

主办单位

- 中国科协学会工作部
- 中国科协普及工作部
- 中国科协继续教育中心
- 中央电视台
- 中国质量管理协会
- 中国电子学会
- 中国仪器仪表学会
- 中国通信学会

盛志森等 编著

可靠性物理

人民邮电出版社

《可靠性工程与管理》电视讲座和函授班教材 四

主办单位

中国科协学会工作部	中国科协普及工作部
中国科协继续教育中心	中央电视台
中国质量管理协会	中国电子学会
中国仪器仪表学会	中国通信学会

可靠性物理

盛志森	杨家铿	郑廷珪	虞亮	编著
王锡清	杨晋泰	禹航林	许康	

人民邮电出版社

登记证号(京)143号

内 容 提 要

本书是《可靠性工程与管理》电视讲座和函授班教材之四。书中系统介绍可靠性物理的基本概念,失效物理模型、失效分析程序、方法与手段、半导体器件、电容器、电阻器、接触元件的失效模式、机理与分析、加速试验等。

本书适于可靠性与质量管理人员学习,也可供大专院校工程与管理专业的师生参考。

· 可 靠 性 物 理

盛志森 杨家铨 郑廷珪 虞 亮 编著
王锡清 杨晋泰 禹航林 许 康

*

人民邮电出版社出版
北京东长安街27号
北京广益印刷厂印刷
人民邮电出版社发行

*

开本: 787×1092 1/16 1988年12月第一版
印张: 9¹⁰/16 页数: 77 1993年1月北京第2次印刷
字数: 237千字 印数: 12 001—17 000册

ISBN 7-115-03811-2/Z·132

定 价: 7.00 元



《可靠性工程与管理》电视讲座和函授班

主办单位

中国科协学会工作部 中国科协普及工作部
中国科协继续教育中心 中央电视台
中国质量管理协会 中国电子学会
中国仪器仪表学会 中国通信学会

教育委员会

顾问:

盛树仁 高镇宁 宋季文 刘 恕
张五球 叶柏林 陈保定 马怀祖

主任委员:

宋直元

副主任委员 (以姓氏笔划为序):

丁俐丽 牛田佳 邓震垠 (常务) 朱玉龙
成银生 李传卿 陆廷杰 罗国英 林振申
苑郑民 钟 良 (常务) 魏学兴

委员 (以姓氏笔划为序):

马 林 马桂夫 么子臣 王圣媛 王相龙
宁云鹤 史定华 汪元江 刘宗仁 过元柄
庄异君 陈 刚 陈章豹 牟致忠 何国伟
郎锋军 杨为民 周 济 周维田 杨定亚
林中强 单永铮 茆侍松 陆洪时 徐运忠
张庆龙 殷鹤林 程光辉 傅光民 裘履正

承办教学单位

上海电子学会可靠性与质量管理专业委员会
上海第二工业大学
中国电子产品可靠性与环境试验研究所
《电子技术》杂志社

教研组

组长、教育录像和教材主编：

傅光民

副组长：

裘履正

成员（以姓氏笔划为序）：

马怀祖	史定华	许康	庄异君	牟致忠
罗威	林中强	卓礼章	郁时霖	茆侍松
费鹤良	倪正铭	夏春镗		

前 言

可靠性 (Reliability), 是产品的重要质量指标。可靠性高, 意味着寿命长、故障少; 可靠性低, 意味着寿命短、故障多。电视机的平均无故障工作时间, 汽车的平均无故障行驶公里数, 运载火箭的发射成功率等都是产品的可靠性指标。

可靠性工程与管理是 40 年代以来迅速发展起来的新兴综合学科, 涉及数学、物理、化学、电子、机械、环境、管理以及人机工程等各个领域。它致力于研究提高产品可靠性, 包括从原材料、元器件、零部件到整机及系统的各个环节。从研究、设计、制造到使用及维修的全寿命周期, 是一个十分复杂的系统工程。国内外的实践表明, 可靠性工程与管理技术的应用, 为企业与社会带来了巨大的经济效益, 因而引起世界各国的普遍重视与关注, 纷纷投入大量人力物力进行研究和推广应用。产品的可靠性, 已经成为当今国际和国内市场竞争的焦点。

1987 年 9 月, 国家经委、国家机械委、国防科工委、劳动人事部、广播电影电视部、中国科协联合发文决定, 由中国科协、中央电视台、中国质协、中国电子学会、中国仪器仪表学会、中国通信学会联合主办全国性的可靠性工程与管理电视讲座和函授班。中国通信学会为牵头单位, 承担组织工作。上海电子学会可靠性与质量管理专业委员会、上海第二工业大学、中国电子产品可靠性与环境试验研究所、《电子技术》杂志社承办教学工作。聘请上海市第二工业大学可靠性研究室主任傅光民同志、上海自动化仪表研究所高级工程师裘履正同志负责组成教研组, 承担制订电视讲座及函授班的教学大纲, 提出课程设置及详细提纲, 组织编写课本及全套书面教材的工作。经教学双方共同努力, 第一期教学取得了良好成果。

近几年来, 产品可靠性工作开始得到重视和加强, 产品可靠性规划、设计、试验、失效分析、评审、鉴定、指标考核和相应的管理、监督逐步开展, 特别是国标、行(部)标和产品质量分等标准中对产品可靠性作为限期必须考核的项目实行以来, 机电产品质量有了一定程度的提高。但是, 发展极不平衡, 我国产品与工业先进国家的同类产品相比, 仍有较大差距。开展可靠性工作要从人才培养入手。为了进一步在全国范围培养大批可靠性工程技术人员和可靠性管理人才, 促进可靠性工作的全面开展, 大幅度提高我国产品可靠性质量, 1992 年 9 月, 人事部、中国科协、机械电子部、国防科工委、广播电影电视部、航空航天部、邮电部、国家技术监督局联合发文决定, 由中国科协学会部、普及部、继续教育中心, 中央电视台和上述四个全国性学会(协会)联合主办第二期可靠性工程与管理电视讲座和函授班。中国通信学会为牵头单位, 承担组织工作。为了加强组织领导, 聘请国家计委、国务院电子信息推广办公室、上述发文单位、主办单位和有关院校、科研院所、企业等单位的领导干部、专家、学者组成可靠性工程与管理电视讲座和函授班教育委员会(第二届)。教学承办单位、教研组负责人同上届。

联合发文指出: “提高产品质量, 是国民经济和社会发展的一项长期战略任务, 在加快改革开放和经济发展的新形势下, 尤为重要。提高产品可靠性是提高产品质量和提高产品社会、经济效益的基础, 也是繁荣市场, 促进出口, 保证产品上台阶, 在商品竞争中赢得主动

权的必要条件。”“各级经济管理部门，各有关部门，各企业和相关的科研、设计、生产、监督、试验、使用、维修等部门，应当把可靠性技术培训列为专业技术人员和管理人员在职教育和岗位培训的一个重要内容，要充分利用举办电视讲座和函授班的有利条件，结合实际情况组织本系统本地区有关人员积极报名参加学习。已经建立继续教育登记制度的单位，可将参加本次教学的学员考试成绩登记入册。并将这次培训作为考核审查可靠性工作开展情况的一个方面的依据。”

根据岗位培训的实际需要，教学分设管理班与工程班。管理班学员是有关企业、研究所以及主管部门的领导干部与管理人员。学员应收看中央电视台第一套节目播出的22集电视教学片（每集50分钟），自学《可靠性工程与管理电视讲座教材》、《可靠性管理》一书；工程班学员是工程技术人员及可靠性与质量管理工作人员。学员除收看电视讲座，学习《可靠性工程与管理电视讲座教材》、《可靠性数学》、《可靠性物理》、《可靠性管理》外，选学《可靠性设计》、《锡焊技术与可靠性》、《可靠性试验》、《环境试验》、《机械可靠性》等五门课程中的一门。《可靠性教学辅导教材》作为参考。

教学认真贯彻理论联系实际、学以致用方针，注意系统性、实用性，着重阐明物理概念，给出定性分析、定量计算方法及运用实例，避免繁琐的数学推导。内容以民用电子设备为重点，讲授可靠性通用技术，兼顾仪器、仪表、通信、航天、航空、轻工等系统的部分应用实例。通过电视讲座及函授学习，可以帮助学员了解可靠性工程与管理的发展历史与重要意义；掌握可靠性工程与管理的主要工作内容及本岗位的可靠性技术（可靠性设计、制造、试验及管理）；了解部分企业、研究所行之有效的实践经验；从而提高可靠性工程与管理技术水平，提高产品可靠性。为此，教材请国内有较丰富工程与教学实践经验的同志编写，总结国内外富有成效的可靠性工作案例，参考国内外可靠性书刊及论文，有较广泛的适用性和较高的实用性，可作为在职可靠性岗位培训的教材，也可作为大专院校可靠性与质量管理专业的参考教材。

在教材编写与出版以及电视教学片摄制过程中，得到中央有关部委、有关全国性学会（协会）、上海及各地工厂企业、研究所、大专院校、人民邮电出版社等50多个单位200多位同志的大力支持、指导和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

由于时间紧迫，工作量很大，组织编写、摄制系统性的可靠性教材及电视教学片尚属首次，缺乏经验，不妥之处，敬请读者批评指正。

可靠性工程与管理电视讲座和函授班教育委员会

1992年9月

编 者 的 话

本书是《可靠性工程与管理》电视讲座和函授班教材之五。主要是为从事电子产品设计人员进行可靠性设计方面的在职教育和岗位培训之用。

可靠性设计是可靠性工程的主要内容。产品的可靠性主要是由设计所决定，所以可靠性工作必须从设计抓起，设计人员必须补上可靠性设计这一课。

根据《可靠性工程与管理》电视讲座和函授班教育委员会的教学方针，本书以民用电子产品为重点，兼顾工业和国防电子设备与系统，贯彻理论联系实际，学以致用方针。全书着重讲授可靠性设计技术的应用，扼要讲授可靠性设计的理论知识。使读者通过对本书的学习，能基本掌握可靠性设计的一般方法。本书吸收了目前国内外出版的有关可靠性书刊文献、培训班讲义和可靠性标准中的部分内容，也有相当部分是作者多年来从事可靠性工程的现场实践、应用实例和可靠性教学工作的总结。

本书经倪正铭、周元初两位同志审核，并提出了许多宝贵的意见，最后经教研组长、教材主编傅光民同志审定，特此表示衷心感谢。

由于可靠性设计技术正处在发展之中，加之作者水平的限制，成书时间的仓促，谬误之处在所难免，祈请广大读者给予批评指正。

作 者

1988年2月于上海

目 录

第一章	可靠性物理的基本概念.....	(1)
第二章	材料的结构、应力与失效.....	(5)
第三章	失效物理模型.....	(18)
第四章	失效分析技术与设备.....	(18)
第五章	半导体器件的失效机理与其分析.....	(27)
第六章	电阻器的失效机理与分析.....	(45)
第七章	电容器的失效机理与分析.....	(63)
第八章	接触元件的失效机理与分析.....	(87)
第九章	加速试验.....	(122)

第一章 可靠性物理的基本概念

1.1 失效及失效物理的含义

产品丧失规定的功能，通常叫失效。对可修复的产品，如无线电整机和某些机电组件，也可使用故障这一名词。为叙述方便，本书统称为失效。

产品的失效，不仅指致命性的破坏或完全丧失功能，也指功能退化或特性降低到不能满足规定的要求。因此，判断产品的失效就必须首先确定其失效判别标准（也叫失效判据）。标准不明确，会造成生产检验上、供需方验收上及维修服务等方面的混乱和分歧。

导致电子产品的失效原因是多种多样的：有因零部件本身的缺陷造成的，有因系统、电路设计不当或装配欠佳造成的，也有因人为使用不当与差错造成的，等等。但无论何种原因，都有一个共同点，即来自环境条件和工艺条件的能量积聚，一旦超过某个限度，产品便开始劣化，并最终导致失效。这类劣化的诱因——环境条件、工艺条件等，一般称为应力。应力只是诱因；产品总是经过一段时间的演变后才失效，因此，时间的因素也不可忽视。

上述应力和时间是产生失效的外因。而失效的内因，即导致发生失效的物理、化学或机械的过程，则称为失效机理。它是从原子或分子学观点来阐明与失效有关的物理、化学过程的。产品失效的方式、形态、现象，称为失效模式。如果拿疾病来作比喻，失效模式相当于症状，而失效机理则相当于病理。研究失效机理及其与应力、时间的相互关系的科学称为失效物理学，简称失效物理，现已改称为可靠性物理。

1.2 失效的分类

根据不同的划分标准，电子产品的失效分类有多种多样。如按失效发生的场合划分，可分为试验失效和现场失效，后者又可分为进仓失效（Dead-on-arrival或DOL）、调试失效和运行失效等；按失效的程度划分，可分为完全失效和局部失效，或者称严重（或致命）失效和轻度失效；按失效前功能或参数变化的性质划分，可分为突然失效和退化失效；按失效排除的性质划分，可分为稳定失效（或称坏死）和间歇失效；按失效的外部表现划分，可分为明显失效和隐蔽失效；按失效发生的起因划分，可分为设计上的失效、工艺上的失效和使用上的失效；按失效的起源划分，可分为自然失效和人为失效；按同其他失效的关系划分，可分为独立失效和从属失效（或称二次失效）；按失效浴盆曲线上不同阶段划分，又可分为早期失效、偶然（或随机）失效、耗损（或老化）失效等等。

现场失效系指产品在现场使用或运行条件下发生的失效。

致命失效系指产品发生诸如开路、短路等以致根本无法工作的完全失效，或指产品的一个或数个基本参数突然变化以致无法工作之类的失效。

退化失效系指产品的一个或数个基本参数逐渐发生退化性变化直至达不到规定要求而失效。诸如半导体器件的电流增益、反向漏电的超差，金属化互连的腐蚀或电迁移等。

间歇失效系指产品在试验或使用过程中呈现时好时坏之类的失效。例如，在半导体器件的金—铝互连系统中，当形成金属间化合物而接触不良时，或由于封装欠佳而引起接触时断时通的现象，都是一种间歇失效。又如管壳内混有不固定的导电微粒，振动时可能会引起瞬间短路。此外，某些元器件表面沾污引起的瞬间短、断路以及一般的虚焊，也可属于间歇失效。

人为失效系指由于人为的误用、误操作所引起的产品失效。

从属失效系指系统中因某一零部件失效而引起其他相关联的零部件的失效。例如，某一电容器本身工作时没有失效，但因电路中其它部分故障而使得加在电容器两端的电压大大超过其额定值，以至被击穿损坏，即为从属失效。为此，对系统的关键部位，应在线路设计上采用预防保护措施。

早期失效系指产品由于设计、特别是工艺制造上的缺陷等原因，导致其在开始工作后的较短时间内就发生的失效。电子元器件和整机一般都有一个早期失效期，出厂前如能进行某些有针对性的筛选、老炼，则早期失效现象可以大为减少。

偶然失效系指产品由于偶然（随机）的因素而发生的失效。经过早期失效期后，产品进入偶然失效期（即正常工作寿命期）。与早期失效期的失效率相比，偶然失效期的失效率较低，且接近于常数。

耗损（老化）失效系指产品由于老化、疲劳、磨损等原因引起的失效。经过较长的偶然失效期后，产品进入使用的后期，即耗损失效期。在这个时期，失效率随时间而迅速增加。

1.3 可靠性物理学发展简史

50年代，可靠性技术发展初期，对产品只注重统计试验，以此来定量地掌握产品的可靠度。这种试验本身并不能提高产品的固有可靠性。到了50年代后期，由于空间技术的迅速发展，复杂的电子系统要求具有很高的可靠性，这就迫使人们要从根本上迅速提高电子产品的固有可靠性。这样，在研制及生产产品时，为缩短试验时间和减少样品数量，创立了许多模拟的加速试验、筛选试验方法，并对其中的失效产品进行机理分析，以求在设计、生产工艺和材料等方面加以改进，提高其可靠度。60年代前后，半导体器件发展很快，未知的失效原因很多，且与物理学关系甚为密切，“失效物理学”从此应运而生。美国“民兵—II”导弹发展计划及此后的“阿波罗”登月计划是可靠性技术、可靠性物理及可靠性管理的首次大演习、可靠性物理由此而大发展，从而开创了可靠性技术发展史的新阶段。

从事可靠性物理研究的专家开始主要是从事整机研制以及部分元器件设计、生产的技术人员。由于失效机理分析要涉及到材料学、物理学、化学、冶金学等专业，并要广泛地应用到理化分析仪器，因此，现阶段分析技术专家的知识面已大大扩展。可靠性物理学已成为一门新兴的边缘或交叉学科。

1962年9月,美国空军所属罗姆空间发展中心(RADC-USAF)和美国伊利诺斯州立工学院联合召开了第一届“电子学失效物理讨论会”,与会者350人。会上罗姆中心人员介绍了他们在可靠性和失效物理方面的研究规划。这是“失效物理”作为一门新学科而首次被正式提出。1965年第四届讨论年会上有美国以外的学者参加,并开始用先进的分析设备来作失效分析。

从1967年的第六届讨论年会起,由美国电气与电子工程师协会(IEEE)的电子器件分会与可靠性分会主办,每年举行一次年会,并更名为“国际可靠性物理讨论会”,出版年会论文集。从每年年会发表的论文内容来看,该讨论会的重点是半导体器件,尤其是大规模集成电路的失效分析;除对失效机理的探索外,趋于转向研究产品的可靠性设计及新的加速试验方法和分析技术。

美国还有一个“失效分析先进技术年会”(ATFA),1975年的第一届年会是由IEEE的洛杉矶分会和国际金相学会联合主办的。自1980年起改名为“国际失效分析与试验年会”(ISTFA)。主要内容是新的分析技术在电子元器件研究中的应用。

与其他的可靠性技术一样,这个在美国首先创立和发展起来的可靠性物理学,很快就在世界各国得到发展。自1962年以来,国际上失效物理的研究异常活跃,且不断有所创新,诸如失效物理模型、失效预测技术等。在交流利用成果上,除各种学术会议外,各国的可靠性数据交换中心都收集了各种电子产品的失效模式和频度等资料,并在出版物中集中列出。失效物理研究对于提高元器件的可靠性、改进筛选等可靠性试验方法以及可靠性预测等大有用处。今天,可靠性技术已发展到可靠性保证阶段,把失效物理的研究成果,具体应用到包括系统在内的设计及其可靠性与质量保证体系中去。也许正是从这个意义上,人们才把“失效物理”改称为“可靠性物理”的。这样,失效物理研究就从一般的“事后分析”转向更为积极、主动的“事前分析”,即在产品的计划研制、开发阶段,通过小子样在高应力的加速试验下进行失效分析,找出导致将来产品不可靠的主要失效机理及其与产品特性、应力和时间的定量依赖关系,并据此确定相关的可靠性模型和基础规则(其中包括工艺制造容差及预防、监控措施),作为产品设计规则的一部分。设计并改进产品,这也是近几年提出的“设计可靠性”(Designed-in Reliability)的基本含义。

我国自60年代初建立电子产品可靠性专业研究所以来,一方面报道和引进了国际上的先进的可靠性技术(包括可靠性物理),另一方面对国产的电子产品进行了大量的可靠性试验研究工作。70年代起,在科学院系统,各工业部门的厂、所及高等院校,先后配备了较先进的分析设备,逐步开展了失效机理的分析研究工作。1979年,中国电子学会成立了可靠性与质量管理专业学会。该专业学会设立了可靠性物理学组,以促进和开展可靠性物理方面的研究和技术交流。

1.4 可靠性物理研究的基本内容及意义

研究的基本内容和方法,大致包括以下几方面:

(1) 可靠性试验,即通过有关试验,研究产品发生失效的场所、阶段、应力、时间、参数变化等(外部观测性分析)。通常把重点放在小子样、短时高应力即加速试验;对大规模、超大规模电路(LSI、VLSI)更需要在一些简单的测试结构或TEG上进行;

(2) 失效机理分析, 即找出失效的真正因子、效应过程及其关联症状 (内部微观观察)。要力图从构成产品诸材料的原子、分子一级出发来阐明所发生参数退化、失效的具体物理、化学过程的本质和起因;

(3) 可靠性特征确定, 即利用现有的理论知识和实际经验把所观察到的失效模式同上述失效机理联系起来, 并通过有关的失效物理模型及概率分布把产品的可靠性特征量 (例如失效率) 及其时间分布同失效机理联系起来, 提供同特定产品的可靠性特征相关的外形、结构、化学和冶金学等特征;

(4) 反馈与纠正, 即将上述研究结果反馈到设计、制造、试验、贮运、使用和维修等有关部门, 以便迅速采取纠正措施予以改进、提高, 并对可靠性进行快速评估和预测。

总起来讲, 可靠性物理研究的目的在于:

- 为产品的可靠性设计提供有关改进设计、工艺、用料及管理的第一手资料;
- 为拟定产品的工艺质量控制和可靠性控制 (包括检验、筛选、加速寿命试验、非破坏性检测等) 提供依据;
- 在短时间内为产品的短期和长期可靠性作出评价;
- 为产品的可靠性预测和降频使用以及FMECA、FTA、可靠性增长等提供基本数据;
- 促进新产品、新材料、新工艺和新技术的开发。

第二章 材料的结构、应力与失效

进行产品失效机理分析,必须具备较广泛的物理、化学及材料力学等方面的基础知识。电子元器件由各种材料组成,其性能各异,在不同环境及工作条件下,它们的失效情况及与时间的关系千差万别。因此,有必要广泛了解材料的结构性质、应力与失效之间的关系。

2.1 材料结构与性能

自然界大多数的固态物质是晶体。有些是单晶体,而多数是多晶体。前者如蔗糖、食盐等;后者如冰块、金属物体等。另有一类固体物质既无一定外形,也无确定的熔点,称为非晶态物质或无定形物质,如玻璃、沥青、蜂蜡等。

2.1.1 材料结构的敏感性

反映固体材料性质的参数,在结构上大致有钝感和敏感之分。凡宏观性质上不受内部结构的微小差异所影响的叫做结构钝感性,如比重、弹性系数、比热、热膨胀系数、折射率等。凡具有易受内部结构微观变化(杂质、晶格缺陷、裂纹、位错等)所影响的性质叫做结构敏感性,如屈服应力、塑性形变、断裂、电导率及磁性等。结构敏感性是导致发生退化、失效的主要因素,失效往往是由结构上最薄弱的环节引起的。

结构位错是纳米(n 或 $10^{-9}m$)级的缺陷,微裂纹是微米(μm 或 $10^{-6}m$)级的缺陷。元器件材料的退化总是先从极小的微观部分开始,而性能测量数据却是代表整体的,不能把握微观的变化状态。因此,为了预防致命失效的突然发生,对于元器件材料的特性值,要从失效物理角度加以充分研究,以便选择出那些对退化敏感的、能预测其将来会失效的参数。此外,还要努力寻求新的观测手段。

2.1.2 晶体结构与性能

分子或晶体所以能稳定存在,是因为原子间有相互作用。这种作用有主次之分,当相邻的两个或多个原子之间存在着主要的和强烈的相互作用时,它们之间就形成了化学键。化学键的强弱用键能表示;键能越高,化学键越强,分子越稳定。化学键的键能与键型是决定物质性质的关键因素。分子与分子间还存在着一种较弱的相互作用,通常叫做分子间作用力或称范德华引力。气体分子凝聚成液体和固体主要靠这种作用力。分子间作用力的大小也不同程度的影响着物质的物理化学性质,特别是决定着物质的熔点、沸点及溶解度等性质。表2—1

列出了晶体的上述作用及与宏观物质的物理化学性质之间的关系。

表2—1

晶体结构与性质对比

结构和性质	离子型晶体	原子型晶体	分子型晶体	金属型晶体
化学键类型	离子键	原子键 (非极性共价键)	分子间力 (范德华引力)	金属键
典型实例	NaCl	金刚石、Si	冰(H ₂ O)、干冰 (CO ₂)	各种金属与合金
硬 度	略硬而脆	高 硬 度	软	较高硬度
熔 点、沸 点 挥 发 性	熔点较高, 沸点高, 挥发性一般较低	熔点、沸点高, 无 挥发性	熔点、沸点低, 高 挥发性	熔点、沸点一般较高, 但 也有部分金属熔点低, 如 Ga、Hg等
导 热 性	热的不良导体	热的不良导体	热的不良导体	热的良好导体
导 电 性	固态为不良导体, 溶化 后或溶于水后能导电	通常为不良导体。Si 有条件地导电	非 导 体	良 好 导 体
机 械 加 工 性	不 良	不 良	不 良	良 好

2.1.3 晶体缺陷

在实际晶体中, 或多或少地存在某些偏离理想结构的区域, 称为晶体缺陷。

晶体缺陷对金属的许多性能有着极重要的影响, 与晶体的凝固、扩散等过程有很大关系, 特别是对塑性变形、强度和断裂等起决定性的作用。

假设就无缺陷的理想金属晶体计算其剪断应力, 将会发现其强度比实际晶体约大1000倍, 拉伸强度也是这样。美国贝尔电话研究所在调查海底电缆增音机故障原因时意外地发现了完善的晶体, 它是自电缆铜线接头部位生长出的细锡结晶, 其强度为普通锡的1000倍。在发现这种猫须状晶体后, 人们又找到了若干种金属须。不过, 其直径仅1 μ m左右; 若大于1 μ m, 则缺陷增加; 如果达到1 mm, 其强度便大大下降。

现实的材料是非平衡的有缺陷的结构, 而晶体缺陷又不是静止、稳定地存在着的, 它们可以随条件的变化而产生、发展、运动并相互作用, 有时会合并或消失。

晶体缺陷按几何形状可分为点缺陷、线缺陷(位错)、面缺陷(如堆垛层错等)。这些缺陷对材料的性能产生重大影响, 可以通过显微术直接观察到这些缺陷, 以便进行有效的分析。

2.1.4 扩 散

物质在物体内部的迁移叫做扩散。金属中的扩散是原子依靠热运动从一个平衡位置到另一个平衡位置的迁移过程。这种迁移并不是自由的, 而是一面和近邻的原子、粒子相碰撞, 一面产生相对运动。金属及合金的许多性质, 特别是高温下的性质, 如凝固、相变、蠕变、再结晶、氧化、烧结、均匀化退火及化学热处理等, 与扩散现象密切相关。

固体金属中的原子有四种不同的扩散途径: 体扩散(晶格扩散)、面扩散、晶界扩散及位错扩散。实际上, 这四种扩散是同时进行的, 大体上有相似的规律, 但体扩散是最基本的

扩散过程。

单位时间内扩散通量的大小（扩散速度的快慢）取决于扩散系数D和浓度梯度。浓度梯度取决于客观条件，因此在一定的条件下，扩散的快慢主要取决于扩散系数。

扩散系数与温度、扩散激活能等有关：

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

式中， D_0 为扩散常数（又称频率因子）

R为气体常数

E_a 为扩散激活能，表示原子扩散时需要的能量

T为绝对温度。

凡能改变扩散常数 D_0 和扩散激活能的因素均影响扩散系数，而温度则是影响扩散系数的主要因素。温度越高，原子的能量越大，越易迁移，扩散系数就越大。由于扩散系数随温度升高而成倍增大，所以通过调节温度可以有效地控制渗杂层深度。

金属原子在晶界上的扩散要比在晶粒内部快得多。这是由于晶界处点阵畸变较大，原子处于较高的能量状态，易于跃迁。晶界扩散激活能（ E_{gb} ）比晶体内扩散激活能（ E_v ）小得多，使扩散有结构敏感性。

原子沿金属外部表面的扩散比沿晶界的扩散速度还要快。例如，银的表面扩散激活能是晶界扩散激活能的1/2，是体内自扩散激活能的2/9。

上坡扩散是指由浓度低处向高处扩散，使固溶体浓度出现不均匀。

在化学热处理时，扩散可改变金属表层的成分。当溶质原子在表面的浓度超过其溶解度极限时，可析出化合物或发生组织变化，使表层分成两层——析出化合物层和未析出化合物层。这种伴随有析出化合物或有相变过程的扩散称为反应扩散或相变扩散。反应扩散的速度，取决于化学反应和原子扩散两个因素。

2.1.5 材料的形变与破坏

材料往往要经受拉伸、弯曲、扭转、压缩等作用。在自然界里，有像石膏那样极易破碎的脆性物质；也有像橡胶那样拉伸度大、直至断裂前仍处在弹性范围内的物质，还如金属类物质，它们遵循虎克定律，有弹性区域，一旦超过此区，再行拉伸就会导致因超过其最大强度极限而发生塑性变形乃至最后断裂。

在应力不变的情况下，材料往往会随时间逐步缓慢地变形，这样的形变叫蠕变。这类形变随应力、温度的增加促使破坏程度加剧。它们之间的关系服从于阿列里乌斯反应速度公式、拉松—密勒公式 $T(C + \ln \dot{\epsilon}) = f(\sigma)$ 和道尔松—渥特曼关于蠕变速度的经验公式 $K = \dot{\epsilon} = C\sigma^n e^{-(E_0/RT)}$ （ $n \approx 5$ ， E_0 约等于材料自扩散的激活能）。

蠕变，有一次、二次、三次蠕变之分。这些不同阶段的蠕变，乃是加工的硬化和软化（由于位错滑移、空间扩散恢复过程所引起的）两者互相平衡的结果。在一次蠕变中，硬化的比率增多，软化的比率减少；而在二次（常态）蠕变中这两者大致相等。对于三次蠕变，由于晶粒交界处有裂缝、材料形变呈蜂腰状等缘故，促使氧化速率增加，伸长率增大，以至最终发生断裂。

若对材料（如电线）施加循环变化的机械应力，便会发生因疲劳而导致的断裂。即使循

环境变化应力比起静载荷的断裂应力来得小，且还在弹性极限之内，也往往会使材料破坏。影响疲劳寿命的因素，除材料组分外还有试样的形状、表面处理和加工条件等。疲劳损坏本质上是塑性形变的结果。另外，不单是机械应力，热循环应力同样也会引起疲劳损坏。

断裂，作为一个结构敏感的物理量，其发生的形式依固体的内部或外部状态、载荷、环境及经历等有所不同。若按应力施加方式分类，则有象拉伸一类的静断裂，由循环应力引起的疲劳断裂，由冲击应力引起的冲击断裂，以及由长时间加固定应力而产生的蠕变断裂等。此外，还有不是因塑性形变引起的，而是由裂纹以近似于音速急剧扩展所致的脆性断裂，以及在塑性形变相当大之后，由于塑性形变的能量促使裂纹渐渐扩展而造成的粘性断裂（即延展性断裂）。还有经历一段时间后发生的滞后断裂。如在水分多的地方放置着施加外力的金属，在端头钩形部分便产生应力集中、氧原子集中，进而脆变损坏。滞后的时间是度量的依据。

由于强度是个结构敏感的量，因而断裂也与空间、时间有关。假如认为裂纹是由微小缺陷发展成的，那么对应于这样的发展过程，断裂则可用最弱环（最大缺陷）模型、反应论模型或泊松分布等寿命分布来描述。

2.2 环境应力与失效

当今，电子产品的应用范围和使用场所，已经遍及到人类可以直接或间接活动到的所有领域。电子产品（包括整机及元器件）从生产出来，经库存、运输到交付使用，每时每刻都在经受各种应力的作用，使其物理、化学、机械和电气性能不断发生变化。

作用于电子产品的应力大致可分下列几类：

（1）气候环境应力 包括高温、低温、潮湿、干燥、气压、日光、尘埃、盐雾和风雨等；

（2）机械环境应力 包括跌落、振动、冲击及离心加速度等；

（3）生物及化学环境应力 包括昆虫、霉菌的侵蚀，工业大气如 SO_2 及各种化学试剂和离子的侵蚀等；

（4）电气应力 包括电压、电流、静电感应、电磁场和射线等。

实际上，作用于产品的应力不是单一的，而是多种应力的综合。应力作用所引起的产品性能的变化，在应力作用停止后，有的是可逆的，有的是不可逆的。当性能变化超过产品技术要求所规定的范围时产品就失效了。

图2-1列出了气候、生物等环境应力对电子产品的影响机理。由图可看到，作为直接气候因素的温度、湿度、气压应力及实际的其他各种气候、生物等因素应力，对电子产品的影响错综复杂，许多因素都是同时综合作用于产品的。