

机械设计丛书

防断裂设计

吴清可 主编

● 机械工业出版社

机 械 设 计 丛 书

防 断 裂 设 计

吴清可 主编

余寿文 主审



机 械 工 业 出 版 社

(京) 新登字054号

本书是中国机械工程学会机械设计学会机械设计丛书 编辑委员会组织编写的机械设计丛书之一,是专为机械设计人员编写的。

由于结构和材料的失效(包括断裂、疲劳、腐蚀等),国家每年损失数千亿元,为此在重大机械产品设计中采用防断裂设计是有重要实用价值和经济意义的。本书共八章,主要内容有:断裂力学的基本知识;防止结构脆断和延性断裂;防止疲劳、蠕变、应力腐蚀等引起的裂纹萌生、扩展直至断裂;防止制造过程中由于工艺因素引起的断裂;概率断裂力学及蒙特卡罗模拟方法在结构可靠性设计和寿命预测中的应用。本书内容新颖、实用,引用了较多的国际标准,数据充实可靠,图、表、文并茂,实例多。

本书亦可供大专院校师生及其他工程技术人员使用。

机械设计丛书

防断裂设计

吴清可 主编

余寿文 主审

*

责任编辑:夏曼苹 范兴国 版式设计:吴静霞

封面设计:方 芬 责任校对:马志正

责任印制:尹德伦

*

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117号)

北京市房山区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $11^{5/8}$ · 插页 1 · 字数 306 千字

1991年11月北京第一版·1991年11月北京第一次印刷

印数 0,001—3,050 · 定价: 11.80元

*

ISBN 7-111-01905-9/TH·320

编辑委员会

主任委员 陈 湖

副主任委员 周延佑

委员(姓氏笔划序)

傅梦莲

郭可谦

徐家宗

江 斌

任光华

刘存智

刘恒愉

何国伟

陈立周

吴宗泽

辛一行

周勤芝

林东初

郑效忠

徐 灏

高庆荣

夏曼苹

黄致甲

曾 英

专业编审组

1. 机械设计理论方法专业编审组

组长 周延佑

组员 陈立周 曾 英 傅家骥 刘光宁 万耀青

2. 机械结构强度专业编审组

组长 傅梦莲

组员 刘存智 高镇同 丁奎元 周辛庚 张如一

3. 机械零部件设计专业编审组

组长 郭可谦

组员 吴宗泽 林东初 舒森茂 余梦生 姜 勇

(其他专业编审组暂缺)

编 者 的 话

当前,国民经济各部门都迫切需要质量好、效率高、消耗低、价格便宜的先进的机械产品。而机械设计工作是决定机械产品质量、水平和经济效益的重要环节。一个机械产品的设计水平如果不高,即使制造得再好,也是一个落后的产品。所以必须加紧提高机械设计水平。

近三十年来,世界上科学技术的发展速度很快,机械设计工作也出现了崭新的局面。由于广泛运用了各学科和各技术领域里的新成就,尤其是采用了电子计算机技术,在机械设计领域里,新原理、新方法、新技术与新结构不断涌现,从而,大大提高了设计水平和速度。特别是对于结构复杂、使用条件要求高的产品,改变了因设计难度大而不能设计或设计的质量低、周期长的状况。于是,许多大型、高精密度、高参数的质量高、效率高、消耗低和可靠耐用的各种机械产品,竞相出现。丰富了市场,并不断更新,以满足用户日益增长的需求。

在我国,随着国民经济的迅速发展,新产品的开发和老设备的技术改造工作日益增多,对机械设计工作的要求越来越高,机械设计人员迫切需要运用新的科学技术知识进行设计工作,但苦于缺乏学习和参考的资料。近几年来,一些进行产品研究、设计和教学的同志,一方面结合我国经验进行创新设计,一方面消化国外引进技术,均获得了可喜成果。这些成果也需要总结推广。因此,中国机械工程学会机械设计学会机械设计丛书编辑委员会组织编写了这套机械设计丛书,以飨读者。

这套丛书编写的指导思想是:内容先进、实用。着重介绍新理论、新方法、新技术和新结构;对于传统的设计计算方法,要做总结提高工作。书中注意贯串整机设计思路。要求阐明本专题

IV

的基本原理，避免深邃的数学，着重介绍物理概念及设计要点，给出实用的设计方法和计算公式、步骤、实际效果及经国内试验的数据、图表和实例。叙述深入浅出，分析透彻，使具有微积分数学知识的大中专程度的设计人员读得懂、用得上。花较少时间得到较大收获。

由于机械设计涉及面广，本丛书题目的选定，原则上是根据上述指导思想成熟一个定一个，不追求系统和全面。因此，全套丛书编写及出版时间将比较长。将采取分批出版的方式陆续出版。第一批13本将在近两年内出齐。它们是：《价值分析在产品中的应用》、《可靠性设计》、《电阻应变测量》、《光弹性应力分析》、《防断裂设计》、《抗疲劳设计》、《振动特性计算》、《轴的设计》、《现代带传动设计》、《机械零件可靠性设计》、《机械结构设计》和《耐磨损设计》、《联轴器》。

尽管我们朝上述设想作了许多努力，但因缺乏经验，并受水平限制，一定还存在一些缺点和不足之处，欢迎读者提出批评改进意见。

机械设计丛书编辑委员会

前 言

随着现代工业技术的飞速发展，机械产品日趋复杂化、大型化、高参数化，新产品、新材料、新工艺的采用带来了新的问题，使产品发生故障的机会增多，其中灾难性的断裂事故亦时有发生。在作者编写本书期间（1985年8月），日航123航班波音747客机坠毁，使520人丧生；1986年美国挑战者号航天飞机在发射时爆炸。断裂事故造成的巨大损失，每年达数千亿元，而其中一半是可用现代科学技术避免的。产品的固有可靠性与安全性是设计出来的，因此在设计时引入防断裂设计、可靠性设计，在制造过程中进行断裂控制设计，生产出高质量、高水平、高可靠性的产品是有重大意义的。作者根据多年的科研经验主编了这本《防断裂设计》，全书共八章。其中，第一、二、三、四、六章及第五章的第一、三节和第八章的部分由吴清可编写；第五章的第二节由刘元杰编写；第七章及第八章的部分由王殿富编写，全书由吴清可主编。

本书承余寿文（清华大学教授）主审。在编写过程中还得到了机械结构强度专业编审组的指导和帮助，他们在百忙中为本书召开了专门的编审会议。此外，姚衢（钢铁研究院）张忠岳（原子能研究所）等同志亦提供了宝贵意见和大力支持，在此表示感谢。

本书中引用了作者在郑州机械研究所工作期间与同志们共同完成的科研成果和数据，以及该所一些同志的成果和数据，还得到了机械院可靠性中心的资助，在此亦向他们致谢！

由于水平有限，书中难免有错误和不当之处，希望读者给予指正。

吴清可 1986年12月于北京

目 录

第一章 绪论	1
第一节 断裂事故与断裂力学的建立	1
第二节 防断裂设计的意义及主要内容	4
第二章 断裂力学的基本知识	6
第一节 缺陷	6
一、缺陷的类型	7
二、缺陷模型及特征尺寸	8
三、缺陷的方向及位置	9
四、单个缺陷与密集缺陷	11
五、探伤结果与缺陷的换算	15
第二节 线弹性断裂力学的基本知识	16
一、线弹性断裂力学的产生	16
二、裂纹尖端附近的应力和位移	18
三、应力强度因子	19
四、能量释放率	21
五、线弹性断裂(脆性断裂)的 K 判据	22
六、平面应变断裂韧性、动态断裂韧性及止裂韧性	22
第三节 复合型断裂及断裂准则	29
一、最大应力准则	30
二、应变能密度因子准则	31
三、应变能释放率准则	32
四、应用实例	32
第四节 弹塑性断裂力学的基本知识	34
一、少量屈服和全塑性状态下邻近裂纹尖端的应力应变场	34
二、裂纹尖端张开位移COD	39
三、 J 积分	43
四、裂纹问题的全塑性解	46

五、裂纹问题的弹塑性解	47
六、控制裂纹扩展的参数及条件	48
七、评定裂纹失稳的准则, 撕裂模量	49
第五节 温度与韧性的关系	51
一、无延性转变温度NDT	51
二、断口形貌转变温度	52
三、脆性发生温度	52
四、止裂温度CAT	52
五、弹性断口转变温度及塑性断口转变温度	52
第三章 防脆断设计	53
第一节 设计思想及设计分类	53
一、防脆断设计建立的背景	53
二、设计思想	54
三、设计方法分类	54
第二节 几种主要的防脆断设计方法	55
一、基于 K_{Ic} 的设计方法及计算步骤	55
二、按许用缺陷尺寸的设计方法及步骤	65
三、裂纹张开位移法	72
四、我国压力容器学会编制的压力容器缺陷评定规范 (CVDA-1984)	75
五、按一定设计要求(或准则)的防脆断设计方法	76
六、按脆性转变温度设计的方法	79
七、 K_R 或 G_R 阻力曲线方法	84
八、经验方法	86
九、小结	88
第三节 应用实例	89
一、压力容器防脆断设计实例	89
二、含有缺陷的转子强度	91
三、寒冷地区结构的防脆断设计要求	93
第四章 弹塑性断裂分析的工程方法	95
第一节 设计思想及设计方法要点	95
一、工程方法建立的背景	95
二、设计思想	96

三、设计方法要点	97
第二节 弹塑性断裂分析的工程方法	97
一、美国电力研究院 (EPRI) 提出的方法及其应用	97
二、裂纹推动力图及其应用	120
三、稳定评定图及其应用	126
四、破坏评定图及其应用	129
五、裂纹张开位移COD设计曲线及其应用	141
第五章 裂纹扩展及寿命估计方法	146
第一节 疲劳裂纹扩展及疲劳寿命估计方法	147
一、疲劳裂纹扩展速率	147
二、应力强度因子波动范围与应力强度因子门槛值	155
三、应用裂纹扩展定律计算寿命	158
四、应用断裂力学方法求疲劳寿命与传统的疲劳设计方法的比较	159
五、影响疲劳裂纹扩展速率的因素	163
六、疲劳寿命计算中安全系数的选取	169
第二节 蠕变裂纹扩展及蠕变寿命估算方法	174
一、蠕变分析中的弹性相似方法	174
二、蠕变延性断裂和蠕变脆性断裂	175
三、描述蠕变裂纹扩展的断裂力学参数	175
四、C*参数的测定和计算	178
五、蠕变裂纹扩展	182
六、蠕变断裂寿命	187
七、高温构件设计准则	189
八、蠕变与疲劳的耦合作用	189
第三节 应力腐蚀及腐蚀疲劳的裂纹扩展和寿命估计方法	191
一、应力腐蚀裂纹扩展速率 da/dt	191
二、腐蚀疲劳裂纹的扩展速率 $(da/dN)_{CF}$	194
三、介质中结构的寿命估计方法	196
四、在腐蚀介质中推荐的结构设计方法	197
第六章 断裂控制及其在制造、工艺评定、维修中的应用	203
第一节 材料评定	203

一、断裂韧性与冶金因素的关系	203
二、材料断裂机理及断裂机理图	208
第二节 热处理工艺的评定	213
一、淬火开裂	213
二、用断裂力学方法评定热处理工艺	214
第三节 焊接工艺的评定	217
一、焊接结构的复杂性	217
二、焊接缺陷及焊接缺陷评定标准	218
三、焊缝形状、焊接角变形及错边量对应力强度因子和疲 劳寿命计算的影响	218
四、焊接残余应力及其影响	226
五、焊缝微观结构对断裂韧性的影响	228
六、焊接接头质量评定方法	230
第四节 大型铸锻件的质量控制	243
一、大型锻件的缺陷性质及改进措施	243
二、把断口形貌转变温度FATT作为表示韧性的指标	243
三、密集夹杂(缺陷群体)的评定方法	244
四、铸件中的缺陷及防止措施	248
第五节 检查与维修	248
一、可用断裂力学方法进行质量保证和检查的内容	249
二、维修缺陷尺寸的确定	249
三、维修周期的决定	250
第七章 概率断裂力学	253
第一节 结构可靠性设计及概率断裂力学	253
第二节 概率断裂力学的设计方法	257
一、驱动力和抗力服从正态分布时的概率断裂设计方法	257
二、驱动力和抗力服从某种典型分布情况下,可靠度计算 的结论式	265
三、概率断裂力学设计方法的要点	265
第三节 概率断裂力学中的不确定因素及其定量化	266
一、裂纹检测概率	266
二、缺陷尺寸的统计分布	269
三、外载概率性质引起应力变化的统计分布	272

四、疲劳裂纹扩展速率的概率特性	273
五、材料断裂韧性的概率统计性质	274
第四节 概率断裂设计在防止缺陷失稳扩展及防疲劳断裂中 的应用	277
一、单调加载下防止缺陷失稳扩展的设计	278
二、重复载荷下防疲劳断裂设计	280
第八章 蒙特卡洛模拟方法在结构可靠性设计及寿命 预测中的应用	283
第一节 蒙特卡洛模拟方法简介	283
一、根据实际问题构造模拟概型	284
二、根据概型特点, 加速模拟结果的收敛	285
三、概型中不同分布随机数的抽样方法	285
四、计算机模拟试验	290
第二节 蒙特卡洛模拟方法在结构可靠性设计中的应用	294
第三节 蒙特卡洛模拟方法在疲劳寿命预测中的应用	296
第四节 蒙特卡洛方法的优缺点	300
一、优点	300
二、缺点	300
附录	301
附录1 常用应力强度因子计算图表	301
附录2 平面应变断裂韧性数据	330
附录3-1 某些材料的 J 积分值	342
附录3-2 某些材料的 J_{Ic} 和撕裂模数	342
附录3-3 某些压力容器钢的裂纹张开位移	344
附录4 某些材料的裂纹扩展速率	345
附录5 正态分布表	347
参考文献	349

第一章 绪 论

第一节 断裂事故与断裂力学的建立

随着生产的发展, 机械工程中大量采用新工艺、新材料, 同时机器的工作条件也向高温、高压、高速发展, 其结构也日趋大型化、复杂化。自50年代以来, 一些按古典强度理论和常规设计方法设计、制造并经严格检验合格的产品, 以及材料常规性能合乎要求的产品, 先后发生了不少灾难性事故。为了保证设备安全, 迫使科技人员多方探索和寻求机械产品的防断裂设计方法。

上述灾难性事故很多, 兹列举数例如下:

飞机方面: 1979年5月 美国亚美利加航空公司一架巨型喷气客机 DC-10 在芝加哥起飞时失事, 死亡 273 人。失事的主要原因是一个联接螺栓疲劳断裂。

发电设备方面: 1950~1980年报道的汽轮机低压和中压转子的飞裂破坏达20台之多^[1]。1977年9月, 美国威廉斯堡电厂一条直径300mm的主蒸汽管(温度471℃)在运行中发生爆炸, 当场死亡5人, 重伤1人, 周围约 $20 \times 30 \text{ m}^2$ 范围的设备都遭到破坏。

压力容器方面: 1978年7月, 西班牙一个液体丙稀储罐爆炸, 死伤260人。1965年12月, 英国一台 $\phi 1925 \text{ mm}$ 氨合成塔脆断, 一块2 t重的碎片飞出约45m。

石油、天然气管道方面: 1950年, 美国曾发生一起管道脆性断裂事故, 裂纹扩展总长达12000m。1978年, 法国罗纳河口省输油管发生破裂, 流出石油一百多万升。

锅炉的爆炸危害更大, Sultana 号蒸汽船锅炉爆炸, 死亡1547人。美国锅炉爆炸次数随年代的变化如图1-1^[2]所示。

桥梁方面: 1969年12月, 美国俄亥俄河上的Pointpleasant 大

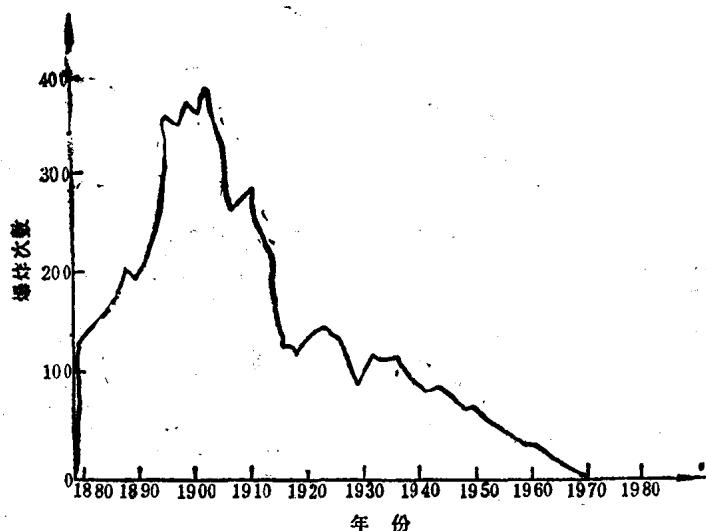


图 1-1 1880~1970年美国锅炉爆炸次数

桥突然断为24块，落于河中，死亡46人，伤9人，当时载荷仅为设计载荷的40%。1938~1942年间共有40座焊接桥倒塌。

船舶方面：1942~1965年间，欧洲及美国轮船突然断裂为两截的有39艘。1972年，美国纽约大型油轮从中部断裂。

铁路交通方面：1977年，美国火车铁轨断裂事故约800起，损失超过60亿美元。

甚至在经过严格检验的国防尖端产品方面，也时有发生断裂事故：1950年，美国北极星导弹固体燃料发动机壳体在试验时爆炸；1965年，美国著名的260SL-1固体火箭发动机压力壳在水压试验时发生脆断，断裂时应力为657MPa，而所用材料18NiCoMoTi的屈服应力为1716.2MPa。

这些灾难性事故，特别是国防尖端产品的爆炸和脆断，引起人们的震惊，要求研究引起这些结构断裂的原因及防止措施。经过大量研究发现：这些事故多数与结构中存在缺陷或裂纹有关，而且事故往往发生在低温的冬天。同时还发现即使经过严格检验

的产品,也会在运行中由于交变载荷、腐蚀、辐照等原因致使裂纹萌生、扩展直至失稳断裂。更使人惊奇的是,过去认为强度很好的结构,如采用高强度钢材料和断面很厚的结构,反而易于发生低应力脆断事故。这些都是用过去的经典强度理论与常规设计方法解释不了的。因为传统的强度理论中,假设材料是均质的、各向同性的、无缺陷的,而现代机械工程的实际情况往往与这些假设有很大的差别。人们从现今工程构件或材料内部不可避免地存在缺陷或裂纹这一基本事实出发,发展起一门新的学科——断裂力学。

断裂力学是以变形体力学为基础,研究含缺陷(或裂纹)材料和结构的抗断裂性能,以及在各种工作环境下研究裂纹的扩展、失稳和止裂规律的一门学科。近20年来这门学科发展迅速,解决了许多工程中灾难性的低应力脆断问题,已成为失效分析的重要研究方法之一,弥补了常规设计方法的不足。

虽然断裂研究的许多领域仍在发展阶段,但许多国家已将较成熟的部分制订了断裂控制新标准及设计规范,用于工程实际中,成为提高产品质量、保证产品安全运行、防止结构断裂事故的有力工具。

在工程设计中采用断裂力学方法时,应考虑以下几点:

1. 重大机械产品设计时要计入缺陷。用常规设计方法设计并经检验合格的产品,应假定其有缺陷,进行防脆性断裂的设计计算,以避免运行时发生事故。

2. 对于含缺陷或裂纹的结构,可以有条件地使用断裂力学的方法评定其安全性。如美国Alyska管线,经检查发现约有4000处缺陷超过管线标准,返修费用达5200万美元。根据断裂力学分析,这4000处缺陷并不会影响管线的可靠使用,而在高约束条件下返修,可能产生有害裂纹,代替原来较无害的夹渣,并带来有害的残余应力。

3. 对于在役结构,由于在交变载荷和腐蚀环境中将萌生裂纹,产生缺陷,因此应定期检查,并作安全评定。如1980年西屋公司对25台汽轮机进行了普查,发现5%的叶轮从键槽处开裂。

我国某地一台球罐经开罐检查,发现已有超标准缺陷与裂纹393处,总长达33.43m,后经断裂力学分析并焊补后,仍可继续安全使用〔4〕。

近年来,各国都在断裂力学方法的基础上,相继制定了结构的缺陷评定标准,以补充传统的设计检验标准。

第二节 防断裂设计的意义及主要内容

断裂力学的建立,对于工程实际问题具有重大的实用价值和经济意义。如1983年美国巴特尔研究所受美国商务部的委托所作的调查表明:美国工业由于材料失效(包括断裂、疲劳、腐蚀等)每年耗损1190亿美元,其中29%的损失,可利用现有技术予以避免(即345亿美元),如计入目前正在进行的防止失效的研究成果,还可再避免24%的损失。这两项共达630亿美元〔5〕。我国工业由于材料失效造成的损失也很惊人,为此在重大机械产品设计中采用防断裂设计,将有助于机械产品设计水平的提高,保证机械产品的安全性和可靠性。在不可避免地存在缺陷或裂纹的构件中,可以防止事故的发生,减少不应有的损失,以提高国民经济建设的经济效益。

防断裂设计国外常称为破损安全设计或损伤容限设计。它是从材料或结构在制造和运行时不可避免地产生缺陷的事实出发,认为一定条件下的缺陷是容许存在的,并能达到安全可靠的要求。通过防断裂设计,应使扩展的裂纹在达到保证安全所允许的尺寸界限前,及时查明其扩展情况并进行修补,以确保结构的正常工作。

本书共八章,分四部分。

1. 第一部分(第一、二章)阐述断裂力学的建立和断裂力学的基本知识。

2. 第二部分(第三、四、五章)阐述机械结构的防断裂设计,用断裂力学方法分析产品结构抵抗断裂破坏的能力,以确保产品结构的安全。常见的断裂破坏类型见表1-1。

表 1-1 断裂破坏类型

类 型	断裂力学分析	断裂阻力	宏观断口外貌
脆断	线弹性断裂力学	脆	平断口
弹塑性断裂	弹塑性断裂力学	低阻力 高阻力	剪切边 混合型断口 倾斜断口

3. 第三部分（第六章）阐述在制造、工艺评定、维修中的断裂控制设计，即为防止断裂而在产品的整个制造和运行过程中制定的断裂控制计划及措施等。

4. 第四部分（第七、八章）阐述用概率断裂力学进行可靠性设计和可靠性寿命预测的方法。近年来研究人员将可靠性理论及统计方法与断裂力学的规律、方法联系起来，出现了概率断裂力学^[17]，并应用这种理论和方法进行可靠性设计和可靠性寿命预测，成为机械产品可靠性设计的重要方法之一。