

现代电力工程师 技术手册

李桂中 等编著
罗宏格 等 审

天津大学出版社

现代电力工程师技术手册

李桂中	肖久生	游国权	
叶涟远	李 明	苏玉红	编著
苏培英	冯家庆	周桂平	
罗宏格		马远騄	主审
李健宗	郑希兰	卢延岳	审核

天 津 大 学 出 版 社

内 容 提 要

本书从新知识、新概念、新技术、新方法、新经验等方面系统介绍了现代电力设备设计、安装与运行技术。主要内容有金属材料的物理化学特性,环境保护措施,系统工程方法,优化设计,短路电流计算,配电装置的设计与安装,电气安全技术,低压、中压、高压大电流开关设备,直流输电,地下输配电工程,电子计算机的应用及其辅助设计等。书中提供的计算公式和图表数据新颖、实用,并符合国家标准。

本书可作为各工业部门电力工程师的实用手册,也可供大专院校有关专业教师、学生参考。

(津)新登字 012 号

特约编辑:郑希兰

现代电力工程师技术手册

李桂中等 编著

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

邮编:300072

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:37¹/₄ 字数:920千

1994年12月第一版 1994年12月第一次印刷

印数:1—6000

ISBN 7-5618-0676-0

TM·22

定价:39.00元

前 言

人类社会已进入信息时代,高科技的发展给现代生活带来了根本性的变革。在这场变革中,电力工业也发生着日新月异的变化,因而新概念、新知识、新技术层出不穷。于是,更新知识与学习和掌握现代电力工业高新技术的任务摆到了我们电力工作者的面前。

从培育合格的、具有现代技术的人材这一角度出发,为使电力工作者全面、系统地掌握新知识、新概念、新技术、新方法和新经验,广西电机工程学会和广西电力工业勘察设计院组织科技人员,参考了国内外大量资料,以实用为目的,精心编写了本书,奉献给读者。

本书由李桂中、肖久生两高级工程师任主编。参加审核的有:广西电力工业局局长、高级工程师罗宏格,广西电力工业局副局长、高级工程师马远騄,广西电力工业勘察设计院副院长、高级工程师李健宗,天津大学电力及自动化系发电教研室副教授郑希兰,以及广西电机工程学会副理事长、高级工程师卢延岳。

本书第1章,第2章2—1节、2—2节、2—5节、2—6节,第7章,第12章,第14章14—3至14—6节及附录由李桂中同志编写;第3章、第4章和第13章由肖久生同志编写;第5章和第9章由游国权同志编写;第6章和第15章15—3节由李明同志编写;第8章由叶连远同志编写;第10章由苏玉红同志编写;第11章由苏培英同志编写;第2章2—3节、2—4节,第14章14—1节、14—2节由冯家庆同志编写;第15章15—1节、15—2节由周桂平同志编写。此外,本书的全部插图由王桂林和欧阳定芳两同志绘制。

在编撰本书过程中,广西电力工业局领导、广西电机工程学会领导与广西电力工业勘察设计院领导给予了大力支持,在此表示衷心的感谢。对李月华同志在摘录、抄写与整理有关文献资料和文稿以及程丽安同志在校译有关英文文献资料等方面所给予的热情帮助深表谢意。另外,对广西电力工业勘察设计院电子计算机计算站站长张昭晨高级工程师对本书第13章和第15章的内容所提的宝贵意见表示感谢。

在编撰本书时,参考或引用国内外的一些书籍、刊物、文献与资料,在此也一并向有关单位或作者致谢。

由于水平所限,经验不足,以及时间仓促,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1994.5

目 录

第一章 基本技术特性	(1)
1-1 金属材料的物理、化学特性及其技术参数	(1)
1-2 材料强度	(8)
1-3 固体的几何形状与面积和体积的计算	(13)
1-4 常用的电工技术公式和图表	(17)
1-5 感性耦合与阻性耦合	(26)
1-6 电压降、功率损失与导体截面的关系	(33)
1-7 电动机与变压器的电流	(34)
1-8 传输系统的衰减常数	(36)
第二章 环境问题与环境保护	(37)
2-1 引言	(37)
2-2 总量控制	(37)
2-3 大气环境标准	(38)
2-4 水环境标准	(63)
2-5 噪声及其污染	(86)
2-6 电磁污染	(108)
第三章 系统法则	(114)
3-1 基本概念	(114)
3-2 系统方法的基本原则	(114)
3-3 系统设计方法	(115)
3-4 系统设计顺序	(117)
3-5 系统的辨识与分析	(118)
3-6 系统模型方法	(120)
3-7 系统评价方法	(122)
第四章 优化设计	(128)
4-1 基本概念	(128)
4-2 基本步骤	(128)
4-3 优化设计基础和方法	(129)
第五章 三相系统短路电流的计算	(135)
5-1 术语与定义	(135)
5-2 额定电压 1kV 以上三相系统短路电流的计算	(137)
5-3 额定电压 1kV 及以下的短路电流计算	(142)
5-4 电气设备阻抗	(144)
第六章 配电装置的设计与安装	(156)
6-1 绝缘尺寸	(156)

6-2	按短路机械强度与热强度选定电气设备	(159)
6-3	按附加荷载与表面电压梯度选择绞线和管形导线	(168)
6-4	额定持续电流的选定	(172)
6-5	最小间距、保护遮栏与通道宽度	(179)
6-6	土木建筑要求	(184)
第七章	电气安全和防护措施	(193)
7-1	基本概念与要求	(193)
7-2	电气设备的特别危险场所	(200)
7-3	保安接零的“相—零回路”	(203)
7-4	保安接零系统中的故障切断	(218)
7-5	接地设计	(223)
7-6	接地设计及其计算	(233)
7-7	转移电压	(243)
7-8	双层土壤中的接地计算	(244)
7-9	等电位接地设计	(249)
7-10	利用架空地线与中性线降低接地电阻	(254)
7-11	防雷保护及其计算	(254)
7-12	共同接地与重复接地	(270)
第八章	低压设备	(274)
8-1	开关装置	(274)
8-2	低压开关装置与配电盘	(287)
第九章	中压设备	(292)
9-1	开关装置	(292)
9-2	配电设备	(297)
9-3	开关装置系统全绝缘母线的连接	(306)
9-4	强电流开关装置	(307)
9-5	强电流分相封闭式母线导管	(311)
第十章	高压设备	(317)
10-1	高压开关设备的定义与电气特性	(317)
10-2	隔离开关与接地开关	(320)
10-3	断路器	(324)
10-4	开关装置上的仪用互感器	(332)
10-5	避雷器	(337)
第十一章	变压器与其它电气设备	(341)
11-1	变压器	(341)
11-2	限流电抗器	(348)
11-3	电容器	(350)
11-4	电阻器	(355)
第十二章	高压开关、配电装置及直流输电	(357)
12-1	一般问题	(357)

12-2	SF ₆ 气体绝缘开关装置(GIS)	(361)
12-3	常规户内高压配电装置	(370)
12-4	常规户外高压配电装置	(376)
12-5	户外变电站布置	(385)
12-6	变电站布置形式	(389)
12-7	高压与超高压直流输电设备	(390)
12-8	换流站的主要设备与布置	(400)
12-9	电气设备布置与环境	(404)
12-10	硬母线的选择与计算	(413)
12-11	软母线的选择与计算	(433)
第十三章	监控、保护与电子计算机在电力系统中的应用	(443)
13-1	概述	(443)
13-2	计算机在电力系统监控中的应用	(474)
13-3	计算机在发电厂监控中的应用	(477)
13-4	微机集中控制装置	(482)
第十四章	地下输配电工程	(485)
14-1	一般问题	(485)
14-2	绝缘	(492)
14-3	热特性与额定电流	(506)
14-4	直流输电电缆	(524)
14-5	压缩气体绝缘电缆	(532)
14-6	超导电缆	(540)
第十五章	电子计算机及其辅助设计	(551)
15-1	概述	(551)
15-2	微处理机与微计算机	(558)
15-3	计算机辅助设计(CAD)入门	(562)
附录		(568)
附录 1:	常用法定计量单位	(568)
附表 1	常用法定计量单位名称与符号表	(568)
附表 2	十进制倍数的词头与符号	(571)
附表 3	常用单位及其换算	(572)
附录 2:	世界一些主要国家或地区货币名称与符号	(574)
	主要参考文献	(578)

第一章 基本技术特性

1-1 金属材料的物理、化学特性及其技术参数

1-1-1 电位序

在现代电工或电子技术中,如何正确、恰当地选用金属材料,必须建立电位序这一新概念。

在金属材料中,只要稍有导电性能的不同金属材料连接在一起,并被诸如像水、酸等液体弄潮或弄湿,便会形成“电解电池”,产生腐蚀。实践表明,腐蚀量与电位差有关。电位差越大,腐蚀量越大。在实际中,如不能避免导体的这种连接,就必须采用防腐保护措施。

在户外电器或电气设备上,铝或铜连接器,铝或铜制垫圈、垫片等,仅用于连接铝或铜制的导电体。在干燥、清洁的户内电器或电气设备上,铝与铜两金属可不加专门保护酌情连接。不过,应注意,两种不同金属的接触面必须平滑干净,接触紧密,接触电阻要小,不能有电火花出现。

表 1-1 电位序(与氢相比的额定电位,V)

1 锂(Li) 约-3.02	10 锌(Zn) 约-0.77	19 氢(H) 约0.0
2 钾(K) 约-2.95	11 铬(Cr) 约-0.56	20 铋(Sb) 约+0.20
3 铷(Rb) 约-2.80	12 铁(Fe) 约-0.43	21 铟(In) 约+0.20
4 钠(Na) 约-2.72	13 镉(Cd) 约-0.42	22 砷(As) 约+0.30
5 锶(Sr) 约-2.70	14 铊(Tl) 约-0.34	23 铜(Cu) 约+0.35
6 钙(Ca) 约-2.50	15 钴(Co) 约-0.26	24 银(Ag) 约+0.80
7 镁(Mg) 约-1.80	16 镍(Ni) 约-0.20	25 汞(Hg) 约+0.86
8 铝(Al) 约-1.45	17 锡(Sn) 约-0.146	26 铂(Pt) 约+0.87
9 锰(Mn) 约-1.10	18 铅(Pb) 约-0.122	27 金(Au) 约+1.50

在表 1-1 列入的金属中,任何两种金属接触在一起,都将产生腐蚀。于是,比较容易起化学作用的金属变成阳极;而更容易起化学作用的金属则成为阴极。通常,金属氧化物总是有不太强的阴电性,因此,在这些金属表面也能产生电解电位差。尽管铸铁与钢的表面是清洁的,并且生锈较少的情况下,只有很小的电位差(表 1-2),但在适当的情况下,这种甚小的电位差仍能产生明显的直流电流,从而起腐蚀作用。

表 1-2 钢、铸铁的标准电位差(与氢相比的额定电位差,V)

钢	清洁表面	约-0.40	铸铁	生锈	约-0.30
铸铁	清洁表面	约-0.38	钢	生锈	约-0.25

应当指出,只有对金属材料建立电位序的概念后,才能在定性与定量的分析中进一步推断不同金属材料连接时产生的腐蚀作用。腐蚀的程度因电位差的大小而异。

1-1-2 法拉第定律

欲分析研究金属材料在电解过程中的腐蚀问题,必须熟悉下述法拉第定律:

(1)在任一电极上,物质沉积或转换的质量 m 与电量 $Q=I \cdot t$ 成正比,即

$$m \propto I \cdot t \quad (1-1)$$

②从不同电解质转换的物质质量 m 乘以相等的电量 Q , 则相当于它们的电化当量质量 Me 。该电化当量质量 Me 为克分子质量 M 除以电化阶 n 。 M 与 Me 的量可以 g/mol 表示。于是

$$m = \frac{Me}{F} I \cdot t \quad (1-2)$$

如果在电解时电流 I 不是常量, 则 $I \cdot t$ 必须用积分式 $\int_{t_1}^{t_2} I dt$ 表示。

每克分子电量必需沉积或变换 $1 g/mol$ 物质(在阳极按氧化, 而在阴极按还原)的电化当量质量在量的方面等于法拉第的常数($F=96480 A \cdot s/mol$)。

显然, 在金属材料电解过程中, 法拉第定律有助于对腐蚀程度进行定量分析。

表 1-3 中列出一些元素的电化当量参量。

表 1-3 一些元素电化当量参量

电化当量阶	n	电化当量质量(g/mol)	理论上的沉积物量(g/A · h)	接近最佳电流效率(%)
铝	3	8.9935	0.33558	85~98
镉	2	56.20	2.0970	95
氢氧化钾	1	56.10937	2.0036	95
氢氧化钠	1	30.09717	1.49243	95
氟	1	35.453	1.32287	95
铬	3	17.332	0.64672	—
铬	6	8.666	0.32336	10~18
铜	1	63.54	2.37090	65~98
铜	2	31.77	1.18545	97~100
金	3	65.6376	2.44884	—
氢	1	1.00797	0.037610	100
铁	2	27.9235	1.04190	95~100
铁	3	18.6156	0.69461	—
铅	2	103.595	3.80543	95~100
镁	2	12.156	0.45358	—
镍	2	29.355	1.09534	95~98
镍	3	19.57	0.73022	—
氧	2	7.9997	0.29850	100
银	1	107.870	4.02500	98~100
锡	2	59.345	2.21437	70~95
锡	4	29.6725	1.10718	70~95
锌	2	32.685	1.21959	85~93

分析上式可知, 在电解过程中, 金属材料每年的腐蚀程度不仅取决于元素电位序不同而产生的电位差, 而且也取决于电解时流过金属材料的电流。

1-1-3 热电序

如果将两种不同的金属导线或半导体导线的两端相互连接起来, 并使两接头经受不同的温度, 导线回路内便有热电流流动。这种物理现象通称塞贝克(Seebeck)效应(即热电偶)。相反, 如果电流流经导线回路过程中, 在两接头之间产生温度差, 这种物理现象通称珀尔帖(Peltier)效应。

上述的两种物理现象是两种不同的物理概念, 不能混淆。通常, 金属材料热电序的电位是有差异的, 见表 1-4 所列。

表 1—4 热电序电位与一般热电偶

金属材料	电位(mV)	金属材料	电位(mV)
铋平行的晶轴	-7.7	铋	0.65
铋垂直的晶轴	-5.2	银	0.67~0.79
康铜	-3.37~-3.4	铜	0.72~0.77
钴	-1.99~-1.52	钢	0.77
镍	-1.94~-1.2	锌	0.6~0.79
汞	-0.07~+0.04	锰铜	0.57~0.82
铂	+0	铱	0.65~0.68
石墨	0.22	金	0.56~0.8
碳	0.25~0.36	镱	0.85~0.92
钽	0.34~0.51	钼	1.16~1.31
锡	0.4~0.44	铁	1.87~1.89
铅	0.41~0.46	铬镍	2.2
镁	0.4~0.43	铈	4.7~4.86
铝	0.37~0.41	硅	44.8
钨	0.65~0.9	碲	50
一般热电偶		一般热电偶	
铜/康铜		镍铬/镍	
(Cu/const)	达到 500°C	(NiCr/Ni)	达到 1000°C
铁/康铜		铂铑/铂	
(Fe/const)	达到 700°C	(PtRh/Pt)	达到 1600°C
镍铬/康铜		铂铈	
(NiCr/const)	达到 800°C	(PtRh)	达到 1800°C

1—1—4 pH 值

这里 pH 值是指含水溶剂酸性的量度,它等于以 10 为底的氢离子浓度 $C_{H^{+}}$ 对数的负值,即

$$pH = -\lg C_{H^{+}} \quad (1-3)$$

在上式中, $C_{H^{+}}$ 以 mol/L 计。图 1—1 示出一些溶剂的 pH 值。

1—1—5 传热

通常,物体的含热量

$$Q = V \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta t \quad (1-4)$$

式中 V ——容积;

ρ ——密度;

c ——比热容;

Δt ——温度差。

热流量等于单位时间的热含量,即

$$\phi = Q/t \quad (1-5)$$

所以,热流量以瓦为单位,即 $1W = 1J/s$ 。物体的比热容是 1kg 物体升高 1K 时所需的热量。必须说明,平均比热与温度变化范围有关(见 1—1—6 节)。

所谓热导率,是指两表面温度相差 1K 时,单位时间流过 $1m^2$ 面积与 1m 厚壁体的热流量。在许多金属材料中,热导率随着温度升高而增加;而在磁性材料中(如铁、镍),降到居里(Cuie)点后,热导率才上升。居里点为二阶铁磁性材料变成非磁性的温度,例如,对铝镍磁钢,

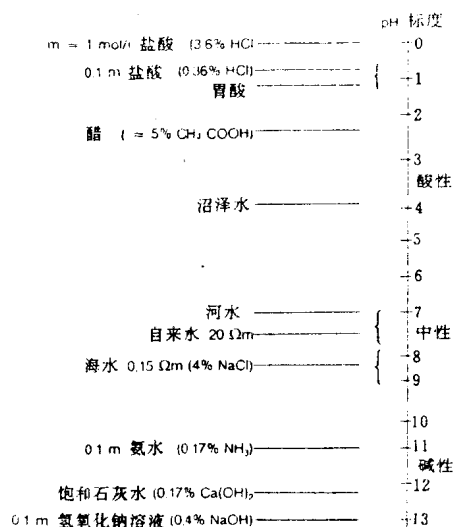


图 1-1 一些溶剂的 pH 值

居里点约为 800°C。在固体中,热导率一般不会变化很大(纯材料中)。但在液体与气体中,由于经常受到温度的影响,热导率变化很大。

一般说来,热总是由高温物体传至低温物体,并取决于下列因素:

- 1) 传导:在固态、液态与气态的物质中,靠粒子碰撞传输热量。
- 2) 对流:热、冷液体或气体粒子的热流通。
- 3) 辐射:液态、固态和气态物质通过电磁波传输热量。

热量的传输通常会同时出现三种形式。

第一种形式是通过物体壁传导,热流量

$$\phi = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot \Delta t \quad (1-6)$$

第二种形式是,通过固体壁与介质之间的对流传导,热流量

$$\phi = \alpha \cdot A \cdot \Delta t \quad (1-7)$$

第三种形式是通过固体壁在两恒温流动的介质间传导,热流量

$$\phi = k \cdot A \cdot \Delta t \quad (1-8)$$

在以上诸式中 λ ——热导率;

α ——传热系数;

k ——热导系数;

δ ——物体壁厚;

A ——传导面积;

Δt ——温度差。

通常,在平滑多层壁面与热流垂直的情况下,热导系数 k 可根据下式求得:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} \sum \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (1-9)$$

其中, α_1, α_2 是由 n 层厚度 δ_n 与 n 层热导率 λ_n 构成每边的热传导系数。

在热辐射时, 两个同样尺寸的无镀层表面通过辐射进行交换热流时, 热流量

$$\phi_{12} = \sigma \cdot A \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \tag{1-10}$$

在半透明辐射表面具有 ϵ_1 与 ϵ_2 热辐射系数的情况下, 热流量

$$\phi_{12} = C_{12} \cdot A \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \tag{1-11}$$

上两式中 $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$;

A — 辐射面积;

T — 绝对温度;

C_{12} — 有效辐射传输系数。

C_{12} 一般由几何尺寸与表面的热辐射系数 ϵ 确定, 其特例为:

当 $A_1 \ll A_2$ 时, $C_{12} = \sigma \cdot \epsilon_1$; (1-12)

当 $A_1 \approx A_2$ 时, $C_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$; (1-13)

当 A_2 计入 A_1 时, $C_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_1} - \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}$ (1-14)

为便于分析物体的传热特性, 表 1-5 与表 1-6 中列出热辐射系数 ϵ 和热传导系数 α 。

表 1-5 热辐射系数 ϵ

无镀层物体	1	纸	0.85
铝(光泽)	0.04	油	0.82
铝(氧化)	0.5	瓷(光滑)	0.92
铜(光泽)	0.05	冰	0.96
铜(氧化)	0.6	木(山毛榉)	0.92
黄铜(光泽)	0.05	屋顶毡(油毛毡)	0.93
黄铜(无光泽)	0.22	油漆	0.8~0.95
钢(无光泽, 氧化)	0.8	红丹氧化物	0.9
钢(磨光)	0.06	煤灰	0.94

表 1-6 热传导系数 α

自然气流在闭合空间运动壁表面	10
地板, 天花板: 上部方向	7
下部方向	5
促成循环气流	
表示气流速度 $V=2\text{m/s}$	20
表示气流速度 $V=5\text{m/s}$	$6.4 \cdot V^{0.75}$

1-1-6 固体、液体、气体的技术参数

在现代电工技术中, 熟悉与掌握常见的固体、液体与气体的技术参数是必需的。表 1-7、表 1-8 与表 1-9 中列出一些固体、液体与气体的技术参数, 供参考。

表 1-7 固体材料技术参数

材 料	密度 ρ kg/dm ³	熔点或凝 固点 °C	沸点 °C	线性热膨 胀 α mm/K $\times$ 10^{-6}	在 20°C 时 热导率 λ W/(m · K)	在 0~100°C 时平均 比热容 c J/(kg · K)	在 20°C 时 电阻率 ρ $\Omega \cdot m$	在 20°C 时 电阻温度 系数 α 1/K
铝	2.70	658	2270	23.8	220	920	0.02874	0.0042
铝合金	2.70	≈645		23	190	920	0.0407	0.0036
铅	11.34	327	1730	28	34	130	0.21	0.0043
青铜	8.6~9	≈900		≈17.5	42	360	≈0.027	0.004
镉	8.64	321	767	31.6	92	243	0.762	0.0042
铬	6.92	1800	2400	8.5		452	0.028	
纯铁	7.88	1500	2500	12.3	71	464	0.10	0.0058
钢铁	≈7.8	≈1350		≈11.5	46	485	0.25~0.10	≈0.005
铸铁	≈7.25	≈1200		≈11	46	540	0.6~1.0	0.0045
金	19.29	1063	2700	14.2	309	130	0.022	0.0038
康铜	8~8.9	1600		16.8	22	410	0.48~0.50	≈0.00005
碳金刚石	3.51	≈3600	4200	1.3		502		
碳石墨	2.25			7.86	5	711		
铜	8.92	1083	2330	16.5	385	393	0.01786	0.00392
铜	8.92	1083	2330	16.5	385	393	0.01754	0.00392
镁	1.74	650	1110	25.0	167	1034	0.0455	0.004
黄铜	8.5	912		17	110	397	≈0.0555	0.0024
镍	8.9	1455	3000	13	83	452	≈0.12	0.0046
铂	21.45	1773	3800	8.99	71	134	≈0.11	0.0039
汞	13.546	38.3	357	61	8.3	139	0.698	0.0008
硫(斜方晶体的)	2.07	113	445	90	0.2	720		
硒(含金属的)	4.26	220	688	66		351		
银	10.50	960	1950	19.5	421	233	0.0165	0.0036
钨	19.3	3380	6000	4.50	167	134	0.06	0.0046
锌	7.23	419	907	16.50	121	387	0.0645	0.0037
锡	7.28	232	2300	26.7	67	230	0.119	0.004

注:表栏中线性热膨胀在 0°C 与 100°C 内之间。

表 1-8 液体材料技术参数

材 料	化学分子式	密度 ρ kg/m ³	熔点或 凝固点 °C	在 760 毫米 水银柱压强 时沸点 °C	在 18°C 时 膨胀系数 $\times 10^{-3}$	在 20°C 时 热导率 λ W/(m · K)	在 0°C 时 比热容 c_p J/(kg · K)	在 180°C 时 相应介电 常数 ϵ_r
丙酮	C ₃ H ₆ O	0.791	-95	56.3	1.43		2160	21.5
乙醇	C ₂ H ₆ O	0.789	-114	78.0	1.10	0.2	2554	25.8

材 料	化学分子式	密度 ρ kg/m ³	熔点或 凝固点 °C	在 760 毫米 水银柱压强 时沸点 °C	在 18°C 时 膨胀系数 $\times 10^{-4}$	在 20°C 时 热导率 λ W/(m·K)	在 0°C 时 比热容 c_p J/(kg·K)	在 180°C 时 相应介电 常数 ϵ_r
乙醚	C ₄ H ₁₀ O	0.713	-124	35.0	1.62	0.14	2328	4.3
氨	NH ₃	0.771	-77.8	-33.5		0.022	4187	14.9
苯胺	C ₆ H ₇ N	1.022	-6.2	184.4	0.84		2064	7.0
苯	C ₆ H ₆	0.879	+5.5	80.1	1.16	0.14	1758	2.24
醋	C ₂ H ₄ O ₂	1.049	+16.65	117.8	1.07		2030	6.29
甘油	C ₃ H ₈ O ₃	1.26	-20	290	0.50	0.29	2428	56.2
亚麻油		0.94	-20	316		0.15		2.2
甲醇	CH ₃ O	0.793	-97.1	64.7	1.19	0.21	2595	31.2
石油		0.80			0.99	0.16	2093	2.1
蓖麻油		0.97			0.69		1926	4.6
硫酸	H ₂ SO ₄	1.834	-10.5	338	0.57	0.46	1385	>84
松节油	C ₁₀ H ₁₆	0.855	-10	161	0.97	0.1	1800	2.3
水(4°C)	H ₂ O	1.00	0	106	0.18	0.58	4187	88

表 1-9 气体材料技术参数

材 料	化学分子式	密度 ρ kg/m ³	熔点 °C	沸点 °C	热导率 λ $\times 10^{-2}$ W/(m·K)	在 0°C 时 比热容 c_p J/(kg·K)	相应的 介电常数 ϵ_r
氨	NH ₃	0.771	-77.7	-33.4	2.17	2060	1.0072
乙烯	C ₂ H ₄	1.260	-169.4	-103.5	1.67	1611	1.001456
氩	Ar	1.784	-189.3	-185.9	1.75	523	1.00056
乙炔	C ₂ H ₂	1.717	-81	-83.6	1.84	1511	
丁烷	C ₄ H ₁₀	2.703	-135	-0.5	0.15		
氯	Cl ₂	3.220	-109	-35.0	0.08	502	1.97
氦	He	0.178	-272	-268.9	1.51	5233	1.000074
一氧化碳	CO	1.250	-205	-191.5	0.22	1042	1.0007
二氧化碳	CO ₂	1.977	-56	-78.5	1.42	819	1.00095
氪	Kr	3.743	-157.2	-153.2	0.88		
空气	CO ₂ -frei	1.293		-194.0	2.41	1004	1.000576
甲烷	CH ₄	0.717	-182.5	-161.7	3.3	2160	1.000953
氖	Ne	0.8999	-248.6	-246.1	4.6		
臭氧	O ₃	0.22	-252	-112			
丙烷	C ₃ H ₈	2.019	-189.9	-42.6			
氧	O ₂	1.429	-218.83	-192.97	2.46	1038	1.000547
六氟化硫	SF ₆	6.07	-50.8	-63	1.28	670	1.0021
氮	N ₂	1.250	-210	-195.81	2.38	1042	1.000606
氢	H ₂	0.0898	-259.2	-252.78	17.54	14235	1.000264

注：相应的介电常数系在 0°C 与 $1013 \times 10^5 \text{Pa}$ 时；

SF_6 的密度、热导率与介电常数系在 20°C 与 $1013 \times 10^5 \text{Pa}$ 时；

SF_6 的熔点系在 $2.26 \times 10^5 \text{Pa}$ 时。

1-2 材料强度

1-2-1 基本原则与说明

由材料力学得知，当外力 F 作用于结构元件时，通常能产生拉伸应力 σ_t 、压缩应力 σ_c 、弯曲应力 σ_b 、剪切应力 τ_s 或扭转应力 τ_t 。如果有若干应力同时施加于构件上，就形成合力。因此这个构件必须按照组合强度进行设计。在此情况下，必须遵照下述规定：

- ① 正交应力 σ_t 、 σ_c 、 σ_b ，切向应力 τ_s 、 τ_t （即剪切应力与扭转应力）是算术相加；
- ② 正交应力 σ_b 与切向应力 τ_s 以及正交应力 σ_b 与切向应力 τ_t 是几何相加。

图 1-2(a) 是具有明显屈服点的拉伸试验应力应变曲线，其材料采用结构钢；而图(b) 同样具有明显屈服点的拉伸试验应力应变曲线，但材料是铜或铝。图中 ϵ 表示伸长； σ 为拉伸应力； σ_s 为屈服强度； $R_{p0.2}$ 为在残余伸长时的应力，小于 0.2% ； σ_B 为抗拉强度。

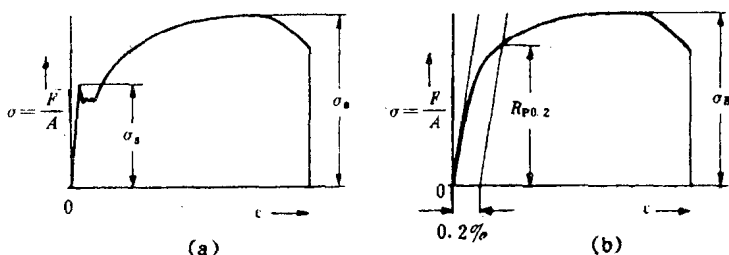


图 1-2 应力应变曲线

伸长率 $\epsilon = \Delta l / l_0$ 是通过施加外力 F （拉伸应力 σ_t ）形成的。 $\Delta l = l - l_0$ ， l_0 为钢材试样的测量长度； l 为拉伸后的长度。当应力在屈服点应力 σ_s 以下时，伸长率与 σ 成正比增长（即虎克定律）。该比值为

$$\frac{\text{应力}}{\text{伸长}} = \frac{\sigma_E}{\epsilon} = \frac{\epsilon_E}{\epsilon} = E$$

E 称为弹性模量。

国外一些文献资料中， E 按照试样实测长度为 0.01% 残余伸长时的应力 $\sigma_{0.01}$ 确定。如果该应力超过屈服点上的应力 σ_s ，钢材就要因疲劳而永久伸长。尽管钢筋（或圆钢）应力减低之前未遭到破坏， σ_B 仍是极限应力或破坏应力。通常，极限应力与试验钢筋在断裂应力 σ 时的伸长有关。一般说来，材料没有明显的比例极限或弹性极限，例如钢或铝，比例极限和弹性极限均按所谓 $R_{p0.2}$ 极限确定，也就是该极限在外力取消之后永久伸长为 0.2% 时的应力。

基于安全的原因，材料中的最大允许应力 $\sigma_{\max}$ 或 $\tau_{\max}$ 必须低于弹性极限，使其没有永久变形（如伸长或挠曲）。当材料经常被无限施加的最大颤动应力约为平均应力时，即使该应力不会使材料过度变形，也会近于疲劳（即应力达到疲劳极限）。应注意，这一点是材料经常无限地承受微振或颤动而遭受破坏的根本原因。

当应力在同样幅度的正、负值之间变化时，或是应力在零与所确定的最大值之间变化时，均能出现周期应力。不过，周期应力仅在压缩或拉伸的周期荷载时才能出现。

通常，金属材料的疲劳强度（如弯曲疲劳强度、拉伸或压缩疲劳强度及扭转疲劳强度）均取决于负载方式。有些结构元件耐受数量有限的负载变换时，可能经受相当高的负载。由这些负载所产生的应力能引起疲劳极限。所以，从分析金属材料强度的大小出发，应建立疲劳极限的概念。

一般说来,在温度升高时,当材料被施加稳态负载且应力均匀时,则会出现人们所说的蠕变。

总之,强度是分析研究金属材料性能及其强度的基本物理概念。

1-2-2 拉伸与压缩强度

根据材料力学理论,如果外力 F 作用线与如图 1-3 所示的钢筋截面 A 的重心轴线一致时,那么正交应力将均匀分布在整個截面上,并与 $\sigma = \frac{F}{A}$ 起正交作用。

由此可见,在已定的金属材料与给定的负载下,根据最大允许应力 $\sigma_{\max}$ 即可得出所要求的截面或最大允许外力,即

$$A = \frac{F}{\sigma_{\max}} \text{ 或 } F = \sigma_{\max} \cdot A \quad (1-17)$$

1-2-3 弯曲强度

金属材料受力时,还有一种是被弯曲的受力类型。无论是外力的最大弯曲作用,还是外力的最大弯曲力矩 M ,皆发生在简支悬臂情况下的固定点 a (图 1-4(a)) 或在两端支撑梁上中心载荷情况下的点 c (图 1-4(b))。

前者(即 a 点)的弯曲力矩 $M = F \cdot l$; 后者(即 c 点)的弯曲力矩 $M = \frac{1}{4} \cdot F \cdot l$ 。

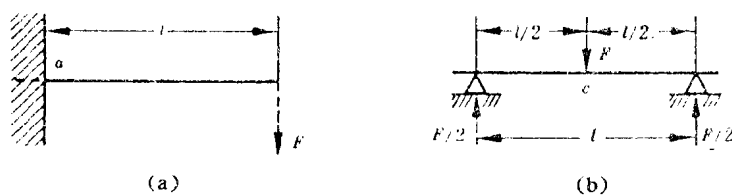


图 1-4 弯曲作用与弯曲力矩示意图

通常,假定在梁上的 a 点与 c 点梁的截面不变,这时距中性轴最远处的弯曲应力 σ 可能很大。由于 M 可能很大,从而有很大的 $\sigma_{\max}$,所以梁的截面要承受很大的抵抗。因此,最大可能的弯曲力矩

$$M = W \cdot \sigma_{\max} \quad (1-16)$$

所要求的抵抗力矩

$$W = M / \sigma_{\max} \quad (1-17)$$

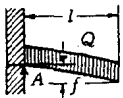
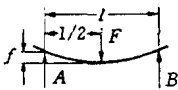
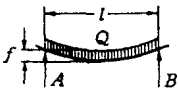
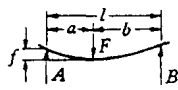
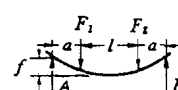
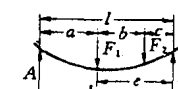
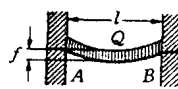
1-2-4 梁的负载

梁一般都有代表性的受力形式。为了说明问题,现将几种常见的和典型的梁的弯曲负载状态列于表 1-10。表中 A 与 B 受力点为危险断面; F 为集中荷载; Q 为均匀荷载。

表 1-10 梁的弯曲负载计算表

编 号	计算情况	压力弯曲力矩	最大允许负载时 要求抵抗力矩	挠 度
1		$A \quad -F$ $M_{\max} = Fl$	$W = \frac{Fl}{\sigma_{\max}}$ $F = \frac{\sigma_{\max} W}{l}$	$\Delta f = \frac{Fl^3}{3EI}$

续表

编 号	计算情况	压力弯曲力矩	最大允许负载时 要求抵抗力矩	挠 度
2		$A = Q$ $M_{\max} = \frac{Ql}{2}$	$W = \frac{Ql}{2\sigma_{\max}}$ $Q = \frac{2\sigma_{\max}W}{l}$	$f = \frac{Ql^3}{8EJ}$
3		$A = B = \frac{F}{2}$ $M_{\max} = \frac{Fl}{4}$	$W = \frac{Fl}{4\sigma_{\max}}$ $F = \frac{4\sigma_{\max}W}{l}$	$f = \frac{Fl^3}{48EJ}$
4		$A = B = \frac{Q}{2}$ $M_{\max} = \frac{Ql}{8}$	$W = \frac{Ql}{8\sigma_{\max}}$ $Q = \frac{8\sigma_{\max}W}{l}$	$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{Ql^3}{EJ}$
5		$A = \frac{Fb}{l}$ $B = \frac{Fa}{l}$ $M_{\max} = Aa = Bb$	$W = \frac{Fab}{l\sigma_{\max}}$ $F = \frac{\sigma_{\max}Wl}{ab}$	$f = \frac{Fa^2b^2}{3EJl}$
6		在 $F_1 = F_2 = F$ $A = B = F$ $M_{\max} = Fa$	$W = \frac{Fa}{\sigma_{\max}}$ $F = \frac{\sigma_{\max}W}{a}$	$f = \frac{Fa}{24EJ}$ $3(l+2a)^2 - 4a^2$
7		$A = \frac{F_1e + F_2c}{l}$ $B = \frac{F_1a + F_2d}{l}$	$W_1 = \frac{Aa}{\sigma_{\max}}$ $W_2 = \frac{Bc}{\sigma_{\max}}$ 按 其中 最大 W 确定梁	$f = \frac{F_1a^2e^2 + F_2l^2d^2}{3EJl}$
8		$A = B = \frac{Q}{2}$ $M_{\max} = \frac{Ql}{12}$	$W = \frac{Ql}{12\sigma_{\max}}$ $Q = \frac{12\sigma_{\max}W}{l}$	$f = \frac{Q}{EJ} \cdot \frac{l^3}{384}$

1—2—5 抗弯强度

在材料力学中,反映梁的另一强度是抗弯强度。显然,当梁承受压缩荷载时,易弯曲。因此,对梁不仅必须检验抗压强度,而且也须计算抗弯强度。通常,应用欧拉公式计算梁的抗弯强度。