

修复工程学

● 王汉功 赵文轸 等编著



机械工业出版社
China Machine Press

修复工程学

主 编 王汉功 赵文轸

参 编 汪刘应 侯根良

郭 秦 潘 伟



机械工业出版社

本书论述了与修复工程密切相关的基础知识,并结合实践总结了典型零部件的修复工作和方法。其主要内容由五部分组成:修复工程中的力学基础、材料强度的基本理论、失效分析的基本理论、修复工艺原理和修复实践。

该书是维修工程技术人员一本有用的参考书,也可作为大专院校机械、能源动力类有关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

修复工程学 / 王汉功, 赵文轸主编. —北京: 机械工业出版社, 2001.10

ISBN 7-111-09470-0

I. 修... II. ①王 ... ② 赵 ... III. 机械维修—基本知识 IV. TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 073655 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 曾 红

封面设计: 陈 沛 责任印制: 付方敏

三河市宏达印刷有限公司印刷 · 新华书店北京发行所发行

2002 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32 · 11.75 印张 · 313 千字

0 001—3 000 册

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

在国民经济的发展和部队建设中，人们深深感到修复的重要性。机械设备、武器装备、自动生产线、各种交通工具，都会因为某种故障而影响使用。能否及时地、高质量地修复，关系到企业的产品质量和生产效率，关系到部队的平时训练和战时的持续作战能力，因此，修复和经济效益、社会效益、军事效益密切相关，是国民经济发展中不可忽视的工程问题。但是，以前人们往往只重视“制造或使用”，不重视“修复”。实际上，高水平的修复所需要的科学技术知识并不比制造低，它涉及到金属材料学、高分子材料学、冶金学、焊接学、电化学、应用力学、摩擦学、腐蚀防护学等多种学科和应用力学、材料强度理论、失效分析理论和各种修复工艺理论等许多基础理论知识。可以说，修复工程学是一门多学科组成的边缘学科，其内容应该囊括几乎全部机械制造的基础理论。但为了突出“修复”的特色，本《修复工程学》只包括与修复工程密切相关的五个部分，即修复工程中的力学基础、材料强度的基本理论、失效分析的基本理论、修复工艺原理和修复实践。

本书由王汉功教授和赵文轸教授主编，并负责拟订编写大纲，审定、修改各章节内容及撰写绪论。本书第2章由潘伟同志编写；第3、4章由侯根良同志编写；第5章由郭秦同志编写；第6章由汪刘应同志编写。

由于我们水平所限，书中难免有不足之处，敬请读者赐教。

编 者

2001年10月



王汉功 男 1940年8月生,河南济源人。1965年毕业于中国人民解放军炮兵技术学院机电工程系,历任教员、教研室主任、研究所所长等职,主要从事维修工程、故障诊断和表面工程技术研究。现任中国人民解放军第二炮兵工程学院机电工程系教授、博士生导师,西安交通大学兼职博士生导师,中国设备管理协会技术委员会委员,中国机械工程学会表面工程分会理事。编辑出版的专著有《光学仪器基础》、《装备维修管理》、《导弹使用维修工程》、《导弹可靠性维修性工程》、《超音速电弧喷涂技术》等。有50余篇学术论文分别在国际学术刊物、国际学术会议、国内核心期刊和学术会议上发表;有23项科研成果获奖,其中国家科技进步一等奖1项,军队科技进步一等奖2项、二等奖4项。荣立一等功1次、二等功1次、三等功2次。1994年被评为全军优秀教师,1993年起享受国家政府特殊津贴,1997年被二炮批准为导弹技术专家,1999年获军队专业技术重大贡献奖,军委江主席签发通令记一等功。

目 录

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 修复在国民经济中的地位	1
1.2 修复工程学的特点	3
1.2.1 应用力学理论	3
1.2.2 材料强度理论	4
1.2.3 失效分析的理论和实践	4
1.2.4 修复工艺技术	5
1.3 修复工程学的发展与教育	5
1.3.1 修复工程学的发展	5
1.3.2 工科大学生的修复工程教育	6
第 2 章 修复工程中的力学基础	8
2.1 线弹性断裂力学基础	8
2.1.1 平面问题	9
2.1.2 裂纹附近的应力场和应力强度因子	12
2.1.3 平面应变断裂韧度 K_{IC} 的测试	20
2.2 弹塑性断裂力学基础	28
2.2.1 COD 理论	29
2.2.2 J 积分理论	34
2.2.3 平面应力断裂韧度 K_C 的测试	50
2.3 断裂力学在修复中的应用	53
2.3.1 指导修复材料的选择	53
2.3.2 指导修复方案的制定	55

第 3 章 材料强度的基本理论	60
3.1 材料强度、塑性的各种指标	60
3.1.1 拉伸试件	60
3.1.2 金属的抗拉强度	61
3.1.3 金属的塑性	64
3.2 疲劳强度理论	65
3.2.1 疲劳断裂的特点	65
3.2.2 循环应力	66
3.2.3 疲劳曲线	67
3.2.4 疲劳强度理论	68
3.3 材料强化的基本途径	71
3.3.1 固溶强化	71
3.3.2 细晶强化	73
3.3.3 沉淀强化	74
3.3.4 分散强化	75
3.3.5 位错强化	76
3.4 关于材料强度、塑性、韧性的配合理论	77
3.4.1 材料强度、塑性、韧性的关系	78
3.4.2 材料强度、塑性、韧性的配合理论	80
3.5 材料强度基本理论在修复中的应用	82
3.5.1 电刷镀技术	82
3.5.2 维修热喷涂技术	83
3.5.3 离子注入技术	83
3.5.4 喷丸强化技术	84
第 4 章 失效分析的基本理论和方法	86
4.1 失效物理的基本概念	86
4.1.1 失效	86
4.1.2 失效模式	87
4.2 机件的失效形式	91

4.2.1	机械产品失效的分类	91
4.2.2	韧性断裂失效	94
4.2.3	脆性断裂失效	96
4.2.4	疲劳断裂失效	99
4.2.5	表面损伤失效	101
4.3	失效分析技术简介	114
4.3.1	失效分析的对象与作用	115
4.3.2	失效分析的基本步骤	116
4.3.3	失效分析的基本方法	117
4.3.4	失效分析举例	118
4.4	机件失效案例	120
4.4.1	设计错误引起的损伤事故	120
4.4.2	塑性加工时的缺陷导致的损伤事故	124
4.4.3	热处理缺陷导致的损伤事故	127
4.4.4	焊接、钎焊及铆接缺陷导致的损伤事故	131
4.4.5	机械加工缺陷导致的损伤事故	136
4.4.6	酸洗及表面处理时的缺陷导致的损伤事故	137
4.4.7	组装及储运时的缺陷导致的损伤事故	138
4.4.8	修理时的缺陷导致的损伤事故	139
第 5 章	修复工艺原理总论	141
5.1	修复焊接	141
5.1.1	铸铁零件的补焊	141
5.1.2	碳钢件的补焊	146
5.1.3	合金钢件的修复	147
5.1.4	有色金属件的修复	151
5.1.5	堆焊	154
5.2	修复热喷涂	160
5.2.1	概述	160
5.2.2	热喷涂的基本原理	161

5.3	修复电镀	170
5.3.1	电刷镀	170
5.3.2	镀铬	175
5.3.3	低温镀铁	179
5.3.4	复合电镀	185
5.4	机加工修复	187
5.4.1	修理基准的选择	187
5.4.2	修理尺寸法	190
5.4.3	附加零件法	194
5.4.4	局部更换法	197
5.5	形变修复	200
5.5.1	利用塑性变形修复零件	200
5.5.2	轴类零件的热校直	202
5.6	熔覆修复	206
5.6.1	真空熔结的基本原理及工艺过程	206
5.6.2	真空熔结涂层合金及其它涂层材料	213
5.6.3	熔结涂层的组织与构造	215
5.6.4	真空熔结技术的功能与应用	217
5.7	胶接修复	220
5.7.1	胶接原理及胶接的主要方法	220
5.7.2	胶粘剂的种类及选用	225
5.7.3	胶粘工艺与强化措施	235
5.8	铆接(金属扣合)修复	241
5.8.1	强固扣合法	241
5.8.2	强密扣合法	247
5.8.3	加强扣合法	248
5.8.4	热扣合法	250
5.9	修复后的性能测试	252
5.9.1	结合强度	252
5.9.2	耐磨性	255

5.9.3 疲劳强度	257
5.9.4 耐腐蚀性	258
第6章 修复实践	260
6.1 修复的一般原则	260
6.1.1 工艺合理	260
6.1.2 经济性好	266
6.1.3 效率要高	267
6.1.4 生产可行	268
6.2 轴类及键类件的修复	271
6.2.1 一般轴类零件的修复和修复工艺	271
6.2.2 曲轴修复工艺	279
6.2.3 花键轴和机床主轴的修复	287
6.2.4 键及键槽	292
6.3 齿轮件的修复	294
6.3.1 齿轮的修复原则	295
6.3.2 齿轮的修复方法	296
6.3.3 齿轮修复工艺	301
6.4 液压件的修复	303
6.4.1 齿轮泵的修复	304
6.4.2 叶片泵的修复	306
6.4.3 柱塞泵的修复	308
6.4.4 液压缸的修复	312
6.4.5 阀的修复	316
6.5 箱件壳体件的修复	317
6.5.1 壳体件的修复	318
6.5.2 箱体的修复	327
6.6 导轨的修复	330
6.6.1 机床导轨的刮研修复工艺	330
6.6.2 导轨的机械加工修理	335

6.6.3 导轨表面局部损伤的修复	338
6.6.4 导轨的粘镶板修复	339
6.7 模具量具的修复	348
6.7.1 模具的修复	349
6.7.2 量具的修复	355
6.8 辊子的修复	361
6.8.1 胶粘修复	361
6.8.2 超音速电弧喷涂法修复	362
6.8.3 埋弧自动堆焊法修复	363
6.8.4 激光表面强化法修复轧辊	364
6.8.5 CO ₂ 点堆焊修复压榨辊	364
参考文献	366

第 1 章 绪 论

1.1 修复在国民经济中的地位

一台机械设备或武器装备，即便是当代最先进的，其寿命也不可能是无限的，其中有某些零件经过一定周期的运转，会因磨损、腐蚀、氧化、刮伤、老化、变形等原因或其它人为因素而失效。在有现储备件的条件下，可以通过更换来解决，但是有的备件昂贵，会严重增加维修费用，从而提高生产成本或增加军费开支，更何况在许多情况下，备件不是现成的，为恢复设备（装备）的技术性能，维持生产和部队的战斗力，必须对失效的部件进行修复。

一台机器或设备的整个寿命期内所需的总费用中，除了设计、投产和正常的制造费用外，还包括各种维修费用，它在总费用中所占的比重是很大的，有人估算，其份额可高达 70%（图 1-1）。随着设备的复杂化和高技术化，维修费用占寿命周期费用比例还在增大。据报道，20 世纪 70 年代末原联邦德国军队拥有的装备，其采购价格约值 400 亿马克，每年必须以此数 10% 的费用用于这些装备的保障，即每年要从国防费用中支付维修费 40 亿马克，相当于其联邦防御技术和采购局每年开支的一半。我国军队每年开支的装备维修费用

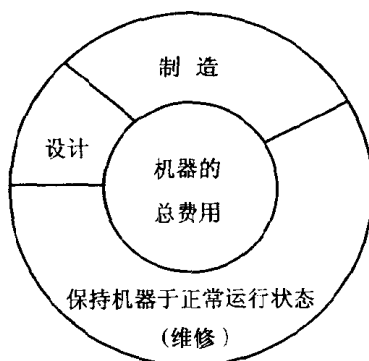


图 1-1 一台机器或设备的
寿命周期总费用

也极为可观，近些年来，更有逐年上涨的趋势。

根据国外有的统计，以下各类装备的使用维修费用各占其全寿命费用的比例为：

典型战斗机	50%~70%
战 车	80%
驱 逐 舰	60%~75%

实践证明，修复对于生产的运转和恢复以及保持部队战斗力是极其重要的，不仅可以恢复和提高零件的性能，而且可以大大节约费用。例如，采用等离子喷涂技术修复化工系统醋酸泵密封环和轴套，使用寿命比一般不锈钢零件提高 10 倍以上；采用喷涂技术对水轮机过流部件进行修复，其抗气蚀和冲蚀能力显著提高，经 6 个水电站 10 台机组 3 年多时间的考核，证明过流部件的寿命提高了 3~5 倍，直接经济效益达百万元以上；装甲兵工程学院应用等离子喷涂技术修复 242 件坦克零件，装在 6 台坦克上进行 12 000km 实车考核试验，证明修复件寿命比新品提高 1.4~8.3 倍，其修复成本仅为新品价格的 10%~12%。修复还在恢复和改造大型、重型、精密设备，尤其在进口设备方面，取得了十分突出的成效。北京首钢从比利时引进二手连铸设备，以废钢铁价格购进，其中有 300 多件大轴承座和轧辊，经刷镀修复或改造，已在生产线上正常使用；唐山水泥机械厂由德国进口的 6.3m 立式车床、天津石油化纤公司由日本进口的 5.7m 连续缩聚搅拌釜主轴、齐鲁石化公司由日本进口的 328 块汇流铜排、燕山石化公司由日本进口的聚丙烯造粒机组主减速箱、平圩电厂由美国进口 60kW 汽轮机等大型进口设备采用刷镀技术进行修复，均具有重大的经济效益，不仅解决了国家重点工程的急需，而且节约了大量外汇。

所以，修复不仅是恢复设备（装备）运行（作战）效能的重要手段，而且可以提高设备的效能和节约费用。修复作为一项对未来的投资，是唯一可以替代重新购置或制造的方法。因此，修复是维修工作的重要内容，它是企业生产力和部队战斗力的重要组成部分。

1.2 修复工程学的特点

修复工程学是维修工程学的重要组成部分，它是研究机件失效后修复理论及工艺的工程应用型学科，也是一门多学科的边缘学科，要涉及到诸如：金属材料学、陶瓷及高分子材料学、焊接学、胶接学、冶金学、电化学、应用力学、摩擦学、腐蚀防护学等。修复工程学也是一门新的技术学科，其理论基础应该包括：应用力学、材料强度理论、失效分析理论、各种修复工艺理论等等。修复工程学是一门实践性极强的学科，除了理论之外，不同机件的修复实践，即工艺技术，也是十分重要的。

严格来说，修复的基础理论首先应当包括设计、制造的基础理论。此外，还有设计、制造中没有涉及到的内容。为避免不必要的重复，本修复工程学的基本内容仅取后者，即包括一些直接与失效、修复有关的理论和实践。

1.2.1 应用力学理论

应用力学中最重要的是断裂力学。断裂是机件失效的最严重的一种形式。断裂之所以会发生，都源于机件表面的裂纹。在大多数情况下，裂纹的出现就预示着机件的失效或即将失效。修复不仅要去掉裂纹，还要恢复裂纹区的强度。因而，了解裂纹对各种机件的作用就显得非常重要。断裂力学就是从机件中出现宏观裂纹这一事实出发，利用线弹性力学和弹塑性力学的分析方法，对机件上的裂纹进行理论分析和研究的一门学问。通过断裂力学的分析，可以把机件上出现的裂纹的大小和机件的性质、状态及受力大小定量地联系起来，从而对出现裂纹的机件的安全性和剩余寿命给出定量或半定量的估价，以确定修复的必要性和紧迫性。在受力一定的条件下，不同的材质对裂纹的敏感性是不一样的，有的材料很短的裂纹就可引起断裂；有的材料较深的裂纹也不会引起断裂。掌握了断裂力学，就会对机件的失效做出正确的判断。

此外，对于修复后的机件也可依据断裂力学对修复质量进行评估。例如，采用堆焊进行修复后，应了解堆焊区的受力以及产生裂纹后造成断裂的可能性。对于那些关键机件即断裂会造成重大事故的机件，修复后的可靠性也必须认真地用断裂力学进行校核。

1.2.2 材料强度理论

材料强度的基本理论是材料的强度、塑性和韧性的理论。材料的这三个性质不仅是一个力学概念，还是一个材料学的概念。这三项指标是用力学量纲标注的，数值的大小是通过力学试验和计算得来的，但是掌握材料的成分、组织、结构对这三个指标的影响是材料强度的核心。在许多情况下，这三个性能都存在一定的相关性，即某一性能的提高会引起另外两个性能的降低，因此对于修复件，也要确定强、塑、韧的合理配合，以此保证修复的高质量。例如，修理一个模具，提高修复层的硬度是重要的，但如果一味追求硬度，韧性太小，即脆性太大，对于那些承受冲击的模具，修复层会很容易脱落或破碎。强度理论包括静强度和动强度，动强度更为重要。疲劳强度是动强度的重要内容。对于那些承受循环载荷的机件，即会产生疲劳的机件，修复时必须保证修复后的机件的疲劳寿命，因而对疲劳强度理论也应掌握。此外，材料学中关于材料强化的途径已经有了大量的研究，了解这些途径对于选择修复工艺、材料、提高修复质量都是有益的。

1.2.3 失效分析的理论 and 实践

失效分析是修复工程学中的一项重要理论和实践。了解失效的原因，才能采用正确的修复措施。机件的失效跟机件的设计、选材、制造和使用维护等过程密切相关，通过失效分析找出真正的失效原因，可以把信息返回上述各环节。但是，对于修复工作者，也可以针对失效的原因，在修复中采用正确的设计、材料和工艺，以使修复件的耐用度赶上或超过原件。例如水轮机过水部件的迎水部位产生的损坏，是由于水中的泥沙冲蚀，修复

时的覆层，必须采用防冲蚀性好的覆层及工艺；而背面的损坏，多是气蚀，修复时必须选用耐气蚀的材料及工艺。如果不针对性地采取措施，就不能获得良好的修复效果。

机器零件丧失所规定的功能称为失效。失效大致可分为三种形式：①完全丧失功能，如机件的断裂；②功能降低，达不到原定的设计指标；③失去可靠性和安全性，例如，转子轴产生微小的裂纹，虽可正常运转，但随时都有断裂的可能。

1.2.4 修复工艺技术

各种修复工艺，尤其是一些现代修复技术的基本理论和实践是修复工程学的核心内容。科学技术发展到现在，对机械设备的维修都提出了很高的要求，仅靠传统的修复工艺、修复工作者的经验是远不能满足要求的，修复工程学必须把分散于多个学科领域的、可用于修复的工艺理论和技术介绍给读者，遇到不同的修复问题时，能择优选择处理的工艺和方法。

修复工程学是一门技术学科，实践性非常强。然而，机件的种类千千万万，失效的方式又多种多样，不可能一一介绍。但是，为了让读者能真正掌握该门学科，书中尽可能给出了一些实例，这些实例可以增强读者对修复过程技术的掌握以及提高其解决实际问题的能力。

1.3 修复工程学的发展与教育

1.3.1 修复工程学的发展

修复一直是设备维修的重要内容，但人们总把它当作一种技艺，是靠传统的技术，靠维修人员的经验，靠师傅带徒弟来解决问题，很少有人把它当作一门学问来研究。随着科学技术的发展，设备结构越来越复杂，自动化程度越来越高。设备损坏后的修复，单靠一般的技艺是修复不了的，修复人员必须具有很高的文化素

质、熟悉设备的结构原理、会运用多种先进的检测设备、掌握先进的修复技术和工艺才能对设备实施修复；另外，由于先进设备造价十分昂贵，而修复的成本仅为生产成本的几十分之一，因此，修复是节约经费，避免浪费的重要举措，所以，对大型、复杂的设备来说，那种一次性使用、损坏后就报废的设计是愚蠢的设计。因而，修复技术的研究引起了人们的高度重视。1974 年，“维修工程”被联合国教科文组织正式列入技术学科目录之中，表明维修科学作为一门科学得到了世界公认。欧洲维修界成立了“欧洲维修团体联盟”，每两年开一次学术会议，专门研究设备维修的理论、技术和策略等问题，世界许多国家的维修界都派代表参加，成为世界性维修工程界的盛会。美国把修复技术看作是投资少、污染小、效率高的绿色再制造技术，已形成了一种新的产业，不仅解决了几十万人的就业问题，而且产值达几百亿美元。半个世纪以来，修复技术有了巨大的发展。从技艺成为一门学科，从生产的从属地位成为社会经济中的重要支柱产业，从设备的后期作业成为一项系统工程，这是社会发展的需求的牵引和科学技术发展的必然结果。

1.3.2 工科大学生的修复工程教育

大学的工科课程几乎都没有认真地考虑过修复问题。工业生产中实际发生的修复业务，都是由经验丰富却没有学位的工程师或工人来处理。由于这些人缺乏正规的教育，不懂得各种修复的基本知识，因此不能进行高水平的维修工作。即使维修经理是大学毕业的，一般也只能按说明书从事修理，而机器的设计者一般又缺少使用经验，而且从用户得到的反馈也少，故制定的维修说明也不一定合理。近来，有人对澳大利亚一所大学机械工程毕业生做了一次调查，大约有 40%~50% 的人在毕业后 5 年所做的工作都和维修有关，但他们均未受过这个领域的正规教育。澳大利亚工程师协会就开设了维修课程，并作为机械学位教育的一门必修课；在瑞典的郎德大学也开设了维修课；在鲁列亚大学，质量