

# 合肥同步辐射装置 2019 年年报

## 一、综述及基本情况

### 设施概述

国家同步辐射实验室坐落在安徽合肥中国科学技术大学西校区，是我国批准建设的第一个国家实验室。实验室建有我国第一台以真空紫外和软 X 射线为主的专用同步辐射光源（简称“合肥光源”、“NSRL”）。

合肥光源的建设历经 HLS-I 和 HLS-II 两个阶段。HLS-I 包括一期工程（1983 年立项，1991 年通过国家验收，总投资 8040 万元）和二期工程建设项目（1999 年开工建设，2004 年通过国家验收，总投资 11800 万元）。在此期间，合肥光源坚持稳定运行、优质开放的原则，为我国材料科学、物理学、化学、能源环境科学等领域提供了一个优良的实验平台，取得了一系列研究成果。

HLS-II 的建设自 2010 年 8 月立项，2012 年 5 月开工，2014 年底完成新建直线加速器、储存环及 5 条光束线站的首批任务。2016 年 1 月投入正式运行，同时边运行、边建设，逐步完善通用辅助设施的基础设施改造，实施恒流运行等改造，不断提升光束线站性能。目前 HLS-II 已建设完成，达到三代光源运行水平。

合肥光源目前拥有 10 条光束线及实验站，包括 5 条插入元件线站，分别为燃烧、软 X 射线成像、催化与表面科学、角分辨光电子能谱和原子与分子物理光束线和实验站；以及 5 条弯铁线站，分别为红外谱学和显微成像、质谱、计量、光电子能谱、软 X 射线磁性圆二色光束线和实验站。此外还有 3 个出光口为未来发展预留空间。

作为国家大科学装置和合肥大科学中心的重要组成部分，NSRL 将继续面向世界科技前沿、经济主战场和国家重大需求，为各领域科学家提供长期、可靠、稳定的技术支撑。

### 总体目标与学术方向

NSRL 致力于提升机器性能，发展新的实验技术和方法，积极引进和培养国内外高水平用户，围绕前沿科学领域和国家重大需求，为国内外众多学科领域提供独特的大型综合交叉研究平台。

在科学实验方面，NSRL 围绕合肥大科学中心的能源与环境、量子功能材料、物质与生命科学交叉等领域科学目标，重点发展能量转换材料、化石燃料的清洁燃烧、大气环境、关联电子材料、多尺度生物成像等前沿学科领域的前沿课题研究。同时，还围绕电子加速器前沿科学和用户需求，开展先进光源物理和关键技术研究。

在保证稳定运行、优质开放的基础上，NSRL 最终目标是建成具有世界一流水平的红外-真空紫外-软 X 射线波段的光源，成为合肥大科学中心的重要组成部分、国家交叉科学研究中心和人才培养基地，为用户提供世界先进的实验平台，推动我国同步辐射应用研究取得创新成果。

## 组织框架

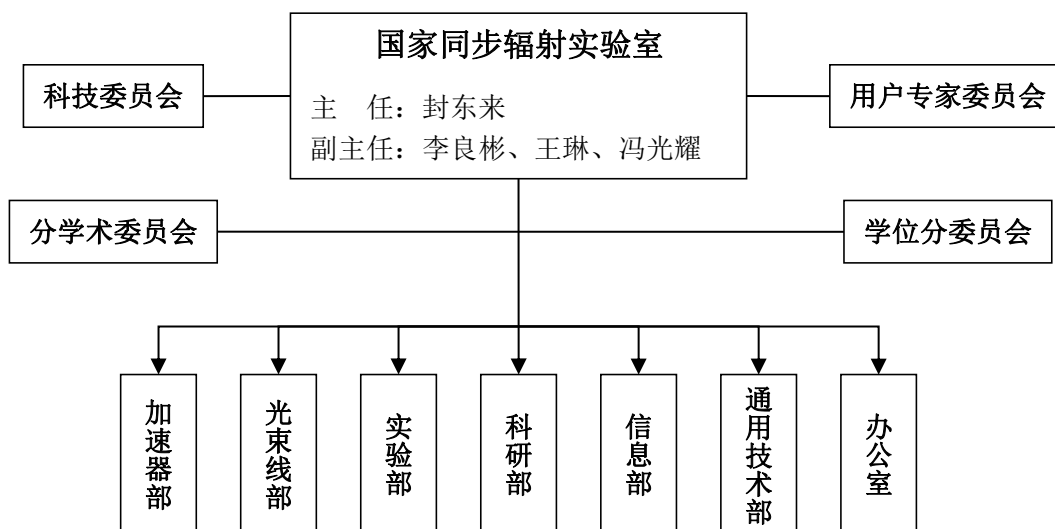


图 1. 国家同步辐射实验室组织结构框图

## 承担重大项目

为全力推进第四代衍射极限低能区同步辐射先进光源（合肥先进光源）的国家立项，在中国科学院、安徽省、合肥市的支持下，实验室正在开展合肥先进光源预研工程项目，对加速器、光束线站的核心关键技术进行攻关及样机研制。目前预研工程进展顺利，合肥先进光源物理设计方案优化，科学目标凝练，得到了国内外专家的广泛认可。

## 二、研究进展与成果

国家同步辐射实验室瞄准国际前沿和国家需求，凝练科学目标和研究领域，联合高水平用户，在能源催化、材料、光学、生物等基础研究和应用研究方面取得了一系列重要成果。

基于在 NSRL 线站的实验，2019 年用户发表论文 336 篇，其中 1 区 261 篇。发表在 Nature, Nature Energy, Nature Catalysis, Physical Review Letters, PNAS, Advanced Materials, Journal of the American Chemical Society, Angew. Chem. Int. Ed.等国际著名期刊上。获得省部级以上奖励 1 项，获得发明专利授权 22 项，实用新型授权 13 项。

SCI 收录 论文数	论文 引用数	国外发表 论文数	用户相关 论文数	获省部级 以上奖数	发明专利 授权	实用新型 专利授权	软件 著作权
324	-	332	336	1	22	13	1

### 1. 高曲率碳负载铂单原子高效催化析氢

中国科学技术大学国家同步辐射实验室宋礼教授与江俊教授等课题组合作，通过精准合成结合理性设计，实现了高曲率碳纳米洋葱负载 Pt 单原子催化剂。利用同步辐射软/硬 X 射线吸收谱（XANES 和 EXAFS）和光电子能谱（XPS）表征，结合第一性原理计算，发现 Pt 位点会构成尖端并产生局域电场效应，诱

导质子聚集在 Pt 位点周围，促进了质子耦合的电子转移 (PECT)过程，最终呈现了优异的 HER 性能[Nature Energy 4(6):512-518(2019)]。

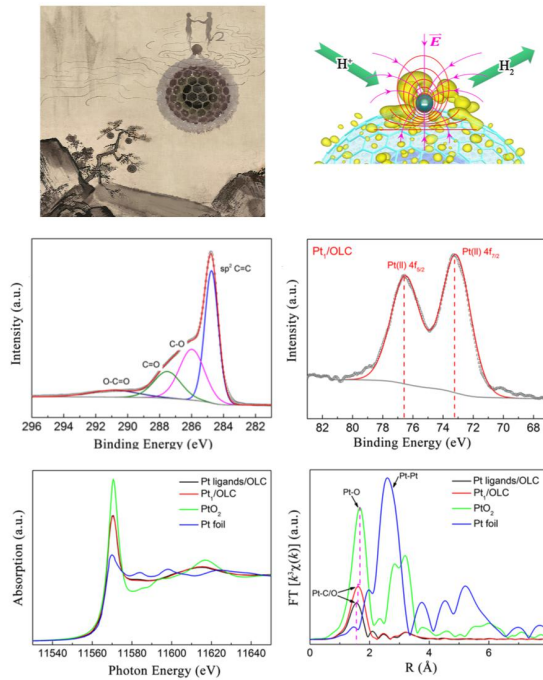


图 2. 高曲率碳纳米洋葱负载 Pt 单原子催化剂的同步辐射软/硬 X 射线谱学解析

## 2. 高温高压反应研究发现氮气可提高金属钌催化剂的反应活性

英国牛津大学的 Dermot O'Hare 教授、Shik Chi Edman Tsang 教授与清华大学的李隽教授团队合作，意外发现实验室常用的惰性保护气 N<sub>2</sub> 可作为催化反应的促进剂加速反应进行。在 TiO<sub>2</sub> 负载的金属钌 (Ru) 催化剂 (Ru/TiO<sub>2</sub>) 的作用下，N<sub>2</sub> 可显著降低对甲基苯酚氢化脱氧 (HDO) 的活化能，提高催化反应活性。利用高温高压反应装置开展了 XPS 和原位 XANES 测试，研究了反应过程中钌电子态的变化以及 N<sub>2</sub> 吸附后生成的活性物种。研究发现，N<sub>2</sub> 在反应过程中可能转化为活性氢化氮 N<sub>2</sub>H<sub>y</sub> 物种，新物种的形成并没有改变催化剂中钌表面的电子结构，而是通过在反应过程中提供质子氢，帮助甲酚上的羟基氧化从而促进 HDO [Nature Catalysis 2(12):1078-1087(2019)]。

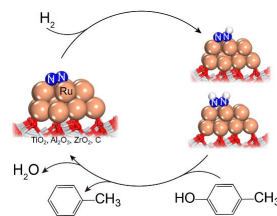


图 3. 氮气分子在温和条件下在负载的钌团簇表面加氢形成氮-氢物种 (NNH 和 NNH<sub>x</sub>), 它们作为助催化剂加速生物质的加氢脱氧反应

## 3. 单原子催化剂中原子的化学状态和配位环境研究

吴宇恩教授 (USTC) 团队和李亚栋院士 (清华大学) 团队联合利用表面缺

陷工程技术捕获和稳定单原子的方法成功制备了高性能的 Ru 单原子合金催化剂，利用催化与表面科学实验线站的 HR-SRPES 和 XPS 技术获得了催化剂的电子结构信息，为如何解决 Ru 基催化剂在酸性氧化性条件下不稳定这一国际性难题提供了新的思路[Nature Catalysis 2(4):304-313(2019)]。该团队还制备了在酸性介质和碱性溶液中均具有良好 ORR 活性的 Fe 单原子催化剂，该催化剂作为空气阴极在 PEMFCs 和 Zn-air 中获得了良好的性能，利用线站的 NEXAFS 技术结合扩展 X 射线吸收精细结构的测量在原子水平上确定 Fe 单原子的化学状态和配位环境，为直接制备用于能量转换系统的高密度单原子催化剂开辟了一条新的途径[ACS Catalysis 9(3):2158-2163(2019)]。

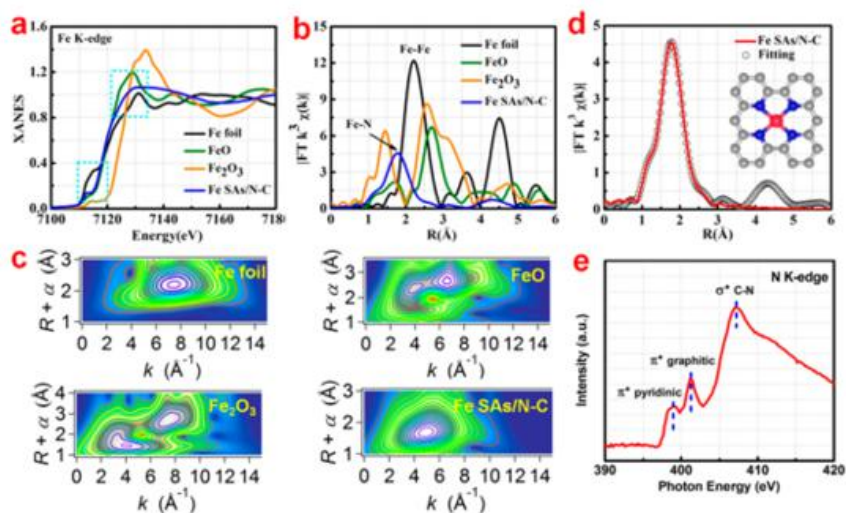


图 4. 利用 NEXAFS 技术结合扩展 X 射线吸收精细结构的测量在原子水平上确定 Fe 单原子的化学状态和配位环境

#### 4. 原位同步辐射探究单原子催化剂酸性电催化析氧反应中间体

中国科学技术大学姚涛教授课题组发展了原位同步辐射红外技术，结合原位 X 射线吸收谱技术，首次精确探测到钌基单原子催化剂在酸性电化学析氧反应过程中的催化活性位点的动态变化过程，并依此设计出高活性和高稳定性的酸性析氧反应（OER）催化剂[Nature Communications 10:4849(2019)]。

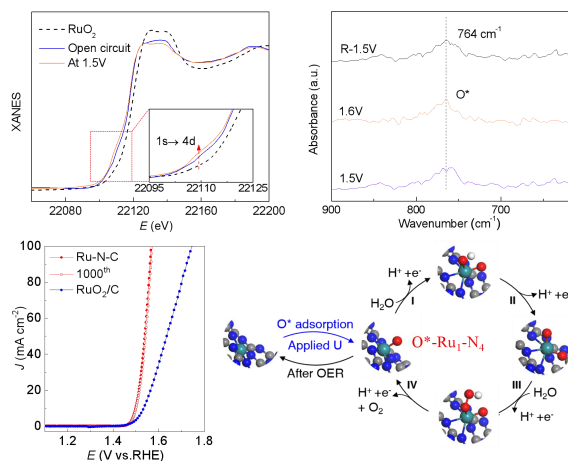


图 5. 单原子 Ru 催化剂的原位同步辐射表征及电催化析氧反应机理

## 5. 过渡金属单原子催化剂设计合成及催化性能研究

清华大学李亚栋院士、陈晨副教授团队利用氮的配位效应制备了氮掺杂石墨化碳稳定且具有显著催化活性的钴纳米晶催化剂 (Co NCs/N-C)。通过 Co、C 和 N 等 XANES 谱测量分析表明, 石墨掺杂氮的配位效应对催化活性发挥了关键作用: Co-N 配位键导致 Co 表面产生部分正电荷, 从而促进反应。Co NCs/N-C 结合了氮的配位协同效应和碳层的保护作用, 使其具有取代贵金属基催化剂和可溶性催化剂进行均相反应的巨大潜力[Chemical Science 10(20):5345-5352(2019)]。

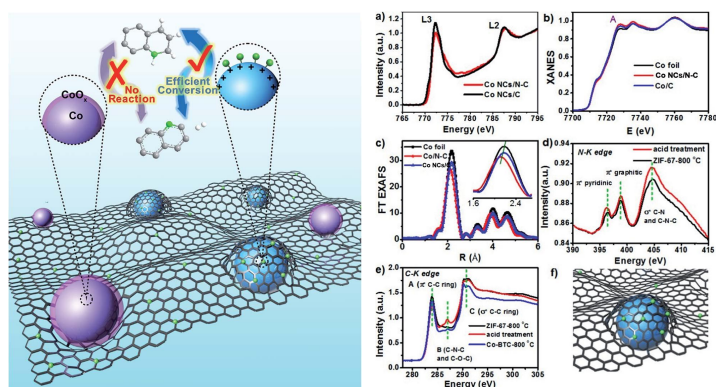


图 6. Co NCs/N-C 示意图及相关图谱

## 6. 金属催化剂粒径效应

中国科学技术大学路军岭教授课题组发展出一种拆分金属颗粒几何效应和电子效应的新策略——金属纳米颗粒的“氧化物选择性包裹”。利用同步辐射原位 XPS 电子结构表征和理论计算, 成功揭示了 Pd 催化剂中几何效应和电子效应对苯甲醇氧化反应随尺寸变化的调变规律: 当催化剂尺寸大于 4 nm 时, 几何效应占主导地位; 当尺寸小于 4 nm 时, 电子效应变得更加突出, 逆转了苯甲醛选择性随粒径减小而降低变化的趋势[Science Advances 5(1):eaat6413(2019)]。相关成果被国际知名期刊《Nano Today》进行专题新闻报道[25:5-6(2019)]。

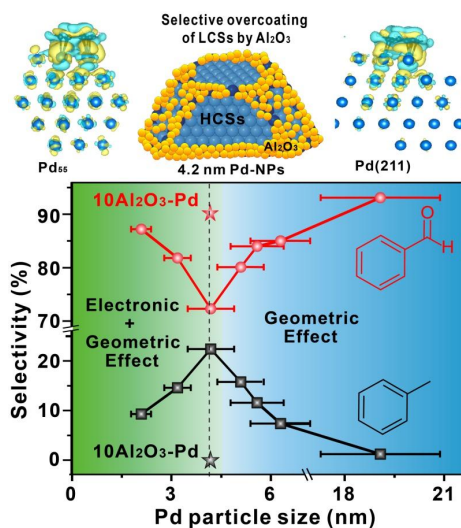


图 7. Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>催化的苯甲醇氧化反应中，苯甲醛和甲苯选择性随 Pd 粒径的变化关系

## 7. 基于拓扑转换材料的电解质突触晶体管

中国科学院物理研究所金奎娟研究员团队利用离子液体调控 SrFeO<sub>2.5</sub>、SrCoO<sub>2.5</sub> 系列氧化物拓扑相变薄膜材料相变过程，成功实现了人工突触器件信息读写功能。对 O、Fe、Co 等吸收边的测量和分析，明确了正/负栅压驱动下氧离子发生插入/析出这一结构变化引起的相变机制，为深入认识拓扑相变材料结构转变机理和指导突触晶体管器件制备提供了基本物理依据。该工作首次验证了基于拓扑相变材料的突触晶体管综合优异性能，为新型高性能神经突触器件的研究提供了新思路[Advanced Materials 31(19):1900379(2019); Advanced Functional Materials 29(29):1902702(2019)]。

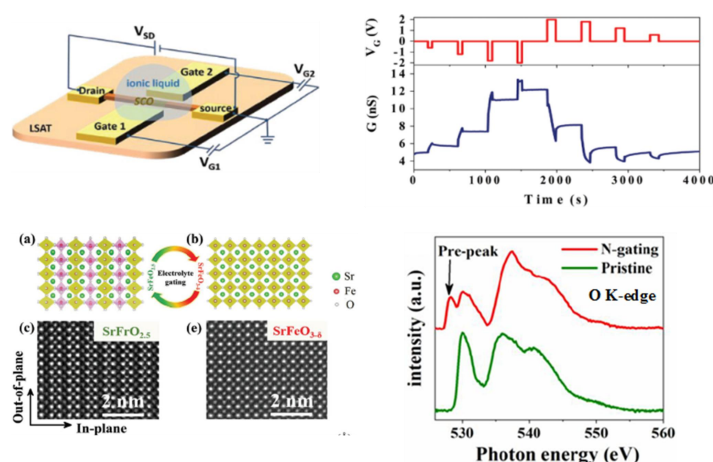


图 8. 晶体管结构和测量设置的示意图（左上）、电导 G 随时间的变化（右上）、结构相的演变（左下）及 X 射线吸收光谱（右下）

## 8. 磁性拓扑绝缘体 MnBi<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 的电子结构研究

利用 ARPES 系统，中国科学院物理研究所的丁洪与钱天研究员、清华大学的杨乐仙与陈宇林研究团队对磁性拓扑绝缘体 MnBi<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 中的拓扑电子结构进行了系统性的研究，首次在磁性拓扑绝缘体中观测到清晰的拓扑表面态。南京大学的宋凤麒教授利用 Sb 元素对 Bi 元素进行了替代掺杂，在 Mn(Sb<sub>0.3</sub>Bi<sub>0.7</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 中发现费米能级刚好位于体态的能隙附近，使该材料可以成为器件研究的平台[Physical Review X 9:041039(2019); 9:041040(2019); Nature Communications 10:4469(2019)]。发表于 Physical Review X 的工作被选为 Feature in Physics 文章，并被美国物理学会 Physics 杂志专题报道。

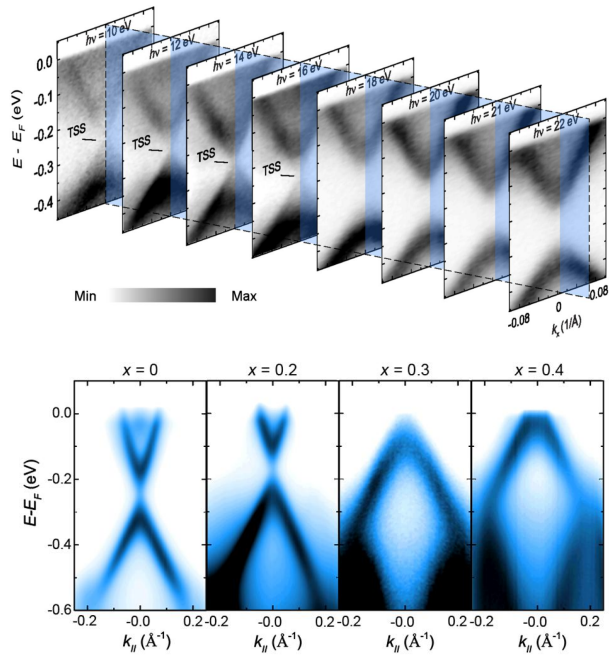


图 9. 能带结构随光子能量的演化（上）；Sb 掺杂对材料能带结构的影响（下）

### 9. 高效率韧 X 射线光栅单色器用 Cr/C 多层膜稳定性研究

面向在韧 X 射线全波段都具有高效率的 Cr/C 多层膜和多层膜光栅应用，同济大学精密光学工程技术研究所（IPOE）与合肥光源计量站合作，利用同步辐射弯铁线站白光辐照开展多层膜稳定性研究，验证了 Cr/C 多层膜结构和反射性能的良好稳定性[Optics Express 27(26):38493-38508(2019)]。在此基础上，同济大学和德国亥姆霍兹柏林研究中心（HZB）合作为德国 BESSY-II 光源成像线站（U41-PGM1-XM）镀制了首块多层膜闪耀光栅和多层膜前置镜，并在线站单色器获得成功应用。多层膜光栅元件的成功研制为韧 X 射线单色器和光谱仪提供了新型高效率核心元件，破解了传统单层膜光栅在韧 X 射线波段效率低的国际难题，为实现我国先进光源装置建设中核心元件的自主可控提供了重要支撑。

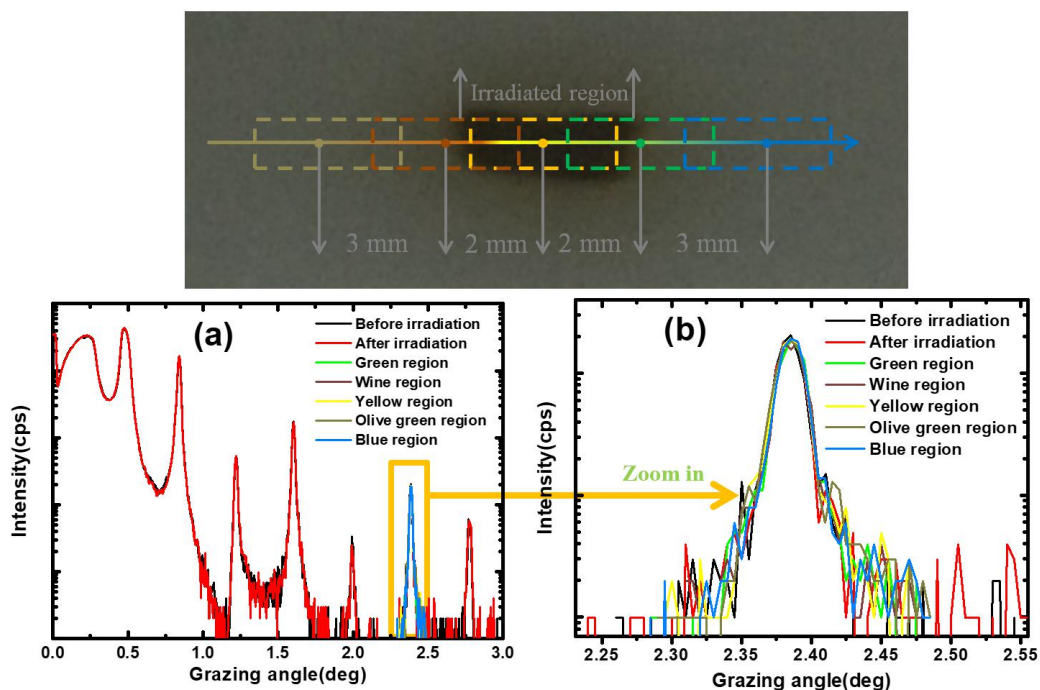


图 10. Cr/C 多层膜白光辐照实物图和多层膜不同位置的硬 X 射线反射测试结果

## 10. 纳米免疫增强剂与纳米酶的恶性肿瘤诊疗

中国科学院宁波材料所用户利用软 X 射线成像线站技术，在纳米免疫增强剂与纳米酶的恶性肿瘤诊疗与预防方面取得重要进展，相关成果发表于生物材料国际权威期刊 *Biomaterials* [223:119464(2019)]、*Nano Letter* [19(8):5674-5682 (2019)]。在这两项工作中，用户设计制备了基于  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子的免疫增强剂、类过氧化氢酶-类葡萄糖氧化酶的双无机纳米酶，以上纳米探针在荷瘤动物模型上展现出良好的肿瘤免疫治疗与预防作用、光动力-饥饿疗法协同治疗效果。

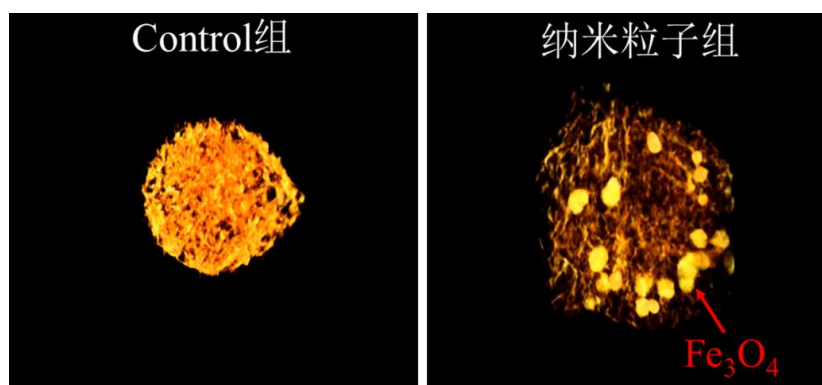


图 11. 纳米探针与免疫细胞相互作用的高分辨三维成像



### 三、设施建设、运行与改造

专用研究设施

设施名称	设施运行总机时	调束注入机时	提供束流机时	机器研究机时	用户实验机时	停机检修机时	故障机时	其他
(合肥同步辐射装置)	7267.17	11.90	5254.04	1441.15	47261.32	535.86	24.22	0

公共实验设施

设施名称	实验束线数	实验站(终端)数	用户单位数	用户计划实验课题数	用户完成实验课题数	用户实验参加人数	用户实验涉及领域及比例	故障机时
合肥同步辐射装置	10	10	106	241	420	1269	物理 18.27% 化学 36.13% 生物 3.57% 地质 1.03% 材料科学与工程 22.64% 其他 18.36%	48

用户单位数

设施	用户总数	院内	院外		其中				
			国内	国外	大学	研究所	政府机构	企业	其他
合肥同步辐射实验装置	106	25	72	9	75	29	0	2	0

2019 年度主要目标是保障合肥光源高效率、稳定的运行；进一步完善提高实验线站性能、提高运行可靠性及用户满意度；围绕重点研究方向，服务用户开展科学研究，取得若干重要成果。

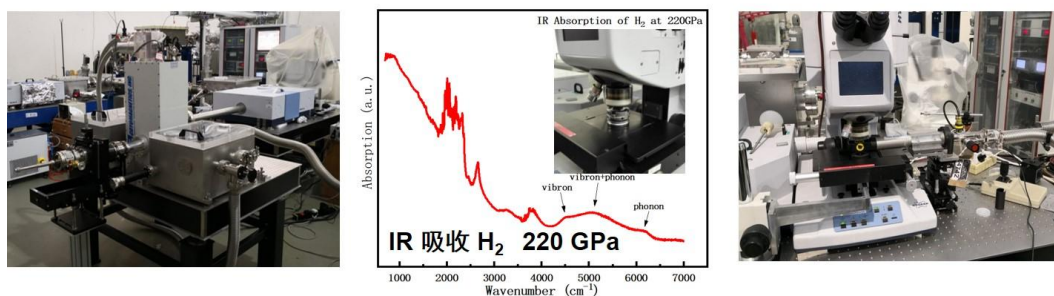
#### 光源的运行、维护、机器研究情况

2019 年是完整恒流模式运行的第一年，恒流运行不仅大幅度提高了光源的性能，运行的稳定性与可靠性也进一步提升。本年度计划运行时间 7212 小时，供光时间 5233 小时，实际运行 7267.17 小时，供光 5254.04 小时，圆满完成了年度运行计划。2019 年合肥光源运行的有效机时率 (Availability) 达到了 99.54%，平均两次故障间隔时间 (Mean Time Between Failures) 为 119.41 小时，平均故障修复时间 (Mean Time To Repair) 降低到了 0.56 小时，光源的运行水平处于世界同步辐射用户装置最优行列。

## 技术与方法的创新

### 1. 极端条件红外谱学研究平台

建立了极端条件红外谱学研究平台，包括低温强磁场（5 T，10–300 K）、高压（>200 GPa）、变温（5–500 K，10  $\mu\text{m}$ ）红外显微谱学技术，为揭示高性能和新功能材料在极端条件下的物性提供了强有力的工具。



低温强磁场红外谱学装置

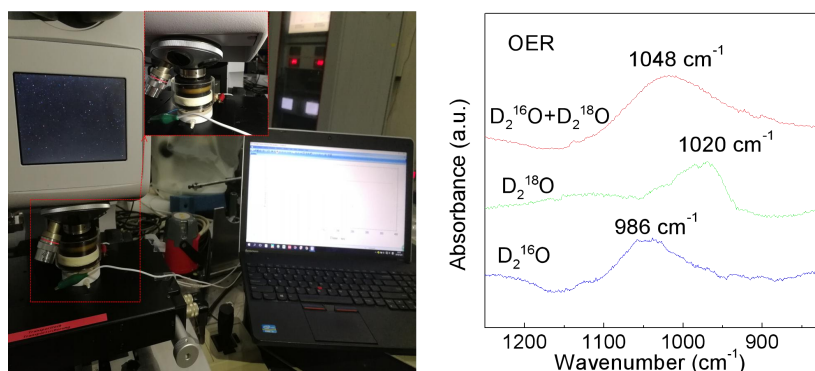
高压红外谱学技术

变温红外显微谱学技术

图 12. 极端条件红外谱学研究平台

### 2. 原位固液电化学红外显微谱学技术

红外谱学和显微线站与用户合作，通过设计三电极原位电化学红外反应池，解决了传统红外技术无法对微弱的界面反应信号进行原位测量的难题，成功地获得电化学反应过程中催化剂表面反应活性位点产生的中间体结构信息，相关成果发表在 Nature Energy 和 Nature Communications 上。



原位固液电化学同步辐射红外谱学实验装置（左图）和 OER 测试结果（右图）

图 13. 原位固液电化学红外显微谱学技术

### 3. 光电离质谱成像方法学研究取得进展

质谱线站与中国科学技术大学熊伟教授合作，发展了一种基于解吸电喷雾电离的二次光电离质谱成像技术（DESI-PI-MSI），可实现对组织切片中多种极性和非极性组分的同时空间成像，从而为生物标志物的高灵敏度探测和药物代谢精确成像研究奠定了基础研究[Analytical Chemistry 91:6616-6623(2019)，封面文章]。



图 14. 二次光电质谱成像技术 (DESI-PI-MSI) 装置图 (上)、封面文章 (左下) 和小鼠脑切片图 (右下)

#### 4. 原位催化质谱方法学研究取得进展

质谱线站发展同步辐射光电离分子束取样时间飞行质谱技术, 设计了高压原位反应器 (2 Torr ~ 20 atm), 既能在低压下探测自由基, 又可在近高压下对稳定产物进行原位定性和定量测量, 为催化剂的合理设计提供了重要的理论指导。

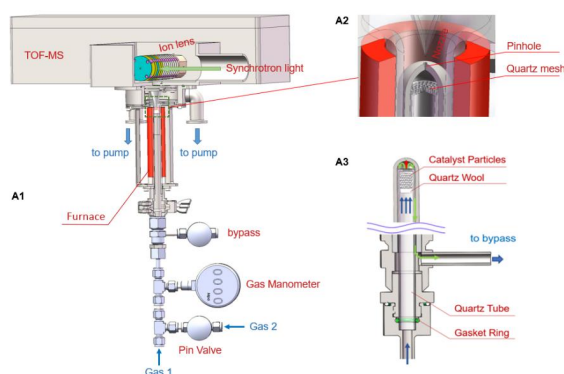


图 15. 同步辐射原位催化质谱技术 (SR-PIMS) 装置示意图

#### 开放共享

2019 年, 实验室积极主动开拓全方位交流渠道, 通过合作交流、用户年会、高端用户研讨会、用户培训班等形式, 邀请高水平用户积极参与实验室的建设, 注重倾听对线站建设、实验技术发展的建议和需求。

2019 年 7 月, 召开了 2019 年度用户会议, 来自国内外高等院校、科研院所共计 70 家单位的 251 名代表参加了会议。

另外, 实施特色用户组织计划, 主动出击、重点组织, 发展新用户, 寻找老用户的新合作点, 并采取重大产出导向的方式, 对重点用户执行政策倾斜, 起到了很好的效果。

#### 四、科技队伍与人才培养

设施 人员 总数	按岗位分			按职称分			学生			在 站 博 士 后	引 进 人 才 *
	运行维 护人员	实验 研究 人员	其 他	高级 职称 人数	中级 职称 人数	其 他	毕 业 博 士	毕 业 硕 士	在 读 研 究 生		
184	129	49	6	86	64	34	27	21	288	21	2

围绕 NSRL 的科研发展布局，实验室积极引进高端人才，着力打造高水平的国际化创新人才队伍，培育若干重点领域创新团队，以应对未来科学发展的重大挑战。充分发挥现有高端人才的力量，积极联系和引进优秀人才，凝聚队伍，牵头形成创新团队，带动实验室整体队伍建设水平。建立聘期制科研人员引进和管理制度，成立一支高水平的流动科研人员队伍，成为实验室研究力量的有益补充。

## 五、合作与交流

### 国内合作

由厦门大学牵头，中国科学技术大学国家同步辐射实验室负责红外自由电子激光光源建设的国家重大科研仪器设备研制专项“基于可调红外激光的能源化学研究大型实验装置”。该项目 2019 年 6 月中红外波段饱和出光，目前正在进行机器维护与调整工作。

与苏州大学共建软 X 射线能源材料原位分析线（MCD-B 支线），进行了首次同步光调试，获得氩气的气体电离谱，表明光束线设计、加工、关键部件检测、安装、准直、调试等工作满足预定的工程技术要求。建成后该线站将为我国能源和催化领域的研究提供先进的原位实验技术。

### 国际交流与合作

2019 年，实验室邀请了来自美国、俄罗斯、加拿大、德国、法国、韩国、日本等多个国家的同步辐射领域专家约 50 人次来我室进行学术交流，多位专家做高水平学术报告。

在加强请进工作的同时，鼓励实验室研究人员积极走出去，拓展眼界、提高知名度，2019 年共计出访 68 人次，并有多人次受邀在国际大会上做邀请报告。

2019 年，国家同步辐射实验室与巴西光源、澳大利亚卧龙岗大学等签署了合作备忘录，在合作研究、人才交流、联合培养等方面达成一致。

### 学术会议

2019 年国家同步辐射实验室成功举办的重要学术会议有：

“天体，大气和燃烧环境下的气相动力学国际研讨会”。本次会议邀请到了来自海内外 9 个国家、20 余所高校及科研单位的 40 余人参会，讨论气相化学动力学领域的实验和理论研究前沿进展，有力推动了相关领域的科学家与 NSRL 展开更多实质性的合作。

“相干光源国际研讨会”。自 2016 年起，国家同步辐射实验室已连续四年召开相干光源的国际研讨会，本次会议邀请到了来自 ESRF、SOLEIL、Photon

Factory 等世界先进光源的顶尖物理与技术专家参会，共同对未来先进光源进行探讨。该系列会议对合肥先进光源规划的推进及预研项目的顺利实施提供了有益助力，为提升合肥先进光源的国际影响力起到了积极作用。

“国家同步辐射实验室用户学术年会”。本次会议共有来自全国高等院校、科研院所等 70 家单位的 251 名代表参会，通过大会特邀报告、用户报告、专题研讨会、会议海报展示等多种形式，呈现了合肥光源过去一年取得的成绩，对未来发展的探索与思考，并与用户进行了充分的交流和讨论，对合肥光源今后的运行开放及合肥先进光源的规划建设将产生积极的促进作用。

### **科普活动**

国家同步辐射实验室组织了 2019 年科技开放活动周。活动期间，实验室共接待 6400 多人来室参观，利用科普图片展板、模型展示、实地参观和趣味知识问答等多种形式，为公众奉献内容丰富、形式多样的科技大餐，吸引了各地、各年龄段（含幼儿园）科技爱好者的参观。

本年度，实验室举办了第九届光子科学夏令营，共 78 名来自哈尔滨工业大学、中山大学等 34 所全国各高校的学生参加了本次夏令营。

## **六、大事记**

3 月 6-9 日 召开“天体，大气和燃烧环境下的气相动力学国际研讨会”。

4 月 19-21 日 召开第三届中国科学技术大学“墨子论坛”光子科学与技术分论坛。

5 月 18-19 日 举办 2019 年度科技活动周。

6 月 26-27 日 召开超级陶粲装置加速器测控技术研讨会。

7 月 18 日 召开由中国科学院条件保障与财务局与前沿科学与教育局组织的“我国同步辐射光源体系规划暨合肥先进光源设计方案研讨会”。

7 月 25-28 日 召开合肥光源 2019 年用户学术年会。

12 月 17-18 日 召开 2019 相干光源国际研讨会。

12 月 21 日 中国科学技术大学科技战略前沿研究中心与国家同步辐射实验室联合主办的“科创时代，洞见未来——长三角‘十四五’规划中科技与产业创新研讨会”在合肥举行。

12 月 31 日 举办合肥光源出光三十周年纪念活动。

## **七、单位通讯录**

单位地址：安徽省合肥市蜀山区合作化南路 42 号

邮编：230029

电话：0551-63602034，0551-63602018

网址：<http://www.nsr1.ustc.edu.cn>

联系人: zhypan@ustc.edu.cn

## **八、编委及责任编辑**

编委: 封东来

责任编辑: 潘志云