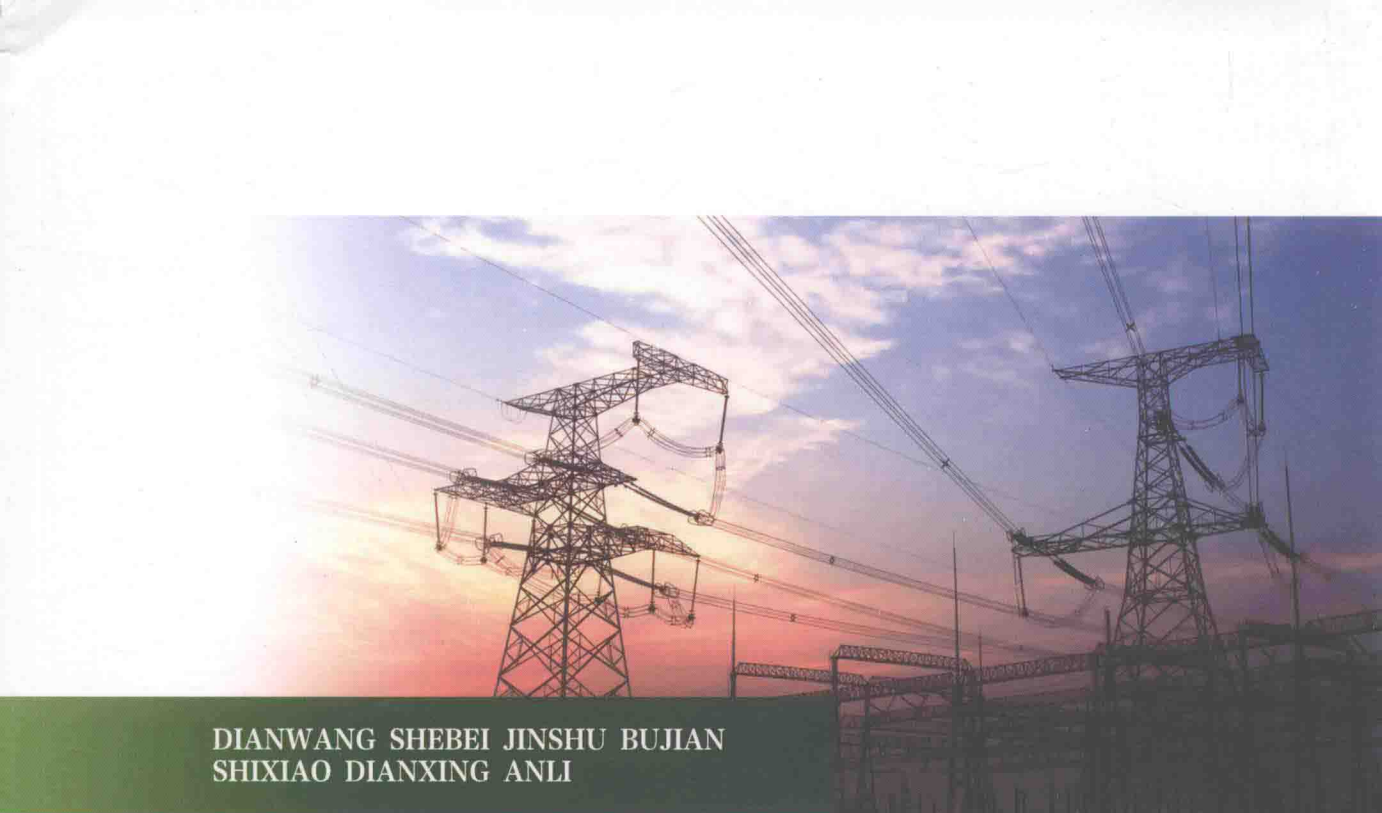




DIANWANG SHEBEI JINSHU BUJIAN
SHIXIAO DIANXING ANLI

电网设备金属部件 失效典型案例

国网湖南省电力公司电力科学研究院 组 编

谢国胜 主 编

刘 纯 谢 亿 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DIANWANG SHEBEI JINSHU BUJIAN
SHIXIAO DIANXING ANLI

电网设备金属部件 失效典型案例

国网湖南省电力公司电力科学研究院 组 编
谢国胜 主 编
刘 纯 谢 亿 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为推进电网系统的金属技术监督工作,减少电网系统金属部件失效问题,提高物资、基建和运检一线金属技术监督人员业务技能,国网湖南省电力公司电力科学研究院结合湖南省电网金属技术监督工作经验,撰写了本书。

本书共4章,分别为电网用金属材料基础、电网金属部件常用安装工艺、变电站金属部件失效典型案例、输电线路金属部件失效典型案例。

本书适用于从事物资、基建和运维检修工作的金属技术监督人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电网设备金属部件失效典型案例/谢国胜主编;国网湖南省电力公司电力科学研究院组编. —北京:中国电力出版社,2015.12

ISBN 978-7-5123-8460-6

I. ①电… II. ①谢…②国… III. ①电网—电气设备—金属材料—零部件—检修 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 246994 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015年12月第一版 2015年12月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13.5印张 286千字

印数 0001—2000册 定价 56.00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

本书编委会

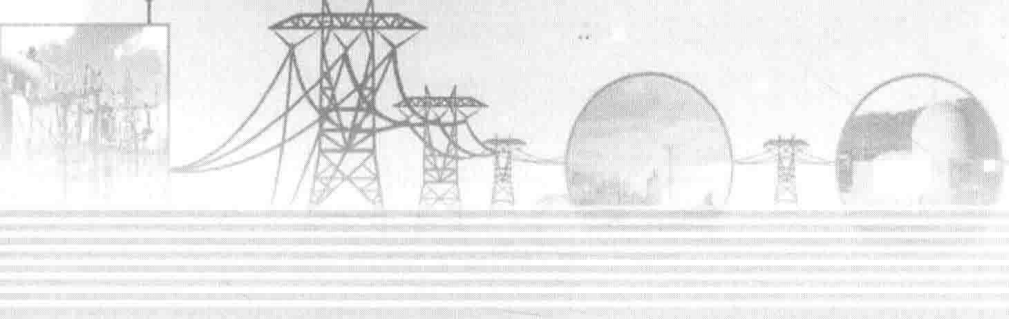
主 编 谢国胜

副 主 编 刘 纯 谢 亿

编写人员 胡加瑞 欧阳克俭 王 军 李文波

陈军君 陈红冬 龙 毅 杨湘伟

刘永雄 陈 欣



前言

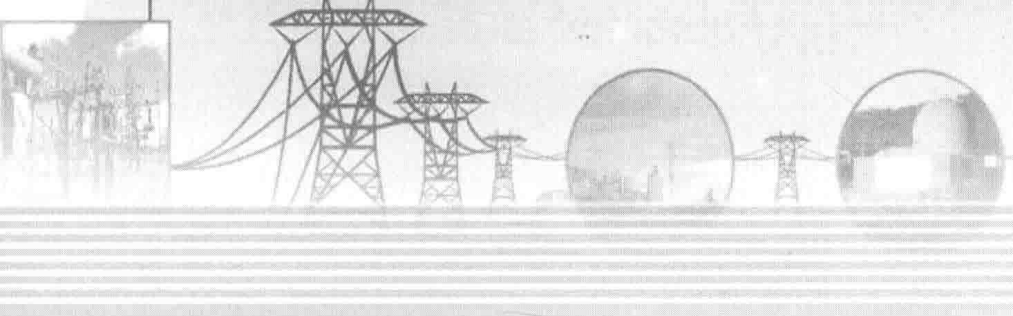
材料是一切设备和部件实现其功能的载体。金属材料在电网中起着载流、承载、密封和保护的作用，应用广，数量大，是变压器、断路器、输电杆塔等重要设备的主要组成部件，关系整个电网的安全运行。然而，目前电网系统缺乏金属材料专业的技术人员和金属材料监督相关的技术标准，以致电网系统金属材料的技术监督工作一直未有效开展，造成物资、基建和运维等过程中金属材料监督缺失。一旦电网设备发生故障，现场技术人员通常是从高压、绝缘和继电保护等角度查找原因，而忽视电网设备的载体金属材料是否存在问题，因此，很多金属部件的材料问题被电气故障所掩盖起来，难以发现与治理。

国网湖南省电力公司电力科学研究院于 2005 年开始试点电网的金属技术监督工作，通过 10 年的探索与努力，建成了全省的电网金属技术监督网络系统，并指导系统内各单位技术人员在物资检测、基建验收、运维检修等方面开展了大量的金属监督实践，将金属材料专业与电气一次专业有机地结合起来，成功处理了电网系统大量的金属部件失效问题，积累了丰富的案例素材。为避免同类事故的再次发生，提高物资、基建和运检一线金属技术监督人员业务技能，推进电网系统的金属技术监督工作快速发展，作者归纳总结了湖南省电网金属技术监督的工作，并参考了部分期刊资料和兄弟院所的事故缺陷分析报告，撰写了《电网设备金属部件失效典型案例》一书。

本书在撰写的过程中得到了国网湖南省电力公司、各供电公司和兄弟电科院的大力支持，书中引用了部分的电网金属领域公开出版的论文及相关文献资料，在此表示衷心的感谢！

由于作者水平所限，书中不足之处在所难免，恳请各位同行和读者批评指正。

编者



目 录

前言

第一章 电网用金属材料基础	1
第一节 材料的概念与分类	1
第二节 金属材料性能	1
第三节 电网常用金属材料	7
第二章 电网金属部件常用安装工艺	14
第一节 焊接	14
第二节 压接	21
第三节 螺栓紧固	28
第四节 防腐涂装	34
第三章 变电站金属部件失效典型案例	44
第一节 变压器	44
第二节 断路器	54
第三节 隔离开关	73
第四节 组合电器设备	85
第五节 开关柜	96
第六节 变电构架	101
第七节 支柱绝缘子	112
第八节 变电金具	122
第四章 输电线路金属部件失效典型案例	135
第一节 地线	135
第二节 导线	142
第三节 角钢塔	152
第四节 钢管杆	173
第五节 水泥杆	177
第六节 金具	181

第一章

电网用金属材料基础

金属材料的用量在电网一次设备中所占的比重非常大，主要起到载流、承载、密封和保护等方面的作用。电网用金属材料的“健康”服役是实现电能的可靠输送和安全使用的重要基础。本章着重介绍电网设备用金属材料的相关基础知识。

第一节 材料的概念与分类

材料是指有用的物资，即人类用于制造物品、器件、构件、机器或其他产品的物质。工程上，材料按属性可分为三类：金属材料、陶瓷材料和高分子材料，此外，还包括由以上三类材料相互组合而成的复合材料。

金属材料是目前用量最大使用最广的材料，通常可分为黑色金属和有色金属两大类。黑色金属包括钢铁、锰及铬等，有色金属包括铝、镁、锂、铜、锌、镍、铅、金、银、铂、钛、锆、钒等。电网设备及机械制造业中，钢铁材料能占 90% 左右，有色金属只占 5%。钢铁材料在 20 世纪处于最鼎盛时期，随着科学技术的发展，钢铁材料虽已不在高科技先进材料之列，但因其具有优良的力学性能、工艺性能和较低的成本，在今后很长一段时期内仍将占有重要地位。

随着工业的高速发展，有色金属应用越来越多，其中铝和铝合金用量最大，这主要是因为铝合金具有较高的比强度、良好的导电导热性能以及优异的耐大气腐蚀性能。基于这些特性，铝及铝合金在电网系统内大量使用，尤其是在远距离输送的导线中。

金属及其合金材料的研究在近一个世纪以来取得了很大的进展，专业技术人员对金属及其合金的化学成分、组织结构、工艺性能、力学性能及服役环境之间相互影响的规律已有较充分的了解。在此基础上，不断研制生产出一系列新的合金和材料，推动社会文明向前发展。

第二节 金属材料性能

与非金属材料相比，金属材料在力学性能、物理性能、化学性能和工艺性能上具有

显著的特点。金属材料的力学、物理、化学性能均是其在使用条件下表现出来的性能，其好坏决定了金属材料的使用范围和使用寿命；金属材料的工艺性能是其在加工制造过程中表现出来的性能，其好坏决定了金属材料在制造过程中加工成型的适应能力。

一、金属材料的力学性能

力学性能是指金属材料在不同环境因素（温度、介质）下承受外加载荷作用时所表现的行为，这种行为通常表现为变形和断裂。通常力学性能包括强度、塑性、刚度、弹性、硬度、冲击韧性和疲劳性能等，详见表 1-1。金属材料的力学性能是电网设备金属部件设计和选材的主要依据，外加载荷性质（如拉伸、压缩、扭转、冲击、摩擦、密封、循环载荷等）不同，对金属材料要求的力学性能也不相同。例如：碳素结构钢由于具有较高的强度和延伸率，力学性能较为优良，在电网系统用来制作输电铁塔和变电构架。表 1-2 列出了电网几种常用金属材料的力学性能。

表 1-1 金属材料力学性能

名称		符号	单位	含 义
强度	抗拉强度	σ_b	MPa	金属试样拉伸时、在拉断前所承受的最大负荷与试样原横截面积之比
	抗压强度	σ_{bc}	MPa	材料在压力作用下不发生碎、裂所承受的最大正应力
	抗弯强度	σ_{bb}	MPa	试样在位于两支承中间的集中负荷作用下，使其折断时，折断截面所承受的最大正应力
	屈服强度	σ_s	MPa	金属试样在拉伸过程中，负荷不再增加，而试样仍继续发生变形的现象称为屈服。发生屈服现象时的应力，称为屈服强度。对某些屈服现象不明显的金属材料，测定屈服点比较困难，常把产生 0.2% 永久变形的应力定为屈服强度
塑性	伸长率	A	%	金属材料在拉伸时，试样拉断后，其标距部分所增加的长度与原标距长度的百分比
	断面收缩率	ψ	%	金属试样拉断后，其颈缩处横截面积的最大缩减量与原横截面积的百分比
韧性	冲击韧性	α_K	J/cm ²	金属材料对冲击负荷的抵抗能力称为韧性，通常用冲击值来度量。用一定尺寸和形状的试样，在规定类型的试验机上受一次冲击负荷折断时，试样刻槽处单位面积上所消耗的功即冲击韧性
	断裂韧性	K_{IC}	MN · m ^{-3/2}	是材料韧性的一个参量。通常定义为材料抗裂纹扩展的能力。例如， K_{IC} 表示材料平面应变断裂韧性值，其意为当裂纹尖端处应力强度因子在静加载方式下等于 K_{IC} 时，即发生断裂。相应地，还有动态断裂韧性 K_{Id} 等

续表

名称		符号	单位	含 义
疲劳强度	疲劳极限	σ_{-1}	MPa	材料试样在对称弯曲应力作用下，经受一定的应力循环数 N 而仍不发生断裂时所能承受的最大应力。对钢来说，如应力循环数 N 达 $10^6 \sim 10^7$ 次仍不发生疲劳断裂时，则可认为随循环次数的增加，将不再发生疲劳断裂。因此常采用 $N = (0.5 \sim 1) \times 10^7$ 为基数，确定钢的疲劳极限
刚性	弹性模量	E	MPa	金属在外力作用下产生变形，当力取消后又恢复到原来的形状和大小的一种特性。在弹性范围内，金属拉伸试验时，外力和变形成比例增长，即应力和应变成正比例关系时，这个比例系数就称为弹性模量，也叫正弹性模数
硬度	布氏硬度	HB	无单位	硬度是指材料抵抗外物压入其表面的能力。硬度不是一个单纯的物理量，而是反映弹性、强度、塑性等的一个综合性指标
	洛氏硬度	HR		
	维氏硬度	HV		

表 1-2 电网几种常用金属材料的力学性能

材料种类	材料牌号	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	延伸率 (%)	硬度
碳素钢	Q235	235	370~500	26	—
不锈钢	12Cr18Ni9	205	≥ 515	40	201HBW
铝及铝合金	1070	15	55~95	30	—
	6061 (T4)	110	≥ 205	14	
铜及铜合金	T2	—	215~275	25	60~90HV
	H70	—	325~410	35	85~115HV

二、金属材料的物理性能

金属材料的物理性能是指不发生化学反应就能表现出来的对外界的各种本征性能，涉及金属材料与热、电、光、磁等现象相关的性能。金属材料常见的物理性能包括熔点、密度、导电率、导热性、热膨胀性能及比热容等，详见表 1-3。T2 纯铜作为变电设备的载流导体，如隔离开关的触指等，就是利用其良好的导电性能，其导电率高达 100.8%IACS。为进一步降低隔离开关触指的接触电阻，设计人员在触指接触部位镀上导电性能更好的银。而使用吸铁石快速检测奥氏体不锈钢螺栓也是利用该类材料无铁磁性的物理特性。

表 1-3

金属材料物理性能

名称	符号	单位	含 义
密度	ρ	kg/cm ³	某种物质单位体积的质量
熔点	—	K	金属材料由固态转变为液态时的熔化温度
热导率	λ	W/(m·K)	维持单位温度梯度时，在单位时间内流经物体单位横截面积(A)的热量(Q)称为该材料的导热系数
线膨胀系数	α_l	10 ⁻⁶ /K	金属温度每升高 1K 所增加的长度与原来长度的比值称线性膨胀系数。随温度增高，热膨胀系数值相应增大，钢的线膨胀系数值一般在 (10~20)×10 ⁻⁶ 的范围内
电阻系数	ρ	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	物体导电性能的一个参数。它等于 1m 长，横截面积为 1mm ² 的导线两端间的电阻
电阻温度系数	α	1/K	温度每升降 1K，材料电阻系数的改变量与原电阻系数之比
电导率	K	S/m	电阻系数的倒数叫导电率，在数值上它等于导体维持单位电位梯度时，流过单位面积的电流
导磁率	μ	H/m	衡量磁性材料磁化难易程度，即导磁能力的性能指标等于磁性材料之磁感应强度(B)和磁场强度(H)的比值。磁性材料通常分为软磁材料(μ 值甚高，可达数万)和硬磁材料(μ 值在 1 左右)两大类
磁感应强度	B	T	对于磁介质中的磁化过程，可以看作在原先的磁场强度(H)上再加上一个由磁化强度(J)所决定的，数量等于 4 πJ 的新磁场，因而在磁介质中的磁场 $B=H+4\pi J$ ，叫做磁感应强度
饱和磁感应强度	B_s	T	用足够大的磁场来磁化样品使样品达到饱和时，相应的磁感应强度
磁场强度	H	A/m	导体中通过电流，其周围就产生了磁场。磁场对原磁矩或电流产生作用力的大小为磁场强度的表征
居里点	T_c	K	铁磁性物质当温度升高到一定温度时，磁被破坏，变为顺磁体，这个转变温度称为居里点。在居里点时，铁磁物质的自发磁化强度降为零

三、金属材料的化学性能

金属材料与周围环境介质在接触时抵抗发生化学反应或电化学反应所表现出来的性能，称之为化学性能，主要包括抗氧化性和耐腐蚀性。抗氧化性指金属材料在室温或高温下抵抗氧化作用的能力，氧化过程实际上是属于化学腐蚀的一种形式，例如开关接地铜编织线在服役过程中出现铜绿，镀锌钢绞线长期在暴露在大气环境中出现锌白小颗粒。抗氧化性可用一定时间内金属表面经腐蚀之后重量损失的大小（金属减重的速度）来表示。耐腐蚀性能指金属材料抵抗各种介质侵蚀的能力。腐蚀是金属材料在服役环境

中最为常见的一种失效方式，也是电网设备金属部件设计、运维、检修等环节重点考虑的问题。表 1-4 给出了金属材料腐蚀的各种形式。

表 1-4 金属材料腐蚀的各种形式

名称	含 义
化学腐蚀	金属与周围介质直接起化学作用的结果，包括气体腐蚀和金属在非电解质中的腐蚀两种形式，其特点是腐蚀过程不产生电流，且腐蚀产物沉积在金属表面
电化学腐蚀	金属与酸、碱、盐等电解质溶液接触时发生作用而引起的腐蚀，其特点是腐蚀过程中有电流产生，腐蚀产物覆盖在作为阳极的金属表面上，而且在阳极金属附近
一般腐蚀	一般腐蚀均匀地分布在金属内外表面上，使截面不断减小，最终使受力件破坏
晶间腐蚀	晶间腐蚀在金属内部沿晶粒边缘进行，通常不引起金属外形的任何变化，常使设备或机件突然破坏
点腐蚀	点腐蚀集中在金属表面不大的区域内，并迅速向深处发展，最后穿透金属，是一种危害较大的腐蚀破坏
应力腐蚀	应力腐蚀是指在静应力（金属的内外应力）作用下，金属在腐蚀介质中所引起的破坏。这种腐蚀一般穿过晶粒，因而属于穿晶腐蚀
腐蚀疲劳	腐蚀疲劳指在交变应力作用下，金属在腐蚀介质中所引起的破坏，也是一种穿晶腐蚀

在常见的金属材料如碳素钢、不锈钢、铝合金和铜合金等中，抗大气腐蚀性能最差的是碳素钢，不锈钢中由于加入了铬元素，能够在合金表面生成一层连续的保护膜，从而具有较为优良的防腐性能；铝合金由于能够在合金表面生成一层致密的氧化铝保护膜，也具有较为优良的防腐性能；铜合金在大气环境中，能够生成碱式碳酸铜，该氧化膜致密，也具有一定的保护性，因此铜合金也具有一定的防腐性能。这几种金属材料在大气环境中使用时，碳素钢通常需要在其表面采取一定的防腐措施如热浸镀锌、电镀锌或者刷涂有机涂料等，以减缓碳素钢腐蚀，这也是输电铁塔使用镀锌钢的原因。

四、金属材料的工艺性能

除力学性能、物理性能、化学性能外，金属材料还有一类非常重要的性能——工艺性能。金属材料的工艺性能是指金属材料适应加工工艺（包括铸造、锻造、焊接、切削加工等）要求的能力，另外，常把与材料最终性能相关的热处理工艺性也作为工艺性能的一部分。金属材料由于加工条件的不同，其要求的工艺性能也不尽相同。

铸造性能是指金属材料是否适合铸造的工艺性能。衡量金属材料铸造性的指标有金属流动性、收缩率和偏析倾向。金属流动性指的是熔融金属的流动能力，流动性不好，铸型就不容易被液态金属充满而变成废品，金属流动性尤其在浇注复杂的薄壁铸件时非常重要。收缩率指的是铸件凝固时体积收缩的程度。收缩是金属铸造时有害的性能，影

响着铸件形成缩孔、缩松倾向的大小，影响铸件内应力的大小、产生裂纹的倾向和铸件的最后尺寸，一般希望收缩率愈小愈好。偏析倾向指的是金属冷却凝固过程中因结晶先后差异而造成的铸件内部化学成分和显微组织不均匀性，从而降低铸件的质量。偏析小，铸件各部位成分就较均匀，可使铸件质量提高。一般说来，合金钢偏析倾向较大，高碳钢偏析倾向比低碳钢大，因此这类钢浇铸后需要扩散退火热处理来消除偏析。

锻造性能指的是金属在压力加工条件下（包括在热态或冷态下进行锤锻、轧制、拉伸、挤压等加工）能够改变形状而不产生裂纹的性能。锻造性能的优劣主要与金属材料的化学成分有关。例如铜、铝的合金在冷态下就具有很好的锻造性，而碳钢在加热状态下锻造性也很好，但青铜的锻造性能就差些，至于铸铁就几乎不能锻造。

焊接性能是指金属材料对焊接加工的适应性，主要是反应金属材料在一定的焊接工艺条件下获得优质焊接接头的难易程度。焊接性能包括两个方面的内容：一是焊接结合性能，即在一定焊接工艺条件下金属形成焊接缺陷的敏感性；二是焊接使用性能，即在一定焊接工艺条件下金属焊接接头对使用要求的适用性。用焊接接头强度与母材强度相比来衡量焊接性，如接头强度接近母材强度则焊接性好。一般说来，低碳钢具有良好的焊接性，中碳钢的焊接性中等，高碳钢、高合金钢、铸铁和铝合金的焊接性较差。

切削加工性能是指金属在切削加工时的难易程度。切削加工性能的优劣与金属材料的化学成分、硬度、强度、塑性、韧性、导热性，金属加工硬化程度及热处理等密切相关，通常用硬度和韧性切削加工性能的优劣来判断。金属材料的硬度越高越难切削，硬度不高但韧性大切削也比较困难。一般有色金属比钢铁的切削加工性能好，铸铁的切削加工性比钢的好。

热处理是指金属材料在固态范围内通过一定的加热、保温和冷却方法，以改变金属工件表面或内部组织结构来得到所需性能的工艺方法，主要包括退火、正火、淬火、回火、化学热处理、时效处理等方法。而衡量金属材料热处理工艺性能的因素主要有淬硬性、淬透性、淬火变形开裂趋势、表面氧化趋势、表面脱碳趋势、过热过烧敏感趋势、回火稳定性及回火脆性等。

热处理对材料的使用性能有很大的影响。例如电网中常用的 6063 铝合金，成形后采用不同的热处理工艺后，力学性能和导电性能有较大不同。采用 T2 热处理制度的 6063 铝合金导电性能优良，显微组织中增强相较少，抗拉强度较低，用来做导电杆较为合适；而采用 T6 热处理制度的 6063 铝合金，则显微组织中析出的增强相较多，抗拉强度高，但是导电性能变差，用来作为承力线夹较为合适。

第三节 电网常用金属材料

输变电设备及部件中大量使用着金属材料，其主要作用可以分为两类：一类是起承载作用，作为结构件起到支撑、传动、紧固作用，一般以钢铁为主，例如输电铁塔、开关设备的操作传动机构、各类紧固螺栓以及导线中的钢芯；另外一类是起载流作用，作为导电功能件起到传输电流的作用，大多数为铝和铜及其合金，例如输电线路上各种铝和铝合金绞线、开关设备中导电杆和触指、变压器中的绕组与引线等。本节选择了输变电设备中最为常用的几种金属材料——碳素钢、不锈钢、铝及铝合金、铜及铜合金进行简要介绍。

一、碳素钢

钢铁是以铁和碳为主要元素组成的合金，按照含碳量的不同分为纯铁、铸铁和钢。纯铁强度低、硬度低、一般不作为结构件使用。铸铁中碳含量高、脆性大、可焊性能差，只能作为小部分承担压应力的结构件。钢由于其良好的综合性能，是电网设备主要的结构件。

按照化学成分进行分类，钢分为碳素钢和合金钢两类。顾名思义，碳素钢中除铁、碳和限量以内的硅、锰、磷、硫等杂质外不含其他合金元素，其价格低廉、易加工成型且适应性强，可以满足大部分常温常压条件下服役要求，因此是电网设备中主要承载部件。碳素钢的性能主要取决于含碳量，含碳量增加，钢的强度、硬度升高，塑性、韧性和可焊性降低。

输变电设备中使用的碳素钢主要有碳素结构钢和优质碳素结构钢等。碳素结构钢含碳量约 0.05%~0.70%，个别可高达 0.90%。由于碳素结构钢主要是承受各种载荷，因此要求有较高的屈服强度、良好的塑性和韧性，以保证工程结构的可靠性。碳素结构钢一般不作热处理，可直接使用，多制成条钢、异型钢材、钢板等。碳素结构钢的牌号主要由两部分组成，首写字母 Q 表示屈服的拼音首字母，数值表示其最低屈服强度值，例如 Q235 钢，表示该碳素结构钢的最低屈服强度值为 235MPa。碳素结构钢的显微组织为“铁素体+珠光体”，图 1-1 示出了 Q235 钢的显微组织，随着钢中碳含量增加，

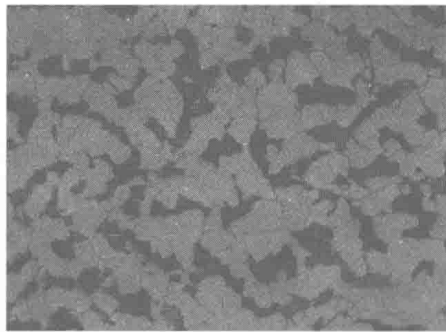


图 1-1 Q235 钢的显微组织 (×500)

注：“×500”表示放大倍数为 500，以下同。

组织中珠光体含量增加，钢的强度也增大，但塑性会下降。

优质碳素结构钢钢质纯净、杂质少，力学性能好，可经热处理后使用。优质碳素结构钢牌号以两位阿拉伯数字或阿拉伯数字与元素符号组成，其中牌号中两位数字表示的是碳的平均质量分数（以万分之几表示），例如 45 号钢表示碳的平均质量分数为 0.45% 的优质碳素结构钢；而牌号中有元素符号，则表示该优质碳素结构钢中该元素含量较高，例如 20Mn 钢表示碳的平均质量分数为 0.20% 且 Mn 含量较高的优质碳素结构钢。

含碳量在 0.25% 以下的优质碳素结构钢，多不经热处理直接使用，或经渗碳、碳氮共渗等处理，制造中小齿轮、轴类、活塞销等；含碳量在 0.25%~0.60% 的优质碳素结构钢，典型钢号有 40、45、40Mn、45Mn 等，多经调质处理，制造各种机械零件及紧固件等；含碳量超过 0.60% 的优质碳素结构钢，如 65、70、85、65Mn、70Mn 等，多作为弹簧钢使用。

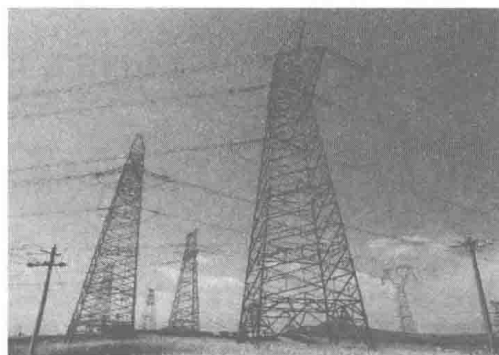


图 1-2 输电铁塔

碳素结构钢在输变电设备中的广泛应用，例如输电铁塔、变电设备构架、断路器储能弹簧、传动机构部件等。输电铁塔虽然形状和用途各不相同，但用来制作的材料却是相似的，由角钢、连接钢板和螺栓组成，输电铁塔如图 1-2 所示。铁塔的杆件主要由单根等边角钢或组合角钢组成，材料一般使用 Q235 和 16Mn (Q345) 两种，杆件间连接采用

粗制螺栓，靠螺栓受剪力连接，而螺栓主要是由中碳钢制作而成。

二、不锈钢

当输变电设备服役条件较为苛刻时，一些关键零部件需选用合金钢。合金钢的牌号是按碳的质量分数、合金元素的种类和数量以及质量级别来编号的，在牌号之首用数字表明碳的质量分数，然后用元素符号表明钢中的主要合金元素，质量分数由其后缀的数字表示，平均质量分数小于 1.5% 时不标，平均质量分数为 1.5%~2.49%、2.5%~3.49%... 时，相应的标出 2、3... 例如 4CrW2Si 合金钢，其含碳量为 0.40%，Cr 和 Si 含量低于 1.5%，W 含量大约为 2.0%。

合金钢的钢种繁多，分类方法也不相同，如按元素含量的多少分为高合金钢（合金质量分数大于 10%）、中合金钢（合金质量分数为 5%~10%）和低合金钢（合金分数低于 5%）。也可以按照用途分为结构钢、工具钢和特殊性能钢。特殊性能钢中有一类

在输变电设备中使用量很大，这就是不锈钢。显然，不锈钢在抵御腐蚀环境防止工件锈蚀方面具有优势。

不锈钢之所以具有良好的抗腐蚀性能，主要是因为不锈钢的成分和组织不同于一般的碳素钢。不锈钢中含有一定含量的铬，能够在钢表面生成一层保护性的氧化膜，该氧化膜和钢牢固结合，腐蚀过程受到阻滞，从而使得钢材得到保护。一般来讲，在中性溶液（ $\text{pH}=7$ ）和大气腐蚀条件下，要生成这种保护性氧化膜的临界铬含量 $w(\text{Cr})$ 约为 12%。常用奥氏体不锈钢中铬含量一般保持在 18% 左右，因此在常规大气环境中保持不锈，其显微组织见图 1-3。

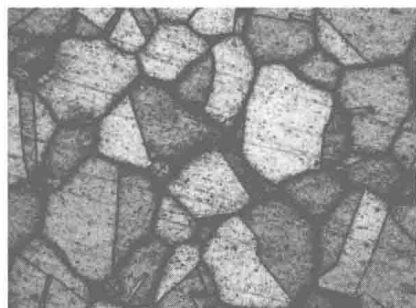


图 1-3 奥氏体不锈钢显微组织
($\times 200$)

不锈钢并非完全抗腐蚀，其防腐的效果与具体服役环境介质特点密切相关，特别是介质的氧化性能。在氧化性介质如硝酸中， NO_3^- 是氧化性的，不锈钢表面容易形成氧化膜，钝化时间也短。在非氧化性介质如稀硫酸、盐酸、有机酸中，含氧量低，钝化时间将延长。当介质中含氧量低到一定程度后，不锈钢就不能钝化。如在稀硫酸中，铬不锈钢的腐蚀速度甚至比碳钢还快。所以必须根据工作介质的特点来正确选择使用不锈钢钢种。

不锈钢按照显微组织可以进一步细分为奥氏体不锈钢、铁素体不锈钢、马氏体不锈钢和奥氏体—铁素体双相不锈钢。奥氏体不锈钢含铬量大于 18%，还含有 8% 左右的镍及少量钼、钛、氮等元素，具有良好的塑性、韧性、焊接性以及耐蚀性能，通常情况下无磁性。典型的奥氏体不锈钢有 0Cr19Ni9、1Cr18Ni9Ti、00Cr19Ni10、00Cr18Ni18Mo2Cu2 等。

铁素体不锈钢含铬 15%~30%，其耐蚀性、韧性和可焊性随含铬量的增加而提高，耐氯化物应力腐蚀性能优于其他种类不锈钢。由于含铬量高，铁素体不锈钢耐腐蚀性能与抗氧化性能均较好，但机械性能与工艺性能较差，多用于受力不大的耐酸结构及作抗氧化钢使用。典型钢种有 0Cr17Ti，Cr25Ti，Cr26Mo1 等。

马氏体不锈钢含铬 13% 左右，因含碳较高，故具有较高的强度、硬度和耐磨性，但耐蚀性稍差，用于对力学性能要求较高、耐蚀性能要求一般的零件上。常用牌号有 1Cr13、3Cr13 等。

奥氏体—铁素体双相不锈钢中奥氏体和铁素体组织约各占一半。在含碳量较低的情况下，Cr 含量在 18%~28%，Ni 含量在 3%~10%。有些钢还含有 Mo、Cu、Si、Nb、Ti，N 等合金元素。该类钢兼有奥氏体和铁素体不锈钢的特点，与铁素体相比，塑性、

韧性更高，无室温脆性，耐晶间腐蚀性能和焊接性能均显著提高，同时还保持有铁素体不锈钢的 475℃脆性以及导热系数高，具有超塑性等特点。与奥氏体不锈钢相比，强度高且耐晶间腐蚀和耐氯化物应力腐蚀有明显提高。双相不锈钢具有优良的耐孔蚀性能，也是一种节镍不锈钢。典型的钢号有 Cr21Ni5Ti、00Cr22Ni5Mo3N、00Gr18Ni5Mo3Si2 等。

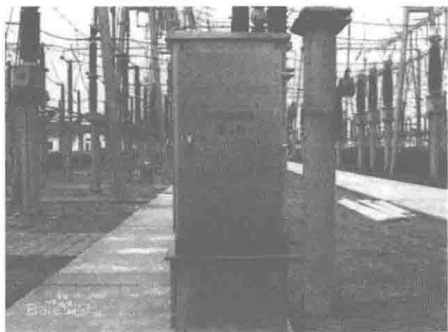


图 1-4 采用不锈钢制作的端子箱

不锈钢在电网中可以作为开关设备的传动机构、端子箱外壳、弹簧、螺栓、抱箍等。例如现在端子箱外壳已经开始采用 Cr18Ni9 系列不锈钢制造，如图 1-4 所示；而 10kV 开关柜的触指压紧弹簧通常采用 Cr18Mn9Ni5 系列不锈钢制造，如图 1-5 所示；部分紧固螺栓也开始采用不锈钢制造。采用不锈钢制作这些部件的优势在于不锈钢在大气环境中具备良好的抗腐蚀性能，不需要

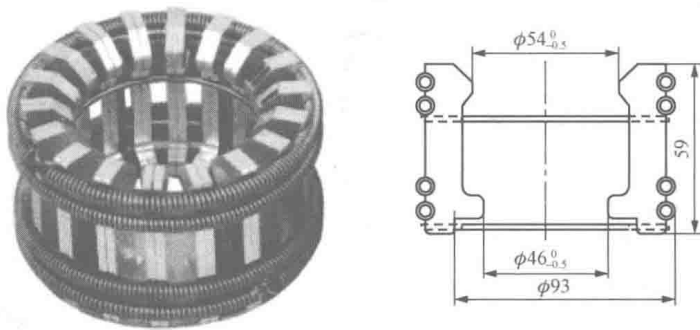


图 1-5 10kV 开关柜触头

表面处理即可使用。而采用碳素钢制作以上部件，由于碳素钢的抗腐蚀性能较差，因此不能直接使用，通常需要采取一定的防腐处理，例如热浸镀锌或者是刷涂有机涂层等。然而镀锌层或者有机涂层的破损仍然会导致碳素钢的局部腐蚀，因此采用不锈钢制作这些部件是减缓腐蚀的一种良好解决办法。需要注意的是，现在厂家为了降低生产成本，有时会采用一些以 Mn 代 Ni 的非标不锈钢来代替标准的 3 系不锈钢，这种非标不锈钢耐蚀性能较差，不推荐使用。

三、铝及铝合金

纯铝的密度小，塑性好，易于加工，且抗腐蚀性能和导电导热性能优良，但其强度很低，退火状态抗拉强度值只有 80MPa，故不宜作结构材料，通常用于导线、设备线夹和母线等。

纯铝采用合金化和热处理时效的方法进行强化，可以制得一系列的铝合金材料。铝

合金在保持纯铝质轻及较好的导电性等优点的同时还能大幅提高强度，扩大其应用范围。

铝合金通常可分为变形铝合金和铸造铝合金两大类。变形铝合金通过挤压等工艺成型，由固溶体基体和析出强化相构成，如图 1-6 所示，能承受压力加工。变形铝合金按照合金成分分为 1000~7000 七大系列。

1000 系列属于工业纯铝，其纯度可以达到 99.00% 以上。一般根据最后两位阿拉伯数字来确定这个系列的最低含铝量，例如 1050 系列最后两位阿拉伯数字为 50，其含铝量必须达到 99.5% 以上方为合格产品。同样的道理 1060 系列铝板的含铝量必须达到 99.6% 以上。2000 系列铝合金的特点是硬度较高，合金添加元素为铜，含量在 3%~5%。2000 系列铝棒属于航空铝材，在常规工业中不常应用。3000 系列铝合金防锈功能较好，合金添加元素为锰，含量在 1.0~1.5。4000 系列铝合金熔点低、耐腐蚀性能好，合金添加元素为硅，含量在 4.5%~6.0%，通常用作机械零件锻造用材和焊接材料。5000 系列铝合金密度低，抗拉强度高，延伸率高，疲劳强度好，但不可做热处理强化。5000 系列铝合金合金添加元素为镁，含量在 3%~5%。6000 系列铝合金主要含有镁和硅两种元素，故集中了 4000 系列和 5000 系列的优点，例如 6061 铝合金是一种冷处理铝锻造产品，其抗腐蚀性、氧化性性能好，易于加工。7000 系列铝合金属于超硬铝合金，有良好的耐磨性和可焊性，但耐腐蚀性较差。主要合金元素为锌，同时还含有镁和铜。

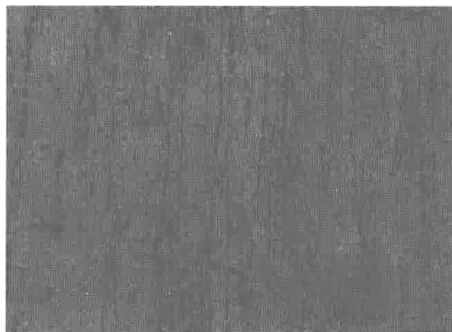


图 1-6 变形铝合金 (6061) 的显微组织 (×200)



图 1-7 铸造铝合金 (ZL104) 显微组织 (×100)

铸造铝合金在铸态下使用，其典型显微组织如图 1-7 所示。

铸造铝合金按化学成分可分为铝硅系合金、铝铜系合金、铝镁系合金、铝锌合金等多个系列。铝硅系合金含硅量在 4%~13%。有时添加 0.2%~0.6% 镁，具有良好的铸造性能和耐磨性能，热胀系数小，在铸造铝合金中品种最多，用量最大，广泛用于结构件如壳体、缸体、箱体和框架等。铝铜系合金含铜量在 4.5%~5.3%，

可合金强化效果最佳，适当加入锰和钛能显著提高合金的室温、高温强度和铸造性能，