]. *Fuel*, 2021, 304(C). DOI: 10. 1016/j. fuel. 2021. 121355.
- [14] 胡莹莹,张清涛,许兰娟,等. 矿用润湿型压裂液的制备与性能分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(10): 78-85.  
HU Yingying, ZHANG Qingtao, XU Lanjuan, et al. Preparation and performance analysis of wetting fracturing fluid for coal mine[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2022, 18(10): 78-85.
- [15] 陈绍杰,金龙哲,陈学习,等. 添加表面活性剂注水对煤体解吸瓦斯的影响分析[J]. *矿业安全与环保*, 2013, 40(6): 12-14.  
CHEN Shaohjie, JIN Longzhe, CHEN Xuexi, et al. Analysis on influence of water infusion by adding surfactant upon gas desorption [J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2013, 40(6): 12-14.
- [16] 申家龙,薄福利. 两性离子表面活性剂对煤层注水渗流润湿协同效应的研究[J]. *煤矿安全*, 2024, 55(5): 100-106.  
SHEN Jialong, BO Fuli. Influence of zwitterionic surfactant on wetting effect of coal seam water injection[J]. *Safety in Coal Mines*, 2024, 55(5): 100-106.
- [17] 林海飞,刘宝莉,严敏,等. 非阳离子表面活性剂对煤润湿性能影响的研究[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(5): 123-128.  
LIN Haifei, LIU Baoli, YAN Min, et al. Research influence of non-cationic surfactant on wettability of coal[J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(5): 123-128.
- [18] ZHANG H, RAMAKRISHNAN T S, NIKOLOV A, et al. Enhanced oil recovery driven by nanofilm structural disjoining pressure: Flooding experiments and microvisualization[J]. *Energy and Fuels*, 2016, 30(4): 2771-2779.
- [19] 王新亮. 石油储层微通道纳米颗粒吸附法双重减阻机制研究[D]. 上海: 上海大学, 2013: 59-78.  
WANG Xinliang. The mechanical-chemical drag reduction mechanism with nanoparticles adsorption method in reservoir micro-channels[D]. Shanghai: Shanghai University, 2013: 59-78.
- [20] 王世禄. 纳米二氧化硅的改性及其降压增注性能评价[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016: 38-49.  
WANG Shilu. The modification of silica nanoparticles and their pressure-decreasing ability evaluation[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016: 38-49.
- [21] BAGWE R P, HILLIARD L R, TAN W. Surface modification of silica nanoparticles to reduce aggregation and nonspecific binding[J]. *Langmuir*, 2006, 22(9): 4357-4362.
- [22] CHENG G, TONG B, TANG Z, et al. Surface functionalization of coal powder with different coupling agents for potential applications in organic materials[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 313(15): 954-960.
- [23] 杨祥,乔智健,苗永哲,等. 微胶囊橡胶改性沥青混合料自修复性能研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(5): 68-76.  
YANG Xiang, QIAO Zhijian, MIAO Yongzhe, et al. Self-healing performance of rubber modified asphalt mixtures with microcapsules[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2023, 42(5): 68-76.

(责任编辑: 齐敏华)