

水泥 - 粉煤灰注浆材料配比试验研究

张浩宇, 白富文*, 陈本康, 张金龙, 杨光

宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2025年3月20日; 录用日期: 2025年4月15日; 发布日期: 2025年4月28日

摘要

根据目前国内地下采空区注浆施工现状分析, 高掺量粉煤灰注浆材料应用较为广泛, 但其配比要求没有相关的规程、规范作为参考, 因此, 有必要通过室内试验了解大掺量粉煤灰与水泥混合浆液材料的指标性能, 确定粉煤灰的掺量、浆液的水灰比、固结体的抗压强度等指标。本研究设计了水泥 - 粉煤灰浆液配比试验, 开展了水泥 - 粉煤灰浆液粘度、析水率、凝结时间、抗压强度等指标测试, 基于指标测试结果, 结合相关注浆条件分析, 最终确定了采空区水泥 - 粉煤灰注浆浆液的最优配比方案: 固体料中水泥含量占比20%~30%, 粉煤灰占比为70%~80%, 比重为1.30。该研究成果可为类似地质条件下采空区注浆浆液的配比选择提供重要的参考依据。

关键词

采空区, 粉煤灰 - 水泥浆液, 浆液配比, 配比优化

Experimental Study on the Ratio of Cement-Fly Ash Grouting Material

Haoyu Zhang, Fuwen Bai*, Benkang Chen, Jinlong Zhang, Guang Yang

School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

Received: Mar. 20th, 2025; accepted: Apr. 15th, 2025; published: Apr. 28th, 2025

Abstract

According to the analysis of the current situation of grouting construction in underground goaf in China, high-volume fly ash grouting materials are widely used, but there are no relevant regulations and specifications for reference in its ratio requirements. Therefore, it is necessary to understand the index performance of cement-fly ash slurry materials with high-volume fly ash through laboratory tests. Determine the amount of fly ash, the water-cement ratio of the slurry, the compressive strength of the

*通讯作者。

consolidated body and other indicators. In this study, the cement-fly ash slurry ratio test was designed, and the cement-fly ash slurry viscosity, water separation rate, setting time, compressive strength and other indicators were tested. Based on the index test results, combined with the analysis of relevant grouting conditions, the optimal ratio scheme of grouting slurry in goaf was finally determined: the cement content in the solid material accounts for 20%~30%, the fly ash accounts for 70%~80%, and the proportion is 1.30. The research results can provide an important reference for the selection of grouting slurry ratio in goaf under similar geological conditions.

Keywords

Goaf, Fly Ash-Cement Slurry, Grout Mix, Ratio Optimization

Copyright © 2025 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

近距离煤层下位煤层开采后形成再生顶板板[1][2]。再生顶板破碎、稳定性较差,工作面采动时端面冒顶严重,常采用注浆手段对其进行预处理。使用单液水泥浆灌注,灌浆效果虽好,但工程造价较高,若仅使用粉煤灰或黏土进行灌注,其可灌性较差,强度不够,施工质量难以保证。粉煤灰中 SiO_2 、 Al_2O_3 和 f-CaO (游离氧化钙)是活性的有利成分,将粉煤灰作为水泥的混合材料,利用二者之间的水化反应,能形成具有一定强度、水稳定性及整体性的硬化体,可达到改善破碎采空区岩体物理力学性能的目的,既经济、又有效[3][4]。

根据目前国内外的施工情况,高掺量粉煤灰的注浆材料应用较广,但没有相关的规程、规范可循,因此,有必要通过室内试验了解大掺量粉煤灰的水泥-粉煤灰浆液材料的物理力学性能,确定粉煤灰的掺量、浆液的水灰比、固结体的抗压强度等技术指标,对采空区处理工程具有重要的意义[5]。

2. 试验方法

2.1. 试验材料

本实验需要实验材料及仪器为:粉煤灰、普通硅酸盐水泥(P.O 42.5)、电子天平、马氏漏斗、维卡仪、浆液模具(50 mm × 100 mm)、若干烧杯与量筒。

2.2. 试验方案

将浆液比重范围拓展为 1.25~1.45,间隔 0.05 作为一个配比(1.25, 1.30, 1.35, 1.40, 1.45)。考虑到浆液本身的性能及注浆成本,对固体料的配比按粉煤灰含量分为 5 个系列: 50%、60%、70%、80%、90%。首先确定固体料总量为 200 g,在固体料配比不变的情况下,通过改变水的加量配制不同比重的粉煤灰-水泥浆。

3. 结果分析

3.1. 水泥-粉煤灰浆液粘度测试结果

流动度和粘度是注浆材料的重要性能指标,直接关系到注浆施工难易程度。注浆材料必须具有良好的流动性,才能保证浆液的可注性,如果粘度过大,会导致浆液流动困难,不能很好地充满空洞和裂隙,

影响注浆充填效果。注浆材料的粘度是用漏斗式泥浆粘度计测定的, 单位为 s [6]。浆液粘度的测试主要使用马氏漏斗粘度计及旋转粘度计, 本次测试采用前者。根据测试结果, 绘制了粉煤灰含量与浆液粘度关系曲线图(图 1)、浆液比重与粘度关系曲线图(图 2)。

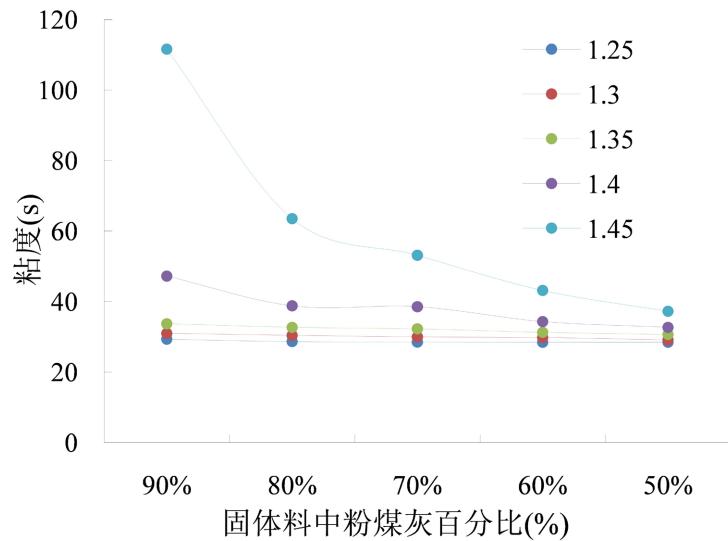


Figure 1. Relationship curve between fly ash content and slurry viscosity
图 1. 粉煤灰含量与浆液粘度关系曲线图

从图 1 给出的不同配比的粉煤灰 - 水泥浆液粘度曲线可得, 水固比相同时, 随着粉煤灰掺量的减少, 粘度也随之减少, 流动度增大。粉煤灰掺量低于 60% 时, 三种水固比下的浆液粘度缓步上升, 当粉煤灰掺量高于 70% 时, 比重为 1.45 时浆液粘度急剧增加。与之相比, 比重为 1.35 与 1.3 时浆液粘度增幅较小。

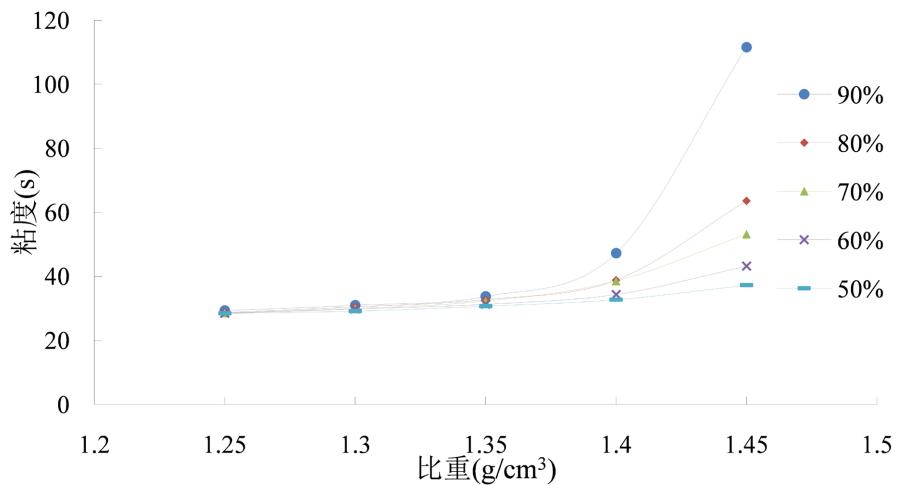


Figure 2. relation curve between slurry specific gravity and viscosity
图 2. 浆液比重与粘度关系曲线图

由图 2 可知, 粘度会随着比重的增加而增加, 流动度减少。比重从 1.4 升高到 1.45, 粉煤灰在固体占百分比为 90% 时, 浆液粘度极速增加, 对浆液粘度影响较大, 能明显改善浆液的可注性。而比重从 1.25 升高至 1.3, 浆液粘度增加缓慢对浆液粘度影响较小, 仍能提高浆液的流动性。

3.2. 水泥 - 粉煤灰浆液析水率测试结果

浆液的析水率是指浆液在静止状态下，浆液颗粒受重力的作用自然沉降，从而析出水的比例。一般情况下，浆液在两个小时内就可以完全析水。析水率是反映浆液稳定性和充填裂隙饱满程度的指标。浆液比重与析水率关系曲线图如图 3 所示。

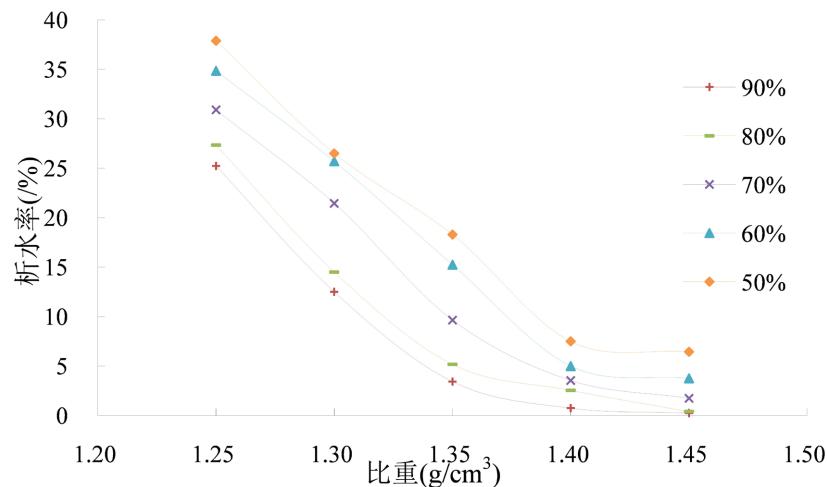


Figure 3. Relation curve between slurry specific gravity and water precipitation rate
图 3. 浆液比重与析水率关系曲线图

由图 3 可知，当浆液中粉煤灰含量一定时，浆液析水率随着浆液比重的增加而减小；当浆液比重一定时，浆液的析水率随着粉煤灰含量的增加而减小，分析可知，当粉煤灰加入到水泥中混合使用时，由于粉煤灰的颗粒级配较好，能够发挥其微集料效应，细小的粉煤灰颗粒能够有效填充于较大的水泥颗粒之间的空隙之中，从而使得整个浆液体系具有较好的稳定性，能够减少浆液在注浆过程中出现的离析和沉降的可能，而粉煤灰具有比水泥较小的比重，能够阻止大颗粒的沉降作用[7][8]。从试验结果看，当粉煤灰含量在 80%~90%，且比重在 1.3~1.45 之间，浆液的析水率均小于 20%，可以满足注浆工程的需求。

3.3. 水泥 - 粉煤灰浆液凝结时间测试结果

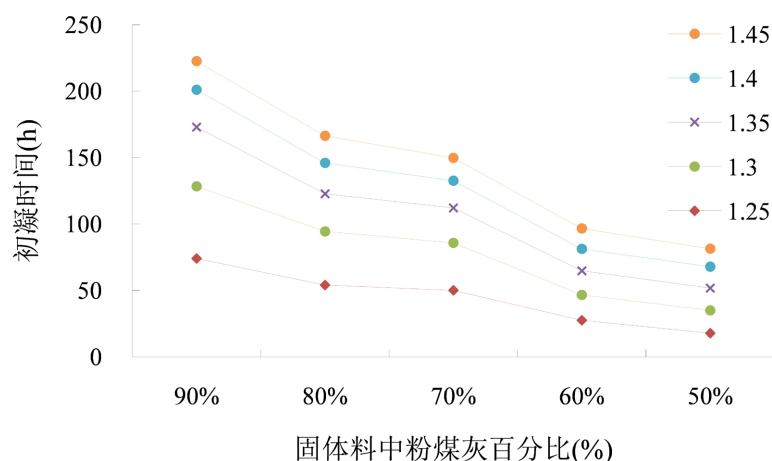


Figure 4. Relationship curve between fly ash content and initial setting test time of slurry
图 4. 粉煤灰含量与浆液初凝测试时间关系曲线

凝结时间是指水泥水化反应所需的时间，分为初凝时间和终凝时间。水泥 - 粉煤灰浆的配制顺序是先按配比加入粉煤灰和水，充分混合后加入水泥，粉煤灰含量与浆液初凝、终凝时间关系如图 4，图 5 所示。

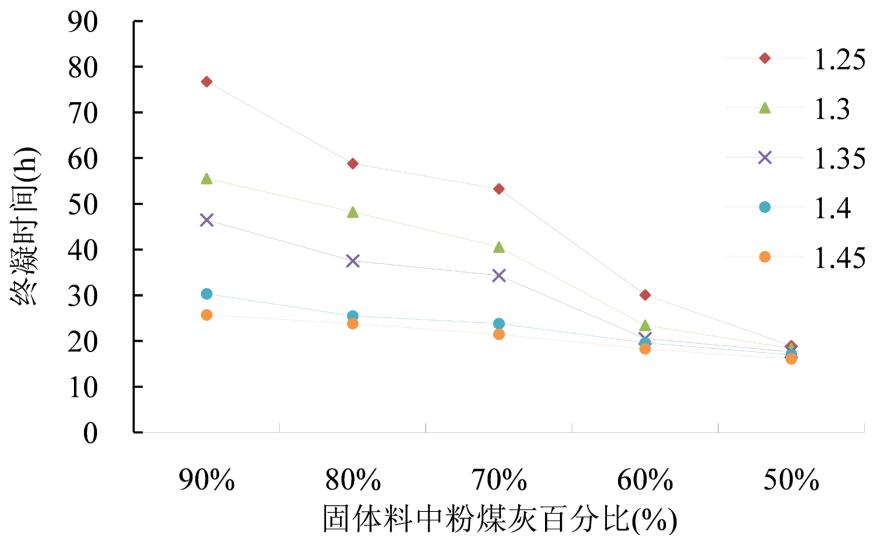


Figure 5. Relationship curve between percentage of fly ash and final setting test time
图 5. 粉煤灰百分比与终凝测试时间关系曲线

从图 4，图 5 中可以看出，浆液的凝结时间随着粉煤灰含量的增加而增加，随着粉煤灰含量的减小，浆液固结体的强度逐渐增大，反映出浆液的初、终凝时间逐渐缩短，说明浆液中水泥含量是影响浆液凝结的重要因素。此外，影响浆液凝结时间的因素不仅仅是水泥的含量，还受到温度、湿度和浆液配比的影响[9] [10]。

注浆浆液要求尽快硬化成具有一定强度的硬化体，同时浆液的凝结时间又要满足注浆作业时间的要求，凝结时间过快，浆液尚未充满采动空隙及裂隙，影响注浆效果，凝结时间较慢影响结石体硬化，耽误施工进度。采空区注浆施工，工程经验是初凝时间不小于 12 h，终凝时间不大于 36 h，满足采空区注浆作业时间需求[11] [12]。从试验知，当水泥 - 粉煤灰浆液比重在 1.30~1.45，粉煤灰掺量为 70%~80% 时，浆液初凝时间均大于 12 h，终凝时间在 36 h 左右，而其他配比浆液凝结时间或偏长或偏短。

3.4. 水泥 - 粉煤灰浆液抗压强度测试结果

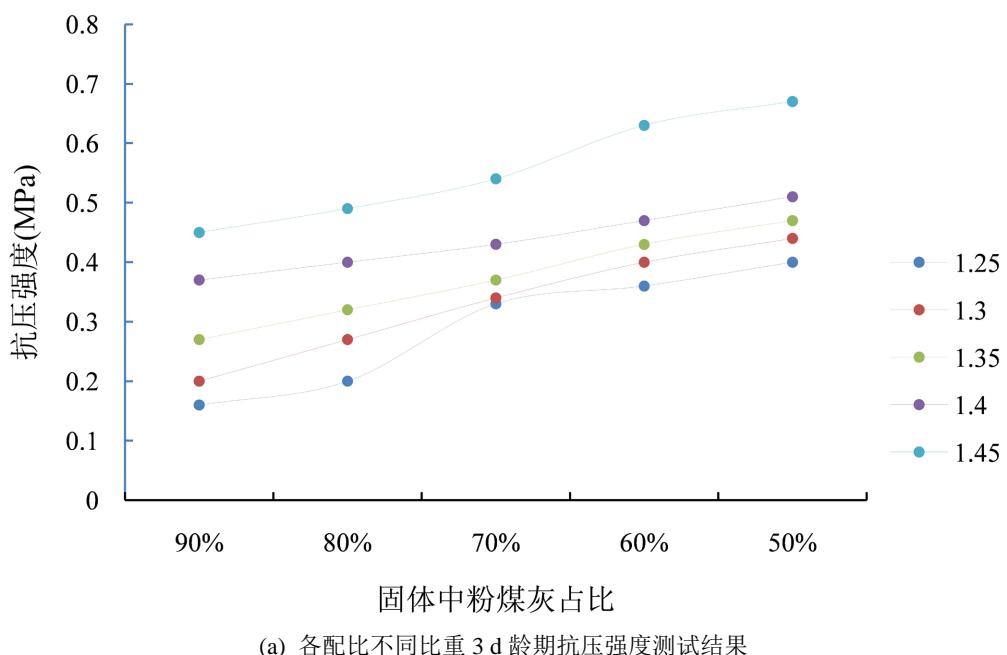
浆液形成结石体的抗压强度直接反映了被加固的破碎围岩的承载能力大小，常用做衡量注浆质量好坏的重要依据，不同配比各比重不同龄期抗压强度测试结果如图 6 所示。

当固相质量比相同、比重不同时，随比重减小，硬化体抗压强度降低。当固相质量比不同、比重相同时，随粉煤灰掺量(粉煤灰占固相质量分数)的增加，硬化体抗压强度降低。比重相同、固相质量比相同时，随龄期增长，硬化体抗压强度增大。浆材早期强度较低，但后期强度增长较大，硬化体 28 d 抗压强度与 7 d 抗压强度相比，增长率一般在 50% 以上，这主要与硬化体强度形成机理有关，早期以水泥硬化过程为主，后期以火山灰反应为主。其中后者将随时间的延长而缓慢地进行，硬化体后期强度也就相应增长[13] [14]。

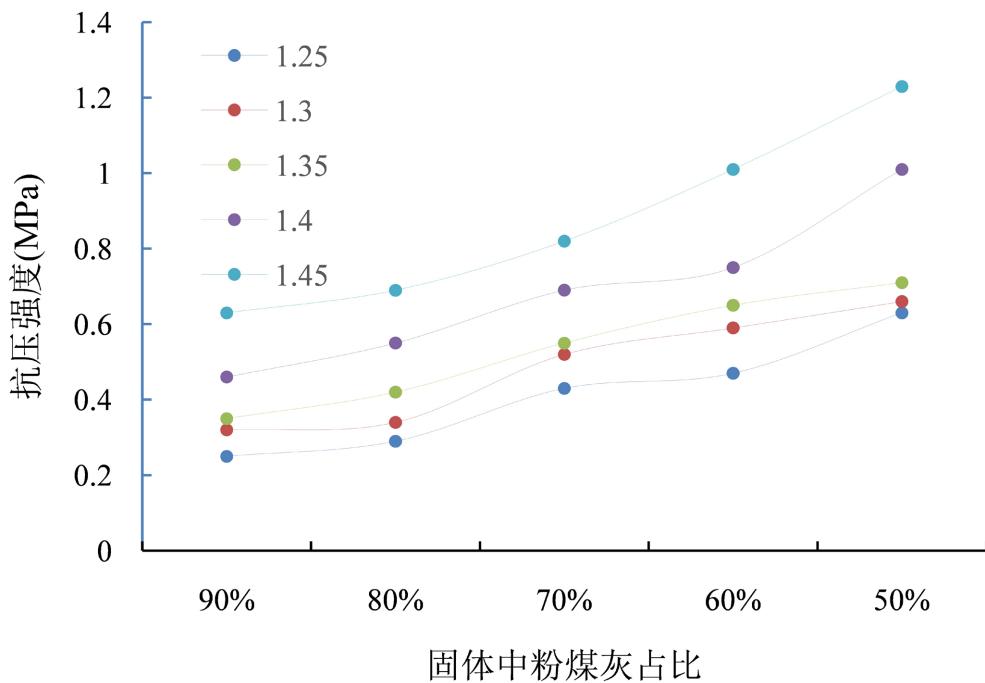
由图 6(a) 可知，浆液硬化体早期强度较低，粉煤灰占比 70%，比重 1.45 的浆液固结试件抗压强度值最大，为 0.65 MPa；粉煤灰占比 50%，比重 1.25 的浆液固结试件抗压强度值最小，为 0.18 MPa，该试件由于水泥含量较小，在固结后出现龟裂，较为破碎，试件强度较低[15]。

由图 6(b)可知, 水泥-粉煤灰浆液各配比不同比重 7 d 龄期抗压强度值有所提升, 但变化幅度不大, 试验各配比硬化体 7 d 抗压强度均低于 1.5 MPa, 特别是粉煤灰掺量大于 60% 时, 其 7 d 抗压强度一般低于 1.3 MPa。

由图 6(c)可知, 固结体 28 d 的抗压强度值较 7 d 增长明显, 抗压强度最大值为 5.57 MPa, 固体料中水泥含量占比在 20%~60%, 比重 $\geq 1.30 \text{ g/cm}^3$ 时, 抗压强度值一般大于 1 MPa, 能满足采空区注浆的要求[12]。



(a) 各配比不同比重 3 d 龄期抗压强度测试结果



(b) 各配比不同比重 7 d 龄期抗压强度测试结果

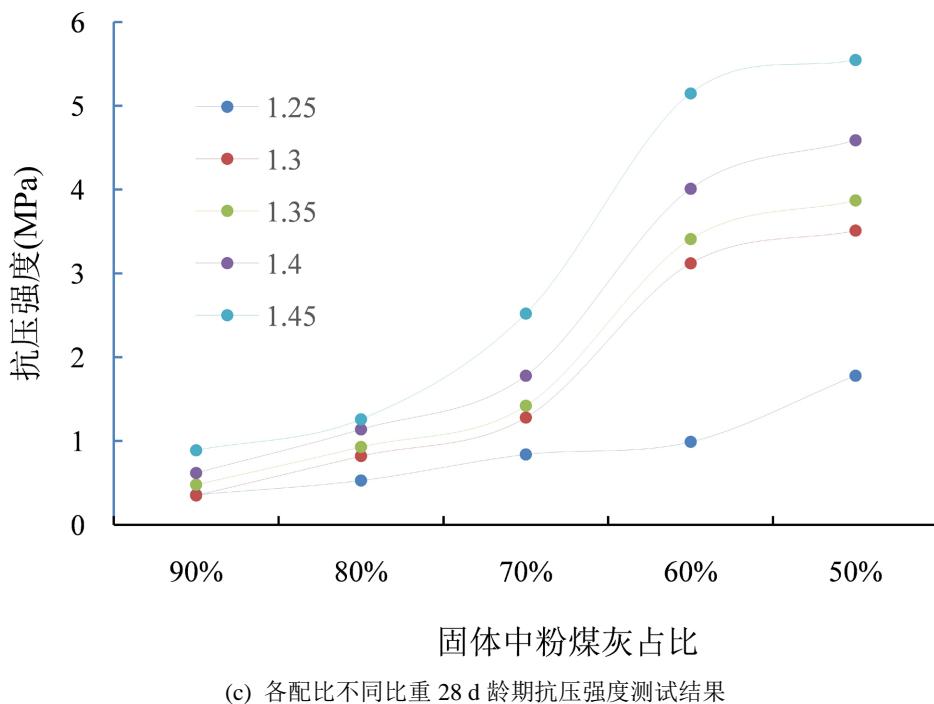


Figure 6. compressive strength test results of different proportions and different ages
图 6. 不同配比各比重不同龄期抗压强度测试结果

3.5. 最优配比分析

由前文的分析可知, 浆液的各个指标都有其较优的配比区间, 如表 1 所示。

Table 1. Statistical table of optimal ratio range of each index
表 1. 各指标最优配比范围统计表

指标	粘度(s)	结石率(%)	凝结时间(h)	28 d 抗压强度(MPa)
采空区注浆要求	25~35	≥ 80	初、终凝时间: 12~36	≥ 1
符合要求的配比范围	5%~60%	5%~30%	20%~30%	20%~60%
符合要求的比重范围	1.25~1.30	≥ 1.30	1.30~1.45	≥ 1.30

由表 1 所列各指标较优配比区间并结合前文各指标最优配比区间和最优比重范围分析, 符合采空区注浆要求的浆液, 其粉煤灰含量为 70%~80%, 最优比重交集为 1.30。

综上所述, 选取的注浆浆液最优配比范围为固体料中粉煤灰含量占比 70%~80%, 水泥含量占比为 20%~30%, 浆液比重为 1.30。

4. 结论

本文通过水泥 - 粉煤灰浆液配比试验研究, 测试了浆液的粘度、析水率、结石率、抗压强度等关键指标, 结合采空区注浆浆液要求, 得出了采空区注浆浆液的最优配比, 具体研究结论如下:

- (1) 随着水泥 - 粉煤灰浆液中粉煤灰含量的增加, 浆液粘度逐渐增大, 流动性逐渐增强。
- (2) 当水泥 - 粉煤灰浆液比重小于 1.35 时, 其析水率随着比重的增加快速减小, 比重超过 1.35 后, 析水率减幅较小。

- (3) 水泥 - 粉煤灰浆液凝结时间受水泥含量的影响较大, 水泥含量越高, 浆液初凝、终凝时间越短。
- (4) 水泥 - 粉煤灰浆液 28 d 的结石体强度较 7 d 相比, 增长率一般在 50% 以上, 主要受后期火山灰反应影响, 致使强度增加。
- (5) 通过各指标分析, 最终得出水泥 - 粉煤灰浆液最优配比为: 粉煤灰含量占比 70%~80%, 浆液为 1.30。可为类似地质条件下采空区注浆浆液的配比选择提供参考。

基金项目

宿州学院省级大学生创新创业训练计划项目资助(水泥 - 粉煤灰浆液材料配比试验研究及性能数据库构建, 项目号: S202410379168); 2024 年宿州学院大学生创新创业训练计划项目资助(ZCXM24-258); 矿井水资源化利用安徽普通高校重点实验室(宿州学院)开放基金资助项目资助(KMWRU202403)。

参考文献

- [1] 杨科, 池小楼, 刘钦节, 刘文杰, 刘帅. 大倾角煤层综采工作面再生顶板与支架失稳机理[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3045-3053.
- [2] 刘伟. 分岔煤层下分层顶板结构特征及其稳定性评价[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
- [3] 张桂芳, 鲁海峰, 年宾, 姚多喜, 张曼曼, 李超. 垮落带直覆下采煤地面注浆加固顶板钻探技术研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(6): 66-71.
- [4] 张开诚, 张超, 王德全, 李杨, 宋洪涛. 高掺量粉煤灰注浆材料在采空区治理中的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(2): 39-46.
- [5] 文仲泽. 基于水泥和粉煤灰改良固化路基土的力学性能研究[J]. 西部交通科技, 2024(11): 11-14.
- [6] 罗世和. 粉煤灰掺量超 30% 的水泥混凝土路用性能研究[J]. 江西建材, 2024(3): 25-27, 30.
- [7] 范颖芳, 李鑫杰, 陈昊, 李秋超. 粉煤灰水泥砂浆早期断裂性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(2): 110-117.
- [8] 谢焱. 不同粉煤灰掺量的水泥浆体的特性研究[J]. 价值工程, 2024, 43(28): 106-108.
- [9] 郭永红, 李鹏飞, 孙强, 刘俊平. 不同配比水泥-粉煤灰浆液结石体物理力学特性演化[J]. 西安科技大学学报, 2024, 44(5): 846-856.
- [10] 霍利杰, 马冰, 高晓耕. 粉煤灰水泥充填注浆材料性能研究[J]. 建井技术, 2008, 29(6): 21-22, 17.
- [11] 周盛全, 陈伟, 李剑伟, 李栋伟. 低钙粉煤灰-水泥浆液可注性试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(5): 1554-1563.
- [12] 童立元, 潘石, 邱钰, 等. 大掺量粉煤灰注浆充填材料试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(4): 643-647.
- [13] 张焱, 张耀耀. 某细骨料粉煤灰基充填注浆试件力学特性研究[J]. 现代矿业, 2024, 40(3): 196-199.
- [14] 王建华. 水泥-粉煤灰砂浆抗压强度预测方法研究[J]. 安徽建筑, 2024, 31(11): 114-116.
- [15] 孟祥瑞, 刘源涛, 陈兵, 王立艳. 粉煤灰在磷酸镁水泥体系中的作用机制研究[J]. 材料导报, 2024, 38(17): 29-35.