

煤气化渣基吸附材料研究进展

邓琦

西安工程大学城市规划与市政工程学院, 陕西 西安 710048

摘要： 煤气化渣 (CGS) 是煤气化过程产生的固体废弃物，年排放量超6000万吨，根据灰渣排放方式和粒度，煤气化渣可分为细渣和粗渣。其堆存易引发大气污染，威胁土壤及水体生态风险，亟需资源化利用。CGS 主要成分为硅铝酸盐，具有丰富的孔隙结构和表面活性位点，是一种潜在的吸附材料。本文系统综述煤气化渣的理化特性及其在吸附领域的研究进展，并探讨未来发展方向。

关键词： 煤气化渣；吸附材料；资源化利用

Research Progress on Coal Gasification Slag Based Adsorbent Materials

Deng Qi

School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048

Abstract: Coal gasification slag (CGS) is a solid waste generated during the coal gasification process, with an annual emission of over 60 million tons. According to the ash discharge method and particle size, CGS can be divided into fine slag and coarse slag. Its storage can easily cause air pollution, threaten soil and water ecological risks, and urgently require resource utilization. The main component of CGS is aluminosilicate, which has rich pore structure and surface active sites, making it a potential adsorbent material. This article provides a systematic review of the physicochemical properties of coal gasification slag and its research progress in the field of adsorption, and explores future development directions.

Keywords: coal gasification slag; adsorbent material; resource utilization

引言

煤炭气化工工艺作为实现煤炭资源清洁转化与高效利用的核心技术路径，已深度融入现代煤化工产业体系。气化过程中同时会产生大量的煤气化渣（CGS），其主要成分为非晶态铝硅酸盐，并夹杂着石英、方解石等晶相。根据统计数据，每年全国煤气化过程中产生的渣滓总量可达数8000万吨。这些废弃物的大规模堆积不仅占用大量土地资源，还可能对土壤、水体及大气环境构成潜在威胁。鉴于此，研究 CGS 的有效处理方法已成为当务之急。CGS 中含有多种有价值的元素和化合物，如金属、稀土元素、矿物质等。通过合理的处理和提取技术，可以将这些有价值的成分回收利用，实现 CGS 的资源化处理。基于煤气化渣的高比表面积特性与多级孔道结构优势，其在吸附领域展现出重要的固废资源化应用价值，特别是在实现双碳战略目标背景下具有显著的环境经济效益。

一、煤气化渣的基本性质

煤气化渣可分为粗渣和细渣两种。粗渣主要通过气化炉出口排放，占60%至80%。细渣主要来自合成气除尘设备，占总量的20–40%。其灰分主要由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 Fe_2O_3 构成^[1]，通常 SiO_2 含量最高，其次是 Al_2O_3 。赵永彬等^[2]发现宁煤集团采用的三种不同煤气化技术生成的粗渣的主要化学成分包括 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 C 、 SiO_2 和 CaO 。宋瑞领等^[3]研究了陕西煤在多喷嘴对置式水煤浆气化炉中生成的粗渣和细渣，发现 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 CaO 的总含量均超过85%。CGS 中多孔碳质颗粒多为不定型，无机颗粒多为球形或不规则形状，这些球形颗粒的主要矿物成分是硅和铝元素。

二、煤气化渣的应用

（一）建工建材方面的应用

煤气化渣主要用作建材原料，包括水泥掺料、混凝土辅料、砌块基材及路基填料等。谢海巍等^[4]研究了掺入不同比例粉煤灰和煤气化渣的水泥胶砂试件在各龄期的力学强度，发现粗渣可替代5%质量分数的水泥作为矿物掺合料，而细渣不适合直接用作矿物掺合料。吕生华等^[5]研究发现，含60%煤化工固废的混凝土28 d 抗压强度超过40 MPa，而含80%固废的混凝土28 d 抗压强度超过30 MPa，且两者均表现出优异的抗渗水性和抗干缩性能。武立波等人^[6]系统研究了煤气化粗渣作为改良材料对季节性冻土区黄土力学性能的影响；采用15%质量分数的粗渣掺量进行配比

试验,通过监测冻胀变形与融沉特性等关键指标发现:经过5次完整的冻融交替作用后,试样表现出0.38 %的平均冻胀变形率和0.17 %的特征融沉系数,有效调控土体在冻融作用初期的体积稳定性。

然而,煤气化渣的建筑应用仍主要限于实验室研究。未来需加强基础研究,优化处理工艺,建立技术标准,提升工程适用性。

（二）农业方面的应用

根据煤气化渣的特性,它对改善土壤的物理和化学性质以及保存有机肥料有重大影响。冷峥^[7]采用化学浸渍法对KOH活化处理的煤气化残渣进行改性,通过FeCl₃溶液负载铁元素制备Fe⁺GFS复合材料,该材料可有效固定土壤中的镉、砷污染物,同时实现工业固体废弃物的资源化利用。煤气化渣作为土壤改良剂可显著提升作物产量,同时改善土壤理化性质并促进养分循环,实现农业增产与固废资源化的双重效益。研究表明,将煤气化渣与沙质土壤混合有利于沙三叶草的生长。

（三）吸附方面的应用

基于其独特的物理化学特性,如较高的比表面积、丰富的多孔结构及残留碳组分,气化渣在环境污染治理领域展现出显著的吸附性能,尤其适用于废气净化等应用场景。元宁等^[8]以煤气化细渣为碳源,通过最佳制备工艺获得活性炭,并将其应用于CO₂吸附,298 K下的CO₂吸附量为20.63 cm³/g,计算15/85的CO₂/N₂混合气体的吸附选择性为38.5。

煤气化渣经改性处理后形成的吸附材料对水体中的磷酸根离子及氨氮具有显著的去除效能。涂亚楠等^[9]采用碱融水热法制备的复合多孔材料是以P型沸石为主要晶相的沸石结构。实验结果表明,在初始NH₄⁺浓度为100 mg/L、吸附反应持续5 h的条件下,该材料对NH₄⁺的饱和吸附容量可达15.65 mg/g。

煤气化渣对废水中的重金属离子有良好的去除能力,Wagner等人^[10]发现,残碳具有较大的比表面积和微孔。经过进一步加工,生产出了活性炭/沸石复合材料,对水溶液中的亚甲基蓝和Cr³⁺重金属都有很好的吸附能力。

由煤气化渣制成的吸附材料也能有效去除废水中的染料污染物。于希豪等^[11]对煤气化渣进行酸、碱改性,考察了其对水中亚甲基蓝(MB)的吸附性能。结果表明,酸活化后增大了CGFS的孔尺寸,碱活化后使CGFS产生了更多微孔,对MB的吸附性能明显提高,最高可达159.92 mg/g。

三、煤气化渣基吸附材料

（一）介孔二氧化硅材料

煤气化固体残渣中富含多种金属元素,需经预处理方可获得高纯度二氧化硅。刘硕^[12]的研究表明,经脱碳及酸浸工艺处理后的气化灰可形成具有介孔特性的二氧化硅微球。实验数据显示,

当采用16%浓度的盐酸溶液时,所制备的介孔二氧化硅材料展现出优异的孔隙特性,其比表面积达到364m²/g,孔容为0.34cm³/g。何绪文等^[13]针对气化炉渣中重金属的提取,系统比较了硫酸硝酸盐法、水平振荡法及醋酸缓冲液法的处理效果。实验结果表明,在这三种溶解方法中,醋酸缓冲液法对重金属的去除效率最为显著,展现出最优的污染物脱除性能。

（二）高分子复合材料

张久朋等^[14]以煤气化渣为原料,成功合成了一种具有除臭功能的固体材料(CGFS-F)。该除臭剂能有效吸附聚丙烯(PP)树脂上的挥发性有机化合物(VOCs),并能使聚丙烯树脂上的VOCs挥发量减少67.6%。张今壹^[15]将煤气化细渣制成多孔微珠(ATCM),与Ag@CM、聚丙烯(PP)混合制得了性能优异的抗静电聚合物基复合材料。实验数据显示,当ATCM添加量为20%质量分数时,所得ATCM@PP复合体系呈现4.93×10⁹Ω·cm的体积电阻率,同时保持29.03MPa的拉伸强度,展现优异的抗静电性能、导热系数及机械强度。

（三）沸石、活性炭及其复合材料

煤气化细渣含碳量高,孔隙结构发达,可利用活化和酸碱转化等方法生产性能优异的吸附材料。马东坡^[16]以硅铝含量高的CGFS制备A型沸石,改性前后A型沸石五次再生循环后,对甲基蓝、结晶紫、臧红T等染料吸附能力约为初始吸附量的80%。Miao等人^[17]采用KOH活化法制备了煤气化渣基活性炭,其比表面积高达1.187 m²/g,孔隙率为0.89 cm³/g,CO₂吸附能力为4.01 mmol/g。Shu等^[18]以CGFS为前驱体,成功制备了炭-沸石复合吸附材料(CZ-1.0)。该材料对亚甲基蓝(MB)表现出显著的吸附性能,100 mg/L MB溶液的吸附容量达到137.5 mg/g,同时具备优异的循环再生特性。

四、现存问题

当前煤气化渣基吸附材料的应用面临三大问题:(1)吸附容量有限,即便采用酸浸、胺基功能化等改性手段,其最佳CO₂吸附量仍不及商业金属有机框架材料,这主要归因于孔隙结构单一和活性位点密度低;(2)循环稳定性不佳,在高温再生时,部分材料由于孔道坍塌或功能基团流失导致性能下降,特别是某些改性沸石及钙基材料在多次循环或高温下出现显著的性能衰减;(3)原料成分波动大,煤气化渣的硅铝比和残碳含量等受多种因素影响,造成吸附剂性能不稳定,限制了大规模生产的可靠性。

五、结论与展望

综上所述,近年来煤气化渣作为吸附材料的研究与应用取得了显著进展,展现了其在减少环境污染和资源回收方面的巨大潜力。然而,实际应用中仍面临诸多挑战,如吸附容量有限、循环

稳定性不足及原料成分波动较大等问题。为解决这些问题，研究应聚焦于设计多级孔结构以提升扩散性能和增加吸附位点密度，开发环保的改性工艺以降低环境影响，并通过构建煤气化渣成分数据库和制定标准化预处理流程来促进工业化集成。未来，随着

这些策略的不断优化和完善，煤气化渣基吸附材料有望成为高效、稳定且环保的吸附剂，广泛应用于污染控制领域，为应对全球变暖 and 环境污染问题做出重要贡献。

参考文献

[1] 曲江山, 张建波, 孙志刚, 等. 煤气化渣综合利用研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2020, 26: 184–93.

[2] 赵永彬, 吴辉, 蔡晓亮, 等. 煤气化残渣的基本特性研究 [J]. 洁净煤技术, 2015, 21: 110–3+74.

[3] 宋瑞领, 李静, 付亮亮, 等. 多喷嘴对置式水煤浆气化炉炉渣特性研究 [J]. 洁净煤技术, 2018, 24: 43–9.

[4] 谢海巍, 潘福元, 刘尊青, 等. 煤气化渣与粉煤灰影响其水泥胶凝硬化产物的强度机理 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2023, 43: 26–34.

[5] 吕生华, 李泽雄, 吴磊, 等. 煤气化固废粗渣的表面处理及其混凝土的制备与应用性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2022, 49: 4–10.

[6] 武立波, 杨嘉伟, 刘惠阳, 等. 煤气化粗渣改良季节冻土区黄土填料的冻融特性及其微观机理研究 [J]. 冰川冻土, 2024, 46: 930–43.

[7] 冷峥. 铁负载煤气化渣对土壤中镉、砷的稳定化效果研究 [D]. 中国环境科学研究院, 2024.DOI:10.27510/d.cnki.gzhky.2024.000042.

[8] 元宁, 李嘉, 张晋玲, 等. 煤气化灰渣制备活性炭及其 CO₂ 吸附分离研究 [J]. 洁净煤技术: 1–10.[2024–08–07].

[9] 涂亚楠, 胡雨杉, 刘旺, 等. 煤气化细渣水热合成多孔材料及对氨氮的吸附性能研究 [J]. 煤炭工程, 2024, 56: 205–12.

[10]Wagner N J, Matjie R H, Slaghuis J H, et al. Characterization of unburned carbon present in coarse gasification ash [J]. Fuel, 2007, 87(6): 683–91.

[11] 于希豪, 刘祺, 张杰, 等. 煤气化细渣简单制备吸附剂用于亚甲基蓝吸附及其回收燃烧性研究 [J]. 工业水处理: 1–15.

[12] 刘硕. 煤气化细渣制备介孔材料及净水剂研究 [D]. 吉林大学, 2019.

[13] 何绪文, 崔伟, 王春荣, 等. 气化炉渣的重金属浸出特性及化学形态分析 [J]. 化工环保, 2014, 34: 499–502.

[14] 张久朋. 气化细渣制备介孔材料及在 CO₂ 捕集与树脂补强、除味中的应用 [D]. 吉林大学, 2022.DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2022.000552.

[15] 张今壹. 煤气化渣基复合导电填料的制备及其在抗静电高分子材料中的应用 [D]. 吉林大学, 2022.DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2022.007556.

[16] 马东坡. 煤基固废制备 A 型沸石及其吸附性能的研究 [D]. 安徽理工大学, 2024.DOI: 10.26918/d.cnki.ghngc.2024.000999.

[17]Zekai M, Zhenkun G, Guofeng Q, et al. Synthesis of activated carbon from high-ash coal gasification fine slag and their application to CO₂ capture [J]. Journal of CO₂ Utilization, 2021, 50.

[18]Shu R, Qiao Q, Guo F, et al. Controlled design of Na–P1 zeolite/porous carbon composites from coal gasification fine slag for high-performance adsorbent [J]. Environmental Research, 2023, 217: 114912.