

• 四川大学建校 130 周年特刊约稿 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202600765



本刊网刊

芯片行业“三废”排放及旋流过程强化新技术应用展望

王雪蒙¹, 魏傲松¹, 付鹏波¹, 汪华林^{1,2,3*}

(1. 华东理工大学 资源与环境工程学院, 上海 200237; 2. 三峡实验室, 重庆 400714;
3. 中国科学院 重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714)

摘要:随着芯片制造向高集成度和多层化发展,清洗、刻蚀、沉积和化学机械抛光等环节产生的废水、废气与固体废物呈现来源多、组分复杂、污染物尺度跨度大和资源回收难等特征,对污染物高效去除、深度处理及资源化利用提出了更高要求。本文以制造工序和污染物形态为主线,系统综述含氟、微细颗粒和高浓度有机物的废水,含酸碱、挥发性有机物和氟的废气,以及污泥、废有机溶剂和工艺废料等固/危废的治理与资源化技术,涵盖化学沉淀、混凝分离、膜分离、高级氧化、生物处理、湿法吸收、热氧化及分离回收等典型工艺。在此基础上,结合不同污染物的赋存形态和处理要求,分析各类治理技术的适用特点,并从多相分离、传质和传热机制出发,评估旋流过程强化的适配场景。综合分析表明,芯片行业“三废”治理正由末端达标排放向分类收集、分质处理、深度回用和资源回收转变。依托颗粒预排序及短路流调控构建的高效微旋流器,可用于废水/废气中微细颗粒/油滴分离与工艺废料分选;旋流吸收器中吸收剂液滴自转—公转耦合形成内循环,强化吸收传质;旋流场下颗粒高速自转—公转产生耦合振荡离心力,可强化颗粒孔道内物质分离,实现污泥低温快速干化。未来可通过设备结构优化及与现有治理技术耦合,进一步提升其工程适用性,为芯片行业“三废”高效治理与资源化提供新的技术路径。

关键词:芯片制造;三废治理;资源化利用;旋流器

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2026)05-0101-20

近年来,数字经济浪潮席卷全球,集成电路产业作为现代信息技术的基石,其战略地位日益凸显。芯片广泛应用于计算机、通信、工业控制等领域,作为信息系统的核心部件,其制造水平已经成为衡量一个国家科技发展水平的重要手段。近年来,随着新一代信息技术的快速发展以及5G、人工智能、新能源汽车等新兴产业的兴起,对于芯片的需求也在不断增加,集成电路产业规模不断扩大^[1]。中国对芯片制造产业高度重视,在《国家集成电路产业发展推进纲要》的深入实施下,芯片制造产业不断升级,产能快速增长,工艺节点不断向更小尺寸、更高集成度的方向推进^[2]。与此同时,资源消耗与污染物排放问题突出,区域生态环境承载压力持续加剧。

芯片行业的核心制造工艺如图1所示,以高纯单晶硅为基础制备晶圆后,再反复进行“沉积—光刻—刻蚀—离子注入—抛光”等步骤,在晶圆上逐层构建晶体管和

金属线路。再利用介质层、通孔和金属布线实现各器件之间的电气互连。最后,通过封装实现芯片的电气连接、机械保护和散热,并经功能与可靠性测试后形成最终产品。晶圆制备是将单晶硅锭加工成具有规定厚度、平整度和表面质量的圆形硅片的过程,通常包括切片、倒角、研磨或磨削、化学腐蚀、化学机械抛光(CMP)、清洗等工序。其中,化学腐蚀和酸洗工序会产生含氟酸雾、硝酸雾及可能伴生的氮氧化物等酸性废气;腐蚀和清洗工序会产生含氟化物、硝酸盐、悬浮硅颗粒的废水;切片、倒角和研磨工序会产生硅粉、磨料及切削液混合形成的硅渣或研磨废泥;CMP工序会产生含胶体SiO₂等微细磨料、硅颗粒和化学添加剂的废抛光浆料。

薄膜沉积是在晶圆表面形成绝缘层、导电层或保护层等功能薄膜的关键工艺,主要分为物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)两类,其中CVD因涉

收稿日期:2026-08-18 修回日期:2026-09-03 网络出版日期:2026-09-07

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(C类)(52600101)

作者简介:王雪蒙(2003—),女,硕士生。研究方向:工业废水物化处理与资源化。E-mail:1132455330@qq.com

* 通信作者:汪华林,教授,中国工程院院士,E-mail:wanghl@ecust.edu.cn

及复杂的化学反应而成为污染控制的重点。在CVD过程中,会向反应腔通入 SiH_4 、 NH_3 等特种气体,在高温或等离子体辅助下发生化学反应沉积固态薄膜。此过程会产生未完全反应的源气体及 HCl 、 H_2 等反应副产物。此外,定期使用 NF_3 、 SF_6 等气体清洗沉积腔室内壁

的薄膜残留时,还会排放出具有极高温室效应的全氟化合物废气。反应腔室内壁、电极等部件上非期望生长的薄膜,因应力剥落形成碎屑颗粒物,需定期开腔清理形成固废,其主要成分与目标薄膜相同,如 SiO_2 、 Si_3N_4 等^[3]。



图1 芯片核心制造过程及其典型污染物

Fig. 1 Core chip manufacturing processes and their typical pollutants

光刻是芯片制造中将电路图形转移到晶圆表面的关键工艺,目的是为后续刻蚀、离子注入和薄膜沉积等步骤确定加工区域。其主要过程包括涂胶、烘烤、曝光、显影和清洗。在光刻过程中,会使用六甲基二硅氮烷(HMDS)、丙二醇甲醚醋酸酯(PGMEA)、异丙醇等增黏剂、溶剂和清洗剂,因此,排放的废气以挥发性有机物(VOCs)为主,并可能伴有少量酸性或碱性气体。显影和清洗环节会产生含残留光刻胶、有机溶剂及四甲基氢氧化铵(TMAH)等显影剂的废水。此外,废光刻胶、废显影液和废溶剂,以及沾染化学品的擦拭

布、滤芯和包装容器等,会形成具有一定毒性和易燃性的危险废物,需分类收集并进行专门处置。

刻蚀是芯片制造中按照光刻胶上的电路图形、有选择地去除晶圆表面材料的关键工艺,目的是将光刻形成的图案转移到硅、二氧化硅、氮化硅或金属薄膜上,主要分为湿法刻蚀和干法刻蚀两类。湿法刻蚀利用氢氟酸、磷酸、硝酸等化学溶液溶解薄膜材料,操作相对简单,但会产生含氟离子、酸碱物质、重金属及悬浮物的刻蚀废水^[4]。干法刻蚀则向反应腔内通入 CF_4 、 CHF_3 、 C_4F_8 、 SF_6 、 Cl_2 、 BCl_3 或 HBr 等气体,以实现精细

图形加工。该过程会产生尾气,主要包括未完全反应的含氟、含氯或含溴气体,以及反应生成的 SiF_4 、 HF 、 HCl 等酸性或腐蚀性副产物^[5]。此外,刻蚀反应产生的聚合物和微细颗粒会附着在设备中,设备清洗和维护过程中还会产生含氟化物、金属化合物及光刻胶残留的固体废物。随着芯片尺寸不断缩小,干法刻蚀已成为先进半导体制造中的主要刻蚀方法。

离子注入是调节硅片导电性能的关键工艺,将 BF_3 、 PH_3 、 AsH_3 等特种气体通入离子源,在电场作用下生成含硼、磷或砷的带电离子,将其注入晶圆以形成特定的掺杂区域。该过程排放的主要污染物为未完全使用的 BF_3 、 PH_3 和 AsH_3 等残余气体。设备维护时,清洗设备可能产生含氟、磷、砷等污染物的清洗废液,同时产生废真空泵油、废零部件和沾染物等固体废物。

晶圆清洗是芯片制造中重复次数多、用水量大的湿法工序,目的是去除晶圆表面的颗粒、有机物、金属杂质和前道工艺残留,保证后续加工的精度和芯片良率。根据污染物类型不同,清洗过程会使用超纯水以及硫酸、过氧化氢、盐酸、氨水、氢氟酸等化学试剂,产生大量含酸、碱、氟化物、氨氮、金属离子、颗粒物及少量有机物的废水;使用含有机溶剂的清洗剂时,还会产生相应的有机废液。设备运维时,会产生废滤芯、废擦拭物、沾染化学品的零部件和清洗废液等固体或液体废物。

金属化互联是形成电路导线和连接孔的关键工艺,通常先采用物理气相沉积、化学气相沉积等方法形成金属阻挡层、种子层和互连结构。该过程会产生残余工艺气体、含氟废气及少量酸雾;电镀、退镀和漂洗等环节则产生含铜、铝、钨等金属离子以及酸、络合剂和有机添加剂的废水。设备清洗和维护过程中还会产生废靶材、废阳极及沾染金属的废物。

封装测试是将已完成电路制造的晶圆加工成可使用芯片并检验其性能的最后环节,主要包括晶圆切割、芯片贴装、引线键合或倒装连接、塑封、清洗、打标以及电性能测试等步骤。切割和清洗过程直接产生含硅颗粒、金属碎屑及少量有机物的废水。贴装、焊接和塑封过程中使用胶黏剂、助焊剂、清洗剂和塑封树脂,会产生VOCs、焊接烟尘及少量颗粒物的废气。固体废物主要包括晶圆边角料、废芯片、废引线框架或基板、废焊料及其他生产耗材。测试环节通常不直接产生大量废水和废气,主要产生不合格芯片及废测试部件。

综上,芯片制造过程中产生的污染问题并非由单一工序导致,而是由多种工艺共性因素共同作用的结果。一方面,晶圆在生产过程中会经过多轮重复的清洗、沉积、刻蚀和平坦化操作,使污染物排放呈现出频次高、持续时间长的特点;另一方面,为满足纳米级别

尺度加工要求和超高洁净度要求,各工序中大量使用超纯水、强酸、强碱、有机溶剂和特种气体^[1,6]。这些污染物成分极其复杂,使分离和处理难度大大增加^[7]。此外,随着制造工艺不断向先进制程发展,芯片结构复杂度不断提高,刻蚀层数增加,单片晶圆需要经历更多次薄膜沉积、刻蚀、清洗和平坦化等循环工艺,使单位产品的污染物产生量不断增加^[8]。

基于此,本文以芯片制造核心工艺流程为主线,系统综述芯片行业废水、废气和固体废弃物的来源、排放特征及处理方法。在此基础上,进一步探讨旋流过程强化技术在芯片行业三废治理中的应用前景,以期对相关研究和工程实践提供参考。

1 芯片行业废水特征及处理方法

面对成分复杂、处理难度极大的废水,半导体行业已发展出一套精细化、多层次的分类收集、分质处理、梯级回用的水处理策略。其技术路线涵盖了从基础的物化处理到尖端的膜技术和高级氧化技术。在实践中,针对不同类型的废水,通常会设计专门的集成工艺路线。

1.1 含氟废水

含氟废水主要来自刻蚀和清洗工序,其水量和氟化物浓度受 HF 使用量、分类收集方式及冲洗倍率影响较大。已有研究表明,半导体及显示制造产生的高浓度含氟废水中氟化物浓度通常为 $400\sim 1\,200\text{ mg/L}$ ^[3,9-10]。实际工程中,应根据不同工序的废液组成和分质收集条件确定具体水量与污染负荷。依据《电子工业水污染物排放标准》(GB 39731—2020),电子工业废水中氟化物的直接排放和间接排放限值分别为 10 mg/L 和 20 mg/L 。部分半导体产业集聚地区进一步实施了更严格的地方排放要求,如江苏省《半导体行业污染物排放标准》(DB32/3747—2020)将氟化物间接排放限值收严至 15 mg/L ,同时设置了 8 mg/L 的特别排放限值。

工业含氟废水处理办法主要包括化学沉淀、吸附、离子交换和膜分离等,不同技术的适用性与废水氟化物浓度、水质组成及处理目标密切相关。对于高浓度含氟废水,钙盐沉淀法因工艺成熟、处理能力强和成本相对较低,是目前工程上应用较广的主体除氟技术。首先,调节 pH 并投加石灰、氯化钙等钙盐,使水中的氟离子与钙离子反应生成难溶的氟化钙(CaF_2)沉淀;再通过聚合氯化铝(PAC)、聚丙烯酰胺(PAM)等混凝、絮凝药剂强化 CaF_2 颗粒的聚集与固液分离^[10-11]。该方法对高浓度含氟废水具有较好的处理效果,但受 CaF_2 溶解平衡、共存离子及固液分离效果等因素影响,单独采用钙盐沉淀通常难以稳定满足较严

格的低氟排放要求,且会产生一定量的含氟污泥。
实际工程中,钙盐沉淀通常与混凝絮凝及多级固液分离单元组合使用,以提高高浓度含氟废水的处理稳定性。某芯片制造企业采用二级混凝沉淀工艺处

理含氟废水,设计进水氟化物浓度 $\leq 1\,000\text{ mg/L}$,反应 pH 控制在 $8.5\sim 9.5$,以 CaCl_2 为主要除氟剂,并投加 PAC 和 PAM 强化混凝絮凝,经二级处理后设计出水氟化物浓度 $\leq 10\text{ mg/L}$,具体工艺流程如图 2 所示^[12]。

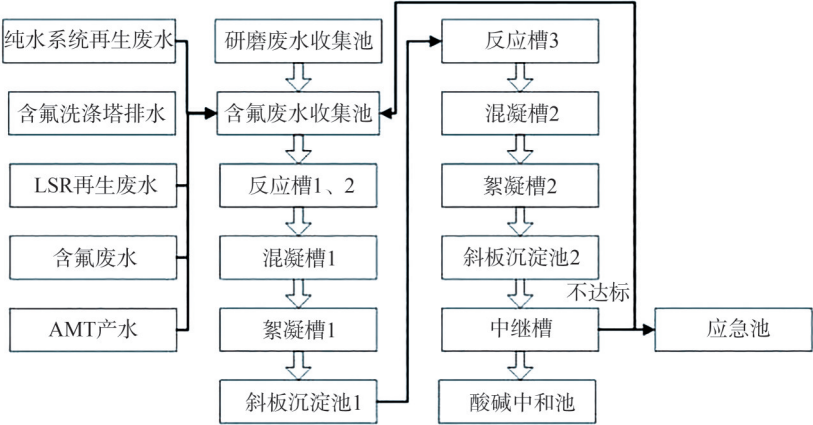


图 2 某芯片制造企业含氟废水处理工艺流程^[12]

Fig. 2 Treatment process of fluoride-containing wastewater in a chip manufacturing enterprise^[12]

对于化学沉淀后的中低浓度含氟尾水,可根据排放或回用要求进一步采用吸附、离子交换及膜分离等技术进行深度处理^[13]。吸附法设备简单,对低浓度氟具有较好的去除能力,适用于含氟尾水深度处理,但吸附容量及选择性易受共存离子影响,且存在吸附材料再生和处置问题;离子交换法具有较好的选择性和深度除氟能力,适用于水质相对稳定的低浓度含氟废水,但树脂再生及再生废液需进一步处理;纳滤(NF)、反渗透(RO)等膜分离技术具有较高的氟截留率和稳定的出水水质,更适用于具有废水回用需求的处理系统,但存在膜污染、浓水处置和运行成本较高等问题。因此,实际工程中宜

根据原水氟浓度、水质特征及排放或回用要求,选择主体除氟与深度处理相结合的组合工艺。

在实现稳定达标的基础上,含氟废水的资源化利用也逐渐成为芯片行业废水治理的重要发展方向。传统钙盐沉淀法虽然能够有效去除氟离子,但生成的 CaF_2 多以含氟污泥形式存在,后续仍需脱水、转运和处置,增加了固废管理压力,也限制了氟资源的进一步利用。为减少含氟污泥产生并提高氟资源利用率,结晶除氟技术逐渐被引入含氟废水处理过程^[14-15]。流化床诱导结晶除氟装置原理如图 3 所示,该技术通过晶种诱导、流化床结晶等方式,促进 CaF_2 晶体生长并

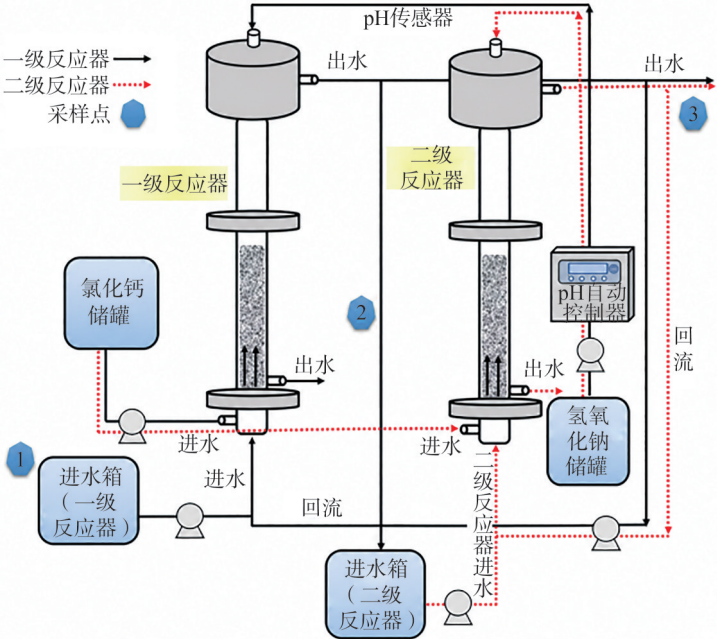
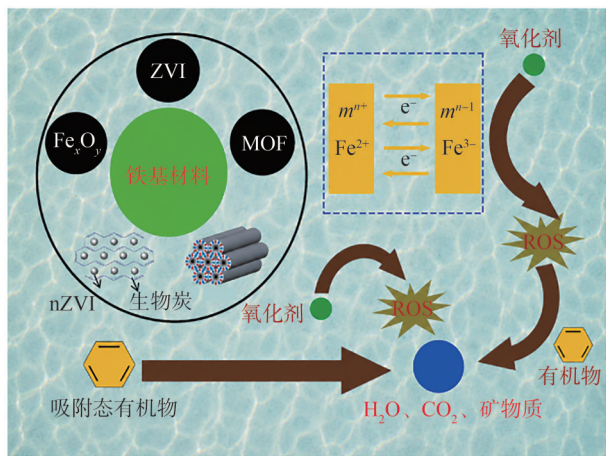


图 3 流化床诱导结晶除氟装置原理示意图^[16]

Fig. 3 Schematic diagram of fluoride removal by fluidized-bed induced crystallization^[16]

一工艺组合处理,TMAH 检测浓度可降至 0.1 mg/L 以下,COD 可控制在 30~100 mg/L 左右。高级氧化预处理破坏难降解有机物结构机制示意图如图 5 所示。



注: ZVI 为零价铁, nZVI 为纳米零价铁, MOF 为金属有机框架, m 泛指具有多种氧化态的金属元素, n 为金属离子的某一较高氧化态, $n-1$ 为金属离子的某一较低氧化态。

图 5 高级氧化预处理破坏难降解有机物结构机制示意图^[34]

Fig. 5 Schematic diagram of the mechanism of advanced oxidation pretreatment for destroying refractory organic matter structure^[34]

对于 NMP 废水,处理重点在于降低高浓度有机溶剂对生化系统的冲击。NMP 常用于光刻胶剥离、去胶和清洗过程,半导体废水中 NMP 浓度常超过 1 000 mg/L^[31],同时废水中还可能混有 MEA、TMAH 等有机物^[32],导致废水成分更加复杂。由于 NMP 具有一定生物抑制性,若未经预处理直接进入生化系统,容易造成污泥活性下降甚至系统失稳。因此,工程上通常先采用均质调节、碱解、铁碳微电解、Fenton 氧化或臭氧氧化等预处理方式,破坏难降解有机物结构,提高废水可生化性;随后再进入厌氧、A/O、MBR 等生化处理单元进行进一步降解。对于浓度较高且具备回收价值的 NMP 废液,也可优先考虑采用蒸馏、精馏或蒸发浓缩等方式进行溶剂回收,以降低后续废水处理负荷^[33]。

2 芯片行业废气特征及处理方法

芯片厂的废气治理同样面临巨大挑战,芯片制造过程工序复杂,气体种类繁多,不同生产环节所产生的废气类型有明显差异。芯片行业废气主要包括酸碱废气、挥发性有机物(VOCs)、含氟温室气体及有毒工艺尾气等,同时还伴随一定量的颗粒物排放^[35]。

2.1 酸碱废气

芯片制造过程中的酸碱废气主要来自湿法刻蚀、清洗、化学品储存及输送等环节。酸性废气主要包括 HF、

HCl、硝酸雾、硫酸雾等,碱性废气则以 NH₃ 为主^[36]。如表 2 所示,以年产 36 万片车规级 6 英寸芯片的公开环评资料为例,酸碱废气处理风量为 10 000 m³/h^[37]。未经末端处理的酸碱废气中,氟化物质量浓度约 7.6 mg/m³,氯化氢 5.7 mg/m³,硫酸雾约 1.0 mg/m³,氨气约 14.7 mg/m³。根据《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996),新污染源有组织排放中,氯化氢最高允许排放浓度为 100 mg/m³,氟化物(以 F 计)最高允许排放浓度为 9.0 mg/m³,硫酸雾最高允许排放浓度为 45 mg/m³。NH₃ 则依据《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—93),15 m 高排气筒的最高允许排放速率为 4.9 kg/h,具体执行要求还应结合地方相关排放标准。

表 2 酸碱废气典型污染物特征及排放限值
Tab. 2 Characteristics and discharge limits of typical pollutants in acid-alkali exhaust gas

污染物类型	污染物浓度/ (mg·m ⁻³)	风量/ (m ³ ·h ⁻¹)	GB 16297—1996 有组 织排放限值/(mg·m ⁻³)
氟化物	7.6		9
氯化氢	5.7	10 000	100
硫酸雾	1.0		45

酸碱废气具有强腐蚀性,对设备和人员安全构成威胁,因此通常需要在源头实现密闭收集并及时处理。芯片行业酸碱废气典型处理装置如图 6 所示,湿法洗涤是处理酸碱废气最常用且成熟的技术之一,通过喷淋塔或填料洗涤塔使废气与吸收液充分接触,利用气液传质和酸碱中和反应将气态污染物转移到液相中^[38]。对于 HF、HCl 等酸性废气,通常用 NaOH 溶液或 Ca(OH)₂ 溶液作为吸收液;对于 NH₃ 等碱性废气,则可采用稀硫酸等酸性吸收液进行中和处理。在实际工程中,酸性废气和碱性废气一般应分开收集、分别处理,以提高吸收效率并避免不同气体混合后产生二次反应或结晶堵塞问题。当酸性或碱性废气浓度波动较大、风量较高或组分较复杂时,单级洗涤塔可能难以保证长期稳定的处理效果,因此工程上常采用多级喷淋或多级洗涤系统强化气液接触和吸收反应^[35],并且在洗涤后通常还会设置除雾器去除夹带液滴,防止酸碱雾随气流排出,降低后续管道腐蚀和二次污染风险。通常,经处理后 HF 排放浓度低于 1 mg/m³,HCl 排放浓度低于 3 mg/m³,酸雾去除率超过 98%。

湿式洗涤法具有工艺成熟、处理效率高、适合大风量酸碱废气等优点,是半导体行业酸碱废气治理的基础工艺。但该方法也会产生含盐或含氟洗涤废液,需要与厂区废水处理系统协同处理。同时,由于酸碱废气腐蚀性较强,洗涤塔、风管、喷嘴和循环泵等设备通常需采用聚丙烯(PP)、纤维增强塑料(FRP)、聚偏氟

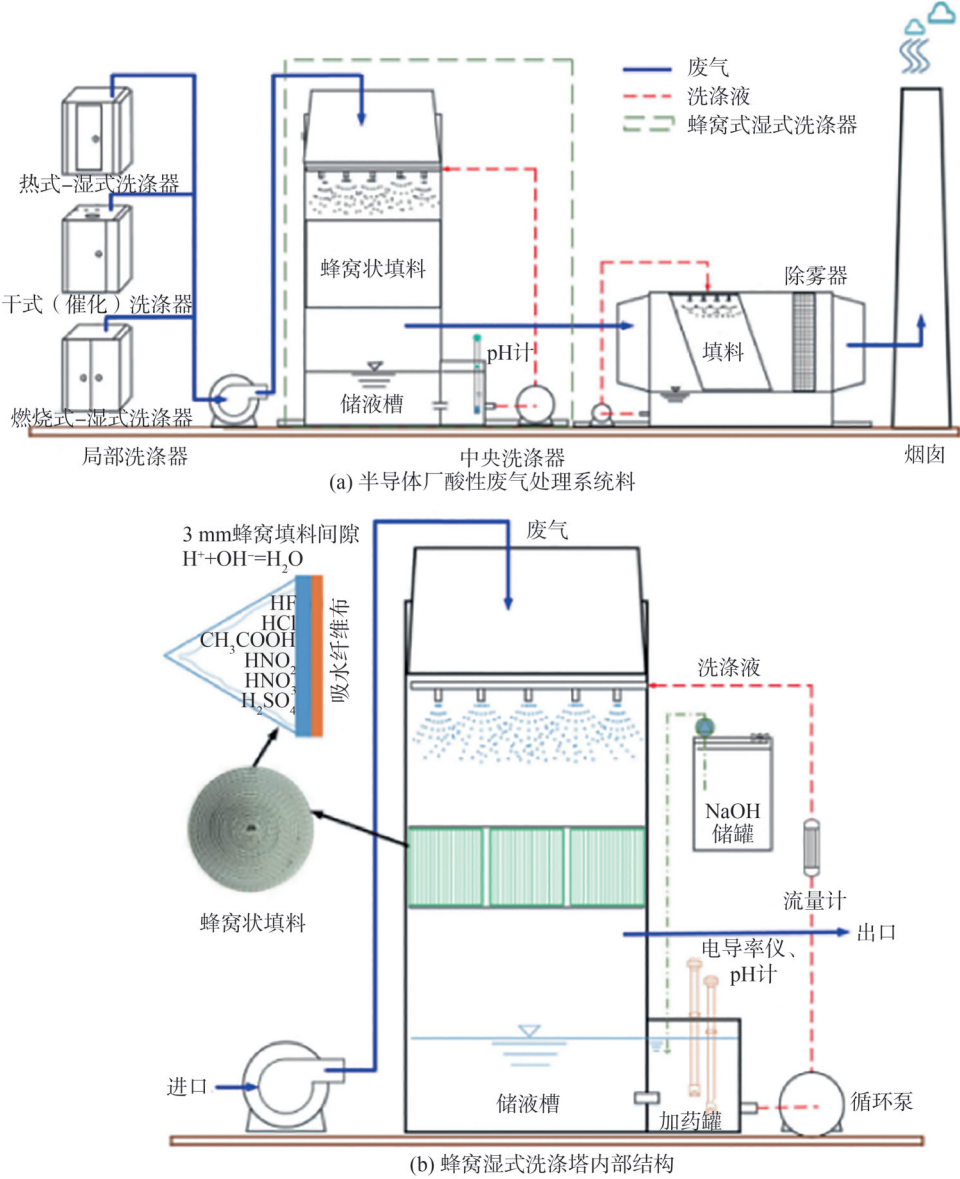


图6 芯片行业酸碱废气典型处理装置^[39]

Fig. 6 Typical treatment devices for acid and alkali exhaust gas in chip industry^[39]

乙烯(PVDF)等耐腐蚀材料,并通过pH、液位、压差和循环液电导率等参数进行在线监控,以保证吸收液浓度和系统运行稳定。

2.2 含挥发性有机物废气

芯片制造过程中的挥发性有机物(VOCs)来自光刻、清洗、涂胶等工序使用的有机溶剂挥发,主要包括异丙醇、丙酮、丙二醇甲醚醋酸酯(PGMEA)、N-甲基吡咯烷酮(NMP)等^[40]。该类废气风量大、浓度低、组分复杂并且排放波动明显。例如,Yang等^[41]的研究表明,上海中芯国际集成电路制造有限公司产生的废气中VOCs体积分数为 $50\times10^{-6}\sim91\times10^{-6}$,排放量达到27 751 m³/h。根据《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996),半导体行业VOCs(以非甲烷总烃计)有组织排放限值为120 mg/m³,厂界无组织排放

限值为2~4 mg/m³。

在工业上,常采用吸附浓缩与热力氧化的组合工艺对废气中的VOCs进行处理。废气首先经干式过滤、降温或除湿等预处理单元去除颗粒物、水雾及易堵塞组分,以保护后续沸石转轮;随后进入沸石转轮吸附区,VOCs被吸附浓缩,净化后的大风量气体排放;脱附区则利用热风将吸附的VOCs转化为小风量、高浓度废气,再送入蓄热式热力氧化炉(RTO)。RTO工作原理示意图如图7所示,经高温氧化后,废气最终分解为CO₂和H₂O^[40]。

沸石浓缩转轮与热力氧化的组合工艺可以同时平衡处理效率与运行成本,是目前VOCs治理的典型技术路线。但该工艺对前端预处理和运行维护要求较高,废气中的颗粒物、酸碱雾、光刻胶残留或高沸点有

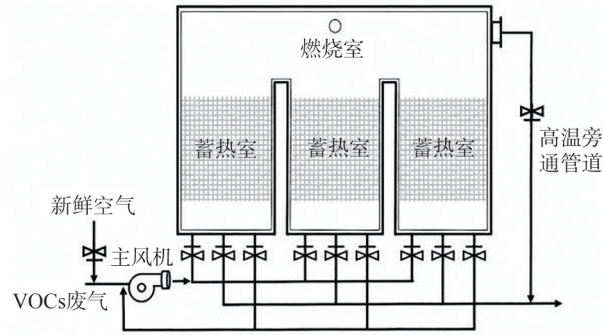


图 7 RTO 工作原理示意图^[42]

Fig. 7 Schematic diagram of RTO working principle^[42]

机物可能造成转轮堵塞或吸附性能下降,因此,通常配置多级过滤、温湿度控制、压差监测和安全联锁系统,以保障长期稳定运行。

2.3 含氟温室气体及有毒气体

含氟温室气体及有毒气体主要来自干法刻蚀、化学气相沉积、扩散、离子注入和外延等工序。含氟温室气体主要包括CF₄、C₂F₆、C₃F₈、SF₆和NF₃等,其化学性质稳定、分解难度大,且具有较高的全球变暖潜势,是半导体行业温室气体控制的重点^[43]。NF₃在治理装置入口的测试浓度可达3 800×10⁻⁶~4 100×10⁻⁶^[44]。有毒气体则主要包括SiH₄、PH₃、AsH₃等,虽然排放浓度通常不高,但具有易燃、自燃或高毒性特征,对生产安全和末端治理系统

可靠性要求较高。尽管中国暂未针对半导体制造行业排放的全氟化合物出台国家层面强制有组织排放浓度限值,但这类兼具极高全球增温潜势与超长环境持久性的污染物并非可无控直排。在项目准入与日常监管层面,依据《排污许可管理条例》及建设项目环境影响评价技术规范要求,地方生态环境主管部门会在环评批复与排污许可证核发环节,强制要求产排污工序配套等离子焚烧、高温热氧化等高效治理设施并明确最低去除效率。在温室气体管控层面,重点排放单位需按照《温室气体排放报告管理办法(试行)》及《温室气体排放核算与报告要求第24部分:电子设备制造企业》(GB/T 32151.24—2024)开展全氟化合物排放的强制核算与上报。

这类废气通常不能与普通酸碱废气或有机废气混合处理,而需要根据气体性质进行分质收集和专门处理。典型处理工艺如图 8 所示。对于 SiH₄、PH₃ 等易燃或有毒气体,工程上通常在设备端设置 POU 处理装置,通过燃烧、热氧化或干式吸附等方式进行就地处理。对于 AsH₃ 等含砷气体,则多采用专用干式吸附材料进行捕集,降低泄漏和人员暴露风险。对于含氟温室气体,由于其分子结构稳定,普通湿式洗涤难以直接去除,因此,通常需要先采用高温裂解、燃烧水洗、等离子体分解或催化分解等破坏性技术,将其转化为 HF、CO₂ 等较易处理的产物,再通过后端湿式洗涤或

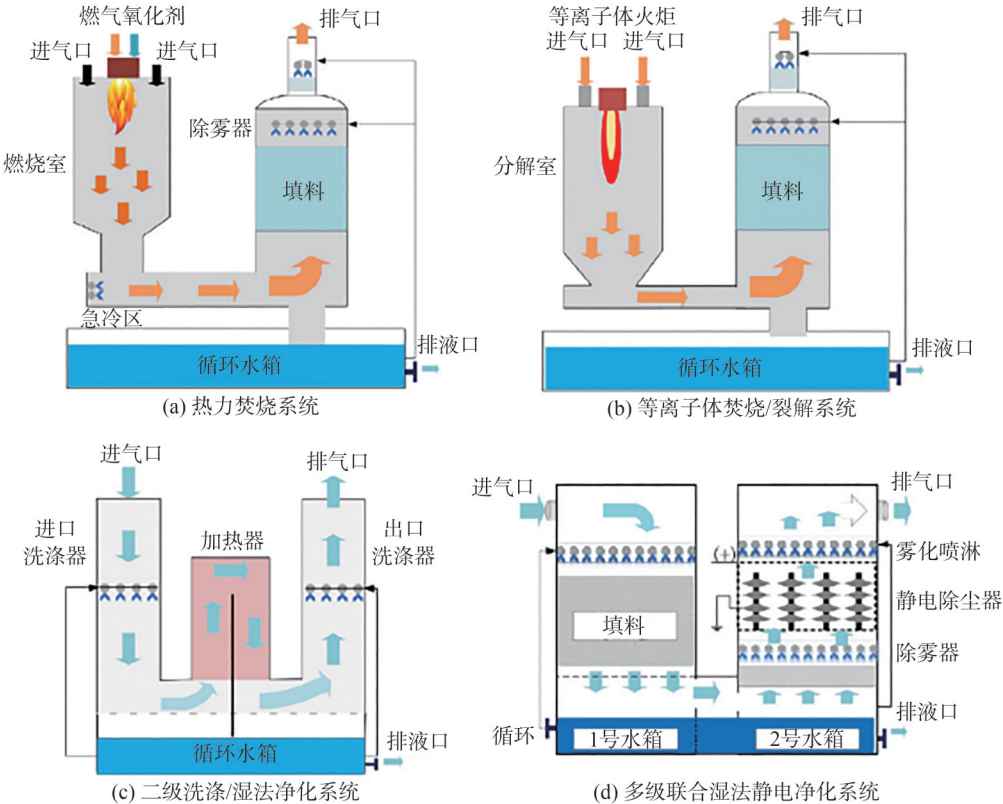


图 8 含氟温室气体及有毒气体典型处理工艺示意图^[35]

Fig. 8 Schematic diagram of typical treatment processes for fluorinated greenhouse gases and toxic gases^[35]

碱液吸收去除酸性副产物^[45]。该类处理过程不仅需要关注含氟温室气体的破坏去除效率,还需控制HF、NO_x等二次污染物的产生。

3 芯片行业固/危废弃物及处理方法

芯片制造过程中会产生大量固体废弃物,其中很大一部分属于危险废物,包括废化学品及其包装物、废水处理污泥、废抛光液、废光刻胶以及含重金属和贵金属的工艺废料等。如果对这些固体废弃物管理不规范,不仅会造成二次污染,还会给企业环境合规和安全生产带来较大压力^[46]。

3.1 废水处理污泥

废水处理污泥主要来自含氟废水、含重金属废水、CMP废水及综合废水处理过程。含氟废水经钙盐沉淀后会产生以CaF₂为主的含氟污泥;含铜、含镍等废水经化学沉淀后会产生含重金属污泥;而CMP废水处理污泥中则可能含有SiO₂、Al₂O₃、CeO₂等研磨颗粒及絮凝剂残留^[24]。以某8英寸MEMS产线为例,其设计产能为3万片/月,废水产生量约3 300 m³/d,污泥排放合计约1 040 t/a,含水率约40%^[47]。芯片制造废水处理污泥管理流程如图9所示,工程上一般先通过浓缩、板框压滤或离心脱水降低含水率,再根据《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)进行危险特性鉴别,根据鉴别结果采取资源化利用或合规处置^[48]。

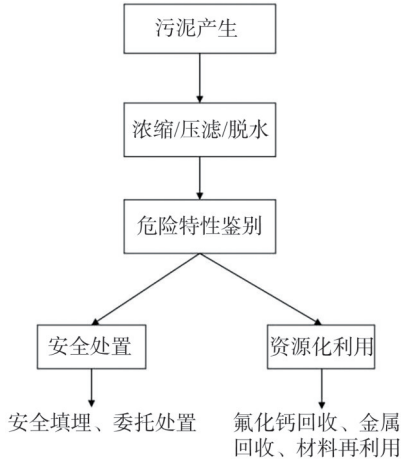


图9 芯片制造废水处理污泥管理流程
Fig. 9 Flowchart of sludge management for wastewater treatment in chip manufacturing

在固废减量和资源循环利用背景下,废水处理污泥的处置方式正逐步由末端填埋向资源化利用转变^[48]。对于含氟污泥,可重点回收其中的氟化钙;对于含铜、含镍等重金属污泥,可根据金属含量评估回收价值;CMP污泥中含有大量无机研磨颗粒,也可作为无机材料原料进行再利用^[49]。这类资源化路径不仅能够减少污泥最终处置量和危险废物管理压力,还可替代部分原生矿物或金属资源,降低处置成本,提升固

体废物的资源利用价值。

3.2 废有机溶剂

芯片制造过程中会大量使用有机溶剂,使用后往往会因水分、杂质和其他化学品混入而形成大量废有机溶剂。以某8英寸MEMS产线为例,其设计产能为3万片/月,废异丙醇、废去光阻液、NMP废液排放量分别为243、1 107和74 t/a^[47]。若直接将这些废有机溶剂外运处置或焚烧处理,不仅会增加危险废物处置压力,也会造成高纯溶剂资源浪费^[46]。因此,对废有机溶剂进行纯化回收,是减少污染负荷和提高资源利用率的重要措施。

废有机溶剂回收利用流程如图10所示。对于纯度较高、成分相对单一的废溶剂,通常采用精馏、吸附或膜分离等技术进行纯化处理,使其达到再利用标准^[50]。回收后的溶剂可重新应用于对纯度要求较低的生产环节,或作为工业原料进行再利用。通常,电子级异丙醇废液经纯化后可重新制备为同等级电子级异丙醇,实现化学品循环利用。溶剂回收不仅能够显著减少危险废物产生量,同时也有助于降低企业运行成本和环境负荷,是半导体行业推进循环经济的重要措施之一。

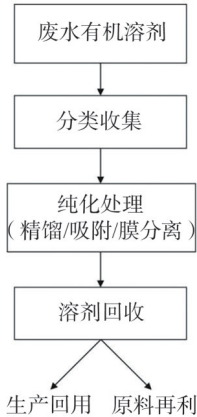


图10 废有机溶剂回收利用流程图
Fig. 10 Flowchart of recovery and reuse of waste organic solvents

3.3 工艺废料

工艺废料主要包括废晶圆片、切割边角料、不合格产品、废靶材、废研磨垫、废滤芯、废包装材料,以及部分受化学品污染的工艺耗材等。与废水处理污泥和废有机溶剂相比,工艺废料种类更加分散,不同废料的污染属性和资源价值差异较大,因此处理重点在于分类识别和分质管理。生态环境部关于集成电路制造项目的环评审批原则也提出,应按照减量化、资源化、无害化原则妥善处理固体废物,并重点关注危险废物种类识别是否遗漏。

对于废晶圆片、边角料和不合格产品,若未受到有毒有害化学品污染,可作为一般工业固废进行资源

化利用或委托合规单位处置。由于晶圆和芯片产品可能涉及企业技术信息和知识产权,实际工程中通常还需进行破碎、打磨或其他不可逆处理,防止产品信息外泄。对于废靶材、金属边角料等含有铜、铝、钛、钨等金属组分的废料,可根据金属含量和回收价值交由供应商回收或资源化单位再利用,从而减少原生金属资源消耗。

对于废研磨垫、废滤芯、废树脂、废擦拭材料以及受酸碱、有机溶剂或重金属污染的耗材,则需根据污染特性判断是否属于危险废物。若被认定为危险废物,应分类暂存于危废暂存间,并委托有资质单位进行处置。

4 芯片行业“三废”治理技术综合分析

4.1 现有治理技术的主要瓶颈

随着芯片制造工艺不断向高集成度和精细化方向发展,“三废”治理目标已由末端达标逐步向深度处理、资源回收和全过程控制转变。现有治理技术虽然能够针对不同污染物形成相应的处理路线,但在复杂多相体系分离、深度处理过程资源消耗以及污染物资源化等方面仍存在进一步提升空间。

芯片制造“三废”具有污染物种类多、粒径跨度大和赋存形态复杂等特点,其中,CMP废水中的微纳颗粒、有机废水中的乳液液滴以及废气中的细颗粒物等均涉及微细分散相的高效分离。此类污染物粒径小、体系稳定,单一常规分离过程往往难以满足深度处理要求,需要与混凝、过滤或膜分离等技术组合使用。同时,随着排放和回用要求提高,膜分离、高级氧化及热力处理等深度处理技术的应用日益广泛,但处理效果的提高通常伴随着膜材料、药剂和能源消耗增加,并可能产生浓水等新的处理需求。因此,如何在保证处理效果的同时提高分离和传递效率、降低资源与能源消耗,是现有治理体系需要进一步解决的问题。

此外,含氟废水、CMP污泥、含金属污泥及废有机溶剂等兼具污染属性和资源属性,传统末端处理过程中部分可利用组分最终进入污泥、浓缩液或废液,增加后续处置压力。目前,通过结晶回收 CaF_2 、废有机溶剂分离再生以及污泥中有价组分回收等方式,可在污染物减量的同时实现资源循环利用。然而,资源化过程仍受到目标组分含量、分离纯化难度、回收产品品质以及能源和药剂消耗等因素制约。因此,芯片行业“三废”治理技术的评价不宜局限于污染物去除效率,还应综合考虑处理规模、能源和药剂消耗、二次废物产生、资源回收及经济性等因素。

4.2 资源化利用及经济性分析

除污染物去除效果外,经济性也是影响芯片行业“三废”资源化技术工程应用的重要因素。资源化

过程的经济成本主要包括设备投入、能源和药剂消耗以及运行维护费用,其经济收益则主要来源于回收产品价值、原料替代以及废物减量所降低的末端处置费用。因此,资源化技术的经济可行性取决于资源回收收益与新增处理成本之间的综合平衡,并受到废物流组成、处理规模、资源回收率和产品品质等因素影响。

废有机溶剂是芯片制造过程中具有较高资源化潜力的危险废物之一。Lee等^[51]针对半导体行业多组分废有机溶剂开展了蒸馏回收过程的技术经济分析。其结果表明,与直接作为废物处置相比,采用蒸馏进行溶剂回收具有成本优势,其经济收益主要来源于回收溶剂对新鲜原料的替代;在进一步引入可再生能源后,可节省更多成本,同时较直接处置情景降低约89.4%的年碳排放。Chaniago等^[52]进一步对半导体废溶剂蒸馏过程进行优化,与常规蒸馏流程相比,强化蒸馏流程的能耗可降低约40.5%,表明分离过程强化可通过降低能源消耗,提高废溶剂资源化的经济可行性。对于组成相对简单的废溶剂,Lin等^[53]研究发现,异丙醇含量超过65%的半导体废溶剂经气提—冷凝处理后,异丙醇回收率最高可达约93%,所得溶剂具有进一步回用潜力。

5 旋流过程强化新技术在芯片行业的应用前景

5.1 旋流过程强化新技术及原理

随着芯片制造工艺不断向先进制程发展,废水、废气及固体废弃物的污染物组成日趋复杂,传统处理工艺逐渐暴露出设备体积大、传质效率有限、能耗较高及资源回收率不足等问题。因此,开发兼具高效分离、低能耗和资源化利用的新型过程强化技术,已成为芯片行业绿色制造的重要发展方向。旋流器作为一种典型的非热分离装置,因具备设备紧凑、停留时间短、处理能力强和能耗较低等优点,被广泛应用于化工与环境领域^[54]。旋流器发展历史如图11所示。

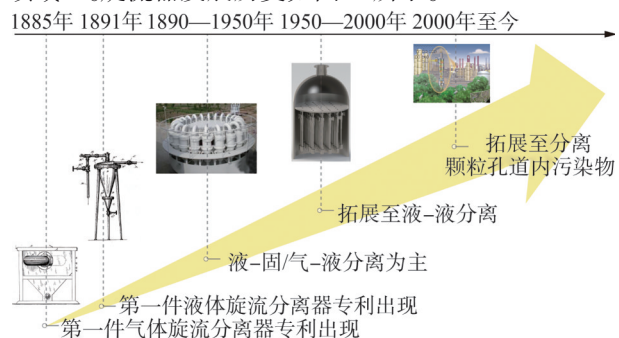


图 11 旋流器发展历史

Fig. 11 Development history of cyclone

旋流器的历史可以追溯到 19 世纪末。受气体中固体颗粒物的分离、气体除尘等需求驱动^[55-56],美国工程师 John M. Jackson 发明了气固旋流器,并于 1885 年公开授权,这也是世界上第一件旋流器的专利^[57-58]。随后,在 1891 年,第一件液体旋流器的专利被公开,旋流器被用于去除水中的固体颗粒^[59]。在 20 世纪初,由于旋流器分离精度的限制,旋流器主要被用于具有高密度差的离散相和连续相的分离,如气固分离、液固分离、气液分离。随着工业技术的进步和旋流器在实践中的应用逐渐成熟,旋流器的结构和性能得到了进一步的优化^[60-61]。在二十世纪中后期,旋流器的应用被拓展至低密度差的液-液分离^[62]。

5.1.1 结构优化对旋流非均相分离性能的强化

非均相分离依然是旋流器的主要应用领域之一,研究人员正不断优化旋流器结构,力求进一步提高分离效率^[63]。Yuan 等^[64]针对传统螺旋顶旋流器相对于平顶旋流器分离效率的不足,在螺旋顶旋流器的环形空间中增加螺旋导叶。通过冷模实验和数值模拟评估新

型螺旋顶旋流器的性能,并与传统平顶和螺旋顶旋流器进行比较。结果表明,与平顶旋流器相比,新设计的旋流器压降降低了 20% 以上,分离效率提高 2%~3%。Mazyan 等^[65]通过在传统旋流器的锥形部分增加切向室来提高固气分离效率。增加切向室可增强锥形部分壁附近颗粒的分离,从而提高整体分离效率,特别是对于直径 1~3 μm 的小颗粒。颗粒预排序旋流器示意图如图 12(a)所示。Fu 等^[66]通过在传统旋流器入口添加一个柱状的颗粒预排序器来提高旋流器的分离效率。柱状的颗粒预排序器使较小的颗粒从传统旋流器矩形入口的径向外侧和轴向下侧进入旋流器,从而提高了传统旋流器的颗粒分离效率,尤其是在分离 $\text{PM}_{2.5}$ 方面,耦合颗粒预排序器的旋流器的 $\text{PM}_{2.5}$ 分级效率超过 80%。环隙溢流旋流器示意图如图 12(b)所示。Zhang 等^[67]提出了基于短流主动控制的溢流微通道微型水力旋流器,用于润滑油中微粒污染物的超净分离。溢流微通道减少了高达 72.4% 的短流。当溢流微通道宽度与涡流探测器直径之比为 0.21 时,对于大于 9.8 μm 的微粒,最大

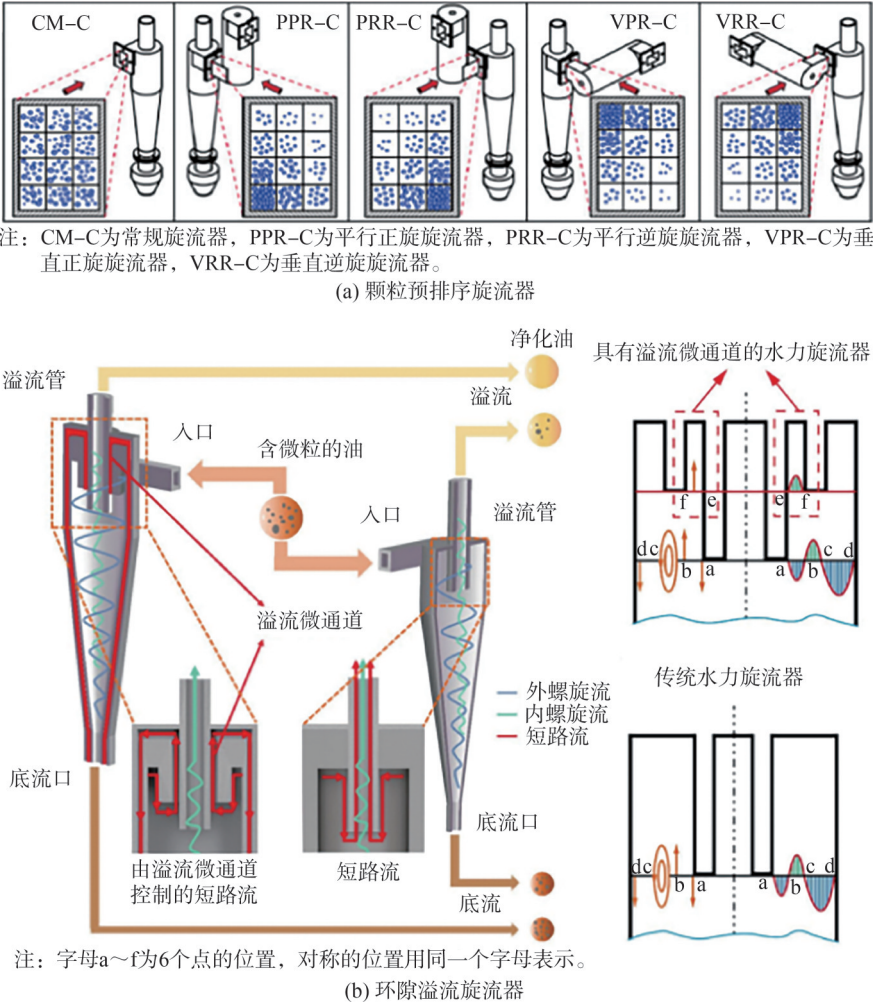


图 12 结构优化对旋流非均相分离性能的强化^[66-67]

Fig. 12 Enhancement of heterogeneous separation performance in cyclones through structural optimization^[66-67]

数分离效率和质量分离效率都可达99.98%。

5.1.2 旋流振荡强化颗粒孔道中“污染物”分离

随着旋流器内颗粒高速自转现象的发现^[68-69],旋流器的应用已不再局限于分散相与连续相之间的分离,而是进一步拓展至干化、砂滤介质再生等过程强化领域,用于强化孔道内污染物的分离,并应用于强化气液吸收等反应过程。基于颗粒自转和公转产生的离心力,气固旋流器被用于从多孔颗粒中分离液体,从而实现多孔固体颗粒的干化。固体材料干化的一般思路是通过各种手段将固体中的水从液态变为气态,然后实现与固体的分离。传统干燥固体材料的方法都需要克服水的气化潜热,但水的蒸发潜热高达2 258 kJ/kg,导致传统干燥方法的能量消耗巨大^[70-71]。因此,开发低能耗、高效率的干燥技术具有重要意义。

固旋流颗粒高速自转干化机理及操作参数对干化性能的影响如图13所示。图13(b)展示了颗粒停留时间为5 s时,载气温度对干化效果的影响, m_0 为初始总质量(g/g干污泥), c_0 为初始含水率。图13(c)展示了温度为90℃时进料速率对干化效果的影响。Li等^[72]使用气固旋流器在低载气温度(低于100℃)和气流流

速为15 m/s的条件下干燥脱水填埋污泥(DLS)和城市污水脱水污泥(UDSS)。DLS的水分含量从53%降低到6.85%,UDSS的水分含量从67%降低至18.92%。Fu等^[70]使用气固旋流器在气体温度低于100℃和气体流速为15 m/s的条件下干燥褐煤,将褐煤的水分含量从45.1%降低到15.2%,实现了褐煤的低能耗、高效率干燥。此外,Zhang等^[73]用气固旋流器干化了高含水率的石膏泥浆。Hayashi等^[74-75]使用热喷射干燥器在气体温度为300℃和气体流速为115~145 m/s的条件下干燥有机污泥。水分含量从大约80~85%降低至15%~25%。Lähdeniemi等^[76]使用旋流器在气体温度为60℃的条件下干燥脱墨污泥,将水分含量从32.1%降低至1.1%~3.7%。Mäkelä等^[77]使用旋流器在入口空气温度为60~90℃的条件下完成了混合森林工业生物污泥的干燥。Grimm等^[78]使用旋流干燥器在入口空气温度为35~85℃和入口空气速度为50~85 m/s的条件下干燥纤维素纤维废料。此外,Grimm等^[79]使用旋流干燥器在入口空气温度为90℃和入口空气速度为110 m/s的条件下干燥纸浆和造纸厂的废水处理化学污泥。

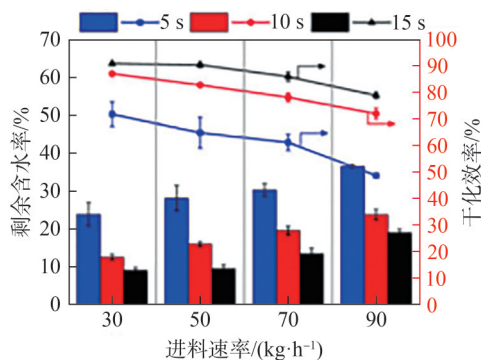
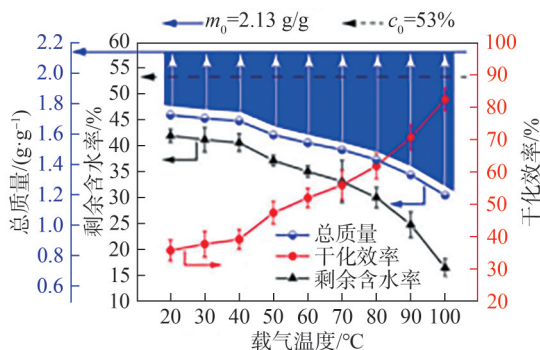
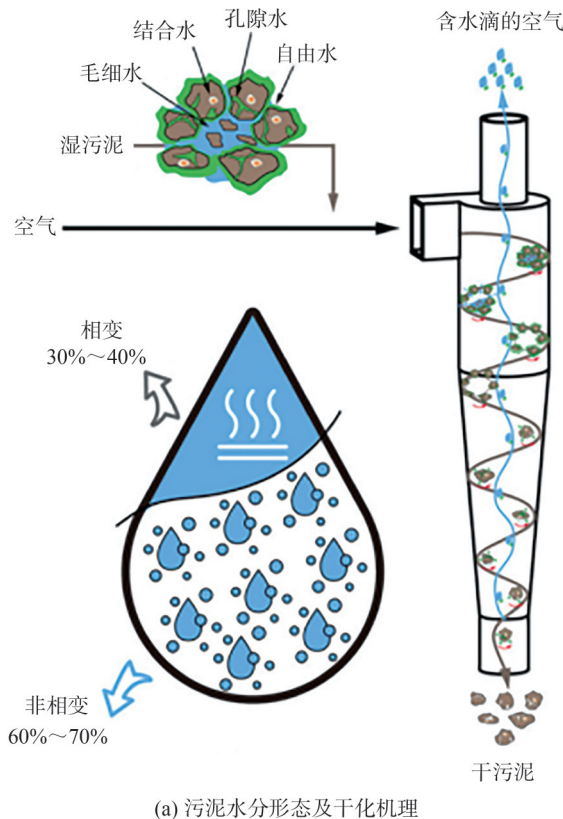


图13 气固旋流颗粒高速自转干化机理及操作参数对干化性能的影响^[72]

Fig. 13 Drying mechanism of high-speed particle self-rotation in a gas-solid cyclone and effects of operating parameters on drying performance^[72]

液固旋流器被用于从多孔颗粒中分离污染物,以实现污染物资源化或者颗粒净化。Li^[80]和Huang^[68]

等使用液体微型旋流器去除废催化剂中的油,将催化剂中的油含量从约30%降低至9%,脱油效率超过

70%。Li 等^[81]研制了一种轴流式水力旋流器脱附催化

剂表面的油,实现催化剂的活化,使催化剂中两种

典型油的含量分别从 55.0% 和 38.8% 降低至 11.4% 和

16.1%。Yang 等^[82]将轴向水力旋流器的内置在沸腾床

来实现催化剂的原位活化,并发现增加流速和减小

涡流探测器插入深度会增加颗粒的公转速度,从而

提高催化剂孔隙和表面油的离心力,强化油相的分

离。旋流器还被集成到颗粒过滤器顶部构成微通道

分离器,通过强化颗粒运动,使附着于过滤介质表面

或孔隙中的小颗粒脱离,从而提高过滤介质的再生

能力^[83-85]。此外,通过调控颗粒亲疏水的性质,构建

异质颗粒床层,微通道分离器还可同步实现水中游

离油滴的分离^[85]。液固旋流颗粒高速自转强化颗粒

净化过程如图 14 所示。

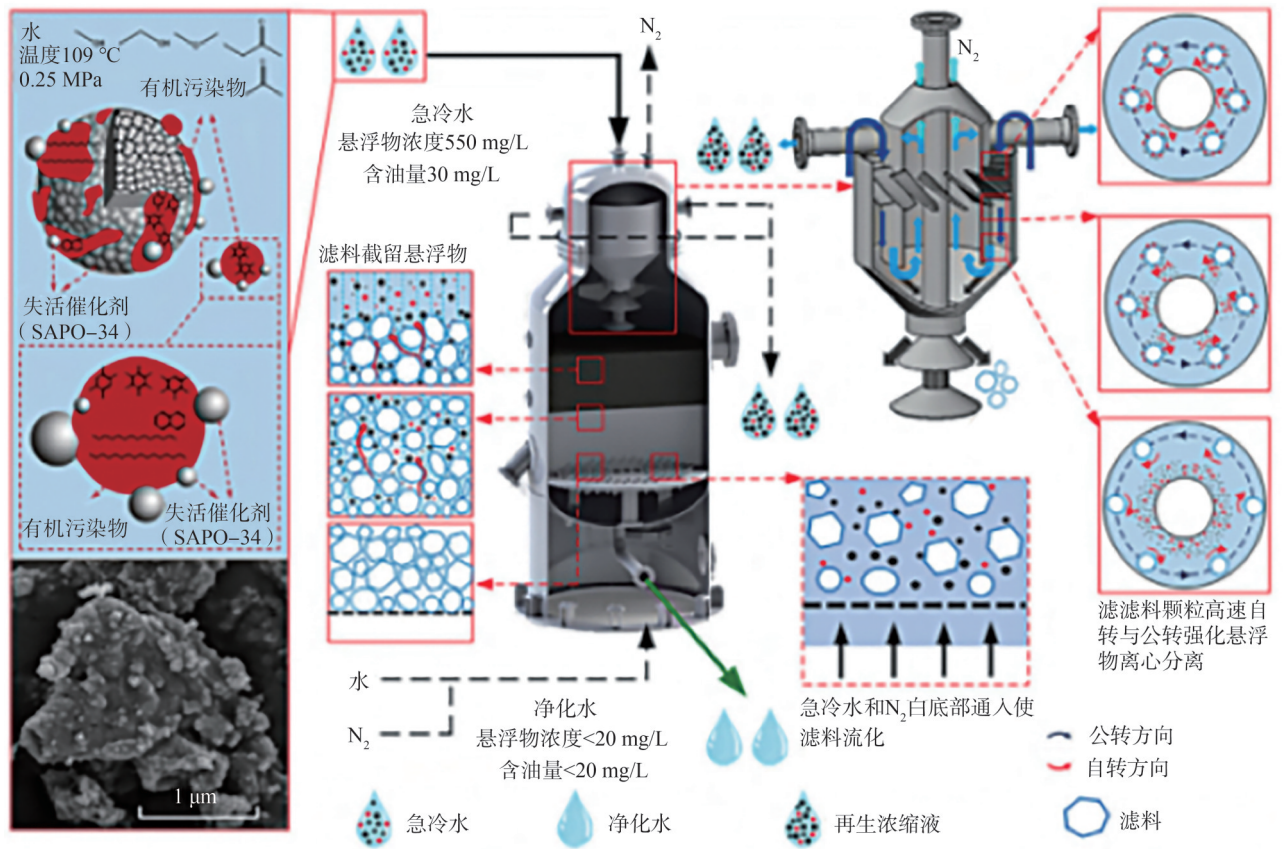


图 14 液固旋流颗粒高速自转强化颗粒净化过程^[83-85]

Fig. 14 Enhancement of particle purification process by high-speed self-rotation of liquid–solid cyclone particles^[83-85]

过 95%, 进一步为液滴高速自转强化界面更新和气

液传质的机制提供了实验依据。

气液旋流器液滴自转强化吸收过程如图 15 所

示。基于液滴“颗粒”在旋流器中的高速自转,气液旋

流器拓展为兼具液相微分散、气体吸收和化学反应

功能的过程强化装置^[86]。

Wang 等^[87]将气旋–液体射流吸收分离器用于湿

法烟气脱硫,采用 NaOH 和 Na₂CO₃ 溶液时,SO₂ 最高

脱除效率分别达到 85% 和 77%。围绕旋流场内液滴

运动与传质之间的关系,Duan 等^[88]进一步提出了水

力射流旋流器,并观察到液相微元在分散过程中发

生公转与自转耦合运动,研究认为,液滴自转引起

的表面更新以及界面振荡有助于增大有效相际面积、

降低液膜传质阻力。Tao 等^[89]则通过 CFD、高速摄像

和 CO₂ 吸收实验,直接研究了胺液微滴的预自转及

其传质效应,随着气体流量增加,液滴的自转和公转

速度显著提高,装置对低浓度 CO₂ 的捕集效率可超

综上所述,旋流器技术自 19 世纪末诞生以来,经

历了不断的发展和优化,逐步从早期的工业粉尘控制

领域扩展到更广泛的工业分离应用中。它的高效分离

能力、简单可靠的设计和广泛的适应性,使其成为了

现代工业不可或缺的一部分。如今,随着技术的进步,

旋流器在废水净化、废气治理及固体废弃物资源化利

用等领域中的应用前景依然广阔^[90]。对于芯片制造

过程中大量存在的微米级颗粒、纳米颗粒、乳化液滴、

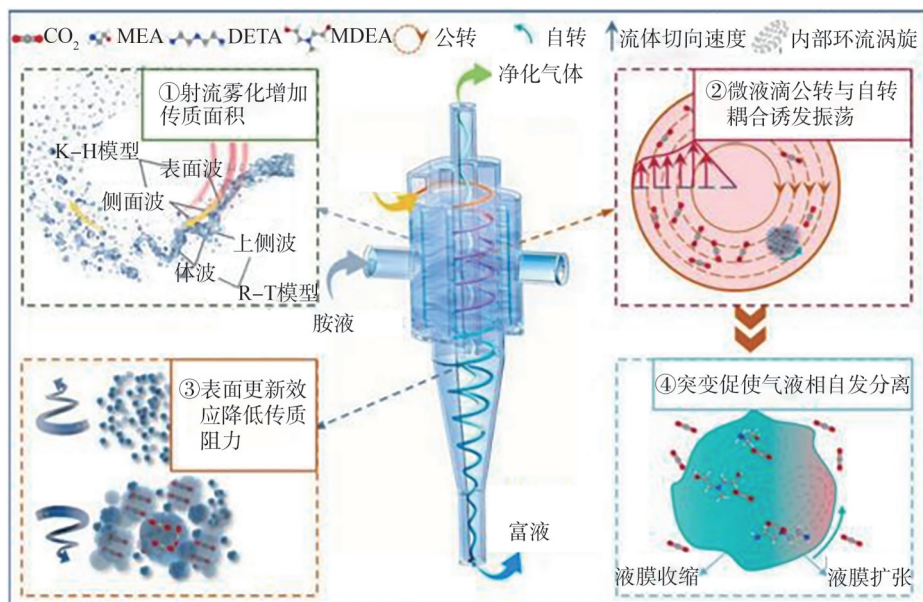
VOCs、酸性气体以及高价值化学品等污染物,旋流强

化技术能够充分发挥强化分离和强化传质优势,在提

高污染物去除效率的同时兼顾资源回收与能耗降低,

有望为芯片行业绿色制造和低碳发展提供新的技术

思路。

图 15 气液旋流器液滴自转强化吸收过程^[86]Fig. 15 Enhancement of absorption process by droplet self-rotation in gas-liquid cyclone^[86]

5.2 旋流强化技术在芯片“三废”处理中的应用前景

芯片制造废水通常采用分类收集和分质处理,不同废水支路的水量、污染物形态及处理负荷存在差异,因此旋流强化技术的应用方式和处理规模也应有所区别。对于含有大量微细颗粒的CMP废水,可采用超净环隙旋流器进行快速固液分离,并根据处理水量采用多台并联或模块化运行方式,以降低后续处理单元的颗粒负荷;对于含氟废水,旋流技术更适宜与化学沉淀或结晶过程耦合,用于强化 CaF_2 颗粒的固液分离,其处理规模应与前端除氟单元相匹配;针对高浓度有机废水中的乳化态有机物,可利用旋流微通道强化液滴碰撞与聚并,促进乳化体系破乳,提高后续分离效率;对于各类水量较小或间歇排放的废水支路,则需综合考虑设备利用率、运行能耗及设备投资与维护成本,避免因处理规模过小导致单位处理成本增加。因此,旋流强化技术的工程应用应根据不同废水支路的水量、污染物赋存形态及处理目标合理确定应用位置和处理规模。

针对芯片制造废气中颗粒物、挥发性有机物及酸性气体等污染物共存,传质效率受限等问题,旋流强化技术具备显著的处理优势。微旋流分离器可用于去除废气中的微米级颗粒物,降低颗粒物进入后续处理单元造成堵塞或磨损的风险。旋流振荡吸收装置则可依靠强化湍流混合和界面更新,促进VOCs及酸性气体向吸收液快速迁移,提高吸收效率。上述单元既可根据污染物特性单独应用,也可组合形成多级强化处理工艺,以实现颗粒物与气态污染物的协同去除。

针对芯片制造过程产生的废有机溶剂、化学污泥及含重金属废渣等固废组分复杂、含水率高及资源回

收难度大等突出问题,旋流强化技术可通过热力耦合效应与界面调控机制,为减量化与资源化提供高效解决方案。对于废水处理污泥,可利用非相变旋流自转干化技术强化脱水过程,通过增强颗粒间传热传质,在较低能耗条件下实现污泥快速干化,减少后续运输和处置成本^[90]。对于废有机溶剂及部分可回收化学品,可结合旋流强化传热与传质过程,提高分离纯化效率,降低资源回收能耗。

需要指出的是,旋流强化技术在芯片行业的实际应用还需充分考虑其特殊工况的适配性。芯片制造废水及废气中常含HF等酸碱腐蚀性介质,对旋流设备的材质及长期运行稳定性提出了较高要求,可通过选用耐腐蚀材料或表面防护措施提高设备的耐蚀性能。对于CMP废水中的超细纳米颗粒,受颗粒尺度及表面稳定性的影响,单纯依靠旋流分离可能存在分离效率下降的问题,可通过优化旋流结构及操作参数,或与混凝、膜分离等技术耦合,提高超细颗粒的去除效果。此外,芯片制造对生产环境和回用水水质具有较高的洁净度要求,旋流设备在材料选择、密封性能及运行过程中还应避免颗粒脱落和二次污染。因此,未来需针对芯片行业高腐蚀性、超细颗粒及高洁净度等特殊要求,从耐腐蚀材料、设备结构和技术耦合等方面开展适配性优化,并结合不同废水支路的处理规模进一步明确旋流强化技术适用范围,以推动其在芯片“三废”处理中的工程应用。

6 结 论

随着集成电路制造工艺不断向先进制程演进,芯片行业在推动数字经济发展的同时,其资源消耗和环境问

题也日益受到关注。本文围绕芯片制造过程中废水、废气和固体废物的来源及污染特征,系统梳理了相关治理技术与资源化路径,并进一步讨论了旋流过程强化技术在行业内的应用潜力,以期对芯片行业全过程环境治理和绿色制造技术的发展提供参考。结论如下:

1)系统梳理了芯片制造废水、废气和固体废物的来源、污染特征及治理与资源化路径。行业已形成以分类收集、分质处理为基础的综合治理体系,治理目标正由末端达标排放转向源头减排、深度回用、资源回收和温室气体协同控制。然而,含氟污染物控制、微纳颗粒和乳化液滴分离、高浓度难降解有机物去除,以及污泥和废溶剂资源化仍是主要难点。随着制造工艺持续升级,污染物组成和排放特征将更加复杂,对处理系统的稳定性、能耗和全过程管理提出更高要求。

2)旋流过程强化技术通过构建强离心场,强化多相分离、界面更新及传热传质过程,可针对上述治理瓶颈与现有工艺进行耦合。在废水处理中,该技术可用于化学机械抛光微细颗粒分离、乳化体系破乳;在废气处理中,可强化颗粒物捕集和气-液吸收;在固体废物处理中,可用于污泥低温快速干化及可回收组分分选。因此,旋流过程强化技术更适合作为预处理、深度处理或资源化环节中的强化单元,而非对现有治理流程的整体替代。

3)现有旋流强化研究较多来自其他工业体系,其在芯片行业腐蚀性介质、超细颗粒、波动负荷及高洁净度要求下的适用性仍需验证。后续应重点开展连续化中试,系统评价分离效率、资源回收率、压力损失、能耗、二次废物、材料耐久性 & 长期运行稳定性,并结合技术经济评价和生命周期评价明确其适用边界。只有在兼顾处理效果、运行可靠性和环境经济效益的前提下,旋流过程强化技术才能由应用潜力走向芯片行业的规模化应用。

参考文献:

- [1] Quan Can. Current status and prospects of standardization of electronic grade chemicals[J]. Chemical Reagents, 2025, 47(9): 21–28. [全灿. 电子化学品标准化现状 & 展望[J]. 化学试剂, 2025, 47(9): 21–28.]
- [2] 工业和信息化部. 国家集成电路产业发展推进纲要[EB/OL]. (2014–06–26)[2026–08–18]. https://www.cac.gov.cn/2014-06/26/c_1111325916.htm?eqid=aa46d871000144da000000264619de0.
- [3] Sim J, Lee J, Rho H, et al. A review of semiconductor wastewater treatment processes: Current status, challenges, and future trends[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 429: 139570.
- [4] Tran D P, Bui X T, Nguyen H V, et al. Integrated approaches for high-efficiency treatment and resource recovery from semiconductor wastewater[J]. Journal of Water Process Engineering, 2026, 81: 109305.
- [5] Zhang Chengping, Quan Hengdao. Research progress on fluorine-containing electronic special gases for chip manufacturing[J]. Fine Chemicals, 2024, 41(2): 330–340. [张呈平, 权恒道. 芯片制造用含氟电子特气的研究进展[J]. 精细化工, 2024, 41(2): 330–340.]
- [6] Qin Lei, Chen Liang. Progress in the removal of trace organic impurities and moisture from ultra-clean and high-purity reagents[J]. Chemical Reagents, 2025, 47(9): 57–62. [秦磊, 陈亮. 超净高纯试剂中微量有机杂质和水分的脱除进展[J]. 化学试剂, 2025, 47(9): 57–62.]
- [7] Li Li, Yu Qingyun, Lin Kuoyi, et al. Scheduling of semiconductor manufacturing system[M]//Data-Driven Scheduling of Semiconductor Manufacturing Systems. Singapore: Springer, 2023: 1–24.
- [8] Ruberti M. The chip manufacturing industry: Environmental impacts and eco-efficiency analysis[J]. Science of the Total Environment, 2023, 858: 159873.
- [9] Eng C Y, Yan Dongning, Withanage N, et al. Wastewater treatment and recycle from a semiconductor industry: A demo-plant study[J]. Water Practice and Technology, 2019, 14(2): 371–379.
- [10] Sinharoy A, Lee G Y, Chung C M. Optimization of calcium fluoride crystallization process for treatment of high-concentration fluoride-containing semiconductor industry wastewater[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(7): 3960.
- [11] Sinharoy A, Chung C M. Fluoride removal from wastewater and potential for resource recovery: Comparative studies between different treatment technologies[J]. Environmental Engineering Research, 2024, 29(6): 240179–0.
- [12] Xie Xiansi. Design and research on wastewater treatment of an chip semiconductor factory[J]. Shanxi Chemical Industry, 2024, 44(10): 246–249. [谢先思. 某企业芯片制造的废水处理工艺设计研究[J]. 山西化工, 2024, 44(10): 246–249.]
- [13] Zhang Xinbo, Yang Yuanying, Ngo H H, et al. A critical review on challenges and trend of ultrapure water production process[J]. Science of the Total Environment, 2021, 785: 147254.
- [14] Li Chengwen. Treatment of high-concentration fluoride wastewater by fluidized bed crystallization method[D]. Changsha: Central South University, 2011. [李程文. 流化床结晶法处理高浓度含氟废水[D]. 长沙: 中南大学, 2011.]
- [15] Cao Shuqin. Mechanism study of calcium fluoride preparation by precipitation and induced crystallization of fluorine-containing wastewater[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2024. [曹书琴. 含氟废水沉淀-诱导结晶法制备氟化钙机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2024.]
- [16] Sinharoy A, Lee G Y, Chung C M. Process intensification

- for enhanced fluoride removal and recovery as calcium fluoride using a fluidized bed reactor[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, 25(9): 4646.
- [17] Yang G C C. CMP wastewater management using the concepts of design for environment[J]. *Environmental Progress*, 2002, 21(1): 57–62.
- [18] Lee H, Kim H, Jeong H. Approaches to sustainability in chemical mechanical polishing (CMP): A review[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2022, 9(1): 349–367.
- [19] Liu J C, Lien C Y. Dissolved air flotation of polishing wastewater from semiconductor manufacturer[J]. *Water Science and Technology*, 2006, 53(7): 133–140.
- [20] Lai C L, Lin S H. Treatment of chemical mechanical polishing wastewater by electrocoagulation: System performances and sludge settling characteristics[J]. *Chemosphere*, 2004, 54(3): 235–242.
- [21] Lin S H, Yang C R. Chemical and physical treatments of chemical mechanical polishing wastewater from semiconductor fabrication[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 108(1/2): 103–109.
- [22] Hu Nan, Shu Ting, Wu Zhaoliang, et al. BS12-assisted flotation for the intensification of SNPs separation from CMP wastewater using a novel flotation column[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 344: 788–796.
- [23] Qiu Yangbo, Ren Longfei, Xia Lei, et al. Investigation of fluoride and silica removal from semiconductor wastewaters with a clean coagulation-ultrafiltration process[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 438: 135562.
- [24] Ali Noman E, Ali Al-Gheethi A, Al-Sahari M, et al. An insight into microelectronics industry wastewater treatment, current challenges, and future perspectives: A critical review[J]. *Applied Water Science*, 2024, 14(4): 64.
- [25] Koito T, Tekawa M, Toyoda A. A novel treatment technique for DMSO wastewater[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1998, 11(1): 3–8.
- [26] Nurjanah I, Hsieh L C, Chiang Y H, et al. Energy saving in NMP(N-methyl-2-pyrrolidone) recovery process by numerical modeling[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, 31: 103218.
- [27] Innocenzi V, Zueva S B, Ippolito N M, et al. A review of the existing and emerging technologies for wastewaters containing tetramethyl ammonium hydroxide(TMAH) and waste management systems in micro-chip microelectronic industries[J]. *Chemosphere*, 2022, 307: 135913.
- [28] Chang K F, Yang S Y, You H S, et al. Anaerobic treatment of tetra-methyl ammonium hydroxide(TMAH) containing wastewater[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2008, 21(3): 486–491.
- [29] Lin S H, Kiang C D. Optimization of high-strength semiconductor wastewater by sequential Fenton oxidation and gas-induced ozonation[J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2005, 27(3): 225–232.
- [30] Innocenzi V, Zueva S B, Vegliò F, et al. Pilot-scale experiences with aerobic treatment and chemical processes of industrial wastewaters from electronics and semiconductor industry[J]. *Energies*, 2021, 14(17): 5340.
- [31] Chen Xiaowen, Wu Yinhu, Huang Nan, et al. Enhanced removal and facile mineralization of N-methyl-2-pyrrolidone(NMP) in semiconductor wastewater by VUV/UV/persulfate[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13(6): 120163.
- [32] Sun Jingjing, Wang Wenlong, Wu Qianyan, et al. Multi-stage AO optimization for nitrogen removal in semiconductor wastewater: Carbon source-driven biodegradation of organic amines(MEA, NMP, TMAH)[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 71: 107391.
- [33] Li Ningning, Han Xushen, Lv Haihui, et al. Biodegradation of N-methyl-2-pyrrolidone(NMP) in wastewater: A review of current knowledge and future perspectives[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 486: 144452.
- [34] Sun Wei, Wang Song, Yu Zhongchen, et al. Characteristics and application of iron-based materials in heterogeneous Fenton oxidation for wastewater treatment: A review[J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2023, 9(5): 1266–1289.
- [35] Lu H H, Lu Mingchun, Le T C, et al. Continuous improvements and future challenges of air pollution control at an advanced semiconductor fab[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2023, 23(5): 230034.
- [36] Yin Yilong, Yang Yi. Sustainable transition of the global semiconductor industry: Challenges, strategies, and future directions[J]. *Sustainability*, 2025, 17(7): 3160.
- [37] 安徽安芯电子科技有限公司. 年产 36 万片车规级 6 英寸 TVS、FRD 芯片设计制造项目环境影响报告表(公示稿)[EB/OL]. [2026–08–18]. <https://czkfq.chizhou.gov.cn/Content/show/734388.html>.
- [38] Chein H M, Aggarwal S G, Wu H H, et al. Field enhancements of packed-bed performance for low-concentration acidic and basic-waste gases from semiconductor manufacturing process[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2005, 55(5): 647–657.
- [39] Le T C, Hong G H, Lin Guanyu, et al. Honeycomb wet scrubber for acidic gas control: Modeling and long-term test results[J]. *Sustainable Environment Research*, 2021, 31(1): 21.
- [40] Chang Fengtang, Lin Y C, Bai H, et al. Adsorption and desorption characteristics of semiconductor volatile organic compounds on the thermal swing honeycomb zeolite concentrator[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2003, 53(11): 1384–1390.

- [41] Yang Ji, Chen Yufeng, Cao Limei, et al. Development and field-scale optimization of a honeycomb zeolite rotor concentrator/recuperative oxidizer for the abatement of volatile organic carbons from semiconductor industry[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(1): 441–446.
- [42] Yang Peng, Zhang Tao, Ling Zhongqian, et al. Regenerative oxidation technology for VOC treatment: A review[J]. *Energies*, 2025, 18(13): 3430.
- [43] Woo J, Min D K, Lee B J, et al. Measurement-based estimation of emission factors for CF₄, C₄F₆, and C₄F₈ in semiconductor etching under varying plasma conditions[J]. *Applied Sciences*, 2026, 16(10): 4746.
- [44] Lee B J, Yun S Y, Jeong I K, et al. Improving the measurement of characteristic parameters for the determination of GHG emissions in the semiconductor and display industries in Korea[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(15): 8834.
- [45] Aghamir F M, Momen-Baghdadabad A R, Salimi S S, et al. Decomposition of SF₆ by a plasma focus device[J]. *Physics Letters A*, 2023, 479: 128923.
- [46] Zheng Shouchang, Zhao Hui, Tian Hao, et al. Current status of resource utilization of waste organic solvents[J]. *Recycling Research*, 2024, 17(11): 30–33. [郑守昌, 赵辉, 田浩, 等. 废有机溶剂资源化利用现状分析[J]. *再生资源与循环经济*, 2024, 17(11): 30–33.]
- [47] 纳微砂磊国际科技(北京)有限公司. 8英寸MEMS国际代工线建设项目[EB/OL]. [2026–08–18]. <http://www.edri.net.cn/public/uploads/ueditor/file/20170216/1487210951975104.pdf>.
- [48] Lee T C, Liu F J. Recovery of hazardous semiconductor-industry sludge as a useful resource[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 165(1/2/3): 359–365.
- [49] Sidik F, Lin J L. Simultaneous detoxification and copper recovery from semiconductor sludge using a hybrid acidification-precipitation-electrosorption process[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2026, 14(5): 123508.
- [50] Zhou Qian, Wang Lan, Wang Tiantian, et al. Four-dimensional comprehensive evaluation of hazardous waste resource utilization technologies: A case study on waste organic solvent and heavy metal contained waste[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2025, 19(3): 539–547. [周倩, 王兰, 王甜甜, 等. 危险废物资源化技术四维综合评价: 以废有机溶剂及含重金属废物为例[J]. *环境工程学报*, 2025, 19(3): 539–547.]
- [51] Lee A, Naquash A, Lee M, et al. Exploitation of distillation for energy-efficient and cost-effective environmentally benign process of waste solvents recovery from semiconductor industry[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 841: 156743.
- [52] Chaniago Y D, Minh L Q, Khan M S, et al. Optimal design of advanced distillation configuration for enhanced energy efficiency of waste solvent recovery process in semiconductor industry[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 102: 92–103.
- [53] Lin S H, Wang C S. Recovery of isopropyl alcohol from waste solvent of a semiconductor plant[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 106(2/3): 161–168.
- [54] Ni Long, Tian Jinyi, Song Tao, et al. Optimizing geometric parameters in hydrocyclones for enhanced separations: A review and perspective[J]. *Separation & Purification Reviews*, 2019, 48(1): 30–51.
- [55] Saxena S C, Henry R F, Podolski W F. Particulate removal from high-temperature, high-pressure combustion gases[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1985, 11(3): 193–251.
- [56] Stern A C. The separation and emission of cinders and fly ash[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1937, 59(4): 289–296.
- [57] Finch J M. Dust collector: US325521A[P]. 1885–09–01.
- [58] Pan Jiake, Shen Qisong, Cui Xin, et al. Cyclones of different sizes and underflow leakage for aerosol particles separation enhancement[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280: 124379.
- [59] Bretney E. Water purifier: US453105A[P]. 1891–05–26.
- [60] Martínez A, Lara Y, Lisbona P, et al. Operation of a cyclonic preheater in the Ca-looping for CO₂ capture[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(19): 11335–11341.
- [61] Tsai C J, Liu Chunnan, Hung S M, et al. Novel active personal nanoparticle sampler for the exposure assessment of nanoparticles in workplaces[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(8): 4546–4552.
- [62] Al-Amr Z, Amori K E. Numerical investigation on oil/water separation by compact nozzle-axial hydrocyclone[J]. *International Journal of Heat and Technology*, 2022, 40(1): 71–80.
- [63] Qian Fuping, Wu Yanpeng. Effects of the inlet section angle on the separation performance of a cyclone[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2009, 87(12): 1567–1572.
- [64] Yuan Shiwei, Sun Guogang, Cao Gang, et al. Study of the performance and flow field of a new spiral-roof cyclone separator[J]. *Powder Technology*, 2024, 438: 119605.
- [65] Mazyan W I, Ahmadi A, Brinkerhoff J, et al. Enhancement of cyclone solid particle separation performance based on geometrical modification: Numerical analysis[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 191: 276–285.
- [66] Fu Pengbo, Wang Fei, Yang Xuejing, et al. Inlet particle-sorting cyclone for the enhancement of PM_{2.5} separation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(3): 1587–1594.
- [67] Zhang Tong, Li Jianping, Wei Aosong, et al. Ultra-clean separation of micro-particles in lubricant oil based on short-flow control of mini-hydrocyclone[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 304: 122370.
- [68] Huang Yuan, Li Jianping, Zhang Yanhong, et al. High-speed

- particle rotation for coating oil removal by hydrocyclone[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 177: 263–271.
- [69] Shi Dai, Huang Yuan, Wang Hualin, et al. Deoiling of oil-coated catalyst using high-speed suspending self-rotation in cyclone[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 210: 117–124.
- [70] Fu Pengbo, Yu Hao, Li Qiqi, et al. Cyclone rotational drying of lignite based on particle high-speed self-rotation: Lower carrier gas temperature and shorter residence time[J]. Energy, 2022, 244: 123005.
- [71] Zhang Y Z. Thermophysical interpretation of the latent heat of vaporization of water[J]. International Journal of Thermophysics, 1989, 10(4): 911–915.
- [72] Li Qiqi, Cheng Tingting, Lu Yufei, et al. Sludge low-temperature drying with mainly non-phase change in mere seconds based on particle high-speed self-rotation in cyclone[J]. Water Research, 2022, 224: 119092.
- [73] Zhang Xianggang, Wu Haijun, Ma Shenggui, et al. Flash drying of slurry-liquid sewage sludge based on avoidance of latent heat of phase change: Laboratory to pilot-scale evolution[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 480: 148371.
- [74] Hayashi N, Shimada S. Study on drying organic sludges by thermal jet dryer: Part 2: Characteristics of air-particle multiphase flow in thermal jet dryer[J]. Drying Technology, 2007, 25(12): 1935–1947.
- [75] Hayashi N, Shimada S. Study on drying organic sludges by thermal jet dryer: Part 1: Drying performance of thermal jet dryer[J]. Drying Technology, 2006, 24(12): 1601–1607.
- [76] Lähdeniemi A, Mäkelä M, Dahl O. Drying/fractionation of deinking sludge with a high-velocity cyclone[J]. Drying Technology, 2013, 31(4): 378–384.
- [77] Mäkelä M, Geladi P. Response surface optimization of a novel pilot dryer for processing mixed forest industry bio-sludge[J]. International Journal of Energy Research, 2015, 39(12): 1636–1648.
- [78] Grimm A, Elustondo D, Mäkelä M, et al. Drying recycled fiber rejects in a bench-scale cyclone: Influence of device geometry and operational parameters on drying mechanisms[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 167: 631–640.
- [79] Grimm A, Etula J, Salh R, et al. Slagging and fouling characteristics during co-combustion of Scots pine bark with low-temperature dried pulp and paper mill chemical sludge[J]. Fuel Processing Technology, 2019, 193: 282–294.
- [80] Li Jianping, Yang Xuejing, Ma Liang, et al. The enhancement on the waste management of spent hydrotreating catalysts for residue oil by a hydrothermal-hydrocyclone process[J]. Catalysis Today, 2016, 271: 163–171.
- [81] Li Jianping, Wang Yao, Chang Yulong, et al. Cold model testing of *in-situ* catalyst activation by swirling self-rotation in ebullated bed reactor for biomass pyrolysis oils hydrogenation[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 406: 126909.
- [82] Yang Zhenghao, Jiang Xia, Zhang Tong, et al. Research on the coupling principle of revolution and self-rotation of catalysts in a bio-oil hydrodeoxygenation ebullated bed reactor[J]. Fuel, 2024, 360: 130489.
- [83] Sun Yuxiao, Liu Yi, Chen Jianqi, et al. Physical pretreatment of petroleum refinery wastewater instead of chemicals addition for collaborative removal of oil and suspended solids[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123821.
- [84] Chen Jianqi, Wang Lu, Ma Shihao, et al. Separation of fine waste catalyst particles from methanol-to-olefin quench water *via* swirl regenerating micro-channel separation (SRMS): A pilot-scale study[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 152: 108–116.
- [85] Sun Yuxiao, Liu Yi, Xue Zhendong, et al. Self-rotation induced regeneration of filter media to enhance the oil-water separation in a microchannel filter[J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 53: 103857.
- [86] Wang Liwang, Duan Xiaoxu, Wang Yuyan, et al. Research and pilot-scale application of hydro-jet oscillation enhanced carbon capture technology[J]. Journal of Cleaner Production, 2026, 572: 148877.
- [87] Wang Yimou, Yang Xuejing, Fu Pengbo, et al. Application of gas cyclone-liquid jet absorption separator for flue-gas desulfurization[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, 17(11): 2705–2714.
- [88] Duan Xiaoxu, Cong Caijiao, Wang Liwang, et al. Spontaneous supergravity field drives liquid-phase microelements to enhance CO₂ capture through self revolution coupling[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 360: 131058.
- [89] Tao Pengcheng, Li Qiong, Fang Haojue, et al. High-speed pre-self-rotation of amine microdroplets in cyclones to enhance CO₂ capture[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 360: 131045.
- [90] Liu Junjie, Li Qiqi, Liang Yanan, et al. Low-temperature rapid drying of viscous sludge *via* non-phase change based on particle high-speed self-rotation and medium dispersion in cyclone[J]. Engineering, 2025, 50: 96–105.

【校友简介】



汪华林, 中国工程院院士, 三峡实验室主任、中国科学院重庆绿色智能技术研究院院长, 国家杰出青年科学基金获得者、教育部高层次人才奖励计划特聘教授, “污染物减排与资源化”科技部重点领域创新团队负责人。长期聚焦环境物理污染与控制(碳污协同减排与资源化利用)研究,

实现了颗粒旋流自转从现象发现到工程应用的突破,为全国燃油质量升级重点工程、“川气东输”骨干气源工程提供了低成本减污降碳关键环保技术和高端装

备。主编《碳中和概论》教材,获何梁何利青年创新奖,以第一完成人获国家科技进步二等奖2项、国家技术发明二等奖1项。

Waste Streams from the Chip Industry and Prospects for Novel Cyclone-based Process Intensification Technologies

WANG Xuemeng¹, WEI Aosong¹, FU Pengbo¹, WANG Hualin^{1,2,3*}

(1.School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2.Three Gorges Laboratory, Chongqing 400714, China;

3.Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

Abstract:

Significance Waste streams from chip manufacturing feature complex compositions, broad particle size distributions, diverse phase states, and considerable potential for resource recovery. Major treatment bottlenecks include the separation of micro- and nanoscale particles and emulsified droplets, the removal of high concentrations of refractory organic compounds, and the recovery of valuable components from fluoride-containing wastewater, sludge, and waste solvents. Conventional treatment can achieve pollutant removal, but advanced membrane, oxidation, and thermal processes often increase material, chemical, and energy consumption and may generate secondary waste streams. Improving multiphase separation and transport efficiency while reducing resource consumption is therefore essential. Cyclone-based intensification generates strong centrifugal fields that promote phase separation, interfacial renewal, and heat and mass transfer, providing a promising approach for enhancing existing treatment and resource recovery processes.

Progress Treatment and resource recovery technologies for major waste streams were reviewed according to manufacturing processes and pollutant characteristics. Wastewater mainly includes fluoride-containing wastewater, turbid wastewater represented by chemical mechanical polishing (CMP) wastewater, and high-concentration organic wastewater. High-concentration fluoride-containing wastewater generated during etching and cleaning generally contains 400–1 200 mg/L fluoride. Calcium salt precipitation together with coagulation and solid–liquid separation is commonly applied for fluoride removal. Adsorption, ion exchange, nanofiltration, and reverse osmosis can provide additional treatment routes when stricter discharge or reuse requirements apply. Crystallization offers a resource recovery route by converting dissolved fluoride into recoverable calcium fluoride (CaF_2) particles, thereby reducing the generation of fluoride-containing sludge. CMP wastewater contains nanoscale abrasives, colloidal silica, metal oxides, and organic additives. The geometric mean size of silica particles is approximately 100 nm, which contributes to colloidal stability and poor natural settling. Coagulation–flocculation followed by sedimentation or flotation can destabilize and separate these particles, whereas filtration and membrane separation can be used for advanced treatment and water reuse. High-concentration organic wastewater is mainly generated during photoresist development, stripping, and cleaning and may contain tetramethylammonium hydroxide (TMAH), N-methyl-2-pyrrolidone (NMP), dimethyl sulfoxide, isopropyl alcohol, and photoresist residues. Ion exchange, membrane separation, evaporation, or distillation can be used for relatively concentrated wastewater streams with simple compositions. For mixed wastewater with poor biodegradability, advanced oxidation coupled with biological treatment can improve biodegradability and enhance the removal of refractory organics.

Waste gas primarily contains acidic and alkaline gases, volatile organic compounds (VOCs), fluorinated greenhouse gases, toxic process gases, and particulate matter. Wet scrubbing removes hydrogen fluoride, hydrogen chloride, acid mist, and ammonia through gas–liquid contact and neutralization. VOC-containing exhaust from photolithography, cleaning, and coating is generally characterized by large flow rates, low concentrations, complex compositions, and fluctuating loads. Zeolite rotor concentration coupled with regenerative thermal oxidation is a typical treatment route for these streams. Fluorinated greenhouse gases such as CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , SF_6 , and NF_3 are chemically stable and difficult to remove using conventional wet scrubbing. Point-of-use treatment based on high-temperature decomposition, combustion, plasma decomposition, or catalytic decomposition can convert them into products suitable for subsequent wet scrubbing. Toxic gases such as SiH_4 , PH_3 , and AsH_3 require separate collection and specialized treatment. Solid waste mainly includes wastewater treatment sludge, waste organic solvents, and process residues. Fluoride-containing sludge, heavy metal sludge, and CMP sludge contain CaF_2 , metals, or inorganic particles with potential recovery value. Their management is shifting toward dewatering, volume reduction, valuable component recovery, and resource utilization. Waste organic solvents can be purified by distillation, adsorption, or membrane separation and subsequently reused. The feasibility of resource recovery depends on waste composition, treatment scale, recovery efficiency, product quality, and energy and chemical consumption. Accordingly, treatment technologies should be evaluated in terms of pollutant removal, resource recovery, secondary waste generation, and economic performance.

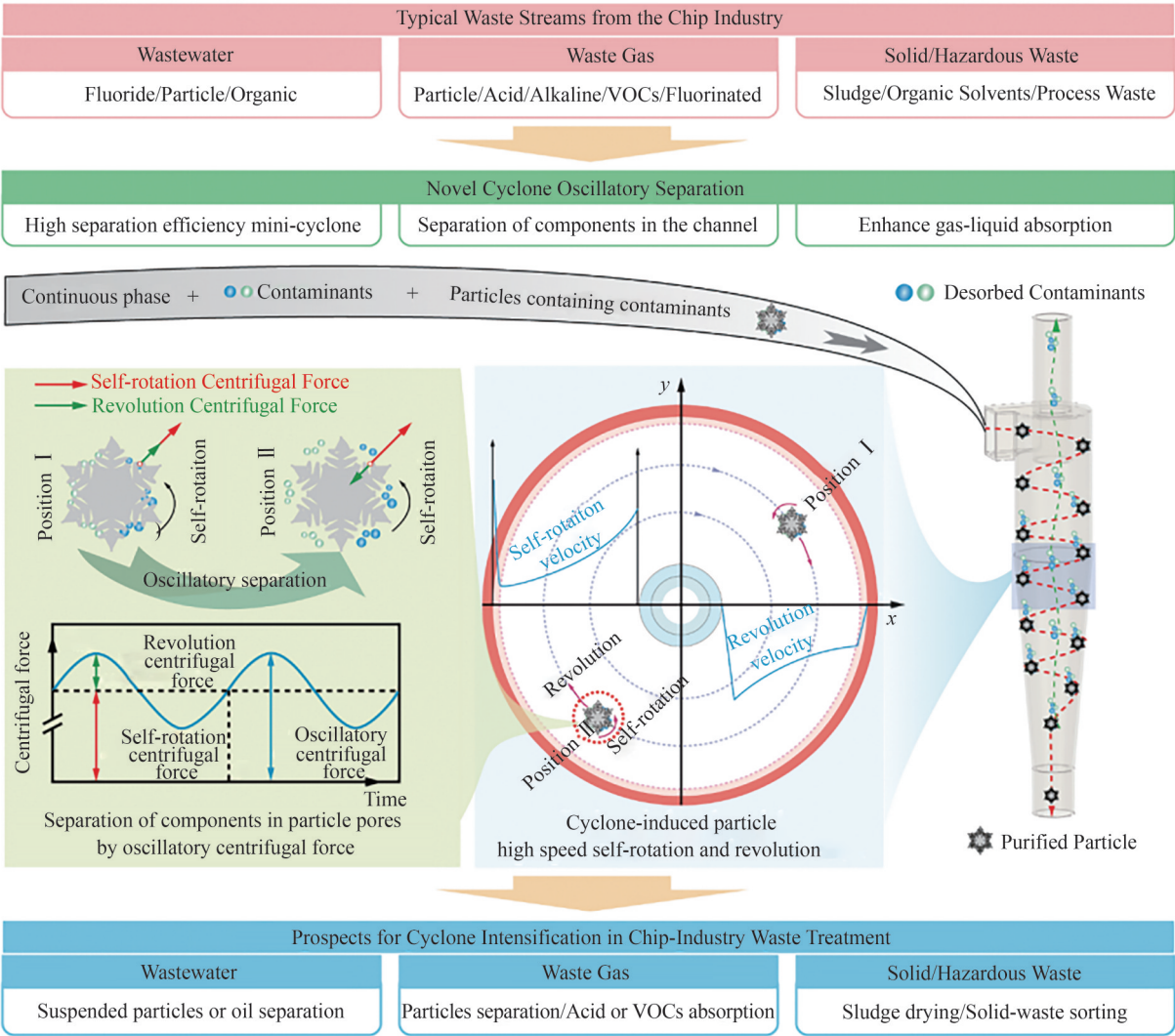
Cyclone intensification was further assessed from the perspectives of separation, mass transfer, and heat transfer. In wastewater treatment,

cyclone-based processes can enhance the separation of fine particles in CMP wastewater, solid–liquid separation of CaF_2 particles, demulsification of emulsified wastewater, and liquid–solid contact during adsorption. Meanwhile, in waste gas treatment, microcyclone separation and cyclone-enhanced gas–liquid contact can improve the capture of fine particles and interfacial mass transfer. For solid waste, high-speed particle self-rotation can intensify heat and mass transfer and accelerate sludge drying. These applications demonstrate the potential of cyclone intensification as an intensification unit for existing waste treatment processes.

Conclusions and Prospects Waste management in the chip industry is shifting from end-of-pipe treatment toward differentiated treatment, advanced water reuse, and resource recovery. Cyclone-based process intensification demonstrates promising potential for enhancing existing treatment processes rather than replacing entire treatment systems. Future research should focus on corrosion-resistant materials, separation of ultrafine particles, contamination control under intensive cleanliness requirements, process integration, and long-term operational stability. Pilot-scale validation under actual chip manufacturing conditions is also needed to evaluate treatment performance, energy consumption, economic feasibility, and engineering applicability, thereby supporting the practical implementation of cyclone-based process intensification in waste treatment and resource recovery.

Key words: chip manufacturing; waste treatment; resource recovery; cyclone

Graphical abstract:



(编辑 陈 雪)

引用格式: Wang Xuemeng, Wei Aosong, Fu Pengbo, et al. Waste streams from the chip industry and prospects for novel cyclone-based process intensification technologies[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(5): 101–120. [王雪蒙, 魏傲松, 付鹏波, 等. 芯片行业“三废”排放及旋流过程强化新技术应用展望[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(5): 101–120.]