

中国科学技术大学辐射化学学科建设与发展历史回顾

葛学武 张志成 瞿保钧

(中国科学技术大学化学与材料科学学院高分子科学与工程系 合肥 230026)

1 前言

2024 年, 对于中国科学技术大学 (以下简称中国科大) 辐射化学学科是一个极其特殊的年份。这一年安全运行了四十年的钴源辐照装置到达退役年限, 即将完成它的历史使命。在四十年的岁月中, 钴源辐照装置对中国科大辐射化学学科乃至中国辐射技术产业化发展起到了至关重要的作用, 也为中国科大辐射化学学科开启下一个新时代打下了良好的坚实基础, 未来可期。为此, 特撰写此文, 以示纪念。

2 中国科大辐射化学学科及专业建设历史沿革概览

中国科大辐射化学专业最早可追溯到建校初期。1958 年 9 月, 我国老一辈革命家和科学家为“两弹一星”事业在北京创立中国科大。为了原子能的和平利用和核武器的研究与发展, 在建校时设立的 13 个系中就有放射化学和辐射化学系 (08 系)。放射化学是研究放射性物质, 以及与原子核转变过程相关的化学问题的化学分支学科。辐射化学是研究电离辐射与物质相互作用时产生的化学效应的化学分支学科。两者的研究对象不同, 但有相关性, 都与原子核衰变有关。08 系的首任系主任是杨承宗先生。杨先生 1947 年赴法国居里夫人实验室留学, 1951 年获巴黎大学镭研究所 (Institut du Radium) 理学博士学位。新中国成立后毅然回国, 投身于原子能事业, 开创了我国放射化学和辐射化学发展的新纪元, 被称为新中国放射化学奠基人。1960 年, 放射化学和辐射化学系更名为原子能化学系 (08 系)。1961 年, 地球化学和稀有元素系并入原子能化学系 (08 系)。1964 年学校进行机构调整, 将与化学有关的系和化学

教研室合并为近代化学系 (03 系)。

早期授课中, 杨承宗、冯锡璋、孙鹏年、肖伦、李虎侯、林念芸、张曼维、徐理沅、吕维纯、章吉祥和范龙祥等老师为放射化学和辐射化学专业学生上课。后来, 从重点高校选拔了一批优秀毕业生, 充实到教师队伍中, 如何坚、李承华、余祖煌、李作前、宋建文、孙莲凤、王镇蒲、庞瑞草、陈大宇、赵柱流、欧阳鸽、曹国强、奉孝伦。再后来, 刘清亮、王庚辰、王宝璋、蒋淮渭、梁癸铭、霍元素、袁致俭、刘占军、吴震南、曹国印、于声、李希明等先后留校, 进一步充实了师资队伍。邵良衡负责管理系和教研室的的教学组织工作^[1]。

1970 年, 中国科大南迁合肥后, 由于合肥不具备放射化学的工作条件, 学校于 1973 年决定撤销放射化学专业, 仅保留辐射化学专业。1974 年, 辐射化学专业开始招收“文革”中的第一批工农兵学员, 1976 年又招收了第二批工农兵学员。1978 年, 招收了“文革”后第一批全国统一入学的辐射化学专业学生 (属于 03 系 78 级本科生, 简称 783), 入学三年后分的专业。直到 20 世纪 70 年代后期, 辐射化学专业与辐射化学教研室在杨承宗、张曼维和何坚的领导下, 王宝璋、吴震南、李承华、蒋淮渭、袁致俭、李希明、刘占军、奉孝伦、毛信玉、章吉祥、赵秉熙和范龙祥等都为辐射化学学科的发展做出了重要贡献。后来, 何坚、王宝璋、李承华、毛信玉和范龙祥调离中国科大。在此期间, 方月娥调入中国科大, 瞿保钧、张志成、施文芳、陈文明和江毅先后加入辐射化学教研室, 形成了一支充满活力的教师队伍。之后, 蒋淮渭调入胶体电化学教研室, 瞿保钧调入结构成分分析中心, 江毅出国学习, 离开了辐射化学教研室。20 世纪 70 年代末, 张祖军

留校, 韩萍入职辐射化学教研室^[1]。80年代后, 葛学武、胡杭春、蒋培云、储高升、徐相凌、刘和文、刘华蓉、吴国忠、陈家富、叶强和汪谟贞陆续留校工作, 充实辐射化学教师队伍。其中, 胡杭春、蒋培云、储高升、徐相凌、吴国忠、陈家富和叶强又陆续出国进修, 离开了辐射化学教研室。校机械厂的全欲才和国家同步辐射实验室的孙廷恒调入钴源室工作。1986年王尚飞从部队复员后留在钴源室工作至今, 几十年如一日, 兢兢业业, 认真负责, 对钴源辐照装置的安全运行做出了重要贡献。马其观和薛凤兰也在钴源室工作过一段时间。1990年前后, 章吉祥和李希明先后离开中国科大。何坚、毛信玉、章吉祥、刘占军、施文芳和葛学武先后担任辐射化学教研室主任。

1982年, 学校从近代化学系中分出一个应用化学系(12系), 辐射化学教研室隶属于应用化学系。2001年, 由于院系调整, 应用化学系被撤销, 将辐射化学教研室并入高分子科学与工程系(20系), 成为辐射化学研究室, 不再单独招收辐射化学本科生。2018年恢复应用化学系。2023年, 中国科大核科学技术学院设立了辐射化学研究方向, 引进了马骏和苗庆庆等年轻人才。这一年黄涛从应用化学系调入钴源室工作。

3 中国科大钴源辐照装置建设过程回顾

钴-60核衰变产生的 γ -射线与物质发生相互作用, 产生辐射化学反应或生物效应。因此, 高能辐射是辐射化学研究的重要手段, 钴源辐照装置是开展辐射化学基础研究和应用研究必不可少的装置之一。南迁合肥时, 学校从北京运到合肥的只有一个用铅罐防护的钴-60放射源, 放射性活度大约只有几百居里(1居里等于 3.7×10^{10} Bq, 1 Bq = 1 衰变/秒), 仅能用于学生的辐射化学实验。由于辐射化学教研室缺少大型放射性钴源装置, 因而难以开展科学研究工作, 致使改革开放后第一批辐射化学专业的学生(78级)只能到上海化工研究院、中国科学院上海原子核研究所(以下简称上海原子核所)(现在的中国科学院上海应用物理研究所, 以下简称上海应物所)、浙江农业科学院原子能农业应用研究所和中国科学院长春应用化学研究所(以下简称长春应化所)等研

究机构做毕业论文。

早在1974年, 杨承宗先生着眼于国家原子能科学的长远发展和辐射化学学科发展的需要, 向学校提出建立钴源辐照装置, 积极推动钴源辐照装置与化学楼按照“一个工程、分开设计”的原则同步建设, 申请购买国外钴-60放射源, 并很快得到了批准^[2]。在土建设计中, 时任辐射化学教研室主任何坚力争提高辐照装置的辐射防护安全性, 使钴源室最高可承受20万居里的放射性活度, 这对教学和科研来说, 实属大型辐照装置。历经十年的努力, 钴-60放射源辐照装置终于建成。1984年4月10日下午, 从加拿大进口的装有钴-60放射源的运输铅罐经由上海运抵合肥, 再由两辆警车一前一后从火车货运站一路护送, 重达5吨多重的运输铅罐安全到达中国科大校园(源棒标准: 451.4×11.1 mm), 当天晚上就将源棒导入源架, 顺利完成了装源工作。装源前, 钴源升降装置曾模拟运行1 680次。装源后, 钴源升降装置顺利运行百余次, 机械传动装置及电子控制系统均运行正常。1984年5月5日, 时任副校长的杨承宗、包忠谋领导的验收小组, 成员包括余翔林、刘海溶、张曼维、于开福、刘金聚、许学佩和杜凤兰, 对钴源辐照装置进行了全面验收, 上报中国科学院, 批准该装置正式投入使用(中国科学技术大学文件, 校字(84)第108号)^[2]。在钴源辐照装置建设过程中, 陈文明和奉孝伦倾注了大量心血, 做出了突出贡献。

钴源辐照装置是中国科大第一个大科学装置, 位于学校东校区西大门南侧(图1)。钴源辐照装置一般分为干井式和水井式, 前者通常为小型装置, 后者主要用于辐射加工和科研单位。源架可以采用板状、鸟笼状和棒状, 辐射加工企业通常采用板状, 而科研单位多采用鸟笼状和棒状。中国科大钴源辐照装置采用的是水井储源和鸟笼状源架(图2)。非工作状态放射源储存室为水井, 要求用去离子水(电导率小于 $10 \mu\text{S}/\text{cm}$, 总卤化物小于 $1 \mu\text{g}/\text{mL}$, $\text{pH} = 4.5 \sim 8.5$, SiO_2 小于 $5 \mu\text{g}/\text{mL}$)。辐照室采用钢筋混凝土建造, 防护墙和棚顶的厚度需要根据辐射防护标准计算得出, 与设计装源活度和距离等因素有关。人员和货物进出通道采用迷宫(中国科大采用回形迷宫), 防止射线溢出。由于中国科大钴源辐照装置建设得比较早,

辐射防护设计不如现在先进，采用铅钢防护门（防止射线溢出），装放射源的铅罐也要从迷道进出源室，而不是目前从棚顶吊装的先进设计。升降源采用卷扬机通过定位导轨、钢丝绳、滑轮转向系统来实现，后因安全考虑，改为目前普遍采用的液压提升机，以实现停电降源的安全要求（图3）。开关门采用电动机械装置。辐射场采用钢制样品操作台，台上设置许多点位（编号），每个点位可单独标定剂量率（图4）。按照国家标准（GB10252—2009 γ 辐照装置的辐射防护与安全规范，GB/T17568—2019 γ 辐照装置设计建造和使用规范）的要求，钴源辐照装置安全联锁要有冗余性，如门与升降源联锁、关门报警；源室内设置紧急降源装置，如拉线、按钮、两道红外线和一

道挡板；另外，还设置有源位指示灯、升源与通风联锁、断电降源、水位指示及报警、复位开关和放射性标志等。在射线监测方面，有多种剂量监测报警设备，如固定式射线检测仪（安装在操作控制台上）、便携式和个人剂量报警仪，以及工作人员佩戴热释光剂量片。钴-60核衰变产生的高能 γ -射线（每次衰变放出两个 γ -射线，能量分别为1.17 MeV和1.33 MeV）在与物质相互作用后，产生高能次级电子。当高速带电粒子束在透明介质中以高于光在该介质中的传播速度运动时，带电粒子的部分能量以蓝光的形式辐射出来，这种形式的辐射称为契伦科夫辐射。这样从水井上方，可以清晰地看到源棒周围的蓝色辉光（图5）。



图1 左图右侧是钴源室与化学楼之间的连廊,插图是中国科大钴源辐照装置建筑物外观(摄于2024年7月10日);右图是与钴源辐照装置同时建设、分开设计的化学楼(装源作业现场);左图与右图均摄于2012年之前



图2 放置源棒的鸟笼状源架



图3 钴源辐照装置的液压提升装置和操作控制台



图4 钴源辐照装置放置样品的辐照台和源盒

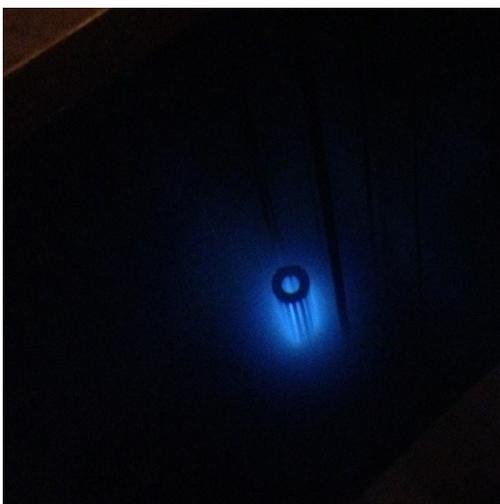


图5 钴源在水中产生的契伦科夫辐射光

4 中国科大辐射化学专业的教学工作

辐射化学专业本科生的专业课包括理论课和实验课两部分，理论课包含《辐射化学》《高分子辐射化学》和《电离辐射防护与剂量学》。对辐射化学专业的研究生还另外开设了《辐射加工工艺学》。《辐射化学》主要讲授溶液的辐射化学基础理论。《高分子辐射化学》主要讲授有机单体的辐射聚合、聚合物的辐射接枝和辐射交联与裂解及其应用。《电离辐射防护与剂量学》主要讲授射线与物质相互作用的基本原理，高能射线的危害与防护及国际标准，以及剂量学基础和射线屏蔽层厚度的计算。20世纪80年代后开课老师包括张曼维、吴震南、袁致俭、赵秉熙、刘占军、李希明、张志成、方月娥、陈文明、施文芳、葛学武、刘华蓉等。实验课包含《电离辐射防护与剂量学实验》和《辐射化学实验》。《电离辐射防护与剂量

学实验》开设了硫酸亚铁剂量计、硫酸铯剂量计、重铬酸银快速液体化学剂量计、剂量监测仪器的使用、热释光剂量计实验和表面沾污仪实验。《辐射化学实验》开设了水的辐射分解、自由基清除剂（DPPH）测定四氯化碳自由基产额、气相色谱法测定氯苯的辐解产物、辐射法制备交联聚丙烯酰胺、苯乙烯-甲基丙烯酸甲酯辐射共聚合、聚乙烯辐射接枝丙烯酸、聚合物辐射裂解产额的测定、聚甲基丙烯酸甲酯的形变-温度曲线的测定、辐射交联聚乙烯熔融指数的测定、辐射交联聚乙烯凝胶含量的测定等实验。实验课的开设是为了训练学生的实际操作能力，加深对理论课的理解。袁致俭、江毅、范龙翔、奉孝伦、陈文明、赵秉熙、方月娥、韩萍、张祖军、葛学武、徐相凌、刘和文、刘华蓉和叶强等老师先后带过辐射化学专业的实验课。

为了做好教学工作，辐射化学教研室的老师们撰写了一批教学讲义，也出版了教科书。张曼维和林念芸早期为辐射化学专业的学生编写了《辐射化学》讲义，之后张曼维又编写了《高分子辐射化学》讲义（1978级本科生使用过），出版了《辐射化学入门》（中国科学技术大学出版社，1993）。李承华编著《辐射技术基础》（原子能出版社，1988）。张志成编写了《高分子辐射化学》讲义（1980级本科生使用过）。吴震南编写了《辐射化学》讲义（1984）。赵秉熙和袁致俭编写了《电离辐射防护与剂量学》讲义。张志成、葛学武、张曼维编著了《高分子辐射化学》（中国科学技术大学出版社，2000）。辐射化学教研室的老师们还集体编写了《电离辐射防护与剂量学实验》讲义和《辐射化学实验》讲义。这些讲义和教科书为培养辐射化学专业人才打下了坚实的基础。

另外，为了充分发挥“全院办学，所系结合”的办学方针，辐射化学教研室邀请上海原子核所林念芸研究员、长春应化所孙家珍研究员、中国科学院上海有机化学研究所赵祥臻研究员和上海化工研究院刘钰铭研究员来合肥，给78级辐射化学专业的学生上课。此外，还长期聘请孙家珍和张利华（长春应化所）为兼职教授，他们经常来学校给学生做学术报告。为了开阔学生的国际视野，辐射化学教研室多次邀请日本东京大学田畑米穗（Yoneho Tabata）教授和勝村庸介（Yosuke Katsumura）教授、京都大学键谷勤教授和西本清一教授等国外辐射化学专家来访，这些专家学者

还包括来自法国、加拿大、瑞典、荷兰和美国的大学教授。1996年，中国科大授予法国巴黎南大学从事辐射化学研究的Jacqueline Belloni教授为名誉教授。她多次来校访问和学术交流，为中国科大与巴黎南大学的双边交流合作铺平了道路，一直延续至今。20世纪80年代和90年代，多人出国出境进修学习。李希明先后在日本东京大学和京都大学进修。张志成在东京大学进修并获得博士学位。吴震南在加拿大卡尔加里大学进修。刘占军在美国马里兰大学进修。瞿保钧和施文芳在瑞典皇家工学院进修并获得博士学位。赵秉熙在法国巴黎南大学进修。陈文明先后在法国巴黎南大学和荷兰Delft理工大学进修。刘和文在芬兰埃博学术大学学习并获得博士学位。葛学武在丹麦RISO国家实验室进修。陈家富在日本理化学研究所进修。林铭章在法国巴黎南大学进修并获得博士学位，在东京大学和日本原子能研究开发机构工作多年，2014年9月获得日本辐射化学会颁发的“放射线化学奖”，成为首位获此奖项的非日本籍科学家。刘华蓉在葡萄牙里斯本大学进修。汪谟贞在香港科技大学进修。在对外交流方面，杨承宗、李希明、施文芳、刘占军、吴震南、张志成和林铭章等做出了突出贡献。

5 中国科大辐射化学的科学研究与人才培养

中国科大是全国为数不多的从学士、硕士和博士连续培养辐射化学专门人才的高校。改革开放后，从1978年开始招收辐射化学专业本科生，大概在1989年辐射化学专业并入应用化学专业，辐射化学方面的相关专业课一直开设至1996年。研究生（包括硕士和博士）培养一直延续至今。承担的科研项目有科技部863项目、科技部攀登计划项目、国家自然科学基金面上项目和青年项目、教育部博士点基金项目 and 安徽省自然科学基金等共有几十项。与企业合作的横向课题估计有一百多项，是中国科大产学研最成功的学科方向之一。20世纪80年代到90年代期间，张曼维、张志成、奉孝伦、蒋培云、徐相凌和叶强开展了辐射乳液聚合研究工作；李希明、袁致俭、方月娥和陈文明开展了医用高分子材料的辐射化学制备和高聚物共混复合材料的辐射交联等研究工作；张曼维、张志成、储高升和陈家富开展了电子脉冲辐射分

解方面的研究工作；章吉祥开展了食品辐射保鲜方面的研究工作；赵秉熙和陈文明开展了高分子吸水材料的辐射制备研究并进行了产业化；吴震南、施文芳和葛学武开展了辐射接枝制备血液分离膜的研究工作；刘占军开展了辐照拉伸HDPE的微分扫描量热研究和光导光度法的理论和应用研究工作；张曼维和钱逸泰在国内率先开展了无机纳米材料辐射化学制备研究。进入21世纪后，瞿保钧、施文芳和刘和文开展了超支化高分子和UV光固化的研究工作；葛学武、刘华蓉和汪谟贞开展了各向异性高分子微球和无机纳米材料及中空多孔材料的辐射化学制备研究工作；林铭章开展了水溶液体系辐射化学、超快反应动力学和放射性废物管理等方面的研究工作；刘和文开展了室温辐射制备钙钛矿量子点和高压绝缘灭弧气体六氟化硫的辐射降解及资源化利用方面的研究工作；马骏开展了功能性水凝胶的辐射合成及其应用等方面的研究工作。据估计，中国科大涉及钴源发表的学术论文有上千篇，获得的专利有上百项。论文发表在美国化学会志（JACS）和先进材料（Advanced Materials）等多种学术期刊上，如近期化学与材料科学学院黄伟新教授团队利用钴-60 γ -射线在室温水溶液中，以甲烷和二氧化碳为原料，直接合成乙酸，合成路线具有原子经济性，研究成果发表在JACS上^[3]；再如物理学院李晓光教授团队利用高能、强穿透性的 γ -射线辐照双向拉伸聚丙烯薄膜（BOPP），对分子链结构进行修饰，引入了强极性的羟基和羰基基团，不仅提高了介电常数，更为重要的是引入了深陷阱能级，可降低高场、高温下漏电流和电-热击穿概率。另外， γ -射线辐照还能引入交联结构，从而提高杨氏模量，降低电-机械击穿的概率，为研发优异介电储能性能的聚合物电介质提供了一种简单而普遍适用的策略，研究成果发表在Advanced Materials期刊上^[4]。

在科学研究取得的成果中，除了发表论文之外，还获得了一批奖项，如张曼维和张志成的《分子介质中正子素形成机理研究》的研究成果获得国家教委科技进步奖三等奖（1991）；张志成、吴承佩、蒋培云和张曼维的《用电离辐射制备反乳型合成增稠剂》的研究成果获得中国科学院科技进步奖三等奖（1994）；张曼维、张志成、吴承佩、奉孝伦和陈东安的《KD-101低温涂料印花粘合剂》研究成果获得国家教委科技进步奖二等奖

(1998); 钱逸泰、谢毅、朱英杰、张曼维等承担的《 γ -射线辐照法制备纳米材料》研究成果获得安徽省自然科学奖二等奖(2010); 苏洪鈺、蒋淮渭、朱贞洪承担的《低温(DXW)自限温加热带》研究成果获得中国科学院科技进步奖二等奖(1989)、全国高科技节能产品博览会一等奖(1991); 张志成、葛学武、张曼维编著的《高分子辐射化学》获第五届安徽图书奖二等奖(2000); 张志成、徐相凌、储高升、陈家富、叶强、葛学武的《电离辐照法制备高性能环保乳胶漆》项目获安徽省科学技术奖三等奖(2002)。

在紫外光交联领域, 瞿保钧和施文芳也取得了丰硕的研究成果。“紫外光辐照交联电缆新技术”2000年荣获第九届中国专利新技术新产品博览会金奖和特别金奖, 2001年又荣获了第十三届全国发明展览会金奖。“光交联聚烯烃绝缘电力电缆的生产方法及其专用设备”发明专利(ZL 98 1 11722.8)获2009年度中国专利优秀奖。与此同时, 2017年瞿保钧代表光交联电缆研究团队与中国科大火灾科学国家重点实验室联合申请的“聚合物/层状无机物纳米复合材料的火灾安全设计与阻燃机理”课题获得了国家自然科学基金二等奖; 2008年“聚合物无卤阻燃新技术及其阻燃电缆”获安徽省科学技术奖二等奖; 2007年“紫外光辐照交联聚乙烯绝缘电缆材料”获黑龙江省省长特别奖; 2000年“聚乙烯光引发交联的机理及其结构性能研究”获安徽省自然科学奖二等奖。

在教学和科研的带动下, 中国科大培养了一大批辐射化学的专门人才, 从建校时起, 就源源不断地为原核工业部、中国原子能科学研究院、长春应化所、上海原子核所、中国科学院兰州近代物理研究所、中国科学院福建物质结构研究所, 以及各省原子能相关院所、辐照中心、农科院所等输送了国家急需的人才, 对推动我国核工业和辐射加工行业的发展做出了突出贡献。涌现出一批杰出校友, 例如, 长春应化所研究员, 高分子辐射交联专家, 中科英华上市公司终身顾问张利华(1959级); 上海应物所研究员, 高分子辐射接枝制备电池隔膜并产业化(国内首创)专家, 上海世龙科技有限公司创始人邱士龙(1959级); 中国科大教授, 辐射乳液聚合制备印染助剂(黏合剂和增稠剂)并产业化(国际首创)专家, 低温黏合剂创始人张志成(1964级); 上海应物所研究员, 电子脉冲辐照理论专家姚思德(1964

级), 他建立了纳秒级电子脉冲辐照分解装置, 为国内的辐射化学理论研究做出了突出贡献。另外, 辐射化学专业还培养出一批杰出的青年学者和管理者, 活跃在各个领域, 如美国加州大学河滨分校的殷亚东教授、上海应物所研究员, 浙江中科辐射高分子材料研发中心主任吴国忠研究员、北京化工大学教授, 国家碳纤维顶级专家徐樾华教授、大连理工大学吕小兵教授、美国PPG公司徐相凌研究员、中国科大林铭章教授, 凯捷生命科学有限公司亚太区总裁施晨阳、广东省惠州市发展和改革局局长吴欣、中国科学院上海硅酸盐研究所朱英杰研究员、香港科技大学吴洪开教授、首都医学科学创新中心特聘研究员李川源、国防科技大学余大斌教授、合肥工业大学丁运生教授、苏州大学华道本教授和陈金星副教授, 以及获得法国巴黎南大学终身教职的姜志文, 等等。

6 钴源辐照装置作为校内服务-公共支撑平台的贡献

钴源辐照装置是中国科大的公共科研支撑平台之一, 每天都承接着来自各个院系的老师和学生前来进行各种样品的辐照。除此之外, 还有一些校外的科研人员前来洽谈合作。钴-60辐照装置为学校的教学和科研工作做出了重要贡献, 同时服务了社会。据不完全统计, 学校利用钴源辐照装置开展科研工作的团队有30多个, 例如: (1) 化学与材料科学学院钱逸泰院士团队、谢毅院士团队、俞书宏院士团队、王志刚教授团队、黄伟新教授团队、刘世勇教授团队、季恒星教授团队、汪志勇教授团队、葛学武教授团队、刘和文教授团队、刘华蓉副教授团队、汪谟贞副教授团队等; (2) 物理学院安琪教授团队、王晓平教授团队、彭海平教授团队、李晓光教授团队、殷月伟教授团队、赵雷教授团队、张云龙教授团队等; (3) 核科学技术学院李良彬教授团队、林铭章教授团队、马骏教授团队、常振旗教授团队等; (4) 环境科学与工程系俞汉青院士团队、盛国平教授团队等; (5) 火灾科学国家重点实验室胡源教授团队、汪碧波副教授团队等; (6) 合肥微尺度物质科学国家研究中心张国庆教授团队、赵爱迪研究员团队等; (7) 地球和空间科学学院周根陶教授团队。此外, 生命科学学院经常使用钴源进行辐照灭菌, 人文与社会科学学院对钴-60放射源也有

需求。由于国内专用于科研的钴源辐照装置极少，因此，国内有多个科研机构与学校合作，利用钴源做了很多科研工作，如中国工程物理研究院、中国科学院合肥分院、合肥工业大学，以及合肥地区的各类企业，如安徽皖仪科技股份有限公司等。

7 科研成果对社会经济的贡献

20世纪80年代初，安徽印染厂接到中国纺织工业部的一个科研开发项目，研制辐射固化的印花涂料，要求与中国科大合作研发，为此学校组成了专项科研团队，成员包括张曼维、张志成、奉孝伦、吴承佩、沈三荣、陆伟琪和陈东安（安徽印染厂），后来蒋培云和徐相凌也参加了研究工作。1984年钴源辐照装置的建立和运行恰逢其时（首次装源活度为6万居里），为项目的顺利进行提供了强有力的研究手段。项目的研究方向也由辐射固化的印染涂料转为辐射乳液聚合制备涂料印花黏合剂。研制的实验样品被带到北京纺织研究所做涂料印花的牢度试验，研究所发现这正是他们想要研发的低温黏合剂，这一结果给课题组做进一步的扩大试验提供了动力。但是，批量黏合剂的上机稳定性较差，经不起滚筒印花过程中的刮擦。后来，课题组经过不懈地努力，逐步解决了黏合剂乳胶上机稳定性差的问题，经过不同地区不同厂家的涂料印花试验，得到了多份满意的试验报告，终于在1986年“KG-101低温印花黏合剂”项目通过了中国科学院和中国纺织工业部的技术鉴定。在鉴定会上，除了通过了低温黏合剂的鉴定之外，涂料印花行业的专家们还提出了研究增稠剂的要求，用于取代A帮浆和从国外进口的PTF增稠剂。于是用辐射法通过反相乳液聚合制备增稠剂成了新的攻关课题，并于1988年“KG-201合成增稠剂”项目通过了中国科学院鉴定。两项成果都申请了发明专利。从80年代末开始，辐射乳液聚合工艺正式走向产业化。首先，中国科大以实业总公司为依托，以学校化学楼南面的空地为生产场地，开展黏合剂和增稠剂的生产与销售，并于1988年3月成立了中国科技大学辐射技术公司。公司初建时，张曼维任经理，袁致俭、马明义和刘占军任副经理。几个月后，公司重组，刘占军任经理，陈文明任副经理，课题组负责技术支撑。1992年，张志成任经理。1995年，KG型印染助剂被列为《国家重点火炬计划项

目》。1997年10月10日成立了合肥中科大辐射技术有限公司，卞祖和副校长兼任董事长，科大实业总公司总经理顾俊廉兼任顾问，张志成任总经理，刘占军、王震球（兼）任副总经理，韩萍任办公室主任，葛学武任总经理助理。该公司是中国科大科研成果产业化的佼佼者。由于中国科大的钴源是教学和科研用源，生产规模小，跟不上扩大再生产的需求，因此，公司筹划在合肥高新区建立独立的生产用钴源辐照装置（设计装源活度50万居里）和生产厂区，葛学武具体负责建设，并在1999年正式投产。由于产品需求旺盛，产能很快达到饱和。因此，又开始筹划建立了第二座钴源辐照装置（设计装源活度依然是50万居里）。第二座钴源建成后，产能又很快达到饱和，年产值达到7000万左右。在此期间，刘占军、韩萍和葛学武任副总经理，刘占军负责采购，韩萍负责销售，葛学武负责基建、环保和安全。1999年12月12日，科大创新股份有限公司成立（简称科大创新），合肥中科大辐射技术有限公司成为该公司的分公司（简称辐化分公司，厂区俯视图见图6）。科大创新于2002年9月5日上市（上海证券交易所，股票代码600551），辐化分公司占50%以上的产值。为了进一步提高产能，科大创新辐化分公司申报了国家级重点火炬计划资助项目，获得500万元资助，建立了一台电子直线加速器（10 kW，10 MeV），准备用加速器生产乳胶。2008年11月18日安徽出版集团有限公司成为科大创新的第一大股东，科大创新更名为时代出版传媒股份有限公司（简称时代出版）。两年后原辐化分公司的领导团队和科研人员先后离开时代出版集团。又过了两三年，由于经营不善，辐化分公司停止运行。发展了二十几年的辐射化学产业在其巅峰时期戛然而止，令人十分遗憾！

令人欣慰的是，辐射化学技术生产的低温黏合剂和增稠剂由于性能优异，被国内印染行业所认可。早在20世纪80年代末和90年代初，辐射化学技术先后孵化出常熟辐照厂（现在的常熟市辐照技术应用厂的前身，目前年产值1亿元）和合肥常青低温粘合剂厂（现在的安徽联合辐化有限公司和安徽聚合辐化化工有限公司的前身，目前前者年产值4000万元，后者年产值2.2亿元）。2010年前后，低温黏合剂发明人张志成离开时代出版集团，来到安徽华晶新材料有限公司，与韩萍一起继续利用钴源辐照装置生产印染助剂和橡

胶乳液（目前年产值超2 000万元）。另外，原辐化分公司研发出的“科创美”牌内外墙乳胶漆在安徽科创美涂料科技股份有限公司得到发扬光大

（年产值8 000万元）。目前，国内以辐射乳液聚合生产高分子乳胶型产品的钴源辐照装置至少还有6座，分别属于4个公司，年产值达到4.6亿元。

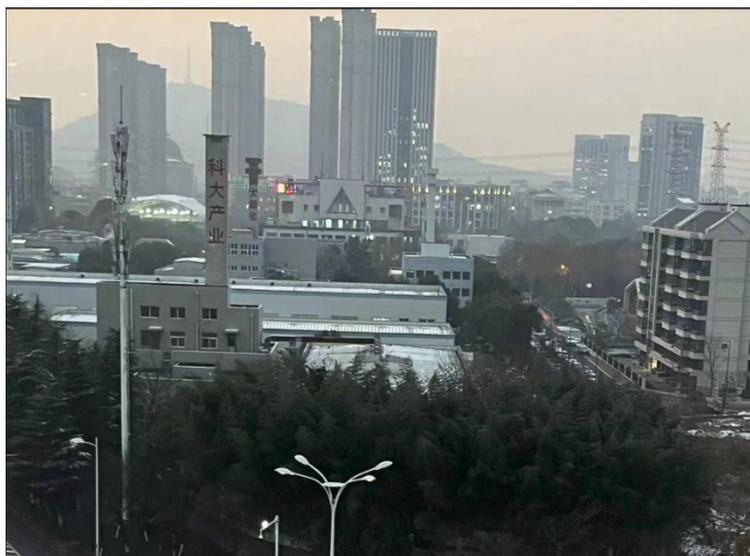


图6 科大创新辐化分公司原址(摄于2024年1月5日)

通过辐射乳液聚合制备高分子乳胶产品具有一定的特色，优势在于聚合反应几乎不受温度的影响，产品性能稳定，得到的聚合物的平均分子量比化学法生产的要高很多。作为纺织品印花黏合剂和水性漆类产品，低温牢度远胜于化学法同类黏合剂。辐射法生产的增稠剂，抗渗化性能远高于化学法生产的同类产品。但不足之处在于，按目前采用的辐射法生产工艺，每批的生产量2吨左右，一座钴源辐照装置每天只能生产10吨左右的产品。相比于化学法，辐射法生产的单位产量的成本要高一些。另外，辐射乳液聚合连续化生产比较困难，目前国内尚未能实现全封闭连续化生产。

基于利用钴源辐照装置研究开发的另一高技术产品是自限温电伴热带。它是将高聚物导电复合材料和辐射化学技术与电热技术结合起来的高效节能伴热产品。其核心功能材料由高分子导电复合物构成，是具有电阻率正温度系数（Positive temperature coefficient, PTC）效应的材料。材料的电阻随温度升高逐渐增大，当温度升到某狭窄温区，电阻率随温升急剧增加几个或几十个数量级，使材料显示出“开/关”的功能。它有自动调节发热温度，并根据环境温度变化自动调节输出功率的特性，从而能稳定被伴热系统的温度。通过辐射交联技术，使该高分子导电复合物产生

“电性能记忆效应”，获得电性能稳定、耐热性好、可长期稳定工作的伴热功能。

20世纪70年代，美国瑞凯公司（Raychem Corporation）利用辐射交联技术率先制造并推出自控伴热电缆系列产品 Raychem Tracer, Self-regulating heating Cables（国标GB/T 19835定名为“自限温电伴热带”）。我国80年代从美国引进，用于大型油田管道伴热保温。由于价格昂贵难以推广，遂列入石油部七五攻关项目。1984年石油部派人到中国科大请求协助，当时科研处联系胶体电化学教研室苏洪鈺和蒋淮渭两位老师，请他们承担该项目的研发任务。彼时辐射化学教研室钴源辐照装置刚建成不久，正好在该项目基础研究及样带研制过程中发挥了关键和不可替代的作用。该项目于1986年通过鉴定，并申请获得了两项国家发明专利和一项中国科学院科技进步奖二等奖（1989），为后面的产业开发提供了有力的技术支撑。随着我国自主研发制造的工业用高能电子加速器的推广应用，通过高能电子束辐射交联实现了自限温电伴热带的规模化生产和产品系列化，逐渐形成了自限温电伴热带产业集群。目前国内自限温电伴热带制造企业已发展到几十家，规模大的企业产值已远超亿元，相关的下游企业不计其数。国产自限温电伴热带已替代进口，在各行各业广泛应用，特别是在油田、海上钻井平台、

石化、化工、高铁、消防等领域发挥着重要作用。

除了基于钴源辐照装置开展的研究工作对社会做出了突出贡献之外，瞿保钧和施文芳还开展了高分子材料的紫外光交联和光固化的研究工作，也取得了不少创新性研究成果。其中较为突出的成果是发明了一种紫外光辐照交联聚烯烃绝缘电线电缆新技术。该新技术采用在线连续生产方式将配方料挤出成型，随即进行紫外光辐照，并在大气环境条件下即刻发生快速均匀的本体光化学交联反应来制备交联电线电缆新产品。从基础研究开始，依托一系列原始创新的技术发明，重点解决了紫外光引发交联聚乙烯绝缘电线电缆的材料配方、光交联电缆专用设备、光交联电缆生产线工艺流程等几个关键科学技术问题，取得了紫外光交联聚乙烯绝缘材料工业化应用于生产交联电缆新产品的重大突破，从而打破了我国电缆光交联技术历来依赖进口的历史。与企业合作先后研发了国内外首条紫外光交联聚乙烯电缆中试生产线、批量生产线和产业化规模生产线，成功应用于生产 10 kV 及以下光交联电力电缆、控制电缆和其他特种电缆等系列新产品，开创了一项具有国际领先水平、由我国自主开发、具有自主知识产权的原始创新技术，为我国交联电缆生产技术开拓了一条新途径。目前国内电缆企业已装备有数以百计的紫外光辐照交联电线电缆生产线。该项新技术的研发过程中已授权了 21 项中国专利，其中发明专利有 18 项，包含有一项国际 (PCT) 发明专利，实用新型专利 3 项。以中国科大为项目第一完成单位的中国科学院与/或省部级科学技术成果鉴定的项目有三项：1991 年中国科学院对“紫外光交联聚乙烯电线电缆新技术研究”作了科学技术成果鉴定 (中科院成鉴字 (91) 133 号)，其鉴定意见为“紫外光交联聚乙烯绝缘电缆材料制造新技术属国际首创。”1999 年 9 月中国科学院和铁道部对“紫外光辐照交联聚乙烯绝缘电力电缆和控制电缆新技术和新产品”的科学技术成果联合鉴定，由电缆行业专家和高分子材料科学院士、教授组成的鉴定委员会做出的鉴定意见是：“紫外光辐照交联聚乙烯绝缘电缆生产新技术为交联电缆生产开拓了一条新途径，处于国际领先水平”“研制的交联聚乙烯绝缘电力电缆和控制电缆新产品性能优异，可以投入批量生产。”国家自然科学基金委员会对该项技术创新成果以“紫外光

交联法及其在聚乙烯绝缘电缆工业应用的突破”为题刊登在 1999 年 12 月第三期简报上，上报中共中央、国务院、全国人大、全国政协及各部委局及有关部门。2007 年黑龙江省对“紫外光辐照交联聚乙烯绝缘 10 kV 及以下电缆和电缆材料新技术和新产品”项目的创新成果作了“国际领先水平”的鉴定意见，该成果同时又获得了黑龙江省“新产品新技术鉴定”验收证书 (黑经技术鉴字 (2007) 6 号)。

8 对辐射化学领域国内外学术交流的贡献

20 世纪 80 年代，国内从事辐射化学研究的单位屈指可数，主要有长春应化所、上海原子核所、北京大学、中国科大、上海科技大学 (现在的上海大学)、北京师范大学和上海化工研究院等单位。中国科大毕业的辐射化学专业的校友在长春应化所和上海应物所等单位成为科研骨干。中国科大在国内辐射化学教学和研究领域具有举足轻重的地位。因此，中国科大从 20 世纪 80 年代至今，承办了 4 次辐射化学领域的国内会议和国际会议。1986 年 10 月，承办了全国第三届辐射工艺学术讨论会 (屯溪)；2000 年 9 月，承办了全国第五届辐射研究与辐射工艺研讨会 (合肥)；2012 年 10 月，承办了第四届亚太辐射化学国际会议 (黄山)，会议举办得非常成功，给国内外学者留下了深刻的印象；2024 年 3 月，又承办了第十三届全国辐射化学与辐射技术应用研讨会 (合肥)，参会人员有学术界的科研人员，也有企业界同仁，会议的内容丰富多彩，受到参会人员的一致好评。

9 结束语

春华秋实四十载，满园桃李竞芬芳。钴源辐照装置作为科学研究的手段之一，为我国辐射化学领域的人才培养和社会经济价值的创造做出了巨大贡献。在该辐照装置即将退役之际，中国科大宣传部桂运安带领白柠语和林思纯同学采访并撰写了《探访中国科大钴源装置》一文，在安徽日报^[2]和中国科学报^[5]做了深度专题报道，被学习强国、中安在线和校官方微信公众号、校友总会微信公众号等 14 家媒体转载。据悉，学校决定由核科学技术学院在合肥天都校区重新建造钴源辐照装置，期待尽快落实。

中国科大辐射化学学科经过 66 年的发展，为

学校的学科建设和社会服务做出了重要贡献, 参加辐射化学学科建设和钴源建设的杨承宗、张曼维、章吉祥、奉孝伦、袁致俭、施文芳、孙廷恒和蒋淮渭已先后离开了我们, 当年参加钴源建设的其他老师也都退休多年, 他们为辐射化学学科发展做出的贡献永留史册, 令人怀念。今天, 中国科大的辐射化学学科又注入了很多新鲜血液, 并加强了与国外大学的学术交流。与此同时, 自屏蔽电子加速器科研装置应用于辐射化学研究工作也已在中国科大逐步展开。希望我们的青年学者继承中国科大的光荣传统, 赓续前行, 再创辉煌。

致谢 本稿的撰写得到了李希明、刘占军、方月娥、林铭章、刘和文、刘华蓉、汪谟贞、韩萍、陈文(安徽华晶新材料有限公司)、夏旭珍(常熟市辐照技术应用厂)、胡中青(安徽聚合辐化化工有限公司)、孙磊(安徽联合辐化有限公司)、周先林(安徽科创美涂料科技股份有限公司)和王尚飞等同志的帮助。李希明、刘占军、方月娥、林铭章、刘和文、刘华蓉和汪谟贞对文章进行了细致的修改, 并提出了很好的建议。特别是李希明老师撰写了自限温电伴热带部分内容, 并对全文进行了系统调整和修改, 在她的建议下, 将文章题目《钴源辐照装置四十年历史回顾》修改为

《辐射化学学科建设与发展历史回顾》, 使我们对中国科大辐射化学的发展脉络更加清晰和全面。在撰写过程中得到了校档案文博院兰荣和她的同事们的大力支持。在此特别致谢!

限于作者的水平和资料收集的困难, 定会有不准确和遗漏之处, 恳请多多指正。

参考文献

- 1 辛厚文. 中国科学技术大学化学与材料科学五十年[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.
- 2 桂运安, 白柠语, 林思纯. 探访中国科大钴源装置[N]. 安徽日报, 2022-07-12(12).
- 3 Fang F, Sun X, Liu Y X, *et al.* Water radiocatalysis for selective aqueous-phase methane carboxylation with carbon dioxide into acetic acid at room temperature[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2024, 146(12): 8492-8499. DOI: 10.1021/jacs.3c14632.
- 4 Wang Y W, Bao Z W, Ding S, *et al.* γ -ray irradiation significantly enhances capacitive energy storage performance of polymer dielectric films[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(16): 2308597. DOI: 10.1002/adma.202308597.
- 5 桂运安, 白柠语, 林思纯. 探访中国科大钴源装置[N]. 中国科学报, 2022-07-14.