

参赛队员姓名： 邢一帆

中学： 山东省实验中学

省份： 山东省

国家/地区： 中国

指导教师姓名： 陈姬 石磊

论文题目： 基于光电耦合催化原理的自密闭气室
型直饮水反应器

2020 S.-T. Yau High School Science Award

本参赛团队声明所提交的论文是在指导老师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。尽本团队所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。若有不实之处，本人愿意承担一切相关责任。

参赛队员： 邢一帆

指导老师： 陈姬 石磊

2020年 9 月 1 日

2020 S.-T. Yau High School Science Award

题目： 基于光电耦合催化原理的自密闭气室型直饮水反应器
作者： 邢一帆

摘 要

本项目设计了一种含有密闭气室的直饮水消毒反应器，充分利用了加水后形成的密闭气室所带来的固液气三相中多种光电催化反应过程相互间发生的耦合增效作用，进行水消毒并达到可直饮水效果。

本反应器创造性地在气室中引入紫外光源，在有光催化剂 TiO_2 阳极镀膜的气室中，利用了光催化臭氧氧化以及光电化学反应的耦合协同增强紫外线的杀菌消毒效果，能彻底将泉水、井水、城市自来水的水中生物、水溶性有机物分解为水和二氧化碳，并保持了水的有益矿物质元素且无需加热可直接安全饮用。

光电催化反应在催化阳极产生氧化物种进行水消毒，同时电解水向密闭气室提供氧气，在紫外线照射下使密闭气室持续保持有臭氧存在。由于气室的形成和存在，使水只能沿气室内壁所镀催化膜薄层流动，提高了水和催化剂的接触效率，由此形成的表面照射既提高了紫外线的照射效率，也增大了和密闭气室中臭氧的接触反应，各高级氧化反应系统在密闭气室结构中耦合增效，之后由位于气室外部的Pt对阴极电催化水解产生的氢气来还原消毒后水中多余的臭氧。

本反应器基于光电耦合催化原理、利用太阳能蓄电提供消毒光电源，利用自密闭气室进行饮用水消毒，高效灵活方便，低碳环保，具有巨大的应用前景。

关键词： 密闭气室；薄层流动；耦合氧化； $\text{Pt}/\text{UV}/\text{TiO}_2/\text{O}_3$ ；光电催化；对阴极；直饮水；消毒

目 录

1、项目背景	-----	1页
2、创新点	-----	2页
3、研究贡献	-----	3页
4、现象及研究原理	-----	6页
5、制备及测定	-----	13页
6、结果与讨论	-----	24页
7、致谢及结束语	-----	25页
8、参考文献	-----	26页

2020 S.-T. Yau High School Science Award

1、项目背景：

在我的家乡泉城济南，人们喜欢在泉水池边打水喝，这是一道富有泉城特色的风景（图1），我自小生活在泉城，这些场景深深刻在我心里（图2）。但是由于担心细菌超标，人们需要回家烧开后饮用，泉水那种自然的甘甜清冽变得渴望而不可及。为了方便人们直接饮用泉水，政府在很多地方安置了直饮点提供经过滤设备处理的泉水来供游客和市民品尝，于是在这些直饮点，用大桶接水、长期占据直饮点的人们又形成了另一种“风景”，这充分反映了泉城人对洁净的泉水的渴望。经过我的思考和调研，我发现问题的关键就在于，必须创造一种便捷的过滤消毒方式，使人们安全直接地饮用泉水，无需加热，方便宜行。而这种泉水直饮方式，我查找相关资料后发现，非常有益于人的健康，保留了大量有益的微量元素，同时减少了烧水然后置凉的等待过程，节约大量的能源。于是我产生了一种构想，继续发展和深化以往的研究成果，充分利用我独创的密闭气室，设计一款不需加热就能直饮的强化光电催化过滤净化反应器。



图1 人们在迎仙泉打水



图2 我小时候在黑虎泉打水

2、创新点

在专利气室结构内外，利用紫外光催化氧化与电催化水解配合分别进行高级氧化和还原反应，强效杀菌净化，趋利避害，提供一种简便的、无需加热即可安全饮用的净水装置。

2.1 能源创新：利用光能而非热能来产生净化效果，使用绿色能源。

2.2 结构创新：向独有的水封密闭气室引进紫外光源能催化光照射到的各部分反应。该气室内部是既气体的发生及反应场所，该气室表面又是光电催化反应的反应场所，固液气三态在两个表面同时发生多相催化反应，能极大提高反应效率。水封气室将反应器分隔成阴阳极室，其中阳极室由天然水封密闭，能增加其中气体分压。阴极室产氢气，用来还原净化后水的氧化物种。

2.3 反应状态创新：水在镀膜气室表面的薄层流动，增大接触交换效率。既将紫外光浸没式消毒，改为表面消毒，又将光催化剂电阳极的光解电解耦合净化效果发挥到最大。

2.4 工艺创新：各反应同时发生，互为底物，减少步骤缩短时间，同时相互协同增益增效耦合。

2.5 环境友好创新：过滤部为可重复添加滤料的设计，不使用一次性塑料壳滤芯抛弃物。替换下来的过滤材料，可以养花养鱼，美化环境。

2.6 饮水方式创新：将半导体光电催化等前沿科技转化为生产力。解决现实问题，改变生活方式。

3、研究贡献

本装置能起到高效的净水作用是基于：通过独特的结构设计，形成了水密气室，水体沿着水密气室的表面呈薄层流动。此表面附着有光催化剂，紫外光源穿过过滤部，直到密闭气室，在能提供最适合的光子能量的紫外光的直接照射下，形成了加强型的表面消毒催化氧化作用，将有机物生物彻底氧化成水和二氧化碳，减少了单纯紫外线消毒会出现的光复活现象^[1]，同时由于与气室外部铂电极构成电催化水解对电极从而使气室内二氧化钛催化膜阳极与水接触的表面产生氧气，在密闭器室内汇聚并通过紫外光的照射增加了臭氧浓度，密闭气室能够保证臭氧不易逃逸，可以和气室表面薄层流动的水增强反应起到了联合增效的作用。同时有研究表明，臭氧和紫外线可以将已经吸附饱和的活性炭复活，而活性炭也同时可以催化臭氧产生更多的羟基自由基来加强分解效应，而位于净水室的铂阴极产生氢气，用来中和水中残留的氧化物种，使之可以安全饮用。这些过程，既单独发生又相互促进，可称之为耦合作用^[2]。能发生耦合作用的关键在于密闭气室的形成和存在以及紫外光的引入和催化剂镀膜电极构成的电催化电极对。

密闭气室是我这一系列研究的基础^[3]。在我之前的研究中，我创造性的利用水的表面张力在联通器中通过增加滤板设计出了一个独有的密闭气室结构，用来泡茶。这一产品受到了人们的喜爱，这一成功一直激励着我，我有更大的信心将这一原理用在水处理的领域，给人们带来更多的益处。

我利用密闭气室的打开和关闭设计了一种具有可调滤孔可反冲

和排污的过滤装置^[4]。取得了第 17 届全国中学生水科技竞赛一等奖并入围了 2019 年度明天小小科学家决赛。决赛过程中和专家的交流，使我认识到要让这一发现创造出更大的社会价值，我也愿意对社区作出自己的贡献，让泉城人喝上清凉甘冽的泉水^{[5][6]}。

我设计了如下的序批式（非连续流）光电催化氧化还原反应器，结构如图 3，并据此制备完成实物，如图 4。

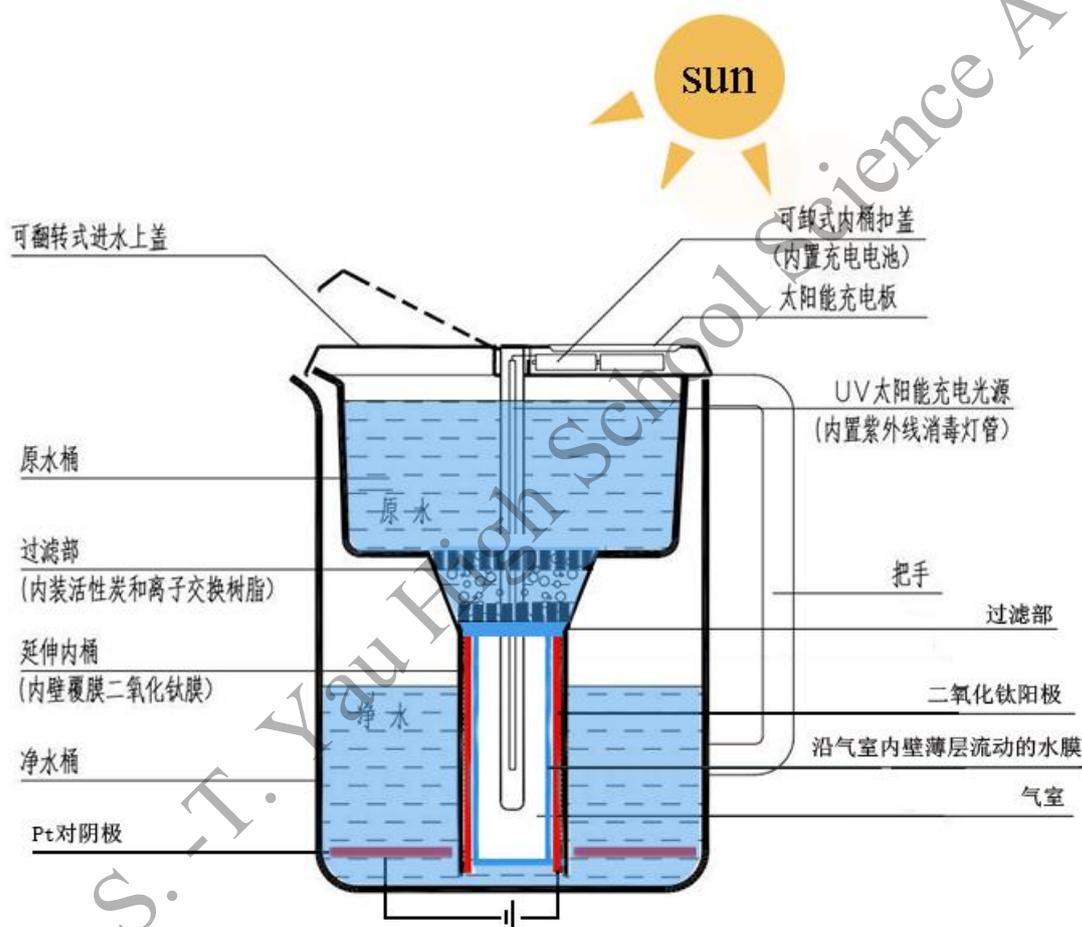


图 3 结构图



(a) 紫外灯由上而下插入气室



(b) 形成水封气室



(c) 钛金属阳极测试



(d) 阴阳两极相对位置



(e) 电极电解测试



(f) 实验成品

图4 实物照片

4、现象及原理

4.1 反应原理：

本反应器中不同结构部位所发生的物理化学反应过程及机理，涉及过滤、吸附、光催化氧化、电解水产氧、气室内部消毒分解的高级氧化耦合反应、电解水产氢、气室外部氧化物种的还原反应。光电反应原理详图5。

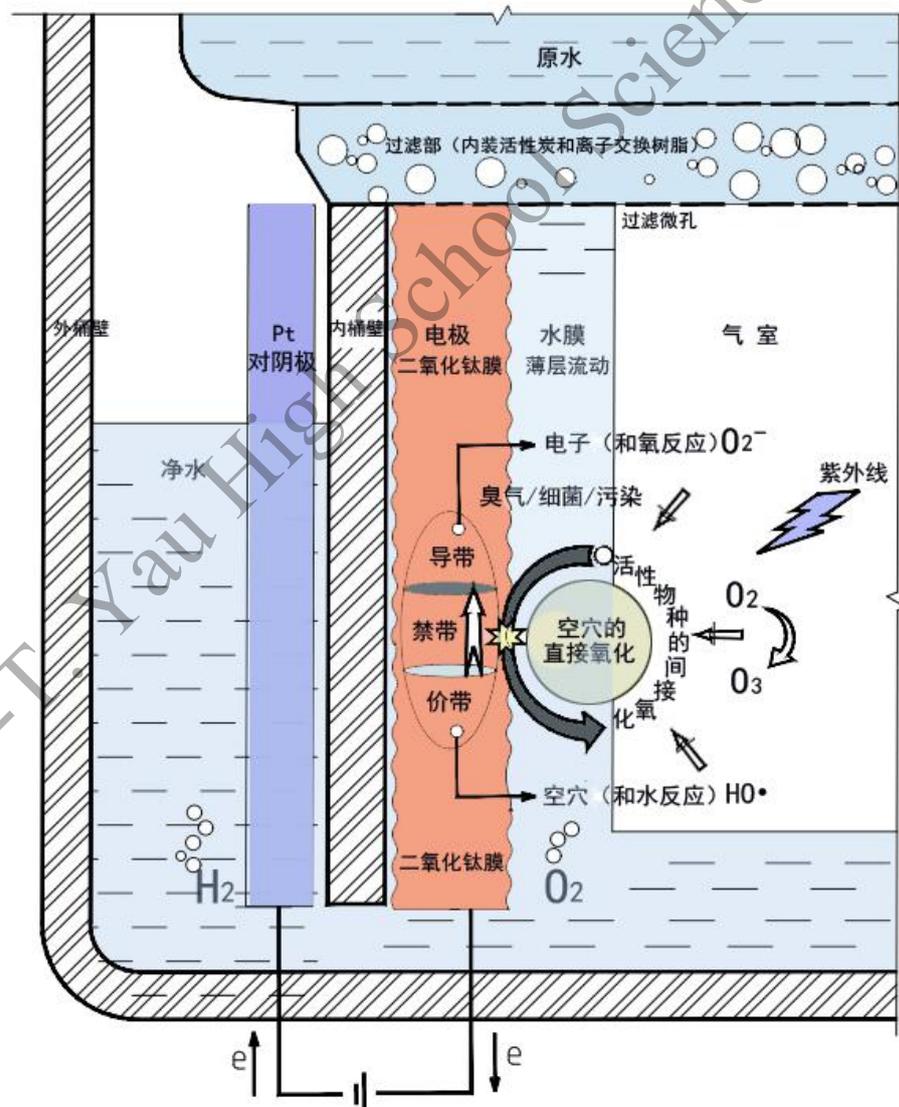


图5 光电反应原理图

4.2 反应过程：以下依照源水在自身重力作用下流经本设备的过程由先而后顺序说明。

4.2.1 开始运行：当紫外灯由上而下穿过原水室、穿过过滤部、直至密闭气室的方式布置时，原水在原水室首先会受紫外灯部分照射，此阶段属于紫外灯浸没式消毒。由于水中含氧率低，此过程臭氧的产生较少，其消毒作用在于破坏细菌的DNA 结构。

当每一次倒出部分净化水后，水的压差变化将导致由水的表面张力在联通器结构中形成的密闭气室其两边水压力不均衡，将使源水的序批示连续流开始启动，水将由源水室向下流经过滤部此时紫外灯也开始工作。

4.2.2 过滤吸附：进入过滤部的水会发生活性炭的吸附作用，利用净水专用活性炭强大的比表面积，连同离子交换树脂的阴阳离子交换作用，能够改变水质，其所含氯气以及一些重金属和钙镁离子会有所改善，味道和色泽也有所提高，氨氮含量有所降低。

穿过滤部的紫外灯将会照射活性炭和离子交换树脂，在过滤部下方的密闭气室中由于空气的存在，在紫外线灯的照射下同步会生成臭氧。部分臭氧向上进入过滤部，有研究表明臭氧和紫外线通过光化学反应可以生成羟基自由基这是一种广谱氧化剂，可以复活吸附饱和的活性炭。同时有研究表明活性炭可以催化臭氧产生羟基自由基，利用羟基自由基高氧化性来清洁消毒的化学过程被称为先进的氧化过程^[7]。

4.2.3 气室形成：随着穿过过滤部的水的到来，就会在本装置中形成独有的密闭气室。此结构类似于在U 型联通器的支管中水平加入一个过

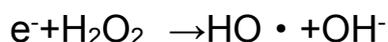
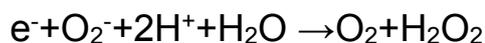
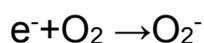
滤板，从滤板上方加水，在滤板的下方和另一支管间就一定会形成一个水封密闭气室。这一现象是基于水的表面张力所产生，被我发现而善加利用。

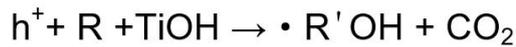
本反应器可以看作是内外桶形成的套筒型连通器。在其中，密闭气室是由过滤部的下表面所形成的水膜，过滤部向下延伸管的内表面（这个表面镀有光催化剂TiO₂），以及由净水杯水面构成的下表面围合而成。我观察到以压差为动力缓慢流过滤部的水全是附着在这个管的内表面呈薄层流下，因此即使很仔细观察，也不容易发现水的流动状态。不知不觉之间，净水杯内出现了水，不断升高的水面与延伸管下端接触后，密闭气室就形成了。此时水流将更加贴近内壁变得更加薄更均匀化，只看得到两个水室的液面的变化，看不到水的明显流动。这一现象的原因，可能是由于水分子的表面张力以及气室形成所带来的内压力。对于管型柱状内壁低速下的水流状态，已有研究者将出现贴附于内壁流动的这种状态，称为“茶壶效应”^[8]。

4.2.4 气室内发生的光催化反应：

现象：受光照射的某些半导体表面会产生光生载流子，在有水存在的条件下，会产生氧气以及强氧化性的自由基（羟基自由基、氧自由基），还能改变半导体膜的表面性质进行亲水性和疏水性的转换，组成合适的对电极结构后，还可以产生氢气^[9]。

反应机理： $\text{TiO}_2 \xrightarrow{h\nu} \text{e}^- + \text{h}^+$





↑ 活性氧化物种
有机物循环释放c

活性氧化物种包括：



其反应过程包含了有光子传递来的能量，禁带宽度、电子和空穴的分离、移动和复合、电化学氧化还原反应和活性氧化物种的产生。强氧化性的物质最终会将有机污染物氧化为水和二氧化碳，还原性物质会将经活性炭吸附后尚且残存的氯气还原为 HCl。光催化现象^[10]光催化剂的发现在几十年中已给现代生活带来了各种各样的便利。本设备利用能给光催化剂提供最合适的光子能量的紫外线照射，促进高效光催化反应的发生，让镀有光催化剂的气室内表面产生的强大的自洁能力，其作用强度远超自然光照射，不仅限于处理无机及有机物杂质，分解大肠杆菌内毒素 O₁₅₇，还可以杀死微生物和原生动物并将之分解，防止光复活现象发生。

4.2.5 气室内紫外灯的表面消毒反应：

反应机理：通过恰当波长的光子能量轰击打开DNA链使相邻的胸腺嘧啶 TT 交联导致微生物无法复制。

气室内部是空的，目前只有空气，穿过过滤部而来的紫外灯，处于中心轴。水沿着弧形筒状内壁薄层流动的现象刚好满足了紫外线的表面消毒要求、光催化作用所需要的增大接触效率的要求、以及增强将要发生在二氧化钛等光催化剂电极表面光电化学反应的要求。气室中空气的存在，也为紫外光产生臭氧提供了最初的原料。

作为一般规则，在电磁辐射中，每个光子相关联的能量越多，对活

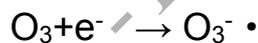
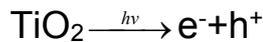
的生物体就越危险。研究者一致认为，紫外线通过改变微生物的DNA而使微生物失活。DNA 不吸收 300 纳米以上波长的光，低于 200 纳米波长的光不能穿透水。

由于紫外线在水中的穿透能力差，紫外线多用于表面消毒，本结构设计反应器密闭气室所观察到的薄层流动现象提供了用低辐照强度的紫外线达到高消毒效果的可能。

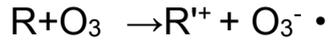
紫外线对于水中的原生动物有非常好的消毒作用，无任何二次污染^[11]。

4.2.6 密闭气室内臭氧紫外耦合反应

反应机理：



臭氧是最强的化学消毒剂，臭氧的氧化势高于氯、过氧化氢，属于杀菌剂，杀毒彻底。臭氧可通过紫外线照射空气产生，臭氧与紫外线通过光化学反应生成HO·自由基等强氧化性产物，本身氧化性也极强。臭氧直接参与的反应称为 D (Dissolved Organic Matter DOM) 反应：

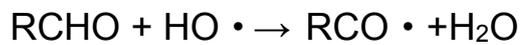


DOM中的富电子芳环与臭氧反应生成HO·自由基这一过程会持续不断。

臭氧一旦溶于水中，便开始衰减生成羟基自由基：



HO·自由基参与的反应为 R 反应：

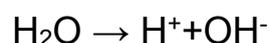


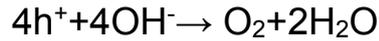
臭氧作为消毒剂主要作用途径还是通过臭氧的直接氧化，所以臭氧余量也是很重要的。空气中约含有 21%的氧，本设备催化的二氧化钛表面生成的氧气会不断给密闭气室提供用来生成臭氧。本装置引进的紫外光源，既有 253.7 纳米的强效杀毒波长，也能够产生臭氧。紫外光催化及臭氧氧化与活性炭联合工艺已在废气治理上得到了推广。由于HO·自由基的活性比臭氧更高，可以处理臭氧难降解的污染物。臭氧和紫外光在水处理的消杀工艺中各有优势，臭氧对水中的内孢子、细菌和病毒，有非常好的消毒效果。紫外线和臭氧可以互补且产物无副作用，无二次污染是目前最安全的消毒杀菌工艺^[12]。

4.2.7 系统中发生的电解水反应

4.2.7.1 密闭气室内发生的TiO₂阳极电解水产O₂反应

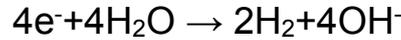
反应机理：



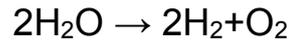


4.2.7.2 气室外Pt阴极电解水产H₂进行氧化物种的还原

TiO₂半导体内产生电子的被外置偏压传递到气室外的对电极Pt



总电解反应：

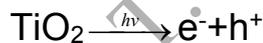


密闭气室内不断消耗的臭氧将由通电后的钛阳极上产生的氧气再经185nm紫外线照射后得到补充。由于阳极设置在密闭气室内，气体得以保持，O₂是有机物降解反应发生的必要条件，能影响表面反应过程和加速某些中间产物的降解。

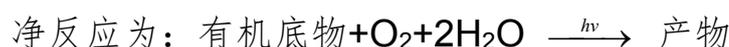
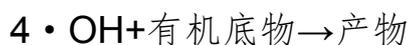
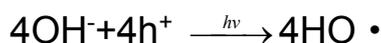
4.2.8 系统中发生的光电催化反应：

电催化反应是在电化学反应的基础上，用催化材料作为电极或在电极表面修饰催化材料，从而降低反应活化能提升电化学反应效率。

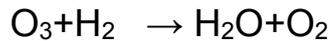
光催化反应是在受光激发后，催化剂表面产生的空穴电子对分别与氧化性和还原性物质相互作用的电化学过程。



光电催化反应是为了减少电子与空穴的复合提高催化降解效率而采用外加电压或电流的方法迫使光致电子向对电极方向移动，减少发生简单复合的机会，增加了以下反应的发生：



4.2.9 净水室中发生的还原反应



通过水封气室中的光电催化电解及臭氧紫外线耦合产生的高级氧化物种的氧化作用，水中的微生物和有机质得到消除，最终变为 H_2O 和 CO_2 。但由于臭氧在水中的半衰期常温为20分钟远长于其他氧化物种以毫秒记的存在时间。为能安全饮用，应消除饮用前水中的氧化物种，这一任务将由设置在密闭气室外部净水杯中的对阴极铂电极上产生的氢气来完成。

氢气的产生是由于水中的 H^+ 充当了光电催化反应中的电子受体，同时水的PH升高用以中和气室内水降低的PH。

以上反应原理示意图，见图5。以上每一部分的反应机理均为成熟理论，但在同一反应器中，同时发生的情况的研究，未见报道。

综上所述：本反应器以气室为中心，利用光电催化反应进行水消毒过程中，留在阳极上的空穴具有强氧化能力，各种氧化反应过程并不是相互隔离而是同时交织在一起共同进行的，某些中间体如羟基自由基参与了多种反应，其最终氧化效果是能否得到增强，从而产生一种耦合性效果，阴极还原是否有效都要用实验来验证。为此我设计了如下的验证实验。

5、制备及测定

5.1 二氧化钛镀膜的制备

传统二氧化钛镀膜采用浸渍提拉法，其成膜性好，但牢固性较低。为了将纳米二氧化钛牢固的附着在玻璃基底上，采用纳米二氧化钛与二氧化硅混合

高温焙烧得到丰富的牢固的二氧化钛镀膜管状体。

5.1.1 用 1000 倍放显微镜观察确定经过烧结擦拭后玻璃试样观察到有彩色镀膜，如图6所示。

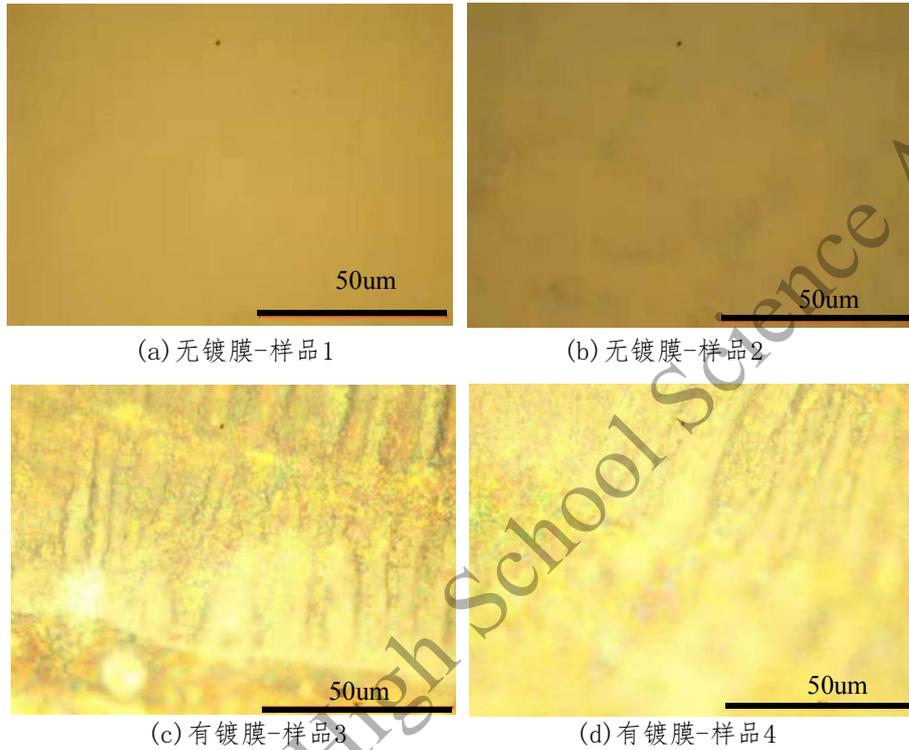


图 6 放大 1000 倍试样表面

观察不同温度焙烧后样品的微观形貌，800 度以上温度，样品明显出现气泡，500 度成膜均匀明显玻璃基底没无明显变化，250 度和常温膜被擦除不牢固无使用价值。

5.1.2 用日立台式扫描电TM4000plus (SEM)

观察玻璃基底的微观形貌，该型号电镜放大倍数为 $80 \sim 2000000$ 倍。分辨率可达 1.3nm。样品不导电需先喷金，取焙烧后的试片进行喷金后，如图7。

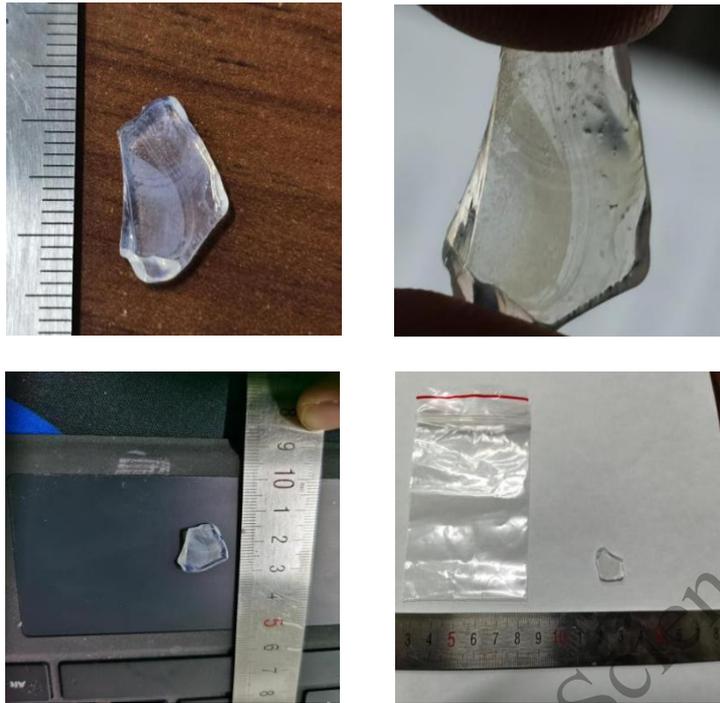
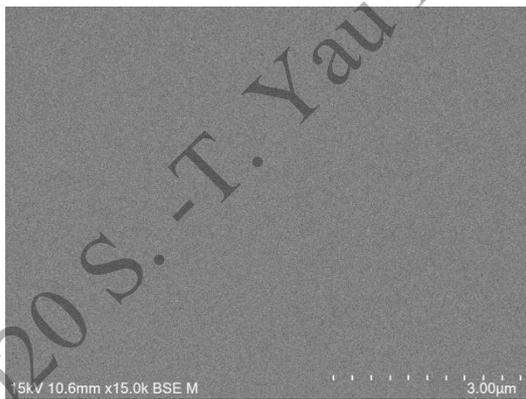
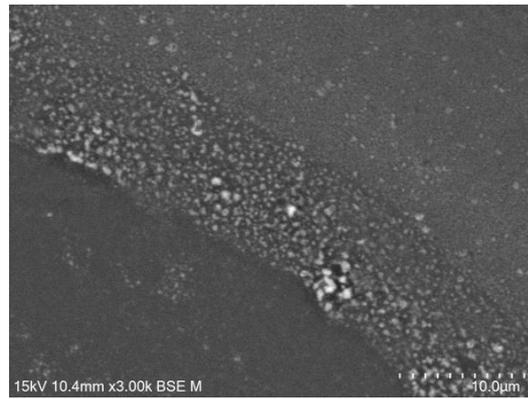


图 7 喷金后的试样

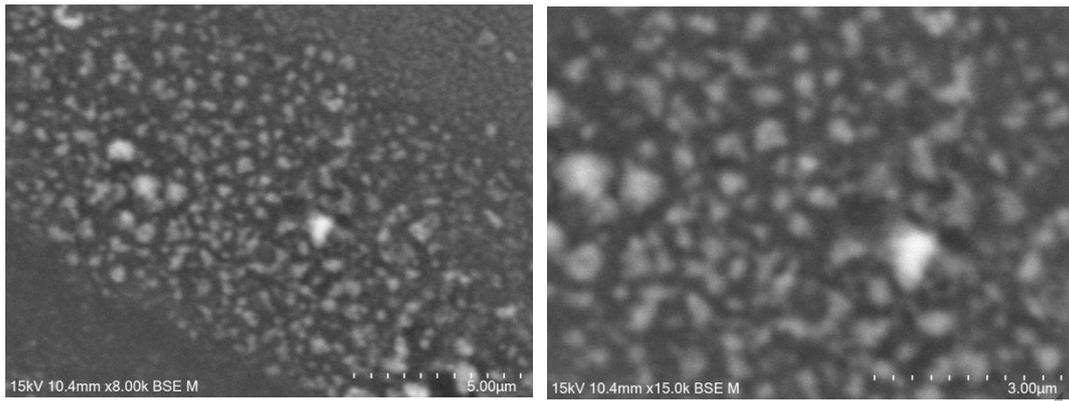
我第 1 次观察到电镜下面的二氧化钛镀膜的微观形貌，颗粒大小间距，从图8中可以清楚地看到二氧化钛不规则颗粒成球形均匀分布，直径尺寸 $1-5\ \mu\text{m}$ 。



(a) $\times 15000$ -无镀膜



(b) $\times 8000$ -有镀膜



(c) ×3000-有镀膜

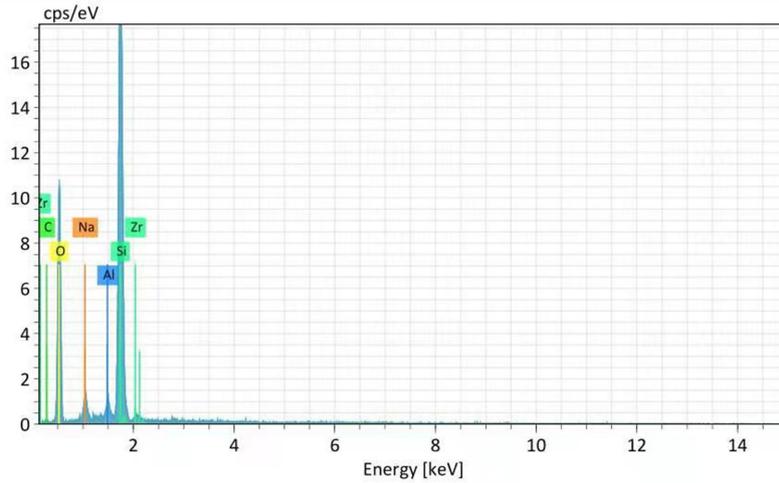
(d) ×15000-有镀膜

图 8 不同放大倍率电镜照片(二氧化钛镀膜的SEM图像)

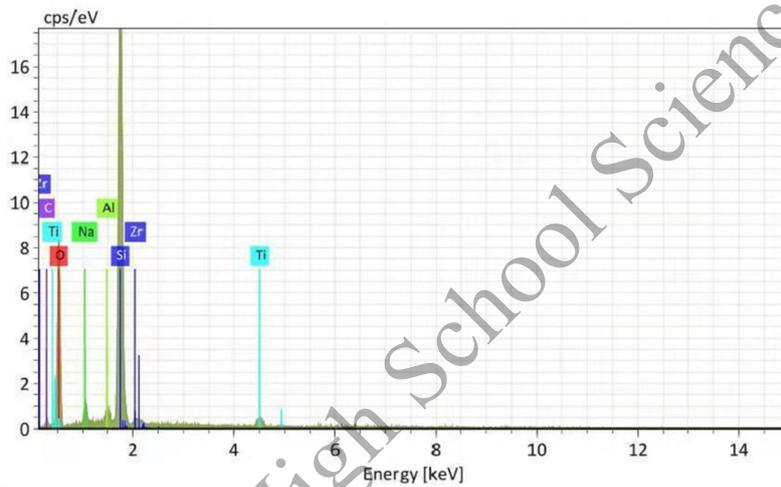
讨论：纳米材料定义为至少有一个维度上的尺寸在1至100纳米范围的材料。因此本实验所购材料为微晶材料，没有达到纳米范围。关于纳米尺度二氧化钛镀膜的特性进一步实验，以开发在纳米范围的新性能。由于具有极大的表面体积比，纳米颗粒的大小对化学催化影响很大，从几何学原理的角度很好理解，表面体积比与粒子大小成反比。也引出了更多提问，如果材料的维度在纳米范围内又如何呢？能否改善催化性能？

5.1.3 镀膜的性质检测

为了进一步了解高温焙烧得到的镀膜的一些特性及元素含量。使用TM系列专用能谱仪(EDS) Quantax75 进行能谱分析，结果如图9所示。



(a) 无镀膜



(b) 有无镀膜

图 9 玻璃表面成分能谱图

成分比例只能做参考，有误差，但能证明玻璃镀膜后，表面镀层有 Ti 成分。

5.1.4 小结

实验中发现通过 500~600 度焙烧的二氧化钛催化剂成膜结实结晶颗粒分布均匀，随着温度的增加，成膜性渐差有杂质气泡出现，所以选择 500~600 度焙烧的镀膜玻璃管来置备密闭气室。

5.2 紫外灯的测试

低压汞灯 9W,冷阴极紫外灯 3W

5.2.1 臭氧浓度监测

采用臭氧检测仪（斯宝路VOC气体检测仪），检测臭氧浓度。如图10所示。



图10 O₃浓度检测数值为15.6ppm

5.2.2 紫外线强度监测

LS125-UVC-WS防水型紫外线辐照计（深圳林上）
气室内紫外辐照强度的检测数据及对应辐照时间的计算

表1 辐照强度和距离表

辐照距离	辐照强度 $\mu\text{w}/\text{cm}^2$	
	9瓦低压汞	3瓦冷阴极
紧贴套管	3162.7	3644.7
1 cm	2033.8	2187.7
2 cm	1833.6	1868.9
3cm	403.2	451.6
5 cm	363.4	396.3

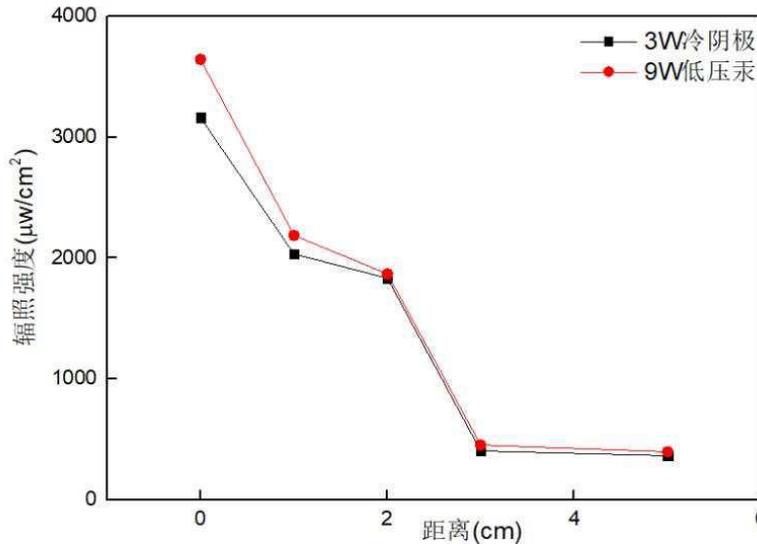


图11 辐照强度和距离的关系图

辐照时间计算：

当采用直径为6cm的气室中心照射紫外线时，以USEPA紫外消毒辐照剂量计算时间应 ≥ 100 秒： $40\text{mJ}/\text{cm}^2 = 40 \times 1000 \mu\text{J}/\text{cm}^2 = 400 \mu\text{w}/\text{cm}^2 \times 100$ 秒

气室外紫外辐照强度的检测数据

经过多次检测，证实这两种功率的紫外灯均无法穿透含二氧化钛镀膜的玻璃气室，甚至也不能穿过塑料矿泉水瓶，气室外室内紫外辐照强度为0，同一仪器，同时检测到室外阳光下紫外辐照强度为 $10.2 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ 。

5.2.3 小结

三瓦的冷阴极紫外辐射强度与九瓦的低压汞相当，均有臭氧生成。在直径6cm的气室内经过100秒的照射后，在气室内辐照强度都能达标^[13]，大于 $40\text{mJ}/\text{cm}^2$ 的目标RED值（等效生物剂量）。从降低能耗减少发热的角度选择三瓦的冷阴极紫外灯管。经过有二氧化钛镀膜的玻璃管的遮挡无紫外线泄露，如图12，可安全使用。安全性比在室外晒太阳还要高。

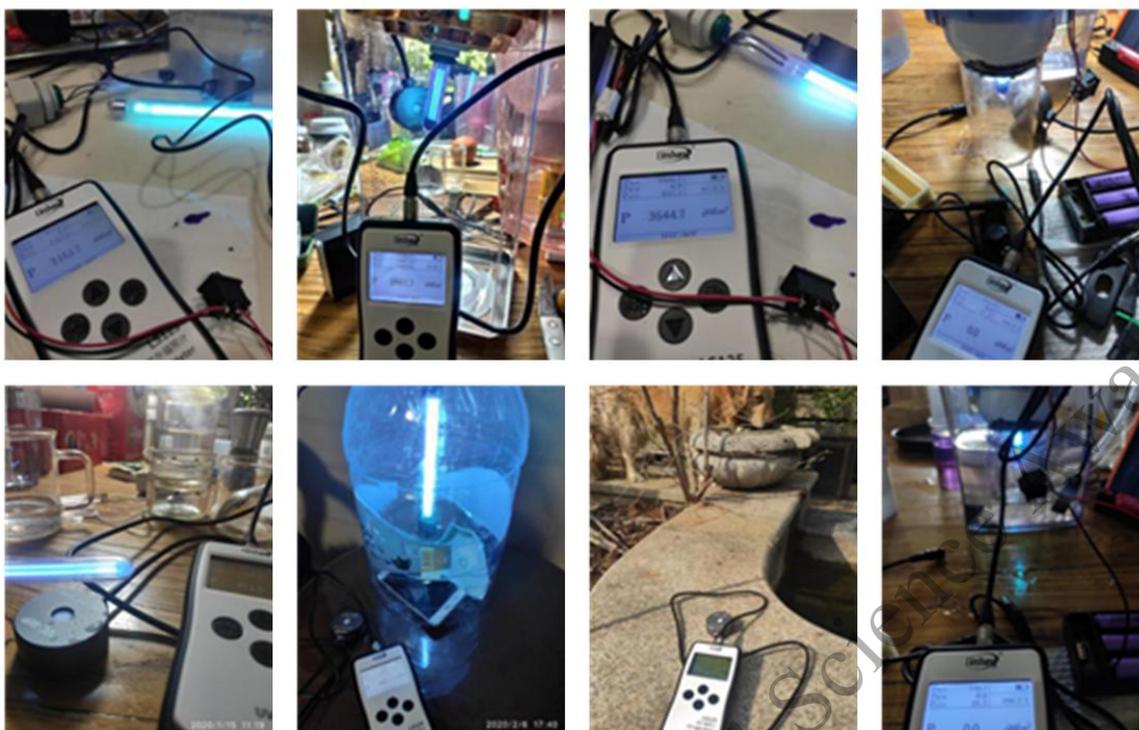


图 12 紫外灯强度、各部位辐照值、辐照安全性测试

5.3 微生物学检测

5.3.1 依据参考文献 5 和6，为加快实验进度，减少生物暴露危险，选择 3M6406 总菌落数检测快速试纸，3M6414 大肠杆菌检测纸片。定量菌株采用微穹MicroDomeGP 定量菌株，由温州维科生物公司生产，36℃恒温培养，24h 计数，数据仅用于校验装置杀菌效果，如图13。





图13 微生物培养检测试验

5.3.2 配置一种浓度菌液，采用 3W 冷阴极紫外灯制作的装置，按不同时间进行消毒实验，并作对照。记录结果表2和如图14所示。

表2 消毒实验具体记录表

检测项目	检测标准	判定标准	检测结果				结论
			编号	杀菌时间	检测项目	数量CFU/ml	
杀菌	GB/T5750.12-2006	GB5749-2006《生活饮用水卫生标准》规定：菌	源水	/	菌落总数	>1000	
					大肠杆菌	>1000	
			2--1	2min	菌落总数	148	
					大肠杆菌	110	
				3min	菌落总数	120	
					大肠杆菌	108	
			5min	菌落总数	75		
				大肠杆菌	42		
			7min	菌落总数	35		
				大肠杆菌	31		
			10min	菌落总数	35		
大肠杆菌	0						
				菌落总数	98		

检测	《生活饮用水标准检验方法微生物指标》	落总数 ≤ 100CFU/ml ; 大肠杆菌不得检出	2--2	2min	大肠杆菌	90	直接在水箱内进行加标(菌)测试, 验证杀菌能力
					菌落总数	26	
				3min	大肠杆菌	11	
					菌落总数	6	
				5min	大肠杆菌	1	
					菌落总数	2	
				7min	大肠杆菌	1	
					菌落总数	1	
				10min	菌落总数	1	
					大肠杆菌	0	
			2--3	2min	菌落总数	56	
					大肠杆菌	37	
				3min	菌落总数	9	
					大肠杆菌	1	
5min	菌落总数	3					
	大肠杆菌	0					
7min	菌落总数	0					
	大肠杆菌	0					

注：2-1 为浸没式消毒； 2-2 无TiO₂镀膜，有气室； 2-3 有TiO₂镀膜，有气室。

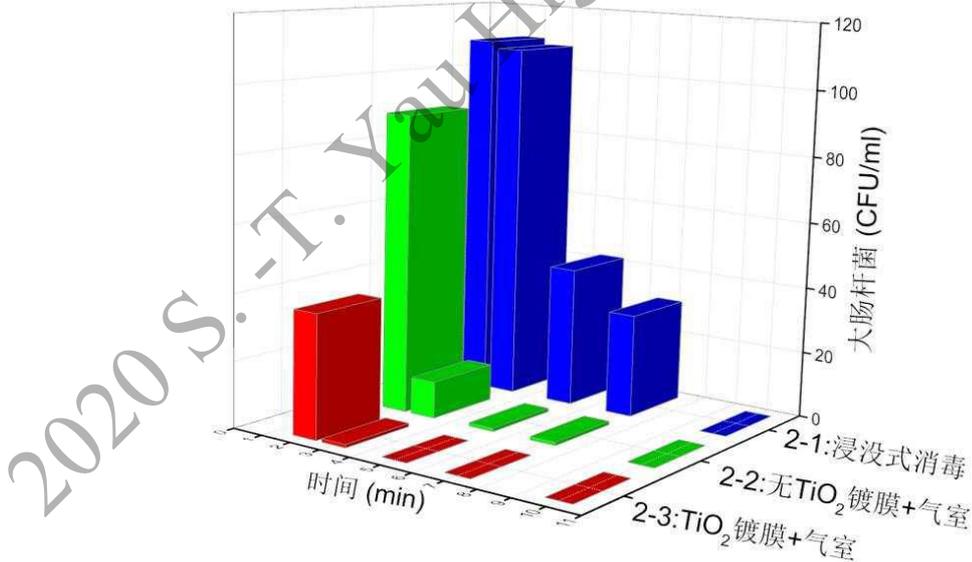


图14 消毒实验结果柱状图

5.3.3 小结

杀菌效果明确，即使高达 1000CFU/ml 的大肠杆菌含菌量，经本装置处理，5 分钟之后即不存在活菌，镀膜气室使单位时间杀菌效率提高。

5.4 臭氧残留安全性检测

目前在世界范围内，纯净水、天然水（山泉水、矿泉水、地下水等经过滤消毒等工序制成），已普遍采用臭氧消毒。

在自来水臭氧净化应用时，国际常规标准为0.4mg/L,保持4分钟消毒，CT值为1.6。C代表臭氧浓度，T代表消毒时间，CT值为水中臭氧浓度和接触时间的乘积。

由于本反应器独特的密闭气室的强化作用,为防止净化后臭氧浓度超标,进行了净化后水的臭氧含量的快速检测。

采用杭州陆恒生物科技生产的臭氧快速检测比色管。检测结果如图15所示。



图15 臭氧含量比色结果为 0.2mg/L

结论：臭氧含量稳定在0.2-0.3mg/L,符合国际标准。

6、结果与讨论

现阶段本结构装置经过初步实验验证，是能够集过滤净化消毒为一体的、可实用化的气液固三相协同增效光电催化净化设备，高效低能耗，而且结构独特稳定，利用光电协同最终将产生能够安全直饮的清洁水。

推广使用后，会大量减少烧开水的能量消耗和烧水过程对水中矿物质的析出，能给人们的生活带来健康和方便，而且快速灵活高效。

本反应器属多相耦合强化催化反应装置，其中各相反应参数均可能相互影响变化：如CT值、UV光照强度、催化剂效率、水体通过反应器状态和时间等。为进一步提高消毒效率预测的准确性应将反应器的水力学，臭氧分解动力学和UV光电催化降解动力学结合组建数学模型。模型中应包含微生物灭活阈值K、有效紫外辐照剂量、反应时间T、臭氧CT值及分解速率、温度、光催化分解率、TOC矿化率、电解电压、水质波动、以及水力学、流体动力学等一系列可变参数。随着当前计算机运算能力的提高，基于计算流体力学CFD技术，可以让预测变得更加准确，从而设计出效率更好的反应器。

通过整个的研究验证过程，让我感觉到科学的奇妙之处。各种平时不易观察到的反应及能量，真真实实的以这样的结果呈现在了我的面前，我同样感觉到了逻辑思维的巨大作用。初步学习到科学的方法论，感受到科学研究的酷，获得验证后的喜悦和成就感。

为了实现最初的目标，我正和同学们一起参加青年推广力传播活动（YIC）。通过大家持续的努力，在专家的指导下利用传播活动提高社区饮用水健康意识水平，让泉城人以新的方式喝上原汁原味的安全的泉水，为泉城济南所拥有的全国全国文明城市和世界花园城市称号做出自己的贡献。

7、致谢及结束语

在整个研究项目选题构想制作实践过程中，我首先通过查阅大量的文献确立研究思路。其中藤岛昭先生所写的生动有趣的光催化现象的发现和实用化的过程我深有同感，我在研究的过程中也同样体会到他当时的快乐和兴奋，在此我向他致敬。同时也像我引用的这些论文、书刊、的作者，光催化现象的研究前辈们致以敬意。

非常感谢山东大学材料科学与工程学院的陈姬教授，及其团队对我的指导。陈教授渊博的知识，严谨的科学风范，深深的影响着我。在催化膜的制备过程中，我第 1 次接触到电子显微镜，看到了我平时无法看到的世界，极大的提高了我对科学研究的兴趣和能力。

感谢山东省实验中学的石磊老师，他给予了我极大的督促和鼓励。

还要感谢我的爸爸妈妈，让我拥有一个幸福和美满的家庭。

未来的路还很长，我知道科学研究的道路上不会一路顺风，但我愿意迎难而上，劈波斩浪，克服一个又一个困难，在科学的海洋中遨游，这一切源自我对知识强烈的渴望和对生命的关心对自然的热爱。

8、参考文献

- [1] 罗利军, 潘学军, 姜峰芝: TiO₂ 复合光催化剂吸附/光催化降解协同去除新型有机物污染物, 科学出版社, 2019, P9-P13.
- [2] 朱永法, 姚文清, 宋瑞隆: 光催化环境净化与绿色能源应用探索, 化学工业出版社, 2014. P007.
- [3] 邢一帆: 实用新型专利, 2016, 2100 20260.
- [4] 邢一帆: 发明专利申请, 2019, 10179703.8.
- [5] 《生活用水卫生标准》, GB5749-2006.
- [6] 《生活饮用水标准检验方法微生物指标》, GB/T 5750, 12-2006.
- [7] 刘守新, 张世润, 孙承林: 木质活性炭的光催化再生, 林产化学与工业 2003.
- [8] E. jambon-puillet. etal. phys. River. lett. 122. 184501
- [9] Carl h hamann, Andrew hamnett, walf vielstich, 陈艳霞等译, 电化学第 2 版 化学工业出版社 2010, p173-p179
- [10] 滕岛昭 著, 上官峰译: 光催化大全 从基础到应用图解, 化学出版社 2019 P92-101.
- [11] John c. crittenclen 等著, 刘百仓等译: 水处理原理与设计水处理技术(二)(原著第三版), P73-94.
- [12] Clemens von sonntag [德] Urs von Gunten[瑞士]著, 刘正乾译: 水和污水处理的臭氧化学 基本原理与应用, 中国建筑工业出版社, 2016. p20-p52.
- [13] 美国环保局紫外线消毒指导手册 U. S. EPA (2006)
- U. S. EPA (2006) Ultraviolet Disinfection Guidance Manual, for the final long Term 2 Enhanced surface water treatment Rule. EPA 815-R-06-00, U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.