

# 低蓄热聚氨酯 - 超细水泥注浆材料的制备和性能研究

杜文俊<sup>1</sup>, 张 墨<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛

<sup>2</sup>兖矿能源济二煤矿通防部, 山东 济宁

收稿日期: 2026年2月15日; 录用日期: 2026年3月11日; 发布日期: 2026年3月19日

## 摘 要

针对深部高温矿井裂隙水渗流加剧热害的问题, 本研究旨在开发一种兼具良好可注性、力学强度与隔热功能的新型注浆材料。通过正交试验系统研究了水灰比、聚氨酯掺量和减水剂用量对低蓄热聚氨酯与超细水泥浆液性能的影响。结果表明, 影响材料综合性能的主次因素顺序为: 水灰比 > 聚氨酯掺量 > 减水剂。确定最佳配比方案为水灰比0.25、聚氨酯添加量5 wt%和减水剂添加量0.1 wt%。XRD和SEM分析表明, 相变材料(CPCMs)成功被引入到水泥基体中, 聚氨酯与水反应生成凝胶体与水化硅酸钙(C-S-H)等产物形成互传网络结构, 该结构显著提升了材料的致密性和耐久性。本研究为高温矿井注浆工程提供了一种性能优化的复合材料解决方案。

## 关键词

注浆材料, 超细水泥, 低蓄热聚氨酯, 正交实验, 隔热性能

# Study on the Preparation and Performance of Low Thermal Storage Polyurethane-Ultrafine Cement Grouting Materials

Wenjun Du<sup>1</sup>, Mo Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>Ventilation and Prevention Department, Jining No. 2 Coal Mine, Yanzhou Mining Group, Jining Shandong

Received: February 15, 2026; accepted: March 11, 2026; published: March 19, 2026

## Abstract

To address the intensified thermal hazard caused by fissure water seepage in deep high-temperature mines, this study aims to develop a novel grouting material that integrates excellent injectability, mechanical strength, and thermal insulation properties. Through orthogonal experiments, the effects of water-cement ratio, polyurethane content, and water-reducing agent dosage on the performance of a low-heat-accumulation polyurethane and ultrafine cement slurry were systematically investigated. The results indicate that the order of significance of factors affecting the overall performance of the material is: water-cement ratio > polyurethane content > water-reducing agent. The optimal mix proportion was determined as follows: water-cement ratio of 0.25, polyurethane content of 5 wt%, and water-reducing agent dosage of 0.1 wt%. XRD and SEM analyses demonstrate that the phase change materials (PCMs) were successfully incorporated into the cement matrix. The reaction between polyurethane and water produced gel-like substances, which formed an interpenetrating network structure with hydration products such as calcium silicate hydrate (C-S-H), significantly enhancing the material's compactness and durability. This research provides a composite material solution with optimized performance for grouting engineering in high-temperature mining environments.

## Keywords

Grouting Materials, Ultrafine Cement, Low Thermal Storage Polyurethane, Orthogonal Experiment, Thermal Insulation Performance

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在矿井深部, 高温裂隙水会渗入矿井加剧热害, 目前解决这个问题最有效的手段是注浆[1][2]。然而在深层的高地应力条件下, 传统水泥基浆液难以注浆, 且在温度应力作用下水泥可能会发生开裂, 导致二次渗水的发生。因此, 研发适用于高温巷道注浆的新型封堵、隔热材料研发愈加紧迫。

超细水泥因其颗粒粒径小、比表面积大, 在相同水灰比下表现出比普通水泥更低的析水率、更好的稳定性以及更高的结石体强度, 其可注性比一般的水泥浆要高得多[3][4]。Chen 等[5]研究表明, 在普通水泥中掺入 10%~20%超细水泥可明显改善浆液流动性与力学性能。近年来, 超细水泥与外加剂的协同改性成为研究重点, 郭颜凤等[6]发现聚羧酸减水剂与碱激发剂复掺时, 超细水泥浆液的流动度提升 25%, 析水率降至 2.1%。国外学者 Markou 等[7]对不同粒径(10  $\mu\text{m}$ 、20  $\mu\text{m}$ 、100  $\mu\text{m}$ )超细水泥的注浆效果进行对比, 发现 10  $\mu\text{m}$  级超细水泥对渗透系数  $10^{-4}$  cm/s 的细砂层注浆填充率达 92%, 远高于普通水泥的 65%。此外, 超细水泥基浆液的长期性能研究受到关注。徐星华等[8]通过干湿循环试验发现, 超细水泥-膨润土复合浆液的质量损失率仅为 3.2%, 而普通水泥浆液达 8.7%, 表明超细水泥基材料具有更优的耐久性。但超细水泥浆液仍存在易团聚、抗冲刷能力不足等缺陷, 需通过与有机材料复合进一步优化[9]。

聚氨酯是一种以发泡材料、弹性体材料、涂料、胶粘剂、防水产品等为主体的一种多功能合成树脂, 近年来逐渐将其用于水泥基材料的改性[10]。聚氨酯浆液具有粘度低、注浆性能好、凝胶时间可调等优点, 注浆设备简单, 是目前国际上发展最迅速的新型化学注浆材料[11][12]。聚氨酯与水泥复合注浆材料结合

了无机材料的高强度与有机材料的高韧性, 已成为研究热点。Zheng 等[13]采用水性聚氨酯改性水泥基复合材料, 28 天粘结强度达到 13 MPa, 抗拉强度 6 MPa, 界面结合性能优异。Fan 等[14]将球磨水泥与水性聚氨酯复合, 研制出具有良好抗压性能的复合材料。然而, 现有复合注浆材料多侧重于力学性能与抗渗性能优化, 针对高温矿井环境的隔热控温功能设计不足, 且对于各组分分配比对材料综合性能的影响机制尚需深入研究[15] [16]。

尽管注浆材料研究已取得一定进展, 但针对高温矿井应用仍存在以下问题: ① 传统水泥基材料可注性差、抗高温水冲刷能力弱, 有机材料力学强度不足、反应放热明显; ② 现有复合材料未充分考虑隔热控温功能, 难以从源头阻隔地下热源; ③ 各组分分配比对材料综合性能的影响规律尚不明确, 缺乏系统的优化研究[17] [18]。基于此, 本研究通过正交试验优化低蓄热聚氨酯-超细水泥复合注浆材料配比, 探究其力学性能、可注性与隔热性能, 为高温矿井注浆工程提供技术支撑。

## 2. 材料的制备

### 2.1. 实验材料

#### 2.1.1. 超细水泥

本研究选用的是 K1340 超细硅酸盐水泥, 其化学成分如表 1、表 2 所示。该水泥的物理性质关键参数包括: 比表面积 920 m<sup>2</sup>/kg, 中位粒径 ≤ 6 μm, 最大粒径 ≤ 20 μm, 3 天抗压强度 ≥ 30 MPa, 28 天抗压强度 ≥ 60 MPa, 满足细裂隙注浆要求[19]。

**Table 1.** Chemical composition of ultrafine Portland cement (Unit: %)

**表 1.** 超细硅酸盐水泥化学成分(单位: %)

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	LOI
62.51	21.53	4.08	2.89	3.04	3.31	0.21	0.57	0.3	1.25

#### 2.1.2. 低蓄热聚氨酯

使用气相二氧化硅(FS)和水合盐磷酸氢钠十二水合物(DHPD)制备形状稳定恒定相变材料(CPCMs)。将相变材料(CPCMs)与复合聚乙二醇(RPEG)及多亚甲基多苯基多异氰酸酯(PAPI)按照不同质量比混合, 并在强力搅拌下制备低蓄热相变聚氨酯(CPCMs-RPUF)。

#### 2.1.3. 减水剂

选用 WH-A 型聚羧酸减水剂, 白色粉末状, 无气味、无毒性, 合理掺量范围 0.1%~1.5%, 能够有效改善浆液流动性, 提高水泥颗粒分散性[20]。

### 2.2. 正交试验

#### 2.2.1. 试验因素与水平

为高效研究水灰比(A)、聚氨酯掺量(B)和减水剂用量(C)三个关键因素对复合材料性能的影响并确定最优比, 本研究采用三因素三水平正交实验设计, 详见表 2。依据 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交表安排 9 组实验, 如表 3 所示。

#### 2.2.2. 复合材料的制备

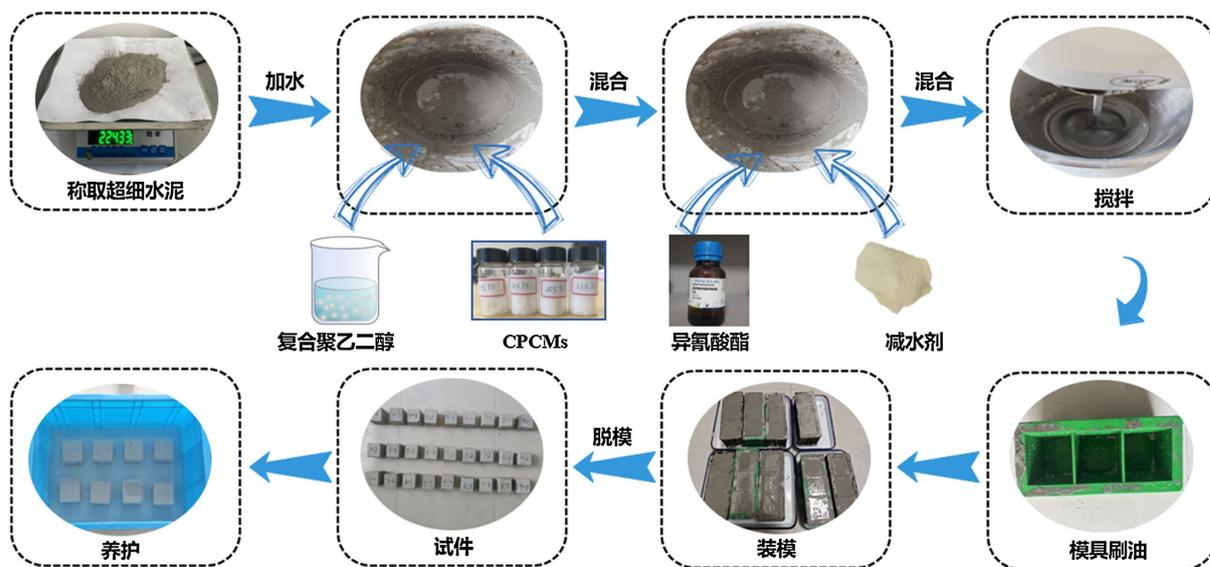
首先预试验以优化方案, 在此基础上按配比称取聚氨酯、水泥和水, 搅拌约 5 分钟至均匀, 控制加水并持续搅拌不超过 5 分钟, 模具涂润滑油后装料, 振动密实, 静置 24 小时脱模, 最后在温度 25℃、湿度 98%条件下养护 28 天。实验流程步骤如下图 1 所示。

**Table 2.** Factor level table (%)  
**表 2.** 因子水平表(%)

水平	因素		
	水灰比 A	聚氨酯掺量(%) B	高效减水剂(%) C
1	0.25	5	0.1
2	0.30	10	0.15
3	0.35	15	0.2

**Table 3.** Orthogonal experimental design based on the different mix proportions  
**表 3.** 基于不同配合比的正交试验设计

试样编号	方案	水灰比 A	聚氨酯掺量(%) B	高效减水剂(%) C
1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	0.25	5	0.1
2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	0.25	10	0.15
3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	0.25	15	0.2
4	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	0.30	5	0.2
5	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	0.30	10	0.1
6	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	0.30	15	0.15
7	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	0.35	5	0.15
8	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	0.35	10	0.2
9	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	0.35	15	0.1



**Figure 1.** Flow chart of test steps  
**图 1.** 试验步骤流程图

### 3. 材料测试结果及分析

#### 3.1. 初终凝时间及浆液流动性能分析

表 4 为低蓄热聚氨酯 - 超细水泥材料不同因素对初终凝时间及流动度试验结果。

对表 5~7 中的初终凝时间及流动度进行极差分析, 通过分析四水平中的最大值和最小值的差值, 评估三因素不同水平变化对初凝和终凝时间的影响以及差异性。

表 5 为初凝时间极差分析表, 可以看出不同因素对复合材料初凝时间的影响程度排序依次为: 水灰比(A) > 聚氨酯掺量(B) > 减水剂(C)。

**Table 4.** Test results of different factors on the initial and final setting time and flow rate

**表 4.** 不同因素下初终凝时间及流动度试验结果

试样编号	方案	水灰比 A	聚氨酯掺量(%) B	减水剂(%) C	初凝时间(min)	终凝时间(min)	流动度(mm)
1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	0.25	5	0.1	133	338	240
2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	0.25	10	0.15	146	354	235
3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	0.25	15	0.2	137	365	230
4	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	0.30	5	0.2	178	355	280
5	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	0.30	10	0.1	165	362	275
6	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	0.30	15	0.15	153	378	270
7	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	0.35	5	0.15	189	365	325
8	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	0.35	10	0.2	175	376	315
9	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	0.35	15	0.1	164	395	310

**Table 5.** Range analysis table of initial setting time under different factors

**表 5.** 不同因素下初凝时间极差分析表

方案	水灰比 A	聚氨酯掺量(%) B	减水剂(%) C
K <sub>1</sub>	416	500	461
K <sub>2</sub>	496	486	488
K <sub>3</sub>	528	454	491
k <sub>1</sub>	138.67	166.67	153.67
k <sub>2</sub>	165.33	162.00	162.67
k <sub>3</sub>	176.00	151.33	163.67
R	37.33	15.34	10.00

**Table 6.** Range analysis table of final setting time under different factors

**表 6.** 不同因素下终凝时间极差分析表

方案	水灰比 A	聚氨酯掺量(%) B	减水剂(%) C
K <sub>1</sub>	1057	1058	1092
K <sub>2</sub>	1095	1092	1104
K <sub>3</sub>	1136	1138	1092
k <sub>1</sub>	352.33	352.67	364.00
k <sub>2</sub>	365.00	364.00	368.00
k <sub>3</sub>	378.67	379.33	364.00
R	26.34	26.66	4.00

表 6 为终凝时间极差分析表, 可以看出不同因素对复合材料终凝时间的影响程度排序依次为: 聚氨酯掺量(B) > 水灰比(A) > 减水剂(C)。

表 7 为流动度极差分析表, 可以看出不同因素对复合材料终凝时间的影响程度排序依次为: 水灰比(A) > 聚氨酯掺量(B) > 减水剂(C)。

Table 7. Range analysis table of flow rate under different factors

表 7. 不同因素下流动度极差分析表

方案	水灰比 A	聚氨酯掺量(%) B	减水剂(%) C
K <sub>1</sub>	705	830	825
K <sub>2</sub>	825	825	840
K <sub>3</sub>	950	825	815
k <sub>1</sub>	235.00	276.67	275.00
k <sub>2</sub>	275.00	275.00	280.00
k <sub>3</sub>	316.67	275.00	271.67
R	81.67	8.33	1.67

综上所述可知, 三因素对初凝时间及流动度的影响程度大小关系为: 水灰比 > 聚氨酯掺量 > 减水剂, 因此从初凝时间及流动度为考察指标最佳配合比为 A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>; 三因素对终凝时间的影响程度大小关系为: 聚氨酯 > 水灰比 > 减水剂, 若单取终凝时间为考察指标最佳配合比为 A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>2</sub>。

### 3.2. 抗压强度分析

图 2 为 28 d 养护龄期的 9 组聚氨酯 - 超细水泥试件抗压强度数据直观图, 其强度范围在 7.6~20.5 MPa。

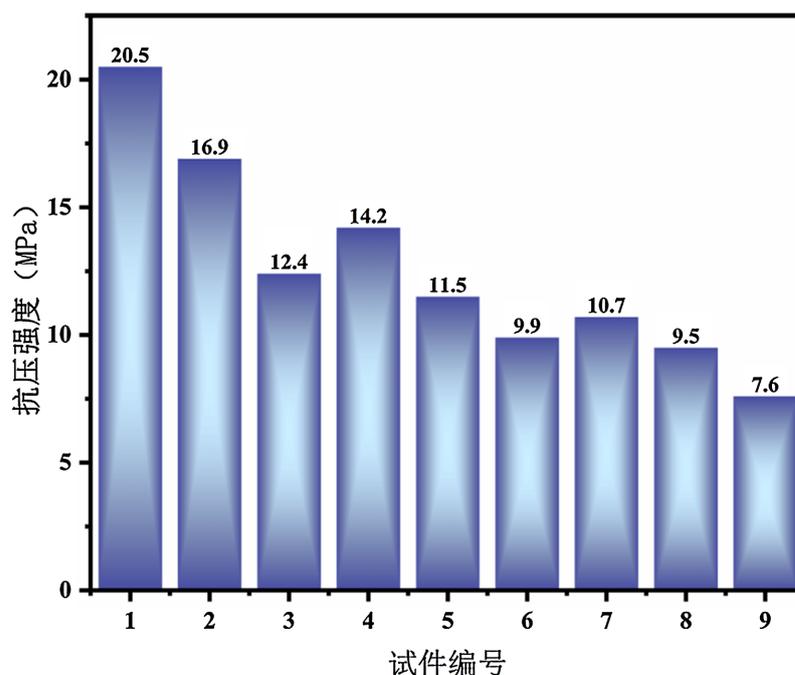


Figure 2. Visual graph of compressive strength data

图 2. 抗压强度数据直观图

表 8 为抗压强度极差分析表, 可以看出不同因素对复合材料抗压强度的影响程度排序依次为: 水灰比(A) > 聚氨酯掺量(B) > 减水剂(C)。

**Table 8.** Range analysis table of compressive strength  
**表 8.** 抗压强度极差分析表

方案	水灰比 A	聚氨酯掺量(%) B	减水剂(%) C
K <sub>1</sub>	49.8	45.4	39.6
K <sub>2</sub>	35.6	37.9	37.5
K <sub>3</sub>	27.8	29.9	36.1
k <sub>1</sub>	16.6	15.13	13.2
k <sub>2</sub>	11.87	12.63	12.5
k <sub>3</sub>	9.27	9.97	12.03
R	7.33	5.16	1.17

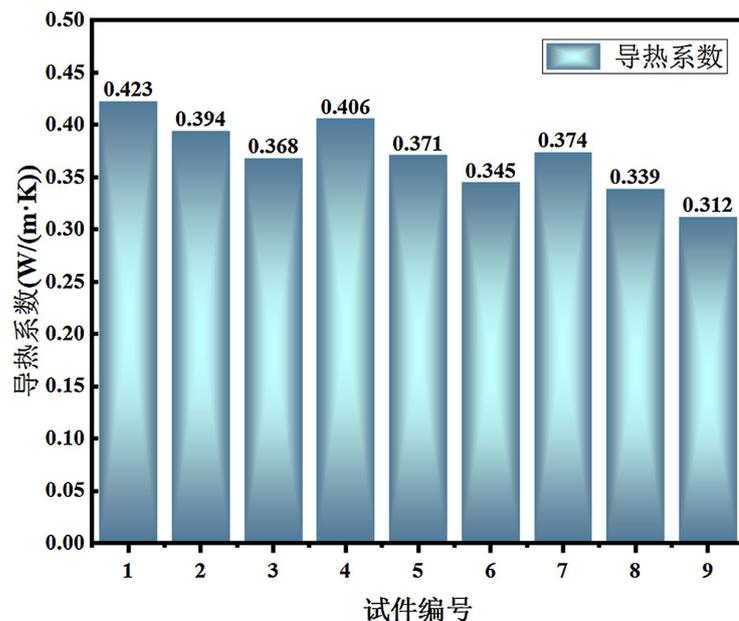
根据试验结果可知: A 因素列的 K<sub>1</sub>, B 因素列的 K<sub>1</sub> 和 C 因素列的 K<sub>1</sub>。因此, 针对力学性能的最佳水平组合为 A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>, 即水灰比为 0.25, 聚氨酯的最佳掺量为 5%, 减水剂的最佳掺量为 0.1%。

### 3.3. 隔热性能分析

图 3 为 28 d 养护龄期的 9 组低蓄热聚氨酯-超细水泥试件导热系数数据直观图, 其导热系数范围在 0.312~0.413 W/(m·K)。

表 9 提供了导热系数极差分析结果, 由表可知, 不同因素对复合材料导热系数的影响程度排序为: 聚氨酯掺量(B) > 水灰比(A) > 减水剂(C)。

根据试验结果可得出: A 因素列的 K<sub>1</sub>, B 因素列的 K<sub>1</sub> 和 C 因素列的 K<sub>1</sub>。因此, 隔热性能的最佳水平组合为 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>, 即水灰比为 0.35, 聚氨酯掺量为 15%, 减水剂为 0.1%。



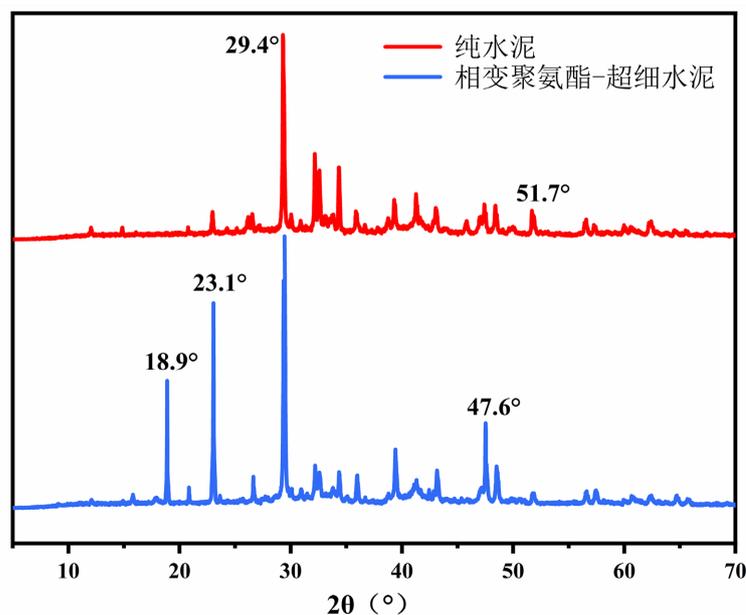
**Figure 3.** Visual diagram of thermal conductivity coefficient data  
**图 3.** 导热系数数据直观图

**Table 9.** Range analysis table of thermal conductivity coefficient**表 9.** 导热系数极差分析表

方案	水灰比 A	聚氨酯掺量(%) B	减水剂(%) C
K <sub>1</sub>	1.187	1.204	1.108
K <sub>2</sub>	1.122	1.105	1.113
K <sub>3</sub>	1.026	1.026	1.113
k <sub>1</sub>	0.395	0.401	0.369
k <sub>2</sub>	0.374	0.368	0.370
k <sub>3</sub>	0.342	0.342	0.371
R	0.0536	0.0594	0.0016

### 3.4. XRD 分析

图 4 展示了超细水泥与聚氨酯-超细水泥复合注浆材料的 XRD 曲线对比。从该对比图中可以观察到, 聚氨酯-超细水泥复合注浆材料中出现了三个新的衍射峰, 分别位于  $2\theta = 18.9^\circ$ 、 $23.1^\circ$  和  $47.6^\circ$ 。在  $2\theta = 23.1^\circ$  处的新衍射峰, 对应于 CPCMs 的特征峰, 证明相变材料已成功引入水泥基体。在  $2\theta = 18.9^\circ$  处出现的衍射峰则与聚氨酯的结晶结构有关, 表明聚氨酯在复合体系中形成了有序相, 这可能对其增韧及界面结合产生积极作用。

**Figure 4.** XRD plots of pure cement and low thermal storage polyurethane-ultrafine cement**图 4.** 纯水泥和低蓄热聚氨酯-超细水泥的 XRD 图

### 3.5. SEM 分析

复合注浆材料的 SEM 图像如图 5 所示, 材料中聚氨酯以薄膜状或颗粒形态填充于水泥基体孔隙中, 与水泥基体结合良好, 界面处无明显缝隙, 无定形凝胶状 C-S-H 通常呈絮状或片层状, 是水泥基体的主要强度来源。聚氨酯与 C-S-H 形成互穿网络结构, 界面结合强度较高。图 5(b)中可以看到呈不规则状的

孔隙结构, 这可能是由于水泥水化不完全导致的收缩孔隙, 或者是聚氨酯发泡过程中引入的气体, 在一定程度上会降低材料的抗压强度。图 5(e)和图 5(f)可以看到出现针状或棒状晶体的 AFT, 通常在水化早期形成, AFT 的生成表明水泥中铝酸盐相(如  $C_3A$ )与硫酸盐发生了反应。

结合导热系数测试结果(图 3)进一步分析发现, 试样的导热系数随聚氨酯掺量的增加而显著降低, 这与其微观结构密切相关。当聚氨酯掺量较低时(如试样 1), 水泥水化产物较为密实, 孔隙较少, 导热系数相对较高( $0.423 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )。随着聚氨酯掺量增大(如试样 9), 材料内部形成了更多的有机凝胶网络和封闭微孔(图 5(e)、图 5(f))。聚氨酯本身导热系数较低, 其连续分布有效阻断了水泥基体中的热传导路径; 同时, 微孔结构能够散射和阻隔热流, 进一步降低复合材料的整体导热系数。例如, 试样 9 ( $A_3B_3C_1$ )的导热系数最低( $0.312 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ), 其 SEM 图像中可见明显的多孔结构和聚氨酯富集区, 这些特征共同构成了高效的隔热屏障。此外, 聚氨酯与水反应生成的凝胶体与 C-S-H 形成的互穿网络结构, 不仅提升了材料的致密性和耐久性, 也通过引入低导热有机相和封闭气孔, 显著改善了隔热性能。

聚氨酯水泥浆的共混体系中, 聚氨酯的聚合反应和水泥的水化反应同时进行, 聚氨酯与水反应生成凝胶体, 凝胶体穿插在水泥水化产物中, 与水泥水化产物形成一个整体, 这种整体结构对液体和气体的渗透具有很强的抵抗力, 因此, 可以相应地大大改善水泥的耐久性能。

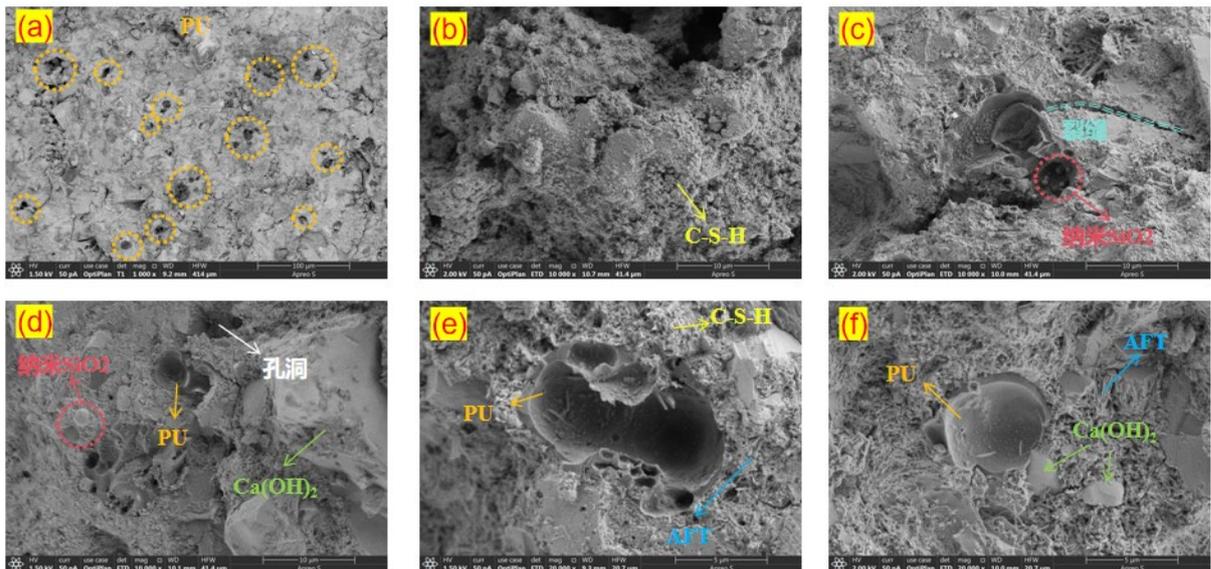


Figure 5. Microscopic morphology of specimen

图 5. 试件微观形貌图

### 3.6. 最佳配合比的确定

正交实验的测试结果如表 10 所示。可以明显看出, 在调整不同材料的比例时, 不同性能之间存在潜在的冲突。增加某一组分的用量可能会提高某项性能, 但同时可能会对另一项性能产生不利影响。为了平衡这些相互矛盾的影响因素, 我们对主要性能指标进行了详细的分析。基于此, 推荐低蓄热聚氨酯-超细水泥复合注浆材料的最佳配比为石灰比 0.25、聚氨酯添加量 5 wt%和减水剂添加量 0.1 wt%, 即配合比  $A_1B_1C_1$ 。

## 4. 结语

本研究将低蓄热聚氨酯与超细水泥浆液有效结合, 制备出一种低蓄热聚氨酯-超细水泥复合材料,

Table 10. Performance test results of orthogonal experiments

表 10. 正交实验的性能测试结果

试样编号	方案	初凝时间 (min)	终凝时间 (min)	流动度(mm)	表观密度 (kg/m <sup>3</sup> )	抗压强度 (MPa)	导热系数 (W/(m·k))
1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	133	338	240	1528	20.5	0.423
2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	146	354	235	1412	16.9	0.394
3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	137	365	230	1202	12.4	0.368
4	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	178	355	280	1446	14.2	0.406
5	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	165	362	275	1338	11.5	0.371
6	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	153	378	270	1128	9.9	0.345
7	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	189	365	325	1358	10.7	0.374
8	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	175	376	315	1239	9.5	0.339
9	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	164	395	310	1065	7.6	0.312
最佳配合比		A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>

并通过系统实验得出的主要结论如下:

1) 通过正交试验与极差分析, 明确水灰比、聚氨酯掺量和减水剂用量对复合材料各项性能的影响规律。水灰比是影响材料流动度与抗压强度的最关键因素; 聚氨酯掺量是决定材料隔热性能(低导热系数)的最主要因素, 并对终凝时间有显著影响; 减水剂的影响相对次要。

2) 微观测试表明, 复合相变材料(CPCMs)被成功引入水泥基体。聚氨酯与水反应生成的凝胶体与水泥水化产物(如 C-S-H)形成了致密的互穿网络结构, 这是该复合材料具备优异耐久性与抗渗性的微观机理基础。

综合考虑工作性能、力学强度及隔热功能, 确定了适用于高温矿井注浆工程的最优配比为: 水灰比 0.25, 聚氨酯添加量 5 wt%, 减水剂添加量 1 wt%。该材料为治理深部矿井高温水害热害耦合问题提供了一种新的功能性注浆材料选择。

## 参考文献

- [1] 李畅. 注浆参数与富水裂隙围岩隧洞应力场-渗流场的关系研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [2] 张章一. 软弱介质充填裂隙的注浆加固机理研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2015.
- [3] 刘光程. 富水砂卵石地层超细水泥注浆模型试验与工程应用研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2016, 18(4): 8-25+76.
- [4] 周茗如, 彭新新, 苏波涛. 普通水泥与超细水泥注浆性能分析及其黄土注浆效果对比研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1673-1678.
- [5] Chen, J.J. and Kwan, A.K.H. (2012) Superfine Cement for Improving Packing Density, Rheology and Strength of Cement Paste. *Cement and Concrete Composites*, **34**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.006>
- [6] 郭颜凤, 黄智勇, 张赵丽. 碱激发剂用量对碱激发矿渣水泥浆体耐久性的影响[J]. 混凝土, 2022(9): 126-124+131.
- [7] Markou, I.N. and Droudakis, A.I. (2013) Factors Affecting Engineering Properties of Microfine Cement Grouted Sands. *Geotechnical and Geological Engineering*, **31**, 1041-1058. <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9631-9>
- [8] 徐星华, 杨嘉怡, 杨韶昆. 超细水泥材料注浆加固深部极软厚煤层回采巷道试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 329-337.
- [9] 李秋义. 聚氨酯改性水泥基材料研究进展[J]. 聚氨酯工业, 2024, 39(1): 13-17.
- [10] 李雅迪. 高性能亲水性聚氨酯注浆材料的制备及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.

- [11] 张猛. 发泡型高聚物混凝土的路用性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [12] Wang, Z., Du, M., Fang, H., Zhang, C., Li, M. and Shi, M. (2021) Influence of Different Corrosion Environments on Mechanical Properties of a Roadbed Rehabilitation Polyurethane Grouting Material under Uniaxial Compression. *Construction and Building Materials*, **301**, Article 124092. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124092>
- [13] Zheng, H., Pang, B., Jin, Z., Liu, S., Zhang, Y., Bi, J., *et al.* (2024) Mechanical Properties and Microstructure of Waterborne Polyurethane-Modified Cement Composites as Concrete Repair Mortar. *Journal of Building Engineering*, **84**, Article ID: 108394. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108394>
- [14] Fan, G., Xiang, W., Yang, J., Yang, S. and Xiang, C. (2023) Study on Capillary Water Absorption of Waterborne-Polyurethane-Modified Recycled Coarse Aggregate Concrete. *Polymers*, **15**, Article 3860. <https://doi.org/10.3390/polym15193860>
- [15] 康正斌, 李小强, 巩越. 强渗透涌水地层注浆新材料的配制与工程特性研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(12): 19-23.
- [16] 余春涛, 韩伟伟, 徐玮. 隧道衬砌施工缝注浆材料适用性试验研究[J]. 新型建筑材料, 2023, 50(9): 9-15.
- [17] 吴若冰. 改性聚氨酯水泥复合材料的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [18] 程桦, 曹如康, 刘向阳. 新型注浆材料力学特性及微观特征试验研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2022, 42(2): 44-51.
- [19] 郭东明, 李妍妍, 左志昊. 低黏度超细水泥浆液配比试验研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(5): 72-77.
- [20] 陈铁海. 聚羧酸高性能减水剂的研究现状与发展趋势[J]. 工程建设与设计, 2020(12): 192-193.