

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.12.005

基于遗传算法的电动涡旋压缩机结构参数优化

潘淑丽, 唐景春, 孙东方, 周培

(合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为了降低电动汽车空调系统的耗能, 提高电动汽车续航能力, 文章使用遗传算法对电动压缩机涡旋盘的主要结构参数进行优化设计, 并运用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法对电动涡旋压缩机内部工质的流动进行计算和分析。仿真计算和压缩机性能试验结果表明, 在相同的压缩机吸气容积和运行工况条件下, 通过优化涡旋盘的相关结构参数, 压缩机的外压缩指示功降低 60.71%, 压缩中心腔排气温度降低 1~2 K; 分析电动涡旋压缩机工作时的内部流场可知, 结构参数优化后的涡旋盘在一定程度上减少了因气体涡流而导致的流动功耗, 降低了电动涡旋压缩机的压缩总功耗, 在压缩机制冷量不变的情况下, 优化后输入电功率降幅为 2.68%。

关键词: 涡旋压缩机; 遗传算法; 流场分析; 结构优化

中图分类号: TB652

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2024)12-1617-06

Structural parameter optimization of electric scroll compressor based on genetic algorithm

PAN Shuli, TANG Jingchun, SUN Dongfang, ZHOU Pei

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to reduce the energy consumption in air conditioning system and improve the endurance capacity of electric vehicles, genetic algorithm is used to optimize the main structural parameters of the vortex disk of the electric scroll compressor. The flow of working medium in electric scroll compressor is calculated and analyzed by means of computational fluid dynamics(CFD). The results of simulation calculation and compressor performance experiment show that, under the same suction volume and operating conditions, by optimizing the relevant structural parameters of the vortex disk, the external compression indicated work is reduced by 60.71%, and the exhaust temperature of the center chamber is reduced by 1-2 K. The internal flow field analysis of the electric scroll compressor indicates that the vortex disk with optimized structure parameters can reduce the flow power consumption caused by the gas vortex to a certain extent, thus reducing the total power consumption of the electric scroll compressor. The experimental results show that the optimized input power decreases by 2.68% under the condition that the refrigerating capacity of the compressor remains unchanged.

Key words: scroll compressor; genetic algorithm; flow field analysis; structure optimization

能源和环境是当今世界所面临的两大重要问题,为了应对能源危机,重构全球产业链,2020年9月中国在联合国大会上提出了碳达峰及碳中和

目标。在此背景下,电动汽车逐渐发展成为重要的交通工具,市场占有率日益增加。在电动汽车的实际运行过程中,空调系统的能耗极大影响了

收稿日期:2023-03-21;修回日期:2023-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52006051)

作者简介:潘淑丽(1998—),女,安徽安庆人,合肥工业大学硕士生;

唐景春(1966—),男,安徽巢湖人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:tngjch@126.com.

其续航水平。涡旋压缩机具有体积小、质量轻、输气连续平稳等优点,被广泛应用于电动汽车空调系统^[1]。作为电动汽车空调系统的主要耗电部件,对涡旋压缩机进行降低能耗的结构优化具有较大的提升空间,而优化研究方向主要集中于结构参数优化、型线方程优化和泄漏优化等。

文献[2]使用粒子群算法对涡旋式空气压缩机的动、静涡旋盘主要参数结构进行优化,提高了空压机的能效比;文献[3]使用复合形法,将比功率作为目标函数,对涡旋压缩机的整体结构进行了优化设计。然而,基于算法的结构优化无法展现涡旋压缩机内部工作腔气流组织,难以揭示内压缩工作过程性能改变的物理本质。

近年来,随着计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术的飞速发展,对涡旋压缩机内部流场的仿真分析也成为主要研究方向之一。文献[4]利用热力学理论和流体仿真技术对涡旋压缩机的瞬态流动进行分析,获得涡旋压缩机内部压缩腔内的压力、温度、流速等参数的分布;文献[5]使用 CFD 动网格技术分析非整圈和不同转速下电动涡旋压缩机的工作状态,对腔内压力、温度、速度分布的不均匀性进行了探讨。

在压缩机运行过程中,当压缩机排气压力低于排气背压,即内压比小于外压比时,压缩机会对中心腔内气体进行重复压缩,产生附加功耗,从而降低压缩机的指示效率。这部分附加功耗称为外压缩指示功。在相同的运行工况和吸气容积前提下,压缩机消耗等熵比功保持不变,外压缩指示功越低,表明压缩机的运行经济性能越高,因此降低外压缩指示功在涡旋压缩机的结构优化中具有重要意义。

本文根据电动汽车空调系统的运行工况,构建电动涡旋压缩机性能优化的目标函数和约束条件,使用遗传算法对涡旋盘的主要结构参数进行优化设计^[6]。建立涡旋压缩机动、静涡旋盘耦合的三维实体模型,编写动涡旋盘平动的用户自定义函数,利用动网格技术模拟压缩机工作腔内部制冷剂气体的流场,对比分析电动涡旋压缩机结构参数优化的成效。

1 优化设计

1.1 热力学模型

电动涡旋压缩机的设计几何排量为 25 cm³,制冷工质为 R134a,制冷循环压焓图如图 1 所示。其中:lg p 为压力的对数值; h 为比焓值。

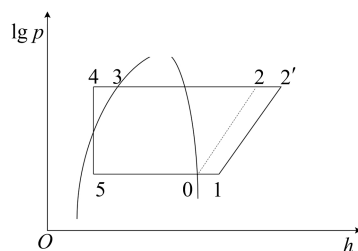


图 1 制冷循环的压焓图

根据国标 GB/T 22068—2018《汽车空调用电动压缩机总成》确定压缩机的设计工况参数,具体见表 1 所列,各计算点的热力状态参数^[7]见表 2 所列。

表 1 压缩机设计工况参数

| 工况参数 | 数值 | 工况参数 | 数值 |
|--------|--------|--------------|-------|
| 蒸发温度/K | 280.15 | 压缩机吸气压力/MPa | 0.3 |
| 冷凝温度/K | 328.15 | 压缩机排气压力/MPa | 1.5 |
| 过冷度/K | 8.00 | 主轴转速/(r/min) | 6 000 |
| 过热度/K | 10.00 | 容积系数 | 0.8 |

表 2 制冷循环中各计算点的状态参数

| 计算点 | 温度/K | 压力/MPa | 比体积/(m ³ /kg) | 比焓/(kJ/kg) | 比熵/[kJ/(kg·K)] |
|-----|--------|--------|--------------------------|------------|----------------|
| 1 | 290.15 | 0.3 | 0.073 01 | 413.25 | 1.778 4 |
| 2 | 338.77 | 1.5 | 0.014 25 | 438.48 | 1.743 8 |
| 2' | 353.27 | 1.5 | 0.015 62 | 455.70 | 1.792 4 |
| 3 | 328.15 | 1.5 | | 280.34 | 1.261 0 |
| 4 | 320.15 | 1.5 | | 267.33 | 1.222 3 |
| 5 | 280.15 | 0.3 | 0.069 91 | 267.33 | 1.747 2 |

1.2 优化变量及目标函数

涡旋体节距 P 、涡旋体壁厚 t 、涡旋体高 h 和涡旋圈数 N 是涡旋压缩机涡旋盘的主要结构参数,影响涡旋压缩机的体积、热力学性能及结构力学性能,选取这 4 个参数作为设计变量^[2]。

涡旋压缩机内压力比的计算公式为:

$$\epsilon_i = \left(\frac{2N-1-\theta_s/\pi}{3-\theta^*/\pi} \right)^n \quad (1)$$

其中: n 为工质等熵指数,取 $n=1.1$; θ_s 为吸气结束角; θ^* 为开始排气角。

θ_s 的计算公式为:

$$\theta_s = [N - \text{int}(N)] \times 360^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ} \quad (2)$$

其中, $\text{int}(N)$ 为 N 的取整函数。

θ^* 的计算公式为:

$$\theta^* = \frac{3}{2}\pi - \Phi_0 + \quad (3)$$

$$\alpha\Phi_0^2 + 2\Phi_0 \sin(\Phi_0 - \alpha) +$$

$$2\cos(\Phi_0 - \alpha) = (\pi - \alpha)^2 - 2 \quad (4)$$

其中: α 为渐开线起始角; Φ_0 为干涉点处渐开线的展角。

考虑到汽车空调用涡旋压缩机的欠压缩状态,其压缩总功是由等熵比功 W_{ts} 和外压缩指示功 ΔW 两部分构成,如图 2 所示。

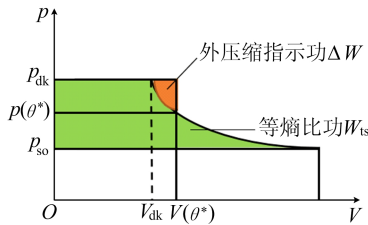


图 2 等熵比功及外压缩指示功

外压缩指示功的计算公式^[8]为:

$$\Delta W = p_{so} V_{so} \epsilon_i^{-1/m} (\epsilon - \epsilon_i) \quad (5)$$

其中: p_{so} 为压缩机吸气压力; V_{so} 为压缩机吸气比体积; $\epsilon = p_{dk}/p_{so}$ 为外压比,按照国标工况为 5, p_{dk} 为压缩机排气压力; m 为有冷却的多方压缩指数。

有冷却的多方压缩指数的计算公式^[8]为:

$$m = \frac{\lg \epsilon_i}{\lg \epsilon_i - \lg \frac{T_p}{T_s}} \quad (6)$$

其中: T_p 为排气温度; T_s 为吸气温度。

在相同的运行工况和吸气容积前提下,外压缩指示功耗越低,表明压缩机的运行经济性能越高。确定目标函数为压缩机外压缩指示功目标函数的表达式为:

$$f(x) = \Delta W = p_{so} V_{so} \epsilon_i^{-1/m} (\epsilon - \epsilon_i) \quad (7)$$

因为在使用遗传算法进行迭代计算的过程中,优化目标是使适应度函数达到最小,所以遗传算法的适应度函数为:

$$F(x) = f(P, t, h, N) = \Delta W \quad (8)$$

1.3 约束条件及优化结果

根据电动汽车空调涡旋压缩机的结构特点和工作特性^[9],确定优化约束条件见表 3 所列。表 3 中: P 为渐开线节距; t 为涡旋体壁厚; h 为涡旋体高度; N 为涡旋圈数; $\lambda = h/p$ 为结构参数; V_p 为几何排量; $h/(P-t)$ 表示加工约束。

编写适应度函数代码、相关线性不等式及非线性不等式约束,再将各参数及所编写的函数代入 MATLAB 遗传算法工具箱中,经过迭代计算获得最优解。优化结果见表 4 所列,可以看出,电动涡旋压缩机外压缩指示功 ΔW 从 1.400 J/kg 降低到 0.550 J/kg,降低了 60.71%。

表 3 约束条件及其选取依据

| 参数 | 取值范围 | 选取依据 |
|-------------------|----------|-------------------|
| P/mm | 10~12 | 小几何排量电动涡旋压缩机的产品参数 |
| t/mm | 2~5 | 涡旋体受力情况和刚度 |
| h/mm | 8~15 | 工程设计经验 |
| N | 1.5~2.5 | 工程设计经验 |
| λ | 1.0~1.4 | 动涡旋盘倾覆力矩及局部应力峰值 |
| V_p/cm^3 | 25 | 电动汽车空调制冷量 |
| $h/(P-t)$ | ≤ 4 | 加工时刀具规格限制及深槽加工问题 |

表 4 优化结果

| 优化参数 | 优化前 | 优化后 |
|--------------------------|--------|--------|
| P/mm | 16.336 | 14.224 |
| t/mm | 3.766 | 2.263 |
| h/mm | 14.500 | 14.321 |
| N | 1.900 | 2.000 |
| ϵ_i | 4.742 | 4.908 |
| $\Delta W/(\text{J/kg})$ | 1.400 | 0.550 |

2 仿真设置及结果分析

2.1 仿真设置

由于动、静盘之间间隙较小,对计算网格的质量要求较高。在进行网格划分时,若将流体域整体网格单元体积减小,则网格数量将达到 200 万以上,计算速度缓慢;若对流体域与动、静盘接触的壁面进行 2 层加密设置,能将网格数量降低到 30 万到 40 万量级,可以加快计算速度,经网格质量检测 and 网格无关性研究发现,这种加密方式可在实现动网格的基础上提高网格的质量。

根据文献[10-16]中相关研究经验,设置仿真参数见表 5 所列。

表 5 仿真参数设置

| 参数 | 数值 | 参数 | 内容 |
|-----------------|-----------|---------|-------------------------|
| 进口温度/K | 290.15 | 网格划分方法 | 四面体网格 |
| 进口压力/MPa | 0.3 | 出口形式 | 压力出口 |
| 转速/(r/min) | 6 000 | 工质 | R134a |
| 环境温度/K | 323.15 | 模拟方法 | 瞬态 |
| 环境压力/kPa | 101.325 | 压力-速度耦合 | SIMPLEC 算法 |
| 操作密度/(kg/m) | 0 | 湍流模型 | $k-\epsilon$ realizable |
| 计算步长/ 10^{-5} | 4 | | |
| 能量残差 | 10^{-6} | | |
| 其他残差 | 10^{-3} | | |

2.2 压力场分析

结构参数优化前、后涡旋压缩机在开始排气角 θ^* 时刻压力场的对比如图 3 所示。从图 3 可以看出:结构优化前、后都存在一定的欠压缩;优化前排气压力为 1.412 MPa,优化后排气压力升高到 1.472 MPa,优化前、后仿真排气压力与理论排气压力的误差分别为 0.773%和 0.271%,误差较小,说明仿真计算结果的有效性较高。

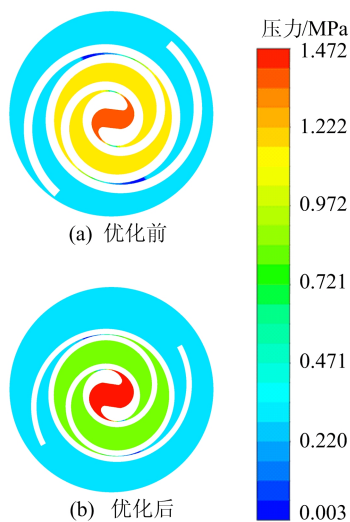


图 3 优化前、后 θ^* 时刻压力场云图

结构参数优化前、后不同转角涡旋压缩机中心腔压力变化如图 4 所示。从图 4 可以看出:在开始排气角 θ^* 时刻,涡旋压缩机的中心腔压力达到最大;优化后涡旋压缩机的排气压力升高,欠压缩程度减小,降低了因欠压缩导致的外压缩指示功,从而压缩机总功耗也得到了降低。

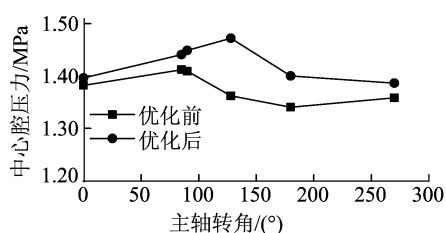


图 4 优化前、后不同主轴转角中心腔压力变化

2.3 温度场分析

结构参数优化前、后涡旋压缩机在开始排气角 θ^* 时刻温度场的对比如图 5 所示。从图 5 可以看出:优化前涡旋压缩机排气温度达 355.90 K,比理论计算值 353.27 K 增加了 2.63 K;优化后涡旋压缩机压缩腔排气时中心腔温度为 355.00 K,比优化前降低了 0.90 K。

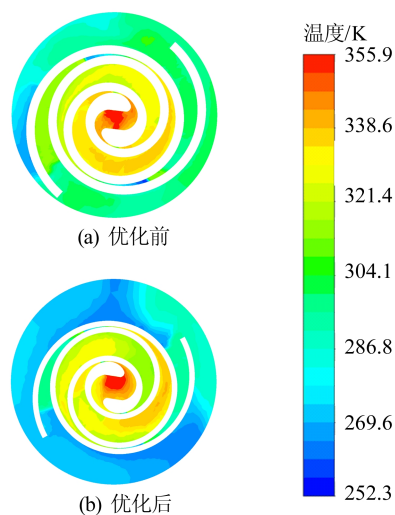


图 5 优化前、后 θ^* 时刻温度场云图

结构参数优化前、后不同转角涡旋压缩机中心腔温度的变化如图 6 所示。从图 6 可以看出,在电动涡旋压缩机的 1 个工作周期内,优化后的整体温度比优化前下降了 1~2 K。

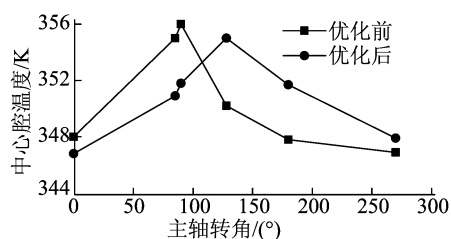


图 6 优化前、后不同主轴转角中心腔温度的变化

2.4 流场分析

结构参数优化前、后 θ^* 时刻的流线场如图 7 所示。

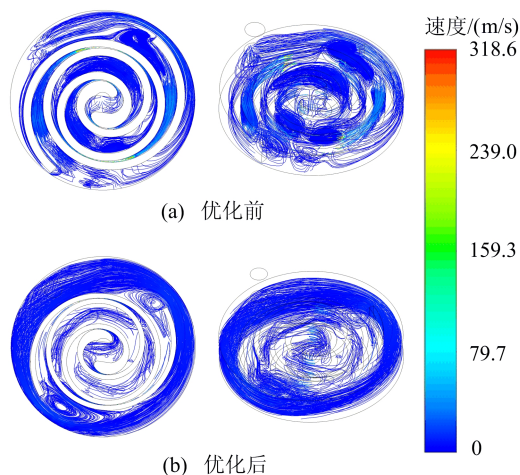


图 7 优化前、后 θ^* 时刻流线场

从图 7a 可以看出,优化前涡旋压缩机在吸气

压缩过程中产生了 9 处气流涡旋,消耗气体流动动能的现象比较严重。

从图 7b 可以看出,优化后由于电动涡旋压缩机涡旋盘节距和壁厚减小,使得涡旋体内部流体域加宽,减少了因窄通道导致的外部流场紊乱,工作腔总涡旋数减少到 5 个,降低了因流场内部气流组织涡旋导致的附加功耗。

3 性能试验

电动压缩机性能试验台架如图 8 所示,其中试验用电动涡旋压缩机的几何排量为 25 cm^3 。

测试中,压力传感器测量误差为 $\pm 0.5\%$,试验台架的温度测量是通过热电偶温度传感器实现,测量误差为 $\pm 0.20 \text{ K}$,试验环境温度控制在 323.15 K ,与仿真工况保持一致。

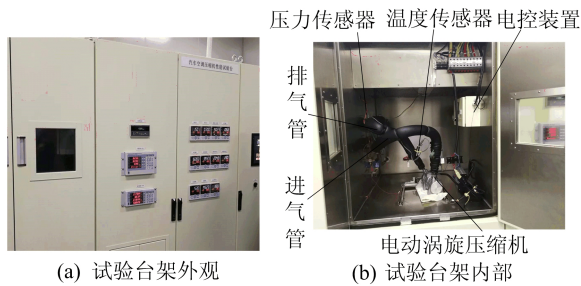


图 8 压缩机性能试验台架

压缩机制冷循环试验测试工况和测试结果见表 6、表 7 所列。

由分析测试结果可知:经过优化后的电动涡旋压缩机排气温度降低了 1.27 K ,与仿真结果近似,说明重复压缩的温升得到了一定程度的控制;同时在压缩机制冷量不变的情况下,输入电功率降低了 0.03 kW ,降幅为 2.68% ,说明经过优化结构参数后的涡旋压缩机实现了预定目标的节能效果。

表 6 压缩机制冷循环试验测试工况

| 参数 | 数值 |
|---------------|----------|
| 蒸发温度/K | 273.82 |
| 冷凝温度/K | 328.40 |
| 过冷度/K | 5.00 |
| 过热度/K | 10.00 |
| 压缩机吸气温度/K | 283.82 |
| 压缩机吸气压力/kPa | 300.05 |
| 压缩机排气压力/kPa | 1 500.00 |
| 压缩机转速/(r/min) | 3 000 |

表 6 压缩机制冷循环试验测试结果

| 参数 | 数值 | |
|----------------|----------|----------|
| | 优化前 | 优化后 |
| 压缩机排气温度/K | 353.53 | 352.26 |
| 压缩机排气压力/kPa | 1 500.14 | 1 500.40 |
| 压缩机质量流量/(kg/h) | 46.29 | 46.46 |
| 压缩机制冷量/kW | 2.09 | 2.11 |
| 输入电功率/kW | 1.12 | 1.09 |

4 结 论

本文基于遗传算法优化了电动涡旋压缩机的涡旋盘结构参数。通过仿真计算和试验研究,分析优化后电动涡旋压缩机总功耗减少的内在原因,得出如下结论:

1) 考虑到电动汽车空调涡旋压缩机的欠压缩实际工作情况,在确保制冷量和等熵比功不变的情况下,结构参数优化后电动涡旋压缩机外压缩指示功从 1.400 J/kg 降低到 0.550 J/kg ,降低了 60.71% 。

2) 通过仿真计算得到优化后压缩机排气压力升高了 0.6 MPa ,内压比增大,降低了因欠压缩导致的外压缩指示功;同时,中心腔温度整体降低了 1 K ,即重复压缩导致的温升得到了控制。

3) 结构参数优化后涡旋壁节距和壁厚减小,涡旋盘内部流域加宽,减少了窄通道导致的流场紊乱,整体效应显示为气流涡旋的减少,降低了因内部气流组织涡旋而产生的附加功耗。试验结果表明,在压缩机制冷量不变的情况下,优化后输入电功率降幅为 2.68% 。

[参 考 文 献]

- [1] 李敏霞,王派,马一太,等. 转子压缩机与涡旋压缩机的对比与发展[J]. 制冷学报,2019,40(1):22-28,78.
- [2] 刘振全,余莉芳. 基于粒子群算法的涡旋压缩机涡旋盘优化的研究[J]. 流体机械,2006,34(12):25-28,88.
- [3] 郭仁宁,王建,杨柳. 基于涡旋压缩机比功率的结构参数优化研究[J]. 压缩机技术,2008(4):11-13.
- [4] 肖根福. 无油涡旋压缩机腔内流场建模仿真及实验研究[D]. 南昌:南昌大学,2013.
- [5] 王旭阳. 电动涡旋压缩机内部流场瞬态仿真分析及壳体的结构特性研[D]. 重庆:重庆大学,2020.
- [6] 李明. 详解 MATLAB 在最优化计算中的应用[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2017.
- [7] 国家市场监督管理总局. 汽车空调用电动压缩机总成:GB/T 22068—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018:2-3.

- [8] 吴宝志. 螺杆式制冷压缩机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [9] 吴业正, 李红旗, 张华, 等. 制冷压缩机[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [10] 郁永章. 容积式压缩机技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [11] 强建国, 刘振全. EA-SAL 修正涡旋齿端面积计算[J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(5): 36-39.
- [12] 唐景春, 左承基. 电动汽车空调热泵型涡旋压缩机结构分析[J]. 制冷学报, 2014, 35(2): 54-58.
- [13] SUN S H, WU K, GUO P C, et al. Analysis of the three-dimensional transient flow in a scroll refrigeration compressor[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 1086-1094.
- [14] MIRKO M, CLAUDIO P, MICHELE P, et al. Analysis of a scroll machine for micro ORC applications by means of a RE/CFD methodology[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 80: 132-140.
- [15] ZHENG S Y, WEI M S, ZHOU Y, et al. Tangential leakage flow control with seal-grooves on the static scroll of a CO₂ scroll compressor[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 208: 118213.
- [16] 唐景春, 李晨凯, 叶斌, 等. 采用涡旋压缩机的电动汽车空调准双级压缩热泵性能实验研究[J]. 制冷学报, 2018, 39(1): 34-39.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 1594 页)

- [2] DRAKE T, JI P F, LIN W B. Site isolation in metal-organic frameworks enables novel transition metal catalysis[J]. Accounts of Chemical Research, 2018, 51(9): 2129-2138.
- [3] WANG J L, LIANG J, LIN Y C, et al. Nanowire stacked bimetallic metal-organic frameworks for asymmetric supercapacitor[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 446(4): 137368.
- [4] MON M, BRUNO R, TIBURCIO E, et al. Multivariate metal-organic frameworks for the simultaneous capture of organic and inorganic contaminants from water[J]. Journal of the American Chemical Society, 2019, 141(34): 13601-13609.
- [5] KE F, QIU L G, YUAN Y P, et al. Thiol-functionalization of metal-organic framework by a facile coordination-based postsynthetic strategy and enhanced removal of Hg²⁺ from water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 196: 36-43.
- [6] SALEEM H, RAFIQUE U, DAVIES R P. Investigations on post-synthetically modified UiO-66-NH₂ for the adsorptive removal of heavy metal ions from aqueous solution[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2016, 221: 238-244.
- [7] ZHANG Y, ZHENG H, ZHANG P Y, et al. Thiol/nitrogen functionalized Fe₃O₄@ZIF-8-DMTD by one-pot post coordination modulation for efficient and rapid removal of trace heavy metals from drinking water[J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 49: 103189.
- [8] NOROUZBAHARI S, LIGHVAN Z M, GHADIMI A, et al. ZIF-8 @ Zn-MOF-74 core-shell metal-organic framework (MOF) with open metal sites: synthesis, characterization, and gas adsorption performance[J]. Fuel, 2023, 339: 127463.
- [9] FU L K, WANG S X, LIN G, et al. Post-functionalization of UiO-66-NH₂ by 2, 5-Dimercapto-1, 3, 4-thiadiazole for the high efficient removal of Hg(II) in water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 368: 42-51.
- [10] MIRZAEI K, MOHAMMADI A, JAFARPOUR E, et al. Improved adsorption performance of ZIF-8 towards methylene blue dye by hybridization with nanodiamond[J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 50: 103254.
- [11] JING H P, WANG C C, ZHANG Y W, et al. Photocatalytic degradation of methylene blue in ZIF-8[J]. RSC Advances, 2014, 4: 54454-54462.
- [12] YAN Y Z, AN Q D, XIAO Z Y, et al. Flexible core-shell/bead-like alginate@PEI with exceptional adsorption capacity, recycling performance toward batch and column sorption of Cr(VI)[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 313: 475-486.
- [13] JIANG X, SU S, RAO J T, et al. Magnetic metal-organic framework (Fe₃O₄@ZIF-8) core-shell composite for the efficient removal of Pb(II) and Cu(II) from water[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(5): 105959.
- [14] LI C, HUANG S J, MIN C G, et al. Highly productive synthesis, characterization, and fluorescence and heavy metal ion adsorption properties of poly(2, 5-dimercapto-1, 3, 4-thiadiazole) nanosheets[J]. Polymers, 2018, 10(1): 24.
- [15] FU Q P, ZHOU S Q, WU P, et al. Regenerable zeolitic imidazolate frameworks@ agarose (ZIF-8@AG) composite for highly efficient adsorption of Pb(II) from water[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2022, 307: 122823.
- [16] 白德奎, 朱霞萍, 王艳艳, 等. 氧化锰、氧化铁、氧化铝对砷(III)的吸附行为研究[J]. 岩矿测试, 2010, 29(1): 55-60.
- [17] ABATE G, MASINI J C. Influence of pH and ionic strength on removal processes of a sedimentary humic acid in a suspension of vermiculite[J]. Colloids and Surfaces A (Physicochemical and Engineering Aspects), 2003, 226: 25-34.
- [18] 管宇立, 赵转军, 赵立芳, 等. 碳铁共沉淀物对水中镉的吸附性能[J]. 工业水处理, 2018, 38(3): 25-29.

(责任编辑 吴亮)