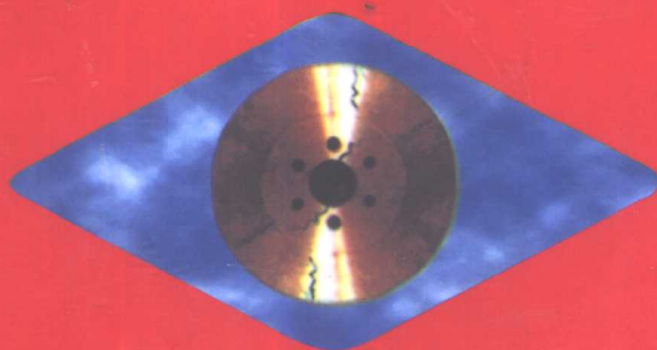


机械工业部科技与质量监督司
中国机械工程学会理化检验分会

编

机械 工程 材料 测试 手册

腐蚀与摩擦学卷



总主编 桂立丰
卷主编 吴民达 (腐蚀)
赵源 (摩擦学)

HANDBOOK
OF MATERIALS
TESTING
FOR MECHANICAL
ENGINEERING

HANDBOOK OF MATERIALS TESTING
FOR MECHANICAL ENGINEERING

腐蚀与摩擦学卷

机械工程材料测试手册

机械工业部科技与质量监督司

中国机械工程学会理化检验分会

编

总主编 桂立丰

卷主编 吴民达(腐蚀)

赵源(摩擦学)

辽宁科学技术出版社

226267

· 沈阳 ·

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料测试手册. 腐蚀与摩擦学卷/机械工业部科技与质量监督司, 中国机械工程学会理化检验分会编. —沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002. 05

ISBN 7-5381-3219-8

I. 机... II. ①桂... ②吴... ③赵... III. ①机械制造材料-性能-测试-手册②机械制造材料-金属腐蚀-测试-手册③机械制造材料-摩擦-测试-手册

IV. TH140. 7-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 005111 号

出 版 者: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路 25 号 邮编: 110003)

印 刷 者: 江苏省无锡长城印务有限公司

发 行 者: 各地新华书店

开 本: 787mm×1092mm 1/16

字 数: 1832 千字

印 张: 58.25

插 页: 5

印 数: 1~2000

出版时间: 2002 年 5 月第 1 版

印刷时间: 2002 年 5 月第 1 次印刷

责任编辑: 刘 红 宋纯智

封面设计: 李若虹

版式设计: 李 夏

责任校对: 丁东戈

定 价: 130.00 元

联系电话: 024-23284360

邮购咨询电话: 024-23284502

E-mail: lkzsb@mail.lnpgc.com.cn

http://www.lnkj.com.cn

发展机械工程材料测试
技术，促进科学技术转化
为生产力。

牛光亚

一九九〇年八月

（全国政协副主席、中国科协名誉主席、中国工程院院长）

提高我國理化檢驗水平
為科研生產和經濟建
設服務

何光遠

一九八四年
九月廿二日

（中華人民共和國機械工業部部長）

发展材料科学
面向廿一世纪

贺机械工业出版社乙亥年冬
丁为定

(中华人民共和国新闻出版署署长)

理化检验要
为发展材料
科学和提高
产品质量
服务

陆燕荪

一九九四·九

(中国机械工程学会理事长)

《机械工程材料测试手册》

编辑委员会

名誉主编 陆燕荪(机械工业部)

主 编 桂立丰(机械工业部上海材料研究所)

副 主 编 朱森弟(机械工业部)

依英奇(机械工业部科技与质量监督司)

方向威(机械工业部上海材料研究所)

吴关昌(机械工业部科技信息研究院)

唐汝钧(机械工业部上海材料研究所)

编 委 (按姓氏笔画为序,带*者为常务编委)

方向威	方禹之	王文忠	冉启芳	朱森弟
刘正义	许守廉	吴 诚*	吴 毅*	吴民达*
吴关昌	张少卿	张绪江*	陈运远	李 真
李炯辉*	沈石年	孟锡明	依英奇*	罗唯力*
胡熹明*	胡传映	胡赓祥*	赵 源	赵少汴
桂立丰*	唐汝钧*	党鸿辛	曹用涛*	曹基文

《机械工程材料测试手册》

腐蚀与摩擦学卷编辑委员会

第一部分:腐蚀

主 编 吴民达(机械工业部上海材料研究所)
副主编 杨 武(机械工业部上海材料研究所)
主 审 陆 柱(华东理工大学)
编 委 (按姓氏笔画为序)
丁亚平 王麟书 杨 武 吴民达
张承典 肖京先 郑文龙 周润培
徐乃欣 顾里之 徐克薰 袁宝林
黄永昌 阎永京
责任编辑 王惠珍
校 对 王惠珍 王琼礼 吴 诚

第二部分:摩擦学

主 编 赵 源(机械工业部武汉材料保护研究所)
副主编 罗唯力(机械工业部上海材料研究所)
汪德涛(机械工业部广州机床研究所)
王琼礼(机械工业部上海材料研究所)
高万振(机械工业部武汉材料保护研究所)
李 健(机械工业部武汉材料保护研究所)
主 审 党鸿辛(中国科学院兰州化学物理研究所)
编 委 (按姓氏笔画为序)
韦习成 王琼礼 刘志强 李 健
汪德涛 罗唯力 赵 源 高万振
倪治龙 聂明德 党鸿辛
责任编辑 杨平原 陈永昌
校 对 陈永昌 杨平原 张藕秀

序

机械工业是国民经济的支柱产业之一,担负着为国民经济建设提供装备的重要任务。机械产品的质量直接影响国民经济的发展和人民生活水平的提高。材料、设计、制造技术等是确保机械产品质量的关键要素;测试技术则是监测和保证机械产品内在质量的主要手段,也是开发研究新材料、新工艺、新产品的基础技术,它是机械产品质量保证体系的一个重要组成部分。

多年来,我司一直将理化检验作为机械工业的基础工作之一,通过中国机械工程学会理化检验分会及理化检验协作网,在行业中组织人员培训、资格鉴定、技术交流、编写培训教材、制订行业技术发展规划等活动。

随着近代科学技术的突飞猛进以及各种新型技术的发展和运用,现有材料测试技术领域的参考书,远远满足不了实际工作的需要。理化检验行业急需一套较为系统、全面、实用的材料测试手册以指导生产和科研。为此,我司委托中国机械工程学会理化检验分会组织编写《机械工程材料测试手册》,并于1991年6月成立了《机械工程材料测试手册》编辑委员会,下设四个分编委会具体进行工作。

这套手册以实用为编写宗旨,既归纳总结了国内成熟的经验和测试方法,同时又推荐介绍国外先进技术。全书分化学卷、物理金相卷、力学卷、腐蚀与摩擦学卷共四卷,可供机械工业中从事设计、制造、测试技术工作的教学、科研、生产应用人员参考。

手册在各位参加编写的专家、学者的不懈努力下,终于如期得以完稿。在此我们对这套手册的出版表示热烈祝贺,并向对编写工作给予人力、物力大力支持的机械工业部上海材料研究所(中国机械工程学会理化检验分会挂靠单位)以及各有关单位及有关人员表示衷心感谢。

机械工业部科技与质量监督司

前 言

材料,作为与能源和信息一起构成世界经济发展三大支柱之一的技术,已日益受到人们的重视。机械工业(和其他工业)所应用的各种材料,按用途划分主要可分为结构材料、功能材料以及工艺和辅助材料三大类;按化学组成划分可分为金属材料、有机高分子材料以及无机非金属材料三大类。不论如何划分,要对这些材料进行合理和有效的使用,充分发挥其潜力,必须了解和掌握它们的某种或某些性能(也包括成分、组织结构)。为了达到这个目标,则必须求助于材料测试工作。

材料测试,就其根本意义来说,属于信息技术的具体应用。也就是采用一定的方法,将与材料某种性能有关的内涵信息,进行提取、分离、输出、传递、转换、接收、检测、采集和处理,最终进行显示或记录,从而反映出所探求的性能特征。当然,也可将经过处理后的信息,径即反馈到生产现场或实验室中,对生产或实验进行控制,或直接在流程中应用。

近年来,由于近代物理学、化学、光学、声学、微电子学、材料科学、计算机技术、自动控制技术等学科的迅速发展,提供了很多敏感元件、转换元件、检测器件、显示与记录装置等器材和技术,使材料测试技术出现了崭新的面貌,不仅使很多原来的测试仪器和方法得到很大地改进和更新,并且还建立了大量新的方法以及相应地创制了一系列新的设备,解决了以往不能解决的问题。整个测试技术正朝着快速、简便、精确、自动化、多功能等方向迅猛发展。因此,今日所谓的材料测试实际上是一种多门类、跨学科的综合性技术。

材料测试的重要意义,可进一步由下列各种场合窥见一斑:

1. 在设计新设备或构件时,必须选用合适的材料以满足设计要求,这就需要提供材料的有关性能数据,特别是提供接近设备或构件在实际服役条件下的性能,以作为新设计的依据。

2. 在合成和制备新材料或制订新工艺(包括提纯、精炼、改性、冷热加工等)时,对材料性能进行比较是筛选和确定最佳方案的重要依据之一。

3. 在工业生产中,对投产的原材料的质量必须进行检查,以了解其是否符合规格,用以保证产品的质量。

4. 在生产的加工过程中,有必要对各道工序前后的材料、半成品和成品的性能进行监控,以明确每一工序的实施过程是否稳定和正常。

5. 在对某些材料进行大量试验研究的基础上,以及根据这些材料制成的设备或构件在具体使用中出现的問題,抽象出材料的性能指标,从而对材料性能和加工工艺制订出标准文件和技术规范,用以控制材料和部件的生产。

6. 对设备和构件进行服役条件下的安全和可靠性评估,以确保其在服役中能有效地工作。

7. 对设备和构件发生故障和失效时,要分析设备和构件及所用材料在使用条件下的性能变化,并探讨故障和失效的发生原因,从而寻求解决和改进的途径。

8. 在材料的宏观性能与微观结构特征之间往往存在着密切联系。例如,从很多宏观测定可探知一些微观的晶体结构特征;反之,从微观的特征又可说明和推断出一些宏观现象和性能,从而有可能用以指导生产应用。因此,性能测定常为材料在宏观与微观范畴之间,以及理论和实践之间建立起纽带或桥梁,这对于紧密地联系材料科学各部分、推动材料科学成为一个综合的整体具有重要的作用。

由以上情况可知,不论从基础理论研究来看,或从生产实践来看,材料性能测试的重要性均显而易见。实际上,根据材料测试结果解决重大科技问题的情况,在历史上和当今均是屡见不鲜的。此外,材料测试还起了推动和促进某些学科和专业发展的作用。例如对一些构件,包括导弹固体燃料发动机壳体、大型舰船、高压容器等脆断事故的测试分析,导致了断裂力学的创立和发展;对引起电站设备断裂事故的构件中氢的有效分析促进了钢的精炼技术的发展;综合运用光学显微术、扫描电子显微术和透射电子显微术以及其他新的测试技术于失效分析中,使显微断口学得以发展。这些均是极典型的例子。

机械工业部及所属科技与质量监督司(原科技司)十分重视材料测试(常称理化检验)工作在生产和科技中的作用,近年来采取不少有力措施来推动这一工作。为了适应广大材料测试工作者和其他有关人员的参考需要,在科技司的主持下,1991 年在京成立了《机械工程材料测试手册》编辑委员会,决定编写出版化学卷、物理金相卷、力学卷、腐蚀与摩擦学卷共四卷,指定由中国机械工程学会理化检验分会负责组织编写。

为适应广大读者的需要,本手册在编写时强调把握下列四个特性:实用性、综合

性、先进性、可靠性。对每种测试方法的叙述内容尽可能包括以下各方面：(1) 概述；(2) 主要原理；(3) 仪器结构概要；(4) 操作要点；(5) 精度、准确度、误差及影响因素；(6) 必要的数据及图表；(7) 特点及限制；(8) 与其他类似方法的比较；(9) 应用范围及实例；(10) 发展趋势；(11) 安全问题；(12) 文献资料。但由于不同测试方法分别有其特色，无法全部一致，所以在叙述时各项的安排顺序以及繁简程度也均不相同。例如对于比较古老的方法在原理上就较简略。而对于新型的方法例如化学卷中仪器分析篇的质谱法、核磁共振法等，物理金相卷中表面分析篇的俄歇能谱法和低能电子衍射法等，则原理叙述所占的篇幅就较多；有些方法不存在安全问题，则这一项目也予略去；等等。

书中的名词术语尽量采用国家和各部委有关部门所规定的，或各学科专业上所公认和通用的。计量单位则采用国家法定计量单位，但有极少数者例外，例如晶体的点阵常数和晶面间距有一部分采用“埃”(Å)为单位，这是由于它仍为国际粉末衍射标准联合委员会(JCPDS)的粉末衍射卡片以及国际上很多晶体学数据所使用之故。

为了编写本手册，聘请了国内各有关学科知名的专家、教授、高级工程师等 200 余人撰稿。他们不辞辛劳，多方收集资料，反复进行研讨修改，力求内容臻于完善。其他担任组织、编辑、校对等同志也认真细致，努力奋战。以上许多同志是在业余时间中完成这些工作的，精神值得钦佩。依靠他们的努力，才能使本书各卷陆续完稿问世。谨向他们表示深切的谢意。

本手册按照原意定名为《机械工程材料测试手册》。事实上，机械工业中所用的材料，绝大多数也在其他科技和工业领域中应用，很多测试方法存在共同之处。因此，对于从事机械工业以外其他行业的人员，本书也具有一定的参考意义。

由于我们经验不足，且本书的篇幅又较大，因此必有很多不当之处，尚请广大读者不吝指正。

《机械工程材料测试手册》编辑委员会

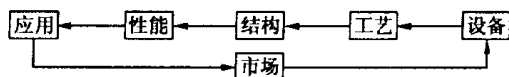
主 编

桂立丰

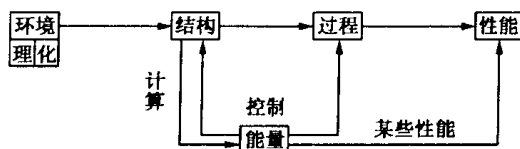
卷 序 一

(腐 蚀)

在材料学领域内,从宏观角度分析,在下列五个环节中,我认为,应该“面向市场,



抓两头,带中间”。在材料工业内部,从材料的质量控制和新材料的开发的微观角度分析,也有五个范畴,若性能、结构、环境及时间分别用 P 、 S 、 e 及 t 表示,则:



$$P=f(S,e,t)$$

$$\text{或: } P=\Phi_e,t(S)$$

广义的结构(S)是材料内组元(或要素)集合(E)和关系集合(R)的总合:

$$S=\{E,R\}$$

E 便是通称的“化学成分”, R 便是狭义的组织结构。金相组织是各个“相”(E)的“排列方式”(R)。

从上面两图三式,可以看出“材料测试”的重要性。机械工业为整个工农业提供设备(或装备);中国机械工程学会理化检验分会,是我国在“机械工程材料测试”领域的权威学术单位,由这个分会主编这方面的“手册”,质量是可以保证的。我相信,本书的出版,将为我国材料工业的发展和材料科学的进步作出重要贡献。

腐蚀、磨损和断裂是材料的三种主要失效方式。1975 年美国总的腐蚀费用为 820 亿美元,占当年美国总产值的 4.9%。我相信,“腐蚀与摩擦学卷”的出版,对于减少腐蚀损失,是很有帮助的。

献序祝贺。

中国科学院院士 北京科技大学教授

肖纪美

卷 序 二

(腐 蚀)

腐蚀、磨损和断裂是工程材料的三种主要破坏失效形式。与磨损和断裂相比,腐蚀破坏有其特点。特点之一是腐蚀过程乃是材料与其周围环境介质相互作用的过程。由于环境介质的多样性,就使得腐蚀过程具有多样性。有的腐蚀过程是材料表面与介质之间的直接化学反应的过程,这种腐蚀过程一般被称为化学腐蚀,大多数的腐蚀过程发生于有水的介质中,这种腐蚀过程和发生于熔融盐膜下的腐蚀(热腐蚀)过程都是按电化学反应的途径进行的,因此金属的电极电位可以影响腐蚀过程的速度;甚至腐蚀过程还可能是物理过程,但不管是哪一种腐蚀过程,都有两个共同点使它区别于其他的因介质对材料作用而导致的破坏过程,如磨损。第一点是,在腐蚀过程中必定有新的相形成;第二点是,在腐蚀过程中,整个体系的自由能是降低的。正因为如此,在介绍腐蚀原理时,首先要讨论热力学的问题,而这正是本卷的特点之一。腐蚀的另一个特点是腐蚀破坏形式的多样性。这是因为金属材料的成分和表面状态,介质的种类、成分和条件,金属材料的电极电位和应力分布状态及腐蚀与磨损、疲劳等过程的协同作用,对于腐蚀破坏的分布与速度均会产生重要的影响,使得腐蚀破坏表现为多种形式:既有全面的甚至比较均匀的腐蚀破坏,又有不均匀的甚至高度集中于材料局部表面的各种局部腐蚀破坏,还有只发生于晶界的晶间腐蚀和只使得合金中某些合金成分离开金属材料的脱合金腐蚀或选择性腐蚀;既有由于不同电极电位的金属相互电接触而引起的电偶腐蚀,也有由于介质中氧的浓度或金属离子的浓度分布不均匀而引起的浓差电池腐蚀;此外,还有腐蚀过程与其他破坏过程的联合作用引起的破坏性极大的应力腐蚀破裂、腐蚀疲劳、磨损腐蚀等。“腐蚀”作为《机械工程材料测试手册》“腐蚀与摩擦学卷”的重要部分,用相当篇幅介绍测试各种腐蚀破坏速度或程度的试验方法或测定材料对不同类型腐蚀破坏的耐蚀性的方法。在这方面,本卷的内容全面详尽,取材又比较新。应该说,虽然目前已经有了一些腐蚀方面的专著,但是在本卷之前还没有一本这样全面而详细地介绍既包括金属材料和非金属材料又包括实验室试验和现场试验在内的腐蚀测试方法的著作。我相信本卷的出版,无论在帮助材料工作者了解腐蚀原理方面或是在指导正确地选择腐蚀试验方法和腐蚀试验方面,都会起到重要的作用。

中国科学院院士 浙江大学教授

曹楚南

卷 序 三

(腐 蚀)

腐蚀被称为无焰的火灾。世界上每年被腐蚀损坏的金属数量巨大,其中有相当比例的金属由于腐蚀的破坏而无法再生。更为重要的是腐蚀危害不仅带来金属本身的损失,还会造成结构的失效、生产流程的中断以致引起突发事件,它所带来的损害要比金属本身的消耗大得多。据统计,国民经济为腐蚀所付出的代价要数倍于自然灾害损失的总和。从可持续发展的角度来看,我们所处的世界资源问题正变得更为紧张,环境和生存质量问题日益受到关注,因而成功地减少由于腐蚀所带来的损失就尤为迫切。特别是随着工业和高新技术的发展,腐蚀控制的任务也变得更复杂了。为了实现零件制造最佳化的理想,出现了材料发展、设计、制造、维护、保养、风险评估以及经济分析等方面的紧密合作。我们知道,热力学可以给出有关腐蚀作用可能性的许多数据,但尚并不足以说明腐蚀作用的速度。腐蚀研究的基本目的是找出为什么在一种情况下热力学上可能的腐蚀作用进行得快,而在另外一种情况下却非常慢的原因,并测定各种因素对腐蚀速度的影响。腐蚀测试的任务也在于此。因为了解各种环境条件下腐蚀的状况,定量地描述其发展的速度,对于认清机理、采取防护控制措施、完成风险分析和寿命预测都是很重要的,所以腐蚀测试知识也是机械工程师所必备的知识。

《机械工程材料测试手册》“腐蚀与摩擦学卷”正式出版了,本卷中所介绍的腐蚀部分内容新颖丰富、覆盖面宽,是涉及腐蚀各相关领域测试技术的工具书。近半个世纪以来,腐蚀科学的发展很快,但过去的腐蚀手册直接面向机械行业的并不多。我们可以期望它的出版对于从事机械设计、制造、腐蚀控制工程和分析测试人员都会很有帮助,对普及腐蚀与防护知识亦将作出重要贡献。我们感谢作者和编辑们为此付出的努力和艰辛,并为他们的成功表示祝贺。

中国工程院院士 中国科学院金属腐蚀与防护研究所研究员

柯伟

卷 序 四

(摩 擦 学)

摩擦学是研究物体表面摩擦行为的一门科学和技术。乍听起来,有些觉得刺耳:摩擦问题值得构成一门学科来研究吗?其实,仔细观察,世间到处都有摩擦问题。譬如,任何一部机器都少不了相互接触的运动副,有相对运动(包括静接触表面间的蠕动)就会有摩擦,有摩擦就会有磨损。摩擦导致能量消耗,而磨损导致表面损坏、材料损耗、零件失效。据研究分析表明,全世界大约有 $1/2 \sim 1/3$ 的能量以各种形式消耗在摩擦上,大约有80%的失效零件是由于各种形式的磨损引起的。因此,减少摩擦和磨损已成为节约能源及原材料和降低维修费用的主要措施。同时,也是提高产品质量、保持精确度、延长使用寿命、提高工作性能可靠性的主要措施。正因为如此,世界上工业技术发达的国家都在积极开展摩擦学的研究与应用。

人类研究和应用摩擦学知识历史悠久,然而系统地应用于机器运动副的设计则进展得非常缓慢。过去设计师们虽然知道,导致机器失效的主要原因不一定是机器零件的断裂,而常是传递运动的工作副在摩擦作用下的磨损。但是在设计时,依然只对主要零件进行强度计算,几乎没有对机械运动副进行减摩和耐磨校核,不考虑其具体工作条件来采用最有效的减摩耐磨措施,以致造成运动副耐磨性和减摩性差、机器使用寿命短、能耗大及可靠性低。近年来,看到了摩擦学设计的经济效果,同时也认识到了仅靠一门学科的知识进行设计和用试探法设计出现的问题和不良后果。因此,现代产品在设计阶段就尽可能将控制摩擦和防止或减少磨损的各种因素考虑进去,开展摩擦学设计。

本卷的摩擦学部分非但对专业人士实用,对非专业人士也是有益的。然而应该说明,摩擦学数据应用,是有条件的,因为实验测得的数据与测试系统条件有很强的依赖关系。想要应用好摩擦学知识来解决工程实际问题,不但要查取相关的摩擦学数据,而且还需要了解获得该数据的测试条件与实际应用条件之间的差异。从这个角度出发,了解摩擦学测试比查取摩擦学数据具有更重要的意义。本手册正是着重从测试技术的角度将摩擦学介绍给读者的。

本卷的摩擦学部分由党鸿辛院士、赵源教授、汪德涛教授、罗唯力教授等十一位专家学者编撰,他们大都从事摩擦学研究和测试工作达数十年之久。他们不但在选材编撰方面使本手册的资料具有系统性和实用性,尤其在测试技术的著述中融入了自己的心得和经验,如何用好摩擦学数据方面提出了自己的深邃见解,这是难能可贵的。相信本手册对广大的工程技术人员、研究人员和研究生,都具有重要的实用和参考价值。

国际摩擦学会前副主席 清华大学教授

郑林庆