

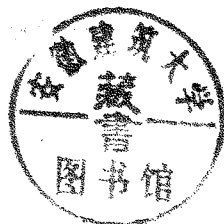
刘再华 董国兴 王文安

华中理工大学出版社

工程结构抗断设计基础

工程结构抗断设计基础

刘再华 董国兴 王文安



华中理工大学出版社

工程结构抗断设计基础

刘再华 董国兴 王文安

责任编辑 湛柏琼

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张: 8.5 字数: 206 000

1990年10月第1版

1990年10月第1次印刷

印数: 1—1500

ISBN 7-5609-0527-7/O·77

定价: 1.72 元

内容简介

本书论述了工程结构抗断设计的基本概念和原理, 以及以材料极限应力为依据的强度设计方法和以断裂力学理论为基础的工程结构起裂控制和止裂控制方法。

全书共分 8 章, 贯彻学以致用原则, 全书以国内外典型的重大工程结构断裂事故的报道为引述, 各章都有应用例题, 多数章节附有思考练习与答案。

本书可作为机械、电力、船舶、冶金、力学、材料、锅炉与化工容器等专业本科生、研究生的教材, 也可作为教师及工程技术人员的参考书。

本书为湖北省暨武汉市力学学会推荐用书。

序

随着我国工业现代化的发展,各种近代工程结构越来越多.这些结构规模大、单位体积的重量轻,结构复杂,它们承受着高应力或交变应力.为适应这些要求,高强度材料、大尺寸截面的构件、焊接构件的应用也越来越广泛.在这种情况下,工程结构发生断裂事故的可能性增加了,事故带来的危害也更加严重了.因而,工程结构的抗断设计受到了国内外学术界和工程界的普遍重视.

概括地说,工程结构发生断裂,主要是由于强度不足或者裂纹扩展所致.作为结构强度计算基础的材料力学,长期来列为工科专业的技术基础课程.但由于教学时数等的限制,一些与构件抗断设计直接有关的近代内容未能编入教材.目前,断裂力学这门研究材料及工程构件中裂纹扩展规律的学科已趋向于成熟,在高等工科院校中已将其作为必修课程或选修课程.但根据武汉地区高校的一些教师反映,尽管在国内出版了一些断裂力学书籍,但适合作教材的还不多.因此,我们学会的教学协作组特意邀请华中理工大学刘再华、武汉水运工程学院董国兴和武汉水利电力学院王文安三位同志,根据他们多年教授材料力学与断裂力学课程的经验,结合武汉地区高等工科院校的特点和需要,在原编讲义的基础上,征求兄弟院校教师的意见,合作编写了《工程结构抗断设计基础》这本教材,并请武汉工业大学彭图让同志担任主审.这本教材贯彻学以致用原则,围绕工程结构抗断设计的实际需要,把材料力学教材中没有深入介绍、甚至没有涉及的有关结构抗断设计的重要概念和方法,以及断裂力学中较为成熟、可供结构起裂控制和止裂控制应用的内容综

合在一起，既避免了和材料力学教程重复的内容，又有抗断设计所需要的较为全面的知识。它可作为高等工科院校机械、电力、船舶、冶金、力学、化工、焊接等专业的大学生和研究生的教材，也可作为教师和工程技术人员的参考书。

如上所述，这本教材是学会根据需要，组织会员合作编写的第二本教材。我们希望，继这本书出版以后，学会能继续发扬会员多、素质高的优势，为力学的教学工作、为社会主义祖国实现四个现代化培养有用人才，作出更大的贡献！

湖北省暨武汉市力学学会理事长

栗一凡（教授）

1989.7.18.

目 录

第一章 绪 论

§ 1-1 安全性是工程结构的最基本要求	(1)
§ 1-2 工程结构抗断设计的任务	(6)
§ 1-3 工程结构抗断设计的理论基础	(8)
§ 1-4 工程结构断裂的起裂控制与止裂控制方法	(10)

第二章 强度设计方法

§ 2-1 强度设计概述	(14)
§ 2-2 真实应力与真实应变	(15)
§ 2-3 工程材料的变形及断裂极限应力	(17)
§ 2-4 影响材料极限应力的主要因素	(22)
§ 2-5 构件的抗疲劳特性	(29)
思考与练习	(37)

第三章 应力强度因子概念及其计算

§ 3-1 弹性力学的基本方程与张量记法	(39)
§ 3-2 用复变函数表示平面裂纹问题的应力函数	(48)
§ 3-3 I 型裂纹尖端附近的应力场强度	(53)
§ 3-4 II 型和 III 型裂纹尖端附近的应力场	(62)
§ 3-5 复应力强度因子法	(67)
§ 3-6 有限平板的 K_I 计算公式	(73)
思考与练习	(79)

第四章 裂纹顶端的塑性区

§ 4-1 裂纹顶端的塑性区尺寸	(83)
§ 4-2 等效裂纹长度和等效应力强度因子	(88)
§ 4-3 塑性区的形状	(96)
§ 4-4 断裂型态转变的厚度效应	(99)

思考与练习	(102)
第五章 K 准则及其在起裂控制中的应用	
§ 5-1 K 准则的意义	(105)
§ 5-2 平面应变断裂韧度 K_{Ic} 的测试	(106)
§ 5-3 K 准则在起裂控制中的应用	(115)
§ 5-4 疲劳裂纹扩展的控制	(120)
§ 5-5 疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的测试	(126)
§ 5-6 破损构件的剩余寿命估计	(138)
§ 5-7 腐蚀环境下构件的开裂与裂纹扩展	(142)
§ 5-8 工程断裂事故分析	(147)
思考与练习	(155)
第六章 裂纹扩展分析的能量方法	
§ 6-1 固体的理论内聚力强度	(159)
§ 6-2 格里菲斯和奥罗文(Orwan)理论	(162)
§ 6-3 能量释放率 G	(164)
§ 6-4 G 、 K 的柔度标定	(170)
§ 6-5 含裂纹构件的变形计算	(174)
§ 6-6 R 阻力曲线	(180)
§ 6-7 应变能密度理论	(183)
思考与练习	(192)
第七章 弹塑性构件的抗断设计基础	
§ 7-1 裂纹张开位移 (COD) 原理	(195)
§ 7-2 COD 临界值的测定	(204)
§ 7-3 J 积分及其守恒性	(209)
§ 7-4 在线弹性条件下的 J 积分	(215)
§ 7-5 J 积分的能量解释	(217)
§ 7-6 J 积分在抗断设计中的应用	(223)
第八章 动态裂纹扩展与止裂控制	
§ 8-1 裂纹动态扩展的能量平衡和极限速度	(234)

§ 8-2 裂纹的分岔.....	(237)
§ 8-3 动态扩展裂纹的力学参数.....	(239)
§ 8-4 止裂原理与止裂判据.....	(242)
§ 8-5 材料止裂韧度的测定.....	(246)
§ 8-6 结构的止裂控制.....	(251)
§ 8-7 止裂控制设计展望.....	(257)
思考与练习	(258)
思考与练习部分答案.....	(259)
参考文献.....	(262)

第一章 绪论

§ 1-1 安全性是工程结构的最基本要求

安全性、经济性和使用性是工程结构设计的基本要求。优良的工程结构设计不仅要使这三项基本要求都得到满足，而且要使它们有最佳协调。许多工程结构，特别是一些重大结构，如航空航天器、核能设备、锅炉与压力容器、船舶舰只、车辆、桥梁、厂房、大型机械、大坝和水工结构等等，往往把确保安全性作为第一位的设计要求。显然，只有在这些结构本身及有关的人员和财产安全得到保障的前提下，进一步提高它们的经济性和使用性才有意义。

构件断裂是工程结构发生安全事故最常见的原因之一。一个构件断裂往往导致整个结构破坏，使贮存于结构中的变形能突然释放，其速度之快、能量之大是很惊人的，往往造成一场灾难。所以，断裂被认为是一种最有危害性的事故。在大工业的社会中，恶性断裂事故将造成严重的生命、财产损失。正确进行工程结构的抗断设计和采取有效的措施，防止恶性断裂事故的发生是十分重要的。为加强这方面的认识，我们在这里选编若干断裂事故的实例，作为本书的开始。

1. 据鞍山市锅炉检验研究所编的《锅炉事故》一书中记载，我国解放后第一起特别重大的锅炉爆炸事故，于1955年4月25日发生于天津某纺织厂。锅炉型式：田熊16-25。在正常压力下突然爆炸，上下锅筒的连管飞出75m远，烟囱震斜750mm。当场死亡8人，重伤17人，轻伤52人。造成人员重大伤亡和巨大经济损失，严重影响了当年国家纱布的生产计划。经技术鉴定，事故系因碱垢严重造成下锅筒钢板脆化所致。

该书共选编了 93 起锅炉事故事例。

2. 某市热电厂 4 号机组叶轮飞裂事故。该机为 31-25-2 型中压 2.5 万 kW 汽轮机。1960 年 5 月 1 日起运行，至 1965 年 4 月 17 日停机大修，累计运行 18 147 小时。在此之前进行大、小修 5 次。第 5 次大修后，于 1965 年 4 月 30 日 23 时 52 分做危急遮断器超速跳闸试验时，第 10 级套装叶轮飞裂。拼合后的叶轮残体如图 1-1 所示。有两大块叶轮碎块打破汽缸盖飞出，其中较大者击穿厂房砖墙落到厂房外 80m 的地方。另一块则飞至除氧器平台挂在栏杆上。其余小碎块落在上汽缸盖内。在突然飞裂时，汽轮机转子的转速为 3380r/min。在这之前并未发现其他异常现象。事故造成的经济损失达数千万元。

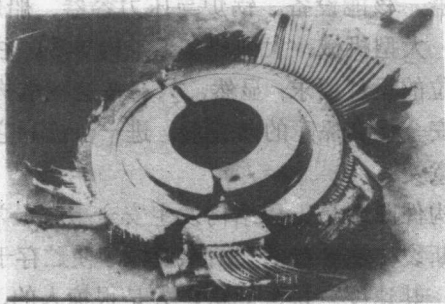


图 1-1 飞裂后的叶轮残体照片

3. 葛洲坝水利枢纽工程 2 号船闸下闸首人字形门顶枢锚杆断裂事故。葛洲坝水利枢纽 2 号通航船闸下闸首人字形钢闸门，高 33m、宽 17m、厚 2m。1982 年 10 月安装后投入运行。1983 年 3 月 18 日 16 时 45 分，在关门过程中左边一扇闸门顶枢锚杆（主拉杆）突然断裂。该锚固拉杆用 45 号钢经锻压切割制成，矩形截面杆断面尺寸为 300×200mm，拉杆两端用圆轴铰接，是典型的轴向拉伸杆件。图 1-2 示出了锚固拉杆的外形尺寸。图 1-3 所示为锚杆（主拉杆）的断口照片。断口边缘有 4mm 深的带锈裂纹，这是构成事故的断裂源。这次事故使 2 号船闸停用三个月，经济损失是很大的。

4. 某发电厂 5 号汽轮发电机组毁坏事故。某发电厂 5 号机

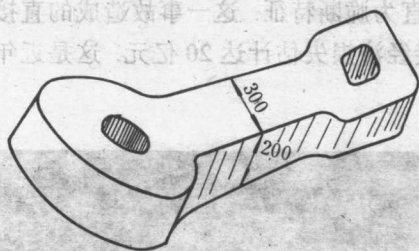


图 1-2 锚固拉杆外形

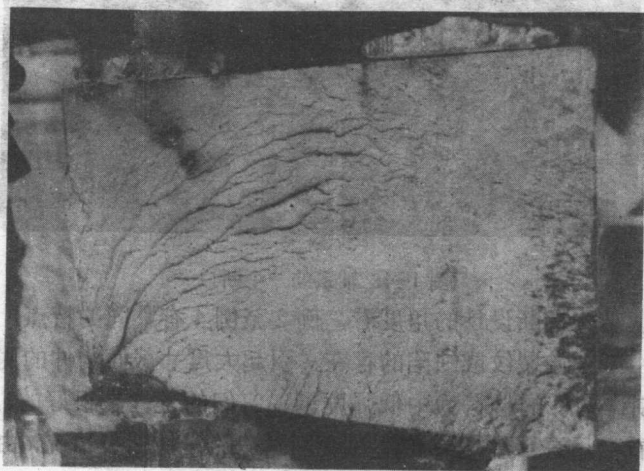


图 1-3 锚固拉杆断口形貌

组为大型汽轮发电机组，额定容量为 200MW，额定转速为 3000r/min，飞逸转速为 3600r/min，蒸汽温度为 555℃，工作压力为 18.4MPa。1986 年 2 月 20 日投入运行。在 1988 年 1 月 10 日停机大修后，做超速 10% 运转时，由于自控系统失控，转速达到 3520~3560r/min 时，引起发电机油膜振荡，机组轴系发生共振，造成机组轴系断裂成 12 段，机组全部损坏。其中一

段轴穿透厂房墙壁飞落到墙外 30m 处。图 1-4 所示的就是这段轴的断口，断口平直为脆断特征。这一事故造成的直接经济损失达 6000 万元，间接经济损失估计达 20 亿元。这是近年来发生的恶性断裂事故之一。

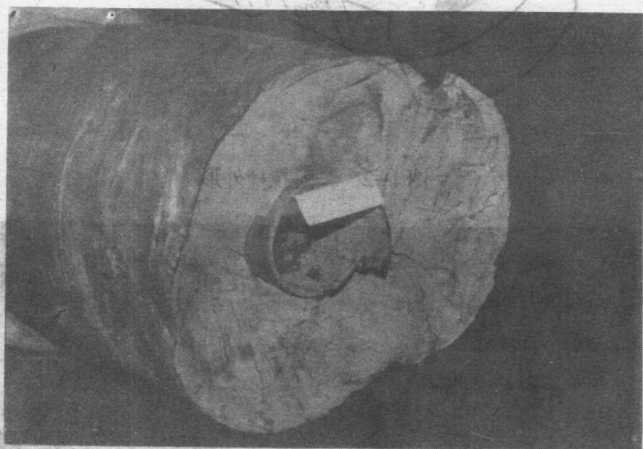


图 1-4 轴系的一个断口

从结构抗断设计的角度看，例 2 至例 4 有共同的特点，它们都是由于初始裂纹或缺陷的存在，引起大尺寸截面构件的脆性断裂。制作构件的材料为中低强度钢，它们的延性是很好的。下面再来看看用高强度钢或超高强度钢制造的构件断裂情况。由于受重量限制，在航空航天器中这种材料应用十分广泛。

5. 20 世纪 50 年代美国北极星导弹固体燃料发动机壳体，在实验时发生爆炸的事故引起了普遍重视。壳体是按设计要求严格检查了的。它所用的材料是屈服极限为 1372MPa 的高强度钢。而在发生爆炸破坏时壳体所受应力只有 686MPa。事后组织了 20 多个单位进行调查和研究，最后发现其破坏是由于壳体中存在 0.1~1mm 的裂纹源引起的。这次事故的发生和其后的研究，促进了断裂力学的形成。

6. 1965年美国发生了另一著名的260SL-1固体燃料火箭发动机压力壳的脆断事故。该压力壳内径为6600mm。材料是屈服极限为1715MPa的18NiCrMoTi钢，设计中选用焊缝系数为0.9，取极限应力为1.421MPa。壳体的设计内压为5.98MPa。安全系数取1.3，壳体厚度选用18mm。设计规定最大水压试验压力为操作压力的1.1倍，即 $p_k = 6.57\text{MPa}$ 。但在同年4月11日水压试验时，压力只到达3.72MPa(仅为规定试验压力的56%)就发生了爆炸事故。爆炸时壳体周向应力 $\sigma_r = 662.5\text{MPa}$ ，不但远低于材料的屈服极限，也远低于设计许用应力1078MPa。事后调查发现，这是微小裂纹引起的低应力脆断事故。

另一容易发生脆断事故的是焊接结构。在船舶和压力容器制造中，焊接工艺应用十分广泛，脆断事故发生也很频繁。

7. 第二次世界大战期间用全焊接工艺制造船舶成功，解决了盟军运输的大问题。这期间也发生了大量而严重的断裂事故。经过对5000艘船舶的调查，在1942年至1946年间发生断裂的全焊接自由轮运输船达千艘之多，有的在大洋之中折为两段。1946年至1952年有238艘发生严重断裂事故。近几十年来由于焊接材料、焊接技术的改良，船舶断裂事故已大大减少，但不时仍有发生。

8. 1965年12月，英国约翰·汤普生(John Thompson)公司制造的一台大型氨合成塔在水压试验时发生脆性断裂。该容器内径为1.925m，壁厚为150mm，全长为18.3m，质量为164t，筒体和法兰锻件的材料均为MnCrMoV钢。规定水压试验压力为48.02MPa，设计压力为35.28MPa。当水压试验压力至34.50MPa时即发生爆炸，容器折成两段，并飞出4块碎片。其中最大一块碎片质量为2t，飞出45m远。经查实，断裂是从法兰锻件与筒体的埋弧焊焊缝开始的。裂纹源是热影响区与焊缝金属间的长约10mm的三角形深埋裂纹。

除了上述三种情况，即中、低强度钢制作的大尺寸截面构

件、高强度或超高强度钢结构、焊接结构容易发生断裂事故外，疲劳裂纹扩展产生的断裂也是经常碰到的事故。

9. 1980年6月我国从芬兰买回一艘集装箱船。1981年4月2日，该船使用单机(左机)航行去香港的途中，突然左主机发出一声巨响，1号缸连杆螺栓断裂，大端上轴承座被敲碎，打破机架右侧，连杆搁在机座上自动停车，缸套、活塞、连杆严重损坏。经分析，这次事故的发生是因为螺栓中微裂纹在交变应力作用下疲劳扩展所致。

10. 1975年5月25日，美国一架DC-10大型客机在芝加哥奥黑尔国际机场起飞后不久坠毁，机上279人全部遇难。据分析，这次事故是挂飞机发动机的螺钉疲劳断裂引起的。

应该指出，在当今世界上每天就有上万起恶性断裂事故发生。涉及到各种类型的结构，大到核能装置，小到家用高压锅。我们不可能也不必要都于罗列。列举以上断裂事故频繁发生的四种情况，是因为工业与技术的发展要求结构趋向于尺寸大、重量轻、高的设计应力以及高转速。这四种情况将是抗断设计的主要工程背景。

§ 1-2 工程结构抗断设计的任务

正如上节所述，防止工程结构断裂是人类安全生产与正常生活的基本要求。人类曾以极大的努力来防止生产工具和工程结构的断裂，以达到顺利生产的目的。这种努力经历了从低级到高级，从经验到科学，逐渐提高的过程。图1-5所示的是一座埃及古神庙残壁上留下的一幅图画，它表示将 $3 \times 3 \times 30\text{m}^3$ 的整块方尖石碑从阿拉伯运到埃及时的装运船。图1-5(a)示出将石碑放于船中部时，对船身设计了加强弦杆。显然，当时对这种货船的危险挠度和可能的断裂方式是正确地预计到了。而且认识到，加强弦杆是受压的，所以用方木制成。图1-5(b)所示的则是将货物装于船首及船尾，中部空着留给指挥者和划船者用的情况。这里同

样正确地考虑到危险的挠曲和断裂的可能方式，而由支承于铅垂短柱上的坚固缆绳来组成受拉加强弦。虽然目前无法考证当时的工匠们是如何对这类尺寸庞大的结构进行设计和计算的，致使其安全性和使用性达到如此完满的协调。但其构思和制作成的结构本身都体现了结构抗断设计思想的萌芽，令人惊叹不止。

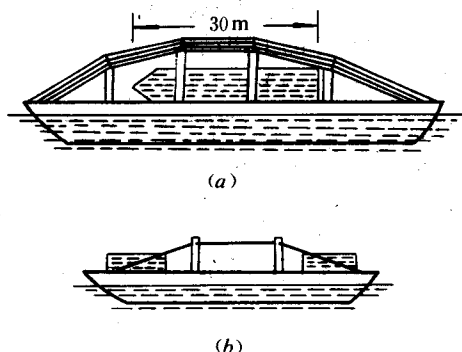


图 1-5 古埃及的运输船

从生产需要出发，在不断总结前人经验的基础上，建立在现代大工业和现代科学理论基础上的工程结构设计方法，在不断地改进、提高和完善。本教材所介绍的工程结构抗断设计包含两类设计思想：一类是传统的强度设计思想，它以材料的强度指标（静强度极限和疲劳极限）为设计的依据；另一类是以断裂力学理论为基础的设计思想，也称之为破损安全设计或损伤容限设计思想。

结构抗断设计的工程计算，概括地说包括两个内容：

1. 确定结构在外载荷作用下构件的应力分布；
2. 建立材料破坏或断裂的条件，从而给出避免这种破坏或断裂的方法，在最经济的条件下达到安全使用的目的。

在一般情况下，工程结构抗断设计任务可以具体地分为三个方面：

1. 选择材料及其合适的处理工艺，确定材料在特定环境下的强度特性和断裂行为；

2. 确定结构可以承受的最大载荷,或在确定的载荷条件下选择合理的结构形式、构件的形状和截面尺寸。

3. 正确估计结构的使用寿命或是根据裂纹扩展规律提出合理的损伤容限、探伤标准及维修周期。

对于一项具体的工程结构,抗断设计可能要求上述任务中的全部计算,也可能侧重于其中的某些计算,这要依工程结构的性质和使用条件而定。在原始数据较为完备时,在许多情况下,近代抗断设计方法能给出相当准确的计算结果;而在原始数据不完备的情况下,则可结合经验给出定性的或近似的定量结果。

§ 1-3 工程结构抗断设计的理论基础

近代工程结构都是综合应用各种近代科学和技术成就的产物。作为一个设计者需要有广博的近代科学技术知识,并具有善于运用这些知识来实现设计目标的能力。正如上面两节所述,工程结构抗断设计是在设计许多结构,特别是一些重大工程结构时所必须要求的设计内容。因而,从事这种结构的设计、制造、使用的工程技术人员,必须具备这方面的基础知识。

把工程结构抗断设计建立于科学理论基础上是近代科学技术发展的重大成就。所谓近代工程结构抗断设计的理论基础,主要是指在连续介质力学基础上建立起来的材料的力学强度理论和断裂力学理论。实际表明,在上述理论上建立的工程结构抗断设计方法常常是很有效的,说明这些方法已能控制影响结构断裂的主要因素。但由于结构的断裂或破坏是一种复杂的物理现象,涉及的影响因素非常多,要完全认识这些现象,人类还需做出巨大的努力。随着人类对这种复杂的物理现象认识的深化,抗断设计方法也会得到不断改进与完善。

以力学强度理论为基础和以断裂力学为基础的抗断设计方法各有其特点和长处,互为补充,相辅相成。前者的不足之处在于不能定量地考虑构件中客观存在的缺陷、裂纹及其扩展对构件断