FuYuZe

技 术 白 皮 书

普通等离子除臭与鑫泽铭电浆脉冲除臭的核心差异

从汤森放电理论、纳秒脉冲电子动力学到自由基化学的深度解析

浙江鑫泽铭环保有限公司

浙江鑫泽铭环保有限公司

2026 年 11 月

目　　录

1　结论先行：差别究竟在哪里 1
1.1　核心差异总表 2
2　概念界定：两种技术各自是什么 3
2.1　普通等离子除臭的技术画像 3
2.2　电浆脉冲除臭的技术画像 3
2.3　两条技术路线的基本分野 4
3　热力学：能量放在哪里，决定反应走向 4
3.1　非平衡等离子体的热力学本质 4
3.2　能量品位与火用损失 4
3.3　热力学可行、动力学受阻 5
3.4　比沉积能量与温升 5
3.5　热力学参量对比 6
4　汤森放电理论：电子雪崩的三个台阶 6
4.1　汤森第一与第二电离系数 6
4.2　折合电场 E/N：真正的能量标尺 6
4.3　过电压击穿：纳秒脉冲的"抢跑" 7
4.4　三种激励方式的放电参数对比 8
5　电场强度：峰值与平均值的分野 8
5.1　峰值电场强度决定电子能拿到多少能量 8
5.2　平均电场强度决定能耗与热负荷 9
5.3　占空比：2.4%的算术 9
5.4　电场与功率参数对比 9
6　纳秒时间尺度：300 纳秒里发生了什么 10
6.1　电子加速与能量沉积 10
6.2　抑制辉光与热化 10
6.3　选择性窗口：为什么能产羟基却不产氮氧化物 11
6.4　电子能量窗口与分子过程阈值 11
7　化学键：断在哪一根，决定副产物是什么 12

浙江鑫泽铭环保有限公司

7.1 键能与断键阈值 12
7.2 选择性断键与二次污染控制 12
7.3 典型致臭分子的键能数据 13
8 除臭介质：电子、羟基自由基、氧原子与臭氧 13
8.1 四类介质的寿命与能力 13
8.2 臭氧路线的物理天花板 14
8.3 自由基路线的链式反应 14
8.4 介质特性对比 15
9 解离性电子附着与共振电子：低能量断键的量子通道 15
9.1 DEA 的基本机理 15
9.2 共振窗口与能量匹配 16
9.3 硫原子空轨道匹配：为什么含硫恶臭特别"吃"电子 16
9.4 DEA 与自由基的接力 17
9.5 DEA 通道参数对比 17
10 双电场耦合：电离场与吸附场的分工 17
10.1 两个电位场同时建立 17
10.2 荷电、输运与再复合抑制 18
10.3 异质成核与可凝结颗粒物 18
10.4 单场与双场结构对比 18
11 DRE：从技术命名到工程指标 19
11.1 两个 DRE 的含义 19
11.2 去除效率与能耗 19
11.3 测试口径与验收要点 19
11.4 能耗与效率对比 20
12 工程边界：什么工况能上，什么工况要先处理 20
12.1 适配工况 20
12.2 需要预处理的工况 20
12.3 副产物控制 21
13 结论 21
13.1 为什么普通等离子用了还是有味道：三个没被解决的问题 22

浙江鑫泽铭环保有限公司

13.2 选型判断清单 23
附录 A 术语表 23
附录 B 参考资料 24

浙江鑫泽铭环保有限公司

普通等离子除臭与电浆脉冲除臭的核心差异

从汤森放电理论、纳秒脉冲电子动力学到自由基化学的深度解析

内容摘要

本文以汤森放电理论、纳秒脉冲电子动力学、化学键能与自由基化学为分析框架，系统比较普通等离子除臭与浙江鑫泽铭环保有限公司电浆脉冲除臭（DRE）的本质差异。分析表明：两者的分界不在"是否产生等离子体"，而在电子平均能量、电场峰值与时间结构三个物理量。普通等离子以连续或准连续放电为主，折合电场 20～40 Td，电子平均能量 1～3 eV，低于绝大多数致臭分子 3～6 eV 的化学键能，只能依靠臭氧与少量自由基进行间接、慢速氧化；电浆脉冲以 300 纳秒级陡前沿、80 kHz 单极性方波输出，把折合电场推到 50～100 Td，电子平均能量 7～12 eV、峰值 18～20 eV，跨过断键阈值，形成"高能电子直接断键＋羟基自由基链式氧化"的双轨机理，并借助解离性电子附着（DEA）与硫原子空轨道匹配实现选择性解离。工程侧表现为峰值电场强度 25～45 $kV·cm^{-1}$、平均电场强度 0.5～1.5 $kV·cm^{-1}$、占空比约 2.4%，在低平均功率下获得高峰值场强，DRE 去除效率可达 90%以上，单位风量电耗约为工频电源的五分之一。

关键词：电浆脉冲；低温等离子体；汤森放电；解离性电子附着；羟基自由基；破坏去除效率

1　结论先行：差别究竟在哪里

把两台设备并排放在同一个垃圾中转站或污水站，肉眼看到的差别只是"一台有蓝光、一台没有"。但真正的差别发生在纳秒尺度：电子被加速到多少能量、这些能量交给谁、在什么时间窗口内交付。这三件事决定了臭味分子是被"氧化掉"还是被"打断"。

普通等离子除臭的本质，是用平均能量 1～3 eV 的电子和臭氧去氧化臭味分子。1～3 eV 低于硫化氢 S—H 键的 3.95 eV、氨气 N—H 键的 4.05 eV、甲硫醇 C—S 键的 3.24 eV，电子撞上去只能把分子激发、振动、电离出一部分，断不了键。真正完成除臭的是臭氧，而臭氧对硫醚、硫醇的反应速率常数只有 10^{0}～10^{2} $L·mol^{-1}·s^{-1}$量级，比羟基自由基低六到八个数量级。

浙江鑫泽铭环保有限公司

电浆脉冲除臭的本质，是用纳秒级高压脉冲在极短时间内把电子加速到 7～12 eV，先直接把化学键打断，产生高活性碎片，再由羟基自由基、氧原子自由基完成链式氧化。这条路线上，臭氧只是配角，主角是高能电子和自由基。

因此，两者的差距不是"效率高一点、低一点"，而是机理层级不同：普通等离子停留在"氧化"，电浆脉冲进入"解离＋氧化"。

1.1 核心差异总表

表 1　普通等离子除臭与电浆脉冲除臭核心差异总表

对比维度	普通等离子除臭	鑫泽铭电浆脉冲除臭
能量载体	热、臭氧、紫外与可见光为主	高能电子、羟基自由基、氧原子自由基为主
电子平均能量	1～3 eV（工频、高频）；2～4.5 eV（微秒脉冲）	7～12 eV，峰值 18～20 eV
折合电场 E/N	20～40 Td	50～100 Td
电场强度峰值	5～10 kV·cm⁻¹	25～45 kV·cm⁻¹
电场强度平均值	接近峰值，连续放电	0.5～1.5 kV·cm⁻¹，占空比约 2.4%
脉冲时间结构	毫秒至微秒级，近似连续	上升陡度 300 ns 级，单极性方波，80 kHz
断键方式	臭氧与少量自由基间接氧化，能量不足以直接断键	高能电子直接断键，自由基接力氧化
解离性电子附着	通道基本关闭	高效开启，与硫原子空轨道匹配
电场结构	单一电离电场	电离电场与吸附电场双场同时建立
去除效率 DRE	常规工况 70%～85%	常规工况 90%～96%
单位风量电耗	约 15 kWh/万 m³（工频基准）	约 3 kWh/万 m³
臭氧副产物	产量高，常需后处理	产量低，可控
热效应	介质与电极温升明显，需散热	接近常温，气体温升通常低于 10 ℃

注：表中电场强度、电子能量为常压空气、常规极板间距条件下的典型量级，实际值随电极结构、介电材料、气隙与气体湿度变化；电耗为同等风量、同等入口浓度下的工程实测口径。

浙江鑫泽铭环保有限公司

2 概念界定：两种技术各自是什么

2.1 普通等离子除臭的技术画像

行业里被称为"等离子除臭"的设备，绝大多数属于以下三类：工频或高频高压电晕放电、介质阻挡放电（DBD）、以及等离子体联合光催化或紫外光解。它们的共同特征是电源输出连续或准连续，电压波形为正弦或近似正弦，放电在时间上不间断，占空比接近 100%。

这种供电方式带来三个必然结果。第一，放电空间内电子能量分布很宽但主体很低，平均能量只有 1～3 eV，高能尾部很短。第二，能量持续注入，电子与重粒子充分碰撞，能量很快转化为气体热量、介质损耗和可见光辐射，也就是现场看到的蓝紫色辉光。第三，氧分子被激发、解离后大量复合为臭氧，臭氧成为实际承担除臭任务的介质。

所以普通等离子除臭在工程上表现为：设备有蓝光、有臭氧味、电极和介质会发热、处理低浓度含硫恶臭时去除率上不去、风量一大就稀释了反应概率。

2.2 电浆脉冲除臭的技术画像

电浆脉冲除臭（本公司技术体系命名为 DRE，即 Direct Reduction Elimination，直接还原裂解）采用纳秒级陡前沿单极性方波电源，重复频率 80 kHz，单脉冲宽度在 0.3～10 μs 可调，输出电压 1 万～10 万伏。核心不是"电压高"，而是"上升快、脉宽窄、占空比极低"。

纳秒级上升沿使气隙在流注贯通之前承受过电压，折合电场被推到 50～100 Td，电子在极短时间内获得 7～12 eV 的平均能量。脉宽只有 300 纳秒量级，电子还来不及把能量传给重粒子，脉冲就结束了；下一个脉冲到来之前有 12.5 μs 的弛豫时间，气体温度来不及上升。这就是"高电子能量、低气体温度"能同时成立的原因。

同时，电源在反应腔内建立两个电位场：电离电场约为额定电压的 0.8～1.6 倍，负责产生高能电子；吸附电场约为额定电压的 0.6～0.8 倍，负责给粒子和碎片荷电、定向输运。两个场叠加，构成了本公司所称的"双电场"结构，工程上也常配合双介质阻挡电极使用。

浙江鑫泽铭环保有限公司

2.3 两条技术路线的基本分野

把两者放在同一张物理图上，普通等离子走的是"热化学＋臭氧氧化"路线：电能先变成电子激发和热量，再由臭氧缓慢氧化。电浆脉冲走的是"电子动力学＋自由基化学"路线：电能几乎全部沉积在电子上，电子直接断键，自由基完成后续反应。

路线不同，评价指标就不同。普通等离子比的是臭氧产量和停留时间；电浆脉冲比的是电子能量、峰值场强、脉冲陡度和单位体积沉积能量。用臭氧产量去评价电浆设备，从根上就评错了对象。

3 热力学：能量放在哪里，决定反应走向

3.1 非平衡等离子体的热力学本质

等离子体化学的第一性问题是能量分配。在局部热平衡（LTE）状态下，电子温度与气体温度相等，能量在电子、离子、中性分子之间均分，气体被整体加热。电弧、火焰属于这一类，温度动辄数千开尔文，能量品位低，且无法选择性作用于某一根化学键。

低温非平衡等离子体则相反：电子温度远高于气体温度。1 eV 对应的电子温度约为 11 600 K，而 300 K 的常温气体只有 0.026 eV。电子与氮气分子的质量比约为 1 比 51 000，单次弹性碰撞最多只能把万分之几的能量传给重粒子，因此电子可以在电场中被反复加速而不迅速"热化"气体。

这个巨大的温度差，正是等离子体化学能够"常温下做高温反应"的物理基础。普通等离子的问题不是没有这个温度差，而是这个温度差维持不住：连续放电让电子与重粒子有充足时间碰撞，能量迅速耗散为热，电子平均能量被拉低到 1～3 eV。

电浆脉冲用时间换温度差。300 纳秒的脉冲宽度远短于电子—重粒子的能量弛豫时间（微秒量级），能量来不及转移，脉冲就关闭了；12.5 微秒的脉冲间隔又让气体充分冷却。于是电子温度可以维持在 7～12 eV，而气体温度只比环境高几度到十几度。

3.2 能量品位与火用损失

从热力学第二定律看，电能是高品位能量，化学键能也是高品位能量，而 100 ℃以下的热是低品位能量。普通等离子把大部分电能转化成了低品位热和可见光辐射，

浙江鑫泽铭环保有限公司

这是一次不可逆的火用（exergy）损失；电浆脉冲则尽量把电能直接转化为电子的动能，再由电子转化为化学键的断裂能，路径短、熵增小。

这解释了一个常被忽略的现象：普通等离子设备摸上去是热的，电浆设备摸上去是凉的，但后者电场强度反而更高。热量不是"能力强"的标志，恰恰是能量走错方向的证据。

3.3 热力学可行、动力学受阻

从热力学看，恶臭分子的氧化反应几乎全部是自发的、强放热的。以两个最典型的反应为例：

$H_2S + 1.5O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O$，标准反应焓约−518 $kJ \cdot mol^{-1}$；$NH_3 + 0.75O_2 \rightarrow 0.5N_2 + 1.5H_2O$，标准反应焓约−317 $kJ \cdot mol^{-1}$。两者的吉布斯自由能变化均为大负值，常温下就该发生。

但现实中污水站的硫化氢可以在空气中稳定存在很久，原因是动力学受阻：反应需要先越过很高的活化能垒，常温下没有足够的高能碰撞。传统化学氧化靠投加药剂、提高温度或使用催化剂来翻越这道坎；等离子体的作用，是提供一条非热的活化路径。

这里的核心判断是：谁的活化路径更直接，谁的能量效率就更高。普通等离子靠臭氧，而臭氧与硫化氢、硫醇的反应本身仍有可观活化能，速率常数偏低，相当于"绕远路"；电浆脉冲直接用 7～12 eV 的电子把键打断，把活化能垒整个绕开，相当于"拆门而不是敲门"。

3.4 比沉积能量与温升

工程上用一个参数衡量能量投入：比沉积能量（SED），即单位体积气体获得的放电能量，常用单位是 $kJ \cdot m^{-3}$或 $J \cdot L^{-1}$。低温等离子体处理恶臭气体的合理区间通常在 2～4 $J \cdot L^{-1}$，硫醚占比高或没有前置喷淋的工况取上限。

SED 不是越高越好。超过合理区间后，能量不再用于断键，而是转向加热气体、激发氮气、生成氮氧化物，效率反而下降。普通等离子由于连续注入，SED 与温升强耦合，很难把能量精确控制在窗口内；电浆脉冲通过脉冲宽度和重复频率两个旋钮独立调节 SED，温度与能量解耦，这是它能把 SED 稳定压在 2～4 $J \cdot L^{-1}$的原因。

浙江鑫泽铭环保有限公司

3.5 热力学参量对比

表 2　两种技术的热力学与能量学参量对比

参量	普通等离子	电浆脉冲	物理含义
电子温度 Te	1～3 eV（约 11 600～35 000 K）	7～12 eV（约 81 000～139 000 K）	决定能否断键
气体温度 Tg	常升至 40～80 ℃	通常低于 10 ℃温升	决定热损失
Te/Tg 比值	约 40～100	约 800～4000	非平衡程度
能量弛豫时间	微秒级，与脉宽同量级	远大于脉宽	决定能量去向
能量主要去向	气体热、介质损耗、可见光、臭氧	电子动能、化学键断裂、自由基	决定效率
SED 控制方式	与连续功率强耦合	由脉宽与频率独立控制	决定工艺窗口
火用效率	低，熵增明显	高，路径短	决定运行成本

4 汤森放电理论：电子雪崩的三个台阶

4.1 汤森第一与第二电离系数

1903 年汤森提出的气体放电理论，把击穿描述为电子雪崩的自持过程。第一电离系数α表示电子沿电场方向单位行程内产生的电离碰撞次数，经验式为α＝A p exp(−B p/E)，其中 p 为气压、E 为电场强度。α随 E/p 增大而急剧增大，说明"场强越强、气压越低，电子越容易把气体电离"。

第二电离系数γ描述正离子撞击阴极表面产生二次电子的能力。自持放电的判据是αd≥ln(1＋1/γ)，d 为气隙距离。这个判据揭示了一个关键事实：击穿不只看电压高低，还看电场强度在气隙内的分布与电子行程。

把这两个系数放回除臭设备上，就能理解普通等离子为何"电压标得很高、效果却一般"：电压高不等于 E/p 高。极板间距大、介电层厚、气体湿度高，都会把有效电场摊薄，α上不去，电子雪崩不充分，电子能量分布的主体仍然停留在低能区。

4.2 折合电场 E/N：真正的能量标尺

工程上更常用折合电场 E/N，即电场强度与中性粒子数密度之比，单位 Td（1 Td ＝10^{-17} V·cm²）。E/N 直接决定电子能量分布函数（EEDF）的形状：E/N 越高，分布越向高能端移动，高能尾部越"厚"。

浙江鑫泽铭环保有限公司

常压空气下，中性粒子数密度约为 2.5×10^{19} cm^{-3}。20 Td 对应约 5 $kV\cdot cm^{-1}$，40 Td 对应约 10 $kV\cdot cm^{-1}$，100 Td 对应约 25 $kV\cdot cm^{-1}$。这组换算说明，从 20 Td 提升到 100 Td，电场强度只提高了 5 倍，但电子能量分布的形状发生了质变，高能电子数量呈指数增加。

不同类型电源激励下的折合电场有明确的数量级差异：正弦交流介质阻挡放电约为 20～40 Td，微秒脉冲约为 30～50 Td，纳秒脉冲约为 50～100 Td。这组数据来自公开的等离子体激励研究综述，是目前学界对三类激励方式的共识性描述。

折合电场每提高一档，电子平均能量大致提高一档：高频或工频激励下为 1～3 eV，微秒脉冲为 2～4.5 eV，纳秒脉冲为 7.4～9.5 eV。本公司 DRE 电源在此区间内进一步优化波形陡度，实测电子平均能量落在 7～12 eV，波尔兹曼高能尾部可达 18～20 eV。

4.3 过电压击穿：纳秒脉冲的"抢跑"

纳秒脉冲之所以能把 E/N 推到 50～100 Td，靠的是过电压击穿机制。常规交流放电在电压缓慢上升的过程中，气隙一旦达到击穿电压就立刻放电，电压被钳位，电场无法继续升高。纳秒脉冲的上升沿只有 300 纳秒，电压在气隙尚未完成流注贯通之前就已经冲到额定值的 1.5～2 倍，形成短时过电压，电场强度随之上冲。

过电压带来两个后果。其一，电子在极短时间内获得的能量远高于平衡态，能量分布整体右移；其二，放电从丝状、局域的微放电转变为更均匀、可重复的弥散放电，放电通道的电子密度显著提高。公开研究给出的量级是：交流介质阻挡放电的电子密度约 10^{9}～10^{10} cm^{-3}，纳秒脉冲可达 10^{12} cm^{-3}，微放电电流密度可达 10^{6} $A\cdot cm^{-2}$，电子温度约 10 eV。

需要说明的是，经典汤森理论描述的是低气压、低过电压下的稳态雪崩，对纳秒过电压击穿的描述并不完整。学界因此引入电子崩链理论和逃逸电子模型作为补充：当电场升高到电子在两次碰撞之间获得的能量大于碰撞损失时，电子进入逃逸状态，雪崩以链式方式快速推进。这正是纳秒脉冲能在几十纳秒内完成放电、而交流放电需要更长时间的原因。

浙江鑫泽铭环保有限公司

4.4 三种激励方式的放电参数对比

表 3　正弦交流、微秒脉冲与纳秒脉冲激励的放电特征对比

特征参数	正弦交流 DBD	微秒脉冲 DBD	纳秒脉冲 DBD
折合电场 E/N	20～40 Td	30～50 Td	50～100 Td
电压峰值	2～30 kV	约 10 kV	约 45 kV
电流峰值	0.002～0.1 A	约 30 A	约 200 A
功率峰值	0.001～0.5 kW	约 180 kW	约 10 000 kW
电子密度	10^{9}～10^{10} cm^{-3}	约 10^{11} cm^{-3}	约 10^{12} cm^{-3}
电子平均能量	1～3 eV	2～4.5 eV	7.4～9.5 eV
放电形态	密集丝状微放电	较均匀，能量效率较高	均匀、可重复、化学活性高

数据来源：公开等离子体激励研究综述与介质阻挡放电实验研究文献，为常压空气条件下的典型量级。

5 电场强度：峰值与平均值的分野

5.1 峰值电场强度决定电子能拿到多少能量

电子在两次碰撞之间的自由飞行时间内获得能量，能量增量近似等于 eEλ，λ为平均自由程。电场峰值越高，单次自由飞行获得的能量越大，电子能量分布的高能尾部越厚。这就是"峰值电场强度"的物理意义：它决定电子能量的上限，而不是决定总能耗。

普通等离子受制于连续放电的自钳位效应，电场峰值通常只能维持在 5～10 $kV·cm^{-1}$；微秒脉冲可以到 10～15 $kV·cm^{-1}$；纳秒脉冲借助过电压击穿可以达到 25～45 $kV·cm^{-1}$。峰值提高 3～5 倍，单次自由飞行获得的能量同比例提高，这才有了跨过 3～6 eV 断键阈值的可能。

需要强调的是，峰值电场强度不是靠"把电压表调大"得到的。它取决于脉冲上升陡度、电极曲率、介电层厚度与气隙的匹配。上升沿越陡，气隙越来不及击穿，过电压倍数越高；极板间距越大，同样电压下的场强越低。所以高压电源标称 10 万伏，若极板间距做到 10 厘米，场强也只有 10 $kV·cm^{-1}$，仍然落在普通等离子区间。

浙江鑫泽铭环保有限公司

5.2 平均电场强度决定能耗与热负荷

平均电场强度是峰值在时间上的积分平均。普通等离子连续放电，占空比接近100%，平均值几乎等于峰值，因此能耗高、热负荷大；电浆脉冲占空比只有约 2.4%，平均值仅为峰值的几十分之一，能耗和热负荷都被压下来。

这就是"高峰值、低平均"的组合。它解决了一个长期困扰行业的矛盾：想要高场强就必须高电压，高电压又带来高能耗和高热损伤。纳秒脉冲把这两个量在时间上拆开——瞬时给足场强，长期只给很少的能量。

5.3 占空比：2.4%的算术

以 80 kHz 重复频率计算，脉冲周期为 12.5 微秒；以 300 纳秒脉冲宽度计算，占空比约为 300 ns÷12 500 ns＝2.4%。这意味着在一个周期内，真正放电的时间只占 2.4%，其余 97.6%的时间反应腔处于弛豫与自由基反应阶段。

这带来两个工程好处。第一，平均功率只有峰值功率的 2.4%：若峰值功率为 10 MW 量级，平均功率约为 240 kW，对应万立方米每小时风量的能耗约 3 kWh。第二，脉冲间歇期正是自由基与臭味分子完成链式反应的时间，电子不必全程"盯着"反应，自由基会替它完成后续工作。

普通等离子没有这个间歇期。电子持续产生、持续复合、持续产热，自由基在电子轰击下不断被淬灭，链式反应难以充分展开。这是连续放电在化学上的固有缺陷，不是靠提高电压能弥补的。

5.4 电场与功率参数对比

表 4　三种供电方式的电场强度与功率参数对比

参数	工频或高频交流	微秒脉冲	鑫泽铭纳秒电浆
输出电压	2～30 kV	约 10 kV	10～100 kV 可调
电场强度峰值	5～10 kV·cm⁻¹	10～15 kV·cm⁻¹	25～45 kV·cm⁻¹
电场强度平均值	接近峰值	3～5 kV·cm⁻¹	0.5～1.5 kV·cm⁻¹
上升时间	毫秒级	微秒级	300 ns 级
脉冲宽度	连续输出	10～50 μs	0.3～10 μs
占空比	约 100%	10%～50%	约 2.4%
峰值电流	0.002～0.1 A	约 30 A	约 200 A
电子平均能量	1～3 eV	2～4.5 eV	7～12 eV
热负荷	高，需强制散热	中	低，接近常温

浙江鑫泽铭环保有限公司

6 纳秒时间尺度：300 纳秒里发生了什么

6.1 电子加速与能量沉积

在 25～45 kV·cm⁻¹的峰值场强下，常压空气中电子的平均自由程约为 0.06 微米量级。电子在两次碰撞之间获得的能量与场强、自由程成正比；300 纳秒内电子经历数十至上百次碰撞，能量不断累积，分布向高能端移动。

关键在于"能量沉积的对象"。等离子体中电子与重粒子的质量相差三到五个数量级，弹性碰撞的能量传递效率极低，因此电场能量优先进入电子，电子温度迅速升高，而气体温度基本不动。这就是非平衡态的形成过程，也是"等离子体能常温断键"的全部秘密。

公开研究给出的对照很直观：在同样的 12 kV 电压下，高频电源激励的放电电流为 10^{-2} A 量级，微秒脉冲为 10^{-1} A 量级，纳秒脉冲可达 10^{2} A 量级；对应的平均电子能量分别为 1～3 eV、2～4.5 eV、7.4～9.5 eV，能量效率则是微秒脉冲的 2 倍、高频电源的 3.5 倍。这组数据说明，能量效率的提升不来自"功率更大"，而来自"波形更陡"。

6.2 抑制辉光与热化

现场判断设备水平有一个朴素办法：看有没有蓝紫光。蓝光在物理学上是辉光放电，本质是气体分子被激发到激发态以上，回迁时把多余能量以光子形式辐射出来。发蓝光意味着大量能量被用来"点亮气体"，而不是用来断键。

普通等离子为什么必然发蓝光？因为连续供电给了气体分子足够的时间吸收能量、反复激发、反复回迁，激发态粒子大量积累，辐射就可见了。电浆脉冲为什么可以不发蓝光？因为 300 纳秒的脉冲宽度短于激发态积累到可见辐射所需的时间，能量在激发态尚未堆积前就被用于电离和解离，脉冲结束后激发态迅速淬灭。

不发蓝光不等于不放电。它说明能量被"锁"在了更短的时间窗和更高的能量位上，用于产生自由基和断键，而不是用于辐射。这正是本公司电源把电子能量锁定在电离阈值以上、激发阈值以下这一窄窗口的设计意图。

热化同样被抑制。电子—重粒子能量弛豫需要微秒量级，300 纳秒远短于这个时间，能量来不及变成热；12.5 微秒的脉冲间隔又让残余热量充分散失。两头一夹，气

浙江鑫泽铭环保有限公司

体温度就上不去，反应腔可以长期贴近常温运行，电极和介电层也不会因反复热胀冷缩而烧蚀。

6.3 选择性窗口：为什么能产羟基却不产氮氧化物

电子能量不是越高越好。空气中的主要成分是氮气和氧气，两者的解离阈值差别很大：氧分子解离为两个氧原子约需 5.17 eV，水分子解离为氢原子和羟基自由基约需 5.15 eV，而氮分子解离为两个氮原子约需 9.79 eV；氧分子电离约需 12.06 eV，氮分子电离约需 15.58 eV。

这组阈值画出了一条清晰的"选择性窗口"：5.2～9.8 eV 之间。电子能量落在这个区间，足以解离氧分子和水分子，生成氧原子自由基与羟基自由基，但不足以大量解离氮分子，因此不会显著生成氮氧化物。

本公司电浆电源把电子平均能量控制在 7～12 eV，主体正好覆盖这一窗口；18～20 eV 的波尔兹曼尾部只占少数，配合毫秒级停留时间和脉冲间歇，即使产生少量氮原子也来不及进一步氧化为二氧化氮。这就是"高产羟基、低产氮氧化物"的能量选择机制。

普通等离子做不到这种选择性。它的电子平均能量只有 1～3 eV，绝大部分电子连氧分子都解离不了，只能靠少数高能电子和臭氧慢慢反应；为了凑效果就得提高电压、延长时间，结果热量上升、臭氧过量、氮氧化物随之出现。

6.4 电子能量窗口与分子过程阈值

表 5　主要分子过程阈值与 7～12 eV 电子能量的匹配关系

分子过程	阈值能量（eV）	7～12 eV 是否覆盖	工艺意义
$H_2O \rightarrow H + \cdot OH$	5.15	覆盖	现场生成羟基自由基
$O_2 \rightarrow 2O$	5.17	覆盖	生成氧原子，进而成臭氧与羟基
H_2S 的 S—H 断键	3.95	覆盖	硫化氢直接解离
CH_3SH 的 C—S 断键	3.24	覆盖	甲硫醇直接解离
NH_3 的 N—H 断键	4.05	覆盖	氨气直接解离
$N_2 \rightarrow 2N$	9.79	仅高能尾部覆盖	控制氮氧化物生成的关键阈值
O_2 电离	12.06	基本不覆盖	抑制过度电离与热化
N_2 电离	15.58	不覆盖	抑制氮氧化物生成

注：阈值为常压条件下的键解离能与电离能典型值，实际反应截面随电子能量呈共振结构，并非阶跃开关。

7 化学键：断在哪一根，决定副产物是什么

7.1 键能与断键阈值

恶臭不是一种物质，而是一组物质的集合。生活场景中最主要的致臭成分包括硫化氢、甲硫醇、甲硫醚、二甲基二硫醚、氨气、三甲胺、苯乙烯、乙醛、二硫化碳等。它们的共同特点是：分子量不大，但含有一根"弱键"——S—H、C—S、S—S、N—H，键能集中在 2.8～4.1 eV。

这根弱键就是臭味的化学根源。键一旦断开，分子就失去了原来的结构和挥发性特征，碎片再被氧化成无臭的硫酸盐、氮气、二氧化碳和水。所以除臭的技术本质，是"找到并断开那根弱键"，而不是"把整个分子烧掉"。

普通等离子 1～3 eV 的电子能量，恰好卡在这些弱键的阈值之下。电子撞上去，分子被激发、振动加剧，键被拉长、削弱，但没有断。这种"半激发"状态很不稳定，多数会回迁放热或与臭氧反应，只有少数能真正解离。这就是普通等离子去除率难以突破 85%的根本原因。

电浆脉冲 7～12 eV 的电子能量，整体高于全部弱键阈值。电子撞上去，键直接断裂，解离是"一步到位"的，不依赖概率性的反复碰撞。这就是去除率能稳定在 90%以上的原因。

7.2 选择性断键与二次污染控制

断键还要讲选择性。如果能量高到把 C—C 主链、C＝O 双键、苯环一起打断，反而会产生醛、酮、羧酸、焦油等二次污染物，出现"臭味没了、异味更怪"的现象。

电浆脉冲的能量窗口设计恰好利用了键能差：S—H、C—S、S—S、N—H 的键能都在 2.8～4.1 eV，属于优先断裂的弱键；C—C 单键约 3.6 eV、C＝O 约 7.7 eV、苯环 C—C 约 5.4 eV，属于相对难断的强键。7～12 eV 的能量虽然足以断弱键，但对苯环、羰基的断键概率明显低于弱键，因此反应具有"分子手术刀"式的选择性。

选择性还体现在碎片走向上。硫化氢断键后产生 HS·和 H·，HS·再被氧原子或羟基氧化为 SO_2，最终形成硫酸盐；甲硫醇断键后产生 CH_3S·，进一步氧化为 SO_2和 CO_2；氨气断键后产生 NH_2·，经链式反应归于 N_2和 H_2O。产物都是无机小分子，不会留下新的有机异味。

浙江鑫泽铭环保有限公司

7.3 典型致臭分子的键能数据

表 6　典型致臭分子的主要化学键与断键阈值

物质	气味特征	主要断键	键能（kJ·mol⁻¹）	键能（eV）
硫化氢 H_2S	臭鸡蛋	S—H	381	3.95
甲硫醇 CH_3SH	烂菜、腐臭	C—S / S—H	313 / 381	3.24 / 3.95
甲硫醚 $(CH_3)_2S$	蒜臭、腐烂	C—S	313	3.24
二甲基二硫醚 $(CH_3)_2S_2$	腐菜、洋葱	S—S	268	2.78
氨气 NH_3	刺激性	N—H	391	4.05
三甲胺 $(CH_3)_3N$	鱼腥	C—N	305	3.16
乙醛 CH_3CHO	辛辣、酸败	C—C	347	3.60
二硫化碳 CS_2	工业溶剂味	C＝S	573	5.94
苯乙烯 C_8H_8	塑料、溶剂味	C—C（侧链）	347	3.60
苯 C_6H_6	溶剂味	C—C（芳环）	518	5.37

注：键能为标准条件下气相均裂键解离能的常用值，不同取代基与环境会带来数个百分点偏差。

8 除臭介质：电子、羟基自由基、氧原子与臭氧

8.1 四类介质的寿命与能力

等离子体除臭不是靠一种介质完成的，而是靠一组活性物种的接力。它们的寿命、氧化能力和作用半径差别极大，理解这组差别，才能理解两条技术路线为何效果不同。

高能电子寿命最短，只在脉冲持续时间内存在，但它能直接断键，是唯一具备"非热断键"能力的介质。羟基自由基寿命约微秒到毫秒，氧化还原电位约 2.80 V，是氧化能力最强的常用自由基，与大多数恶臭分子的反应速率常数在 10^9～10^{10} $L·mol^{-1}·s^{-1}$量级。氧原子自由基寿命与羟基相当，氧化能力略低，但它是生成臭氧和羟基的前体。臭氧寿命最长，可达数百秒，因此可以被输送到较远距离，但氧化能力只有 2.07 V，且反应具有明显的选择性。

这组数据说明一个容易被营销话术混淆的事实：寿命长不等于能力强。臭氧之所以被大量使用，是因为它稳定、可输送、可测量，不是因为它氧化能力最强。恰恰相反，它是对硫醚、硫醇反应最慢的那一类氧化剂。

浙江鑫泽铭环保有限公司

8.2 臭氧路线的物理天花板

普通等离子除臭本质上是臭氧除臭。氧分子被电子激发、解离成氧原子，氧原子再与氧分子复合生成臭氧。这条路线有两个天花板。

第一个天花板是产率。氧分子解离需要 5.17 eV，普通等离子电子平均能量只有 1～3 eV，只有极少的高能电子能完成解离，因此臭氧产率低、能量转换效率差。为提高产率只能加大功率，功率一大热量就上来，臭氧在高温下又快速分解，形成"越使劲越低效"的死循环。

第二个天花板是反应速率。臭氧与硫化氢、甲硫醇、甲硫醚的反应速率常数远低于羟基自由基，对二甲基二硫醚这类"腐菜味"组分尤其迟钝。要达到 90%以上的去除率，往往需要数秒到数十秒的接触时间、数倍于理论量的臭氧投加，设备体积和运行成本都下不来。

更麻烦的是残余臭氧。臭氧本身有刺激性气味，排放受限，必须配后置分解装置。这既增加投资，也增加风阻和能耗。

8.3 自由基路线的链式反应

电浆脉冲的除臭介质以羟基自由基和氧原子自由基为主。它们寿命短，但反应速率快、选择性小，几乎能与所有挥发性恶臭分子反应，且反应一旦启动就以链式方式展开。

以硫化氢为例，主要反应路径为：高能电子先把 H_2S 的 S—H 键打断，生成 HS·和 H·；HS·与氧原子或臭氧反应生成 SO_2；SO_2进一步被羟基氧化为 SO_3，最终与水结合成硫酸雾，由后置碱洗或除雾器捕集。整个过程没有"等待臭氧扩散"的环节，反应发生在自由基产生的地方，时间尺度是微秒到毫秒。

氨气的路径稍有不同：N—H 键断裂生成 NH_2·，两个 NH_2·结合成肼的中间态，再经脱氢归于 N_2；部分氨直接与羟基反应生成 NO，但在 7～12 eV 的能量窗口下，氮原子的进一步氧化被抑制，因此氮氧化物生成量可控。

含硫恶臭的终产物是硫酸盐，含氮恶臭的终产物是氮气，含碳骨架的终产物是二氧化碳和水。这条路径的副产物是酸性气溶胶，工程上需要后置碱性吸收塔兜底，这属于工艺配套问题，不是技术缺陷。

浙江鑫泽铭环保有限公司

8.4 介质特性对比

表 7　等离子体除臭主要活性介质的特性对比

介质	生成方式	寿命量级	氧化还原电位（V）	在路线中的地位
高能电子	电场加速	纳秒（脉冲内）	—	电浆主武器，直接断键
羟基自由基 ·OH	水分子解离	微秒至毫秒	2.80	电浆主力氧化剂
氧原子 $O(^3P)$	氧分子解离	微秒至毫秒	约 2.42	电浆主力，成臭氧与羟基的前体
过氧羟基 $HO_2\cdot$	$H+O_2$复合	毫秒	约 1.70	辅助氧化
臭氧 O_3	$O+O_2$复合	数百秒	2.07	普通等离子主力
激发态分子	电子激发	纳秒至微秒	—	能量耗散通道

注：氧化还原电位为标准条件下常引值，实际反应活性受 pH、湿度与共存组分影响。

9 解离性电子附着与共振电子：低能量断键的量子通道

9.1 DEA 的基本机理

解离性电子附着（Dissociative Electron Attachment，简称 DEA）是等离子体化学中一条极为重要的通道。它的过程是：入射电子被分子俘获，形成一个寿命极短的瞬态负离子（AB^{-*}），这个负离子处于振动激发态，随核运动迅速解离，生成一个负离子碎片和一个中性自由基。

用反应式表达就是：$AB+e^-\rightarrow AB^{-*}\rightarrow A+B^-$。整个过程发生在飞秒到皮秒量级，不需要先激发、再碰撞、再断键的多步过程，因此能量利用效率极高——一个能量恰好的电子，就能断掉一根键。

这条通道能够成立，前提是电子能量与分子的空轨道能级"对得上"，形成共振。这就是共振电子的概念：当入射电子能量接近某个空轨道的能级时，俘获截面陡增，形成形状共振；当电子能量足以同时激发内层电子时，形成核激发共振。共振峰的位置由分子结构决定，因此 DEA 具有天然的分子选择性。

浙江鑫泽铭环保有限公司

9.2 共振窗口与能量匹配

含硫恶臭分子的 DEA 共振窗口有两组：一组在低能区，对应电子进入σ*反键轨道形成的形状共振；一组在较高能区，对应核激发共振。公开文献报道的含硫分子 DEA 截面峰值多落在 1～5 eV 区间，部分分子在高能区还有第二个共振峰。

这个区间恰好与普通等离子的电子能量重叠了一部分，但重叠不等于有效。普通等离子的电子能量分布峰值在 1～3 eV，高能尾部很短，能落在共振窗口内的电子数量有限；而且连续放电中电子与气体分子碰撞频繁，共振态容易被二次碰撞淬灭，来不及完成解离。

电浆脉冲的电子能量主体在 7～12 eV，看似偏离低能共振窗口，但其波尔兹曼尾部覆盖 1～5 eV，且脉冲持续时间短、碰撞次数少，共振态形成后几乎不受二次碰撞干扰，解离概率大幅提高。这就是"高能主体＋低能尾部＋短脉冲"三者的协同：主体负责直接断键，尾部负责走 DEA 通道，短脉冲保证通道不被打断。

9.3 硫原子空轨道匹配：为什么含硫恶臭特别"吃"电子

硫原子在元素周期表中位于第三周期，基态电子构型为 $3s^2 3p^4$，除三对成键电子和两对孤对电子外，还有空的 3d 轨道。这一结构带来两个后果。

第一，硫原子可以接受电子对形成配位，也就是"扩展八隅体"，因此含硫分子的 LUMO（最低未占分子轨道）往往带有明显的硫 3d 与σ*反键轨道混合特征。电子进入这个轨道，等于直接填充到反键位置，S—H 或 C—S 键的键级下降、键长拉长，解离几乎是必然结果。

第二，硫原子的电子亲和能约为 2.08 eV，明显高于氧原子的 1.46 eV。电子亲和能越高，俘获电子形成负离子的倾向越强，DEA 截面越大。这解释了为什么硫化氢、硫醇、硫醚对电子附着如此敏感，而烷烃类分子相对迟钝。

把这两点合起来，就得到"硫原子空轨道匹配"的完整图景：电浆脉冲提供的电子，能量覆盖σ*共振窗口；含硫分子的空轨道又正好能接住这些电子；接住之后反键轨道被填充，键自然断裂。这是含硫恶臭在电浆脉冲下去除率特别高的量子化学原因，也是普通等离子难以复制的——普通等离子连共振窗口内的电子数量都不够，谈不上"匹配"。

浙江鑫泽铭环保有限公司

9.4 DEA 与自由基的接力

DEA 完成的是"断键"，不是"矿化"。断键产生的碎片仍是活性物种，如 HS^-、RS^-、$NH_2\cdot$，需要自由基接手才能变成无机盐。

电浆脉冲的优势在于，断键和自由基生成发生在同一时间窗、同一空间内：脉冲期间电子既断键，又解离水分子和氧分子生成羟基与氧原子；脉冲之后，这些自由基在原地与碎片反应。空间上不分离、时间上不错位，接力效率自然高。

普通等离子的时间结构是连续的，断键（少数高能电子完成）与自由基生成（臭氧为主）在时间上错开，空间上也不一定重合，接力效率低，大量碎片重新复合，表现为"处理后有味道残留"。

9.5 DEA 通道参数对比

表 8　解离性电子附着相关参数对比

参数	普通等离子	电浆脉冲	说明
电子能量分布主体	1～3 eV	7～12 eV	决定直接断键能力
高能尾部	短，占比低	可达 18～20 eV	决定 DEA 共振覆盖
共振窗口覆盖	部分重叠	主体加尾部全覆盖	决定通道开启率
硫原子空轨道匹配	弱	强	含硫恶臭选择性解离
电子附着截面	偏低	显著提高	与电子能量和分子结构相关
共振态存活条件	二次碰撞易淬灭	短脉冲内不被干扰	决定解离概率
断键与自由基的时空重合	错位	同窗口重合	决定矿化完整度

10 双电场耦合：电离场与吸附场的分工

10.1 两个电位场同时建立

本公司电源在反应腔内同时建立两个电位场。电离电场电压约为额定电压的 0.8～1.6 倍，承担气体击穿、电子加速、自由基生成的任务；吸附电场电压约为额定电压的 0.6～0.8 倍，承担粒子荷电、定向输运与捕集的任务。

这两个场的电压比不是随意设定的。电离场要高于击穿阈值才能产生放电，但过高会导致弧光与电极烧蚀；吸附场要低于击穿阈值，才能在不引发二次放电的前提下

浙江鑫泽铭环保有限公司

建立稳定的电场梯度，让带电粒子向捕集面迁移。0.8～1.6 与 0.6～0.8 这两组比例，本质上是"放电强度"与"输运强度"的解耦设计。

普通等离子只有单一电离场。放电与输运挤在同一个场里，要么场强不够、放电弱，要么场强过高、弧光烧蚀，无法兼顾。这是单场结构的固有矛盾。

10.2 荷电、输运与再复合抑制

断键产生的碎片和尘粒在电离区带电后，会在吸附场作用下向集尘极迁移。这一步解决了一个关键问题：碎片再复合。

如果碎片停留在原地，很快就会与相邻的自由基或未反应的分子重新结合，形成新的异味物质。吸附场把它们及时"搬走"，一方面减少了再复合，另一方面让碎片在迁移过程中继续被自由基氧化，相当于延长了有效反应时间。

双介质阻挡结构进一步稳定了这一过程。介电层限制了放电电流的增长，抑制了弧光与回电晕；同时介电层表面可以持续被水膜冲洗，避免结垢导致的电场畸变。这也是本公司设备可以在喷淋状态下连续运行、不必停机清洗的原因。

10.3 异质成核与可凝结颗粒物

除臭设备常被忽略的一个功能是处理可凝结颗粒物（CPM）。垃圾站、餐厨厂的废气里含有大量半挥发性有机物，它们在降温或氧化后成核，形成青烟、蓝烟。

电浆脉冲的高能电子和自由基能把这些气态前体氧化为低挥发性产物，使其在颗粒表面异质成核、长大，再被吸附场捕集。普通等离子没有足够的高能电子完成这一步氧化，臭氧路线又无法有效断裂长链，因此对 CPM 基本无效。

这是"除臭"与"除烟"能在同一台设备上完成的原因，也是双电场结构在视觉上能明显减少烟羽的原因。

10.4 单场与双场结构对比

表 9　单一电离场与双电场耦合结构的对比

对比项	单一电离场	双电场耦合
电场构成	仅电离电场	电离电场＋吸附电场
电极结构	单介质或裸电极	双介质阻挡
放电与输运	相互制约	解耦，各自独立调节
碎片再复合	较难抑制	荷电迁移，显著抑制

浙江鑫泽铭环保有限公司

对比项	单一电离场	双电场耦合
颗粒物处理	通过为主	荷电捕集＋异质成核
回电晕与弧光	较常见	介电层抑制，稳定性高
连续喷淋运行	易结垢、需停机	可带水连续运行

11 DRE：从技术命名到工程指标

11.1 两个 DRE 的含义

DRE 在本公司技术体系中有两层含义。作为技术命名，它指 Direct Reduction Elimination，即直接还原裂解——用高能电子直接打断化学键，把大分子还原为小分子碎片，再由自由基完成氧化。作为工程指标，它对应 Destruction and Removal Efficiency，即破坏去除效率，定义为进出口浓度差与进口浓度之比。

两层含义指向同一件事：这套技术的价值不在于"把臭味藏起来"，而在于"把臭味分子破坏掉"。吸附、掩蔽、稀释都只能改变浓度分布，DRE 要求的是分子结构的消失。

11.2 去除效率与能耗

在垃圾中转站、污水站、餐厨厂等典型工况下，本公司 DRE 电浆设备的恶臭去除率可达 90%～96%，高于常规等离子设备的 70%～85%。这个差距不是靠加大功率换来的，而是靠电子能量跨过断键阈值换来的。

能耗方面的对比更直观：处理万立方米每小时风量，工频电源约需 15 kWh，高频电源约需 5～7 kWh，本公司电浆电源约需 3 kWh，相对工频节电约 80%。这个数字来自实际工程计量，随入口浓度、湿度、极板结构会有浮动，但数量级关系稳定。

为什么能省电？因为能量几乎全部用于断键和生成自由基，没有大量转化为热、可见光和多余臭氧。普通等离子看似"功率不大"，但很大一部分功率做了无用功；电浆脉冲看似"峰值功率惊人"，但占空比只有 2.4%，平均功率很低。

11.3 测试口径与验收要点

谈去除率必须说清测试口径，否则数字没有意义。至少应明确四项：一是测点位置，进口与出口是否在同一截面、是否避开涡流区；二是检测方法，硫化氢与氨气常用分光光度法或电化学传感器，硫醇硫醚常用气相色谱或热脱附—气相色谱质谱；三

浙江鑫泽铭环保有限公司

是工况条件，风量、温度、湿度、入口浓度是否稳定；四是执行标准，通常参照 GB 14554—93《恶臭污染物排放标准》与 HJ 2000—2010《大气污染治理工程技术导则》。

验收时还应关注三个非浓度指标：臭氧残余浓度、氮氧化物浓度、压降。前两者关系到二次污染，后者关系到风机能耗。只测去除率不测这三项，容易在运行半年后出现"效率还在、味道回来了"的情况。

11.4 能耗与效率对比

表 10 三种供电方式的能耗与副产物对比

项目	工频电源	高频电源	电浆脉冲电源
万 m³/h 电耗	约 15 kWh	5～7 kWh	约 3 kWh
相对节电	基准	50%～60%	约 80%
恶臭去除率	70%～85%	75%～88%	90%～96%
臭氧产量	高	中	低
氮氧化物风险	中	中	低
电极寿命	较短，易结垢烧蚀	中等	较长，可带水运行

注：电耗与去除率为常规垃圾站、污水站工况下的工程实测区间，入口浓度、湿度与极板结构不同会有偏差。

12 工程边界：什么工况能上，什么工况要先处理

12.1 适配工况

电浆脉冲最适合的是"中低浓度、复合组分、含硫为主"的恶臭治理场景：垃圾中转站与收集点、污水处理站与泵站、餐厨垃圾处理厂、污泥干化车间、养殖与屠宰场、食品加工车间、化工园区的低浓度无组织排放。这些场景的共同特点是风量大、浓度波动大、组分复杂、传统生物法或吸附法运行不稳定。

在这些场景里，电浆脉冲的优势不只是去除率，还有抗冲击能力。生物滤池怕浓度冲击和低温，活性炭怕湿度与饱和，而电浆脉冲的反应强度由电场决定，不依赖微生物活性，启停快、随工况调节方便。

12.2 需要预处理的工况

有三类工况必须先做预处理，否则设备寿命和稳定性会出问题。

浙江鑫泽铭环保有限公司

第一类是油脂与油雾。大量油脂直接进入电浆反应舱，会在电极和介电层表面形成油膜，导致爬电、局部过热甚至击穿。工程上应设置油雾物理分离器或预喷淋，把油脂负荷降下来。

第二类是高浓度硫化氢与高湿度。浓度过高时，单级电浆的 SED 不足以完成矿化，应先用喷淋吸收掉大部分硫化氢与氨气，再由电浆做深度处理。这样既降低负荷，也减少酸性副产物对设备的腐蚀。

第三类是爆炸性气体与高粉尘。粉尘会遮蔽电场、造成短路，爆炸性气体积聚则有安全风险，必须前置除尘与浓度监控。

12.3　副产物控制

电浆氧化会生成少量臭氧和酸性产物，这是物理过程的必然结果，不是设计缺陷。工程上通常配置后置碱性吸收塔，一方面吸收二氧化硫、三氧化硫形成的酸雾，另一方面分解残余臭氧。

吸收塔的碱液浓度、循环量、停留时间要按入口硫负荷计算，不能按经验拍脑袋。硫负荷高而碱液不足，会出现"除臭达标、酸雾超标"的问题；碱液过量则增加运行成本与二次废水。

对于氮氧化物敏感的区域，还应控制 SED 上限，避免电子能量过高、停留时间过长导致氮气解离。这一点在垃圾站、医院周边、居民区项目中尤其重要。

13　结论

普通等离子除臭与电浆脉冲除臭的差别，可以归结为四个"不够"与四个"够"。

普通等离子：电子能量不够，1～3 eV 低于 3～6 eV 的断键阈值；电场峰值不够，5～10 kV·cm⁻¹难以形成过电压击穿；时间结构不够陡，毫秒级上升沿让能量有时间转化为热与光；介质能力不够，臭氧对硫醚硫醇反应速率低。四个"不够"叠加，结果就是去除率卡在 70%～85%，能耗与副产物居高不下。

电浆脉冲：电子能量够，7～12 eV 覆盖全部弱键阈值；电场峰值够，25～45 kV·cm⁻¹形成过电压击穿；时间结构够陡，300 纳秒上升沿把能量锁在电子上；介质能力够，羟基自由基与氧原子的反应速率比臭氧高六到八个数量级。四个"够"叠加，才有 90%以上的去除率和五分之一的电耗。

浙江鑫泽铭环保有限公司

更深一层的差别在物理机制。普通等离子是"热化学＋臭氧氧化"，能量绕了两道弯才到化学键；电浆脉冲是"电子动力学＋自由基化学"，能量几乎直线到达化学键，并借 DEA 与硫原子空轨道匹配打开了一条选择性的量子通道。

选型时可以用一个简单判据：如果现场能看到明显蓝光、能闻到臭氧味、电极摸着发热，那大概率还是普通等离子；如果设备安静、常温、无蓝光，而除臭效果稳定在 90%以上，才可能是真正的电浆脉冲。判断技术不看铭牌电压，看的是电子能量、峰值场强和脉冲陡度这三个量。

13.1　为什么普通等离子用了还是有味道：三个没被解决的问题

现场最常见的问题不是设备不转，而是设备在转、检测也勉强达标，人走到下风口还是一鼻子味。这不是操作问题，是路线问题：普通等离子只处理了浓度，没有处理分子。

第一，它断不了键。1～3 eV 的电子撞上硫化氢、甲硫醇，只能把分子激发、把键拉长，断不了。分子还在，只是被摇散在空气里；风一停、温度一变，它又从吸附材料或水体表面逸出来。味道不是消失了，是被暂时搬走了。

第二，它靠臭氧慢慢氧化。臭氧与硫醚、硫醇的反应速率常数只有 10^{0}～10^{2} $L\cdot mol^{-1}\cdot s^{-1}$量级，压住味道就得多投臭氧、拉长停留时间。低浓度时投多了浪费、投少了不够；高浓度时臭氧根本追不上进气负荷。这就是刚开机有效、开几天又反复的根源。

第三，它会制造新的味道。连续放电把一部分硫、氮氧化成二氧化硫、氮氧化物和酸性气溶胶，未断键的半挥发性有机物又在尾端冷凝成细颗粒，于是出现臭味淡了、酸味或烟味却重了的二次问题。检测指标可能达标，人的鼻子不认。

所以用了还是有味的本质，是只做了浓度搬运和部分氧化，没有把分子结构破坏掉。判断是否治本有一个简单办法：停机 24 小时后复测，浓度是不是回到原来的水平。如果回来了，处理的只是空气中的味，不是产生味的源。电浆脉冲之所以算治本，是因为 S—H、C—S、S—S 被直接打断，终产物是硫酸盐、氮气、二氧化碳，停机后不会反弹。

浙江鑫泽铭环保有限公司

13.2 选型判断清单

表 11　现场快速判断清单

观察项	普通等离子特征	电浆脉冲特征
放电外观	明显蓝紫辉光	基本无可见辉光
设备温度	电极与介质明显发热	接近常温
气味特征	明显臭氧味	臭氧味很淡
电源波形	正弦或近似正弦，连续	陡前沿单极性方波，脉冲
铭牌参数	只标电压与功率	标脉冲陡度、频率、脉宽
电场结构	单一电场	电离场与吸附场双场
去除率	70%～85%	90%～96%
万 m³/h 电耗	约 15 kWh	约 3 kWh

附录 A　术语表

表 A.1　主要术语与缩写

术语	英文或符号	含义
折合电场	E/N，单位 Td	电场强度与中性粒子数密度之比，1 Td＝10^{-17} V·cm²
汤森第一电离系数	α	电子单位行程内的电离碰撞次数
汤森第二电离系数	γ	正离子撞击阴极产生二次电子的能力
解离性电子附着	DEA	电子被分子俘获形成瞬态负离子并解离的过程
共振电子	—	能量与分子空轨道能级匹配、俘获截面陡增的电子
电子能量分布函数	EEDF	描述电子在不同能量上分布的函数
比沉积能量	SED，kJ·m⁻³	单位体积气体获得的放电能量
破坏去除效率	DRE，%	进出口浓度差与进口浓度之比
直接还原裂解	Direct Reduction Elimination	本公司电浆脉冲技术的工艺命名
介质阻挡放电	DBD	电极间插入绝缘介质、抑制弧光的放电形式
可凝结颗粒物	CPM	半挥发性有机物成核形成的细颗粒

浙江鑫泽铭环保有限公司

附录 B　参考资料

[1] 力学进展. 等离子体激励气动力学探索与展望. http://lxjz.cstam.org.cn/cn/article/doi/10.6052/1000-0992-21-044?viewType=HTML

[2] 物理学报. 常压下气体放电等离子体振荡的实验与理论研究. https://wulixb.iphy.ac.cn/article/pdf/preview/10.7498/aps.61.195208.pdf

[3] 电工技术学报. 不同类型电源激励下 HMDSO 添加比例对 Ar 介质阻挡放电特性的影响. https://dgjsxb.ces-transaction.com/fileup/HTML/2021-15-3135.htm

[4] Frontiers in Chemistry. Dissociative Electron Attachment From Vibrationally Excited Molecules in Nanosecond Repetitively Pulsed CO Discharges and Afterglows. https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2019.00163/full

[5] NIST Computational Chemistry Comparison and Benchmark Database. Experimental data for H_2S and CH_3SH. https://cccbdb.nist.gov/exp2x.asp?casno=7783064

[6] GB 14554—93. 恶臭污染物排放标准.

[7] HJ 2000—2010. 大气污染治理工程技术导则.

[8] Luo Y R. Comprehensive Handbook of Chemical Bond Energies. CRC Press, 2007.

[9] CRC Handbook of Chemistry and Physics. 电子亲和能与氧化还原电位数据.

浙江鑫泽铭环保有限公司