

附件 1

团 体 标 准

T/CAQI xxx-xxxx

城镇给水紫外高级氧化深度处理 技术规程

Technical code of for ultraviolet advanced oxidation technology
for urban water supply

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国质量检验协会 发布

目录

前 言	II
1. 范围	1
2. 规范性引用文件	1
3. 术语和定义	2
4 基本规定	2
5. 工艺设计	3
6 施工与验收	5
7 运行与管理	6
附录 A（规范性）单位对数去除率所需剂量（DL）的测定	8
附录 B（规范性）紫外线反应器理论剂量的计算	11
附 录 C（规范性）紫外线反应器的剂量验证	14
附 录 D（规范性）紫外线反应器性能检测	17

前 言

本文件按 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国质量检验协会归口。

本文件起草单位：北京市自来水集团有限责任公司、清华大学、山东建筑大学、北京景盛达环保科技有限公司、济南水务集团有限公司、山东华城工程技术有限公司、上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司、济南市市政工程设计研究院(集团)有限责任公司、潍坊市市政公用事业服务中心、山东省庆云县供水公司、青岛中质脱盐质量检测有限公司。

本文件起草人：

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国质量检验协会标准化办公室。

本文件为首次发布。

城镇给水紫外高级氧化深度处理技术规程

1. 范围

1.1 为规范城镇给水厂紫外高级氧化深度处理技术的工程应用，确保技术先进、安全可靠、经济合理和管理方便，制定本规程。

1.2 本规程适用于新建、扩建和改建城镇给水厂紫外高级氧化深度处理工程的工艺设计、施工验收与运行维护。

1.3 城镇给水厂紫外高级氧化深度处理工程除应符合本文件规定外，尚应符合国家现行相关标准的规定。

2.规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 5749 生活饮用水卫生标准

GB 12463 危险货物运输包装通用技术条件

GB 15603 常用化学危险品贮存通则

GB/T 17218 饮用水化学处理剂卫生安全性评价

GB/T 17219 生活饮用水输配水设备及防护材料的安全性评价标准

GB/T 19837 城镇给排水紫外线消毒设备

GB 22216 食品添加剂 过氧化氢

GB/T 32091 紫外线水消毒设备 紫外线剂量测试方法

GB/T 32092 紫外线消毒技术术语

GB 50013 室外给水设计标准

GB 55026 城市给水工程项目规范

AQ 3018 危险化学品储罐区作业安全通则

AQ 3047 化学品作业场所安全警示标志规范

CJJ 58 城镇供水厂运行、维护及安全技术规程

CJ/T 206 城市供水水质标准

CJJ/T 271 城镇供水水质在线监测技术标准

CJ/T 345 生活饮用水净水厂用煤质活性炭

3. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 紫外高级氧化深度处理工艺 UV advanced oxidation process

利用紫外或紫外同时添加氧化剂产生强氧化性自由基对水中污染物高效去除的水处理方法。

3.2 紫外线反应器 UV reactor

通过紫外光进行光化学反应的设备，由紫外灯、紫外反应腔体、石英套管、镇流器、紫外线强度传感器和清洗系统等组成。

3.3 紫外高级氧化系统 UV-based advanced oxidation system

紫外线反应器、氧化剂投加装置和其他辅助装置组成。

3.4 紫外线穿透率 UV transmittance;UVT

波长为253.7nm的紫外线在通过1cm比色皿水样后的紫外线强度与通过前的紫外线强度之比。

3.5 紫外线剂量 UV dose

单位面积上接收到的紫外线能量，常用单位为 mJ/cm^2 或者 J/m^2 。

3.6 光强计 UV sensor

用来监测紫外线反应器运行过程中紫外线强度的仪器。

3.7 淬灭 quenching

在高级氧化反应中，用另一种更易与过量氧化剂反应的物质与之反应，从而将氧化剂从反应体系中除去以终止反应的过程。

4 基本规定

4.1 水厂常规处理出厂水有机物、嗅味、氨氮、消毒副产物等水质指标不能达标时，宜增设紫外高级氧化深度处理工艺。

4.2 紫外高级氧化深度处理工艺可采用紫外/过氧化氢、紫外/臭氧、紫外/臭氧/过氧化氢等工艺。

4.3 水厂紫外高级氧化工艺流程的选择应通过技术经济和现场中试试验综合比较后确定。

4.4 水厂紫外高级氧化工程所使用材料、药剂和设备应符合现行国家标准《饮用水化学处理剂卫生安全性评价》GB/T 17218 和《生活饮用水输配水设备及防护材料的安全性评价标准》GB/T 17219 的有关规定。

4.5 水厂紫外高级氧化工程使用的危险化学品贮存应符合现行国家标准《常用化学危险品贮存通则》GB 15603 的有关规定。

5. 工艺设计

5.1 一般规定

5.1.1 紫外高级氧化深度处理工艺可设置在水厂沉淀或过滤后，紫外线反应器进水 UVT 应大于 80%。

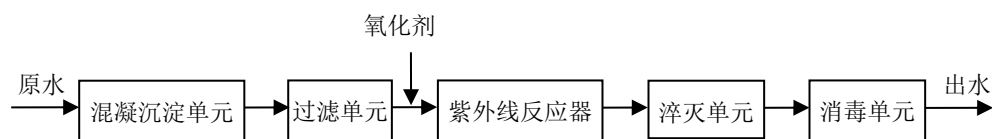


图 1 给水厂紫外高级氧化深度处理工艺流程

5.1.2 当原水中溴离子含量较高时，宜选用紫外/过氧化氢处理工艺。

5.1.3 紫外线反应器宜采用过流式管道反应器，可低压、低压高强和中压三种紫外灯。低压紫外灯适用于小规模水厂；低压高强灯适用于大中型规模水厂；中压灯适用于大型或占地面积紧张的水厂。

5.1.4 双氧水存储库房设计应符合现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016 和《建筑防火通用规范》GB 55037 的有关规定。

5.2 氧化剂投加装置

5.2.1 氧化剂宜采用臭氧或过氧化氢等化学药剂。

5.2.2 臭氧系统应包括气源装置、臭氧发生器、臭氧投加装置、臭氧尾气消除装置和监测控制仪表，系统设计应符合现行国家标准《室外给水设计标准》GB 50013 和《城市给水工程项目规范》GB 55026 的有关规定。

5.2.3 过氧化氢投加装置应包括储存、调制、输送、计量、混合设施（备）等。

5.2.4 氧化剂投加点应设置在紫外线反应器的上游，并保证进入反应器时药剂混合均匀。

5.2.5 采用过氧化氢为氧化剂时，投加点距紫外线反应器的直管段距离不小于 5 倍管径，紫外线反应器后应设置不小于 3 倍管径的直管段。

5.2.6 采样臭氧为氧化剂时，臭氧气体应通过水射器抽吸后注入设于紫外线反应器进水管上的静态混合器。

5.2.7 氧化剂投加量等工艺参数，应根据待处理水质并结合试验结果确定；亦可根据类似工程经验确定，臭氧投加量宜为 0.5mg/L~2.0mg/L，过氧化氢投加量宜为 5mg/L~20mg/L。

5.3 紫外线反应器

5.3.1 应根据处理规模、用地条件、原水水质、进入紫外线反应器的水质、经济性、合理性、管理便利性等情况，合理确定紫外灯类型、紫外线反应器的数量和备用方式。

5.3.2 紫外灯石英套管的 UVT、结垢系数、紫外灯老化系数、运行寿命、石英套管的清洗、电子镇流器应符合现行国家标准《城镇给排水紫外线消毒设备》GB/T 19837 的有关规定。

5.3.3 紫外线反应器中每组紫外灯应安装一个紫外线在线光强计，用于监控紫外灯运行状态并核算实际的紫外线剂量。

5.3.5 紫外线反应器出水宜在线检测过氧化氢、臭氧等水质参数。

5.3.5 紫外线反应器宜安装水体在线 UVT 测试仪。

5.3.6 管式紫外线反应器水头损失宜小于 0.5 m，管路系统的设计流速宜采用 1.2 m/s~1.6 m/s。

5.3.7 紫外线反应器的紫外线剂量宜为 200mJ/cm²~800mJ/cm²，每万吨水处理规模配备的紫外线反应器输入功率宜为 15 KW~40 KW，并应根据不同目标污染物和不同的控制要求，结合参考中试实验和已有实际工程确定。

5.3.8 紫外线灯套管的清洗方式应根据水质情况、使用寿命、维护管理等选择化学、机械或者两者结合的方式，宜采用在线机械清洗方式。

5.3.9 原水中目标污染物单位对数去除率所需剂量（DL）按照附录 A 的规定进行测定。

5.3.10 紫外剂量可采用理论剂量法和验证剂量法，其中理论剂量计量法按照附录 B 的规定进行，验证剂量法按照附录 C 的规定执行。

5.4 淬灭单元

5.4.1 紫外线反应器后序工艺应设置残余氧化剂的淬灭单元。

5.4.2 淬灭单元应优先采用活性炭池消减残留过氧化氢或臭氧等氧化剂；若消毒单元采用次氯酸钠为消毒剂，次氯酸钠可作为 H₂O₂ 的淬灭剂。

5.4.3 活性炭的选型应根据试验及经济比较确定，宜选用煤质破碎炭；活性炭池过流方式可采用下向流或上向流，上向流可选择 12 目×40 目或试验确定的规格，空床流速宜为 10 m/h~12 m/h，空床接触时间宜采用 6min~10min，下向流可选择 8 目×30

目或试验确定的规格，空床滤速宜为 9 m/h~10 m/h，空床接触时间宜采用 6min~20min。

5.4.4 用于季节性臭味物质应急处理时，活性炭可选择 $\Phi 1.5$ mm 等较大粒径的颗粒炭，采用向下流，空床接触时间宜不低于 6 min，过滤速度宜为 20 m/h，具体工艺参数应根据工程实际或现场试验确定。

5.4.5 颗粒活性炭的选择和使用应符合现行行业标准《生活饮用水净水厂用煤质活性炭》CJ/T 345 的有关规定。

5.4.6 采用臭氧为氧化剂时，宜在紫外高级氧化系统下游设置残余臭氧的破坏装置。

5.5 控制系统

5.5.1 为便于运行维护与管理，宜配有紫外线反应器控制中心，包括自动机械清洗、紫外灯累计使用时间、温度过高保护、低水位保护、清洗故障报警、灯管故障报警、超高水位报警、紫外光强度在线监控系统等。

5.5.2 紫外线反应器控制中心宜根据水质、流量、目标污染物去除率的设定值等控制需求，实时调节紫外线反应器的紫外功率输出和氧化剂投加量，以确保紫外高级氧化深度处理工艺完成污染物控制目标及监控要求。

6 施工与验收

6.1 施工

6.1.1 混凝土构筑物的土建施工应符合现行国家标准《给水排水构筑物工程施工及验收规范》GB 50141 的有关规定。

6.1.2 钢结构的制作应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的有关规定。

6.1.3 风机、泵类等机械设备安装应符合现行国家标准《风机、压缩机、泵安装工程 施工及验收规范》GB 50275 的有关规定。

6.1.4 管道、阀门、管件及其它配件的安装应符合现行国家标准《给水排水管道工程施工及验收规范》GB50268 的有关规定。

6.1.5 紫外线反应器宜在厂家定制完成后以成品方式运输至施工现场，到达现场后应提供产品合格证、涉水产品卫生许可等产品证明材料。

6.1.6 应采取措施将紫外线反应器的供电系统和水厂其他供电系统相隔离，并满足供电系统温度、湿度、通风等相关要求。

6.2 验收

6.2.1 紫外高级氧化工程应按照现行国家标准《给水排水构筑物工程施工及验收规范》

GB50141 相关要求要求进行满水试验。

6.2.2 配套管道安装工程的验收应符合现行国家标准《给水排水管道工程施工及验收规范》GB50268 的有关规定。

6.2.3 其他机电设备安装工程的验收应符合现行国家标准《机械设备安装工程施工及验收通用规范》GB50231 的有关规定。

6.2.4 紫外灯老化系数、紫外灯运行寿命、紫外灯石英套管结垢系数、水体紫外线穿透率等应按国家标准《城镇给排水紫外线消毒设备》GB/T 19837 的有关规定进行检测。

6.2.5 紫外高级氧化工程建成后宜对紫外线反应器进行性能测试，性能测试可按照附录 D 执行，以验证设计条件下反应器对目标污染物的去除是否可以达到既定目标。

7 运行与管理

7.1 运行维护

7.1.1 紫外高级氧化工程的运行、维护及安全技术规程可参照现行行业标准《城镇供水厂运行、维护及安全技术规程》CJJ 58 要求执行。

7.1.2 紫外线反应器应在充满水后预热开机调试，确保系统可正常运行。

7.1.3 应根据紫外线光强和使用时间定期更换和清洗紫外灯管，清洗频率应根据水质情况和在线紫外线强度变化确定。

7.1.4 紫外线光强计应定期校验，对仪器进行故障维修或更换后，应重新进行校验。

7.1.5 应定期维护水体在线 UVT 测试仪，每年至少应采用分光光度计对水体在线 UVT 测试仪进行校准一次。

7.1.6 应定期校准氧化剂投加泵和流量计，确保投加量的准确性。

7.1.7 在运行模式上，可根据目标污染物浓度间歇运行或改变紫外功率与氧化剂投加浓度。季节性藻致臭味物质爆发期间，紫外线发生器高功率运行，投加适配浓度的氧化剂；无臭味问题时则调整为消毒模式，紫外线发生器低功率运行，可少加氧化剂维持后续活性炭微生物活性，以保障出水水质稳定。

7.1.8 建立紫外高级氧化工程日常巡检及记录制度。根据水质变化、紫外线反应器运行情况及时调整运行参数，确保出水水质安全以及设备连续运行。

7.1.9 制定运行档案记录和资料管理制度。药剂存放和使用、设备开关机以及日常维护等方面遵守各项安全操作规程，保证设施稳定运行。

7.1.10 应建立水质检验制度，配备检验人员和检验设备，应定期对各工艺单元进行水质检验，主要检测指标包括有机物、浑浊度及 pH 等。

7.1.11 紫外高级氧化工程除应达到工程预定的特定污染物去除目标外，出厂水水质应符合现行国家标准《生活饮用水卫生标准》GB 5749 的要求。

7.2 安全防护

7.2.1 禁止裸眼直视紫外线。观察紫外线时应通过合适的观察窗或使用合适的防护眼镜，设备运行区域应设有明显的“禁止裸眼直视紫外线”标志。

7.2.2 穿着长袖工作服和手套，尽量减少皮肤暴露，防止紫外线对皮肤的照射。

7.2.3 在启动系统前确保所有反应器中的灯管均处于安全状态。在维护前应先关闭系统并确认紫外灯完全熄灭后才可进行操作。

7.2.4 在拆卸或更换灯管时，应佩戴防护手套并在维护前使灯管冷却，避免高温烫伤或破碎的灯管对操作人员造成伤害。

7.2.5 禁止敲击、弯折或加压于石英管。若石英管破损，须立即清理破碎部件，并在清理过程中佩戴防护手套及护目镜。

7.2.6 接触清洗视窗的酸液时应穿着防护衣、防护手套并配戴防护眼镜。用酸液清洗后应用流动水仔细冲洗。

7.2.7 氧化剂的储罐区、调配区、投加区应配备紧急洗眼器和应急淋浴设备，操作人员在接触氧化剂时需穿戴合规的防护设备。氧化剂的使用应符合《危险化学品储罐区作业安全通则》AQ 3018 和《化学品作业场所安全警示标志规范》AQ 3047 的有关规定。

附录 A

(规范性)

单位对数去除率所需剂量 (DL) 的测定

A.1 目标污染物

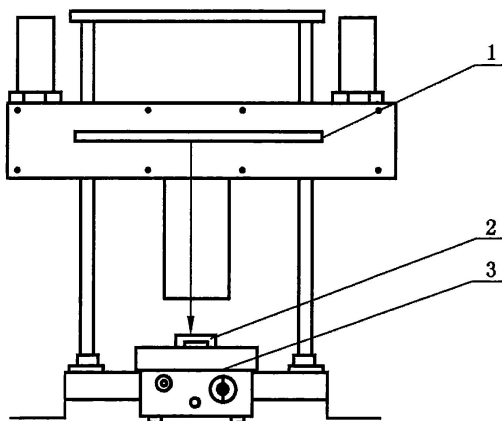
目标污染物选取水厂工艺进水中主要有机污染物的一种或多种，确定相应的污染物分析方法。目标污染物的浓度应依据工艺进水中相应污染物的浓度水平确定。

A.2 准平行光束仪

测定紫外线剂量-灭活率曲线应采用准平行光束仪 (Collimated Beam Apparatus)，装置如图 A.1 所示。准平行光束仪选用低压/中压汞灯作为紫外光源，安装在一个封闭的圆柱体内，在筒体的底部中央开口，下方接一段长度为 30 cm~60 cm，直径为 6 cm~9 cm 的圆管，其作用是产生平行紫外线，使得紫外线能够垂直到达样品的表面。

实验时在直径为 50mm~90mm 的培养皿中装入 40 mL~50 mL 试验水样，为了保证所有的污染物都得到均匀的照射，用磁力搅拌器充分搅拌，为了防止搅拌中出现漩涡，应对搅拌速度进行很好的控制。

紫外线照射时间可通过控制遮光板的开启时间控制，紫外线的平均光强通过紫外线光强计测量，并计算后得到。



说明：

- 1：紫外灯；
- 2：含有待测水样的反应皿；
- 3：搅拌器。

图 A.1 准平行光束仪示意图

A.3 测定步骤

A.3.1 使用前，先打开紫外灯管开关，预热 30min，使准平行光束仪发出的紫外光稳定。

A.3.2 若紫外灯为低压灯，测定受试水溶液在 254 nm 处的吸光度；若紫外灯为中压灯，测定受试水溶液在 200 nm~300 nm 波段的吸光度。

A.3.3 在培养皿中放入试验水样，以水面为基准平面，以平行光管投影的中心为中心，分别在培养皿的水平方向（X 轴）和垂直方向（Y 轴）每隔 0.5 cm 划线。

A.3.4 将紫外光强计置于该平面，按 X 轴和 Y 轴方向每隔 0.5 cm 测定该点的紫外线强度，测量点与中心点的紫外线强度的比值的均值即为 Petri 系数（ P_f ）系数。

A.3.5 若紫外灯为低压灯，紫外线剂量用式（A.1）计算：

$$D_{CB} = E_c P_f (1-R) \frac{L}{d+L} \frac{(1-10^{-a_{254}d})}{a_{254}d \ln(10)} t \quad (\text{A.1})$$

式中：

D_{CB} ：紫外线剂量，单位为 mJ/cm^2 ；

E_c ：中心点光强，单位为 mW/cm^2 ；

P_f ：Petri 系数，测量点与中心点的紫外线强度的比值的均值；

R ：空气和水界面反射率，为 0.025；

L ：灯管中点距液面距离，单位为 cm；

d ：溶液的深度（紫外线在水中的路径长度），单位为 cm；

a_{254} ：溶液紫外线 254 nm 吸光度，单位为 cm^{-1} ；

t ：照射时间，单位为 s。

A.3.6 紫外灯为中压灯，则在式（A.1）基础上，需要引入光强计系数（Sensor Factor, S_f ）进行进一步修正。 S_f 用式（A.2）计算：

$$S_f = \frac{S_{254}}{\sum_i N_{\lambda_i} S_{\lambda_i}} \quad (\text{A.2})$$

式中：

S_f ——紫外光强计在 254 nm 处的灵敏度除以光强计在 200~300 nm 波段灵敏度的加权平均值；

S_{254} ——紫外光强计在 254 nm 处的灵敏度；

N_{λ_i} ——归一化处理后的在波长 λ_i 处的相对光子流量；

S_{λ_i} ——紫外光强计在波长 λ_i 处的灵敏度，波长 λ 的范围为 200~300 nm。

中压灯的紫外线剂量用式 (A. 3) 计算：

$$D_{CB} = E_c P_f S_f (1-R) \frac{L}{d+L} \sum_i N_{\lambda_i} \frac{1-10^{-a_i d}}{a_i d \ln(10)} t \quad (\text{A. 3})$$

式中：

D_{CB} ：紫外线剂量，单位为 mJ/cm^2 ；

E_c ：中心点光强，单位为 mW/cm^2 ；

P_f ：Petri 系数；

R ：空气和水界面反射率，为 0.025；

L ：灯管中点距液面距离，单位为 cm；

d ：溶液的深度（紫外线在水中的路径长度），单位为 cm；

a_i ：水溶液在波长 λ_i 处的吸光度，单位为 cm^{-1} 。

t ：照射时间，单位为 s。

A. 3.7 根据式 (A. 1) 或式 (A. 2) 计算指定紫外线剂量的照射时间。

A. 3.8 准备试验水样，水样中含有目标污染物和一定量的氧化剂。

A. 3.9 将试验水样放在准平行光束仪辐射窗下，打开磁力搅拌器，打开遮光板照射一定时间后关闭遮光板，以控制紫外线照射剂量。每组试验重复 3 次。照射后的水样立即投加反应终止剂（如甲醇等），随后进行目标污染物的浓度检测。

A. 3.10 根据目标污染物分析检测结果，用式 (A. 4) 计算污染物的对数去除率：

$$\text{Log Reduction} = \lg\left(\frac{C_0}{C}\right) \quad (\text{A. 4})$$

式中：

Log Reduction：污染物的对数去除率；

C_0 ：紫外高级氧化处理前水样中目标污染物的浓度；

C ：紫外高级氧化处理后水样中目标污染物的浓度。

根据污染物的对数去除率和紫外线剂量，绘制出该污染物的剂量-响应曲线，该曲线的斜率倒数即为 D_L 。

附录 B

(规范性)

紫外线反应器理论剂量的计算

B.1 连续流紫外线反应器剂量的理论公式

B.1.1 低压灯/低压高强灯

在准平行光束仪（低压灯）中，若 E_e 为到达溶液的紫外线辐照度， $E_e = E_s P_f (1-R)$ ，理想的准平行光束仪 $L/(d+L)$ 值为 1，因此式 (A.1) 可改写为：

$$D = E_e \frac{(1-10^{-a_{254}d})}{a_{254}d \ln(10)} t \quad (\text{B.1})$$

若 P_e 为到达溶液的紫外线总辐射功率，溶液面积为 A ，则 $E_e = P_e/A$ ：

$$D = \frac{P_e}{A} \frac{(1-10^{-a_{254}d})}{a_{254}d \ln(10)} t \quad (\text{B.2})$$

对于间歇式反应器，反应器体积 $V=A \times d$ ：

$$D = \frac{P_e}{V} \frac{(1-10^{-a_{254}d})}{a_{254} \ln(10)} t \quad (\text{B.3})$$

由上式可知，紫外线剂量是到达水溶液的辐射功率 (P_e)、紫外线在水中的路径长度（光程， d)、溶液体积 (V)、暴露时间 (t) 和紫外线吸收系数的函数 (a)，而与面积 (A) 无关。对于非均匀的间歇式反应器，反应器中则存在多个紫外线光程：

$$D = \sum_{d_i} \frac{P_e F_i}{V} \frac{(1-10^{-a_{254}d_i})}{a_{254} \ln(10)} t \quad (\text{B.4})$$

式中：

D ：低压紫外线反应器的紫外线剂量，单位为 mJ/cm^2 ；

V ：溶液体积，单位为 cm^3 ；

P_e ：到达水中的紫外线辐射功率，单位为 mW ；

d ：紫外线在水中的路径长度（光程），单位为 cm ；

F_i ：光程为 d_i 的 UV 的分数；

a_{254} ：溶液紫外线 254 nm 吸光度，单位为 cm^{-1} 。

对于连续流反应器，流量 $Q=V/t$ ，根据式 (B.4) 则有：

$$D = \sum_{d_i} \frac{P_e F_i}{Q} \frac{(1-10^{-a_{254}d_i})}{a_{254} \ln(10)} \quad (\text{B.5})$$

式中：

D ：低压紫外线反应器的紫外线剂量，单位为 mJ/cm^2 ；

Q ：反应器流量，单位为 cm^3/s ；

P_e ：到达水中的紫外线辐射功率，单位为 mW ；

d ：紫外线在水中的路径长度（光程），单位为 cm ；

F_i ：光程为 d_i 的 UV 的分数；

a_{254} ：溶液紫外线 254 nm 吸光度，单位为 cm^{-1} 。

B. 1.2 中压灯

中压紫外线高级氧化系统的紫外剂量是不同波长的剂量积分，以 MPUV/ H_2O_2 系统为例，其紫外剂量要基于 H_2O_2 在不同紫外波长下的吸收系数相对于其在 254 nm 处吸收系数的值来进行加权计算。与用于消毒的紫外线反应器类似，中压紫外线高级氧化系统的 D_L 与灯的光谱输出、UVT 以及紫外线在反应器中的光程无关。因此，通过将中压灯的输出光谱分为 20 个或 100 个波段（5 nm 或 1 nm 间隔），并基于以上波段进行积分求和，可以计算间歇式中压紫外反应器的剂量：

$$D_{\text{H}_2\text{O}_2} = \sum_{\lambda=200\text{nm}}^{300\text{nm}} \sum_{d_i} \frac{P_{e\lambda} r_{\lambda} F_i}{V} \frac{(1-10^{-a_{\lambda} d_i})}{a_{\lambda} \ln(10)} t \quad (\text{B. 6})$$

式中：

$D_{\text{H}_2\text{O}_2}$ ：中压紫外线反应器基于 H_2O_2 的加权紫外线剂量，单位为 mJ/cm^2 ；

$P_{e\lambda}$ ：到达水中波段为 λ 的紫外线总辐射功率；

r_{λ} ：氧化剂（如 H_2O_2 ）或光敏物质在波长 λ 处相对于 254nm 处的相对吸收系数。如果氧化剂或光敏物质的量子产率随紫外线波长而变化，则该系数还应乘以波长 λ 相对于 254 nm 处的相对量子产率；

V ：溶液体积，单位为 cm^3 ；

d ：紫外线在水中的路径长度（光程），单位为 cm ；

F_i ：光程为 d_i 的 UV 的分数；

a_{λ} ——水溶液在波长 λ 处的吸收系数（ cm^{-1} ）。

对于连续流中压紫外反应器，则剂量计算公式为：

$$D_{\text{H}_2\text{O}_2} = \sum_{\lambda=200\text{nm}}^{300\text{nm}} \sum_{d_i} \frac{P_{e\lambda} r_{\lambda} F_i}{Q} \frac{(1-10^{-a_{\lambda} d_i})}{a_{\lambda} \ln(10)} \quad (\text{B. 7})$$

式中：

$D_{\text{H}_2\text{O}_2}$ ：中压紫外线反应器基于 H_2O_2 的加权紫外线剂量，单位为 mJ/cm^2 ；

$P_{e\lambda}$ ：到达水中波段为 λ 的紫外线总辐射功率，单位为 mW ；

r_λ : 氧化剂（如 H_2O_2 ）或光敏物质在波长 λ 处相对于 254nm 处的相对吸收系数。如果氧化剂或光敏物质的量子产率随紫外线波长而变化，则该系数还应乘以波长 λ 相对于 254 nm 处的相对量子产率；

Q: 反应器流量，单位为 cm^3/s ；

d : 紫外线在水中的路径长度（光程），单位为 cm；

F_i : 光程为 d_i 的 UV 的分数；

a_λ ——水溶液在波长 λ 处的吸收系数（ cm^{-1} ）。

B.2 反应器的光程

紫外线反应器中的光程分布可以根据反应器的几何形状进行计算。由于石英套管内部的反射和折射，所有紫外线都以与法线大约 ± 45 度的弧度从石英套管中发出。

B.3 紫外线反应器剂量的计算模型

前文所述的基于准平行光束仪或间歇式反应器的紫外线剂量测定结果并未考虑实际规模反应器中不均匀的紫外线剂量分布。因此，实际规模的连续流紫外线反应器的剂量需要采用合适的模型模拟计算。

计算模型法是理论方法，包括紫外线强度分布模型和计算流体力学模型。其中，紫外线强度模型（LID）是基于光学和几何学原理，通过计算紫外线在反应器中的辐照情况，获得紫外线强度分布模型，从而推算紫外线剂量。常见的紫外线强度分布模型有 MPSS、MSSS、LSI、RAD-LSI 和 DO。

流体力学模型是基于模拟流体流动的计算机技术，计算污染物通过紫外线系统的轨迹，研究反应器的水力特性。在 CFD 计算时，实际规模的紫外线反应器一般可被分为上百万个 CFD 单元。以中压紫外线反应器为例，其剂量应基于氧化剂（ H_2O_2 ）或目标污染物在中压紫外波段的紫外线吸收做归一化加权处理。紫外线强度模型（UV Intensity Modeling, UVI）被用于计算每个 CFD 单元的 H_2O_2 （或其他氧化剂/光敏物质）加权紫外线剂量（ $D_{\text{H}_2\text{O}_2}$ ）。每个 CFD 单元的 $D_{\text{H}_2\text{O}_2}$ 为：

$$D_{\text{H}_2\text{O}_2} = \sum_{300\text{nm}} E_\lambda r_\lambda t \quad (\text{B.8})$$

式中：

$D_{\text{H}_2\text{O}_2}$: 每个 CFD 单元基于 H_2O_2 的加权紫外线剂量，单位为 mJ/cm^2 ；

E_λ ——波长为 λ 的紫外线在 CFD 单元中的紫外线总辐照度（通量率，fluence rate），单位为 mW/cm^2 ；

r_λ —— H_2O_2 （或其他氧化剂/光敏物质）在波长 λ 处相对于 254nm 处的相对吸收系数。

t ——CFD 单元中溶液的停留时间，单位为 s。

附录 C

(规范性)

紫外线反应器的剂量验证

C.1 测试内容和控制参数

C.1.1 测试内容

C.1.1.1 紫外线高级氧化系统应对目标污染物进行降解测试。

C.1.1.2 使用紫外线准平行光束仪测试目标污染物的剂量-反应曲线。

C.1.1.3 数据分析和紫外线有效剂量的计算。

C.1.2 控制参数

C.1.2.1 在测试过程中检测、控制和记录的主要参数包括：流量、流速、目标污染物浓度、氧化剂投加量、水样水质背景参数、紫外线强度、紫外灯管布置和工作状态、系统进出水管（渠）的构造、以及其他重要配件的工作参数等。

C.1.2.2 紫外线反应器设备厂商应提供紫外灯管老化系数、结垢系数、紫外线反应器的理论剂量计算结果等信息。

C.1.3 测试工况选择

在紫外线高级氧化系统中， D_L 取决于氧化剂投加量和水质条件。

紫外线高级氧化系统剂量（RED）验证应包括至少 3 组不同氧化剂投加量

水样水质参数中，TOC/DOC、pH 和碱度等对系统去除污染物的效能影响较大，可根据系统实际需求设置相应工况。

C.2 目标污染物的选择

目标污染物选取水厂工艺进水中主要有机污染物的一种或多种，确定相应的污染物分析方法。目标污染物的浓度应依据工艺进水中相应污染物的浓度水平确定。

C.3 测试设备要求

C.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，保证测试剂量不高于实际工程的紫外线剂量。

C.3.2 进水取样口和出水取样口与系统设备之间应连接适当的弯头。

C.3.3 紫外灯管应具有详细的型号、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。验证用灯管应采用运行时间大于 100 h 以上的灯管，以保证其能够产生稳定的紫外光辐射。采用中压灯的系统应配有过热安全切断开关。

C.3.4 紫外线反应器应配备验证用传感器及校准过的光强计，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.4 验证测试程序

C.4.1 一般要求

剂量验证应在紫外线高级氧化系统特定的目标污染物、氧化剂、水质背景及光强条件下测定系统对目标污染物的去除率曲线。目标污染物对紫外线剂量-去除率曲线应在实验室条件下用准平行光束仪来确定。通过系统对污染物的去除效果、实验室的紫外线剂量-去除率曲线来确定紫外线高级氧化系统的验证剂量。

C.4.2 对工艺进水的检测

按照附录 D 中的 D.2 进行。

C.4.3 系统的调试运行

按照附录 D 中的 D.3 进行。

C.4.4 氧化剂的投加与分析检测

按照附录 D 中的 D.4 进行。

C.4.5 系统运行稳定状态调试和混合测试

按照附录 D 中的 D.5 进行。

C.4.6 取样

按照附录 D 中的 D.6 进行。

C.4.7 准平行光测试

在进行上述全尺寸规模试验的同时，需在实验室规模下，对同一水样在同样的氧化剂投加量下进行准平行光测试，从而确定目标污染物的紫外线剂量-去除率曲线，测试的具体步骤应符合附录 A 的要求。

C.4.8 测试数据分析

C.4.8.1 降解测试数据分析

根据水样的检测结果，通过附录 A 中的公式（A.4）可以计算得到某一特定条件下紫外线高级氧化系统对目标污染物的对数去除率。

C.4.8.2 准平行光束仪实验数据分析

根据准平行光束仪的实验结果，得到某一氧化剂投加量和水质条件下的紫外线剂量-去除率关系曲线。

C.4.8.3 验证剂量的获得

基于上述结果，通过剂量-响应曲线上对应的污染物对数去除率就能得到紫外反应器的验证剂量（RED）。

C.4.9 测试报告

应包括剂量验证测试报告、紫外线高级氧化系统操作手册、设备参数文件、剂量验证测试计划、原始数据记录和其他相关资料。

还应包括测试的场地信息、测试系统信息、系统运行参数和测定工况、测试用水的水质信息、实验数据处理和不确定度分析、原始数据记录和其他相关资料。

测试报告和原始数据文件应经测试人员和第三方验证人员签字确认。

附录 D
(规范性)
紫外线反应器性能检测

D.1 目标污染物的确定与分析检测

选取水厂工艺进水中主要有机污染物的一种或多种作为目标污染物，确定相应的污染物分析方法。目标污染物亦可采用投加的方式，使得工艺进水中目标污染物处于特定浓度。

D.2 对工艺进水的检测

对水体中的 UVT、TOC、pH、温度、电导率、TSS、TDS、碱度、无机阴离子、天然有机物（NOM）等重要水质背景参数进行测试。

若工艺进水中含有化学消毒剂余量（如氯），可采用中和试剂（如硫代硫酸钠）对化学消毒剂进行中和。水体的中和试剂残余浓度不应影响水体的 UVT 产生影响。

D.3 系统的调试运行

开启紫外线反应器，通过调节入口阀门、出口阀门或水泵功率，使系统达到目标流量。取样开始和结束时检测的目标流量误差不应超过 5%。

D.4 氧化剂的投加与分析检测

根据工艺进水中目标污染物的浓度、期望的污染物去除率、水体流量等参数，确定氧化剂的投加量，同时计算所需原液体积及确定计量泵参数。

氧化剂的浓度测试依据相关标准方法进行。

D.5 系统运行稳定状态调试和混合测试

D.5.1 稳定状态测试

取样前应对系统进行稳定状态测试。首先应根据整个测试系统的水容量和测试的流量，计算系统的水力停留时间（RT），向水中投加 UVT 调节剂（咖啡、木质素磺酸或者腐殖酸），开始计时为 0 时刻，每间隔 RT 在进水取样口和管路末端取样测试其

UVT，计算同一取样时间两个取样点紫外线穿透率的比值，从 0 时刻到比值趋近于 1 的时间即为系统达到稳定状态的时间（ST），对于不同的流量应进行相对应的 ST 测试。

D. 5. 2 进出水口混合测试

D. 5. 2. 1 进水口混合测试

向水中投加目标污染物或 UVT 调节剂（紫外灯关闭），分别调节流量至测试中选择流量范围的最大值和最小值两种情况，在系统达到稳定后，检测系统进水口和出水口的 UVT 和目标污染物浓度。测试中两个检测点的平均 UV_{254} 差或目标污染物浓度误差应小于 5%，且同一点 3 次取样误差应小于 5%。

D. 5. 2. 2 出水口混合测试

向水中投加目标污染物或 UVT 调节剂（紫外灯关闭），分别调节流量至测试中选择流量范围的最大值和最小值两种情况，在系统达到稳定后，检测系统出水口和排水管末端的 UVT 和目标污染物浓度。测试中两个检测点的平均 UV_{254} 差或目标污染物浓度误差应小于 5%，且同一点 3 次取样误差应小于 5%。

D. 6 取样

D. 6. 1 取样时间

取样应在系统达到稳定状态后 10min 进行。

D. 6. 2 取样要求

在系统进、出水口分别取样。取样应包括目标污染物检测水样、水质参数检测水样、氧化剂检测水样，记录取样开始和结束时间。

出水口取样时，应避免水样被紫外线照射。

测试人员应在取样时记录并检测以下数据：样品编号、流量、紫外灯功率、紫外灯电流、光强、传感器位置、取样时间和水温。

D. 6. 3 样品保存及运输

样品应保存在 4℃ 左右的环境中。水样由测试人员送至现场实验室，进行基本水质参数、氧化剂浓度等的测试。目标污染物水样则送至相应的化学分析实验室进行检测。

D. 7 测试数据分析

根据水样的检测结果，可以计算得到特定的氧化剂投加量、紫外线剂量和水质参数下的紫外线高级氧化系统对目标污染物的去除效率。

给出对数去除的计算公式

$$\text{Reduction} = \frac{C_0}{C} \times 100\% \quad (\text{D. 1})$$

$$\text{Log Reduction} = \lg\left(\frac{C_0}{C}\right) \quad (\text{D. 2})$$

式中：

Reduction：污染物的去除率，%；

Log Reduction：污染物的对数去除率；

C_0 ：紫外高级氧化处理前水样中目标污染物的浓度；

C ：紫外高级氧化处理后水样中 R 目标污染物的浓度。

根据性能测试结果，可以考察系统对目标污染物的处理效能是否能够达到预期目标。