

《生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂》编制说明

《生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂》

标准编制组

2026 年 9 月

目 录

一、 项目背景	2
(一) 行业发展与政策驱动背景	2
(二) 传统活性炭治理技术的固有局限	2
(三) 硅基复合吸附剂的技术突破与净化机理	3
(四) 标准化工作的迫切需求	4
二、 工作简况	5
(一) 任务来源	5
(二) 起草/参编单位	5
(三) 主要工作过程	5
三、 制定的必要性与意义	6
(一) 制定的必要性	6
(二) 制定的意义	7
四、 国内外相关情况	8
(一) 国外技术与标准发展现状	8
(二) 国内技术与标准发展现状	11
(三) 小结	14
(四) 本标准的定位与填补空白的作用	15
五、 编制原则与依据	16
(一) 编制原则	16
(二) 主要内容及确定依据	16
六、 主要试验（验证）情况分析	43
(一) 试验验证方案的系统性设计	43
(二) 基础技术指标多批次验证结果	44
七、 与现行法律法规、标准的关系	56
八、 采用国际/国外标准情况	58
九、 其他事项	58
参考文献	60

一、项目背景

（一）行业发展与政策驱动背景

1.我国生活垃圾焚烧行业爆发式增长态势

随着我国城镇化率从 2020 年的 63.89%提升至 2025 年的 66.9%，城镇常住人口突破 9.2 亿，全国城镇生活垃圾清运量从 2020 年的 2.35 亿吨增长至 2025 年的 3.12 亿吨，年均复合增长率达 5.8%。垃圾焚烧发电凭借减容 90%以上、减重 80%以上的显著减量化优势、彻底无害化的处置能力以及余热发电供热的资源化价值，已全面取代卫生填埋成为我国城镇生活垃圾终端处置的主流技术路线。

根据国家发展改革委、住房和城乡建设部联合印发的《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》明确要求：到 2025 年底，全国城镇生活垃圾焚烧处理能力占比提升至 65%左右，县城生活垃圾焚烧处理能力实现全覆盖。截至 2025 年末，我国已建成投运生活垃圾焚烧发电设施 527 座，总设计日处理能力突破 83.6 万吨，占全国生活垃圾无害化处理能力的 68.2%，超额完成“十四五”规划目标。预计到 2030 年，全国生活垃圾焚烧处理能力将突破 120 万吨/日，行业市场规模超过 3000 亿元。

2.烟气污染物管控要求持续趋严。

垃圾焚烧烟气中排放的二噁英类持久性有机污染物(PCDD/Fs)、铅/汞/镉等重金属污染物，具有高毒性、难降解、生物累积性、远距离迁移性等特征，被生态环境部列入《优先控制化学品名录》，是国家大气污染防治重点管控对象。现行《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485-2014)强制性规定，生活垃圾焚烧烟气二噁英排放限值为 0.1ng TEQ/m³，部分重点区域执行更严苛的地方限值。随着环保监管常态化、趋严化、精准化态势不断升级，对烟气净化材料的净化效率、运行安全性、长期稳定性、经济环保性、无二次污染等核心性能提出了远超以往的技术要求。

（二）传统活性炭治理技术的固有局限

当前我国生活垃圾焚烧行业烟气二噁英治理的主流工艺为：活性炭喷射吸附+布袋除尘器除尘+飞灰稳定化无害化处置。该工艺自 20 世纪 90 年代从国外引进，已在行业内应用超过 30 年。粉状活性炭凭借其物理吸附性能在行业内得到大规模应用。但在规模化工程应用中，活性炭技术存在以下固有局限：

1.吸附性能与烟气工况匹配度不足：活性炭的孔道结构以微孔

（孔宽 $<2\text{nm}$ ）为主，微孔孔容占比通常超过 70%，而垃圾焚烧烟气中二噁英多以分子动力学尺寸 $0.4\sim 3\text{nm}$ 的分子及更大尺度的分子聚集体形式存在。根据吸附理论，有效吸附孔径需为吸附质分子直径的 $1.7\sim 3$ 倍，活性炭微孔对二噁英大分子的可及性较差，存在大量无效孔容。在烟气湿度波动、酸性气体共存等复杂工况下，水分子和酸性气体分子会优先占据吸附位点，影响二噁英的吸附效率。此外，活性炭以物理吸附为主，吸附饱和后二噁英在温度波动条件下存在脱附风险。

2.高温工况下的安全风险：粉状活性炭燃点较低（ $200\sim 250^{\circ}\text{C}$ ），属于可燃固体，在储运及气力输送过程中存在粉尘燃爆风险。同时，活性炭在 140°C 以上工况使用时存在氧化自燃风险，可能引发布袋除尘器滤袋损坏。而垃圾焚烧烟气温度通常为 $150\sim 300^{\circ}\text{C}$ ，为适配活性炭的使用条件，部分焚烧厂需通过喷水降温等方式调整烟气温度，这带来了额外的能耗增加和设备腐蚀风险。

3.全生命周期综合成本较高：活性炭原料来源于木材或煤炭，受资源约束价格波动较大；吸附二噁英后的废活性炭混入飞灰，增加了危险废物的产生量及后续稳定化、运输、填埋等环节的综合处置成本。

4.废活性炭资源化利用困难：活性炭吸附饱和后，二噁英易受热脱附，造成二次污染。此外，部分劣质活性炭产品自身存在二噁英本底值，投加后反而会增加烟气污染负荷。废活性炭难以再生利用，随飞灰填埋后，在雨水淋溶作用下，吸附的二噁英和重金属会逐渐渗漏，长期污染土壤和地下水。研究表明，垃圾焚烧飞灰填埋场的渗滤液中，二噁英浓度可达到地下水标准的数百倍。活性炭生产过程能耗高、碳排放大，每吨煤质活性炭的生产能耗约为 1.5 吨标准煤，碳排放约为 4 吨 CO_2 当量。此外，废活性炭随飞灰填埋后，其中的碳元素无法回收利用，进一步增加了碳排放。

（三）硅基复合吸附剂的技术突破与净化机理

1.天然硅基矿物的资源优势与改性潜力：我国天然硅基矿物（绿泥石、坡缕石、伊利石、蒙脱石等）储量丰富，已探明储量超过 100 亿吨，主要分布在内蒙古、甘肃、新疆、河南等省份，原料易得、价格低廉。天然硅基矿物具备完全不燃、热稳定性强、耐酸碱腐蚀、比表面积大、孔隙结构丰富等天然优势，是极具产业化与替代潜力的新型环保吸附材料。但天然硅基矿物的原始孔隙结构不够发达，表面活性位点不足，对二噁英的吸附性能较差，需要通过物理和化学改性手段进行优化。

2.硅基复合吸附剂的制备工艺与结构特征

本标准所规范的生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂，以天然富硅硅酸盐矿物为核心原料，经改性制备而成的多孔无机吸附材料，以无定形二氧化硅为三维骨架，兼具物理吸附富集、化学固定稳定双重功能，可精准调控材料链层状晶体结构，完美适配生活垃圾焚烧烟气复杂工况下二噁英与重金属协同深度净化需求，是传统炭基吸附剂的升级替代产品。

3. 双重协同净化机理的深度解析

①物理捕集：硅基复合吸附剂通过精准调控孔径分布，使中孔孔容占比有效提升，使材料中孔孔径分布与二噁英分子的尺寸分布形成较好的匹配。凭借范德华力和氢键作用，吸附剂可以快速捕集烟气中游离态与结合态的二噁英分子，并将其锁定在中孔孔道内，避免脱附。

②化学固定：硅基复合吸附剂表面的硅羟基和金属氧化物活性位点，可以通过离子交换、化学螯合、表面络合等作用，与烟气中的气态重金属（铅、汞、镉、铊等）发生化学反应，将其转化为稳定的无机化合物，永久固定在孔道内。例如，汞蒸气可以与吸附剂表面的 Fe_2O_3 反应生成稳定的 HgO ；铅和镉可以与硅羟基发生离子交换反应，生成稳定的硅酸盐化合物。这种化学固定作用不可逆，即使在高温和酸性条件下，重金属也不会重新释放到环境中。

（四）标准化工作的迫切需求

硅基复合吸附剂作为新型无机环保吸附材料，自 2021 年实现产业化以来，已在国内 40 余家生活垃圾焚烧企业完成 3 年以上的工程应用，取得了显著的环境和经济效益。

硅基复合吸附剂作为新型无机环保吸附材料，技术水平处于国际领先地位，工程应用效果显著，市场前景广阔。但目前国内外行业内尚未形成统一的产品技术规范、性能评价体系与检测方法标准，行业现状呈现“三无”局面：

1.无国家/行业标准：目前国内尚无针对生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂的国家、行业或团体标准，产品生产和质量检测无据可依；

2.无统一技术指标：缺乏明确的核心技术指标（如中孔孔容占比、硅基矿物成分含量等）要求，无法科学评价产品性能；

3.无规范检测方法：对于中孔孔容占比等核心指标，不同检测机构采用的试验方法不同，检测结果缺乏可比性。

这种“三无”局面严重制约了该技术的推广应用和产业发展。

1.焚烧企业选型困难：由于缺乏统一的产品标准和评价方法，焚烧企业无法科学验证产品性能，对新技术的接受度受到影响；

2.检测机构评价无据：第三方检测机构无法按照统一标准对产品进行检测和评价，检测结果不具备权威性；

3.技术成果转化受阻：标准化的缺失影响了技术成果的规模化推广，不利于我国环保技术优势转化为产业优势；

未来产业发展无基准：随着技术的成熟和市场的扩大，未来可能会有更多企业进入该领域，缺乏统一的技术标准将导致行业发展无序。

在此背景下，制定《生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂》团体标准，精准填补国内外行业专项标准空白，系统规范产品的技术要求、检验方法、应用方法、检验规则、标志、包装、运输、贮存、使用说明书、保质期与产品管理要求，既是保障产品质量、推动技术规模化推广的迫切需要，也是建立行业技术基准、引导未来产业健康发展、提升我国环保技术国际话语权的重要举措。

二、工作简况

（一）任务来源

为填补生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂行业标准空白，规范产品生产、质量检测、工程应用与市场监管，推动新型高效烟气净化材料在生活垃圾焚烧行业的规模化、标准化推广，由广州鑫材科技有限公司牵头，联合瀚蓝绿电固废处理（佛山）有限公司、东莞科伟环保电力有限公司、生态环境部华南环境科学研究所、广州环投永兴集团股份有限公司、浙能锦江环境控股有限公司等国内头部垃圾焚烧运营企业、科研院所共同提出立项申请，经广东省环境科学学会审核、专家论证、公示批复，《生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂》正式列入学会团体标准制修订计划。

（二）起草/参编单位

本标准由广州鑫材科技有限公司牵头组织起草，生态环境部华南环境科学研究所、瀚蓝绿电固废处理（佛山）有限公司、东莞科伟环保电力有限公司、广州环投永兴集团股份有限公司、浙能锦江环境控股有限公司、中山市广业龙澄环保有限公司、湛江市粤丰环保电力有限公司、梅州市三峰环保能源有限公司、南宁市三峰能源有限公司、旺能环境股份有限公司、汕尾三峰环保发电有限公司、兴宁康恒环保能源有限公司、中山公用事业集团股份有限公司、白银三峰环保发电有限公司、恒建能源环保集团股份有限公司、广东工业大学、广州环投南沙环保能源有限公司等单位协同参与编制。

（三）主要工作过程

2025 年 4 月，收到《关于征集 2025 年度第一批广东省环境科学学会标准项目的通知》（粤环学〔2025〕8 号），征集生态环境领域产品、技术、科普、管理和工作标准规范及其相关内容。

2025 年 4~6 月，标准牵头单位广州鑫材科技有限公司开展《生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂》立项前期研究工作，收集整理了硅基复合吸附剂相关技术规范、参考文献、环保法规和标准等资料。

2025 年 6 月，分别前往瀚蓝绿电固废处理（佛山）有限公司、东莞科伟环保电力有限公司、广州环投永兴集团股份有限公司、浙能锦江环境控股有限公司等开展调研，了解硅基复合吸附剂实际应用情况。

2026 年 1 月，编制完成《生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂》标准立项申报材料，并向广东省环境科学学会报送立项。

2026 年 1 月 28 日，广东省环境科学学会在广州市组织召开团体标准《生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂》立项论证会。专家组听取了标准编制单位的汇报，审阅了相关资料，经质询讨论，一致认可该标准立项。

2026 年 2 月—5 月，根据专家意见完善《生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂》标准及编制说明。

2026 年 6 月 3 日，广东省环境科学学会在广州市组织召开团体标准《生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂》专家咨询会。专家组听取了标准编制单位的汇报，审阅了相关资料，经质询讨论，一致认为该标准制定具备必要性与可行性，并提出针对性修改完善建议。

2026 年 6 月—9 月，根据专家意见完善《生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂》标准及编制说明。

三、制定的必要性与意义

（一）制定的必要性

1. 填补行业标准空白，建立统一技术基准：硅基复合吸附剂是以天然硅基矿物为原料改性制备的多孔无机吸附材料，与传统活性炭在原料来源、晶体结构、孔隙特征、吸附机理及热稳定性等方面存在本质区别。现行《木质活性炭试验方法》（GB/T 12496 系列）、《煤质活性炭》（GB/T 7702 系列）等活性炭标准体系，以及《膨润土》（GB/T 20973）等黏土矿物通用标准，均无法覆盖该产品的核心差异化指标（如中孔孔容占比、硅基矿物成分比例等），也无法适配其在 140℃~250℃烟气温度区间、高湿度、酸性气体共存的复杂焚烧工况下的特殊应用要求。本标准首次系统规定了硅基复合吸附剂的术语和

定义、产品技术指标（第4章）、检验方法（第5章）、应用方法（第6章）、检验规则（第7章）及标志、包装、运输、贮存、使用说明书（第8章）、保质期与产品管理（第9章），为产品生产、质量检测、工程应用与市场监管提供了统一的技术依据，填补了该领域国家、行业及团体标准的空白。

2.保障产品质量与工程应用效果：标准第4章表1从材料本源出发，系统设定了涵盖硅基矿物成分含量、中孔孔容占比、粒度分布、水分含量、堆积密度、低位热值等6项产品技术指标，直接关系产品在焚烧烟气净化场景中的吸附性能、输送稳定性与运行安全性。通过出厂检验（第7.2条）和型式检验（第7.3条）的分级管控，确保每批次产品的核心质量合格后方可出厂流通。同时，标准第6章“应用方法”从应用端出发，设置了投加点位、应用温度（140℃~250℃）及投加量等工程应用条件（6.1、6.2），明确了烟气二噁英与重金属净化效果的验证方法（6.3），以及净化后飞灰的处置要求（6.4）。上述条款相互配合，形成了从产品质量到工程应用的全链条管控，为焚烧企业科学选型与效果验证提供了标准化工具，确保产品在实际工况中能够发挥预期净化作用。

3.推动自主创新技术成果转化，促进产业化规模化应用：硅基复合吸附剂是我国自主研发的原创性环保材料技术，技术水平处于国际领先地位，已在国内40余家生活垃圾焚烧企业完成3年以上工程应用验证。但由于缺乏统一的产品标准，焚烧企业在采购选型时缺乏科学的性能评价依据，第三方检测机构亦无法出具具有行业公信力的检测报告，在一定程度上制约了该技术的规模化推广。本标准的制定，将自主创新技术成果转化为可量化、可复现、可比较的标准技术指标，有助于提高行业对新型吸附材料的认知度和接受度，加速技术成果的产业化进程。

4.引导未来产业健康发展

随着生活垃圾焚烧行业对降本增效、安全环保需求的持续提升，硅基复合吸附剂的市场关注度不断提高，未来将有更多企业进入该领域。在本标准出台前，由于缺乏统一的产品质量要求和评价方法，可能出现以次充好、概念炒作等市场乱象。本标准通过明确最低性能阈值和检测方法，为行业设置了清晰的技术门槛，引导企业通过提升真材实料与核心技术指标来参与市场竞争，从源头规避低水平重复建设和无序竞争，保障行业健康可持续发展。

（二）制定的意义

1.规范行业高质量发展：本标准是国内首个、国际首创的生活垃

圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂专项产品标准，首次统一了产品术语定义、核心技术指标、检验方法与应用方法，为行业建立了统一的技术语言和评价体系，为产业规范化发展奠定了标准化基础。

2.强化二噁英深度治理技术支撑：本标准以 GB 18485-2014 规定的烟气污染物排放限值为根本目标导向。标准第 4 章产品理化技术指标的设定，均以产品在实际工程中能够支撑焚烧企业达标排放为最终管控目标；第 6 章的应用方法要求直接与排放标准挂钩。工程验证数据表明，在标准规定的产品指标和推荐工况下，产品能够使烟气二噁英排放浓度长期稳定低于 GB 18485-2014 限值，为焚烧行业二噁英深度治理提供了材料层面的标准化技术支撑。

3.助力生态环境保护：通过标准的实施与引导，高性能硅基复合吸附剂的规范化生产和规模化应用将有效减少生活垃圾焚烧烟气中二噁英类持久性有机污染物及重金属的排放，降低对周边生态环境和人体健康的风险，直接服务于区域大气环境质量改善和土壤、地下水保护，具有良好的生态环境正效益。

4.促进产业高质量发展：本标准将技术优势转化为标准优势，有助于提升我国自主研发的烟气净化材料在国内外市场的竞争力和行业话语权，推动环保新材料领域技术创新与产业升级，培育具有国际竞争力的环保材料产业集群。

5.服务国家生态文明建设战略：硅基复合吸附剂的推广应用契合“无废城市”建设关于固废源头减量与资源化利用的要求。同时，产品自身为全无机硅基体系，全生命周期不引入额外碳源，相比传统活性炭可显著减少碳排放，助力“双碳”目标实现，具有显著的战略支撑价值。

四、国内外相关情况

（一）国外技术与标准发展现状

1.技术研发与应用现状

欧美、日本等发达国家生活垃圾焚烧行业起步较早，烟气治理技术体系相对成熟，在二噁英净化吸附材料领域长期以活性炭类产品为核心，相关技术研发、生产与应用已形成完整的产业体系。然而，随着全球环保要求的持续提升和活性炭自身局限性的日益凸显，学术界和产业界近年来开始探索新型无机吸附材料。

（1）硅基吸附材料的基础理论研究

在硅基材料吸附二噁英的基础理论方面，国外学者开展了较为系统的研究工作。

美国密歇根州立大学 Boyd 教授团队通过长达十余年的系统性研

究，从基础科学层面揭示了黏土矿物对多氯代二苯并二噁英/呋喃（PCDD/Fs）的吸附机制，证实了其作为二噁英吸附材料的本质可行性。研究发现，由于 PCDD/Fs 具有极低的水溶性和高度的化学稳定性，吸附是其环境归趋与生态毒性的主要决定因素。被吸附的 PCDD/Fs 分布在土壤/沉积物的主要组分（黏土、无定形有机质和碳质材料）之间，各组分对 PCDD/Fs 的吸附差异决定了污染物在环境中的生物有效性和生态风险。该团队进一步证实，膨胀性黏土对二苯并二噁英具有极强的吸附能力，可保留高达 1% 的吸附态二噁英分子，在土壤中的二噁英固定化方面，黏土的作用可能比有机质更为重要。

在介孔硅材料的可控合成方面，Kresge 等首次报道了 M41S 家族介孔分子筛的合成，以表面活性剂为模板经超分子组装合成高度有序的介孔材料^[1]，该材料具有规则孔道、巨大的比表面积。Zhao 等报道了使用三嵌段共聚物合成 SBA-15 的方法，该材料具有高度有序的六方介孔结构，孔径可达约 300 埃，具有更大的孔径、更厚的孔壁及更高的水热稳定性^[2]。Antonietti 等报道了利用聚合物乳胶模板合成介孔二氧化硅，通过改变模板尺寸实现了孔径从 10 纳米到微米级的可编程调控，为硅基吸附材料的孔径精准设计提供了重要的合成策略^[3]。

国际纯粹与应用化学联合会（IUPAC）于 1972 年正式提出了多孔材料的孔径分类标准，将孔道按宽度划分为微孔（<2nm）、中孔（2~50nm）和大孔（>50nm），这一统一标尺使得硅基吸附材料的孔径设计有了科学的分类依据和可比基准。

在硅基材料对二噁英的吸附机制研究方面，Diagboya 等系统总结了硅基介孔材料在水相污染物吸附中的前沿进展，详细介绍了有序介孔硅酸盐的合成方法、表面活性剂去除工艺以及“设计型硅酸盐”的制备策略，重点评述了含氮/巯基功能化、磁性化、复合型等各类改性硅基吸附材料在重金属阳离子、阴离子污染物、染料、农药、药物分子和新兴污染物去除中的应用^[4]。为其在垃圾焚烧烟气净化领域的应用提供了坚实的理论基础和技术参照。

（2）硅基材料在烟气治理中的应用探索

基于上述基础研究成果，国外学者和企业逐步开展了硅基材料在烟气治理中的应用探索。

在专利技术方面，日本三菱重工研发了一种烟气处理用吸附剂专利，该吸附剂包含至少一种选自 pentasyl 型沸石、脱铝八面沸石和介孔硅酸盐的组分，且 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 摩尔比为 10 以上，用于吸附城市垃圾焚烧炉、工业废弃物焚烧炉等排放的烟气中的二噁英等氯化芳香族化合物。Sugawara 等研发了以蒙脱石族黏土矿物或其酸处理产物为基体的二噁英吸附剂，该吸附剂具有特定的 SiO_2 含量范围，并保持较高的 Lewis 酸含量，利用黏土矿物的固体酸性质实现了对二噁英的高

效吸附。

在机理研究方面,Hwang 等系统考察了天然酸黏土和活化酸黏土对垃圾焚烧烟气中氯代有机物的去除机制。研究发现,天然酸黏土含有较高比例的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 和 CaO 等金属氧化物,这些组分在 300°C 下可催化一氯苯的脱氯反应^[5]。这一发现为黏土矿物在高温烟气条件下的应用提供了实验依据。

Ottaviani 等采用 EPR 方法,研究了二噁英蒸气在微孔碳 NORIT、焚烧厂炭 EVN.2 和低极性胶束模板介孔二氧化硅 lpMTS 上的吸附过程。EPR 分析表明,标记的二噁英与碳材料的 C-O-C 基团和 lpMTS 的硅氧烷基团发生了偶极-偶极相互作用。吸附动力学显示,NORIT 活性炭和 lpMTS 在数秒内即可实现大量吸附, $1400\text{dm}^3/\text{h}$ 流速下, 100mg NORIT 在 5s 可吸附约 $60\mu\text{g}$ TCDD-T, 100mg lpMTS 在 5s 可吸附约 $78\mu\text{g}$ TCDD-T; 而焚烧厂来源的 EVN.2 碳样品即使经过 1 分钟吸附量也微乎其微^[6]。该研究认为, EPR 方法可为二噁英在多孔碳、介孔二氧化硅上的吸附过程提供独特而有效的信息。

(3) 国外工程化应用滞后的原因分析

尽管国外在硅基吸附材料的理论研究和实验室探索方面取得了丰富成果,但在生活垃圾焚烧烟气净化领域的工程化应用方面明显滞后于中国。主要原因包括:一是国外发达国家的垃圾焚烧行业已进入成熟稳定期,以活性炭为核心的现有烟气治理产业链已十分完善,焚烧企业更换新技术的意愿和动力不足;二是欧美等国家的天然硅基黏土矿物资源相对匮乏,原料获取成本较高,制约了硅基吸附材料的大规模工业化生产;三是硅基材料吸附剂的工程化应用需要针对不同烟气工况进行大量系统性的工艺适配研究,研发投入大、周期长,国外相关机构在此方向上的持续投入有限;四是国外活性炭标准体系完善、供应链稳定,企业缺乏主动寻求替代方案的市场驱动力。

2. 标准体系建设现状

国外针对吸附材料的标准体系建设,主要集中于传统活性炭产品与通用型黏土矿物填料两大领域,尚未形成针对烟气二噁英净化用硅基复合吸附剂的专项标准。

活性炭标准: 美国材料与试验协会 (ASTM) 发布了 ASTM D2862《颗粒活性炭总表面积的标准试验方法》、ASTM D5742《活性炭吸附性能评价标准指南》等 50 余项标准; 欧洲标准化委员会 (CEN) 发布了 EN 12915《用于水处理的颗粒活性炭》、EN 14804《用于气体净化的颗粒活性炭》等系列标准,系统规范了活性炭的吸附性能、粒径分布、灰分、水分、pH 值等核心技术指标与试验方法,覆盖了水处理、气体净化、食品加工、化工催化等多个应用场景。

硅基矿物标准: 国际标准化组织 (ISO) 发布的 ISO 3262 系列标

准《涂料用填充剂 规范和试验方法》，规范了黏土矿物作为工业填料的通用技术要求；美国石油学会（API）发布了 API RP 13B-1《钻井液现场测试 第1部分：水基钻井液》，规范了黏土矿物在石油钻井领域的应用。

但针对生活垃圾焚烧烟气净化场景，尤其是二噁英类超痕量有毒污染物专用吸附材料，国外尚未出台专项的产品标准或工程应用规范。日本虽在硅基矿物改性材料研发领域技术领先，但其标准体系仅覆盖基础原材料与水处理产品，未涉及烟气二噁英吸附用硅基复合吸附剂的专项技术规范；欧美国家的气体净化用吸附材料标准仍以活性炭为核心，未针对新型硅基材料吸附剂制定专项技术标准，相关领域的标准空白显著。

（二）国内技术与标准发展现状

1. 技术研发与产业应用现状

我国是全球天然硅基黏土矿物资源最为丰富的国家之一，已探明储量超过百亿吨，主要分布在内蒙古、甘肃、新疆、河南等省份。这一资源禀赋为国内硅基吸附材料的研究开发和产业化提供了充足的原料保障。同时，我国是全球生活垃圾焚烧处理规模最大的国家，截至 2025 年底，全国生活垃圾焚烧处理能力已超 80 万吨/日，烟气净化吸附材料年市场需求规模超百万吨。巨大的市场需求为硅基复合吸附剂的技术迭代和工程验证提供了丰富的应用场景。

（1）基础理论研究

在硅基材料吸附二噁英的基础理论研究方面，我国学者开展了系统性的工作，取得了多项重要成果。

李灿院士等研究发现，脱附温度随吸附材料类型差异显著：无定形/介孔二氧化硅约为 200℃，金属氧化物约为 230℃，而 NaY 和丝光沸石可达 450℃。二噁英的吸附主要归因于三类不同的分子间相互作用：与无定形/介孔二氧化硅表面硅羟基之间的氢键作用、与金属氧化物表面 Lewis 酸位点的配位作用，以及与丝光沸石和 NaY 分子筛孔道的限域效应^[7]。这一研究为硅基介孔材料的孔径可设计性提供了坚实的理论支撑。

在吸附剂筛选与性能评价方面，王麟等研究以 1,2,3,4-四氯代二苯并一对-二噁英和 1,2,3,8,9-五氯代二苯并呋喃为二噁英模型物，测定了 11 种吸附剂上不同温度点下的保留体积并建立了范特霍夫方程^[8]。研究结果表明，弗洛里硅土在 120℃ 时对两种二噁英模型物表现出极强的吸附能力；丝光沸石在 310℃ 下对 1,2,3,4-TCDD 可实现热脱附而对 1,2,3,8,9-PCDF 无法脱附，体现了沸石对二噁英同系物的选择

性吸附特性。该研究通过系统评价，为二噁英吸附材料的选择提供了重要参考。

黄姝晗等从环境地球化学视角，系统梳理了天然矿物表面在非水饱和相条件下对有机污染物的催化转化机理^[9]。该团队指出，黏土矿物层间交换性阳离子对其表面酸性和催化活性具有关键影响。干燥矿物表面相比水溶液条件能表现出更强的表面 Lewis 酸性和 Brønsted 酸性以及氧化活性，可催化有机污染物的水解反应或氧化聚合反应。其中八氯二噁英每年沉积量约 5500kg，占二噁英排放总量的约 70%。黏土矿物中铁主要以结构铁形态存在，在非水相条件下可催化氯酚类化合物转化为二噁英类物质。这些研究从环境地球化学角度揭示了黏土矿物与二噁英之间的相互作用机制。

在硅基介孔材料的功能化与吸附应用方面，刘丽等系统梳理了 M41S、SBA 等系列材料的研究脉络，分析了模板剂、硅源、合成条件对材料结构的影响机制，并深入探讨了无机改性、有机功能化和复合改性等策略在重金属吸附方面的应用^[10]。唐振平等对硅基介孔材料的功能化改性进行了系统分析，总结了无机、有机和无机-有机复合改性的三类主要方法及其改性原理^[11]。黎亚平等阐述了介孔硅的成型原理及对重金属及放射性核素的吸附作用机理^[12]。武晓邨等综述了有机黏土矿物在水污染治理中的研究进展，指出有机黏土矿物因成本低、比表面积大、阳离子交换容量高等优势备受关注^[13]。

在硅基吸附剂对烟气中重金属的吸附研究方面，Cheng Haoqiang 等利用自行设计的气固两相快速吸附实验系统，研究了一系列 Si/Al 基吸附剂对 Pb 和 Cd 蒸气的捕获性能^[14]。研究表明，高岭石和蒙脱石表现出比 SiO₂ 和 Al₂O₃ 更好的重金属吸附容量，且对 Pb 的吸附显著强于 Cd。DFT 计算进一步揭示，偏高岭石（001）表面暴露的 O 原子和不饱和 Al 原子是重金属及其氯化物的有效吸附活性位点，化学吸附机制主导了高温下 Pb/Cd 的捕获。张锴等开发了高耐硫硅铝负载 Fe-Ce-La 复合氧化物吸附剂，实现了燃煤烟气中低温脱砷和高效抗硫^[15]。

在硅基类材料对二噁英的吸附研究方面，梁莎等利用粉煤灰合成了沸石材料（ZFA）并用于二噁英吸附^[16]。研究表明，前驱体的 Si/Al 摩尔比显著影响沸石的晶型转变，ZFA 对二噁英的吸附在 Si/Al 摩尔比为 1.5 时达到峰值，可达 $4.13 \times 10^5 \text{ pg I-TEF/g}$ ，超过活性炭 1.46 倍。沸石材料以 Si-Al 成分为特征，具有高热稳定性，其孔隙结构以微孔和小中孔为主，是二噁英吸附的有前途的候选材料。

在国家科研项目层面，北京科技大学杨雄教授主持了国家重点研发计划重点专项子课题“硅基 NO_x 吸附剂、二噁英吸附剂研发”。中国科学院生态环境研究中心苏贵金研究员团队开展了二噁英和

NO_x 的协同处置研究，成功研制了蜂窝型工业催化剂。

（2）工程化应用突破

我国在硅基复合吸附剂的工程化应用方面取得了国际领先的突破性进展。目前硅基复合吸附剂已在广东、浙江、江苏等多个省份的 40 余家生活垃圾焚烧电厂完成 3 年以上长期工程应用验证，充分验证了其在复杂烟气工况下对二噁英的高效去除效果、运行稳定性与安全性。

在产品技术方面，我国自主研发的硅基复合吸附剂以天然硅基矿物为基材，经改性工艺制备，产品粒度分布符合本标准表 1 要求，耐 1000℃ 高温。产品具备多级孔道有序分布的无机多孔结构，由微孔、中孔、大孔共同构成，其中中孔为核心孔道，中孔孔容占比≥55%，与二噁英大分子尺寸高度匹配。骨架以无定形二氧化硅为三维无机骨架，金属氧化物均匀负载于孔道内壁与材料表面，孔道不易坍塌，热稳定性优异；材料表面富含大量硅羟基活性位点，为污染物吸附提供充足的活性位点与接触空间。

工程验证数据显示，在行业常规投加量 0.5kg/吨垃圾条件下，二噁英去除率>80%，净化后烟气二噁英排放浓度长期稳定≤0.05ng TEQ/m³，远优于 GB 18485-2014 规定的 0.1ng TEQ/m³ 限值。对镉、铊、铅等重金属的去除率可稳定≥99.5%，对汞的去除率常规工况下≥80%。产品为全无机硅基体系，具备完全不燃特性，经国家消防产品质量检验检测中心检测，燃烧性能等级达到 GB 8624-2012 规定的 A1 级不燃材料标准，可在 140~250℃ 温度范围内安全稳定运行。

产品具备优异的热稳定性与抗脱附性能。碳基吸附剂（如 GDX 系列高分子多孔微球）在 270℃ 下二噁英会产生热脱附；沸石类吸附剂在 310℃ 下对部分二噁英同系物亦会发生热脱附。相比之下，硅基复合吸附剂通过化学固定作用将二噁英及重金属转化为稳定的无机化合物永久固定在孔道内，该化学固定作用不可逆，即使在 140℃~250℃ 的应用温度区间内也不会发生热脱附。产品经改性后以无定形二氧化硅为三维骨架，热稳定性优异，300℃ 下孔道结构不坍塌，可在 140℃~250℃ 全温度窗口安全稳定运行，从根本上规避了传统活性炭因物理吸附主导而在温度波动条件下存在的二噁英二次脱附风险，为焚烧企业在 140℃~250℃ 烟气温度范围内的连续稳定达标排放提供了材料层面的安全保障。

我国在硅基复合吸附剂的技术研发与工程化应用方面已处于国际前列，技术成熟度和产业化规模均领先于欧美日等发达国家。

2.标准体系建设现状

我国已建立了相对完善的活性炭产品标准体系。《木质活性炭试验方法》（GB/T 12496 系列）、《煤质活性炭试验方法》（GB/T 7702

系列)等国家标准,全面规范了活性炭的水分、pH 值、灰分、吸附性能等通用指标的检测方法。住房和城乡建设部发布了行业标准《生活垃圾焚烧烟气净化用粉状活性炭》(CJ/T 546-2023)。该标准规定了生活垃圾焚烧厂烟气净化用粉状活性炭的技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存等内容,适用于以煤和植物为原料生产的煤质和木质粉状活性炭。

针对黏土矿物材料,我国发布了《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》(SY/T 5163-2018)、《膨润土》(GB/T 20973-2020)等行业标准和国家标准,规范了黏土矿物的成分分析与物化性能检测方法,覆盖了石油、地质、建材、农业等多个应用领域。

在污染物排放管控方面,《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485-2014)明确了生活垃圾焚烧厂烟气中二噁英、重金属等污染物的排放限值,是烟气治理的核心管控依据。

然而,目前国内尚无针对生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂的专项产品标准。现有活性炭标准体系虽然在试验方法层面可供参考(如 GB/T 12496.4 水分测定、GB/T 21650.2 孔径分布测定等),但无法覆盖硅基复合吸附剂的核心特性指标。GB/T 12496 系列和 CJ/T 546-2023 主要针对活性炭的微孔结构和吸附性能设计,无法准确测定硅基复合吸附剂的中孔孔容占比这一核心指标;GB/T 20973 等黏土矿物标准主要适用于建材、农业等传统领域,未涉及烟气二噁英吸附的应用场景和特殊性能要求;SY/T 5163 虽可用于硅基矿物成分的定性定量分析,但并未规定烟气吸附用产品的整体技术指标体系。

标准的缺失,直接导致产品生产、质量检测、工程应用与市场监管缺乏统一的技术依据,不仅制约了先进技术的规模化推广,也为未来行业发展埋下了隐患,亟需通过专项团体标准的制定填补该领域的标准空白。

(三) 小结

综合国内外技术与标准发展现状可见:欧美、日本等发达国家在硅基吸附材料的理论研究方面起步较早,围绕黏土矿物吸附机理、介孔材料可控合成及功能化改性积累了系统而扎实的成果,并在专利技术层面开展了初步的应用探索。然而,在生活垃圾焚烧烟气净化这一特定应用场景下,国外尚未形成针对二噁英和重金属协同脱除的硅基复合吸附剂专项技术规范,且受制于资源禀赋、产业链惯性和技术更迭动力不足等因素,其工程化应用明显滞后于中国。

相比之下,我国依托丰富的天然硅基黏土矿物资源和全球最大的垃圾焚烧应用市场,在国家重点研发计划等科研项目的持续支持下,

已成功实现了硅基复合吸附剂从实验室基础研究到工程化规模应用的跨越。产品在复杂烟气工况下的净化效率、运行稳定性及安全性均达到国际领先水平，产业化推广已进入关键阶段。

（四）本标准的定位与填补空白的作用

1. 本标准的定位

本标准是国内首个、国际首创的生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂专项产品标准，定位为行业通用技术规范，适用于硅基复合吸附剂的生产、质量检测、工程应用与市场监管。标准充分结合我国生活垃圾焚烧行业的实际工况与硅基复合吸附剂的技术特性，兼顾先进性与实用性，为行业提供统一、科学、可落地的技术依据。

2. 填补空白的核心作用

本标准精准瞄准生活垃圾焚烧烟气净化特殊工况需求，结合国内3年以上工程实践，系统制定产品核心技术指标、检验方法、应用方法、检验规则、标志包装储运、保质期与产品管理全链条规范，填补了国内外生活垃圾焚烧烟气二噁英净化用硅基复合吸附剂专项标准空白。具体填补的空白内容包括：

（1）术语定义空白：统一了硅基矿物、硅基复合吸附剂、粒度、堆积密度、热值等核心术语的定义，建立了行业统一的技术语言，消除了因术语歧义导致的沟通障碍和认知偏差；

（2）技术指标空白：首次将中孔孔容占比、硅基矿物成分含量等核心差异化指标纳入标准，建立了科学的性能评价基准，解决了长期以来产品性能“无尺可量”的问题；

（3）检验方法空白：明确了中孔孔容占比、硅基矿物成分含量等核心指标的检验方法，确保了检测结果的准确性和可重复性，为第三方检测机构提供了权威的技术依据；

（4）检验规则空白：建立了硅基复合吸附剂的出厂检验和型式检验规则，从制度层面保障了每批次产品的质量一致性，为生产企业质量管控和应用单位采购验收提供了标准化工具；

（5）应用方法空白：明确了投加点位、应用温度、投加量、烟气二噁英与重金属检测、飞灰处置等应用要求，为焚烧企业科学选型与工程应用提供了标准化工具；

（6）保质期与产品管理空白：明确了12个月保质期及过期产品检测、回收、再加工、处置要求，填补了新型吸附材料全生命周期管理的标准空白。

本标准与现行国家污染物管控标准、基础检测标准有效衔接、协调一致，为生产质量管控、工程选型应用、第三方检测监管提供统一、

科学、可落地的技术依据，对推动我国新型环保吸附材料标准化、产业化、规模化发展，规范未来市场竞争秩序，提升环保技术国际竞争力具有重要支撑作用。

五、编制原则与依据

（一）编制原则

1.合规性原则：严格遵循 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》、GB/T 20001.10—2014《标准编写规则 第 10 部分：产品标准》要求编制；符合《中华人民共和国生态环境法典》《中华人民共和国标准化法》等法律法规；与《生活垃圾焚烧污染控制标准》（GB 18485-2014）等强制性环保标准协调一致、无冲突，确保标准编制合法、合规、规范。

2.科学性原则：标准所有技术指标均基于大量实验室试验数据、40 余家企业 3 年以上工程应用验证结果确定，试验方法优先选用国家现行成熟通用标准，确保指标设置科学合理、检测结果准确可重复，兼顾产品技术先进性与行业适用性。

3.实用性原则：标准内容紧密贴合生活垃圾焚烧行业实际工况，技术指标明确、检验方法可操作、检验规则清晰，适配国内生产企业的检测能力、焚烧企业的喷射工艺与现场应用需求，便于生产、检测、应用、监管等各相关方执行。

4.协调性原则：积极借鉴 ISO、ASTM 等国际通用吸附剂基础标准，规范性引用国内现行无机化工产品、活性炭检测、污染物监测等相关国家标准、行业标准，与现有标准体系充分衔接，避免内容冲突与重复。

5.先进性原则：充分体现硅基复合吸附剂的材料特性与技术优势，将中孔孔容占比等核心差异化指标纳入标准。

（二）主要内容及确定依据

1.范围

本文件规定了生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂的术语和定义、产品技术指标、检验方法、试验方法、检验规则、标志、包装、运输、贮存、使用说明书、保质期与产品管理等内容。本文件适用于以天然硅基矿物为原料，通过化学改性制备的硅基复合吸附剂（以下简称产品）。产品应用于生态环境、化学化工领域，主要用于生活垃圾焚烧烟气中二噁英类有机污染物及重金属的吸附；危险废物焚烧与医疗废物处理领域可参考本文件。

确定依据：结合产品的原料来源、制备工艺、核心应用场景，精准界定标准适用边界，同时兼顾产品在其他焚烧领域的拓展应用需求。

2.规范性引用文件

规范性引用了 GB/T 213、GB/T 6678、GB/T 6679、GB/T 8946、GB/T 9969、GB/T 12496.4、GB 16889、GB 18485、GB 18599、GB/T 21524、GB/T 21650.2、GB/T 23771、SY/T 5163 共 13 项国家现行标准、行业标准，涵盖检验方法、基础通用规范、污染物监测三大类，覆盖标准所有检测项目与操作要求。

确定依据：优先选用国内现行成熟、通用的国家标准与行业标准，确保各项指标的检测方法统一、检测结果具有可比性，同时减少标准重复编制内容。

3.术语和定义

明确了硅基矿物、硅基复合吸附剂、粒度、堆积密度、热值 5 项核心术语与定义。其中：

（1）硅基矿物：指具有层链状构造的含水镁铝硅酸盐矿物，是构成黏土岩和土壤的主要矿物组分，如绿泥石、坡缕石、伊利石等。

（2）硅基复合吸附剂：指以硅基矿物为核心原料，经提纯、活化、无机金属氧化物原位改性制备的多孔无机吸附材料。

（3）粒度、堆积密度、热值的定义分别引用 GB/T 21524、GB/T 23771、GB/T 213。

确定依据：

（1）硅基矿物的定义结合了我国天然硅基矿物的实际种类与矿物学分类体系，以绿泥石、坡缕石、伊利石作为典型代表矿物，既体现了我国资源禀赋特点，又为产品原料来源提供了明确的矿物学界定。

（2）硅基复合吸附剂的定义，精准概括了产品的三大核心特征：原料来源——以硅基矿物为核心原料；制备工艺——经提纯、活化、无机金属氧化物原位改性；材料属性——多孔无机吸附材料。该定义将本标准规范的产品与活性炭、沸石分子筛、硅胶等其他吸附材料明确区分开来，具有唯一性和排他性。

（3）粒度、堆积密度、热值三项术语直接引用现行国家标准的定义（GB/T 21524、GB/T 23771、GB/T 213），确保术语定义与现有标准体系保持一致，避免因术语理解偏差导致标准执行偏差。这三项术语均是产品技术指标中涉及的关键性能参数，统一其定义有助于规范检测与评价工作。

（4）本标准在第 5.3.4 条中孔容占比的计算公式注释中，引用了国际纯粹与应用化学联合会（IUPAC）的孔径分类标准（微孔 $<2\text{nm}$ 、中孔 $2\sim 50\text{nm}$ 、大孔 $>50\text{nm}$ ）。该分类标准已在吸附科学与多孔材料表征领域得到全球公认和广泛应用，在此作为注释性说明引入，有

助于标准使用者在理解中孔孔容占比这一核心指标时具有统一的孔径分类参照。

4.技术与数据依据

本标准第4章共设置外观和6项产品技术指标，遵循“基础性能指标→结构特征指标”两层逻辑架构：基础性能指标（外观、粒度分布、水分含量、堆积密度、热值）确保产品生产一致性、储运安全性与工程可操作性；结构特征指标（硅基矿物成分含量、中孔孔容占比）确保产品的吸附性能本质。各项指标的设定原因与依据分述如下：

（1）外观

①设定原因：产品外观为浅红色或红褐色粉末，其色泽表现不仅能够直观体现改性组分分散均匀性与生产工艺稳定性，防范组分分布不均、杂质掺入等质量缺陷，同时也受到地质条件、成分组成以及地貌环境的制约。

②设定依据：基于改性配方与制备工艺，结合多批次量产产品的外观一致性验证结果，其色泽均匀性是判断改性组分在硅基矿物基体中分散是否均匀的直观指标。若出现色泽不均、色斑或异色夹杂，通常意味着改性工艺参数异常或原料中混入了杂质。

（2）硅基矿物成分含量

①设定原因：硅基矿物是硅基复合吸附剂的核心基体材料，直接决定材料孔道结构发育、热稳定性、表面活性位点数量及吸附容量基础。含量过低会导致中孔结构发育不足、吸附性能下降。参考SY/T 5163-2018表3质量要求中的最严值，并结合多批次量产数据，本标准将硅基矿物成分总含量定为 $\geq 50\%$ ，数值偏差为10%。在三种关键硅基矿物中，本标准要求伊利石 $\geq 20\%$ ，坡缕石 $\geq 10\%$ ，绿泥石 $\geq 5\%$ 。

②设定依据：

A.基体功能决定：硅基矿物（含伊利石、绿泥石、坡缕石等典型组分）天然具有层状或层链状多孔结构与较高比表面积，表面富含极性吸附位点，对气相二噁英类持久性有机污染物具有捕获性能。硅基矿物的层间通道和表面孔道可容纳大分子污染物，并与孔隙结构形成协同吸附体系，显著提升整体净化效率。CUN LIU等研究证实，硅基矿物的层状结构是二噁英吸附的核心位点^[17]。

B.硅基复合矿物改性的技术依据：本标准所规范的硅基复合吸附剂，以绿泥石、坡缕石、伊利石等多种硅基矿物组成的复合矿物体系为基体，采用整体提纯、活化、无机金属氧化物原位改性工艺同步调控所有矿物组分的孔隙结构与表面化学特性，充分发挥不同矿物的结构与成分优势，构建协同增效的吸附体系，而非仅针对单一矿物进行改性。整体改性的技术依据如下：

a. 多矿物协同具备天然吸附基础：复合体系中的各类硅基矿物

均具有层状或层链状晶体结构，表面分布有硅羟基、铝羟基及离子交换位点，对气相二噁英类有机污染物与重金属气态分子均具有天然吸附能力。吴大清等对黏土矿物吸附氯代有机污染物的研究表明，层状硅酸盐矿物的表面位点与层间域均可作为吸附活性位点，多矿物共存时可形成孔径梯度与位点互补，提升整体吸附效能^[18]。

b. 整体改性可同步丰富活性位点：通过酸活化、无机金属氧化物（如 Fe、Ce、La、Mn、Ti 等）原位改性等手段，可同时对复合体系内所有矿物的表面进行修饰，在绿泥石、坡缕石、伊利石表面同步构建 Si-O-M 活性位点，既活化伊利石的层间域与端面，也拓展坡缕石的纳米孔道吸附容量，同时强化绿泥石的固定作用，全方位提升材料对二噁英的物理捕集能力和对重金属的化学固定能力。

c. 黏土矿物改性机制具有普适性：Nolan 等研究表明，用羟基铝聚合物处理层状黏土矿物后，改性黏土对氯化二噁英的亲合力显著高于未处理黏土，吸附机制来自黏土表面结合的羟基铝聚合物与氯化二噁英之间的相互作用^[19]。该改性机制对绿泥石、坡缕石、伊利石等所有层状/层链状硅基矿物均适用，整体改性可充分释放每一类矿物的吸附潜力。

d. 复合体系结构稳定性适配烟气工况：复合矿物体系中的伊利石非膨胀性强、层间结合力高，坡缕石孔道结构刚性强，绿泥石热稳定性优异，三者协同使整体材料在 140℃~250℃ 生活垃圾焚烧烟气温度窗口内结构稳定，改性后孔道不易坍塌，从基体层面规避了传统活性炭因物理吸附主导而产生的二噁英高温脱附风险。

e. 组分含量保障整体改性效果：硅基矿物总含量≥50%，且绿泥石≥5%、坡缕石≥10%、伊利石≥20%的配比要求，可确保改性后有充足的基体表面与孔道内壁负载活性组分，支撑中孔孔容占比≥55%，满足工程应用中二噁英和重金属的协同净化效果要求。

C. 各矿物在材料体系的作用：

绿泥石是一族结构特殊的 2:1 型含水层状铝硅酸盐矿物，其通用化学式可表示为 $Y_3[Z_4O_{10}](OH)_2 \cdot Y_3(OH)_6$ ，八面体位置以镁、铁、铝为主，四面体位置以硅、铝为主。绿泥石对与二噁英结构或性质相似的有机物有吸附作用，如有研究显示绿泥石对多环芳烃具有吸附能力，平衡吸附量可达 0.756 mg/g^[20]。绿泥石含量不足 5% 将削弱材料对多环芳烃类污染物的吸附容量。此外，绿泥石结构中的铁元素可在非水相条件下完成有机污染物转化，对二噁英化学固定具有辅助作用。

坡缕石是一种单斜晶系含水镁铝硅酸盐黏土矿物，属 2:1 型层链状结构，两层硅氧四面体夹一层镁（铝）氧八面体，形成沿 a 轴方向的纳米孔道，理论化学式为 $(Mg,Al)_5[(OH)_2(Si,Al)_8O_{20}] \cdot 8H_2O$ 。其独特结构赋予其较大比表面积和优异吸附性能，纳米孔道结构与二噁英

分子尺寸匹配度较高，是吸附剂中孔孔容的贡献者之一。坡缕石 $\geq 10\%$ 可保证充足的中孔结构。

伊利石是一类非膨胀性的 2:1 型粘土矿物，其理想化学式可表示为 $K_{0.75}(Al_{1.75}R)Si_{3.5}Al_{0.5}O_{10} \cdot 2H_2O$ （R 代表 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等），晶体结构由两层硅氧四面体片夹一层铝氧八面体片构成，层间由低水合度的钾离子占据形成强结合力，已被证实可用于离子吸附和有机污染物吸附。

D.多批次量产数据验证：多批次量产样品实测值在 50.3%~63.2%（详见表 5-1 和图 5-1），工艺稳定性优异。

E.工程验证：工程验证表明，该含量范围可保证中孔孔容占比满足要求，二噁英与重金属去除效率满足工况要求。

表 5-1 硅基复合吸附剂硅基矿物成分含量检测结果表

序号	硅基矿物成分含量 (%)	伊利石 (%)	坡缕石 (%)	绿泥石 (%)
1	51.6	25.7	17.1	8.8
2	53.4	27.1	18.1	8.2
3	55.2	28.6	19.1	7.5
4	56.8	31.4	15.1	10.3
5	51.0	26.3	16.6	8.1
6	63.2	26.8	31.1	5.3
7	60.9	35.4	17.7	7.8
8	57.4	31.2	20.8	5.4
9	54.1	31.1	15.5	7.5
10	57.6	31.2	15.6	10.8
11	51.7	28.7	12.2	10.8
12	50.3	28.2	13.2	8.9
13	58.2	31.3	15.3	11.6
14	56.9	33.2	16.1	7.6
15	59.5	27.9	22.7	8.9
16	53.2	26.0	17.3	9.9
17	62.5	29.8	26.6	6.1
18	51.0	24.2	15.5	11.3
19	56.8	29.5	16.1	11.2
20	56.6	30.6	14.5	11.5
21	51.6	25.4	15.5	10.7
22	53.6	21.9	18.3	13.4
23	50.3	23.6	15.2	11.5
24	53.7	24.0	17.2	12.5
25	52.8	27.3	17.2	8.3
26	53.2	25.1	19.9	8.2
27	59.1	26.4	22.7	10.0
28	61.7	33.0	20.2	8.5
29	58.5	28.2	20.5	9.8
30	59.1	25.8	24.9	8.4
31	55.2	26.0	20.2	9.0
32	56.4	24.5	24.9	7.0
33	59.6	28.8	22.6	8.2
34	58.9	29.2	22.5	7.2

35	51.8	27.8	12.2	11.8
36	51.4	27.7	12.1	11.6
37	51.5	27.7	12.2	11.6
38	50.4	27.7	12.1	10.6
39	51.4	27.4	12.0	12.0
40	54.2	24.0	25.0	5.2
41	60.9	28.7	21.8	5.8

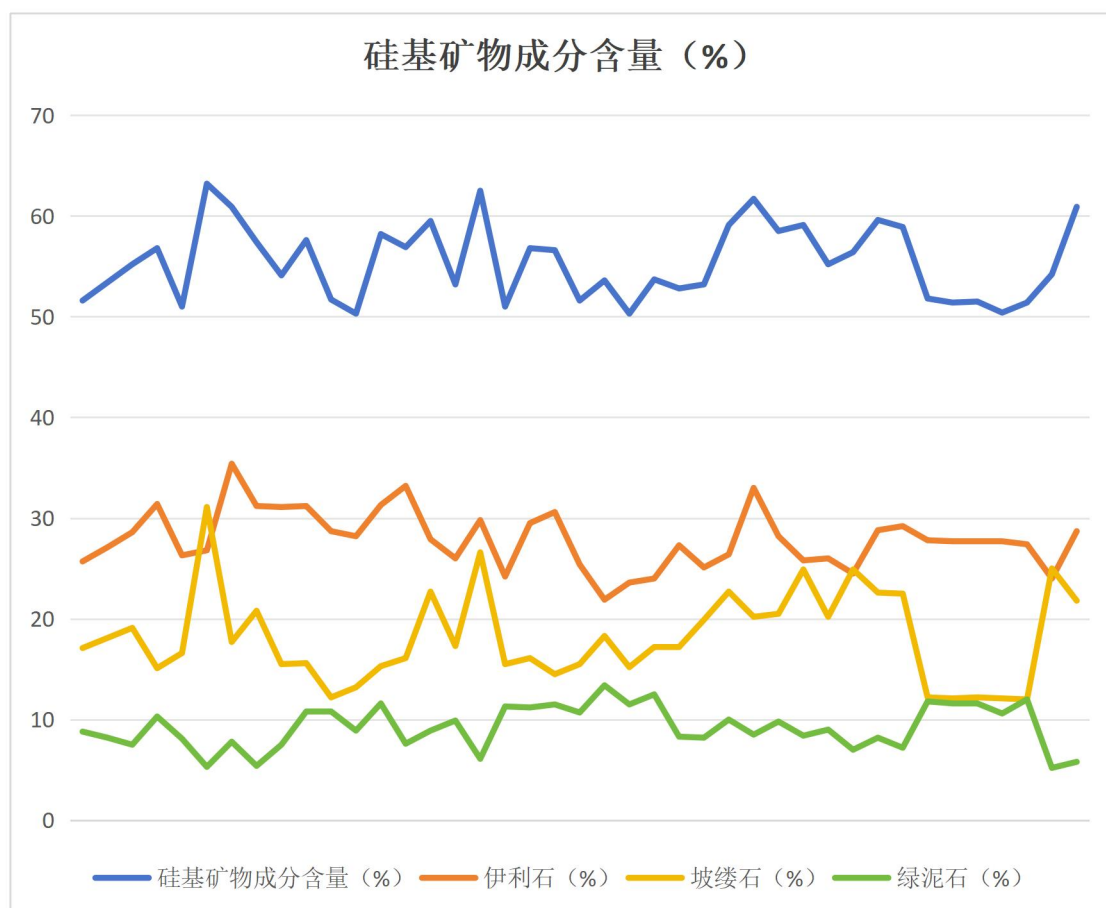


图 5-1 硅基复合吸附剂硅基矿物成分含量检测结果分布图
(注：图中横坐标为样品号，纵坐标为含量百分比(%))

(3) 中孔孔容占比

①设定原因：中孔（2~50nm）是能有效容纳并锁定二噁英大分子的关键孔道结构。二噁英分子的动力学直径为 0.4~3nm，且在烟气中常以分子团簇形式存在（可达 20nm 左右）。根据吸附理论，吸附剂利用率最高时，吸附剂的孔径与吸附质分子直径最佳比值为 1.7~3 倍。据此计算，吸附二噁英分子的有效孔径范围为 2.3~4.1nm。微孔（<2nm）孔径过小，二噁英分子无法进入；大孔（>50nm）孔径过大，无法有效锁持被吸附分子，中孔是唯一能与二噁英分子尺寸形成有效匹配的孔道结构。因此，中孔孔容占比是决定硅基复合吸附剂二噁英吸附性能的核心指标。本标准把中孔孔容占比定为≥55%。

②设定依据：

A.孔径—分子尺寸匹配的科学机理依据：根据朗缪尔吸附匹配理论，吸附剂有效吸附孔径需为吸附质分子直径的 1.7~3 倍，二噁英分子动力学直径为 0.4~3nm，二噁英在烟道中因聚合超细颗粒呈现分子状态，恰好落入中孔范围。刘斌等^[21]研究表明颗粒中同时存在多种孔结构，一般分为亚微孔、微孔、中孔和大孔。由于二噁英分子尺寸较大，亚微孔和微孔均不适于对其吸附，中孔是吸附二噁英分子的较佳孔隙。因此，中孔容积是评价吸附二噁英的合理结构参数，而不能采用常见的比表面积来对吸附二噁英性能进行评价，尺寸在 2~20nm 之间的孔是吸附二噁英的主要作用场所。

B.吸附性能临界阈值的验证依据：中孔孔容是决定二噁英吸附性能的最关键因素，与二噁英去除率呈显著正相关，相关性远高于比表面积、微孔容积等其他参数。马显华等^[22]对多类活性炭开展对比吸附试验，实测不同孔隙结构材料的二噁英净化效果：中孔孔容占比 52.3%的活性炭样品，二噁英去除表现最优；中孔占比 49.2%的样品处理效果小幅下降；中孔占比 47.8%、41.6%的样品，净化效果出现明显降低。试验数据直观体现，中孔占比越高，样品对二噁英的处理效果越好。郭祥信等^[23]围绕活性炭各项孔隙参数开展系统性测试与吸附试验，重点探究不同孔隙组成对气相二噁英吸附效果的影响规律，对比分析微孔、中孔对比对吸附表现的差异化作用，进一步补充了孔隙结构调控对二噁英吸附效果的试验研究基础。

C.孔隙网络与工况适配性：王沛玥研究表面发达的中孔孔容可构建连续贯通的孔隙网络，形成多级孔隙缓冲结构，有效减少垃圾焚烧烟气中粉尘、水汽对吸附位点的竞争占用，显著提升吸附剂在复杂工况下的吸附稳定性与长效性^[24]。

D.工程依据：工程验证表明，中孔孔容占比 $\geq 55\%$ 的产品可保证二噁英去除率 $>80\%$ 。

E.生产检测与应用现状：量产批次长期检测数据显示（详见表 5-2 和图 5-2），所有样品中孔孔容占比均 $\geq 55\%$ ，在 55.24%—83.53%区间。

表 5-2 硅基复合吸附剂中孔孔容检测结果表

序号	中孔占比 (%)	序号	中孔占比 (%)	序号	中孔占比 (%)
1	62.52	44	68.53	87	55.74
2	64.40	45	67.40	88	65.33
3	60.37	46	65.05	89	67.22
4	62.58	47	66.73	90	67.12
5	63.62	48	64.80	91	70.54
6	68.80	49	67.67	92	62.66
7	72.17	50	69.42	93	63.27
8	68.79	51	67.12	94	66.61
9	74.39	52	63.48	95	66.43

10	65.43	53	65.01	96	68.47
11	67.57	54	63.33	97	58.00
12	67.10	55	67.46	98	61.39
13	66.13	56	61.26	99	63.95
14	69.77	57	63.95	100	63.26
15	65.02	58	61.39	101	67.46
16	70.66	59	58.00	102	63.33
17	64.25	60	68.47	103	65.01
18	66.14	61	66.43	104	63.48
19	59.17	62	66.61	105	67.12
20	68.90	63	62.66	106	69.42
21	65.09	64	70.54	107	65.75
22	68.51	65	67.12	108	67.67
23	64.71	66	65.33	109	64.80
24	65.79	67	65.59	110	66.73
25	65.39	68	58.20	111	65.05
26	69.49	69	59.04	112	67.40
27	65.65	70	62.86	113	68.53
28	66.88	71	61.82	114	61.95
29	68.65	72	56.27	115	67.75
30	72.33	73	59.65	116	65.30
31	68.57	74	55.24	117	66.73
32	65.16	75	57.36	118	61.15
33	69.36	76	69.48	119	67.62
34	64.70	77	63.26	120	61.77
35	63.89	78	59.78	121	61.77
36	67.11	79	59.14	122	65.41
37	64.80	80	65.59	123	67.11
38	64.78	81	58.20	124	64.80
39	61.15	82	59.78	125	64.78
40	66.73	83	59.04	126	77.32
41	65.30	84	62.86	127	62.02
42	67.75	85	61.82	128	83.53
43	61.95	86	56.27	129	78.11

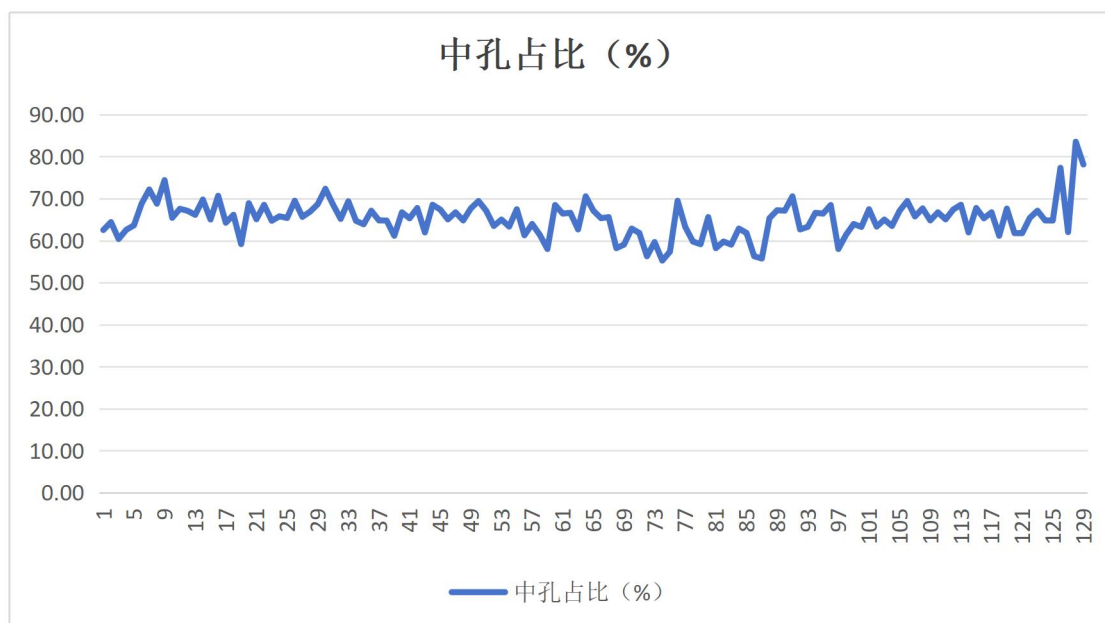


图 5-2 硅基复合吸附剂中孔孔容占比检测结果分布图
(注：图中横坐标为样品批号，纵坐标为中孔孔容占比 (%))

(4) 粒度分布：

①设定原因：粒度直接决定产品在烟气中的分散性、流动性与吸附接触面积。粒度过粗会导致分散不均、吸附不充分，降低净化效率；粒度过细易随烟气逃逸、堵塞布袋除尘器滤袋，增加系统阻力。该区间可完美适配焚烧烟气主流喷射工艺，保证与烟气充分接触。本标准把粒度分布定为 100 目 (0.150mm) 通过率 $\geq 95\%$ 、200 目 (0.074mm) 通过率 $\geq 80\%$ 、325 目 (0.045mm) 通过率 $\geq 60\%$ 。

②设定依据：

A.各工序工艺管控与固有粒度极限

a.原料分选与提纯阶段：在此阶段可去除 99%以上 $>2\text{mm}$ 的粗颗粒杂质与轻飘物，将提纯后硅基矿物原料的初始粒径控制在 45-150 μm 区间，原料粒度批次相对偏差 $\leq 1.5\%$ 。但天然硅基矿物存在晶体结构不均一性，少量莫氏硬度 >4 的石英包裹体难以通过常规提纯工艺完全分离，这部分硬颗粒在后续研磨中无法被充分破碎，成为成品中微量粗颗粒的主要来源之一。

b.精细化研磨阶段：在此阶段研磨后粉体基础粒度稳定在 200 目通过率 90%以上。但受物理破碎概率极限限制：当颗粒粒径小于 10 μm 时，颗粒间范德华力与静电力会显著大于破碎力，导致颗粒团聚而非进一步破碎；若延长研磨时间或提高转速，会引发严重的过粉碎与二次团聚，反而恶化粒度分布。因此，研磨工序无法实现所有颗粒均小于 200 目。

c.改性阶段：在化学改性过程中，不可避免会有 0.5%—1%的颗粒因表面活性位点相互作用形成微小二次团聚体，这部分团聚体粒径

多在 75-150 μm 之间，无法通过后续分级完全去除。

B.量产数据验证

基于对一年多批次量产产品的粒度分布进行的专项检测，检测结果如下（详见表 5-3.1、表 5-3.2、表 5-3.3、图 5-3.1、图 5-3.2 和图 5-3.3）：

100 目（0.150mm）通过率：在 96%—100%区间，平均通过率为 99.8%，所有样品均满足 $\geq 95\%$ 的要求；

200 目（0.074mm）通过率：在 89.8%—99.4%区间，平均通过率为 95.2%，所有样品均满足 $\geq 80\%$ 的要求。

325 目（0.045mm）通过率：在 64.9%—92.7%区间，平均通过率为 73.6%，所有样品均满足 $\geq 60\%$ 的要求。

该水平已达到当前工艺条件下的最优值，进一步提升通过率将导致生产成本大幅上升且无实际工程意义。

表 5-3.1 硅基复合吸附剂 100 目粒度通过率检测结果表

序号	100 目粒度通过率%	序号	100 目粒度通过率%	序号	100 目粒度通过率%
1	99.0	25	100	49	100
2	100	26	100	50	100
3	100	27	100	51	100
4	99.9	28	100	52	100
5	100	29	100	53	100
6	100	30	100	54	100
7	100	31	100	55	100
8	100	32	100	56	100
9	100	33	100	57	100
10	100	34	100	58	100
11	100	35	100	59	100
12	100	36	100	60	100
13	100	37	100	61	100
14	100	38	100	62	100
15	100	39	100	63	100
16	100	40	100	64	100
17	100	41	100	65	100
18	100	42	100	66	100
19	100	43	100	67	100
20	100	44	100	68	100
21	100	45	100	69	100
22	100	46	100	70	100
23	100	47	100		
24	100	48	100		

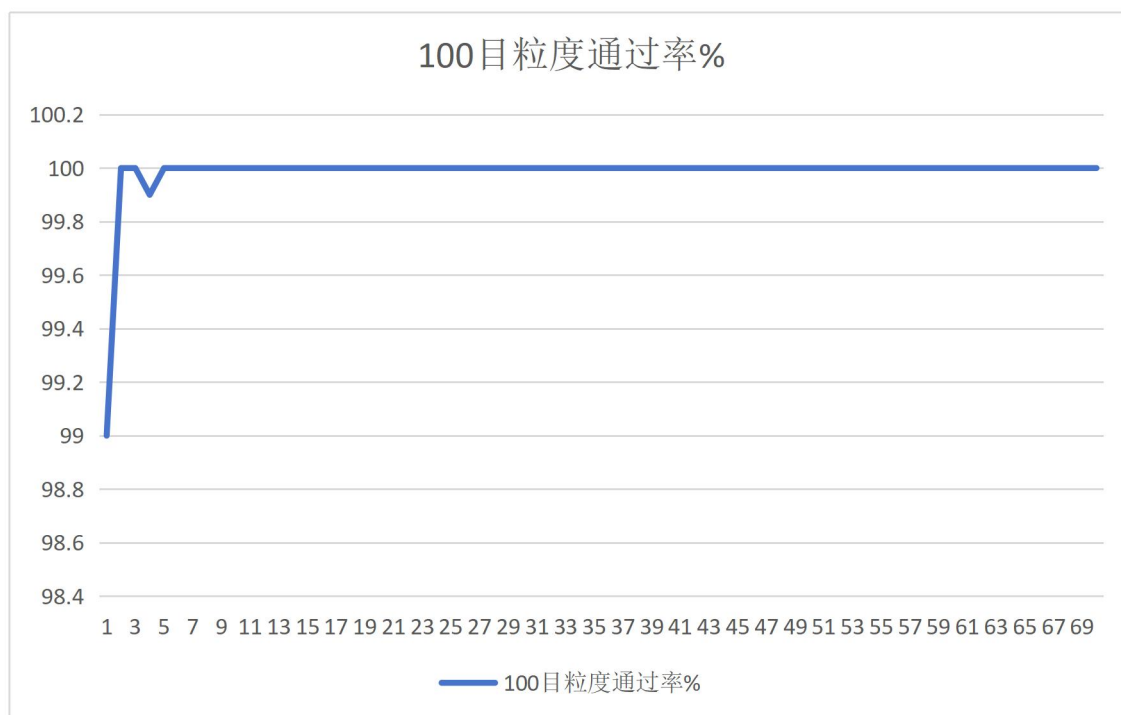


图 5-3.1 硅基复合吸附剂 100 目粒度检测结果分布图
(注：图中横坐标为样品批号，纵坐标为 100 目粒度通过率（%）)

表 5-3.2 硅基复合吸附剂 200 目粒度通过率检测结果表

序号	200 目粒度 通过率%	序号	200 目粒度通 过率%	序号	200 目粒度 通过率%	序号	200 目粒度通 过率%
1	97.5	126	96.1	251	92.9	376	96.0
2	99.4	127	96.3	252	93.9	377	95.7
3	98.4	128	94.0	253	93.9	378	96.1
4	98.3	129	94.7	254	93.9	379	95.4
5	97.9	130	94.0	255	92.7	380	96.1
6	96.1	131	94.4	256	94.3	381	94.5
7	95.6	132	94.5	257	93.5	382	93.2
8	98.5	133	94.2	258	93.9	383	94.0
9	97.2	134	94.1	259	93.9	384	93.9
10	98.5	135	94.1	260	95.3	385	95.7
11	98.2	136	93.8	261	94.2	386	94.1
12	98.3	137	94.0	262	94.9	387	94.2
13	98.1	138	95.3	263	95.1	388	95.3
14	97.4	139	95.3	264	94.4	389	94.1
15	97.5	140	94.1	265	93.9	390	95.8
16	96.2	141	95.7	266	95.1	391	94.5
17	97.7	142	95.7	267	96.1	392	94.0
18	97.5	143	95.2	268	95.5	393	94.0
19	96.5	144	95.7	269	94.1	394	94.3
20	98.0	145	95.0	270	96.1	395	95.2
21	97.3	146	95.5	271	95.0	396	95.7
22	98.4	147	94.7	272	94.7	397	96.1
23	98.1	148	95.1	273	96.3	398	95.9
24	97.6	149	94.4	274	95.3	399	93.6

序号	200 目粒度 通过率%	序号	200 目粒度通 过率%	序号	200 目粒度 通过率%	序号	200 目粒度通 过率%
25	97.1	150	94.8	275	95.4	400	94.2
26	98.4	151	94.1	276	95.1	401	94.0
27	97.1	152	94.1	277	93.5	402	93.3
28	98.0	153	94.6	278	94.0	403	93.6
29	98.9	154	94.4	279	93.8	404	94.0
30	97.6	155	94.9	280	94.2	405	93.5
31	98.1	156	94.3	281	93.8	406	94.4
32	96.1	157	94.1	282	94.2	407	93.5
33	95.8	158	94.6	283	93.4	408	93.2
34	96.8	159	95.4	284	94.3	409	93.2
35	96.3	160	94.6	285	95.1	410	93.6
36	98.0	161	95.8	286	93.7	411	94.0
37	96.9	162	95.5	287	93.5	412	93.1
38	96.5	163	95.3	288	94.0	413	93.9
39	97.1	164	95.1	289	93.5	414	93.5
40	92.0	165	94.9	290	94.7	415	93.5
41	91.8	166	95.1	291	93.5	416	92.6
42	91.8	167	93.6	292	94.7	417	94.3
43	91.6	168	92.5	293	94.3	418	92.6
44	91.4	169	95.3	294	93.9	419	94.7
45	91.8	170	94.0	295	95.1	420	96.4
46	90.6	171	93.7	296	93.7	421	95.7
47	90.1	172	93.6	297	96.2	422	95.9
48	90.3	173	93.4	298	93.5	423	95.4
49	90.1	174	95.2	299	93.6	424	94.3
50	90.4	175	95.5	300	93.3	425	94.6
51	90.2	176	95.8	301	94.6	426	93.7
52	89.8	177	95.9	302	93.7	427	95.6
53	90.1	178	95.3	303	93.5	428	94.3
54	90.7	179	95.2	304	94.5	429	94.2
55	90.9	180	96.2	305	94.3	430	94.2
56	90.2	181	93.4	306	93.4	431	94.5
57	90.4	182	94.9	307	94.6	432	94.0
58	90.1	183	95.1	308	93.6	433	94.1
59	95.8	184	94.6	309	95.2	434	94.5
60	95.1	185	95.7	310	94.3	435	94.4
61	92.9	186	96.1	311	93.0	436	94.4
62	94.0	187	96.4	312	93.6	437	92.6
63	95.1	188	95.1	313	96.0	438	95.3
64	95.7	189	92.4	314	93.6	439	93.4
65	95.2	190	92.5	315	93.9	440	93.7
66	94.0	191	94.5	316	93.2	441	92.9
67	95.3	192	93.7	317	94.4	442	95.2
68	89.8	193	94.1	318	93.8	443	93.0
69	90.4	194	96.7	319	93.5	444	93.9
70	90.8	195	95.0	320	93.4	445	93.9
71	90.5	196	93.9	321	94.0	446	93.6

序号	200 目粒度 通过率%	序号	200 目粒度通 过率%	序号	200 目粒度 通过率%	序号	200 目粒度通 过率%
72	97.3	197	95.6	322	93.6	447	93.8
73	99.4	198	95.1	323	94.2	448	93.8
74	96.2	199	94.2	324	94.3	449	94.8
75	95.5	200	94.5	325	93.7	450	95.0
76	92.8	201	95.4	326	93.9	451	94.0
77	94.5	202	92.4	327	95.5	452	94.6
78	94.3	203	95.0	328	94.8	453	93.9
79	94.1	204	94.5	329	92.8	454	93.5
80	96.1	205	96.0	330	93.0	455	94.2
81	93.6	206	96.7	331	95.1	456	93.1
82	94.8	207	94.6	332	91.5	457	95.3
83	93.8	208	95.7	333	92.0	458	93.0
84	94.8	209	95.1	334	92.3	459	93.1
85	91.9	210	95.0	335	91.6	460	93.5
86	94.0	211	95.2	336	93.2	461	94.2
87	93.9	212	94.7	337	93.2	462	93.5
88	92.4	213	94.7	338	93.2	463	92.9
89	92.3	214	95.1	339	92.9	464	93.8
90	93.0	215	94.4	340	92.6	465	91.2
91	92.6	216	94.9	341	94.1	466	93.8
92	94.6	217	94.8	342	92.7	467	93.8
93	97.4	218	95.9	343	92.0	468	93.6
94	97.4	219	96.1	344	92.5	469	94.0
95	96.0	220	94.1	345	94.2	470	93.2
96	97.9	221	92.7	346	93.5	471	94.1
97	96.7	222	95.6	347	93.0	472	94.7
98	95.6	223	94.7	348	94.2	473	92.7
99	95.6	224	93.7	349	93.5	474	90.5
100	95.8	225	93.2	350	93.0	475	93.6
101	95.2	226	95.0	351	94.2	476	94.1
102	95.4	227	95.9	352	93.1	477	95.2
103	96.2	228	95.3	353	94.1	478	94
104	94.0	229	95.6	354	93.4	479	94.2
105	94.4	230	94.7	355	92.6	480	93.6
106	95.3	231	96.7	356	94.0	481	94.3
107	94.1	232	96.0	357	95.7		
108	94.9	233	95.7	358	95.6		
109	94.8	234	96.5	359	95.6		
110	94.5	235	93.9	360	94.4		
111	95.1	236	94.3	361	94.1		
112	94.6	237	94.2	362	94.4		
113	94.9	238	96.1	363	94.7		
114	94.3	239	95.0	364	93.7		
115	96.2	240	93.7	365	94.3		
116	95.8	241	96.1	366	92.6		
117	95.2	242	96.0	367	94.8		
118	95.2	243	95.7	368	93.2		

序号	200 目粒度 通过率%	序号	200 目粒度通 过率%	序号	200 目粒度 通过率%	序号	200 目粒度通 过率%
119	95.8	244	95.3	369	93.5		
120	95.1	245	95.2	370	94.1		
121	96.5	246	92.8	371	93.7		
122	96.4	247	94.8	372	93.9		
123	97.1	248	94.9	373	95.1		
124	96.5	249	94.4	374	94.3		
125	96.5	250	93.7	375	94.3		

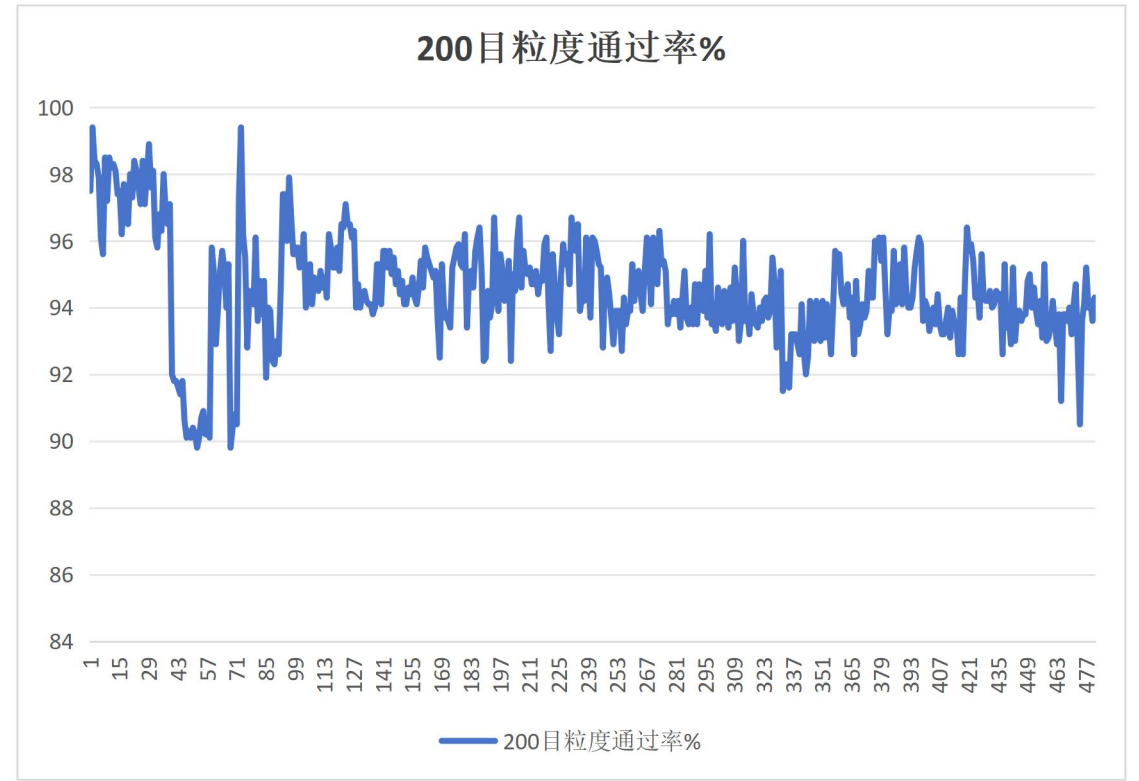


图 5-3.2 硅基复合吸附剂 200 目粒度检测结果分布图
(注：图中横坐标为样品批号，纵坐标为 200 目粒度通过率(%))

表 5-3.3 硅基复合吸附剂 325 目粒度通过率检测结果表

序号	325 目粒度通过率%
1	83.0
2	92.7
3	72.8
4	80.4
5	80.4
6	87.1
7	65.1
8	71.4
9	71.4
10	72.6
11	72.6
12	74.1
13	74.1

序号	325 目粒度通过率%
14	69.9
15	69.9
16	69.9
17	73.7
18	73.7
19	70.7
20	70.7
21	76.5
22	73.2
23	73.2
24	73.3
25	73.3
26	73.3
27	75.4
28	75.4
29	75.4
30	70.2
31	70.2
32	64.9
33	64.9
34	66.5
35	66.5
36	71.7
37	71.7
38	80.3
39	80.3
40	73.8
41	73.8
42	72.9

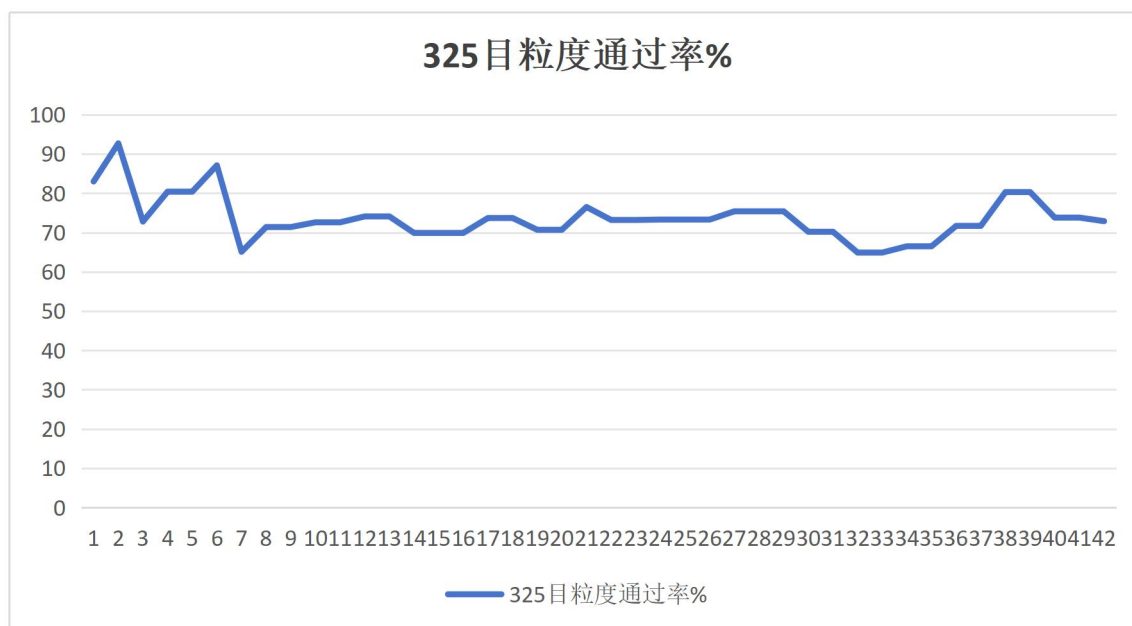


图 5-3.3 硅基复合吸附剂 325 目粒度检测结果分布图
(注：图中横坐标为样品批号，纵坐标为 325 目粒度通过率(%))

(5) 水分含量

①设定原因：水分含量是决定硅基复合吸附剂吸附活性、气力输送稳定性、系统设备安全及全生命周期经济性的双向关键控制指标，需严格规避水分过高与过低的双重风险。本标准把水分含量定为 $\leq 5\%$ 。

A.水分过高：水分子极性显著强于二噁英，会优先抢占材料表面与中孔内的活性吸附位点，形成竞争吸附并堵塞孔道，大幅降低二噁英吸附容量与去除效率；同时颗粒间液桥力急剧升高，引发粉体团聚结块，易造成喷射管道、给料阀堵塞，还会与烟气中 SO_2 、 HCl 等酸性组分结合形成酸性液膜，加剧设备低温腐蚀，并抬升灰含水率、增加稳定化处置成本。

B.水分过低：会导致材料表面活性硅羟基发生不可逆脱水缩合，永久损失吸附活性位点，同时加剧粉体静电聚集，提升生产能耗与现场运行隐患。

C.设定水分含量 $\leq 5\%$ ，可平衡材料吸附活性、输送流畅性与生产运维安全，完美适配生活垃圾焚烧烟气净化全流程应用需求。

①设定依据：

A.科学机理与文献支撑

a.水分过高：

竞争吸附与孔道堵塞：水分子的极性显著强于疏水性的二噁英分子，会优先与吸附剂表面的极性位点结合，形成竞争吸附并堵塞吸附孔道，大幅降低二噁英吸附容量与去除效率。刘斌等研究指出，吸附剂表面氧含量增加会提升其亲水性能，导致对疏水性二噁英的吸附性

能下降；而水分的存在会直接占据吸附剂表面的活性吸附位点，同时在孔道内形成水膜，阻碍二噁英分子向孔内扩散^[21]。郭祥信等进一步证实，中孔是吸附二噁英的主要场所，其中 2~5nm 的中孔对二噁英吸附起关键作用；当含水率过高时，水分子会优先填充这些中孔结构，使二噁英无法进入孔道内部进行吸附，最终导致吸附剂对二噁英的有效吸附容量显著降低^[23]。

粉体团聚与喷射系统故障：颗粒表面水分含量增加会使颗粒间液桥力急剧升高，引发粉体团聚结块，易造成喷射管道、给料阀堵塞，导致吸附剂投加不均甚至系统停机。徐止恒等通过 CFD-DEM 数值模拟研究发现，颗粒含水率越高，液桥力与临界破裂距离越大，团聚现象越严重；当含水率达到 5% 时，颗粒几乎全部以团块形式运动，易在管道弯头、变径处沉积堵塞，导致输送效率下降 40% 以上，最终引发气力输送系统流动失效^[25]。这种团聚现象不仅会造成喷射系统故障，还会导致吸附剂在烟气中分散不均，进一步降低二噁英的接触吸附效率。

酸性液膜形成与设备腐蚀：吸附剂带入的过量水分会与烟气中 SO₂、HCl 等酸性组分结合形成酸性液膜，在设备表面引发低温腐蚀，缩短设备使用寿命。刘斌等^[21]明确指出，当烟气温度低于酸性气体的露点温度及生石灰潮解温度时，水分会与烟气中 SO₂、HCl 结合形成酸性液膜，造成烟道、布袋除尘器壳体、引风机等设备腐蚀及布袋滤饼堵塞，严重影响系统稳定运行。腐蚀速率随烟气含水率升高呈线性增长，会显著增加设备维护成本和停机检修频率。

飞灰含水率抬升与处置成本增加：高含水率的活性炭最终会进入飞灰中，抬升飞灰整体含水率，导致飞灰稳定化处置难度和成本显著增加。陈爱军等^[26]通过实验研究证实，螯合飞灰的无侧限抗压强度随含水率增加呈近似线性下降，飞灰含水率每升高 1%，水泥固化体 28d 抗压强度下降 2.1%~3.2%；为满足填埋场入场强度要求，螯合剂用量需增加 8%~12%，水泥用量增加 5%~10%，飞灰处置成本相应上升 10%~15%。此外，高含水率飞灰在运输过程中易发生渗漏，需采用密封罐车运输，运输成本增加 30% 以上，同时还会产生更多渗滤液，进一步增加填埋场运维成本。

b. 水分过低：

硅羟基不可逆脱水缩合：吸附剂表面的 Si-OH 硅羟基是其吸附二噁英、重金属等污染物的核心活性位点，水分过低会引发空间相邻硅羟基的不可逆脱水缩合，造成吸附性能的永久性劣化。Cheng 等通过热重分析（TG）和 ²⁹Si 固体核磁共振（MASNMR）定量证实：纳米二氧化硅表面初始羟基密度为 8.6 个/nm²，经 600℃ 脱水处理后降至 3.6 个/nm²；即使在常温空气中充分再水化 48 小时，羟基密度也仅能

恢复至 7.0 个/nm²，意味着 1.6 个/nm² 的羟基发生了永久性损失^[27]。

粉体静电剧烈聚集水分过低会使硅基吸附剂颗粒表面电阻率急剧升高，静电荷无法有效耗散，引发剧烈的静电聚集，易造成喷射管道、给料阀堵塞。李俊菲等通过料罐静电测量试验系统定量证实：粉体荷质比与含水率呈显著负相关，当生物质粉体外水含量从 7%降至 1%时，荷质比从接近 0 升至 0.4μC/kg，静电水平提升两个数量级^[28]。

B.量产批次稳定性验证：根据近一年来硅基复合吸附剂多批次样品的水分含量专项试验结果（详见表 5-4 和图 5-4），检测结果显示，产品水分含量在 1.03%—3.73%区间，平均水分含量为 2.15%，无超标情况；

C.工程应用适配性验证：近一年来，40 余家合作生活垃圾焚烧企业在规模化应用过程中，未收到任何关于产品团聚结块、喷射系统堵塞、吸附效果异常的相关投诉，充分验证该水分控制区间可完全适配焚烧厂主流喷射工艺与现场工况。

表 5-4 硅基复合吸附剂水分含量检测结果表

序号	水分含量	序号	水分含量	序号	水分含量	序号	水分含量
1	2.37	126	1.48	251	1.62	376	1.35
2	3.30	127	1.57	252	1.97	377	1.46
3	3.11	128	1.79	253	2.33	378	1.78
4	3.22	129	2.43	254	1.74	379	2.45
5	2.13	130	2.46	255	1.60	380	1.97
6	2.15	131	2.37	256	2.12	381	2.03
7	3.05	132	2.41	257	2.43	382	1.33
8	3.73	133	2.32	258	2.36	383	1.62
9	3.04	134	2.67	259	1.46	384	1.97
10	1.71	135	2.24	260	2.34	385	2.03
11	2.30	136	2.27	261	1.97	386	1.56
12	1.19	137	2.67	262	2.16	387	1.87
13	1.38	138	2.43	263	2.18	388	2.32
14	2.31	139	2.54	264	1.73	389	1.06
15	2.40	140	2.82	265	2.23	390	1.46
16	2.15	141	1.72	266	1.75	391	1.38
17	2.98	142	1.97	267	2.45	392	1.87
18	2.71	143	2.37	268	2.37	393	2.02
19	3.30	144	2.20	269	1.94	394	1.95
20	2.20	145	1.78	270	2.28	395	1.49
21	2.14	146	1.95	271	2.47	396	1.97
22	2.21	147	1.40	272	1.98	397	1.36
23	2.72	148	2.05	273	2.16	398	1.53
24	2.96	149	1.80	274	1.68	399	1.58
25	2.65	150	2.95	275	2.43	400	1.67
26	2.82	151	1.67	276	1.97	401	1.78
27	2.19	152	2.43	277	2.46	402	1.47
28	2.92	153	1.93	278	2.37	403	1.78
29	2.35	154	1.88	279	1.75	404	1.47

序号	水分含量	序号	水分含量	序号	水分含量	序号	水分含量
30	2.69	155	1.74	280	2.23	405	1.78
31	2.88	156	1.22	281	2.66	406	1.92
32	2.59	157	1.78	282	2.17	407	1.23
33	2.70	158	2.02	283	2.45	408	1.37
34	2.54	159	2.06	284	2.78	409	1.32
35	1.98	160	1.56	285	2.12	410	1.75
36	2.90	161	1.98	286	1.98	411	1.43
37	2.08	162	1.98	287	1.27	412	2.12
38	2.87	163	1.92	288	2.36	413	2.27
39	3.02	164	2.12	289	2.45	414	1.37
40	2.18	165	2.36	290	1.98	415	1.92
41	3.04	166	2.54	291	2.22	416	1.56
42	2.68	167	2.47	292	2.56	417	1.23
43	2.37	168	2.58	293	1.87	418	1.17
44	2.43	169	2.67	294	2.43	419	1.32
45	2.59	170	2.83	295	1.98	420	1.37
46	2.61	171	2.62	296	1.88	421	1.23
47	2.93	172	2.43	297	2.46	422	1.42
48	3.22	173	2.65	298	1.75	423	1.28
49	2.55	174	2.43	299	2.43	424	1.47
50	2.87	175	2.65	300	1.87	425	1.58
51	2.67	176	2.54	301	2.09	426	1.15
52	2.55	177	2.47	302	1.57	427	1.37
53	2.16	178	2.12	303	2.23	428	1.42
54	2.01	179	2.48	304	2.46	429	1.56
55	2.50	180	2.87	305	1.95	430	1.17
56	2.14	181	3.60	306	2.48	431	1.43
57	2.70	182	3.30	307	2.52	432	1.23
58	2.35	183	3.14	308	2.54	433	1.17
59	2.22	184	1.87	309	1.87	434	1.42
60	1.97	185	2.34	310	1.56	435	1.71
61	2.41	186	1.92	311	2.37	436	1.32
62	2.40	187	2.17	312	1.87	437	1.48
63	2.56	188	2.77	313	1.23	438	1.56
64	2.62	189	2.43	314	2.22	439	1.84
65	2.31	190	1.92	315	2.43	440	1.31
66	2.65	191	2.17	316	1.56	441	1.65
67	2.73	192	2.77	317	2.58	442	1.78
68	1.71	193	2.43	318	2.25	443	1.71
69	1.98	194	2.57	319	2.47	444	1.62
70	2.04	195	2.48	320	2.36	445	1.38
71	2.12	196	2.42	321	2.62	446	1.17
72	1.70	197	2.77	322	2.54	447	1.46
73	1.74	198	2.35	323	1.97	448	1.48
74	1.83	199	2.74	324	1.82	449	1.57
75	2.42	200	2.36	325	2.37	450	1.30
76	2.54	201	1.97	326	2.45	451	1.42
77	1.68	202	2.46	327	2.36	452	1.51

序号	水分含量	序号	水分含量	序号	水分含量	序号	水分含量
78	1.55	203	2.75	328	1.49	453	1.12
79	1.29	204	1.99	329	2.41	454	1.37
80	1.73	205	2.42	330	1.86	455	1.46
81	1.92	206	1.87	331	1.93	456	1.13
82	1.22	207	2.36	332	1.97	457	1.36
83	1.08	208	2.47	333	2.32	458	1.52
84	1.03	209	2.68	334	1.98	459	1.16
85	1.97	210	2.80	335	1.64	460	1.14
86	1.55	211	2.34	336	2.12	461	1.48
87	1.26	212	2.46	337	1.74	462	1.52
88	1.34	213	2.42	338	1.86	463	1.42
89	1.71	214	1.82	339	1.23	464	1.23
90	2.21	215	1.80	340	1.86	465	1.12
91	2.46	216	2.23	341	1.23	466	1.46
92	2.35	217	2.36	342	1.95	467	1.32
93	2.14	218	2.74	343	1.06	468	1.45
94	2.67	219	2.53	344	1.24	469	1.63
95	1.96	220	2.81	345	1.27	470	1.41
96	1.80	221	2.12	346	1.67	471	1.84
97	1.97	222	1.34	347	1.32	472	1.32
98	2.04	223	1.53	348	1.45	473	1.41
99	1.45	224	1.53	349	1.27	474	1.05
100	1.77	225	2.23	350	1.67	475	1.44
101	2.14	226	2.46	351	1.32	476	1.37
102	2.32	227	2.68	352	1.45	477	1.65
103	2.74	228	1.53	353	1.27	478	1.82
104	2.48	229	1.65	354	1.23	479	1.08
105	2.54	230	2.07	355	2.15	480	1.74
106	2.46	231	1.63	356	1.84	481	1.23
107	2.59	232	2.72	357	1.96	482	1.61
108	2.55	233	2.84	358	1.43	483	1.55
109	2.24	234	2.62	359	1.92	484	1.07
110	2.54	235	2.67	360	1.75	485	1.34
111	2.45	236	2.73	361	2.16	486	1.52
112	2.57	237	1.98	362	1.69	487	1.83
113	2.81	238	1.67	363	1.57	488	1.23
114	2.43	239	1.33	364	1.60	489	1.43
115	2.64	240	1.79	365	2.14	490	1.32
116	1.93	241	2.12	366	1.73	491	1.27
117	1.68	242	1.97	367	1.54	492	1.08
118	1.98	243	1.67	368	1.78	493	1.31
119	2.33	244	1.24	369	1.45	494	1.28
120	1.24	245	2.04	370	1.16	495	1.22
121	1.87	246	1.88	371	1.25	496	1.11
122	1.95	247	1.56	372	1.34	497	1.32
123	1.73	248	2.34	373	1.27	498	1.36
124	1.83	249	1.98	374	1.07	499	1.17
125	1.67	250	1.74	375	1.84	500	1.28

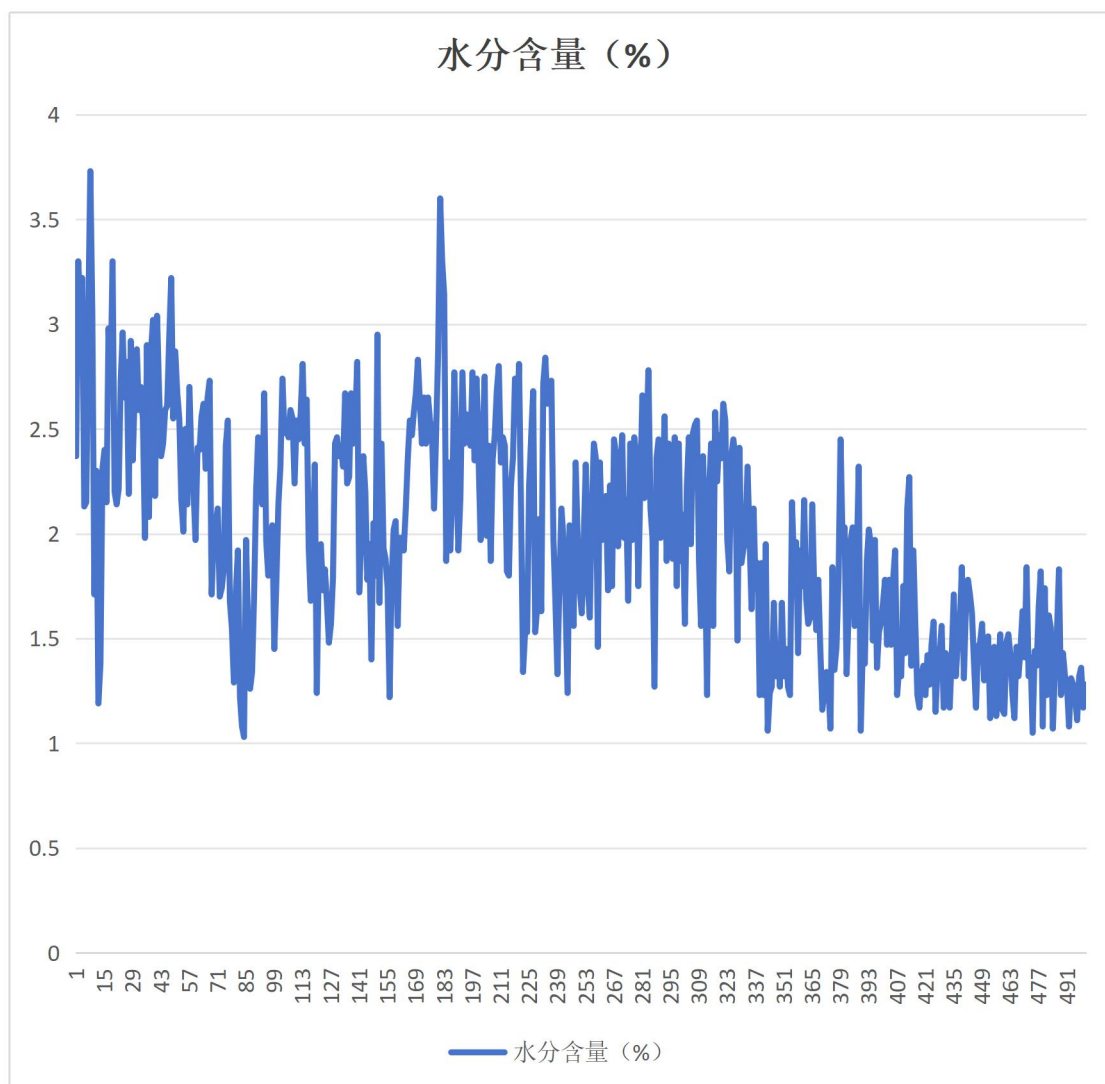


图 5-4 硅基复合吸附剂水分含量检测结果分布图
(注：图中横坐标为样品批号，纵坐标为水分含量 (%))

(6) 堆积密度

①设定原因：堆积密度直接决定产品的输送流化性能、管道适配性、床层压降与装填运输成本；密度过低易导致输送过程中飞散、计量不准，密度过高易导致管道堵塞、流化不均；该区间适配国内主流喷射输送系统，保证输送稳定、流化均匀，确保产品在烟气中与污染物充分接触。本标准把堆积密度定为 0.65~0.90g/mL。

②设定依据：

A.流化性能与输送适配：堆积密度在 0.65~0.90g/mL 范围内的粉体材料，在常规气力输送系统中具有最佳的悬浮流化特性——既不至于因密度过低而难以沉降捕集，也不至于因密度过高而需要过高的输送气速。

B.量产批次稳定性验证：根据近一年来硅基复合吸附剂多批次样品的堆积密度专项试验结果（详见表 5-5 和图 5-5），产品堆积密度在 0.676g/mL-0.786g/mL 区间，平均堆积密度为 0.712g/mL，完全处

于拟定的控制区间内，批次间波动幅度小，生产工艺与产品质量稳定性优异；

C.工程应用适配性验证：近一年来，40 余家合作生活垃圾焚烧企业在规模化应用过程中，未收到任何关于产品气力输送不畅、管道堵塞、投料计量偏差过大、布袋除尘器压降异常、吸附效果不达标的相关投诉，充分验证该堆积密度区间与焚烧厂主流喷射系统、烟气净化工艺的高度适配性。

表 5-5 硅基复合吸附剂堆积密度检测结果表

序号	堆积密度 (g/mL)
1	0.728
2	0.725
3	0.786
4	0.690
5	0.724
6	0.676
7	0.715
8	0.715
9	0.740
10	0.723
11	0.723
12	0.702
13	0.762
14	0.708
15	0.706
16	0.704
17	0.707
18	0.705
19	0.705
20	0.676
21	0.709
22	0.723
23	0.714
24	0.755
25	0.696
26	0.696
27	0.726

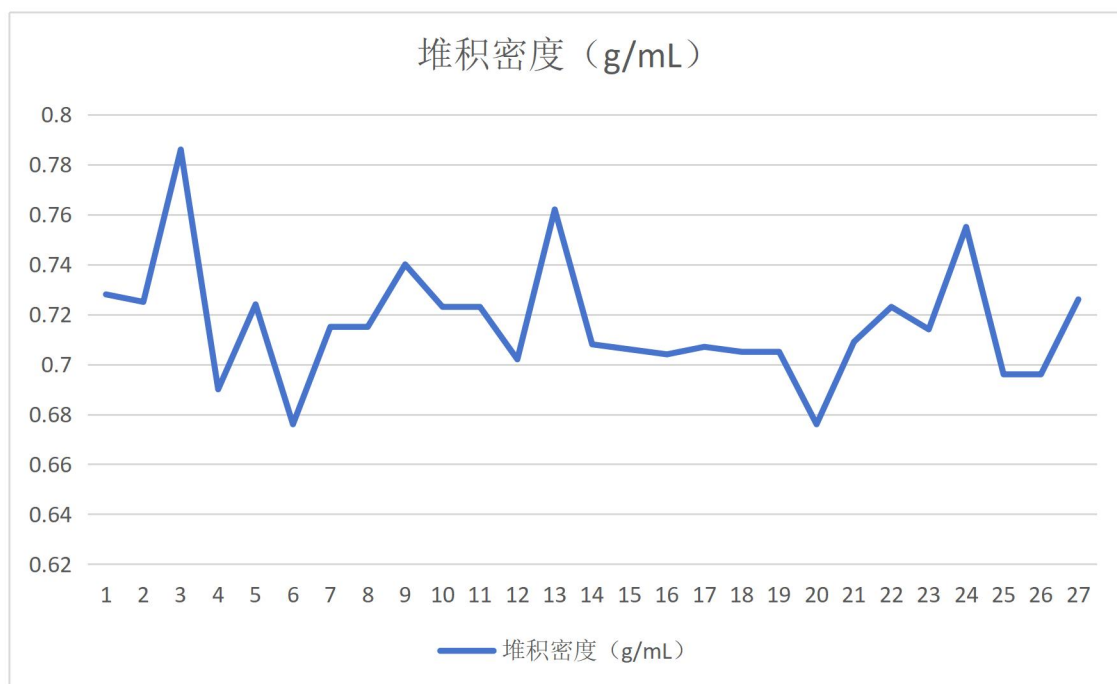


图 5-5 硅基复合吸附剂堆积密度检测结果分布图
(注：图中横坐标为样品批号，纵坐标为堆积密度 (g/mL))

(7) 低位热值

①设定原因：热值反映产品中可燃有机杂质的含量。1kJ/kg 的限值仅为国标 A1 级不燃材料要求 ($\leq 2.0\text{MJ/kg}$) 的 1/2000，体现极高的安全冗余。该限值可严格控制有机杂质含量，保障产品全无机硅基主体的不可燃特性，彻底规避自燃风险，适配 150~300℃的焚烧烟气全工况运行。本标准把低位热值定为 $< 1\text{kJ/kg}$ 。

②设定依据：

A.国家标准依据：根据 GB 8624-2012《建筑材料及制品燃烧性能分级》，A1 级不燃材料的总热值 (PCS) 限值为 $\leq 2.0\text{MJ/kg}$ 。硅基复合吸附剂热值指标设定为 $< 1\text{kJ/kg}$ (即 $< 0.001\text{MJ/kg}$)，远低于国家标准 A1 级不燃材料 2.0MJ/kg 的限值要求，不足国标限值的 1/2000，体现了产品极高的不燃安全裕度。

B.产品材料特性：硅基复合吸附剂以天然硅基矿物（绿泥石、坡缕石、伊利石等）为原料，经改性制备而成，产品主体为无定形二氧化硅三维骨架，属于全无机非金属材料体系。无机矿物粉体大多数不可燃，硅基材料本身具有优良的热稳定性和不燃性。产品配方中不含任何有机碳组分或可燃添加剂，从材料本源上决定了其不具备燃烧释热的基础条件。

C.安全冗余设计：热值指标设定为 $< 1\text{kJ/kg}$ ，而非简单地表述为“不燃”或“未检出”，主要基于以下考虑：

a.定量化管控需求：将热值以具体数值 ($< 1\text{kJ/kg}$) 形式纳入产品技术指标，为生产质量控制和产品一致性判定提供了明确的量化依据，

避免“不燃”等定性描述带来的模糊性。

b.安全冗余设计：该限值较国标 A1 级要求严格 2000 倍以上，即使生产过程中出现极微量的工艺波动或杂质引入，产品热值仍远低于安全临界值，确保在垃圾焚烧 150~300℃ 高温烟气工况下的绝对安全，从源头规避活性炭工艺中因燃点低（200~250℃）导致的粉尘燃爆和高温自燃风险。

D.实测数据支撑：标准编制过程中，对多批次量产产品开展了热值专项检测，热值均为未检出（负值）（详见表 5-6.1 和图 5-6.1），完全处于拟定的控制区间内，生产工艺与产品质量稳定性优异。通过广东产品质量监督检验研究院国家消防产品质量检验检测中心权威检测机构监测进一步证实，产品燃烧性能等级达到 GB 8624-2012 规定的 A1 级不燃材料标准—炉内温升仅 1.0℃（限值≤30℃）、持续燃烧时间为 0s（限值要求为 0）、质量损失率 30.0%（限值≤50%）、总热值为负值（限值≤2.0MJ/kg）。上述数据充分表明，<1kJ/kg 的热值限值设定科学合理、切实可行，量产产品可稳定满足该指标要求。

E.工程应用适配性验证：近一年来，40 余家合作生活垃圾焚烧企业规模化应用过程中，未收到任何关于产品自燃、炉膛温度异常波动、布袋除尘器烧袋、系统运行安全风险的相关投诉，充分验证该热值控制区间可完全适配焚烧厂高温烟气工况，从源头规避安全风险。

表 5-6.1 硅基复合吸附剂热值检测结果表

序号	热值 (kJ/kg)
1	未检出 (负值)
2	未检出 (负值)
3	未检出 (负值)
4	未检出 (负值)
5	未检出 (负值)
6	未检出 (负值)
7	未检出 (负值)
8	未检出 (负值)
9	未检出 (负值)
10	未检出 (负值)
11	未检出 (负值)
12	未检出 (负值)
13	未检出 (负值)
14	未检出 (负值)
15	未检出 (负值)
16	未检出 (负值)
17	未检出 (负值)
18	未检出 (负值)
19	未检出 (负值)
20	未检出 (负值)
21	未检出 (负值)
22	未检出 (负值)

序号	热值 (kJ/kg)
23	未检出 (负值)
24	未检出 (负值)

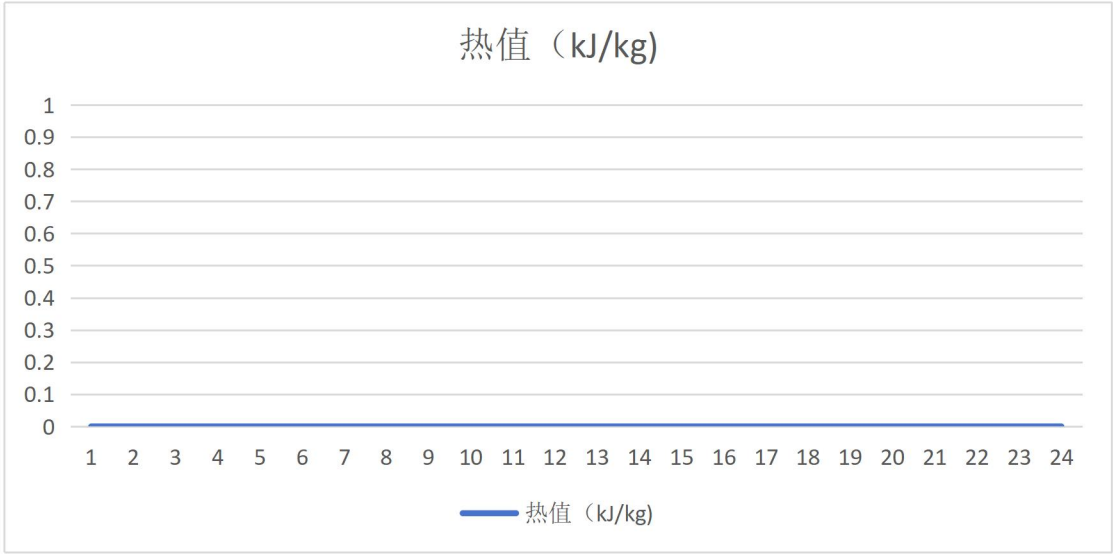


图 5-6.1 硅基复合吸附剂热值检测结果分布图
 （注：图中横坐标为样品批号，纵坐标为低位热值（kJ/kg））

表 5-6.2 硅基复合吸附剂燃烧性能等级表

序号	检测项目/条款	检测与判定依据要求		实测结果	分项判断
1	炉内温升 ΔT , °C/ GB 8624-2012 5.1.1	A(A1)	≤ 30	1.0	合格
2	持续燃烧时间 t_f , s /GB8624-2012 5.1.1		0	0	合格
3	质量损失率 Δm , %/ GB 8624-2012 5.1.1		≤ 50	30.0	合格
4	总热值 (PCS), MJ/kg/ GB 8624-2012 5.1.1		≤ 2.0	-0.3	合格

5.检验方法

本标准第 5 章针对外观及硅基矿物成分含量、中孔孔容占比、粒度分布、水分含量、堆积密度、低位热值 6 项产品技术指标，逐一明确了检验方法。

确定依据：优先直接采用国家现行标准方法，确保检验方法的权威性和可比性。硅基矿物成分含量测定按 SY/T 5163（X 射线衍射分析法）进行，样品应在低于 60℃的温度下烘干并冷却至室温，并研磨至全部粒径小于 40μm；中孔孔容占比测定参考 GB/T 21650.2/ISO 15901-2 气体吸附法，并明确硅基复合吸附剂脱气温度为 250℃、脱气时间为 6h、建议称样量为 0.4g，总孔容 V 按第 5.3.4 条式（1）计算、中孔孔容占比 X_1 按式（2）计算，总孔容须在吸附等温线最高点（ $P/P_0 \geq 0.99$ ）取值，中孔累积孔体积取 BJH 吸附模型中孔径 $2nm \leq dp \leq 50nm$ 范围内的累计孔容，同一实验室内两个测定结果的差

值不应大于平均值的 6%、不同实验室间的差值不应大于平均值的 8%；粒度测定按 GB/T 21524 中 6.3.3 毛刷法进行；水分测定按 GB/T 12496.4 中 4.1 的规定进行；堆积密度测定按 GB/T 23771 进行；低位热值测定按 GB/T 213 进行。所有方法均为国内成熟通用标准，适配国内第三方检测机构与生产企业的实验室设备能力。

6.应用方法

①应用条件：产品投加点设置于垃圾焚烧半干法脱硫出口、布袋除尘器入口烟道，可沿用原有活性炭喷射装置。应用温度宜在 140℃～250℃。

②投加量：按环境影响评价报告或排污许可证的要求确定。

③烟气二噁英、重金属检测：烟气二噁英类污染物按照 GB 18485 规定方法取样检测。烟气中铅、镉、汞等重金属含量按 GB 18485 规定方法取样检测。

④烟气净化后飞灰处置：烟气净化后飞灰经稳定化后，按照 GB 16889 规定填埋处置。

确定依据：应用方法条款与团标第 6 章一致，从应用端明确投加点位、应用温度、投加量、净化效果验证和飞灰处置要求，与 GB 18485、GB 16889 有效衔接。

7.检验规则

①出厂检验：检验项目为硅基矿物成分含量、总孔容、中孔孔容占比、粒度分布、水分含量、堆积密度、低位热值，确保每批次产品核心质量合格后方可出厂；

②型式检验：检验项目与出厂检验一致，即硅基矿物成分含量、总孔容、中孔孔容占比、粒度分布、水分含量、堆积密度、低位热值；明确了 5 种需开展型式检验的情形：新产品或老产品转厂生产的试制定型鉴定；结构、材料、工艺有较大变动可能影响产品性能时；产品长期停产后恢复生产时；出厂检验结果与上次型式检验结果有较大差异时；国家质量检验机构提出型式检验要求时；

③抽样规则：严格遵循 GB/T 6678、GB/T 6679 规定。袋装产品按 GB/T 6678 第 7.6.1 条确定采样单元数，采样时将采样器沿包装袋垂直中心线插入至料层深度的 2/3 处采样，每袋所取试样不少于 50g，每批采样量不得少于 1000g；散装产品按 GB/T 6679 第 4.3.2.2 条采样，充分混合后用四分法缩分至约 1000g；样品装入两个清洁、干燥的密封袋中密封并粘贴标签（生产厂名、产品名称、类别、型号、等级、批号、采样日期和采样者姓名），一袋用于检验，另一袋保存备查；型式检验从出厂检验合格产品中随机抽取 500g 样品；

④判定规则：采用“一票否决制”。出厂检验若有一项指标不合格，则判定该批产品不合格，涉事批次产品全部作报废处理；型式检验应

由第三方进行检验，检验项目均符合规定则判此次型式检验合格，若有一项不合格，在原批产品中加倍抽样复检，仍不合格则判此次型式检验不合格。

确定依据：结合无机化工产品生产质量管控要求与生活垃圾焚烧行业对产品质量稳定性的高要求，兼顾生产企业质量管控成本与应用单位的质量保障需求。

8.标志、包装、运输、贮存、使用说明书

产品包装件外表面上应标明生产厂名、生产地址、商标、产品标记、产品净重、生产日期与批号、贮存与运输事项、贮存期。产品采用带有塑料薄膜的防潮型包装，参考 GB/T 8946 的要求。在贮存和运输过程中避免受潮。产品出厂应附带中文使用说明书，说明书内容应符合 GB/T 9969 规定。说明书应包含产品信息、适用范围、技术参数、使用说明、储运。

确定依据：结合无机粉状产品的特性，针对产品防潮、防晒、防结块的需求制定，确保产品在流通过程中性能稳定。

9.保质期与产品管理

规定产品在 8.3 要求下贮存，自生产之日起保质期为 12 个月。

产品超过保质期后，建议停止使用，若确需使用，应对产品的中孔孔容分布、粒度分布、水分含量进行检测，确认符合 4.2 要求后方可使用。过期产品应单独收集、密封包装，标注“过期回收”标识。回收产品应在专用贮存区存放，与新料隔离。回收产品应回收至厂家再加工，再加工产品应符合 4.2 要求，再加工的保质期重新计算。经检测无法通过再加工达到标准要求的回收产品，应按一般工业固体废物处理，符合 GB 18599 的规定，不得擅自处置

确定依据：

保质期设定为 12 个月，综合考虑产品自身化学稳定性、行业通行惯例、焚烧企业采购与库存周转周期以及工程应用安全。产品为全无机非金属材料体系，化学稳定性优异，不同于有机吸附材料，不存在因微生物作用、水解或氧化而发生的性能降解。根据对 40 余家合作企业的调研，活性炭采购周期通常覆盖 2~6 个月使用需求，安全库存不少于 1 个月，实际库存周期通常 3~6 个月。12 个月保质期可覆盖至少 2 个完整采购周期，具有良好工程经济性。参照 CJ/T 546-2023，同类粉状活性炭未开封产品保质期同样为 12 个月。长期储存稳定性跟踪试验表明，20240311 批次样品在规范贮存条件下一年后核心指标变化幅度极小，确定 12 个月保质期具有充分试验数据支撑。

表 5-7.1 20240311 样品一年物料稳定性对比表

序号	样品批号	粒度 (%)		水分 (%)	中孔孔容 (%)
		100 目	200 目		
1	(原样品) 20240311	100	91	2.5	57.36
2	一年后样品	100	97	2.48	66.99
一年变化率%		0.00%	6.59%	-0.8%	16.80%

稳定性数据显示，一年内产品核心指标变化幅度极小。确定 12 个月保质期具有充分的试验数据支撑。

六、主要试验（验证）情况分析

（一）试验验证方案的系统性设计

1.设计原则

- （1）代表性原则：选取不同生产批次、不同原料配比、不同改性工艺的产品作为试验样品，确保样品能够代表量产产品的质量水平；
- （2）全面性原则：覆盖产品基础技术指标、应用效能指标、系统运行适配性、飞灰处置适配性、安全性能等全方面内容；
- （3）科学性原则：试验方法优先采用国家现行标准方法，试验过程严格按照标准操作，确保试验数据准确可靠；
- （4）实用性原则：结合生活垃圾焚烧行业实际工况设计试验方案，确保试验结果能够指导工程应用。

2.质量控制措施

- （1）所有试验仪器设备均经过计量检定合格，并在有效期内使用；
- （2）试验人员均经过专业培训，熟悉试验方法和操作流程；
- （3）每个试验项目均进行平行样测定，平行样相对偏差不超过标准规定的允许差。

3.试验验证样品与数据来源

- （1）实验室验证样品：选取广州鑫材科技有限公司近一年期间生产的多批次硅基复合吸附剂样品，覆盖不同原料配比、改性工艺的量产产品；
- （2）工程验证数据来源：
 - ①二噁英测试：中山市广业龙澄环保有限公司、东莞市科伟环保电力有限公司、梅州市三峰环保能源有限公司、南宁三峰能源有限公司 4 家焚烧厂，共 42 组有效数据；
 - ②重金属测试：中山市广业龙澄环保有限公司、东莞市科伟环保电力有限公司、梅州市三峰环保能源有限公司 3 家焚烧厂，共 42 组有效数据；
 - ③飞灰浸出毒性测试：中山市广业龙澄环保有限公司、东莞市科

伟环保电力有限公司、梅州市三峰环保能源有限公司 3 家企业，共 15 个飞灰样品；

④安全性能测试：委托通标标准技术服务有限公司（SGS）广州分公司开展欧盟 REACH 法规高关注物质全项检测。

4. 验证数据与团标条款的对应关系

本章各项验证数据与团标条款的对应关系如下：

验证内容	对应团标条款	说明
基础技术指标	第 4 章 表 1 “产品技术指标”	验证表 1 中各项理化指标的合理性和可达性
二噁英去除效率、重金属去除效率	第 6 章 第 6.3 条 “烟气二噁英、重金属检测”	验证第 6.3 条检测方法下产品的实际净化效果
系统运行适配性、飞灰浸出毒性	第 6 章 第 6.4 条 “烟气净化后飞灰处置”	验证第 6.4 条飞灰处置要求的可达性
有毒有害物质安全（REACH 全项筛查）	第 4 章 热值指标、第 9 章 保质期与产品管理	验证产品全生命周期的环境安全性

（二）基础技术指标多批次验证结果

对多批次硅基复合吸附剂样品的基础技术指标进行了全面检测，检测结果统计如下：

表 6-1 基础技术指标检测结果统计

技术指标	最小值	最大值	平均值	标准偏差	合格率
硅基矿物成分含量（%）	50.3	63.2	55.4	3.77	100%
中孔孔容占比（%）	55.24	83.53	65.19	4.29	100%
100 目通过率（%）	99.0	100.0	99.9	0.12	100%
200 目通过率（%）	89.8	99.4	95.2	2.13	100%
325 目通过率（%）	64.9	92.7	73.6	5.55	100%
水分含量（%）	1.03	3.73	2.15	0.68	100%
堆积密度（g/mL）	0.676	0.786	0.716	0.02	100%
低位热值（kJ/kg）	未检出	未检出	—	—	100%

检测结果表明，所有批次样品的基础技术指标均满足团标第 4 章表 1 规定的限值要求，且批次间稳定性良好，标准偏差较小，说明生产工艺成熟稳定，产品质量可控。上述验证数据充分证明了团标第 4 章表 1 中各项技术指标的限值设定合理、可达。

（三）应用效能指标全工况验证结果

团标第 6 章第 6.3 条规定了“烟气二噁英、重金属检测”的取样检

测方法（按 GB 18485 规定方法进行）。本节工程验证数据旨在实证：采用团标第 6.3 条规定的检测方法，产品在实际工况下的净化效果均可稳定达到预期目标，验证了该检测方法在产品应用效能评价中的可行性和有效性。

1.二噁英去除效率验证

（1）工程汇总

选取了中山市广业龙澄环保有限公司、南宁市三峰能源有限公司、梅州市三峰环保能源有限公司、东莞市科伟环保电力有限公司 4 家不同处理规模的焚烧厂，开展了硅基复合吸附剂二噁英去除效率专项测试。

实测结果汇总如下：

表 6-2 二噁英去除效率汇总

项目	原烟气浓度范围 (ngTEQ/m³)	去除率范围 (%)	均值 (%)	净化后浓度范围 (ngTEQ/m³)
中山市广业龙澄环保有限公司	0.55~0.75	99.71~99.92	99.83	0.0024~0.0050
南宁市三峰能源有限公司	1.5~3.0	99.84~99.96	99.93	0.0011~0.0024
梅州市三峰环保能源有限公司	0.30~1.30	89.25~99.57	97.21	0.0033~0.0430
东莞市科伟环保电力有限公司	0.95~6.00	98.95~99.85	99.39	0.0037~0.0120

中山市广业龙澄环保有限公司：

表 6-3.1 试验条件

时间	试验条件	监测类型项目	监测点位	监测频次
2023 年 9 月 24 日	投加吸附剂， 0.5kg/t 垃圾	有组织废气(常规及 二噁英)	#3 炉处理前、处 理后	处理前 1 次/ 天，处理后 3 次/天
2023 年 9 月 25 日			#4 炉处理前、处 理后	

表 6-3.2 检测结果

炉号	试验时间		处理前	处理后	去除效率 (%)
			毒性当量质量浓度 (ngTEQ/m³)	毒性当量质量浓度 (ngTEQ/m³)	
3# 炉	2023 年 9 月 24 日	第 1 次	3.00	0.0050	/
		第 2 次	/	0.0025	/
		第 3 次	/	0.0024	/
		均值	3.00	0.0033	99.89
	2023 年 9 月 25 日	第 1 次	0.55	0.0100	/
		第 2 次	/	0.0078	/
		第 3 次	/	0.0130	/

炉号	试验时间		处理前	处理后	去除效率 (%)
			毒性当量质量浓度 (ngTEQ/m ³)	毒性当量质量浓度 (ngTEQ/m ³)	
		均值	0.55	0.0100	98.18
4#炉	2023年9月24日	第1次	1.70	0.0024	/
		第2次	/	0.0049	/
		第3次	/	0.0047	/
		均值	1.70	0.0040	99.76
	2023年9月25日	第1次	0.75	0.0100	/
		第2次	/	0.0078	/
		第3次	/	0.0130	/
		均值	0.75	0.0100	98.67

南宁市三峰能源有限公司：

表 6-4.1 试验条件

时间	试验条件	监测类型项目	监测点位	监测频次
2023年9月12日	投加活性炭, 0.3kg/t 垃圾	有组织废气 (常规及二噁英)	2#炉处理前、处理后	处理前1次/天, 处理后3次/天
2023年9月13日	投加吸附剂, 0.4kg/t 垃圾			
2023年9月14日	投加吸附剂, 0.35kg/t 垃圾			
2023年9月15日	投加吸附剂, 0.3kg/t 垃圾			

表 6-4.2 检测结果

炉号	试验时间		处理前	处理后	去除效率 (%)
			毒性当量质量浓度 (ng TEQ/m ³)	毒性当量质量浓度 (ng TEQ/m ³)	
2#炉	2023年9月12日	第1次	1.5	0.0024	/
		第2次	/	0.0011	/
		第3次	/	0.0011	/
		平均值	1.5	0.0015	99.90
	2023年9月13日	第1次	2.6	0.0011	/
		第2次	/	0.0011	/
		第3次	/	0.0011	/
		平均值	2.6	0.0011	99.96
	2023年9月14日	第1次	3.0	0.0011	/
		第2次	/	0.0018	/
		第3次	/	0.0011	/
		平均值	3.0	0.0013	99.96
	2023年9月15日	第1次	1.5	0.0011	/
		第2次	/	0.0011	/
		第3次	/	0.0021	/
		平均值	1.5	0.0014	99.91

梅州市三峰环保能源有限公司：

表 6-5.1 试验条件

时间	试验条件	监测类型项目	监测点位	监测频次
2022 年 11 月 7 日	投加活性炭， 0.5kg/t 垃圾	有组织废气 (常规及二噁英)	2#炉处理前、 处理后	3 次/天
2022 年 11 月 8 日	投加吸附剂 1 号， 0.6kg/t 垃圾			
2022 年 11 月 9 日	投加吸附剂 1 号， 0.5kg/t 垃圾			
2022 年 11 月 10 日	投加吸附剂 1 号， 0.4kg/t 垃圾			
2022 年 11 月 11 日	投加吸附剂 2 号， 0.6kg/t 垃圾			
2022 年 11 月 12 日	投加吸附剂 2 号， 0.5kg/t 垃圾			
2022 年 11 月 13 日	投加吸附剂 2 号， 0.4kg/t 垃圾			

表 6-5.2 检测结果

采样日期		毒性当量质量浓度 处理前 (ngTEQ/m ³)	毒性当量质量浓度 处理后 (ngTEQ/m ³)	处理效率 (%)	吸附剂类型
2022 年 11 月 7 日	第 1 次	0.84	0.0200	/	活性炭 (0.5kg/t 垃圾)
	第 2 次	0.39	0.0170	/	
	第 3 次	/	0.0160	/	
	平均值	0.62	0.0180	97.10	
2022 年 11 月 8 日	第 1 次	0.78	0.0099	/	1 号吸附剂 (0.6kg/t 垃圾)
	第 2 次	1.30	0.0046	/	
	第 3 次	/	0.0045	/	
	平均值	1.04	0.0063	99.39	
2022 年 11 月 9 日	第 1 次	0.35	0.0076	/	1 号吸附剂 (0.5kg/t 垃圾)
	第 2 次	0.40	0.0087	/	
	第 3 次	/	0.0067	/	
	平均值	0.38	0.0077	97.97	
2022 年 11 月 10 日	第 1 次	0.47	0.0063	/	1 号吸附剂 (0.4kg/t 垃圾)
	第 2 次	0.41	0.0150	/	
	第 3 次	/	0.0200	/	
	平均值	0.44	0.0138	96.86	
2022 年 11 月 11 日	第 1 次	0.44	0.0076	/	2 号吸附剂 (0.6kg/t 垃圾)
	第 2 次	0.30	0.0033	/	
	第 3 次	/	0.0068	/	
	平均值	0.37	0.0059	98.41	
2022 年 11 月 12 日	第 1 次	0.76	0.0130	/	2 号吸附剂 (0.5kg/t 垃圾)
	第 2 次	0.30	0.0310	/	
	第 3 次	/	0.0089	/	
	平均值	0.53	0.0176	96.68	
2022 年 11 月 13 日	第 1 次	0.31	0.0430	/	2 号吸附剂 (0.4kg/t 垃圾)
	第 2 次	0.48	0.0160	/	
	第 3 次	/	0.0140	/	
	平均值	0.40	0.0243	93.93	

采样日期	毒性当量质量浓度 处理前 (ngTEQ/m ³)	毒性当量质量浓度 处理后 (ngTEQ/m ³)	处理效率 (%)	吸附剂类型
备注：因采样条件限制，处理前做 2 次。				

东莞市科伟环保电力有限公司：

表 6-6.1 试验条件

时间	试验条件	监测类型项目	监测点位	监测频次
2023 年 9 月 26 日	投加吸附剂， 0.6kg/t 垃圾	有组织废气（常规及 二噁英）	5#炉处理 前、处理后	处理前 1 次/天， 处理后 3 次/天
2023 年 9 月 27 日	投加吸附剂， 0.5kg/t 垃圾			
2023 年 9 月 28 日	投加吸附剂， 0.4kg/t 垃圾			

表 6-6.2 检测结果

炉号	试验时间		处理前	处理后	去除效率 (%)
			毒性当量质量浓度 (ng TEQ/m ³)	毒性当量质量浓度 (ng TEQ/m ³)	
5 号	2023 年 9 月 26 日	第 1 次	0.95	0.0037	/
		第 2 次	/	0.0100	/
		第 3 次	/	0.0064	/
		均值	0.95	0.0067	99.29
	2023 年 9 月 27 日	第 1 次	1.50	0.0085	/
		第 2 次	/	0.0083	/
		第 3 次	/	0.0120	/
		均值	1.50	0.0096	99.36
	2023 年 9 月 28 日	第 1 次	6.00	0.0067	/
		第 2 次	/	0.0110	/
		第 3 次	/	0.0100	/
		均值	6.00	0.0092	99.85

(2) 不同投加量对二噁英去除效率的影响

在南宁市三峰能源有限公司 2#炉、梅州市三峰环保能源有限公司 2#炉、东莞市科伟环保电力有限公司 5#炉开展了不同投加量对比试验，试验结果如下：

表 6-7 不同投加量下的二噁英去除效率

项目名称	投加量 (kg/吨垃圾)	原烟气浓度 (ngTEQ/m ³)	净化后浓度 (ngTEQ/m ³)	去除率 (%)
南宁市三峰能源 有限公司 2#炉	0.3（活性炭）	1.5	0.0015	99.90
	0.3	1.5	0.0014	99.91
	0.35	3.0	0.0013	99.96
	0.4	2.6	0.0011	99.96
梅州市三峰环保	0.5（活性炭）	0.62	0.0180	97.10

项目名称	投加量 (kg/吨垃圾)	原烟气浓度 (ngTEQ/m ³)	净化后浓度 (ngTEQ/m ³)	去除率 (%)
能源有限公司 2# 炉	0.4	0.44	0.0138	96.86
	0.5	0.38	0.0077	97.97
	0.6	1.04	0.0063	99.39
东莞市科伟环保 电力有限公司 5# 炉	0.4	6.00	0.0092	99.85
	0.5	1.50	0.0096	99.36
	0.6	0.95	0.0067	99.29

上述 3 家企业的工程验证数据表明：

A.去除效果稳定优异：全部 12 组实测数据中，去除率最低为 96.86%，最高达 99.96%。在高达 6.00ng TEQ/m³的极高浓度冲击工况下，去除率仍达 99.85%，净化后浓度仅 0.0092ng TEQ/m³，远低于 GB 18485-2014 限值。

B.对比活性炭具有显著优势：南宁三峰在同一台炉、相同投加量（0.3kg/吨垃圾）条件下，硅基复合吸附剂较活性炭略优。梅州三峰在相近原烟气浓度条件下（活性炭 0.62ngTEQ/m³、投加量 0.5kg/吨垃圾，去除率 97.10%；硅基吸附剂 0.44ngTEQ/m³、投加量 0.4kg/吨垃圾，去除率 96.86%），硅基吸附剂以更低的投加量实现了与活性炭相当的去除效果，验证了硅基复合吸附剂的高效性和经济性。

（4）不同原烟气浓度对二噁英去除效率的影响

在中山市广业龙澄环保有限公司 3 号炉和 4 号炉开展了不同原烟气浓度对比试验，投加量固定为 0.5kg/吨垃圾，试验结果如下：

表 6-8 不同原烟气浓度下的二噁英去除效率

炉号	原烟气浓度 (ng TEQ/m ³)	净化后浓度 (ng TEQ/m ³)	去除率 (%)
3 号	3.00	0.0033	99.89
	0.55	0.0100	98.18
4 号	1.70	0.0040	99.76
	0.75	0.0100	98.67

上述试验数据表明：

A.宽浓度范围适应性优异：在 0.55~3.00ng TEQ/m³的原烟气浓度范围内，硅基复合吸附剂均表现出稳定的高效去除能力，去除率最低为 98.18%，最高达 99.89%，各工况下净化后浓度均远低于 GB 18485-2014 规定的 0.1ng TEQ/m³限值。

B.净化效果高度稳定：在浓度差异超过 5 倍的原烟气条件下

（0.55ng TEQ/m³与 3.00ng TEQ/m³），净化后浓度均稳定在 0.0033～0.0100ng TEQ/m³区间，表明产品的吸附容量充足、净化效果稳定，不随入口浓度的显著波动而出现排放超标风险。

C.高浓度冲击工况适应性强：在原烟气浓度高达 3.00ng TEQ/m³的工况下，去除率仍达到 99.89%，净化后浓度低至 0.0033ng TEQ/m³，仅为国标限值的 3.3%，验证了产品在焚烧厂燃烧工况波动、二噁英瞬时浓度飙升的极端场景下仍能保障达标排放。

上述数据充分验证了硅基复合吸附剂在宽浓度范围内的稳定净化能力。

2.重金属去除效率验证

在 3 家焚烧厂开展了硅基复合吸附剂重金属去除效率专项测试，投加量为 0.5k/吨垃圾，试验结果汇总如下：

表 6-9 重金属去除效率汇总

重金属类别	平均去除率（%）
汞及其化合物	85.60
镉/砷/铅/铬/铜/钴/锰/镍及其化合物	99.69
汞及其化合物	99.93

所有批次净化后重金属浓度均远低于 GB 18485-2014 限值要求，验证了产品对多类重金属的协同去除效果稳定可靠。

上述二噁英和重金属的工程验证数据表明：团标第 6.3 条规定的检测方法具有良好的工程可操作性和结果可重复性，能够有效评价产品在实际工况下的净化效果。

中山市广业龙澄环保有限公司：

表 6-10.1 试验条件

时间	试验条件	监测类型项目	监测点位	监测频次
2023 年 9 月 24 日	投加吸附剂， 0.5kg/t 垃圾	有组织废气 （常规及二噁英）	#3 炉处理前、处理后 #4 炉处理前、处理后	处理前 1 次/天， 处理后 3 次/天
2023 年 9 月 25 日				

表 6-10.2 试验结果

炉号	试验时间	检测项目	处理前浓度 (mg/m ³)	处理后浓度 (mg/m ³)				去除效率 (%)
				第 1 次	第 2 次	第 3 次	均值	
#3 炉	2023 年 9 月 24 日	汞及其化合物	0.0207	ND	ND	ND	ND	100
		镉/铊及其化合物	0.0638	ND	1.06×10 ⁻⁵	ND	ND	100
		镉/砷/铅/铬/铜/钴/锰/镍及其化合物	1.47	5.08×10 ⁻³	5.56×10 ⁻³	0.0128	7.77×10 ⁻³	99.47
	2023 年 9 月 25 日	汞及其化合物	0.0169	ND	ND	ND	ND	100
		镉/铊及其化合物	0.0893	6.10×10 ⁻⁵	ND	ND	2.25×10 ⁻⁵	99.97

炉号	试验时间	检测项目	处理前浓度 (mg/m³)	处理后浓度 (mg/m³)				去除效率 (%)
				第 1 次	第 2 次	第 3 次	均值	
	日	锑/砷/铅/铬/铜/钴/锰/镍及其化合物	1.61	4.77×10 ⁻³	4.16×10 ⁻³	3.65×10 ⁻³	4.19×10 ⁻³	99.74
#4 炉	2023 年 9 月 24 日	汞及其化合物	0.0159	2.70×10 ⁻³	2.70×10 ⁻³	2.68×10 ⁻³	2.70×10 ⁻³	83.02
		镉/铊及其化合物	0.0485	ND	ND	ND	ND	100
		锑/砷/铅/铬/铜/钴/锰/镍及其化合物	0.874	5.83×10 ⁻³	4.60×10 ⁻³	4.49×10 ⁻³	4.98×10 ⁻³	99.43
	2023 年 9 月 25 日	汞及其化合物	0.0164	2.58×10 ⁻³	2.58×10 ⁻³	2.59×10 ⁻³	2.58×10 ⁻³	84.27
		镉/铊及其化合物	0.0262	ND	ND	ND	ND	100
		锑/砷/铅/铬/铜/钴/锰/镍及其化合物	0.662	4.30×10 ⁻³	4.42×10 ⁻³	4.22×10 ⁻³	4.31×10 ⁻³	99.35
备注：ND 表示小于检出限或未检出。								

东莞市科伟环保电力有限公司：

表 6-11.1 试验条件

时间	试验条件	监测类型项目	监测点位	监测频次
2023 年 9 月 26 日	投加吸附剂，0.6kg/t 垃圾	有组织废气 (常规及二噁英)	处理前、处理后	处理前 1 次/天，处理后 3 次/天
2023 年 9 月 27 日	投加吸附剂，0.5kg/t 垃圾			
2023 年 9 月 28 日	投加吸附剂，0.4kg/t 垃圾			

表 6-11.2 试验结果

试验日期及试验条件	检测项目	处理前浓度 (mg/m³)	处理后浓度 (mg/m³)				去除效率 (%)
			第一次	第二次	第三次	均值	
2023/9/26 (吸附剂，0.6kg/t)	汞及其化合物	0.0297	3.88×10^{-3}	3.91×10^{-3}	3.38×10^{-3}	3.74×10^{-3}	87.41
	镉/铊及其化合物	0.0784	2.37×10^{-4}	3.94×10^{-5}	1.44×10^{-5}	1.01×10^{-4}	99.10
	锑/砷/铅/铬/铜/钴/锰/镍及其化合物	1.68	0.012	2.73×10^{-3}	2.59×10^{-3}	5.93×10^{-3}	99.65
2023/9/27 (吸附剂，0.5kg/t)	汞及其化合物	0.0325	4.50×10^{-3}	4.32×10^{-3}	4.26×10^{-3}	4.35×10^{-3}	86.62
	镉/铊及其化合物	0.0397	ND	ND	ND	ND	100
	锑/砷/铅/铬/铜/钴/锰/镍及其化合物	0.940	1.82×10^{-3}	1.85×10^{-3}	1.97×10^{-3}	1.88×10^{-3}	99.80
2023/9/28	汞及其化合物	0.0208	ND	ND	2.67×10^{-3}	ND	100

试验日期及试验条件	检测项目	处理前浓度 (mg/m ³)	处理后浓度 (mg/m ³)				去除效率 (%)
			第一次	第二次	第三次	均值	
(吸附剂, 0.4kg/t)	镉/铊及其化合物	0.0706	ND	ND	ND	ND	100
	铈/砷/铅/铬/铜/钴/锰/镍及其化合物	1.52	1.79×10^{-3}	1.77×10^{-3}	1.82×10^{-3}	1.80×10^{-3}	99.88

梅州市三峰环保能源有限公司：

表 6-12.1 试验条件

时间	试验条件	监测类型项目	监测频次
2022 年 11 月 7 日	投加活性炭, 0.5kg/t 垃圾	有组织废气 (常规及二噁英)	3 次/天
2022 年 11 月 8 日	投加吸附剂 2 号, 0.6kg/t 垃圾		
2022 年 11 月 9 日	投加吸附剂 2 号, 0.5kg/t 垃圾		
2022 年 11 月 10 日	投加吸附剂 2 号, 0.4kg/t 垃圾		
2022 年 11 月 11 日	投加吸附剂 1 号, 0.6kg/t 垃圾		
2022 年 11 月 12 日	投加吸附剂 1 号, 0.5kg/t 垃圾		
2022 年 11 月 13 日	投加吸附剂 1 号, 0.4kg/t 垃圾		

表 6-12.2 检测结果

炉号	试验时间	检测项目	处理前浓度 (mg/m ³)	处理后浓度 (mg/m ³)	去除效率 (%)
2# 炉	2022 年 11 月 7 日	汞及其化合物	0.0111	5.34×10^{-3}	51.89
		镉/铊及其化合物	0.118	6.58×10^{-5}	94.42
		铈/砷/铅/铬/铜/钴/锰/镍及其化合物	2.06	2.65×10^{-3}	99.87
2# 炉	2022 年 11 月 8 日	汞及其化合物	8.17×10^{-3}	ND	100
		镉/铊及其化合物	0.118	4.29×10^{-5}	99.96
		铈/砷/铅/铬/铜/钴/锰/镍及其化合物	1.62	2.31×10^{-3}	99.86
2# 炉	2022 年 11 月 9 日	汞及其化合物	0.0101	2.65×10^{-3}	73.76
		镉/铊及其化合物	0.0673	4.06×10^{-5}	99.94
		铈/砷/铅/铬/铜/钴/锰/镍及其化合物	1.21	2.10×10^{-3}	99.83
2# 炉	2022 年 11 月 10 日	汞及其化合物	0.0198	0.0102	48.48
		镉/铊及其化合物	0.0461	5.08×10^{-5}	99.89
		铈/砷/铅/铬/铜/钴/锰/镍及其化合物	0.749	3.22×10^{-3}	99.57
2# 炉	2022 年 11 月 11 日	汞及其化合物	0.0211	4.46×10^{-3}	78.86
		镉/铊及其化合物	0.0791	5.45×10^{-5}	99.93
		铈/砷/铅/铬/铜/钴/锰/镍及其化合物	1.37	2.69×10^{-3}	99.80
2# 炉	2022 年 11 月 12 日	汞及其化合物	6.10×10^{-3}	ND	100
		镉/铊及其化合物	0.0515	4.34×10^{-5}	99.92
		铈/砷/铅/铬/铜/钴/锰/镍及其化合物	1.13	1.84×10^{-3}	99.84
2# 炉	2022 年 11 月 13 日	汞及其化合物	7.09×10^{-3}	5.11×10^{-3}	27.93
		镉/铊及其化合物	0.0882	4.47×10^{-5}	99.95
		铈/砷/铅/铬/铜/钴/锰/镍及其化合物	1.37	2.12×10^{-3}	99.85

(四) 系统运行与飞灰处置适配性验证

团标第 6 章第 6.4 条规定了“烟气净化后飞灰处置”要求——经稳

定化后按照 GB 16889 规定填埋处置。本节验证数据旨在实证：投加产品后，飞灰经稳定化处理能够满足 GB 16889 的入场要求，验证了第 6.4 条规定的可行性和可达性。

1.系统运行适配性

连续 12 个月运行数据显示，产品投加后，烟气净化系统无堵塞、无结焦、无炉膛温度异常波动，布袋除尘器压差稳定在 800—1200Pa，未出现糊袋、烧袋现象，可直接适配现有焚烧烟气净化系统，无需进行设备改造。

2.飞灰浸出毒性

在 3 家焚烧厂采集投加硅基复合吸附剂后的飞灰样品共 15 个，按 HJ/T 300 方法进行浸出毒性检测。结果显示：铅、镉、汞等 8 项浸出毒性指标全部达标，其中镉、汞、砷等重金属多次检出“未检出”，铅最大浸出浓度仅 0.0035mg/L（为 GB 18598-2019 限值 0.015～1.5mg/L 的 1.4%～23%），远低于标准限值要求。

梅州市三峰环保能源有限公司：

表 6-13.1 试验条件

时间	试验条件	监测类型项目	监测频次
2022 年 11 月 7 日	投加活性炭, 0.5kg/t 垃圾	有组织废气(常规及二噁英)	3 次/天
2022 年 11 月 8 日	投加吸附剂 2 型, 0.6kg/t 垃圾		
2022 年 11 月 9 日	投加吸附剂 2 型, 0.5kg/t 垃圾		
2022 年 11 月 10 日	投加吸附剂 2 型, 0.4kg/t 垃圾		
2022 年 11 月 11 日	投加吸附剂 1 型, 0.6kg/t 垃圾		
2022 年 11 月 12 日	投加吸附剂 1 型, 0.5kg/t 垃圾		
2022 年 11 月 13 日	投加吸附剂 1 型, 0.4kg/t 垃圾		

表 6-13.2 检测结果

检测项目	取样日期							限值	结果评价
	221108	221109	221110	221111	221112	221113	221114		
含水率 (%)	22	24.8	23.3	21.4	26.5	20.5	23.1	<30	达标
汞 (mg/L)	0.00171	0.00164	0.0013	0.00189	0.00134	0.00178	0.0018	<0.05	达标
铜 (mg/L)	0.00313	0.00504	ND	ND	0.00466	0.0162	ND	<40	达标
锌 (mg/L)	4.91	1.85	0.289	19.8	18.1	24.5	11.6	<100	达标
铅 (mg/L)	0.027	0.0074	ND	0.151	0.128	0.216	0.0411	<0.25	达标
镉 (mg/L)	0.0128	0.00201	0.00463	0.0338	0.0264	0.0421	0.0105	<0.15	达标
铍 (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0.02	达标
钡 (mg/L)	0.749	0.712	0.461	0.446	0.651	1.03	0.516	<25	达标
镍 (mg/L)	0.0291	0.0301	0.0221	0.0173	0.022	0.0386	0.0234	<0.5	达标
砷 (mg/L)	0.00595	0.0059	0.0057	0.0059	0.00533	0.00533	0.00488	<0.3	达标
总铬 (mg/L)	0.0137	0.04	0.0563	ND	0.00399	0.0128	0.00631	<4.5	达标
六价铬 (mg/L)	0.00622	0.0079	0.00622	ND	ND	ND	0.00622	<1.5	达标
硒 (mg/L)	0.00275	0.00429	0.00355	0.00313	0.00865	0.00899	0.0053	<0.1	达标

东莞市科伟环保电力有限公司：

表 6-14.1 试验条件

时间	试验条件	监测类型项目	监测点位	监测频次
2023 年 9 月 26 日	投加吸附剂， 0.6kg/t 垃圾	有组织废气 (常规及二噁英)	处理前、 处理后	处理前 1 次/天，处理 后 3 次/天
2023 年 9 月 27 日	投加吸附剂， 0.5kg/t 垃圾			
2023 年 9 月 28 日	投加吸附剂， 0.4kg/t 垃圾			

表 6-14.2 检测结果

检测项目	样品编号			参考限值	结果评价
	230926KW3WFA-1 (M)	230927KW3WFA-1 (M)	230928KW3WFA-1 (M)		
含水率 (%)	14.9	14.7	19.8	<30	达标
汞 (mg/L)	2.84×10^{-3}	3.59×10^{-3}	2.24×10^{-3}	<0.05	达标
铜 (mg/L)	ND	ND	ND	<40	达标
锌 (mg/L)	0.305	0.0223	8.29×10^{-3}	<100	达标
铅 (mg/L)	0.0109	0.0208	4.73×10^{-3}	<0.25	达标
镉 (mg/L)	ND	0.146	0.0434	<0.15	达标
铍 (mg/L)	ND	ND	ND	<0.02	达标
钡 (mg/L)	1.02	1.28	1.15	<25	达标
镍 (mg/L)	ND	ND	ND	<0.5	达标
砷 (mg/L)	0.0171	7.90×10^{-3}	0.0108	<0.3	达标
总铬 (mg/L)	0.0358	0.118	0.176	<4.5	达标
六价铬 (mg/L)	0.0197	0.0311	0.0377	<1.5	达标
硒 (mg/L)	7.90×10^{-3}	5.19×10^{-3}	7.31×10^{-3}	<0.1	达标
备注：					
1. 限值参考《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB16889-2008) 6.3 浸出液污染物浓度限值；					
2. ND 表示结果未检出或低于检出限。					

(五) 有毒有害物质安全验证

为保障产品全生命周期使用安全性，严格管控产品有毒有害物质本底值，避免产品在生产、运输、工程应用及飞灰处置过程中引入新的环境与健康风险，标准起草工作组委托具备 CMA/CNAS 资质的通标标准技术服务有限公司 (SGS) 广州分公司，对硅基复合吸附剂产品开展欧盟 REACH 法规高关注物质 (SVHC) 有毒有害物质总含量全项检测。检测报告编号 CANEC26009567902，检测日期 2026 年 5 月 29 日，检测范围覆盖欧盟 REACH 法规高关注物质候选清单全项指标，完成 253 项 REACH 法规高关注物质 (SVHC) 全项筛查，同步完成潜在高关注 SVHC 补充检测，涵盖致癌/致畸/致生殖毒性物质 (CMR)、持久性有机污染物 (POPs)、内分泌干扰物、重金属及有毒有机化合物等全类别环境管控有毒有害物质。

最终检测结果显示：所提交样品中，253 项 SVHC 检测结果均 <

0.1%(w/w)，潜在 SVHC 检测结果全部符合管控限值要求，所有检测项目全部通过，无任何超标项，远低于 REACH 法规规定的 0.1%(w/w) 强制管控限值，完全符合我国《危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别》（GB 5085.6）《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》（GB 5085.3）等国家相关安全标准要求。

本产品为全无机硅基体系配方，无有毒有害有机添加组分，生产过程无有毒有害物质引入，产品本身无原生毒性；在生活垃圾焚烧烟气净化应用过程中，不会向烟气、飞灰中释放有毒有害物质，不会增加飞灰危废处置难度与二次污染风险。上述安全验证数据为团标第 4 章热值指标和产品全生命周期安全管理要求提供了坚实的毒理学安全支撑。

（六）试验方法重复性验证

对所有检测项目开展平行样重复性验证，结果显示：中孔孔容占比两次测定相对偏差 $\leq 3.5\%$ 、水分含量平行测定绝对差值 $\leq 0.8\%$ 、均优于标准规定的允许差要求，证明本标准选用的试验方法成熟、可操作、重复性好，适配国内第三方检测机构与生产企业的实验室设备能力。

（七）验证结论

本次试验验证覆盖了产品全生命周期与全应用场景，数据充分、结果稳定，对各团标条款的支撑关系汇总如下：

表 6-15 验证结论与团标条款对应关系

验证结论	对应团标条款	支撑作用
基础技术指标多批次检测全部合格	第 4 章 表 1	证明团标第 4 章技术指标限值科学合理、可达
应用效能全工况验证二噁英去除率 $>80\%$	第 6 章 第 6.3 条	证明第 6.3 条检测方法可有效评价产品净化效果
重金属协同去除率 $>99\%$	第 6 章 第 6.3 条	同上
飞灰浸出毒性全部达标	第 6 章 第 6.4 条	证明第 6.4 条飞灰处置要求的可达性
系统运行稳定，无设备改造需求	第 6 章 第 6.1 条	证明第 6.1 条应用条件的工程适配性
REACH253 项全项筛查全部通过	第 4 章 热值指标、第 9 章	证明产品全生命周期环境安全性

综合以上验证结果，本标准设置的技术指标阈值科学合理，能够有效区分产品质量优劣，兼顾先进性与行业适用性；检验方法严谨规范、可操作性强，能够满足产品质量检测与工程应用验证的需求。

七、与现行法律法规、标准的关系

（一）与现行法律法规的关系

本标准严格符合以下国家生态环境保护法律法规的相关要求：

《中华人民共和国生态环境法典》：标准以保护和改善环境、防治污染和其他公害、保障公众健康为目标，以规范烟气净化用吸附材料产品质量为手段，为生活垃圾焚烧行业实现绿色低碳发展提供技术支撑，符合生态环境法典的立法宗旨与基本原则；

《中华人民共和国标准化法》：标准的制定程序符合标准化法的规定，团体标准由社会团体自主制定，由本团体成员约定采用或者按照本团体的规定供社会自愿采用；标准内容未设定低于强制性国家标准的技术要求，符合标准化法关于团体标准不得低于强制性标准相关技术要求的规定；

《团体标准管理规定》：标准的制定遵循开放、公平、透明、协商一致、促进贸易和交流的原则，标准制定过程中广泛征求了焚烧运营企业、科研院所、检测机构等利益相关方的意见，符合团体标准管理规定的要求。

本标准与国家生态环境保护相关法律法规的立法宗旨与管理要求完全一致，无任何冲突。

（二）与现行强制性标准的关系

1.与《生活垃圾焚烧污染控制标准》（GB 18485-2014）的关系

《生活垃圾焚烧污染控制标准》（GB 18485-2014）规定了生活垃圾焚烧厂烟气中二噁英、重金属等污染物的排放限值，是行业烟气治理的核心强制性管控依据。本标准所规范的产品，其根本目的是服务于焚烧企业满足 GB 18485-2014 排放限值这一工程目标。

在具体关系上，本标准与 GB 18485-2014 通过以下方式实现协调配套：

（1）技术指标以达标排放为目标导向。本标准第 4 章表 1 规定的产品理化技术指标（包括硅基矿物成分含量、中孔孔容占比、粒度分布、水分含量、堆积密度、热值等），其限值的设定充分考虑了产品在实际工程应用中需要达到的净化效果要求，以确保产品在推荐工况条件下能够支撑焚烧企业实现达标排放。中孔孔容占比等核心指标的阈值，正是基于产品在工程应用中使二噁英排放浓度稳定低于 GB 18485-2014 限值而确定的。

（2）应用验证要求与排放标准衔接。本标准第 6 章“应用方法”设置了产品在实际工程应用中的烟气净化效果验证要求（6.3 烟气二噁英、重金属检测），用于指导焚烧企业在使用产品时开展二噁英和重金属去除效果的实际验证。验证结果的判定依据即为 GB

18485-2014 规定的排放限值,实现了产品应用效能评价与强制性排放标准的直接挂钩。

(3) 工程验证数据支撑。编制组在 40 余家生活垃圾焚烧企业开展了为期 3 年以上的工程应用验证(详见本编制说明第 6 章),结果表明:在常规投加量(0.5kg/吨垃圾)条件下,产品可使烟气二噁英排放浓度长期稳定 $\leq 0.05\text{ng TEQ/m}^3$,优于 GB 18485-2014 规定的 0.1ng TEQ/m^3 限值;铅、镉、汞等重金属净化后浓度亦满足 GB 18485-2014 排放要求。本标准技术指标的设定具有充分的工程实践支撑。

综上,本标准在目标导向和应用要求上与 GB 18485-2014 保持一致,为焚烧企业筛选和验证高效烟气净化材料提供了统一的技术依据,二者协调配套、无冲突。

2.与危险废物相关标准的关系

(1) 与《危险废物填埋污染控制标准》(GB 18598-2019)的关系。本标准第 6.4 条要求“烟气净化后飞灰经稳定化后,按照 GB 16889 规定填埋处置”。同时,编制组在工程验证中对投加产品后的飞灰按 HJ/T 300 方法开展了浸出毒性检测(详见本编制说明第 6 章)。结果表明,飞灰中铅、镉、汞等关键重金属浸出浓度均远低于 GB 18598-2019 限值要求,且无新增浸出毒性风险。本标准在飞灰处置要求上与危险废物填埋污染控制标准有效衔接,确保投加产品后的飞灰能够满足安全填埋处置要求。

(2) 与《危险废物鉴别标准》(GB 5085.1~5085.7)的关系。本标准第 9.2.5 条规定,经检测无法通过再加工达到标准要求的回收产品,应按一般工业固体废物处理,符合 GB 18599 的规定,不得擅自处置。该要求与《危险废物鉴别标准》体系衔接,若实际鉴别属于危险废物,仍应依法管理;团标明确按一般工业固体废物处理的前提是符合 GB 18599,不排除依法开展危险废物鉴别的管理要求。

(3) 与《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB 18599-2020)的关系。本标准第 9.2.5 条规定,经检测无法再加工达标的回收产品按 GB 18599 的规定处置,确保废弃产品的最终处置有据可依、安全可控。

本标准与上述强制性国家标准的管控要求协调一致,在技术指标设定、应用验证要求、废弃产品处置等环节均以强制性标准为最终依据,不存在任何冲突或矛盾。

(三) 与现行推荐性标准的关系

本标准规范性引用了 GB/T 213、GB/T 6678、GB/T 6679、GB/T 8946、GB/T 9969、GB/T 12496.4、GB/T 21524、GB/T 21650.2、GB/T 23771 共 9 项推荐性国家标准,以及 SY/T 5163 行业标准,在术语定义、采样规则、检验方法、包装要求等方面与基础通用标准保持高度

衔接，未出现矛盾或不一致的内容。

例如：粒度测定采用 GB/T 21524 中 6.3.3 毛刷法规定的方法；水分含量测定采用 GB/T 12496.4 中 4.1 规定的方法；堆积密度测定采用 GB/T 23771 规定的方法；中孔孔容占比测定参考 GB/T 21650.2/ISO 15901-2 气体吸附法；硅基矿物成分分析采用 SY/T 5163 规定的 X 射线衍射分析方法；低位热值测定采用 GB/T 213 规定的方法。

上述标准均为国内成熟通用的基础标准，被广泛应用于环保、化工、材料等领域，确保了本标准试验方法的权威性、可比性和可操作性。

目前国内无同类硅基复合吸附剂产品的国家标准或行业标准，本标准填补了该领域的标准空白，是对现有环保材料标准体系的重要补充与完善。

八、采用国际/国外标准情况

目前国际标准化组织（ISO）、美国材料与试验协会（ASTM）等国际标准化组织均未发布专门针对生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂的专项产品标准，仅发布了吸附材料基础性能测定的通用方法标准。

本标准在试验方法制定过程中，积极借鉴了国际先进标准中的成熟方法：

（1）中孔孔容占比测定：本标准第 5.4 条规定中孔孔容占比测定“参考 GB/T 21650.2 中的规定进行测定”。GB/T 21650.2《压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第 2 部分：气体吸附法分析介孔和大孔》等同采用 ISO 15901-2:2006。通过引用该国家标准，本标准的中孔孔容占比测定方法实现了与国际通行方法的技术接轨，确保检测结果具有国际可比性。

（2）孔径分类术语：本标准关于微孔（ $<2\text{nm}$ ）、中孔（ $2\sim 50\text{nm}$ ）、大孔（ $>50\text{nm}$ ）的孔径划分，与国际纯粹与应用化学联合会（IUPAC）1972 年正式发布的孔径分类标准保持一致，确保了术语定义的国际通用性。

除上述基础方法标准外，国际标准中尚无针对生活垃圾焚烧烟气净化用硅基复合吸附剂的专项技术指标、应用效能评价及工程规范要求。本标准的制定填补了该领域国际专项标准的空白，体现了我国在硅基复合吸附剂技术研发与工程化应用方面的国际领先地位。

九、其他事项

本标准为首次制定，无既往版本，所有内容均基于国内行业调研、实验室试验数据与 40 余家企业 3 年以上工程应用实践编制，所有技

术资料与验证数据真实、有效、可追溯。

本标准主要适用于生活垃圾焚烧烟气净化场景，危险废物焚烧、医疗废物处理等其他工业烟气净化领域可参考使用，相关企业可根据自身工艺特点与烟气工况，合理调整产品应用参数。

本标准实施过程中，各相关单位如有意见与建议，可向广东省环境科学学会或标准起草工作组反馈，为标准后续修订提供参考。

参考文献

- [1] Kres C T, Leonowicz M E, Roth W J, et al. Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism [J]. *Nature*, 1992, 359 (6397): 710-712
- [2] Zhao D, Feng J, Huo Q, et al. Triblock Copolymer Syntheses of Mesoporous Silica with Periodic 50 to 300 Angstrom Pores[J]. *Science*, 1998, 279(5350): 548-552.
- [3] Antonietti M, Berton B, Göltner C, Hentze H P. Synthesis of mesoporous silica with large pores and bimodal pore size distribution by templating of polymer lattices[J]. *Advanced Materials*, 1998, 10(2): 154-159.
- [4] Diagboya P N E, Dikio E D. Silica-based mesoporous materials; emerging designer adsorbents for aqueous pollutants removal and water treatment[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2018, 266: 252-267.
- [5] Hwang I H, Takahashi S, Matsuo T, et al. Decomposition of organochlorine compounds in flue gas from municipal solid waste incinerators using natural and activated acid clays[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2014, 64(9): 1021-1027.
- [6] Ottaviani M F, Mazzeo R, Turro N J, et al. EPR study of the adsorption of dioxin vapours onto microporous carbons and mesoporous silica[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2011, 139: 179-188.
- [7] Guan Y, Liu Y, Wu W, et al. Dibenzodioxin adsorption on inorganic materials[J]. *Langmuir*, 2005, 21(9): 3877-3880.
- [8] 王麟, 王龙星, 倪余文, 等. 11 种吸附剂上二噁英的热吸附/脱附性能评价[J]. *色谱*, 2021, 39(4): 437-443.
- [9] 黄姝晗, 范振辉, 谷成, 金鑫. 非水饱和相矿物表面催化转化有机污染物的研究进展 [J]. *南京大学学报 (自然科学)*, 2023, 59(3): 503-517.
- [10] 刘丽, 冯博, 文洋, 古启雄. 硅基介孔材料的合成、功能化及对金属的吸附研究进展 [J]. *化工进展*, 2024, 43 (9): 5063-5078.
- [11] 唐振平, 毕玉玺, 凌辉, 谢水波. 改性硅基介孔材料去除废水中重金属研究进展 [J]. *南华大学学报 (自然科学版)*, 2018, 32(5): 1-8.
- [12] 黎亚平, 王劲松, 魏清伟, 董腾, 王国华, 王瑞, 欧阳高尚, 彭晓. 功能化介孔硅在放射性水处理中的研究进展 [J]. *应用化工*, 2021, 50 (6): 1645-1650.
- [13] 武晓郊, 王意茹, 李芙蓉, 李崇瑛. 有机黏土矿物的研究进展及污水治理中的应用 [J]. *山东化工*, 2022, 51 (24): 190-193.

- [14] Haoqiang C ,Yaji H ,Zhicheng Z , et al.Experimental and theoretical studies on the adsorption characteristics of Si/Al-based adsorbents for lead and cadmium in incineration flue gas.[J].The Science of the total environment,2022,858(P2):159895-159895.
- [15] 温航宇, 侯书阳, 王凯, 等。高耐硫硅铝负载 Fe-Ce-La 复合吸附剂用于中低温烟气砷捕集 [J]。燃料化学学报 (中英文),2026,54(2):176-189.
- [16] Gui L ,Zhang Z ,Sun K , et al.Recycling of fly ash to synthesize zeolites for efficient removal of dioxins[J].Journal of Environmental Chemical Engineering,2024,12(3):112970-.DOI:10.1016/J.JECE.2024.112970.
- [17] Liu C ,Li H ,Johnston T C , et al.Relating Clay Structural Factors to Dioxin Adsorption by Smectites: Molecular Dynamics Simulations[J].Soil Science Society of America Journal,2012,76(1):110-120.
- [18] 吴大清,刁桂仪,袁鹏,等.五氯苯酚在矿物表面吸附——实验、表面反应模式及其环境意义[J].岩石矿物学杂志,2005,(6):556-562.
- [19] Nolan T, Srinivasan K R, Fogler H S. Dioxon Sorption by Hydroxy-Aluminum-Treated Clays[J]. Clays and Clay Minerals, 1989, 37(5): 487-492.
- [20] 冯凯婕,董维红,万玉玉,等.松辽盆地浅层含水层中含铁矿物对砷的吸附特征研究[J].中国农村水利水电,2019,(3):58-62.
- [21] 刘斌,刘金龙,左宋林.活性炭吸附及其耦合技术对二噁英去除的研究进展[J].生物质化学工程,2025,59(06):72-80.
- [22] 马显华,李晓东.典型种类活性炭吸附二恶英影响因素实验研究[J].能源工程,2013,(03):50-54.
- [23] 郭祥信,王沛玥,马云峰,等.活性炭孔隙参数对二噁英气相吸附影响的试验研究[J].环境卫生工程,2020,28(04):52-56.
- [24] 王沛玥.活性炭吸附气相二噁英的性能评价及实验研究[D].浙江大学,2024.
- [25] 徐止恒,李政权,王贻得,等.基于 CFD-DEM 的湿颗粒气力输送数值模拟[J].中国粉体技术,2024,30(02):12-23.
- [26] 陈爱军, 李超华, 张东波, 蔡建军, 吴迪。螯合稳定生活垃圾焚烧飞灰的力学特性 [J]. 环境工程学报, 2025,19 (04):1360-1370.
- [27] Cheng Z M, Shan H W, Sun Y, et al. Evolution mechanism of surface hydroxyl groups of silica during heat treatment[J]. Applied Surface Science, 2020, 513: 145766.
- [28] 李俊菲,梁财,胡驾纬,等.料罐中粉体静电特性[J].化工进展,2017,36(10):3633-3638.