

团 体 标 准

T/CAMIE 15—2023

降解电子级水总有机碳紫外线系统 技术规程

Technical regulation of ultraviolet system for degradation of
total organic carbon in electronic-grade water

2023-09-18 发布

2023-10-18 实施

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 工艺设计	2
4.1 一般要求	2
4.2 工艺要求	3
4.3 紫外线反应器	4
4.4 电气系统	5
4.5 控制系统	5
5 质量控制	5
5.1 设备检验	5
5.2 控制系统	5
6 安装	5
6.1 一般要求	5
6.2 紫外线反应器	5
6.3 电气系统	6
6.4 控制系统	6
7 调试	6
7.1 一般要求	6
7.2 紫外线反应器	6
7.3 电气及控制系统	6
7.4 系统联动调试	6
8 验收	7
9 运行维护与安全防护	7
9.1 运行维护	7
9.2 安全防护	8
附录 A (规范性) 真空紫外灯强度测试方法	9
A.1 测试条件	9
A.2 测试器材	9
A.3 测试步骤	9
A.4 数据整理	10

附录 B (规范性) 石英套管穿透率测试方法	11
B.1 测试仪器	11
B.2 样品制备	11
B.3 测试步骤	11
B.4 数据整理	11
附录 C (规范性) 紫外线降解 TOC 系统辐射剂量验证方法 (1)	12
C.1 剂量-响应曲线绘制	12
C.2 剂量验证	14
附录 D (规范性) 紫外线降解 TOC 系统辐射剂量验证方法 (2)	16
D.1 验证原理	16
D.2 验证步骤	16
D.3 验证方法	17
D.4 测试步骤	17
附录 E (规范性) 痕量 TOC 检测方法	18
E.1 检测仪器	18
E.2 样品类型	18
E.3 检测步骤	19
参考文献	20
图 1 紫外线降解 TOC 系统组成示意图	3
图 A.1 185 nm 紫外灯强度测试装置	9
图 C.1 真空紫外线准平行光束仪示意图	12
图 D.1 TOC 降解效果验证系统图	17
图 E.1 氧化类型 P ₁	18
图 E.2 氧化类型 P ₂	18
图 E.3 氧化类型 P ₃	19
表 1 紫外线设计剂量表	4

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件不涉及专利。

本文件由中国环保机械行业协会提出并归口。

本文件起草单位：世源科技工程有限公司、清华大学、北京安力斯环境科技股份有限公司、中国电子工程设计院有限公司、阿尔德拉科技（深圳）有限公司、无锡江大联盛水处理科技有限公司、Fluidsmile 乐富意得（上海）流体技术有限公司、重庆瑞朗电气有限公司、佛山柯维光电股份有限公司、上海莱索思特种光源（集团）有限公司、哈希水质分析仪器（上海）有限公司、安特蓝德技术公司、广州威固环保设备有限公司、广东君睿光电科技有限公司、北方集成电路技术创新中心（北京）有限公司、清华苏州环境创新研究院、中国科学院生态环境研究中心、北京科技大学、同济大学、中山大学、山东建筑大学、广州市市政工程设计研究总院有限公司、中国计量科学研究院光学所、中国建筑材料科学研究总院石英与特种玻璃研究院、清华大学深圳国际研究生院。

本文件主要起草人：刘澈、孙文俊、钟静、薛雅内、王鹏、吕东明、韦婷婷、罗为民、张晓蕾、何志明、冉新宇、吴义稳、翟煜、李妮、王俭、杨素芬、林若沙、王宸、刘伟、楚文海、方晶云、王永磊、尹文选、敖秀玮、李梦凯、王文龙、蔡晓涌、蔡睿、王彦飞、吴洁、张帆。

本文件为首次发布。

引 言

紫外线技术被广泛应用于各类水处理工艺中，通过真空紫外光光解，将有机物降解为小分子中间产物，或矿化为 CO_2 和 H_2O ，小分子有机物会被后续的水处理单元去除。本文件以 185 nm 真空紫外线为对象，以降解电子级水中总有机碳为目标，对紫外线系统的工艺设计、质量控制、安装、调试、验收、运行维护与安全防护等进行统一规范，有利于提高该系统的设计水平、产品质量和运行效果，提升真空紫外线技术在电子级水处理领域中的应用，为行业的发展提供技术指导和支撑。

降解电子级水总有机碳紫外线系统技术规程

1 范围

本文件规定了用于降解电子级水总有机碳（TOC）紫外线系统的术语和定义、工艺设计、质量控制、安装、调试、验收、运行维护与安全防护。

本文件适用于电子级水制备工艺中采用紫外线方法降解总有机碳的系统（以下简称紫外线降解TOC系统）。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）
- GB/T 11446.1 电子级水
- GB/T 19837—2019 城镇给排水紫外线消毒设备
- GB/T 32092—2015 紫外线消毒技术术语
- GB 50054 低压配电设计规范
- GB 50168 电气装置安装工程电缆线路施工及验收标准
- GB 50171 电气装置安装工程盘、柜及二次回路接线施工及验收规范
- GB50231 机械设备安装工程施工及验收通用规范
- GB50235 工业金属管道工程施工规范
- GB50268 给水排水管道工程施工及验收规范
- GB 51035 电子工业纯水系统安装与验收规范
- T/CAMIE 01—2021 城镇给水紫外线高级氧化系统

3 术语和定义

GB/T 32092界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

紫外线反应器 UV reactor

由紫外线反应器腔体、紫外线灯管、石英套管、紫外线传感器、温度传感器等组成，通过紫外线灯管照射水体而进行水质净化的设备。

[来源：T/CAMIE 01，3.1，有修改]

3.2

紫外线传感器 UV sensor

将紫外线光信号转换为电信号的装置。

注：本文件适用于 185 nm 和 254 nm 紫外线的测定。

3.3

电子级水 electronic grade water

电子工程工艺过程中使用的超纯水。

注：配水点水质应满足 GB/T 11446.1 和 ASTM D5127 规定的纯水指标。

3.4

紫外线设计剂量 UV target dose

在一定水质即 UVT_{254} 条件下满足特定 TOC 去除率所需的 185nm 紫外线剂量，单位为 mJ/cm^2 。

3.5

紫外线强度 UV intensity

紫外线反应器腔体内单位时间内与紫外线传播方向垂直的单位面积上的紫外线辐射通量，单位为 mW/cm^2 。

[来源：GB/T 32092，2.1，有修改]

3.6

单位对数去除率所需紫外线剂量 UV dose required per log reduction (D_L)

将 TOC 降低 1 个 log（即 90% 去除率）时所需要的 185 nm 紫外线剂量，其值为紫外线剂量—TOC 对数去除率（剂量-响应）曲线斜率的倒数，单位为 $mJ/cm^2 \cdot \log$ 。

3.7

紫外线验证剂量 UV reduction equivalent dose (RED)

测定紫外线降解 TOC 系统对 TOC 的去除率，同时使用真空准平行光束仪辐射同一水样，经混合离子交换柱或连续电脱盐装置后绘制出剂量-响应曲线，通过曲线上对应的去除率所得到的验证剂量，单位为 mJ/cm^2 。

3.8

紫外线穿透率 UV transmittance (UVT_{254})

波长为 254 nm 紫外线在通过 1 cm 比色皿水样后的紫外线强度与通过前的紫外线强度之比。

[来源：GB/T 32092，2.10，有修改]

3.9

石英套管穿透率 UV transmittance of quartz glass tube

波长为 185 nm 紫外线透过石英套管的光通量与入射光通量之比。

3.10

紫外灯老化系数 UV lamp aging factor

紫外灯在某一时刻的紫外线输出功率与紫外灯初始运行 100 h 后的紫外线输出功率之比。

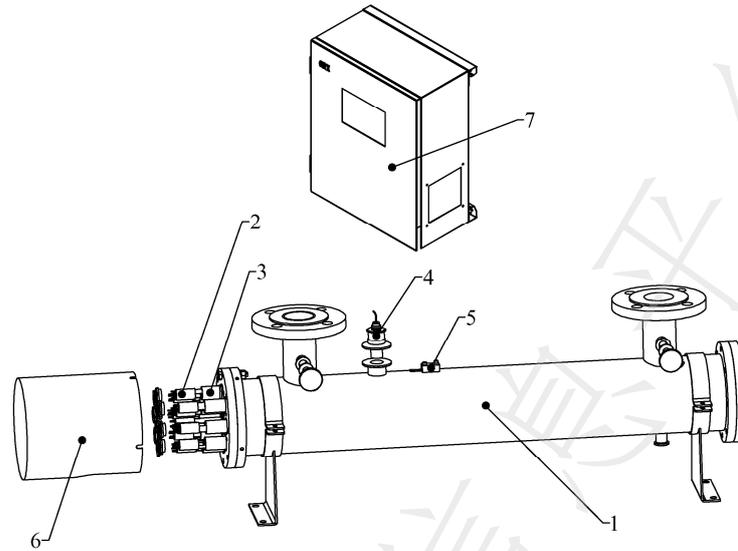
[来源：GB/T 19837，3.1]

4 工艺设计

4.1 一般要求

4.1.1 系统组成

紫外线降解 TOC 系统基本组成单元包括紫外线反应器、电气系统、控制系统及其他配件等，系统组成如图 1 所示。



标引序号说明：

- 1——反应器腔体；
- 2——灯管；
- 3——石英套管；
- 4——紫外线传感器；
- 5——温度传感器；
- 6——封罩；
- 7——电气控制柜。

图 1 紫外线降解 TOC 系统组成示意图

4.1.2 设备材料

- 4.1.2.1 反应器腔体内表面电抛光粗糙度应小于等于 $0.4 \mu\text{m}$ ，所有与水接触的材料应禁油且无 TOC 溶出。
- 4.1.2.2 暴露在紫外线下的组件应抗紫外线辐射，且无 TOC 溶出。
- 4.1.2.3 灯管的连接部件应耐高温和阻燃。
- 4.1.2.4 与水接触的设备和部件应防腐蚀，其中的金属部件应耐腐蚀。

4.1.3 防护

- 4.1.3.1 反应器防护等级应不低于 IP54，与水接触处部分的防护等级应达到 IP68。
- 4.1.3.2 反应器灯头部应设置封罩将灯管电缆与外界隔离。

4.2 工艺要求

4.2.1 进水水质

紫外线降解 TOC 系统进水的紫外线穿透率 UVT_{254} 应不低于 99%。

4.2.2 设置位置

- 4.2.2.1 紫外线降解 TOC 系统反应器的串联级数应根据该装置进水 TOC、TOC 去除率及产水要求的 TOC 指标来确定。
- 4.2.2.2 紫外线降解 TOC 系统宜设置在可再生、不可再生混合离子交换柱或连续电脱盐装置之前。

4.2.3 设计剂量

降解 TOC 所需紫外线设计剂量，应根据进水水质特点和 TOC 去除率确定，系统在处理条件和水质参数下所能实现的紫外线剂量应不低于该设计剂量。当不能确定设计剂量时，可参考表 1。

表 1 紫外线设计剂量表

序号	TOC 去除率 %	@254 nm 紫外线剂量 mJ/cm ²	@185 nm 紫外线剂量 mJ/cm ²
1	< 0.5 log (68%)	≥ 150	≥ 40
2	0.5 log~1 log (68%~90%)	≥ 250	≥ 70
3	1 log~2 log (90%~99%)	≥ 400	≥ 100

注：反应器进水 TOC 质量浓度 ≤ 100 μg/L；去除率为本系统和混合离子交换柱或连续电脱盐装置联合的去除率。

4.2.4 系统运行方式

紫外线降解 TOC 系统宜采用连续的方式运行。

4.3 紫外线反应器

4.3.1 一般规定

4.3.1.1 紫外线灯管分为低压灯（LP）和中压灯（MP）。

4.3.1.2 反应器应设置紫外线传感器，宜设置温度传感器，可选择设置灯管功率调节系统。

4.3.1.3 灯管、套管和传感器应易于拆卸。

4.3.1.4 紫外线灯辐射照度应按照附录 A 的规定进行测定。

4.3.1.5 石英套管的紫外线穿透率应大于 70%@185 nm，应按照附录 B 的规定进行测定，其他要求应符合 GB/T 19837 的相关规定。

4.3.1.6 低压灯管的使用寿命应不低于 9 000 h，中压灯管应不低于 5 000 h。紫外灯老化系数和运行寿命应按照 GB/T 19837—2019 附录 A 的方法进行测定。测定时在环境中应填充纯度大于 99.999% 的 N₂。

4.3.1.7 镇流器的使用应符合 GB/T 19837—2019 的相关规定。镇流器使用寿命应不低于 2 年。

4.3.1.8 验证用紫外线传感器在使用前应进行校准，其设置位置应与验证期间相同。

4.3.1.9 反应器应预留更换灯管及套管的操作空间。

4.3.1.10 反应器设计工作压力应与纯水系统相一致，并宜不低于 1.0 MPa。

4.3.1.11 与反应器相连接的管道和配件应抗紫外线辐射，且无 TOC 溶出。

4.3.2 剂量计算及验证

4.3.2.1 理论剂量

反应器的理论紫外线剂量可以使用数值模型计算，应按照 T/CAMIE 01—2021 附录 C 的计算方法。理论剂量用于反应器的优化设计，不宜用来评估系统的实际处理效果。

4.3.2.2 验证剂量

通过降解 TOC 的剂量-响应曲线进行系统紫外线验证剂量的测定，应按照本文件附录 C 的操作方法。紫外线降解 TOC 系统的实际处理效果应有第三方检测的紫外线验证剂量评估。第三方检测报告应在设计阶段提交给甲方及设计单位。

4.4 电气系统

- 4.4.1 电气元件应符合 GB 50054 的相关规定。
- 4.4.2 接线应符合 GB 50054 和 GB 50168 的相关规定。
- 4.4.3 电气柜应符合 GB 50054 和 GB 50171 的相关规定。
- 4.4.4 电气部件的防护等级应符合 GB/T 4208 的相关规定。

4.5 控制系统

- 4.5.1 系统宜集成各项控制、故障报警和远程通讯等功能。系统应带有触摸屏，操作界面宜为菜单式，界面宜简单便于操作，在报警时宜自动显示错误信息窗口。
- 4.5.2 系统宜连接到工厂的 SCADA 系统，实现远程监控及操作。系统应支持 Modbus RTU、TCP/IP 通讯协议，应支持 PROFIBUS - DP、以太网等接口。
- 4.5.3 系统设备应安装在室内，环境工作温度宜为 18℃~28℃，相对湿度宜为 40%~60%。
- 4.5.4 控制屏宜显示 UV 强度、反应器腔体内温度、电气柜内温度、监控状态、报警状态及信息、运行时间、灯管的运行、启停状态及累计运行时间等信息，有查阅和下载历史记录等功能。
- 4.5.5 控制柜内应设置温度监测装置。柜体应采用集成换热器式风冷散热系统和控制与镇流器一体化紧凑设计，应采用免维护接线方式预制灯线连接。
- 4.5.6 控制柜柜体防护等级应不低于 IP50。
- 4.5.7 控制柜应设置现场检修开关，当检修维护设备时应切断电源。

5 质量控制

5.1 设备检验

设备、配套设备及仪器仪表等所示铭牌、商标、型号规格等均应符合相关国家现行产品标准的规定和设计文件的要求，并应具有产品出厂质量合格证、质量保证书和安装使用说明书等文件。

检查方法：对照设计、招标文件及相关产品标准观察检验及查验相关文件。

检查数量：全数查验。

5.2 控制系统

控制中心应完成系统的数字和模拟信号输入、输出的功能测试。

6 安装

6.1 一般要求

- 6.1.1 设备的安装应符合 GB 50231、电气装置的安装应符合 GB 50168 的有关规定。
- 6.1.2 管道的安装应符合 GB 51035 和 GB 50235 的有关规定。
- 6.1.3 设备、材料进场前必须经过验收，合格后方可使用。

6.2 紫外线反应器

- 6.2.1 反应器安装前应对其基础进行校对，基础中心线的平面位移、基础标高的偏差最大允许值应在±5 mm 范围内。
- 6.2.2 反应器应采用基座进行固定，坡度最大允许值应在±3 mm 范围内。
- 6.2.3 应预留检修、维护反应器所需的空间。
- 6.2.4 反应器不得承担与其连接的管道重量。
- 6.2.5 反应器安装完成后再安装灯管、灯头、锁头和封罩。安装灯管时应佩戴洁净手套。

6.3 电气系统

- 6.3.1 反应器应通过引线组件和端子盒接地，端子盒与接地线应紧固到反应器安装支架上。
- 6.3.2 控制面板应与控制盒柜体接地，电缆的自由端应在邻近输入点的端子接地。
- 6.3.3 电气柜的安装高度应与地面有一定距离。
- 6.3.4 操作面板的安装高度应保证操作便利。

6.4 控制系统

- 6.4.1 设备应安装在光照充足、通风良好、操作维修方便的地方。
- 6.4.2 设备不应安装在潮湿、有腐蚀性、有振动影响及有电磁干扰的地方。
- 6.4.3 设备的安装位置应与管道保持一定距离。

7 调试

7.1 一般要求

7.1.1 调试应具备下列条件：

- a) 技术文件、装箱清单、随机资料及专用工具齐全；
- b) 场地的通风、供电、供水和排水正常；
- c) 调试应由专业技术人员负责，并按调试程序进行。

7.1.2 调试应包括反应器调试、电气及控制系统调试和系统联动调试。

7.1.3 调试结束后应存档调试记录。

7.2 紫外线反应器

7.2.1 在启动系统之前应确保反应器内注满水，并达到最小流量要求。

7.2.2 反应器应缓慢加压至设计压力值。

7.3 电气及控制系统

7.3.1 参数设置应能满足现场工况的要求。现场应具备联网条件。

7.3.2 设备安装就位后应进行单机和联机调试。

7.3.3 系统应有紫外线强度、故障报警、远程启停复位等信号，应与现场的 DCS/SCADA 系统进行交互，应能实现自动控制与实时监控运行状态。

7.3.4 系统应进行手动/自动模式切换，交互信号应能正常接收和发送。

7.3.5 应收集系统运行参数。

7.4 系统联动调试

7.4.1 系统联动调试应符合下列条件：

- a) 对设备启停进行测试，启停应迅速；
- b) 对镇流器进行检查，灯管亮度应符合要求，镇流器反馈顺序应正常，升温应正常，冷却系统应正常工作；
- c) 对反应器的温度保护进行检测，故障停机应能报警；
- d) 通讯功能与上位机联网应符合数据收发要求。

7.4.2 系统联动调试前应打开反应器前后管路上的阀门。

7.4.3 启动系统，观察 TOC、溶解氧数值的变化情况，根据数值和 TOC 处理目标调整系统的运行参数。

7.4.4 在系统连续运行 24 h 后, TOC、溶解氧数值应正常, 系统信号反馈应正常, 则确定系统运行模式。

8 验收

8.1 系统验收应符合 GB 51035、GB 50268、GB 50231 的相关规定。

8.2 系统竣工验收应包括下列文件:

- a) 批准的设计文件、设计变更文件和竣工文件;
- b) 完整的安装、调试和试运行记录;
- c) 试运行期间运行参数及连续监测报告;
- d) 其他相关技术资料。

8.3 系统验收后, 建设单位应将有关设计、安装和验收的文件组卷归档。

9 运行维护与安全防护

9.1 运行维护

9.1.1 运行维护者应为专业人员, 应熟悉系统的运行要求, 应严格按操作规程的要求进行操作。

9.1.2 应建立安全操作规程, 并应标示于醒目位置。

9.1.3 操作人员应定期巡视系统, 填写报表和交接班记录, 发现异常情况应及时上报。

9.1.4 应制定系统维修计划并建立设备维修档案, 应详实记录设备故障原因、故障现象、处理措施和验收结果。

9.1.5 应对设备、电气元件和仪表进行日常维护和检查, 应包括检查记录、设备维护记录、保养记录等。

9.1.6 当系统出现故障不能正常运行时应及时向维保单位进行故障报修, 非专业人员严禁开启系统。

9.1.7 反应器的运行维护应符合下列规定:

- a) 反应器外表面应干净, 无冷凝水、无泄漏点, 腔体应不发热, 传感器应工作正常, 连接电缆应完好, 灯管的连接接头及灯管线应完好;
- b) 在小流量或无流量时应关闭反应器;
- c) 在更换灯管前应关闭电源, 应做系统绝缘, 应在灯管冷却后进行操作。每次更换灯管时都应检查套管的清洁状况;
- d) 更换套管前应先卸压和排空反应器, 宜采用工具支撑套管避免其在反应器内破损;
- e) 应定期对传感器进行清洗和校验。

9.1.8 电气与控制系统的运行维护应符合下列规定:

- a) 控制柜应散热充分, 进风口过滤棉应定期清理, 控制柜外表面应干净, 无冷凝水, 外部电缆接线应整洁、完整, 接地应可靠;
- b) 应定时查看浏览设备显示屏信息, 确认设备处于正常运行状态。记录紫外线强度和剂量数值、系统运行时间等关键信息参数。应安排更换接近使用寿命终点的耗材;
- c) 应定期查看设备故障记录显示, 了解近期是否有故障发生, 是否已查明其原因, 是否已有效处理;
- d) 控制柜应由专业电气人员进行维护和操作。控制柜内存在高电压风险, 应先断开电源再打开柜门, 并及时挂上安全锁, 等待 1 min 后再进行操作;

e) 故障排查需专业人员在说明书的指导下进行。

9.2 安全防护

9.2.1 应建立安全规章制度，应制定安全隐患问题清单，应制定事故应急预案。

9.2.2 应加强安全教育，组织模拟事故发生时应采取的紧急处置措施，演练组织救援设施、设备调配和人员疏散演习。

9.2.3 设备检查、维护和维修时必须关闭电源，并在配电柜上明确警示。

9.2.4 在系统运行时应注意高电压与灯管高温的风险，灯管、套管及传感器应在断电冷却至室温时操作。

9.2.5 禁止将裸露的皮肤暴露在紫外线下，禁止直视发光的灯管。

9.2.6 应为电力系统建立安全和保护程序。

附录 A
(规范性)
真空紫外灯强度测试方法

A.1 测试条件

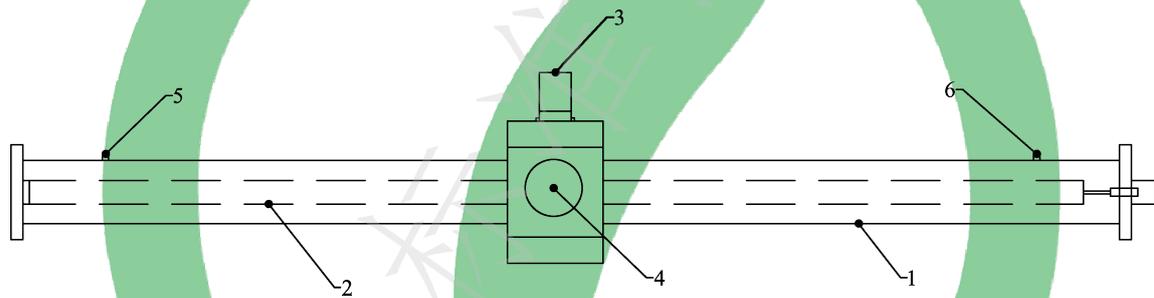
A.1.1 环境温度应为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度应 $\leq 65\%$ 。

A.1.2 测试时应通入纯度大于 99.999%的 N_2 作为保护气体。

A.2 测试器材

A.2.1 针对测试光谱范围 $165\text{ nm}\sim 200\text{ nm}$ 的真空紫外线辐照计推荐型号为 ILT2400+NS185。

A.2.2 185 nm 紫外灯强度测试装置如图 A.1 所示。



标引序号说明：

- 1——测试仓；
- 2——灯管；
- 3——辐照计；
- 4——石英观察窗；
- 5—— N_2 进口；
- 6—— N_2 出口。

图 A.1 185 nm 紫外灯强度测试装置

A.3 测试步骤

A.3.1 从每批产品中随机选取待测灯管数支，目视表面光洁、管体笔直，接线插头牢固。

A.3.2 将灯管装入测试装置。

A.3.3 开启 N_2 阀门，持续吹扫。

A.3.4 检测设备准备：将辐照计检测探头置于测试仓内，固定，开启辐照计电源，待其初始化完成后选定检测，设备归零。

A.3.5 开启并预热灯管，应预热至少 10 min，开始测试。

A.3.6 记录数据曲线，读取紫外线辐照峰值。

A.3.7 关闭紫外灯，停止 N_2 吹扫，关闭辐照计电源。

A. 4 数据整理

A. 4. 1 PC 端导出数据曲线。

A. 4. 2 记录数据曲线，读取紫外线辐照峰值。

附录 B
(规范性)
石英套管穿透率测试方法

B.1 测试仪器

紫外分光光度计：测量相对误差应在 $\pm 1\%$ 范围内，应能在高纯 N_2 吹扫环境下实现对 180 nm~380 nm 紫外线光谱穿透率测试。

B.2 样品制备

B.2.1 从每批产品中任意抽取无气线、色线、沟楞、杂质点等外观无缺陷的管状样品 3 支，每支切取长度为 30 mm~50 mm 的管段，将每个管段沿管长方向切割成两个半圆体，任选其中一个半圆体为待测样品。

B.2.2 用洁净的布擦拭待测样品，必要时用无水乙醇擦洗，晾干。

B.3 测试步骤

B.3.1 开启测试仪器，按仪器说明书要求用高纯 N_2 吹扫；电脑进入测量系统。

B.3.2 选定方法、测量波长范围等设置参数；校正仪器基线及 100% 线。

B.3.3 将待测样品放入样品室，关闭样品室后开始测量，保存样品紫外线光谱曲线。

B.4 数据整理

B.4.1 PC 端导出样品紫外线光谱曲线。

B.4.2 读取每个样品 185 nm 波长下的紫外线穿透率值，以百分数表示，保留 1 位小数。

附录 C

(规范性)

紫外线降解 TOC 系统辐射剂量验证方法 (1)

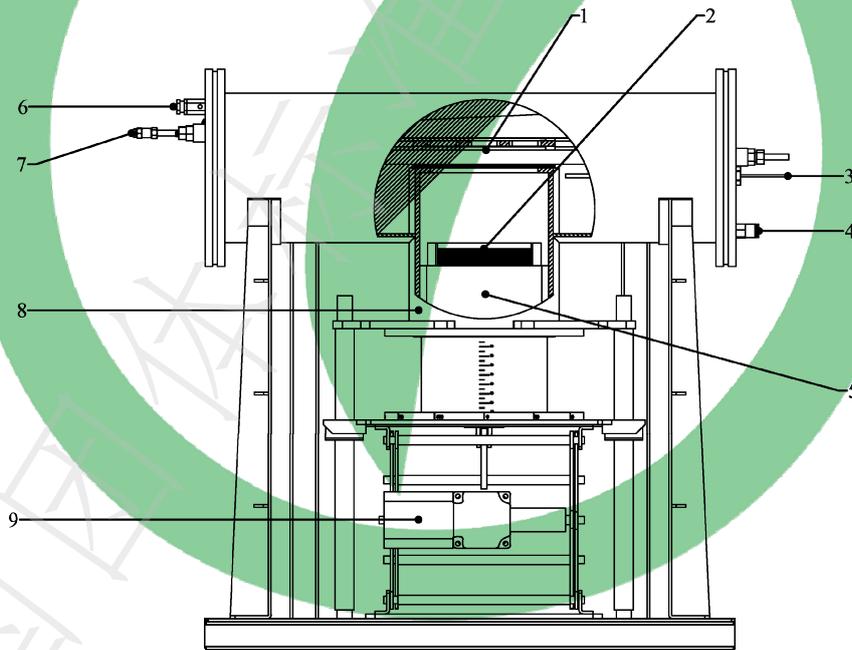
C.1 剂量-响应曲线绘制

C.1.1 模型化合物

选择在 UV-C 波段光响应不灵敏但易于与羟基自由基反应的有机物作为模型化合物, 如对氯苯甲酸、卡马西平等。模型化合物和羟基自由基的反应动力学参数应已知。

C.1.2 准平行光束仪

采用真空紫外线准平行光束仪 (collimated beam apparatus) 测定紫外线剂量-响应曲线, 装置如图 C.1 所示。采用 185 nm 紫外灯作为光源, 平行安装于封闭灯筒内, 在筒体的底部中央开口, 下方接一准直管, 其作用是产生平行紫外线。准平行光束仪配置 N₂ 吹扫系统, 填充纯度大于 99.999% N₂ 作为保护气体, 防止真空紫外线被空气吸收。



标引序号说明:

- 1——灯管;
- 2——反应皿;
- 3——温感探头;
- 4——N₂ 进口;
- 5——磁力搅拌器;
- 6——安全阀;
- 7——遮光板拉杆;
- 8——准直管;
- 9——升降台。

图 C.1 真空紫外线准平行光束仪示意图

为了保证反应溶液照射均匀，用磁力搅拌器充分搅拌。通过控制遮光板的开启时间控制紫外线的照射时间。

C. 1. 3 平均辐照度测定

C. 1. 3. 1 采用探针化合物法测定准平行光束仪下真空紫外线的平均辐照度。

C. 1. 3. 2 真空紫外线辐射探针化合物的降解可表示为式 (C.1)：

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -k_{\text{OH,C}}[\cdot\text{OH}]_{\text{ss}}t = -k't \quad \dots\dots\dots (\text{C.1})$$

式中：

C_0 ——反应前水样中探针化合物的浓度，单位为摩尔每升 (mol/L)；

C ——反应后 t 时刻水样中探针化合物的浓度，单位为摩尔每升 (mol/L)；

$k_{\text{OH,C}}$ ——探针化合物与羟基自由基的二级反应速率常数，单位为升每摩尔每秒 $L/(\text{mol}\cdot\text{s})$ ；

$[\cdot\text{OH}]_{\text{ss}}$ ——羟基自由基的稳态浓度，单位为摩尔每升，(mol/L)；

t ——反应时间，单位为秒 (s)；

k' ——探针化合物在真空紫外线下降解的拟一级反应动力学常数，单位为每秒 s^{-1} 。

在稳态条件下， $d[\cdot\text{OH}]/dt=0$ ，则真空紫外光辐射下羟基自由基的产生可表示为式 (C.2)：

$$\frac{d[\cdot\text{OH}]}{dt} = \phi_{\text{H}_2\text{O}}f_{\text{H}_2\text{O}}I_a \quad \dots\dots\dots (\text{C.2})$$

式中：

$\phi_{\text{H}_2\text{O}}$ ——水在真空紫外线辐射时的量子产率；

$f_{\text{H}_2\text{O}}$ ——被水吸收的真空紫外线光子的光子数；

I_a ——真空紫外线的入射光子通量率。

C. 1. 3. 3 将反应溶液中的溶质化合物 (如甲醇) 以 S_i ($i=1, 2, \dots$) 表示，则式 C.2 可以表示为式 (C.3)：

$$\frac{d[\cdot\text{OH}]}{dt} = \sum_i k_{\text{OH},S_i}[\cdot\text{OH}]_{\text{ss}}S_i \quad \dots\dots\dots (\text{C.3})$$

根据式 (C.2) 和式 (C.3)， $[\cdot\text{OH}]_{\text{ss}}$ 可以表示为：

$$[\cdot\text{OH}]_{\text{ss}} = \frac{\phi_{\text{H}_2\text{O}}f_{\text{H}_2\text{O}}I_a}{\sum_i k_{\text{OH},S_i}S_i} \quad \dots\dots\dots (\text{C.4})$$

根据式 (C.1) 和 (C.4) 得到式 (C.5)：

$$k' = \frac{k_{\text{OH,C}}\phi_{\text{H}_2\text{O}}f_{\text{H}_2\text{O}}I_a}{\sum_i k_{\text{OH},S_i}S_i} \quad \dots\dots\dots (\text{C.5})$$

根据上式可计算得到 I_a ，又已知 I_a 和真空紫外线的平均辐照度关系如式 (C.6)：

$$I_a = \frac{I_{\text{avg}}S}{V} \quad \dots\dots\dots (\text{C.6})$$

式中：

I_{avg} ——真空紫外线的平均辐照度，单位为毫瓦每平方厘米 (mW/cm^2)；

S ——真空紫外线入射光通过的溶液表面积，单位为平方厘米（ cm^2 ）；

V ——真空紫外线辐照的溶液体积，单位为立方厘米（ cm^3 ）。

综上，计算得到真空紫外线的平均辐照度。

C.1.4 剂量-响应曲线绘制

C.1.4.1 开启 N_2 阀门，进行吹扫。

C.1.4.2 开启紫外灯，应预热至少 10 min，使灯管发出的紫外线稳定。

C.1.4.3 按照 C.1.3 方法测定真空紫外线平均辐照度。

C.1.4.4 真空紫外线辐照剂量计算见式（C.7）：

$$D = I_{\text{avg}} t \quad \dots\dots\dots (\text{C.7})$$

式中：

D ——紫外线剂量，单位为毫焦每平方米（ mJ/cm^2 ）；

t ——照射时间，单位为秒（s）。

C.1.4.5 根据式（C.7）计算指定真空紫外线剂量的照射时间。

C.1.4.6 在 N_2 环境下，配置特定浓度模型化合物的待照射水样。

C.1.4.7 将水样注入反应皿，调整升降台，使反应皿液面至灯管中心为设定的距离；打开磁力搅拌器，调整转速，使溶液混合均匀且无飞溅；通过设置遮光板启闭时间控制溶液的紫外线照射剂量。同一浓度模型化合物溶液应测量 3 次，测定其紫外线照射前后浓度的数值。

C.1.4.8 根据模型化合物紫外线照射前后浓度的数值计算其对数去除率，计算公式如下式（C.8）：

$$Re_{\log} = \lg\left(\frac{C_0}{C}\right) \quad \dots\dots\dots (\text{C.8})$$

式中：

Re_{\log} ——模型化合物的对数去除率；

C_0 ——照射前水样中模型化合物的浓度，单位为摩尔每升（ mol/L ）；

C ——照射后水样中模型化合物的浓度，单位为摩尔每升（ mol/L ）。

C.1.4.9 根据模型化合物的对数去除率和紫外线剂量，绘制出剂量-响应曲线，该曲线的斜率倒数即为单位对数去除率所需紫外线剂量 D_L 。

C.2 剂量验证

C.2.1 测试内容和控制参数

C.2.1.1 测试内容包括紫外线系统对模型化合物的去除率、模型化合物的剂量-响应曲线、数据分析和紫外线有效剂量的计算。

C.2.1.2 在测试过程中检测、控制和记录流量、流速、模型化合物浓度、水样水质参数、紫外线强度、紫外线灯管布置和工作状态、系统进出水管路的布置等主要参数。

紫外线反应器设备厂商应提供紫外灯老化系数、反应器的理论剂量计算过程等信息。

C.2.2 模型化合物浓度

模型化合物的浓度应根据工艺进水的 TOC 质量浓度确定。

C.2.3 测试设备要求

C.2.3.1 测试所选管路的水力学状况不应优于实际工程的水力学状况，以保证测试剂量不高于实

际工程的紫外线剂量。

C.2.3.2 进出水取样口与反应器之间应设置弯头。

C.2.3.3 紫外线灯管应有详细的型号、工作参数、尺寸、压力等级、发射光谱、光电转化率、生产厂商等信息。验证用灯管应保证其能够产生稳定的紫外线辐射。采用中压灯的系统应配有过热安全切断开关。

C.2.3.4 反应器应配备验证用光强计和校准过的光强计，在反应器同一安装位置，紫外线光强计读数的平均值与验证用传感器读数的误差应小于 10%。

C.2.4 验证测试程序

C.2.4.1 一般要求

通过系统对模型化合物的去除效果、紫外线平行光束仪的剂量-响应曲线来确定真空紫外线验证剂量。

C.2.4.2 进水水质检测

对进水 TOC、UVT₂₅₄、TDS、电导率等水质参数进行检测。

C.2.4.3 系统调试运行

开启紫外线系统，调节进出口阀门，使系统流量达到目标流量并稳定。调试运行期间的流量波动不应超过 5%。

C.2.4.4 系统运行稳定状态调试

取样前应对系统进行稳定状态测试。向水中投加一定量的模型化合物，检测进水口和出水口的模型化合物浓度。测试中两个点的平均化合物浓度相对误差应小于 5%，且同一点 3 次取样浓度误差应小于 5%。

C.2.4.5 取样

取样应在系统达到稳定后进行。

在系统进水口、出水口分别取样，并记录取样开始时间和结束时间。

在取样时记录样品编号、流量、紫外灯功率、电流、光强、紫外线传感器位置、取样时间和水温等参数。

水样应保存在 4℃ 环境中。

C.2.4.6 准平行光测试

在进行上述全尺寸规模实验的同时，在实验室对同一水样在进行真空紫外线准平行光测试，从而确定模型化合物的紫外线剂量-响应曲线。

C.2.5 验证剂量

C.2.5.1 根据水样的检测结果，通过式 (C.8) 可以计算得到某一特定条件下紫外线系统对模型化合物的对数去除率。

C.2.5.2 根据准平行光束仪的实验结果，绘制某一水质条件下的真空紫外线剂量-响应关系曲线。

C.2.5.3 通过真空紫外线剂量-响应曲线上对应的模型化合物对数去除率就能得到紫外反应器的紫外线验证剂量数值。

附录 D

(规范性)

紫外线降解 TOC 系统辐射剂量验证方法 (2)

D.1 验证原理

真空紫外线波段可光解水生成羟基自由基·OH，同时灯管表面高浓度·OH 会复合，生成微量 H₂O₂。因此，本测试方法的原理在于通过检定微量 H₂O₂ 的生成率测定生成·OH 的真空紫外线辐射剂量。真空紫外线辐照去离子水生成 H₂O₂ 的量子产率，已通过光异构化光度计 (cis-cyclooctene cis-trans) 标定为 0.024±0.002，因此在实际测试中，以去离子水作为测试药剂 (即化学感光剂)，测定目标紫外线反应器辐照去离子水生成微量 H₂O₂ 的速率，即可验证目标反应器的辐射剂量。

D.2 验证步骤

D.2.1 搭建待测反应器和水循环系统，系统内充满去离子水 (体积 V, L)，开启紫外灯。启动水循环，循环流量为 3 L/min。

D.2.2 分别在开灯后 5 min、10 min、15 min、20 min、25 min 对反应器内进行取样，每次取样 3 个。

D.2.3 采用 DPD-POD 分光光度法测定 H₂O₂ 产率 [mol / (L · min)]。

D.2.3.1 试剂准备：DPD (N, N-二乙基-对苯二胺, N, N-diethyl-p-phenylenediamine)、POD (horseradish peroxidase)、磷酸盐缓冲液。

D.2.3.2 溶液配制：0.1 g 的 DPD 溶于 10 mL 0.05 mol/L H₂SO₄ 溶液中配成 DPD 溶液；10 mg POD 溶于 10 mL 超纯水中制得 POD 溶液，溶液均由超纯水配制。

D.2.3.3 测试流程：用移液管移取 27 mL 水样于 50 mL 烧杯中，加入 3 mL 0.5 mol/L pH = 6 的磷酸盐缓冲液，再快速加入 50 μL DPD 和 50 μL 的 POD 并开始计时，在 (45±5) s 内于 551 nm 处测量吸光度，每个样品至少测量两次，取平均值。根据所测的吸光度值，利用标准曲线求得相应的 H₂O₂ 浓度及 H₂O₂ 产生速率。

D.2.4 根据 H₂O₂ 产生速率与真空紫外线的剂量的函数关系 [见式 (D.1)] 计算紫外线反应器紫外线辐射剂量。

$$DL = \frac{r_{\text{H}_2\text{O}_2} \times V}{\phi} t \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

式中：

DL——真空紫外线辐射剂量，单位为 einstein；

r_{H₂O₂}——H₂O₂ 产率，单位为摩尔每升每分钟 mol / (L · min) ；

V——系统内去离子水体积，单位为升 (L) ；

φ——H₂O₂ 量子产率，0.024 mol/einstein；

t——反应器水力停留时间，单位为分钟 (min) 。

D.3 验证方法

在标准反应器（如紫外线准平行光束装置和紫外线细管流反应系统，见图 D.1），测定真空紫外线辐射剂量与目标原水 TOC 百分数去除率的关系，结合目标反应器的紫外线验证剂量，即可验证待测反应器对不同原水 TOC 降解效果。

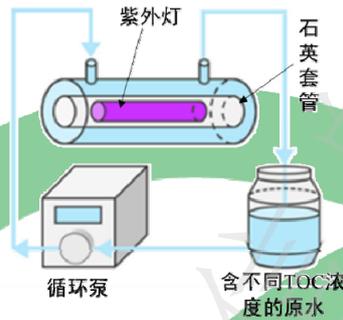


图 D.1 TOC 降解效果验证系统图

D.4 测试步骤

D.4.1 标准反应器（如紫外线准平行光束装置和紫外线细管流反应系统）使用之前，先打开紫外灯预热 10 min。

D.4.2 测定标准反应器多个预设辐照时间的真空紫外线辐射剂量。

D.4.3 在每个预设辐照时间辐照原水，重复 3 次，照射后的水样立即进行 TOC 浓度检测，以未辐照目标水作为对照，计算目标水 TOC 的降解百分比 [见式 (D.2)]，并获得真空紫外线辐射剂量和 TOC 降解百分比之间的关系曲线。

$$DR = \frac{C_t}{C_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

式中：

DR ——目标水 TOC 降解率 (%)；

C_t ——目标水在接受某一辐照剂量后的 TOC 浓度，单位为微克每升 ($\mu\text{g/L}$)；

C_0 ——目标水在未接受辐照时的 TOC 浓度，单位为微克每升 ($\mu\text{g/L}$)。

D.4.4 基于紫外线验证剂量、辐射剂量和目标原水 TOC 降解百分比之间的关系曲线，即可验证紫外反应器对目标原水 TOC 的降解效果。

附 录 E
(规范性)
痕量 TOC 检测方法

E.1 检测仪器

E.1.1 紫外氧化电导率测定仪：通过测量样品被紫外线氧化前后的电导率变化（电导率的变化是存在的有机碳量及其氧化成 CO_2 的直接函数）确定 TOC 浓度。仪器量程为 $0.05 \mu\text{g/L} \sim 9\,999 \mu\text{g/L}$ ，用水样冲洗和填充监测单元。

E.1.2 传感器的前面板及其控制器上显示样品分析的数值，单位为微克每升（ $\mu\text{g/L}$ ）。同时显示电阻率或电导率和温度，温度补偿或校正至 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。传感器能显示 1 h 内的数据曲线。

E.1.3 打印机记录异常情况、偏移等数据。

E.2 样品类型

依据样品检测过程中电导率与时间的关系曲线，将样品分为三种不同“氧化类型”，传感器在分析过程中连续监测电导率和温度，以确保样品完全氧化。

E.2.1 P_1 型样品：如图 E.1 所示，在 P_1 型样品中，电导率一直在增加，直到氧化完成。这表明很少形成中间有机酸，而这些有机酸的导电性比等效的 CO_2 高。

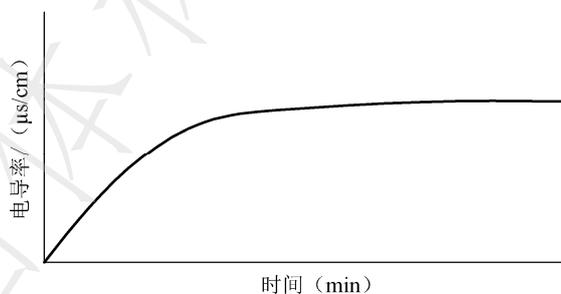


图 E.1 氧化类型 P_1

E.2.2 P_2 型样品：如图 E.2 所示， P_2 型样品出现在低 TOC 浓度，非常类似于 P_1 型或低 TOC 浓度的 P_3 型样品，其中必须调整测量单元的有机“背景”。

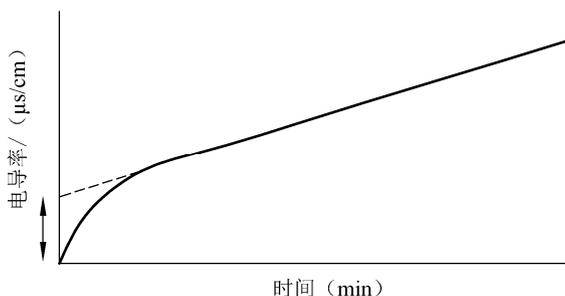


图 E.2 氧化类型 P_2

E.2.3 P₃型样品：如图 E.3 所示，P₃型样品中含有大量的有机酸。因此，随着氧化的完成，电导率峰值随之下降。

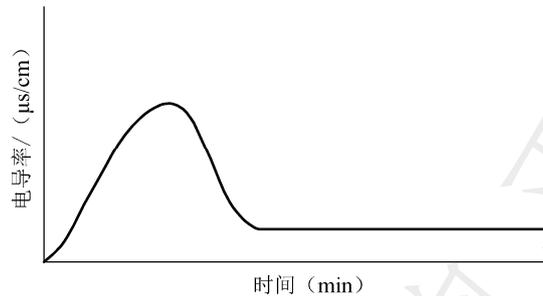


图 E.3 氧化类型 P₃

氧化类型的突变可以表明水中化学成分的变化。当 TOC 浓度为 10 μg/L 时，从 P₂型到 P₃型的变化表明污染向更复杂的化合物转移。

简单的有机物，如甲醇，P₁型 TOC 浓度相对较高（超过 500 μg/L），更复杂的有机物倾向于以 P₃型氧化，相对浓度较低（< 25 μg/L）。随着 TOC 浓度的变化，这种转变的位置发生变化，但测量的准确性保持不变。

E.3 检测步骤

E.3.1 开机：按仪器说明书要求，在 99.999%N₂ 环境下注入水样，水样氮封；电脑进入测量系统，设定样品的冲洗时间、测量周期时间、测量速度、温度补偿、报警条件、打印机设置、信号输出等参数。

E.3.2 选定自动分析模式：在这种模式下，水分析由传感器使用程序自动进行。TOC 测量使用微处理器控制的光催化过程与电导率检测相结合。测定水样的初始电导率以建立参考值。然后紫外灯氧化样品，由此产生的电导率变化用于计算 TOC 的浓度。

E.3.3 测量过程：分析过程由三个连续的阶段组成：进样阶段、氧化阶段和空置阶段。

进样阶段：在采样时间间隔内，关闭紫外灯，打开传感器的内部采样阀，加压水清洗样品入口管路。样品阀在进样结束时关闭，测量单元中的新样品。

氧化阶段：在氧化时间内，关闭样品阀，打开紫外线灯，氧化开始。这个时间间隔取决于水中的有机物含量。

空置阶段：如果分析在设定的周期时间之前完成，传感器将进入工作状态空置状态，等待下一次分析的开始。在此空置时间内，样品阀处于“开启”或“关闭”状态。当设置为“打开”时，测量单元连续清洗，直到循环时间结束；如果“关闭”，则通过传感器的采样流暂停，直到初始化后续采样时间。对于正常分析，建议将阀门“关闭”。

如果循环周期小于分析的持续时间，则立即开始下一个分析。因此，为了执行连续分析，传感器的周期时间应设置为默认的“0”分钟。建议使用此设置，除非需要进行固定且冗长的（例如每小时）分析。

E.3.4 读取测量值。

参 考 文 献

[1] ASTM D5127 Standard Guide for Ultra-Pure Water Used in the Electronics and Semiconductor Industries: D5127-07[S]. West Conshohocken,PA:ASTM International, 1999.



标准实施反馈与服务

中国环保机械行业协会团体标准
降解电子级水总有机碳紫外线系统
技术规程

T/CAMIE 15—2023

*

北京科学技术出版社出版发行
(北京西直门南大街16号 邮编: 100035)

新华书店经销

河北泓景印刷有限公司印刷

版权专有 不得翻印



155714467

开本 880×1230 1/16 印张 1.5 字数 23 千字
2023 年 10 月第 1 版 2023 年 10 月第 1 次印刷

*

书号: 155714·467 定价: 48.00 元