



黄祖洽 编著

射线束 和材料改性



清华大学出版社



暨南大学出版社

(京)新登字 158 号

图书在版编目(CIP)数据

射线束和材料改性/黄祖洽著. -北京:清华大学出版社;广州:暨南大学出版社,2002

(院士科普书系/路甬祥主编)

ISBN 7-302-05264-6

I. 射… II. 黄… III. ①射线理论-普及读物 ②射线理论-应用-金属材料-改性-普及读物

IV. 0572-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 006840 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

暨南大学出版社(广州天河,邮编 510630)

<http://www.jnu.edu.cn>

责任编辑: 宋成斌

印 刷 者: 北京鑫丰华彩印有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 850×1168 1/32 印张: 6.375 字数: 122 千字

版 次: 2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-05264-6/G·243

印 数: 0001~5000

定 价: 15.00 元

《院士科普书系》编委会(第二届)

编委会名誉主任 周光召 宋 健 朱光亚

编委会主任 路甬祥

编委会委员 (两院各学部主任、副主任)

陈佳洱	杨 乐	闵乃本	陈建生	周 恒
王佛松	白春礼	刘元方	朱道本	何鸣元
梁栋材	卢永根	陈可冀	匡廷云	朱作言
孙 枢	安芷生	李廷栋	汪品先	陈 颢
王大中	戴汝为	周炳琨	刘广均	杨叔子
钟万勰	关 桥	吴有生	刘大响	顾国彪
陆建勋	龚惠兴	吴 澄	李大东	汪旭光
陆钟武	王思敬	朱建士	郑健超	胡见义
陈厚群	陈肇元	崔俊芝	张锦秋	刘鸿亮
方智远	旭日干	周国泰	王正国	赵 铠
钟南山	桑国卫			

编委会执行委员 郭传杰 常 平 钱文藻 罗荣兴

编委会办公室主任 罗荣兴(科学时报社)

副主任 周先路(中国科学院学部联合办公室)

白玉良(中国工程院学部工作部)

蔡鸿程(清华大学出版社)

周继武(暨南大学出版社)

总 策 划 罗荣兴 周继武 蔡鸿程

总 责 任 编 辑 周继武 蔡鸿程 宋成斌

提高全民族的科学素质

——序《院士科普书系》

人类走到了又一个千年之交

人类的文明进程至少已有 6000 余年。地球上各个民族共同创造了人类文明的灿烂之花。中华文明同古埃及文明、古巴比伦文明、古印度文明、古希腊文明等一起,是人类文明的发源地。

15 世纪之前,以中华文明为代表的东方文明曾遥遥领先于当时的西方文明。从汉代到明代初期,中国的科学技术在世界上一直领先长达 14 个世纪以上。在那个时期,影响世界文明进程的重要发明中,相当部分是中华民族的贡献。

后来,中国逐渐落后了。中国为什么落后?近代从林则徐以来许多志士仁人就不断提出和思索这个历史课题。但都没有找到正确的答案。以毛泽东同志、邓小平同志为代表的中国共产党人作出了唯一正确的回答:中国落后,是由于生产力的落后和社会政治的腐朽。西方列强对中国的欺凌,更加剧了中国经济的落后和国家的衰败。而落后就要挨打。所以要进行革命,通过革命从根本上改变旧的生产关系和政

治上层建筑,为解放和发展生产力开辟道路。于是,就有了 80 多年前孙中山先生领导的辛亥革命,就有了 50 年前我们党领导的新民主主义革命的胜利,以及随后进行的社会主义革命的成功。无论是革命还是我们正在进行的社会主义改革,都是为了解放和发展生产力。

邓小平同志提出的“科学技术是第一生产力”的著名论断,使我们对科学技术在经济和社会发展中的地位与作用的认识,有了新的飞跃。我们应该运用这一真理性的认识,深刻总结以往科学技术发展的历史经验,把我国科技事业更好地推向前进。中国古代科技有过辉煌的成果,但也有不足,主要是没有形成实验科学传统和完整的学科体系,科学技术没有取得应有的社会地位,更缺乏通过科技促进社会生产力发展的动力和机制。为什么近代科学技术首先在文艺复兴后的欧洲出现,而未能在我国出现,这可能是原因之一吧。而且,我国历史上虽然有着伟大而丰富的文明成果和优良的文化传统,但相对说来,全社会的科学精神不足也是一个缺陷。鉴往开来,继承以往的优秀文化,弥补历史的不足,是当代中国人的社会责任。

在新的世纪中,中华民族将实现伟大的复兴。在一个占世界人口五分之一的发展中大国里,再用 50 年的时间基本实现现代化,这又是一项惊天动地的伟业。为实现这个光辉

的目标,我们应该充分发挥社会主义制度的优越性,坚持不懈地实施科教兴国战略。

科教兴国,全社会都要参与,科学家和教育家更应奋勇当先,在全社会带头弘扬科学精神,传播科学思想,倡导科学方法,普及科学知识。科教兴国也要抓好基本建设。编辑出版高质量的科普图书,就是一项基本建设,对于提高全民族的科学素质,是很有意义的。在《院士科普书系》出版之际,写了上面这些话,是为序。

A handwritten signature in black ink, reading '江泽民' (Jiang Zemin), written in a cursive style.

1999 年 12 月 23 日

人民交给的课题

——写在《院士科普书系》出版之际

世界正在发生深刻的变化。这一变化是 20 世纪以来科学技术革命不断深入的必然结果。从马克思主义的观点看来,生产力的发展是人类社会发展与文明进步的根本动力;而“科学技术是第一生产力”,因此,科学技术是推动社会发展与文明进步的革命性力量。从生产力发展的阶段看,人类走过了农业经济时代、工业经济时代,正在进入知识经济时代。

知识经济时代,知识取代土地或资本成为生产力构成的第一要素。知识不同于土地或资本,不仅仅是一种物质的形态,知识同时还是一种精神的形态。知识,首先是科学技术知识,将不仅渗透到生产过程、流通过程等经济领域,同时还将渗透到政治、法律、外交、军事、教育、文化和社会生活等一切领域。可以说,在新的历史时期,一个国家、一个民族能否掌握当代最先进的科技知识以及这些科技知识在国民中普及的程度将决定其国力的强弱与社会文明程度的高低。科技创新与科普工作是关系到一个国家、一个民族兴衰的

大事。

对于我们科技工作者来说,我们的工作应当包含两个方面:发展科技与普及科技;或者说应当贯穿于知识的生产、传播及应用的全过程。我们所说的科普工作,不仅是普及科学知识,更应包括普及科学精神和科学方法。

我们的党和政府历来都十分重视科普工作。党的十五大更是把树立科学精神、掌握科学方法、普及科技知识作为实施科教兴国战略和社会主义文化建设的一项重要任务提到了全党、全国人民和全体科学工作者的面前。

正是在这样的背景下,1998年春由科学时报社(当时叫“中国科学报社”)提出创意,暨南大学出版社和清华大学出版社积极筹划,会同中国科学院学部联合办公室和中国工程院学部工作部,共同发起《院士科普书系》这一重大科普工程。

1998年6月,中国科学院与中国工程院“两院”院士大会改选各学部领导班子,《院士科普书系》编委会正式成立,各学部主任均为编委会委员。编委会办公室在广泛征求意见的基础上拟出150个“提议书目”,在“两院”院士大会上向1000多名院士发出题为《请科学家为21世纪写科普书》的“约稿信”,得到了院士们的热烈响应。在此后的半年多时间里,有176名院士同编委会办公室和出版社签订了175本书的写作出版协议,开始了《院士科普书系》艰辛的创作过程。

《院士科普书系》的定位是结合当代学科前沿和我国经济建设与社会发展的热点问题，普及科技知识、科学方法。科学性、知识性、实用性和趣味性是编写的总要求。

编写科普书对我国大多数院士来说是一个新课题。他们惯于撰写学术论文。如何把专业的知识和方法写成生动、有趣、有文采的科普读物，于科技知识中融入人文教育，不是一件容易的事。不少院士反映：写科普书比写学术专著还难。但院士们还是以感人的精神完成自己的书稿。在此过程中，科学时报社和中国科学院学部联合办公室、中国工程院学部工作部以及清华大学出版社、暨南大学出版社也付出了辛勤的劳动。

《院士科普书系》首辑终于出版了。这是人民交给科学家课题，科学家向人民交出答卷。江泽民总书记专门为《院士科普书系》撰写了序言，指出科普是科教兴国的基础工程，勉励科学家、教育家“在全社会带头弘扬科学精神，传播科学思想，倡导科学方法，普及科学知识”，充分表达了党的第三代领导集体对科普的重视，对提高全民族科技素质的殷殷期望。

《院士科普书系》将采取滚动出版的模式。一方面随着院士们的创作进程，成熟一批出版一批；另一方面随着科学技术的进步和创新，不断有新的题材由新的院士作者撰写。因此，《院士科普书系》将是一个长期的、系统的科普工程。

这一庞大的工程,不但需要院士们积极投入,还需要各界人士和广大读者的支持——对我们的选题和内容提出修订、完善的建议,帮助我们不断提高《院士科普书系》的水平与质量,使之成为国民科技素质教育的系统而经典的读本。在科学家群体撰写科普书方面,我们也要以此为起点为开端,参与国际竞争与合作,勇攀世界科普创作的高峰。

中国科学院院长
《院士科普书系》编委会主任

路甬祥

2000年1月8日

本书前言

优质材料是实施四个现代化建设工程和保证人民幸福生活所必需的物质基础。许多工业部门和研究单位都在为生产和研制常规的或新型的优质材料而从不同方面不断努力工作。在这种种努力中,也包括一种叫做“射线束材料改性”的新工艺的研究和开发,它是深入到材料的分子和原子层次对其性能引起改变的一种新工艺。在实施这种新工艺时,人们利用一定能量和剂量的电子、 γ 光子、离子或中子等微观粒子的射线束去辐照特定材料,通过改变材料中原子本身或原子间的结合方式,使材料的性能或表面性能发生改变,变得能更好地符合特定的应用目的。正如美国的著名物理学家,1965年诺贝尔物理奖的获得者之一,R. P. 费曼说过的那样:“如果有一天我们的技术发展到原子、分子水平,那么我们将得知各种物质的性能,并制造出我们所需要的任何一种物质。”可以说,“射线束材料改性”这样一种新工艺的研究和开发预示了那一天到来的一线曙光。事实上,这种新工艺是核科学技术和材料科学技术交叉发展的产物。利用它,可以产生常规手段不可能产生的种种神奇效果。例如,一把用于切削的工具刀经过这种新工艺的短时间处理,就可以成倍地提高它的使用寿命,同时还能改善工件的切削质量。又如,一批种子,经过某种射线束的辐照,竟有可能产生出比原种优秀得多的植株。据报道,美国航天飞机上的低温冷凝泵

的阀门,经离子注入处理,寿命可提高两个数量级。事实上,在我国,也有许多应用辐射加工取得类似惊人效果的事例。正因为这种新工艺所开创的十分广泛而巨大的可能性,近年来它发展得十分迅速,而且已经在不少工业(特别是尖端工业和信息工业)及国民生产部门得到应用,在越来越多的实例中表明了它的良好效果。

由于牵涉到交叉学科,所以人们对这种有效的新工艺手段以及它的原理和实施情况可能还不十分清楚,它是否可望而不可及? 它的成本是否十分昂贵,以致经济上并不可行? 这种种疑问自然会影响到其作用的充分发挥和推广。我们希望,通过这本小书的初步介绍,能够使读者对这一新工艺有更多了解,能够促使和帮助更多对材料性能的改进有兴趣的人们,去掌握和开发这门新出现的加工工艺,并尝试在自己部门的工作中去应用它,更充分地利用它那神奇的可能性。为了便于非本专业读者的阅读,第1章先介绍了原子物理和核物理方面的一些必要的准备知识,使读者对什么是射线束和各种射线束的本质有比较清楚的了解。第2章介绍各种类型材料的宏观特性,以便读者了解材料的哪些性能在实际应用中是重要的。第3章简单介绍材料的微观物质结构,作为讨论为什么各种射线束能引起材料性能改变的依据。在前3章的基础上,第4、5、6等3章则分别介绍电子和 γ 射线束、离子束、中子束等引起材料改性的情况。限于篇幅,前3章所介绍的基础知识都很简略,更详细的说明可以参考相应的科普读物、教材或专著,例如本书最后所列参考文献中的前4种;同样,后3章所介绍的情况也只涉及这种新工艺的一些代表性的方面和例子。更多的情况可以在书

末所附后两种参考文献中找到。对上确实有心于应用和研究这种新工艺的读者,不妨进一步和有关研究机构(例如北京师范大学低能核物理研究所)的业务部门联系,以便取得所需的帮助。

作者衷心感谢北京师范大学低能核物理研究所的同事们,特别是张荟星、张通和、谢立占、陆挺、姬成周和李国辉等教授的帮助。他们提供了本书所引用关于材料改性资料的绝大部分,并为本书的写作提出了有益的意见。此外,吴顺光、高卓和周路群等博士在电脑文字处理方面的帮助,对本书的写作也起了重要的作用。作者也十分感谢在中国原子能研究所共同工作过的老朋友杨桢和胡华琛伉俪,感谢他们提供了关于热中子嬗变掺杂的资料。最后,作者还应当表示对老伴张蕴珍、女儿黄萌和外孙杨立的感谢,没有他们的理解和在制图方面的帮助,这本小书也是不可能在较短的时间里写成的。

由于成书仓促和限于作者水平,本书的疏漏和错误之处在所难免,敬希读者不吝赐教,作者在此预先致谢。

黄祖洽

2000年5月

目 录

1 什么是射线束	1
1.1 预备知识	1
1.2 电子束	13
1.3 X射线束和 γ 射线束	16
1.4 离子束	20
1.5 中子束	22
1.6 射线束对物质原子的作用	23
2 各种类型材料的宏观特性	31
2.1 材料的力学性能和热处理	32
2.2 材料的腐蚀和氧化	41
2.3 材料的断裂和磨损	45
2.4 材料的电磁学性能	48
2.5 材料的光学和热学性能	56
3 材料的微观物质结构	60
3.1 物质的晶体结构	60
3.2 非晶体和高聚物(玻璃、塑料和橡胶)	101

4	电子束和γ射线束引起的材料改性	109
4.1	半导体功率器件的电子束辐照工艺	115
4.2	聚合物电子束辐射交联和接枝	117
4.3	宝石和玉石颜色的改变	119
4.4	医疗用品的辐射灭菌	120
4.5	食品的辐射保藏	122
4.6	辐射用于环境保护	123
4.7	辐射加工剂量学	124
5	离子束引起的材料改性	126
5.1	离子束物理与材料改性	129
5.2	金属离子材料表面改性	131
5.3	离子注入引起的化学效应 ——热原子化学	139
5.4	硅化物的金属离子注入合成	141
5.5	半导体离子注入和在器件中的应用	151
5.6	兆电子伏量级高能离子注入和离子注入 工艺发展的前景	160
5.7	射线束导致的生物材料改性与 低能离子生物学	162
6	中子束引起的材料改性	170
6.1	热中子照射单晶硅引起的嬗变掺杂	171
6.2	快中子照射引起的生物效应	175
	参考文献	180

1

什么是射线束

1.1 预备知识

在讨论什么是射线束之前,先来简知地复习一下中学物理和化学课程中学过的有关物质的原子分子结构的一些知识。我们现在知道,每种物质都是由它的分子组成的。一个分子可以由一个或几个相同或不同的原子构成。例如,氧分子 O_2 是由两个氧原子(O)构成的;水分子 H_2O 是由两个氢原子(H)和一个氧原子(O)构成的。一般,化学元素(或称单质)是由相同原子组成的物质;化合物的分子则是由不同原

当初人们是怎么认识到物质的原子分子结构的呢？这是一个漫长而有趣的故事。它不知包含了自古以来多少聪明人的幻想和科学家的苦心研究。

子组成的。各元素可以根据化学性质并基本上按照原子量的顺序排列构成周期表。

当初人们是怎么认识到物质的原子分子结构的呢？这是一个漫长而有趣的故事。它不知包含了自古以来多少聪明人的幻想和科学家的苦心研究。这里不可能一一叙述，而只能挑一些可能和我们的主题有关的内容来介绍。最容易使人们想到原子分子组成的物质状态是气体。冬天的一个大厅里只要摆了一盆水仙花，便不时可以闻到一股幽香。这香味无疑来自水仙花，但是它是如何传播的，靠什么传播的呢？这就使人猜想，它可能是由水仙花所散发的、香气的极小单元(分子)传播的。要传播一段距离，这香气的分子还必须能在空气中运动。对于一个寻根究底而又有相当科学训练的人来说，他无法回避气体分子运动的想法。事实上，1850 年左右，物理学家们已经认识到热和分子运动的联系，根据理想气体的内能跟它们的体积无关这一实验事实，气体分子之间的作用力应当是很小的，除了相互碰撞上之外。因此，可以假设它们彼此没有撞上时是各自在作匀速直线运动，而在相互碰撞或与器壁碰撞时，则服从质点的弹性碰撞规律。1860 年，英国的著名物理学家麦克斯韦提出了以他的姓命名的分子速度分布定律。这个定律说，在温度为 T 的气体中，分子速度是 v 的概率同下列指数函数成正比：

$$e^{-mv^2/(2k_B T)}$$

这里， m 是每个分子的质量； k_B 叫做玻耳兹曼常数，其值为：

$$k_B = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

式中，J 为能量的标准国际单位“焦耳”；K 为热力学温度单位