



材料科学丛书

肖纪美 编著



金属的韧性与韧化

上海科学技术出版社

材料科学丛书

金属的韧性与韧化

肖纪美 编著

上海科学技术出版社



内 容 提 要

本书主要介绍金属材料的韧化原理及其应用。书中着重从断裂力学角度分析了断裂现象与材料断裂韧性之间的关系,分别讨论了各种缺口断裂韧性和裂纹断裂韧性的力学意义,对断裂力学基本参量—— K 和 J 作了较为详尽的推导;同时也从物理学、化学和金属学的角度分析了断裂过程,探讨了断裂机理,总结了金属材料韧化的原理。在此基础上,书中进一步探讨了提高金属材料断裂韧性的途径,提出了韧化的工艺,把韧化原理应用于冶炼、铸造、压力加工和热处理等工艺中。第8章还专门讨论了焊接结构的韧化问题。

本书读者对象是高等院校和科研单位有关专业人员,以及从事这方面工作的工程技术人员。

材料科学丛书

金属的韧性与韧化

肖纪美 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海新华印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 17.8 字数 484,000

1980年10月第1版 1980年10月第1次印刷

印数 1—8,500

书号: 15119·2061 定价:(科四)1.95元

前 言

近七年来,由于教学和科研的迫切需要,作者运用“断裂力学”这个工具,研究了金属材料的“断裂”问题。

1976年4月,在北京钢铁学院举办的为期六周的“断裂韧性测试和应用”训练班上,作者编写和讲授了《断裂力学原理和应用》。1978年,在北京钢铁学院举办的为期一年的“断裂分析”进修班上,作者编写和讲授了《韧化原理与工艺》。为了科研的需要,几年来,在金属材料断裂方面,还先后综合评述过以下几个专题:

- (1) 《高速钢的金属学问题》(1973年8月);
- (2) 《不锈钢的金属学问题》(1974年8月);
- (3) 《电站设备断裂事故的分析》(1977年6月);
- (4) 《焊接结构的断裂力学分析》(1977年10月);
- (5) 《断裂韧性、断口金相和断裂过程》(1978年3月);
- (6) 《化学介质和断裂过程》(1978年9月)。

此外,这几年来受学会、科协、科研单位和工厂的委托,围绕着“断裂力学”、“断裂”、“韧性”、“韧化”、“断裂分析”、“应力腐蚀断裂”、“氢损伤”等课题,还先后作了四十余次报告。

通过这些活动作者深深感到,“断裂”这个学科具有重要的实际意义;因而,试图从几年来的教学和科研实践中,总结出“韧性和韧化”方面的规律性的东西来。本书就是在这个思想指导下编写而成的。

工程结构脆断事故的不断出现,促使人们重视工程材料的断裂韧性。在第1章引论中,我们从各个方面引入了不少与断裂有关的术语,并阐述了它们之间的关系。断裂事故的发生,人们对于断裂事故所进行的断裂分析,促进了断裂学科的发展。这个新兴的边缘学科,综合运用了力学、物理学和化学的成就,从而形成了

断裂力学、断裂物理和断裂化学三个分支,它们从各个方面分析断裂问题及材料学科的重要问题——断裂韧性。断裂力学在弹性力学和塑性力学的基础上,建立了断裂韧性、断裂应力和裂纹尺寸之间的关系,提供了断裂判据,是断裂分析的有力的工具;断裂物理是研究断裂韧性的物理实质,以查明断裂起源和断裂过程,建立断裂机理,为提高断裂韧性(韧化)提供理论基础;断裂化学则研究化学介质对于断裂过程的影响,重点解决腐蚀断裂和氢脆等断裂问题,以及反映这种断裂的韧性问题。

为了理解和控制断裂韧性,我们应该从各个方面去观察和分析它。对于这类宏观力学性能,首先应该从宏观力学角度去进行分析。因此,在第2、3、4章,分别在缺口断裂力学及裂纹断裂力学的基础上,讨论了各种缺口断裂韧性及裂纹断裂韧性。在第2章,分析了缺口下的应力集中、应变集中和缺口敏感,讨论了各种缺口断裂韧性及其工程应用。在第3章,首先从能量分析方法导出Griffith断裂理论,引入裂纹伸展的能量释放率(G);然后较为详尽地推导了穿透型裂纹和表面裂纹的应力场强度(K)的表达式;在这些基础上,进一步推导出 G - K 关系式,并讨论了裂纹断裂韧性 K_{I0} 的力学意义。在第4章,则较为详尽地推导了 J 积分和裂纹顶端张开位移(ODD 或 δ)的表达式,并在这些基础上讨论了裂纹断裂韧性 J_{I0} 及 δ_0 的意义;此外,还介绍了其他的裂纹断裂韧性。这三章,是断裂韧性的力学基础。

在第5章,我们首先讨论韧性测试的几个共性问题,然后从断裂学科的发展历史,分析了断裂韧性,阐述了各种断裂韧性的建立过程以及它们相互之间的关系。了解断裂韧性的发展过程对分析断裂问题是重要的。最后,我们从四个方面分析了断裂韧性:第一,我们尝试从力学过程的应力、应变和应变能去分析各种韧性参量;第二,从力学过程的内因和外因,分析了 σ_K (或 σ_T)与 K_{I0} 之间的区别和联系;第三,基于这样的认识,即断裂过程是沿着能量降低的方向、遵循阻力最小的途径进行的,我们讨论了能量学和过程学方法在断裂分析中的应用;第四,由于脆性是韧性的对立面,

我们尝试从人们在金属材料脆化方面所取得的研究成果中，寻找可以影响韧性的因素。

在第6章，我们首先介绍了裂纹形成的断裂理论，示例地介绍了用能量学方法处理的位错堵塞理论和晶界碳化物膜理论，讨论了影响断裂韧性的力学参量和金属学参量。其次，讨论了裂纹伸展的断裂理论，介绍了应变判据的韧断理论和应力判据的解理断裂理论。同时我们从组织结构（晶界、晶内基体、脆性相及韧性相）分析了影响断裂韧性的因素，探讨了提高断裂韧性的途径。

第5章及第6章是断裂韧性的物理学和化学基础，也是其金属学基础。从第2到第六章，我们从各方面分析了断裂韧性，这些内容组成了“韧化原理”。

工艺决定了成分和组织结构（广义的结构），而结构又决定了性能。在第7章，我们按照这一思路讨论了韧化工艺，并强调了从结构变化这个中心环节去理解工艺与断裂韧性之间的关系。我们挑选冶炼、铸造、压力加工和热处理等几个重要问题进行了分析，借以阐明工艺、结构和性能间的相互关系。只有通过工艺，才能改变结构；只有通过工艺，才能生产出满足断裂韧性要求的金属材料。一种工艺常常会改变多种结构参量，而这些参量对断裂韧性的影响也可能是相反的，因而必须分析起主要作用的参量。

焊接是最接近于使用状态的工艺。随着焊接结构应用的日益广泛，焊接脆性的问题不断出现，迫使人们去研究焊接工艺对于焊接结构（包括焊区各个区域）的影响。在第8章，我们应用断裂力学的理论，讨论了焊接工艺对于残余应力、焊接缺陷及焊区断裂韧性的影响。第7章讨论的是材料的韧化问题，而第8章分析的是焊接结构的韧化问题；这两章都是讨论韧化原理的应用，即韧化工艺。

本书力图阐明原理和处理方法。因而，对断裂力学基本参量 K 和 J 作了较为详尽的推导。在韧性分析上，则采用演绎的方法，按照自然过程总是沿着能量降低的方向，遵循阻力最小的途径这个简化原理，从能量和过程两个方面讨论了断裂途径，从而总结

了一些韧化的原理。在韧化工艺方面,只是阐明其原理,而不求网罗资料。由于作者几年来主要是在线弹性断裂力学应用较为成熟的领域——超高强度钢及中强度大锻件钢方面进行了一些科研工作,因而在资料的选择上,也偏于这两个领域;并且对表面裂纹及焊接结构,讨论也稍多。

由于时间和篇幅的限制,对于疲劳断裂及应力腐蚀断裂这两个重要问题的机理,我们没能进行讨论,希望另有专著介绍。

最后,作者谨向这几年来共同战斗的同志致谢;没有这些同志的帮助和启发,本书是无法完成的。这些同志是:北京钢铁学院金属物理教研组的林实、褚武扬、姚玉琴、吴杏芳、李世琼、屠懋等同志,力学教研组的王枏、邓极钧、靳东来、祝淑叶等同志。

作者 于北京钢铁学院

1979年2月

毛主席语录

指导一个伟大的革命运动的政党，如果没有革命理论，没有历史知识，没有对于实际运动的深刻的了解，要取得胜利是不可能的。

社会主义制度终究要代替资本主义制度，这是一个不以人们自己的意志为转移的客观规律。不管反动派怎样企图阻止历史车轮的前进，革命或迟或早总会发生，并且将必然取得胜利。

目 录

第1章 引论	1
§1 断裂事故和工程设计	1
§2 强度、塑性、韧性和弹性	3
§3 断裂韧性和断裂力学	9
§3-1 缺口冲击韧性	9
§3-2 裂纹断裂韧性和断裂力学	13
§4 断裂分析和断裂学科	17
第2章 缺口断裂力学和缺口断裂韧性	27
§1 应力集中	27
§1-1 力学公式和概念	27
§1-1-1 圆孔和圆筒	27
§1-1-2 椭圆孔	31
§1-1-3 重要概念	32
§1-2 物理图象	35
§2 应变集中	38
§2-1 弹性负荷	38
§2-1-1 平面应力	38
§2-1-2 平面应变	39
§2-2 整体屈服	41
§2-2-1 双边半圆缺口	41
§2-2-2 深裂纹	42
§2-2-3 V型缺口	45
§2-2-4 L 和 Q 的物理意义	47
§2-3 应变集中系数	48
§3 缺口敏感	48
§4 缺口断裂韧性	54
§4-1 影响因素	55
§4-1-1 应力状态	55

§ 4-1-2 材料强度	56
§ 4-2 试验方法	58
§ 4-2-1 落锤试验	59
§ 4-2-2 爆破鼓突试验	59
§ 4-2-3 裂纹停止伸展温度(CAT)试验	60
§ 4-2-4 焊接区缺口韧性试验	60
§ 4-3 缺口断裂韧性参量和相关性	61
§ 4-3-1 缺口韧性参量	61
§ 4-3-2 缺口韧性之间相关性	63
§ 4-3-3 缺口韧性与断裂事故之间的相关性	64
第 3 章 裂纹断裂力学和裂纹断裂韧性(一)	
——线弹性断裂力学	68
§ 1 能量分析	69
§ 1-1 完整晶体的理论强度	70
§ 1-2 裂纹体的断裂理论	74
§ 1-3 裂纹伸展的能量释放率(G)	77
§ 1-3-1 柔性法测 G	79
§ 1-3-2 能量关系	81
§ 2 应力场强度分析——穿透型裂纹	84
§ 2-1 Westergaard 应力函数	85
§ 2-2 穿透型裂纹的应力场强度	90
§ 2-2-1 双向拉伸(K_I)	90
§ 2-2-2 单向拉伸(K_I)	95
§ 2-2-3 II型和III型裂纹的应力场强度(K_{II} 和 K_{III})	98
§ 3 G - K 关系式	101
§ 4 塑性区校正	104
§ 4-1 平面应力	105
§ 4-2 平面应变	107
§ 4-3 有效裂纹长度	109
§ 5 应力场强度和裂纹断裂韧性	111
§ 5-1 应力场强度(K)	111
§ 5-2 裂纹断裂韧性(K_{I0})	113
§ 5-3 K_{I0} 的测试	115
§ 6 应力场强度分析——表面裂纹	117
§ 6-1 数学推导	118

§ 6-2	随后发展	125
§ 6-3	物理过程	132
§ 6-4	工程应用	136
§ 6-4-1	K_{I0} 的测试	136
§ 6-4-2	断裂分析	140
第 4 章 裂纹断裂力学和裂纹断裂韧性(二)		
——弹塑性断裂力学		145
§ 1	裂纹顶端张开位移(COD)	147
§ 1-1	COD 的数学表达式	148
§ 1-2	COD 的测定	152
§ 1-2-1	δ 和 V_0 的关系	153
§ 1-2-2	临界点的确定	155
§ 1-3	δ_0 的物理意义和应用	156
§ 1-3-1	脆断与厚度	156
§ 1-3-2	断裂应力	156
§ 1-3-3	脆断与温度	157
§ 1-4	δ_0 的工程应用	157
§ 1-4-1	输气管道的韧断设计	160
§ 1-4-2	Burdekin-Dawes 方法	164
§ 2	J 积分	168
§ 2-1	能量线积分 J 的性质	168
§ 2-2	J 积分的力学意义	174
§ 2-2-1	能量释放率 G 和 J 的关系	174
§ 2-2-2	裂纹顶端奇异性问题—— K 和 J 的关系	176
§ 2-2-3	J 和 COD 的关系	178
§ 2-3	J_{I0} 的测试	179
§ 2-3-1	J_I 的等值定义	180
§ 2-3-2	J_I 的测定	183
§ 2-3-3	临界点的选择和测定	186
§ 3	其他断裂韧性参量	187
§ 3-1	能量及能量率	188
§ 3-1-1	缺口断裂韧性和 K_{I0} 的关系	188
§ 3-1-2	等能量法	190
§ 3-1-3	广义的能量释放率 ($\bar{G}$)	193
§ 3-2	裂纹伸展阻力曲线—— R 曲线	195

第5章 断裂韧性的意义	206
§ 1 韧性的测试	206
§ 1-1 试样的制备	207
§ 1-1-1 裂纹制备	208
§ 1-1-2 尺寸要求	210
§ 1-2 临界点	212
§ 2 历史分析	214
§ 2-1 断裂历程	215
§ 2-2 学科历史	218
§ 2-2-1 断裂力学	218
§ 2-2-2 断裂物理	224
§ 2-2-3 断裂化学	225
§ 3 物理分析	228
§ 3-1 应力、应变和应变能	229
§ 3-2 内因和外因	234
§ 3-3 能量和过程	240
§ 3-4 韧性和脆性	249
第6章 断裂过程分析	254
§ 1 裂纹形成的断裂理论	254
§ 2 裂纹伸展的断裂理论	259
§ 2-1 应变判据——切断模型	260
§ 2-2 应力判据——解理断裂	266
§ 3 裂纹伸展途径分析	273
§ 3-1 沿晶断裂及晶粒度	273
§ 3-2 脆性相	287
§ 3-2-1 几何学因素	287
§ 3-2-2 化学因素	301
§ 3-2-3 力学因素	303
§ 3-2-4 物理因素	304
§ 3-3 韧性相	305
§ 3-3-1 复相合金	306
§ 3-3-2 复合材料	315
§ 3-4 基体	326
§ 3-4-1 应变硬化指数及断裂应变	328

§ 3-4-2	相变诱导塑性的 TRIP 钢	333
§ 3-4-3	形变和解理断裂	340
§ 3-4-4	奥氏体及其转变产物	351
第 7 章	韧化工艺	365
§ 1	冶炼和铸造	366
§ 1-1	成分控制	366
§ 1-2	气体和夹杂物	368
§ 1-3	铸造和特殊冶铸工艺	378
§ 1-4	铸造材料	381
§ 2	压力加工	389
§ 2-1	晶粒大小	389
§ 2-2	晶粒取向	397
§ 3	热处理	400
§ 3-1	超高温淬火	400
§ 3-2	临界区淬火	415
§ 3-3	回火和时效	430
§ 3-3-1	回火软化性	430
§ 3-3-2	高温回火脆性	433
§ 3-3-3	低温回火脆性	438
§ 3-3-4	时效硬化	441
§ 3-4	形变热处理	446
§ 3-4-1	铁基合金	446
§ 3-4-2	铝基合金	456
第 8 章	焊接结构的断裂力学分析	462
§ 1	应力和 K 的表达式	464
§ 2	焊接缺陷和焊接脆性	472
§ 2-1	焊接裂纹和焊接脆性	472
§ 2-1-1	凝固开裂	474
§ 2-1-2	过烧及过热脆性	477
§ 2-1-3	分层开裂	479
§ 2-1-4	马氏体转变脆性	481
§ 2-1-5	氢脆	486
§ 2-1-6	焊后加热开裂	492
§ 2-2	其他焊接缺陷	499
§ 2-2-1	欠焊	499

§ 2-2-2 夹渣	501
§ 2-2-3 气孔	502
§ 3 焊区的断裂韧性	502
§ 3-1 测试方法	503
§ 3-2 分布规律	506
§ 3-3 韧化措施	511
结束语	522
参考文献	534

第 1 章

引 论

§ 1 断裂事故和工程设计

磨损、腐蚀和断裂是工程构件三种主要破坏形式,其中以断裂所带来的危害为最大。在土建、机电、化工、冶金等工业中,各种工程结构例如钢建筑、桥梁、船艇、电站设备、压力容器、输气管道、轧辊等,都曾出现过不少的重大脆断事故。这些脆断事故,是人们所不希望发生然而又确实发生了的断裂现象的现场“实验”。应用已有的科学知识,对这些事故进行科学的分析,可使人们获得有益的教训。接受这些教训,并采取相应的措施,既提高了工程结构的安全性,也提高了人们的认识水平。

通过分析,人们认识到脆断具有如下几点共性:

(1) 脆断时,结构的宏观应力一般都小于材料的屈服强度。

(2) 脆断从应力集中处开始,冶金和机械加工过程中产生的缺陷,特别是缺口和裂纹,通常是脆断的发源地。

(3) 低温、厚截面和高变形速度,易于引起脆断。

断裂事故的发生,以及对于它的分析结果,产生了三方面效应:

(1) 冲击了原有的设计思想。既然宏观应力低于材料的屈服强度就会发生脆断,那么安全系数就失去了意义,人们不禁要怀疑,传统的强度设计是否合理?

(2) 对材料的断裂判据发生了怀疑。为什么宏观应力低于材料的抗拉强度材料就发生了脆断?真正合理的材料的断裂判据又应当是什么呢?

(3) 考核了工艺的适用性。有些工艺,例如熔化焊接,不仅会

改变材料的性能, 而且还会引入残余应力和缺口、裂纹等缺陷, 从而也会影响断裂。第二次世界大战期间, 美国将焊接技术引入造船工业, 随之也带来了脆断问题。

设计、材料和工艺三者之间的关系是: 设计是主导, 材料是基础, 工艺是保证。设计的指导思想是重要的, 因为它规定了工作应力、材料性能和工艺规范。我们先来看看设计工作者是如何依据材料的力学性能来进行设计的。

在单向拉伸光滑试样的情况下, 当负荷从零开始逐步增加时, 金属材料将经历弹性变形、塑性变形, 最后则发生断裂。进行拉伸试验, 可以测定金属材料的各项力学性能(或叫作机械性能):

σ_p ——比例极限;

σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ ——屈服强度;

δ ——伸长率;

E ——弹性模量;

σ_b ——抗拉强度;

ψ ——截面收缩率。

已知材料的这些性能以及工程构件的受力情况, 就可以按现有的各种强度理论进行设计。传统的设计只考虑弹性和塑性, 可以分别叫作弹性设计和塑性设计。例如, 在弹性范围内工作的机械零件(如弹簧), 依据 E 及 σ_p 进行设计; 工程构件可以允许少量塑性变形, 因此可依据 σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ 进行设计。为了设计安全, 引入了安全系数 S :

$$S = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{\max}} \quad (1-1-1)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 是依据构件的几何形状和负荷所计算的最大应力。 S 一般在 1.5 到 2 的范围内, 依据经验选择。

“安全”系数从某种角度讲也是一种“无知”系数, 它反映了人们对于客观事物的了解程度, 例如应力分析是否与使用条件完全符合, 施工过程引入的残余应力有多大, 施工与设计之间有多少偏差等等。人们采用大于 1 的 S 值来弥补这些“无知”, 从而获得

“安全”设计。

随着对于客观事物认识的不断深入,人们考虑到高温、疲劳及腐蚀的作用,在设计中又分别引入了持久强度、疲劳极限及应力腐蚀断裂强度等材料性能。此外,还考虑了多向受力的情况。这些设计实质上只考虑强度,也可叫作强度设计。对于塑性指标(δ 及 ψ)以及综合反映强度和塑性的韧性指标(例如冲击韧性 a_K),只是依据经验提出要求,而这个要求并未用于设计的计算。

虽然上述传统的强度设计成功地设计了无数的工程结构,但也仍然出现不少的工程结构脆断的事故。这就迫使设计工作者在传统的强度设计之外,寻求防止脆断的措施,这便是脆性设计,或叫作韧性设计。

设计工作者和材料工作者,经常是在材料性能上找到合作的基础和共同的语言。进行韧性设计时,应该提出什么样的韧性指标,材料工作者又如何能达到这种指标,这是首先要讨论的问题。设计工作者为了进行安全而有效的设计,例如既要避免脆断又要减轻重量(火箭外壳、高层建筑的高强度钢筋等),在传统的强度设计思想的指引下,往往会片面地对材料强度提出越来越高的要求,而对于韧性,则仅仅是依据使用低、中强度材料时的经验,提出“相应”的要求。然而什么是相应的要求,即什么样的韧性指标能反映脆断趋势,对于具体的工程结构又需要多大的韧性,这种韧性如何测定,以及如何通过工艺来保证等等,这都是需要认真研究的。在下一节,我们先简单地分析一下韧性及其与其他力学性能之间的关系。

§ 2 强度、塑性、韧性和弹性

韧性是材料的一种力学性能。材料的性能是材料在给定外界条件下所表现的行为,这种表现也是材料的一种变化,因此我们可以从外因和内因的关系去理解韧性。

相同的金属材料(包括成分和组织结构),在不同的外界条件