

《中国工程物理研究院科技丛书》第 037 号

材料中的氦及氚渗透

Helium in Materials and the
Permeation of Tritium

王佩璇 宋家树 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

材料中的氦及氙渗透 王佩璇, 宋家树编著. —北京 :
国防工业出版社, 2002. 4
(中国工程物理研究院科技丛书)
ISBN 7-118-02753-7

I. 材... II. ①王...②宋... III. ①工程材料—氦
—释放作用—研究②工程材料—氙—渗透作用—研究
IV. TB30

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 097348 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6 1/8 148 千字

2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月北京第 1 次印刷

印数 1—1500 册 定价 17.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就 ,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下 ,原国防科工委率先设立出版基金 ,扶持出版科技图书 ,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物 ,是对出版工作的一项改革。因而 ,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进 ,这样 ,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授 ,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来 ,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗 !

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名 誉 主 任 委 员	陈达植			
顾 问	黄 宁			
主 任 委 员	殷鹤龄			
副 主 任 委 员	王 峰	张涵信	张又栋	
秘 书 长	张又栋			
副 秘 书 长	崔士义	蔡 镭		
委 员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)				
	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	彭华良	韩祖南	舒长胜

《中国工程物理研究院科技丛书》

出版说明

中国工程物理研究院建院 40 多年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务,在许多专业学科领域里,不论在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人材。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 40 多年来在各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果,内容涉及本院过去开设过的 20 几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 40 多年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》

编 审 委 员 会

1999 年 6 月 4 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》
第四届编审委员会

主 任	杜祥琬				
副主任	彭先觉	华欣生	李志民		
委 员	(以姓氏笔划为序)				
	王艳秀	邓门才	水鸿寿	田常津	江金生
	沈元如	李 凡	李泽仁	张方晓	张友寿
	张富堂	陈银亮	杨本立	郑志坚	罗顺火
	竺家亨	周德惠	俞大光	胡三国	贺云汉
	章冠人	黄清南	蒲仁壁		

本丛书编辑部

负 责 人	吴衍斌
本册编辑	吴衍斌

《中国工程物理研究院科技丛书》

已 出 版 书 目

- | | | | |
|-----|-------------------------|---------|-------------|
| 001 | 高能炸药及相关物性能
董海山、周芬芬主编 | 科学出版社 | 1989 年 11 月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术
谭显祥编著 | 科学出版社 | 1990 年 02 月 |
| 003 | 凝聚炸药起爆动力学
章冠人等编著 | 国防工业出版社 | 1991 年 09 月 |
| 004 | 线性代数方程组的迭代解法
胡家赣编著 | 科学出版社 | 1991 年 12 月 |
| 005 | 映象与混沌
陈式刚编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 06 月 |
| 006 | 再入遥测技术 (上册)
谢铭勋编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 06 月 |
| 007 | 再入遥测技术 (下册)
谢铭勋编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 12 月 |
| 008 | 高温辐射物理与量子辐射理论
李世昌编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 10 月 |
| 009 | 粘性消动法和差分格式粘性
郭柏灵著 | 科学出版社 | 1993 年 03 月 |
| 010 | 无损检测技术及其应用
张俊哲等著 | 科学出版社 | 1993 年 05 月 |
| 011 | 半导体材料辐射效应
曹建中著 | 科学出版社 | 1993 年 05 月 |

- | | | | |
|-----|------------------|---------|-------------|
| 012 | 炸药热分析 | | |
| | 楚士晋编著 | 科学出版社 | 1994 年 12 月 |
| 013 | 脉冲辐射场诊断技术 | | |
| | 刘庆兆主编 | 科学出版社 | 1994 年 12 月 |
| 014 | 放射性核素活度的测量方法和技术 | | |
| | 古当长编著 | 科学出版社 | 1994 年 12 月 |
| 015 | 二维非定常流和激波 | | |
| | 王继海编著 | 科学出版社 | 1994 年 12 月 |
| 016 | 抛物型方程差分方法引论 | | |
| | 李德元 陈光南著 | 科学出版社 | 1995 年 12 月 |
| 017 | 特种结构分析 | | |
| | 刘新民 韦日演编著 | 国防工业出版社 | 1995 年 12 月 |
| 018 | 理论爆轰物理 | | |
| | 孙锦山 朱建士著 | 国防工业出版社 | 1995 年 12 月 |
| 019 | 可靠性维修性可用性评估手册 | | |
| | 潘吉安编著 | 国防工业出版社 | 1995 年 12 月 |
| 020 | 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析 | | |
| | 陈元金编著 | 国防工业出版社 | 1997 年 01 月 |
| 021 | 近代成像技术与图像处理 | | |
| | 吴世法著 | 国防工业出版社 | 1997 年 03 月 |
| 022 | 一维流体力学差分方法 | | |
| | 水鸿寿著 | 国防工业出版社 | 1998 年 02 月 |
| 023 | 抗辐射电子学—辐射效应及加固原理 | | |
| | 赖祖武等著 | 国防工业出版社 | 1998 年 07 月 |
| 024 | 金属的环境氢脆及其试验技术 | | |
| | 周德惠 谭云编著 | 国防工业出版社 | 1998 年 12 月 |
| 025 | 试验核物理测量中的粒子分辨 | | |
| | 段绍节编著 | 国防工业出版社 | 1999 年 06 月 |
| 026 | 实验物态方程导引 (第二版) | | |
| | 经福谦著 | 科学出版社 | 1999 年 09 月 |

- | | | | |
|-----|-----------------------------|---------|-------------|
| 027 | 无穷维动力系统
郭柏灵著 | 国防工业出版社 | 2000 年 01 月 |
| 028 | 真空吸取器设计及应用技术
单景德编著 | 国防工业出版社 | 2000 年 01 月 |
| 029 | 再入飞行器天线
金显盛编著 | 国防工业出版社 | 2000 年 03 月 |
| 030 | 应用爆轰物理
孙承纬等著 | 国防工业出版社 | 2000 年 12 月 |
| 031 | 混沌的控制、同步与利用
陈式刚等著 | 国防工业出版社 | 2000 年 12 月 |
| 032 | 激光干涉测速技术
胡绍楼著 | 国防工业出版社 | 2000 年 12 月 |
| 033 | 空气炮理论与实验技术
王金贵编著 | 国防工业出版社 | 2000 年 12 月 |
| 034 | 一维不定常流与激波
李维新著 | 国防工业出版社 | 2000 年 12 月 |
| 035 | X 射线与真空紫外辐射源及其计量技术
孙景文编著 | 国防工业出版社 | 2001 年 11 月 |
| 036 | 含能材料热谱集
董海山等编著 | 国防工业出版社 | 2002 年 01 月 |
| 037 | 材料中的氦及氚渗透
王佩璇 宋家树编著 | 国防工业出版社 | 2002 年 04 月 |

前 言

本书论述了材料科学与技术中一个特殊问题,即惰性元素氦在材料中的行为和有关的氦的渗透。首先,在聚变能源研究、军用核技术、氦工艺及涉及氦的实验工作中经常会遇到由氦的衰变或其他核反应所产生的氦的问题,它会引起材料微观结构变化,使材料部件老化变质,导致严重的氦脆,以及造成等离子体的污染。为了解决这些问题就需要搞清楚:氦在材料中为什么能够滞留,在什么情况下会聚集、扩散及释放出来,这些过程对材料性能有什么害处,它受什么因素影响以及如何控制它等等。20 世纪中期这些问题就已经被提出来,而从 70 年代开始,随着聚变反应堆的设计和聚变堆材料研究的进展,更加明确它是一个需要解决的难题。其次,本书还论述了氦的渗透过程和在材料表面建立防氦渗透阻挡层的研究成果及其发展方向,它也与核技术的诸多方面密切相关,具有重要的实际意义,是当前该领域研究热点之一。上述两方面的现象涉及材料科学中许多基本问题,如原子间相互作用,晶体缺陷,扩散过程等,需要深入分析这些过程的机理,从新的角度及用新的方法来进行研究。

本书在综合国内外研究成果基础上,对主要的理论和实验结果进行了系统的、扼要的介绍和分析,其中也包括了我们在国家自然科学基金和中国工程物理研究院科学技术基金的支持下,对材料(不锈钢、钛及其化合物)中的氦问题进行的长达十几年的研究成果,以及近年对不锈钢通过表面改性提高抗氦渗透性能的研究。相信本书所提供的理论、实验数据和研究结果对于相关领域的研究人员有一定的参考价值。第一章论述当氦引入材料后的微观形态、分布及迁移问题。第二章论述氦的热释放现象,包括金属氦化

物中的氦释放、离子注入固体中氦的热释放以及材料中氦与氢同位素的相互作用。还着重讨论了氦所引起的宏观效应和氦脆问题,以及钚的自辐照所引起的氦问题。第三章论述氦的扩散与渗透理论及渗透率测定方法。第四章介绍一些防氦渗透阻挡层的制备工艺,它的稳定性、抗等离子体辐照性能和氦在其中扩散渗透过程的机理,其中包括作者关于离子束辅助合成 SiC 阻挡层的研究结果,第五章侧重介绍研究材料中氢同位素与氦的离子束分析方法,包括卢瑟福背散射方法,增强质子背散射及前冲散射方法,核反应分析方法及二次离子质谱方法等。

书中介绍的作者研究工作中包含了研究生李玉璞、苟成玲、王宇、张镭等的贡献和中国工程物理研究院倪然夫、邹觉生研究员以及原子能研究院山常起研究员等的合作和大力协助,在此一并致以衷心的感谢。由于材料中氦与氦的行为研究还是一个比较新的领域,国内外的研究进展很快,本书所介绍的资料和研究结果不一定完善。我们衷心欢迎读者对本书内容提出意见和建议。

王佩璇 宋家树

2001 年 11 月 23 日

北 京

目 录

第一章 材料中氦的微观形态、分布及迁移	1
1.1 氦的引入和含量	2
1.2 单个氦原子及原子团	5
1.2.1 能量参数、氦原子的捕陷和簇聚	6
1.2.2 氦原子的迁移	9
1.3 氦泡	11
1.3.1 形成过程	11
1.3.2 泡内的氦压强及密度	13
1.3.3 研究氦泡的其他方法	14
1.3.4 加热时氦泡的聚集长大	16
第二章 氦的热释放、宏观效应及氦脆	22
2.1 金属氟化物的氦释放	22
2.2 离子注入固体中氦的热释放	24
2.3 氦与氢同位素的相互作用	27
2.4 表面效应	30
2.5 体效应	32
2.6 不锈钢的氦脆	33
2.6.1 高温氦脆	33
2.6.2 低温氦脆	36
2.7 自辐照引起的氦问题	39
2.7.1 辐照损伤	39
2.7.2 钚的自辐照现象	41
2.7.3 氦泡及氦的热释放	48
2.7.4 钚的 α 辐照对不锈钢的效应	51
第三章 氦的扩散与渗透	53
3.1 氦的特性及其产生与储存	53

3.2 氙的吸收与释放	58
3.2.1 吸附	58
3.2.2 溶解	60
3.2.3 复合与解吸	62
3.3 氙的扩散	63
3.3.1 扩散的宏观规律	63
3.3.2 扩散的微观机制	66
3.3.3 存在陷阱时的氢扩散	69
3.4 氙的渗透	71
3.4.1 气相渗透过程	71
3.4.2 等离子体驱动的渗透	73
3.4.3 氙渗透率的测定方法	75
3.4.4 各种材料的氢同位素渗透参数	79
第四章 防氙渗透阻挡层	83
4.1 氧化物层	84
4.1.1 直接生长 Cr_2O_3 氧化物层	84
4.1.2 Al_2O_3 涂层	87
4.1.3 Cr_2O_3 涂层	87
4.2 铝化物涂层	88
4.3 钛基陶瓷涂层	92
4.4 硅化物涂层	95
4.4.1 概况	95
4.4.2 离子束辅助合成 SiC 阻挡层的研究	100
4.5 阻挡层的渗透机制	107
4.6 阻挡层的其他特性	111
第五章 氢同位素及氢的离子束分析方法	113
5.1 卢瑟福背散射	114
5.1.1 实验方法及基本设备	114
5.1.2 基本原理	115
5.1.3 背散射谱的分析方法	124
5.1.4 小结	130
5.2 增强质子背散射及前冲散射方法	131
5.2.1 增强质子背散射	131

5.2.2 前向反冲方法	134
5.2.3 小结	141
5.3 核反应分析	141
5.3.1 基本原理	141
5.3.2 分析技术	144
5.3.3 核反应分析举例	147
5.3.4 小结	150
5.4 二次离子质谱	151
5.4.1 基本物理过程	151
5.4.2 基本设备及实验方法	158
5.4.3 SIMS 分析实例	162
5.4.4 小结	167
附录	168
参考文献	169

Contents

Chapter 1	The micro-morphology distribution and the movement of helium in materials	1
1.1	The introduction of helium into materials and its content	2
1.2	Single helium atoms and the clusters of helium atoms	5
1.2.1	The energy parameters ,the trapping of helium atoms and their clustering	6
1.2.2	The movement of helium atoms	9
1.3	Helium bubbles	11
1.3.1	Processes of He bubble formation	11
1.3.2	The pressure and density in bubbles	13
1.3.3	The other experimental methods of helium bubble observation	14
1.3.4	The coalescence and growth of helium bubbles during heating	16
Chapter 2	Thermal release of helium ,the macroscopical effects and helium embrittlement	22
2.1	Helium release from metal tritides	22
2.2	Helium release from the solid after helium ion implantation	24
2.3	The interplay of helium and hydrogen isotopes	27
2.4	Surface effects	30
2.5	Bulk effects	32
2.6	Helium embrittlement of stainless steels	33
2.6.1	High temperature helium embrittlement	33
2.6.2	Low temperature helium embrittlement	36
2.7	Helium problems induced by self-irradiation	39
2.7.1	Radiation damage	39
2.7.2	Self-irradiation of plutonium	41
2.7.3	Helium bubbles and thermal release of helium	48

2.7.4 The effects of α -radiation produced by plutonium isotope decay on stainless steels	51
Chapter 3 The diffusion and permeation of tritium	53
3.1 The nature of tritium ,the production and storage of tritium	53
3.2 Tritium absorption into materials and its release	58
3.2.1 Adsorption	58
3.2.2 Solution	60
3.2.3 Recombination and desorption	62
3.3 The diffusion of tritium	63
3.3.1 Macroscopic laws of diffusion	63
3.3.2 Microscopic mechanism of diffusion	66
3.3.3 Diffusion of hydrogen (isotopes)with the existence of traps	69
3.4 The permeation of tritium	71
3.4.1 The processes of permeation from gas phase	71
3.4.2 Plasma-driven tritium permeation	73
3.4.3 Methods of tritium permeability determination	75
3.4.4 Permeation parameters of hydrogen isotopes in various materials	79
Chapter 4 The barrier layers of tritium permeation	83
4.1 Oxide layers	84
4.1.1 Cr_2O_3 layers grown by oxidation	84
4.1.2 Al_2O_3 coating	87
4.1.3 Cr_2O_3 coating	87
4.2 Aluminide coatings	88
4.3 Titanium ceramic coatings	92
4.4 Silicide coatings	95
4.4.1 Summary review	95
4.4.2 Works on ion-beam assisted synthesis of SiC permeation barriers	100
4.5 The mechanisms of permeation through barrier layer	107
4.6 Other features of barrier layers	111
Chapter 5 Ion beam analysis of hydrogen isotopes and helium	113
5.1 Rutherford Backscattering	114