

·真空工程技术丛书·

真空材料

ZHENKONG CAILIAO

张以忱 黄英 编著

冶金工业出版社

《中国材料百科全书》

真空材料

ZHONGGUO CAIWU

中国材料百科全书

冶金工业出版社

真空工程技术丛书

真 空 材 料

张以忱 黄 英 编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2005

内 容 提 要

本书主要介绍真空材料(含电真空材料)的分类,材料的扩散与渗透性能,材料的常温与高温放气,材料放气速率的计算和测试方法,真空材料的蒸发,升华与凝结,真空材料的选材原则,真空工程与技术中所用的金属和非金属材料,磁性材料与靶材,真空辅助材料,真空工程用油、吸气剂,真空技术常用气体,低温制冷系统工作介质等材料的性质、特性技术参数、选用与应用等内容。

本书集基础理论和应用技术于一体,使理论与工程实践有机结合,适合于真空技术、真空冶金、材料工程、低温工程、机械设计等行业从事设计研究、设备应用与维护的技术人员参考,也可作为大专院校相关专业师生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

真空材料/张以忱等编著. —北京:冶金工业出版社, 2005. 12

(真空工程技术丛书)

ISBN 7-5024-3891-2

I. 真… II. ①张… ②黄… III. 真空材料
IV. TB74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 143091 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 宋 良 杨 敏 美术编辑 李 心

责任校对 卿文春 李文彦 责任印制 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2005 年 12 月第 1 版, 2005 年 12 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 10 印张; 317 千字; 307 页; 1-3000 册

29.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

本书是在多年教学与科研实践的基础上编著的。全书共有14章,内容包括真空技术及工程所用各类材料的相关基础理论、力学性能、物理化学性能、电磁性能、真空性能、工艺特点及真空材料的应用等,较详细、全面地论述了真空技术与工程所用的金属材料、非金属材料、磁性材料、溅射镀膜靶材、真空辅助材料、吸气剂与吸附剂、真空工程用油、真空工程中常用气体和低温制冷系统工作介质等材料的性质、性能和相关技术参数数据,材料在真空工程中的应用等,为真空技术与工程设计选用材料的可靠性和经济性提供了依据。书中既有基础理论知识,又面向实际应用,提供了大量相关的数据图表,是从事真空研究、设计、应用领域的技术人员所需的实用性很强的参考书。

本书在《真空》杂志连载的“真空技术讲座”内容的基础上,进行了大量的修改和补充,使基础理论知识更加系统化,实践应用上的内容更加丰富充实,增加了许多高科技领域、新型真空材料的内容。本书可供从事真空工程、低温工程、表面与薄膜技术、流体机械、航空航天技术等领域的工程技术人员在真空系统设计、应用、维护、检修时参考,也可作为真空技术、过程装备与控制、应用物理、流体机械、低温工程、机械设计与制造等专业学生(本科生和研究生)的教材

或参考书。

在编写过程中，得到东北大学杨乃恒、张树林教授等的帮助和支持，同时还得到了东北大学真空教研室和《真空》杂志社的大力支持及其他同行专家的帮助，在此深致谢意。

由于理论水平和实践经验有限，书中如有不妥之处，恳请读者指正。

作 者

2005 年 8 月

目 录

1 真空材料概述	1
1.1 真空材料的分类	1
1.2 电真空材料的分类与特性	2
1.2.1 电真空材料的分类	2
1.2.2 电真空材料的特性	2
1.3 真空系统平衡方程	6
2 材料的气体渗透与扩散	8
2.1 气体分子的溶解与渗透	8
2.2 影响溶解度的因素	10
2.2.1 环境气压对溶解度的影响	10
2.2.2 温度对溶解度的影响	11
2.2.3 气体-固体配组的性质对溶解度的影响	12
2.3 不同材料中的气体溶解度	14
2.3.1 气体在金属中的溶解度	14
2.3.2 气体在非金属材料中的溶解度	15
2.4 气体扩散方程	17
2.5 气体渗透速率	18
2.5.1 气体对平板壁的渗透	18
2.5.2 气体对圆筒壁的渗透	22
2.5.3 气体对球形壁的渗透	24
2.5.4 不同气体-固体配组的渗透性能	25

3 材料的放气	35
3.1 常温放气	35
3.2 高温放气	39
3.2.1 高温放气概述	39
3.2.2 材料的高温放气机理	40
3.2.3 材料的高温放气参量	41
3.3 材料放气速率的计算	46
3.3.1 无限厚平板材料	46
3.3.2 有限厚平板材料	47
3.3.3 球形固体材料	48
3.3.4 圆柱形固体材料	49
3.3.5 结构及初始溶解浓度不均匀的固体材料	50
3.4 真空材料的放气率测试方法	51
3.4.1 流量率法 (动态法)	52
3.4.2 压升率法 (静态法)	56
3.4.3 收集法	57
3.4.4 质量损失或重量损失法	57
3.4.5 放气率的动态法测试装置	57
3.5 材料的真空除气	65
4 材料的蒸发、升华与凝结	68
4.1 蒸气	68
4.2 蒸气压	69
4.3 蒸发率和凝结率	74
4.4 材料蒸发对真空器件的影响	79
5 真空材料的其他性能与选材要求	82
5.1 真空材料的其他性能	82
5.2 真空材料的选材原则	83

5.2.1 对真空容器壳体及内部零件材料的要求	83
5.2.2 对密封材料的要求	83

6 金属材料 85

6.1 电真空及超高真空金属材料的工艺特点	85
6.1.1 粉末冶金法	85
6.1.2 金属热还原法	85
6.1.3 真空熔炼法	86
6.2 铸件	86
6.3 纯铁与钢	86
6.3.1 纯铁	86
6.3.2 碳素钢	88
6.3.3 不锈钢	90
6.3.4 不锈钢复合钢板	93
6.4 有色金属	94
6.4.1 镍 (Ni)	94
6.4.2 铜 (Cu)	97
6.4.3 铝 (Al)	100
6.4.4 钛 (Ti)	102
6.4.5 锆 (Zr)	105
6.4.6 镉、锌 (Cd、Zn)	107
6.4.7 铬 (Cr)	107
6.5 贵金属	107
6.5.1 铂 (Pt)	107
6.5.2 钯 (Pd)	109
6.5.3 金 (Au)	110
6.5.4 银 (Ag)	111
6.6 软金属	112
6.6.1 铟 (In)	112
6.6.2 镓 (Ga)	113
6.6.3 汞 (Hg)	114
6.7 难熔金属	116

6.7.1 钨 (W)	116
6.7.2 钼 (Mo)	118
6.7.3 钽 (Ta)	119
6.7.4 铌 (Nb)	121
6.7.5 铼 (Re)	123
6.8 合金	124
6.8.1 难熔金属合金	124
6.8.2 铁镍合金与可伐合金	126
6.8.3 镍铬合金与铁铬合金	128
6.8.4 铜合金	129
6.9 碱金属与碱土金属	131
6.9.1 碱金属	131
6.9.2 碱土金属和镁	132
7 磁性材料	135
7.1 磁性材料的性质与分类	135
7.2 软磁材料	138
7.2.1 软磁材料的特性	138
7.2.2 纯铁和铁合金	139
7.2.3 坡莫合金	139
7.2.4 软磁铁氧体	141
7.2.5 非晶态软磁材料	142
7.2.6 纳米微晶软磁材料	143
7.2.7 高分子有机磁性材料	146
7.3 硬磁材料	149
7.3.1 硬磁材料特性	149
7.3.2 磁钢与铁合金	149
7.3.3 纳米微晶稀土硬 (永) 磁材料	151
7.3.4 永 (硬) 磁材料的发展趋势	152
7.3.5 永磁 (硬磁) 材料磁性测量方法	153
7.4 钕铁硼永磁材料	161
7.4.1 钕铁硼合金的磁特性	161

7.4.2	烧结 Nd-Fe-B 永磁体的制造方法	163
7.4.3	粘结 Nd-Fe-B 永磁材料的制造	166
7.4.4	低温度系数和高矫顽力 Nd-Fe-B 永磁体	179
7.4.5	钕铁硼永磁体的热出气率	180
8	溅射镀膜靶材	186
8.1	靶材的种类	186
8.2	对靶材的技术要求	186
8.2.1	靶材的纯度	186
8.2.2	成分与结构均匀致密性	187
8.2.3	晶粒尺寸及结晶取向	188
8.2.4	靶材的几何形状与尺寸	188
8.2.5	靶材与阴极背板的连接	188
8.3	靶材的制备工艺	189
8.4	常用的溅射靶材	190
8.4.1	铬靶	190
8.4.2	ITO 靶	190
8.4.3	金及金合金靶	195
8.4.4	磁性材料靶	196
8.4.5	铝合金溅射靶材	196
9	非金属材料	200
9.1	玻璃	200
9.1.1	真空工程所用玻璃的特点	200
9.1.2	玻璃的分类	201
9.1.3	玻璃的机械性能	201
9.1.4	玻璃的黏度、膨胀系数与热导率	202
9.1.5	电阻率与电击穿强度	204
9.1.6	玻璃的抗化学腐蚀性能	204
9.1.7	玻璃的渗透率与放气	205
9.2	陶瓷	207

9.2.1 陶瓷的性质	207
9.2.2 真空中常用的陶瓷	208
9.3 塑料	212
9.3.1 氟塑料 (聚四氟乙烯)	212
9.3.2 聚乙烯和聚丙烯	214
9.3.3 尼龙	214
9.3.4 酚醛塑料	214
9.3.5 有机玻璃	215
9.4 石墨 (碳)	215
9.4.1 概述	215
9.4.2 石墨的真空性能	216
9.4.3 石墨的电性能	218
9.4.4 石墨的物理化学性能	219
9.4.5 石墨的机械性能	221
9.4.6 石墨的加工工艺性	222
9.4.7 真空电阻炉的石墨构件	222
9.5 碳纤维与石墨纤维	224
9.5.1 碳纤维与石墨纤维的性质	225
9.5.2 石墨纤维制品的应用	226
9.5.3 石墨纤维-树脂复合材料 (碳纤维增强塑料)	229
9.5.4 石墨纤维增强金属基复合材料	230
9.6 橡胶	232
9.6.1 天然橡胶	232
9.6.2 合成橡胶	232
9.6.3 真空密封橡胶的选择	234
9.7 环氧树脂	235
9.7.1 环氧树脂的特性	235
9.7.2 机械真空泵的环氧树脂修复	236
10 辅助密封材料	237
10.1 真空封蜡	237
10.2 真空封脂	237

10.3	真空封泥	238
10.4	真空漆	238
10.5	真空粘接剂	238
10.5.1	环氧树脂密封胶	238
10.5.2	氯化银	239
10.5.3	厌氧胶	239
11	吸气剂与吸附剂	240
11.1	吸气剂	240
11.1.1	蒸散型吸气剂	240
11.1.2	非蒸散型吸气剂	243
11.2	吸附剂	247
11.2.1	分子筛	247
11.2.2	硅胶 (SiO_2)	251
12	真空工程用油	252
12.1	真空泵油	252
12.1.1	机械真空泵油	252
12.1.2	机械真空泵油的性能要求	253
12.1.3	机械真空泵油的过滤与更换	255
12.1.4	机械真空泵油的再生应用	259
12.2	扩散泵油	260
12.2.1	对扩散泵油的要求	260
12.2.2	扩散泵油分类及对极限压力的影响	261
12.2.3	扩散泵油的饱和蒸气压 p_s	261
12.3	扩散喷射泵油 (增压泵油)	262
12.4	真空干燥用油	262
12.4.1	气相干燥用煤油	262
12.4.2	导热油	264
12.5	真空润滑用油	265
12.5.1	真空液体润滑的特点和方式	265

12.5.2	真空润滑油	268
12.5.3	真空轴承的润滑技术	272
13	真空工程中的常用气体	274
13.1	惰性气体	276
13.1.1	氦 (He)	276
13.1.2	氖 (Ne)	276
13.1.3	氩 (Ar)	276
13.1.4	氪、氙 (Kr、Xe)	277
13.2	活性气体	277
13.2.1	氢气	277
13.2.2	氧气	278
13.2.3	氮气	278
13.2.4	二氧化碳	279
13.2.5	一氧化碳	279
13.3	气体的纯化与制取	279
13.3.1	气体的纯化	279
13.3.2	气体的制取	281
14	低温制冷系统工作介质	286
14.1	制冷剂	286
14.1.1	制冷剂的一般分类	286
14.1.2	对制冷剂的要求	287
14.1.3	常用的制冷剂	288
14.2	载冷剂	298
14.2.1	对载冷剂的要求	299
14.2.2	常用载冷剂	299
	参考文献	305

1 真空材料概述

1.1 真空材料的分类

真空工程的用材范围包括：真空设备的壳体，真空规管，置放于真空容器内的各种固定、活动、可拆卸机构及零部件，各类密封材料，各类真空获得设备中所用的工作物质等等。真空工程中所用的材料大致可分为两类：

(1) 结构材料。这是构成真空系统主体的材料，它将真空系统与大气隔开，承受着大气压力。这类材料主要是各种金属和非金属材料，包括可拆卸连接处的密封垫圈材料。

(2) 辅助材料：真空系统中某些零件连接处或系统漏气处辅助密封用的真空封脂、真空封蜡、装配时用的粘接剂、焊剂、真空泵及真空应用设备中所用的真空油、吸气剂、制冷剂、工作气体及加热元件材料等。

随着真空科学技术的进展，新工艺、新材料将不断出现。真空系统中常用的材料见表 1-1。

表 1-1 真空系统中的常用材料

零部件名称	低真空及高真空	超 高 真 空
壳体、管路、阀、内部零件	普通碳素钢、不锈钢	不锈钢、钛、高纯铝
密封垫圈	丁基橡胶、氟塑料	氟橡胶、氟塑料、铜、金、银、钨
导电体	铜、不锈钢、铝	铜、不锈钢
绝缘体	酚醛、氟塑料、玻璃、陶瓷	玻璃、致密高铝瓷等
视窗	玻璃	硼硅玻璃、透明石英玻璃
润滑剂	低蒸汽压的油及脂	二硫化钼、镀银或金
加热元件	镍铬铁合金、钨、钼、钽、碳布	钨、钼、钽、钨-铈合金、石墨碳纤维

1.2 电真空材料的分类与特性

1.2.1 电真空材料的分类

电真空材料主要分为三类：第一类包括制造零件和用作其他特殊用途的电真空金属和合金；第二类为制造具有电绝缘性能和半导体性能的零件所必须之绝缘材料和半导体材料；第三类是一些特殊材料，用来保证电真空器件必须具有的参数以及这些器件工作时参数的稳定性。

根据材料导电性的强弱，所有电真空材料和电工材料一样，可分为导体、半导体和绝缘体（电介质）。

导体内的静电场几乎是突然消失的，而电介质内的静电场则能存在很长时间。半导体介于两者之间。

1.2.2 电真空材料的特性

1.2.2.1 电性能

A 导电性

金属中的价电子同带正电荷的原子核的结合是相当弱的，并且不断地由一个原子移到另一个原子上。在金属中运动的全部电子共同形成了所谓“电子气”，它的性质在相当程度上与普通气体的性质相似。

当电子脱离原子时，原子就变成带正电荷的离子而分布在金属的晶格结点上。因此，金属应当看作是由固定在晶格结点上的金属离子核与其周围的价电子（即极易由一个原子的外层轨道移到另一个原子的外层轨道上的电子）所组成的系统。

在无外电场时，金属中电子的运动没有一定的方向。当金属加上电压时，电子在与电场强度相反的方向上得到了一个固定的加速度，于是金属导体内就产生了由于电子定向运动而形成的电流。

B 电阻率

金属的导电性决定于材料电阻率的大小。根据不同需要，电阻率可分为体积电阻率、线电阻和面积电阻率几种量纲。

体积电阻率为电流通过材料立方体的相对两面时，单位体积材料阻止电流通过的电阻数值。电阻率单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

由于采用 $\Omega \cdot \text{m}$ 单位时金属电阻率的数值很小，所以也常采用断面

为 1mm^2 和长 1m 的导线的电阻作为金属电阻的单位, 此时电阻率的量纲为 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

对于绝缘体和弱导体, 除了体积电阻率以外, 还使用面积电阻率, 单位为 $\Omega/\square$ 。

电阻率与温度有很大关系。一般情况下, 温度变化时, 材料的电阻率均发生改变。大多数金属的电阻率随着温度增高而增大。用电阻温度系数来表达材料电阻与温度的关系, 单位为 $1/^\circ\text{C}$ 或 $1/\text{K}$ 。

材料的导电性以电阻的倒数表示。如果材料的体积电阻率值为 ρ , 则相应的导电率为 $1/\rho$ 。

在电真空器件中, 各个零件之间的电绝缘的可靠性均与电阻率有关。

1.2.2.2 热性能

电子在运动时和晶格结点上的正离子发生碰撞, 把自己在电场中加速时所储存的能量传给了正离子。因此, 金属导体在有电流通过时就会发热。根据电子理论, 金属的导热性是由于金属高温部分和低温部分间电子互换的结果。此时, 动能即由导体的高温部分传至低温部分。因此, 导热现象和导电现象一样, 均与电子气的密度及运动有关。

热导率表征材料的导热能力, 其量纲为 $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ 或 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。在电真空器件中, 适当的热导率保证了某些零件, 如阴极或热丝工作温度的稳定。此外, 热导率还决定了器件不同零件上热量传导的速度。

比热是单位数量的材料温度升高 1K (或 1°C) 时所必需的热量, 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

膨胀系数是使某种材料温度升高 1K 时, 其体积或线度相对变化的指标。一般分为线膨胀系数和体膨胀系数, 其量纲为温度量纲的倒数 $1/\text{K}$ 。

必须指出, 膨胀系数同样也取决于温度, 其数值仅与某有限温度区域有关。此外, 在一种物理状态变为另一种状态的过渡点上 (如金属由一种形态变为另一种时), 膨胀系数将有剧烈的变化。

在电真空器件中, 材料的线膨胀系数有着重要的意义。例如, 玻璃和金属材料的膨胀系数的相符保证了金属零件和玻璃零件之间真空封接的可靠性。在很多情况下, 各零件间距离的恒定, 零件几何尺寸的变化