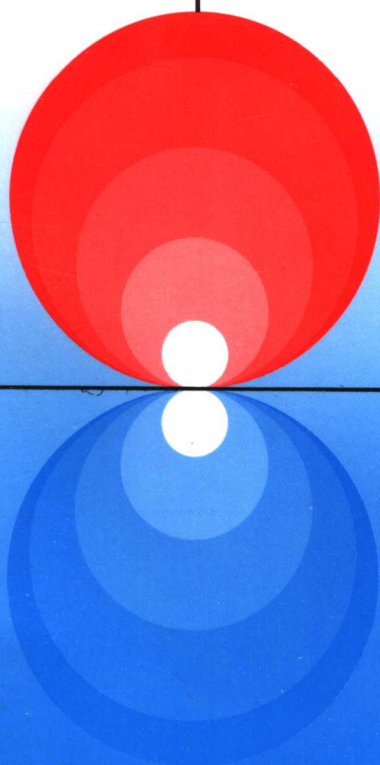


水利行业工人技术考核培训教材

SHUIGONG
FANGFU
GONG

水工防腐工

主编 牧春山



黄河水利出版社

水工防腐工

主 编 牧春山

黄河水利出版社

(豫)新登字 010 号

水工防腐工 牧春山主编

责任编辑:王路平

出版:黄河水利出版社

(地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 12 层)

邮编:450003

印刷:黄河水利委员会印刷厂

发行:黄河水利出版社

开本:850mm×1168mm 1/32

版别:1997 年 8 月 第 2 版

印次:1997 年 8 月郑州第 2 次印刷

印张:9.875

印数:660—1500

字数:247 千字

ISBN 7-80621-068-7/TV·51

定价:18.60 元

前 言

为了建立和完善水利行业工人考核培训体系,弥补新中国成立以来全国水利行业没有完整的、系统的工人培训教材的空白,我们组织水利行业一百多位专家学者编写了这套“水利行业工人考核培训教材”。本教材是依据劳动部、水利部联合颁发的《中华人民共和国工人技术等级标准(水利)》规定的 32 个行业工种要求编写的,编写的内容与技术考核规范和试题库相结合,并在每一章后设有思考题,能够满足水利行业技术工人考核前培训和职业技能鉴定的需要。

教材分为通用教材和专业教材两大类。通用教材共 8 本,分别为:《水利工程施工基础知识》、《工程力学与建筑结构基础知识》、《地质与土力学基础知识》、《水工建筑物基础知识》、《水力学与水文测验基础知识》、《水利工程制图基础知识》、《机械基础知识》、《电工基础知识》,其内容主要侧重于为 30 本专业教材配套使用的基础理论知识;专业教材共 30 本,分别为:《开挖钻工》、《水工爆破工》、《锻钎工》、《坝工模板工》、《坝工钢筋工》、《坝工混凝土工》、《钻探灌浆工》、《喷护工》、《防渗墙工》、《砌筑工》、《坝工土料实验工》、《坝工混凝土实验工》、《水工泥沙实验工》、《水工结构实验工》、《混凝土维修工》、《土石维修工》、《闸门运行工》、《水工防腐工》、《水工监测工》、《河道修防工与防治工》、《渠道维护工》、《灌区供水工》、《灌溉试验工》、《泵站机电设备维修工与泵站运行工》、《灌排工程工》、《水文勘测工》、《水文勘测船工》、《水土保持防治

工》、《水土保持测试工》、《水土保持勘测工》，其内容包括各工种的中、高级工的专业知识和技能知识。两类教材均突出了水利行业专业工种的特点，具有专业性、权威性、科学性、整体性、实用性和相对稳定性。它包括了本行业技术工人考核晋升技术等级时试题的范围和内容，是水利行业各工种职业技能鉴定的必备教材。

本次教材编写时参照的技术规范或规定、标准等是以1995年7月底尚在使用的为准，涉及的个别计量单位虽属非法定单位，但考虑到这些计量单位与有关规定、标准的一致性和实际使用的现状，本次出版时暂行保留，在今后修订时再予改正。

编写全国水利行业统一的工人培训教材，对于我们来说尚属首次，曾得到了各级领导、有关专家及广大水利职工的关怀和支持。经过大家一年来的辛勤耕耘和不断探索，现已面世出版了，但由于它是一项新的工作、新的尝试，不足之处在所难免，希望大家在使用中提出宝贵意见，使其日臻完善。

水利行业工人考核培训教材
编审委员会

一九九五年七月

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 金属腐蚀与防护在国民经济中的意义	(1)
第二节 金属腐蚀与防护的任务	(3)
第三节 金属腐蚀的分类	(4)
第四节 金属腐蚀程度的评定标准	(6)
第二章 金属腐蚀原理	(9)
第一节 金属的化学腐蚀理论	(9)
第二节 金属的电化学腐蚀理论	(24)
第三章 水工金属结构在各种条件下的腐蚀	(70)
第一节 金属结构的局部腐蚀	(70)
第二节 水工金属结构在水中的腐蚀	(76)
第三节 水工金属结构在大气中的腐蚀	(92)
第四节 金属结构在土壤中的腐蚀	(97)
第四章 金属结构腐蚀的防护方法及选择原则	(102)
第一节 金属结构腐蚀的防护方法	(102)
第二节 水工金属结构防护方法的选择	(124)
第五章 水工金属结构防护的表面预处理	(133)
第一节 金属表面污染的种类及表面预处理要求	(134)
第二节 金属表面处理方法	(138)
第六章 水工金属结构的涂料防护	(166)
第一节 涂料的一般知识	(166)
第二节 水工金属结构常用防腐蚀涂料的选择	(173)
第三节 防腐蚀涂料的施工	(202)
第七章 水工金属结构的金属热喷涂防护	(237)

第一节	金属热喷涂的设备与材料·····	(238)
第二节	喷涂施工·····	(249)
第八章	水工金属结构的阴极保护·····	(273)
第一节	阴极保护的方法及选择阴极保护的条件·····	(273)
第二节	外加电流阴极保护·····	(276)
第三节	外加电流阴极保护与涂料联合保护·····	(294)
第九章	钢筋混凝土中钢筋的腐蚀与保护·····	(298)

第一章 概 论

第一节 金属腐蚀与防护在国民经济中的意义

一、金属腐蚀的定义

金属（包括合金）是使用最广泛的材料，无论在工业、农业、国防、水利等行业，还是在日常生活中，都离不开金属材料。但是，金属在使用过程中，常常因发生腐蚀而影响正常使用。例如：钢结构设备在大气中的生锈、钢闸门在水中的锈蚀、轮船外壳在海水中的腐蚀、地下管道的穿孔、高压锅炉的腐蚀损坏以及日常生活中螺栓的锈死等。这些现象都是金属与其周围介质发生化学及电化学反应而使金属遭到损坏的，我们称之为金属腐蚀。

从热力学的理论来看，在自然状态中，除少数贵金属（如 Au、Pt 等）外，绝大多数金属都有与其周围介质发生作用而转变成离子的倾向，也可以说金属发生腐蚀是自然趋势，因此腐蚀现象是普遍存在的。

腐蚀造成金属的损坏，不同于物理作用造成金属的损坏。如轴承使用一段时间后，轴承直径变细，这是磨蚀，而轴承生锈就是腐蚀。但有时两种作用会同时发生，例如，在水中使用的金属部件（水轮叶片），不但受到流沙的冲击发生磨蚀，同时也可能受到腐蚀。

二、金属腐蚀与防护在国民经济中的意义

金属腐蚀所造成的损坏，不仅使金属材料本身在其外形、色泽以及机械性能等方面受到破坏，更主要的是使其制品（例如结构、部件、设备等）等级下降，影响使用价值，甚至报废。而金

属制品的价值远远超过金属材料本身。金属制品受腐蚀会引起停工停产、物质泄漏、环境污染，甚至造成事故。每年，因腐蚀造成的损失是非常惊人的。据国外有关统计报导，全世界现存的钢铁及金属设备每年约有 1/3 因腐蚀而报废，如果考虑到部分回炉再生，至少也有 10% 完全被腐蚀浪费掉。全世界的金属腐蚀损失约为每年 7000 亿美元，占国民经济总产值的 1%，但发达国家高达 2%~4%。全世界近 50 年来生产的约 1800 亿 t 钢铁中有 800 亿 t 因腐蚀而损失掉，损失率达 44%。

随着经济的发展，世界各国因金属腐蚀的损失也愈来愈大。据统计，1968、1969 年西德的金属腐蚀损失 190 亿马克，近年来已达 300 亿马克/年。1971 年英国金属腐蚀损失为 13.65 亿英镑，占英国国民生产总值的 3.5%。然而，到 1974 年，这位统计者又说，实际英国每年的金属腐蚀损失比上面的统计数字至少要多一倍。到 80 年代统计，英国金属腐蚀损失为 100 亿英镑/年，日本的腐蚀损失为 133~160 亿美元/年，澳大利亚为 4.7 亿澳元/年，而前苏联则为 147 亿卢布/年。

工业发达的美国，据 1975 年统计，每年因金属腐蚀损失达 700 亿美元，相当于美国年生产总值的 4.2%，其中直接金属腐蚀损失为 100~150 亿美元。进入 80 年代后，美国的金属腐蚀损失已增加到每年 750 亿美元。金属腐蚀使美国的能量消耗增加了 3.5%。另有资料显示，美国每年汽车事故损失约为 300 亿美元，火灾 110 亿美元，水灾 4.3 亿美元，风灾损失 7 亿美元，地震损失 4 亿美元，以上共计损失 425.3 亿美元，仅为金属腐蚀损失的 60%。从中可以看到，金属腐蚀所造成的损失远远大于车祸和自然灾害所造成损失的总和，金属腐蚀已成为美国的头号灾难。

我国金属防腐技术工作起步较晚，与世界先进水平尚有较大差距，有关金属腐蚀所造成的经济损失也是非常惊人的。据国家科委 1981 年统计，我国金属直接腐蚀损失为 100~150 亿元/年，

每年约有 1000 万 t 钢材因遭腐蚀而不能使用, 3000 万 t 钢铁设备因腐蚀而报废, 间接损失至少为直接损失的 3~5 倍。水工钢结构的腐蚀也很严重。例如, 某水闸的钢闸门建成使用 15 年后, 构件腐蚀严重, 承载能力降低 $1/3 \sim 2/3$; 又如某挡潮闸的钢闸门受海洋大气腐蚀, 有一孔闸门的门叶发生失稳破坏; 再如某闸的钢闸门在使用 20 年后因严重腐蚀而报废。

金属腐蚀所造成的直接损失, 仅为金属结构和设备的本身价值, 但因影响其使用年限及其他原因所造成的间接损失要比直接损失大得多。总之, 金属腐蚀所造成损失是巨大的, 对国民经济影响也是巨大的。金属腐蚀的科学研究越来越引起人们的重视。

当前, 我国还是发展中国家, 国力财力有限, 这就更需要开展金属腐蚀与防护的研究, 减轻金属腐蚀造成的损失, 为国家节约资金 (每年可节约百亿元之多), 节约能源, 保护资源, 减少污染, 巩固国防, 这对国民经济发展具有重要的意义。

第二节 金属腐蚀与防护的任务

一、金属腐蚀与防护是一门新兴学科

金属腐蚀与防护是随着生产发展的需要, 近几十年来逐渐建立和发展起来的新学科。它建立在金属学和物理化学的基础上, 并涉及化学、冶金学、工程力学、机械工程学、生物学等多种学科, 是融合多门科学的新兴边缘学科。它的主要任务是借助于物理化学中多相反应的化学动力学和电化学过程动力学, 研究金属和周围介质作用时所发生的化学或电化学现象; 探讨这些现象的机理及其一般规律; 利用掌握这些现象的机理和一般规律, 研究金属结构 (设备、部件等) 在各种条件下使用时的腐蚀以及防腐和保

护办法，保证金属结构的正常运行和使用寿命。

二、水工钢结构的防腐任务

水利是国民经济的基础产业。在水利设施中使用最多的金属材料是钢铁，使用环境是大气和水（包括淡水、海水、河水、地下水、污染水等）。这就要求水利行业从设计到运行管理的人员中，有一批专门人才，熟悉钢铁在大气中或水中的腐蚀机理，精通钢铁在大气和水中的常用保护方法，并将有效的防护措施应用到设计和工程管理中，才能防止和减少水工钢结构的腐蚀，确保水利设施的安全运行。

第三节 金属腐蚀的分类

金属腐蚀一般按腐蚀发生机理和腐蚀损坏形式进行分类。

一、按金属腐蚀的机理分类

（一）化学腐蚀

化学腐蚀是指金属在介质中，仅仅由于发生化学作用而使金属损坏的现象。其特点是腐蚀过程没有电流产生。化学腐蚀按其接触的环境可分为如下两种：

（1）气体腐蚀（也称“干蚀”）：是指金属在干燥的气体（如氧气、硫化氢气、氯气等）中，表面生成相应的化合物（如氧化物、硫化物、氯化物等）。例如钢铁热轧时表面生成氧化皮。

（2）在非电解质溶液中的腐蚀：是指金属在不导电的溶液中发生的腐蚀。例如金属在有机溶液（如酒精）中的腐蚀。

（二）电化学腐蚀

电化学腐蚀是指金属与介质发生电化学作用而损坏的现象。其特点是腐蚀过程中有电流产生。电化学腐蚀要比化学腐蚀更普

遍，危害性也更大。电化学腐蚀按其产生腐蚀的环境又可分为如下几类：

(1) 大气腐蚀（也称“湿蚀”）：是指金属在潮湿的气体（如自然大气）中的腐蚀。这是最常见的一种。

(2) 土壤腐蚀：埋设在地下的金属构筑物（如管道、电缆等）的腐蚀。

(3) 在电解质溶液中的腐蚀：是指在导电的溶液（如天然水及大部分水溶液，包括海水及酸、碱、盐的水溶液）中，金属制品的腐蚀。这也是一种极其广泛的腐蚀，水工钢结构的腐蚀多属此类。

(4) 其他包括在熔融盐中的腐蚀。

二、按照损坏的形式分类

（一）全面腐蚀（也称均匀腐蚀）

全面腐蚀是指金属与介质相接触的部位，均匀地遭到腐蚀损坏，如图 1-1 (a)。这种腐蚀损坏的结果是使金属尺寸变小和颜色改变。

（二）局部腐蚀

局部腐蚀是指相接触的部位中，遭到腐蚀损坏的仅是一定的区域（点、线、片）。它又可分为以下几种：

(1) 点蚀：腐蚀形态是不均匀的麻点，所占面积大，但不深，而且点与点之间互相不连。如图 1-1 (b)。

(2) 孔蚀：腐蚀形态是高度局部腐蚀，腐蚀深度大于孔表面直径，有时会穿孔。如图 1-1 (d)、(g)。它是破坏性和隐患最大的腐蚀形态之一。

(3) 皮下腐蚀（也称鼓泡腐蚀）：先在金属表面某一处开始，然后进入皮下层，再向四边扩散。此种形态多在金属表面发生鼓泡时，才被发现。这类腐蚀最易在涂料防护中出现。

(4) 其他腐蚀：如选择腐蚀、晶间腐蚀等，见图 1-1。

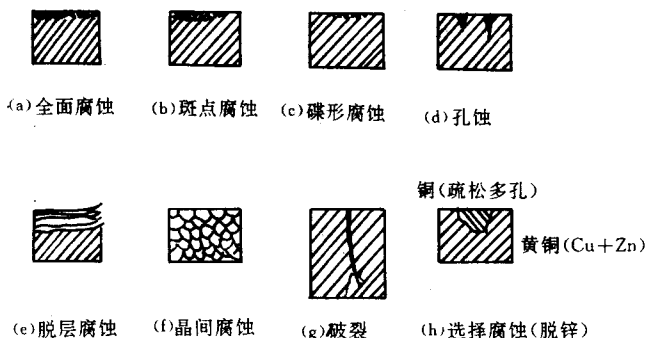


图 1-1 腐蚀的不同形态

从某种意义上讲局部腐蚀的危害要比均匀腐蚀大得多。例如一根铁管，均匀地腐蚀尚可以使用相当长的时间而无妨碍，但局部腐蚀而烂穿成小孔就要影响使用或报废。

第四节 金属腐蚀程度的评定标准

金属腐蚀的程度，通常用平均腐蚀速度来表示。评定腐蚀程度的方法很多，这里介绍两种最基本的方法。

一、重量法

金属腐蚀的程度，可以用样品在腐蚀前后单位时间内单位面积重量的变化（减少或增多）来评定。常用重量减少来测定，简称失重法，可用下式表示

$$\text{失重法} \quad K_{\text{重量}} = \frac{g_0 - g_1}{S_0 t}$$

式中 $K_{\text{重量}}$ ——腐蚀速度， $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ；

g_0 ——样品腐蚀前的重量, g;

g_1 ——样品腐蚀后清除产物后的重量, g;

S_0 ——样品的表面积, m^2 ;

t ——腐蚀的时间, h。

此法仅适用于样品受均匀腐蚀, 并能彻底清除腐蚀产物而又不伤样品的基体。

在某种情况下, 腐蚀产物全部附着在样品表面, 或者即使脱落下来, 也能全部收集时, 可采用增重法, 用下式表示

增重法
$$K_{\text{重量}}^+ = \frac{g_2 - g_0}{S_0 t}$$

式中 $K_{\text{重量}}^+$ ——腐蚀速度, $g/(m^2 \cdot h)$;

g_2 ——样品带有腐蚀产物的重量, g。

二、以腐蚀深度来评定

重量法是以单位时间内单位面积重量的变化来表示腐蚀速度, 不能反映样品腐蚀前后的尺寸变化, 因此, 在重量法的基础上, 引入金属密度的概念, 用腐蚀深度评定金属材料的耐蚀性, 更为适当, 更为科学。腐蚀深度按下式计算

$$D_{\text{深}} = 8.76 \frac{K_{\text{重量}}^-}{d_{\text{金属}}}$$

式中 $D_{\text{深}}$ ——用腐蚀深度表示腐速, mm/a;

$K_{\text{重量}}^-$ ——失重法求得的腐速, $g/(m^2 \cdot h)$;

$d_{\text{金属}}$ ——样品的密度, g/cm^3 。

金属(包括合金)的耐蚀性用腐蚀深度来划分, 共分6类, 10级, 见表1-1。

应当指出, 上述两种评定金属腐蚀程度的方法是建立在金属被均匀腐蚀基础上的, 对于局部腐蚀不能使用。

表 1-1

金属耐腐蚀性标准

耐腐蚀性的分类		耐腐蚀性的等级	腐蚀速度 (mm/a)
I	完全耐蚀	1	<0.001
II	极耐蚀	2	$0.001\sim0.005$
		3	$0.005\sim0.01$
III	耐蚀	4	$0.01\sim0.05$
		5	$0.05\sim0.1$
IV	尚耐蚀	6	$0.1\sim0.5$
		7	$0.5\sim1.0$
V	稍耐蚀	8	$1.0\sim5.0$
		9	$5.0\sim10.0$
VI	不耐蚀	10	>10.0

复 习 题

1. 金属腐蚀的定义是什么？它对国民经济带来怎样的危害？
2. 水工钢结构的腐蚀会给水利设施带来什么后果？
3. 金属化学腐蚀与电化学腐蚀有何不同？举一些日常接触现象的例子。
4. 金属腐蚀的损坏有哪些形式，各有何不同？
5. 金属腐蚀速度的表示方法有哪几种？它们之间如何换算？

第二章 金属腐蚀原理

金属与其周围介质发生作用而遭受损坏，这种损坏，既包括了金属材料本身的化学质变，也包括了性能的降低和组织的破坏。这种损坏是由于发生了化学作用或电化学作用而引起的。金属为什么会遭受腐蚀？遭受腐蚀的快慢如何？这必须从腐蚀机理上阐明。本章分别从化学和电化学两个方面阐明金属腐蚀问题。

第一节 金属的化学腐蚀理论

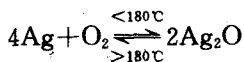
金属的化学腐蚀是指金属材料与其周围介质发生纯化学反应而引起的金属材料的损坏，最常见的是金属在干燥气体中的腐蚀（往往在高温下进行），尤其是高温氧化，是最普遍、最重要的一类化学腐蚀。因此，本节从金属的化学氧化阐明化学腐蚀理论。

一、金属化学腐蚀的基本知识

（一）金属化学氧化的热力学和动力学概念

1. 问题的提出

大家知道铁在高温有氧的条件下能生成氧化铁，而金却不能生成氧化金。如下列反应



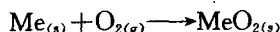
银（Ag）在空气中加热，温度在 180°C 以下时，能生成 Ag_2O ；但当温度升至 180°C 以上，则发生 Ag_2O 的分解。如果把空气（氧分压约为 $1/5$ 大气压）换成 1 个大气压的纯氧，则上述反应即使在 180°C 以上也不会发生 Ag_2O 的分解。

以上提出了这样的问题，某种金属在给定的条件下有无产生氧化腐蚀的“可能性”？腐蚀体系的温度、压力（浓度）对这种“可能性”的影响如何？这就要对金属化学氧化热力学和动力学的概念进行探讨。

尽管金属被腐蚀的“可能性”是一个首先需要解决的问题，而生产实践中最为关心的却是金属被腐蚀的速度。实践和理论均已证明，除少数金属（Au、Pt 等）之外，绝大多数金属，在现实条件下，均有被腐蚀的可能性。然而可能性并不等于“现实性”。例如在同一条件下，铝（Al）比铁（Fe）氧化的“可能性”大得多，但实际上铝比铁的氧化腐蚀速度却慢得多。这就说明金属氧化腐蚀的“可能性”大小，不能作为腐蚀速度快慢的标志，还需从动力学上进一步阐明。

2. 金属化学氧化热力学

对于一个金属化学反应



式中 $\text{Me}_{(s)}$ ——固态金属；

$\text{O}_{2(g)}$ ——气态氧；

$\text{MeO}_{2(s)}$ ——固态金属氧化物。

把整个化学反应作为一个腐蚀体系， $\text{Me}_{(s)}$ 与 $\text{O}_{2(g)}$ （即反应物）为状态 I，生成物 $\text{MeO}_{2(s)}$ 为状态 II，腐蚀能否发生，也就是整个体系能否由状态 I 变化成状态 II，这就由热力学理论来描述：任何化学反应如果伴随着能量（自由能）的降低，都可能自发地进行。金属腐蚀就是这样一种自发反应。在腐蚀环境中，金属由元素态变为化合物，同时放出能量。这恰和冶金过程相反，后者是由化合物（例如氧化铁）吸收大量的能，变为元素态（铁）。

由于实际过程大多是在恒温恒压条件下进行的，所以仅用热力学函数“吉氏自由能”（G），就可考察金属氧化的倾向性。

在金属氧化反应中，反应在恒温条件下能进行到平衡时，有