

引文格式:吕瑞彤,姚亮,余跃,等. CO₂固体吸附材料与技术研究进展及其在有色领域的应用前景[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(4): 52-65.

Lyu Ruitong, Yao Liang, Yu Yue, et al. Research progress on CO₂ solid adsorption materials and technologies and their prospects for application in the non-ferrous metallurgical industry[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(4): 52-65.

CO₂固体吸附材料与技术研究进展及其在有色领域的应用前景

吕瑞彤, 姚 亮, 余 跃, 王 昊

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘 要] 有色金属工业是我国工业领域碳排放的重点行业,碳捕获、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)技术是实现有色金属行业碳中和的一个重要途径,固体吸附法碳捕集技术由于工艺流程简单、自动化程度高等优点,受到了研究者和行业专家的广泛关注。以碳基材料、沸石分子筛、固体胺基吸附材料为吸附剂的 CO₂变压吸附技术正逐步在燃煤电站、石灰窑等燃烧后烟气碳捕集的中试和工程示范项目中开展试验,并取得了关键性进展。同时,金属有机框架材料(Metal Organic Frameworks, MOFs)、多孔聚合物(Porous Organic Polymers, POPs)以及类水滑石等新型 CO₂吸附材料的研究也为不同工况条件下的碳捕集工艺技术提供了更多的材料选择。目前,吸附法 CO₂分离与捕集技术主要适用于有色金属冶炼末端 CO₂捕集过程,但吸附剂和工艺相关参数在有色冶炼烟气高硫的条件下的稳定性和投入成本控制仍需通过研究进一步提升和优化。实际应用过程中,还应该借鉴燃煤电厂等应用领域经验,结合有色冶炼等多学科、多专业领域,寻求碳捕集技术 CO₂产品在有色冶金及相关领域的应用场景,解决碳捕集过程的经济效益问题,进一步探索降本增效的工艺路径。

[关键词] 有色金属行业; 碳捕集技术; CO₂吸附; 固体吸附材料; 物理吸附; 化学吸附

[中图分类号] TF805.3 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)04-0052-14

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.04.006

0 引言

据 2025 年 3 月国际能源署(IEA)发布的《全球能源回顾(Global Energy Review 2025)》报告显示,2024 年,全球与能源相关的二氧化碳排放量增长 0.8%,创下 378 亿 t 的历史新高,大气 CO₂浓度达到 422.5 ppm(10⁻⁶,下同),比 2023 年高出约 3 ppm,如图 1 所示^[1]。我国 2024 年碳排放量基本与 2023 年持平,为 126 亿 t,其中能源增长 0.4%,工业过程下降 5%^[1]。近年来,以太阳能光伏、风能等关键技术清洁能源得到大力发展,使得我国碳排放量正

在出现结构性放缓,但 2024 年统计数据表明,我国对煤炭、石油、天然气等化石能源消费总量仍占能源消费总量的约 82.1%^[2]。为有效应对 CO₂排放量升高为主引发的全球气候变化问题,我国在 2020 年明确提出了“双碳”目标^[3]。数据表明,我国目前碳排放主要来源于工业生产,因而控制工业碳排放成为建设低碳经济的关键^[4]。

在工业领域中,有色冶炼行业是工业领域碳排放的重点行业之一,在实现碳中和进程中扮演重要的角色。2023 年 10 月发布的《关于做好 2023—2025 年部分重点行业温室气体排放报告与核查工作的通知》中将有色金属的铝冶炼和铜冶炼纳入全国碳市场。统计数据显示,2020 年有色金属行业二氧化碳排放量约 6.6 亿 t,约占工业领域碳排放量的 15.3%。其中,以铝冶炼为代表的冶炼过程碳排放量占比高达 76% 左右,因此冶炼过程是有色金属行

[收稿日期] 2026-01-28 [修订日期] 2026-04-06

[录用日期] 2026-04-06 [出版日期] 2026-08-01

[第一作者] 吕瑞彤(1994—),女,陕西咸阳人,博士研究生,工程师,从事工业烟气污染治理、大气污染物控制技术相关研究。

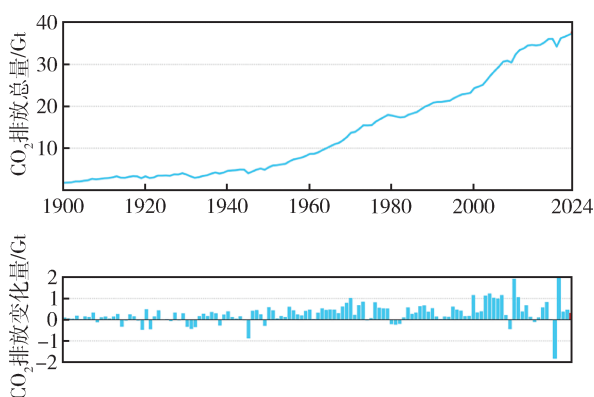


图1 1990—2024年全球能源相关碳排放量及年变化量^[1]

Fig. 1 Annual changes in global energy-related carbon emissions from 1990 to 2024^[1]

业碳排放的重点环节^[5-7]。

从当前形势看,有色金属工业完全实现清洁能源替代的难度较大,化石燃料仍将占据一定的比例,CCUS技术将是未来实现有色金属行业碳中和的一个重要途径。然而,高成本的CO₂捕集技术极大程度限制了后端CO₂的转化利用^[8]。同时,普通烟气的压力小、体积大、CO₂浓度低且含有大量的N₂和复杂组分,也对CO₂捕集技术提出了更为严苛的要求。目前,液体吸收法是最为成熟的CO₂捕集技术,但其存在吸收液黏度调节耗水量较大、吸收液热再生能耗大等问题,造成过程中整体能耗过高^[9]。而固体吸附法碳捕集技术从理论上有效规避了再生过程中大量的无效热损耗,工艺流程简单、自动化程度高,有望大幅度降低碳捕集过程的能耗和成本^[10]。其技术核心在于开发高性能的吸附剂材料,对整体效率、实施效果和成本高低有决定性作用^[11]。

基于固体吸附材料在CO₂捕集技术中的重要地位和作用,本文首先对目前CO₂固体吸附材料以及工艺方法进行系统性介绍,然后对比分析不同类型吸附材料和工艺在实际工程项目中的应用效果和存在问题,最后根据吸附法CO₂捕集技术现状,结合目前有色金属行业的碳捕集需求探讨该技术在有色冶金领域的技术应用前景及发展方向。

1 CO₂固体吸附材料

CO₂固体吸附材料根据吸附机制的不同可分为物理吸附材料和化学吸附材料两大类。物理吸附

材料主要包括碳基吸附材料、沸石分子筛、金属有机框架材料(MOFs)以及多孔聚合物(POPs)等;化学吸附材料包括固体胺基吸附材料、金属氧化物(Metal Oxides, MOs)以及类水滑石吸附材料等^[12]。其中,碳基吸附材料、沸石分子筛、固体胺基吸附材料、POPs以及MOFs等主要适用于低温(<200℃)CO₂吸附过程;类水滑石吸附材料和MgO基吸附剂等通常用于中温(200~400℃)烟气CO₂吸附过程;CaO基吸附剂和碱金属陶瓷吸附材料(如Li₂ZrO₃)等则适用于高温(>400℃)工况条件下的CO₂吸附过程^[13]。下文将根据吸附剂类型对各种材料进行具体介绍。

1.1 物理吸附材料

1.1.1 碳基吸附材料

碳基材料是由碳元素为结构主体的一类吸附材料。常见的碳基材料包括活性炭、活性碳纤维、碳分子筛、碳纳米管、石墨烯、碳纳米纤维(Carbon Nanofibers, CNFs)和生物炭等。值得关注的是,碳基材料是目前唯一不需要预先去除水蒸气的工业用吸附剂,具有广阔的应用前景和实用价值。

1)活性炭。活性炭是由椰壳、煤炭、石油等含碳物质经过碳化和活化制得的一种碳基吸附材料,比表面积高达600~2 000 m²/g,孔隙结构发达,被广泛用于气体的净化和分离、水处理等方面。近年来,诸多学者在高比表面积与微孔调控、表面化学-氮/氧官能化、生物质衍生-分级孔-复合化等方向开展了大量的研究,进一步优化活性炭材料孔径-功能协同和绿色低碳低成本制备等^[14]。Creamer等^[15]报道了以KOH、H₃PO₄或蒸汽活化制备的超高比表面积活性炭(SBET>2 000 m² g⁻¹),在25℃、100 kPa下CO₂吸附量突破4 mmol·g⁻¹,并指出<0.7 nm微孔对低压吸附起决定作用。Abd等^[16]通过NH₃、尿素以及氧化-胺化耦合等手段,引入吡啶-N、羧基、羰基等极性位点,获得的氮/氧共掺杂活性炭在15 kPa低压区段吸附量提升40%~60%,CO₂/N₂选择性>25。

2)碳分子筛。碳分子筛(Carbon Molecular Sieves, CMSs)以高纯碳为主要骨架,孔径分布在0.3~1.0 nm范围内,特定的孔道尺寸能够对CO₂分子实现选择性吸附,表现出明显的“分子筛效应”。依据其外形特点可分为纤维状CMSs、颗粒状CMSs和膜状CMSs^[14]。碳分子筛具有孔径均一、选择性好、热/化学稳定性高、疏水性强、再生性能良好等特点。近年来,关于碳分子筛的研究主要集中在微孔

精密调控、表面化学修饰、CMC膜复合以及DAC级低压捕集等方向。Carruthers等^[17]以聚偏二氯乙烯(PVDC)为原料制备的碳分子筛,室温条件下对CO₂吸附量可达到4.5 mmol·g⁻¹。有研究表明,碳分子筛对CO₂的选择性受到其制备原料的影响较大,以玉米秸秆和对叔丁苯酚醛树脂分别为原料制备的CMS,在CO₂/CH₄混合气的分离中,CMS的动力学选择性分别为26%和8%^[18]。当前,CMS由于传质速率慢、吸附容量相对较低、表面化学性质比较单一、制备成本较高等缺点,限制了其在气体吸附分离方面的规模化应用。

3) 活性炭纤维。活性炭纤维是由碳纤维和可碳化纤维(如木质素、聚丙烯腈、沥青等)活化得到的纤维直径在5~13 μm,孔径在1~4 nm的新型吸附材料。与传统活性炭相比,活性炭纤维比表面积高达2 500 m²/g,微孔结构更丰富,孔径分布更均匀、具备良好的吸附选择性和耐酸碱性,高温条件吸附效果稳定,更适合极端吸附环境^[19]。李灿灿等^[20]采用碱改性活性炭纤维,改性后材料的CO₂吸附量提升至24.4%。An等^[21]采用ACF和酚醛树脂复合材料制备CO₂吸附活性炭纤维,发现ACF与酚醛树脂的质量比越高,CO₂的吸附量越小。尽管活性炭纤维有更强的CO₂吸附能力,但其存在再生困难、成本较高、活化工艺复杂等问题,亟待进一步研究解决。

4) 碳纳米管。碳纳米管(Carbon Nanotubes, CNTs)是一种空心管状结构的纯碳材料,主要由石墨片卷曲制成,可以具有不同的管壁碳原子层数。碳纳米管的结构独特、比表面能较强,具备优异的力学、光学和化学等性能,广泛应用于氢气储存、气体吸附分离等领域。Lu等^[22]对比了3-氨基丙基三乙氧基硅烷(APTS)改性的颗粒活性炭、碳纳米管和沸石的CO₂吸附性能,发现碳纳米管改性的样品性能最好。Lithoxoos等^[23]对气体在单壁碳纳米管(Single-Walled Carbon Nanotubes, SWNTs)上的吸附进行了实验论证和模拟计算,发现其对于CO₂有很好的吸附能力,具有一定的应用前景。但目前关于CNTs对于CO₂的吸附研究仍处于探索阶段。

5) 石墨烯。石墨烯(Graphene)是一种六角蜂巢状二维网格结构的纯碳材料。其特点在于比表面积大(理论值为2 630 m²/g),表面活性较高,机械强度和力学性能优异,同时具备良好的化学稳定性和高导热性。部分学者^[24-26]尝试将石墨烯用于CO₂等

气体吸附领域的研究并取得良好的效果。Chowdhury等^[27]制备了具有良好疏水性的三维多孔石墨烯材料,在100 kPa压力条件下,CO₂吸附量可达到2.11 mmol·g⁻¹。Zhou等^[28]采用三联吡啶改性石墨烯材料,制得的样品对CO₂的吸附容量达到12 mmol·g⁻¹。尽管石墨烯在CO₂吸附方面显示出一定的良好性能,但其吸收率较低,且再生工艺复杂,制备成本与传统吸附材料相比仍较高,限制了其规模化应用。

近年来,关于CO₂碳基吸附材料的前沿研究方向主要包括:①以可再生生物质为前驱体制备低成本多孔碳;②通过杂原子(N、O、S、P)掺杂或表面官能团提升低压(≤15 kPa)亲和力;③面向直接空气捕获(DAC)设计分级孔结构-功能协同的碳气凝胶/纳米复合材料等超高比表面氮掺杂碳气凝胶合成、石墨烯-壳聚糖-聚苯并噁嗪三元杂化体系构建以及直接空气捕获(DAC)场景下的K₂CO₃/碳气凝胶合成、杂原子共掺电子结构调控等方向,为碳基材料性能和稳定性的提升提供了更多的思路和可能性^[29,30]。

1.1.2 沸石分子筛

沸石分子筛是天然或人工合成的含碱金属(K、Na、Li)或者碱土金属(Mg、Ca、Ba等)的结晶硅铝酸盐,因具有规整的孔道结构、较强的酸性和高的水热稳定性而广泛应用于催化、吸附和离子交换等领域^[31]。目前,以5A和13X为代表的沸石分子筛已经被广泛应用于CO₂的吸附和分离,但在高湿、复杂烟气条件下存在吸附性能下降显著等问题。研究者们通过离子交换、胺基化、疏水化、酸改性以及“Trapdoor”策略等方式对现有分子筛材料进行改性和性能优化。Pham等^[32]通过阳离子交换采用锂、钠和钾离子对SSZ-13沸石进行改性,所制备的Li-SSZ-13表现出最高的二氧化碳吸附能力。Kim等^[33]采用十八烷基三甲氧基硅烷(ODTMS)制备的疏水性沸石,使材料的CO₂吸附容量增加了33.3%。Zhou和团队^[34]将NaX封装在疏水性聚丙烯酸酯壳内,制备的NaX/聚丙烯酸酯复合材料在25℃和11%RH下的吸水率为5.20 mmol·g⁻¹,比纯聚丙烯酸酯降低了64.77%。

在众多CO₂吸附固体材料中,分子筛吸附剂的CO₂吸附容量以及热稳定优势明显,但其较高的合成成本限制了其规模化应用。因此,降低分子筛吸附材料的合成成本是推进该类吸附材料工业化应

用亟需解决的问题之一。

1.1.3 金属有机框架材料

MOFs是一种由金属节点和有机配体通过配位键构筑的新型材料。MOFs的高比表面积、功能位点及可精修结构使其在CO₂捕获中优势明显,获得了研究者们的大量关注^[35]。但MOFs中的金属节点和配体常以较弱的配位键连接,这导致其在高温高压等苛刻反应条件下的热稳定性相对较差,同时对酸、碱、空气、水等相对敏感,这些弱点极大限制了MOFs材料在大规模CO₂捕集中的工业化应用。

为提升潮湿环境中的CO₂捕集效率,研究人员主要通过两种策略提高MOFs的耐水性:一是从合成源头进行结构设计(如调控疏水性与稳定性等特性),二是通过后处理改性(如引入疏水分子、表面接枝等手段)^[36]。Li等^[37]采用烷基胺对Cr-MIL-101进行改性,在15 kPa、25℃条件下,其CO₂吸附量达到4.21 mmol·g⁻¹。Andirova等^[38]以2,5-二氧代-1,4-苯二甲酸酯(DOBDC)为配体,构建了乙二胺官能化的MOF材料(ED-Mg/DOBDC)。该材料在蒸气存在下仍能优先吸附CO₂分子,尽管吸附量从4.66 mmol·g⁻¹略微下降至4.47 mmol·g⁻¹,但表明其在高湿环境下仍具备较为稳定的CO₂吸附性能。上述研究为拓展MOFs在气体吸附领域的实际应用奠定了重要基础。

1.1.4 多孔聚合物

多孔有机聚合物(POPs)是一类由碳、硼、氧、氮等元素通过强有机共价键连接构成的超交联聚合物材料。根据结构类型的不同,POPs主要包括多孔聚合物网络(Porous Polymer Networks, PPN)、多孔有机框架(Porous Organic Frameworks, POF)、共轭微孔聚合物(Conjugated Microporous Polymers, CMP)、固有微孔聚合物(Polymers of Intrinsic Microporosity, PIM)、超交联聚合物(Hyper-Crosslinked Polymers, HCP)、共价三嗪基骨架(Covalent Triazine Frameworks, CTF)、多孔芳香骨架(Porous Aromatic Frameworks, PAF)以及结晶共价有机骨架(Crystalline Covalent Organic Frameworks, COF)等^[35]。POPs具有高比表面积、高孔隙率、结构多样性和可调控的物理化学稳定性等优势,经特定亲CO₂官能团修饰后,在高湿等恶劣环境下的CO₂捕集过程中展现出良好的应用潜力。

Lu等^[39]通过IAST计算发现,经磺酸铵盐接枝改性后的多孔聚合物网络(PPN-6-SO₃NH₄)对CO₂具

有极高的吸附选择性。在295 K、100 kPa、15% CO₂(N₂为平衡气)条件下,其CO₂吸附容量达到1.7 mmol·g⁻¹。此外,部分研究者^[40-42]通过胺基改性、引入富氮或富氧官能团、接枝无机离子等亲CO₂基团,合成了一系列新型POPs功能材料,增强了聚合物与CO₂之间的相互作用,从而进一步提升了POPs材料的CO₂吸附容量和稳定性。尽管POPs吸附材料在CO₂吸附分离方面表现出良好的性能,但仍面临合成工艺复杂、成本高、结构表征困难、吸附机制尚不明确、复杂烟气组分影响等问题,亟需开展深入研究。

1.2 化学吸附材料

1.2.1 固体胺基吸附剂

固体胺基吸附剂是一类胺化物和载体复合的新型吸附材料,能够兼具胺化合物对CO₂的优良吸附容量和载体的多孔、高比表面积、水热稳定性等优势。载体材料可以是二氧化硅、沸石、活性炭、树脂、MOFs等。常见的胺类型包括聚乙烯亚胺(PEI)、四乙烯五胺(TEPA)、二乙醇胺(DEA)等^[43]。通常,胺基与载体之间的结合方式主要有湿式浸渍法、原位聚合法以及后合成法(如共价接枝等)等。郝京华等^[44]采用乙醇胺对自制的有序介孔氧化铝(OMA)、有机铝(MIL-53(Al))进行胺基改性,结果表明,在298 K、吸附压力400 kPa、空速300 h⁻¹条件下,OMA-MEA和MIL-53(Al)-MEA对CO₂的饱和吸附量分别为165.5 mg/g和178.9 mg/g,并且具有良好的再生循环性能。Kalantarifard等^[45]合成了一种乙二胺(EDA)改性的中孔沸石ZSM-5,CO₂吸附容量可达6.13 mmol·g⁻¹,并通过微波解吸,实现100%解吸效率。

传统固态胺类材料固定床吸附存在压降严重、胺类化合物浸出、孔道堵塞等问题^[46]。近年来,固体胺吸附剂已成为碳捕集与分离技术领域的研究热点,随着研究的不断深入,其有望成为胺溶液的替代品,解决设备腐蚀和再生热问题,被认为是最有前途的烟气或其他气体碳捕集技术之一^[43]。

1.2.2 金属氧化物

金属氧化物(MOs)是一类通过与CO₂反应实现对CO₂的分离和去除的吸附材料,常见的有CaO、MgO、Al₂O₃、Na₂O等,通常用于电厂脱碳等高温烟气条件(100℃以上)。其中,CaO的CO₂理论吸附量为78.6%(质量分数),但其与CO₂反应生成的碳酸钙

会覆盖在CaO表面,堵塞吸附剂孔道,导致扩散阻力增大等问题。同时,CaO吸附剂再生能耗高(800~900℃煅烧再生),且易因CaO烧结导致循环性能下降。Abanades等^[47]在流化床内采用CaO吸收CO₂,经11次循环后,吸附剂的转化率下降了50%。有研究通过对沉淀CaCO₃进行改性和提高CaO等金属氧化物的孔隙率和抗腐蚀性能,以减缓吸附容量衰减,同时提高吸附容量和稳定性。与CaO相比,MgO吸附材料对于烟气温度高、CO₂分压低、含一定量水蒸气的烟气条件具有更好的适用性。MgO具备较好的耐水性和较低的脱附温度,且来源广泛,可规模化生产。然而,MgO吸附材料的吸附性能仍有待进一步提升,同时需克服反应器运行成本较高等问题^[12,13]。

1.2.3 类水滑石类材料

类水滑石材料(Layered Double Hydroxides, LDHs)又称层状双羟基金属氢氧化物,是一类由层板金属阳离子和层间阴离子有序组装而成的新型无机多孔材料^[48]。类水滑石材料的通式可表示为 $[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)_2]^{x+}(A^{n-})_{\frac{x}{n}} \cdot zH_2O$,其中二价和三价阳离子可以为Mg²⁺、Ni²⁺、Zn²⁺、Al³⁺、Cr³⁺等,层间阴离子则可以是含氧阴离子(CO₃²⁻、OH⁻)和卤素阴离子(F⁻、Cl⁻)等^[12]。类水滑石材料具有组成灵活和“记忆效应”功能等特点,已广泛应用于催化材料、吸附材料、阻燃材料、废水处理等领域^[49-54]。

作为CO₂吸附材料,传统的LDH需经过热处理(包括脱水、脱羟基和脱碳等)转变为类水滑石氧化物(Layered Double Oxide, LDO)材料才能表现出较高的CO₂吸附性能^[55]。为改善其吸附性能,研究者们通过调控合成方法^[56,57]、引入有机大分子^[58,59]、改变LDHs颗粒大小^[60-62]、优化煅烧温度^[63]、掺杂金属^[64]以及与其他材料复合制备等方式对类水滑石吸附材料进行优化改性。Climent等^[65]采用不同制备法合成了类水滑石及其衍生Al₂O₃-Mg-O复合金属氧化物,发现超声处理和焙烧有利于提升其颗粒均匀性和增大比表面积。Wang等^[66]通过研究发现在合成过程中插入长链有机阴离子或负载碱式碳酸盐能够提升LDHs的CO₂吸附性能。Oliveira等^[67]向类水滑石中掺杂K、Cs等金属离子,在403℃、CO₂分压40 kPa条件下,掺杂K的MG30样品CO₂吸附量从0.1 mmol·g⁻¹提升至0.76 mmol·g⁻¹。

与大多数低温吸附剂(如活性炭、沸石和

MOFs)在含水条件下性能下降相反,微量水蒸气条件下LDO的CO₂吸附性能有10%左右的提升^[68],但含硫气体组分存在同样会导致其吸附容量下降显著。目前关于该类材料的CO₂吸附相关研究较少,其CO₂吸附性能、稳定性等仍有待进一步提高。

1.3 其他新型吸附材料

除以上吸附材料之外,一些研究者致力于开发新型CO₂吸附材料,主要包括碱金属陶瓷类吸附剂(如Li₂ZrO₃)和碱金属硅酸盐高温吸附剂(如Li₄SiO₄、Li_{4-x}Na_xSiO₄、Li_{4+x}(Si_{1-x}Al_x)O₄等)。

碱金属陶瓷类吸附剂具有优异的CO₂吸附性能以及稳定性,但是吸附过程存在Li₂CO₃副产物阻碍CO₂的内部扩散,限制吸附过程速率^[69]。有研究采用碳酸锂或碳酸钾对Li₂ZrO₃进行改性以增加材料对CO₂的吸附速率。Xiao等^[70]研究获得K:Li:Zr摩尔比最佳比例为0.2:1.6:1的Li₂ZrO₃吸附剂,在550℃条件下,15 min内的CO₂吸附量达到23%(质量分数)。Nakagawa等^[71]合成的Li₂ZrO₃吸附剂,在450~680℃条件下,实际CO₂吸附量可达5.682 mmol·g⁻¹,且经过18次循环后吸附量下降1.1%。碱金属硅酸盐吸附材料一般适用于500~850℃的CO₂吸附过程,由于脱附温度较低,且稳定性较高,成为近年来高温吸附CO₂材料的关注重点之一。目前,该类材料的研究方向主要有微观结构改性、负载碱金属盐及过渡金属、用Na替换Li等。新型CO₂吸附剂的开发为吸附材料的发展注入了新的研究思路 and 方向,有助于进一步拓宽CO₂固体吸附技术以及碳捕集工艺的多领域应用。

2 CO₂吸附工艺

目前,根据再生条件的不同CO₂吸附工艺主要分为变压吸附(Pressure Swing Adsorption, PSA)、变温吸附(Temperature Swing Adsorption, TSA)、变电压吸附(Electric Swing Adsorption, ESA)以及变温变压耦合吸附(Pressure & Temperature Swing Adsorption, PTSA)等技术^[72,73]。

2.1 变压吸附

变压吸附的基本原理是利用固体吸附剂对CO₂的特异性吸附及吸附容量随压力变化的特性来实现CO₂的分离或提纯。该技术具有工艺流程简单,能耗低,适应性好,避免溶剂损失和回收等优点^[74]。根据起始压力的不同,变压吸附又细分为高压变压

吸附(PSA)和真空变压吸附(Vacuum Pressure Swing Adsorption, VPSA)^[75]。随着技术的不断改进,变压吸附装置由最早的单塔发展至Skarrstorm双塔结构,乃至4~12个吸附塔的循环装置,通过循环操作,提高了产物回收率,节省了能量损失。图2为两阶真空变压吸附工艺流程示意图^[73]。

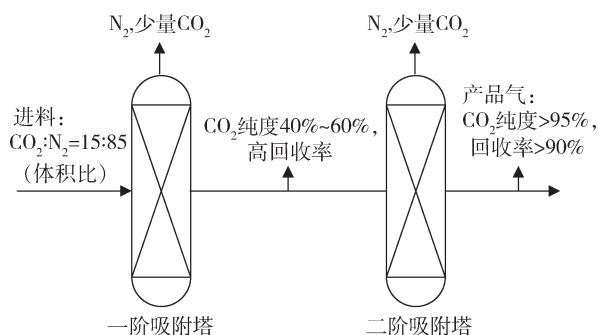


图2 两阶VPSA工艺流程示意图^[73]

Fig. 2 Two-stage VPSA process flow diagram^[73]

目前PSA主要应用于CO₂捕集、制氢和氮甲分离等领域^[73],其中的双循环真空变压吸附(Dual-reflux Vacuum Pressure Swing Adsorption, DR-VPSA)、Two-stage VPSA等吸附工艺已经中试或处于实验验证阶段^[76-78]。在原料气中CO₂浓度低于40%时,单阶PSA工艺难以满足95%纯度和90%的回收率(碳捕集与封存(Carbon Capture and Storage, CCS)技术目标值),因而国内外关于变压吸附的研究大多采用双阶工艺、回流处理以及引入温度波动以实现低浓度CO₂的高效富集。Wang等^[78]研究了燃煤电厂烟道气(15%CO₂/85%N₂)中试规模的双阶VPSA工艺。该过程以13XAPG和活性炭分别作为第一、二阶吸附剂,在能耗2.44 MJ/kg条件下,产品气中CO₂纯度为95.6%,回收率为90.2%。Nikolaidis等^[79]分别以13X分子筛和Mg-MOF-74为吸附剂考察双阶VPSA的CO₂富集效果。CO₂回收率达到90.16%,纯度为97.57%,能耗为0.7 MJ/kg。

2.2 变温吸附

变温吸附的基本原理是利用吸附剂在低温条件下吸附CO₂,高温条件脱附CO₂,达到分离提纯CO₂目的。图3为两步或三步TSA过程操作示意图^[80]。吸附剂的再生方式主要包括热吹扫、吸附塔夹套通入热流体、微波加热等。

变温吸附主要应用于挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)净化、干燥等领

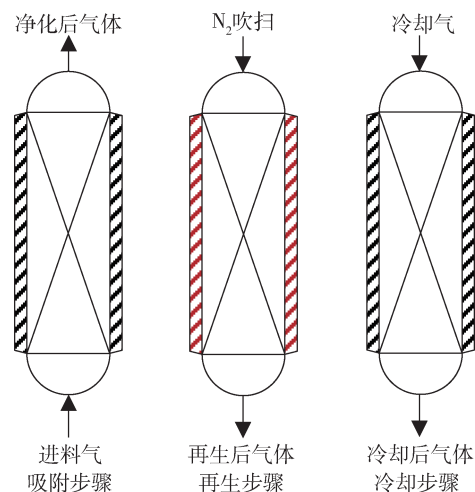


图3 两步或三步TSA过程操作示意图^[80]

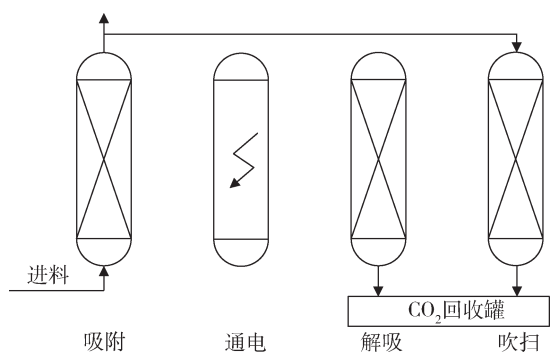
Fig. 3 Two or three-step operation of TSA process^[80]

域。该技术具有吸附剂再生程度高、循环使用寿命长等优点,但也存在吸附周期长(一般约8 h)、脱附再生能耗高等不足。针对以上问题,学者们开展了相关研究工作并取得了突破性进展。张晓娟等^[81]采用自主研发的胺基固态吸附剂R₁HMS₃-PEHA₈₀,结合固定床变温吸附工艺,应用于燃煤电厂烟道气二氧化碳捕集过程。该工艺过程理论CO₂捕集量为20 kt/a,总再生能耗为2.26 GJ/t,捕集成本为341.0元/t(以上数值均基于CO₂捕集量计算)。与传统胺溶液吸收法相比,再生能耗和捕集成本分别降低了30.7%和13.5%。凌江华等^[75]研究了以NaUSY分子筛为吸附剂的1-bed/5 step的循环变温吸附工艺,在15%CO₂浓度下获得的产品气纯度为95.44%,回收率为71.05%,吸附剂在250℃条件下再生,工艺的单位能耗为4.55 MJ/(kgCO₂)。

2.3 变电吸附

针对变压吸附与变温吸附在低浓度CO₂烟气中存在的诸多问题,有学者提出了变电吸附(Electric Swing Adsorption, ESA)技术。该技术主要依靠电流焦耳热效应驱动脱附,在低浓度CO₂吸附领域(如大气中低浓度CO₂捕集、载人航天飞行器、空间站和潜艇等密闭空间)引起了广泛关注。经典ESA循环包括吸附、通电、解吸、吹扫四个步骤,如图4所示^[82]。

ESA循环工艺具有解吸时间短、富集浓度高等优点,但主要缺点是能耗高和能量利用率低。研究者们通过优化循环结构、内部热回收等方式进一步改进ESA工艺过程,并尝试了多种固体吸附剂与

图4 四步ESA循环工艺示意图^[82]Fig. 4 Four-step ESA cycle process diagram^[82]

ESA 工艺的组合,以提高其 CO_2 分离捕集性能。吕博涵^[83]采用物理浸渍和电化学共价接枝技术制备活性炭纤维毡(ACF)基固体胺吸附剂,应用于变压吸附 CO_2 捕集过程。在室温、0.4% CO_2 浓度气氛下, CO_2 吸附量达到 84.3 mg/g,经 0.15A 电流加热,可在 10 min 内实现 CO_2 完全脱附。朱佳金等^[84]采用经不同氧化体系(硝酸、硫酸硝酸混酸和双氧水等)改性的导电炭固体胺吸附剂作为 ESA 吸附剂,吸附容量达到 143.25 mgCO_2/g 吸附剂,通过电加热实现 10 min 脱附完全,5 次循环吸附量保持在 83% 以上。

目前,ESA 碳捕集工艺的关键研究方向在于设计合成新型的能够高密度捕获 CO_2 的高稳定性材料。研究表明,ESA 应用于电厂的碳捕集过程时,净电效率比液态胺溶液工艺低 1%,尚不具备明显优势。未来可将并网困难的光电和风电发电系统用于 ESA 吸附剂再生用电,有望进一步提高 ESA 的技术优势。

2.4 变温变压耦合吸附

为了在分离捕集烟气中 CO_2 的同时利用低级废热进行吸附剂再生,以降低工艺能耗,研究者们提出了变温变压耦合的 CO_2 吸附技术并开展了一系列研究工作。Ishibashi 等^[85]在电厂烟道气 CO_2 捕集项目中采用了变压/变温吸附耦合工艺,该工艺的 CO_2 纯度和回收率分别达到了 99% 和 90% 以上,在烟气流 1 000 m^3/h 条件下,连续运行 2 000 h 性能没有明显下降,真空泵的电力消耗减少了 10%,结合余热再生吸附剂将有望使碳捕集成本降低 20%。梁辉等^[86]采用 13X-APG 沸石作为真空变压变温耦合工艺的吸附剂,在近常压(133 kPa)和常温(30℃)下吸附捕集,在加热(90~150℃)和抽真空(3 kPa)条件下进行吸附剂再生,在 15% CO_2 /85% N_2 模拟烟气中的 CO_2 吸附量达到 2.69 $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$, CO_2 捕集效率明

显优于常规变压吸附和变温吸附。Tili^[87]等以 5A 分子筛为吸附剂对比研究了不同再生方式对 CO_2 吸附工艺性能的影响,发现真空和加热协同的再生方式能够提高 10% 的 CO_2 回收率。

3 CO_2 吸附技术中试及工程示范应用

随着 CO_2 吸附材料和工艺技术的不断发展和优化,国内外先后以吸附法为核心技术建立了一批应用于燃煤电站、石灰窑等燃烧后烟气碳捕集的中试和工程示范项目。

国际方面,1991 年,日本东京电力公司在横须贺热电站建成 1 000 Nm^3/h 烟气处理量的两段变压吸附碳捕集中试装置。该装置使用 Ca-X 型分子筛作为吸附剂,经两段吸附纯化, CO_2 产品浓度可达 99%^[88]。同期,针对 300 Nm^3/h 炼钢高炉烟气处理项目,日本制铁采用 Zeolum F-9 吸附剂开发的 ASCOA-3 变压吸附 CO_2 捕集技术,实现 CO_2 处理量 3 t/d,捕集成本 120 元/t 以下^[89]。2009 年,澳大利亚 Hazelwood 褐煤电站采用日本静冈大学设计的以 A 型沸石为吸附剂的变压吸附技术建设的 1 t/d CO_2 捕集试验装置投入试验^[90],在确保 CO_2 吸附效率的前提下,实现了高纯度 CO_2 产品生产。2019 年, Wawrzyńczak 等^[91]报道了采用以活性炭为吸附剂的双循环真空变压吸附(DR-VPsA)技术从烟气中分离二氧化碳的试验结果。在最佳工艺参数下(原料气流速约 100 Nm^3/h ,吸附时间 300 s),产品纯度为 87.5%,回收率为 44.6%,生产能力为 11.4 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$,气体压缩和抽真空能耗为 978 kWh/MgCO_2 。

国内方面,20 世纪 80 年代初,西南化工研究设计院有限公司开始研究利用变压吸附从各种含 CO_2 的气体中分离获取 CO_2 产品。1987 年,第一套从石灰窑烟气中分离提纯 CO_2 的工业装置在四川眉山县氮肥厂投入运行,随后推广至天津碱厂、广州钢铁、浙江巨化等 6 家单位石灰窑烟气捕集装置,累计捕集规模超过 30 万 t/a^[92]。近年来,吸附法碳捕集技术成为煤电低碳化改造的重要技术选项。Liu 等^[93]在某燃煤电厂碳捕集项目中采用沸石 5A 为吸附剂的三床七步 VPSA 工艺进行 CO_2 捕集回收。在 15.0% CO_2 、76.5% N_2 和 8.5% O_2 条件下,产品气中 CO_2 浓度为 85%,回收率为 79%,能量消耗为 2.37 $\text{MJ}/(\text{kg CO}_2)$ 。Wang 等^[94]报道了应用于燃煤电厂 CO_2 捕集的 VPSA 中试示范项目研究。该装置分

别以13-APG和沥青基ACB为第一、二单元吸附剂。在湿度低于0.5%、CO₂含量为15.5%~16.5%条件下,实现产品气CO₂纯度95%以上。2013年8月,宁夏大荣集团水泥窑气变压吸附回收低浓度CO₂技术试车运行成功,获取CO₂浓度达到50%,成功实现我国首次低浓度CO₂回收相关试验^[95]。2024年12月,万吨级低压吸附碳捕集示范装置在国能浙江宁海电厂成功投运。项目采用NICE-CO₂-AD1高性能碳基物理吸附剂,在捕集率≥80%、产品气纯度≥95%的条件下,系统平均综合电耗仅331 kWh t⁻¹ CO₂,显著低于现有胺吸收工艺^[96]。

目前,吸附法CO₂捕集技术仍处在中试和示范阶段,在实际工程应用中,仍需进一步降低吸附材料成本、工艺能耗等。相较于变温吸附,变压吸附CO₂捕集技术在以电厂为代表的行业领域已有一系列中试试验和示范工程,而TSA碳捕集技术由于再生能耗以及周期长等问题,相关的工程应用鲜有报道,尚处于探索阶段^[97,98]。此外,从工程应用的角度看,变压变温吸附耦合和变电吸附技术成熟度仍有待进一步提高。未来,在提高吸附剂性能、选择性、稳定性的同时,进一步优化CO₂吸附工艺和过程操作参数以适应复杂组分下CO₂捕集过程将成为吸附法规规模化应用的重要研究内容之一。

4 吸附法碳捕集技术在有色领域的应用前景

2025年3月,生态环境部发布了关于印发《全国碳排放权交易市场覆盖钢铁、水泥、铝冶炼行业工作方案》的通知,将除火电行业外的高排放行业,钢铁、水泥、铝冶炼三个行业纳入全国碳排放权交易市场管理,并指出以上三个行业具有碳排放量大、碳排放强度高、高碳锁定效应强等特点^[99]。我国出台的一系列政策表明,未来对于有色金属冶炼行业的碳排放管控将逐步开展并趋于严格。目前,吸附法碳捕集技术主要在燃煤电厂、钢铁等碳排放量大的行业开展中试试验和示范工程应用,而对于碳排放较少的有色冶炼行业的技术应用仍处于探索阶段。

当前,有色行业降碳途径主要包括能源替代、提高能源利用率(包括高效燃烧、惰性电极技术和金属再生利用等)、冶炼前CO₂分离捕集、智能控制以及冶炼末端的CO₂捕集等。然而,由于新型选矿

设备、气化炉、高性能催化剂与碳捕集系统的前期投资十分巨大,这些降碳技术在中小冶炼企业中开展实际应用受到较大的限制。同时,这些技术的工艺稳定性仍有待进一步提高,在冶炼过程中可能出现气化炉结渣、催化剂中毒失活等问题,对生产工序造成影响,导致成本大幅增加,使得有色金属冶炼前降碳技术的规模化应用仍需深入探索研究。

我国有色金属矿具有来源广泛、多元素伴生、品位低、高砷、高氟等特点,相应的冶炼工艺也不断趋于复杂,造成冶炼烟气的气量、组分波动较大。有色冶金工业的原料大多以硫化矿为主,且冶炼工艺中火法冶炼过程占比较大,产生的烟气中以SO₂、NO_x、重金属以及粉尘等组分为主。其中,铜、镍、铅、锌等冶炼工艺较为先进,冶炼烟气量稳定、SO₂浓度高,而钼、锡、锑等稀有有色金属受冶炼工艺限制,烟气量大且SO₂浓度较低^[100]。此外,在铅、锌等金属冶炼烟气制酸后NO_x浓度通常在10~100 mg/m³^[101]。目前,有色金属冶炼的烟气治理主要针对粉尘、SO₂以及NO_x,对于冶炼烟气中的CO₂监测和控制仍处于起步探索阶段,关于有色冶炼过程烟气中CO₂排放特征的数据报道相对较少^[102]。根据当前有色冶炼废气脱硫脱硝技术主要采用湿法等低温处理技术的现状,笔者认为可在有色金属冶炼末端采用变压或变温吸附工艺实现碳捕集过程,吸附剂也可相应采用中低温固体吸附材料,如活性炭、沸石分子筛以及固体胺基吸附材料等。但有色金属冶炼烟气中较高的SO₂含量可能对以上吸附材料性能产生影响,因而,CO₂吸附剂和碳捕集工艺相关参数在有色冶炼烟气高硫的条件下的稳定性和投入成本控制等关键问题仍需进一步深入研究^[103]。具体来说,CO₂吸附技术应用于有色冶金行业仍需对以下几个方面开展针对性研究工作:①针对有色金属冶炼工艺,开发相应含湿烟气中新型耐硫、高效、低能耗且环境友好的吸附材料;②深入了解有色冶金过程中烟气组分、排放特征以及物质循环利用等,根据实际工艺需求进行CO₂捕集工艺的设计和优化;③结合有色冶炼等多学科、多专业领域,寻求碳捕集技术CO₂产品的应用场景,解决碳捕集过程的经济效益问题,探索降本增效的工艺路径。

[参考文献]

- [1] International Energy Agency. Global Energy Review 2025 [R/OL]. Paris: International Energy Agency, (2025-03-24) [2025-

- 07-21]. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴 2024 [M/OL]. 北京: 中国统计出版社, (2024-10-15) [2025-07-21]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2024/indexch.htm>.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2024 [M/OL]. Beijing: China Statistics Press, (2024-10-15) [2025-07-21]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2024/indexch.htm>.
- [3] 阳平坚, 彭栓, 王静, 等. 碳捕集、利用和封存(CCUS)技术发展现状及应用展望[J]. 中国环境科学, 2023, 44(1): 404-416.
Yang Pingjian, Peng Shuan, Wang Jing, et al. Carbon capture, utilization and storage(CCUS) technology development status and application prospects[J]. China Environmental Science, 2023, 44(1): 404-416.
- [4] 徐叶净, 王兵. 工业碳排放状况及减排途径分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(4): 87-88+96.
Xu Yejing, Wang Bing. Analysis of industrial carbon emission status and emission reduction pathways [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2022, 12(4): 87-88+96.
- [5] 刘楠楠, 杨晓松, 楚敬龙, 等. 有色金属冶炼企业碳排放核算与减排策略[J]. 矿冶, 2021, 30(3): 1-6.
Liu Nannan, Yang Xiaosong, Chu Jinglong, et al. Carbon emission analysis and emission reduction strategy of nonferrous metal metallurgy[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(3): 1-6.
- [6] 张伟伟. 有色金属工业碳排放现状与实现碳中和的途径[J]. 有色冶金节能, 2021, 37(2): 1-3.
Zhang Weiwei. Carbon emission status of nonferrous metal industry and ways to realize carbon neutralization [J]. Energy Saving of Non-ferrous Metallurgy, 2021, 37(2): 1-3.
- [7] 生态环境部办公厅. 关于做好 2023—2025 年部分重点行业企业温室气体排放报告与核查工作的通知[EB/OL]. (2025-10-18) [2025-07-20]. https://wzq1.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202310/t20231018_1043427.html.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on reporting and verification of greenhouse gas emissions of some key industries from 2023 to 2025 [EB/OL]. (2025-10-18) [2025-07-20]. https://wzq1.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202310/t20231018_1043427.html.
- [8] Mondal M K, Balsora H K, Varshney P. Progress and trends in CO₂ capture/separation technologies: A review [J]. Energy, 2012, 46(1): 431-441.
- [9] 沈海燕, 李芳芹, 任建兴, 等. 化学吸收法捕集二氧化碳的研究进展[J]. 无机盐工业, 2024, 56(5): 11-19, 44.
Shen Haiyan, Li Fangqin, Ren Jianxing, et al. Research progress of carbon dioxide capture by chemical absorption [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024, 56(5): 11-19, 44.
- [10] 王继锋. 变温吸附在焦炉煤气净化中的应用[J]. 煤炭与化工, 2018, 41(12): 130-132.
Wang Jifeng. Application of TSA in purge of coke oven gas [J]. Coal and Chemical Industry, 2018, 41(12): 130-132.
- [11] 高腾飞, 常超, 杨阳, 等. 碳捕集变压吸附技术工艺及吸附材料研究进展[J]. 辽宁化工, 2020, 49(11): 1389-1394.
Gao Tengfei, Chang Chao, Yang Yang, et al. Research progress of pressure swing adsorption technology and adsorption materials for carbon capture [J]. Liaoning Chemical Industry, 2020, 49(11): 1389-1394.
- [12] 李纯. Ca-Al 类水滑石的制备及其衍生吸附剂的 CO₂ 吸附性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
Li Chun. Preparation of Ca-Al layered double hydroxide and CO₂ adsorption capacity of the derived sorbent. [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [13] 宋淦. MgO 吸附剂制备及其 CO₂ 吸附性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
Song Gan. The research of preparation and CO₂ adsorption performance of MgO [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [14] 王亮. 新型多孔碳基材料的制备、结构调控及其捕获烟气 CO₂ 性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
Wang Liang. Research of the porous carbon-based materials on the preparation, structure control and performance in CO₂ capture from flue gas [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.
- [15] Creamer A E, Gao B. Carbon-based adsorbents for post-combustion CO₂ capture: a critical review [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50: 7276-7289.
- [16] Abd. A A, Othman M R, Kim J. A Review on application of activated carbons for CO₂ capture [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 43329-43364.
- [17] Carruthers J D, Petruska M A, Sturm E A, et al. Molecular sieve carbons for CO₂ capture [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2012, 154: 62-67.
- [18] Banisheykholeslami F, Ghoreyshi A A, Mohammadi M, et al. Synthesis of a carbon molecular sieve from broom corn stalk via carbon deposition of methane for the selective separation of a CO₂/CH₄ mixture [J]. Clean-soil Air Water, 2015, 43(7): 1084-1092.
- [19] 杨钧略. 二氧化碳变压吸附材料的研究进展[J]. 节能, 2024, 43(10): 126-128.
Yang Junhan. Research progress of carbon dioxide pressure swing adsorption materials [J]. Energy Conservation, 2024, 43(10): 126-128.
- [20] 李灿灿, 朱佳媚, 任婷, 等. 改性活性炭纤维对 CO₂ 的吸附性能[J]. 化工进展, 2018, 37(9): 3520-3527.
Li Cancan, Zhu Jiamei, Ren Ting, et al. CO₂ adsorption performance of modified activated carbon fibers [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(9): 3520-3527.
- [21] An H, Feng B, Su S. CO₂ capture capacities of activated carbon fibre-phenolic resin composites [J]. Carbon (New York),

- 2009,47(10): 2396–2405.
- [22] Lu C, Bai H, Wu B. Comparative study of CO₂ capture by carbon nanotubes, activated carbons, and zeolites [J]. *Energy & Fuels*, 2008,22(5): 3050–3056.
- [23] Lithoxoos G P, Labropoulos A, Peristeras L D. Adsorption of N₂, CH₄, CO and CO₂ gases in single walled carbon nanotubes: A combined experimental and Monte Carlo molecular simulation study [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2010, 55 (2): 510–523.
- [24] 潘鹏云, 赵博, 熊峰, 等. 多孔固相吸附材料捕集低浓度CO₂研究进展[J]. *能源环境保护*, 2023,37(3): 50–63.
Pan Pengyun, Zhao Bo, Xiong Feng, et al. Research progress on low-concentration CO₂ capture by porous solid-phase adsorption materials [J]. *Energy Environmental Protection*, 2023,37(3): 50–63.
- [25] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films [J]. *Science*, 2004, 306 (5696): 666–669.
- [26] Zhou D, Liu Q, Cheng Q Y, et al. Graphene-manganese oxide hybrid porous material and its application in carbon dioxide adsorption [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57 (23): 3059–3064.
- [27] Chowdhury S, Balasubramanian R. Holey graphene frameworks for highly selective post-combustion carbon capture [J]. *Scientific Reports*, 2016,6(1): 21537.
- [28] Zhou D, Cheng Q Y, Cui Y, et al. Graphene-terpyridine complex hybrid porous material for carbon dioxide adsorption [J]. *Carbon*, 2014,66: 592–598.
- [29] Li H, Li J, Thomas A, Liao Y. Ultra-high surface area nitrogen-doped carbon aerogels derived from a schiff-base porous organic polymer aerogel for CO₂ storage and supercapacitors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019,29(40): 1904785.
- [30] Alhwaige A A, Ishida H, Qutubuddin S A. Nitrogen-enriched carbon aerogels derived from polybenzoxazine cross-linked graphene oxide-chitosan hybrid matrix with superior CO₂ capture performance [J]. *ACS Applied Engineering Materials*, 2024,2(6): 1672–1686.
- [31] Lo A Y, Taghipour F. Review and prospects of microporous zeolite catalysts for CO₂ photoreduction [J]. *Applied Materials Today*, 2021(23): 101042.
- [32] Ganiyu S A. Review of zeolitic-based sorbents for CO₂ capture: Insights into functional modifications, economic feasibility and machine learning-enhanced strategies [J]. *Chemical Engineering Journal Advances*, 2025,23: 100818.
- [33] Kim M, Lee J W, Kim S, et al. CO₂ adsorption on zeolite 13X modified with hydrophobic octadecyltrimethoxysilane for indoor application [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 337: 130597.
- [34] Zhou A, Yang C, Xue M, et al. High stability and strong hydrophobic hindrance effect of core-shell NaX/polyacrylate composite for CO₂ capture [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025,355: 129689.
- [35] Zou L, Sun Y, Che S, et al. Porous organic polymers for post-combustion carbon capture [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29 (37):1700229.
- [36] Singh G, Lee J, Karakoti A, et al. Emerging trends in porous materials for CO₂ capture and conversion [J]. *Chemical Society Reviews*, 2020,49(13): 4360–4404.
- [37] Li H, Wang K, Hu Z, et al. Harnessing solvent effects to integrate alkylamine into metal-organic frameworks for exceptionally high CO₂ uptake [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019,7(13): 7867–7874.
- [38] Andirova D, Lei Y, Zhao X, et al. Functionalization of metal-organic frameworks for enhanced stability under humid carbon dioxide capture conditions [J]. *ChemSusChem*, 2015, 8 (20): 3405–3409.
- [39] Lu W, Verdegaal W M, Yu J, et al. Building multiple adsorption sites in porous polymer networks for carbon capture applications [J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, 6 (12):3559–3564.
- [40] Woodward R T, Stevens L A, Dawson R, et al. Swellable, water- and acid-tolerant polymer sponges for chemoselective carbon dioxide capture [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2014,136(25): 9028–9035.
- [41] İslamoğlu T, Gulam Rabbani M, El-Kaderi H M. Impact of post-synthesis modification of nanoporous organic frameworks on small gas uptake and selective CO₂ capture [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013,1(35): 10259–10266.
- [42] Zhao Y, Wang X, Zhang C, et al. Isoindigo-based microporous organic polymers for carbon dioxide capture [J]. *RSC advances*, 2015,5(121): 100322–100329.
- [43] Lin L, Meng Y, Ju T, et al. Characteristics, application and modeling of solid amine adsorbents for CO₂ capture: A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023,325(Pt A): 116438.
- [44] 臧毅华. 介孔分子筛MCM-41吸附CO₂研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
Zang Yihua. Mesoporous molecular sieves MCM-41 on adsorption CO₂ research [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [45] Kalantarifard A, Ghavaminejad A, Yang G S. High CO₂ adsorption on improved ZSM-5 zeolite porous structure modified with ethylenediamine and desorption characteristics with microwave [J]. *Journal of Material Cycles And Waste Management*, 2017,19(1): 394–405.
- [46] 王晓琼, 陈水挟. 二氧化碳捕获材料的研究进展[J]. *离子交换与吸附*, 2023,39(5): 381–408.
Wang Xiaoqiong, Chen Shuixia. Research progress of carbon dioxide capture materials [J]. *Ion Exchange and Adsorption*, 2023,39(5): 381–408.
- [47] Abanades J C, Alvarez D. Conversion limits in the reaction of

- CO₂ with lime[J]. *Energy & fuels*, 2003, 17(2): 308–315.
- [48] 王君雅. 类水滑石/碳基复合材料的制备及其中温吸附 CO₂ 性能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- Wang Junya. Synthesis of layered double hydroxides/carbon based composites for intermediate-temperature CO₂ capture [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [49] Zhao H, Nagy K L. Dodecyl sulfate-hydrotalcite nanocomposites for trapping chlorinated organic pollutants in water[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 274 (2): 613–624.
- [50] Sels B F, De Vos D E, Grobet P J, et al. Molybdate and tungstate-exchanged layered double hydroxides as catalysts for ¹O₂ formation: characterization of reactive oxygen species and a critical evaluation of ¹O₂ detection methods [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 1999, 103(50): 11114–11123.
- [51] 牛向楠, 赵毅, 朱洪涛. Mg-Al-Fe 类水滑石及其煅烧产物对活性艳红 X-3B 脱色性能研究[J]. *水处理技术*, 2010, 36 (10): 35–40.
- Niu Xiangnan, Zhao Yi, Zhu Hongtao. Study on decolorization of active red X-3B by Mg-Al-Fe hydrotalcite-like compounds and its calcined product[J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, 36(10): 35–40.
- [52] 黄婧玮, 王仁念, 徐芳. CuZnAl 三元水滑石及其焙烧产物对甲基橙的吸附[J]. *科坛*, 2009(8): 75–76.
- Huang Jingyi, Wang Rennian, Xu Fang. Adsorption of methyl orange on CuZnAl ternary hydrotalcite and its calcined products [J]. *The Science Forum*, 2009(8): 75–76.
- [53] Ding Y, Alpay E. High temperature recovery of CO₂ from flue gases using hydrotalcite adsorbent [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2001, 79(1): 45–51.
- [54] Wang B, Williams G R, Chang Z, et al. Hierarchical NiAl layered double hydroxide/multiwalled carbon nanotube/nickel foam electrodes with excellent pseudocapacitive properties [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6 (18): 16304–16311.
- [55] 吴凯. 类水滑石基复合材料的制备及其 CO₂ 吸附性能研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2022.
- Wu Kai. Study on the preparation and CO₂ adsorption performance of hydrotalcite-like composites [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2022.
- [56] Gao Y, Zhang Z, Wu J, et al. Comprehensive investigation of CO₂ adsorption on Mg-Al-CO₃ LDH-derived mixed metal oxides [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, 1 (41): 12782–12790.
- [57] Wang Q, Wu Z, Tay H H, et al. High temperature adsorption of CO₂ on Mg-Al hydrotalcite: Effect of the charge compensating anions and the synthesis pH [J]. *Catalysis Today*, 2011, 164 (1): 198–203.
- [58] Qin Q, Wang J, Zhou T, et al. Impact of organic interlayer anions on the CO₂ adsorption performance of Mg-Al layered double hydroxides derived mixed oxides [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2017, 26(3): 346–353.
- [59] Rossi T M, Campos J C, Souza M M V M. An evaluation of calcined hydrocalumite as carbon dioxide adsorbent using thermogravimetric analysis [J]. *Applied Clay Science*, 2019, 182: 105252.
- [60] Wang Q, Gao Y, Luo J. Synthesis of nano-sized spherical MgAl-CO₃ layered double hydroxide as a high-temperature CO₂ adsorbent [J]. *RSC Advances*, 2013, 3(10): 3414–3420.
- [61] Wang Q, O'Hare D. Recent advances in the synthesis and application of layered double hydroxide (LDH) nanosheets [J]. *Chemical Reviews*, 2012, 112(7): 4124–4155.
- [62] Zhang Z, Wang J, Huang L, et al. The influence of synthesis method on the CO₂ adsorption capacity of Mg₃Al-CO₃ hydrotalcite-derived adsorbents [J]. *Science of Advanced Materials*, 2014, 6(6): 1154–1159.
- [63] Coenen K, Gallucci F, Pio G, et al. On the influence of steam on the CO₂ chemisorption capacity of a hydrotalcite-based adsorbent for SEWGS applications [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 314: 554–569.
- [64] Lee J M, Min Y J, Lee K B, et al. Enhancement of CO₂ sorption uptake on hydrotalcite by impregnation with K₂CO₃ [J]. *Langmuir*, 2010, 26(24): 18788–18797.
- [65] Climent M J, Corma A, Iborra S, et al. Increasing the basicity and catalytic activity of hydrotalcites by different synthesis procedures [J]. *Journal of Catalysis*, 2004, 225(2): 316–326.
- [66] Wang Q, Han H, Chen H L. Preparation and CO₂ capture capacity of alkali metal carbonates promoted hydrotalcite [J]. *Journal of Nanoengineering and Nanomanufacturing*, 2011, 1 (3): 298–303.
- [67] Oliveira E L G, Grande C A, Rodrigues A E. CO₂ sorption on hydrotalcite and alkali-modified (K and Cs) hydrotalcites at high temperatures [J]. *Separation and Purification Technology*, 2008, 62(1): 137–147.
- [68] Ding Y, Alpay E. Equilibria and kinetics of CO₂ adsorption on hydrotalcite adsorbent [J]. *Chemical Engineering Science*, 2000, 55(17): 3461–3474.
- [69] Ochoa-Fernández E, Rusten H K, Jakobsen H A, et al. Sorption enhanced hydrogen production by steam methane reforming using Li₂ZrO₃ as sorbent: Sorption kinetics and reactor simulation [J]. *Catalysis Today*, 2005, 106 (1–4): 41–46.
- [70] Xiao Q, Tang X, Liu Y, et al. Citrate route to prepare K-doped Li₂ZrO₃ sorbents with excellent CO₂ capture properties [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 174(1): 231–235.
- [71] Nakagawa K, Ohashi T. A novel method of CO₂ capture from high temperature gases [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1998, 145(4): 1344–1346.
- [72] 李飒. 膜分离-变压吸附协同捕集高炉煤气 CO₂ 技术经济性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.

- Li Sa. Technical and economic analysis of CO₂ capture from blast furnace gas by synergic process of membrane separation and pressure swing adsorption [D]. Beijing: School of Environmental Science and Engineering, 2021.
- [73] 江南. 变压吸附与变温吸附从干烟道气中捕集CO₂的数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- Jiang Nan. Numerical simulation study of CO₂ capture from dry flue gas by pressure swing adsorption and temperature swing adsorption[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [74] 刘闯. 分离CO₂的煤基活性炭制备研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- Liu Chuang. Research on preparation of coal-based activated carbon for separating CO₂ [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [75] 凌江华. 工业烟气中二氧化碳吸附捕集过程的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- Ling Jianghua. CO₂ capture from industrial flue gases by adsorption process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [76] Wawrzyńczak D, Majchrzak-Kucęba I, Srokosz K, et al. The pilot dual-reflux vacuum pressure swing adsorption unit for CO₂ capture from flue gas [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 209: 560–570.
- [77] Liu B, Ye L, Wang R, et al. Phosphorus-doped graphitic carbon nitride nanotubes with amino-rich surface for efficient CO₂ capture, enhanced photocatalytic activity, and product selectivity [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10 (4): 4001–4009.
- [78] Wang L, Yang Y, Shen Y, et al. CO₂ capture from flue gas in an existing coal-fired power plant by two successive pilot-scale VPSA units [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(23): 7947–7955.
- [79] Nikolaidis G N, Kikkinides E S, Georgiadis M C. An integrated two-stage P/VSA process for postcombustion CO₂ capture using combinations of adsorbents zeolite 13X and Mg-MOF-74 [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, 56 (4): 974–988.
- [80] 江南, 刘冰, 唐忠利, 等. 真空变温吸附捕集干烟道气中CO₂的模拟研究[J]. 化工学报, 2019, 70(10): 4032–4042.
- Jiang Nan, Liu Bing, Tang Zhongli, et al. Simulation study on CO₂ capture from dry flue gas by temperature vacuum swing adsorption[J]. CIESC Journal, 2019, 70(10): 4032–4042.
- [81] 张晓娟, 王峰, 李磊, 等. 电厂烟道气CO₂变温吸附捕集工艺设计及经济评价[J]. 石油化工, 2018, 47(4): 368–373.
- Zhang Xiaojuan, Wang Feng, Li Lei, et al. Design and economic evaluation of temperature swing adsorption process for CO₂ capture from power plant flue gas [J]. Petrochemical Technology, 2018, 47(4): 368–373.
- [82] 王胜岩, 邓帅, 赵睿恺. 变电吸附二氧化碳捕集技术研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(S1): 233–245.
- Wang Shengyan, Deng Shuai, Zhao Ruikai. Research progress on carbon dioxide capture technology based on electric swing adsorption [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(S1): 233–245.
- [83] 吕博涵. ACF基固体胺及其低浓度CO₂变电吸附[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
- Ly Bohan. ACF-based solid amines and their electric-swing adsorption performances toward low concentration CO₂ [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.
- [84] 朱佳金. 用于CO₂变电吸附多孔炭材料的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- Zhu Jiajin. Studies on porous carbon for CO₂ electric swing adsorption[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [85] Ishibashi M, Ota H, Akutsu N. Technology for removing carbon dioxide from power plant flue gas by the physical adsorption method [J]. Energy Conversion and Management, 1996, 37(6/8): 945–950.
- [86] 梁辉, 刘振, 王璐, 等. 13X-APG沸石真空变压变温耦合工艺吸附捕集烟道气中CO₂[J]. 过程工程学报, 2010, 10(2): 249–255.
- Liang Hui, Liu Zhen, Wang Lu, et al. Capture of CO₂ from flue gases by a combined process of vacuum and temperature swing adsorption using 13X-APG zeolite [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(2): 249–255.
- [87] Thili N, Grévillet G, Vallières C. Carbon dioxide capture and recovery by means of TSA and/or VSA [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(5): 519–527.
- [88] Tonomura S. Outline of course 50 [J]. Energy Procedia, 2013, 37: 7160–7167.
- [89] Saima H, Mogi Y, Haraoka T. Development of PSA system for the recovery of carbon dioxide and carbon monoxide from blast furnace gas in steel works [J]. Energy Procedia, 2013, 37: 7152–7159.
- [90] Qader A, Hooper B, Innocenzi T E, et al. Novel post-combustion capture technologies on a lignite fired power plant – results of the CO₂CRC/H₂ capture project [J]. Energy Procedia, 2011, 4: 1668–1675.
- [91] Wawrzyńczak D, Majchrzak-Kucęba I, Srokosz K, et al. The pilot dual-reflux vacuum pressure swing adsorption unit for CO₂ capture from flue gas [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 209: 560–570.
- [92] 郝豫川, 陈健. 变压吸附技术在我国的应用现状及发展方向[J]. 低温与特气, 1993(3): 1–9.
- Gao Yuchuan, Chen Jian. The application status and development direction of pressure swing adsorption technology in China [J]. Cryogenics and Special Gases, 1993(3): 1–9.
- [93] Liu Z, Wang L, Kong X, et al. Onsite CO₂ capture from flue gas by an adsorption process in a coal-fired power plant [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51 (21): 7355–7363.

- [94] Wang L, Yang Y, Shen W, et al. CO₂ capture from flue gas in an existing coal-fired power plant by two successive pilot-scale VPSA units[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(23): 7947-7955.
- [95] 大荣成功实现PSA回收低浓度二氧化碳[C]//中国无机盐工业协会镁化合物分会. 2013年全国镁化合物行业年会暨技术产品展示大会专辑. 镁化合物科技(生产)信息编辑部, 2013:138.
- Darong successfully achieved PSA recovery of low concentration carbon dioxide [C]//China Inorganic Salt Industry Association Magnesium Compound Branch. 2013 National Magnesium Compound Industry Annual Conference and Technical Product Exhibition Conference album. Magnesium compound science and technology (production) information editorial department, 2013:138.
- [96] 国家能源集团. 国内首个煤电万吨级吸附碳捕集项目成功产气[EB/OL]. (2025-01-03)[2026-07-25]. <http://www.ccoalnews.com/news/202501/03/c189529.html>.
- National Energy Group. China's first coal-fired power million-ton adsorption carbon capture project successfully produced gas [EB/OL]. (2025-01-03) [2025-07-25]. <http://www.ccoalnews.com/news/202501/03/c189529.html>.
- [97] Bui M, Adjiman C S, Bardow A, et al. Carbon capture and storage (CCS): The way forward[J]. Energy & Environmental Science, 2018, 11(5): 1062-1176.
- [98] Riboldi L, Bolland O. Overview on pressure swing adsorption (PSA) as CO₂ capture technology: state-of-the-art, limits and potentials[J]. Energy Procedia, 2017, 114: 2390-2400.
- [99] 生态环境部办公厅. 关于印发《全国碳排放权交易市场覆盖钢铁、水泥、铝冶炼行业工作方案》的通知[EB/OL]. (2025-03-21)[2025-07-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202503/t20250326_1104736.html.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on the issuance of the "National Carbon Emissions Trading Market Covering the Steel, Cement and Aluminum Smelting Industry Work Plan" [EB/OL]. (2025-03-21) [2025-07-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202503/t20250326_1104736.html.
- [100] 姜秀玲. 有色冶炼行业烟气净化技术探讨[J]. 一重技术, 2017(4): 33-35.
- Jiang Xiuling. Discussion on flue gas purification technology applied in non-ferrous metal smelting industry [J]. CFHI Technology, 2017(4): 33-35.
- [101] 袁东丽. 有色冶炼烟气SO₂和NO₂协同去除工艺及机理研究[D]. 郑州:郑州轻工业大学, 2020.
- Yuan Dongli. Study on synergic remove process and mechanism of SO₂ and NO₂ in nonferrous smelting flue gas[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University of Light Industry, 2020.
- [102] 尹一男. 铅冶炼污染防治技术评价指标研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.
- Yin Yinan. Study on technology evaluation indicator of pollution prevention and control for lead smelting [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [103] 夏韬, 吴丰辉, 崔庆渊. 有色金属冶炼过程中降碳与烟气中CO₂分离技术研究现状[J]. 低碳化学与化工, 2025, 50(12):75-86.
- Xia Tao, Wu Fenghui, Cui Qingyuan. Research status of carbon reduction and flue gas CO₂ separation technologies in non-ferrous metal smelting processes [J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2025, 50(12): 75-86.

Research progress on CO₂ solid adsorption materials and technologies and their prospects for application in the non-ferrous metallurgical industry

Lyu Ruitong, Yao Liang, Yu Yue, Wang Hao

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: The non-ferrous metal industry is a key industry for carbon emissions in China's industrial sector. Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) technology is an important way to achieve carbon neutralization in the non-ferrous metal industry. Among them, the solid adsorption carbon capture technology has attracted extensive attention from researchers and industry experts due to its simple process flow and high degree of automation. The CO₂ pressure swing adsorption technology using carbon based materials, molecular sieves, and solid amine based adsorbent materials as adsorbents has gradually been carried out in pilot and engineering demonstration projects for post combustion flue gas carbon capture in coal-fired power plants, lime kilns, etc., and has made critical progress. At the same time, the research on new CO₂ adsorption materials such as metal organic framework materials (MOFs), porous organic polymers (POPs), and layered double hydroxides also provides more material choices for carbon capture technology under different working conditions. At present, adsorption based CO₂ separation and capture technology is mainly applicable to the CO₂ capture process at the end of non-ferrous metal smelting. However, the stability and cost control of adsorbents and process related parameters

under high sulfur conditions in non-ferrous smelting flue gas still need to be further improved and optimized through research. In the actual application process, it is also necessary to draw on the experience of application fields such as coal-fired power plants, combined with multi-disciplinary fields such as non-ferrous metallurgy, to seek the application scenarios of carbon capture technology CO₂ products in non-ferrous metallurgy and related fields, solve the economic benefits of carbon capture processes, and further explore the process path of cost reduction and efficiency improvement.

Key words: nonferrous metal industry; technology of carbon dioxide capture; CO₂ adsorption; solid adsorption materials; physical adsorption; chemical adsorption

神火新材攻克高端铝箔领域多项技术难题 产业化成效显著

近日,神火新材料科技有限公司(以下简称“神火新材”)凭借在高端铝箔领域的技术突破与产业化成效,实现荣誉与业绩的双重跨越。神火新材的两项核心工艺研究项目分别获得“河南省有色金属行业科学技术进步奖”二等奖、三等奖;神火新材成功入选“创客中国”全国 500 强,成为河南省铝加工行业唯一获此荣誉的企业。与此同时,神火新材市场表现再攀新高,实现产销“双破万”的历史性突破,形成“技术创新驱动产品竞争力,产销规模反哺研发投入”的良性循环,彰显了技术与市场的双向赋能成效。

一系列荣誉与业绩的背后,是神火新材在高端铝箔生产领域的持续技术攻关。针对行业普遍存在的效率低、成品率低、精度不足等痛点,该公司精准发力,取得多项关键性突破。在 1235D 合金 0.012 mm 电池箔生产中,通过对核心工艺的针对性调整,生产效率提升 60%,成品率提升 20%,大幅缩短了产品交付周期,显著提升了客户响应能力;成功攻克 0.0053 mm 超薄铝箔稳定轧制技术并实现规模化生产,产品针孔数量减少 42.85%,轧制成品率稳定维持在 90% 以上,精准匹配新能源汽车、高端双零铝箔领域对高精度、高品质铝箔的核心需求;持续投入研发资源,突破材料与工艺限制,成功研发 0.008 mm 双面光超薄电池箔,该产品市场占有率稳居国内前列,成为支撑企业产销规模突破的核心动力。

截至目前,神火新材已累计攻克高端铝箔生产领域多项技术难题,获得授权专利 63 项,构建起“研发—转化—产业化”的良性闭环机制,为技术持续迭代与产品创新提供了坚实保障。神火新材始终将技术创新作为核心战略,持续加大研发投入,为高端产品的研发、试验与生产线优化提供充足的资金、设备与人才支持。

站在产销“双破万”与入选“创客中国”全国 500 强的新起点,神火新材将继续聚焦高端铝箔领域,针对未攻克的技术难点开展攻关,进一步提升产品精度与生产效率;加快高附加值铝箔产品的研发与产业化进程,扩大高端产品市场份额,巩固国内领先地位;力争在新能源领域实现更大的技术与市场突破,为推动河南省有色金属行业高质量发展、助力实现国家“双碳”目标贡献更多神火力量。

(资料来源:中国有色金属报)