

电子工程师手册

ELECTRONICS ENGINEERS' HANDBOOK

上册

第3篇 电子材料

主 编	朱履冰
执 笔	朱履冰
	张之圣
	朱宝安
	韩立民
	朱秀文
主 审	宋秉治

电子工程师手册

电子工程师手册编辑委员会 编

下 册



机械工业出版社

(京) 新登字054号

本手册系统地概括了电子技术基础及其应用领域的主要技术内容，有一定的深度和广度。

全书按其内容，大体上可分为如下三个部分：

1. 基础知识部分，包括：常用符号、物理化学常数、单位、标准和数学公式；电磁学与电路基础；信号与系统分析等。
2. 技术基础部分，包括：电子材料；电子元器件；模拟电路；数字电路；微波、电波传播与天线；电子产品的工艺、结构、电磁兼容与可靠性。
3. 技术应用部分，包括：电力电子技术；电子测量与电子仪器；机械量的电子测量；电子计算机与人工智能；自动控制系统与控制仪表；数控技术与机器人；广播、电视与声像处理技术；通信、雷达、导航与电子对抗；医疗电子技术。

本书在编写上，力求简明扼要、深入浅出、直观易懂、归类便查。注意理论阐述的严谨和采用数据、图表和公式的准确可靠。努力做到既反映我国电子技术近年来的主要成就，也介绍国外的先进技术和发展动向。

本手册主要供机电工业系统和其他行业系统的工程技术人员在处理专业工作中涉及电子技术问题时查阅使用，也可供大专院校有关专业师生参考。

电子工程师手册

电子工程师手册编辑委员会 编

责任编辑：贾 馨 版式设计：霍永明
封面设计：姚 毅 责任校对：肖新民
责任印制：路 琳

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京房山区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张 182¹/₂·插页 8·字数 5756 千字

1995年4月北京第1版·1995年4月北京第1次印刷

印数 00,001—10 000 定价：上、下册共198.00元

ISBN 7-111-04178-X/TM·523

发展电子技术促
进经济繁荣与社
会进步

孙俊人

一九八二年六月

中国电子学会理事长孙俊人为本书题词

电子工程师手册编委会

主任委员	吴咏诗					
副主任委员	胡健栋	邹洵	罗命钧(常务)			
委	翁瑞琪(常务)	秦起佑(常务)	张长生			
员	黄仕机	周孝琪	阚石	俞斯乐	丁润涛	
	郭维廉	徐苓安	张国雄	朱梦周		
总编辑	吴咏诗					
副总编辑	秦起佑	翁瑞琪				
秘书	尹明丽					

序

电子技术是一门发展迅速，应用广泛的技术。它的发展可以说是日新月异，新技术层出不穷。它的应用则已遍及工业、农业、国防、科技、文教和人民日常生活的各个领域，对于经济发展和社会进步有着重要的促进作用。当前第三次新的技术革命正在兴起，如果说第一次技术革命是以机械化为标志，第二次技术革命是以电气化为标志的话，那么，第三次新的技术革命就应该说是以电子化作为标志。前两次技术革命主要都是人类体能的延伸，而第三次新的技术革命则主要是人类智能的扩展，其基础就是电子技术。也有人说目前已是信息时代，而信息的获取、处理、传输也是要依赖于电子技术的。所以为了加速我国的现代化建设，体现“科学技术是第一生产力”的伟大作用，在各个领域，尤其是机电工业系统中推广与普及电子技术是十分重要的。在这种情况下，编写和出版这部《电子工程师手册》是很有必要的。

这部手册是为机电工业系统和其他行业系统中具有中等以上技术水平的工程技术人员在处理专业工作中涉及电子技术问题时查阅而编写的，是以应用为主的、综合性的电子技术手册。它是一部工具书，主要为工程技术人员在研究、处理电子技术问题时起备查、提示和启发的作用。它也可作为高等学校有关专业师生及其他有关人员提供参考。

这部手册系统地概括了电子技术及其主要应用领域的基本技术内容。在内容取舍上力求做到：科学性、实用性和先进性。科学性是要体现现代电子科学技术的基本内容，介绍必要的基础知识，注意理论阐述的严谨，采用数据、图表的准确可靠；实用性是要从实用出发建立自己的体系，主要提供一些结论性的技术内容以及这些结论的应用，在编写上简明扼要，深入浅出，直观易懂，归类便查；先进性则是既要反映我国电子技术近年的主要成就，也要介绍国外的先进技术和发展动向，注意反映电子技术的时代特征。

整个手册共17篇，按其内容大体上可分为以下三个部分：

(1) 基础知识 共2篇，分别是：常用资料（符号、常数、单位、标准和数学公式）；电磁学与电路基础。

(2) 技术基础 共6篇，分别是：电子材料；电子元器件；模拟电路；数字电路；微波技术、电波传播与天线；电子产品的工艺、结构与可靠性。

(3) 技术应用 共9篇，分别是：电力电子技术；电子测量与电子仪器；机械量的电子测量；电子计算机；自动控制与控制仪表；电子技术在机械制造方面的应用；广播、电视与声像技术；通信、雷达、导航与电子对抗；医疗电子技术。

这部手册的编写方式也是一种改革的尝试。过去一部综合性手册的编写一般是组织全国各地的有关专家分头编写，然后集中统稿编辑的。由于专家分散在全国各地，联系讨论不便，统稿、编辑过程中也要往返于各地进行讨论、修改，这就不能不拖延时日，往往要5~6年，大型的甚至要8~10年才能出版。电子技术发展非常迅速，如果从编写到出版要花这样长的时间，那么，手册出版之日可能已是内容陈旧之时。因此，这部手册是主要聘请天

津、北京两地的有关专家编写、审稿，而且由机械工业出版社委托天津大学承担了具体的组织工作。由于编写人员居住相对集中，便于交流与讨论，主编与主审也能及时交换意见，除出版社外，还有一个专业面较宽的学术单位负责组织工作，这就使整个手册的编写、审稿和定稿工作在两年之内顺利完成，而且保证了质量，基本上达到了预定的目标和要求。应该说这种做法是成功的，不足之处则可能是未能充分反映其他各地有关专家的经验与成就，这就希望各位专家和广大读者对本手册多提宝贵意见，以便今后能予以修改和补充。

这部手册能以顺利地完成和出版，我愿诚挚地感谢编委会各位委员、各篇的主编、主审以及全体编者所付出的辛勤劳动，感谢他们认真负责的态度和友好合作的精神。我还要特别感谢机械工业出版社的罗命钧、秦起佑、贾馨三位同志和天津大学的翁瑞琪教授，他们为本手册的组织编写、统稿定稿、编辑出版做了大量的工作，为保证手册的质量做出了重要的贡献。

我希望，这部手册的出版，能为有关专业的工程技术人员和高等学校的师生，在从事电子技术应用与推广工作中提供一本实用的工具书。如果它能为我国电子技术的广泛应用起到一些促进作用的话，这将使我们所有这些参加手册编写、出版工作的同志感到荣幸和欣慰。

吴泳诗

目 录

第1章 导电材料	
1 基本特点及分类.....3-1	4.2 电阻率的测量3-80
1.1 导电材料分类.....3-1	4.3 晶向的测定3-80
1.2 导电材料特点.....3-2	4.4 位错的检测3-81
2 性能参数.....3-3	4.5 杂质分布的测量3-81
2.1 导电材料一般性能参数.....3-3	4.6 非平衡少数载流子寿命的测量3-82
2.2 常用金属材料的性能及参数.....3-3	4.7 霍尔测量3-82
2.3 无机非金属导电材料的性能及参数3-21	
2.4 有机导电材料的性能及参数3-22	第3章 绝缘材料
2.5 快离子导体材料的性能及参数3-24	1 基本特点及分类3-83
3 应用3-32	1.1 定义3-83
3.1 导体材料的应用3-32	1.2 基本特点及术语3-83
3.2 电阻材料的应用3-45	1.3 分类3-85
3.3 特殊金属材料的应用3-54	2 性能参数3-85
3.4 快离子导体材料的应用3-54	2.1 气体绝缘材料3-85
4 测试3-57	2.2 液体电介质3-86
4.1 物理性能测试3-57	2.3 固体绝缘材料3-87
4.2 化学分析3-61	3 应用3-90
4.3 仪器分析3-63	4 测试3-91
	4.1 绝缘电阻的测试3-91
	4.2 损耗角正切 $\text{tg}\delta$ 的测试.....3-91
	4.3 击穿强度的测试3-91
第2章 半导体材料	
1 基本特点及分类3-74	第4章 磁性材料
1.1 外界因素对电阻率的影响3-74	1 基本特点及分类3-93
1.2 能带特点3-74	1.1 基本物理量3-93
1.3 导电类型3-74	1.2 磁化曲线3-93
1.4 分类3-75	1.3 磁滞回线3-93
2 性能参数3-75	1.4 磁致伸短3-94
2.1 元素半导体3-75	1.5 自发磁化与磁畴3-94
2.2 化合物半导体3-76	1.6 退磁场与退磁能3-94
2.3 氧化物半导体3-77	1.7 分类3-94
2.4 固溶体半导体3-77	2 性能参数3-95
2.5 铁电半导体3-77	2.1 硬磁材料3-95
2.6 有机半导体3-77	2.2 软磁材料3-95
3 应用3-78	2.3 特殊磁性材料3-95
4 测试3-79	3 应用3-98
4.1 导电类型的测量3-79	4 测试3-98
	4.1 静态磁性能的测试3-98
	4.2 软磁材料动态磁性能的测试.....3-101

第5章 功能电子材料

- 1 基本特点及分类·····3-102
 - 1.1 敏感功能材料·····3-102
 - 1.2 光功能材料·····3-102
 - 1.3 超导材料·····3-106
- 2 应用·····3-108
- 3 测试·····3-108
 - 3.1 霍尔器件的乘积灵敏度 S_H ·····3-108
 - 3.2 超导材料参数的测试·····3-109
 - 3.3 热敏材料电阻—温度特性的测量·····3-109
 - 3.4 CdS光敏电阻材料的灵敏度与温度特性·····3-109
 - 3.5 PTC热敏电阻材料的电阻—温度特性的测量·····3-110

第6章 复合材料

- 1 基本特点及分类·····3-111
 - 1.1 基本特点·····3-111
 - 1.2 复合材料的常用术语·····3-111
 - 1.3 复合材料的分类·····3-111
- 2 性能参数·····3-111
 - 2.1 金属基复合材料·····3-111
 - 2.2 聚合物(树脂)基复合材料·····3-114
 - 2.3 陶瓷基复合材料·····3-114
 - 2.4 其他复合材料·····3-114
- 3 应用·····3-117
 - 3.1 复合材料的设计与选用·····3-117
 - 3.2 碳纤维增强复合材料的应用·····3-117
 - 3.3 复合金属导体的应用·····3-117
 - 3.4 常用复合材料的应用·····3-117
 - 3.5 民用复合材料·····3-117
- 4 测试·····3-119
 - 4.1 以研制为主要目的的复合材料性能测试·····3-119
 - 4.2 以应用为目的的复合材料性能测试·····3-119
 - 4.3 无损检验·····3-120

第7章 薄膜材料

- 1 基本特点及分类·····3-121

- 2 性能参数·····3-121
 - 2.1 导电薄膜·····3-121
 - 2.2 介质薄膜·····3-121
 - 2.3 半导体薄膜·····3-123
 - 2.4 其他薄膜·····3-123
- 3 应用·····3-126
 - 3.1 导电薄膜·····3-126
 - 3.2 介质薄膜·····3-126
 - 3.3 半导体薄膜·····3-127
 - 3.4 其他薄膜·····3-128
- 4 制备技术·····3-128
 - 4.1 化学气相沉积(CVD)·····3-128
 - 4.2 真空蒸镀(VE)·····3-128
 - 4.3 离子镀(IP)·····3-134
 - 4.4 真空溅射(SP)·····3-134
 - 4.5 外延生长镀膜技术·····3-137

- 5 测试·····3-141
 - 5.1 薄膜表面状态的分析与测试·····3-141
 - 5.2 薄膜成分与组织结构的测试·····3-141
 - 5.3 薄膜厚度的测定与监控·····3-141
 - 5.4 薄膜硬度的测定·····3-143
 - 5.5 薄膜附着力的测定·····3-144
 - 5.6 薄膜内应力的测定·····3-145
 - 5.7 薄膜耐蚀性的测定·····3-145
 - 5.8 薄膜钎焊性能的测定·····3-145

第8章 辅助材料

- 1 粘结剂·····3-147
 - 1.1 胶粘剂·····3-147
 - 1.2 导电涂料及导电胶精剂·····3-147
 - 1.3 FS-203粘合剂·····3-147
 - 2 光刻胶·····3-148
 - 3 超纯制剂·····3-149
 - 3.1 超纯气体·····3-149
 - 3.2 超纯水·····3-149
 - 3.3 超纯化学试剂·····3-150
 - 4 超细引线材料·····3-151
 - 5 包封涂料·····3-152
- 参考文献·····3-153

当今的社会已进入高度信息化的时代，其特点是以电子技术为先导，而电子材料的研究开发是电子工业发展的基础，在社会发展中起着举足轻重的作用。

电子材料，是指电子信息工业所使用的、能满足电子信息工业专门要求的一大类材料。电子材料的种类繁多：从形态看，有固体、液体、气体材料；从晶态看，有多晶、单晶、非晶材料；从成分看，有金属、非金属、单质、化合物，而化合物又有无机、有机化合物等等。本篇试图从材料的特性、应用以及目前工作中惯用的一些概念出发，把电子材料分为导电材料、半导体材料、绝缘材料、磁性材料、功能电子材料、复合材料、薄膜材料、辅助材料。

电子材料与电子工业的关系是一种相互促进的关系，材料科学的发展为新型电子设备、新功能新效应的诞生与开发提供了前提；而电子工业的发展又促进了高纯度、高效能电子材料的研制与开发。

目前，电子材料具有更新快、增值高、生产的国际化等特点，并且要求质量高，性能指标精度高，因此，电子材料的研制与开发已经成为各行各业共同关注的内容，是与高科技发展息息相关的重要课题。

本篇各章将按照基本特点及分类、性能参数、应用、测试四大部分作最基本的阐述，限于篇幅，产品难以概列无遗，仅就目前较为通用的及新开发基本定型的电子用材料加以扼要介绍。

第1章 导电材料

1 基本特点及分类

导电材料是指在常温常压下具有一定导电能力的材料。导电材料的导电能力一般以“导电率”标志，符号为“ σ ”。根据我国1990年颁布的“法定计量单位”规定，电导率量纲为“西[门子]·米⁻¹”，量纲符号为(S·m⁻¹)。对于金属材料，其电导率将根据国际电工委员会规定，以“百分电导率”表示。

导电材料是电子工业的基本材料，其中以金属材料电导率最高，是应用最为广泛的导电材料；近年来开发的有机高分子导电材料逐渐展现其特殊导电功能，正在推广应用；另一种新型导电材料是快离子导体。其他导电材料也正在开发中。

1.1 导电材料分类

1.1.1 导电材料分类方法

导电材料分类方法很多，常用的分类方法见表3·1-1。一般多根据需要，选用不同的分类方法。本章在介绍导电材料性能时，选用了表中第一、三种方法，在介绍导电材料应用时，选用表中第四种方法。

1.1.2 金属材料分类

由于金属材料是导电材料中的重要部分，在本章中将作为重点内容加以介绍。金属材料为无机材

表3·1-1 导电材料分类

分类方法	类别
按物质聚集态	气体导电材料 液体导电材料 固体导电材料
按化学类别	有机导电材料 无机导电材料
按元素类别	非金属导电材料 金属导电材料
按导电能力	导体材料(属高导电材料) 电阻材料(属低导电材料)
按导电机理	电力导电型材料(即第一类导电材料) 离子导电型材料(即第二类导电材料)

料，在常温下一般为固体，也有液态的，如汞等。金属材料的导电机理为电子型导电。按其导电能力分为高导电及低导电材料两种。

金属材料一般按冶金标准分为黑色金属及有色金属两大类。黑色金属主要包括铁及其合金，锰、铬及其合金等，在电子工业中多作为结构材料使用，本章不予介绍。有色金属作为重要的导电材料，将着重列举，但限于篇幅，只介绍常用的几种。

金属材料的分类（主要介绍有色金属的分类）定，金属材料的电导率以“百分电导率”表示，即见表3·1-2。

表3·1-2 有色金属主要类别

类别	主要品种
重金属	铜、镍、铅、锌、钴、锡、铋、铌、铍等密度大于4.5g/cm ³ 的金属及其合金
轻金属	铝、镁、钠、钾、钙、锶、钡等密度小于4.5g/cm ³ 的金属及其合金
贵金属	金、银、铂、铂族元素、铱、钨、钨、铱、钼及其合金等
稀有金属	轻质 钽、钼、铷、铯、铍及其合金等
	高熔点 钨、钼、钨、钨、钨、钨、钨及其合金等
	难分离 镓、铟、铊、铋及其合金等
	稀土类 钪、钇、镧系元素等17种金属及其合金
	放射类 钋、镭、铀、钍、钷、钷、钷等
半金属	硅、硒、碲、砷、硼等

1·2 导电材料特点

导电材料特点，一般通过其电性能参数表示。

1·2·1 导电材料电性能参数定义式

导电材料电性能参数定义式见表3·1-3。

1·2·2 导电材料电参数确定方法

1. 电导率确定方法

1) 金属材料电导率 根据国际电工委员会规

定，金属材料的电导率以“百分电导率”表示，即用“%IACS”(International Annealed Copper Standard)表示。这是指以标准退火工业纯铜在20°C的电导率为基准，用100%IACS表示，则其他金属的电导率将以此为标准，所得到的相对百分值即为百分电导率。

在百分电导率定义中，以标准退火铜线材的电导率为“标准电导率”。若以ρ表示一般金属材料电导率，则百分电导率

$$\sigma = \frac{\rho_{Cu}}{\rho} \times 100\% \quad (\text{IACS})$$

式中 ρ_{Cu} 为标准铜线材在20°C温度下的电导率，其值为0.017241Ω·mm²/m。

在一般情况下，除银以外，金属的百分电导率均小于1。

2) 铜线材百分电导率

$$\sigma_{Cu} = \frac{C}{\frac{R_t M}{L^2} + B(t_0 - t)} \times 100\% \quad (\text{IACS})$$

式中 R_t 是温度为 t 时电阻值 (Ω)，M 为导体总重量 (g)，L 为导体测量区间长度 (m)，t₀ 为室温 (°C)，B、C 为常数，C = 0.153280，B = 0.00060。

3) 非金属材料电导率

(1) 平均截面法 电导率确定式

$$\sigma = \frac{C}{\frac{R_t A}{L} [1 + \alpha_0(t_0 - t)]} \times 100 \quad (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$$

表3·1-3 导电材料基本电参数定义式

项目	电阻率	电导率	电阻温度系数	接触电势差
符号	ρ (Ω·m)	σ (S·m ⁻¹)	TCR或α _t (°C ⁻¹)	U _{AB} (μV)
表达式	ρ = R $\frac{A}{L}$ σ = $\frac{1}{\rho} = \frac{L}{RA}$	ρ _s = R _s d	α _t = $\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{R_t - R_0}{R_0(t - t_0)}$ 半导体: α _t = -bT ⁻²	U _{AB} = U _B - U _A + $\frac{kT}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}$
式中符号含意	A—导体截面积(mm ²) L—导体长度(m) R—导体电阻值(Ω) R _s —膜电阻(或方阻)(Ω·□ ⁻¹) d—薄膜厚度(μm) ρ _s —膜电阻率		R _t —终温 t 时的电阻值(Ω) R ₀ —初温 t ₀ 时的电阻值(Ω) t—终温(°C) t ₀ —初温(°C) T—绝对温度(K) b—半导体激活能常数	U _A —金属 A 之电势(μV) U _B —金属 B 之电势(μV) k—玻耳兹曼常数 e—电子电荷 n _{0A} —金属 A 中电子密度 n _{0B} —金属 B 中电子密度

(2) 重量法 电导率确定式

$$\sigma = \frac{CG}{\frac{R_t M}{L} [1 + \alpha_0(t_0 - t)]} \times 100 \text{ (S} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}$$

式中 C为计算常数; A为导体平均截面积(mm²);
 ρ为导体密度(g·cm⁻³); α₀为室温电阻温度系数
 (°C⁻¹). 其他同本节之2)。

2. 电阻率确定方法

(1) 平均截面法 电阻率确定式

$$\rho = \frac{A}{L} R_t [1 + \alpha_0(t_0 - t)] \times 100 \text{ (}\Omega \cdot \text{m)}$$

(2) 重量法 电阻率确定式

$$\rho = \frac{R_t}{L L_0 \rho} [1 + \alpha_0(t_0 - t)] \times 100 \text{ (}\Omega \cdot \text{m)}$$

式中 L₀为导体总长度(m); 其他同前。

2 性能参数

导电材料性能, 除电性能外, 还包括力学、热学、化学等性能。这些性能, 同材料晶格的结构有密切的关系, 在材料的使用选择中有重要意义。

2.1 导电材料一般性能参数

导电材料结构参数见表3·1-4。其基本性能参数见表3·1-5。

2.2 常用金属材料的性能及参数

2.2.1 铜及其合金

除银以外, 铜是金属中电导率最高的导电材料, 应用广泛。铜合金在电导率变化不大的情况下, 改善了纯铜的性能, 因此应用更为广泛。

1. 纯铜主要成分和用途 纯铜又称为“紫

表3·1-4 常用金属材料结构参数

名称	符号	序号	原子量	原子外层 电子组态	晶格结构 类型 ^①	晶格常数 a (hcp包括c)(Å) ^②	最近原子 间距(Å)	原子半径 (Å)	原胞中 原子数	配位数
铍	Be	4	9.01218	2s ²	hcp	2.28 (c = 3.59)	2.225	1.13	2	6
钠	Na	11	22.98911	3s ¹	bcc	4.225	3.715	1.92	2	8
镁	Mg	12	24.305	3s ²	hcp	3.21 (c = 5.21)	3.196	1.60	2	6
铝	Al	13	26.98154	3s ² 3p ¹	fcc	4.05	2.862	1.43	4	12
硅	Si	14	28.0855	3s ² 3p ²	dia	5.4282	2.351	1.34	8	4
钛	Ti	22	47.90	3d ² 4s ²	hcp	2.95 (c = 4.68)	2.89	1.47	2	6
钒	V	23	50.9414	3d ³ 4s ²	bcc	3.03	2.632	1.36	2	8
铬	Cr	24	51.996	3d ⁵ 4s ¹	bcc	2.88	2.498	1.28	2	8
锰	Mn	25	54.9380	3d ⁵ 4s ²	复杂立方	8.91	2.24	1.36	58	—
铁	Fe	26	55.847	3d ⁶ 4s ²	bcc	2.87	2.481	1.27	2	8
钴	Co	27	58.9332	3d ⁷ 4s ²	hcp	2.51 (c = 4.07)	2.51	1.25	2	6
镍	Ni	28	58.71	3d ⁸ 4s ²	fcc	3.52	2.49	1.25	4	12
铜	Cu	29	63.546	3d ¹⁰ 4s ¹	fcc	3.61	2.556	1.28	4	12
锌	Zn	30	65.38	3d ¹⁰ 4s ²	hcp	2.66 (c = 4.95)	2.664	1.37	2	6
锗	Ge	32	72.59	4s ² 4p ²	dia	5.658				
铀	Zr	40	91.22	4d ² 5s ²	hcp	3.23 (c = 5.133)	3.17	1.60	2	6
铌	Nb	41	92.9064	4d ⁴ 5s ¹	bcc	3.30	2.86	1.47	2	8
钼	Mo	42	95.94	4d ⁵ 5s ¹	bcc	3.15	2.73	1.40	2	8
钌	Ru	44	101.07	4d ⁷ 5s ¹	hcp	2.70 (c = 4.28)	2.649	1.34	2	6
铑	Rh	45	102.9055	4d ⁸ 5s ¹	简立方	2.80	2.689	1.34	48	—
钯	Pd	46	106.4	4d ⁹ 5s ¹	fcc	3.89	2.75	1.37	4	12
银	Ag	47	107.868	4d ¹⁰ 5s ¹	fcc	4.09	2.888	1.44	4	12
镉	Cd	48	112.40	4d ¹⁰ 5s ²	hcp	2.98 (c = 5.62)	2.98	1.52	2	6
铟	In	49	114.82	5s ² 5p ¹	面心立方	4.954 (c = 4.95)	4.591	3.23	4	4.8
锡	Sn	50	118.69	5s ² 5p ²	dia	5.658	2.81	1.58	8	4
锑	Sb	51	121.75	5s ² 5p ³	斜方	4.5064	2.903	1.61	—	—
钡	Ba	56	137.33	5p ⁶ 6s ²	bcc	5.03	4.35	2.24	2	8
钨	Ta	73	180.9479	5d ³ 6s ²	bcc	3.30	2.860	1.47	2	8
钨	W	74	183.85	5d ⁴ 6s ²	bcc	3.16	2.979	1.52	2	8
铱	Os	76	190.2	5d ⁶ 6s ²	hcp	2.73 (c = 4.319)	2.675	1.35	2	6
铱	Ir	77	192.22	5d ⁷	fcc	3.84	2.714	1.36	4	12
铂	Pt	78	195.09	5d ⁹ 6s ¹	fcc	3.92	2.775	1.39	4	12
金	Au	79	196.9665	5d ¹⁰ 6s ¹	fcc	4.08	2.884	1.44	4	12
铊	Tl	81	204.37	6s ² 6p ¹	hcp	3.46 (c = 5.53)	3.407	1.71	2	6
铅	Pb	82	207.2	6s ² 6p ²	fcc	4.95	3.499	1.75	4	12
铋	Bi	83	208.9804	6s ² 6p ³	斜方	4.736	3.11	1.82	2	3.3

① hcp——六角晶系, bcc——体心立方, fcc——面心立方, dia——金刚石结构

② 1Å = 0.1nm = 10⁻¹⁰m

表3-1-5 常用金属基本性能参数

名称	符号	密度 (kg/m ³) ×10 ³	熔点 (°C)	电导率 (%IACS)	热导率 (W/m·K)	电阻率 (×10 ⁻⁸ Ω·m)	电阻温度 系数 (×10 ⁻³ °C ⁻¹)	热胀系数 (×10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	弹性模量 (10 ⁻⁴ MPa)	抗拉强度 (MPa)	热电势 (mV)
铍	Be	1.86	1289	33	146.5	6.6	6.7	11.5	28~31	137.8	-7.25
钠	Na	0.97	97.8	37.4	134	4.6	5.40	71	—	~0	-0.21
镁	Mg	1.74	650	34	157.42	4.47	4.12	25.7	4.48	196	—
铝	Al	2.69	660	61	222	2.66	3.90	23.03	6.8~7	78	+0.38
硅	Si	2.33	1414	—	83.74	10	0.8~1.8	2.8~7.2	11.28	脆性	—
钛	Ti	4.51	1672	3	15.17	47.5	3.97	9.0	7.72	294	—
钒	V	6.1	1929	6	30.98	26	2.8	8.3	11.8~ 14.4	215	—
铬	Cr	7.19	1855	12	67.99	12.9	2.5	6.2	25.4	279	—
锰	Mn	7.43	1245	32	79.6	4.4	1.7	23.0	19.77	脆性	—
铁	Fe	7.86	1538	16	75.36	9.7	5.0	11.7	19.6~21	323	+1.91
钴	Co	8.9	1495	26	70.07	5.7	6.5	12.5	20.90	245	-1.99
镍	Ni	8.85	1455	24.9	87.92	7.16	6.0	12.8	19.61	393	-1.43
铜	Cu	8.94	1083	100	386.4	1.72	3.93	16.6	11.77	196	+0.75
锌	Zn	7.14	419.4	28.2	112.6	5.75	3.7	33.0	7.85	147	+0.77
钼	Mo	10.2	2623	30.3	144.5	5.17	4.71	5.1	31.4	882	+0.31
银	Ag	10.5	960.5	106	418.7	1.62	3.8	18.9	7.85	147	+0.75
镉	Cd	8.65	321	22.9	92.11	7.51	3.8	29.8	5.5	64.7	+0.92
锡	Sn	7.35	232	15.1	64.48	11.5	4.2	20.0	5.39	24.5	+0.45
铋	Sb	6.69	630.5	4	15.95	39	5.11	11.4	7.75	脆性	—
钽	Ta	16.60	3027	9	8.64	14.0	3.5	7.0	18.6	882.6	—
钨	W	19.3	3387	31.4	159.9	5.1	4.5	4.3	32.5	1079	+0.70
铂	Pt	21.45	1755	16.4	71.18	10.5	3.0	8.9	14.71	147	—
金	Au	19.3	1063	71.6	296.4	2.07	3.4	14.2	7.85	98	+0.70
汞	Hg	13.55	-38.9	1.9	8.37	95.8	0.89	—	—	—	—
铅	Pb	11.37	327.5	7.9	35.09	18.8	3.0	29.1	1.8	3.5	+0.44
铋	Bi	9.84	271	1.4	7.95	106	4.0	13.3	31.8	7.0	-7.25
钯	Pd	12.0	1552	17	0.17	9.1	3.8	11.7	1.57~ 1.79	—	—
铑	Rh	12.41	1960	30	0.36	6.02	4.6	8.5	41.18	—	+0.65
铱	Ir	22.54	2442	35	0.35	4.85	4.0	6.5	5.20	—	+0.65
铱	Os	22.5	3033	16	—	9.66	4.2	6.6	54.92	—	—

铜”，具有高电导率及优良的可焊可塑性，易于加工，并具有一定的机械强度。纯铜中不可避免地存在杂质元素，一般杂质的少量存在对铜的基本性能影响很小，但有些杂质元素在微量时也会对铜的性能产生各种不同的影响，如砷、锰、硒等杂质元素，含量小于0.005%时，在基本不影响铜电导率的情况下，可显著提高其机械强度及耐热性；砷将显著降低其电导率；铅、铋将显著降低其机械强

度等，只有氧是唯一不降低其电导率的元素，氧含量在0.003%以下的纯铜称为“无氧铜”，是特殊用途的纯铜材料。

各种纯铜主要特性及用途见表3·1-6。

2. 铜合金主要成分和用途 铜合金品种繁多，常用的有黄铜、青铜、白铜等。其成分、特性及主要用途见表3·1-7、表3·1-8、表3·1-9。

3. 常用铜合金基本性能参数 见表3·1-10。

表3·1-6 纯铜主要特性及用途

名称	牌号	主要成分 Cu+Ag≥%	主要特性	主要用途
纯铜	T ₁	99.95	导电、导热性高，耐腐蚀性强，可焊性及可塑性好，硬度低，不宜在370℃以上加工使用；与其他金属接触时需钝化处理或镀锌	电线电缆导体、导电零件、各种电工零件，以及垫片、铆钉等
	T ₂	99.90		
	T ₃	99.70		
	T ₄	99.50		
无氧铜	TU ₁	99.97	导电、导热性高，耐蚀、耐寒性强，可焊性及可塑性好，TUP冷弯性强	电真空器件、大功率管屏板及玻璃封接材料等，TUP还可用于焊接
	TU ₂	99.95		
	TUM _n	99.60		
	TUP	99.50		

注：1.本表摘自GB5231-85。

2.代号均以汉语拼音字母表示，“T”为“纯铜”，“TU”为无氧铜，下标数字为品种序号；“TUM_n”及“TUP”分别为含Mn及含P的无氧铜，其中Mn及P的含量分别为0.1~0.3及0.01~0.04。

表3·1-7 黄铜成分、特性及主要用途

名称	牌 号	主添加元素	成分及含量(%)			主要用途	主要特性
			基元 Cu	其他元素	杂质 (≤)		
普通黄铜	H68	Zn	95~97	Fe≤0.10	0.2	导电零件及辅助件	质轻，色泽光亮，可塑性高于纯铜，在不影响电导率情况下各种电性能优于纯铜
	H70		68.5~71.5	Pb≤0.03 P≤0.01	0.3	导电零件及结构件	
	H62		60.5~63.5	Sb≤0.005	0.5	导电零件及结构件	
	H59		57~60	Bi≤0.002	1.0	电器、仪表、焊接材料	
铝黄铜	HAl60-1-1	Zn	58~61	Al0.70~1.50 Fe0.70~1.60 As0.10~0.60	0.7	耐腐蚀性电器、仪表零件	耐腐蚀性优于纯铜，机械性能及加工性能好
	HAl59-3-2		57~60	Al2.5~2.3 Ni2.0~3.0	0.9		
锰黄铜	HMn58-2		57~60	Mn1.0~2.0 Fe≤1.0 Pb≤0.1 P≤0.01	1.2	电器仪表中耐腐蚀零件及船舶用导电零件	耐腐蚀性及机械性能优于纯铜

注：1.本表摘自GB5232-85。

2.代号均为汉语拼音字母，“H”为“黄铜”，下标符号为第二主添加元素；下标数字为基元Cu平均含量，其后为除Zn以外元素含量组。

3.“其他元素”栏中，只列入含量较大的元素。

表 3-1-8 常用青铜的成分、特性及用途

名称	牌号	基元Cu以外成分(%)		杂质总量 (≤%)	主要特性	主要用途
		主要成分	其他成分			
铝青铜	QA10-2	Al 8.0~10.0	Mn 1.5~2.5, Zn ≤1.0 Fe ≤0.5, Sn, Si 各 ≤0.1, Pb ≤0.03 P ≤0.01	1.7	导电性高, 力学性能及耐磨性、耐腐蚀性、耐寒耐热性好, 无铁磁性	导电性要求高的触片及电子用机械零件等
铍青铜	QB2	Be 1.80~2.1	Ni 0.2~0.5, Pb ≤0.005 Al, Fe, Si 各 ≤0.15	0.5	导电导热性高, 强度高, 耐磨、耐蚀等综合性能良好, 无铁磁性	电器、电子仪表零件及弹性零件等
铬青铜	QC0.5	Cr 0.4~1	Fe ≤0.1 Ni ≤0.05	0.5	导电导热性高, 加工性能好, 耐磨耐蚀性好, 无铁磁性	电极材料、导电零件、电器零部件等
锆青铜	QZ0.2	Zr 0.15~0.50	Ni ≤0.2, Fe, Sn 各 ≤0.05, Sb ≤0.005, Pb, S 各 ≤0.01	0.5	导电导热性高, 弹性高, 加工性能好, 耐蚀性好, 无铁磁性	高温电器开关、电热零件、弹性零件、电焊零件等
钛青铜	QT0.5	Ti 3.5~4.0	微量可略	0.5	导电导热性高, 强度、硬度高, 耐磨、耐蚀性好, 无铁磁性	电器开关, 弹性零件等
锰青铜	QM0.5	Mn 4.5~5.5	Zn ≤0.4, Fe ≤0.35 Si ≤0.1, Pb ≤0.03 P ≤0.01, Sb ≤0.002	0.9	耐磨、耐蚀性好	电子用耐磨零件
镉青铜	QCd	Cd 0.8~1.3	微量可略	0.3	导电导热性高, 强度、硬度高	电极, 换向器, 电器及导电零件等

注: 1. 本表数字摘自 GB5233-85。

2. 代号为汉语拼音字母, "Q" 为青铜, 下标符号为第一主添加元素符号, 后列数字组为基元铜以外元素平均含量。

3. 表中仅列最大值的为杂质含量, 其余为主要成分。

表3-1-9 常用白铜的成分、特性及用途

名称	牌号	基元铜以外成分(%)			杂质总量(%)	主要特性	主要用途
		Ni+Co	其他	其他			
普通白铜	B0.6	0.57~0.63	Fe, Pb, S各≤0.05 Si, C, P, Di, As, Sb各≤0.002		1.0	含Ni可提高强度, 化学性能稳定, 耐腐蚀性好, 加工性能好, 具有较高热电性及电阻率	B0.6白铜及B19白铜为电工仪表材料, B5白铜为一般结构材料
	B5	4.4~5.0	Fe≤0.20, O≤0.10, C≤0.03 Pb, S, P, As各≤0.01, Sb≤0.005		0.5		
	B19	18.0~20.0	Fe, Mn各≤0.5, Zn≤0.3 Si≤0.15, S, P, As各≤0.30		1.8		
镍白铜	B _{Mn8-12}	2.0~3.5	Mn11.5~13.5, Fe0.20~0.35 Si0.1~0.3, Al0.2		0.5	含Mn可提高强度及耐腐蚀性, 电阻率高, 电阻温度系数小, 与铜的接触电势小	电工仪表零件及热电偶零件等
	B _{Mn43-0.5}	42~44	Mn0.1~1.0, Fe≤0.15 Si, C各≤0.10, Mg≤0.05		0.9		
铝白铜	BA113-3	12.0~15.0	Al2.3~3.0		0.9	具有一定导电性, 耐腐蚀性及抗寒性好, 高弹性	电子工业用弹性零件及结构零件
	BA10-1.5	5.5~6.5	Al1.2~1.8		1.0		
锌白铜	BZn15-20	13.5~16.5	Zn18~21, Fe≤0.5, Si≤0.15 Mg≤0.05, C≤0.03, Pb≤0.02		0.9	具有一定导电性, 耐腐蚀性好, 力学性能好, 质轻, 色泽白亮, 价格低廉	电子工业用结构零件
	BZn15-21-1.8	14.0~16.0	Zn19~22, Pb1.5~2.0, Mn≤0.5 Fe≤0.3, Si≤0.15		0.9		
铁白铜	DFe10-1-1	9.0~11.0	Fe1.0~1.5, Mn0.5~1.0, Si≤0.15 Zn≤0.3, Pb≤0.02, S≤0.01		0.7	含Fe可提高耐腐蚀性, 可细化晶粒提高机械强度, 导电性较差	电子工业用防蚀零件及结构零件
	DFe30-1-1	29.0~30.0	Fe0.5~1.0, Mn0.5~1.2, Si≤0.15 Zn≤0.03, Pb≤0.02, S≤0.01		0.7		

注: 1. 本表数据摘自GB5234-85。
 2. 代号为汉语拼音字母, "B"为白铜, 下标符号为第二主基加元素符号, 数字为除基元铜外成分平均含量数字。
 3. 表中仅列最大值的为杂质含量, 其余为主要成分。