



# 钛合金的制备与性能

魏世忠 韩明儒 徐流杰 编



科学出版社

内 容 提 要

# 镍合金的制备与性能

魏世忠 韩明儒 徐流杰 编

河南科技大学学术著作出版基金资助出版

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统介绍了稀散、难熔金属铼及其化合物、合金,特别是钼铼合金、钨铼合金、铼的超硬材料的相关知识及其在工业技术领域的应用;论述了国际铼合金研究的最新进展。

本书共8章。第1章综合介绍了金属铼的性能、用途和资源分布等基本知识;第2章论述了铼的氧化物、卤化物、硫化物、铼酸和铼盐类化合物的分类和分析化学特点;第3章论述了铼金属的冶炼提取知识和技术;第4章论述了铼合金的分类与铼膜涂层的制备与控制;第5章和第6章分别论述了第一个得到工业应用的钨铼合金和目前应用最为广泛的钼铼合金的知识,以及它们的显微组织结构、技术指标、物理性能、化学性能、机械性能、抗磨特性和制备技术;第7章论述了铼的轻元素超硬化合物;第8章论述了铼-钨同位素测年法的原理及其在地质探矿中的应用及发展。

本书的读者对象为耐磨材料、有色冶金、矿山机械行业及为其提供产品和服务的机械设备设计、耐磨产品生产厂家的工程技术人员和经营管理人员;并可供从事材料摩擦、磨损领域和耐磨材料、表面工程技术的研究人员、相关大专院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

铼合金的制备与性能 / 魏世忠, 韩明儒, 徐流杰编. —北京: 科学出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-03-042648-2

I. ①铼… II. ①魏… ②韩… ③徐… III. ①铼合金-粉末冶金制品-研究 IV. ①TF125. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 280590 号

责任编辑: 耿建业 刘翠娜 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张: 12 1/2

字数: 236 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



## 前 言

新材料是支撑现代文明社会的基石和高新技术发展的先导,是科技进步、社会发展、国力增强的重要物质基础。研制开发新型材料是国家发展水平的重要标志。

铼是一种稀有、难熔金属。稀有是指铼在地壳中的含量稀少、分散,它在地壳中的含量为 $1 \times 10^{-7} \%$ ,比所有的稀土元素都少,难熔是指铼金属的熔点极高,其熔点高达 $3180^{\circ}\text{C}$ ,仅次于钨,居所有金属的第二位。

铼多以微量伴生于钼、铜、锌、铅、铂、铌等矿物中。铼、钼两种元素有相似的原子半径和离子半径,并且在大多成矿环境中都是以六价存在,铼以类质同象进入辉钼矿、铜钼矿中。铼作为副产品在辉钼矿和铜精矿的冶炼中回收。

铼虽然稀少,但它的作用却很大。铼是一种非常坚硬的银白色金属,看起来像白金。铼的密度大,差不多是铁的三倍,是除铂族金属以外最致密的金属。铼及其合金具有优异的物理和化学性能,广泛用于现代工业,成为许多领域使用的重要材料。具有优良高温抗蠕变性能的铼钼合金,可用作火箭发动机的喷嘴,火箭、导弹和人造卫星的外壳高温涂层,宇宙飞船上用的仪器和高温部件如热屏蔽、电弧放电、电接触器,以及原子反应堆的防护板等,铼在航空、航天、核工业等方面有广泛的应用。铼在石油化学工业中用作催化剂,在冶金工业中用作添加元素,制造超耐热合金,用于制造热电偶合金电镀金属保护层。铼很耐磨,将铼与铁、钴、镍、钼、钨等元素结合,制成坚硬的耐磨合金,用于制造各种仪表的罗盘及精密仪表的转轴及指针,既精确又耐用。铼还可用于制作笔尖,铼金笔堪称“长寿笔”。铼是一种重要的高温仪表材料。铼和铼的合金还可制作电子管元件和超高温加热器。在电子仪器仪表等领域的用途更是令人瞩目。

摩擦学与材料防护教育部工程研究中心地处洛阳市,是由教育部、河南省科技厅、河南省教育厅与河南科技大学联合投资兴建的工程研究中心和高科技产业中心,是耐磨材料生产技术和优质耐磨材料的聚散地。摩擦学与材料防护教育部工程研究中心与洛阳钼业集团公司建立了紧密的产学研合作关系,共同承担了国家级、省部级关于钼、铼及其合金的研究课题,获得了国家级和省部级科技进步奖。

本书详细论述了铼的物理性能、化学性能和力学性能,铼的各种化合物的制备及其性能,铼合金,特别是钼铼合金、钨铼合金的组织结构、技术指标、抗磨特性和制备技术,铼的轻元素化合物等超硬材料知识,论述了国际铼合金研究的最新进展。这些内容是摩擦学与材料防护教育部工程研究中心、高温难熔金属材料河南

省工程实验室、河南省耐磨材料工程技术研究中心和洛阳钼业集团公司多年产学研合作成果的精华荟萃,同时也参考了兄弟院校和单位的经验。在成书过程中,很多同志给予编者热情的帮助和大力的支持,西安交通大学博士生导师高义民教授,河南科技大学博士生导师、中原学者张永振教授,对初稿的内容、章节安排、写作体例进行了审阅,并给予指导。王丽红同志帮助进行了资料收集工作,在此表示衷心的感谢!

本书的内容是近期最新的科研成果,在理论与技术上都有需要完善之处,加之编者水平有限,如有不当之处,敬请读者批评指正。

编者

2014年6月

# 目 录

第 1 章 铯的基本知识	1
1.1 金属的基本知识	1
1.2 铯是稀散、难熔金属	2
1.3 铯元素的发现过程	3
1.4 铯的性能	6
1.4.1 铯的物理性能	6
1.4.2 铯的化学性能	9
1.4.3 铯的力学性能	11
1.4.4 铯的加工性能	11
1.4.5 铯效应	12
1.5 铯资源概况	12
1.5.1 地球上的铯资源	12
1.5.2 世界铯的储量及生产概况	13
1.5.3 我国铯的储量及生产概况	14
1.6 铯的用途	16
1.6.1 化学工业中用作催化剂	16
1.6.2 冶金工业中用作添加元素制造超耐热合金	16
1.6.3 在航空航天等方面的应用	17
1.6.4 用于电灯泡及电真空仪表的生产	18
1.6.5 用于制造电接触点	18
1.6.6 用于制造热电偶合金	18
1.6.7 用于电镀金属保护层	19
1.7 世界铯市场	19
1.7.1 铯的供应	19
1.7.2 铯的需求	20
1.7.3 铯的价格	20
1.8 铯-钷同位素定年	21
参考文献	21

<b>第2章 铼的化合物</b> .....	23
2.1 铼化合物的种类 .....	23
2.1.1 铼的氧化物 .....	23
2.1.2 铼的卤化物 .....	24
2.1.3 铼的硫化物 .....	24
2.1.4 高铼酸及其盐类——高铼酸盐 .....	25
2.2 铼化合物的分析化学特点 .....	26
2.2.1 沉淀反应 .....	26
2.2.2 络合反应 .....	26
2.2.3 氧化还原反应 .....	27
2.2.4 电化学性质 .....	27
2.3 分析铼含量的不同方法及要求 .....	27
2.3.1 分光光度法 .....	27
2.3.2 电感偶合法 .....	28
2.3.3 中子活化法 .....	28
参考文献 .....	29
<b>第3章 铼金属的冶炼提取</b> .....	31
3.1 冶金基本知识 .....	31
3.1.1 矿物、矿石和精矿 .....	31
3.1.2 冶金学的分类 .....	32
3.1.3 冶金生产的主要方法 .....	33
3.2 铼的原料来源、选矿行为及分离富集方法 .....	34
3.2.1 铼的原料来源 .....	34
3.2.2 铼在选矿中的行为 .....	34
3.2.3 铼的分离富集方法 .....	35
3.3 铼在处理辉钼精矿和铜矿石过程中的行为 .....	35
3.3.1 铼在处理辉钼精矿过程中的行为 .....	35
3.3.2 铼在处理铜矿石过程中的行为 .....	37
3.4 铼的综合回收技术 .....	37
3.4.1 从辉钼矿中回收铼的方法 .....	37
3.4.2 冶炼辉钼矿过程中提炼铼的主要方法 .....	40
3.4.3 从铜矿中回收铼的方法 .....	49
3.5 由烟尘及其他生产废料中提取铼 .....	51
3.5.1 从辉钼矿精矿的焙烧烟尘中提取铼 .....	52

3.5.2	由生产钼酸钙的母液中提取铯	52
3.5.3	由置换沉出物中提取铯	53
3.5.4	从炼铜鼓风炉烟尘中提取铯	54
3.6	从其他物料中回收铯	55
3.7	钼精矿氧化焙烧-离子交换法提取金属铯新工艺	55
3.7.1	铯回收机理	56
3.7.2	焙烧过程铯的行为分析	56
3.7.3	提取铯工艺	56
3.7.4	工艺特点及与其他方法比较	58
3.7.5	小结	59
3.8	离子交换法从炼铜废液中提取贵金属铯	59
3.8.1	废液成分	60
3.8.2	提取步骤	60
3.8.3	用离子交换法提取废液中铯的操作要点	61
	参考文献	61
<b>第4章</b>	<b>铯合金与铯膜涂层</b>	<b>62</b>
4.1	铯合金的研究	62
4.1.1	铯合金是航天高科技领域的重要材料	62
4.1.2	铯合金的分类	63
4.2	铯粉和铯涂层、铯膜的制备	67
4.2.1	铯粉的制备	67
4.2.2	铯涂层、铯膜的制备	67
4.3	铯合金的应用现状	68
4.3.1	铯合金在航空航天上的应用	68
4.3.2	铯合金在原子能工业上的应用	69
4.3.3	铯合金在电子材料和高温材料上的应用	69
4.3.4	铯合金在冶金工业上的应用	70
4.3.5	铯合金是制造钢笔尖的极好材料	70
4.4	铯合金研究的发展趋势	71
4.4.1	铯合金研究的方向	71
4.4.2	利用镧和钇改进含铯合金的性能	71
4.5	铯对单晶高温合金铸态组织的影响	71
4.5.1	实验方法	72
4.5.2	实验结果与讨论	72



4.5.3	小结	76
4.6	紫外分光光度法测定合金中含铯量	76
4.6.1	实验部分	76
4.6.2	实验结果与讨论	77
4.6.3	小结	81
	参考文献	81
<b>第5章</b>	<b>钨铯合金</b>	<b>83</b>
5.1	钨铯合金概述	83
5.1.1	钨铯合金优良的性能	83
5.1.2	钨铯合金的主要用途	83
5.1.3	钨铯合金的制造工艺	84
5.2	钨铯热电偶丝材的生产及应用	84
5.2.1	钨铯热电偶是性能优良的高温测量用传感器	84
5.2.2	钨铯热电偶的生产	85
5.2.3	钨铯热电偶的应用	88
5.3	我国钨铯合金的研发与应用	90
5.3.1	钨铯热电偶及掺杂钨铯合金丝的研发	90
5.3.2	掺杂钨铯合金的研制	91
5.3.3	掺杂钨铯合金板材及带材的研制	91
5.3.4	钽钨加铯的钽钨铯合金	91
5.4	化学气相沉积法制备钨铯合金	91
5.4.1	实验方法	92
5.4.2	实验结果与讨论	93
5.4.3	小结	97
5.5	退火温度对钢液测温用钨铯热电偶热电性能的影响	97
5.5.1	炼钢过程中快速测量钢液温度的重要性	97
5.5.2	退火温度对钨铯热电偶测温精度的影响实验	97
5.5.3	实验结果与讨论	98
5.5.4	小结	99
5.6	退火温度对微细钨铯合金丝力学性能的影响	99
5.6.1	改善微细钨铯合金丝力学性能的重要性	99
5.6.2	实验部分	100
5.6.3	实验结果与讨论	100
5.6.4	小结	102

5.7 用荧光光谱二元比例法测定钨铌合金中的钨和铌 .....	102
5.7.1 定量原理 .....	102
5.7.2 实验部分 .....	103
5.7.3 实验结果与讨论 .....	105
5.7.4 小结 .....	107
5.8 钨铌合金微米电阻随直径变化的统计分析 .....	107
5.8.1 研究钨铌合金微米电阻变化的意义 .....	107
5.8.2 测量仪器及方法 .....	108
5.8.3 实验结果与讨论 .....	108
5.8.4 小结 .....	112
5.9 电真空器件热子材料——WRe25 钨铌合金丝的研制 .....	112
5.9.1 钨铌合金丝是电真空器件重要的热子材料 .....	112
5.9.2 电真空器对 WRe25 钨铌合金丝性能的要求 .....	113
5.9.3 WRe25 钨铌合金丝的研制 .....	113
5.9.4 研制 WRe25 合金丝的特点和水平 .....	115
5.10 电子探针搭配波谱仪表征钨铌合金 .....	115
5.10.1 实验过程 .....	115
5.10.2 实验结果与讨论 .....	117
5.10.3 小结 .....	119
参考文献 .....	119
<b>第 6 章 钼铌合金</b> .....	<b>121</b>
6.1 钼铌合金概述 .....	121
6.1.1 钼铌合金的组成 .....	121
6.1.2 钼铌合金的基本性质 .....	122
6.1.3 钼铌合金的应用现状 .....	122
6.2 铌在钼铌合金中的作用 .....	123
6.2.1 铌对钼铌合金性能的影响 .....	124
6.2.2 铌在钼铌合金中的作用 .....	126
6.3 氧化物弥散强化钼铌合金的研制 .....	127
6.3.1 ODS 钼铌合金优良的高温 and 低温性能 .....	127
6.3.2 ODS 钼铌合金的制备实验方法 .....	128
6.3.3 实验结果与讨论 .....	129
6.3.4 小结 .....	132
6.4 制备方式对钼铌合金组织性能的影响 .....	132

6.4.1	钼合金制备的方法	132
6.4.2	实验方法	132
6.4.3	实验结果与讨论	132
6.4.4	小结	135
6.5	粉末冶金法制备钼铼合金的研究	136
6.5.1	粉末冶金法制备钼铼合金的工艺路线	136
6.5.2	钼铼合金的成分设计	138
6.6	粉末冶金法制备 Mo-43Re 合金退火行为的研究	139
6.6.1	材料制备与实验方法	140
6.6.2	实验结果与讨论	140
6.6.3	小结	143
6.7	钼铼合金带材的组织 and 性能	143
6.7.1	实验方法	143
6.7.2	实验结果	144
6.7.3	讨论	145
6.7.4	小结	146
6.8	粉末冶金法制取低铼钼合金	146
6.8.1	实验原料	146
6.8.2	混合料的制备及还原	146
6.8.3	试样压制及烧结	147
6.9	制备低钼铼合金高温烧结过程的研究	147
6.9.1	实验过程	148
6.9.2	实验结果与讨论	149
6.9.3	小结	151
6.10	低铼钼合金力学性能的研究	151
6.10.1	实验过程	151
6.10.2	实验结果与讨论	152
6.10.3	小结	153
6.11	低铼钼合金加工性能的研究	154
6.11.1	实验方法	154
6.11.2	实验结果与讨论	155
6.11.3	小结	157
6.12	钼铼合金铸锭的热加工方式	157
6.12.1	实验材料及方法	157

6.12.2	实验结果与讨论	157
6.12.3	小结	160
6.13	交叉轧制及退火对钨铼合金箔材深冲性能的影响	160
6.13.1	实验方法	161
6.13.2	实验结果与讨论	162
6.13.3	小结	167
6.14	钨铼合金的焊接工艺和性能	167
6.14.1	实验过程	168
6.14.2	实验结果与讨论	168
6.14.3	小结	169
	参考文献	169
<b>第7章</b>	<b>铼的超硬化合物</b>	<b>171</b>
7.1	超硬材料的研究概述	171
7.1.1	超硬材料的定义	171
7.1.2	研究超硬材料的重要意义	171
7.1.3	超硬材料的研究历程	172
7.1.4	超硬材料的研究思路	173
7.1.5	研究超硬材料的方法	174
7.2	铼的轻元素化合物的实验研究进展	175
7.2.1	超硬材料 $\text{ReB}_2$ 的研究	175
7.2.2	铼的轻元素化合物在理论上的研究	176
7.2.3	小结	178
	参考文献	178
<b>第8章</b>	<b>铼-钨同位素测年法</b>	<b>180</b>
8.1	铼-钨同位素测年法原理	180
8.1.1	Re-Os 同位素体系的地球化学性质	180
8.1.2	铼-钨同位素定年基础	180
8.2	分析方法	181
8.2.1	样品的溶解	181
8.2.2	酸溶法	181
8.2.3	碱熔法	182
8.2.4	硫化镍火试金法	182
8.2.5	Carius 管溶样法	182
8.2.6	高温高压反应釜法	182

181	8.3 Re-Os 同位素分离及纯化 .....	183
181	8.3.1 Os 的分离及纯化 .....	183
187	8.3.2 Re 的分离及纯化 .....	183
181	8.4 Re-Os 同位素的质谱测定方法 .....	183
181	8.4.1 传统的测定方法 .....	183
181	8.4.2 Re-Os 同位素的质谱测定方法新发展 .....	184
181	8.5 成功应用铼-钨同位素法测年的范例及所揭示的地质意义 .....	184
181	8.6 小结 .....	185
181	参考文献 .....	186

# 第 1 章 镍的基本知识

## 1.1 金属的基本知识

金属的可塑性、导电性及导热性良好,具有金属光泽。在目前已发现的 118 种化学元素中,金属元素有 80 多种,非金属元素有 20 多种。金属的分类是按历史上形成的工业分类法分类的。这种分类法虽然没有经过严格的科学论证,但一直沿用到现在。

现代工业习惯上把金属分为黑色金属和有色金属两大类。黑色金属是指铁、铬、锰三种金属。黑色金属的单质为银白色,而不是黑色。之所以称它们为黑色金属,是由于这类金属及其合金表面常有灰黑色的氧化物。有色金属是指除黑色金属以外的所有金属,其中除少数有颜色外(铜为紫红色,金为黄色),大多数为银白色。有色金属有 60 多种,分为重金属、轻金属、贵金属、稀有金属和半金属五类。

### 1) 重金属

一般指密度在  $5\text{t/m}^3$  以上的金属,包括铜、铅、锌、镍、钴、锡、铋、汞、镉、铀。它们的密度都很大( $7\sim 11\text{t/m}^3$ )。

### 2) 轻金属

一般指密度在  $5\text{t/m}^3$  以下的金属,包括铝、镁、钠、钾、钙、锶、钡。这类金属的共同特点是密度小( $0.53\sim 4.5\text{t/m}^3$ ),化学性质活泼。

### 3) 贵金属

这类金属包括金、银和铂族金属(铂、铱、钨、钨、铑、钯)。它们因在地壳中含量少、提取困难和价格较高而得名。贵金属的特点是密度大( $10.4\sim 22.4\text{t/m}^3$ ),熔点高( $1189\sim 3273\text{K}$ ),化学性质稳定。

### 4) 稀有金属

通常指那些发现较晚,在工业上应用较迟,在自然界中地壳丰度小,天然资源少,赋存状态分散,难以被经济地提取或不易分离成单质的金属。在 60 多种有色金属元素中,大约有 50 种被认为是稀有金属。稀有金属这一名称的由来,并不是由于其在地壳中的含量稀少,而是历史上遗留下来的一种习惯性的概念。事实上,有些稀有金属在地壳中的含量比一般金属还要多。例如,稀有金属钛在地壳中的含量占第九位,比铜、银、镍以及许多其他元素都多;稀有金属锆、锂、钒、铀在地壳中的含量,比普通金属铅、锡、汞多。当然,有许多稀有金属在地壳中的含量确实是

很少的,但含量少并不是稀有金属的共同特征。

根据金属的密度、熔点、分布及其他物理化学特性,稀有金属在工业上又可分为以下几种。

(1) 稀有轻金属:包括锂、铷、铯、铍。这类金属的特点是密度小(仅为  $0.53 \sim 1.859 \text{ t/m}^3$ ),化学活性大,其氧化物和氯化物都很稳定,难以还原成金属,一般都用熔盐电解法或金属热还原法制取。

(2) 难熔稀有金属:包括钛、锆、钨、钼、铌、钽、钨、铪。它们的共同特点是熔点高(如钛的熔点为  $1933\text{K}$ ,钨为  $3683\text{K}$ ),抗腐蚀性好,具有多种原子价。在生产工艺上,一般都是先制取纯氧化物或卤化物,再用金属热还原法或熔盐电解法制取金属。

(3) 稀散金属:包括镓、铟、铊、锗、硒、碲。这类金属的共同特点是极少独立成矿,在地壳中几乎是平均分布的,一般都是以微量杂质形态存在于其他矿物中。例如,镓存在于铝土矿中,铟存在于有色重金属硫化矿中。因此,它们多富集在有色金属生产的副产品、烟尘和尾渣中,品位一般在  $0.1\%$  以下,需要采用复杂的工艺进一步富集后才能冶炼成金属。

(4) 稀土金属:包括钪、钇及镧系元素(从原子序数为  $57$  的镧到原子序数为  $71$  的镥,共  $15$  种元素)。其共同特点是物理化学性质非常相似,在矿物中多共生,分离困难。冶金上一般先制取混合稀土氧化物或其他化合物,再用溶剂萃取、离子交换等方法分离成单一化合物,最后还原成金属。

(5) 放射性稀有金属:包括天然存在的钷、镭、钋和锕系元素中的锕、钍、镤、铀以及人工制造的镅、钷、锔系其他元素和周期表中  $104 \sim 109$  号元素。这类金属的共同特点是具有放射性,它们多共生或伴生在稀土矿物中。

#### 5) 半金属

又称似金属或类金属,包括硼、硅、砷、碲。其特点是它们的电导率介于金属和非金属之间,并且都具有一种或几种同质异构体,其中一种具有金属性质。

## 1.2 铈是稀散、难熔金属

铈是一种稀散、难熔金属。稀散是指铈在地壳中的含量稀少、分散,它在地壳中的含量为  $1 \times 10^{-7}\%$ ,比所有的稀土元素都少,仅大于镤和镭这些元素。难熔是指铈金属的熔点极高,其熔点高达  $3180^\circ\text{C}$ ,仅次于钨,居所有金属的第二位。至今尚未发现自然形态铈的存在,也很少见到铈呈主要矿物组分出现。铈、钨两种元素有相似的原子半径和离子半径,并且在大多成矿环境中都是六价,铈以类质同象进入辉钨矿、铜钨矿中,炼钨的烟灰就是提炼铈的主要原料。

难熔金属又称稀有高熔点金属,它包括元素周期表中 IVB 族的钛(Ti)、锆



(Zr)、铪(Hf), VB族的钒(V)、铌(Nb)、钽(Ta), VI B族的钼(Mo)、钨(W)和 VII B族的铼(Re),共九种金属。难熔金属的共同特点是熔点高,硬度高,耐腐蚀性强,原子的价态比较复杂。

稀散金属是稀有分散金属的简称。它通常包括元素周期表中 III A 族的镓(Ga)、铟(In)、铊(Tl), IV A 族的锗(Ge), VI A 族的硒(Se)、碲(Te)和 VII B 族的铼(Re),共七种金属。稀散金属的共同特征是它们的物理性质和化学性质多相似,而且在地壳中的分布稀少、分散,很少有独立的矿物存在,大多是以类质同象形态分散存在于其他金属矿物中。因此,稀散金属通常是从冶金或化工等工业生产的副产品或废料中冶炼提取的<sup>[1]</sup>。

### 1.3 铈元素的发现过程

铈作为锰副族中的一个成员,早在 1871 年俄国化学家门捷列夫建立元素周期表时,就曾预言它的存在,把它称为次锰(dwimanganese),而把这个族中另一个当时也没有发现的成员称为类锰(ekamanganese)。

1913 年,英国科学家莫塞莱确定了这两个元素的原子序数分别是 75 和 43。

1913 年,莫塞莱采用布拉格的 X 射线光谱拍摄了一系列元素的标识谱线(特征谱线),发现其规律性与玻尔理论预期一致。他总结出标识谱线的频率  $\gamma$  与原子序数  $Z$  的关系

$$\gamma = (Z - \sigma K)^2$$

此即莫塞莱定律。因为光的波长( $\lambda$ )与频率( $\gamma$ )成反比,莫塞莱定律也可以写成

$$\lambda = a(Z - b)^{-2}$$

式中, $Z$  为元素的原子序数; $\lambda$  为光的波长; $\gamma$  为光的频率; $a$ 、 $b$ 、 $\sigma$ 、 $K$  均为常数。一个元素的性质由原子序数决定,而不是由相对原子质量决定,用  $Z$  为元素周期表排序比用相对原子质量  $A$  排序更准确。根据玻尔模型, $Z$  正是原子中电子数,即原子核中的质子数,由此确定了原子序数与原子核电荷数之间的关系。莫塞莱实验也第一次提供了精确测量  $Z$  的方法<sup>[2]</sup>。

莫塞莱(H. G. J. Moseley, 1887~1915),英国物理学家,对化学元素周期律及周期表实质性内容的研究颇有贡献。

1887 年 11 月 23 日,莫塞莱出生在英国赛特郡的维茅泽城,这是一个极为美丽幽静的小镇,出过许多名人。莫塞莱的家庭是一个科学世家,他的祖父是著名的数学家和物理学家,父亲是动物学家,他们都是知名教授,也是令人尊敬的英国皇家学会会员。

莫塞莱的启蒙老师应当说是他的母亲和两个姐姐,因为他出生时,知识丰富的祖父早已去世,父亲患脑卒中,半身瘫痪,在莫塞莱 4 岁时也去世了。莫塞莱的母亲和两个姐姐给莫塞莱以很好的学前教育,在他幼小的心灵中,播下了科学的种子。

莫塞莱童年时就聪明好学,悟性过人,他有非常敏锐的观察力,热爱大自然,喜欢动物,尤其



喜欢鸟类。他极为耐心地观察他家附近的小鸟,对他们的种类、生活习性、居住地等都知道得很清楚。他父亲的朋友兰开斯特是一位很有名的动物学家,对莫塞莱观察鸟类的才能非常惊奇,称他为“小博物学家”,曾鼓动他长大以后研究动物学,但莫塞莱后来却成了一名化学家。

莫塞莱 13 岁时,以优异成绩考入了有名的伊顿中学,在中学读书时曾因学习成绩优异,获得过奖学金,毕业后,考入了牛津大学三一学院,并获得了米拉德奖学金。

1909 年,莫塞莱借大学放假的机会,到曼彻斯特拜访了著名物理大师卢瑟福。卢瑟福热情地接待他,在谈话中,卢瑟福发现,莫塞莱基础知识丰厚,思维清晰,很有培养前途,因此邀他毕业后去曼彻斯特卢瑟福实验室工作。1910 年,莫塞莱毕业于牛津大学,获硕士学位,应卢瑟福之约,到曼彻斯特大学卢瑟福实验室工作,很快他就成了大学的讲师。

在卢瑟福实验室,莫塞莱除完成讲师的工作以外,把精力都投入科研工作中。他的工作极为出色,成就十分突出。后来,他的同事回忆说:“莫塞莱的成功是由于罕见的智力,良好的数学训练,杰出的实验技巧与惊人的毅力相结合。他有一种特殊的持久工作的能力,他喜欢从白天一直工作到深夜,尤其是问题处在关键阶段时,他总是连续工作 15 小时,通宵达旦奋战在实验室。”

莫塞莱待人和蔼有礼,特别喜欢帮助别人解决疑难问题,实验室的同事们,都对他十分钦佩。在卢瑟福的指导下,莫塞莱开始研究元素放射性的问题,他首先研究了当时所知道的放射性元素放出  $\beta$  射线的情况,并把研究结果在英国皇家学会的会报上发表。接着,他又研究了在高真空、高电压的情况下,放射性物质的性质。同时测定了铀的一种蜕变产物的寿命,他经过精心设计和深入研究,测定出其半衰期为  $1/5000\text{s}$ ,在当时的实验条件下,完成如此高精度的测定,实属罕见,因此受到学术界的一致称赞。

莫塞莱最杰出的工作是发现了以他的名字命名的定律,即莫塞莱定律。

1912 年 12 月,莫塞莱离开了曼彻斯特,到牛津大学任教,开始研究各种元素所产生的特征 X 射线的波长。

1913 年,莫塞莱测得 50 多种元素的 X 射线光谱,从中发现光谱特征线的频率和元素的原子序数的内在关系。从而,第一次确立了原子序数与核电荷数、核内质子数相等的关系,并由此得知按原子序数排列的元素周期表比按相对原子质量排列的更为科学,他指出:“各元素 X 射线的波长非常有规律地随着它们在元素周期表中排列的顺序而递减……”他利用 X 射线研究元素,为化学、核物理学和原子化学的发展作出了卓越的贡献并奠定了基础。

莫塞莱经研究发现,以不同的元素作为产生 X 射线的靶子,则各种不同元素产生的特征 X 射线的波长是不同的。莫塞莱把各种元素产生的特征 X 射线按着波长的大小加以系统排列,他惊奇地发现,这种排列和元素在周期表中的顺序是完全一致的,他把这个排列顺序称为原子序数,此后,他经过数量分析,提出了各种元素的原子序数与其所产生的 X 射线波长之间的经验公式:

$$\lambda = a(Z - b)^{-2}$$

以上公式说明,X 射线波长  $\lambda$  倒数的平方根,与原子序数  $Z$  呈直线函数关系,式中的  $a$ 、 $b$  都是常数。这个公式就是莫塞莱定律的数学形式。

把莫塞莱 1913 年发现的定律,和卢瑟福的  $\alpha$  粒子散射实验相结合,人们不难得出结论:原子序数在数量上正好等于元素的核电荷数,这一发现是建立原子模型的基础。1914 年 4 月,莫