

文章编号: 1004-4051(2024)S2-0357-06

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20241568

脱硫粉煤灰掺量对蒸压加气混凝土稳定性影响及其机理

韩磊^{1,2}, 方珏静², 何祥², 许起¹, 刘云龙¹, 苏松嵘¹, 秦宇鹏¹

(1. 山煤国际能源集团股份有限公司, 山西太原 030000;

2. 安徽理工大学矿业工程学院, 安徽淮南 232001)

摘要: 随着环保要求的提高和资源循环利用的推广, 脱硫粉煤灰作为一种煤电化副产品, 在改善蒸压加气混凝土(AAC)的性能方面具有潜在的应用价值。为了深入研究脱硫粉煤灰掺量对 AAC 稳定性的影响及其机理, 开展了以不同比例的脱硫粉煤灰替代普通粉煤灰的稳定性实验, 通过对六组不同掺量试件的稠度、干密度进行测试, 并分析了其对 AAC 试件抗压强度的影响趋势, 结合 ACC 水化过程, 探讨了脱硫粉煤灰从微观到宏观对 AAC 的结构和性能的影响, 阐明了脱硫粉煤灰对蒸压加气混凝土稳定性影响机理。研究表明, 在脱硫粉煤灰的初始掺入阶段, 由于其作为微细填料的功能, 以及促进水化反应的作用, 显著提高了 AAC 的干密度和初期抗压强度, 在脱硫粉煤灰掺量为 30% 时, AAC 试件强度达到阈值。然而脱硫粉煤灰掺量对 AAC 具有双向作用, 过多的脱硫粉煤灰导致气孔增多及活性降低, 进而影响试件的长期稳定性。本文研究成果对于 ACC 工艺的优化具有较大参考价值, 为脱硫粉煤灰在蒸压加气混凝土领域的运用提供了理论依据和数据支撑。

关键词: 脱硫粉煤灰掺量; 蒸压加气混凝土; 水化反应; 气孔结构; 稳定性

中图分类号: TD989 **文献标识码:** A

Effect of desulfurized fly ash dosage on the stability of autoclaved aerated concrete and its mechanism

HAN Lei^{1,2}, FANG Juejing², HE Xiang², XU Qi¹, LIU Yunlong¹,
SU Songrong¹, QIN Yupeng¹

(1. Shanxi Coal International Energy Group Co., Ltd., Taiyuan 030000, China;

2. School of Mining Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: With increasing environmental regulations and the promotion of resource recycling, desulfurized fly ash, a byproduct of coal-fired power generation, has potential applications in enhancing the performance of autoclaved aerated concrete (AAC). To deeply investigate the impact of desulfurized fly ash dosage on the stability of AAC and its mechanisms, stability experiments are conducted using various proportions of desulfurized fly ash to replace ordinary fly ash. The consistency and dry density of six different mix proportions are tested, and the influence on the compressive strength

收稿日期: 2024-08-13 责任编辑: 聂虹

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(编号: 52130402); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目资助(编号: U21A20110)

第一作者简介: 韩磊(1978—), 男, 汉族, 河北卢龙人, 博士, 正高级工程师, 主要从事多源煤基固废利用等方面的研究工作, E-mail: lhan_kuangren@163.com。

通讯作者简介: 方珏静(1999—), 女, 汉族, 安徽铜陵人, 博士研究生, 主要从事多源煤基固废利用等方面的研究, E-mail: juejing.fang@163.com。

引用格式: 韩磊, 方珏静, 何祥, 等. 脱硫粉煤灰掺量对蒸压加气混凝土稳定性影响及其机理[J]. 中国矿业, 2024, 33(S2): 357-362.

HAN Lei, FANG Juejing, HE Xiang, et al. Effect of desulfurized fly ash dosage on the stability of autoclaved aerated concrete and its mechanism[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(S2): 357-362.

of AAC specimens is analyzed. Alongside the hydration process of AAC, the effects of desulfurized fly ash from the micro to macro levels on the structure and performance of AAC are explored, elucidating the mechanisms by which desulfurized fly ash affects the stability of autoclaved aerated concrete. The study shows that in the initial phase of incorporating desulfurized fly ash, due to its role as a micro-filler and its enhancement of the hydration reaction, there is a significant improvement in the dry density and early compressive strength of AAC, with the strength of AAC specimens reaching a threshold at 30% fly ash content. However, the addition of desulfurized fly ash has a bidirectional effect on AAC. Excessive amounts lead to an increase in porosity and a decrease in reactivity, subsequently affecting the long-term stability of the specimens. These findings provide significant references for optimizing AAC processes, offering a theoretical basis and data support for the application of desulfurized fly ash in the field of autoclaved aerated concrete.

Keywords: desulfurized fly ash dosage; autoclaved aerated concrete; hydration reaction; pore structure; stability

0 引言

在现代建筑材料科学中,蒸压加气混凝土(Autoclaved Aerated Concrete, AAC)由于其优异的隔热、隔音及轻质高强的特性,已广泛应用于建筑行业^[1-2]。然而,随着环境保护要求的提高和资源的可持续使用策略的推进,传统 AAC 材料的生产过程和原材料的选择面临着新的挑战和改进需求。特别是在原材料的利用效率和环境影响方面,探索新的添加剂使用策略成为了行业的热点问题之一^[3]。

粉煤灰作为一种在煤燃烧过程中产生的副产品,其在矿山充填、再生混凝土、制砖及路基工程中的应用具有重要的环保和技术价值。针对这些应用领域,研究人员开展了一系列的理化性能测试和应用研究,以提高资源的利用率并降低环境影响^[4-5]。普通粉煤灰的应用仍然存在对 AAC 性能的限制,相对于普通粉煤灰,脱硫粉煤灰是在煤燃烧过程中配合脱硫技术产生的一种特殊的粉煤灰,其中包含更多的硫酸盐和其他化学活性组分^[6]。研究结果表明,脱硫粉煤灰在成分上与高钙粉煤灰相近、活性上几乎相同,但脱硫粉煤灰的含硫化合物(CaSO_3 和 CaSO_4)含量较高^[7],在 AAC 应用中具有独特的性能改进潜力,适量脱硫粉煤灰的加入可有效抑制加气混凝土前期的发气速度,并延长发气时间,使制品保持轻质特性,同时提升其抗压强度和耐久性^[8-9]。

上述研究虽聚焦脱硫粉煤灰对 ACC 宏观性能的影响,但脱硫粉煤灰的掺入量对 AAC 稳定性及其作用机理尚未完全明确。基于此,开展了不同比例脱硫粉煤灰掺入量对 AAC 的稳定性影响研究,通过分析浆液稠度、ACC 干密度和抗压强度的变化,分析了脱硫粉煤灰掺量对材料的微观结构和化学反应过程,阐明了脱硫粉煤灰掺量对 ACC 稳定性影响内在机制,确定了最优脱硫粉煤灰的掺入量比例。本

文研究为脱硫粉煤灰在 AAC 中的应用提供了科学依据,同时为工业生产中的配比优化提供了指导,从而可以在满足环保要求的同时,实现材料性能的最优化。

1 材料与方法

1.1 材料选择

试验所需物料由普通硅酸盐水泥、普通粉煤灰、脱硫粉煤灰、生石灰、铝粉构成,均取自山西某矿区。其中,普通粉煤灰作为一种活性较低的掺和材料,可以提高混凝土的工作性和长期强度,同时减少水泥用量,有利于提高混凝土的环境性能,主要由二氧化硅(SiO_2)、氧化铝(Al_2O_3)、氧化铁(Fe_2O_3)、氧化钙(CaO)及其他氧化物包括氧化镁(MgO)、氧化钠(Na_2O)、氧化钾(K_2O)等组成;脱硫粉煤灰由燃煤电厂的烟气脱硫过程中产生,相较于普通粉煤灰,含有较高的钙成分和硫化物,其化学活性更高,能更有效地与水泥矿物相反应,提高混凝土的早期强度和耐久性,各成分相对含量如图 1 所示。

为探究脱硫粉煤灰对 ACC 稳定性影响,固定水料比为 2 : 3,水泥、生石灰均占物料的 20%,粉煤灰总量占物料的 60%,铝粉作为发气剂按照标准额外添加 0.1%,设计了 6 组不同脱硫粉煤灰配比的蒸压加气混凝土试件(表 1),其中,DF-0、DF-1、DF-2、DF-3、DF-4、DF-5、DF-6 分别代表脱硫粉煤灰掺量占物料质量的 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%。

1.2 试样制备

首先,将水泥、普通粉煤灰、脱硫粉煤灰和生石灰按照既定比例称量,并放入搅拌机中充分干混。再将 60 °C 温水缓缓加入搅拌机中,继续搅拌以形成均匀的料浆。在搅拌过程中,精确计量所需的铝粉量,并浇注模具前 45 s 加入搅拌机中,继续搅拌 45 s,确保铝粉均匀分布在混合料中,并开始发生化学反

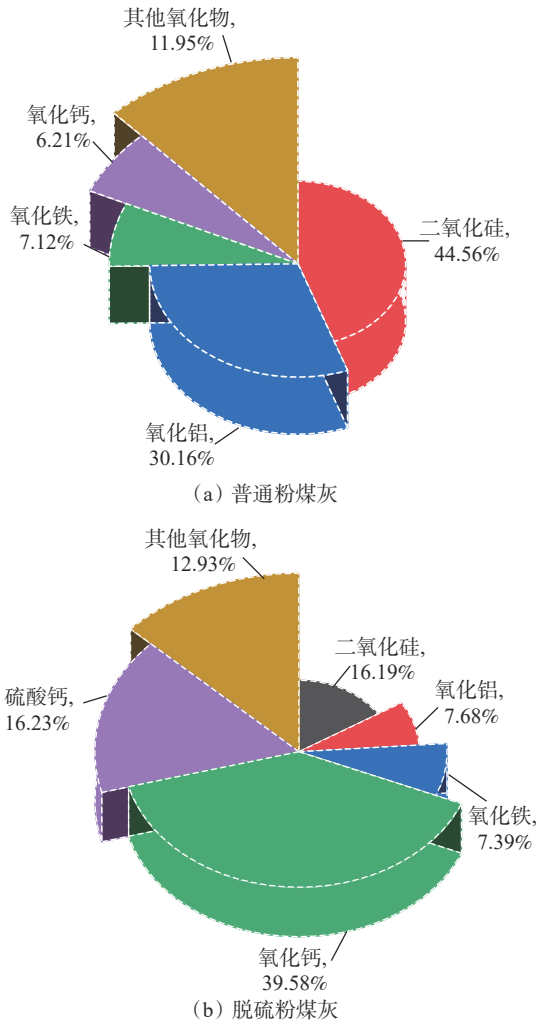


图 1 两种粉煤灰成分相对含量

Fig. 1 Relative content of two fly ash components

应以产生微小的气泡,并借助砂浆稠度测定仪测定料浆的稠度。

将料浆浇注入预先准备好的 100 mm×100 mm×100 mm 模具中,为防止蒸养时原料继续反应导致混凝土开裂,需放入养护箱中进行发气和静态养护 2 h,此时,养护过程中料浆开始初步硬化。待试件脱模并设置蒸压釜温度为 180 ℃,压力 1.2 MPa,持续养护 10 h,以完成混凝土的蒸压加气养护过程。在干燥箱恒温烘干 24 h 后记录试件的干密度,设置加载速率

表 1 不同脱硫粉煤灰掺量的 ACC 试件配比

Table 1 ACC specimen proportions with different desulfurized fly ash dosage

试验编号	物料配合比/%				
	普通粉煤灰	脱硫粉煤灰	水泥	生石灰	铝粉
DF-0	60	0	20	20	0.1
DF-1	50	10	20	20	0.1
DF-2	40	20	20	20	0.1
DF-3	30	30	20	20	0.1
DF-4	20	40	20	20	0.1
DF-5	10	50	20	20	0.1
DF-6	0	60	20	20	0.1

为 0.1 kN/s 测试试件抗压强度。试件制备流程如图 2 所示。

2 试验结果与分析

2.1 脱硫粉煤灰掺量对试件物理性能影响

不同脱硫粉煤灰掺量下蒸压加气混凝土浆液稠度及干密度变化如图 3 所示。由图 3 可知,随着脱硫粉煤灰掺量的增加,料浆的稠度值表现出明显的上升趋势,即脱硫粉煤灰的需水量小于普通粉煤灰。这是由于脱硫粉煤灰较大的比表面积和较高的未烧结颗粒含量提供了更多的表面活性,促进了水分的保持和分布,从而增加了浆液的流动性^[10]。

干密度呈现先增加后下降的趋势,在脱硫粉煤灰掺量为 20% 时达到最高点,约 633 kg/m³,随后持续下降。这是由于脱硫粉煤灰中含有较多的活性成分(如 CaO、SO₃),这些成分能与水反应形成硫铝酸钙和硅酸钙水合物,这些水化产物有助于增加混合物的密实度。而后期干密度下降一方面是因为脱硫粉煤灰的相对密度(2.09 g/cm³)低于普通粉煤灰(2.28 g/cm³),这直接影响了混合物的整体密度。另一方面,随着脱硫粉煤灰的掺入比例增加,料浆中 SO₄²⁻离子的增多抑制了生石灰的水化作用^[11]。通常,生石灰的水化作用对于加快硬化过程和提高早期强度至关重要。当这一反应被抑制时,硬化速度减慢,为铝粉的发气反应提供了更多时间,最终导致硬化后的浆体含气量增加,从而降低了干密度。脱硫粉煤灰的掺入在



图 2 试件制备过程

Fig. 2 Preparation process of specimen

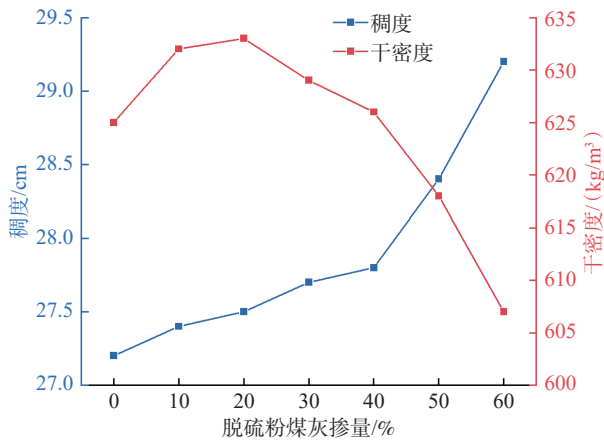


图 3 不同脱硫粉煤灰掺量下蒸压加气混凝土浆液稠度及干密度变化

Fig. 3 Changes of consistency and dry density of autoclaved aerated concrete slurry under different desulfurized fly ash dosages

改善混凝土的工作性和降低干密度方面发挥了积极作用,通过控制脱硫粉煤灰的掺量,可以在保证混凝土的结构轻质化。

2.2 脱硫粉煤灰掺量对试件抗压强度的影响

图 4 为不同脱硫粉煤灰掺量的蒸压加气混凝土试件抗压强度分布,对脱硫粉煤灰掺量与抗压强度曲线进行拟合,得到式(1)。

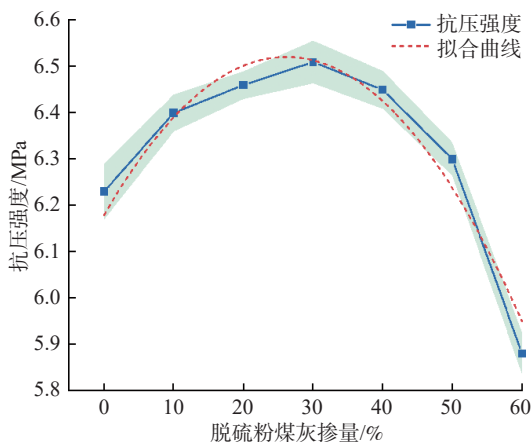


图 4 不同脱硫粉煤灰掺量对试件抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of different desulfurized fly ash dosage on compressive strength of specimens

$$\sigma = -17954.498 + 17961.019 \exp \left[-0.5 * (w - 26.165)^2 / 4243.519^2 \right] \quad (1)$$

式中: σ 为单轴抗压强度, MPa; w 为脱硫粉煤灰掺量, %。相关系数 R^2 为 0.943 能够较好表征脱硫粉煤灰掺量与抗压强度之间的关系。

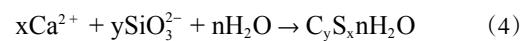
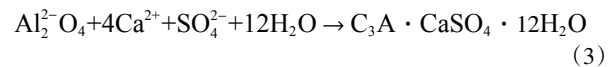
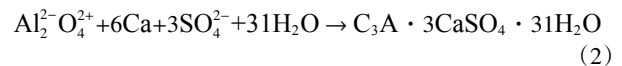
由图 4 可知,试件的抗压强度随着脱硫粉煤灰掺量的增加先提升后下降,其中,在掺量达到 30% 时

抗压强度达到阈值。脱硫粉煤灰掺入初期对抗压强度的增强,其主要原因是脱硫粉煤灰中的二氧化硅在碱性环境下,特别是在一定的热量作用下,会表现出更高的活性,这导致 C-S-H(硅酸钙水化物)凝胶的形成,同时,脱硫粉煤灰的存在加速了早期的水化反应,放出大量热量,促进了 C-S-H 凝胶的迅速形成,从而提高了早期的抗压强度。当脱硫粉煤灰掺量超过 40% 时,此时,高掺量的脱硫粉煤灰提供了更多的铝粉发气时间,导致混凝土中的气孔率增加,降低了材料的整体密实度和承载能力。与此同时,脱硫粉煤灰中较高的 SO_4^{2-} 离子浓度抑制了生石灰的水化作用,影响混凝土的最终硬化和强度,致使试件抗压强度降低。

3 脱硫粉煤灰对试件的影响机理分析

3.1 水化反应对试件稳定性的影响

试验制备过程中,粉煤灰的颗粒在生石灰形成的碱性溶液中发生溶解,其表面形成 $\text{Al}_2\text{O}_4^{2-}$ 、 SiO_3^{2-} 等离子与溶液中的 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 发生反应生成 C-S-H 凝胶及钙矾石等水化产物,其形成水化产物过程的化学反应式见式(2)~式(4)。



粉煤灰颗粒在碱性环境中持续溶解,随着水化反应的进行, $\text{Al}_2\text{O}_4^{2-}$ 、 SiO_3^{2-} 离子逐渐被消耗,这一过程中,随着水化产物的不断积累,包括钙矾石、C-S-H 凝胶粒子、少量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、不规则的单硫型水化硫铝酸钙及未水化的原料颗粒,这些水化产物相互连接穿插依靠,形成了致密的网络结构,显著增强了材料的凝胶性能。随着水化龄期的延长,原料颗粒持续水化,固体结构变得更加致密,从而进一步提升了材料性能。

在普通粉煤灰原料中, SiO_2 、 Al_2O_3 组成的 Si-O 键和 Al-O 键在碱性环境条件下断裂,而在脱硫粉煤灰中, CaSO_4 的存在促使 Ca^{2+} 与断裂后的 Si-O 键和 Al-O 键反应,导致难溶解的钙矾石、水化硅酸钙胶凝物质和二水石膏等稳定的水化产物的形成。硫铝酸钙和硅酸钙的生成成为 ACC 试件体系提供了关键的支持强度。此外,钙矾石晶体的互相交错和相连,以及它们与水化硅酸钙胶凝物质覆盖在二水石膏表面的交互作用,进一步增强了材料的结构完整性^[12]。因此,由试验验证可知,替换 30% 的普通粉煤灰为脱硫粉

煤灰可以显著提高试件的抗压强度。

3.2 气孔结构对试件稳定性的影响

料浆中的碱性环境极易促使铝粉反应生成大量氢气,氢气在水中的溶解度极低。在生石灰放热的作用下,环境温度持续升高,导致混合料浆发生持续膨胀。此外,料浆的膨胀、稠化、凝结硬化,以及硬化坯体在蒸压养护期间的水热反应等过程均对AAC的气孔结构产生了显著影响。细小、形状接近圆形、孔径大小均匀且分布均匀、气孔封闭不串孔的AAC试件通常展示出最佳的强度和干密度。相反,孔径较大、孔壁薄、气孔呈扁或长圆形、串孔现

象严重、孔分布不均及孔径大小不均的AAC试件则表现出较差的性能^[1]。

图5(a)为未掺加脱硫粉煤灰的普通AAC砌块,图5(b)为掺加30%脱硫粉煤灰的AAC砌块。图5(a)中可见孔径较大且串联、分布不均的试件,其气孔内的水化产物较少,主要由凝胶和低结晶度的单碱水化硅酸钙组成,呈现半卷曲状。这种结构在外力作用下易产生应力集中,导致试件破坏。图5(b)显示的孔径相对紧密、大孔径较少、分布较均匀,孔结构良好,各种水化产物如C-S-H凝胶和托贝莫来石的交织形成了稳定的晶体网络,有助于强度的提升。

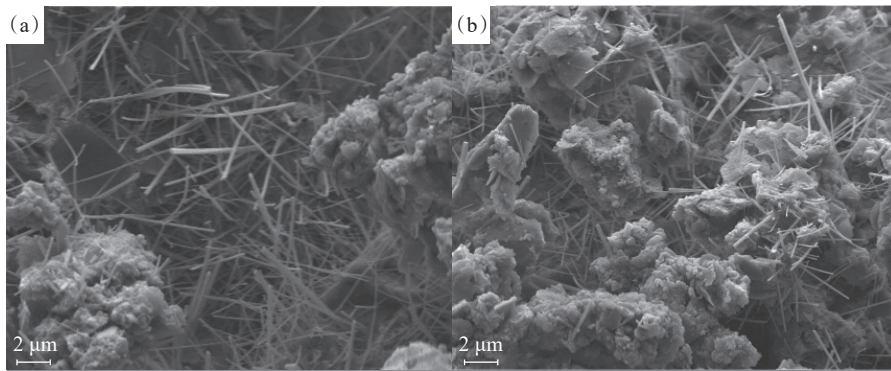


图5 AAC试件微观形貌

Fig. 5 Microstructure of AAC specimen

通过掺入脱硫粉煤灰,AAC试件中不仅增多了C-S-H凝胶,还形成了针棒状的钙矾石晶体和托贝莫来石,进一步密实了结构。钙矾石晶体和托贝莫来石等水化产物的形成,减少了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量,并以针状水化硫铝酸钙为骨架,其他水化产物交错其间,形成了致密的网络结构,显著提高了试件的强度。因此,合理控制脱硫粉煤灰的掺入量,可以有效利用其对复合胶凝体系中的反应和性能的改善,优化AAC的气孔结构,提高其整体性能。

4 结论

1)脱硫粉煤灰掺入蒸压加气混凝土可以影响浆料的稠度,其掺量增加初期通常导致稠度增加,主要由于脱硫粉煤灰中活性组分在碱性环境中提供了更多的表面活性,有助于水的保留和分布,增强了浆料的流动性。然而,掺量过高时,过多的粉煤灰反而增加了浆料的黏稠性,降低了流动性。

2)随着脱硫粉煤灰掺量的增加,试件的干密度表现出下降趋势。这主要是由于脱硫粉煤灰的低密度特性,以及由于水化反应产生较多气孔的结果,这些气孔在结构中形成了大量的空隙,降低了材料的整体密度。

3)蒸压加气混凝土抗压强度随脱硫粉煤灰掺量增加呈先上升后下降的单峰变化,适量的脱硫粉煤灰掺量可以通过增强水化反应和优化气孔结构来提高材料的抗压强度,在30%时达到强度阈值。当掺量超过40%后,抗压强度开始下降,这是因为高掺量增加了气孔率和降低了结构的致密性。

4)脱硫粉煤灰在蒸压加气混凝土中的作用机理包括促进更有效的水化反应和C-S-H凝胶的形成,这些凝胶有助于提高初期和最终的结构强度。此外,脱硫粉煤灰的掺入改变了材料的孔结构,通过优化孔径和孔壁的分布及形态,改善了材料的物理和机械性能。

参考文献(References):

- [1] 唐凌霄,姚华彦,徐马云龙,等.蒸压加气混凝土板研究与应用综述[J].材料导报,2022,36(S1):237-240.
TANG Lingxiao, YAO Huayan, XU Mayunlong, et al. Review on the research and application of autoclaved aerated concrete slab[J]. Materials Reports, 2022, 36(S1): 237-240.
- [2] MOHAMMAD Z, ALI A K, MOHSEN Z. Evaluating the fracture behaviour of modified asphalt concrete composites (ACC) at low and intermediate temperatures using edge notched disc bend (ENDB)

- specimen[J]. Road Materials and Pavement Design, 2022, 23(7/9): 457-481.
- [3] 马淑杰. 新征程下大宗固废综合利用产业发展研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(6): 10-18.
MA Shujie. Research on the development of comprehensive utilization industry of bulk solid waste in the new journey[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(6): 10-18.
- [4] 徐文彬, 陈伟, 张亚伦, 等. 深部充填开采矸石-粉煤灰料浆流变特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 85-93.
XU Wenbin, CHEN Wei, ZHANG Yalun, et al. Research on rheological characteristics of gangue-fly ash slurry in deep filling mining[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 85-93.
- [5] 杨科, 方珏静, 张吉雄, 等. 加浆改性固体充填材料承载压缩特性与固结机制[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(3): 456-468.
YANG Ke, FANG Juejing, ZHANG Jixiong, et al. Compression load-bearing characteristics and consolidation mechanism of grout-modified solid backfill materials[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(3): 456-468.
- [6] 刘素霞, 王雨利, 王卫东. 利用脱硫粉煤灰和炉渣制备蒸压加气混凝土砌块的研究[J]. 粉煤灰, 2012, 24(3): 4-5.
LIU Suxia, WANG Yuli, WANG Weidong. Research on preparation of autoclaved aerated concrete block with desulfurized fly ash and slag[J]. Coal Ash, 2012, 24(3): 4-5.
- [7] 鞠恺, 刘颖, 李新, 等. 基于响应面的粉煤灰湿法脱硫条件优化与机理[J/OL]. 煤炭科学技术, 1-18[2024-10-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240613.1320.001.html>.
JU Kai, LIU Ying, LI Xin, et al. Optimization and mechanism of wet desulfurization with fly ash based on response surface[J/OL]. Coal Science and Technology, 1-18[2024-10-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240613.1320.001.html>.
- [8] 郭志奇, 成水武, 林瀚, 等. 不同脱硫粉煤灰对水泥基材料性能影响[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(1): 199-201.
GUO Zhiqi, CHENG Shuiwu, LIN Han, et al. Effects of different desulfurized fly ash on the performance of cement-based materials[J]. Highway Traffic Science and Technology(Applied Technology Edition), 2016, 12(1): 199-201.
- [9] 李亚娇, 李璟婷, 王铁, 等. 粉煤灰湿法脱硫及其脱硫浆液用作充填材料的试验研究[J/OL]. 洁净煤技术, 1-9[2024-10-13]. <https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.23082504>.
LI Yajiao, LI Jingting, WANG Tie, et al. Experimental study on wet desulfurization of fly ash and its desulfurization slurry as filling material[J/OL]. Clean Coal Technology, 1-9[2024-10-13]. <https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.23082504>.
- [10] 于清航, 尚庆雨, 徐振刚, 等. 空气分级燃烧对滴管炉粉煤灰理化特性及脱硫性能的影响[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S1): 296-304.
YU Qinghang, SHANG Qingyu, XU Zhengang, et al. Effect of air staging combustion on physic-chemical properties and desulfurization potentiality of fly ash[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S1): 296-304.
- [11] 赵文华, 崔锋, 刘鹏亮, 等. 粉煤灰-脱硫石膏充填材料性能及微观结构研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(9): 132-138.
ZHAO Wenhua, CUI Feng, LIU Pengliang, et al. Study on the performance and microstructure of fly ash-desulfurized gypsum filling materials[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(9): 132-138.
- [12] 何锐, 柴华, 安炬峰, 等. 粉煤灰微珠粒径及掺量对灌浆料性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(4): 15-26.
HE Rui, CHAI Hua, AN Jufeng, et al. Influence of particle size and dosing of fly ash microbeads on performance of grout[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2024, 44(4): 15-26.
- [13] 刘健, 李伟, 王立才, 等. 碱激发矿渣泡沫混凝土的制备及其封存CO₂可行性研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(1): 218-225.
LIU Jian, LI Wei, WANG Licai, et al. Preparation of alkali-activated slag based foam concrete and feasibility study on CO₂ sequestration[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(1): 218-225.