



引文格式: 杨小勇, 王众, 孙强, 等. 基于波速响应的裂隙岩体粉煤灰注浆效果分析[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 258–266. DOI: 10.12401/j.nwg.2025014

Citation: YANG Xiaoyong, WANG Zhong, SUN Qiang, et al. Analysis of Fly Ash Grouting Effect in Fractured Rock Mass Based on Wave Velocity Response[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 258–266. DOI: 10.12401/j.nwg.2025014

基于波速响应的裂隙岩体粉煤灰注浆效果分析

杨小勇^{1,2}, 王众¹, 孙强^{2,*}, 袁士豪², 王少飞³

(1. 国家能源集团煤焦化有限责任公司, 内蒙古 乌海 016000; 2. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054;
3. 陕西理工大学土木工程与建筑学院, 陕西 汉中 723001)

摘要: 煤炭资源开发过程中产生的粉煤灰严重占用土地并污染环境, 将其回收利用对保护生态环境与提高社会经济效益意义重大。为研究粉煤灰注浆材料与碱激发剂掺量对裂隙岩体注浆效果的影响, 制备了不同掺量粉煤灰 (0%、10%、20%、30%) 与硅酸钠 (0%、1%、2%、3%) 的水泥浆液, 将其注入含有不同角度预制裂缝岩体的贯通裂隙中, 待其凝固结实养护后, 对结石体进行波速测试。结果表明: 硅酸钠含量小于 1% 时, 波速随裂缝倾角的增大稍有增加, 但并不显著, 随粉煤灰的增加无明显变化, 说明硅酸钠含量较少无法与粉煤灰完全反应; 硅酸钠含量为 2%, 波速随硅酸钠的增大存在明显的下降段, 说明此时粉煤灰与硅酸钠充分反应通过缩聚过程形成地质聚合物, 这些聚合物填充了颗粒之间的空隙, 降低孔隙的连通性, 使得浆体内部微裂纹减少, 结构致密, 波速显著减低; 硅酸钠含量为 3% 时出现过碱, 过量的硅酸钠会形成无机泡沫, 阻碍反应过程, 导致地质聚合物形成量减少, 颗粒之间空隙增多, 孔隙度增大, 进而引起波速增大。研究结果为粉煤灰综合利用提供一定的借鉴与参考。

关键词: 煤炭资源开发; 粉煤灰再利用; 碱激发剂; 预制裂缝; 纵波波速

中图分类号: P642; TU528

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)03-0258-09

Analysis of Fly Ash Grouting Effect in Fractured Rock Mass Based on Wave Velocity Response

YANG Xiaoyong^{1,2}, WANG Zhong¹, SUN Qiang^{2,*}, YUAN Shihao², WANG Shaofei³

(1. National Energy Group Coal Coking Co., Ltd., Wuhai 016000, Inner Mongolia, China; 2. School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China)

Abstract: Fly ash generated during the development of coal resources seriously occupies land and pollutes the environment, and its recycling is of great significance to the protection of the ecological environment and the improvement of social and economic benefits. In order to study the influence of fly ash grouting material and alkali activator content on grouting effect of fractured rock mass, cement grout with different contents of fly ash (0%, 10%, 20%, 30%) and sodium silicate (0%, 1%, 2%, 3%) was prepared and injected into through cracks of rock mass with prefabricated cracks at different angles. The wave velocity of the junction entity is tested. The re-

收稿日期: 2024-09-05; 修回日期: 2025-01-04; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家自然科学基金“富油煤原位热解煤-岩结构协同演化及岩层封闭性响应机制(42402187)”资助。

作者简介: 杨小勇(1998-), 男, 工程师, 本科, 从事矿井安全方面研究工作。E-mail: 642210113@qq.com。

* 通讯作者: 孙强(1981-), 男, 教授, 博士生导师, 从事煤矿工程地质与地质灾害防治研究。E-mail: sunqiang04@cumt.edu.cn。

sults show that when the content of sodium silicate is less than 1%, the wave velocity increases slightly with the increase of crack angle, but it is not significant, and there is no obvious change with the increase of fly ash, indicating that the content of sodium silicate is too small to completely react with fly ash. When the content of sodium silicate is 2%, the wave velocity decreases significantly with the increase of sodium silicate, indicating that fly ash and sodium silicate fully react to form geopolymers through the polycondensation process. These polymers fill the voids between particles, reduce the connectivity of pores, and result in fewer internal cracks, dense structure, and significantly reduced wave velocity. When sodium silicate content is 3%, excessive sodium silicate will form inorganic foam, hinder the reaction process, resulting in a decrease in the formation of geopolymer, an increase in the space between particles, an increase in porosity, and thus an increase in wave velocity. The research results provide a certain reference for the work of fly ash and sodium silicate in grouting.

Keywords: coal resource development; fly ash reuse; alkali activators; prefabricated cracks; longitudinal wave velocity

煤炭是中国能源安全的兜底保障(王双明等, 2024)。但大规模、高强度煤炭开发利用下会造成地面开裂, 导致土壤含水量降低, 引起生态环境劣化, 影响土地资源利用, 危害土壤和粮食安全, 诱发环境污染、资源浪费等一系列地质灾害问题(刘金平等, 2001; 陈守建等, 2006; 武强等, 2019; 王双明等, 2020, 2023, 2024a)。粉煤灰是煤炭利用过程中的固体废物(靳辛, 2009; 卢国懿, 2011, 王玮健, 2021; 卢海峰等 2024)。近年来粉煤灰产量都在 6 亿 t 以上; 每年有 1 亿 t 以上粉煤灰不能及时利用, 造成了土地和环境污染(中国工业固废网, 2020)。因此, 如何实现粉煤灰的高效资源化利用, 使其变废为宝, 是当前重要的研究议题(赵阳, 2023)。

地质体在开挖、卸荷、降雨等人为和自然因素下, 岩石中的裂隙发生扩展甚至丛集贯通, 引起地质体劣化, 诱发山体崩塌、煤矿和隧道涌突水、路基失稳等地质灾害, 影响工程建设和安全运营(王建圣等, 2023)。注浆技术作为加固岩石提高稳定性的重要手段, 在岩体加固和阻渗中得到广泛应用(马荷雯, 2021; 夏曾银等, 2022)。在掺入粉煤灰后, 可以改善水泥浆液结石体的力学性能, 有利于减少水泥用量, 降低成本(宋华等, 2009; 张俊儒等, 2018; 蒋建华等, 2022; 马砺等, 2023; 时雅倩等, 2024)。粉煤灰中富含的铝硅酸盐在碱性环境下极易被激发活性, 形成高聚合度和高强度的硅铝酸盐地质聚合物(童小东等, 2007; 王东星等, 2019; 卞立波等, 2020; 卫春安等, 2020)。庞文

台等(2012)发现, 粉煤灰在碱性条件下能够显著增强水泥的稳定性。肖东旭等(2022)发现, 当粉煤灰掺量为 3% 时, 水泥土抵抗破坏和变形的能力最强; 随着粉煤灰养护龄期的增长, 强度和变形模量显著增大。田海彦等(2023)研究表明, 掺入粉煤灰后, 硫氧镁泡沫水泥性能有显著提高, 且随粉煤灰掺量的变化而变化。因此, 将粉煤灰作为注浆材料加固裂隙岩体, 有利于实现粉煤灰资源利用与灾害防治。

笔者研究了裂隙岩体对不同掺量粉煤灰与不同硅酸钠含量水泥浆液的波速响应特征, 分析了结石体的波速变化信息, 阐明了不同裂隙倾角结石体波速的响应机理。研究结果为评价粉煤灰浆液的注浆效果提供一定的参考。

1 材料及试验方法

1.1 试验材料及设备

本研究使用的超细水泥来自青岛卓能达建筑科技有限公司, 具体参数见表 1。硅酸钠来自嘉善县优瑞耐火材料有限公司, 具体参数见表 2。粉煤灰来自河南铂润铸造材料有限公司, 具体化学成分见表 3。速检测设备为武汉中岩科技有限公司生产的非金属声波检测仪, 型号为 RSM-SY6(C), 增益精度: 0.5 dB; 频带宽度: 1~500 kHz; 声幅准确度: $\leq 3\%$; 接收灵敏度: $\leq 10 \mu\text{V}$; 工作温度: $-20 \sim +55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 超细水泥参数

Tab. 1 Parameters of ultrafine cement

初凝时间(h)	终凝时间(h)	7 d 抗压强度(MPa)	28 d 抗压强度(MPa)	细度(目)	泌水率(%)
7.5	21.5	40.3	53.1	600	0

表 2 硅酸钠参数

Tab. 2 Sodium silicate parameters

波美度(Be)	Na ₂ O(%)	SiO ₂ (%)	模数	S(%)	P(%)	固含量(%)	pH	体密(m ³)
38.5	8.53	26.98	3.3	< 0.03	< 0.03	35.5	10~13	1.35

表 3 粉煤灰参数

Tab. 3 Parameters of fly ash

Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	CaO(%)	Cl ⁻ (%)	碱含量(%)	铁含量(%)	烧失量(%)	密度(g/cm ³)	堆积密度(g/cm ³)
24.2	45.1	2.1	5.6	0.015	1.2	0.85	2.8	2.55	2.55

1.2 试验流程

按不同掺量的粉煤灰(质量分数 0%、10%、20%、30%)、硅酸钠(含量 0%、1%、2%、3%)配制水灰比 0.9 的浆液, 共计 16 组, 使用搅拌机以 500 r/min 的转速搅拌 2 min, 随后将浆液注入岩石贯通节理裂隙中,

共 5 个节理角度, 分别为 0°、15°、30°、45°和 60°, 每组 3 块。将结石体试样以温度 20±2 ℃、相对湿度 RH≥95% 的条件养护 28 d, 得到的试样照片见图 1。之后采用非金属声波检测仪进行纵波测试, 为减小试验误差, 每个样品进行 3 次测定。试验流程见图 2。

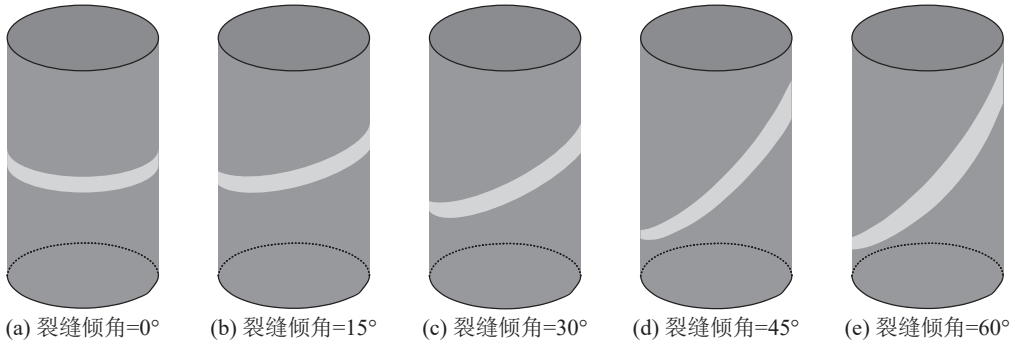


图1 不同角度贯通节理岩体注浆后试样图

Fig. 1 Sample of rock mass with joint grouting at different angles

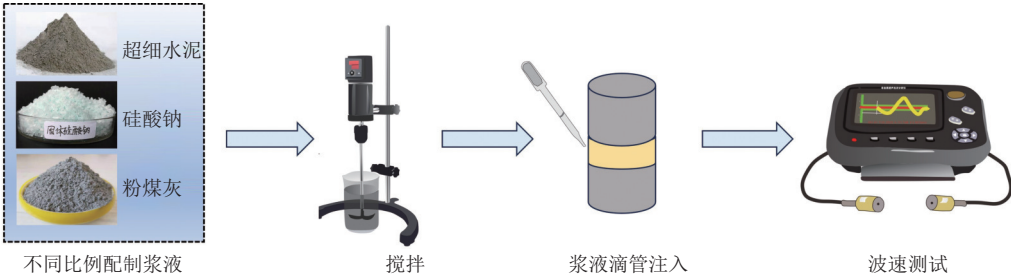


图2 试验流程图

Fig. 2 Test flow chart

2 试验结果与讨论

2.1 不同倾角预制裂缝及硅酸钠含量对结石体波速的影响

图 3 为不同粉煤灰掺量下硅酸钠含量对不同裂缝倾角结石体波速的影响。粉煤灰含量为 0% 与 20% 时, 硅酸钠含量为 0%、1%、3% 的试样波速随裂缝倾角的升高变化不显著, 在 4.4 km/s 上下波动; 硅酸钠含

量为 2% 的试样波速则随着裂缝的倾角先增大后减小。粉煤灰含量为 10% 时, 硅酸钠含量为 0%、1% 的试样波速随裂缝倾角的增大无明显变化, 硅酸钠含量为 2% 的试样波速随裂缝倾角的增大先减小后增大, 硅酸钠含量为 3% 的试样则与之相反。粉煤灰含量为 30% 时, 不同硅酸钠含量试样的波速随裂缝倾角的增大变化各不相同。

2.2 不同掺量粉煤灰对预制裂缝结石体波速的影响

图 4 给出了不同掺量硅酸钠结石体波速随裂缝

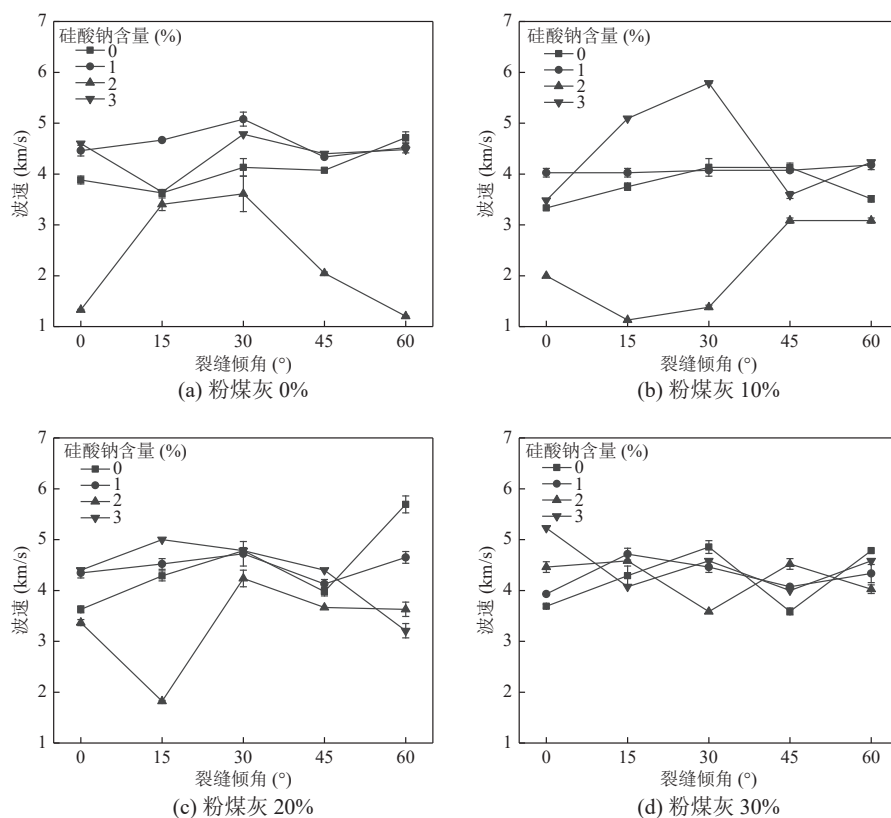


图3 不同掺量粉煤灰结石体波速随裂缝倾角变化

Fig. 3 The wave velocity of fly ash with different content varies with crack inclination

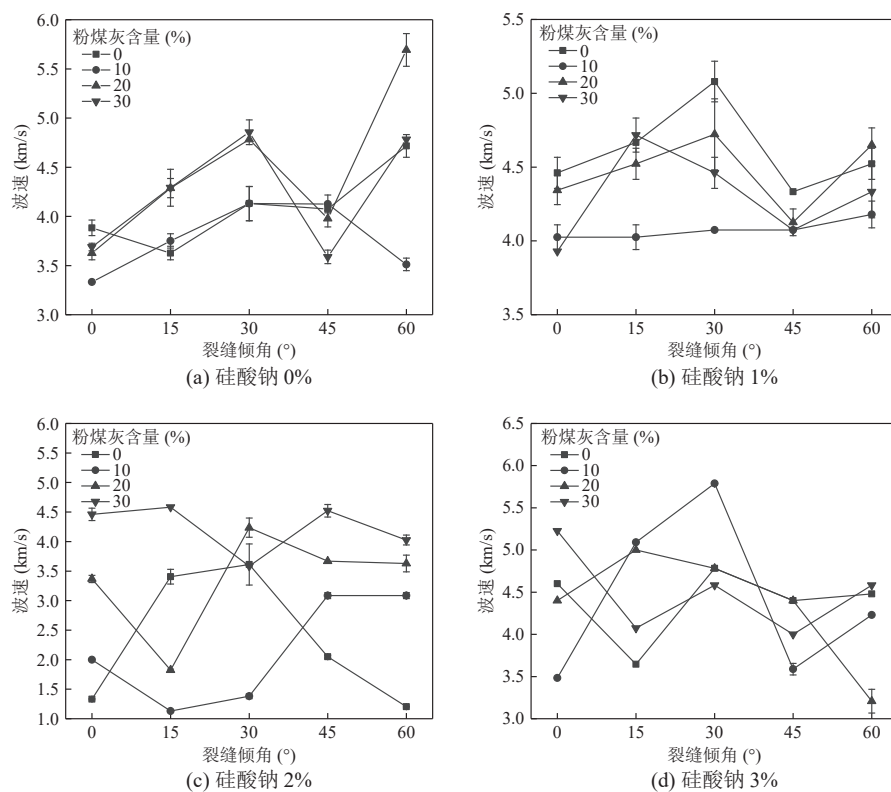


图4 不同掺量硅酸钠结石体波速随裂缝倾角变化

Fig. 4 The wave velocity of sodium silicate stone varies with the crack inclination

倾角变化情况。图4中可以看出, 结石体中不含硅酸钠时, 结石体波速随裂缝倾角的增大呈现先增大后减小的趋势, 裂缝倾角为 45° 时粉煤灰含量较高的结石体波速迅速降低。此外, 粉煤灰含量较高的结石体的波速明显大于粉煤灰含量较低的结石体, 表明粉煤灰含量较高时, 结石体内部存在的微裂纹较多。硅酸钠含量为1%时, 结石体波速随裂缝倾角的变化规律与不含硅酸钠试样类似, 波速随裂缝倾角的增大稍有

增大。当硅酸钠含量超过2%后, 粉煤灰与硅酸钠发生反应共同影响结石体的波速, 不同粉煤灰含量的结石体随裂缝倾角的变化趋势不同。

2.3 不同掺量粉煤灰对预制裂缝结石体波速的影响

图5为不同裂缝倾角下, 掺量粉煤灰与硅酸钠对波速的影响, 不同掺量粉煤灰、硅酸钠共同影响试样的波速变化, 二者对波速的影响程度不尽相同。裂缝倾角为 0° 与 45° 时, 随着粉煤灰含量的增大, 硅酸钠

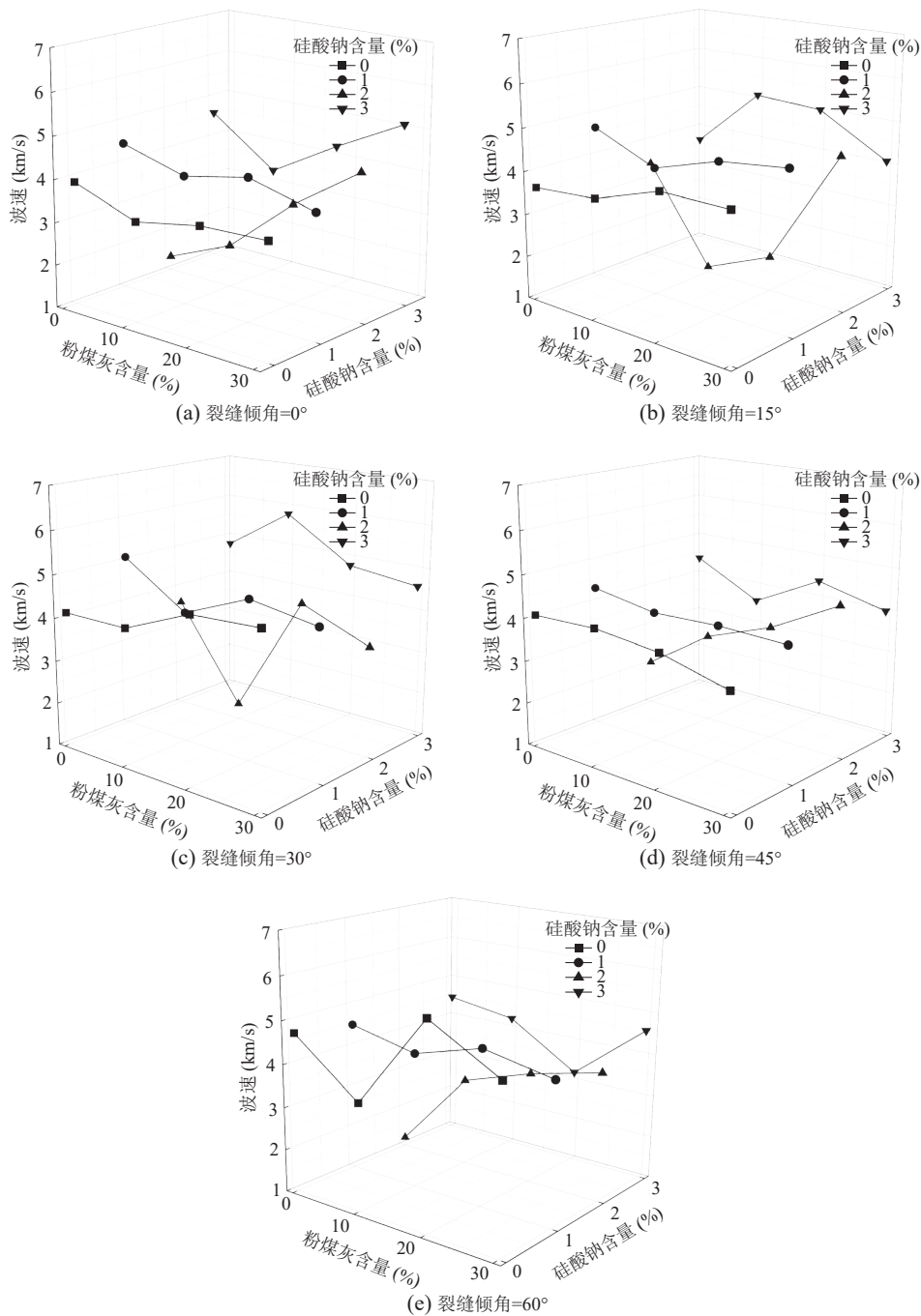


图5 不同粉煤灰与硅酸钠含量对波速的影响

Fig. 5 Influence of different fly ash and sodium silicate contents on wave velocity

含量为 0%, 1%, 3% 的试样波速变化幅度较小, 在 3.5 km/s 上下波动, 硅酸钠含量为 2% 的试样波速则随着粉煤灰含量的增大而增大; 对于不同含量的粉煤灰试样, 波速随着硅酸钠的含量增大, 整体呈现上升趋势, 仅在硅酸钠含量为 2% 时存在明显的下降段。裂缝倾角为 15° 与 30° 时, 硅酸钠含量较少为 0% 与 1% 时, 波速随粉煤灰的含量增加同样变化不显著, 而硅酸钠含量为 2% 与 3% 的试样波速表现出明显的相反性。裂缝倾角=60° 时, 对于不同含量的粉煤灰试样, 波速随着硅酸钠的含量增大, 整体呈现下降趋势。硅酸钠含量低于 1% 时, 粉煤灰对不同裂缝倾角试样的

波速影响较轻, 说明碱激发剂较少时, 粉煤灰的含量对试样波速作用效果不显著。

为了更好的反映出硅酸钠与粉煤灰掺量对注浆结合体波速的影响, 以硅酸钠含量为 0% 的试样为标准进行归一化处理, 归一化处理所得见图 6。可以看出, 对于不同裂缝倾角的试样, 归一化之后, 不同裂缝倾角试样的波速随硅酸钠含量的增加变化规律近似。当硅酸钠含量为 1% 时, 波速有小幅增大或减小, 变化不显著。当硅酸钠含量为 2% 时, 所有试样的波速均出现明显的下降段, 说明硅酸钠含量为 2% 时, 粉煤灰与硅酸钠充分反应通过缩聚过程形成地质聚合物凝

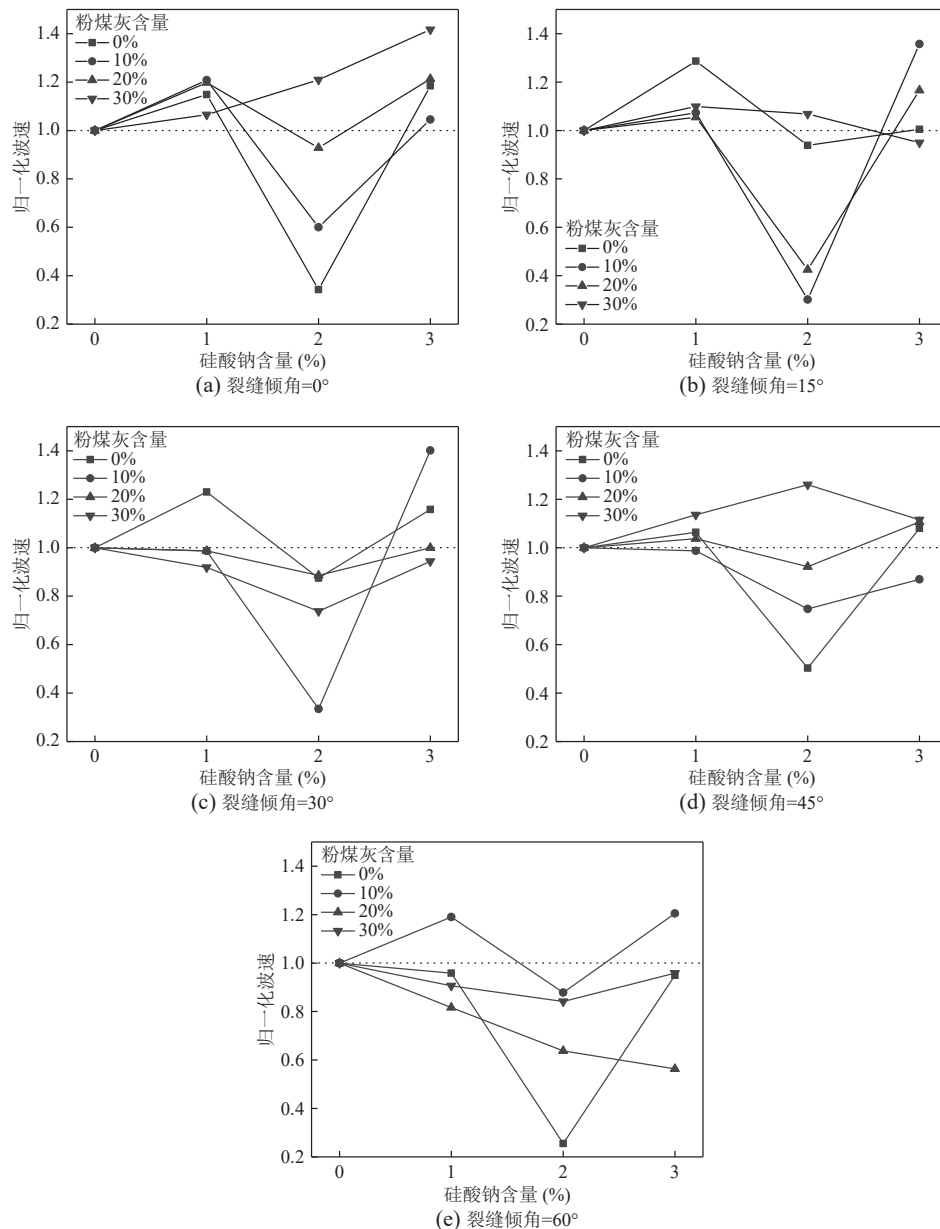


图6 波速归一化后随硅酸钠与粉煤灰掺量的变化

Fig. 6 The change of wave velocity with the content of sodium silicate and fly ash after normalization

胶,其中,四面体二氧化硅(SiO_4)和氧化铝(AlO_4)通过共享氧原子相互连接(卢春阳, 2023; 满吉芳等, 2023)。地质聚合物会填充到粉煤灰与水泥颗粒之间的空隙,减弱了孔隙之间的连通性,降低了结石体的孔隙度,浆体内部微裂纹减少,结构致密,使得波速显著减低(白应华等, 2020; 刘扬等, 2023; 方明伟等, 2023)。硅酸钠含量为 3% 时,波速出现明显的上升趋势,这可能是由于硅酸钠过量所致。过量的硅酸钠会形成无机泡沫,阻碍反应过程,导致地质聚合物形成量减少,粉煤灰与水泥颗粒之间空隙增大,孔隙度增大,进而导致波速增大(王亚超, 2015; 刘进琪等, 2020)。

3 结论

(1)粉煤灰含量相同时,随着裂缝倾角的增大,硅酸钠为 0% 与 1% 的试样波速并未出现明显变化,而硅酸钠为 2% 与 3% 的试样波速变化显著,且变化趋势呈现显著的相反性。

(2)硅酸钠含量较低时,不同粉煤灰含量的试样波速随裂缝倾角增大的变化趋势基本一致,呈现先增大后减小再增大,在 45° 时出现明显的下降;而硅酸钠含量较高时,不同粉煤灰含量的试样变化趋势存在显著差异。

(3)对波速进行归一化处理后,不同裂缝倾角试样的波速随硅酸钠含量的增加变化规律近似。硅酸钠含量为 2% 时,所有试样的波速均出现明显的下降,此时粉煤灰与硅酸钠充分反应形成地质聚合物,其填充于颗粒之间孔隙,使得水泥浆内部微裂纹减少,孔隙降低,进而引起波速显著降低。

参考文献(References):

- 白应华,章启航,余胜,等.偏硅酸钠激发矿渣-粉煤灰胶凝材料水化机理研究[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2020,33(1):162-166.
- BAI Yinghua, ZHANG Qihang, YU Sheng, et al. Study on Hydration Mechanism of Slag-Fly Ash Cementitious Material Excited by Sodium Metasilicate[J]. Journal of Xinyang Normal University, 2020, 33(1): 162-166.
- 卞立波,董申,陶志.碱激发矿渣/粉煤灰多孔混凝土基本性能试验研究[J].材料导报,2020,34(S2):1299-1303.
- BIAN Libo, DONG Shen, TAO Zhi. Basic Properties of Alkali Activated Slag/Fly Ash Pervious Concrete[J]. Materials Reports, 2020, 34(S2): 1299-1303.
- 陈守建,王永,伍跃中,等.西北地区煤炭资源及开发潜力[J].西北地质,2006,39(4):40-56.
- CHEN Shoujian, WANG Yong, WU Yuezhong, et al. Coal Resources and Development Potential in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2006, 39(4): 40-56.
- 方明伟,王丹,周枫桃,等.碱激发剂对粉煤灰地聚物混凝土的性能影响[J].功能材料,2023,54(11):11170-11176.
- FANG Mingwei, WANG Dan, ZHOU Fengtao, et al. Effect of alkali activator on the performance of fly ash geopolymer concrete[J]. Journal of Functional Materials, 2023, 54(11): 11170-11176.
- 蒋建华,吴琦,付用全,等.掺粉煤灰再生混凝土吸湿过程与预测模型研究[J].建筑材料学报,2022,25(3):248-255.
- JIANG Jianhua, WU Qi, FU Yongquan, et al. Moisture Absorption Process and Prediction Model of Recycled Concrete Mixed with Fly Ash[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(3): 248-255.
- 靳辛.粉煤灰处理采油废水研究及工程应用[D].青岛:中国海洋大学,2009.
- JIN Xin. Research and Engineering Applications on the Treatment of the Production Waste Water Using Coal Ash[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- 刘金平,汪理全,刘保业,等.煤炭开采的系统思想[J].西北地质,2001,34(2):34-36.
- LIU Jinping, WANG Liquan, LIU Baoye, et al. System ideas of coal mining[J]. Northwestern Geology, 2001, 34(2): 34-36.
- 刘进琪,王世玉,彭晖,等.碱激发剂对粉煤灰基地聚物性能影响研究[J].交通科学与工程,2020,36(3):8-13.
- LIU Jinqi, WANG Shiyu, PENG Hui, et al. Study on the effect of alkali activator on the properties of fly ash-based geopolymer[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 8-13.
- 刘扬,陈湘,王柏文,等.碱激发粉煤灰-矿渣-电石渣基地聚物的制备及强度机理[J].硅酸盐通报,2023,42(4):1353-1362.
- LIU Yang, CHEN Xiang, WANG Bowen, et al. Preparation and Strength Mechanism of Alkali-Activated Fly Ash-Slag-Carbide Slag Based Geopolymer[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2023, 42(4): 1353-1362.
- 卢春阳.混合碱激发粉煤灰地质聚合物注浆材料的研究[D].淮南:安徽理工大学,2023.
- LU Chunyang. Study of mixed alkali-activated fly ash geopolymer grouting materials[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2023.
- 卢国懿,薛峰,赵江涛.对我国粉煤灰利用现状的思考[J].中国矿业,2011,20(S1):193-195+200.

- LU Guoyi, XUE Feng, ZHAO Jiangtao. Some advice to the fly ash of China[J]. China Mining Magazine, 2011, 20(S1): 193-195+200.
- 卢海峰, 李中洋, 张凯. 改性粉煤灰材料固沙特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S1): 3374-3384.
- LU Haifeng, LI Zhongyang, ZHANG Kai. Experimental study on sand fixation characteristics of modified fly ash materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(S1): 3374-3384.
- 马荷雯. 采动覆岩离层多层位注浆地表沉陷控制技术[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 150-157.
- MA Hewen. Surface subsidence control technology of multi-bed separation grouting[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3): 150-157.
- 马砺, 杜素, 张照允, 等. 采空区大掺量粉煤灰无机固化泡沫制备及特性研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 243-251.
- MA Li, DU Su, ZHANG Zhaoyun, et al. Preparation and characteristics of inorganic curing foam with large-volume fly ash ingoaf[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2): 243-251.
- 满吉芳. 碱激发粉煤灰地质聚合物对黄土力学性能的改性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(1): 207-215.
- MAN Jifang. Study on improvement of mechanical properties of loess based on alkali activated fly ash geopolymer[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(1): 207-215.
- 庞文台, 申向东. 复合水泥土抗渗性能的实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(6): 1617-1625.
- PANG Wentai, SHEN Xiangdong. Study on Impervious Performance of Cement-soil[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2012, 31(6): 1617-1625.
- 时雅倩, 关渝珊, 葛伟哲, 等. 粉煤灰建材化增值利用: 最新技术与未来展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2860-2875.
- SHI Yaqian, GUAN Yushan, GE Weizhe, et al. Value-added utilization of pulverized fuel ash as construction materials: State-of-the-art technologies and future prospects[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2860-2875.
- 宋华, 牛获涛, 李春辉. 矿物掺合料混凝土碳化性能试验研究[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(12): 2066-2070.
- SONG Hua, NIU Ditao, LI Chunhui. Carbonation Test of Concrete Containing Mineral Admixtures[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2009, 37(12): 2066-2070.
- 田海彦. 粉煤灰掺量对硫氧镁泡沫水泥性能的影响[J]. 辽宁化工, 2023, 52(8): 1139-1141.
- TIAN Haiyan. Effect of Fly Ash Content on Properties of Magnesium Oxysulfate Foam Cement[J]. Liaoning Chemical Industry, 2023, 52(8): 1139-1141.
- 童小东, 徐敏, 戴国亮, 等. 某添加剂在水泥土搅拌法中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007(2): 345-349.
- TONG Xiaodong, XU Min, DAI Guoliang, et al. Application of an additive in cement deep mixing method[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007(2): 345-349.
- 王东星, 王宏伟, 邹维列, 等. 碱激发粉煤灰固化淤泥微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 3197-3205.
- WANG Dongxing, WANG Hongwei, ZHOU Weilie, et al. Research on micro-mechanisms of dredged sludge solidified with alkali-activated fly ash[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 3197-3205.
- 王建圣, 蒋志斌, 李丽超. 隧道岩体贯通节理面注浆加固力学响应特征[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2023, 5(2): 80-88.
- WANG Jiansheng, JIANG Zhibin, LI Lichao. Mechanical response characteristics of persistent joint planes in tunnel surrounding rock masses with grouting treatments[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2023, 5(2): 80-88.
- 王双明, 孙强, 乔军伟, 等. 论煤炭绿色开采的地质保障[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 8-15.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, QIAO Junwei, et al. Geological guarantee of coal green mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 8-15.
- 王双明, 耿济世, 李鹏飞, 等. 煤炭绿色开发地质保障体系的构建[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 33-43.
- WANG Shuangming, GENG Jishi, LI Pengfei, et al. Construction of geological guarantee system for green coal mining[J]. Coal Geology and Exploration, 2023, 51(1): 33-43.
- 王双明, 孙强, 耿济世, 等. 西部矿区采动损害及减损开采的地质保障技术框架体系[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(9): 1-13.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, GENG Jishi, et al. Geological Support Technology Framework System for Mining Induced Disasters and Damage Reduction Mining of Geological Conditions in Western Mining Area[J]. Coal Geology and Exploration, 2024, 52(9): 1-13.
- 王双明, 孙强, 袁士豪, 等. 论煤-水-土多资源协调开发[J]. 西北地质, 2024a, 57(5): 1-10.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, YUAN Shihao, et al. On the Coordinated Development of Coal-Water-Soil Multiple Resources[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 1-10.
- 王玮健. 固化粉煤灰体力学特性试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
- WANG Weijian. Experimental study on physical properties of solidified fly ash[J]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2021.

- 王亚超. 碱激发粉煤灰地质聚合物强化增韧及耐久性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- WANG Yachao. Investigations on reinforcing, toughening and durability of alkali-activated fly ash-based geopolymer[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- 卫春安, 苏安双, 贾青, 等. 胶结土无侧限抗压强度试验研究[J]. [水利科学与寒区工程](#), 2020, 3(5): 23–27.
- WEI Chunan, SU Anshuang, JIA Qing, et al. Experimental study on unconfined compressive strength of cemented soil[J]. [Hydro Science and Cold Zone Engineering](#), 2020, 3(5): 23–27.
- 武强, 涂坤, 曾一凡, 等. 打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J]. [煤炭学报](#), 2019, 44(6): 1625–1636.
- WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan, et al. Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgrade version of main energy (coal) industry in China[J]. [Journal of China Coal Society](#), 2019, 44(6): 1625–1636.
- 夏曾银, 潘军, 盛鲁腾, 等. 注浆和隔离墙对基坑引发隧道变形的联合控制作用研究[J]. [水利水电技术\(中英文\)](#), 2022, 53(9): 175–185.
- XIA Zengyin, PAN Jun, SHENG Luteng, et al. Study on joint control effect of grouting and separating wall on tunnel deformation induced by foundation pit[J]. [Water Resources and Hydro-power Engineering](#), 2022, 53(9): 175–185.
- 肖东旭, 马芹永. 粉煤灰水泥土力学特性试验研究[J]. [安徽理工大学学报\(自然科学版\)](#), 2022, 42(3): 23–28.
- XIAO Dongxu, MA Jinyong. Experimental Study on Mechanical Properties of Fly Ash Cement Soil[J]. [Journal of Anhui University of Science and Technology \(Natural Science\)](#), 2022, 42(3): 23–28.
- 张俊儒, 闻毓民, 欧小强. 粉煤灰喷射混凝土孔隙结构的演变特征[J]. [西南交通大学学报](#), 2018, 53(2): 296–302.
- ZHANG Junru, WEN Yumin, OU Xiaoqiang. Evolutionary Characteristics of Pore Structure of Fly Ash Shotcrete[J]. [Journal of Southwest Jiaotong University](#), 2018, 53(2): 296–302.
- 赵阳. 掺入粉煤灰的碱激发胶凝材料路用性能研究[J]. [山东交通科技](#), 2023(4): 44–47.
- ZHAO Yang. Research on road performance of alkali-activated cementitious materials mixed with fly ash[J]. [Shandong Jiaotong Keji](#), 2023(4): 44–47.
- 中国工业固废网, 中循新科环保科技有限公司(北京)有限公司, 中关村绿色矿山产业联盟矿山固废资源综合利用专委会. 2019—2020 年度中国大宗工业固体废物综合利用产业发展报告[R]. 北京, 2020.