

电子工业 生产技术手册

4

电真空器件卷

电真空材料

电真空器件通用生产技术

内 容 简 介

本书是《电子工业生产技术手册》的第4分册, 主要介绍制造电真空器件用的通用材料和工艺。材料包括钨、钼、钽、铌、铜、镍等金属, 合金和各类定膨胀合金。对低蒸汽压焊料和磁性材料亦作了介绍。非金属材料着重介绍电真空陶瓷、玻璃和某些晶体。对各种材料只介绍其性能、用途而不涉及制造工艺。

通用工艺不包括普通零件的制造工艺而只从制造电真空器件角度介绍零件的清洗、被覆、焊接、封接、装架、封口、排气、老炼等技术。对电真空器件专用零件如阴极、热丝、消气剂、微波组件介绍了他们的特殊要求和制法。对真空技术亦作了较详细的介绍。

本分册未涉及光电器件、电光源器件专用的材料和工艺, 这些内容将在本卷另一分册作详细介绍。

本书适于从事电真空器件和真空技术专业的工程技术人员、工人和管理人员参考, 也可供大学、专科和中等专业学校作为教学参考资料。

电子工业生产技术手册

(4)

电 真 空 器 件 卷

《电子工业生产技术手册》编委会 编

国防工业出版社出版、发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张64 1491千字

1990年2月第一版 1990年2月第一次印刷 印数: 0,001—4,000册

ISBN 7-118-00220-8/TN·41

定价: 35.10元

科技新书目205-011

目 录

第1篇 电真空材料

第1章 难熔金属3

1.1 钨4

1.1.1 钨的物理性质4

1.1.2 钨的化学性质13

1.1.3 钨的机械性能14

1.1.4 含氧化物添加剂的钨丝18

1.1.5 钨合金21

1.1.6 钨及其合金的牌号和应用24

1.2 钼25

1.2.1 钼的物理性质26

1.2.2 钼的化学性质28

1.2.3 钼的机械性能30

1.2.4 含氧化物添加剂的钼34

1.2.5 钼合金35

1.2.6 钼及其合金的牌号和应用38

1.3 钽和铌39

1.3.1 钽、铌的物理性质39

1.3.2 钽、铌的化学性质41

1.3.3 钽和铌的机械性能43

1.3.4 钽-铌合金45

1.3.5 钽、铌及其合金的牌号和

应用49

1.4 钛、锆、铪50

1.4.1 钛50

1.4.2 锆59

1.4.3 铪61

1.5 铼63

1.5.1 铼的原子、晶体结构性质63

1.5.2 铼的热性质63

1.5.3 铼的电磁性质64

1.5.4 铼的化学性质64

1.5.5 铼的机械性能65

1.5.6 铼的用途65

第2章 非难熔金属67

2.1 铁和钢67

2.1.1 纯铁的成分、用途和性能67

2.1.2 电真空技术中常用的钢71

2.2 镍及其合金86

2.2.1 镍的特性87

2.2.2 阴极用镍及其合金91

2.2.3 其它几种常用的镍合金100

2.3 铜及其合金104

2.3.1 纯 铜104

2.3.2 黄 铜114

2.3.3 青 铜115

2.4 铝及其合金119

2.4.1 铝的物理、机械性能119

2.4.2 铝的化学性能120

2.4.3 铝的工艺性能121

2.4.4 真空技术中常用的铝及其合金121

2.4.5 应用126

2.5 膨胀合金127

2.5.1 铁磁性膨胀合金127

2.5.2 非铁磁性膨胀合金137

第3章 焊 料141

3.1 电真空器件对焊料的基

本要求141

3.2 常用电真空焊料的分类142

3.2.1 钎系焊料142

3.2.2 金系焊料142

3.2.3 银系焊料142

3.2.4 铜系焊料143

3.2.5 其它焊料143

3.3 常用电真空焊料性能图、

表汇编144

第4章 其它金属材料162

4.1 贵金属及其合金162

4.1.1 贵金属的性能162

4.1.2 贵金属及其合金的应用168

4.2 金属粉末170

4.3 复合材料	173	6.6.3 与固体的反应	233
4.3.1 封接用复合材料	173	第7章 电真空玻璃	234
4.3.2 电极用复合材料	175	7.1 电子管玻璃	235
4.3.3 其它复合材料	176	7.1.1 钨组玻璃	235
第5章 磁性材料	179	7.1.2 钼组玻璃	235
5.1 软磁材料	179	7.1.3 铂组玻璃	235
5.1.1 软磁材料的磁性能	179	7.1.4 铜组玻璃	238
5.1.2 常用的软磁材料	180	7.2 显象管玻璃	238
5.1.3 磁温度补偿合金	188	7.2.1 黑白显象管玻璃	238
5.2 永磁材料	189	7.2.2 彩色显象管玻璃	240
5.2.1 永磁材料的特性与分类	189	7.3 焊料玻璃	243
5.2.2 微波电子管中常用的永磁材料	191	7.3.1 焊料玻璃的某些特性	243
5.3 超导磁体	200	7.3.2 易熔焊料玻璃	245
5.3.1 超导现象与物理概念	200	7.3.3 难熔焊料玻璃	248
5.3.2 实用的超导材料和使用条件	202	7.3.4 中间玻璃	249
5.3.3 超导磁体电流供电方法	204	7.4 微晶玻璃	249
5.3.4 超导材料的应用	204	7.4.1 微晶玻璃的分类	250
第6章 电真空陶瓷	207	7.4.2 微晶玻璃的性能	252
6.1 氧化物瓷	207	7.4.3 热敏微晶玻璃	253
6.1.1 氧化铝瓷	207	7.4.4 光敏微晶玻璃	253
6.1.2 氧化铍瓷	209	7.4.5 特种微晶玻璃	255
6.1.3 透明瓷	211	7.5 石英玻璃	260
6.1.4 其它氧化物瓷	212	7.5.1 石英玻璃的分类	260
6.2 硅酸盐瓷	212	7.5.2 石英玻璃的生产工艺特点	261
6.2.1 滑石瓷	212	7.5.3 石英玻璃的性能	262
6.2.2 镁橄榄石瓷	215	7.5.4 特种石英玻璃	267
6.2.3 硅灰石瓷	215	第8章 其它介质材料	270
6.2.4 锆英石瓷	215	8.1 云母	270
6.3 氮化物瓷	215	8.1.1 云母的组成和结构	270
6.4 其它电真空用瓷	217	8.1.2 云母的性质	271
6.4.1 衰减瓷	217	8.1.3 天然云母及合成云母制品的应用	276
6.4.2 可切削瓷	218	8.2 金刚石	277
6.5 电真空瓷的物理性能	219	8.2.1 类型	277
6.5.1 真空性能	219	8.2.2 化学成分及杂质氮	278
6.5.2 热性能	220	8.2.3 化学物理性能	278
6.5.3 电性能	224	8.2.4 人造金刚石、人造多晶金刚石衰减材料	282
6.5.4 机械性能	230	8.2.5 应用	282
6.5.5 其它性能	232	8.3 人造蓝宝石	284
6.6 电真空瓷的化学性能	232	8.3.1 人造蓝宝石的特性	284
6.6.1 与气体的反应	232	8.3.2 人造蓝宝石单晶的生长	
6.6.2 与液体的反应	233		

方法	287
8.3.3 人造蓝宝石的应用	289
8.4 碳及石墨制品	290
8.4.1 碳和石墨材料的物理性能	291
8.4.2 碳和石墨材料的化学性能	295
8.4.3 高纯石墨制品	296
8.4.4 石墨乳	297
8.5 真空油脂	299
8.5.1 真空脂	299
8.5.2 真空封泥及封蜡	301
8.5.3 真空泵油	302
8.5.4 高真空微孔密封剂	305
8.5.5 有机硅偶联剂	306
8.6 硅、氟橡胶及其制品	306

8.6.1 硅橡胶	306
8.6.2 硅橡胶的性能	307
8.6.3 氟硅橡胶	307
8.6.4 氟橡胶	308
8.6.5 氟橡胶的选用	309
8.6.6 几种常用的氟化物	309
附表	314
1. 金属的物理性能	314
2. 固态和液态元素的蒸气压	316
3. 各种耐高温材料的蒸气压	320
4. 电子器件常用材料退火温度	320
5. 各种气体与蒸气的爆炸范围、自燃 点、蒸气的比重	321
6. 硬度换算表	322

第2篇 电真空器件通用生产技术

第1章 材料与零部件的净化	327
1.1 沾污的类型	327
1.2 机械净化	328
1.2.1 磨光	328
1.2.2 抛光	330
1.2.3 刷光	330
1.2.4 喷砂	332
1.2.5 滚筒研磨	334
1.3 化学净化	338
1.3.1 溶剂净化	338
1.3.2 洗净剂净化	342
1.3.3 碱液净化	346
1.3.4 酸液净化	349
1.3.5 水清洗	355
1.4 热处理净化	355
1.4.1 在空气中热处理	355
1.4.2 在氢气中热处理	357
1.4.3 在真空中热处理	363
1.5 其它净化	367
1.5.1 电化学净化	367
1.5.2 超声净化	371
1.5.3 粒子轰击净化	374
1.5.4 激光净化	374
1.6 净化件的贮存	374
1.7 检验和质量分析	375

第2章 零部件的被覆	377
2.1 机械被覆	377
2.1.1 喷涂	377
2.1.2 刷涂	382
2.1.3 旋涂	385
2.1.4 拉涂	387
2.1.5 浸渍涂覆	387
2.1.6 沉淀被覆	388
2.2 物理被覆	389
2.2.1 静电喷涂	389
2.2.2 熔融喷涂	392
2.2.3 热涂	395
2.2.4 真空蒸镀	396
2.2.5 溅射沉积	399
2.2.6 离子镀	403
2.3 化学被覆	406
2.3.1 化学气相沉积	406
2.3.2 置换镀	409
2.3.3 化学镀	409
2.3.4 化学转化	412
2.4 电化学被覆	413
2.4.1 电镀	413
2.4.2 电泳	421
2.4.3 电化学转化	423
第3章 金属零件的焊接和连接	426

3.1 电阻焊	427	4.2.2 研 磨	526
3.1.1 电阻焊的特点和分类	427	4.2.3 抛 光	530
3.1.2 电真空工业常用金属点焊的可焊性	427	4.3 玻璃与金属封接	533
3.1.3 点焊工艺	429	4.3.1 封接件及其材料的技术要求	533
3.1.4 缺陷分析	438	4.3.2 玻璃与金属的润湿	534
3.1.5 点焊质量的监测	439	4.3.3 玻璃与金属的膨胀系数	534
3.1.6 凸 焊	440	4.3.4 金属材料的净化及表面处理	537
3.1.7 滚 焊	442	4.3.5 金属氧化层的形成及其工艺	537
3.1.8 对 焊	443	4.3.6 典型封接结构及玻璃与金属封接件	538
3.2 熔化焊	443	4.4 玻璃与玻璃的封接	546
3.2.1 氩弧焊	443	4.4.1 直接熔封	546
3.2.2 微束等离子焊接	453	4.4.2 玻璃焊料封接	547
3.2.3 电子束焊	462	4.4.3 过渡玻璃封接	548
3.2.4 激光焊	471	4.5 应力与退火	553
3.3 钎 焊	476	4.5.1 玻璃中的热致应力	553
3.3.1 钎焊的特点与种类	476	4.5.2 玻璃与玻璃的封接应力	553
3.3.2 钎焊接头设计	477	4.5.3 玻璃与金属的封接应力	554
3.3.3 零件钎焊的定位方法及模具选择	481	4.5.4 应力的测定	556
3.3.4 钎焊工艺	481	4.5.5 玻璃的退火	557
3.3.5 多级钎焊	484	4.6 玻璃成型的模具	558
3.3.6 常用金属材料的钎焊	485	4.6.1 对模具材料的技术要求	558
3.3.7 钎焊在电真空器件生产中的应用	487	4.6.2 模具材料	558
3.3.8 钎焊缺陷分析	489	4.6.3 模具涂料	559
3.4 压力焊	492	4.6.4 模具温度	559
3.4.1 扩散焊	492	4.6.5 模具的冷却	559
3.4.2 超声波焊	503	第5章 陶瓷、云母与金属的封接	561
3.4.3 冷压焊	505	5.1 电真空器件中的陶瓷及其封接件	561
3.5 其它连接方法	506	5.2 常用陶瓷-金属封接结构	564
3.5.1 机械连接	506	5.2.1 分 类	564
3.5.2 粘 接	511	5.2.2 平封结构	566
第4章 玻璃零件及其封接	514	5.2.3 套封结构	568
4.1 玻璃零件	514	5.2.4 针封结构	570
4.1.1 玻 管	514	5.2.5 混合结构	571
4.1.2 玻 壳	518	5.3 常用陶瓷-金属封接工艺	571
4.1.3 玻璃碟与玻璃屏	523	5.3.1 烧结金属粉末法	572
4.1.4 玻璃支杆	523	5.3.2 活性金属法	584
4.1.5 窗口玻片	525	5.3.3 其他封接方法	590
4.2 玻璃零件的冷加工	525	5.3.4 部分特殊介质的封接方法	594
4.2.1 切 割	525	5.3.5 陶瓷-金属封接件的检验	595
		5.4 云母零件及其封接	595

5.4.1 云母零件的加工	595
5.4.2 检验及废品分析	596
5.4.3 云母的封接	597
第6章 阴 极	608
6.1 氧化物阴极	609
6.1.1 基金属	610
6.1.2 基金属的成形	613
6.1.3 碳酸盐	616
6.1.4 涂覆工艺	619
6.2 氧化物阴极的变体	625
6.2.1 海绵镍阴极	625
6.2.2 粉敷镍阴极(又称CPC)	627
6.2.3 压制阴极(亦称钡镍阴极)	629
6.2.4 储存式阴极	629
6.3 碳化钍钨阴极	630
6.3.1 阴极的成形	630
6.3.2 阴极的碳化	631
6.3.3 碳化钍钨阴极的废品分析	634
6.4 钡钨阴极	634
6.4.1 钨海绵体	634
6.4.2 难熔盐	637
6.4.3 浸渍钡钨阴极制造工艺	641
6.4.4 压制钡钨阴极制造工艺	642
6.4.5 钡钨阴极的发展	644
6.4.6 钡钨阴极成品质量检验和 废品分析	645
6.5 冷阴极	646
6.5.1 外场致发射体	646
6.5.2 次级发射体	646
6.6 其它阴极	647
6.6.1 纯金属阴极	647
6.6.2 六硼化钨阴极	648
6.6.3 氧化钍阴极和稀土氧化物阴极	649
6.6.4 钨钨阴极	650
6.6.5 阴极-热丝组件	651
6.7 阴极性能的比较和应用	653
6.7.1 几项主要性能的比较	653
6.7.2 阴极性能的综合比较和应 用范围	658
第7章 热 丝	660
7.1 热丝的结构形式	660
7.2 热丝的金属丝材料	661

7.3 热丝的成形	664
7.3.1 成形前丝料的预处理	664
7.3.2 热丝的成形	665
7.3.3 热丝成形的辅助工序	666
7.4 热丝的涂覆	667
7.4.1 热丝涂覆材料	667
7.4.2 热丝涂覆工艺	670
7.5 热丝的烧结	675
7.6 检验方法和废品分析	676
第8章 栅 极	678
8.1 对栅极材料的要求	678
8.2 细丝绕螺旋管形栅极的制造	678
8.3 框架栅极的制造	683
8.4 平板栅极的制造	686
8.5 鼠笼栅极的制造	689
8.5.1 车床绕制法	689
8.5.2 专用机绕制法	691
8.5.3 手工绕制法	693
8.5.4 电火花加工法	695
8.5.5 光刻法	697
8.6 热解石墨栅极的制造	698
8.7 网状栅极的制造	701
8.7.1 电火花加工法	701
8.7.2 电镀-机械法	704
8.8 蜂窝状球面无截获栅的制造	710
8.9 栅极涂覆	712
8.9.1 涂 铅	712
8.9.2 涂碳化钨	713
第9章 阳 极	715
9.1 阳极对材料的要求及常用 阳极材料的特性	715
9.1.1 阳极对材料的要求	715
9.1.2 常用阳极材料的特性	715
9.2 阳极的典型结构与制造方法	718
9.2.1 阳极的典型结构	718
9.2.2 典型结构阳极的制造方法	721
9.2.3 阳极的应用范围	724
9.3 阳极组件的典型结构及 组合方法	727
9.3.1 自然冷却阳极组件	727
9.3.2 风冷阳极组件	728

9.3.3 水冷阳极组件	729	12.1 装 配	820
9.3.4 蒸发冷却阳极组件	730	12.1.1 装配对真空卫生的要求	820
9.3.5 超蒸发和热管冷却阳极组件	732	12.1.2 装配中常用的工艺方法	820
9.4 常用连接方法的适用范围	733	12.1.3 阴极部件的装配及要求	821
9.5 阳极表面处理	734	12.1.4 栅极部件的装配工艺	836
第10章 吸气剂	735	12.1.5 阳极的装配工艺	840
10.1 蒸散型吸气剂	735	12.1.6 静电控制电子管的装配工艺	840
10.1.1 常用蒸散型吸气剂品种	735	12.1.7 微波电子管的装配工艺	846
10.1.2 蒸散型吸气剂制造工艺	743	12.2 封 口	857
10.1.3 蒸散型吸气剂使用要点	745	12.2.1 封口用气源	857
10.2 非蒸散型吸气剂	750	12.2.2 封口用的保护气体	860
10.2.1 常用非蒸散型吸气剂品种	751	12.2.3 封口用的模夹具	862
10.2.2 非蒸散型吸气剂制造工艺	760	12.2.4 玻璃封口用火头种类和结构	864
10.2.3 非蒸散型吸气剂使用要点	761	12.2.5 玻璃管封口	868
第11章 微波管组件	764	12.2.6 金属管封口	875
11.1 输能装置	764	第13章 排气、老炼及整管处理	877
11.1.1 真空密封窗	764	13.1 排 气	877
11.1.2 阻抗变换器	771	13.1.1 排气的要求	877
11.2 O型器件的慢波系统及 谐振系统	774	13.1.2 典型的排气系统	878
11.2.1 螺旋线及环杆、环圆形 慢波系统	774	13.1.3 典型排气工艺流程图	884
11.2.2 耦合腔型系统	789	13.1.4 接排气管	884
11.2.3 速调管谐振腔	792	13.1.5 检 漏	887
11.3 M型器件的慢波系统及 谐振系统	793	13.1.6 零件除气	887
11.3.1 正交场器件分布作用慢波系统	793	13.1.7 吸气剂处理	891
11.3.2 磁控管谐振系统及管内调谐 机构	796	13.1.8 阴极的分解与激活	891
11.4 衰减器	799	13.1.9 动态排气	894
11.4.1 薄膜衰减器	800	13.1.10 充气工艺	894
11.4.2 体积衰减器	805	13.1.11 封 离	896
11.5 电子枪	807	13.1.12 电子管典型排气工艺	898
11.5.1 分类与结构	808	13.2 老 炼	901
11.5.2 特殊制造工艺	808	13.2.1 热阴极电子管的常规老炼规范	901
11.6 收集极	814	13.2.2 老炼实例及特点	908
11.6.1 分类与结构	814	13.3 管外件装配	911
11.6.2 材料的选择及处理工艺	815	13.3.1 管外件的基本类别及作用	911
11.6.3 制造工艺	816	13.3.2 装管基、管帽	912
11.6.4 冷却方式	817	13.3.3 装散热器	916
第12章 装配与封口	820	13.3.4 装外调机构	917
		13.3.5 装磁路零部件	920
		13.3.6 灌 封	923
		13.4 整管处理	924
		13.4.1 打 印	924
		13.4.2 涂 漆	925

13.4.3 包装及贮存	927	14.3.1 漏孔的形式与判断	971
13.4.4 环境试验对电子管外表的要求	929	14.3.2 排气过程的检漏技术	972
第14章 真空技术在电真空器件		14.3.3 电真空器件零部件的检漏	975
生产中的应用	930	14.3.4 密封管的检漏技术	978
14.1 真空获得	930	14.3.5 发展中的检漏技术	979
14.1.1 旋转机械泵	931	14.3.6 电真空器件常用氦质谱检漏仪	980
14.1.2 扩散泵	932	14.4 真空技术与电真空器件	
14.1.3 涡轮分子泵	935	质量的关系	981
14.1.4 低温吸附泵	938	14.4.1 真空度与电真空器件质量	
14.1.5 钛升华泵和离子泵	938	的关系	981
14.1.6 低温冷凝泵	941	14.4.2 管内残余气氛对阴极的作用	982
14.1.7 电真空器件常用排气系统	942	14.4.3 电真空器件的贮存性能	987
14.2 真空测量	945	14.4.4 表面分析技术与电真空器件	
14.2.1 全压强的测量	945	中失效机理分析	999
14.2.2 残余气体分析	951	附录 常用旧计量单位与法定	
14.3 检漏技术	971	计量单位换算表	1004

电 真 空 材 料

主 编

刘 联 宝

主 审

莫 纯 昌

第1章 难熔金属

韩忠德

目前，我国把钨、钼、钽、铌、铼、锆、铪和钒等八种元素列为难熔金属。本章将涉及电真空器件生产技术中常用的钨、钼、钽、铌、铼、锆、铪及其合金，同时对熔点较高，应用甚广的钛及其合金也予以适当介绍^{(1)~(12)}。

难熔金属和钛的某些性质见表1-1。

表1-1 难熔金属和钛的某些性质

金 属	符 号	熔 点 (℃)	密 度 (g/cm ³)	线 膨 胀 系 数 α ($\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)	晶 型
钨	W	3400	19.3	4.5	体心立方(bcc)
钼	Mo	2615	10.2	5.1	体心立方
钽	Ta	2980	16.6	6.5	体心立方
铌	Nb	2467	8.6	7.2	体心立方
铼	Re	3180	21.0	6.6	密集六方(cph)
锆	Zr	1852	6.49	5.9	密集六方
铪	Hf	2227	13.1	6.0	密集六方
钒	V	1902	6.1	8.3	体心立方
钛	Ti	1667	4.5	8.9	密集六方

钨和钼与许多其它具有体心立方结构的金属一样，都存在塑性向脆性转变的较窄温度范围(图1-1)。

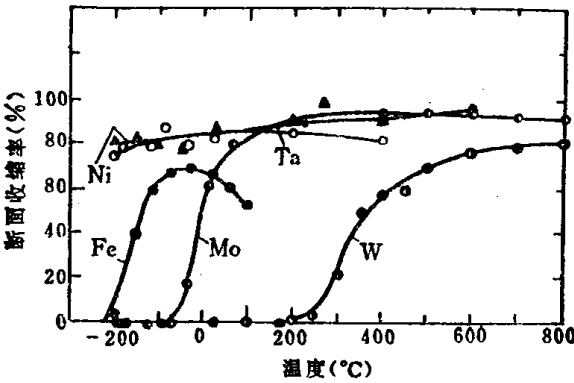


图1-1 体心立方金属的塑-脆转变

体心立方 { Ta 450
W 2000 } 晶粒个数/mm²
Mo 900
面心立方 { Fe —
Ni —

通常，金属的最大和最小断面收缩率之平均值所对应的温度称为塑-脆转变点 DBTT (Ductile-Brittle Transition Temperature)。在转变点以下，材料呈脆性断裂，断裂时的断面收缩率很小；在转变温度范围以上，呈塑性断裂，具有较大的断面收缩率。对于具有面心立

方结构的金属,如铜、铝和奥氏体不锈钢等不存在这种特性。难熔金属中存在的氢、碳、氮、氧等间隙元素以及第二相氧化物、氮化物、碳化物对DBTT有明显影响。这种作用是由于它们能阻止金属中位错移动和金属塑性流动的结果。

钨、钼、钽、铌等难熔金属由于熔点高,早期只能通过粉末冶金技术制取。随着冶金技术的发展,它们已可采用电弧熔炼、感应熔炼、电子束轰击熔炼、区域熔炼以及电渣熔炼等多种方法制取,其性能不断获得提高。采用某些氧化物添加剂和合金化的方法可使钨和钼的性能得到明显改善。不同的冶炼、加工方法对金属的性能有较大的影响。例如,采用粉末冶金方法所获得的金属晶粒较细,但气体含量较高;真空冶炼的气体含量较少,但晶粒较粗;电渣熔炼可以减少金属的非金属夹杂物;电子束轰击熔炼可以减少气体和易挥发性杂质;区域熔炼可以有效地提纯金属,以至获得单晶体。

1.1 钨^{[13]~[16]}

在纯金属中,钨的熔点、硬度最高,蒸气压、膨胀系数最低。这些特性使它成为电真空器件中最不可缺少的一种难熔金属。

1.1.1 钨的物理性质

1. 钨的原子、晶体结构性能

原子序数	74
原子量	183.85
同位素	180、182、183、184、186
原子体积	$15.848 \times 10^{-30} \text{m}^3$
密度(理论值)	19.3g/cm^3
(按X射线衍射晶格常数间距计算为 19.254g/cm^3)	
烧结钨(约 1500°C)	$10 \sim 15 \text{g/cm}^3$
(约 3000°C)	$16.5 \sim 17.5 \text{g/cm}^3$
旋锻钨	$18 \sim 19 \text{g/cm}^3$
控制钨	$18 \sim 19.3 \text{g/cm}^3$
原子价	-2至+6
价轨道	$5d^4 6s^2$
晶格类型	体心立方
晶格常数($\text{\AA}$)	$\alpha\text{-W} \quad 3.16522 \pm 0.00009 \quad (25^\circ\text{C})$
	$\beta\text{-W} \quad 5.046 \quad (25^\circ\text{C})$

($\beta\text{-W}$ 仅在氧存在时出现,可能为 W_3O)

原子间距($\text{\AA}$)	$\alpha\text{-W} \quad 2.74116$
	$\beta\text{-W} \quad 2.52$
原子半径($\text{\AA}$)	$\alpha\text{-W} \quad 1.41$
	$\beta\text{-W} \quad 1.37$

热中子俘获截面 $(19.2 \pm 1.0) \times 10^{-28} \text{m}^2/\text{mol}$

2. 热性能

熔点 3400℃
沸点 5700±200℃
熔化热 40.2±6.7 kJ/mol
临界温度 23000K(假定临界压强为101.3×10⁷Pa)
蒸发热 861.0±4.6J/mol
蒸气压 可按下式计算:

$$\lg P = \frac{-45385}{T} + 9.877$$

(T=2600~3100K, P的单位为Pa)

膨胀系数

表1-2 钨的低温膨胀系数

温 度 (K)	从X射线点阵间距获得的数据(×10 ⁻⁶ K ⁻¹)	膨胀实测数据(×10 ⁻⁶ K ⁻¹)
180	3.7	3.9
140	3.2	3.4
100	2.3	2.7
80	1.8	2.2
60	1.1	1.5
40	0.4	0.6

中温(298~2173K)可按下式计算:

$$\frac{L-L_{25^{\circ}\text{C}}}{L_{25^{\circ}\text{C}}}\times 100=A_0+A_1t+A_2t^2$$

式中, t为摄氏温度, A₀、A₁和A₂的数值见下表。

材 料	A ₀	A ₁	A ₂
粉末冶金棒	-8.69×10 ⁻³	3.83×10 ⁻⁴	7.92×10 ⁻⁸
粉末冶金板	-4.58×10 ⁻³	3.65×10 ⁻⁴	9.81×10 ⁻⁸
电弧熔铸板	-6.76×10 ⁻³	3.91×10 ⁻⁴	8.98×10 ⁻⁸

高温(2173K以上) 可按下式计算:

$$\alpha=[(5.262+0.875\times 10^{-3})T-(0.0997\times 10^{-5})T^2+(0.21\times 10^{-9})T^3]\times 10^{-6}$$

式中, T=t(℃)-1900

热导率 见图1-2和图1-3。

比热[kJ/(kg·K)]

$$C_p=130.32\left(1-\frac{4805}{T^2}\right)+(9.1229\times 10^{-6})T+(23.1481\times 10^3)T^3$$

焓(J/g)

$$H_T-H_{298}=0.13586\left(T+\frac{26.14}{T}\right)-42.70+(4.5604\times 10^{-6})T^2+(5.78647\times 10^{-13})T^4$$

熵[J/(g·K)]

$$\Delta S\Big|_{298}^T=0.13586(\ln T-5.6971)+326.4157[\exp(-2\ln T)-(1.12608\times 10^{-3})]$$

$$+9.1229 \times 10^{-6} \times (T-298) + 23.1481 \times 10^{-13} \\ \times \left[\frac{1}{3} \exp(3 \ln T) - (8.8212 \times 10^6) \right]$$

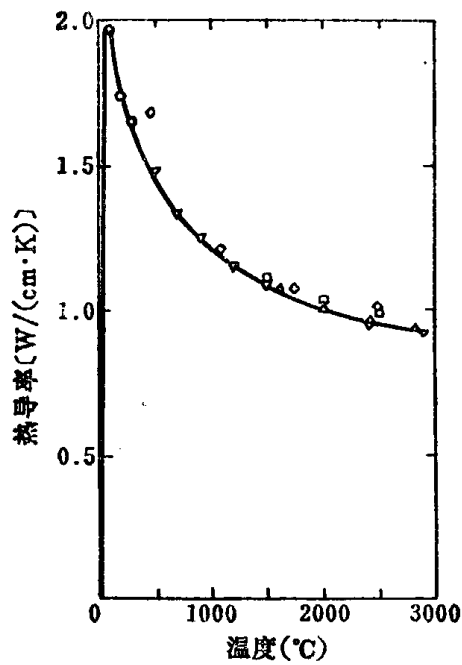


图1-2 钨的热导率与温度的关系

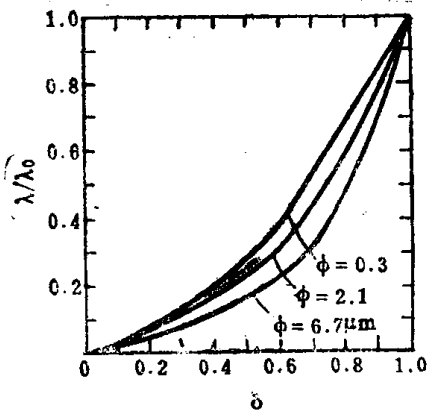


图1-3 钨的相对热导率 λ/λ_0 与相对密度 δ 的关系—— λ_0 为100%的理论密度时的热导率， ϕ 为粉末平均粒度(μm)

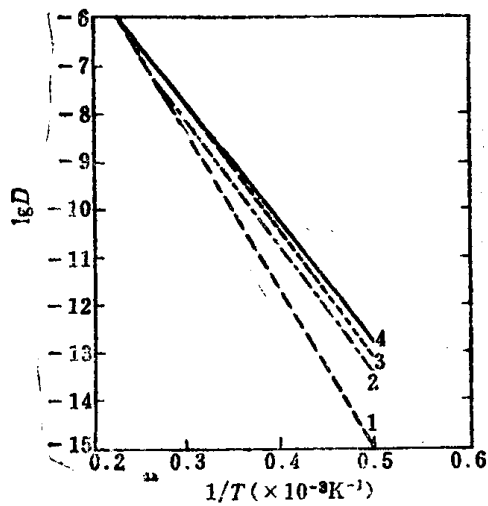


图1-4 钨的自扩散率和钨中碳和钍的体扩散率

1—单晶钨自扩散 $D = 4.28 \exp[-15300/RT]$ ；2—典型多晶钨试样自扩散 $D = 0.54 \exp[-120500/RT]$ ；
3—钨中的钍；4—钨中的碳。

扩散系数

由于晶界扩散远比晶内扩散容易，尤其在较低温度下更是如此，所以体扩散速度与显微结构有明显的关系。图1-4表示在钨中的某些典型扩散情况，表1-3列出钨中某些金属的扩散数据。扩散系数 D 等于 $D_0 e^{-Q/RT}$ ，其中 D_0 为实验常数， T 为绝对温度， R 为气体常数， Q 为扩散活化能。

表1-3 钨中某些金属的表面扩散数据

金	属	$D_0(\text{cm}^2/\text{s})$	$Q(\text{kJ/mol})$
钽		0.47	278
铈第一原子层		0.2	58.6
第二原子层		0.016	9.6
钾		0.43	63.6

再结晶

钨的再结晶温度随加工率增加而下降，完全再结晶温度为1350~1500℃。真空电弧熔炼钨的再结晶见图1-5。

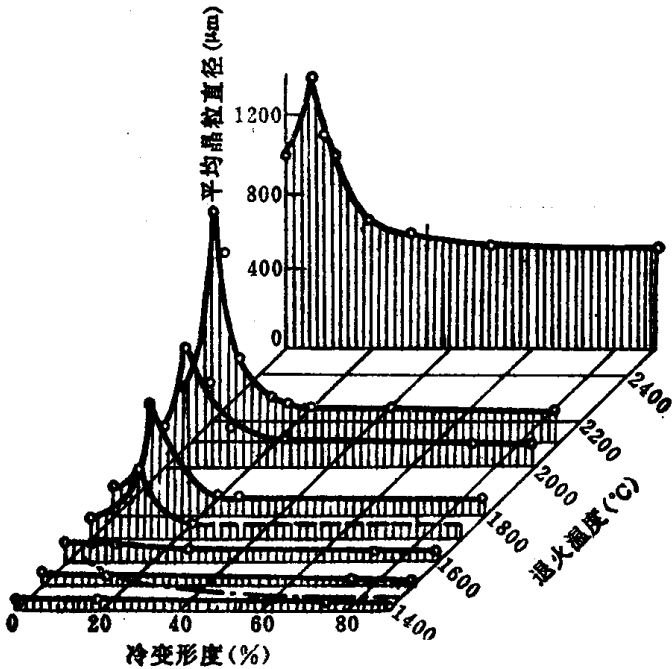


图1-5 钨的再结晶图

温度特性

仅与温度有关的钨的性能见表1-4。

3. 光学性能

X射线发射谱线

表1-5列出了国际X射线晶体学表中最强X射线谱线与钨的能级界限的对比关系。

全发射率和辐射热

真空中样品的发射率在很大程度上取决于其表面状况。通常，存在于金属表面的杂质(如氧化物)会使发射率高于无表面膜的、光洁无晶界的纯金属表面的发射率。单位面积的全辐射能符合斯忒藩-玻耳兹曼定律：

$$P=\sigma\varepsilon(T_1^4-T_2^4)$$

式中， T_1 、 T_2 分别为热源、环境的绝对温度，斯忒藩-玻耳兹曼常数 $\sigma=5.67032\times10^{-12}\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{K}^4)$ ， ε 为平均发射率。表1-6列出了不同温度下钨的总发射率和辐射功率密度(环境温度为300K)。图1-6示出了钨的光谱发射率与波长的关系。表1-7列出了钨的不同波长的标准单色

表1-4 钨的温 度 特 性

温度 T (K)	色温 T_c (K)	亮温 $S_{0.88\mu m}$ (K)	辐射 温度 T_R (K)	光谱发射率		平均光谱 发射率 $\bar{\epsilon}_v$	色光谱 发射率 ϵ_c	全发 射率 ϵ_t	正射亮度 (cd/cm^2)	全辐射 强度 η (w/cm^2)	发光效率 (lm/w)	蒸发率 ($g/(cm^2 \cdot s)$)	蒸气压 (Pa)	热容 C_p [$J/(mol \cdot K)$]	不同温 度下的 相对 长度	电阻率 ρ ($\mu\Omega cm$)
				$\epsilon_{0.88\mu m}$	$\epsilon_{0.457\mu m}$											
300				0.470	0.505			0.024		0.00110				25.25	1.0000	5.65
400				0.468	0.501			0.034		0.00495				25.33	1.0005	8.00
500				0.466	0.498			0.042		0.015				25.50	1.0010	10.48
600				0.464	0.495			0.052		0.0385				25.70	1.0014	13.07
700				0.462	0.492			0.062		0.0850				25.96	1.0018	15.75
800				0.460	0.490			0.074		0.173				26.13	1.0023	18.51
900				0.458	0.488			0.089		0.333				26.38	1.0028	21.35
1000	1006	966	581	0.456	0.486	0.464	0.396	0.105	0.126×10^{-3}	0.600	0.693×10^{-3}			26.63	1.0032	24.26
1100	1108	1058	659	0.454	0.484	0.463	0.393	0.121	1.07×10^{-3}	1.01	3.44×10^{-3}			26.92	1.0036	27.23
1200	1210	1149	738	0.452	0.482	0.462	0.391	0.138	6.31×10^{-3}	1.63	12.6×10^{-3}			27.30	1.0041	30.26
1300	1312	1240	819	0.450	0.480	0.460	0.388	0.156	0.276×10^{-2}	2.54	0.355×10^{-2}			27.93	1.0046	33.29
1400	1414	1330	905	0.448	0.478	0.459	0.386	0.174	0.1040	3.82	0.899×10^{-2}			28.47	1.0052	36.37
1500	1517	1420	991	0.445	0.476	0.457	0.383	0.192	0.333	5.54	0.199			29.10	1.0057	39.50
1600	1619	1509	1080	0.443	0.475	0.456	0.381	0.207	0.94	7.74	0.395			29.73	1.0063	42.67
1700	1722	1597	1167	0.441	0.473	0.455	0.378	0.222	2.30	10.58	0.724			30.35	1.0069	45.88
1800	1825	1684	1254	0.439	0.472	0.454	0.376	0.236	5.15	14.15	1.19			30.98	1.0075	49.12
1900	1929	1771	1342	0.437	0.470	0.453	0.373	0.248	10.40	18.45	1.94			31.61	1.0081	52.40
2000	2033	1857	1428	0.435	0.469	0.452	0.370	0.259	20.00	23.65	2.84	1.75×10^{-13}	1.32×10^{-3}	32.24	1.0088	55.71
2100	2137	1943	1514	0.433	0.467	0.450	0.367	0.269	35.9	29.85	4.08	1.58×10^{-14}	1.22×10^{-2}	32.67	1.0094	59.05
2200	2242	2026	1601	0.431	0.466	0.449	0.364	0.278	61.0	37.2	5.52	1.25×10^{-11}	9.89×10^{-2}	33.49	1.0101	62.42
2300	2347	2109	1688	0.429	0.464	0.448	0.362	0.286	100.1	45.7	7.24	7.82×10^{-11}	6.32×10^{-1}	34.12	1.0108	65.82
2400	2452	2192	1775	0.427	0.463	0.447	0.359	0.294	156	55.7	9.39	4.36×10^{-10}	3.52	34.75	1.0116	69.25