

创新者的报告

(第2集)

中国科学院综合计划局 编

科学出版社

2000

内 容 简 介

中国科学院是我国国家创新体系的重要组成,是国家知识创新系统的核心部分之一,于1998年开展了知识创新工程试点工作。本书收录了中国科学院1998年以来取得的一批科技成果或重大阶段性进展,内容包括数学、物理学、化学、天文学、地学、生物学、技术科学及其有关交叉学科等方面内容。

本书可供具有大专以上文化程度的有关人员阅读参考。

创新者的报告

(第2集)

中国科学院综合计划局 编

责任编辑 彭克里

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2000年11月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2000年11月第一次印刷 印张:15 1/2

印数:1—2 500

字数:238 000

ISBN 7-03-008950-2/N·106

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)



前言

Preface

创新是人类社会进步和经济发展的动力和源泉。知识创新是指通过科学研究包括基础研究和应用研究获得新的自然科学和技术科学知识的过程。知识创新的目的是追求新发现,探索新规律,创造新方法,积累新知识,知识创新是技术创新的基础,是新技术和新发明的源泉。知识创新为人类认识世界、改造世界提供新理论和新方法,为人类文明进步和社会发展提供不竭的动力。在 21 世纪初,面临着知识经济时代的到来,建立国家创新体系是经济和社会可持续发展的基础和引擎,是综合国力和国际竞争力的支柱和后盾。如果把国家创新体系比作知识经济的动力系统,那么可以把创新知识比作其动力系统的燃料。正如江泽民主席指出:“科技的发展,知识的创新,越来越决定着一个国家、一个民族的发展进程。”

中国科学院是我国国家创新体系的重要组成,是国家知识创新系统的核心部分之一。在党中央、国务院和国家科技领导小组的领导及有关部门的大力支持下,我院从世界科技发展趋势和国家经济与社会发展的战略需要出发,在院所两个层次凝炼和提升科技创新目标,开始进行了建院 50 年来涉及面最广、意义最为深远的科学布局和组织结构调整,开展了深层次的、大力度的体制和机制改革,显著提高了科技竞争能力,有力地调动了科技人员的积极性,推动了科技创新的快速进展。

中国科学院创新工程试点工作 1998 年启动以来,取得了良好的开端,得到了社会各界的广泛关心与理解。为了加强创新知识的传播,同时也为了答谢各界对中国科学院的支持以及增加对我院科技创新工作进展的了解,我们对 1998 年实施创新工程试点工作以来取得的科技创新成果或重大阶段性进展进行了整理,编辑成《创新者的报告》系列书,陆续出版。

《创新者的报告》系列书属于科技创新成果或重大阶段性进展的简单介绍,不属于论文,为了节省篇幅,我们在编辑过程中,把参考文献都省略



了。读者欲了解哪项成果的详情，可与中国科学院综合计划局成果专利处联系或直接与撰写者单位联系。

在本书编辑过程中，得到了中国科学院有关部门、各研究所的领导、管理人员、科技人员的大力支持，尤其是报告的撰写者在科研工作的百忙中抽出时间为本书撰稿，在此，我们一并表示衷心感谢。

由于编写时间仓促和我们水平有限，书中谬误之处一定不少，敬请读者不吝指正。

编 者



高分子凝聚态的若干基本物理 问题研究

Study of Some Basic Physical Problems in the
Macromolecular Condensed State

撰稿/沈德言(化学研究所)

一、序言

高分子材料(诸如我们所熟知的合成纤维、橡胶、塑料、树脂等)在国民经济中的重要性,无论从其产量(世界年产量超过 1 亿 t)、应用面之广(衣食住行到各高技术领域)、从事人员之多(约占从事研究和生产化学工作者的半数)都是人所共知的。高分子材料是由众多的高分子链凝聚而成,但在以往的研究中大多仅从单一分子链的几何因素考虑,没有触及到问题的本质。因而许多重要问题的基本概念至今还缺乏全面的理解或可能有错误,影响了高分子科学的进一步发展。无论从高分子科学的创新,还是高分子材料的开发应用都迫切需要对高分子凝聚态的一些基本物理问题进行深入的研究。

在钱人元院士主持下,由中国科学院化学研究所、长春应用化学研究所、复旦大学、南京大学等全国 10 余所科研单位组成的项目组,以高分子链单元的相互作用特别是链单元间的相互吸引在凝聚态形成过程中的作用这一国际上独创的观点出发,纵贯高分子的全部相态——高分子溶液、非晶态、晶态和液晶态中存在的问题,开展了深入系统的研究工作(见图 1)。

二、取得的主要成果

经过 10 余年不懈的探索,本项目取得了若干国际前沿性的研究成果。
如:

INNOVATORS' REPORT



(1) 在国际上首先开辟高分子单链凝聚态的研究的新领域。该方面的研究包括单链玻璃态和单链单晶两个主要方面。在单链玻璃态研究中,发现高分子的极稀溶液经冰冻后,链内的凝聚缠结导致线团塌缩成紧缩球粒。但是将溶液升温到一定温度后,线团尺寸又恢复到冰冻前的值,说明分子线团的凝聚缠结又再解开,从而否定了文献中已有 20 年历史的所谓高分子冰冻降解的观点。在单链单晶研究中,制备了多种高分子单晶,观察到了单晶的电子衍射图,发现它们的分子链均竖立于基底膜(碳膜)表面,分子动力学模拟出了链段竖直有序化过程,说明链段的横向凝聚在结晶过程中起了重要作用。

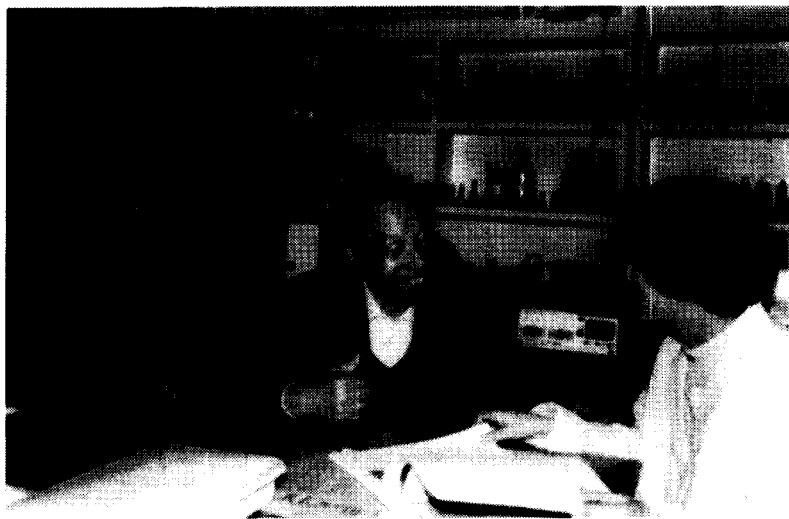


图1 钱人元院士(中)与研究组讨论工作

(2) 提出了高分子链的凝聚缠结新概念,得到多种实验证实。并从分子水平上来认识其对高分子材料性能的影响,很好地解释了非晶态高聚物的物理老化、应力屈服峰等多种重要物理现象的本质。

(3) 首次从实验上证实了柔性链高聚物的分子链大尺度高度取向而小尺度无规取向的取向非晶态的存在,解释了形成机理,并揭示了其特性。对取向态高分子材料(如纤维、薄膜)的加工和性能预测有重要的指导意义。

(4) 提出了从极稀溶液到稀溶液的分界浓度——动态接触浓度 C_s 的新概念,已得到多种实验证实,可以很好地解释稀溶液的性质。

(5) 揭示了向列性液晶态条带织构的本质,发现了主链向列液晶态的固化诱导条带织构(图 2),用凝聚的观点来解释液晶高分子的结构特性。

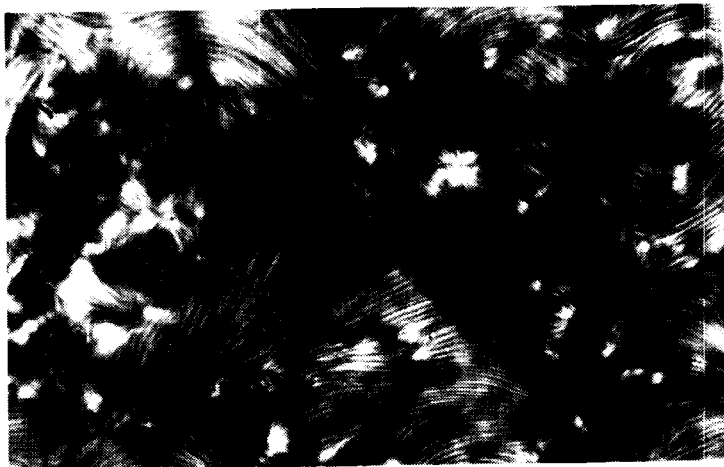


图2 用固化诱导条带织构装饰高分子液晶向列相向错的偏光显微照相

(6) 推导了一个能合理描述玻璃化转变温度和高分子链刚性程度之间定量关系的理论公式。理论预测和十几种高聚物的实验数据能很好吻合。

(7) 提出了高分子溶液中分子链具有链构像和平动两个自由度的概念，改进和发展了 Flory-Huggins 理论，把 de Gennes 散射函数与 Flory 自由能理论很好地统一起来。

三、成果的水平及意义

1996 年我们在北京首次举办了 IUPAC 国际高分子凝聚态物理学术会议，有来自美、德、英、日、意、韩等国的著名高分子科学家出席。会议上，我们在高分子凝聚态研究中得到的几个重要进展和学术观点获得了国际同行的认同。在总结发言中，德国著名的高分子物理学家 Fischer 谈到这次会议的学术水平很高，涉及了广泛的研究领域，对中国科学家的贡献留下了深刻的印象。英国的科学家 Windle 谈到这次会议反映中国有很强的高分子物理研究力量。

仅根据美国科学情报所出版的《科学引文索引》(SCI)检索的结果，本项研究所发表的论文被国际学术期刊引用达 314 次(截至 1998 年 10 月)。我们的研究成果对国内、外高分子物理研究有着较为广泛的影响。如《聚合物科学大全》(*Comprehensive Polymer Science*)的主编邀请我们撰写有关“高分子单链凝聚态”，作为其中一章。有许多作者在发表的论文中引用我们的观



点和实验结果。有些作者引用我们的观点作为他们实验结果的解释，也有一些作者根据我们的理论公式推导的结果来验证他们的实验数据。

以著名科学家唐敖庆为首的专家组一致认为：本项目取得了丰硕的研究成果，在分子物理领域提出了一些新概念，并得到了实验上有力的验证，也获得了国际上权威同行的认同。本项目的完成加速形成了有我国特色的高分子物理学学派，在国际高分子界已获得了应有的地位，并培养了一支包括中青年的研究队伍。

本项目的研究成果为高分子科学发展作出贡献，并对高分子材料的分子设计和开发应用提供了坚实的理论基础。于 1998 年获中国科学院自然科学奖一等奖，1999 年获国家自然科学奖二等奖。



微重力条件下钯系合金的凝固

Solidification of Pd-Based Alloys under Microgravity

撰稿/战再吉(物理研究所)

一、目的与意义

随着航天技术的发展,空间应用研究也取得了很大进展,由于在微重力条件下材料制备过程的特殊性,空间材料科学成为目前国际上比较活跃的研究领域。与国际空间技术大国相比,我国虽然在这方面起步较晚,投资力度也有很大差距,但是能够很好地把握发展方向,取得了一系列具有自主知识产权的科技成果,在某些方面已经达到国际领先水平。

在微重力条件下,由于重力诱发产生的沉降、浮力对流和静压梯度等基本上被消除,热和熔质的传递过程主要受扩散过程控制,凡是与流体相关的物理过程无不因此而发生显著变化。因此,人们把在地面上难以弄清的许多材料科学问题的解决都寄希望于空间实验,如晶体中因浮力对流而产生的生长条纹、化学配比的偏离、比重偏析中由于比重差而引起的液相分离等,同时希望在空间获得地面上难以得到的组织状态和使用性能。从 20 世纪 80 年代开始,研究工作由原来的以很快实现空间产业化为目标转向以探索科学规律为主的空间材料加工研究上来,侧重以微重力研究规律指导地基生产工艺为宗旨,普遍采用“空间”、“地基”相结合的方式发展微重力科学。尤其对空间环境下表面张力驱动对流、器壁形核对凝固过程的影响,人们有了更深入的了解,认识到解决上述问题是进一步发展空间材料科学的一个关键所在。

为了更好地发展我国的空间微重力材料科学,在考察了西方发达国家微重力实验设施的基础上,根据国家技术发展战略,我们通过建立自己的地基模拟实验设施(包括落管、可转动组合式定向凝固梯度炉等),广泛、深入地开展地面短时微重力效应及重力场效应对凝固过程影响的研究,以实现最



终的空间凝固实验，获得纯扩散控制的凝固过程，验证经典理论，发现新现象，指导地面材料加工工艺的合理制定，获得新的凝固组织和独特的使用性能。

二、成果内容与创新

本项目研究组以易形成非晶的钎系合金为对象，采用自制的国内第一台实验室落管，在国际上首次成功地获得了钎系合金块体金属玻璃。利用分形分析方法从全新的角度研究了凝固过程组织的演化规律。在国际上首次提出了助熔剂净化液体合金样品的物理机制。在大量地基实验的基础上，在国际上首次提出了在空间使用助熔剂技术研究合金凝固工艺问题的创新思想，在空间实验中成功地抑制了表面张力驱动对流和器壁形核的影响，获得了国内空间合金搭载实验成功率最高的结果，这项技术比国际上同类实验早 5 年。根据地-空对比实验，首次定量评价了浮力对流对固-液界面前沿溶质原子传输能力的贡献。

该项目的实验为我国“863”等空间项目的顺利完成做出了极其重要的贡献。专家鉴定认为“该项目在多方面研究均有创新，具有国际先进水平”。其研究成果在我国空间站模样以及工业生产中得到了广泛应用，同时取得了显著的社会与经济效益。

在进行科学研究的过程中，我们选择了钎系合金作为研究体系，由于这种合金在凝固过程中容易形成金属玻璃，而金属玻璃具有高强度、高韧性、高耐磨性、高抗腐蚀性及其他优异的物理、化学特性，因而受到凝聚态物理界的特别关注，其研究正在步入商业化阶段。以往，人们通常采用液态急冷、气相沉积或激光淬火等快速凝固技术制取金属玻璃。但是，由于这些方法均受到器壁引起的非自发形核以及重力引起的浮力对流的影响，难以制备出高质量的块体金属玻璃，因而大大限制了它的应用与开发。微重力环境下的无容器凝固避免了合金熔体由于容器壁引起的非自发形核过程，抑制了重力引起的浮力对流的作用，使得合金熔体可以达到更大的过冷，从而有可能制备出高质量块体金属玻璃。钎镍磷、钎金硅等钎系合金具有很大的非晶形成能力，其熔体易于达到深过冷并形成块状的非晶体，更重要的是凝固过程中，其晶体凝固速度很慢，从而使得人们有机会利用这种材料来探索由熔



质传递控制的晶体生长过程。

1. 地面短时微重力条件下的落管凝固实验研究

空间实验的费用昂贵且机会难得，难以进行大规模的合金凝固研究。在地面上通过飞机抛物线飞行、落管等方法可以方便地进行大量的短时微重力凝固研究。因此，地面模拟实验一直是开展微重力凝固研究的不可缺少的重要手段，它也是空间实验的基础，我们的总体设想就是在大量、坚实的地面实验基础上在空间实现纯扩散控制的合金凝固过程。

应用最广泛的地面短时微重力实验设备是落管，一方面落管可以用于研究地面短时微重力及无容器条件下合金的凝固特征，发现新的凝固现象，探索微重力和无容器条件下的凝固规律；另一方面它还可以为空间微重力条件下合金凝固实验提供地面预研和对比结果，有利于我们为空间实验进行样品筛选、制定工艺路线。更加重要的是，利用落管产生的微重力和无容器工艺这样独特的实验条件还可获得非晶固化过程。

我们成功地建立了国内第一台实验室落管，其微重力水平($10^{-6}g$)、样品加热手段、样品收集方法等均为国际先进水平，此后的 20m 落管也是在改进实验室小落管的基础上建立的。利用落管研究了 $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ 、 $Pd_{43.5}Ni_{43.5}P_{13}$ 及 $Pd_{77.5}Au_6Si_{16.5}$ 等合金样品在下落过程中凝固特征，研究了在不同冷却速度、不同样品尺寸条件下的组织演化过程。在国际上首次在落管中成功地获得了块状钎系金属玻璃，过冷度达到该合金熔点绝对温度的 0.67，是国际上最高水平；同时采用分形方法定量描述了凝固组织形态，探索了枝晶形态的变化规律，为空间实验作好地面准备工作。

2. 地面助熔剂包裹凝固实验研究

为配合空间助熔剂包裹实验，进行了地面助熔剂包裹凝固实验。首先研究了助熔剂净化的物理机制，并据此选择了 B_2O_3 作为钎系合金的助熔剂，对钎镍磷、钎金硅等合金样品进行凝固过程中的包裹处理。利用助熔剂对样品进行净化处理，是实现深过冷和细化组织的行之有效的方法。通过该实验，一方面可制备金属玻璃样品，研究非晶固化过程，另一方面可为空间使用助熔剂技术作好技术准备。采用 B_2O_3 等低熔点玻璃为助熔剂，在加热过程中它先于样品熔化并包裹样品，当样品熔化后被包裹在液态助熔剂中。



因此，在冷却过程中样品是在液态助熔剂包裹之下凝固的。凝固过程中助熔剂不仅对样品进行了净化处理减少了非自发形核源，而且还克服了器壁效应，经反复加热→冷却→加热→冷却循环处理，还可以得到深过冷相和亚稳相。同时进一步实现大体积熔体无容器凝固工艺，为大块金属玻璃的制造提供可能，得到可能包括更高的纯度，材料组织结构及其性能均匀的新成分的金属玻璃。我们采用该技术在地面上制备出直径 3mm 的非晶合金球，在此基础上首次提出了助熔剂净化液体合金的物理机制，这一创新理论受到了同行专家们的关注。

3. 结合助熔剂技术的空间凝固实验研究

在空间虽然可以方便地抑制重力诱发的浮力对流的影响，但如何克服器壁形核和因此存在自由表面而产生的表面张力驱动对流的不利作用一直是困扰空间材料科学家 30 余年的最为头疼的问题。将助熔剂技术用于空间凝固实验很好的解决了上述难题，当然，这需要解决诸如助熔剂的选择、存在助熔剂时的样品封装及温度准确测量等诸多关键技术难题。

在空间使用助熔剂技术研究合金的凝固过程在国际上是一个创新之举，空间环境提供的微重力条件可克服浮力对流对凝固的影响，助熔剂又可抑制表面张力驱动对流和器壁形核的不利作用，降低了非均匀成核率，因此采用合理的研究对象可以最终获得真正由纯扩散控制的合金凝固过程。我们这方面的研究工作比国外科学家利用同类实验方法(德国科学家利用美国航天飞机进行的 D-2 飞行任务)的研究工作早 5 年。鉴于空间实验机会难得、费用昂贵，在大量地基实验基础上，解决了真空封装、测温、助熔剂与样品和器壁反应等关键技术，成功地在卫星搭载实验中使用助熔剂技术，抑制器壁形核和表面张力驱动对流的影响，实现了纯扩散控制的合金凝固过程，属国际首创。图 1 为空间实验样品的真空封装图。

在国际上首次定量评估了浮力对流对合金固-液界面前沿溶质原子传输能力的贡献，给出了相同过冷度条件下，自然对流引起的物质传输系数与微重力条件下近纯扩散物质传输系数的定量关系，取得了微重力条件下合金凝固实验的突破性研究成果。

$$\frac{D_{\text{Lncon}}}{D_{\text{L}\mu g}} = 1.64$$

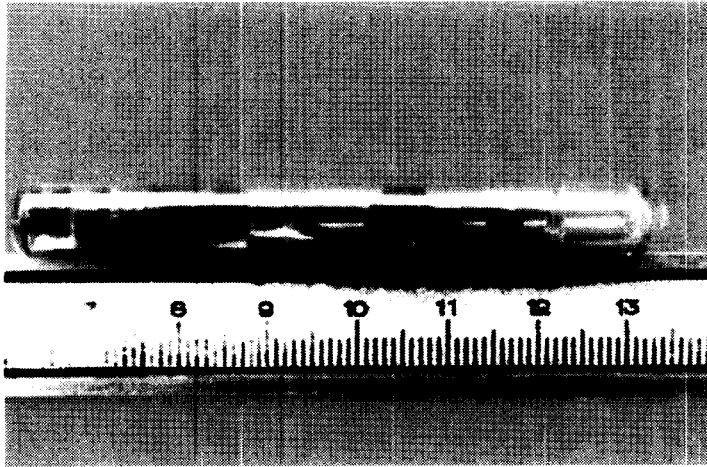
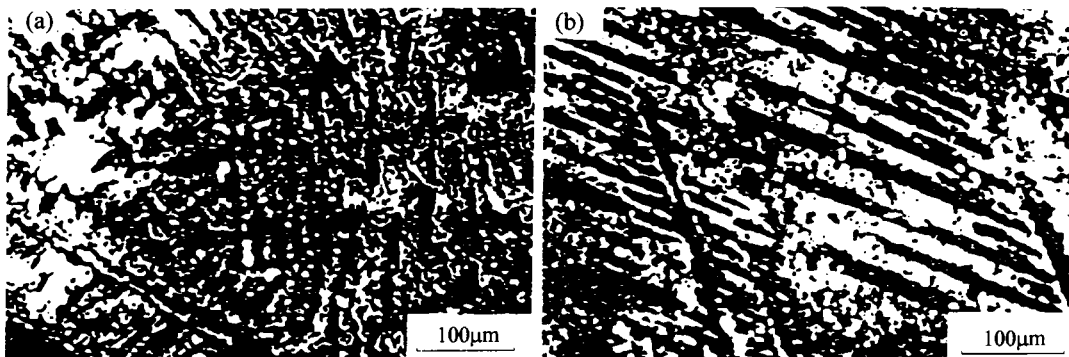


图1 空间实验样品的真空封装

其中： D_{Lncon} ：自然对流引起的物质传输系数；

$D_{L\mu g}$ ：微重力条件下近纯扩散物质传输系数。

图2为不同微重力条件下 $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ 合金的凝固组织，仔细观察其微重力条件下生长的树枝晶比较细小，而同样条件下地面样品的树枝晶则比较粗大。

图2 不同微重力条件下 $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ 合金的凝固组织

(a) μg ; (b) $1g$

另外在进行科学研究的同时，建立了一系列先进、独具特色的空间材料加工基地实验设施。



三、成果与应用

本项目利用易形成非晶的钚系合金系统为研究对象，通过地面短时微重力条件、助熔剂技术、空间卫星搭载等手段进行了深入、系统的研究，取得了突破性科学研究成果，顺利地完成了“863”、“中国科学院重中之重”、“中德国际合作研究”等项任务。获得了中国科学院科技进步一等奖和国家科技进步二等奖。新颖的科学构思、先进的技术方 案、丰富的实验结果均受到国际同行瞩目，为我国下一步利用美国航天飞机、我国宇宙飞船和未来空间站开展合金凝固奠定了坚实基础，并对于正确认识并合理利用空间资源作出了重要贡献。此外，本项实验研究与理论探索对于指导地面重力条件下的凝固组织控制及亚稳材料的制取起到了非常重要的作用。可转动式梯度炉及控温系统已经推广到我国空间站模样中，并且是该模样中惟一的材料加工实物演示系统，为训练宇航员和未来空间站工程上开展凝固实验提供了可靠的硬件准备。另外一些实验设备的研究成果，也在加热炉工业中取得了初步经济效益。在进行科学研究的同时，发表相关的高水平学术论文 50 篇，论著 3 部，被国际著名期刊和文献检索系统广泛摘录和引用 72 篇次。其中被 SCI 引用 20 次，21 篇文献被 SCI 收录，31 篇文献被 EI 收录。



离子束在生命科学中应用 取得重大进展

Application of Low Energy Ion Beam to
Life Science

撰稿/余增亮(等离子体物理研究所)

一、序言

中国科学院等离子体物理研究所的科研人员将选择过的离子加速注入到生物体内,发现离子注入后的水稻如同搭乘阿波罗飞行的玉米一样,叶片上出现了黄色的条纹(图 1)。人们称这类现象为离子注入生物效应。这一现象的发现,立即得到科学家、特别是农学家们的关注,纷纷投入该项研究,开辟了离子束在生命科学中应用的新领域,促进了物理学与生物学的交叉。低能离子生物学从这里诞生、发展并走向世界。进入中国科学院知识创新工程以来,机理研究奠定了这一交叉领域的基础,在国际前沿占有一席之地;应用研究取得了十多项新技术新成果;技术传播和成果推广获得了重大社会、经济效益。同时培养出一批优秀的青年人才。

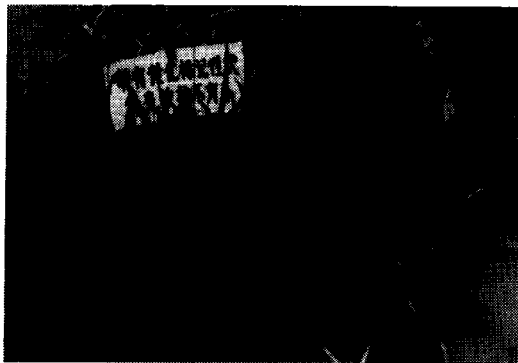


图 1 离子注入诱变产生的水稻黄化突变体,
已将黄化基因作为标记性状转入光敏核不育系。



二、机理研究取得重大进展

1. 低能离子与生命化学起源

为了解释离子注入生物效应的机理, 研究人员选择离体有机小分子为对象模拟离子注入生物体后与生物分子的作用, 发现离子注入有机分子可引起样品原子移位和重排, 最终形成新的化合物。特别是氮离子注入不含氮元素的乙酸形成甘氨酸给予人们很大启示: 低能离子与生命化学起源可能存在某种联系。分析表明, 在原始地球大气中, 由于雷电、火山爆发、地壳放射性元素的衰变, 都可能产生低能离子。我所科研人员证实: 模拟原始大气组分离子, 如 N_2 、 CO_2 、 CO 、 CH_4 等离子注入水, 可形成丰富的有机分子; 离子注入有机分子, 只要实验系统中有氮参与, 不管氮元素是有机分子中所含有成分还是来自注入离子, 都有一定的概率形成带有氨基的有机分子, 有的还可以形成氨基酸和碱基的前体, 提示原始大气离子在生命化学起源中(如氨基酸、碱基的形成)起了重要作用。这种作用可以发生在海洋、陆地, 也可以发生在大气中, 再落入海洋。这就增加了人们对生命化学起源途径的认识。1998 年 3 月, 日本召开生命起源国际会议, 邀请中国科学院等离子体物理研究所就低能离子在生命化学起源和星际分子形成中的作用做“邀请报告”, 会上德国科学家评论说: “你们用一个简单的实验模型, 演示了生命化学起源的复杂过程”。

2. 单个离子对细胞核、质的诱变作用

在现代居室环境中, 氡气及其子代衰变产生的 α 粒子(一种低能氮离子)占人体接受的有害辐射总量的 55%以上。为了精确估价低剂量环境氡气暴露对人体的影响, 我所与美国哥伦比亚大学联合培养的博士生吴李君, 利用单粒子微束装置研究 α 粒子对细胞核和细胞质的诱变作用。1997 年、1999 年, 吴李君在美国《国家科学院院刊》上连续发表两篇论文, 不仅回答了辐射位点敏感性的长期争论, 而且为估价环境中低剂量氡气辐射危害性提供了基本的生物学数据。更重要的是, 他发现单粒子束照射细胞质能引起核基因的突变, 揭示了细胞近旁效应, 说明了损伤信号在细胞中的传导。《国家科学院院刊》等刊物为此发表 7 篇评论, 认为: “这些结果显示, 美国每年



15 000 名肺癌死亡病人可能确因室内氡气所致，室内氡气可能是一个严重的健康问题”；“该成果直接挑战组织中只有核被照射的细胞才处于危险状态的理论，对评价低剂量辐射的模型发展有着广泛的意义”；“吴的发现，以及在近旁效应方面不断增加的文献，证明遗传和癌变损伤目标的假设现在需要重新考虑”。

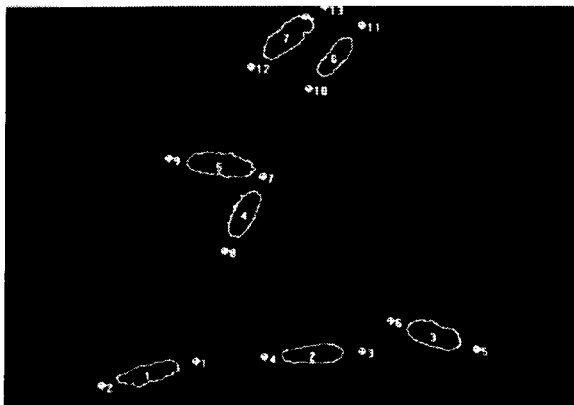


图2 单粒子束照射细胞质引起核基因突变。图中白线围成的是细胞核。
小圆点代表粒子在细胞质上的入射位置，距细胞核 $8\mu\text{m}$ 。

3. 低能离子与生物体系相互作用研究

低能离子与生物体系相互作用是一个复杂的过程。从离子注入那一时刻起到终点生物学效应，时间跨越 $10^{-19}\sim 10^9\text{s}$ ，经历物理、化学和生物学阶段；空间从微观生物分子损伤到宏观性状的表现，其效应不知放大了多少倍。要弄清这样宽广的时空域内发生的过程，确是一个困难的课题。中国科学院等离子体研究所的研究人员从原初物理过程分析入手，提出低能离子质(量)、能(量)、电(荷)三因子联合作用引起生物效应的观点，不断得到实验的证实。因子的复杂性必然导致效应的特异性。实验发现，生物存活与离子注入剂量的关系呈现先降后升再降的“马鞍型”曲线，与 γ 射线辐照情况下的指数衰减存活剂量曲线有本质的差异。这一奇异现象后被国外科学家所证实。我所科研人员提出的注入离子在作物干种子内长程穿射的假说，近两年也被众多的实验所证实。这些开创性的研究工作受到国内外学术界的关注，为离子束生物工程学的发展奠定了基础。