

参赛学生姓名：王海轩

中学：重庆市南开中学

省份：重庆市

国家/地区：中国

指导老师姓名：甘立勇

指导老师单位：重庆大学物理学院

论文题目：高效压电催化材料的构建及其电荷
运输与界面反应动力学研究

高效压电催化材料的构建及其电荷输运与界面反应动力学研究

王海轩

重庆市南开中学

摘要：随着能源危机与水污染问题日益突出，利用机械能驱动多相界面化学反应的压电催化技术展现出巨大应用潜力。然而，传统压电催化体系面临载流子严重复合、电荷浪费以及产物选择性难以调控等多重瓶颈。本研究围绕硬件装置创新——双电荷协同利用——界面与微环境调控展开系统研究。首先，自主设计并研制了在线自动气体进样装置，实现了常压密闭体系下气体产物的无损自动采样与色谱联用。其次，制备了二维 SnSe 纳米片，在超声机械驱动下同时利用空穴降解有机废水（RhB 去除率 97.2%）和电子还原产氢（ $1047.3 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ ），为机械驱动压电催化剂中废水净化与制氢一体化的双功能电荷利用提供策略。为进一步解决电荷极易复合的问题，构筑了高稳定性的 Ag-ZnO 催化剂，利用 Ag 纳米颗粒的电子陷阱效应促进了载流子分离。最后，创新性地引入反应气氛调控手段，为在固定催化体系上定向调控产物选择性开辟了简便高效的新途径。本工作为机械能转化、废水资源化及反应选择性精准调控提供了新范式。

关键词：压电催化；电子输运；界面反应动力学；废水制氢；

Construction of High-Efficiency Piezocatalytic Materials and Investigation of Their Charge Transport and Interfacial Reaction Kinetics

Haixuan Wang

Chongqing Nankai Middle School

Abstract: With the growing severity of energy crises and water pollution, piezocatalysis—which harnesses mechanical energy to drive heterogeneous interfacial chemical reactions—has exhibited tremendous application potential. However, conventional piezocatalytic systems suffer from multiple bottlenecks, including severe carrier recombination, charge dissipation, and difficulties in regulating product selectivity. In this study, systematic research is conducted centering on hardware device innovation, dual-charge synergistic utilization, and interface/microenvironment regulation. First, an automated on-line gas sampling apparatus was independently designed and developed, achieving non-destructive, automated sampling of gaseous products coupled with gas chromatography under an ambient-pressure closed system. Second, two-dimensional SnSe nanosheets were prepared; under ultrasound driving, holes were utilized to degrade organic wastewater (achieving a 97.2% RhB removal efficiency) while electrons simultaneously reduced water to generate hydrogen ($1047.3 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$), providing a strategy for dual-functional charge utilization that integrates wastewater remediation and hydrogen evolution in mechanically driven piezocatalysts. Third, to further address the challenge of facile charge recombination, a highly stable Ag–ZnO catalyst was constructed, promoting carrier separation via the electron-trapping effect of Ag nanoparticles. Finally, a reaction atmosphere regulation approach was innovatively introduced, opening up a facile and efficient pathway for the targeted tuning of product selectivity on a fixed catalytic system. This work establishes a new paradigm for mechanical energy conversion, wastewater resource recovery, and the precise control of reaction selectivity.

Keywords: Piezocatalysis; Electron transport; Interfacial reaction kinetics; Hydrogen production from wastewater

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

目 录

摘要.....	1
关键词.....	1
1 引言.....	6
2 实验部分.....	8
2.1 实验试剂与材料.....	8
2.2 压电催化材料的制备.....	9
2.2.1 二维 SnSe 材料的制备	9
2.2.2 Ag 修饰的 ZnO 纳米催化剂的制备.....	9
2.3 压电催化废水降解与析氢性能测试.....	10
2.3.1 压电催化实验条件.....	10
2.3.2 污染物降解性能测试.....	10
2.3.3 H ₂ 生成性能测试.....	11
2.3.4 H ₂ O ₂ 生成性能测试	11
2.4 材料表征方法.....	11
3 结果与讨论.....	12
3.1 装置创新：自动进样系统.....	12
3.2 二维 SnSe 材料压电催化废水制氢研究	13
3.2.1 二维 SnSe 纳米片的结构与压电性质	13
3.2.2 机械参数（超声功率与频率）调控催化活性.....	14
3.3 高效 Ag-ZnO 催化剂的构筑与电荷输运研究	17
3.3.1 Ag-ZnO 催化剂物相与界面微观结构	17
3.3.2 电荷输运动力学调控机制.....	18
3.4 Ag-ZnO 催化反应界面反应动力学研究	21
3.4.1 反应气氛定向调控催化产物.....	21
3.4.2 界面反应动力学机制.....	23
4. 总结.....	24
参考文献.....	25
致 谢.....	27

附 录.....	29
A. 全自动在线气体采样装置控制系统软件 V1.0 源代码.....	29
B. 全自动在线气体采样装置控制系统软件使用说明.....	66

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

1 引言

随着全球化石能源的日渐枯竭以及工业化进程中水污染问题的日益严峻,开发低碳可持续的清洁能源技术与高效的水污染净化手段已成为当今能源与环境科学的前沿焦点^[1]。在传统水处理技术中,芬顿高级氧化、光催化以及电催化等方法虽已展现出独特的净化潜力,但它们通常依赖于持续的高品质电能、人工紫外/可见光源或化学药剂的大量输入,面临能耗高、碳排放大以及综合处理成本昂贵等现实瓶颈。与此同时,自然界与人类工业生产活动中广泛分布着巨大的低频机械能(如工业设备振动、机械声波、潮汐水流及管道流体等),然而这类机械能往往作为耗散能量被忽视。如果能够利用先进功能材料直接捕获这些环境机械能,并将其高效转化为高密度的化学能源或用于驱动环境修复反应,将为实现“碳中和”愿景开辟极具前景的技术路径^[2, 3]。

更为重要的是,传统环境治理往往停留在单向降解污染物的治理模式,若能构筑双功能耦合体系,将难降解有机废水的解离、矿化过程与质子还原析氢(H_2)过程有机结合,便能突破“高能耗治理低价值废物”的局限^[4, 5]。

压电催化(Piezocatalysis)作为近年来新兴的多相催化分支,利用非中心对称晶体材料固有的压电效应,开辟了机械能至化学能直接转化的全新途径^[6]。其基本原理为:当压电材料受到外部机械作用时,材料内部正、负电荷中心发生相对位移,在表面形成极化电荷。随后,机械诱导产生的电子和空穴迁移至材料表面,并分别参与还原和氧化反应^[7, 8]。尽管压电催化前景广阔,但在载流子动力学与表面反应层面仍面临严峻的基础科学挑战^[9]。其一,机械诱导电荷从产生到参与化学反应还需要经历材料内部迁移和界面传输过程。电子与空穴的复合以及界面电荷传输阻力都会降低真正参与表面反应的有效电荷数量^[10]。其二,现有研究大多致力于通过形貌工程或异质结构来优化催化剂本身的性能,而往往忽略了界面反应微环境对产物演化路径的决定性影响。目前,针对反应气相介质引入及其构筑的“气-液-固”三相微环境协同调控策略仍显匮乏,导致压电催化过程中的产物分布与反应选择性难以实现定向引导与精准调控^[9, 11]。

针对以上问题,本研究围绕压电催化过程中电荷的产生、传输和界面反应动力学调控展开研究。首先利用二维 SnSe 构建污染物降解与 H_2 生成耦合体系,提高正、负电荷的协同利用。随后针对材料稳定性及电子—空穴复合问题,构建 Ag-

ZnO 界面促进电荷传输，并进一步通过调节反应气氛改变界面反应过程和产物分布，从材料本体与反应微环境两个层面探索高效压电催化体系的构建方法。

本研究主要开展以下三个方面的工作

(1) 自动在线气体进样装置的开发。针对催化产气实验中人工定时取样操作繁琐的问题，设计并搭建自动在线气体进样装置，实现气相产物的定时自动取样，为后续压电催化产氢实验提供测试基础。

(2) 二维 SnSe 压电催化体系的构建。制备二维 SnSe 纳米片，并研究其压电响应及催化性能。利用机械诱导的氧化性电荷进行污染物降解，同时利用还原性电荷驱动 H_2 生成，实现机械驱动的废水降解与产氢耦合。进一步通过调节超声频率和功率等参数，研究机械激励条件对压电催化性能的影响。

(3) Ag-ZnO 界面构建及反应微环境调控。针对 SnSe 体系稳定性和电荷复合问题，选用稳定性较好的 ZnO 作为压电催化材料，并在其表面修饰 Ag 纳米颗粒构建 Ag-ZnO 界面，通过调节 Ag 负载量研究界面调控对压电催化性能及电荷传输的影响。在此基础上，通过改变反应气氛（空气/Ar）定向调控产物分布，并结合压电流、电化学阻抗和 EPR 测试分析反应气氛对电荷输运和界面反应动力学过程的影响。

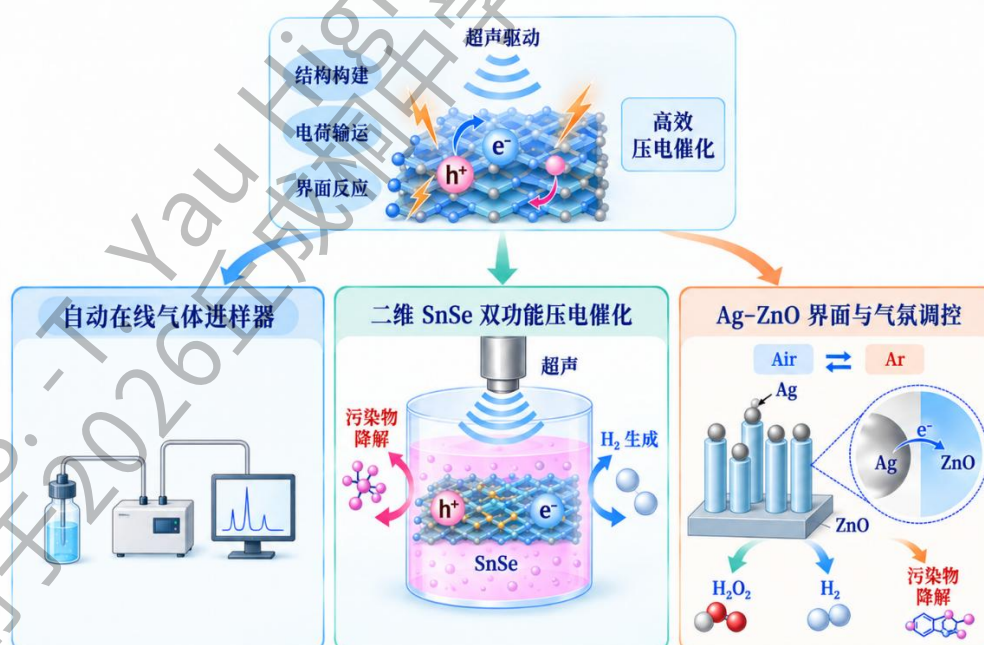


图 1.1 实验设计示意图。

2 实验部分

2.1 实验试剂与材料

本论文使用的主要实验试剂如表 2.1 所示。

表 2.1 实验试剂与耗材

试剂名称	生产厂商	CAS 号
二水合醋酸锌 ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	Aladdin	5970-45-6
氢氧化钠 (NaOH)	Aladdin	1310-73-2
聚乙二醇 400 (PEG400)	Aladdin	25322-68-3
硝酸银 (AgNO_3)	Aladdin	7761-88-8
甲醇 (CH_3OH)	Aladdin	67-56-1
罗丹明 B (RhB)	KESHI	81-88-9
无水乙醇 ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)	KESHI	64-17-5
碘化钾 (KI)	Macklin	7681-11-0
邻苯二甲酸氢钾 (KHP)	Macklin	877-24-7
氯化亚铁 (FeCl_2)	Macklin	7758-94-3
硫酸钠 (Na_2SO_4)	Macklin	7757-82-6

本论文使用的主要仪器与设备如表 2.2 所示。

表 2.2 实验仪器与设备

仪器名称	型号	制造商
鼓风干燥箱	DHG-9076A	上海精宏实验设备有限公司
离心机	TG-16	四川蜀科仪器有限公司
超声清洗机	JM-03D-80	深圳洁盟超声仪器有限公司
电子天平	ME104	梅特勒-托利多仪器有限公司
X 射线衍射仪	D7 Ultra	安徽国科仪器科技有限公司

仪器名称	型号	制造商
高分辨场发射扫描电子显微镜	SU8600	日本日立高新技术株式会社
透射电子显微镜	Talos F200S	美国赛默飞世尔科技有限公司
X 射线光电子能谱仪	ESCALAB 250Xi	美国赛默飞世尔科技有限公司
电子顺磁共振波谱仪	EPR200-Plus	国仪量子技术（合肥）股份有限公司
紫外-可见分光光度计	SP-1920	上海光谱仪器有限公司
气相色谱仪	GC-2030	日本株式会社岛津制作所
电化学工作站	CHI660E	上海辰华仪器有限公司

2.2 压电催化材料的制备

2.2.1 二维 SnSe 材料的制备

采用无表面活性剂的水相化学沉淀法制备 SnSe 纳米片。首先，将 0.45 g 二水合氯化亚锡 ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 和 10 g 柠檬酸加入 20 mL 去离子水中，在室温条件下磁力搅拌 20 min，使 Sn^{2+} 与柠檬酸充分络合，得到均匀溶液，记为溶液 A。随后，将 50 mg 硒粉缓慢加入 20 mL、10 mol/L NaOH 溶液中，并在 80 °C 条件下持续搅拌 60 min，直至形成均匀的红棕色溶液，记为溶液 B。待两种溶液中均无明显固体颗粒后，在持续搅拌条件下将溶液 A 缓慢滴加至溶液 B 中。混合后约 60 s 内体系逐渐变黑，继续在室温下搅拌不少于 5 min。反应结束后，通过离心收集黑色固体产物，并分别采用去离子水和乙醇各洗涤 3 次。最后，将所得样品置于真空干燥箱中，在 50 °C 条件下干燥 12 h，得到 SnSe 纳米片粉末。

2.2.2 Ag 修饰的 ZnO 纳米催化剂的制备

ZnO 纳米棒的制备：采用水热法制备 ZnO 纳米棒。首先，将 1.1 g 二水合醋酸锌和 4.0 g NaOH 加入 30 mL 无水乙醇和 7.5 mL PEG400 中，充分混合后将溶液转移至聚四氟乙烯内衬的不锈钢反应釜中。反应釜在 120 °C 条件下水热反应 12 h。待反应结束并自然冷却至室温后，通过离心收集所得白色沉淀，并分别采用去离子水和乙醇洗涤数次。最后，将样品置于 60 °C 条件下干燥过夜，得到 ZnO

纳米棒。

Ag-ZnO 纳米棒的制备：采用光沉积法在 ZnO 纳米棒表面负载 Ag 纳米颗粒。取 0.1 g ZnO 分散于去离子水和 10 mL 甲醇组成的混合溶液中，并加入一定体积浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ Ag 的 AgNO_3 标准溶液，保持体系总体积为 50 mL。混合液首先在暗处搅拌 1 min，随后转移至 100 mL 石英反应器中并通入 Ar 5 min。之后在持续搅拌条件下利用 300 W 氙灯照射 1 h 进行光沉积。反应结束后收集产物，用去离子水洗涤，并在 60°C 下干燥。通过改变 AgNO_3 的加入量分别制备 Ag 名义负载量为 1、2、3 和 4 wt% 的样品，依次记为 ZnO-1 wt% Ag、ZnO-2 wt% Ag、ZnO-3 wt% Ag 和 ZnO-4 wt% Ag。

2.3 压电催化废水降解与析氢性能测试

2.3.1 压电催化实验条件

本研究针对 SnSe 和 Ag-ZnO 两种压电催化体系采用不同的实验用量。SnSe 体系中，取 10 mg 催化剂加入 20 mL 反应溶液；Ag-ZnO 体系中，取 25 mg 催化剂加入 30 mL 反应溶液。其中，污染物降解实验采用 5 mg/L RhB 溶液作为反应液， H_2O_2 和 H_2 生成实验根据具体测试要求采用去离子水作为反应介质。实验过程中将反应容器固定于超声设备的相同位置，并采用超声振动作为机械驱动力。使用循环冷凝水稳定反应条件为室温。

2.3.2 污染物降解性能测试

选用罗丹明 B (RhB) 作为模型有机污染物。实验开始前，将催化剂加入 RhB 溶液中，在暗环境下磁力搅拌 1h，使催化剂与 RhB 达到吸附-脱附平衡。随后根据实验要求调节反应气氛，并在超声作用下进行压电催化反应。反应过程中定时取出 1 mL 反应液，经 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后，采用紫外-可见分光光度计测定 RhB 在 554 nm 处的特征吸收峰，并根据吸光度变化确定不同反应时间下 RhB 的浓度。

RhB 降解效率按下式计算：

$$\eta = (1 - \frac{C_t}{C_0}) \times 100\% \quad (1)$$

式中， C_0 为 RhB 的初始浓度， C_t 为反应时间 t 时 RhB 的浓度。

2.3.3 H₂ 生成性能测试

反应前根据实验要求向体系中通入 Ar 或空气,随后进行超声压电催化反应。H₂ 采用 GC-2030 气相色谱仪进行定量分析。SnSe 体系中每隔 30 min 测定一次 H₂ 生成量; Ag-ZnO 体系中每隔 15 min 测定一次 H₂ 生成量。

2.3.4 H₂O₂ 生成性能测试

H₂O₂ 生成性能测试采用碘量法进行定量。压电催化反应过程中每隔 15 min 取样一次,取 1 mL 过滤后的反应液,加入 0.5 mL 0.4 mol/L KI 溶液和 0.5 mL 0.1 mol/L 邻苯二甲酸氢钾溶液,避光放置 24 h 后,采用紫外-可见分光光度计测定 352 nm 处的吸光度,并根据 H₂O₂ 标准曲线计算其浓度。

2.4 材料表征方法

采用 XRD 分析材料的晶体结构和物相组成。利用高分辨场发射扫描电子显微镜 (FESEM)、环境扫描电子显微镜 (ESEM) 和透射电子显微镜 (TEM) 观察材料的表面形貌和微观结构,并结合高分辨 TEM 及元素面扫描分析材料的晶格结构、元素空间分布以及材料的界面结构。采用 X 射线光电子能谱 (XPS) 分析材料表面的元素组成及化学状态,测试过程中以 C 1s 峰的 284.8 eV 作为结合能校正基准。采用压电响应力显微镜 (PFM) 评估样品压电性质。

电子顺磁共振波谱 (EPR): EPR 对压电催化反应过程中产生的活性物种进行检测。结合相应自旋捕获剂,分析超声激励条件下体系中自由基信号的变化。在 SnSe 和 Ag-ZnO 体系中,通过比较不同材料或不同反应气氛条件下 EPR 信号的差异,为分析压电催化过程中活性物种的生成及反应路径提供依据。

超声诱导压电流测试:采用 CHI660E 电化学工作站测试催化剂在周期性超声激励下的电流响应。通过比较机械激励开启和关闭过程中产生的瞬态电流变化,分析不同催化剂在超声作用下的电荷产生及传输行为。

电化学阻抗测试:采用三电极体系进行电化学阻抗谱 (EIS) 测试。以催化剂修饰的玻碳电极作为工作电极,碳棒作为对电极,Ag/AgCl 电极作为参比电极,并以 0.5 mol/L Na₂SO₄ 溶液作为电解液。

3 结果与讨论

3.1 装置创新：自动进样系统

在暑假初入实验室进行性能探究时，师兄师姐包括我自己，都是以手动进样的方式来进行析氢性能的测试，而这种气体的采集过程不仅繁琐、容易出错，样本精度也难以保证。尤其是在之前的实验中，每隔 15 分钟就要手动取一次样品，人必须一直守在仪器旁，既耗费精力又让时间被切得零碎，显得十分低效和不智能。而现有的自动采样设备价格昂贵、兼容性差，无法满足不同实验的需要。因此我提出了设计一款既能自动采样，又能与现有检测设备兼容的装置的想法。在老师的支持下，经过与实验室中科研人员的讨论，从原理设计、编写代码、系统验证，完成了这款自动气体采样装置的开发。它像一个“气体快递员”（图 3.1），能在反应的同时，自动、精准、稳定地采集气体样品，并自动送入气相色谱等检测系统，提高了实验效率，为催化反应研究提供了可靠的技术支持。



图 3.1 自主研发的“气体快递员”气体采样装置。

该装置的核心物理原理在于优化气体在常压下的传输动力学。通过设计动态补偿系统，实现了快速且无损的气体输运，从而确保采样过程高精度和高重复性。装置采用的柔性锚定技术，可以与多种反应容器兼容，避免了传统气密性维护的复杂操作，保证了即插即用的便利性与实验环境的清洁性。在功能上，该自动进样系统集成了远程监控、自动送样和自动清洁三大模块。科研人员在反应进行的同时即可实现实时采样，并将气体精准送入气相色谱等检测设备。与传统方法相

比, 该装置能够大幅减少人为误差和操作时间, 使实验更加高效与智能化。其小巧的体积和较低的维护成本也提升了使用的便利性和推广潜力。

“气体快递员”不仅在物理原理上通过动态补偿与柔性锚定技术实现了常压条件下的高效无损传输, 还在实际应用中大幅提高了实验效率与数据可靠性。这一创新装置为光催化产氢实验提供了更加自主、安全和智能化的检测手段, 也为催化剂筛选和性能评价开辟了新的可能。在成功研制该装置的基础上, 本研究将其深度应用于后续的压电催化系列实验中, 实现了气体产物的连续精准追踪, 保障了反应动力学数据解析的严谨度与可靠性。

3.2 二维 SnSe 材料压电催化废水制氢研究

将有机污染物氧化与析氢反应相耦合实现双功能电荷利用是一条合理路径。有机污染物通过氧化降解消耗正电荷, 而负电荷可用于水/质子还原释放 H_2 。这种反应有望将传统废水治理从单一修复过程提升为“变废为宝”的资源化策略, 在治污的同时生产清洁燃料。因此, 研发适用于此类氧化还原耦合的高性能压电催化材料, 是实现机械驱动“废水制氢”的关键。

二维 SnSe 纳米片是实现上述耦合过程的理想候选材料。SnSe 属于典型的低维各向异性层状半导体, 兼具独特电子特性与可调控性。尽管块体 SnSe 因中心对称结构而导致压电响应微弱, 但其二维或少层纳米片由于对称性破缺及显著的机械变形能力, 可展现出强烈的压电效应。二维 SnSe 的强压电响应、高暴露表面位点及短电荷迁移路径, 使其非常适于机械响应的表面氧化还原反应。此前已有 SnSe 基材料应用于压电析氢或降解污染物的报道, 但将其作为双功能压电催化剂用于“废水净化耦合产氢”的研究仍鲜见报道。

3.2.1 二维 SnSe 纳米片的结构与压电性质

本文采用液相化学沉淀法合成了二维 SnSe 纳米片。并系统解析了其物相结构、微观形貌及局域压电响应。首先, XRD 图谱 (图 3.2a) 证实样品为纯正交晶相 SnSe (JCPDS No. 48-1224)。TEM 与能谱元素分布 (EDS mapping) 表明材料呈片状形貌, Sn 与 Se 元素分布均匀 (图 3.2b)。高分辨透射电镜 (HRTEM) 图像 (图 3.2c) 显示其晶面间距分别为 0.289 nm 和 0.225 nm, 对应 SnSe 的 (400) 与 (002) 晶面, 表明材料主要暴露 (010) 面。为评估其压电响应特性, 开展了 PFM 表征。PFM 振幅图像显示纳米片区域存在清晰的压电响应 (图 3.3a), 且偏

压-振幅迟滞曲线呈现典型的对称“蝴蝶状”特征（图 3.3b），确证了二维 SnSe 纳米片具有显著的压电活性。

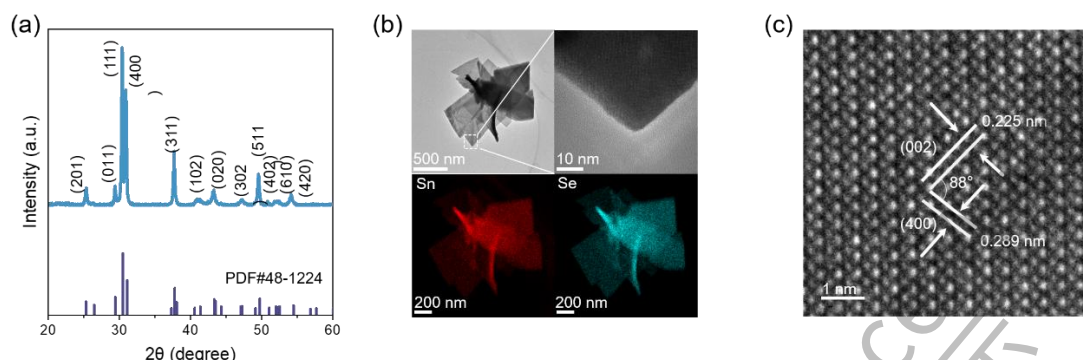


图 3.2 SnSe 纳米片的 (a) XRD 图谱、(b) EDS mapping 图谱以及 (c) HRTEM 图谱。

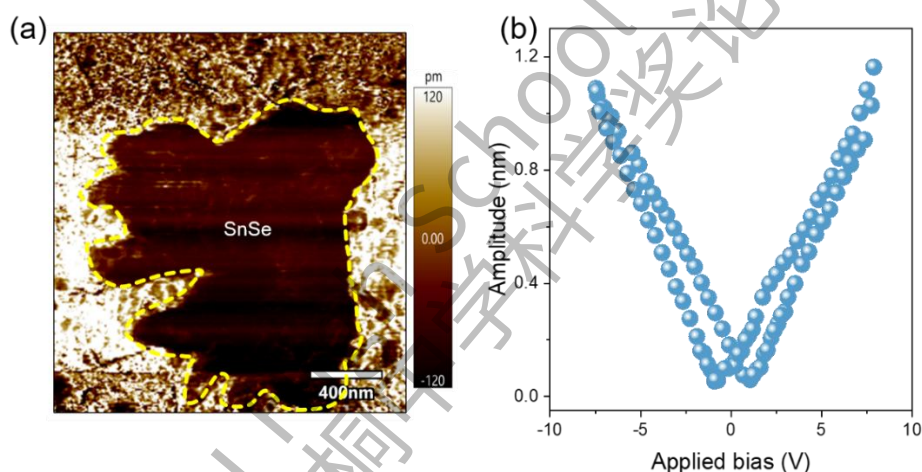


图 3.3 SnSe 纳米片 (a) PFM 图和 (b) 电滞回线。

3.2.2 机械参数（超声功率与频率）调控催化活性

我们以模拟 RhB 染料废水为模型反应体系，评估了 SnSe 纳米片的压电催化废水制氢性能。所有压电催化实验均在避光环境下进行。在开启超声前，催化剂悬浮液避光磁力搅拌 1 小时以达成吸附-脱附平衡，随后通入高纯 Ar 气吹扫除氧。为确保超声外场条件的一致，反应容器在全流程测试中严格置于超声水浴中的同一固定位置。以超声振动作为机械外场驱动力，同时通入外循环冷却水以抑制声致热效应积累（图 3.4）。通过自主搭建的在线自动进样系统连接气相色谱仪（GC），原位监测 H_2 的生成量。

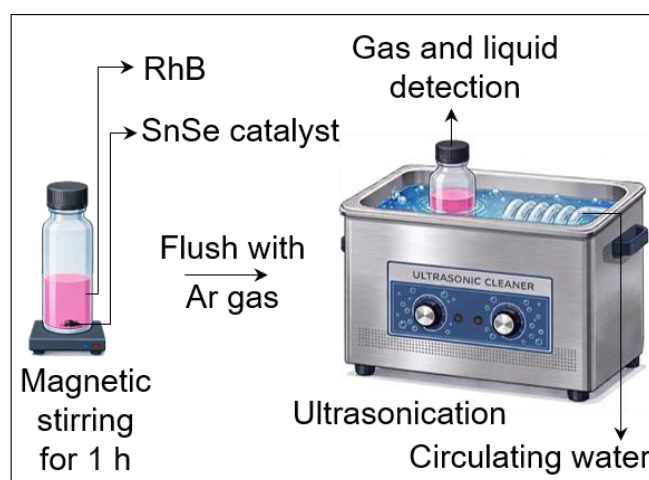


图 3.4 压电催化废水制氢的实验流程。

结果显示在超声外场激发下，SnSe 纳米片 (NSs) 在 RhB 溶液中反应 2 小时后的累积产氢量达 $1047.3 \mu\text{mol g}^{-1}$ (图 3.5a)。气相色谱定性定量分析表明，气相产物以 H_2 为主，仅检出微量 CO ($22.4 \mu\text{mol g}^{-1}$)，而 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 和 C_2H_6 等烷烃气相产物均低于色谱检测下限。块体 SnSe 上检测到的极微量 H_2 。空白对照实验进一步显示，在缺少 SnSe 催化剂或无机械超声激励的条件下，体系中 H_2 的释放量均可忽略不计，表明催化反应的进行必须同时依赖压电催化剂与机械振动外场。在纯水体系中，超声激发的 SnSe 纳米片也能析出 H_2 ，但产氢量显著低于 RhB 溶液体系，表明有机污染物的氧化过程通过高效消耗正电荷，抑制了电子-空穴复合，进而促进了析氢半反应的动力学进程。与此同时，采用紫外-可见吸收光谱 (UV-Vis) 监测 RhB 的降解动力学。在特征吸收波长下测得的吸光度-浓度标准曲线呈现出优良的线性拟合度 ($R^2 = 0.999$)，确保了 RhB 降解率定量分析的准确性。在相同反应条件下，反应 2 小时后 RhB 的降解去除率达到了 97.2%，对应的一级反应动力学速率常数 k 为 0.0312 min^{-1} (图 3.6)。

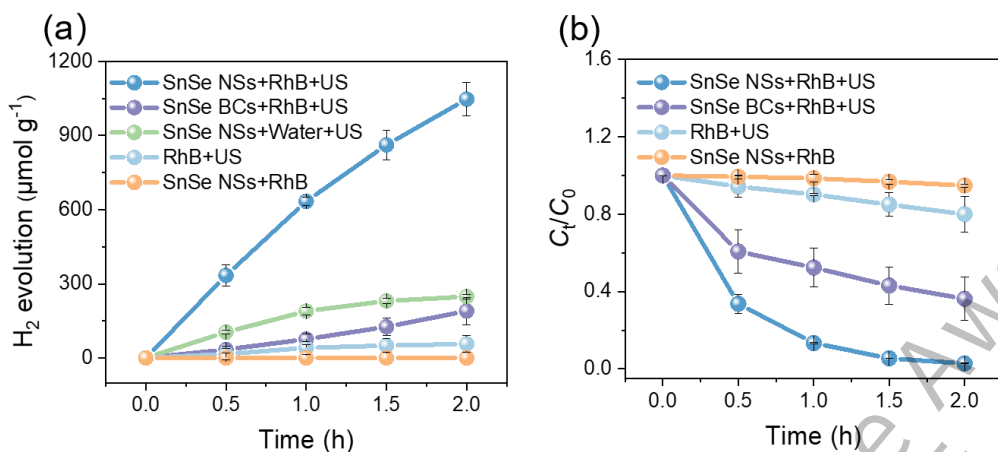


图 3.5 不同条件下 SnSe 催化剂的压电催化 (a) 析氢和 (b) RhB 降解性能。

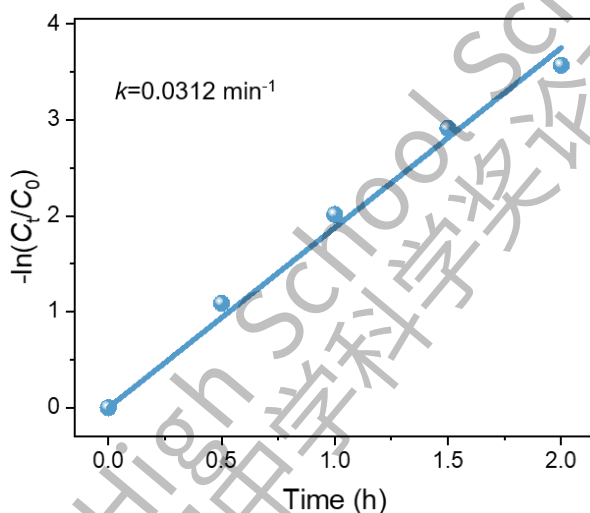


图 3.6 SnSe 催化剂降解 RhB 的一级反应动力学速率

通过改变超声输入功率与工作频率,深入探究了外部机械参数对压电反应效率的调控规律。我们发现提高超声功率能够提高 H_2 释放量与 RhB 降解速度,这与更强的机械形变在材料表面激发出更高通量的压电电荷相吻合(图 3.7a)。在固定输出功率下,28 kHz 条件下表现出最优的催化活性,这可能与反应系统在低频机械驱动下的声学共振匹配有关(图 3.7b)。

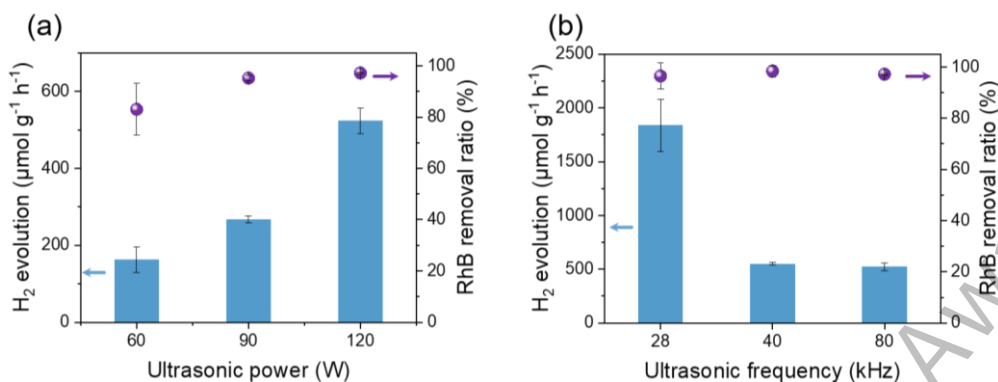


图 3.7 超声（a）功率和（b）频率对压电催化析氢和 RhB 降解速率的影响。

3.3 高效 Ag-ZnO 催化剂的构筑与电荷输运研究

在上述研究中发现 SnSe 材料在反应过程中容易被氧化，导致使循环稳定性匮乏，因此本工作后续引入了结构稳定的 ZnO 纳米棒作为压电催化核心基底。选取纤锌矿结构 ZnO 纳米棒，在于其不仅具备非中心对称晶格赋予的出色本征压电响应与已被广泛证实的机械驱动氧化还原能力。此外，为突破半导体中严重的电子-空穴自发复合瓶颈，进一步采用光沉积策略原位构筑了 Ag 纳米颗粒修饰的 Ag-ZnO 异质界面。利用 Ag 纳米颗粒在半导体表面形成的肖特基势垒与高效电子陷阱效应，大幅降低了界面电荷输运阻抗并诱导载流子定向分离，为后续实现高效、稳定的机械能量转换与多相界面反应奠定了基础。

3.3.1 Ag-ZnO 催化剂物相与界面微观结构

首先采用 XRD 分析了纯 ZnO 与不同 Ag 负载量的 Ag-ZnO 纳米棒的晶体结构。如图 3.8a 所示，所有样品均呈现出六方纤锌矿 ZnO 的特征衍射峰，表明 Ag 的引入未改变 ZnO 的晶体结构。随着 Ag 负载量增加，与金属单质 Ag 相关的衍射峰逐渐出现，证实了 Ag 物种的成功引入。随后，通过透射电子显微镜进一步表征了样品 ZnO-2 wt% Ag 的形貌与界面微观结构。TEM 观测表明，Ag 修饰后 ZnO 依然保持纳米棒形貌；在高分辨透射电镜（HRTEM）图像中可清晰观察到分别对应 ZnO 和金属 Ag 的晶格条纹（图 3.8b），表明形成了 Ag-ZnO 异质界面。进一步统计分析显示，表面锚定的 Ag 纳米颗粒平均粒径为 $13.64 \pm 3.78 \text{ nm}$ 。EDS 元素分布谱图显示 Zn、O、Ag 元素在整个纳米棒上共存且分布均匀（图 3.8c）。此外，XPS 的高分辨 Ag 3d 谱图（图 3.8d）展现出经典的双峰构型，确证了表面

修饰的 Ag 元素主要以零价金属态 (Ag^0) 形式稳定存在。

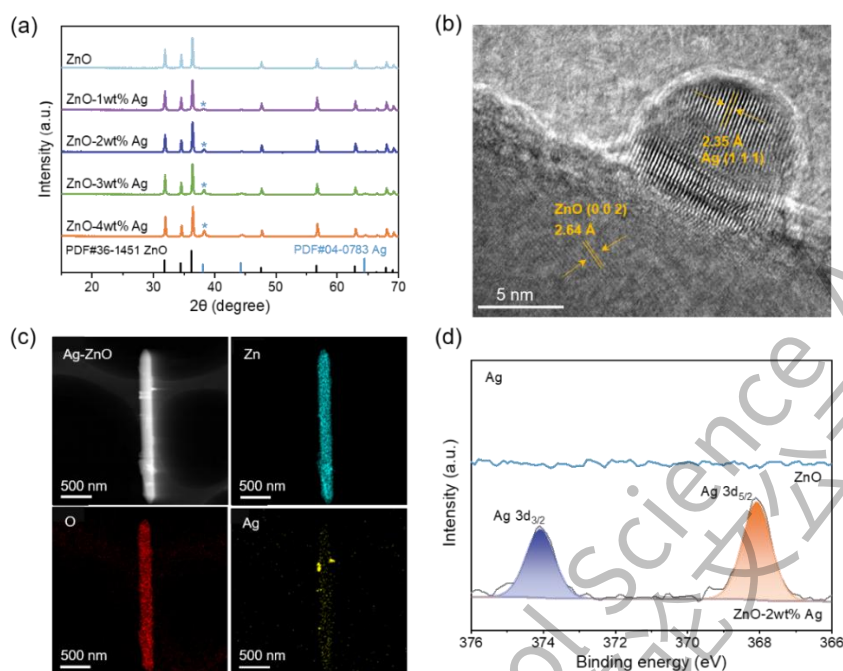


图 3.8 ZnO 和 Ag-ZnO 催化剂的 (a) XRD 图谱、(b) HRTEM 图、(c) EDS mapping 图和 (d) 高分辨 XPS 图谱。

3.3.2 电荷输运动力学调控机制

为探究材料的双功能压电催化特性，本工作在机械外场作用下对纯 ZnO 及 Ag-ZnO 纳米棒展开了活性评估。如图 3.9 所示，将催化剂悬浮液置于密封反应釜中，在超声振动前对反应气氛进行置换调节。在 80 kHz、120 W 的超声机械振动下，应变诱导的极化电荷激发界面氧化与还原反应，实现液相 H_2O_2 与气相 H_2 的同时生成。通过对产物生成速率的高精度定量分析，系统量化了不同复合构型催化剂的氧化与还原反应转化效能。

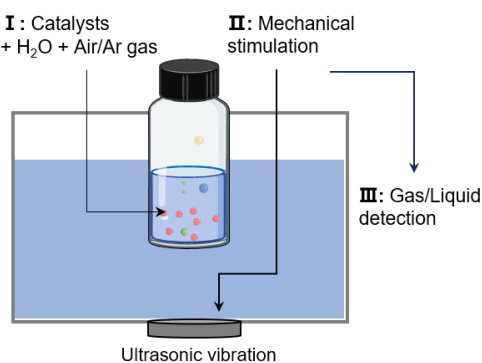


图 3.9 压电催化制备 H_2O_2 和 H_2 的实验流程示意图。

我们在 Ar 气氛下对 Ag 负载量进行了优化。如图 3.10 所示，所有催化剂的 H_2O_2 与 H_2 累积产量均随超声时间延长而持续增加，表明体系在机械外场下具有持续稳定的压电催化活性。纯相 ZnO 具备同步产 H_2O_2 与 H_2 的能力，产率分别为 614 与 $302 \mu\text{mol g}^{-1}$ 。引入 Ag 修饰后，体系的氧化与还原产率均得到提升，但活性对 Ag 负载量呈现出典型的“火山型”依赖趋势。具体而言， H_2O_2 生成速率由 ZnO-1 wt% Ag 的 $826 \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 提升至 ZnO-2 wt% Ag 的 $970 \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ；当进一步将 Ag 负载量增加至 3 wt% 和 4 wt% 时， H_2O_2 速率分别下滑至 $478 \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 和 $389 \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ （图 3.10a）。 H_2 生成速率也呈现相似规律，其中 ZnO-2 wt% Ag 达到了最高的产氢速率（ $568 \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ）（图 3.10b）。

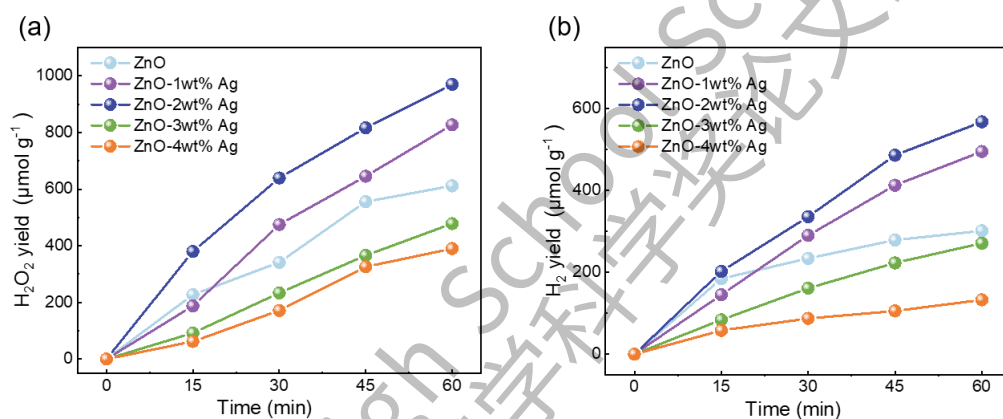


图 3.10 不同催化剂的 (a) H_2O_2 和 (b) H_2 生成速率。

图 3.11 所示的不同催化剂总反应生成速率对比进一步证实，适量修饰 Ag 纳米颗粒能有效强化 ZnO 的双功能压电催化活性。整体反应活性随 Ag 负载量呈现出典型的“火山型”依赖关系，适宜的 Ag 负载量对于平衡电荷有效利用与暴露反应界面至关重要。其中，ZnO-2 wt% Ag 展现出最优的催化活性，可能与引入金属 Ag 后导电性改善、机械电荷利用率提升有关。相反，过量的 Ag 负载可能会遮蔽表面反应位点或充当电荷复合中心，从而降低压电载流子的有效利用率。

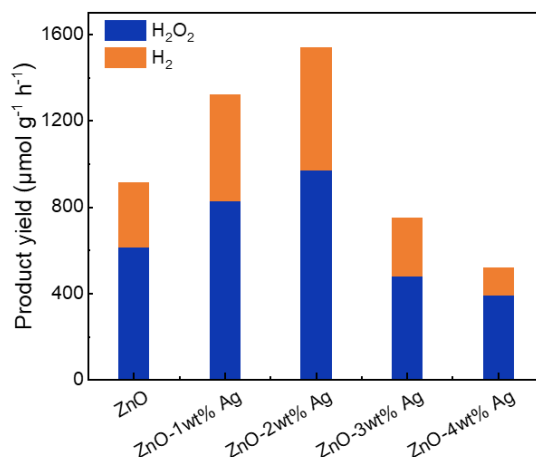


图 3.11 不同催化剂在 Ar 环境中的催化活性对比。

为探究 Ag 修饰对压电催化性能提升的内在机理，我们对纯 ZnO 与 ZnO-2 wt% Ag 的电荷转移行为进行了深入分析。首先通过压电电流响应评估了引入 Ag 对机械诱导电荷产生与运输的影响。如图 3.12a 所示，周期性超声振动激励下，纯 ZnO 和 ZnO-2 wt% Ag 均表现出高度可重现的“开/关”电流脉冲信号。值得注意的是，ZnO-2 wt% Ag 的压电电流响应幅度显著高于纯 ZnO，表明 Ag 修饰有效促进了载流子的分离与传输。与此一致，电化学阻抗谱（EIS）奈奎斯特图（图 3.12b）显示 ZnO-2 wt% Ag 的高频圆弧半径明显减小，证实界面电荷转移阻抗显著降低。这些结果印证了 Ag 修饰加速了界面电荷运输，为图 3.11 中所展示的高效压电性能提供了直接证据。

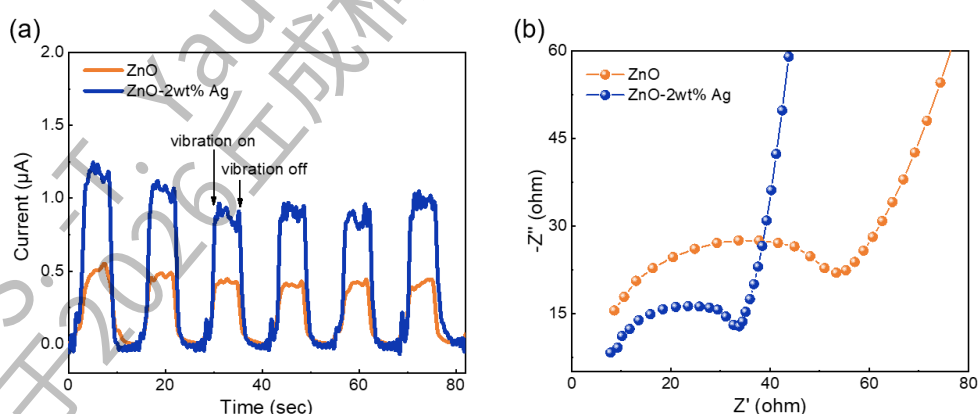


图 3.12 催化剂的（a）压电流响应和（b）阻抗谱图。

3.4 Ag-ZnO 催化反应界面反应动力学研究

在水相压电催化体系中，反应气氛是一种简便的外在操作参数。水既充当反应介质，又是潜在的反应物，而溶解的气体会影响反应物的可及性以及界面氧化还原反应之间的竞争。特别是含氧气氛会引入额外的消耗电子的还原途径，从而改变最终检测到的产物分布。此前已有关于压电催化产 H_2 、产 H_2O_2 以及同步联产 $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}_2$ 的相关报道。在超声辅助或压电催化条件下，气体环境也被报道会影响 H_2O_2 的生成。然而，在不改变催化剂结构的前提下，通过运行过程调节使固定体系的 $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}_2$ 产物分布发生改变，这一方向受到的关注仍相对较少。

基于上述筛选结果，我们选取具有最优催化活性的 $\text{ZnO-2 wt\% Ag}$ 催化剂作为理想模型催化体系，进一步探究了在相同机械激励条件下，反应气氛是否可作为外部参数调控产物选择性。

3.4.1 反应气氛定向调控催化产物

实验所采用的空气与高纯 Ar 气氛原位切换流程如图 3.13a 所示。打破了以往单纯依赖催化剂本征微结构调控的传统材料工程策略，该方法通过纯粹调变固-液-气三相界面的气相微环境，实现了对催化反应演变路径的动态外场调控。实验结果表明， $\text{ZnO-2 wt\% Ag}$ 体系呈现了明显受反应气氛控制的产物分布图 3.13b：在空气气氛下，体系表现为以 H_2O_2 合成为主导的“单一产物模式”， H_2O_2 产率达到 $1181 \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ，同时完全检测不到 H_2 的产生；相反，将反应气氛切换为 Ar 之后，同一催化剂转变为截然不同的双产物模式，可同时生成 H_2O_2 与 H_2 ，速率分别为 970 和 $568 \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。因此，仅通过改变反应环境气体，即可在不改变材料组成和反应条件的情况下使催化体系输出完全不同的产物。

为进一步证明该调控策略的动态性与可逆性，研究开展了交替进行的空气/Ar 气氛切换原位循环测试（图 3.13c）。当气氛由空气切换为 Ar 时，析氢反应立即被激活，同时 H_2O_2 继续保持稳定生成；当重新通入空气后，析氢受到抑制，体系迅速回归至纯 H_2O_2 生产模式。这种在不同产物状态间的可逆切换充分证实反应气氛可作为一种高效、无损的外在调控维度。

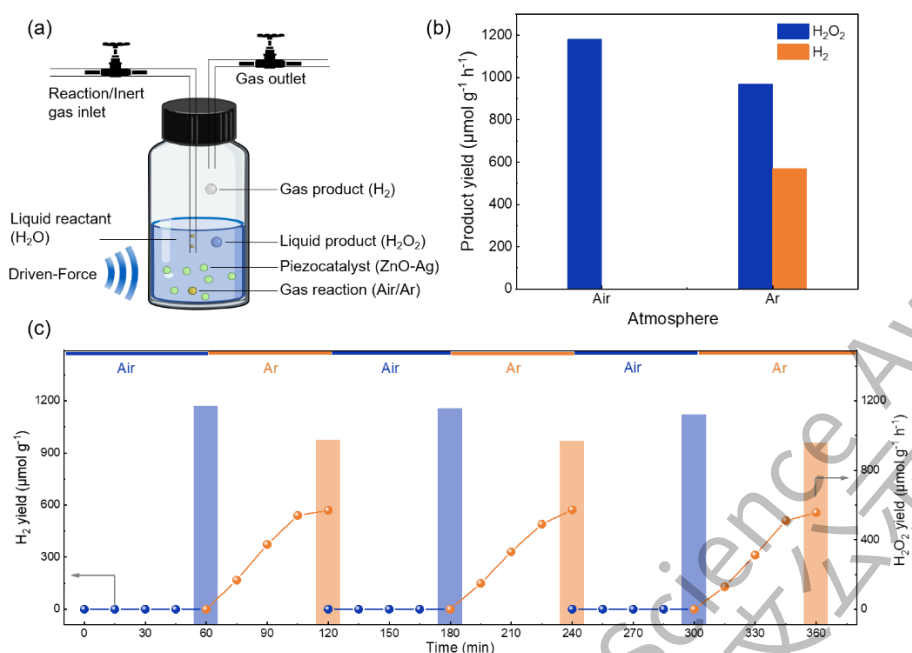


图 3.13 (a) 气氛切换实验示意图、(b) 不同气氛下压电催化产物生成速率和 (c) 空气/氩气交替实验。

上述产物的选择性分化与反应体系内的溶氧环境直接相关。在空气条件下，水体中充足的溶解氧优先捕获还原性电荷驱动二电子氧还原过程，推动了 H₂O₂ 的积累；而在 Ar 惰性环境中，由于消除了溶氧的竞争性捕获，原本受阻的质子还原途径被有效激活，同时产生了 H₂O₂ 与 H₂。此前在超声催化体系中亦有关于气体环境影响 H₂O₂ 生成的类似报道，凸显了溶解气体在机械驱动反应中的关键作用。

为了评估催化剂的稳定性，我们进行了循环测试。结果如图 3.14a 所示，ZnO-2 wt% Ag 在空气下连续进行 5 轮循环测试均保持了稳定的 H₂O₂ 产生速率。循环后的 XRD 分析显示材料在反应前后没有发生明显的晶型相变（图 3.15），证实了该催化剂在压电测试中的结构稳定性。为展示气氛调控产物输出的功能应用价值，进一步开展了 RhB 染料降解实验（图 3.14b）。在空气气氛下，ZnO-2 wt% Ag 表现出明显优于 Ar 环境的 RhB 降解速率。

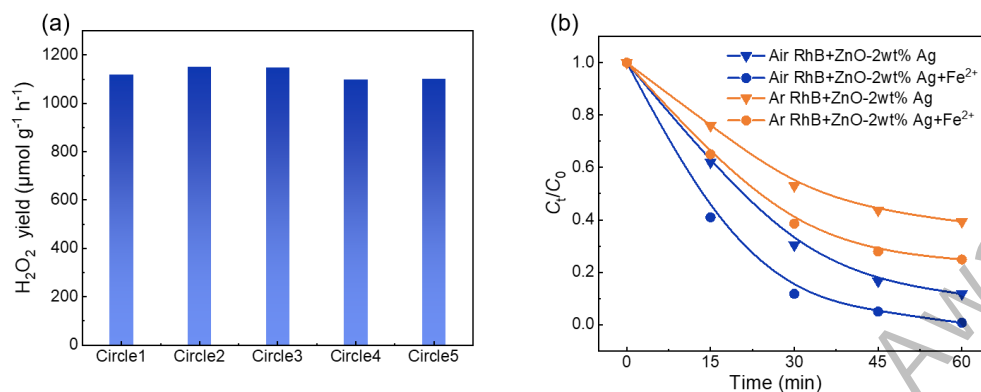


图 3.14 (a) 氩气气氛下催化剂的循环稳定性和 (b) 不同气氛下 RhB 的降解速率对比。

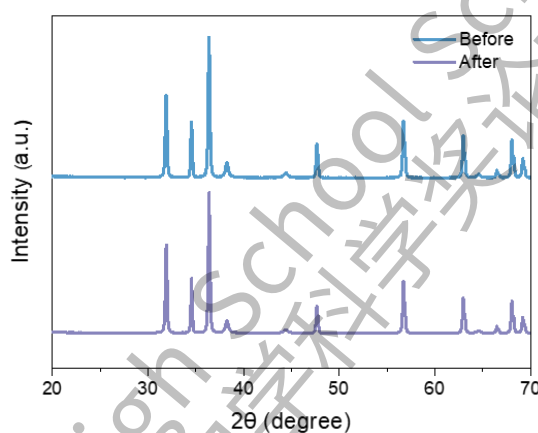


图 3.15 ZnO-2 wt% Ag 反应前后的 XRD 图谱

3.4.2 界面反应动力学机制

为深入解析机械激励下载流子的界面消耗路径，进行了活性物种测试（图 3.16a）。在超声振动下，ZnO-2 wt% Ag 的 DMPO- $\cdot\text{OH}$ 响应信号强于纯 ZnO，表明该测试条件下产生了更强的羟基自由基；但由于超声振动本身也能引发声化学自由基，该现象本身尚不足以证明空穴驱动氧化路径或判定 H_2O_2 的来源。此外，ZnO-2 wt% Ag 的 TEMPO-电子捕获信号有所减弱，进一步在侧面佐证了电子消耗速率的加快。

氮对比实验(图 3.16b)则直接揭示了产物分布调控的微观驱动力(图 3.16b)。在空气气氛下检测到了明显的超氧自由基信号，表明溶解氧在压电过程中参与了界面还原反应；而在 Ar 气氛下，超氧自由基信号显著削弱，表明低氧环境下氧

还原反应贡献减少。基于上述结果，提出了气氛依赖的反应机理模型：在空气微环境下，充足的溶解氧优先耗尽界面累积的压电电子并导向 H_2O_2 积累；而在惰性 Ar 环境中，低氧条件迫使还原性电荷转而参与质子还原，最终表现为 H_2O_2 与 H_2 的共同生成。该结论不仅厘清了产物选择性突变的物理化学诱因，亦为利用外场微环境定向调控多相多通道催化提供了清晰的操作范式。

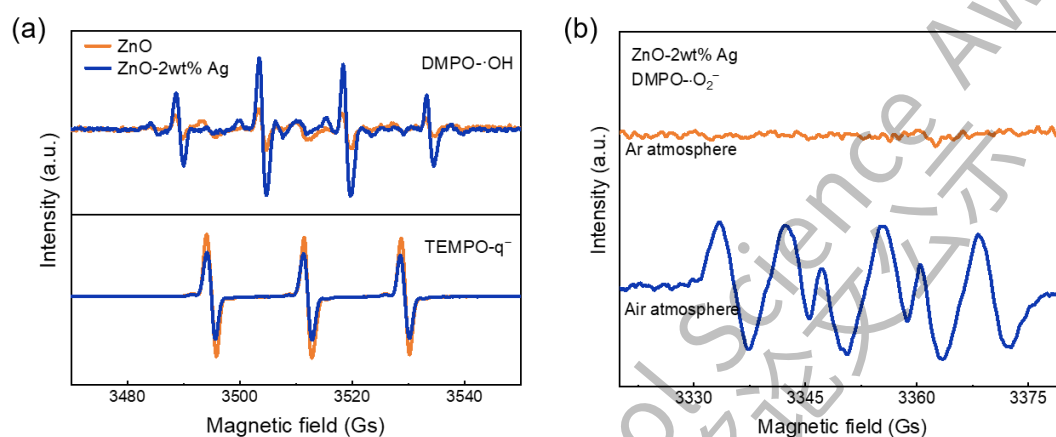


图 3.16 (a) 催化剂的 $\text{DMPO}\cdot\text{OH}$ 和 $\text{TEMPO}\cdot\text{q}^-$ 自由基信号图谱。(b) $\cdot\text{O}_2^-$ 自由基图谱。

4. 总结

本论文针对多相压电催化在测试精度、载流子复合、及产物选择性方面的核心挑战完成了系统研究。首先自主研发了集成动态补偿与柔性锚定技术的“气体快递员”在线自动进样系统，攻克了密闭产气实验中手动取样繁琐与误差大的技术痛点；在此基础上，构筑了二维 SnSe 双功能压电催化体系，成功实现了有机物降解耦合析氢的双电荷协同利用；进一步选用高稳定性 ZnO 纳米棒并构筑 Ag-ZnO 肖特基界面以加速界面电荷输运，首次通过空气与 Ar 的气相微环境切换，在固定催化体系上达成了产物 ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2$) 定向调控，为机械能驱动的环境修复与绿色能源转化开辟了新途径。

参考文献

- [1] L. Ruan, D. Sun, J. Ma, P. Luo, Y. Feng, X. Wang, H. Ran, L.-Y. Gan, G. Wang, J.-Y. Dai, X. Zhou, Spontaneous Symmetry Breaking via Metal-Triggered Surface Defect Engineering for Durable Piezocatalytic Hydrogen Evolution[J]. 2026, 38: e73832.
- [2] C. Chen, J. Ni, Y. Ao, Z.-Q. Liu, Suppressing Charge Screening via Z-Scheme With Polarization Field for In Situ H₂O₂ Generation and Utilization[J]. 2026, 38: e73242.
- [3] J. Ma, S. Jing, Y. Wang, X. Liu, L.-Y. Gan, C. Wang, J.-Y. Dai, X. Han, X. Zhou, Piezo-Electrocatalysis for CO₂ Reduction Driven by Vibration[J]. 2022, 12: 2200253.
- [4] C. Hu, J. Hu, Z. Zhu, Y. Lu, S. Chu, T. Ma, Y. Zhang, H. Huang, Orthogonal Charge Transfer by Precise Positioning of Silver Single Atoms and Clusters on Carbon Nitride for Efficient Piezocatalytic Pure Water Splitting[J]. 2022, 61: e202212397.
- [5] A. Karunakaran, H.-D.P. Nguyen, C.R. Bowen, F. Marken, B. Narayan, S. Dunn, Y. Zhang, M. Jia, Y. Zhao, N.-P. Nguyen, B.-N.T. Le, T.-P.T. Pham, Understanding the Effect of Saturated Gases on Catalytic Performance of Graphitic Carbon Nitride (g-C₃N₄) for H₂O₂ Generation and Dye Degradation in the Presence of Ultrasound[J]. 2024, 26: 2301958.
- [6] J. Ma, X. Xiong, D. Wu, Y. Wang, C. Ban, Y. Feng, J. Meng, X. Gao, J.-Y. Dai, G. Han, L.-Y. Gan, X. Zhou, Band Position-Independent Piezo-Electrocatalysis for Ultrahigh CO₂ Conversion[J]. 2023, 35: 2300027.
- [7] Y. Wu, P. Wang, H. Che, W. Liu, C. Tang, Y. Ao, Triggering Dual Two-electron Pathway for H₂O₂ Generation by Multiple [Bi-O]_n Interlayers in Ultrathin Bi₁₂O₁₇Cl₂ towards Efficient Piezo-self-Fenton Catalysis[J]. 2024, 136: e202316410.
- [8] W. Liu, S. Zhu, M. Ran, Z. Fu, M. Zhang, Y. Zhang, H. Wang, M. Xing, P. Fu, Hydroenergy Inspiring Large-Scale Piezoelectric Catalysis for Seawater Hydrogen Evolution[J]. 2025, 64: e202504749.
- [9] S. Tu, Y. Guo, Y. Zhang, C. Hu, T. Zhang, T. Ma, H. Huang, Piezocatalysis and

Piezo-Photocatalysis: Catalysts Classification and Modification Strategy, Reaction Mechanism, and Practical Application[J]. 2020, 30: 2005158.

[10] J. Ma, L. Xia, L. Ruan, J. Guan, L. Wang, X. Zhang, X. Gao, L.-Y. Gan, X. Zhou, Sacrificial agent effect in piezo-electrocatalytic hydrogen evolution[J]. Applied Physics Letters 2023, 122.

[11] L. Jian, G. Wang, X. Liu, H. Ma, Unveiling an S-scheme F-Co₃O₄@Bi₂WO₆ heterojunction for robust water purification[J]. eScience 2024, 4: 100206.

致 谢

作为一名高中生，我第一次走进重庆大学物理学院的实验室时，对一切都感到既新鲜又陌生。在参观实验室时发现传统催化产气测试需每隔 15 分钟手动取样一次，操作繁琐且易带来气密性误差；于是，我提出研制自动化采样工具的想法，在老师指导下完成了微控制器电路搭建、流路控制逻辑与程序编写，成功研制出“气体快递员”在线自动气体进样装置。在利用该装置协助实验室测试的过程中，我第一次观察到机械振动直接驱动半导体产氢的奇妙物理现象，深受启发，便开启了关于高效压电催化材料的构建及其电荷输运与界面反应动力学研究课题。

在实验过程中，我遇到了不少困难。比如在尝试负载 Ag 颗粒的实验时，我发现样品的结果总是重复不出来。为此，我和师兄师姐一起排查了可能的原因，从操作步骤到实验条件都逐一检查，最后才发现是 Ag 前驱体溶液已经过期，才导致了实验失败。虽然这些挫折让我一度感到沮丧，但也让我逐渐学会了如何冷静地分析问题，并尝试找到解决办法。

在研究的不同阶段，我们有着明确的分工和配合。最初在选题和理论学习阶段，我主动查阅了大量相关文献，在老师的讲解下逐渐理解了压电催化、电子输运和界面反应等核心概念。进入实验方案设计时，我提出了初步想法，老师则帮助我把这些设想转化为具体可行的实验方案，包括材料选择、表征手段和测量方法。在重庆大学物理学院实验室开展实验时，我亲自参与了 XRD 晶体结构测试、SEM 形貌表征、光电流响应测量和氢气检测等环节。最后，在数据处理和论文写作阶段，我主要负责原始数据的整理和初步分析。在此期间，我使用 Gemini（版本 1.5 Pro）辅助进行文献要点初梳、文字润色与语病排查，未利用 AI 生成实验原始数据、核心观点或替代学术论证。老师则在此基础上帮助我梳理科学逻辑，完善数据解读，并提升论文的整体结构与学术表达。

最后，我要特别感谢甘立勇教授实验室的师兄师姐，他们在 XRD、SEM、光电流等实验环节中给予了我耐心的操作指导和技术支持，使得实验得以顺利完成。所有帮助均为无偿，这让我深刻体会到科研团队的合作精神与学术共享的氛围。

这段科研经历让我体会到科学探索并不是一帆风顺的，而是充满了挑战与思

考。但正是这些挑战，让我在解决问题的过程中获得了成就感与自信。我学会了如何将兴趣转化为实践，也学会了如何从失败中寻找改进的方向。在未来的学习中，我希望能继续保持这份好奇心与探索精神，让自己在科学的道路上不断成长。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

附 录

A. 全自动在线气体采样装置控制系统软件 V1.0 源代码

```
#include <Adafruit_GFX.h>           //核心图形库
#include <Adafruit_TFTLCD.h>         //硬件专用库
#include <MCUFRIEND_kbv.h>
#include <TouchScreen.h>             //触摸库
#include <MsTimer2.h>
#include <Ds1302.h>
#include "CN_font.h"
#include <avr/pgmspace.h>
#define LCD_CS A3                    //片选引脚
#define LCD_CD A2                    //数据/命令引脚
#define LCD_WR A1                    //写数据引脚
#define LCD_RD A0                    //读数据引脚
#define LCD_RESET A4                //复位引脚
#define EMV_1_pin 49
#define EMV_2_pin 47
#define EMV_3_pin 45
#define EMV_4_pin 43
#define EMV_5_pin 41
#define EMV_6_pin 39
#define EMV_7_pin 37
#define EMV_8_pin 50
#define SIGNAL_1_pin 38
#define SIGNAL_2_pin 44
#define SIGNAL_3_pin 42
#define PUMP_pin 48

Ds1302 rtc(52,53,51);               //PIN_RST, PIN_CLK, PIN_DAT

MCUFRIEND_kbv tft;

#include "logo.h"
TouchScreen ts = TouchScreen(XP,YP,XM,YM,300); //声明触摸;

char key_font[10]={'0','1','2','3','4','5','6','7','8','9'};

uint16_t rtc_year_num = 0;           //年
uint8_t  rtc_month_num = 0;          //月
uint8_t  rtc_date_num = 0;           //日
uint8_t  rtc_hour_num = 0;           //时
```

```

uint8_t rtc_minu_num = 0;           //分
long now_interval_num = 0;         //键盘设置的间隔时间(分钟)
uint16_t now_times_num = 0;        //次数

```

```

/* 数据设置 */

```

```

uint8_t bit_num = 0;               //位数
uint8_t index_num = 0;             //要设置的哪个数

```

```

/* 键盘参数 */

```

```

uint16_t tbox_num = 0;
uint8_t sce_num = 0;
uint8_t key_0_num = 0;
uint8_t key_1_num = 0;
uint8_t key_2_num = 0;
uint8_t key_3_num = 0;
uint8_t key_4_num = 0;
uint8_t key_5_num = 0;
uint8_t key_6_num = 0;
uint8_t key_7_num = 0;
uint8_t key_8_num = 0;
uint8_t key_9_num = 0;
uint8_t key_clear_num = 0;
uint8_t key_enter_num = 0;

```

```

/* 主界面参数 */

```

```

uint8_t clear_out_num = 0;
uint8_t clear_in_num = 0;
uint8_t start_collect_num = 0;
uint8_t stop_run_num = 0;
uint8_t year_press_num = 0;
uint8_t month_press_num = 0;
uint8_t date_press_num = 0;
uint8_t hour_press_num = 0;
uint8_t minute_press_num = 0;
uint8_t interval_press_num = 0;
uint8_t times_press_num = 0;

```

```

/* 触摸按键触摸位置 */

```

```

uint16_t x_position = 0;
uint16_t y_position = 0;

```

```

bool scene_mark = true;
bool press_collect_mark = false;
bool press_enable_mark = true;

```

```

bool update_time_mark = false;

/* 运行结束后打印的信息 */
struct{
    bool end_meg_mark = false;
    uint8_t end_meg_num = 0;
    uint16_t sample_run_times = 0;
}end_message;

/* 清理外部管路数据 */
struct {
    long clean_out_num = 0;    //清理外部管路时间
}clean_out_task;

/* 清理内部管路数据 */
struct Task_in{
    uint16_t interval_1_num = 0;    //第 1 个延时时间
    uint16_t interval_2_num = 0;    //第 2 个延时时间
    uint16_t interval_3_num = 0;    //第 3 个延时时间
    uint16_t interval_4_num = 0;    //第 4 个延时时间
}clean_in_task;

/* 开始进样数据 */
struct Task_sample{
    uint16_t sample_inter_1_num = 0; //第 1 个延时时间
    uint16_t sample_inter_2_num = 0; //第 2 个延时时间
    uint16_t sample_inter_3_num = 0; //第 3 个延时时间
    uint16_t sample_inter_4_num = 0; //第 4 个延时时间
    uint16_t sample_inter_5_num = 0; //第 5 个延时时间
    long sample_idle_num = 0;    //间隔时间减去蓝色代码所用时间的空闲
时间
    long sample_interval_num = 0; //间隔时间
    uint16_t sample_times_num = 0;    //进样次数
    bool start_sample_mark = false;    //进样使能标志
}sample_num;

void setup(void)
{
    Serial.begin(9600);
    pinMode(36,OUTPUT);
    digitalWrite(36,HIGH);
    pinMode(EMV_1_pin,OUTPUT);
    pinMode(EMV_2_pin,OUTPUT);
    pinMode(EMV_3_pin,OUTPUT);

```

```

pinMode(EMV_4_pin,OUTPUT);
pinMode(EMV_5_pin,OUTPUT);
pinMode(EMV_6_pin,OUTPUT);
pinMode(EMV_7_pin,OUTPUT);
pinMode(EMV_8_pin,OUTPUT);
pinMode(SIGNAL_1_pin,OUTPUT);
pinMode(SIGNAL_2_pin,OUTPUT);
pinMode(SIGNAL_3_pin,OUTPUT);
pinMode(PUMP_pin,OUTPUT);
digitalWrite(EMV_1_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_2_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_3_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_4_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_5_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_6_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_7_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_8_pin,LOW);
digitalWrite(SIGNAL_1_pin,LOW);
digitalWrite(SIGNAL_2_pin,LOW);
digitalWrite(SIGNAL_3_pin,LOW);
digitalWrite(PUMP_pin,LOW);
rtc.init();
if(rtc.isHalted())
{
    Ds1302::DateTime dt;
    dt.year = 22;
    dt.month = 1;
    dt.day = 16;
    dt.dow = 7;
    dt.hour = 12;
    dt.minute = 0;
    dt.second = 0;
    rtc.setDateTime(&dt);
}
pinMode(XM,OUTPUT);
pinMode(YP,OUTPUT);
tft.reset();

uint16_t identifier = tft.readID();
Serial.print("id_chip:");
Serial.println(identifier);
tft.begin(identifier);
tft.setRotation(1);
start_scene();

```

```

delay(2000);
//tft.fillScreen(LIGHTGREY);

main_scene();
//key_borad();
MsTimer2::set(50,timer2_handler);
MsTimer2::start();
}

void loop(void)
{
  if(press_enable_mark == true)
  {
    TSPoint p = ts.getPoint();
    pinMode(XM,OUTPUT);
    pinMode(YP,OUTPUT);
    if((p.z > MINPRESSURE) && (p.z < MAXPRESSURE))
    {
      press_collect_mark = true;
      x_position = map(p.x,TS_MINX,TS_MAXX,tft.width(),0);
      y_position = (tft.height()-map(p.y,TS_MINY,TS_MAXY,tft.height(),0));
      /*Serial.print("x:");
      Serial.print(x_position);
      Serial.print("\t");
      Serial.print("y:");
      Serial.println(y_position);*/
    }
    else
    {
      press_collect_mark = false;
    }
  }
  /* 主界面 */
  if(scene_mark == true)
  {
    if(press_collect_mark == true)
    {
      if((122<x_position) && (x_position<260))
      {
        if((12<y_position) && (y_position<74))
        {
          if(clear_out_num == 0)
          {

```

```

clear_out_num = 7;
/* 清理外部管路事件 */
if(now_interval_num>0)
{
/* LCD 信息 */
Serial.println(F("清洗外部管路"));
digitalWrite(EMV_1_pin,LOW);
    digitalWrite(EMV_2_pin,LOW);
    digitalWrite(EMV_3_pin,LOW);
    digitalWrite(EMV_4_pin,LOW);
    digitalWrite(EMV_5_pin,LOW);
    digitalWrite(EMV_6_pin,LOW);
    digitalWrite(EMV_7_pin,LOW);
    digitalWrite(EMV_8_pin,LOW);
    digitalWrite(SIGNAL_1_pin,LOW);
    digitalWrite(SIGNAL_2_pin,LOW);
    digitalWrite(SIGNAL_3_pin,LOW);
    digitalWrite(PUMP_pin,LOW);
/* 清零其他运作参数 */
clean_out_task.clean_out_num = 0;
clean_in_task.interval_1_num = 0;
clean_in_task.interval_2_num = 0;
clean_in_task.interval_3_num = 0;
clean_in_task.interval_4_num = 0;
sample_num.start_sample_mark = false;
sample_num.sample_inter_1_num = 0;
sample_num.sample_inter_2_num = 0;
sample_num.sample_inter_3_num = 0;
sample_num.sample_inter_4_num = 0;
sample_num.sample_inter_5_num = 0;
sample_num.sample_idle_num = 0;
sample_num.sample_interval_num = 0;
sample_num.sample_times_num = 0;

tft.setTextColor(NAVY);
tft.setTextSize(2);
tft.fillRect(72,34,258,28,BACKGROUND); //LIGHTGREY
tft.setCursor(80,41);
tft.println(rtc_hour_num);
Show_Chinese("时",103,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
tft.setCursor(120,41);
tft.println(rtc_minu_num);
Show_Chinese("分",143,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
Show_Chinese("进行了",159,40,NAVY,WHITE,16,1,2);

```



```

sample_num.sample_interval_num = 0;
sample_num.sample_times_num = 0;

Serial.println(F("清洗内部管路"));
tft.setTextColor(NAVY);
tft.setTextSize(2);
tft.fillRect(72,34,258,28,BACKGROUND);
tft.setCursor(80,41);
tft.println(rtc_hour_num);
Show_Chinese("时",103,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
tft.setCursor(120,41);
tft.println(rtc_minu_num);
Show_Chinese("分",143,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
Show_Chinese("进行了",159,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
Show_Chinese("清洗内部管路",210,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
/* 清理内部管路 */
digitalWrite(EMV_3_pin,HIGH);
digitalWrite(EMV_1_pin,HIGH);
clean_in_task.interval_1_num = 20*5;
Serial.println("clear in start.");
Serial.println("run 1 stage.");
    }
}
else if((162<y_position) && (y_position<222))
{
if(start_collect_num == 0)
{
start_collect_num = 7;
Serial.println(F("开始进样"));
digitalWrite(EMV_1_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_2_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_3_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_4_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_5_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_6_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_7_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_8_pin,LOW);
digitalWrite(SIGNAL_1_pin,LOW);
digitalWrite(SIGNAL_2_pin,LOW);
digitalWrite(SIGNAL_3_pin,LOW);
digitalWrite(PUMP_pin,LOW);
/* 清零其他运作参数 */
clean_out_task.clean_out_num = 0;
clean_in_task.interval_1_num = 0;

```

```

clean_in_task.interval_2_num = 0;
clean_in_task.interval_3_num = 0;
clean_in_task.interval_4_num = 0;
sample_num.start_sample_mark = false;
sample_num.sample_inter_1_num = 0;
sample_num.sample_inter_2_num = 0;
sample_num.sample_inter_3_num = 0;
sample_num.sample_inter_4_num = 0;
sample_num.sample_inter_5_num = 0;
sample_num.sample_idle_num = 0;
sample_num.sample_interval_num = 0;
sample_num.sample_times_num = 0;
if(now_interval_num>2)
    sample_num.sample_interval_num = now_interval_num*20*60;
else
    sample_num.sample_interval_num = 0;
if(now_times_num>0)
    sample_num.sample_times_num = now_times_num;
if(now_times_num>1)
{
    digitalWrite(SIGNAL_2_pin,HIGH);
    digitalWrite(SIGNAL_3_pin,HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(SIGNAL_2_pin,LOW);
    digitalWrite(SIGNAL_3_pin,LOW);
}
if((sample_num.sample_interval_num>0)
(sample_num.sample_times_num>0))
{
    digitalWrite(EMV_3_pin,HIGH);
    digitalWrite(EMV_4_pin,HIGH);
    digitalWrite(PUMP_pin,HIGH);
    digitalWrite(EMV_6_pin,HIGH);
    digitalWrite(EMV_7_pin,HIGH);
    Serial.print("开始第");
    Serial.print(1);
    Serial.println("次进样");
    sample_num.sample_inter_1_num = 20*80;
    sample_num.start_sample_mark = true;
    end_message.end_meg_num = 3;
    end_message.sample_run_times = 1;
    end_message.end_meg_mark = true;
}

```

```

    }
    else
        sample_num.start_sample_mark = false;
    }
    }
}
else if((62<x_position) && (x_position<98))
{
    if((0<y_position) && (y_position<26))
    {
        if(year_press_num == 0)
        {
            year_press_num = 7;
            bit_num = 4;
            index_num = 1;
            scene_mark = false;
            key_borad();
            Serial.println(F("年份"));
        }
    }
    else if((40<y_position) && (y_position<54))
    {
        if(mouth_press_num == 0)
        {
            mouth_press_num = 7;
            bit_num = 2;
            index_num = 2;
            scene_mark = false;
            key_borad();
            Serial.println(F("月份"));
        }
    }
    else if((63<y_position) && (y_position<77))
    {
        if(date_press_num == 0)
        {
            date_press_num = 7;
            bit_num = 2;
            index_num = 3;
            scene_mark = false;
            key_borad();
            Serial.println(F("日期"));
        }
    }
}
}

```

```

}
else if((8<x_position) && (x_position<54))
{
    if((6<y_position) && (y_position<28))
    {
        if(hour_press_num == 0)
        {
            hour_press_num = 7;
            bit_num = 2;
            index_num = 4;
            scene_mark = false;
            key_borad();
            Serial.println(F("小时"));
        }
    }
    else if((44<y_position) && (y_position<66))
    {
        if(minute_press_num == 0)
        {
            minute_press_num = 7;
            bit_num = 2;
            index_num = 5;
            scene_mark = false;
            key_borad();
            Serial.println(F("分钟"));
        }
    }
}
if((7<x_position) && (x_position<98))
{
    if((88<y_position) && (y_position<150))
    {
        if(stop_run_num == 0)
        {
            stop_run_num = 7;
            tft.setTextColor(NAVY);
            tft.setTextSize(2);
            tft.fillRect(72,34,258,28,BACKGROUND);
            tft.setCursor(80,41);
            tft.println(rtc_hour_num);
            Show_Chinese("时",103,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
            tft.setCursor(120,41);
            tft.println(rtc_minu_num);
            Show_Chinese("分",143,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
        }
    }
}

```

```
Show_Chinese("停止运行",159,40,NAVY,WHITE,16,1,1);
Serial.println(F("停止运行"));
```

```
digitalWrite(EMV_1_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_2_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_3_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_4_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_5_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_6_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_7_pin,LOW);
digitalWrite(EMV_8_pin,LOW);
digitalWrite(SIGNAL_1_pin,LOW);
digitalWrite(SIGNAL_2_pin,LOW);
digitalWrite(SIGNAL_3_pin,LOW);
digitalWrite(PUMP_pin,LOW);
/* 清零其他运作参数 */
clean_out_task.clean_out_num = 0;
clean_in_task.interval_1_num = 0;
clean_in_task.interval_2_num = 0;
clean_in_task.interval_3_num = 0;
clean_in_task.interval_4_num = 0;
sample_num.start_sample_mark = false;
sample_num.sample_inter_1_num = 0;
sample_num.sample_inter_2_num = 0;
sample_num.sample_inter_3_num = 0;
sample_num.sample_inter_4_num = 0;
sample_num.sample_inter_5_num = 0;
sample_num.sample_idle_num = 0;
sample_num.sample_interval_num = 0;
sample_num.sample_times_num = 0;
}
}
}
if((183<y_position) && (y_position<212))
{
if((51<x_position) && (x_position<90))
{
if(interval_press_num == 0)
{
interval_press_num = 7;
bit_num = 4;
index_num = 6;
scene_mark = false;
key_borad();
}
```



```

}
else if(end_message.end_meg_num == 3)
{
    tft.setTextColor(NAVY);
    tft.setTextSize(2);
    tft.fillRect(72,34,258,28,BACKGROUND);
    tft.setCursor(80,41);
    tft.println(rtc_hour_num);
    Show_Chinese("时",103,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
    tft.setCursor(120,41);
    tft.println(rtc_minu_num);
    Show_Chinese("分",143,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
    Show_Chinese("进行了第",159,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
    tft.setCursor(223,41);
    tft.println(end_message.sample_run_times);
    if(end_message.sample_run_times<10)
        Show_Chinese("次进样",233,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
    else if(end_message.sample_run_times<100)
        Show_Chinese("次进样",245,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
    else if(end_message.sample_run_times<1000)
        Show_Chinese("次进样",258,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
}
else if(end_message.end_meg_num == 4)
{
    tft.setTextColor(NAVY);
    tft.setTextSize(2);
    tft.fillRect(72,34,258,28,BACKGROUND);
    tft.setCursor(80,41);
    tft.println(rtc_hour_num);
    Show_Chinese("时",103,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
    tft.setCursor(120,41);
    tft.println(rtc_minu_num);
    Show_Chinese("分",143,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
    Show_Chinese("进样完毕",159,40,NAVY,WHITE,16,1,2);
}
end_message.end_meg_mark = false;
}
/* RTC 更新 */
if(update_time_mark == true)
{
    /* 时间块 */
    tft.fillRect(4,173,48,16,BACKGROUND);    //年
    tft.fillRect(70,173,24,16,BACKGROUND);    //月
    tft.fillRect(110,173,24,16,BACKGROUND);    //日

```

```

tft.fillRect(20,195,36,24,BACKGROUND);    //时
tft.fillRect(80,195,36,24,BACKGROUND);    //分

/* 时间数字显示 */
tft.setTextColor(BLACK);
tft.setTextSize(2);
tft.setCursor(5,174);
tft.println(rtc_year_num);    //
tft.setCursor(71,174);
tft.println(rtc_month_num);    //月
tft.setCursor(111,174);
tft.println(rtc_date_num);    //日
tft.setTextSize(3);
tft.setCursor(22,197);
tft.println(rtc_hour_num);    //时
tft.setCursor(82,197);
tft.println(rtc_minu_num);    //分

update_time_mark = false;
}
}
/* 键盘界面 */
else if(scene_mark == false)
{
    if(press_collect_mark == true)
    {
        if((228<x_position)&&(x_position<286))
        {
            if((26<y_position)&&(y_position<62))
            {
                if(key_0_num == 0)
                {
                    press_enable_mark = false;
                    if((bit_num>0) && (tbox_num<1000))
                    {
                        tbox_num = tbox_num*10 + 0;
                        if(tbox_num>0)
                            bit_num--;
                    }
                    key_0_num = 7;
                    Serial.println("press:0");
                    /* 文本框 */
                    digitalWrite(XM,HIGH);
                    digitalWrite(YP,HIGH);

```

```

tft.fillRect(150,20,100,40,GREENYELLOW);
tft.drawRect(150,20,100,40,NAVY);
tft.setCursor(155,26);
tft.setTextSize(4);
tft.setTextColor(MAGENTA);
tft.println(tbox_num);
press_enable_mark = true;
}
}
else if((76<y_position)&&(y_position<111))
{
    if(key_1_num == 0)
    {
        press_enable_mark = false;
        if((bit_num>0) && (tbox_num<1000))
        {
            tbox_num = tbox_num*10 + 1;
            bit_num--;
        }
        key_1_num = 7;
        Serial.println("press:1");
        /* 文本框 */
        digitalWrite(XM,HIGH);
        digitalWrite(YP,HIGH);
        tft.fillRect(150,20,100,40,GREENYELLOW);
        tft.drawRect(150,20,100,40,NAVY);
        tft.setCursor(155,26);
        tft.setTextSize(4);
        tft.setTextColor(MAGENTA);
        tft.println(tbox_num);
        press_enable_mark = true;
    }
}
else if((126<y_position)&&(y_position<161))
{
    if(key_2_num == 0)
    {
        press_enable_mark = false;
        if((bit_num>0) && (tbox_num<1000))
        {
            tbox_num = tbox_num*10 + 2;
            bit_num--;
        }
        key_2_num = 7;
    }
}

```

```

Serial.println("press:2");
/* 文本框 */
digitalWrite(XM,HIGH);
digitalWrite(YP,HIGH);
tft.fillRect(150,20,100,40,GREENYELLOW);
tft.drawRect(150,20,100,40,NAVY);
tft.setCursor(155,26);
tft.setTextSize(4);
tft.setTextColor(MAGENTA);
tft.println(tbox_num);
press_enable_mark = true;
}
}
else if((176<y_position)&&(y_position<210))
{
if(key_3_num == 0)
{
press_enable_mark = false;
if((bit_num>0) && (tbox_num<1000))
{
tbox_num = tbox_num*10 + 3;
bit_num--;
}
key_3_num = 7;
Serial.println("press:3");
/* 文本框 */
digitalWrite(XM,HIGH);
digitalWrite(YP,HIGH);
tft.fillRect(150,20,100,40,GREENYELLOW);
tft.drawRect(150,20,100,40,NAVY);
tft.setCursor(155,26);
tft.setTextSize(4);
tft.setTextColor(MAGENTA);
tft.println(tbox_num);
press_enable_mark = true;
}
}
}
else if((126<x_position)&&(x_position<185))
{
if((26<y_position)&&(y_position<62))
{
if(key_4_num == 0)
{

```

```

press_enable_mark = false;
if((bit_num>0) && (tbox_num<1000))
{
    tbox_num = tbox_num*10 + 4;
    bit_num--;
}
key_4_num = 7;
Serial.println("press:4");
/* 文本框 */
digitalWrite(XM,HIGH);
digitalWrite(YP,HIGH);
tft.fillRect(150,20,100,40,GREENYELLOW);
tft.drawRect(150,20,100,40,NAVY);
tft.setCursor(155,26);
tft.setTextSize(4);
tft.setTextColor(MAGENTA);
tft.println(tbox_num);
press_enable_mark = true;
}
}
else if((76<y_position)&&(y_position<111))
{
    if(key_5_num == 0)
    {
        press_enable_mark = false;
        if((bit_num>0) && (tbox_num<1000))
        {
            tbox_num = tbox_num*10 + 5;
            bit_num--;
        }
        key_5_num = 7;
        Serial.println("press:5");
        /* 文本框 */
        digitalWrite(XM,HIGH);
        digitalWrite(YP,HIGH);
        tft.fillRect(150,20,100,40,GREENYELLOW);
        tft.drawRect(150,20,100,40,NAVY);
        tft.setCursor(155,26);
        tft.setTextSize(4);
        tft.setTextColor(MAGENTA);
        tft.println(tbox_num);
        press_enable_mark = true;
    }
}
}

```

```

else if((126<y_position)&&(y_position<161))
{
    if(key_6_num == 0)
    {
        press_enable_mark = false;
        if((bit_num>0) && (tbox_num<1000))
        {
            tbox_num = tbox_num*10 + 6;
            bit_num--;
        }
        key_6_num = 7;
        Serial.println("press:6");
        /* 文本框 */
        digitalWrite(XM,HIGH);
        digitalWrite(YP,HIGH);
        tft.fillRect(150,20,100,40,GREENYELLOW);
        tft.drawRect(150,20,100,40,NAVY);
        tft.setCursor(155,26);
        tft.setTextSize(4);
        tft.setTextColor(MAGENTA);
        tft.println(tbox_num);
        press_enable_mark = true;
    }
}
else if((176<y_position)&&(y_position<210))
{
    if(key_7_num == 0)
    {
        press_enable_mark = false;
        if((bit_num>0) && (tbox_num<1000))
        {
            tbox_num = tbox_num*10 + 7;
            bit_num--;
        }
        key_7_num = 7;
        Serial.println("press:7");
        /* 文本框 */
        digitalWrite(XM,HIGH);
        digitalWrite(YP,HIGH);
        tft.fillRect(150,20,100,40,GREENYELLOW);
        tft.drawRect(150,20,100,40,NAVY);
        tft.setCursor(155,26);
        tft.setTextSize(4);
        tft.setTextColor(MAGENTA);
    }
}

```

```

        tft.println(tbox_num);
        press_enable_mark = true;
    }
}
}
else if((24<x_position)&&(x_position<87))
{
    if((26<y_position)&&(y_position<62))
    {
        if(key_8_num == 0)
        {
            press_enable_mark = false;
            if((bit_num>0) && (tbox_num<1000))
            {
                tbox_num = tbox_num*10 + 8;
                bit_num--;
            }
            key_8_num = 7;
            Serial.println("press:8");
            /* 文本框 */
            digitalWrite(XM,HIGH);
            digitalWrite(YP,HIGH);
            tft.fillRect(150,20,100,40,GREENYELLOW);
            tft.drawRect(150,20,100,40,NAVY);
            tft.setCursor(155,26);
            tft.setTextSize(4);
            tft.setTextColor(MAGENTA);
            tft.println(tbox_num);
            press_enable_mark = true;
        }
    }
    else if((76<y_position)&&(y_position<111))
    {
        if(key_9_num == 0)
        {
            press_enable_mark = false;
            if((bit_num>0) && (tbox_num<1000))
            {
                tbox_num = tbox_num*10 + 9;
                bit_num--;
            }
            key_9_num = 7;
            Serial.println("press:9");
            /* 文本框 */

```

```

digitalWrite(XM,HIGH);
digitalWrite(YP,HIGH);
tft.fillRect(150,20,100,40,GREENYELLOW);
tft.drawRect(150,20,100,40,NAVY);
tft.setCursor(155,26);
tft.setTextSize(4);
tft.setTextColor(MAGENTA);
tft.println(tbox_num);
press_enable_mark = true;
}
}
else if((126<y_position)&&(y_position<161))
{
if(key_clear_num == 0)
{
press_enable_mark = false;
if(tbox_num>0)
bit_num++;
tbox_num = tbox_num/10;
key_clear_num = 7;
Serial.println("press:clear");
/* 文本框 */
digitalWrite(XM,HIGH);
digitalWrite(YP,HIGH);
tft.fillRect(150,20,100,40,GREENYELLOW);
tft.drawRect(150,20,100,40,NAVY);
tft.setCursor(155,26);
tft.setTextSize(4);
tft.setTextColor(MAGENTA);
tft.println(tbox_num);
press_enable_mark = true;
}
}
else if((176<y_position)&&(y_position<210))
{
if(key_enter_num == 0)
{
key_enter_num = 7;
Serial.println("press:enter");
switch(index_num)
{
case 1:
if(tbox_num>999)
rtc_year_num = tbox_num; //年

```

```

{
    Ds1302::DateTime dt;
    dt.year = rtc_year_num%100;
    dt.month = rtc_minu_num;
    dt.day = rtc_date_num;
    dt.hour = rtc_hour_num;
    dt.minute = rtc_minu_num;
    dt.second = 0;
    rtc.setDateTime(&dt);
}
break;
case 2:
    if(tbox_num<13)
        rtc_month_num = tbox_num; //月
    {
        Ds1302::DateTime dt;
        dt.year = rtc_year_num%100;
        dt.month = rtc_month_num;
        dt.day = rtc_date_num;
        dt.hour = rtc_hour_num;
        dt.minute = rtc_minu_num;
        dt.second = 0;
        rtc.setDateTime(&dt);
    }
    break;
case 3:
    if(tbox_num<32)
        rtc_date_num = tbox_num; //日
    {
        Ds1302::DateTime dt;
        dt.year = rtc_year_num%100;
        dt.month = rtc_minu_num;
        dt.day = rtc_date_num;
        dt.hour = rtc_hour_num;
        dt.minute = rtc_minu_num;
        dt.second = 0;
        rtc.setDateTime(&dt);
    }
    break;
case 4:
    if(tbox_num<24)
        rtc_hour_num = tbox_num; //时
    {
        Ds1302::DateTime dt;

```



```

{
    /* 主界面 */
    if(clear_out_num>0) clear_out_num--;
    if(clear_in_num>0) clear_in_num--;
    if(start_collect_num>0) start_collect_num--;
    if(stop_run_num>0) stop_run_num--;
    if(year_press_num>0) year_press_num--;
    if(mouth_press_num>0) mouth_press_num--;
    if(date_press_num>0) date_press_num--;
    if(hour_press_num>0) hour_press_num--;
    if(minute_press_num>0) minute_press_num--;
    if(interval_press_num>0) interval_press_num--;
    if(times_press_num>0) times_press_num--;
    /* 键盘 */
    if(key_0_num>0) key_0_num--;
    if(key_1_num>0) key_1_num--;
    if(key_2_num>0) key_2_num--;
    if(key_3_num>0) key_3_num--;
    if(key_4_num>0) key_4_num--;
    if(key_5_num>0) key_5_num--;
    if(key_6_num>0) key_6_num--;
    if(key_7_num>0) key_7_num--;
    if(key_8_num>0) key_8_num--;
    if(key_9_num>0) key_9_num--;
    if(key_clear_num>0) key_clear_num--;
    if(key_enter_num>0) key_enter_num--;
    /* 清理外部管路 */
    if(clean_out_task.clean_out_num>0)
    {
        clean_out_task.clean_out_num--;
        if((clean_out_task.clean_out_num%20) == 0)
        {
            Serial.print("clear out time:");
            Serial.print(clean_out_task.clean_out_num/20);
            Serial.println("s.");
        }
        if(clean_out_task.clean_out_num == 20*30)
        {
            digitalWrite(EMV_5_pin,LOW);
            digitalWrite(EMV_7_pin,LOW);
            Serial.println("充气关闭");
        }
        if(clean_out_task.clean_out_num == 0)
        {

```

```

        end_message.end_meg_mark = true;
        end_message.end_meg_num = 1;
        Serial.println("clear out over.");
//        digitalWrite(EMV_5_pin,LOW);
//        digitalWrite(EMV_7_pin,LOW);
        digitalWrite(EMV_3_pin,LOW);
        digitalWrite(EMV_2_pin,LOW);
        Serial.println("尾气排放关闭");
    }
}
/* 清理内部管路 */
if(clean_in_task.interval_1_num>0)
{
    clean_in_task.interval_1_num--;
    if(clean_in_task.interval_1_num==0)
    {
//        digitalWrite(EMV_3_pin,LOW);
        digitalWrite(EMV_2_pin,HIGH);
        clean_in_task.interval_2_num=20*5;
        Serial.println("run 2 stage.");
    }
}
else if(clean_in_task.interval_2_num>0)
{
    clean_in_task.interval_2_num--;
    if(clean_in_task.interval_2_num == 0)
    {
        //digitalWrite(EMV_2_pin,LOW);//废气出口取消关闭，帮助泄压
        digitalWrite(EMV_4_pin,HIGH);
        digitalWrite(PUMP_pin,HIGH);
        digitalWrite(EMV_6_pin,HIGH);
        digitalWrite(EMV_7_pin,HIGH);
        digitalWrite(EMV_8_pin,HIGH);

        clean_in_task.interval_3_num = 20*10;
        Serial.println("run 3 stage.");
    }
}
else if(clean_in_task.interval_3_num>0)
{
    clean_in_task.interval_3_num--;
    if(clean_in_task.interval_3_num == 0)
    {
//        digitalWrite(EMV_1_pin,LOW);

```

```

        digitalWrite(EMV_4_pin,LOW);
        digitalWrite(EMV_2_pin,LOW);//废气出口关闭
        digitalWrite(PUMP_pin,LOW);
        digitalWrite(EMV_6_pin,LOW);
        digitalWrite(EMV_5_pin,HIGH);
        clean_in_task.interval_4_num = 20*10;
        Serial.println("run 4 stage.");
    }
}
else if(clean_in_task.interval_4_num>0)
{
    clean_in_task.interval_4_num--;
    if(clean_in_task.interval_4_num == 0)
    {
        digitalWrite(EMV_1_pin,LOW);
        digitalWrite(EMV_8_pin,LOW);
        digitalWrite(EMV_7_pin,LOW);
        digitalWrite(EMV_5_pin,LOW);
        digitalWrite(EMV_3_pin,LOW);//3 号在此关闭

        Serial.println("clear in over.");
        end_message.end_meg_mark = true;
        end_message.end_meg_num = 2;
    }
}
/* 开始进样 */
if(sample_num.start_sample_mark == true)
{
    if(sample_num.sample_inter_1_num>0)
    {
        sample_num.sample_inter_1_num--;
        if(sample_num.sample_inter_1_num == 0)
        {
            digitalWrite(EMV_3_pin,LOW);
            digitalWrite(EMV_4_pin,LOW);
            digitalWrite(PUMP_pin,LOW);
            digitalWrite(EMV_6_pin,LOW);
            digitalWrite(EMV_7_pin,LOW);

            sample_num.sample_inter_2_num = 20*1; //持续时间 1s
        }
    }
    else if(sample_num.sample_inter_2_num>0)

```

```

{
    sample_num.sample_inter_2_num--;
    if(sample_num.sample_inter_2_num == 0)
    {
        digitalWrite(EMV_8_pin,HIGH);
        digitalWrite(EMV_5_pin,HIGH);
        sample_num.sample_inter_3_num = 2;
    }
}
else if(sample_num.sample_inter_3_num>0)
{
    sample_num.sample_inter_3_num--;
    if(sample_num.sample_inter_3_num == 0)
    {
        digitalWrite(EMV_8_pin,LOW);
        digitalWrite(EMV_5_pin,LOW);
        delay(100);
        digitalWrite(SIGNAL_1_pin,HIGH);
        delay(4000);
        for(uint8_t i=0;i<5;i++);
        digitalWrite(SIGNAL_1_pin,LOW);
        sample_num.sample_inter_4_num = 20*5;
    }
}
else if(sample_num.sample_inter_4_num>0)
{
    sample_num.sample_inter_4_num--;
    if(sample_num.sample_inter_4_num == 0)
    {
        digitalWrite(EMV_8_pin,HIGH);
        digitalWrite(EMV_5_pin,HIGH);
        sample_num.sample_inter_5_num = 20*3;
        sample_num.sample_times_num--;//次数减 1
        Serial.print("第");
        Serial.print(end_message.sample_run_times);
        Serial.println("次进样结束");
        Serial.print("剩余进样次数: ");
        Serial.println(sample_num.sample_times_num);
    }
}
else if(sample_num.sample_inter_5_num>0)
{
    sample_num.sample_inter_5_num--;

```

```

if(sample_num.sample_inter_5_num == 0)
{
    if(sample_num.sample_times_num>0)
    {
        digitalWrite(EMV_8_pin,LOW);
        digitalWrite(EMV_5_pin,LOW);
        Serial.println("进样清洗管路结束");
        sample_num.sample_idle_num = sample_num.sample_interval_num-
1863;
    }
    else if(sample_num.sample_times_num == 0)
    {
        digitalWrite(EMV_8_pin,LOW);
        digitalWrite(EMV_5_pin,LOW);
        Serial.println("进样清洗管路结束");
// sample_num.sample_idle_num = 0;
        sample_num.start_sample_mark = false;
        end_message.end_meg_mark = true;
        end_message.end_meg_num = 4;
    }
}

if(sample_num.sample_idle_num>0)
{
    sample_num.sample_idle_num--;
    if(sample_num.sample_idle_num%20 == 0)
    {
        Serial.print("idle time:");
        Serial.print(sample_num.sample_idle_num/20);
        Serial.println("s.");
    }
    if(sample_num.sample_idle_num == 0)
    {
        //sample_num.sample_times_num--;
        if(sample_num.sample_times_num == 1) //0 改为了 1
        {
            digitalWrite(SIGNAL_2_pin,LOW);
            digitalWrite(SIGNAL_3_pin,LOW);
        }
        if(sample_num.sample_times_num == 0)
        {

```

```

        sample_num.start_sample_mark = false;
        end_message.end_meg_mark = true;
        end_message.end_meg_num = 4;
    }
    else if(sample_num.sample_times_num>0)
    {
/*      Serial.print("剩余进样次数: ");
        Serial.println(sample_num.sample_times_num);
*/
    }

```

```

        end_message.sample_run_times++;
        end_message.end_meg_mark = true;
        end_message.end_meg_num = 3;
        digitalWrite(EMV_3_pin,HIGH);
        digitalWrite(EMV_4_pin,HIGH);
        digitalWrite(PUMP_pin,HIGH);
        digitalWrite(EMV_6_pin,HIGH);
        digitalWrite(EMV_7_pin,HIGH);
        Serial.print("开始第");
        Serial.print(end_message.sample_run_times);
        Serial.println("次进样");
        sample_num.sample_inter_1_num = 20*80;
    }
}
}

```

```

/* 此过程会引起系统出错
 *   if(sample_num.sample_idle_num == 0)
    {

        if(sample_num.sample_times_num == 0)
        {
            digitalWrite(EMV_8_pin,LOW);
            digitalWrite(EMV_5_pin,LOW);
            Serial.println("进样清洗管路结束");
            sample_num.start_sample_mark = false;
            end_message.end_meg_mark = true;
            end_message.end_meg_num = 4;
        }
    }
*/
}

```

```

/* RTC */
Ds1302::DateTime now;
rtc.getDateTime(&now);
static uint8_t last_second = 0;
if(last_second != now.second)
{
    last_second = now.second;
    /*Serial.print(last_second);
    Serial.println("s.");*/
    if(now.year>70)
    {
        if(rtc_year_num != 1900+now.year)
        {
            rtc_year_num == 1900+now.year;
            update_time_mark = true;
        }
    }
    else if(now.year<70)
    {
        if(rtc_year_num != 2000+now.year)
        {
            rtc_year_num = 2000+now.year;
            update_time_mark = true;
        }
    }
    if(rtc_month_num != now.month)
    {
        rtc_month_num = now.month;
        update_time_mark = true;
    }
    if(rtc_date_num != now.day)
    {
        rtc_date_num = now.day;
        update_time_mark = true;
    }
    if(rtc_hour_num != now.hour)
    {
        rtc_hour_num = now.hour;
        update_time_mark = true;
    }
    if(rtc_minu_num != now.minute)
    {
        rtc_minu_num = now.minute;
        update_time_mark = true;
    }
}

```

```

    }
}

/* 启动界面 */
void start_scene(void)
{
    tft.fillScreen(BACKGROUND);

    tft.drawPixel(0,0,jialing_logo);

    Show_Chinese("正在启动中",120,90,BLACK,WHITE,32,1,1);
    //tft.drawRoundRect(120,50,30,30,5,GREEN);
    delay(150);
    tft.fillRoundRect(20,140,35,20,4,MYBLUE);
    delay(150);
    tft.fillRoundRect(55,140,35,20,4,MYBLUE);
    delay(150);
    tft.fillRoundRect(90,140,35,20,4,MYBLUE);
    delay(150);
    tft.fillRoundRect(125,140,35,20,4,MYBLUE);
    delay(150);
    tft.fillRoundRect(160,140,35,20,4,MYBLUE);
    delay(150);
    tft.fillRoundRect(195,140,35,20,4,MYBLUE);
    delay(150);
    tft.fillRoundRect(230,140,35,20,4,MYBLUE);
    delay(150);
    tft.fillRoundRect(265,140,35,20,4,MYBLUE);
    delay(150);
    tft.fillRoundRect(300,140,35,20,4,MYBLUE);
    delay(150);
    tft.fillRoundRect(335,140,35,20,4,MYBLUE);
}

/* 主界面 */
void main_scene(void)
{
    //tft.fillScreen(LIGHTGREY);
    tft.fillScreen(BACKGROUND);

    // tft.drawRGBBitmap(0,0,cqu,240,400);

```

```

tft.drawRect(71,33,260,30,RED);
/* 时间块 */
tft.fillRect(4,173,48,16,BACKGROUND);    //年，设置时间字体的背景
色
tft.fillRect(70,173,24,16,BACKGROUND);    //月
tft.fillRect(110,173,24,16,BACKGROUND);    //日
tft.fillRect(20,195,36,24,BACKGROUND);    //时
tft.fillRect(80,195,36,24,BACKGROUND);    //分
/* 采集块 */
tft.fillRect(304,175,48,17,SKYBLUE);
tft.fillRect(304,200,48,17,SKYBLUE);
Ds1302::DateTime now;
rtc.getDateTime(&now);
if(now.year>50)
{
    if(rtc_year_num != 1900+now.year)
        rtc_year_num = 1900+now.year;
}
else if(now.year<50)
{
    if(rtc_year_num != 2000+now.year)
        rtc_year_num = 2000+now.year;
}
if(rtc_month_num != now.month)
    rtc_month_num = now.month;
if(rtc_date_num != now.day)
    rtc_date_num = now.day;
if(rtc_hour_num != now.hour)
    rtc_hour_num = now.hour;
if(rtc_minu_num != now.minute)
    rtc_minu_num = now.minute;
/* 时间数字显示 */
tft.setTextColor(BLACK); //设置时间的字体颜色
tft.setTextSize(2);
tft.setCursor(5,174);
tft.println(rtc_year_num);    //
tft.setCursor(71,174);
tft.println(rtc_month_num);    //月
tft.setCursor(111,174);
tft.println(rtc_date_num);    //日
tft.setTextSize(3);
tft.setCursor(22,197);
tft.println(rtc_hour_num);    //时
tft.setCursor(82,197);

```

```

tft.println(rtc_minu_num);          //分

/* 采集数字 */
tft.setTextColor(NAVY);
tft.setTextSize(2);
tft.setCursor(305,177);
tft.println(now_interval_num);      //间隔
tft.setCursor(305,202);
tft.println(now_times_num);
/* 时间 */
Show_Chinese("年",53,173,BLACK,WHITE,16,1,1);
Show_Chinese("月",95,173,BLACK,WHITE,16,1,1);
Show_Chinese("日",134,173,BLACK,WHITE,16,1,1);
Show_Chinese("时",56,195,BLACK,WHITE,24,1,1);
Show_Chinese("分",116,195,BLACK,WHITE,24,1,1);
/* 采集 */
Show_Chinese("间隔:",265,175,BLACK,WHITE,16,1,1);
Show_Chinese("次数:",265,200,BLACK,WHITE,16,1,1);
Show_Chinese("分钟",362,175,BLACK,WHITE,16,1,1);

/* 文本框 */
//tft.fillRect(30,90,100,70,DARKGREY);
//tft.fillRoundRect(30,90,100,70,10,0xbdf7);
//tft.drawRect(30,90,100,70,NAVY);
Show_Chinese("清洗外",45,100,BLACK,WHITE,24,1,1);
Show_Chinese("部管路",45,125,BLACK,WHITE,24,1,1);
// tft.fillRect(150,90,100,70,MEDPURPLE);
// tft.drawRect(150,90,100,70,NAVY);
tft.fillRoundRect(150,90,100,70,10,0x8d5b);
Show_Chinese("清洗内",165,100,BLACK,WHITE,24,1,1);
Show_Chinese("部管路",165,125,BLACK,WHITE,24,1,1);
// tft.fillRect(270,90,100,70,DARKGREEN);
// tft.drawRect(270,90,100,70,NAVY);
tft.fillRoundRect(270,90,100,70,10,0x968a);
Show_Chinese("开始",272,112,BLACK,WHITE,24,1,1);
Show_Chinese("进",320,112,BLACK,WHITE,24,1,2);
Show_Chinese("样",344,112,BLACK,WHITE,24,1,1);
// tft.fillRect(150,170,100,50,LIGHTCORAL);
// tft.drawRect(150,170,100,50,NAVY);
tft.fillRoundRect(150,170,100,50,10,0xfaaa);
Show_Chinese("停止运行",152,181,BLACK,WHITE,24,1,1);
}

/* 键盘界面 */

```

```

void key_borad(void)
{
    //tft.fillScreen(LIGHTGREY);
    tft.fillScreen(WHITE);
    /* 画键盘 */
    for(uint8_t i=0;i<3;i++)
    {
        for(uint8_t j=0;j<4;j++)
        {

tft.fillRoundRect(key_x+(key_width+key_w_inter)*j,key_y+(key_h_inter+key_hight
)*i,
                key_width,key_hight,5,DARKGREEN);
        }
    }
    /* 按键字体 */
    tft.setTextColor(YELLOW);
    tft.setTextSize(3);
    uint8_t k = 0;
    for(uint8_t i=0;i<3;i++)
    {
        for(uint8_t j=0;j<4;j++)
        {

tft.setCursor(key_x+(key_width+key_w_inter)*j+23,key_y+6+(key_h_inter+key_hig
ht)*i);

                if(k<10)
                    tft.println(key_font[k]);
                k++;
            }
        }
        tft.setTextSize(2);
        tft.setTextColor(RED);

tft.setCursor(key_x+(key_width+key_w_inter)*2+1,key_y+8+(key_h_inter+key_high
t)*2);
        tft.println("clear");
        tft.setTextColor(BLUE);

tft.setCursor(key_x+(key_width+key_w_inter)*3+1,key_y+8+(key_h_inter+key_high
t)*2);
        tft.println("enter");
        /* 文本框 */
        tft.fillRect(150,20,100,40,GREENYELLOW);

```

```

tft.drawRect(150,20,100,40,NAVY);
tft.setCursor(155,26);
tft.setTextSize(4);
tft.setTextColor(MAGENTA);
tft.println(tbox_num);
}

```

```

void Show_Chinese(uint8_t *str,uint16_t x,uint16_t y,uint16_t fs,uint16_t
bc,uint16_t fsize,uint8_t mode,uint8_t font_group)
{
    uint16_t i,j,k,num=0,color,mult;
    uint8_t code_h=0,code_l=0;
    char rdata;
    boolean first = true;
    if(x>(tft.width()-fsize)||y>(tft.height()-fsize))
    {
        return;
    }
    switch(fsize)
    {
        case 16:
            if(font_group == 1)
                num=sizeof(font_1_16)/sizeof(Chinese_16_Font);
            else if(font_group == 2)
                num=sizeof(font_2_16)/sizeof(Chinese_16_Font);
            mult=2;
            break;
        case 24:
            if(font_group == 1)
                num=sizeof(font_1_24)/sizeof(Chinese_24_Font);
            else if(font_group == 2)
                num=sizeof(font_2_24)/sizeof(Chinese_24_Font);
            mult=3;
            break;
        case 32:
            if(font_group == 1)
                num=sizeof(font_1_32)/sizeof(Chinese_32_Font);
            else if(font_group == 2)
                num=sizeof(font_2_32)/sizeof(Chinese_32_Font);
            mult=4;
            break;
        default:
            break;
    }
}

```

```

}
while(*str!='\0')
{
    for(k=0;k<num;k++)
    {
        if(fsize==16)
        {
            if(font_group == 1)
            {
                code_h=pgm_read_byte(&font_1_16[k].GBCode[0]);
                code_l=pgm_read_byte(&font_1_16[k].GBCode[1]);
            }
            else if(font_group == 2)
            {
                code_h=pgm_read_byte(&font_2_16[k].GBCode[0]);
                code_l=pgm_read_byte(&font_2_16[k].GBCode[1]);
            }
        }
        else if(fsize==24)
        {
            if(font_group == 1)
            {
                code_h=pgm_read_byte(&font_1_24[k].GBCode[0]);
                code_l=pgm_read_byte(&font_1_24[k].GBCode[1]);
            }
            else if(font_group == 2)
            {
                code_h=pgm_read_byte(&font_2_24[k].GBCode[0]);
                code_l=pgm_read_byte(&font_2_24[k].GBCode[1]);
            }
        }
        else if(fsize==32)
        {
            if(font_group == 1)
            {
                code_h=pgm_read_byte(&font_1_32[k].GBCode[0]);
                code_l=pgm_read_byte(&font_1_32[k].GBCode[1]);
            }
            else if(font_group == 2)
            {
                code_h=pgm_read_byte(&font_2_32[k].GBCode[0]);
                code_l=pgm_read_byte(&font_2_32[k].GBCode[1]);
            }
        }
    }
}

```

```

if((code_h==*str) && (code_l==(str+1)))
{
    first = true;
    tft.setAddrWindow(x, y, x+fsize-1, y+fsize-1);
    for(j=0;j<fsize*mult;j++)
    {
        for(i = 0;i<8;i++)
        {
            if(fsize==16)
            {
                if(font_group == 1)
                    rdata=pgm_read_byte(&font_1_16[k].Mdata[j]);
                else if(font_group == 2)
                    rdata=pgm_read_byte(&font_2_16[k].Mdata[j]);
            }
            else if(fsize==24)
            {
                if(font_group == 1)
                    rdata=pgm_read_byte(&font_1_24[k].Mdata[j]);
                else if(font_group == 2)
                    rdata=pgm_read_byte(&font_2_24[k].Mdata[j]);
            }
            else if(fsize==32)
            {
                if(font_group == 1)
                    rdata=pgm_read_byte(&font_1_32[k].Mdata[j]);
                else if(font_group == 2)
                    rdata=pgm_read_byte(&font_2_32[k].Mdata[j]);
            }
            if(mode) //叠加模式
            {
                if(rdata&(0x80>>i))
                {
                    tft.drawPixel(x+((j*8+i)%fsize),y+((j*8+i)/fsize),fc);
                }
            }
            else //非叠加模式
            {
                if(rdata&(0x80>>i))
                {
                    color = fc;
                }
            }
            else

```

```

        {
            color = bc;
        }
        tft.pushColors(&color, 1, first);
        first = false;
    }
}
}
}
}
str+=3;
x+=fsize;
}
}
}

```

B. 全自动在线气体采样装置控制系统软件使用说明

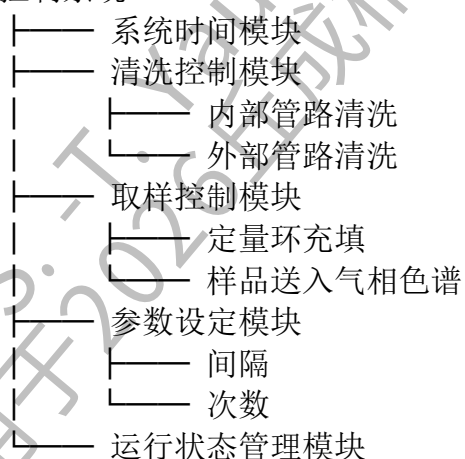
第一章 软件概述

本软件为《全自动在线气体采样装置控制系统软件》V1.0，用于控制一种适用于多种催化的在线气体取样系统，实现气路自动清洗、反应器冲洗、定量取样和气相色谱联动。

本软件部署于嵌入式控制器上，通过触控显示屏提供人机交互界面，并对主控电磁阀、循环泵和定量环进行精确时序控制。

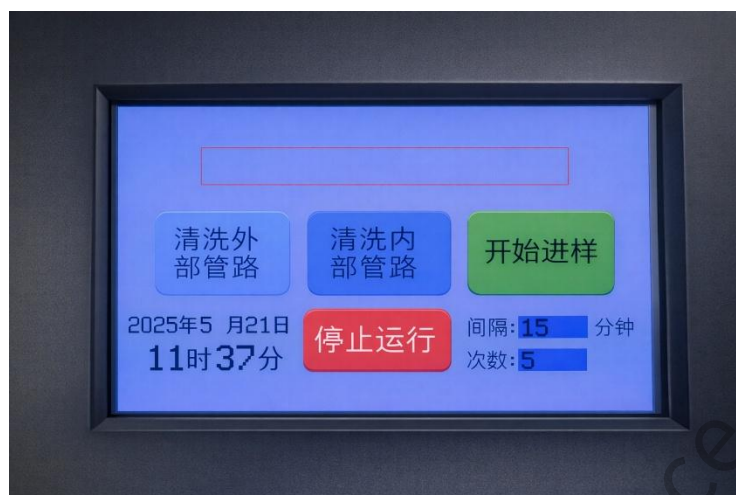
第二章 系统功能结构

控制系统



第三章 软件主界面说明

软件主界面用于操作全自动气体采样流程，包括清洗外部管路、清洗内部管路、开始进样、停止运行、采样间隔、采样次数及系统时间显示。



第四章 主要操作流程

4.1 清洗内部管路

功能目的：用于在取样前对系统内部气路与定量环进行载气冲洗，去除残留气体与水汽，降低交叉污染风险，确保后续取样的代表性与可重复性。

操作步骤

1. 在主界面点击【清洗内部管路】。
2. 系统进入“内部清洗”运行状态，界面显示当前状态提示；清洗结束后自动返回待机状态。

控制逻辑（软件自动执行）内部清洗采用分阶段时序控制，软件按预设时序依次执行以下过程（全过程无需人工干预）：

- **阶段 A：主干气路冲洗**
 - 打开内部清洗所需的气路通断阀，建立“载气 → 内部主管路 → 排放/回收”的通路；
 - 关闭与反应容器相连的外部取样通路，避免载气进入反应器；
 - 维持设定时间后进入下一阶段。
- **阶段 B：循环回路与定量环预冲洗**
 - 启动循环泵，打开循环回路相关阀门，使载气在内部回路中循环流动；
 - 使气体通过定量环/关键腔体，实现对易残留区域的增强冲洗；
 - 维持设定时间后进入下一阶段。
- **阶段 C：补充冲洗与复位**
 - 切换阀门组合，对剩余支路（如旁路、支管）进行补充冲洗；
 - 关闭循环泵，关闭内部清洗相关阀门，系统复位至安全待机状态。

结束条件

当所有阶段完成并复位后，系统提示“内部清洗完成”，设备进入待机状态。

4.2 清洗外部管路

功能目的：用于对连接反应容器的外部管路进行载气冲洗，排除反应器接口与外部气路残留空气/杂质，减少首次取样偏差。

操作步骤

1. 确认外部取样针/接口已连接反应容器。
2. 在主界面点击【清洗外部管路】。
3. 系统自动执行外部冲洗，完成后提示并返回待机。

控制逻辑（软件自动执行）

- 软件打开外部清洗所需的阀门组合，使载气进入外部管路并通向反应容器接口；
- 关闭与气相色谱送样相关的通路，避免清洗气体进入检测端；
- 如系统设计包含排放路径，软件同时建立排放/回收通路以形成稳定冲洗流；
- 达到设定清洗时长后，软件关闭相关阀门并复位。

结束条件

外部冲洗完成后提示“外部管路清洗完成”，系统回到待机状态。

4.3 开始进样

功能目的：按用户设定的“间隔（分钟）”与“次数”，自动完成多次定量取样，并将样品送入气相色谱/分析端，实现无人值守的在线取样测试。

操作步骤

1. 在主界面设置：
 - **【间隔】：**两次取样之间的时间间隔；
 - **【次数】：**本次自动取样的总次数。
2. 点击【开始进样】进入自动运行。
3. 运行过程中可随时点击【停止运行】终止。

控制逻辑（软件自动执行）

软件以“循环任务”的方式执行取样流程，直至完成设定次数或被人工停止：

- **步骤 1：取样前充填/更新**
 - 软件打开取样回路阀门并启动循环泵（如系统包含循环泵），使反应容器气体在取样回路中循环；
 - 定量环被反应气体充分置换/充填，保证取样体积一致且气体新鲜；
 - 充填达到设定时间后进入送样步骤。
- **步骤 2：定量送样**
 - 软件切换阀门状态，将定量环中的气体由载气推动送入气相色谱/分析端；
 - 同步触发外部接口信号，用于通知分析端开始记录数据。
 - 送样完成后进入清洗/等待步骤。
- **步骤 3：送样后清洗与等待**
 - 软件对定量环及关键通道进行短时载气冲洗，减少残留；
 - 计时等待至下一个“间隔”时间点，开始下一次取样循环。

结束条件

- 完成设定“次数”后，系统自动停止并复位到待机状态；
- 若用户点击【停止运行】，系统立即进入停止流程（见 4.4）。

4.4 停止运行

功能目的：在任何运行状态下终止当前流程，确保阀门与循环泵处于安全状

态，避免误送样或持续通气。

操作步骤

运行过程中点击【停止运行】。

控制逻辑（软件自动执行）

- 立即关闭循环泵（如有）；
- 关闭与送样/清洗相关的阀门组合，切断关键通路；
- 系统复位至待机状态并提示“已停止运行”。