

材料与
材料与 设计

工程设计中
材料失效的
分析·预测
和预防

● 杨杰章 糜若虚 等编译

机械工业出版社

本书主要是根据美国麻省理工学院机械系Nam P.Suh教授所著“Elements of the Mechanical Behavior of Solids”（1975年版）和俄亥俄州立大学机械系J. A. Collins教授所著“Failure of Materials in Mechanical Design”（1981年版）两书和其他一些最新发展起来的内容编译而成。全书共分三篇：第一篇为基本原理，阐述固体的宏观力学原理以及微观塑性变形和断裂理论；第二篇为工程材料的力学行为，介绍了疲劳、蠕变、震动和冲击、磨损、翘曲和失稳等内容；第三篇为聚合物及工程陶瓷，介绍了聚合物的粘弹性变形和断裂以及工程陶瓷的寿命预测和最佳设计等。每章都附有习题，以便读者思考和掌握书中的内容。

本书可供工科院校有关专业的研究生和高年级学生作为教学用书，也可作为材料工程人员、设计人员和制造工程师的参考书。

材料与amp;设计

——工程设计中材料失效
的分析、预测和预防
杨杰章 糜若虚等编译

*

责任编辑：仲 晖

封面设计：姚 毅

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）
（北京市书刊出版业营业许可证出字第111号）

河北省永清县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行，新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张32·字数 780千字
1990年4月北京第一版·1990年4月北京第一印刷厂

印数 0,001—2,850 定价 24.40元

*

ISBN 7-111-01618-1/TB·70

8

序

在人类文明发展史中，对材料的知识和使用常被作为进步的标志，这就是为什么历史学家将人类进化的阶段分为石器时代、青铜器时期的原因。

机械工业的进步更是和材料的进步息息相通。没有高强度重量比的材料就不会有今天的航空工业；没有抗一般高温的材料便不会有今天的动力工程；没有抗特高温度的材料便不会有今天的宇航奇迹。反过来说也有很多事物，在理论和概念上完全成熟了，但因为找不到适当材料而无法实施。一个明显的例子便是磁流体发电，理论上是一件非常理想的东西，能将热效率提高一倍，但因为找不到一种能抗足够高温的材料来作电极，因此至今无法用于实际。

由于机械设计制造和材料的密切关系，从事机械设计制造的人员，尤其是设计人员，有一定材料方面的知识是必要的。不幸的是设计和材料两门学科，由于其要求的背景知识相差太远，一个人想兼通二者很难。在金属材料如此，对高分子材料则更是如此。因为使用材料不当，使设计的产品早期失效，不能达到最优性能，甚至不能使用的例子比比皆是。每年因此受到的损失达到惊人的数字。当然使设计失效的因素很多，但选用材料不当则可能占第一位。

对机械工业的从业人员来说，对材料的知识有两个侧面：一是将材料看作各向同性的连续体来研究其受到外力后的应力和变形，这属于弹性力学的范围。经一些简化后形成传统的材料力学。此名称并不合适，因为它很少涉及材料的本质，但对于机械设计却集中了最主要的内容。另一侧面是了解材料的本质、微观结构、处理方法和失效机理。照目前教学内容，这两门课程在大多数学校都有设置。但因为这两门课程的核心相去很远，而又限于时间二者都不能过于展开，所以有趋势形成两个互不连通的孤岛，使学生不知道从一门课学到的知识怎样运用到另一门课去。而且这种影响常常要延续多年。这是教学和学习上必须改革的一个缺点。

本书作者根据十余年来国外教育发展趋势，编译了本书。正好弥补了上面缺失。除了材料的宏观性能外还以较大篇幅论述了材料的疲劳、断裂、弹塑性、弹粘性、表面性能、磨擦性能等。特别是还用较大篇幅论述了高分子材料。将过去所谓材料力学和材料学熔为一体，形成一本对设计和工艺都极为有用的书，使读者眼界扩大，知识融会。从内容看可作为学过材料力学的学生的教科书。但其最大价值在于设计和工艺工作者继续提高的自学读物。相信广大设计者读过本书后眼界会开扩，工作质量也可能大大提高一步。在这方面，作者们对于我国机械工业作了一个很大贡献。

中国科学院工程学学部委员、教授

雷天觉

1988年元月

序

作为工程构件所承受的外力作用，首先要受设计所规范，其次要结合设计的载荷状况分析其失效原因，因此材料与设计就紧密相联，这本书就是在工程设计人员和材料工程人员之间架设桥梁，沟通它们之间的联系，使得在充分发挥材料最优性能的基础上进行设计，使构件在可靠设计寿命下进行选材，两者相得益彰，互为补充。本书从工程的宏观力学到材料的微观结构，从构件的一般力学行为到具体的特殊受载状况，从承载状况到失效条件作了统一的描述。这正是本书的特色之一。

其次，对广大机械工程师来说，本书提供了各种工程材料在各种不同载荷情况下的性能和失效等方面的系统知识，使他们能摆脱过去主要依靠经验进行设计研究的传统，而采用较为先进和精确的计算方法。这是本书的又一个特色。

由中国纺织大学机械系顾克铮教授根据美国工程科学院院士、Illinois大学 (UIUC) 机械系赵佩之教授的建议，邀请国内专家、学者编译的这本书内容丰富、涉及范围广、处理深度亦较大，是有关工厂、大学、研究所、设计院不可缺少的必备参考书，也可作为当前开展继续工程教育的一本较好的教材，希望能对读者有所裨益。

上海市机械工程学会副理事长
兼学术委员会主任
贝季瑶

上海市机械工程学会副理事长
兼培训委员会主任
叶自伟

1988年5月

序

自从执行开放政策以来,我国的社会经济发展进入了一个新的时代,对于机械设计方面的工程技术人员来说,正面对着一个挑战,一方面看到了可以发挥才能大展鸿图的机会,另一方面又面临着国内外市场的严峻的竞争。当前机械产品市场在技术方面的竞争主要表现在要求更高的产品性能,更高的可靠性,更高的经济效益。近年来各方面新技术的发展,都必须充分地利用,才能在这场竞争中取胜。而这里,尤其令人瞩目的是材料科学的大步发展所取得的成就,为机械产品的进一步发展和提高提供了大量的有效的新技术。材料科学近年来无论在理论上,还是新技术上的新发展都已经和必将帮助我们机械设计工作者的设计水平大大提高一步。

本书以数学、力学、断裂力学为基础,将这些基础理论贯穿应用于金属、陶瓷、高分子材料的疲劳、冲击、蠕变等断裂研究之中,并计算其构件的寿命,进行科学的安全可靠性设计,同时又合理而经济地使用材料,这些内容是当前机械设计工作者进行高水平设计所必须的知识。相信这本书的出版会对我国机械产品的更新和向更高水平发展起很大的推动作用。

本书阐述基础理论深入浅出,应用实例简单明瞭,清晰易懂,我读后觉得收益不浅。为此向我的同行——机械工程师们推荐这本书。

我认为杨杰章、糜若虚等编审者们为我们机械工程师编译这本非常有用的书是一个很大的贡献。

同济大学机械学院院长

侯镇冰

1988年元月

编译者的话

现代的机械设计要求设备系统和零件的可靠性、适用性和经济性三者紧密联系。其中可靠性是最主要的，可靠性是衡量系统、工程或产品质量的主要因素，它可定义为：系统、设备、零件在规定条件下和预定时间内，实现指定功能的机率。

随着科学技术的发展，人们要求不断提高设备性能，因此设计者要注意引入新材料以满足高速、高压、高温、重量轻、强度高、体积小、寿命长、消耗低和改进生态相容性的要求。这就迫使设计者必须细心研究材料在工作时的行为，估计真实工作的性质，了解材料失效的原因和多种形式，熟悉不利环境下动载荷所产生的应力和应变以及制造过程中所产生的残余应力场之影响。同时，对断裂力学所研究的材料和结构件中预存的准裂纹及其在外载荷下的扩展以及它们的检测，也需给予充分注意。

此外，充分发挥现有材料潜力，精确恰当地选用相应材料又是设计者的另一任务。

做为材料工作者，为提供适当的材料性能，不仅要精通材料的组织结构和它的力学行为，同样也需熟悉不同构件的工作状况及其失效形式和失效原因，了解其工作应力和应变，通晓残余应力的影响，懂得断裂力学在材料中的应用。需知整个一台机器，各部件不可能同时一次损坏。因此，只有对每一构件选用恰当材料，并在使用中适时更换，才能保证系统的可靠性。所以材料工作者应当承担：（1）不同机器、结构、部件等的选材；（2）按要求对材料进行适当的加工，以获得适宜的性能；（3）诊断和预测材料的失效。

本书的目的就是在工程设计人员和材料工程人员间架设桥梁，消除他们之间的隔阂。在工程基础上，结合宏观力学和微观结构基本原理，进行统一的逻辑处理，对固体材料宏观力学行为作出物理的说明和定量的分析。期望在设计 and 制造中能够满足构件强度及构件工作中的要求。材料在外力作用下或者是变形或者是断裂，我们的目的是研究材料如何变形或如何断裂以及根据工程要求制定其失效准则，求得工程问题的最优解。因此本书特别着重于工程材料在使用中的失效分析、预测和预防。这里，我们对工程失效给予初步的定义：机器、结构或部件发生断裂以及尺寸、形状或材料性能的任何改变而不能完满地实现其功能者即为失效。因此设计人员首先应保证其预定的设计寿命，然后是市场竞争力。

然而本书并未就所有失效形式等量介绍，而是根据目前工程常见现象，重点介绍了疲劳、冲击、磨损和蠕变等失效形式，预测它们的工程寿命，疲劳失效中引入了疲劳失效机率 $S-N-P$ 曲线；冲击和振动失效中作了弹性冲击波的分析，并结合断裂力学进行预测；磨损现象中引入零磨损的寿命预测；蠕变中介绍了先进的寿命预测工作；对高分子材料和陶瓷材料，则分别专章介绍，重点讨论了它们的工程应用和寿命预测工作。由于上述全部内容目前尚无专书综合介绍，因此本书具有一定的先进性和实用性。适用于作机械工程和材料工程高年级学生的教科书，也可作研究生的进修课程用书。对工程和机械设计工作者及材料工程人员还是一本更新知识较好的实用参考书。需要指出的是：书中涉及的计量单位多是由英制单位换算而来，数字不很圆整，尚望谅解。由于作者水平有限，匆促付梓，书中错误在所难免，敬希读者指正，不胜感谢之至。

参加本书编译的有杨杰章(一、八、九、十、十一、十二章),周顺深、胡企贤(十三章),郭敏(七章),赵翰燮(六章),汤胜常(十五章),宋名实、史观一(十七章),薛文龙(十八章),盛慧英(十四章),汪舒华(五、十六章),许其珊(二、三章),叶秀松(四章)等人。本书主编译为杨杰章、糜若虚,第十七章为于同隐校阅。全书在编写中,得到陈锡琦、余新英、胡成诸同志的大力帮助。并承中国纺织大学机械系主任陈明教授及机械系材料工程专业教研组顾克铮教授、中国科学院工程学学部委员雷天觉教授、美国Illinois大学机械系主任、美国国家工程科学院院士赵佩之教授、上海市机械工程学会副理事长兼学术委员会主任贝季瑶教授、上海市机械工程学会副理事长兼培训委员会主任叶自伟高级工程师大力支持,并此致谢!

1988年5月

目 录

序

编译者的话

第一篇 基本原理

第一章 导论

- 第一节 研究范围 (1)
- 第二节 失效形式 (1)

第二章 连续介质力学

- 第一节 引言 (4)
- 第二节 应力 (4)
- 第三节 应力的平衡 (7)
- 第四节 应力变换 (11)
- 第五节 应变分量的定义及其相容性 (16)
- 第六节 应力和应变的关系 (20)
- 附录 应力和应变的不变量 (21)
- 习题 (22)
- 参考文献 (25)

第三章 弹性行为

- 第一节 关于材料弹性行为的讨论 (26)
- 第二节 弹性本构关系 (27)
- 第三节 弹性体中的应力分布 (28)
- 第四节 St. Venant原理 (29)
- 第五节 残余应力 (30)
- 第六节 热应变 (35)
- 第七节 应变能 (36)
- 第八节 应力集中 (39)
- 第九节 滞弹现象 (43)
- 习题 (45)
- 参考文献 (47)

第四章 塑性响应——连续介质处理

- 第一节 绪言 (48)
- 第二节 单向受载时的本构关系 (49)
- 第三节 单向受载与多向受载之间的相互关系 (53)
- 第四节 多向受载条件下的本构关系——屈服条件 (55)
- 第五节 屈服准则的进一步讨论 (56)

- 第六节 流动法则——塑性状态下的应力-应变关系式 (61)

第七节 应用——塑性大变形问题 (67)

- 一、求解方法 (67)
- 二、拉丝 (67)
- 三、圆杯的深拉延 (70)
- 四、拉伸塑性失稳(或颈缩) (73)
- 五、柱体的翘曲——压缩塑性失稳 (79)

第八节 应用——弹塑性问题 (81)

- 一、引言 (81)
- 二、宽板的弯曲和卸载 (81)

第九节 塑性极限分析 (83)

- 习题 (88)
- 参考文献 (89)

第五章 复合应力失效理论及其应用

- 第一节 引言 (90)
- 第二节 最大正应力理论(Rankine理论) (90)

第三节 最大切应力理论(Tresca-Guest理论) (92)

第四节 最大正应变理论(St. Venant理论) (93)

第五节 应变能理论(Beltrami理论) (94)

第六节 畸变能理论(Huber-Von Mises-Hencky理论) (95)

第七节 二向应力状态下失效理论的比较 (98)

第八节 莫尔失效理论 (99)

第九节 失效理论的选用 (103)

第十节 复合应力失效理论在设计中的应用 (103)

- 习题 (109)
- 参考文献 (111)

第六章 微观塑性变形

第一节 引言 (112)

第二节 滑移和临界切应力 (112)

第三节 位错理论 (113)

一、位错和柏氏矢量 (113)

二、位错运动产生的应变 (116)

三、位错的应力场 (117)

四、位错应变能和线张力 (118)

五、位错受力 (119)

六、平行位错之间的相互作用 (119)

七、自由表面对位错的作用 (121)

八、位错的产生 (121)

九、晶格对位错运动的阻力 (123)

第四节 位错理论与金属的应力-应变关系 (123)

一、具有缓慢屈服的金属应力-应变关系 (123)

二、不连续屈服点 (124)

三、锯齿屈服 (Portevin-Le Chatelier) 效应 (126)

第五节 加工硬化机理 (127)

第六节 金属的强化机理 (129)

一、固溶强化 (129)

二、沉淀强化 (130)

第七节 位错引起的二次效应 (132)

一、微应变 (132)

二、包辛格效应 (133)

附录A 密勒指数和密勒-布拉维指数 (134)

附录B 晶体结构和一般金属的滑移系 (135)

习题 (137)

参考文献 (137)

第七章 断裂

第一节 线弹性断裂力学引言 (139)

第二节 断裂力学在设计中的应用 (144)

第三节 弹塑性断裂力学 (150)

第四节 应用举例 (151)

习题 (152)

参考文献 (153)

第二篇 工程材料力学行为

第八章 疲劳分析中的统计方法

第一节 引言 (154)

第二节 定义 (154)

第三节 总体分布 (156)

一、机率密度函数 (156)

二、标准正态分布 (158)

第四节 样本分布 (160)

一、正态分布 (160)

二、 χ^2 分布 (卡方分布) (161)

三、 t 分布 (162)

四、 F 分布 (164)

五、Weibull分布 (168)

第五节 统计假设 (169)

一、统计假设内容 (169)

二、两类错误 (169)

三、检验程序 (170)

四、举例 (170)

第六节 置信限 (172)

第七节 优良估计量的性质 (173)

第八节 一定置信度下的样本容量 (173)

第九节 机率纸 (174)

第十节 均值和方差的比较 (179)

习题 (182)

参考文献 (183)

第九章 疲劳

第一节 引言 (184)

第二节 Wöhler疲劳曲线 (186)

第三节 疲劳裂纹 (187)

一、疲劳过程 (187)

二、宏观效应 (189)

第四节 高周疲劳 (190)

第五节 $S-N-P$ 曲线 (191)

一、 $S-N-P$ 曲线 (191)

二、实验步骤 (191)

三、 $S-N-P$ 曲线的建立 (192)

第六节 影响 $S-N-P$ 曲线的因素 (194)

一、材料的影响 (194)

二、几何形状的影响 (198)

三、环境的影响 (200)

四、工作条件的影响 (201)

五、应力-时间图 (203)

六、影响因素在设计中的应用 (205)

第七节 非零均值应力的影响 (205)

第八节 应用举例 (211)

第九节 多向疲劳应力 (212)

一、多向疲劳失效最大正应力理论 (212)

二、多向疲劳失效最大切应力理论 (213)

三、多向疲劳失效畸变能理论 (213)

第十节 多向疲劳失效理论的应用 (214)

一、应用 (214)

二、应用举例 (215)

习题	(218)	第六节 多向应力状态的影响	(285)
参考文献	(219)	第七节 热疲劳与低周疲劳	(285)
第十章 积累损伤、寿命预测和断裂控制		第八节 总结	(286)
第一节 引言	(221)	第九节 应用举例	(286)
第二节 线性损伤理论	(221)	习题	(289)
第三节 积累损伤理论	(222)	参考文献	(289)
一、损伤与循环数比值	(222)	第十三章 蠕变	
二、Marco-Starkey积累损伤理论	(222)	第一节 引言	(291)
三、Henry积累损伤理论	(224)	第二节 基本概念	(291)
四、Gatts积累损伤理论	(226)	一、蠕变	(291)
五、Corten-Dolan积累损伤理论	(228)	二、蠕变极限	(292)
六、Marin积累损伤理论	(233)	三、蠕变性能的预测	(293)
七、Manson双线性损伤理论	(236)	四、持久强度(蠕变断裂强度)	(295)
第四节 应用举例	(238)	第三节 设计中蠕变数据的评估	(296)
第五节 按局部应力-应变和断裂力学概念		一、蠕变速度方程式	(296)
的寿命预测	(242)	二、蠕变经验公式	(296)
第六节 裂纹扩展的断裂力学	(249)	三、蠕变寿命估算	(299)
第七节 工作载荷模拟和全尺度疲劳试验	(253)	第四节 高温结构零件的蠕变断裂设计	(303)
第八节 损伤容限和断裂控制	(254)	第五节 蠕变极限和持久强度值的确定	(304)
第九节 应用举例	(258)	一、持久强度确定	(304)
习题	(259)	二、蠕变极限的确定	(307)
参考文献	(261)	第六节 蠕变断裂数据的关系	(307)
第十一章 疲劳试验程序和数据的统计		第七节 复合应力下的蠕变	(308)
说明(处理)		一、复合应力下蠕变速度方程式	(308)
第一节 引言	(267)	二、高温高压圆筒蠕变断裂设计	(310)
第二节 标准方法	(267)	三、含缺陷管子蠕变断裂寿命估算	(311)
第三节 恒应力水平试验	(268)	四、缺口试样的蠕变和持久强度	(312)
第四节 响应或存活方法(Probit方法)	(268)	第八节 蠕变断裂机理	(314)
第五节 阶梯试验方法	(270)	一、应力集中理论	(314)
第六节 Prot方法	(271)	二、空位理论	(315)
第七节 楼梯法或升降方法	(272)	三、晶界断裂发展过程模型	(315)
第八节 极值方法	(275)	第九节 积累损伤理论在蠕变断裂寿命估	
第九节 总结	(275)	算中的应用	(316)
习题	(276)	一、W型裂纹(或楔型裂纹)时的蠕变	
参考文献	(277)	断裂寿命	(316)
第十二章 低周疲劳		二、R型空洞时蠕变断裂寿命	(317)
第一节 引言	(278)	第十节 近代蠕变断裂寿命预测发展	(318)
第二节 应变循环概念	(278)	一、高温蠕变脆性断裂	(318)
第三节 应变-寿命曲线和低周疲劳关系	(280)	二、高温断裂力学应用	(319)
第四节 非零平均应变和非零平均应力的		三、蠕变和疲劳的综合效应	(321)
影响	(282)	四、应用举例	(322)
第五节 低周疲劳的积累损伤	(284)	第十一节 耐热材料	(324)
		一、低合金耐热钢	(324)

二、变性12%Cr钢.....	(325)	六、侵蚀.....	(409)
三、奥氏体钢.....	(325)	七、剥层磨损理论.....	(413)
四、铁基合金.....	(326)	第三节 工程设计中的零磨损经验模型.....	(422)
五、镍基合金.....	(327)	一、零磨损经验模型.....	(422)
六、钴基合金.....	(328)	二、零磨损模型的应用.....	(426)
七、TD镍.....	(328)	第四节 磨损的检测和监控.....	(428)
八、难熔金属.....	(329)	一、磨损试验.....	(428)
九、陶瓷和金属陶瓷.....	(329)	二、表面分析术.....	(428)
第十二节 设计者对选材的考虑.....	(330)	习题.....	(431)
习题.....	(331)	参考文献.....	(436)
参考文献.....	(333)	第十六章 翘曲和失稳.....	
第十四章 震动与冲击.....		第一节 引言.....	(438)
第一节 引言.....	(334)	第二节 简单连杆机构的翘曲.....	(438)
第二节 冲击载荷下的能量法.....	(334)	第三节 两端铰支的柱体的翘曲.....	(439)
第三节 冲击载荷下应力波的传播.....	(338)	第四节 端部约束对柱体翘曲的影响.....	(441)
第四节 质点速与波速.....	(341)	第五节 柱体翘曲的非弹性性能.....	(442)
第五节 自由端和固定端的应力波行为.....	(343)	第六节 高、窄形梁承受弯曲时的侧向翘曲.....	(446)
第六节 杆件受轴向骤加力时的应力波传播.....	(345)	第七节 细长圆轴承受扭转时的翘曲.....	(448)
第七节 滞弹阻尼引起的应力波衰减.....	(346)	第八节 其他翘曲现象.....	(450)
第八节 运动体撞击杆件端点的应力波和最大应力.....	(349)	习题.....	(450)
一、运动体撞击杆件端点的应力波.....	(349)	参考文献.....	(451)
二、运动体撞击杆件端点的最大应力.....	(354)	第三篇 聚合物及工程陶瓷材料的力学行为.....	
第九节 超过屈服极限时应力波的传播.....	(356)	第十七章 聚合物的力学性质.....	
第十节 冲击载荷下材料性能的变化.....	(357)	第一节 引言.....	(452)
第十一节 冲击载荷下的剥落.....	(362)	第二节 聚合物的结构与基本特性.....	(453)
第十二节 冲击载荷下的应力、应变集中效应.....	(364)	第三节 复合材料.....	(456)
第十三节 应用举例.....	(365)	第四节 聚合物的形变性质.....	(458)
习题.....	(368)	一、模型与本构关系.....	(458)
参考文献.....	(370)	二、Maxwell固体在恒定应力下的形变(蠕变).....	(459)
第十五章 磨损.....		三、Maxwell固体的应力松弛.....	(459)
第一节 引言.....	(372)	第五节 实际聚合物的应力松弛与蠕变.....	(459)
一、概况.....	(372)	一、应力松弛.....	(459)
二、表面现象.....	(373)	二、蠕变.....	(460)
第二节 磨损类型.....	(376)	第六节 时间温度叠加原理与平移因子.....	(462)
一、粘附磨损.....	(376)	第七节 聚合物的应力-应变关系.....	(466)
二、磨粒磨损.....	(388)	第八节 银纹的形成、结构及其力学性质.....	(467)
三、疲劳磨损.....	(394)	一、银纹的结构.....	(467)
四、腐蚀磨损.....	(396)	二、银纹的力学性质.....	(468)
五、微振磨损.....	(401)	第九节 银纹形成的应力和应变判据.....	(469)

目 录

第十节 分子缠结的作用和取向	(470)	第四节 评价、设计和测定技术	(485)
第十一节 线性粘弹体的应力分析	(471)	一、断裂基础	(485)
第十二节 聚合物的粘性行为	(474)	二、Weibull统计	(487)
习题	(476)	三、缺陷检验	(488)
参考文献	(479)	第五节 寿命预测	(489)
第十八章 工程陶瓷		一、机械应力疲劳	(489)
第一节 引言	(480)	二、热应力疲劳(热疲劳)	(491)
第二节 工程陶瓷的分类	(480)	三、机械应力状态下的热疲劳	(492)
一、按化学成分分类	(480)	第六节 寿命保证试验	(493)
二、按制造方法分类	(480)	第七节 最佳设计	(496)
三、按性质性能或用途分类	(481)	习题	(498)
第三节 工程陶瓷研究、开发中的主要问 题	(484)	参考文献	(498)

第一篇 基本原理

第一章 导 论

第一节 研究范围

在序言里我们曾定义机械失效是结构、机器或部件发生断裂以及形状、尺寸或材料性能变化而不能完满实现其所需功能的现象，因此对工程材料失效进行预测就需要从固体力学基本原理、工程材料力学行为和其他材料力学行为三个方面着手。本书第一篇是基本原理，以张量为工具描述材料的宏观力学状态。考虑到生产的需要而对大塑性变形问题作了专门的分析，对生产中的锻压、拉延、拔丝等问题进行了理论计算，对工程中的复合应力失效理论作了专章论述，为第二篇工程材料力学行为的研究打下一定理论基础。此外，第一篇中专章介绍了微观塑性变形，为本书中探讨宏观工程力学行为提供了足够的微观理论基础，因而可以对宏观的包辛格效应以及其他诸种宏观现象作出物理的解说。专章介绍的断裂虽然没有从理论上作出宏观的力学处理，也没有从微观结构上介绍断裂机制，但却提供了工程应用上所需的必要手段。因此第一篇着重从基本原理出发深入了解工程材料的力学状态、材料在外力作用下所发生的演变过程、外力作用下材料微观结构所表现的行为以及材料使用时的一般失效条件和景象。第二篇是工程材料力学行为，就工程中材料失效的几个主要问题作了重点深入的论述。疲劳是工程中最常见的现象，因此这一篇扼要介绍数理统计、引入疲劳中的 $S-N-P$ 曲线族，趋近于精确定量的工程描述。对疲劳中的损伤理论则分别就其基本概念逐步引导至应用。在疲劳试验程序中介绍了诸种方法，特别着重于雨流法。在高、低周疲劳中均介绍了多向疲劳失效，接近于工程实际情况。对蠕变从机理、断裂到材料均予描述，特别是引入了提高蠕变寿命的经验公式，对生产影响颇大。在振动与冲击一章中，对从应力波的传播预测到工程的失效状态进行了讨论。磨损一章提出零磨损论点，将寿命预测推进到定量评估阶段。最后，对工程中的翘曲和失稳现象进行了阐述。因此第二篇着重解决工程中的几个基本寿命问题，导出其主要计算公式，了解影响寿命的诸种因素，使失效问题步入定量预测、有效预防和恰当分析的阶段。第三篇是其他材料的力学行为，根据当前工业中新出现的常用材料，重点介绍了聚合物和工程陶瓷的寿命问题，导出这些材料在不同条件下的寿命公式，指出影响寿命的因素，简述这些材料的应用条件，并对其力学行为作了扼要的阐述。

第二节 失效形式

工程设计是一个反复深入思考的过程，其目的是作出创造性的最优工程系统或器件，以满足社会需要，并节约资源和减少环境污染。因此设计者的重要职责是保证他的设计在规定

的设计寿命内能实现预期的功能。所以成功的设计应避免产品的过早失效，为此就必须了解和预测控制设计的可能失效型式，熟悉现场的各种失效及其失效条件。特别是在社会要求日益增长的今天，设计者遇到前所未有的挑战：新材料的引入和高温、高压、体积小、寿命长、成本低、重量轻、生态适应等的要求，以及超声速飞行、宇航环境、核工业设备和人体器官置换等的特殊要求，迫使设计者必须仔细研究材料行为，深入了解各种失效型式，学会失效分析、预测和预防，这当然也是材料工作者所面临的问题。为此我们简要列举各种失效形式如下：

- (1) 力和(或)温度引起的弹性变形：弹性变形达到干扰机器完满实现其功能的情况。
- (2) 屈服：塑性变形达到干扰机器完满实现其功能状况。
- (3) 曲面变形：两接触曲面间静态力产生局部屈服，使表面一定范围内发生不连续现象。
- (4) 塑性断裂：塑性变形到部件分离为二的现象。
- (5) 脆性断裂：弹性变形到原子键断裂、部件分离的现象。
- (6) 疲劳：在交变载荷或变形作用下，部件突然发生分离的现象，又可分为：
 - 1) 高周疲劳：循环10000次以上而产生的失效。
 - 2) 低周疲劳：循环10000次以下而产生的失效。
 - 3) 热疲劳：交变温度场引起的失效。
 - 4) 表面疲劳：滚动接触表面因开裂、点蚀和脱落扩大接触面而引起的失效。
 - 5) 冲击疲劳：反复冲击载荷下引起疲劳裂纹而产生的失效。
 - 6) 腐蚀疲劳：疲劳和腐蚀交互作用而引起的失效。
 - 7) 微振疲劳：交变载荷或交变应变与同时产生微振作用而引起的失效。
- (7) 腐蚀：部件材料与环境因化学或电化学反应的恶化而不能实现其功能的现象。
 - 1) 直接化学腐蚀：表面比较均匀地直接受介质腐蚀的情况。
 - 2) 电池电流腐蚀：两不同金属在电接触状态形成局部电流而加速电化学腐蚀的情况。
 - 3) 缝隙腐蚀：裂隙、裂纹或接头内储存溶液与腐蚀金属接触而加速腐蚀的情况。
 - 4) 点蚀：一列孔或凹坑局部腐蚀而穿透金属。
 - 5) 晶界腐蚀：Cu、Cr、Ni、Al、Mg和Zn合金因不适当热处理和不适当焊接而引起的晶界的腐蚀。
 - 6) 选取过滤：固态合金中某一元素被过滤者。
 - 7) 侵蚀：磨料或粘料流过容器表面而不断腐蚀者。
 - 8) 空泡腐蚀：容器壁附近流体的空泡或空洞爆破，表面质点剥落而受腐蚀介质腐蚀者。
 - 9) 氢损伤：由腐蚀所引起，它包括氢泡、氢脆、氢侵袭和脱碳。
 - 10) 生物腐蚀：由生物有机体所引起的腐蚀。
 - 11) 应力腐蚀：在腐蚀介质中因应力而开裂失效者。
- (8) 磨损：接触表面质点逐渐磨去，尺寸改变而失效者，过程较复杂。
 - 1) 粘附磨损：局部高压力和焊接的粗糙接触点，随之因运动而引起塑性变形，粗糙

接合点的破裂，导致金属被磨去者。

2) 磨粒磨损：磨损质点以犁、凿、切等型式磨去金属者。

3) 腐蚀磨损：粘附磨损或磨粒磨损、微振磨损与腐蚀并存者。

4) 表面疲劳磨损：滚动或滑动接触曲面的下表层产生微裂纹、扩展至表面而剥落，形成磨伤坑的现象。

5) 变形磨损：磨损表面重复塑性变形，基体形成裂纹，扩展、聚集而形成磨损质点者。

6) 冲击磨损：反复冲击引起循环弹性应变，基体产生疲劳裂纹，并扩展至失效者。

7) 微振磨损：压在一起的两固体界面间之微振幅循环相对运动，使配件尺寸改变，以致干扰设计功能者。

(9) 冲击：动载荷或骤加载荷作用下产生应力或变形，使部件不能实现其功能者。

1) 冲击断裂：冲击产生的局部应力和应变而使部件分离的现象。

2) 冲击变形：冲击产生塑性变形或产生不能接受的弹性变形现象。

3) 冲击磨损：见(8)。

4) 冲击微振：冲击时两部件表面侧向发生微量相对位移者。

5) 冲击疲劳：部件承受反复冲击载荷而失效者。

(10) 微振：由垂直力压在一起的两固体界面，相互间发生微振幅循环相对运动的行为，如固定接头受振动或变形而发生的现象。

1) 微振疲劳：见(6)。

2) 微振磨损：见(8)。

3) 微振腐蚀：部件因微振行为使材料表面受损劣化而失去其功能者。

(11) 蠕变：部件在应力和温度作用下，变形增加，尺寸改变，干扰其功能效用者。

(12) 热松弛：蠕变过程中因预应变或预应力，部件的松弛、尺寸改变而不能实现其功能者。

(13) 蠕变开裂：与蠕变过程紧密相关的失效。在应力和温度共同作用下，稳定态蠕变期缩短或不存在。

(14) 热冲激：严重热梯度使不同热应变超过材料的屈服或断裂者。

(15) 擦伤和咬死

1) 擦伤：两滑动表面承受载荷，在温度、滑动速度、环境和润滑剂的共同作用下，使大块表面因焊接和撕裂、铲犁、挖凿、粗糙表面严重变形和两表面间金属转移而失效者。

2) 咬死：是擦伤过程的深化，使两部分完全焊合在一起。

(16) 脱落：质点从部件表面自动移去而干扰其功能者。

(17) 辐射损伤：部件受辐射，改变材料性能而失去其功能者。

(18) 翘曲：载荷稍变而显著弯曲者。

(19) 蠕变弯曲：蠕变过程中因部件形状和受载不稳定超过弯曲极限而失效者。

(20) 蠕变疲劳：同时受蠕变和疲劳作用而失效者。

第二章 连续介质力学

第一节 引言

在讨论材料的力学行为以前,我们先讨论受载后物体的一般力学情况。当一个物体承受载荷时(这些载荷可以是作用在外表面上,也可以是重力或者贯穿整个物体的“力”),在物体的内部就会产生应力和变形。连续介质力学就是对连续物体上力的影响的研究。在连续介质力学中,基本公式是对物体单元上的应力和由此而产生的应变之间的关系的描述。这个关系可以有多种形式,它取决于材料和载荷的大小及方式,本书将主要对该关系的不同形式进行讨论。本章我们将首先复习对所有材料均具有共性的连续介质力学的一些内容(即平衡和几何相容性)。

第二节 应力

在考虑力通过一物体传递时,我们关心的不仅是合力,而且也需要了解力的分布。为此,有必要定义一个量,以便讨论某点分布力的强度,这个力就称为应力。首先考虑作用在表面上的应力。如果一个合力 F_1 作用在图2-1所示的一个面积为 A_1 的表面上,那么根据定义,作用在这个表面上的平均应力大小为 F_1/A_1 ,其方向与合力 F_1 方向相同。

取笛卡尔坐标系 x_1, x_2, x_3 ,沿着坐标轴的单位矢量记作 e_1, e_2, e_3 ,则作用在 A_1 表面上的应力可以用这3个单位矢量方向的分量来表达:

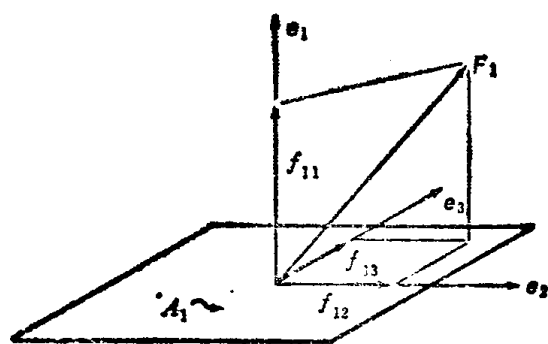


图2-1 作用在一个表面上的力的分量

应力 σ_{11} 是与垂直于表面的分力相关的,而应力 σ_{12} 和 σ_{13} 是与平行于表面的分力相关的。因此, σ_{11} 称为法向应力,而 σ_{12} 和 σ_{13} 称为切向应力。

我们也可以采用 i, j 等标号表示取值为1到3的任何一个数,这样“ x_i ”轴可以代表 x_1 轴或 x_2 轴或 x_3 轴。同样 σ_{ij} 也可以代表任何一个应力分量。许多书采用 x, y, z 坐标轴并用 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ ……作为应力的写法。本书采用黑体字作为矢量。

上面定义的表面应力分量是平均应力分量。如果应力是均匀分布的话,那么也就代表了在这个表面上一点的应力。而当 A_1 非常小,或者当 A_1 趋向于零的极限情况,上述应力也就代

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= \frac{f_{11}}{A_1} \\ \sigma_{12} &= \frac{f_{12}}{A_1} \\ \sigma_{13} &= \frac{f_{13}}{A_1}\end{aligned}\quad (2-1)$$

其中脚标的含义为:第一个脚标表示应力所在的面与 x_1 轴正交,第二个脚标表示合力的分量(即 σ_{13} 是在 e_3 方向单位面积上的平均力)。应注意,

表示了表面积 A_1 中心的应力。因此，应力的严格定义由下面的极限式表达：

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= \lim_{A_1 \rightarrow 0} \frac{f_{11}}{A_1} \\ \sigma_{12} &= \lim_{A_1 \rightarrow 0} \frac{f_{12}}{A_1} \\ \sigma_{13} &= \lim_{A_1 \rightarrow 0} \frac{f_{13}}{A_1}\end{aligned}\quad (2-2)$$

其中， f_{11} 、 f_{12} 和 f_{13} 是作用在表面积 A_1 上的合力 F_1 的分量，而表面积 A_1 垂直于 e_1 方向 \ominus 。

表面上应力的定义包含着该表面在空间的方向及其面积。为了定义固体内一点的应力分量，我们还必须作一参考表面通过该点，表面的方向可任意选择。实际上，为了完整地描述该点的应力状态，至少要给出3个面上的应力分量。习惯上常取的3个参考面垂直于3个坐标轴，我们可以用图2-2表示的无限小应力单元解释。这个单元的3个表面垂直于坐标轴，组成正交平行的六面体，该单元中心的应力状态由作用在单元表面上的合力 F_i 决定。如果表面上的力已决定：

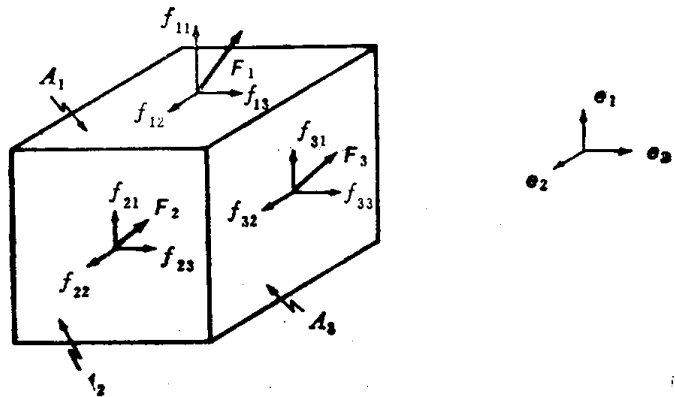


图2-2 三维应力单元体表面上作用的分力

$$\begin{aligned}F_1 &= f_{11}e_1 + f_{12}e_2 + f_{13}e_3 \\ F_2 &= f_{21}e_1 + f_{22}e_2 + f_{23}e_3 \\ F_3 &= f_{31}e_1 + f_{32}e_2 + f_{33}e_3\end{aligned}\quad (2-3)$$

应力分量 σ_{ij} 可由下式定义：

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= \lim_{A_1 \rightarrow 0} \frac{f_{11}}{A_1} \\ \sigma_{12} &= \lim_{A_1 \rightarrow 0} \frac{f_{12}}{A_1} \\ \sigma_{13} &= \lim_{A_1 \rightarrow 0} \frac{f_{13}}{A_1} \\ &\vdots \\ \sigma_{ij} &= \lim_{A_i \rightarrow 0} \frac{f_{ij}}{A_i}\end{aligned}\quad (2-4)$$

式中， A_i 为应力分量作用表面面积。由于单元的3个表面上各有3个应力分量，因此总共有9个应力分量。

在上述讨论中，应力分量总是作用在表面上，其外法线矢量就是单位矢量的正方向。今后将这样的表面称正表面。由方程(2-4)应力分量的定义可以看出，如果合力分量 f_{ij} 是正的，那么在正表面上的应力分量 σ_{ij} 也是正的，反之合力分量是负的，则应力分量亦为负。为方便起见，对于法向矢量在坐标轴负方向上的表面即负表面上的应力分量我们可以建立一个符号规则，即：对于负表面而言，如果合力分量 f_{ij} 是负的，其上的应力分量 σ_{ij} 定义为

\ominus 坐标轴用 x_1 、 x_2 、 x_3 表示，沿坐标轴的单位矢量用 e_1 、 e_2 、 e_3 表示。