

半导体芯片废水高标准处理工艺 碳排放与效能特征

梁杏媚¹, 刘可², 蔡振山³, 黄重庆⁴, 吴乾元¹, 王文龙^{1,*}

(1. 清华大学深圳国际研究生院 深圳市环境微生物利用与安全控制重点实验室, 深圳市生态修复与固碳增汇重点实验室, 广东深圳 518055; 2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 广东深圳 518055; 3. 深圳市长隆科技有限公司, 广东深圳 518116; 4. 深圳市坪山区水务局 水务工程建设管理中心, 广东深圳 518055)

摘要: 为推动废水处理行业的绿色低碳转型, 精确核算废水处理工艺的碳排放至关重要, 其中电力消耗是主要的碳排放源。采用国际气候变化专门委员会推荐的排放因子法, 对典型芯片废水处理工艺的碳排放进行了核算, 并探讨了不同处理阶段的碳排放组成及其决定因素。结果表明, 芯片废水处理工艺的碳排放量普遍高于城镇废水处理工艺。7种典型芯片废水处理工艺 A~G 的碳排放强度分别为 2.20、2.32、2.85、2.58、2.72、3.69、2.39 kg CO₂e/m³。其中, 在碳排放强度差异较小的情况下, G 工艺的碳排放量最低, 仅为 1.2×10⁴ kg CO₂e/d, 直接甲烷、氧化亚氮、间接电耗和药耗排放量分别为 3 309.3、2 893.8、3 733.4 和 2 520.7 kg CO₂e/d, 间接电耗占比最高, 达 30%。相比之下, G 工艺平均减排 10%, 最高达 35%。以广东省某电子工业企业 5 200 m³/d 芯片废水处理工程为例, G 工艺旨在有效应对氟化物及有机碳/氮处理挑战及碳排放控制问题, 确保出水水质符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III 类标准。此外, A、G 工艺单位用地碳排放强度分别为 0.71、1.93 kg CO₂e/m², G 工艺土地利用率和污水处理效率高。通过深入探究与分析后得出的结果, 应用新的能源利用模式和工艺优化方法, 在处理芯片废水的过程中, 能够显著减少能源消耗, 从而降低碳排放, 有助于推动该行业朝着更加绿色、可持续发展的方向发展。

关键词: 芯片废水; 碳减排; 碳排放核算; 排放因子; 减污降碳

中图分类号: X322

文献标识码: A

Carbon Emissions and Efficiency Characteristics of High-standard Processes for Semiconductor Chip Wastewater

LIANG Xingmei¹, LIU Ke², CAI Zhenshan³, HUANG Chongqing⁴,
WU Qianyuan¹, WANG Wenlong^{1,*}

(1. Key Laboratory of Microorganism Application and Risk Control of Shenzhen, Shenzhen Key Laboratory of Ecological Remediation and Carbon Sequestration, Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China; 2. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518055, China; 3. Shenzhen Changlong Technology Co., Ltd., Shenzhen 518116, China; 4. Waterworks Construction Management Centre, Shenzhen Pingshan District Water Affairs Bureau, Shenzhen 518055, China)

Abstract: To effectively promote the green and low-carbon transformation of the wastewater treatment industry, it is of utmost importance to carry out accurate calculations of carbon emissions

收稿日期: 2024-10-18

修回日期: 2024-12-23

接受日期: 2024-12-30

DOI: 10.20078/j.eep.20250105

基金项目: 深圳市科技计划项目 (KCXST20221021111201004)

第一作者: 梁杏媚(2001—), 女, 广西桂平人, 硕士研究生, 主要研究方向为新型混凝剂除氟及其资源化。E-mail: 2949249430@qq.com

通讯作者: 王文龙(1990—), 男, 福建三明人, 副教授, 主要研究方向为水污染控制与循环利用。E-mail: wwl20@sz.tsinghua.edu.cn

from wastewater treatment processes. In this regard, electricity consumption stands out as the major source of carbon emissions. During the wastewater treatment procedures, various electrical devices and equipment are in operation, such as pumps for water circulation, aeration devices for oxygen supply, and monitoring instruments. All of these consume a significant amount of electricity, which in turn leads to substantial carbon emissions. This study adopted the emission factor method recommended by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) to calculate the carbon emissions of typical chip wastewater treatment processes and explored the composition of carbon emissions at different treatment stages and their influencing factors. The results showed that the carbon emissions of chip wastewater treatment processes are generally higher than those from municipal wastewater treatment processes. The carbon emission intensities of seven typical chip wastewater treatment processes (A to G) were 2.20, 2.32, 2.85, 2.58, 2.72, 3.69, and 2.39 kg CO₂e/m³, respectively. Among these, with relatively small differences in carbon emission intensity, process G had the lowest carbon emissions of 1.2×10⁴ kg CO₂e/d. Its direct methane, nitrous oxide, indirect electricity consumption, and chemical consumption emissions were 3 309.3, 2 893.8, 3 733.4, and 2 520.7 kg CO₂e/d, respectively, with indirect electricity consumption accounting for the highest proportion at 30%. In comparison, process G achieved an average reduction of 10%, with a maximum reduction of 35%. Taking the 5 200 m³/d chip wastewater treatment project from an electronics company in Guangdong Province as an example, process G aims to effectively address the challenges of fluoride and organic carbon/nitrogen treatment as well as carbon emission control, ensuring that the effluent water quality meets the Class III standard of the Surface Water Environmental Quality Standard (GB 3838—2002). In addition, the carbon emission intensities per unit of land for process A and G are 0.71 and 1.93 kg CO₂e/m², respectively, and process G has a high land utilization rate and efficient wastewater treatment. As a result of this study, after in-depth investigation and analysis, the application of new energy utilization models and process optimization methods in the treatment of chip wastewater can significantly reduce energy consumption and thus carbon emissions, helping to promote the development of the industry in a greener and more sustainable direction.

Keywords: Chip wastewater; Carbon emission reduction; Carbon emission accounting; Emission factors; Pollution and carbon reduction

0 引 言

半导体芯片制造业是现代电子信息产业的核心,但也是高耗水、高排放企业^[1-2]。在芯片生产过程中,特别是晶圆清洗、光刻、刻蚀沉积等工序产生的废水含高浓度的氟化物、有机碳、氨氮、重金属等复杂污染物,污水处理难度大^[3-5]。随着排放标准的提高,芯片废水的处理工艺变得更为复杂,这直接导致了能耗和碳排放量的增加。此外,处理设施的占地面积也在不断扩大^[6]。因此,芯片废水处理成为水处理领域减污降碳关注的重要领域。

全球范围内,废水处理厂的碳排放量占碳排放总量的1%~2%,且该比例仍在持续上升^[7-8]。因此,削减废水处理过程的碳排放量是实现“碳中

和”目标的关键环节之一^[9]。常用的碳排放核算方法包括排放因子法、生命周期法、碳足迹法和模型法^[10-11]。其中,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)推荐的排放因子法因具备广泛适用性和计算简便性,被广泛应用于国家层面的碳排放核算^[12-14]。废水处理设施的占地面积,特别是在人口密集的城市区域,已受到广泛关注^[15-16]。废水处理占地面积受到多种因素的影响,包括处理规模、工艺技术和平面布局等。研究表明,通过优化平面布局、改进工艺流程和采用竖向强化技术,可以显著提升废水处理厂的土地利用效率^[17]。

本文致力于研究芯片废水处理工艺,旨在降低碳排放并提升土地使用效率。为此,本研究核算了不同芯片废水处理工艺的碳排放量,并评价用地面积。研究发现,G工艺,具体工艺流程为

调节池-事故池-两级除氟高密池-臭氧接触池-厌氧好氧-膜生物反应器(Anoxic-Oxic Membrane Bioreactor, AO-MBR)-磁混凝高效沉淀池-除氟树脂系统-紫外消毒,在操作简便性、碳排放量和占地面积方面表现优异,为后续芯片废水处理工艺的优化设计及其碳排放核算提供了重要参考。

1 处理工艺及概况

本文选取了8个典型的芯片废水处理工艺进行研究,处理工艺见表1,水质指标见表2。A和B工艺位于江苏省,C~H工艺位于深圳。G工艺的设计处理规模为5200 m³/d,鉴于其地理位置,出水水质标准较为严格,出水主要指标需达到符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的准

Ⅲ类标准,其中总氮(TN)的浓度需控制在10 mg/L以下。

本研究考察的废水处理工艺均采用预处理、生化处理和深度处理的串联工艺。在生化处理单元,A、D、E工艺使用改良厌氧-缺氧-好氧(Anaerobic Anoxic Oxic, AAO)生化池,B工艺采用缺氧-好氧-缺氧膜生物反应器(Anoxic Oxic Anoxic Membrane Bioreactor, AOA-MBR)组合,而C、F工艺采用厌氧-好氧-缺氧膜生物反应器(Anaerobic Oxic Anoxic, AOA-MBR)组合,G工艺采用AO-MBR反应器,H工艺采用反渗透处理工艺,预处理和深度处理则分别采用除氟高密池和除氟树脂工艺。

表1 典型芯片废水处理厂的处理工艺

Table 1 Treatment process of typical chip wastewater treatment plants

工艺代号	工艺流程
A	粗格栅+细格栅+曝气沉砂池+反应沉淀池+调节池+水解酸化+改良AAO生化池+中进周出二沉池+高效沉淀池+V型滤池+臭氧接触氧化+生物活性炭滤池+活性氧化铝吸附+接触消毒池
B	调节池+两级高效沉淀池+水解酸化+AOAO-MBR+臭氧接触氧化+高效沉淀池+反硝化深床滤池+接触消毒池
C	调节池+两级高效沉淀池+水解酸化+AOA-MBR+臭氧接触氧化+生物活性炭滤池+高效沉淀池+V型滤池+除氟树脂+紫外消毒
D	调节池+两级平流沉淀池+水解酸化+多级AAO生化池+平流二沉池+高效沉淀池+V型滤池+臭氧接触氧化+生物活性炭滤池+除氟树脂+紫外消毒
E	调节池+两级高效沉淀池+AOA-MBR+活性炭吸附滤池+高效沉淀池+除氟树脂+紫外消毒
F	主流程:调节池+除硬沉淀池+水解酸化+AOA-MBR+软化树脂+反渗透+紫外消毒 反渗透浓水处理流程:臭氧催化氧化+除氟沉淀池+MBBR-MBR生化池+高级氧化+沉淀池+除氟树脂
G	调节池、事故池+两级除氟高密池+臭氧接触池+AO-MBR+磁混凝高效沉淀池+除氟树脂系统+紫外消毒
H	调节池+混凝絮凝沉淀池+中间水池+反渗透系统+RO浓水池+混凝絮凝沉淀池+综合废水调节池+序批式活性污泥池+湿地系统

表2 典型芯片废水处理厂设计规模及进出水水质

Table 2 Typical chip wastewater treatment plant design scale and inlet and outlet water quality

工艺代号	流量/(万m ³ ·d ⁻¹)	进水 COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	出水 COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	进水 BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	出水 BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	进水 TN/(mg·L ⁻¹)	出水 TN/(mg·L ⁻¹)	进水 SS/(mg·L ⁻¹)	出水 SS/(mg·L ⁻¹)
A	1.00	300	40	100	10	60	15	100	10
B	2.00	300	30	100	6	60	10	250	10
C	4.50	500	20	300	4	70	15	400	6
D	2.87	500	20	300	4	70	15	400	6
E	1.00	500	20	300	4	70	15	400	6
F	2.50	500	20	300	4	70	15	400	6
G	0.52	500	20	300	4	70	15	400	6
H	0.50	500	20	300	4	70	10	400	6

A、B工艺进水COD_{Cr}、BOD₅和TN浓度分别为300、100和60 mg/L, C~H工艺进水COD_{Cr}、

BOD₅和TN进水浓度为500、300和70 mg/L, COD和BOD的去除率需达到95%以上,对TN和氟化

物的去除也提出了更高的要求,因此要求对芯片废水进行更彻底的除氟、脱氮和脱碳处理。

2 碳排放核算

2.1 系统核算边界

本研究碳排放核算边界以半导体废水处理工艺园区围墙为界限。碳排放核算的起点为废水进入废水处理厂,终点为处理后的废水排放,核算范围涵盖了废水处理厂内全流程,但不包括污泥脱水后的后续处置环节。

2.2 核算方法

碳排放评估在废水处理中分为直接排放和间接排放^[18]。直接碳排放主要由生化处理阶段释放的甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)以及二氧化碳(CO₂)构成。CH₄和N₂O的排放量是基于其全球温室效应潜能值,转换为CO₂当量进行计算。根据IPCC规定,废水生化处理产生的CO₂属于生源性CO₂,不计入碳排放总量^[19-20]。间接碳排放由废水处理过程中能源消耗引起,特别是电力消耗和化学药剂的应用。本研究以《IPCC2006年国家温室气体排放清单指南》(2019年修订版)为指导原则,同时考虑中国废水处理行业的实际状况,参考《城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算技术指南(试行)》,采用排放因子法,此方法旨在精确评估芯片废水处理中的碳排放量。

芯片废水处理中的CH₄和N₂O直接碳排放当量的计算方法分别如式(1)和(2)所示。

$$M_{CH_4} = Q \times (BOD_i - BOD_e) \times EF_{CH_4} \times 10^{-3} \times GWP_{CH_4} \quad (1)$$

$$M_{N_2O} = Q \times (TN_i - TN_e) \times EF_{N_2O} \times 10^{-3} \times GWP_{N_2O} \quad (2)$$

式中: M_{CH_4} 为废水处理产生的CH₄,以CO₂当量计算,kg CO₂e/d; Q 为芯片废水处理工艺日进水量,m³/d; BOD_i 为进水BOD₅含量,mg/L; BOD_e 为出水BOD₅含量,mg/L; EF_{CH_4} 为CH₄排放因子,根据IPCC推荐的缺省值及中国废水实际情况,取平均值0.086 kg CH₄/kg BOD; GWP_{CH_4} 为CH₄全球增温潜势,取值25; M_{N_2O} 为废水处理产生的N₂O,以CO₂当量计算,kg CO₂e/d; TN_i 为进水总氮含量,mg/L; TN_e 为出水总氮含量,mg/L; EF_{N_2O} 为N₂O排放因子,根据IPCC推荐的缺省值及中国废水实际情况,取平均值0.035 kg N₂O-N/kg TN; GWP_{N_2O} 为N₂O全球增温潜势,取值265。

芯片废水处理中的电力消耗和药剂消耗导致

的碳排放量计算方法分别如式(3)和(4)所示。

$$M_e = W \times EF_e \quad (3)$$

$$M_p = \sum (P_i \times EF_i) \quad (4)$$

式中: M_e 为废水处理过程设备耗电产生的碳排放量,kg CO₂e/d; W 为工艺设备运行总耗电量,kW·h/d; EF_e 为电力的CO₂排放因子,不同区域电网排放因子见表3,t CO₂/(MW·h); M_p 为废水处理过程药剂消耗产生的碳排放量,kg CO₂e/d; P_i 为废水处理消耗的药剂消耗量,kg/d; EF_i 为药剂的CO₂排放因子,不同药剂的排放因子见表4^[21],参考《IPCC2006年国家温室气体清单指南》(2019修订版),t CO₂/t。

表3 2023年减排项目中国区域电网基准线排放因子结果
Table 3 Results of baseline emission factors for 2023 emission reduction projects in China's regional power grid

电网名称	OM/(t CO ₂ ·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)
华北区域电网	0.935 0
东北区域电网	1.047 2
华东区域电网	0.770 3
华中区域电网	0.877 1
西北区域电网	0.901 4
南方区域电网	0.773 8
西南区域电网	0.595 9

注:表中OM为2019—2021年电量边际排放因子的加权平均值。

表4 不同药剂的排放因子

Table 4 Emission factors for different agents

化学药剂	排放因子/(t CO ₂ ·t ⁻¹)
聚丙烯酰胺(阴)	1.480
聚合氯化铝	0.530
氢氧化钠	0.840
乙酸钠	0.623
次氯酸钠	0.990
盐酸	1.200
六水氯化铝	0.600
聚丙烯酰胺(阳)	1.500
聚硫酸铁	2.500

3 结果与讨论

3.1 总体碳排放特征

图1揭示了芯片废水典型处理工艺的碳排放情况,由于H工艺没有足够的数据库支持,因此未进

行碳排放核算。在碳排放量方面,顺序如下: $G < A < E < B < D < F < C$, 其中进水流量为关键影响因素。G工艺碳排放量最低为 1.2×10^4 kg CO₂e/d, 处理水量为 0.5×10^4 m³/d, C工艺碳排放量最高为 2.0×10^5 kg CO₂e/d, 处理水量为 4.5×10^4 m³/d。处理水量增加导致废水处理设施规模扩大, 进而提高了能源和化学药剂的使用量, 增加了碳排放。在碳排放强度方面, 7种典型芯片废水处理工艺A~G的碳排放强度分别为2.20、2.32、2.85、2.58、2.72、3.69、2.39 kg CO₂e/m³, 各工艺的排放强度依次为 $A < B < G < D < E < C < F$, 其范围介于2.20~3.69 kg CO₂e/m³。一般来说, 进水流量越高, 碳排放强度越低。A、B工艺进水流量分别是G工艺的2、4倍, 但碳排放强度仅减少8%、3%。在低进水流量及对污染物处理要求更高的情况下, G工艺依然维持了低碳排放强度, 可见该工艺具有控制碳排放的优势。相较于中国城镇污水处理厂的碳排放强度 0.612 kg CO₂e/m³^[22], 芯片废水处理工艺的碳排放强度显著增加, 平均增幅达4.8倍, 造成这一现象的主要原因在于芯片废水中高浓度污染物的去除难度大、难降解有机物含量相对更高、微生物可利用营养源匮乏。在所考察的工艺中, F工艺的碳排放强度最高, 是由于采用反渗透处理工艺, 耗能增加, 碳排放强度高。总体分析, G工艺在碳排放控制方面效果突出。与F工艺相比, G工艺降低35%的碳排放强度; 与A~F工艺相比, G工艺实现了平均10%的碳削减。图2揭示了芯片废水典型处理工艺的碳排放组成, 表明其与城镇污水处理工艺相似, 即以间接碳排放为

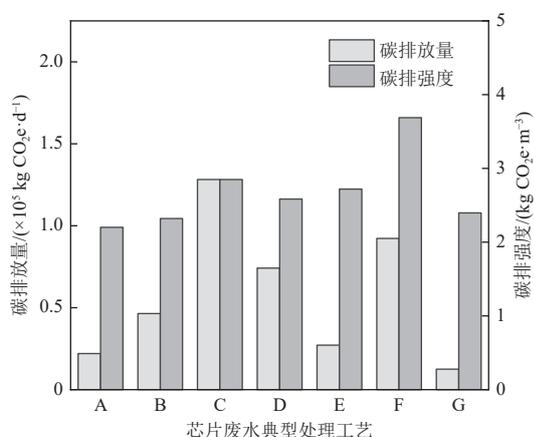


图1 芯片废水典型处理工艺的总碳排放量和碳排放强度
Fig. 1 Total carbon emission volume and intensity of typical treatment processes for the wastewater treatment of chip manufacture

主, 且电耗碳排放占比最大。基于芯片废水的水质特征, 芯片废水处理工艺对曝气设备、MBR、泵的需求高, 设备耗电量大, 碳排放量随之增大。

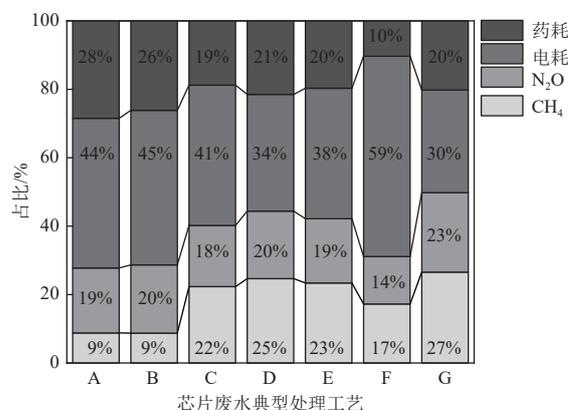


图2 芯片废水典型处理工艺碳排放组成

Fig. 2 Carbon emission composition of typical chip treatment processes

3.2 G工艺碳排放结构分析

G工艺直接碳排放占比与间接碳排放占比相等, 总体碳排放特征如图3(a)所示。G工艺总体碳排放量小, 总氮出水要求高于其他芯片废水工艺, TN<10 mg/L, 因此氨氮生化处理过程产生更多的直接碳排放。此外, G工艺的电耗碳排放小于其他工艺(图2)。在设计过程中, G工艺考虑技术的实用性和成熟性, 通过以下几个方面进行了节能设计: (1)为适应水质水量变化, 处理构筑物进行合理分组; (2)MBR工艺采用了标准氧利用率为37%, 理论充氧动力效率达到8.0 kg O₂/(kW·h)的微孔曝气设备, 降低能耗; (3)采用变频设备, 供气量根据好氧池中溶解氧浓度的变化自动调节, 在保证处理效率的前提下, 使鼓风机供气量最小, 节省能耗。

在G工艺的碳排放构成中, 电耗碳排放占比最大, 占比达30%。G工艺中各处理单元的电耗碳排放情况如图3(b)所示。臭氧接触池单元中臭氧的生产、投加、传递以及相关设备的运行和操作均依赖于电能, 因此其电耗碳排放量最高。其次为AO-MBR单元, 其电耗碳排放占比为21.5%。在AO-MBR单元的好氧阶段, 生物降解有机物和膜过滤过程需要大量曝气, 而曝气设备的能耗较高; 此外, MBR工艺的运行和维护进一步增加了电耗。

图3(c)揭示了G工艺废水处理中不同药剂的碳排放量。药剂的碳排放量由高到低依次为乙

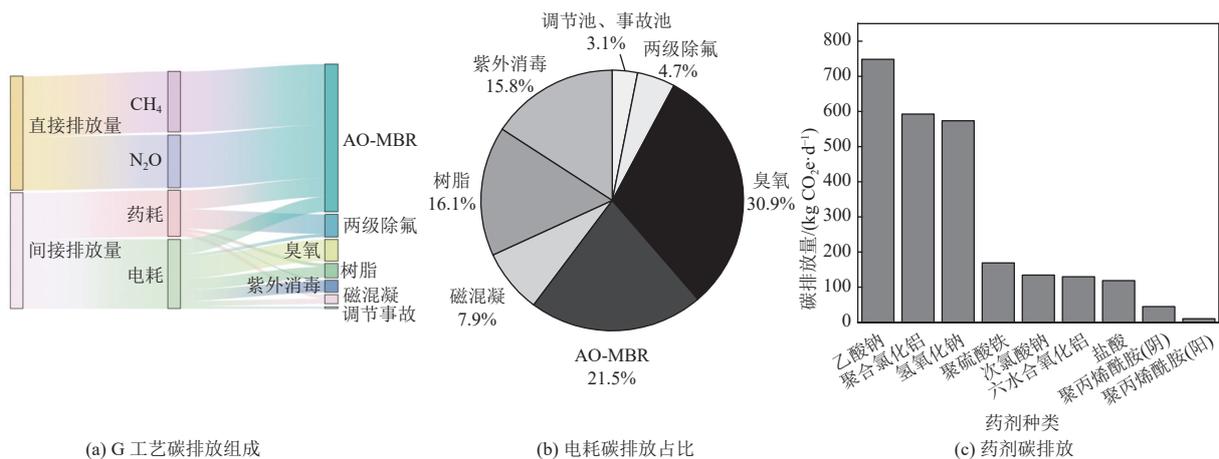


图 3 G 工艺碳排放结构

Fig. 3 Carbon emission structure of process G

酸钠>聚合氯化铝>氢氧化钠>聚硫酸铁>次氯酸钠>六水合氯化铝>盐酸>聚丙烯酰胺(阴)>聚丙烯酰胺(阳)。乙酸钠的碳排放量居于首位,原因是芯片废水普遍存在碳源匮乏的问题,生化系统往往需要投加大量碳源以维持微生物的生长和活性。聚合氯化铝和氢氧化钠则主要在除氟工艺段消耗,其中聚合氯化铝作为除氟剂时投加量较大,氟化物浓度较低时聚合氯化铝投加量呈指数级增长。根据文献报道^[23-24],在氟化物浓度为 4~8 mg/L 时,去除单位氟化物的铝氟摩尔比为 10:1,而当氟化物浓度低于 2 mg/L 时,去除单位氟化物的铝氟比达到 40:1。由于聚合氯化铝的水解作用,投加聚合氯化铝后溶液 pH 呈酸性,为保证最佳的反应效果还需要相应投加氢氧化钠以保证处理水的 pH 维持在 6.5~6.7,因此氢氧化钠的消耗量同样较高。

图 4 揭示了 G 工艺中各单元的碳排放分布。结果显示, AO-MBR 单元的碳排放量在所有单元中最为显著,占整体碳排放的 64.3%。在 AO-MBR 单元内部,直接碳排放占据了 77.16%,显著高于间接碳排放。这一现象的主要原因: AO-MBR 单元是处理过程中有机物代谢的主要场所,其中的生物脱氮和厌氧分解过程产生了大量的 N₂O 和 CH₄ 等温室气体,这些气体的直接碳排放量超过了间接碳排放量。G 工艺划分为 3 个主要阶段:预处理、生化处理和深度处理。预处理阶段包括调节池、事故池、两级除氟高密池和臭氧接触池。生化处理阶段采用 AO-MBR 工艺。深度处理阶段包括磁混凝高效沉淀池、除氟树脂系统、紫外消毒。在碳排放量方面,生化处理阶段对

整体碳排放的贡献最为显著,占总碳排放量的 64.3%。其次是预处理阶段,占比 20.1%,而深度处理阶段的碳排放量相对较低,占比 15.6%。

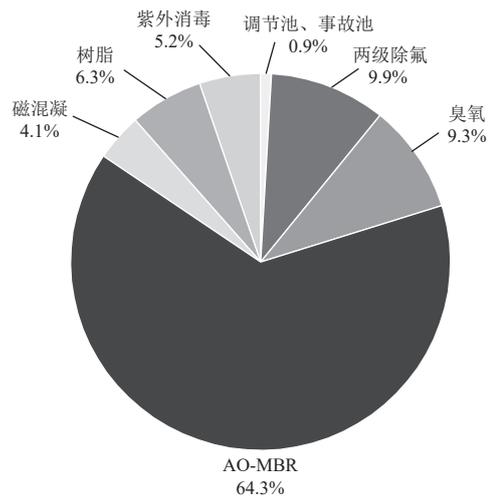


图 4 G 工艺中单元碳排放占比

Fig. 4 Percentage of unit carbon emissions in process G

3.3 空间用地评价

在半导体芯片废水处理的绿色转型进程中,低碳运行和合理用地是两大关键环节。上文已针对半导体芯片废水处理工艺的碳排放特征予以分析,后续将开展工艺用地评价。鉴于部分 B~F 工艺设计单位的保密性要求,相关用地信息无法获取,故而仅对 A、G、H 工艺进行用地评价。A、G、H 工艺用地情况见表 5, A、H 工艺占地面积极大,用地均超过 1 万 m², G 工艺仅有 6 464.82 m²。按处理阶段分析,如图 5 所示, A 和 H 工艺的深度处理阶段占地面积比例为 45% 以上,占主导地位。相比之下, G 工艺深度处理阶段占地面积仅为 12%,通过生化阶段提高处理效果,减少后续深

度处理环节,使得深度处理阶段占地面积大大削减。G工艺以工艺优化为核心,通过采用先进设备和紧凑型工艺,如MBR膜处理技术,树脂除氟技术,多采用组合池共壁的布置方式,实现了土地资源的高效合理利用,从而大幅节约了用地面积。A、G、H工艺中占地最大的单元分别为生化池单元(1 981.44 m², 16.0%)、AO-MBR单元(1 471.20 m², 52.0%)、人工湿地单元(8 000.00 m², 70.3%)。与A、H工艺相比,G工艺在单位用地面积上分别实现了60%和57%的削减。A、G工艺单位用地碳排放强度分别为0.71、1.93 kg CO₂e/m²,说明G工艺处理效率高,碳排放集中,提高了土地利用效率。此外,G、H工艺运营费用分别为1 217.56、2 403.5万元/年,运营单价分别为6.41、13.17元/m³。由此可知,相较H工艺,G工艺实现51.3%的成本削减。

表5 用地情况分析

Table 5 Analysis of the land use situation

工艺	规模/(m ³ ·d ⁻¹)	用地面积/m ²	单位用地面积/m ²
G	5 200	6 464.82	1.24
A	10 000	31 050.00	3.11
H	5 000	14 551.60	2.91

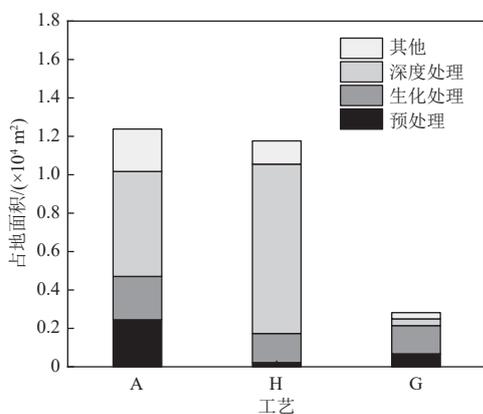


图5 工艺各阶段占地面积

Fig. 5 Footprint for each stage of the process

4 结 论

本文采用排放因子法,对典型芯片废水处理工艺进行碳排放核算。该方法具备计算简便性与广泛适用性,为进一步提高评价准确性,需全面收集数据,确保活动数据的可靠性,并及时更新排放因子,进一步优化和完善排放因子法。芯片废水处理工艺碳排放量远高于城镇生活废水,平均碳排放强度为2.68 kg CO₂e/m³。在碳排放组成方

面,芯片废水处理工艺间接碳排放大于直接碳排放,其中间接电耗碳排放占比最大。不同地区与规模条件下,芯片废水处理工艺的碳排放有所差异。故而,需根据实际工艺运行状况确定特定排放因子,从而开展碳排放核算分析工作。与典型芯片废水处理工艺相比,G工艺流程短、效率高、能耗低、单位用地碳排放强度高,实现碳排放量减少10%,占地面积减少50%以上,运营成本减少51.3%。G工艺在半导体芯片废水处理仍需开展以下优化:(1)半导体废水水质水量波动大,G工艺设计进水流量小,流程简单,需进一步提高抗冲击负荷能力;(2)G工艺采用膜处理单元进行生化处理,单个技术单元较复杂,限制了G工艺进一步碳减排,需进一步开展单元间协同的碳减排。未来,芯片废水处理工艺将朝着更加智能化、高效化、绿色化方向发展。一方面引入人工智能技术,精准控制处理过程,提高适应能力;另一方面,采用高级氧化、电化学等技术高效去除污染物,使水质达到回用标准,实现水资源的回收利用。

参考文献 (References):

- [1] 赵健雅. 应对美国出口管制的企业竞争情报服务体系建设研究 [J]. 情报杂志, 2024, 43(1): 70-76.
ZHAO Jianya. Research on the construction of enterprise competitive intelligence service system in response to U. S. export administration [J]. Journal of Intelligence, 2024, 43(1): 70-76.
- [2] 王礼春, 徐文祥, 张雨萌, 等. 新型工艺处理半导体行业废水工程实例 [J]. 山西化工, 2023, 43(9): 234-236.
WANG Lichun, XU Wenxiang, ZHANG Yumeng, et al. Example of a new process for treating semiconductor industry wastewater engineering [J]. Shanxi Chemical Industry, 2023, 43(9): 234-236.
- [3] 徐梦晏. 关于芯片废水处理技术的探讨 [J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(19): 130-131+146.
XU Mengyan. Discussion on chip wastewater treatment technology [J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2022, 3(19): 130-131+146.
- [4] 朱加豆, 江宇, 洪耀良, 等. 三星半导体公司闪存芯片生产废水处理工程 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(10): 105-109.
ZHU Jiadou, JIANG Yu, HONG Yaoliang, et al. Flash memory chip wastewater treatment project of samsung semiconductor company [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(10): 105-109.
- [5] 肖燕, 陈彤, 胡永健, 等. 面向半导体废水回用处理的MBR-RO组合工艺可行性 [J]. 水处理技术, 2013, 39(2): 102-106+111.

- XIAO Yan, CHEN Tong, HU Yongjian, et al. Feasibility of semiconductor wastewater reclamation by using MBR-RO process[J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39(2): 102-106+111.
- [6] 王文鑫, 刘焕芳, 孙志华. 新型双层平流沉淀池沉淀性能试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2017(2): 140-144+149. WANG Wenxin, LIU Huanfang, SUN Zhihua. Experimental research on new type double-deck horizontal flow sedimentation tank[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(2): 140-144+149.
- [7] 张惠. 城镇污水处理行业低碳技术研究现状与发展趋势分析[J]. *净水技术*, 2024, 43(7): 1-9. ZHANG Hui. Analysis on research status and development trend of low-carbon treatment and disposal technologies for urban sewage and sludge[J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(7): 1-9.
- [8] LIU Zhixin, XU Ziyi, ZHU Xiaolei, et al. Calculation of carbon emissions in wastewater treatment and its neutralization measures: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 912: 169356.
- [9] 翟明洋, 周长波, 李晟昊, 等. 废水处理行业温室气体核算模型开发及减排潜力分析[J]. *中国环境管理*, 2022, 14(6): 57-64. ZHAI Mingyang, ZHOU Changbo, LI Shenghao, et al. Development of greenhouse gas accounting model and emission reduction potential analysis in wastewater treatment industry[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2022, 14(6): 57-64.
- [10] 李知兵. 城镇污水处理常见工艺碳排放核算平台搭建[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023: 4-8. LI Zhibing. Establishment of carbon emission accounting platform for common processes in urban sewage treatment[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Science and Technology, 2023: 4-8.
- [11] 赵伟华, 王艳艳, 白萌, 等. 农村污水处理过程的碳排放核算与碳减排研究综述[J]. *市政技术*, 2023, 41(10): 1-6+276. ZHAO Weihua, WANG Yanyan, BAI Meng, et al. Review of carbon emission accounting and reduction in rural sewage treatment process[J]. *Journal of Municipal Technology*, 2023, 41(10): 1-6+276.
- [12] 唐小亮, 何川, 刘晴. 排放因子法高估燃气电厂的碳排放量——基于高邮某电厂的观测结果[J]. *电力科技与环保*, 2020, 36(3): 17-20. TANG Xiaoliang, HE Chuan, LIU Qing. Emission factor method overestimates carbon emission of gas—Fired power plant: Based on observations of a power plant in Gaoyou City[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2020, 36(3): 17-20.
- [13] 李文慧, 李振国, 余光辉, 等. 长沙市碳足迹与碳承载力动态分析[J]. *国土与自然资源研究*, 2022(4): 61-64. LI Wenhui, LI Zhenguo, YU Guanghui, et al. Dynamic analysis of carbon footprint and carbon bearing capacity in Changsha[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2022(4): 61-64.
- [14] 周鹏, 许艺馨, 冯磊, 等. 化工园区大气特征污染物筛选方法探讨[J]. *广东化工*, 2023, 50(23): 104-106. ZHOU Peng, XU Yixin, FENG Lei, et al. Exploration of screening methods for characteristic air pollutants in chemical parks[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2023, 50(23): 104-106.
- [15] 杨一烽, 杜炯, 张欣. 国内地下式污水处理厂的发展现状和关键技术分析[J]. *净水技术*, 2021, 40(10): 101-106+117. YANG Yifeng, DU Jiong, ZHANG Xin. Development status and key technology analysis of underground wastewater treatment plants (UWWTPs) at home[J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(10): 101-106+117.
- [16] 施勤章, 王春妹. 关于反硝化深床滤池在污水处理厂提标改造工程中的应用[J]. *现代工业经济和信息化*, 2023, 13(4): 157-159. SHI Qinzhang, WANG Chunmei. Application of denitrification deep bed filter in wastewater treatment plant upgrading project[J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2023, 13(4): 157-159.
- [17] 张宁. 城镇污水处理厂节地技术研究与工程应用[J]. *城市道桥与防洪*, 2023(11): 126-129+320. ZHANG Ning. Research and engineering application of land saving technology for municipal wastewater treatment plant[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2023(11): 126-129+320.
- [18] 呼永锋, 梁梅, 张永祥, 等. A²O+MBR 工艺运行效果与碳排放特征研究[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(9): 4439-4446. HU Yongfeng, LIANG Mei, ZHANG Yongxiang, et al. Study on operation efficiency and carbon emission characteristics of A²O + MBR process[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(9): 4439-4446.
- [19] 郝晓地, 李季, 张益宁, 等. 污水处理行业实现碳中和的路径及其适用条件分析[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(12): 3857-3863. HAO Xiaodi, LI Ji, ZHANG Yining, et al. Analysis on the path and applicable conditions of carbon neutrality in wastewater treatment industry[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(12): 3857-3863.
- [20] LAW Y, JACOBSEN G E, SMITH A M, et al. Fossil organic carbon in wastewater and its fate in treatment plants[J]. *Water Research*, 2013, 47(14): 5270-5281.
- [21] 张静. 污水处理厂温室气体核算与减排途径研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2023: 23-24. ZHANG Jing. Study on greenhouse gas calculation and emission reduction in sewage treatment plants[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023: 23-24.
- [22] 郭盛杰, 黄海伟, 董欣, 等. 中国城镇污水处理行业温室

- 气体排放核算及其时空特征分析 [J]. 给水排水, 2019, 55(4): 56-62.
- GUO Shengjie, HUANG Haiwei, DONG Xin, et al. Calculation of greenhouse gas emissions of municipal wastewater treatment and its temporal and spatial trend in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(4): 56-62.
- [23] 曹晓蒙, 彭建平, 李轶斐, 等. 炭渣碱化焙烧模拟浸出液制备冰晶石 [J]. 材料与冶金学报, 2024, 23(3): 241-248. CAO Xiaomeng, PENG Jianping, LI Yifei, et al. Preparation of cryolite from simulated leaching solution of alkaline roasting of carbon dust[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2024, 23(3): 241-248.
- [24] 陈聪聪, 钱光磊, 谢陈鑫, 等. 双铝电极电絮凝处理高含氟地下水的影响因素及动力学分析 [J]. 环境工程学报, 2020, 14(5): 1216-1223. CHEN Congcong, QIAN Guanglei, XIE Chenxin, et al. Influencing factors and kinetics analysis of electrocoagulation with bipolar aluminum electrodes treating high fluorine groundwater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(5): 1216-1223.