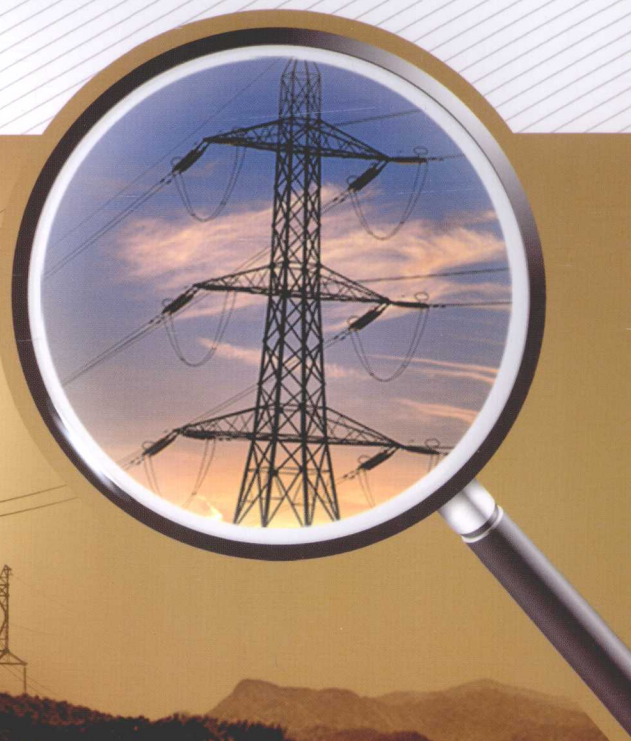


电网设备

金属监督检测技术

国网浙江省电力公司 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电网设备

金属监督检测技术

国网浙江省电力公司 编



.....
中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要介绍了各种金属监督检测技术的基本原理、检试验方法和典型案例等,内容包括材料学基础知识、材料加工成型技术、超声波检测技术、射线检测技术、光谱检测技术、镀层质量检测技术和常见力学性能试验等相关知识。

本书深入浅出,图文并茂,既可供电力系统工程技术人员和管理人员学习及培训使用,也可供其他相关专业人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电网设备金属监督检测技术/国网浙江省电力公司编. —北京:中国电力出版社,2016.8

ISBN 978-7-5123-9650-0

I. ①电… II. ①国… III. ①电网-电气设备-金属-技术监督 ②电网-电气设备-金属-检测 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 183617 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 7 月第一版 2016 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12 印张 265 千字

印数 0001—3000 册 定价 49.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

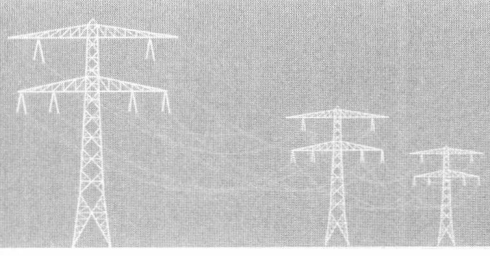
版权专有 翻印必究

编 委 会

主 编：阙 波

副 主 编：徐嘉龙 宣晓华

编写组成员：俞培祥 王炯耿 张 弛 龚坚刚 姜文东
周正强 张 杰 李志新 周重回 罗宏建
胡洁梓 赵洲峰 楼玉民 吴芳芳 许 飞
赵 峥 施 航 徐建平 扶达鸿 廖玉龙
王 威 徐长威 毛航银 汤义勤 吴 忠
王灿灿 肖国磊 胡雪平 丁一岷 王坚俊
郦于杰 严浩军 曹 炯 姚建锋 胡旭光
毛琳明 林 群 徐建良 王 勇 李宏雯
沈 祥 杨核群 汪 滔 汪建勤 朱利锋
张长伟 项兴华 王志惠 何喜梅 孙林涛
苏良智 王 磊 杨先进 范 明 李国广
韦爱平 周 平 朱亦振 初金良 陶礼兵
卜 建 柳青山 朱海貌 王建东 柳 骏
盛 骏 夏巧群 韦立富 林 雪 孙庆峰
吴一峰 张荣伟 屠晔炜 夏强峰



前 言

电网设备金属监督是一项重要的技术监督工作，近年来，国网浙江省电力公司在金属材料、工艺等监督方面工作开展了大量的探索和实践，取得了良好的成效。为认真总结电网设备金属监督的经验，更好地发挥金属监督在电网设备中保驾护航的作用，国网浙江省电力公司自2014年9月起组织金属专业和电气专业的专家联合编写本书。

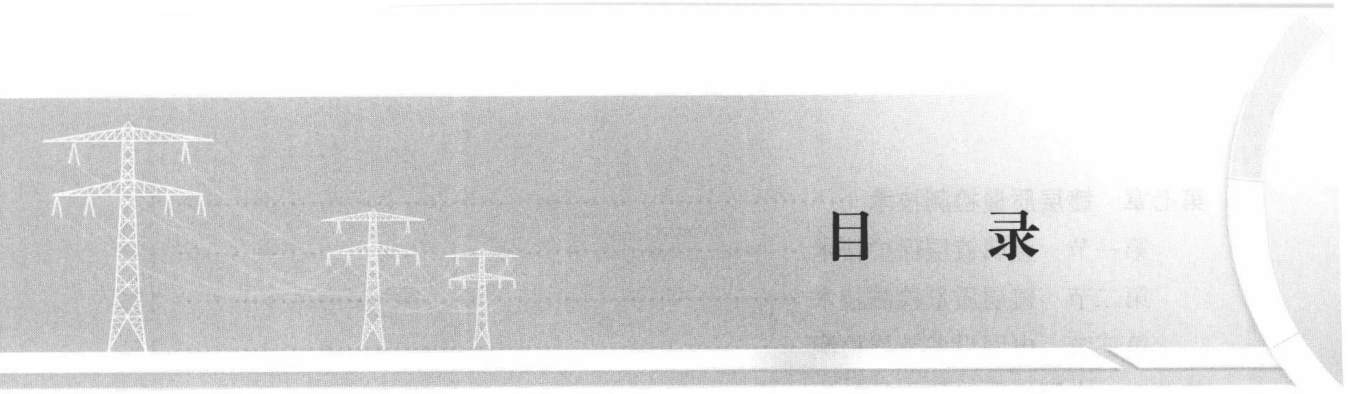
专家组查阅了大量电气、金属材料等方面的专著、论文、文献，将深奥的技术理论进行归纳整理后深入浅出的加以阐述，并引入近年来浙江省电网金属监督过程中积累的案例、经验、科研数据等，使得该书浅显易懂、贴近实际工程应用。在编写的同时，专家组不断收集新的案例资料，丰富书籍的内容。

本书内容包括各种金属监督检测技术的基本原理、检试验方法和典型案例等。共分八章，系统介绍了材料学基础知识、材料加工成型技术、超声波检测技术、射线检测技术、光谱检测技术、镀层质量检测技术和常见力学性能试验方法等。

本书由国网浙江省电力公司组织编写，既可供电力系统工程技术人员和管理人员学习及培训使用，也可供其他相关人员学习参考。由于时间仓促，编者水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请广大读者予以指正。

编 者

2016年4月



目 录

前言

第一章 电网设备金属监督概述	1
第一节 电网设备金属监督发展历程	1
第二节 电网设备金属监督检测技术介绍	3
第二章 材料学基础知识	6
第一节 金属材料概述	6
第二节 金属材料的性能	9
第三节 电气设备常见材料	13
第四节 电气设备金属监督常用检验方法	21
第三章 电气设备常用材料加工成型技术	32
第一节 金属材料常用加工技术	32
第二节 支柱瓷绝缘子及瓷套加工成型技术	55
第四章 超声波检测技术	59
第一节 超声检测的基础知识	59
第二节 支柱瓷绝缘子及瓷套超声波检测技术	73
第三节 GIS壳体超声波检测技术	79
第四节 接地网损伤状况超声导波检测技术	83
第五节 输变电钢管超声检测技术	88
第五章 射线检测技术	91
第一节 射线检测通用技术	91
第二节 数字化射线检测技术	95
第三节 数字化射线成像系统的图像特征	98
第四节 数字化射线检测技术在电网设备检测中的检测工艺	101
第五节 数字化射线检测技术在电网设备检测中的应用	103
第六章 光谱检测技术	110
第一节 光谱检测技术	110
第二节 光谱检测技术应用	122

第七章 镀层质量检测技术 131

 第一节 金属镀层保护技术 131

 第二节 镀层质量检测技术 136

 第三节 电网设备镀层检测 151

第八章 电网设备常见力学性能试验 155

 第一节 力学性能概述 155

 第二节 线路器材常见的力学性能试验 166

 第三节 力学性能试验设备简介 181

参考文献 186

第一节 电网设备金属监督发展历程

一、电网设备金属监督的含义

电力技术监督是指采用有效的检测、试验和抽查等手段，在可研规划、工程设计、采购制造、运输安装、调试验收、运维检修、退出报废等全过程中，监督有关技术标准和预防设备事故措施在各阶段的执行落实情况，分析评价电力设备健康状况、运行风险和安全水平，并反馈到规划、设计、建设、运检、营销、物资、调度等部门，以确保电力设备安全可靠经济运行，包括电能质量、金属、自动化、电网设备性能、节能与环保、信息通信、化学、热工、水机、电测、保护与控制、水工共 12 个专业（见图 1-1）。电气设备金属监督是电力技术监督 12 个专业监督之一，其主要内容是电气设备的金属线材、金属部件、瓷绝缘部件、压力容器和承压管道及部件、蒸汽管道、高速转动部件的材质、组织和性能变化分析、安全和寿命评估；焊接材料、胶接材料、焊缝、胶接面的质量，部件、焊缝、胶接面的材料的无损检验。电网设备金属监督来源于电气设备金属监督，它特指以输变电设备部件的材质性能作为主要监督对象的技术监督，监督对象不包括电气设备中的电源侧设备。

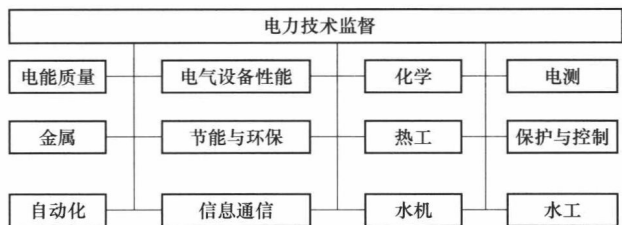


图 1-1 电力技术监督各专业组成

在电力生产的全过程中，严格执行电力技术监督制度是保障电厂、电网安全经济运行，向用户提供优质电能的基础。反之，任何细节上的差池或疏忽都可能导致违背技术标准及操作规程，酿成大祸，不但造成电力生产人员或设备的损失，还有可能殃及社会，电网设备金属监督工作也不例外。另外，通过对电网设备金属监督报告的分析，还能为电力管理、生产、营销部门的科学决策提供重要依据。因此，搞好电网设备金属监督对输变电设备的安全稳定运行十分重要。

二、电网设备金属监督发展历程

电力行业的技术监督开始于 20 世纪 50 年代初,源于苏联,最初为对水、汽、油品质的化学监督及计量。20 世纪 50 年代后期,随着高温、高压机组的发展又增加了金属监督。1963 年,当时的水利电力部明确把电力设备技术监督作为电力生产技术管理的一项具体管理内容,称为“四项监督”,即化学监督(主要是水汽品质监督和油务监督)、绝缘监督(电网设备绝缘检查)、仪表监督(热工仪表及自动装置的检查)、金属监督(主要是高温高压管道与部件的金属检查)。这四项都是预防性检查,主要是为了扭转技术管理混乱,对设备检查、监督不力、加强生产检修管理工作而提出的,一直受到各级电力管理部门和基层生产单位的重视。

随着电力事业的不断发展和电力技术水平的日益提高,对电力设备技术监督的范围、内容和工作要求越来越多、越来越高。随后电力技术监督的范围扩大为电能质量、金属等 12 个专业,并且要求实行从工程设计、设备选型、监造、安装、调试、试生产及运行、检修、停(备)用、技术改造等电力建设与电力生产全过程的技术监督。

根据电网技术水平和运行状况的实际,随着新技术、新设备的使用,为适应电网的发展和现代化安全生产管理的要求,实现安全生产要求与技术监督内容动态管理的有机结合,一些省级技术监督部门又陆续把励磁技术监督、锅炉技术监督和汽机技术监督加了进来,形成了 12 项技术监督。这 12 项监督包括了电源侧和电网侧的主要专业监督。

2003 年 4 月 21 日,国家电网公司下发的《关于加强电力生产技术监督工作的意见》中明确提出技术监督“要根据技术发展和电网运行特性不断扩充、延伸和界定”,为今后技术监督的发展奠定了基础。国家电网生〔2005〕第 682 号《国家电网专业技术监督规定》中对金属技术监督中电网设备的范围进行了规定,为电网设备的金属监督工作开展奠定了基础。2012 年 11 月,国家电网公司发布的《国家电网公司技术监督管理规定》,重新明确了电网设备金属技术监督含义和专业组成,其中进一步明确了电网设备的监督覆盖范围。2015 年 3 月,国家能源局发布了 DL/T 1424—2015《电网金属技术监督规程》,其中对电网金属技术监督内容和一般要求做了相应的规定。

三、金属监督的意义

在当前形势下,强调电网设备的金属监督有着更深层次的意义。

(1) 目前我国处于能源发展的新阶段,特高压电网进入建设加速期、网架过渡期,交、直流大电网运行安全控制、工程大规模建设安全 and 质量等都面临新的考验,加强电网设备的金属监督,提高设备入网质量,对于提高输变电工程质量和抵抗安全风险的能力有积极作用。

(2) 由于材料科学在电网设备的监督应用发展尚处于初步阶段,监督力度和深度尚不深入,当电网设备使用的材料出现质量问题时无法查找到问题的真正原因,同时带缺陷的材料也可能被应用到设备上,这将直接影响到设备的质量,为今后设备运行留下安全隐患。因此开展电网设备金属监督,将关口前移,贯穿到设计阶段、制造阶段、设备出厂验收阶段等不同阶段,在设备安装前剔除不合格产品,最大程度保证合格产品上

网，从而保证电网设备的安全。

(3) 随着以特高压为骨干网架的智能电网的建设，电网电压等级不断提高，大容量、远距离输电对设备的材料性能和制造工艺也提出了更高的要求，因此更需要对新材料、新工艺进行监督。

随着输变电技术的不断进步，更多先进技术、先进材料逐渐被运用，电网设备金属监督工作将紧跟电网技术发展，必将为电力事业的安全发展做出更大的贡献。

第二节 电网设备金属监督检测技术介绍

金属监督检测技术是开展电网金属监督工作的基础，同时也是电网设备金属监督的重要技术手段。

一、电网设备金属监督常用检测技术

电网设备金属监督常用的检测技术有超声波检测技术、射线检测技术、渗透检测技术、磁粉检测技术、光谱分析技术、镀层质量检测技术以及一些力学性能试验方法。其中超声波检测、射线检测、渗透检测、磁粉检测被称为四大常规无损检测方法。

(1) 超声波检测 (ultrasonic testing, UT) 是利用超声波在介质中传播时遇到异质界面发生反射、透射和散射的特性来检测缺陷的无损检测方法。超声波检测具有灵敏度高、指向性好、穿透能力强、检测速度快的优点。

(2) 射线检测 (radiographic testing, RT) 是利用 X 射线、 γ 射线和中子射线穿透物体后的衰减程度不同，根据胶片感光程度的不同来检测物体内部缺陷，并对缺陷种类、大小、位置等进行判断。射线检测主要适用于体积型缺陷如气孔等的检测，在特定条件下，也可检测裂纹、未焊透、未熔合等缺陷。

(3) 渗透检测 (penetrant testing, PT) 是最早使用的无损检测方法之一，基于毛细管现象检测非多孔性固体材料表面开口缺陷。渗透检测具有方法简单、成本低廉、缺陷显示直观、检测灵敏度高等优点，但只能用于检测表面开口缺陷。

(4) 磁粉检测 (magnetic particle testing, MT) 是利用缺陷产生的漏磁场与磁粉相互作用显示磁痕，用于检测铁磁性材料表面和近表面缺陷的无损检测方法。磁粉检测技术可检测裂纹、折叠、夹层、夹渣等缺陷，具有操作方便、检测速度快、对裂纹敏感和缺陷显示直观快速的优点，但只能用于检测铁磁性材料，且某些场合要求检测后对工件进行退磁处理。

(5) 光谱分析法是基于物质发射的电磁辐射及电磁辐射与物质的相互作用而建立起来的分析方法。通过光谱的研究，人们可以得到物质组成方面的信息，为化学分析提供了多种重要的定性与定量的分析方法。

(6) 镀层质量检测是采用不同的测试手段针对镀层的厚度、硬度、附着强度、均匀性、耐蚀能力等参数进行测量，用以评定镀层质量好坏的方法。

(7) 力学性能测试是指在不同的环境 (温度、介质、湿度) 下，对材料施加外加载

荷（拉伸、压缩、弯曲、扭转、冲击、交变应力等），测试材料在外加载荷下表现出的力学特征的方法。

二、电网设备金属监督检测的范围及内容

目前，电网设备金属监督检测的范围及内容主要包括支柱瓷绝缘子及瓷套的超声波检测、GIS 筒体焊缝超声波检测、镀层质量检测、不锈钢光谱分析、DR 射线检测等。

支柱瓷绝缘子及瓷套使用爬波和小角度纵波相结合的方法进行超声波检测。爬波主要用于检测瓷件的近表面缺陷，它能够克服支柱瓷绝缘子及瓷套表面粘沙和胶合剂的影响，对最易发生断裂的铸铁法兰口与瓷件相交的内外 5mm 区域进行检测。小角度纵波通过底面反射波与缺陷回波的相对关系，针对瓷体内部的黄芯、黑芯等危险缺陷进行检测。

GIS 筒体焊缝的超声波检测主要使用常规超声波 A 型脉冲反射法对铝合金、不锈钢等材质的对接焊缝进行检测，能够有效发现裂纹、未熔合、未焊透、气孔、夹渣、砂眼等多种缺陷。除此之外，超声相控阵及 TOFD 这些新型检测技术也被应用到 GIS 筒体对接焊缝和角焊缝的检测中，在实际应用中发挥了重要作用。

镀层质量检测包括隔离开关镀银层和金属构件镀锌层厚度检测。隔离开关镀银层厚度检测使用 X 射线荧光镀层测厚仪，通过从被检件上反射的二次 X 射线强度测量镀银层厚度，检测范围可达 $0.01\sim 50\mu\text{m}$ 。金属构件镀锌层厚度检测可使用电涡流测厚仪，通过测量探头与导电基体之间的反射阻抗值获得金属构件上镀锌层厚度。

不锈钢光谱分析是利用 X 射线光谱分析仪的色散元件和光学系统将光辐射按波长分开排列，并使用适当的接收器接收不同波长幅值，对隔离开关、接地开关传动轴销及其他不锈钢构件的化学成分进行定量或半定量的分析。

DR 射线检测使用数字成像板，具有检测效率高、不需底片、灵敏度高等优点，被应用于 GIS 焊缝内部缺陷检测，以及对 GIS 筒体内部隐蔽缺陷例如掉落的杂物、螺栓紧固程度、电缆插入深度等进行数字成像，实现在不开盖情况下的无损检测。

力学性能测试主要是对输变电杆塔等使用的金属件、金具、螺栓紧固件等进行力学性能的相关测试，如对紧固件施加楔负载、保证负载，对金具、金属件直接加载拉伸静载荷等测试材料的力学性能。

三、电网设备金属监督发现的问题

随着近年来行业内对电网设备金属监督重视程度的提高，一些省市（自治区）的电力（网）公司等率先开展了不同设备的金属监督，并在一定程度上取得了不错的成效。尤其是一些电力（网）公司自 10 年前已开始着手建设监督网络，逐步推进电网设备金属监督工作。随后以基建阶段设备质量的金属监督为切入点，前移技术监督关口，按照“先试点、后推广”的原则，扎实推进基建阶段金属技术监督检测工作，取得了阶段性成果。现阶段，以设备全寿命管理为核心，按照全过程十个阶段（可研规划阶段、工程设计阶段、设备采购阶段、设备制造阶段、设备验收阶段、运输储存阶段、安装调试阶段、竣工验收阶段、运维检修阶段、退役报废阶段）推进金属技术监督工作。尤其是随

着金属技术监督工作的不断深入,将先进的数字射线成像技术、导波技术、超声衍射时差技术等应用到对电网设备的材料诊断中,有效地提高了缺陷的检出率。

根据某省公司提供的 2011~2014 年金属监督缺陷统计 (见表 1-1), 可以看出近几年在技术监督中发现的问题, 主要概括为以下 6 个方面:

(1) 支柱瓷绝缘子法兰口缺陷。目前通过超声波爬波和小角度纵波检测发现多个变电站在役和基建阶段的绝缘子法兰口出现缺陷。另外,有些厂家提供的绝缘子无唯一性编号。

(2) 户外高压隔离开关触指镀银层厚度不符合要求。按照相关标准要求, 隔离开关主触头镀银层厚度 $\geq 20\mu\text{m}$, 从目前抽查的情况看来, 部分厂家隔离开关主触头镀银层厚度达不到要求, 有些触头镀银层厚度甚至不足 $10\mu\text{m}$, 更有些厂家, 隔离开关触指镀锡代替镀银, 严重危害设备的安全运行。

(3) 输电线路杆塔螺栓强度等级不达标。在基建阶段抽查了一些杆塔螺栓, 并进行相关的机械性能试验, 发现部分厂家提供的螺栓达不到其设计的强度等级。

(4) 户外高压隔离开关销子、球铰材质不符合要求。按照相关标准要求, 隔离开关的转动部件要求用不锈钢材质, 部分要求用 8-18 系列不锈钢, 有些厂家提供的产品 Cr、Ni 含量严重不足, 导致运行过程中销子断裂。

(5) 焊接质量不符合要求。根据对已经出现事故的输电线路杆塔相关分析发现,部分杆塔焊缝质量较差,出现未焊透现象,导致焊缝部位发生断裂。GIS 壳体焊缝质量不达标,主要是裂纹、未焊透、未融合等缺陷。

(6) 镀锌层厚度不符合要求。有部分变电站杆塔镀锌层厚度不符合要求, 导致运行后时间不长发生锈蚀。

表 1-1 2011~2014 年某省公司金属监督缺陷统计表

序号	缺陷项目	数量			
		2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
1	隔离开关触头（触指）镀银层厚度不合格（把）	216	156	38	37
2	隔离开关触头（触指）镀银层为镀锡（把）	40	22	35	23
3	支柱瓷绝缘子超声波检测不合格（柱）	128	322	366	127
4	支柱瓷绝缘子标记不合格（柱）	215	228	187	313
5	支柱瓷绝缘子外观检测不合格（柱）	0	96	127	11
6	断路器及避雷器瓷套检测不合格（柱）	16	11	28	0
7	不锈钢部件不合格（处）	30	63	13	6
8	GIS 焊缝超声波检测不合格（条）	—	9	23	162
9	螺栓紧固件保证载荷不合格（套）	—	22 694	89 263	160
10	拉伸试验不合格（套）	—	5786	384	0
11	其他	1	0	2	1

第一节 金属材料概述

一、金属的定义

金属是一种具有金属光泽（即对可见光强烈反射）富有延展性，具有导电性、导热性、加工特性和固定熔点特征的结晶物质。导电性比非金属大 $10^{20} \sim 10^{25}$ 倍，随温度的降低而增加；加工特性良好，可塑、可焊、可铸、可切削。

在自然界中，绝大多数金属以化合态存在，少数金属例如 Au、Pt、Ag、Bi 以游离态存在。金属矿物多数是氧化物及硫化物，其他存在形式有氯化物、硫酸盐、碳酸盐及硅酸盐。金属之间的联结是金属键，因此随意更换位置也可再重新建立联结，这也是金属延展性良好的原因。

二、金属的分类

目前已被发现的 109 种元素中，有 86 种是金属元素，常温下除 Hg（又名水银）外，金属元素均以固体形态存在，金属的分类方式众多。

按纯度可以分为纯金属和合金：纯金属是具有金属特征单一的基本不含任何杂物的物质，如 Fe、Cu、Al 等；合金指含两种或两种以上的纯金属，或者由纯金属和非金属组成的新物质，如 Cu 和 Zn 组成的黄铜、Fe 和 C 组成的钢等均属于合金。

按颜色可以分为黑色金属和有色金属：Fe、Mn、Cr 属于黑色金属；除黑色金属以外的其他金属及其合金都是有色金属，如 Cu、Al、Pb 等。

按密度分轻金属和重金属：密度小于 4500kg/m^3 的都是轻金属，如 Al、Mg、Ca、Na、Sr、Ba 等；重金属的密度都大于 4500kg/m^3 ，如 Cu、Ni、Co、Pb、Zn、Sn、Sb、Bi、Cd、Hg 等。

还有铁族金属 Co、Ni、Mn，稀土金属 La、Ce、Nd 等。难溶金属是指熔点高于 Fe (1539°C) 的金属，这类金属通常作为合金元素加入钢中，有 W、Mo、Nb、V、Cr。

三、金属基本结构

金属的特性归根于金属原子构造的特点，也取决于原子之间的结合以及原子在空间排列的情况。金属原子最外层电子少，电子与原子核的结合力较弱，容易脱离原子。在固体金属内，正离子按照一定的几何形式规则排列，并在固定位置做轻微振动，而脱离原子的价电子以自由电子的形式在各离子间运动，为整个金属所公用。金属固体就借助

这些正离子和自由电子间的引力结合在一起，即金属键。当金属温度升高，正离子的振动随之加剧，从而阻碍自由电子的流通，使电阻增大。

绝大多数金属具有面心立方（又称 FCC 结构）、体心立方（又称 BCC 结构）、密排六方（又称 HCP 结构）三种之一的晶体结构，如图 2-1 所示。

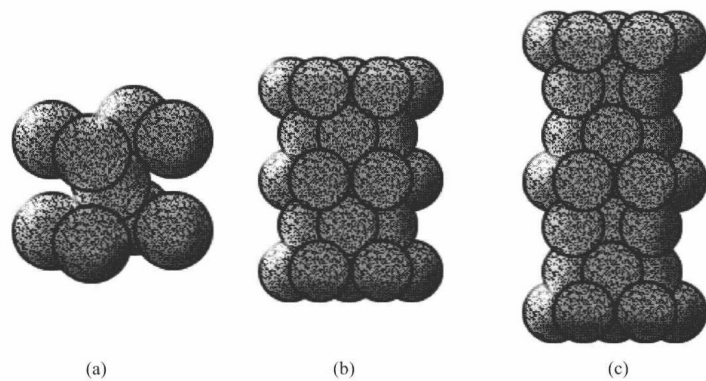


图 2-1 常见纯金属的晶体结构

(a) 体心立方晶格；(b) 密排六方晶格；(c) 面心立方紧堆晶格

四、实际金属晶体中的缺陷

在实际使用的金属材料中，由于加进了其他种类的原子及材料在冶炼后凝固过程中受到各种因素的影响，使本来有规律的原子堆积方式受到干扰，不像理想晶体那样有规则。晶体中出现的各种不规则的原子堆积现象称为晶体缺陷。常见的晶体缺陷有以下几种。

(1) 点缺陷。点缺陷是最简单的晶体缺陷，它是结点上或邻近的微观区域内偏离晶体结构正常排列的一种缺陷。一般发生在晶体中一个或几个晶格常数范围内，其特征是在三维方向上的尺寸都很小，也称零维缺陷，例如晶格空位、间隙原子、杂质原子等。

在晶体中，晶格中的原子由于热振动能量的涨落，脱离格点移动到晶体表面，在原来的格点位置留下空位，即晶格空位，这种空位称为肖特基缺陷，如图 2-2 (a) 所示。如果脱离格点的原子跑到邻近的原子空隙形成间隙原子，这种缺陷称为弗伦克尔缺陷，如图 2-2 (b) 所示。晶格中的杂质原子因为热振动占领正常原子跳脱产生的晶格空位，即置换原子，也称置代原子，如图 2-2 (c) 和 (d) 所示。

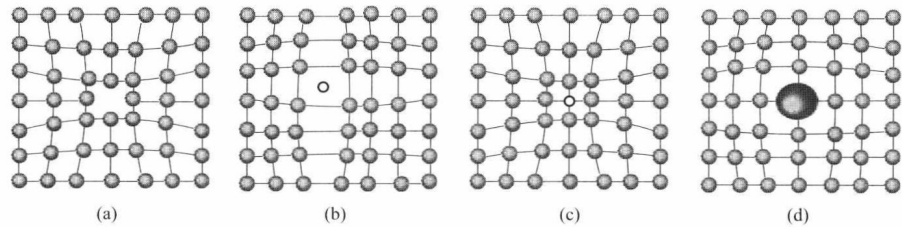


图 2-2 点缺陷示意图

(a) 晶格空位；(b) 间隙原子；(c) 小置换原子；(d) 大置换原子

(2) 线缺陷：位错。位错指晶体材料的一种内部微观缺陷，可视为晶体中已滑移部分与未滑移部分的分界线，有刃型位错、螺型位错等。形式比较简单的是刃型位错，如图 2-3 所示，在这个晶体的某一水平面（ABCD）的上方，多出一个原子面（EFGH），它中断于 ABCD 面上的 EF 处，这个原子面如同刀刃一样插入晶体，故称刃型位错。螺型位错是指一个晶体某一部分相对于其余部分发生滑移，原子平面沿着一根轴线盘旋上升，每绕轴线一周，原子面上升一个晶面间距，在晶体台阶附近的中央轴线处即为一处螺型位错，如图 2-4 所示。在位错附近区域，晶格将发生畸变，图 2-5 所示的是高分辨率电镜下的刃位错（白点为原子）形貌。位错的特点之一是很容易在晶体中移动，金属材料的塑性变形便是通过位错运动来实现的。

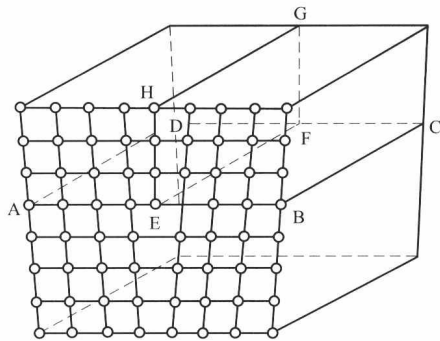


图 2-3 刃型位错

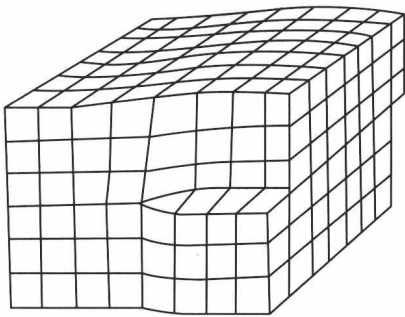


图 2-4 螺型位错

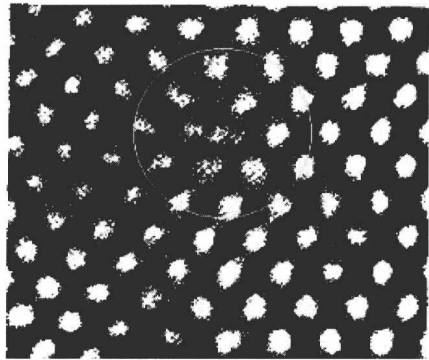


图 2-5 高分辨率电镜下的刃位错（白点为原子）

位错的存在使得金属晶体产生滑移的力大大减少，所以一方面减少位错能提高金属实际强度，但一般很难做到。因为当晶体中由于大量方向不同的位错存在时，可以使位错彼此牵制不易受力移动，金属强度反而因为位错的增多而增大。

(3) 面缺陷：晶界。实际金属为多晶体，是由大量外形不规则的晶粒组成的，每个晶粒相当于一个单晶体。所有晶粒结构完全相同，但彼此之间的位向不同，一般相差几度或几十度，如图 2-6 所示。晶界处的原子排列是不规则的，这里的原子处于不稳定的状态。

另外实验证明，即使在一颗晶粒内部，其晶格位向也不像理想晶体那样完全一致，而是分隔成许多尺寸很小、位向差很小（只有几分，最多达一二度）的小晶块，它们相互嵌镶成一颗晶粒，这些小晶块称为亚晶粒（或嵌镶块）。亚晶粒之间的界面称为亚晶界。图 2-7 所示为亚晶粒示意图，亚晶界处的原子排列与晶界相似，也是不规则的。

晶界和亚晶界由于原子排列不同导致与晶内特性不同，一方面比晶内易腐蚀，熔点也低，原子扩散较快；另一方面常温下晶界不易发生塑性变形，强度和硬度较晶内高。

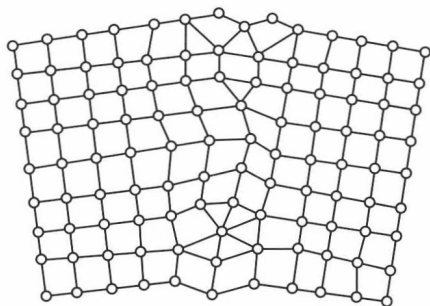


图 2-6 晶界的过渡结构示意图

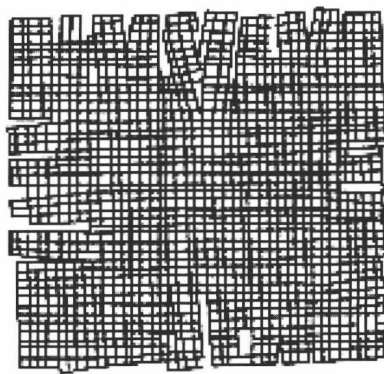


图 2-7 亚晶粒示意图

晶体中存在的空位、间隙原子、置代原子、位错、晶界及亚晶界等结构缺陷，都会造成晶格畸变，引起塑性变形抗力的增大，从而使金属的强度提高。

第二节 金属材料的性能

为了合理地使用金属材料，充分发挥其作用，必须掌握各种金属材料制成的零、构件在正常工作情况下应具备的性能（使用性能）及其在冷热加工过程中材料应具备的性能（工艺性能）。

材料的性能包括物理性能（如比重、熔点、导电性、导热性、热膨胀性、磁性等）、化学性能（耐用腐蚀性、抗氧化性）、力学性能（也叫机械性能）、加工性能（铸造性、塑性加工性、焊接性、切削加工性）。

一、金属的物理性能

物理性能是材料本身具备的物理特性，不需要化学变化就能表现出来，包括可以利用人类的耳、鼻、舌、身等感官感知的颜色、气味、形态等，还有可以利用仪器测知的熔点、沸点、硬度、导电性、导热性、延展性等都属于物理性能。

1. 密度

金属单位体积的质量称为密度（也可用金属与同体积水的重量比作为该金属的比重），单位为克/厘米³（g/cm³），用 ρ 表示。例如钢的密度为 7.85g/cm³，铝的密度为 2.7g/cm³。而合金的密度，一般是与其组成的合金成分呈线性关系。

2. 热的性质

热的性质包括熔点、比热容、热导率和热膨胀系数。

（1）熔点。加热使金属从固态变为液态的现象称为金属的可溶性。金属由固态转变为液态时的温度称为熔点，不同的金属有不同的熔点。易熔金属（如 Li、Mg、Sn、Pb 等）具有很好的塑性、铸造性和焊接性，可用于制作熔断件和焊料。难熔金属（如 W、Mo、Ta、Nb、Ti、Zr 等）有很高的硬度、高温强度和耐腐蚀性，电力上用来制作各种耐高温器件，如过热器管卡、燃气轮机叶片、电热丝等。物质晶态与液态平衡共存的温

度 t_R 和所受到的压力有关。如 Fe 1537°C ，Cu 1083°C ，Al 660.1°C 都是在一个大气压下的熔点数据。

(2) 比热容。比热容符号为 c ，表示单位质量的物体每升高 1°C 所吸收的热量，或每降低 1°C 所放出的热量，是制定材料热加工工艺规范的重要工艺参数。一般的金属比热容均较小，但是 Al ($0.92\text{J/g}\cdot^{\circ}\text{C}$) 和 Mg ($1.02\text{J/g}\cdot^{\circ}\text{C}$) 是比热容较大的金属。大多数合金的比热容，与合金的成分呈线性关系。

(3) 热导率。金属材料热传导速度的物理量是衡量材料导热性好坏的指标，用 λ 表示。电气设备在用金属中，热导率较大者为 Ag [$4.2\text{W}/(\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C})$]、Cu、Au、Al 等；小的为 Hg [$0.0839\text{W}/(\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C})$]。金属的纯度越低，热导率越小。合金的热导率一般低于组成该合金的各金属。

(4) 热膨胀系数。金属在加热过程中发生体积增大的特性，通常以线膨胀系数 α_1 作指标。电气设备在用金属中，线膨胀系数较大者为 Zn ($39.7\times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$)，较小者为 W ($4.6\times 10^{-8}^{\circ}\text{C}^{-1}$)，Fe 是 $11.76\times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。同样的合金线膨胀系数与其组成成分也是线性关系。

3. 电的性质

导电性指金属和合金传导电流的能力，用电导率 γ 或电阻率 ρ 来表示（二者互为倒数关系）。导电性高的常见金属有 Ag（定为 100%）、Cu（97%）、Al（57%）等，Cu 和 Al 由于导电性高且价格便宜，在电力工业中被大量作为导电材料使用。导电性低材料则作为电阻元件，还有导电性很微弱的 Ge、Si、Se 等则作半导体用。电导率一般用 γ 来表征，单位为米/欧姆·毫米² ($\text{m}/\Omega\cdot\text{mm}^2$)，如：Fe 是 0.1，Cu 是 0.59，Ag 是 0.66。电阻率用 ρ 来表征，单位为欧姆·米 ($\Omega\cdot\text{m}$)。通常金属的导电性随温度的升高而下降。

4. 磁性

金属被磁场磁化的性能称为磁性。金属材料分为：①铁磁材料（Fe、Co、Ni 等），能被外加磁场强烈磁化；②顺磁材料（Mn、Cr、W 等），只能被微弱磁化；③抗磁材料（Cu、Al、Sn、Pb、Zn 等），能抵抗或削弱外加磁场对材料本身的磁化作用。磁导率是用来衡量磁性材料磁化难易程度的指标，用 μ 表征，是磁感应强度和磁场强度的比值，单位为特斯拉/(安培每米) [$\text{T}/(\text{A}/\text{m})$]。

二、金属的化学性能

电气设备总在一定环境介质中服役，环境介质对构件材料的力学性能往往有着重要的影响。有时腐蚀性很弱的介质，像水、潮湿空气也能起到很大的作用。金属材料对各种腐蚀物质表现出来的抵抗能力叫化学性能，通常包括抗氧化性和耐腐蚀性等。研究这方面的能力对评估材料的疲劳寿命有重大关系。

抗氧化性指金属材料在高温下抵抗氧化性气氛腐蚀作用的能力。当设备在高温高压下运行时，金属的氧化反应将不可避免地发生，这一指标对高温高压环境下使用的钢材选用显得更加重要。

耐腐蚀性指金属材料耐介质腐蚀的性能。常见的腐蚀类型有以下几种：①应力腐蚀