



液态空气储能吸附剂物性调控及吸附床设计研究进展

赵毅通¹, 黄煜鸿¹, 郝长生¹, 高飞², 折晓会¹

(¹石家庄铁道大学机械工程学院, ²石家庄铁道大学材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 液态空气储能作为新型大规模物理储能技术, 凭借能量密度高、环境友好及选址灵活等优势, 被认为是解决电力系统调峰需求的重要途径之一, 近年来受到广泛关注。在系统运行过程中, 空气中的H₂O和CO₂等高凝点杂质易在系统内部发生冷凝、结霜或沉积, 这不仅影响系统效率, 还可能导致流道阻塞及运行故障。吸附分离因操作简便、净化效率高而被广泛认为是最具应用前景的净化技术之一。吸附床作为关键单元, 其性能取决于吸附剂物性与床层结构设计。本文首先综述了近年来国内外吸附剂的研究现状, 总结了活性炭、分子筛、金属有机骨架(MOFs)、沸石、硅胶、复合多孔材料等多种吸附剂的比表面积、亲疏水性以及低温吸附容量等特征, 对比了不同材料在去除H₂O和CO₂方面的适用性, 分析了吸附剂物性调控和优化的方法; 其次, 详细阐述了轴向流吸附床和径向流吸附床的研究进展, 比较了轴向流吸附床和径向流吸附床在结构、流动场、压力场及吸附性能等方面的差异, 并分析了吸附床结构优化改进方案。本文为液态空气储能吸附过程的优化设计提供一定的理论参考。

关键词: 液态空气储能; 吸附剂; 吸附床; 研究进展; 结构优化

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0981

中图分类号: O 647.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 04-1264-11

Advances in the regulation of the physical properties of adsorbents and the design of adsorption beds in liquid air energy storage

ZHAO Yitong¹, HUANG Yuhong¹, HAO Changsheng¹, GAO Fei², SHE Xiaohui¹

(¹School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, ²School of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China)

Abstract: Liquid air energy storage (LAES) represents a nascent, large-scale physical energy storage technology that offers high energy density, environmental benignity, and site-selection flexibility. LAES has gained significant attention as an effective approach for satisfying peak-shaving requirements in power systems. During system operation, high-boiling point impurities, such as atmospheric water vapor (H₂O) and carbon dioxide (CO₂), tend to undergo condensation, desublimation (frosting), or deposition within the system, thereby concurrently compromising operational efficiency and inducing flow-channel blockage and potential operational failures. Adsorptive separation presents a promising solution to these challenges,

收稿日期: 2025-11-03; 修改稿日期: 2025-11-14。

基金项目: 河北省重大科技支撑计划前沿技术专项(242Q9916Z), 石家庄市驻冀高校重大科技专项(241260497A)。

第一作者: 赵毅通(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为液态空气储能, E-mail: 19931320804@163.com; 通信作者: 折晓会, 教授, 博士, 研究方向为液态空气储能, E-mail: shexh19@hotmail.com。

引用本文: 赵毅通, 黄煜鸿, 郝长生, 等. 液态空气储能吸附剂物性调控及吸附床设计研究进展[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(4): 1264-1274.

Citation: ZHAO Yitong, HUANG Yuhong, HAO Changsheng, et al. Advances in the regulation of the physical properties of adsorbents and the design of adsorption beds in liquid air energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(4): 1264-1274.

offering a favorable balance between operational simplicity and high purification efficiency. The performance of the adsorption bed, as a critical unit of the LAES pretreatment system, is fundamentally governed by the synergistic effect of the physicochemical properties of the adsorbent and the structural design of the bed. This paper presents reviews of recent advances in various adsorbent classes, including activated carbon, molecular sieves, metal-organic frameworks, zeolites, silica gel, and composite porous materials. The reviews also compare their specific surface areas, hydrophilicity, and low-temperature-adsorption capacity to assess the suitability of the materials for H_2O and CO_2 capture, as well as discuss methods for tuning and optimizing adsorbent properties. Subsequently, recent advancements in axial- and radial-flow adsorption beds are systematically explored, highlighting their structural, flow- and pressure-field, and adsorption-performance differences, as well as the corresponding structural optimization strategies. The findings provide theoretical guidance for optimizing adsorption processes in LAES systems.

Keywords: liquid air energy storage; adsorbent; adsorption bed; research progress; structural optimization

随着可再生能源在电力系统中的快速发展，能源供需不匹配和电网波动性问题日益凸显，大规模储能技术的需求愈加迫切^[1]。液态空气储能(liquid air energy storage, LAES)作为一种新兴的物理储能方式，凭借能量密度高、储能规模大、选址灵活以及环境友好等优势，近年来受到广泛关注^[2]。液态空气储能原理如图 1 所示，该技术通过将空气在

低温条件下液化并储存，在用电高峰期再气化膨胀发电，实现跨时段能量调配与利用^[3]。当空气进入 LAES 系统时， H_2O 和 CO_2 等高凝点杂质会沉积在低温换热器、透平膨胀机和气液分离器的冷却面上，导致气体管道和阀门堵塞^[4]。因此需要在系统前端配置一套吸附床，用来去除空气中的 H_2O 和 CO_2 等杂质，从而确保设备的安全有效运行^[5]。

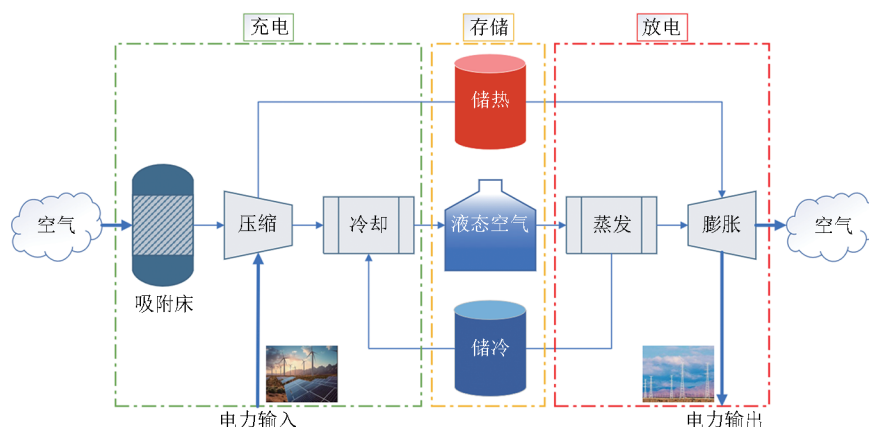


图 1 液态空气储能原理

Fig. 1 Liquid air energy storage process

吸附过程广泛应用在各种工业生产中，如在深冷空分和变压吸附制氧系统中，通过分子筛和氧化铝清除空气中的水分和二氧化碳等杂质，保证氧气的纯度和空分设备的安全运行；在工业气体生产中，通过吸附剂净化工业气体，去除有害杂质；在碳捕集与封存(CCUS)技术中，可采用吸附法对二

氧化碳进行分离；此外，合适的吸附剂还可用在挥发性有机物(VOC)的脱除，在环保方面表现出色。在液态空气储能系统中，常采用沸石 13X 和活性氧化铝吸附 H_2O 和 CO_2 ^[6]，保障系统安全运行。吸附循环是吸附过程实现连续运行与高效分离的核心环节，其基本原理是通过周期性交替的吸附与解吸操

作,使吸附剂得以重复利用。在工业应用中,为保证气体的连续稳定输出,通常采用双塔吸附系统交

替运行,如图2所示。吸附循环的效率高度依赖于吸附剂与吸附床结构的协同作用^[7]。

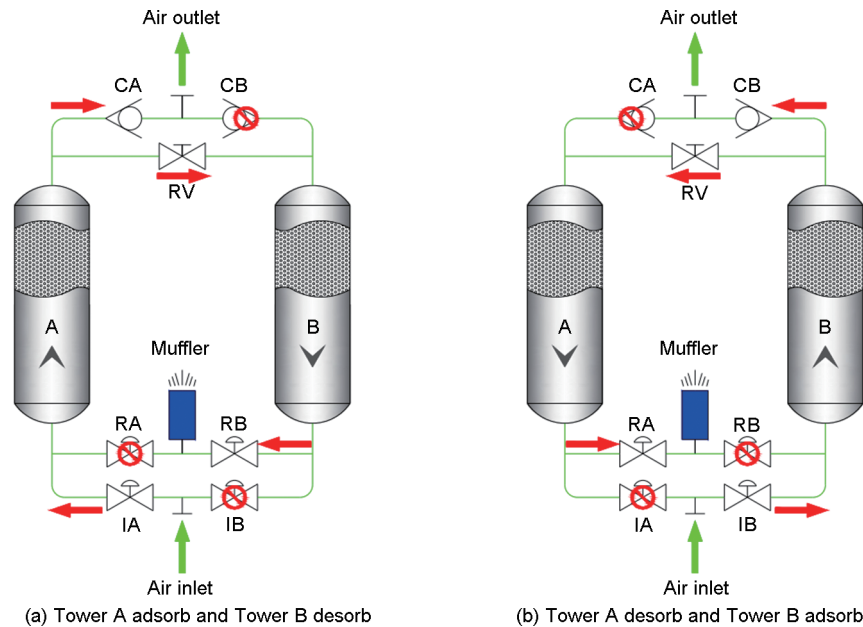


图2 空气净化双塔操作流程

Fig. 2 Flowchart of air purification double tower operation

目前吸附床的主要形式有轴向流吸附床和径向流吸附床。近年来,对吸附材料和吸附床的研究主要集中在以下三个方面。①改进吸附剂,包括金属阳离子或离子溶液改性、刻蚀造孔和利用有机胺强化吸附等。②轴向流吸附器结构优化,包括吸附过程的流场分析,设计提升流动均匀性的分布器,研究不同的吸附床外形和床层配置。③径向流吸附器结构优化,包括研究径向流与轴向流的4种不同流型,优化径向流吸附床结构。本文基于以上三个方

面综述国内外关于吸附材料和吸附床的应用及研究进展,并对吸附材料和吸附床的前沿技术与理论进行研究展望。

1 吸附材料

吸附材料在液态空气储能系统中主要用于空气预处理与干燥环节,常用的 H_2O 吸附剂包括:硅胶、沸石分子筛、活性氧化铝以及部分新型多孔材料,部分 H_2O 吸附剂及其吸附参数见表1。

表1 H_2O 吸附剂及其吸附温度和压力

Table 1 H_2O adsorbent and its adsorption temperature and pressure

编号	吸附剂	比表面积/(m^2/g)	25 $^{\circ}C$ 下最大吸附容量/(g/g)	吸附质	参考文献
1	Alcan AA200X	295	1.1	H_2O	Desai等 ^[8] . 1992
2	Alcan AA300	325	0.35	H_2O	Desai等 ^[8] . 1992
3	Alumina	329	0.396	H_2O	Cardenas等 ^[9] . 2022
4	Fuji Davison Type 3A silica gel	650	0.35	H_2O	Ng等 ^[10] . 2001
5	Fuji Davison Type RD silica gel	650	0.4	H_2O	Ng等 ^[10] . 2001
6	Emm-8	879.63	0.35	H_2O	Liu等 ^[11] . 2022
7	0.5HZSM-5@Mg/DOBDC MOF	621.70	0.7025	H_2O/CO_2	Cui等 ^[12] . 2024

常见的 CO_2 吸附剂包括沸石分子筛、活性炭、MOFs材料、有机胺等。表2列举了部分 CO_2 吸附剂及其吸附参数。

尽管固体吸附剂比液体捕捉法呈现出较好的热

稳定性,但是对 H_2O 和 CO_2 的单位捕捉量仍然过少且选择性弱,达到理想的吸附效果需要耗费大量的固体吸附剂。因此,许多研究提出对原有吸附剂进行合理的改性及强化吸附措施,以提升吸附剂的吸

表2 CO₂吸附剂及其吸附温度和压力
Table 2 CO₂ adsorbent and its adsorption temperature and pressure

编号	吸附剂	吸附温度/°C	吸附压力/bar	吸附质	参考文献
1	Zeolite 13X	25	1.6	CO ₂	Cavenati等 ^[13] . 2004
2	Na-Y	25	5	CO ₂	Harlick等 ^[14] . 2003
3	5A	25	1	CO ₂	Lozinska等 ^[15] . 2020
4	Merlinoite zeolite	25	1	CO ₂	Georgieva等 ^[16] . 2019
5	Zeolite 13X, Aldrich zeolite CaX, Siliporite zeolite NaY, Zeolyst zeolite 4A, Acros zeolite 5A, Acros activated carbon	30	1	C ₂ H ₄ /CO ₂ /N ₂ /Ar mixtures	Van Zandvoort等 ^[17] . 2024
6	Zeolite CaA, Zeolite AgA	30	5	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆ /CO ₂ /N ₂ /Ar mixtures	Van Zandvoort等 ^[18] . 2018
7	Zeolite NaA, Zeolite clinoptilolite	25	1	CH ₄ /CO ₂ /N ₂ /He mixtures	Neishabori Salehi等 ^[19] . 2018
8	Binderless zeolite 5A	35	4	CO ₂ /He, CH ₄ /He, N ₂ /He, CO/He, CH ₄ /CO ₂ , N ₂ /CO ₂ , CH ₄ /N ₂ mixtures	Mendes等 ^[20] . 2017
9	BPL activated carbon	25~65	3	H ₂ /CO ₂ /CO/CH ₄ mixtures	Brea等 ^[21] . 2017
10	Zeolite 13X	28 50	3.2 5	CO ₂ , CH ₄ /CO ₂ /N ₂ mixtures	Cavenati等 ^[22] . 2006
11	Carbon fiber composite molecular sieve	25	1.01	CO ₂ /CH ₄ , H ₂ S/H ₂ mixtures	Burchell等 ^[23] . 1997
12	Zeolite clinoptilolite	35~65	1	CO ₂ /N ₂ mixtures	Joss等 ^[24] . 2012
13	Activated carbon AP360	25	1~10	CO ₂ /H ₂ mixtures	Delgado等 ^[25] . 2014

附性能以及吸附选择性。为了提高H₂O的吸附量,通常通过物理改性(如结构调控与孔隙优化)来改善材料的微观形貌和比表面积。同时,复合材料的组分协同作用也常被发挥,通过进一步的孔结构优化和表面官能化手段,增强对水分子的亲和力与传质效率。Chung等^[26]采用硼-10掺杂并经中子通量辐照的方式对硅胶进行微观结构改性。研究表明,硼-10在中子照射下可产生高能 α 粒子,对材料内部晶格造成微损伤并诱导形成额外的微孔区域,从而显著增大比表面积与水蒸气吸附位点。改性后的硅胶在除湿系统中吸附量提高约23%,且再生热需求降低。Jia等^[27]通过将氯化锂浸渍于多孔硅胶基体中,制备了复合型干燥剂。该复合材料兼具硅胶的多孔结构与氯化锂的强亲水特性,实现了物理吸附与化学吸附的协同作用,使平衡吸湿量提高40%~50%,再生温度降低至95°C。随后,Lyu等^[28]进一步在此基础上引入化学-物理协同改性思路,通过将亲水盐(LiCl、CaCl₂)复合于多孔载体(硅胶、MOF、碳气凝胶)中,并结合孔结构优化与表面能调控,使吸附剂在低湿环境下的吸湿量提高45%~

70%,且可在70~80°C低温下实现高效再生。

为了提高CO₂的吸附量,常用方法有采用离子溶液对沸石分子筛改性;利用碱溶液对分子筛刻蚀造孔,提高其比表面积与总孔体积;利用胺基团与CO₂和水形成的碳酸根离子形成化合键构成胺盐化合物等。Gęsikiewicz-Puchalska等^[29]通过离子交换法制备了不同阳离子(Li⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺)改性的X型沸石,并系统研究了离子种类对孔结构参数及CO₂吸附性能的影响。研究表明,离子交换对沸石13X的孔结构具有显著影响,其中Li⁺交换样品表现出最高的比表面积(624 m²/g)和微孔体积(0.35 cm³/g),其CO₂吸附容量在273 K、0.95 bar(1 bar=100 kPa)下达到5.94 mmol/g,为各样品中最高。与此类似,Mortazavi等^[30]以天然斜发沸石为基体,通过阳离子交换(Li⁺、Mg²⁺、Ca²⁺)、胺类负载及离子液体修饰对材料进行多种改性。结果显示,所有改性均显著提升了CO₂吸附容量,其中Li⁺改性样品、2% MEA改性样品及5%[bmim]PF₆改性样品的吸附量分别较原样提高了4.18倍、3.58倍和4.35倍。此外,Hosseini等^[31]采用氨水和氢氧化钾对碳包覆整体柱进行碱性改

性,发现改性后材料的表面碱性基团显著增加,比表面积和微孔体积均得到提升,CO₂吸附容量分别提高约12%(NH₃改性)和27%(KOH改性)。研究指出,含氮和含氧官能团的引入增强了碳表面的碱性,从而提升了对酸性气体CO₂的吸附亲和力。

综上所述,在液态空气储能系统中,吸附材料主要用于空气预处理和干燥。为提高吸附性能,研究者通过离子交换、碱性处理、胺基负载、孔结构优化及亲水盐复合等方法对材料进行改性。改性后材料的比表面积和吸附位点增加,对H₂O和CO₂的吸附容量显著提升,再生温度降低,整体吸附性能得到有效改善。此外,再生温度的降低可有效减少再生过程中的能量消耗,从而提高系统运行效率,并增强吸附材料在液态空气储能系统中的经济性与可持续性。

2 轴向流吸附床设计

轴向流吸附床是一种传统的吸附床形式,具有简单的圆柱形几何结构,流体从一端向另一端轴向流动。原料气由顶部或底部进入吸附床,经吸附分离后,剩余气体从另一端排出。Liu等^[32]研究发现立式轴向流吸附床入口端的轴向速度并不均匀,其分布呈W型,且在中心和近壁区域出现峰值速度。Chen等^[33]研究发现当混合气体进口流量一定时,黏性阻力和惯性阻力随吸附剂粒径的增大而减小。Wang等^[34]用计算传质(computational mass transfer, CMT)的方法分析轴向流吸附床,结果表明,吸附剂粒径越大越容易受到壁面效应的影响。另外,对于大型吸附床而言,湍流质量扩散系数仍远高于分子扩散系数。Li等^[35]通过仿真和实验研究发现入口位置对纯度和回收率有较大的影响。Yu等^[36]研究认为温度、压力和组分浓度分布都会对吸附过程产生影响,进而可以分析出吸附的最优条件。Knox等^[37]通过建立一维轴向分散的吸附床塞流模型,发现可以通过对突破曲线的数值模拟,准确地提取传质系数和轴向扩散系数。因此,吸附床的尺寸、吸附剂的粒径、进出口位置等都会对气体流动速度分布造成影响。而气体的温度、压力、组分浓度分布以及轴向扩散系数都会直接对吸附过程造成影响。

吸附床的吸附性能很大程度上取决于吸附床的结构,通过改变吸附床的外形、为吸附床入口端添

加气体分布器以及改变吸附床层配置以提高吸附床的吸附效率。如图3(a)所示,Chen等^[33]设计出倾斜的吸附层,同时设置用不同流量的两个入口来提高吸附效率。Ben-Mansour等^[38]研究表明,在2~7.77的宽高比范围内,床层的吸附能力增强不明显(仅为2.3%),吸附性能的提高不明显。在相同床层体积、进口气体流量、操作压力和温度下,锥度形状对吸附性能影响不大。Ben-Mansour等^[39]又通过改变加热和冷却时间以及床壁厚度来探索最佳温度条件下的吸附性能。由于在吸附床入口端位置上存在着气流分布不均匀的现象,Liu等^[32]设计了穿孔的进口静压室与传统的分布器、王浩宇等^[40]设计了进口多孔板气体分布器与单级挡板以及黄世钊等^[41]设计了进口板式分布器来改善进口气流均匀性,如图3(b)~(d)所示。这些措施均改善了吸附床的气流速度和方向,缓和了轴向流吸附床在入口端的气流不均匀现象,进而延长了吸附剂的使用寿命,减少吸附床内的死空间,提高产气率。如图3(e)和(f)所示,Saadat等^[42]对单层(3A沸石)床吸附与双层(硅胶和3A)床吸附进行了理论比较,随着硅胶长度从0 m增加到3.7 m时,突破时间从430 min增加到787 min;然而,在床层中添加更多的硅胶,床层将无法达到标准的输出水浓度水平,并且突破时间急剧缩短。Nastaj等^[43]提出了由硅胶、沸石13X和活性炭组成的三层吸附床结构,该床的吸附时间较于单层吸附床有所提高,且硅胶和沸石13X吸附苯的量明显小于活性炭吸附苯的量。

轴向流吸附床存在着较大的压降,且压降随着吸附床的尺寸增大而增大。改变形状降低压降的代价是加剧了气流速度分布的不均匀性。同时入口端也存在着一定程度的速度分布不均匀现象。均匀的速度分布意味着均匀的吸附过程,即较小的吸附死区;压降则意味着空气处理过程所需要的能耗。然而较大的空气处理量则要求较大的吸附床尺寸,但是较大的吸附床尺寸则存在着压降过大和局部突破现象明显,即吸附死区较大的问题。因此在空气处理量较大时,径向流吸附床是更好的选择。

综上所述,轴向流吸附床虽可通过结构优化与分布器设计改善流场和吸附性能,但仍存在压降大、入口流速分布不均及放大效应明显等问题。为进一步提升气体分布均匀性并降低压降,近年来径向流吸附床结构的提出有效改善了气体流场分布特

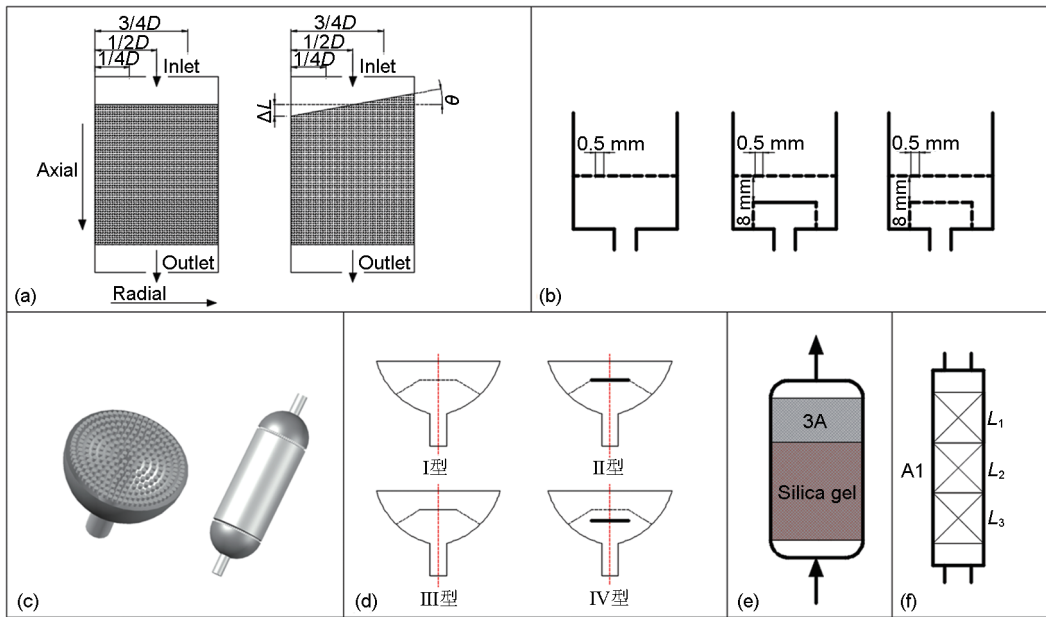


图 3 轴向流吸附床结构优化: (a) 倾斜的吸附层^[33]; (b)~(d) 入口气流分布器^[32,40-41]; (e) 双层吸附床^[42]; (f) 三层吸附床^[43]
Fig. 3 Structural optimization of axial flow adsorption beds: (a) Inclined adsorption layer^[33]; (b)~(d) inlet airflow distributor^[32,40-41]; (e) double-layer adsorption bed^[42]; (f) triple-layer adsorption bed^[43]

性，在大规模空气处理及液态空气储能系统中表现出更优的应用潜力。

3 径向流吸附床设计

与轴向流相比，径向流通常具有更低的压降，但又会表现出更陡峭的反应面，这增加了吸附床内的死空间。而且径向系统中，较大的储罐也会导致更高的成本^[44]。Skuntz 等^[45]认为当径向流床在长径比(短/宽)较小时，反应面得到改善，但压降较大；高长径比时，径向流速度减小，导致压降减小，但反应面扩散增大，降低效率。而在轴向流动中则有相反的趋势。

径向流吸附床由中心通道、吸附层以及环形通道构成。吸附层顶部覆盖有盖板，环形通道分布器有两种类型：一种是金属丝网，而另一种是由一系列孔口组成穿孔圆柱板。根据环形通道和中心通道内流动的轴向不同，径向流反应器可分为 Z 型流动型和 π 型流动型。如果环形通道内的轴向流动方向与中心通道内的轴向流动方向相同，则为 Z 型流动；反之则为 π 型流动。此外，根据反应器径向流动方向的不同，径向流反应器还可分为向心(centripetal, CP)流型和离心式(centrifugal, CF)流型。在 CP 流型中，气体被送入环形通道，并从环形通道径向向内移动到中心通道。在 CF 流型中，气体被送入中心通道，并从中心通道径向向外流动到环形通道。因

此，径向流反应器有 4 种流动结构，它们分别为 CPZ、CP π 、CFZ 和 CF π ，如图 4 所示^[46]。

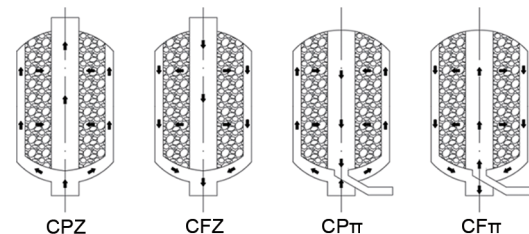


图 4 径向流的四种流型
Fig. 4 Four types of radial flow

在这 4 种流型中，王浩宇等^[47]研究表明 CP 流比 CF 流气流更均匀， π 型比 Z 型气流较均匀。Zhang 等^[48]研究表明在恒定工况下，CF π 型结构具有最均匀的流场，CPZ 型结构的传热和反应性能最好。Xu 等^[49]研究表明 CF π 型吸附器性能最好，与 CPZ 型吸附器相比，CF π 型吸附器的压降降低了 12.0%，吸附时间增加了 134%。CP π 和 CF π 相比，Zhabbasbayev 等^[50]认为 CF π 比 CP π 压降更小，这是由于中心通道和环形管中的通量分布导致通过吸附层的压力变化不均匀，从而使得 CF π 比 CP π 流动分布更均匀。Yang 等^[51]对比研究了 CP π 和 CF π 的气体分布、不均匀分布系数和压差，认为 CP π 流径向吸附器在吸附和解吸方面具有更佳的吸附性能，并进一步研究了产物流速与产气率的

关系。而在CP π 的研究上, Wang等^[52]建立了CP π 气固两相流的三维模型, 研究表明吸附器外孔和中心孔附近压力和速度变化较大, 但床层内总压力和速度变化较为稳定。总而言之, CP π 的压降是最小的, 但是对于不同的吸附条件、吸附气体和吸附床尺寸而言, 不同流型之间的关于吸附性能的比较仍缺少详细的讨论。

吸附床结构是发挥吸附剂性能的关键, 合理的吸附床结构能够有效改善进气速度和气流方向, 最大限度发挥吸附剂的吸附性能; 减少在高压气流冲击下吸附剂的粉化概率, 有效地延长吸附剂的使用寿命; 减少吸附床内的死空间、提高产气率、降低系统能耗。径向流吸附床结构优化的主要方式有: 优化床体尺寸、设计通道与吸附层之间的分布器、优化中心流道与环形流道的形状, 以及优化并联方式等。

(1) 优化床体尺寸。Xu等^[53]发现吸附层长度和中心通道直径会影响吸附器性能。Li等^[54]发现中心通道和环形通道的截面直径、入口气体分布器的结构以及床层孔隙度都会影响吸附气流的均匀性。因此, 空气处理量和入口速度不同时, 径向流吸附床存在最优尺寸比例。

(2) 设计通道与吸附层之间的分布器。王浩宇等^[47]研究了中心流道和外流道的开孔率, 发现中心流道开孔率越小, 径向流速度不均匀度值越小, 布气效果越好, 但开孔率过低将导致布气孔附近局部布气不均匀, 能耗增大; 外流道开孔率变化对径向流吸附器内气流均布影响有限。Zhang等^[55]对CP π 型吸附床的穿孔板分布结构和分布器结构做了优化, 结果表明当分配器上圆柱孔排列规则时, 孔的排列对分配器的影响不显著。然而, 孔隙率若不均匀, 吸附区由于流动阻力的改变, 从吸附器底部向顶部移动。

(3) 优化中心流道与环形流道的形状。Zhang等^[55]比较了CP π 型吸附床环形通道的3种形状(收敛、常规和发散), 发现采用收敛环形通道并优化布料布置的吸附器, 整体流动均匀性提高24.69%。Li等^[56]为解决CPZ型吸附床气流分布不均匀的问题, 研究了床层径向压降与中心管与环形通道截面积之比的关系, 同时采用参数化方法对中心通道内插入的分布器进行了优化设计, 如图5(a)所示。通过对比分析, 在给定的实验条件下, 优化设计方法

下的均匀性达到99.1%, 突破时间从564 s延长到1175 s。Xu等^[57]为改善CF π 型吸附床内流动分布的均匀性, 提出了不同的锥形通道设计方法, 如图5(b)所示, 即比例法、最小化通道两端压力差的传统线性设计方法、最小化整个通道压力轴向变化的改进线性设计方法以及将通道划分为不同倾角的多段改进多段线性设计方法。通过数值模拟研究了不同设计方法和不同气体流速下的流场。研究认为锥形通道角度的指定尤为重要; 与原结构相比, 比例法难以获得合适的倾角, 其压降和风速分布的不均匀性指数变化不能确定。Chen等^[58]对CPZ型吸附床的模拟结果表明, 脱附过程的不均匀程度比吸附过程的更严重。因此, 认为径向流吸附器中流动分布不均匀主要表现在解吸过程中。通过对分布器参数的优化设计, 可以改善吸附器内的流动分布。同时, 分析了3种不同结构的分配器及呼吸阀的作用。结果表明, 截锥分布器比管状分布器和锥形分布器更有效。在中心通道中插入截锥后, 解吸均匀性提高了6.56%, 吸附过程中CO₂的突破时间由564 s延长至1138 s。通过开启呼吸阀解决了解吸过程中吸附器顶部的“死区”问题, 延长了吸附器的使用寿命, 且对气流均匀性影响较小。

(4) 优化并联方式。Tian等^[59]在CPZ型吸附床基础上, 提出了一种新型的平行分层吸附床径向吸附器, 如图5(c)所示。该结构在相对紧凑的情况下减小压降可提高吸附性能, 结果表明平行层床的吸附剂利用率高于单层层床。冯明杰等^[60]在CP π 型吸附床基础上, 设计了一种 Ω 形阶梯径向流吸附床, 如图5(d)所示。在同样条件下, 与 π 形床相比穿透时间显著延长, 流动不均匀区显著缩小。Dai等^[61]为解决垂直径向流吸附器中吸附床高度过高引起的流动分布不均匀问题, 在CPZ型吸附床基础上, 提出了一种新型的平行连接方法, 如图5(e)所示。对增高法和并联法在相同的吸附剂高度进行了比较。结果表明, 与增高法相比, 采用并联方式可使径向最大静压降与最小静压降之差减小86.2%, 均匀性提高80%。Salimi等^[62]在CPZ型吸附床基础上, 提出一种创新的平行径向吸附器, 如图5(f)所示。这种结构通过拓宽吸附剂直径的选择来提高吸附床的性能, 该布置通过增加气流接触面积有效减小了压降。

综上所述, 径向流吸附床相较于轴向流可显著

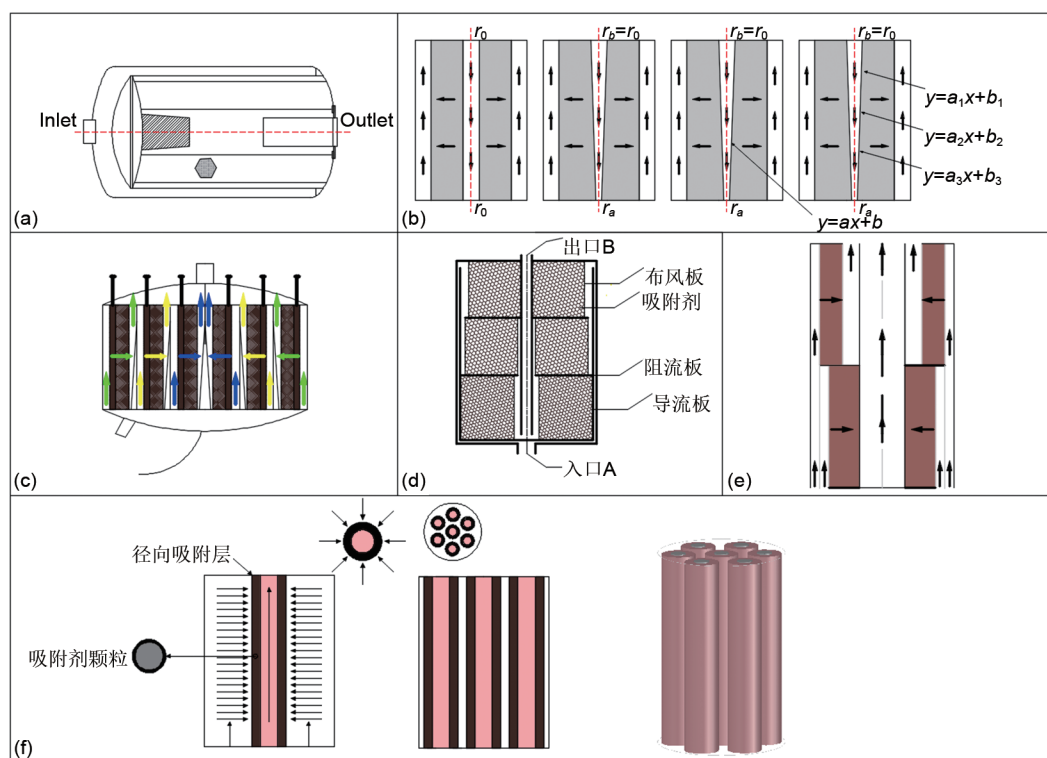


图5 径向流吸附床结构优化: (a) 垂直径向流吸附器^[56]; (b) 离心径向床中锥形通道不同设计方法^[57]; (c) 并联通道径向吸附器^[59]; (d) Ω 形阶梯径向流吸附床^[60]; (e) CPZ垂直径向流吸附器^[61]; (f) 平行径向吸附器^[62]

Fig. 5 Structure optimization of radial flow adsorption bed: (a) Vertical radial flow adsorber^[56]; (b) different design methods of conical channels in radial centrifugal beds^[57]; (c) parallel channel radial adsorber^[59]; (d) Ω -shaped stepped radial flow adsorption bed^[60]; (e) CPZ vertical radial flow adsorber^[61]; (f) parallel radial adsorber^[62]

降低压降, 但存在反应面陡峭、死空间增大及结构成本高等问题。不同流动结构(CPZ、CP π 、CFZ、CF π)在气流均匀性、压降及吸附性能上各具特点。研究表明, 合理的结构优化不仅能改善气流分布、降低压降, 还能延长穿透时间、提升吸附效率并减少解吸过程中的不均匀性, 从而有效提高吸附剂利用率与系统稳定性。

4 发展趋势及展望

在对吸附剂及吸附床设计研究现状进行综述的基础上, 本文对液态空气储能吸附床技术的研究和发展趋势作出以下展望。

(1) 开展新型吸附剂材料的研究, 开发具有高吸附容量且低脱附能耗的新型吸附剂, 提升液态空气储能系统的综合效率。

(2) 进一步深入研究吸附和解吸过程的机理, 针对不同吸附剂和吸附质特性, 建立专用方程和模型以确定吸附循环过程的工艺参数。

(3) 持续优化吸附床结构设计, 进一步改善布

气系统、确定适宜的吸附剂用量、减小床层高度、缩小吸附器尺寸、优化填充方法以及减少运行成本与能耗, 并探索新型吸附床结构, 实现吸附床高效运行。

参考文献

- [1] DAMAK C, LEDUCQ D, HOANG H M, et al. Liquid air energy storage (LAES) as a large-scale storage technology for renewable energy integration—A review of investigation studies and near perspectives of LAES[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 110: 208-218. DOI: 10.1016/j.ijrefrig. 2019. 11.009.
- [2] VECCHI A, LI Y L, DING Y L, et al. Liquid air energy storage (LAES): A review on technology state-of-the-art, integration pathways and future perspectives[J]. Advances in Applied Energy, 2021, 3: 100047. DOI:10.1016/j.adapen.2021.100047.
- [3] RABI A M, RADULOVIC J, BUICK J M. Comprehensive review of liquid air energy storage (LAES) technologies[J]. Energies, 2023, 16(17): DOI:10.3390/en16176216.
- [4] KERRY F G. Industrial gas handbook: gas separation and purification[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [5] HIDANO T, NAKAMURA M, NAKAMURA A, et al. The downsizing of a TSA system for an air purification unit using a high flow rate method[J]. Adsorption, 2011, 17(4): 759-763. DOI: 10.1007/s10450-

- 010-9291-5.
- [6] WANG C, ZHANG X S, YOU Z P, et al. The effect of air purification on liquid air energy storage—An analysis from molecular to systematic modelling[J]. *Applied Energy*, 2021, 300: 117349. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.117349.
- [7] ZHAO R K, DENG S, WANG S P, et al. Thermodynamic research of adsorbent materials on energy efficiency of vacuum-pressure swing adsorption cycle for CO₂ capture[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 128: 818-829. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.09.074.
- [8] DESAI R, HUSSAIN M, RUTHVEN D M. Adsorption of water vapour on activated alumina. I-equilibrium behaviour[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1992, 70(4): 699-706. DOI:10.1002/cjce.5450700412.
- [9] CARDENAS C, FARRUSSENG D, DANIEL C, et al. Modeling of equilibrium water vapor adsorption isotherms on activated carbon, alumina and hopcalite[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2022, 561: 113520. DOI:10.1016/j.fluid.2022.113520.
- [10] NG K C, CHUA H T, CHUNG C Y, et al. Experimental investigation of the silica gel-water adsorption isotherm characteristics[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2001, 21(16): 1631-1642. DOI:10.1016/S1359-4311(01)00039-4.
- [11] LIU Z L, XU J X, XU M, et al. Ultralow-temperature-driven water-based sorption refrigeration enabled by low-cost zeolite-like porous aluminophosphate[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 193. DOI:10.1038/s41467-021-27883-4.
- [12] CUI S M, SHAO Y J, ZHONG W Q. Molecular sieves hybrid metal-organic framework for efficient simultaneously capturing carbon dioxide and collecting water from air[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499: 155912. DOI: 10.1016/j.cej.2024.155912.
- [13] CAVENATI S, GRANDE C A, RODRIGUES A E. Adsorption equilibrium of methane, carbon dioxide, and nitrogen on zeolite 13X at high pressures[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2004, 49(4): 1095-1101.
- [14] HARLICK P J E, TEZEL F H. Adsorption of carbon dioxide, methane and nitrogen: Pure and binary mixture adsorption for ZSM-5 with SiO₂/Al₂O₃ ratio of 280[J]. *Separation and Purification Technology*, 2003, 33(2): 199-210. DOI:10.1016/S1383-5866(02)00078-3.
- [15] LOZINSKA M M, MILLER D N, BRANDANI S, et al. Hiding extra-framework cations in zeolites L and Y by internal ion exchange and its effect on CO₂ adsorption[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(6): 3280-3292.
- [16] GEORGIEVA V M, BRUCE E L, VERBRAEKEN M C, et al. Triggered gate opening and breathing effects during selective CO₂ adsorption by merlinoite zeolite[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, 141(32): 12744-12759. DOI: 10.1021/jacs.9b05539.
- [17] VAN ZANDVOORT I, RAS E J, DE GRAAF R, et al. Using transient breakthrough experiments for screening of adsorbents for separation of C₂H₄/CO₂ mixtures[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 241: 116706. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116706.
- [18] VAN ZANDVOORT I, VAN KLINK G P M, DE JONG E, et al. Selectivity and stability of zeolites [Ca]A and [Ag]A towards ethylene adsorption and desorption from complex gas mixtures [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2018, 263: 142-149. DOI:10.1016/j.micromeso.2017.12.004.
- [19] NEISHABORI SALEHI R, SHARIFNIA S, RAHIMPOUR F. Natural gas upgrading by selective separation on zeotype adsorbents[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 54: 37-46. DOI:10.1016/j.jngse.2018.03.008.
- [20] MENDES P A P, RIBEIRO A M, GLEICHMANN K, et al. Separation of CO₂/N₂ on binderless 5A zeolite[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2017, 20: 224-233. DOI:10.1016/j.jcou.2017.05.003.
- [21] BREA P, DELGADO J A, ÁGUEDA V I, et al. Modeling of breakthrough curves of N₂, CH₄, CO, CO₂ and a SMR type off-gas mixture on a fixed bed of BPL activated carbon[J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 179: 61-71. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.01.054.
- [22] CAVENATI S, GRANDE C A, RODRIGUES A E. Removal of carbon dioxide from natural gas by vacuum pressure swing adsorption[J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20(6): 2648-2659.
- [23] BURCHELL T D, JUDKINS R R, ROGERS M R, et al. A novel process and material for the separation of carbon dioxide and hydrogen sulfide gas mixtures[J]. *Carbon*, 1997, 35(9): 1279-1294. DOI:10.1016/S0008-6223(97)00077-8.
- [24] JOSS L, MAZZOTTI M. Modeling the extra-column volume in a small column setup for bulk gas adsorption[J]. *Adsorption*, 2012, 18(5): 381-393. DOI:10.1007/s10450-012-9417-z.
- [25] DELGADO J A, ÁGUEDA V I, UGUINA M A, et al. Adsorption and diffusion of H₂, CO, CH₄, and CO₂ in BPL activated carbon and 13X zeolite: Evaluation of performance in pressure swing adsorption hydrogen purification by simulation[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(40): 15414-15426. DOI:10.1021/ie403744u.
- [26] CHUNG T W, CHUNG C C. Increase in the amount of adsorption on modified silica gel by using neutron flux irradiation[J]. *Chemical Engineering Science*, 1998, 53(16): 2967-2972. DOI: 10.1016/S0009-2509(98)00101-8.
- [27] JIA C X, DAI Y J, WU J Y, et al. Use of compound desiccant to develop high performance desiccant cooling system[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2007, 30(2): 345-353. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2006.04.001.
- [28] LYU Y, WU J B, DONG J W, et al. A study of hygroscopicity improvements to adsorbents in solar-powered air water extraction [J]. *Coatings*, 2024, 14(4): DOI:10.3390/coatings14040472.
- [29] GEŚSIKIEWICZ-PUCHALSKA A, ZGRZEBNICKI M, MICHALKIEWICZ B, et al. Changes in porous parameters of the ion exchanged X zeolite and their effect on CO₂ adsorption[J]. *Molecules*, 2021, 26(24): 7520. DOI:10.3390/molecules26247520.
- [30] MORTAZAVI N, BAHADORI M, MARANDI A, et al. Enhancement of CO₂ adsorption on natural zeolite, modified clinoptilolite with

- cations, amines and ionic liquids[J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2021, 22: 100495. DOI:10.1016/j.scp.2021.100495.
- [31] HOSSEINI S, MARAHEL E, BAYESTI I, et al. CO₂ adsorption on modified carbon coated monolith: Effect of surface modification by using alkaline solutions[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 324: 569-575. DOI:10.1016/j.apsusc.2014.10.054.
- [32] LIU Y S, ZHENG X G, DAI R F. Numerical study of flow maldistribution and depressurization strategies in a small-scale axial adsorber[J]. *Adsorption*, 2014, 20(5): 757-768. DOI:10.1007/s10450-014-9619-7.
- [33] CHEN S J, TIAN M M, TAO Z C, et al. Effect of swing on removing CO₂ from offshore natural gas by adsorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 382: 122932. DOI:10.1016/j.cej.2019.122932.
- [34] WANG Y H, SHEN Y H, ZHANG R Y, et al. Investigation of mass transfer characteristics under turbulent condition in adsorption separation process for CO₂ capture[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(1): 107106. DOI: 10.1016/j.jece.2021.107106.
- [35] LI D D, ZHOU Y, SHEN Y H, et al. Experiment and simulation for separating CO₂/N₂ by dual-reflux pressure swing adsorption process[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 297: 315-324. DOI:10.1016/j.cej.2016.03.075.
- [36] YU X X, LIU B, SHEN Y H, et al. Design and experiment of high-productivity two-stage vacuum pressure swing adsorption process for carbon capturing from dry flue gas[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2022, 43: 378-391. DOI:10.1016/j.cjche.2021.02.022.
- [37] KNOX J C, EBNER A D, LEVAN M D, et al. Limitations of breakthrough curve analysis in fixed-bed adsorption[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(16): 4734-4748.
- [38] BEN-MANSOUR R, BASHA M, QASEM N A A. Multicomponent and multi-dimensional modeling and simulation of adsorption-based carbon dioxide separation[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2017, 99: 255-270. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2017.01.040.
- [39] BEN-MANSOUR R, QASEM N A A. An efficient temperature swing adsorption (TSA) process for separating CO₂ from CO₂/N₂ mixture using Mg-MOF-74[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 156: 10-24. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.11.010.
- [40] 王浩宇, 刘应书, 吴义民, 等. 轴向流吸附器内部流场特性[J]. *工程科学学报*, 2016, 38(4): 575-580.
WANG H Y, LIU Y S, WU Y M, et al. Internal flow characteristics of axial flow absorbers[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2016, 38(4): 575-580.
- [41] 黄世钊, 吴林杰, 向冰. 轴向流吸附塔流场数值模拟与进口分布器优化[J]. *轻工机械*, 2018, 36(2): 18-24. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2895.2018.02.004.
HUANG S Z, WU L J, XIANG B. Numerical simulation and optimization of flow field of inlet distributor of axial adsorption tower[J]. *Light Industry Machinery*, 2018, 36(2): 18-24. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2895.2018.02.004.
- [42] SAADAT S, GHOLAMI M, EHSANI M R. Mathematical modeling of adsorptive natural gas dehydration: The effect of layering the bed[J]. *Separation Science and Technology*, 2019, 54(14): 2212-2221. DOI:10.1080/01496395.2018.1543325.
- [43] NASTAJ J, AMBROŹEK B. Analysis of gas dehydration in TSA system with multi-layered bed of solid adsorbents[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2015, 96: 44-53. DOI:10.1016/j.cep.2015.08.001.
- [44] MCTIGUE J D, WHITE A J. A comparison of radial-flow and axial-flow packed beds for thermal energy storage[J]. *Applied Energy*, 2018, 227: 533-541. DOI:10.1016/j.apenergy.2017.08.179.
- [45] SKUNTZ M E, ELANDER R, AL AZAWI M, et al. System efficiency of packed bed TES with radial flow vs. axial flow—Influence of aspect ratio[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108463. DOI:10.1016/j.est.2023.108463.
- [46] KAREERI A A, ZUGHBI H D, AL-ALI H H. Simulation of flow distribution in radial flow reactors[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2006, 45(8): 2862-2874.
- [47] 王浩宇, 刘应书, 孟宇. 径向流吸附器布气系统结构对布气效果的影响[J]. *工程科学学报*, 2015, 37(1): 91-96.
WANG H Y, LIU Y S, MENG Y. Effect of the gas distribution system structure of a radial flow adsorber on gas distribution[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2015, 37(1): 91-96.
- [48] ZHANG W, LIN Y X, NORINAGA K. Insights into structure-performance relationship in radial flow fixed bed reactor for CO₂ methanation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(64): 24594-24606. DOI:10.1016/j.ijhydene.2023.03.343.
- [49] XU P, WEN J, XIN B P, et al. Comparison of four types of vertical radial-flow adsorbents based on binary adsorption of CO₂ and H₂O [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2022, 45(4): 631-640. DOI:10.1002/ceat.202100548.
- [50] ZHAPBASBAYEV U K, RAMAZANOVA G I, KENZHALIEV O B. Modelling of turbulent flow in a radial reactor with fixed bed[J]. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, 22(2): 229-243. DOI: 10.1134/S0869864315020092.
- [51] YANG X, WANG H Y, CHEN J W, et al. Two-dimensional modeling of pressure swing adsorption (PSA) oxygen generation with radial-flow adsorber[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(6): DOI: 10.3390/app9061153.
- [52] WANG H Y, YANG X, LI Z Y, et al. 3-D modeling of gas-solid two-phase flow in a π-shaped centripetal radial flow adsorber[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(2): 614. DOI:10.3390/app10020614.
- [53] XU P, WEN J, ZHAO X, et al. Study on adsorption characteristics optimization of vertical radial flow adsorber[J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2022, 17(2): e2755. DOI: 10.1002/apj.2755.
- [54] LI Y, SI H Q, WANG H B, et al. Numerical investigation of integrated design on uniform fluid distribution for radial flow adsorber[J]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2021, 55(5): 894-905. DOI:10.1134/S0040579521050274.
- [55] ZHANG R Y, WANG Y H, YU X X, et al. Flow characteristics of air separation in VPSA process with radial flow adsorber[J]. *Powder*

- Technology, 2022, 407: 117672. DOI:10.1016/j.powtec.2022.117672.
- [56] LI Y, SI H Q, WANG B, et al. Optimization design research of air flow distribution in vertical radial flow adsorbers[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2018, 35(4): 835-846. DOI: 10.1007/s11814-017-0348-y.
- [57] XU H N, ZHANG Q C, WANG R J, et al. Theoretical analysis and numerical simulation study on the structural optimization of conical channels in the center tube of a centrifugal radial bed[J]. Particulate Science and Technology, 2024, 42(4): 612-624. DOI: 10.1080/02726351.2023.2271430.
- [58] CHEN Y L, LI Y, SI H Q, et al. Numerical investigation into the distributor design in radial flow adsorber[J]. Advances in Applied Mathematics and Mechanics, 2021, 11(6): 1436-1460. DOI: 10.4208/aamm.0a-2019-0001.
- [59] TIAN Q Q, HE G G, WANG Z P, et al. A novel radial adsorber with parallel layered beds for prepurification of large-scale air separation units[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(30): 7502-7515. DOI:10.1021/acs.iecr.5b00555.
- [60] 冯明杰, 徐凤森, 周帅磊. Ω 形阶梯径向流变压吸附床制氧特性的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 516-520. DOI: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.04.011.
- FENG M J, XU F S, ZHOU S L. Numerical simulation of oxygen generation characteristics of Ω -shaped step radial flow pressure swing adsorbent bed[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(4): 516-520. DOI: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.04.011.
- [61] DAI Z S, YU M, RUI D Z, et al. Investigation on a vertical radial flow adsorber designed by a novel parallel connection method[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2018, 26(3): 484-493. DOI:10.1016/j.cjche.2017.11.005.
- [62] SALIMI S, GHOLAMI M. Theoretical study of parallel radial adsorber: A novel configuration of temperature swing gas adsorption bed[J]. Adsorption, 2017, 23(6): 871-878. DOI: 10.1007/s10450-017-9899-9.