

 中国南方电网  
CHINA SOUTHERN POWER GRID

◆ 贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书 ◆

# 电网

## 一次设备材料失效分析

贵州电网有限责任公司 组编



贵州大学出版社  
Guizhou University Press

◇ 贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书 ◇

# 电网一次设备材料失效分析

贵州电网有限责任公司 组编



贵州大学出版社

Guizhou University Press

图书在版编目 (C I P) 数据

电网一次设备材料失效分析 / 贵州电网有限责任公司组织编写. -- 贵阳: 贵州大学出版社, 2017.12  
(贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书)  
ISBN 978-7-5691-0073-0

I. ①电… II. ①贵… III. ①电网 - 一次设备 - 电工材料 - 失效分析 IV. ①TM727②TM201.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第294956号

## 电网一次设备材料失效分析

贵州电网有限责任公司 组编

---

出版人: 闵 军

责任编辑: 滕 芸 张 萌

装帧设计: 陈 艺

---

出版发行: 贵州大学出版社有限责任公司

地址: 贵阳市花溪区贵州大学北校区出版大楼

邮编: 550025 电话: 0851-88291180

印 刷: 贵阳精彩数字印刷有限公司

成品尺寸: 170毫米×240毫米

印 张: 22.5

字 数: 350千

版 次: 2017年12月 第1版

印 次: 2017年12月 第1次印刷

---

书 号: ISBN 978-7-5691-0073-0

定 价: 60.00元

版权所有 侵权必究

本书若出现印装质量问题, 请与出版社联系调换  
电话: 0851-88291180

编  
委  
会

主 编 | 张仁奇

参编人员 | 蒋 欣 代发明 戴 宇  
杨再贵 何锦航 陈家辉  
王凌旭 樊 磊 苏剑锋

主  
编  
简  
介



张仁奇，男，水族，1968年3月生，  
贵州三都水族自治县人，高级工程师。

1990年毕业于长沙水利电力师范学院（长沙理工大学）物理专业，先后就职于贵州黔桂发电有限公司（盘县发电厂）、贵州电网有限责任公司电力科学研究院，长期从事电站锅炉、压力容器、汽轮机发电机组、水轮发电机组、电网一次设备等电力系统重要设备的检验检测、失效分析工作，持有中国特种设备检验协会射线检测高级人员、锅炉检验师、压力容器检验师资格证。为西南地区电力行业无损检测人员资格考核委员会委员、西南地区电力行业理化检测人员资格考核委员会委员、贵州省特种设备无损检测人员考核委员会委员。

# 序

一个电网公司的有型资产中 70% ~ 80% 是由钢、铝、铜金属材料构成的, 10% ~ 20% 是由瓷、玻璃、硅橡胶等非金属材料构成的。然而, 在生产实践中, 长期以来不管是管理层、工作层都重视电方面的问题, 在材料的分析与应用上是比较欠缺的。一般来说, 电网公司是以成型的设备购入, 对设备的材料关注是不够的, 基本是交由设备制造商去考虑。因此, 这方面的规程规范也比较少, 这种模式从电力生产的设计阶段就产生了。电网公司主要业务是电力的输送, 设计时主要关注的是电力输送环节的配合, 属于工艺流程设计, 多考虑电压、电流、电功率、电磁干扰等因素, 很少考虑所用材料在运行的过程中能否保证在 10—20 年维持性能不变, 保证设备功能的完整性与可靠性。比如, 刀闸出厂标定的额定参数电流、电压、机械操作次数等, 就没有材料的耐酸、耐碱、耐紫外等自然环境的参数。在自然环境的作用下, 往往不能保证其所标定参数的长期运行, 现实中的很多缺陷由此而生。

贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 在长期的设备缺陷跟踪过程中, 积累了丰厚的缺陷分析样本, 从设备材料的角度给我们揭示了一个我们长期忽视的问题。这个意义非常重大。可以这样说, 我们如果解决了材料问题, 我们的缺陷就减少了一半。我们希望通过材料分析提高各级管理层对电网公司设备资产性质的再认识, 提高各级部门的管理水平。

贵州电网有限责任公司生技部 戴宇

2017 年 12 月于贵阳

# 前 言

完成发电—输电—配电功能的设备叫做一次设备,如发电机、断路器、电流电压互感器、变压器、避雷器等。电网一次设备都是由结构材料构成的,这些材料有很多种,包括钢铁、铝及铝合金、铜及铜合金、陶瓷、环氧树脂、硅橡胶等固体材料,也有 SF<sub>6</sub> 气体、绝缘油等气体和液体材料等。这些材料组成的构件及设备在环境因素、运行载荷的作用下均会出现疲劳、劣化以致失效,直接影响到电网的安全。随着电网的建设和发展,电网安全对一次设备的可靠性要求越来越高,需要电网一次设备安装维护人员对相关结构材料的性能和可能的失效原理有一些基本的认识。

在多年电网一次设备缺陷分析工作中,作者深感电网一线一次设备安装维护人员对电网设备材料、结构知识的匮乏。现在电网的输电、变电设备运维队伍中,设备安装维护技术人员往往是从高校电气工程相关专业毕业,在学校和工作中均未得到机械设计、材料性能、失效分析等方面的系统学习。因此电网一次设备安装维护人员补充学习电网一次设备常用材料基础知识、失效分析技术、失效反措技术是非常必要的。

根据电网一次设备常见材料归类,本书主要就钢铁、铝及铝合金、铜及铜合金、陶瓷四类材料基本性能进行介绍,并对一些典型设备材料失效案例进行分析。本书分为八个部分,第一部分介绍电网一次设备材料基本使用性能;第二部分介绍钢铁、铝及铝合金、铜及铜合金基础知识;第三部分介绍绝缘子基础知识;第四部分介绍电网一次设备钢铁部件失效分析案例;第五部分介绍电网一次设备铝及铝合金部件失效分析案例;第六部分介绍电网一次设备铜及铜合金部件失效分析案例;第七部分介绍电网一次设备电瓷部件失效分析案例;第八部分介绍电网一次设备材料可靠性改进措施,当中涉及了隔离开关卡涩发热原因分析及改进措施、弹性材料失效原因及改进措施、螺栓扭矩的控制、导管扩口

式管接头密封原理及装配技术要点等一次设备管理维护技术。

本书是电网一次设备结构材料基础知识教材,主要针对变电、输电的安装维护人员,也可供电网一次设备管理人员参考。

张仁奇

2017年11月于贵阳



# 目 录

## 第一章 材料的基本使用性能/001

## 第二章 电网一次设备常用金属材料

### 第一节 钢铁的分类/026

### 第二节 铝及铝合金基础知识/045

### 第三节 铜及铜合金基础知识/053

## 第三章 绝缘子材料

### 第一节 绝缘子/069

### 第二节 瓷绝缘子/097

### 第三节 玻璃绝缘子/116

### 第四节 复合绝缘子/123

### 第五节 几种绝缘子的比较/132

## 第四章 钢铁部件失效案例

### 第一节 隔离开关储能弹簧的失效/138

### 第二节 接地刀闸传动机构抱箍打滑/150

### 第三节 接地刀闸不锈钢连杆断裂/161

### 第四节 输电导线断线/167

## 第五章 铝及铝合金失效案例

第一节 GIS 铝合金制造缺陷漏气/191

第二节 输电线路引流线板熔断/199

第三节 CT 密度表三通铝合金螺母剥蚀/215

第四节 隔离开关软连接片断裂/219

## 第六章 铜及铜合金失效案例

第一节 PT 铜合金接线螺栓断裂/225

第二节 GIS 气室阀门铜合金配件开裂/229

第三节 铜合金管接线端子开裂/244

## 第七章 电瓷失效案例

第一节 接地刀闸瓷瓶断裂/251

第二节 避雷线引下线接地刀闸支柱瓷瓶破裂/256

第三节 融冰管母支柱瓷瓶断裂/261

第四节 悬式陶瓷绝缘子掉串/268

## 第八章 电网一次设备材料可靠性分析及改进措施

第一节 高压隔离开关卡涩、发热原因/277

第二节 弹性材料失效机理与电网设备轮换制/311

第三节 电网一次设备螺栓紧固力计算方法/332

第四节 导管扩口式接头连接原理及装配要点/341

# 第一章 材料的基本使用性能

## 一、概述

材料的性能是选择和使用材料的依据。材料的性能包括使用性能和工艺性能。

使用性能包括物理性能、化学性能、机械性能。物理性能:密度、熔点、导电性、导热性、磁性等;化学性能:抗氧化性、耐腐蚀性;机械性能:强度、塑性、冲击韧性、硬度、疲劳强度等。

工艺性能包括锻造性能、焊接性能、切削性能。

## 二、材料的机械性能

机械性能是指材料在外力作用下所表现出来的抵抗变形和破坏的能力以及接受变形的能力。我们在进行设备结构材料能力和寿命进行评价时,机械性能是必须考察的因素。

### (一)应力与应变

物体在经受外力作用时会发生变形,此时其内部各部分之间会因为相对位置的变化而产生相互作用的力,即使不受外力作用,物体的各个质点之间也存在着相互作用的力。因此可认为内力是指材料内部各部分之间的相互作用的力,在未受外力作用时,材料内部相互平衡并保持其固有的形状。当受到外力时,这种固有的平衡被打破,相互之间作用力会改变,材料会发生变形,这是由于材料在外力作用下产生的附加内力的结果。

物体在外力作用下,其形状尺寸所发生的相对改变称为应变;物体在外力作用下而变形时,其内部任一截面单位面积上的内力大小通常称为应力;方向垂直于截面的应力称为正应力。

在我国法定计量单位中,应力的单位为 Pa,称为“帕斯卡”, $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。

由于这个单位太小,在使用时常常用 MPa 代替,  $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$ 。

## (二)强度和塑性

**强度:**是衡量材料在外力作用下抵抗塑性变形或断裂的能力。

**塑性:**是衡量材料在外力作用下接受变形的能力。

### 1. 拉伸试验

分析构件的强度时,需要考虑应力以及材料的力学性能。材料的力学性能是指材料在外力作用下表现出的变形、破坏等方面的特性,它是由试验来测定的。在室温下,以缓慢平稳的加载方式进行试验,称为常温静载试验,是测定材料力学性能的基本试验,该试验依据国家标准(目前通用的标准为 GB/T 228)进行,将材料制作成标准试样或比例试样,在万能实验机上沿试样轴向缓慢地施加拉力,试样随拉力的增加而变形,直至断裂。测得材料的伸长率、断面收缩率、屈服强度、屈服载荷及抗拉强度等主要力学性能指标。

#### (1) 拉伸试样

拉伸试样如图 1-1。

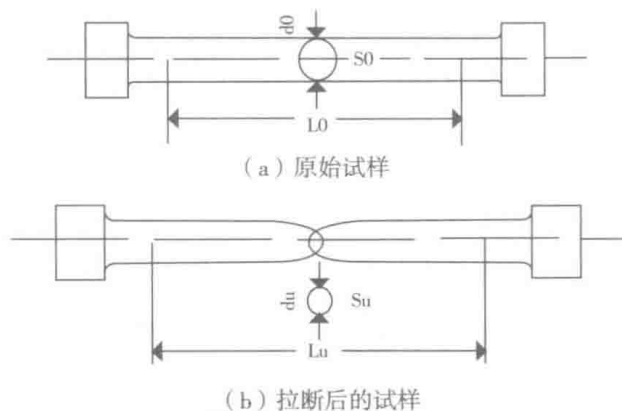


图 1-1 拉伸试样

#### (2) 拉伸曲线

低碳钢的拉伸曲线如图 1-2。

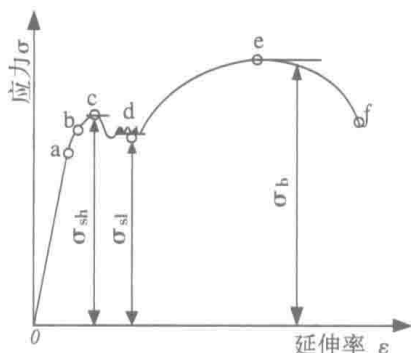


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

图 1-2 拉伸曲线表示试样拉伸过程中力和变形关系,可用应力—延伸率曲线表示,纵坐标为应力  $R$ ,  $R = F/S_0$ ,横坐标为延伸率  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon = \Delta L/L_0$ 。

拉伸曲线的形状与材料有关,由图 1-2 可见,在载荷小的  $oa$  阶段,试样在载荷  $F$  的作用下均匀伸长,伸长量与载荷的增加成正比。如果此时卸除载荷,试样立即回复原状,即试样产生的变形为弹性变形。当载荷超过  $b$  点以后,试样会进一步产生变形,此时若卸除载荷,试样的弹性变形消失,而另一部分变形则保留下来,这种不能恢复的变形称为塑性变形。在经过屈服阶段后,材料抵抗变形的能力会恢复,若要使变形量增加则需要增加拉力,此阶段称为材料的强化,在此阶段中,试样的横向尺寸会有明显的缩小。

## 2. 强度

强度是材料抵抗塑性变形或断裂的能力。通过拉伸试验所测得的常用的强度指标有屈服强度和抗拉强度。

屈服强度是材料产生屈服时对应的极限应力值,也就是抵抗微量塑性变形的应力。用符号  $\sigma_s$  表示,单位是  $N/mm^2$  或  $MPa$ ,大小为载荷与试样原始横截面积的比值,即:

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} \quad (1-1)$$

式中,  $F_s$ ——材料屈服时的载荷 ( $N$ );

$S_0$ ——试样原始横截面积 ( $mm^2$ )。

屈服强度可分为上屈服强度和下屈服强度,上屈服强度是指试样发生屈服而外力首次下降前的最高应力,用符号  $\sigma_{sh}$  表示;下屈服强度是指试样屈服期

间,不计初始瞬时的最低应力值,用符号  $\sigma_{st}$  表示。

一般机械零件和工程构件都不允许在使用中产生塑性变形,否则会因失效而发生事故,所以  $R_{eL}$  屈服强度是机械设计和工程设计中的重要依据。

抗拉强度是材料由均匀塑性变形向局部集中塑性变形过渡的临界值,也是材料在静拉伸条件下的最大承载能力。用符号  $\sigma_b$  表示,单位是  $N/mm^2$  或  $MPa$ ,其大小为材料最大载荷与试样原始横截面积的比值表示,即:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \quad (1-2)$$

式中,  $F_b$ ——材料屈服时的载荷(N);

$S_0$ ——试样原始横截面积( $mm^2$ )。

### 3. 塑性

材料的塑性指材料在外力作用下能稳定地产生永久变形而不破坏的能力。拉伸试验所测得的塑性指标有断后伸长率和断面收缩率。

断后伸长率,又称延伸率,是指金属在做抗拉实验时,试样断裂后,其断面标距部分增长的长度与试样初始长度的百分比。标准试样的断后伸长率用  $A$  表示,指试样被拉断后,其标距部分所增加的长度与原标距比值的百分率。即:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中,  $L_u$ ——试样被拉断后标距的长度;

$L_0$ ——试样原始标距。

对于比例试样,  $A$  应附下脚注说明所使用的比例系数,例如  $A_{11.3}$  表示原始标距的断后伸长率。对于非比例试样,符号  $A$  应附以下脚标注说明所使用的原始标距,以  $mm$  表示,例如,  $A_{80mm}$  表示原始标距  $L_0$  为  $80mm$  的断后伸长率。

断面收缩率是材料的塑性指标,材料受拉力断裂时断面面积会缩小,断面缩小的面积与材料原面积的比值称作断面收缩率,用符号  $Z$  表示。

$$Z = \left[ 1 - \left( \frac{d_u}{d} \right)^2 \right] \times 100\% \quad (1-4)$$

### (三) 硬度

材料的硬度通常是指材料表面抵抗更硬物体压入其表面时所引起局部塑性变形的能力,是比较各种材料软硬的指标。

常见的硬度指标有布氏硬度(HB)、洛氏硬度(HR)、维氏硬度(HV)和里氏硬度(HL)等。

### 1. 布氏硬度(HB)

布氏硬度试验原理见图 1-3。

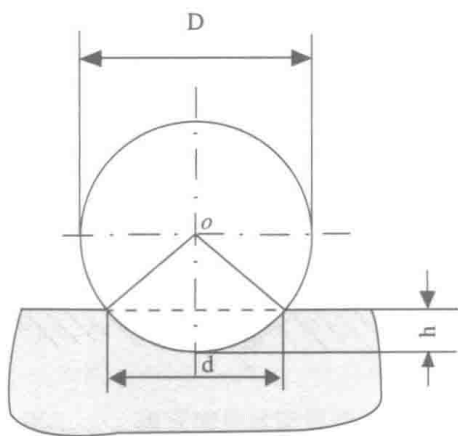


图 1-3 布氏硬度试验原理示意图

$$S = \pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

$$HB = \frac{F}{S} (\text{kgf/mm}^2) \quad (1-4)$$

式中,  $F$ ——钢球压力;

$S$ ——钢球压入表面积。

压头的材质有淬火钢球或硬质合金两种,当压头材质为淬火钢球时,布氏硬度用 HBS 表示,适用于测量布氏硬度  $\leq 450$  的材料;当压头材质为硬质合金时,布氏硬度用 HBW 表示,适用于测量布氏硬度在 450 ~ 650 范围内的材料。

布氏硬度值的表示方法为:硬度值 + 硬度符号 + 球体直径 / + 载荷 / + 载荷保持时间(10 ~ 15 秒不标注)。

例如,180HBS10/1000/30,表示直径 10mm 的钢球在 1000kgf 作用下,保持 30 秒测得的布氏硬度值为 180。

## 2. 洛氏硬度(HR)

洛氏硬度试验原理见图 1-4。

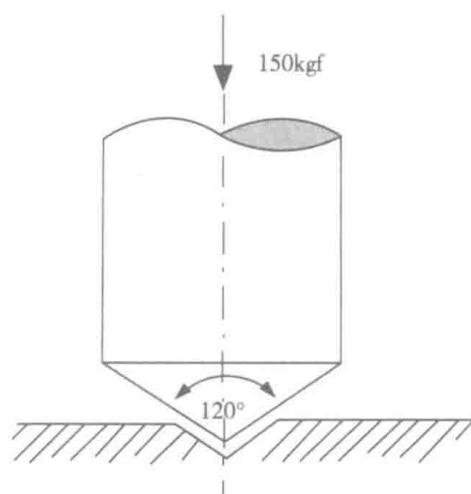


图 1-4 洛氏硬度试验原理示意图

用一定载荷将压头压入材料表面,根据压痕深度表示硬度值。根据压头和载荷的不同,洛氏硬度分 HRA,HRB 和 HRC,试验规范见表 1-1。

表 1-1 洛氏硬度试验规范

符号	压头类型	总载荷(kgf)	适用范围
HRC	120°金刚石圆锥	150	一般淬火钢等硬度较大材料
HRB	Φ1.588mm 钢球	100	退火钢和有色金属等软材料
HRA	120°金刚石圆锥	60	硬而薄的硬质合金或表面淬火钢

## 3. 维氏硬度(HV)

维氏硬度试验原理见图 1-5。



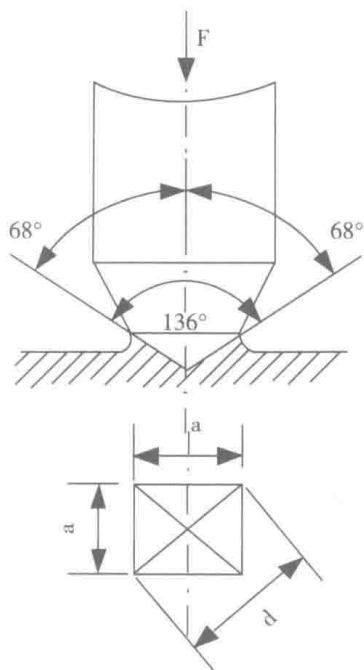


图 1-5 维氏硬度试验原理示意图

维氏硬度是用一定的载荷将锥面夹角为  $136^\circ$  的正四棱锥金刚石压头压入试样表面,保持一定时间后卸除载荷,试样表面就留下压痕,测量压痕对角线的长度,计算压痕表面积,载荷  $F$  除以压痕面积  $S$  所得值即为维氏硬度。维氏硬度用符号 HV 表示,计算公式如下:

$$HV = \frac{F}{S} = 1.8544 \frac{F}{d^2} (\text{kgf/mm}^2) \quad (1-5)$$

维氏硬度也可按对角线的  $d$  值作表查出, $d$  值为两对角线的算术平均值。维氏硬度的结果表示方法为:

硬度值 + HV + 试验载荷 / + 载荷保持时间 (10 ~ 15 秒不标注)。

例如,640HV30/20 表示在试验力 30kgf 作用下保持载荷 20 秒测定的维氏硬度值为 640。

#### 4. 里氏硬度(HL)

里氏硬度用规定质量的冲击体在弹力作用下以一定的速度冲击试样表面,用冲头在距试样表面 1mm 处的回弹速度与冲击速度的比值计算硬度值。计算公式如下: