

粉煤灰特性及其对气泡轻质土性能影响研究

Study on the Characteristics of Fly Ash and Their Effects on the Performance of Foam Concrete

王稷良^{1,2}, 朱繁涛^{1,2}, 辛懿韬³, 徐伟东⁴

- (1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088;
3. 内蒙古交通集团有限公司项目管理分公司, 呼和浩特 010051;
4. 内蒙古雷石环保科技有限公司, 乌海 016040)

摘要: 粉煤灰的品质良莠不齐制约了粉煤灰气泡轻质土的大规模应用, 为了揭示不同种类和掺量下的粉煤灰对气泡轻质土性能的影响, 通过系统综述粉煤灰的颗粒特征、化学组分和火山灰活性, 深入探讨了粉煤灰对气泡轻质土物理性能、力学性能和耐久性能的作用机制。结果表明: 掺加适量的粉煤灰可以降低气泡轻质土的吸水率、干密度和孔隙率, 有利于改善流动度和孔隙结构, 能够进一步增强无侧限抗压强度、抗硫酸盐侵蚀性能和抗冻性能。以期为粉煤灰在气泡轻质土中的大规模推广利用提供参考。

关键词: 粉煤灰; 气泡轻质土; 物理性能; 力学性能; 耐久性能

中图分类号: TU528.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 03-0028-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.006

WANG Jiliang^{1,2}, ZHU Fantao^{1,2}, XIN Yitao³, XU Weidong⁴

- (1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
3. Inner Mongolia Transportation Group Co.Ltd., Project Management Branch, Hohhot 010051, China;
4. Inner Mongolia Leishi Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhai 016040, China)

Abstract: The variability in the quality of fly ash restricts the large-scale promotion and application of fly ash lightweight foamed concrete. To reveal the effects of fly ash with different types and contents on the properties of lightweight foamed concrete, systematically reviews the particle characteristics, chemical composition, and pozzolanic activity of fly ash, and deeply discusses the action mechanisms of fly ash on the physical, mechanical, and durability properties of lightweight foamed concrete. The result show that adding an appropriate amount of fly ash can reduce the water absorption, dry density, and porosity of lightweight foamed concrete, which is beneficial for improving workability and pore structure. Additionally, it can further enhance the unconfined compressive strength, sulfate resistance, and freeze-thaw resistance of the material. The findings establish a database to support extensive application of fly ash in aerated lightweight soil systems.

Key words: fly ash; lightweight foamed concrete; physical properties; mechanical properties; durability

基金项目: 内蒙古自治区交通运输科技项目 (NJ-2022-13, NJ-2020-28)。

作者简介: 王稷良 (1978—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 高性能水泥基材料。

通信作者: 朱繁涛 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 大宗固废利用。

收稿日期: 2024-02-18

0 引言

我国的能源消费结构以煤炭为主,煤炭行业每年产生大量的工业固废,其中粉煤灰占 70% 左右^[1]。粉煤灰的累计堆积量逐年增长,但综合利用率较低,未处理的粉煤灰占用大量土地资源且易造成大气污染,同时也是一种资源的浪费。粉煤灰处置和利用是国内目前亟待解决的环境问题之一。

粉煤灰中含有大量的铝硅酸盐相,化学组分与水泥类似,是一种具有潜在活性的重要胶凝材料^[2-3]。采用粉煤灰替代水泥可在一定程度上提高粉煤灰的利用率。然而粉煤灰颗粒表面的玻璃体致密且性质稳定,用于胶凝材料需采用机械粉磨、化学激发等手段进行活化处理,导致粉煤灰的早期水化程度和水化速率相比于水泥较低,传统混凝土材料在大量掺加粉煤灰的情况下易出现强度降低和耐久性变差等问题,因而不利于粉煤灰规模化消纳^[4-6]。气泡轻质土制备技术从国外引进以来,通常用于强度要求较低的大规模工程回填。目前制备气泡轻质土所使用的胶凝材料主要为水泥,并添加了大量化学外加剂,高昂的成本限制了其在建筑行业的实际应用^[7-8]。不同于传统混凝土材料,气泡轻质土中大量掺加粉煤灰不仅对力学性能影响较小,还有利于改善工作性能^[9-10]。相关研究^[11-12]表明,使用粉煤灰生产的气泡轻质土具有三个方面的优点:一是可减少水泥和水用量,降低气泡轻质土的水胶比,增强其施工性能和后期强度,提高力学性能、工作性能和耐久性能;二是粉煤灰的堆积密度较低且与气泡间的相容性较好,能够减轻结构自重,提高气泡轻质土的整体稳定性^[13];三是粉煤灰能够提升胶凝材料的和易性,减少固化材料和化学外加剂的用量,从而降低生产成本^[14]。

粉煤灰应用于气泡轻质土中有利于缓解大量堆积带来的一系列问题,同时也是降低气泡轻质土成本的有效途径。为进一步揭示粉煤灰的特性对气泡轻质土性能的影响规律,全面分析并总结了粉煤灰影响气泡轻质土性能的主要因素,阐明粉煤灰的颗粒特征、化学组分以及火山灰活性等特性与气泡轻质土性能之间的联系,以期粉煤灰高效绿色利用提供参考。

1 粉煤灰的特性

1.1 颗粒特征

粉煤灰颗粒多数呈球状,球体表面相对光滑,部分颗粒由微球、不规则碎屑和多孔结构的残碳颗粒组成,微观结构^[15]如图 1 所示。粉煤灰颗粒粒径大小不一,呈以对数为自变量的正态分布特征,粒径范围大致在 1~100 μm 之间,还有少量粒径在 100 μm 以上,但通常小于 75 μm ,而我国粉煤灰平均粒径小于 20 μm ,具有较低的堆积密度 0.54~0.86 g/cm^3 和高比表面积 300~500 kg/m^2 ^[16]。粉煤灰的表观颜色由浅入深依次有灰白色、黄色、橙色和深红色等,主要原因在于粉煤灰中铁元素和未燃尽的残碳含量不同。粉煤灰 pH 值从 1.2 至 12.5 不等,大多数偏碱性^[17]。

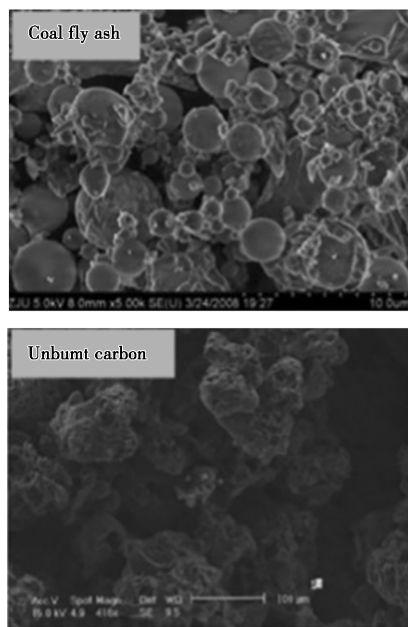


图 1 粉煤灰原灰和残碳颗粒的 SEM 微观形貌图
Fig. 1 SEM images of coal fly ash and unburnt carbon

1.2 化学组分

粉煤灰的化学组分受原料和生产方式的不同而差异很大,进而影响了粉煤灰基气泡轻质土的性能。原煤一般有烟煤、次烟煤、无烟煤和褐煤四种类型,生产方式大致可分为固态排渣、液态排渣和循环流化床。虽然原煤和生产方式引起粉煤灰中金属氧化物的质量百分比在一定范围波动,且 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 CaO 在粉煤灰中占比很大^[18-19]。粉煤灰中

材料科学

无定形的玻璃基质占大部分,并含有少许 Fe、Ca 和 Mg 等金属氧化物组成的矿物质和微量残碳^[20]。罗少慧^[21]利用 X 射线衍射 (XRD) 分析低钙粉煤灰矿物组成并将角度调整到 2θ 角为 $22^\circ \sim 35^\circ$, 结果发现, 石英和莫来石的衍射峰较为明显, 含量较多, 钙长石 (Anorthite, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) 和其他矿物质衍射峰强度偏低, 含量较少, 如图 2 所示。美国材料与试验协会按照粉煤灰中主要金属氧化物含量和烧失量不同将粉煤灰分为两大类, SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的质量分数高于 70% 且 CaO 的质量分数介于 1% ~ 12% 之间被划分为 F 级粉煤灰, SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的质量分数高于 50% 且低于 70%, CaO 的质量分数达到 30% ~ 40% 被划分为 C 级粉煤灰^[22]。大量研究^[23-25]表明, F 级粉煤灰的火山灰活性较高, 能够与水泥发生二次水化反应, C 级粉煤灰钙含量较高, 凝结时间随钙含量增加而减少, 早期强度相对较高。在我国 GB/T 1596—2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》技术规范中, 以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 总质量分数, 45 μm 方筛筛余量和烧失量等参数将粉煤灰划分为 I 级、II 级和 III 级三种类型。

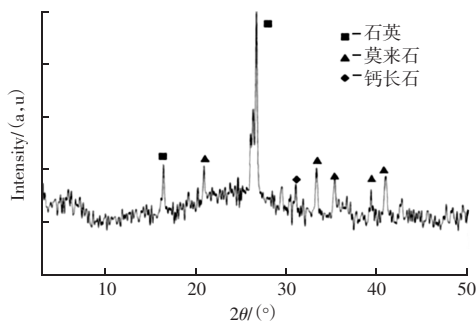


图 2 粉煤灰 X 射线衍射 (XRD) 图谱

Fig. 2 X ray diffraction (XRD) pattern of fly ash

1.3 火山灰活性

颗粒级配是影响粉煤灰火山灰活性的一个重要因素, 粉煤灰颗粒细度与表面能有着直接关系, 颗粒平均粒径越小表明表面能越大, 粉煤灰水化反应能力越强。粉煤灰经过球磨机和立磨机粉磨均可增大颗粒比表面积, 增加颗粒与水的接触面, 加快粉煤灰水化反应速率^[26]。同时, 玻璃微珠经过粉磨可以破坏致密且性质稳定的外层结构, 使活性较高的内层结构水化反应更加充分^[27]。

从化学成分看, 粉煤灰的火山灰活性主要取决于各个金属氧化物的含量, SiO_2 和 Al_2O_3 质量分数越

大, 粉煤灰火山灰活性越强, 参与水泥水化二次反应生成的 C-S-H 和 C-A-H 胶凝材料越多^[28-29]。化学激发法是激发粉煤灰活性的另一种方法, 通常利用化学激发剂破坏粉煤灰中金属氧化物的结构, 生成新的物质或使玻璃体表面性质发生变化。强酸、强碱、硫酸盐和氯盐等是常见的化学激发剂, 化学激发机理一般认为是化学激发剂促使 Si-O 和 Al-O 键断裂, 从而激发粉煤灰的活性^[30]。

粉煤灰中含有大量的玻璃体, 粉煤灰中常见的玻璃基质有石英 (Quartz, SiO_2) 和莫来石 (Mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), 这两种物质是粉煤灰火山灰活性的主要来源^[31]。此外, 由 Si、Al 元素组成的玻璃体结构要发生水化反应必须先破坏氧化物的化学键, OH^- 离子浓度越高化学键破坏进程越快, 因此, 粉煤灰在强碱环境下能够表现出更强的火山灰活性。

2 粉煤灰特性对气泡轻质土性能的影响

2.1 吸水率

气泡轻质土的吸水率与孔隙率密切相关, 当工程结构处于水位以下, 水分子将填充部分孔隙, 削弱了轻质的特性, 同时引起毛细孔应力集中, 不利于无侧限抗压强度, 粉煤灰可以调节水泥基材料的性能, 因此也可优化气泡轻质土的吸水率。杨卫东等^[32-33]分别采用内掺法和外掺法将粉煤灰按一定比例掺入气泡轻质土, 研究发现内掺 10% (质量分数) 的粉煤灰可使气泡轻质土吸水率降到最低, 掺量超过 10% (质量分数) 后吸水率增大; 梁朋涛^[34]研究粉煤灰等质量替代水泥对气泡轻质土性能影响时发现, 掺入 25% ~ 45% (质量分数) 的粉煤灰时, 气泡轻质土的吸水率明显提升, 掺量介于 50% ~ 70% (质量分数) 时, 提升趋势逐渐减缓; Kearsley 等^[35]得出不同结论, 即影响气泡轻质土吸水率的主要因素是其干密度和孔隙率, 适当提高气泡轻质土的干密度并降低孔隙率可以减小吸水率, 粉煤灰对气泡轻质土吸水率的影响效果较小。通常认为, 其他矿物掺合料能够弥补粉煤灰自身缺陷, 复合掺合料气泡轻质土的性能提升更加显著。叶武平等^[36]对比了粉煤灰和矿粉不同添加比例制备的 4 批气泡轻质土的吸水率, 试验结果显示, 复合掺合料 (矿粉和粉煤灰比例为 0.8:1) 比单掺粉煤灰的气泡轻质土降低吸

水效果更加明显,吸水率减少 4.3%。

值得注意的是,粉煤灰在合适的掺量下可以降低气泡轻质土的吸水率,但粉煤灰单掺对降低气泡轻质土吸水率程度有限,一方面是由于大量掺加粉煤灰导致胶凝材料内部摩擦力增大,在搅拌过程中气泡破裂或合并成大气泡,气泡轻质土中孔径增大、连通孔和有害孔数量增多;另一方面,粉煤灰相比水泥具有较高的比表面积和极细的颗粒,需水量较大决定了粉煤灰基气泡轻质土吸水率高的特点。为此,通过对粉煤灰改性或和其他掺合料复掺实现对气泡轻质土吸水率的优化将是研究者关注的重点。

2.2 流动度

流动度是气泡轻质土和易性的重要表征,流动度过小会加大实际施工难度,流动度过大将直接导致气泡轻质土体积稳定性不良^[37]。李驰等^[38]探究了胶凝材料流动度对气泡轻质土整体稳定性的影响,发现掺入粉煤灰并调节减水剂的掺量可以优化气泡轻质土的流动度,当减水剂掺量为 0.88% 时浆体流动度能够达到 407 mm,气泡轻质土的整体稳定性最好。粉煤灰的形态效应是增强气泡轻质土流动度的主要来源;马军涛等^[26]比较了球磨机粉磨 1 和 2 h 以及立磨机粉磨之后的粉煤灰对气泡轻质土流动度性能的影响程度,发现各组粉煤灰掺量为 30% (质量分数) 时流动度最高,对照组气泡轻质土的流动度 (151.33 mm) 优于球磨机粉磨 2 h 后的流动度 (119.14 mm);陈盟等^[39]利用循环流化床处理粉煤灰制备气泡轻质土,作为对比样,在相同的条件下使用未处理的粉煤灰掺入气泡轻质土,通过对比发现气泡轻质土掺入 50% (质量分数) 经过循环流化床处理粉煤灰的流动度 (144 mm) 低于相同掺量但未经处理粉煤灰的流动度 (161 mm),降低了约 10%。

粉煤灰的颗粒呈球形且表面光滑是其提高气泡轻质土流动性的关键因素,但经过特殊处理后可以改变颗粒形态,增强火山灰活性,对气泡轻质土无侧限抗压强度提升效果显著,但牺牲了流动性,不利于气泡轻质土整体的工作性能。同时,减水剂通常被用来改善混凝土的流动性,同样适用于水泥基气泡轻质土,通过调整减水剂和粉煤灰的掺量以及水灰比优化气泡轻质土的流动性仍然是目前研究的

热点。

2.3 干密度

粉煤灰掺量对气泡轻质土干密度有一定的影响。刘军等^[40]测试了同一水胶比情况下气泡轻质土掺入不同质量分数粉煤灰的干密度值,结果表明,气泡轻质土的干密度随粉煤灰掺量增加而降低;马永炯等^[41]采用正交试验研究了粉煤灰气泡轻质土干密度的变化规律,其影响因素由大到小依次是水胶比 > 胶粉 > 粉煤灰;Zhang 等^[42]研究了粉煤灰掺量范围为 10%~60% 时对气泡轻质土的干密度的影响规律,结果表明,当粉煤灰掺量为 40% 时干密度值最小 (336 kg/m³)。

粉煤灰的表观密度小于水泥,利用粉煤灰替代部分水泥可以在一定程度上降低气泡轻质土的干密度,具体掺量应综合考虑水胶比、粉煤灰种类以及其他因素的影响。粉煤灰掺量过大导致流动度降低,摩擦阻力增大易使气泡破裂,不利于气泡轻质土的轻质性,因此干密度是提高粉煤灰在气泡轻质土中的利用率的重要因素。

2.4 孔隙率和孔隙结构

通常认为粉煤灰具有提高胶凝材料水化产物密实度和优化孔隙的能力,也意味着掺加粉煤灰可以改善气泡轻质土的孔隙率和孔隙结构。嵇鹰等^[43]将掺量为 20%、40%、60% 的 II 级粉煤灰分别等质量替代水泥掺入气泡轻质土,结果如图 3 所示,40% 掺量的粉煤灰气泡轻质土多害孔区域 (区域 IV) 的最大孔径相对最小,最大有害孔孔径为 829.0 nm;吴丽曼等^[44]探讨了粉煤灰掺量与气泡轻质土性能之间的关系,研究发现当粉煤灰掺量为 10%~20% 时,可以优化气泡轻质土的孔隙结构,但随着粉煤灰掺量增大,孔隙率随之降低;庞超明等^[45]利用 X-CT 技术分析了气泡轻质土孔隙结构受粉煤灰特性影响的规律,研究发现粉煤灰能够改善气泡轻质土孔隙的形状因子,优化孔径结构。粉煤灰不同的加工工艺也会间接影响气泡轻质土的孔隙率和孔隙结构;Li 等^[46]利用湿磨工艺加工粉煤灰用于制备气泡轻质土,试验发现湿磨粉煤灰可以优化气泡孔径,有利于气泡均匀分布,掺入 40% 粉煤灰相比纯水泥气泡轻质土的平均孔径减小 3.82 μm 。

材料科学

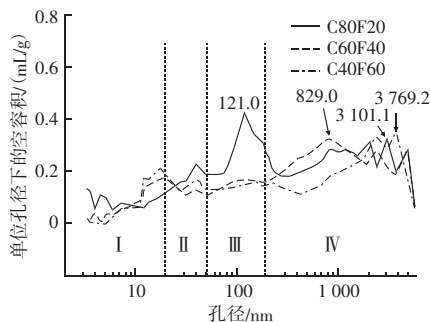


图3 粉磨后二级粉煤灰气泡轻质土的微观孔隙分布
Fig.3 Microscopic pore distribution of secondary fly ash lightweight foamed concrete after grinding

粉煤灰与气泡相容性较好,利用粉煤灰制备气泡轻质土不仅能够优化气泡轻质土孔隙率和孔隙结构,同时还可以改善孔隙的形状因子,使孔隙分布更加均匀。然而,不同种类粉煤灰的特性不同,对气泡轻质土孔隙率和孔隙结构的影响效果也存在差异,这主要取决于粉煤灰的颗粒粒径分布范围和火山灰活性。

2.5 无侧限抗压强度

粉煤灰掺入量是影响气泡轻质土无侧限抗压强度的关键因素之一。陈朋等^[47]使用不同掺量粉煤灰研究气泡轻质土的力学性能,发现气泡轻质土的抗压强度随粉煤灰掺量增加先增大后减小。说明粉煤灰对气泡轻质土抗压强度的提升有一个最佳掺量,但粉煤灰具有消泡效应,掺量超过某一数值会造成气泡轻质土稳定性降低,不利于气泡轻质土性能的提升。刘军等^[40]分别对比了5种掺量的Ⅱ级粉煤灰气泡轻质土性能,发现粉煤灰掺量介于25%~35%(质量分数)之间时气泡轻质土的抗压强度随粉煤灰掺量增加而降低,且下降趋势显著,而粉煤灰掺量介于35%~45%之间时,气泡轻质土的抗压强度虽然随掺量增加继续下降,但强度差值逐渐减小;此外,Abd等^[48]还发现粉煤灰降低了胶凝体系前期水化速率,不利于气泡轻质土前期抗压强度,但同时也减少了终凝后干缩,减少干缩引起孔隙结构的改变,与未参加粉煤灰气泡轻质土相比后期强度相差不大。值得注意的是,粉煤灰掺量过高导致浆体材料前期水化速率缓慢,浆体的重量大于气泡的表面张力,严重情况下会发生塌模现象。陈钊等^[49]分析了两种湿密度(537和582 kg/m³)条件下添加不同掺量气泡轻质土的力学性能,未掺入粉煤灰且湿密度高的

样品强度最高,28 d无侧限抗压强度为1.4 MPa;掺入35%粉煤灰且干密度低的样品强度最低,28 d无侧限抗压强度仅为0.75 MPa。

粉煤灰和矿物掺合料的类别也是影响气泡轻质土无侧限抗压强度的重要原因。嵇鹰等^[43]分别对比了未经处理的一级粉煤灰和粉磨之后的二级粉煤灰对气泡轻质土抗压强度的影响,结果表明,在掺入粉煤灰比例相同时掺入一级粉煤灰的气泡轻质土抗压强度高于粉磨后二级粉煤灰气泡轻质土,在粉煤灰替代40%质量的水泥时,密度为600和1200 kg/m³的粉磨处理后二级粉煤灰气泡轻质土抗压强度分别为掺入一级粉煤灰气泡轻质土的44.5%和73.6%。除了粉煤灰外,其他矿物掺合料也被用于气泡轻质土制备,陈金威等^[50]将粉煤灰、矿粉、矿渣和高岭土四种掺合料分别按相同质量分数替代水泥掺入气泡轻质土,分析不同掺合料对气泡轻质土抗压强度的影响程度,结果表明,掺入粉煤灰的气泡轻质土28 d抗压强度都高于其他三种,但粉煤灰和其他矿物掺合料复掺的气泡轻质土抗压强度性能提升更加显著。

根据大量学者研究数据评估,粉煤灰在合适的掺量范围内有利于提高气泡轻质土的抗压强度,火山灰活性和微骨料效应是其强度的主要来源,粉煤灰具有很强的火山灰活性, SiO₂和 Al₂O₃与水泥水化产物 Ca(OH)₂反应生成 C-S-H 和 C-A-H,增强胶凝材料整体强度,由于气泡轻质土孔隙数量较多,粉煤灰可以充分发挥微骨料效应,增强气泡轻质土稳定性,但掺量过大会导致体积稳定性不良和塌模现象的发生,导致气泡含量降低且分布不均匀,强度反而降低。在相同的条件下,粉煤灰较于其他矿物掺合料对气泡轻质土无侧限抗压强度的提升效果更为显著,但粉煤灰单掺对气泡轻质土无侧限抗压强度提升有限。

2.6 抗硫酸盐侵蚀性能

气泡轻质土抗硫酸盐侵蚀性能与普通混凝土相似,硫酸根离子与水泥水化产物生成石膏和钙矾石,早期可以增加气泡轻质土的质量和强度,随着反应的进行,反应产物在孔隙中膨胀致使气泡轻质土开裂,添加适量粉煤灰可以增强抗硫酸盐侵蚀性能。张经双等^[51]通过抗压强度和劈裂抗拉强度表征不同

掺量粉煤灰对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响,结果表明,掺加粉煤灰有利于混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的提升,随着粉煤灰掺量增加,混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度先提升后降低,15%掺量的粉煤灰混凝土150 d 分别提升17.6%和21%,气泡轻质土抗硫酸盐侵蚀变化规律与普通混凝土相同;余意^[52]利用灰色系统理论对粉煤灰气泡轻质土抗硫酸盐侵蚀性能进行模拟,研究发现9组试验的模拟值与试验值平均相对误差为2.099%,证明了GM(1,1)模型预测结果较为准确,随着硫酸盐侵蚀时间的增加,气泡轻质土的抗压强度和质量先增大后减小,与普通混凝土相比变化幅度较大。粉煤灰能够增强气泡轻质土抗硫酸盐侵蚀性能。

与纯水泥气泡轻质土相比,利用粉煤灰制备气泡轻质土增强了抗硫酸盐侵蚀性能,减少了水化热,同时降低了生产成本,提高了对固体废物有效利用。但随着粉煤灰掺量增加,提升气泡轻质土抗硫酸盐性能效果逐渐变差,不利于粉煤灰大规模应用,将抗硫酸盐性能较强的矿渣和粉煤灰进行复掺是一条改善途径,不断优化和探索多种矿物掺合料复掺提高气泡轻质土性能,进一步提升粉煤灰综合利用率。

2.7 抗冻性能

陈钊等^[49]将Ⅱ级F类粉煤灰加入气泡轻质土替代30%质量的水泥,发现气泡轻质土早期质量随着冻融循环次数增加略有增长,但后期质量显著降低。为了提高气泡轻质土的抗冻性能,魏向明^[53]通过粉煤灰、矿渣双掺制备了高性能气泡轻质土,研究表明随着粉煤灰掺量增大,气泡轻质土质量损失率先小幅度提升然后大幅度下降,且粉煤灰对气泡轻质土抗冻性能的影响效果较小,适量添加矿渣可以提高冻融循环次数,增强抗冻性能。微裂缝数量也是气泡轻质土抗冻性能评价方法之一。陈品明等^[54]采用温度区间为-10~10℃、每4h一个循环的方式测试了气泡轻质土的抗冻性能,实验结果表明,随着冻融循环次数增加,微裂缝数量在冻融循环100次之前基本没有变化,在100次之后微裂缝数量增长相对明显;抗压强度随着冻融循环次数增加表现出先增大后降低的趋势。孔隙中的水一部分被用于粉煤灰和水泥水化,小孔隙未形成足够的结晶压,因此,微裂缝发展缓慢并且能够略微提升抗压强度。与单

掺粉煤灰相比,砂和粉煤灰复掺可以显著降低气泡轻质土在冻融循环下质量和强度的损失,随着气泡轻质土容重增加,损失率的差值逐渐减少^[55]。

相对气泡轻质土其他性能而言,粉煤灰对气泡轻质土抗冻性能的影响研究仍相对较少,对改善抗冻性能以调节粉煤灰掺量以及粉煤灰和其他掺合料复掺为主,但仍然难以达到预期目标,未来需进一步深入探索粉煤灰和其他矿物掺合料复掺对气泡轻质土提高抗冻性能的影响规律,揭示复掺的改善机理,为粉煤灰在气泡轻质土大规模应用提供理论依据。

3 结论

粉煤灰具有的形态效应、微集料效应和火山灰效应有利于增强气泡轻质土的和易性以及整体稳定性,是提高气泡轻质土性能的关键组分,尤其是对流动度、无侧限抗压强度和抗硫酸盐侵蚀提升效果显著。从粉煤灰的特性及其对气泡轻质土的性能影响因素进行综合分析,可以得到以下结论:

(1) 粉煤灰微观结构呈表面光滑的球状玻璃体,在化学组成上以硅、铝氧化物为主,具有潜在的火山灰活性,可用于制备高性能和绿色环保的工程材料。

(2) 适量的粉煤灰可以增强气泡轻质土的流动度,抑制气泡消散或小气泡合并成大气泡,以此减少连通孔和有害孔的数量,优化孔隙结构并降低吸水率和干容重,同时粉煤灰具有较低的堆积密度也是其能够制备气泡轻质土的重要原因之一。

(3) 粉煤灰的前期水化速率较慢,大多作为微集料填充在孔隙和裂缝中,未反应的粉煤灰通常与氢氧化钙和硫酸盐等进行二次反应,生成的水化产物可以优化孔隙结构并修补微裂缝,进一步改善气泡轻质土的力学性能和耐久性能。

(4) 粉煤灰的特性受原煤种类和处理方式的不同差异较大,导致其制备的气泡轻质土在性能上具有一定的波动性,在一定程度上影响大规模应用和推广。相比单一固废利用,多种固废协同处置和利用方法更有利于粉煤灰等固体废弃物的规模化和高值化利用。

材料科学

参 考 文 献

- [1] 何翔, 乔险涛, 喻鹏, 等. 工业固废粉末对自密实高性能混凝土性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (11): 4017 - 4026.
- [2] 马鹏传, 李兴, 温振宇, 等. 粉煤灰的活性激发与机理研究进展 [J]. 无机盐工业, 2021, 53 (10): 28 - 35.
- [3] 孙志高, 吴渊, 杨兴春, 等. 富镁镍渣 - 粉煤灰地质聚合物的制备及性能 [J]. 无机盐工业, 2023, 55 (11): 139 - 146.
- [4] 常瑞祺, 张建波, 李会泉, 等. 煤基固废制备胶凝材料研究进展及应用 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30 (2): 316 - 330.
- [5] 李静静, 陈超衍, 王淑萍, 等. 湿拌粉煤灰地聚物凝结硬化性能影响因素研究 [J]. 非金属矿, 2022, 45 (1): 5 - 8.
- [6] 尹道道, 秦哲焕, 郭城瑶, 等. 机械粉磨矿物掺合料对胶砂力学性能的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (4): 98 - 103.
- [7] 高巧玲, 范功端. 固体废弃物在轻质泡沫混凝土中应用研究进展 [J]. 武汉工程大学学报, 2021, 43 (5): 539 - 545.
- [8] 高英力, 肖敏强, 关宏信. 气泡混合轻质土及其在公路工程中的应用研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35 (8): 2432 - 2438.
- [9] 曹启坤, 景昊星, 李豪. 基于响应曲面法的粉煤灰泡沫混凝土配合比优化 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (4): 1427 - 1435.
- [10] 郑晓芳, 李霖霖, 齐恩磊, 等. 轻质粉煤灰泡沫混凝土的制备及性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (2): 107 - 111.
- [11] 宋强, 张鹏, 鲍玖文, 等. 泡沫混凝土的研究进展与应用 [J]. 硅酸盐学报, 2021, 49 (2): 398 - 410.
- [12] 宋安祥, 郭远臣, 王雪, 等. 泡沫混凝土研究新进展与应用现状 [J]. 混凝土, 2018 (9): 152 - 156.
- [13] 区钰妍, 潘卫东, 郭文瑛. 新拌泡沫混凝土稳定性影响因素研究进展 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (10): 135 - 140, 164.
- [14] 李猛, 黄寅生, 张少波, 等. 泡沫混凝土的研究进展及展望 [J]. 材料导报, 2016, 30 (增刊1): 402 - 405.
- [15] XING Y W, GUO F Y, XU M D, et al. Separation of unburned carbon from coal fly ash: A review [J]. Powder Technology, 2019, 353 (5): 372 - 384.
- [16] 赵学松, 刘琦. 煤基固体废弃物制备压裂支撑剂研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29 (6): 161 - 172.
- [17] 胡少军. 改性粉煤灰对重金属吸附及钝化效果研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
- [18] 陈旭红, 苏慕珍, 殷大众, 等. 粉煤灰分类与结构及活性特点 [J]. 水泥, 2007 (6): 8 - 12.
- [19] 高建明, 杜宗沅, 郭彦霞, 等. 综合利用粉煤灰制备莫来石系列材料研究进展及展望 [J]. 洁净煤技术, 2021, 27 (3): 36 - 47.
- [20] 孙红娟, 曾丽, 彭同江. 粉煤灰高值化利用研究现状与进展 [J]. 材料导报, 2021, 35 (3): 3010 - 3015.
- [21] 罗少慧. 粉煤灰基矿物聚合材料的制备及其显微结构研究 [D]. 淄博: 山东理工大学, 2013.
- [22] 王建新, 李晶, 赵仕宝, 等. 中国粉煤灰的资源化利用研究进展与前景 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (12): 3833 - 3841.
- [23] 黄伟. 矿物掺合料对超高性能混凝土的水化及微结构形成的影响 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [24] 邓恺, 黎红兵, 张林涛. 利用固体废弃物制备磷酸镁水泥基复合材料的研究进展 [J]. 粉煤灰综合利用, 2019 (6): 101 - 104.
- [25] 余春松, 张玲玲, 郑大伟, 等. 固废地质聚合物的研究及其应用进展 [J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52 (4): 529 - 546.
- [26] 马军涛, 王大广, 陈浩, 等. 磨细粉煤灰粉磨制度对其水化行为和强度的影响分析 [J]. 混凝土, 2021 (1): 94 - 97.
- [27] 聂铁苗, 刘淑贤, 牛福生, 等. 粉煤灰研究进展及展望 [J]. 混凝土, 2010 (4): 62 - 65.
- [28] GRZEGORZ L G. The Role of Pozzolanic Activity of Siliceous Fly Ash in the Formation of the Structure of Sustainable Cementitious Composites [J]. Sustainable Chemistry, 2022, 3 (4): 520 - 534.
- [29] EŠTOKOVÁ A, HOLOSOVA M. Study of Pozzolanic Activity of Selected Waste Materials [J]. Advances in Science and Technology, 2023, 68 (7): 93 - 99.
- [30] 朱绘美, 张煜雯, 李辉. 超细粉煤灰和减水剂对 AAFA 胶凝材料常温性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26 (4): 419 - 428.
- [31] 陈永亮, 张铁轲, 陈铁军, 等. 碱激发高钙粉煤灰发泡地聚合物的制备及机理 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (8): 2787 - 2798.
- [32] 杨卫东, 黎冰, 马文昊. 降低气泡混合轻质土吸水性的试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42 (5): 1061 - 1068.
- [33] 马文昊. 气泡混合轻质土的吸水特性研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [34] 梁朋涛. 气泡轻质土的力学性能及耐久性的试验研究 [D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2018.
- [35] KEARSLEY E P, WAINWRIGHT P J. Porosity and permeability of foamed concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31 (5): 805 - 812.
- [36] 叶武平, 曹力强, 梁瑞华, 等. 防水抗渗泡沫混凝土的制备及在墙板中的应用 [J]. 混凝土, 2021 (4): 122 - 124, 128.
- [37] 梁荣伟. 泡沫轻质土在高速公路改扩建工程中的应用研究 [J]. 公路工程, 2022, 47 (4): 124 - 130.
- [38] 李驰, 方从启. 料浆流动度对双氧水泡沫混凝土浆体稳定性的影响 [J]. 新型建筑材料, 2015, 42 (8): 1 - 4.
- [39] 陈盟, 周明凯, 王杰, 等. 循环流化床飞灰对泡沫混凝土性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (7): 2447 - 2457.

- [40] 刘军, 齐玮, 刘润清, 等. 粉煤灰对泡沫混凝土物理力学性能的影响 [J]. 材料导报, 2015, 29 (16): 111–114.
- [41] 马永炯, 杨安, 洪芬, 等. 基于正交试验的泡沫混凝土配合比设计 [J]. 混凝土, 2021 (7): 147–150.
- [42] ZHANG D S, DING S, MA Y, et al. Preparation and Properties of Foam Concrete Incorporating Fly Ash [J]. Materials, 2022, 15 (18): 6287.
- [43] 嵇鹰, 张军, 武艳文, 等. 粉煤灰对泡沫混凝土气孔结构及抗压强度的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (11): 3657–3662.
- [44] 吴丽曼, 孙勇, 张晓莉, 等. 粉煤灰对超轻发泡混凝土孔结构及吸声性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33 (9): 2387–2392.
- [45] 庞超明, 王少华. 泡沫混凝土孔结构的表征及其对性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20 (1): 93–98.
- [46] LI G Y, TAN H B, HE X Y, et al. The influence of wet ground fly ash on the performance of foamed concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 304: 124676.
- [47] 陈朋, 惠冰, 孟凌霄, 等. 粉煤灰基气泡轻质土配合比和抗压强度研究 [J]. 公路与汽运, 2022 (5): 47–49, 61.
- [48] ABD ELRAHMAN M, EL MADAWY M E, CHUNG S Y, et al. Preparation and Characterization of Ultra – Lightweight Foamed Concrete Incorporating Lightweight Aggregates [J]. Applied Sciences, 2019, 9 (7): 1447–1458.
- [49] 陈钊, 刘勇, 刘晖, 等. 高性能粉煤灰泡沫轻质土性能试验及应用分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (4): 103–106, 117.
- [50] 陈金威, 刘勇, 石苏意, 等. 不同掺料泡沫轻质土的强度特性 [J]. 长沙理工大学学报 (自然科学版), 2016, 13 (4): 15–22.
- [51] 张经双, 朱建华, 朱敬斌. 粉煤灰对聚丙烯纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响 [J]. 煤炭技术, 2018, 37 (11): 118–120.
- [52] 余意. 聚丙烯纤维泡沫混凝土的力学性能及抗盐侵蚀性能试验研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2021.
- [53] 魏向明. 双掺粉煤灰矿渣泡沫混凝土性能试验研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [54] 陈品明, 曾嵘, 卞绍洋, 等. 路用泡沫混凝土长期耐久性研究 [J]. 新型建筑材料, 2018, 45 (7): 33–36.
- [55] SHE W, DU Y, ZHAO G T, et al. Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high – speed railway roadbeds [J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 153–16.

(上接第 22 页)

- [6] JIN C, WAN X, LIU P, et al. Stability prediction for asphalt mixture based on evolutionary characterization of aggregate skeleton [J]. Computer – Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2021, 36 (11): 1453–1466.
- [7] 刘国强. 沥青混合料主力链特性及骨架构成力学机理研究 [D]. 南京: 东南大学, 2023.
- [8] 杨昌栋. 压实过程沥青混合料细观骨架构造演变规律及稳定性评价 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2023.
- [9] 刘焕娇. 基于细观力学的颗粒类路面材料堆积行为与骨架结构研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [10] 彩雷洲, 李刚, 李翔, 等. 压实次数对沥青混合料骨架特征影响研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30 (2): 341–350.
- [11] 李微, 韩森, 黄啟波, 等. 细粒式薄表层沥青混合料中粗集料的骨架特性 [J]. 材料导报, 2019, 33 (4): 617–624.
- [12] 顾兴宇, 章天杰, 王晓威, 等. 一种评价沥青混合料矿料骨架强度的试验方法 [J]. 公路, 2018, 63 (6): 232–238.
- [13] DING X, MA T, ZHANG W, et al. Effects by property homogeneity of aggregate skeleton on creep performance of asphalt concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 171: 205–213.
- [14] MIRANDA H M B, BATISTA F A, Neves J, et al. Influence of the aggregate skeleton matrix and volumetric composition on the resistance of stone mastic asphalt to permanent deformation [J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22 (11): 2538–2551.
- [15] 程永春, 李赫, 李立顶, 等. 基于灰色关联度的矿料对沥青混合料力学性能的影响分析 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2021, 51 (3): 925–935.