

PFAS 销毁

从评估到
工业化部署

2026年8月



目录

GIC首席执行官致 辞	04
执行摘要	05
背景	06
监管格局	06
现有PFAS处理方 法	10
新兴销毁技术格局	13
各行业销毁需求与技术适配	15
不作为的代价	17
行动倡议：为何现在开展中试	19
附录	22

前言

关于全球影响力联盟（Global Impact Coalition）：

全球影响力联盟（GIC）是一个由首席执行官主导的平台，致力于推动化工价值链迈向循环、净零的未来。

GIC孵化于世界经济论坛，通过跨行业合作，将可持续发展挑战转化为商业解决方案。

通过共同开发和规模化推广新技术与新商业模式，GIC成员携手应对任何一家企业都无法独自解决的可持续发展挑战。

关于波士顿咨询公司（Boston Consulting Group）：

波士顿咨询公司与商业和社会领袖携手，应对其最重要的挑战，把握其最重大的机遇。BCG于1963年成立时即是商业战略领域的先驱。如今，我们与客户紧密合作，采用以惠及所有利益相关方为目标的转型方法，助力组织实现增长、建立可持续的竞争优势，并推动积极的社会影响。

我们多元化的全球团队拥有深厚的行业与职能专长，以及敢于挑战现状、激发变革的多元视角。BCG通过领先的管理咨询、技术与设计以及企业和数字风投提供解决方案。我们以独特的协作模式在公司内部以及客户组织的各个层级开展工作，目标是帮助客户蓬勃发展，并让世界变得更美好。

GIC首席执行官 致辞



PFAS污染是当今工业界面临的最复杂的环境挑战之一。它们存在于每一个主要工业部门的工艺水中——在土壤和地下水中不断累积，数十年不降解，并且越来越多地被证实与严重的人类健康影响相关。作为回应，欧洲、北美和亚太地区的监管限值正日益收紧。对每一家工业企业而言，问题已不再是是否采取行动，而是行动有多快。

全球已记录的PFAS相关和解金额超过150亿。这项责任并非假设——它此刻就体现在资产负债表上，并随着基于分离的处理方式每一轮未能达到监管要求而不断累积。对工业企业而言，这不仅是可持续发展问题，更是一项重大的商业风险。

目前大多数企业所依赖的技术并不能销毁PFAS，而只是将其浓缩为更小的体积——而短链和超短链PFAS基本未经改变地穿过这些系统。仅靠现有的分离方法无法满足当下正在制定的排放限值。永久断裂碳-氟键才是实现合规的根本途径。

这正是全球影响力联盟成立所要应对的挑战。没有任何一家企业能够独自评估所有新兴销毁技术、在多样化的工业基质中加以测试，并生成规模化解方案所需的运行数据。GIC PFAS工作组汇聚了整个价值链上的企业，共同分担这项投入，建立起比任何单一企业所能形成的更广泛、更严谨的证据基础。

本报告阐述了为何销毁至关重要、哪些技术展现出真正的潜力，以及为何联盟模式是实现部署的最快途径。如果贵公司面临PFAS合规义务——如今大多数工业企业都是如此——我诚挚邀请您加入GIC工作组。尽早行动的成本是可控的，而等待的代价则不然。

Charlie Tan
全球影响力联盟首席执行官

执行摘要

PFAS销毁是本十年工业水处理领域最关键的合规挑战。

PFAS——全氟和多氟烷基物质——难以自然降解，会在水和土壤中持续累积，并与严重的健康影响相关。欧洲、北美和亚太地区现已实施具有强制力的浓度限值，阈值正以数量级收紧，所覆盖的化合物范围也在不断扩大——包括TFA等超短链物质，而目前尚无任何已商业化部署的处理技术能够有效去除这类物质。

GIC PFAS工作组的成立，旨在建立行业采取行动所需的证据基础。

工作组汇聚了来自化工价值链各环节的企业，正在对五家销毁技术供应商在多种真实工业水基质中开展结构化、独立的评估——由此产生任何单一企业或供应商都不会独自生成的对比性能数据。实验室测试正在进行中，其结果将为选择一至两家供应商开展共享中试规模部署提供依据。

集体行动的理由十分明确。大多数工业企业每年在PFAS管理上的投入不断增加，却始终未能根本解决问题。活性炭、离子交换和反渗透只是浓缩PFAS，都不能将其销毁。焚烧依赖预先分离，无法在现场处理工艺水，且面临日益严格的监管约束。永久断裂碳-氟键是唯一可行的合规路径——但要在其必须适用的多样化工业基质中评估提供这一能力的新兴技术，并跟上监管要求的节奏，这并非任何一家企业能够独自完成任务。

当前发现

成熟的分离技术对长链PFAS有效，但对短链化合物的效果明显下降，迄今尚无任何已商业化部署的系统有效弥补这一缺口。焚烧是目前唯一可用的销毁途径——但需要预先分离，且无法实现现场处理。GIC的实验室测试表明，多项新兴销毁技术能够有效销毁（超）短链PFAS，但尚无一项在完整的工业部署中得到验证。因此，需要找到一种可规模化部署、具有成本效益并满足包括TFA在内的监管阈值的可持续解决方案。

下一阶段

下一阶段的核心是共同投资共享中试设施，在运行规模下、以真实工艺水、在可直接转化为商业采购的条件下，验证所选技术的销毁性能。通过GIC，每家参与企业只需承担单独开展所需成本的一小部分，即可获得比任何单一企业项目更广泛、更可靠、更受监管机构认可的数据集。

本报告梳理了主要司法管辖区的监管格局，剖析了现有处理方法的结构性局限，评估了从分离到销毁的完整技术格局，并阐述了从评估迈向部署的投资理由。面临PFAS合规义务的任何行业的企业——化工、半导体、水务、能源、制药、纺织——均可通过 contact@wearegic.com 联系GIC团队，[了解加入联盟的更多信息。](#)

01

背景

PFAS，即全氟和多氟烷基物质，是由一万多种合成化合物组成的物质家族，自20世纪40年代起便应用于工业领域。它们被设计得极其稳定：耐高温、耐水、耐油、耐化学降解。这种耐久性使其在几乎所有主要行业中都极具价值，从半导体制造、纺织品到消防泡沫和食品包装。但也意味着它们在自然界中不会分解。一旦释放，PFAS将在环境中无限期存留——因此被称为“永久化学品”。

数十年累积的后果如今已可量化。在每一个有人居住的大陆的饮用水源中、在北极野生动物体内，以及在人类血液和母乳中，都已检测到PFAS。据美国疾病控制与预防中心估计，97%的美国人血液中存在PFAS。长期接触与免疫系统紊乱、甲状腺功能障碍以及某些癌症风险增加相关，尽管完整的健康影响仍有待进一步确定。

欧洲、北美和亚太地区的监管机构从这些证据中得出了相同的结论：继续排放已不可接受，而制止排放的框架正在制定之中。

02

监管格局

PFAS监管已不再由单一司法管辖区主导。欧盟、美国、日本、韩国、澳大利亚和加拿大都在同步推进限制措施，中国、台湾地区和新加坡也紧随其后。当前形势由三大动态所定义。



范围扩大：

监测义务正扩展至以前无需报告PFAS的企业，使直接面临合规风险的工业企业群体不断扩大。



限值收紧：

排放数值阈值正以数量级下降。过去以微克/升计的限值尚可接受，如今监管机构正在设定个位数纳克级的限值，这一水平要求对工业排放实现近乎完全的销毁。



化合物覆盖范围扩大：

受监管化合物清单正从传统长链PFAS扩展至短链物质，并越来越多地纳入TFA——一种只含两个碳原子的超短链化合物，目前尚无任何已商业化部署的去除技术能够有效捕获它。

主要法规一览

司法管辖区	法规文件	主要要求	合规日期
已生效（2023–2025年）			
欧盟	IED 2010/75/EU	每季度监测PFOA/PFOS；PFOS <25 µg/L	已生效（2023年，各成员国不同）
法国	Loi 2025-188	2030年前消除工业PFAS排放；按每100g征收€100的排放费	已生效（2025年2月）
意大利	皮埃蒙特大区法LR 25/2021	PFOS <0.65 ng/L；PFOA <100 ng/L；短链0.5–3.0 µg/L	已生效
美国	SDWA MCL	PFOA/PFOS最大污染物限值（MCL）：4 ng/L；其他PFAS正在评估中	已生效（2024年）
美国	CERCLA	PFOA/PFOS被列为有害物质；污染者付费责任	已生效（2024年）
韩国	《持久性有机污染物管理法》	限制PFHxS及147种相关物质	已生效（2023年6月）
澳大利亚	ICHEMS附表7	禁止生产、进口和使用PFOA/PFOS/PFHxS（另含500余种物质）	已生效（2025年7月）
日本	CSCL第一类	禁止生产、进口和使用138种PFAS物质	已生效（2025年1月）
中国	新污染物治理	PFOS/PFOA列入重点管控新污染物清单；严格报告与监测要求；2023年11月发布PFOA参考清单	已生效
澳门	第168/2024号行政命令	禁止《斯德哥尔摩公约》所列持久性有机污染物的进口、出口和转运	已生效（2024年10月）
2026年生效			
欧盟	DWD 2020/2184	饮用水中20种PFAS总和≤100 ng/L；PFAS总量≤500 ng/L	2026年1月
德国	《饮用水条例》	20种PFAS总和≤100 ng/L（2026年）；4种PFAS总和≤20 ng/L（2028年）	2026年1月 / 2028年
欧盟	PPWR	食品接触包装中PFAS超过严格阈值即予禁止	2026年8月
丹麦	国家限制令	禁止在服装、鞋类和防水剂中使用PFAS	2026年7月
新加坡	NEA泡沫禁令	禁止进口含PFOA/PFOS的消防泡沫	2026年1月
美国	TSCA 8(a)(7)	生产商/进口商须报告自2011年以来的所有PFAS使用情况	2025年7月–2026年1月
台湾地区	PFAS法规草案	依据TCSCA对PFAS实施分级管理	2026年（预计）
韩国	《水环境保护法》修正案	加强对水体和污水排放中PFAS的管控	2026年（预计）
澳大利亚	《饮用水指南》v4.0	下调国家饮用水标准中的PFAS指导值	2025–2026年
欧盟	WFD	地表水/地下水中24种PFAS为4.4 ng/L PFOA当量；拟纳入TFA	已生效（2026年）

司法管辖区	法规文件	主要要求	合规日期
未来趋势：2026–2030年			
欧盟	REACH限制	近乎全面禁止所有符合OECD定义的PFAS；行业豁免正在审议中	2026–27年作出决定
欧盟	UUWD 2024/3019	强制监测PFAS；2035年前须进行处理；2045年前全面推广	2025–27年转化为成员国法律
美国	SDWA第三阶段	所有公共供水系统全面符合PFOA/PFOS最大污染物限值	2031年
加拿大	PFAS禁令草案	拟禁止PFAS的生产、进口、销售和使用	2026年起（预计）
英国	EIP 2025 / UK REACH	2028年12月前与欧盟PFAS限制措施进一步接轨	2028年
日本	排放标准	正在研究具有约束力的PFAS排放限值	审议中
中国	PFAS监管扩展	扩大重点管控新污染物清单；加强工业监测和排放管控	持续推进
印度	新兴框架	尚无专门的PFAS法规；工业地区的污染记录日益增多；监管框架尚处于早期阶段	制定中

来源：工作组法规分析；公开法规文本；ECHA、EPA及各国政府出版物。截至2026年3月。



行业专项监管

除横向环境立法外，行业专项框架也在多个地区对PFAS实施直接限制。



纺织品：

《ZDHC生产限用物质清单》（MRSL v3.1）禁止亚洲、美洲和欧洲的生产商在服装、鞋类和家纺生产中使用PFAS——仅对安全关键型技术纺织品（军用、医用、防护和交通运输）给予有限豁免。该限制带来的供应链合规义务，远远超出了受直接环境许可约束的设施范围。



半导体：

半导体行业面临独特的全球压力：PFAS广泛用于光刻、湿化学品、等离子刻蚀、导热流体以及晶圆厂基础设施中的含氟聚合物部件——涵盖从超短链表面活性剂到长链含氟聚合物的各类化合物。行业分析（SIA、ZVEI）认为，这些应用中的大多数尚无规模化替代方案，因此销毁成为进入工艺水的PFAS唯一的合规路径。欧盟新建晶圆厂必须从一开始就配套PFAS处理设施，而台湾地区、韩国和日本的设施也面临影响相同工艺的、日益收紧的排放和物质管控。



能源、石油与天然气：

军事和工业场地遗留的AFFF消防泡沫污染已在多个司法管辖区引发监管行动。美国的CERCLA认定确立了针对PFOA和PFOS的直接“污染者付费”责任。澳大利亚的IChEMS禁令限制了含有这些物质的泡沫。在海湾国家，石油设施也面临与同类遗留污染相关的、日益加重的修复义务。

对工业企业的意义

合格格局正在全球范围内趋同，而不仅限于欧洲。

欧盟

PFAS生产商必须履行监测义务，且根据《工业排放指令》，该义务正扩展至非生产商。地方许可条件设定的排放阈值往往比欧盟层面的最低要求更为严格。法国已对每排放100克PFAS征收100欧元的排放费——这对尚未消除排放的任何企业都构成直接的经济处罚。欧盟《水框架指令》是最具影响力的待定进展——拟议的地表水和地下水PFOA当量4.4 ng/L阈值，将要求任何进入受纳水体的工业排放实现近乎完全的销毁，使传统处理方法在技术和商业上都被淘汰。

美国

PFOA和PFOS具有强制力的饮用水最大污染物限值（MCL）现已以4 ng/L生效，并要求在2031年前全面达标。CERCLA认定对这两种物质确立了直接的“污染者付费”责任，使任何有历史PFAS排放的企业都承担直接修复责任——无论污染发生于何时。

亚太地区

日本根据《化学物质审查与生产管理法》限制138种PFAS物质，韩国的持久性有机污染物管控，以及澳大利亚IChEMS附表7的禁令，都为在该地区从事生产或排放的任何企业带来了直接的合规义务。多个司法管辖区的监管机构还在加强审查对含PFAS物料的高温焚烧——逐步关闭工业企业长期依赖的处置途径。

跨多个司法管辖区经营的企业面临叠加的合规负担：每个市场都设定了各自的阈值、时间表和责任框架，任何单一的分离方法都无法同时满足。销毁是从源头化解这一复杂性的唯一途径——永久消除PFAS，而不是逐一按各项标准对其进行管理。

现有PFAS处理方法

PFAS链长及其重要性

PFAS是一个涵盖一万多种化合物的统称，但只有其中一小部分构成了水处理问题。这些物质是全氟烷基酸（PFAA）——包括PFOA、PFOS和TFA在内的一类物质。它们是在水体和人体血清中经常被检出的化合物，也是目前衡量强制性排放限值和销毁技术的基准对象。本节其余部分将聚焦于PFAA。

PFAA化合物按碳链长度分类，这一分类决定了它们在环境中的行为、被传统处理工艺捕获的难易程度，以及销毁的难度。长链PFAA（C8+，包括PFOA和PFOS）已被充分认识和监管，并可通过成熟的处理技术加以应对：它们易于被活性炭和树脂吸附，并可被反渗透膜截留。短链和超短链化合物则带来了根本不同的挑战：它们分子更小、迁移性更强，且基本未经改变地穿过大多数传统处理系统。

始于21世纪初的长链PFAA逐步淘汰，并未消除PFAS作为工业难题的存在。生产商改用了链长更短的替代品——通常为C6至C4——当时人们认为这些物质具有更好的环境特性。这一假设仅部分成立：短链PFAA的生物累积性较低，但对传统捕获技术的抵抗力明显更强。超短链化合物则几乎不受目前工业规模部署的大多数销毁方法的影响。其结果是，这类化合物更难去除、更难销毁，而如今却与其原本要取代的长链物质一样受到严格的监管审查。监管期望恰恰在化学物质变得更具抵抗性的时刻变得更加严格。

三氟乙酸（TFA）处于这一谱系中最具挑战性的一端。其两个碳原子的结构和完全对称的氟化，使其对传统分离技术以及目前工业规模部署的多种销毁技术都具有极强的抵抗力。已有大量证据表明光化学工艺可销毁TFA，最近的同行评审研究也报告了在相对温和的HALT条件下有效销毁TFA并实现脱氟。声解法也已有早期证据。TFA是现有处理基础设施在设计时并未考虑应对的化合物，而监管机构正着手将其纳入受监管的总量之中。

三氟乙酸（TFA）挑战

它是什么？

TFA (CF_3COOH) 是一种仅含两个碳原子的超短链PFAS。它有多种来源：HFC和HFO制冷剂的大气降解是一条重要且不断增长的途径，某些含氟农药和除草剂的降解也是如此。直接工业排放——尤其是来自含氟化学品生产的排放——是另一个点源。各途径的相对贡献因地区而异，且仍存在不确定性，但欧洲、北美和亚洲部分地区的TFA浓度正在上升。

为何重要？

欧盟SCHEER委员会建议（2025年4月）将TFA纳入受监管的PFAS总量。若与WFD 4.4 ng/L阈值一并采纳，合规将要求具备销毁一种目前尚无任何商业化去除技术能有效捕获的化合物的能力。颗粒活性炭对TFA的吸附效果很差。离子交换树脂的选择性有限。即便是电化学氧化——较具能力的新兴销毁技术之一——对长链PFAS的降解也远比对TFA容易。只有反渗透显示出可观的截留率，但仍不足以满足WFD限值。

分析方法缺口在哪里？

标准PFAS分析方法EPA Method 1633并未涵盖TFA（仅涵盖C4+羧酸）。任何技术评估都必须要求采用补充性的TFA专用分析方法。

有何影响？

尽管目前TFA监管在欧洲最为先进，但任何着手监管PFAS总量的司法管辖区——美国、澳大利亚和日本都在考虑——都将面临同样的处理缺口。超短链化合物（包括TFA）能够穿过或抵抗目前工业规模部署的大多数销毁方法。只有高温焚烧被证实能够销毁TFA，但新的证据表明，光化学还原和水热碱处理也能有效销毁TFA。

分离与销毁

PFAS处理格局分为两类互补的方法：将PFAS浓缩为更小体积的分离技术，以及永久破坏PFAS结构的销毁技术。有效的处理流程将二者结合：先分离浓缩，再销毁消除。

分离技术

传统技术

颗粒活性炭、离子交换树脂、反渗透和纳滤是成熟的商业化方法（TRL 8-9），拥有成熟的供应链和广泛的部署。其主要瓶颈在于：维护、介质再生，以及对短链PFAS的性能下降。

新兴替代方案

泡沫分馏、新型吸附剂和环糊精聚合物可在极端条件下提升性能且无需介质再生，但均未解决对短链PFAS的适用性难题。

新兴销毁技术

传统技术

1,100°C以上的高温焚烧是唯一商业化成熟的PFAS销毁途径。它主要用于处理浓缩残留物，需要上游浓缩步骤，并存在水分流失或蒸发而非回收的风险。取代焚烧作为唯一销毁途径是一项高度优先的挑战。

新兴替代方案：

与需要预先分离的焚烧不同，超临界水氧化、电化学氧化或光化学工艺等技术可直接作用于水中的PFAS并在现场运行，避免了运输和废介质处置。

现有方法的局限

传统处理方式原本是为解决另一类问题而设计的。成熟的分离技术对长链PFAS效果良好，但存在三项结构性局限，并随着监管阈值的收紧而愈发突出。基于分离的处理并非稳定的合规方案，而是一种临时措施，其有效性会随着每一轮监管更新而逐步削弱。

基质差异性

不同工业工艺的PFAS浓度和化合物组成差异巨大。含氟聚合物生产商的排放浓度可能达到毫克/升级；半导体工厂为微克/升级；表面处理厂的浓度则随工艺化学而变化。没有任何一种分离技术能在所有这些基质中都达到最优。

短链PFAS对传统技术的抵抗性

短链PFAS与颗粒活性炭的结合较弱，被离子交换树脂捕获的效率也较低。膜的性能差异很大：纳滤膜的截留率有限，而致密的反渗透膜可形成有效屏障，但随后产生的浓盐水废液的处理与管理仍是一项挑战。这些并非局部性的局限——它们适用于欧洲、美国和亚太地区的所有处理基础设施。

市政处理压力层层传导

大多数工业废水在市政或集中式处理厂进行协同处理。随着这些处理厂面临降低出水PFAS的压力，负担会向上游传导至工业排放企业，后者可能面临排放协议被重新谈判或许可条件被单方面收紧，且留给其应对的时间十分有限。

新兴销毁 技术格局

GIC工作组评估了十三个类别中的十五家以上技术供应商，涵盖处于不同成熟阶段的分离和销毁技术——从已商业化部署的系统到仍处于中试规模的新兴方法。本次评估揭示了三项结构性缺口：

✎ TFA在两类技术中均未得到广泛解决

反渗透是唯一能够截留TFA的分离技术，但仍会留下需要销毁的浓缩液。高温焚烧是唯一能够销毁TFA的商业化成熟途径，而SCWO、HALT和光化学等新兴水相技术尚未在真实工业运行条件下得到验证。

✎ 成熟的分离技术仅适用于长链和中链PFAS

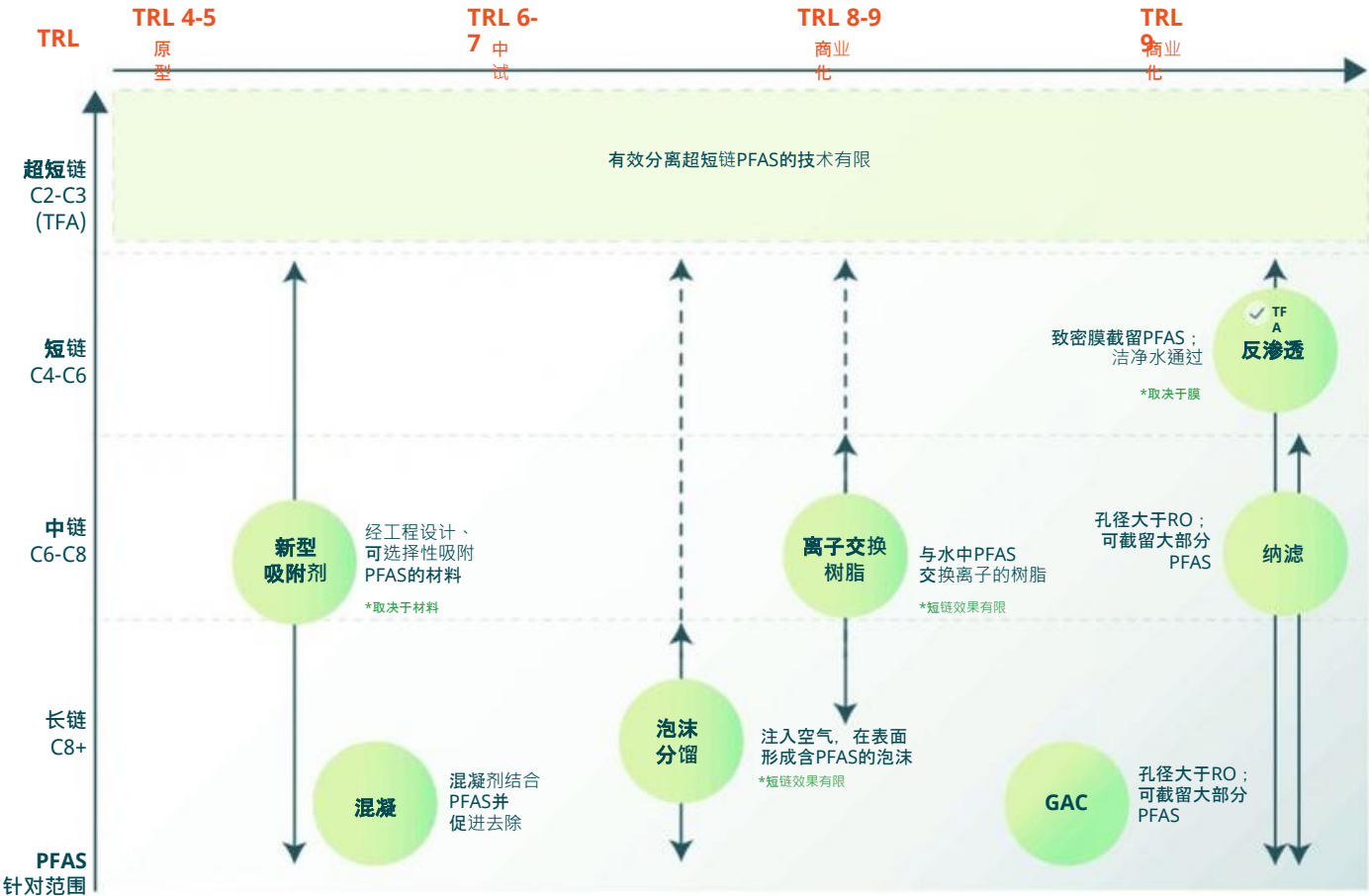
TRL 8-9的技术对长链和中链PFAS效果良好，但对短链化合物效果下降——这一局限尚无任何已商业化部署的分离系统在工业规模上解决。

✎ 销毁技术尚未在规模化应用中得到验证

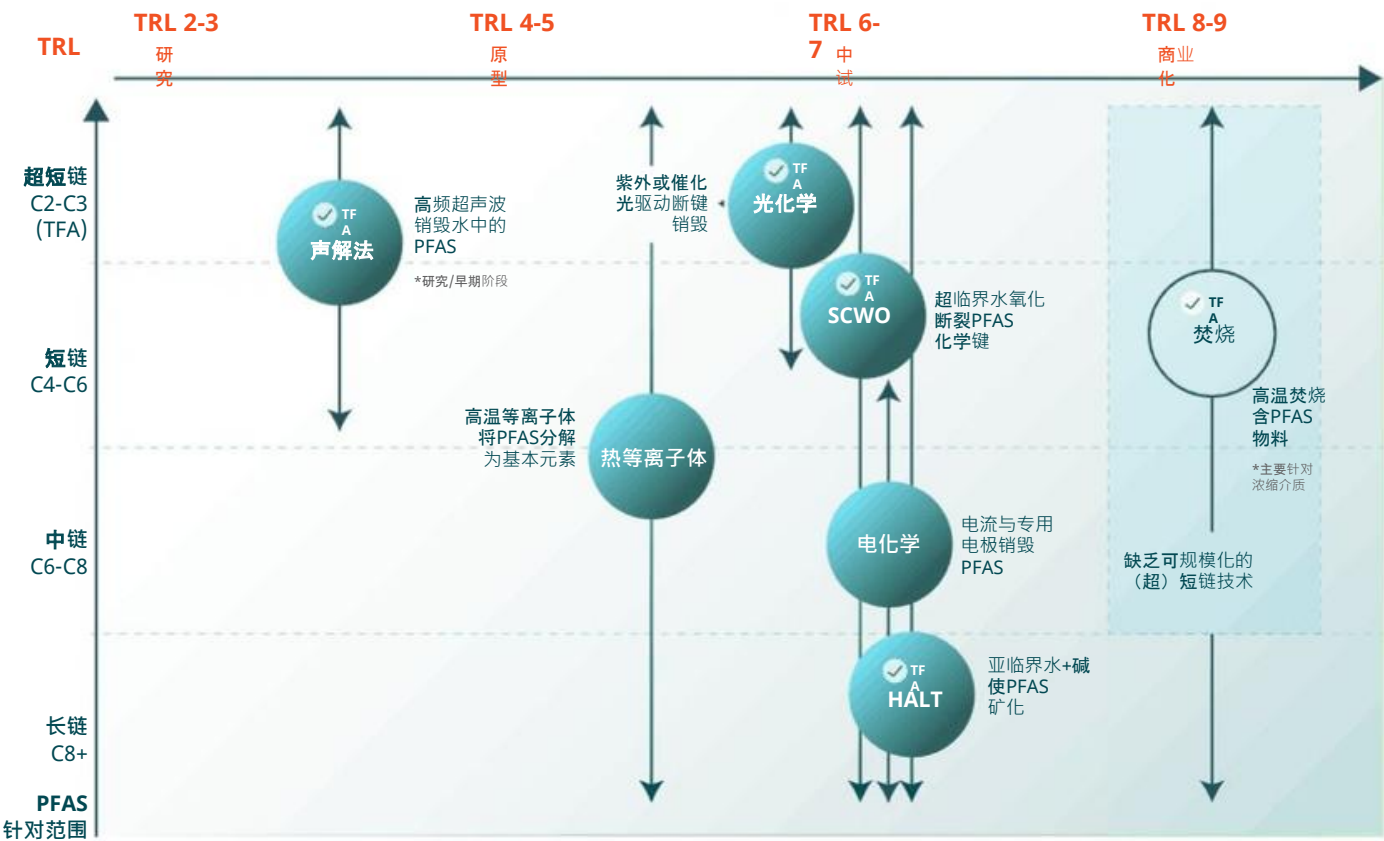
在销毁技术中，多种新兴方法在中试规模上展现出对短链PFAS的有效销毁，但尚无一項在完整的工业部署中得到验证。

下表基于当前最新认知，按技术类型、成熟度等级和PFAS针对范围呈现了完整的技术格局。

图表
1
分离技术



销毁技术



各行业销毁需求与技术适配

不同工业部门的PFAS排放特征在化合物类别、浓度、水量和共存污染物复杂性方面存在根本差异。这种差异决定了技术选择：没有任何一种销毁方法能在所有基质中都达到最优，有效的合规策略必须与各行业工艺水的具体特性相匹配。以下行业分析中有三项发现尤为突出。



不存在通用的销毁技术：

SCWO最适合含氟化学品和能源行业运营产生的高浓度废水流。电化学氧化则更适合半导体和纺织工艺水中较低的浓度和纯度要求。凡是存在相当数量TFA的场景，均适用光化学工艺。



处理流程必须因行业而异：

各行业的浓度水平跨越六个数量级——从饮用水供水企业的纳克/升级到含氟化学品生产的毫克/升级。销毁之前的分离和预浓缩步骤必须针对每种基质单独设计。



TFA是跨行业的挑战：

在含氟化学品生产和半导体这两个最优先的排放类别中，TFA都是一个关键的悬而未决的问题。任何无法证明对TFA有效的销毁技术，恰恰会在监管压力最大的行业中无法满足合规要求。

下表基于各行业指南及对行业代表的访谈，梳理了各行业的具体PFAS特征、处理参数及最相关的销毁途径。

PFAS行业概况

行业	典型PFAS特征	浓度与水量	优先销毁途径	关键问题
半导体	超短链（C2-C4）：含氟光酸产生剂、全氟聚醚、含氟表面活性剂。无化学替代品	超纯水漂洗中为低µg/L；刻蚀/CMP废液中为mg/L。水回用有纯度要求	电化学；光化学（针对TFA部分）；离子交换预浓缩	与超纯水回收回路的兼容性。副产物特征（氟化物、离子）与回用标准的对比。在东亚晶圆厂的可部署性
含氟化学品生产	高浓度长短链混合。TFA作为工艺副产物。基质复杂多变	mg/L范围。水量大。每个场地有多股不同的工艺废水流	SCWO用于浓缩液；电化学用于工艺水；光化学用于以TFA为主的废水流	在实际浓度下每立方米成本与现行焚烧的对比。TFA销毁率。规模化运行的能耗
能源、石油与天然气	遗留AFFF泡沫：C4-C8+混合地下水羽流中为µg/L至PFAS。共存污染物基质复杂（烃类、盐类、金属）	µg/L；浓缩泡沫废液中为mg/L。场地差异大	SCWO用于浓缩废液；电化学用于地下水；移动式/集装箱式系统用于场地修复	对共存污染物（烃类、氟化物）的耐受性。现场与异地销毁的经济性对比。移动部署的物流
食品与饮料	扩散性污染：遗留长链，以及来自大气沉降、日益增多的短链和TFA	ng/L至低µg/L。水量极大（每天数万立方米）。共存污染物少	光化学（唯一经验证的TFA途径）；离子交换预浓缩，在销毁前减少水量	在ng/L浓度和供水规模水量下销毁是否可行。TFA专项性能。每立方米成本
消费品与化妆品	来自涂层和包装生产的PFAS。正转向替代品，但遗留废水流仍然存在	工艺水中为µg/L范围。水量中等	电化学用于工艺水；离子交换预浓缩	处理成本与现行处置的对比。销毁能否支持品牌ESG和ZDHC合规声明
制药	合成、膜清洗和涂层工艺中的PFAS。验证负担高	µg/L至低mg/L。水量中等。文件记录要求严格	电化学；SCWO用于浓缩废液	经验证、附GMP相关文件的销毁率。副产物能否满足制药环境许可要求
纺织与时尚	工艺废水中来自防水整理剂的PFAS。生产集中在亚洲	µg/L至mg/L。生产场地水量大	电化学（模块化，可在亚洲部署）；离子交换预浓缩	在东南亚、南亚和中国生产场地的可部署性。每立方米成本与现行废水收费的对比

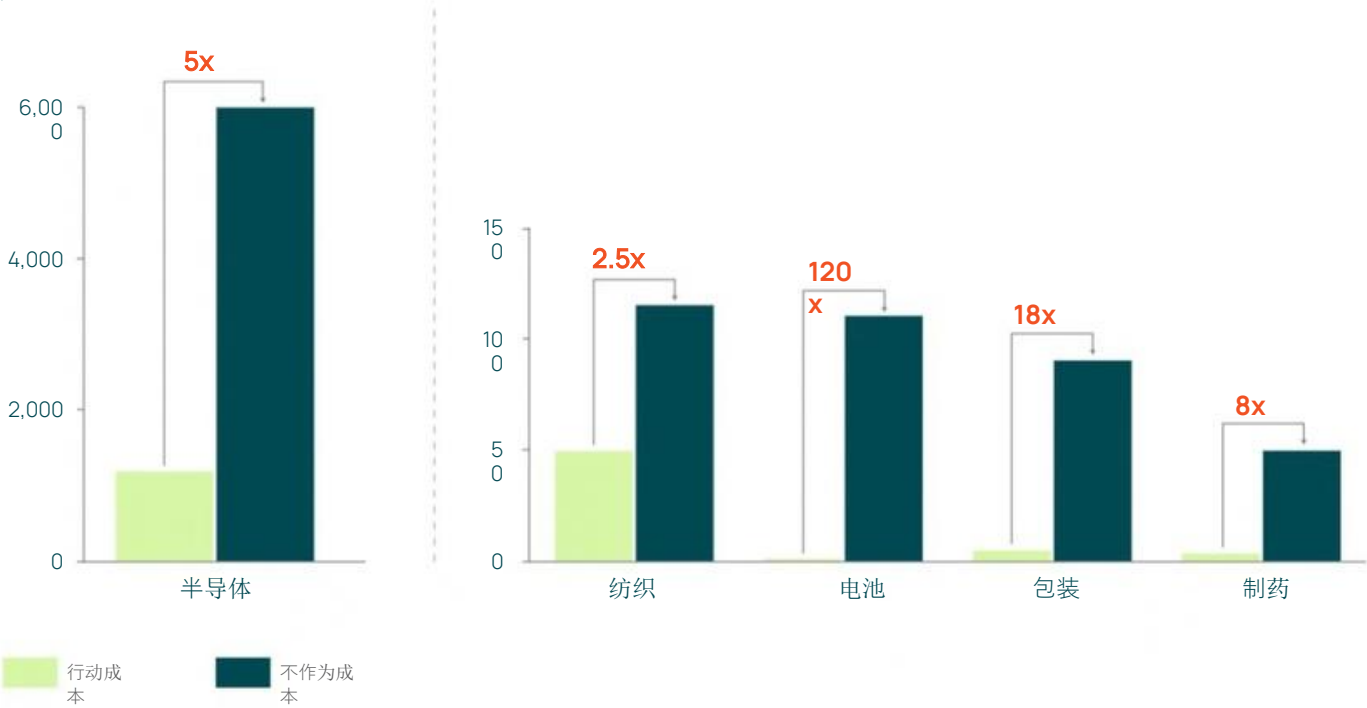
不作为的代价

量化差距： 行动与不作为

以下数据是对各行业欧洲普通企业在二十年期间的自下而上估算。行动成本反映企业为实现合规必须投入的资金：销毁并去除工艺水中的PFAS，并在可能的情况下替代生产中的PFAS。不作为成本则反映企业停滞不前所面临的风险：不断累积却无法解决根本问题的处置和处理成本、日益增加的诉讼和责任风险，以及随着监管阈值收紧而逐步丧失的市场准入、许可和合同。

尽早行动的企业能够将不断升级的负债转化为有限、可控的投资——并相对于仍在推迟决策的竞争对手获得可衡量的商业优势。

图表 2
各行业的
不作为成本均显著更高
各行业欧盟普通企业20年间行动成本与不作为成本对比（百万美元）



来源：BCG分析。行动成本与不作为成本估算基于自下而上的方法，覆盖一家总部位于欧盟的普通企业在约20年期间（2025-2045年）的情况。成本按五个类别建模：合规缺口（去除和销毁的资本支出/运营支出）、PFAS替代、现有处理的沉没成本、责任和诉讼风险，以及丧失的市场准入。数据仅供参考，基于截至2026年第一季度的公开数据；具体场地成本会有所不同。

在各行业中，不作为成本都大大超过行动成本——倍数从纺织行业的2.5倍到电池市场的120倍不等。绝对风险敞口在半导体行业最大；

而倍数最高的行业，是那些错过期限并非逐步推高成本、而是使产品被完全逐出欧盟市场的行业。

各行业成本驱动因素

现状对所有行业都构成风险。依赖基于分离的处理方式的企业，其负债累积的速度快于其管理的速度——处置成本不断上升、许可条件日益收紧、诉讼风险持续增加。全球已提起**6,400多起PFAS相关诉讼**，和解金额超过**150亿美元**。各行业的具体情况使财务风险变得具体可见：

半导体

晶圆厂目前依赖仅捕获式处理（离子交换、反渗透），对超短链工艺PFAS不具备销毁能力；而由于工艺PFAS没有可行的替代品，销毁是唯一可行的手段。利害关系异常重大：晶圆厂的资本投资达100-200亿美元，工艺容差极小，使得周期中途的合规改造成本极高；且其所服务的供应链中，单一设施失去许可就会波及整条产品线。因此，不作为的代价是二元的：如果无法证明具备销毁能力，欧盟REACH的必要用途豁免将失效，新建晶圆厂也无法获得许可，从而完全丧失市场准入，而不仅仅是逐步增加成本。

纺织

合规策略包括两方面：改用无氟DWR整理剂——目前尚无可直接替换的替代品能在耐久性和拒油性方面达到PFAS的性能，因此研发投入不可避免；以及在过渡期间仍使用PFAS整理剂的设施进行废水处理。然而，尽管行动成本高昂，不作为的代价仍然更高：排放费、和解风险、亚洲生产基地日益收紧的有害物质框架（ZDHC），以及如今已直接影响销售的可持续发展认证的逐步丧失。

包装

该行业的主要目标是改用生物基或水性阻隔涂层，因为大型买家正在发布无PFAS采购要求。然而，遗留生产线会产生含PFAS的漂洗水，

在这一较长的过渡期内需要进行销毁。该行业的不作为代价是即时的：PPWR为食品接触包装设定了具有约束力的PFAS浓度阈值，而在缺乏销毁能力的情况下，过渡期内的排放责任会随着每一轮监管更新不断累积。

电池

主要的合规手段是替代——替换PVDF粘结剂和含氟电解质盐——但这并不能消除PFAS处理挑战：溶剂回收和电极涂布工艺产生的含PFAS废水，无论配方改良进展多快，都需要主动销毁。然而，该行业的不作为成本倍数在所有行业中最（约120倍）：欧盟市场准入豁免有时间限制且不可续期，这意味着一旦错过期限，企业将失去全球增长最快市场之一的收入，而工艺水排放责任仍会独立地持续累积。

制药

活性药物成分被排除在大多数PFAS限制之外，限制了直接排放责任，但行动成本是真实存在的：工艺设备替换、膜清洗规程变更和涂层调整都带有药品生产质量管理规范（GMP）再认证负担，其周期比监管较少的行业更长。尽管如此，不作为的代价仍在不断累积——审批延误不断加剧、新出现的销毁证明要求，以及难以在设计之初未考虑PFAS处理的设施上补充实施的文件记录负担。

由此可得出两个结论。第一，采取行动的经济理由并非某个行业所特有——它是普遍的，只是程度不同。第二，行动成本本身主要取决于企业可以影响的两个变量：进入销毁环节的废水流浓度，以及所选技术是否已针对该基质完成验证。这两者都可以通过中试来解决。

因此，采取行动的障碍不在于决策本身，而在于逐项技术、逐种基质地获得经验证的性能数据所需的成本和时间——而且必须赶在监管或法律压力迫使企业做出仓促且更昂贵的选择之前。当这一工作由多方共同承担时，障碍最低。

行动倡议：为何现在开展中试

共享中试的理由

当投资由多方共同承担时，销毁技术中试的经济性会显著改善。一家化工生产商、一家水务企业和一家半导体企业通过同一中试设施处理不同的基质，每家只需承担单独开展所需成本的一小部分，却能获得比任何单一企业项目更广泛、更可靠、更受监管机构认可的数据集。共同投资还能增强采购议价能力：技术供应商向代表多个部署场地的联盟提供的条件，远优于向单一买家提供的条件。

为何开展共享中试项目

经验证的运行数据

中试设施在真实运行条件下产生销毁率、能耗、副产物特征和每立方米成本等数据——这些数据无法从实验室规模结果中推算，也不会由任何单一供应商独立提供。

与行业相关的基质

中试设施可配置为处理代表工业工艺废水流、饮用水浓缩液或半导体漂洗水的水体——从而产生可直接应用于每个参与行业的性能数据。

共享投资，共享数据

一套中试设施的成本因技术而异，约为50万至300万欧元。由多家企业分摊后，单个企业的投入仅为常规采购所需的一小部分，而所获得的数据集更广泛、更可靠。

监管公信力

拥有来自独立、多方利益相关者项目的经验证中试数据的企业，在许可谈判和监管咨询中，比仅提供供应商声明或理论评估的企业处于更有利的地位。

合规路径—— 中试可能的实施方式

无论行业、司法管辖区或起点如何，合规路径都遵循一致的三阶段结构。从初步审计到具备可运行的销毁能力，通常需要18-24个月，中试结果可在6-12个月内获得。成本仅供参考，取决于流量和PFAS销毁目标。

评估（0-3个月）

梳理所有工艺水流中的PFAS。对照适用限值开展监管差距分析。表征水基质——PFAS特征、TFA存在情况、共存污染物。筛选与这些基质相匹配的销毁技术。该阶段的成本主要为内部资源投入及分析检测费用。

测试（3-12个月）

与两到三家供应商开展实验室小试，并进行完整的PFAS及TFA专项分析。在现场部署为期三至六个月的中试。关键指标包括销毁率、能耗、副产物特征和每立方米成本。实验室测试费用通常为每家供应商7,000-50,000欧元；完整的中试项目费用为50,000-85,000欧元。

部署（12-24个月）

经验证的中试数据为处理流程集成的工程设计提供依据。该阶段涵盖采购、安装、调试和持续运行的启动——资本成本为50万至300万欧元或更高，取决于技术和规模。

图表3



行动倡议：加入GIC共享中试

GIC PFAS工作组正在生成多家销毁技术供应商的性能数据，并将从中选择一至两家开展中试规模部署。下一阶段的核心是共同投资共享中试设施，在运行规模下、以真实工艺水、在可直接转化为商业采购决策的条件下验证销毁性能。

目前正在进行的实验室测试阶段将缩小候选范围。随后的一步——与选定供应商开展中试规模验证——将把评估转化为足以支撑采购的证据。我们诚邀负有PFAS合规义务的企业加入中试验证阶段，共同确定哪些前沿技术已具备规模化条件。

从评估到部署的转变，不是任何单一企业或技术供应商能够独自完成的挑战。本工作组产生的数据将为采购决策提供依据、支持监管咨询，并以行业所需的速度加快销毁技术的商业化进程。GIC的宗旨是促进对新技术的共同投资，并扩大相关证据在各行业和各地区的适用性。

欢迎联系我们的团队了解更多信息：contact@wearegic.com

关于本报告

本报告由全球影响力联盟（GIC）PFAS工作组与波士顿咨询公司（BCG）合作编写。

所有技术评估均为初步评估，基于公开信息、企业披露和专家访谈，不构成对任何技术或供应商的认可。监管分析反映截至2026年3月的情况。

主要来源： Company websites; Austin, C. et al., Hydrothermal Destruction and Defluorination of Trifluoroacetic Acid (TFA), Environmental Science & Technology 58(18), 2024; Hori, H. et al.: Decomposition of Environmentally Persistent Trifluoroacetic Acid to Fluoride Ions by a Homogeneous Photocatalyst in Water, Environmental Science & Technology 37(2), 2003; European Chemicals Agency (ECHA), Annex XV Restriction Report – Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), 2023, with SCHEER and RAC/SEAC opinions through 2025; European Commission, Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption, 2020; Hao, S. et al., Application of Hydrothermal Alkaline Treatment for

Destruction of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Contaminated Groundwater and Soil, Environmental Science & Technology 56(10), 2022; Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC), PFAS Technical and Regulatory Guidance Document; Cousins, I.T. et al., Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for PFAS, Environmental Science & Technology 56(16), 2022; OECD 2021 PFAS definition. Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances; Semiconductor Industry Association (SIA) PFAS Consortium, The Use and Management of PFAS in the Semiconductor Industry, 2024; US Environmental Protection Agency, PFAS National Primary Drinking Water Regulation, Final Rule, April 2024; Zero Discharge of Hazardous Chemicals (ZDHC), Manufacturing Restricted Substances List (MRSL) v3.1, 2022; Safulko, S. et al.: Rejection of perfluoroalkyl acids by nanofiltration and reverse osmosis in a high-recovery closed-circuit membrane filtration system, Journal of Membrane Science, 685, 2023.

作者



Nadine Feustel, GIC
项目负责人



Vuk Trifkovic, BCG
董事总经理
兼合伙人



Ana Sofía Almagro, GIC
全球项目负责人



Adam Rothman, BCG
董事总经理
兼资深合伙人



Davide Del Ben, GIC
高级经理，
合作与运营



附录：销毁技术 供应商格局

下表呈现了截至2026年6月销毁技术供应商格局的概况。
供应商描述基于公开信息；此为初步名单，并将持续更新。

供应商	技术	描述	总部	成立年份
高温工艺（SCWO、HTG、气化）				
Aquarden Technologies	SCWO	基于SCWO的PFASinator装置，可在现场对工业浓缩液中的PFAS实现完全矿化	丹麦	2005
374 Water	SCWO	商用SCWO系统，可销毁复杂废物流中>99.99%的PFAS	美国	2018
Revive Environmental	SCWO	移动式SCWO系统（PFAS Annihilator®），可实现经验证的现场销毁	美国	2022
General Atomics	SCWO	工业规模PERSES™反应器，经EPA验证可销毁99.99%的PFAS	美国	1955
Aries Clean Tech	气化	用于含PFAS污泥的气化中试系统，销毁率最高达97%	美国	2010
Aquagga	HALT	移动式水热碱处理装置；亚临界水与碱	美国	2019
常温工艺（电化学、化学）				
Oxyle	光化学催化	专有催化还原系统；对短链和超短链PFAS的去除率>99%	瑞士	2020
Aclarity	电化学氧化	EOx拖车式装置，可销毁地下水、渗滤液和工业废水流中的PFAS	美国	2017
Axine	电化学氧化	模块化现场ElectraClear™系统；PFAS销毁率最高达99.999%	加拿大	2010
Perma-Fix	化学水解	低温密封Perma-FAS系统（≤150°C）；销毁率99.9999%	美国	1990
Arvia	电化学吸附	采用Nyex™碳电极吸附并电化学降解PFAS浓缩液	英国	2007
Infinite Water	催化氧化	Hydroxon催化高级氧化工艺，用于处理难降解污染物	澳大利亚	2017
Gradiant	泡沫+电化学	ForeverGone工艺，结合泡沫分离与电化学销毁	美国	2013
VWater	电穿孔	Faraday反应器，利用短时高压电脉冲破坏PFAS	美国	2022
Forever-Water / Fraunhofer	电化学	三维石墨烯海绵电极，用于低能耗电化学销毁	欧盟	项目启动：2025
光化学工艺				
Claros Technologies	紫外光催化	专有紫外光催化系统；工业规模下销毁率>99.99%	美国	2018
Enspired Solutions	紫外还原	光还原脱氟；具备针对泡沫和土壤的移动中试能力	美国	2021
ecoSPEARS	紫外活化	源自NASA技术的紫外活化反应器，用于处理地下水中的PFAS	美国	2017
热等离子体				
Fraunhofer IGB	常压等离子体	欧盟常压等离子体水处理反应器，用于工业PFAS矿化	德国	1955
PyroGenesis	等离子弧	大型等离子弧反应器，将PFAS分解为基本元素	加拿大	1991
DMAX Plasma	非热等离子体	介质阻挡等离子体放电；移动式氩气装置	美国	2014
Onvector	冷等离子体涡旋	紧凑型冷等离子体涡旋系统；现场销毁率约97%	美国	2013
声解/空化				
FustLab	超声空化	CaviTox工艺；欧洲基地；可处理TFA	韩国	2022
University of Surrey	声解法	用于销毁水中PFAS的高频超声波研究	英国	-

来源：GIC工作组评估；企业公开信息。所有评估均为初步评估，基于公开数据。本表不构成任何认可。



助力实现净零化工未来