

常用黑色金属

材料断裂力学性能参数手册

马德林 等著

兵器工业出版社

常用黑色金属材料断裂力学性能参数手册

马德林 等著

兵器工业出版社

(京)新登字 049 号

内 容 简 介

本手册系“常用金属材料断裂力学性能参数手册”课题组在经过 10 年研究测试的基础上编写的一本工具书,它汇总了五个实验室分头测定的枪钢、炮钢、弹箭钢和弹簧钢、装甲钢和铸钢、结构钢和其他钢等 52 种常用金属材料,在不同回火温度和不同试验温度下的常规力学性能和断裂力学性能参数的数据表和曲线图。手册介绍了常用金属材料主要性能参数的测试原理、所用公式及测试技术和测试方法;扼要地介绍了断裂力学性能参数与基础性能参数之间关系的主要成果。

本手册一律选用生产中的原材料,其性能数据可供设计、生产、使用和科研部门的工程技术人员直接使用,也可供高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

常用黑色金属材料断裂力学性能参数手册/马德林等著, —北京:兵器工业出版社, 1994. 12

ISBN 7-80038-799-2

I. 常… II. 马… III. 金属材料-断裂力学-力学性能试验-IV
①TG14-62②TG111.91-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 02372 号

兵器工业出版社出版发行

(北京市海淀区车道沟 10 号)

各地新华书店经销

北京育才印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:19.625 字数:472.68 千字

1994 年 12 月第 1 版 1994 年 12 月第 1 次印刷

印数:1—500 定价:22.00 元

常用黑色金属材料断裂力学性能参数手册著作委员会

主 编 马德林

特邀编委 王良国

编 委 (以下按姓氏笔划为序)

马勇立 马德林 邓爱明 刘玉麟 陈福泰

张滨茹 秦运荟 景海江 潘会庆

前 言

断裂力学是研究含裂纹体力学行为的一门新兴的固体力学分支学科,是对常规力学的重要补充和发展。断裂力学理论将材料的断裂韧度与外加应力、构件的缺陷大小和几何尺寸有机地联系在一起,从而为安全设计提供了定量的计算依据。因此,断裂力学一出现就得到迅速的发展,并在航空、机械、化工、交通和军工等部门得到具体应用,解决了大量的工程实际问题。

材料的断裂力学性能在构件设计、故障分析、寿命估价、新材料的应用推广、工艺规范的合理制定以及提高产品质量等方面均有较大的现实意义。国内外已将断裂力学性能参数列入评价若干材料的重要指标之中,这种趋势还在不断地发展和扩大。

为了适应断裂力学飞速发展的需要,国内外学者进行了大量的研究和实验工作。自1973年以来,已陆续出版了几本应力强度因子手册,但是,与其相配套的材料的断裂力学性能参数手册还不多见,大部分试验数据仅出现在分散的文献中。少量的类似于手册性质的专著中,提供的数据均欠完整。为了满足广大科技人员的需要,兵器科学研究院于1980年3月在重庆主持召开“八〇、三”会议上,决定编写“常用金属材料断裂力学性能参数手册”,并作为课题任务下达,委托五二研究所负责组织实施。为此,五二研究所经过大量的调查研究,制定了统一的研究试验方案,拟定了有关试验技术和试验方法等技术文件,从20多个生产厂家提供的120多种材料中,筛选出52种常用金属材料,组织了6个单位,5个实验室,用了10年的时间共同完成了本手册的数据测试和整理工作,汇集成这本“手册”。

在本手册中,绝大部分试验是严格按照国家标准执行的。但是,有些参数在国内,甚至在国际上也没有统一的试验标准,为此课题组先后召开了四次工作会议,并邀请有关专家对试验中碰到的一些理论和技术问题进行了专门研究和讨论,制定出一些供课题组执行的“内部标准”。有关“内部标准”的说明将在本手册第一篇内介绍。因此,本手册的形成过程不是简单的性能测试和数据整理,而是一个带有探索性的研究和试验的完整过程。

为了提高实测数据的可靠性和实用性,除了在试样数量上比标准的正常要求增加一倍外,对主要性能参数,各实验室均采用先进的进口试验机进行性能测试。此外,课题组还专门加工了一批试样在各实验室之间进行对比试验,并邀请冶金部钢铁研究总院断裂力学实验室进行仲裁试验。结果表明,全部的测试数据均在允许的试验误差范围内。因此本手册提供的数据能够满足实际应用的精度要求。

本手册汇总了原来常用的和近年新研制成功的典型枪钢、炮钢、弹箭钢和弹簧钢、装甲钢和铸钢、结构钢和其他钢等52种材料的常规力学性能(包括 σ_f 、 σ_b 、 σ_s 、 δ 、 ψ 、 A_k 、HRC、 E 和 n)和断裂力学性能参数(包括 K_{Ic} 、 J_R 、 ΔK_{th} 、 da/dN)的277个数据表和277张曲线图。其中,常规力学性能数据在表中以分式形式列出,分子代表实测数据的范围,分母是平均值。其他参数均给出每组或每个试样的实测结果。经缩颈修正的断裂真应力 σ_f 、工程弹性模量 E 、硬化指数 n (或 $1/m$)和门槛值 ΔK_{th} ,在其他手册中很少系统地给出,而在断裂力学理论和试验研究中,这些参数具有重要的作用,因此在本手册中将它们系统地列出。曲线图的绘制是在充分考虑特定参数

的物理行为的基础上,利用多项式回归分析结果做出的。例如,材料性能与回火温度关系曲线的绘制,考虑到回火脆性和二次硬化效应,一般取四次多项式为宜。然而,断裂韧度与试验温度关系数据,很难用多项式进行曲线拟合,因此采用折线绘制。但是考虑到韧-脆转变温度曲线具有上、下平台的特性,以及断裂韧度试验数据本身有10%的误差,因此,在上平台区,凡 K_{Ic} 试验数据在10%误差范围内,则一律用平均值绘制水平直线段。

本手册分两篇。第一篇是测试方法说明及断裂力学性能参数与其它性能参数的关系。在测试方法说明中,重点介绍“内部标准”的原理和测试技术。考虑到应力强度因子手册主要是写给力学工作者和设计人员的,而断裂力学性能参数手册则主要是写给与材料有关的工程技术人员,因此在本手册中占用一定篇幅简要地介绍断裂力学性能参数与基础性能参数之间关系的一些主要研究成果。这是因为,本手册中所涉及的材料范围虽然比较宽,但毕竟是有限的。对于从事材料研究、生产和使用部门的科技人员来说,他们更关心的是断裂力学性能参数的物理本质,以便改善现有材料的性能和研制高性能的新材料。

第二篇是数据和图表,按枪钢、炮钢、弹箭钢和弹簧钢、装甲钢和铸钢、结构钢和其他钢的顺序编排。

本手册一律选用生产中的原材料,其性能参数可供设计、生产、使用和科研部门工程技术人员直接使用,也可供高等院校师生参考。

参加本手册试验研究工作的单位有:中国兵器工业第五二研究所、国营长安机器厂、内蒙古第二机械制造总厂、内蒙古第一机械制造厂、中国兵器工业第五九研究所和国营建设机床厂。

本手册的编审工作由著作委会组织,采用分片负责制。全手册由主编统一校改和审定,最后请特约编委、中国力学学会理事、中国兵工学会应用力学研究会副主任委员、南京理工大学应用力学系主任王良国教授通审。由于缺少经验,手册中难免有缺点甚至错误,恳请批评指正。

在本手册的完成过程中,自始至终地得到了兵器科学研究院综合技术处以及课题组成员单位的鼎力支持和协助。中国科学院院士、北京科技大学教授肖纪美先生为本“手册”作序。在此一并表示衷心的感谢。

主编 马德林

19920320

序

50年代出现的断裂力学,提出了应力场强度(Stress field intensity)—— K 的概念,有时将 K 简称为应力强度(Stress intensity)。 K 是一个场的概念,依据 K ,可以计算裂纹尖端区任一点(极坐标为 r, θ)的应力分量(σ_{ij})及应变分量(ϵ_{ij}):

$$\sigma_{ij} = f(K, \theta, r) \quad (1)$$

K 是外加应力 σ 及裂纹长度 a 的复合参量:

$$K = \alpha \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

式中 α 是随裂纹几何形状而异的无量纲系数。对于 σ 垂直于裂纹面的拉开型裂纹,叫做I型;这时的 K 记为 K_I 。采用裂纹失稳扩展而致断裂的条件为临界(Critical)条件,这时的 K_I 为 K_{Ic} :

$$K_{Ic} = \alpha \sigma_F \sqrt{\pi a_c} \quad (3)$$

式中: σ_F 为断裂应力; a_c 为裂纹的临界长度; K_{Ic} 是临界条件下的 K_I 值,反映这种条件下材料抗断裂的能力,英文叫做 Fracture toughness,我们叫做断裂韧度。

从(2)式及(3)式可以看出 K 及 K_{Ic} 的量纲为:

$$(\text{Nm}^{-2})(\text{m})^{\frac{1}{2}} = \text{Nm}^{-\frac{3}{2}}$$

若将 K_{Ic} 换算为裂纹扩展的能量释放率 G_{Ic} :

$$G_{Ic} = \frac{1-\nu^2}{E} K_{Ic}^2 \quad (4)$$

式中 ν 为泊松比, E 为弹性模量。 G_{Ic} 的量纲为:

$$(\text{Nm}^{-\frac{3}{2}})^2 / (\text{Nm}^{-2}) = \text{J/m}^2$$

即裂纹扩展单位面积(m^2)所需的能量(J),这就与夏比U型缺口冲击吸收功 A_{KU} ,即冲断给定缺口下截面所需的能相似。对于光滑试样,也可用真实应力(σ)-真实应变(ϵ)的拉伸曲线下面积来表征韧性:

$$\int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon = \text{面积} \quad (5)$$

其量纲为:

$$(\text{Nm}^{-2})(\text{m}/\text{m}) = \text{J/m}^3$$

即单位体积所吸收的能量。

因此,所有的韧性都可以转换为不同条件下的断裂能量参量,这种能量是强度和塑性的综合表现。断裂时的强度、塑性和韧性分别对应于断裂时的应力、应变和能量。

从(3)式可以看出,断裂力学理论将材料的性能 K_{Ic} 、外加载荷(σ_F)、裂纹尺寸(a_c)及几何(a)定量地联系在一起,为安全设计和评估提供了有效工具。如图1a的等边三角形所示,这个系统包括三个组元:

(1)力学工作者——计算 σ ;并依据裂纹几何,提供不同裂纹几何条件下的 a 。这部分工作

有共性,全世界的断裂工作者可以共享这方面的信息。

(2)材料工作者——测定 K_{Ic} 及其它力学性能,这些性能具有结构敏感性,各国的材料工作者必须测定国产材料在各种工艺条件下的这些性能,提供设计使用。这是具有特性的工作。

(3)探伤工作者——发展和完善探伤技术,获得误差较小的裂纹尺寸。这是易于遗忘的部分。

兵器科学研究院于1980年3月在重庆主持召开的会议中,决定编写这本手册,挑选了52种常用金属材料,用了十几年的时间,将图1a所示的断裂分析工作移向M点,是富有战略眼光的。正如图1b所示的坦克总体设计中,对于给定总质量的坦克中,如何分配到防护(P)、火力(F)及机动(M)这三方面,也是一个战略决策。

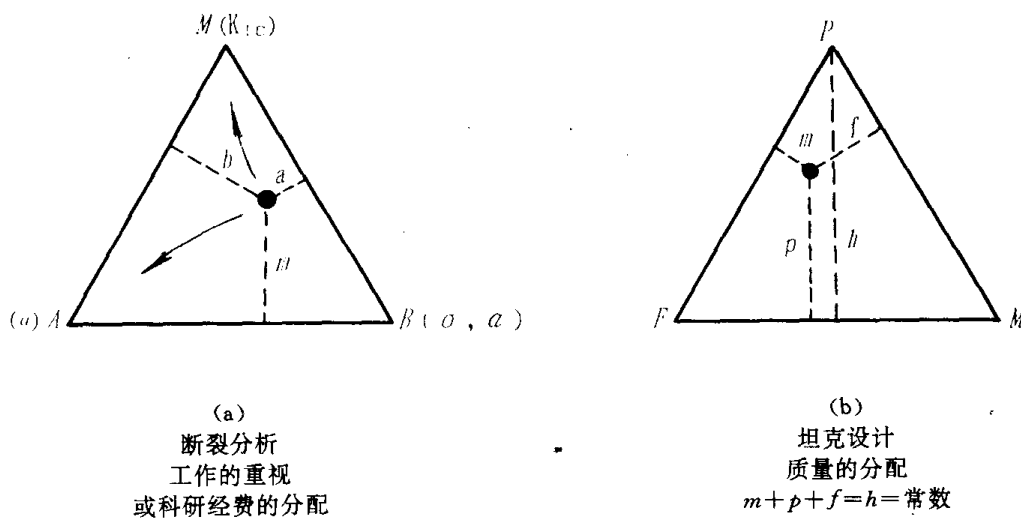


图1 三组元系统

在战术上,五二研究所经过大量的调查研究,制定了统一的研究试验方案,拟定了试验技术和试验方法等文件,组织了6个单位、5个实验室,完成了本手册的数据测试和整理工作。

十几年的艰苦战斗成果,整理成两篇八章的手册。第一篇共两章;第一章测试技术和测试方法,简明地介绍了国家标准以外的、课题组所执行的“内部标准”;第二章扼要地讨论了断裂力学性能与其他力学性能之间的关系,便于估算未知的断裂力学性能。第二篇共六章,将52种钢分为六大类,分别收集了各种钢的成分、原材料状态、热处理、室温力学性能、室温断裂韧性、低温断裂韧性、疲劳裂纹扩展速率和门槛值。

这本手册所收集的性能数据,不仅可供设计、生产、使用和科研部门的工程技术人员直接使用,也可供高等院校师生及科研单位的研究人员进一步总结规律、探讨机理时参考。

我相信,本书的出版,将为广大的断裂分析工作者提供一本很好的工具书,使材料能更好地为我国四个现代化服务。

北京科技大学

肖纪美

1993.12

符号和术语

- A_{kU} —— 夏比 U 型缺口冲击吸收功, J
 A_{kV} —— 夏比 V 型缺口冲击吸收功, J
 a_{kU} —— 夏比 U 型缺口冲击韧性值, J/cm²
 a_{kV} —— 夏比 V 型缺口冲击韧性值, J/cm²
 a —— 裂纹长度, mm
 Δa —— 裂纹扩展增量, mm
 c —— Paris 公式中的常数
 d —— 晶粒直径, μm
 E —— 工程弹性模量, MPa
 e —— 工程应变
 f —— 频率, Hz
 G —— 切变弹性模量, MPa
 G_{1c} —— 能量释放率(或称裂纹扩展力), N/mm
 H —— 广义弹性模量, $=E$ (平面应力), $=E/(1-\nu^2)$ (平面应变), MPa
 HB—— 布氏硬度
 HRC—— 洛氏硬度
 h_r —— 相对湿度, %
 J —— J 积分, N/mm
 J_i —— 启裂 J 积分 J_{1c} , N/mm
 J_R —— J_R 阻力曲线, N/mm
 $J_{0.05}$ —— 裂纹扩展 0.05mm 时的 J 积分, N/mm
 $J_{0.2}$ —— 裂纹扩展 0.2mm 时的 J 积分, N/mm
 ΔJ —— J 积分的绝对误差, N/mm
 K_c —— 平面应力断裂韧度, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$
 K_{1c} —— 疲劳断裂韧度, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$
 K_I —— I 型应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$
 K_{1c} —— 平面应变断裂韧度, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$
 K_{1d} —— 动态断裂韧度, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$
 K_{JR} —— 由 J_R 换算出来的断裂韧度值, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$
 $K_{J0.05}$ —— 由 $J_{0.05}$ 换算出来的断裂韧度值, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$
 $K_{J0.2}$ —— 由 $J_{0.2}$ 换算出来的断裂韧度值, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$
 K_{\max} —— 在疲劳加载下, 与最大载荷对应的应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$
 K_{\min} —— 在疲劳加载下, 与最小载荷对应的应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$
 ΔK —— 应力强度因子范围, $=K_{\max} - K_{\min}$, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$
 ΔK_0 —— $R=0$ 下的门槛值, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$

- ΔK_e —— 有效应力强度因子范围, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$
 ΔK_{th} —— 门槛值, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$
 l_c —— 微观结构参量, μm
 m —— Ramberg-Osgood 关系中的硬化指数, 或者疲劳裂纹扩展速率指数
 N —— 数据对数, 或循环次数
 n —— Hollomon 硬化指数, 或者 Paris 公式中的指数
 n' —— 循环应变硬化指数
 P_{max} —— 在疲劳加载下的最大载荷, kN
 P_{min} —— 在疲劳加载下的最小载荷, kN
 R —— 载荷比或应力比, $= P_{min}/P_{max}$
 r —— 相关系数
 s —— 剩余标准差
 t —— 温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_{tem} —— 回火温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_{tes} —— 试验温度, $^{\circ}\text{C}$
 v —— Y 方向上的位移, mm
 da/dN —— 疲劳裂纹扩展速率 m/cycle
 α —— 材料常数
 β —— 材料常数
 δ —— 断后伸长率, %
 δ_5 —— 短比例试样断后伸长率, %
 δ_{10} —— 长比例试样断后伸长率, %
 ϵ —— 真应变
 ϵ_f —— 断裂真应变, $\approx \ln(1/(1-\phi\%))$
 ϵ'_f —— 平面应变下的断裂真应变
 ϵ_p —— 塑性真应变
 ν —— 泊松比
 σ —— 应力, MPa
 σ_b —— 抗拉强度, MPa
 σ_f —— 断裂真应力, MPa
 $\bar{\sigma}_f$ —— 平均断裂真应力, MPa
 σ_s —— 屈服点或屈服强度, MPa
 σ_{sc} —— 循环屈服强度, MPa
 $\sigma_{p0.1}$ —— 规定 0.1% 非比例伸长率的应力, MPa
 $\sigma_{p0.2}$ —— 规定 0.2% 非比例伸长率的应力, MPa
 ψ —— 断面收缩率, %
 ρ —— 点阵间隙或门槛速率, m 或 m/cycle

目 录

前言	
序	
符号和术语	

第一篇 测试方法说明及断裂力学性能参数与其它性能参数的关系

第一章 测试技术和测试方法	(1)
1.1 断裂真应力	(1)
1.2 工程弹性模量	(2)
1.3 应变硬化指数	(2)
1.4 单试样法测定 J_{Ic} 的近似公式	(3)
1.5 疲劳裂纹扩展速率和门槛值	(3)
第二章 断裂力学性能与其它性能间的关系	(6)
2.1 断裂韧度与光滑试样拉伸性能的关系	(6)
2.2 K_{Ic} 与 A_{KV} 的关系	(7)
2.3 疲劳裂纹扩展速率和门槛值	(9)
2.3.1 经验关系.....	(10)
2.3.2 宏观力学模型.....	(11)
2.3.3 位错模型.....	(12)
2.3.4 累积损伤模型.....	(14)
参考文献	(16)

第二篇 数据和图表

第三章 枪钢	(18)
3.1 30SiMn2MoVA(工艺 A)	(18)
3.2 30SiMn2MoVA(工艺 B)	(24)
3.3 30SiMn2MoVA(工艺 C)	(30)
3.4 30CrNi2MoVA	(35)
3.5 30CrNi2WVA	(40)
3.6 30CrMnMoTiA	(45)
3.7 32Cr2MoVA	(50)
3.8 50BA	(55)
第四章 炮钢	(60)

4.1	PCrNi1MoQ	(60)
4.2	32CrNi2MoVA	(65)
4.3	708	(70)
4.4	PCrNi3Mo	(75)
4.5	PCrNi3MoVA(工艺A)	(80)
4.6	PCrNi3MoVA(工艺B)	(85)
4.7	G4335V	(90)
4.8	PCrNi4MoVA	(95)
第五章	弹、箭钢和弹簧钢	(100)
5.1	D60	(100)
5.2	9260	(105)
5.3	30CrMnSiA(工艺A)	(110)
5.4	30CrMnSiA(工艺B)	(116)
5.5	35CrMnSiA	(120)
5.6	45CrNiMoVA	(126)
5.7	58SiMn	(131)
5.8	60Si2MnA	(136)
5.9	65Si2MnWA	(141)
5.10	65Mn	(146)
第六章	装甲钢和铸钢	(151)
6.1	高压四钢	(151)
6.2	28CrMnMoRe	(156)
6.3	616	(161)
6.4	30CrNiMnMoRe	(167)
6.5	ZG28CrMnMoRe	(172)
6.6	ZG30MnNiMoCuBRe	(177)
6.7	ZG27CrNiMoRe	(182)
6.8	ZG35	(187)
第七章	结构钢	(192)
7.1	12CrNi3A	(192)
7.2	18CrMnNiMoA	(197)
7.3	18Cr2Ni4WA	(202)
7.4	20Cr2Ni4A	(207)
7.5	25Cr2Ni4WA	(212)
7.6	30CrNiWA	(217)
7.7	30CrNi3A	(222)
7.8	35CrMoA	(227)
7.9	35Cr	(232)
7.10	38CrA	(237)

7.11	38CrSi	(242)
7.12	40Cr	(247)
7.13	40MnB	(252)
7.14	40CrNi	(257)
7.15	40CrNiMoA	(262)
7.16	42CrMo	(267)
7.17	45CrNi	(272)
7.18	50Z	(277)
第八章	其他钢	(282)
8.1	20CrMnMo	(282)
8.2	38CrMoA1A	(287)
8.3	2Cr13	(292)
8.4	T8A	(297)

第一篇

测试方法说明及断裂力学性能参数 与其它性能参数的关系

第一章 测试技术和测试方法

在本手册中,绝大部分试验是严格按国标执行的,例如金属拉伸试验按 GB228—87 执行,冲击试验按 GB2106—80(V 型)或 GB229—84(U 型)执行, K_{Ic} 试验按 GB4161—84 执行, J_R 阻力曲线按 GB2038—80 执行,疲劳裂纹扩展速率按 GB6398—86 执行。但是,在本手册开始试验时,有些性能参数测定方法国内尚没有统一标准,或者虽然有参考标准,但是尚不够完善。因此我们不得不制定一些供课题组执行的“内部标准”。为了便于读者参考,我们将“内部标准”做一些简要介绍。

1.1 断裂真应力

通常所说的断裂真应力多半指的是平均断裂真应力,在数值上就等于拉伸试样的断裂载荷除以净截面面积。此处所说的断裂真应力是经缩颈修正后的断裂真应力。在断裂力学中,断裂真应力具有十分重要的作用,因此我们实测了这个参数。然而,直到目前为止,国内外均无测定断裂真应力的统一标准。不同作者采用不同的公式,其结果很难进行比较。当前计算断裂真应力的公式主要有三种:

a Bridgman 公式^[1]

$$\bar{\sigma}_f/\sigma_f = (1+2R/a)\ln(1+a/2R) \quad (1.1)$$

各量意义参见图 1.1,其中 $\bar{\sigma}_f$ 是平均断裂真应力,在数值上等于断裂载荷除以净截面面积。 a/R 经常以经验关系给出。Bridgman 开始给出的经验关系是:

$$a/R = \sqrt{\epsilon_f} - 0.1 \quad (1.2)$$

而文献[2]给出如下关系

$$a/R = 0.94(\epsilon_f - 0.192) \quad (0.40 \leq \epsilon_f \leq 1.0) \quad (1.3)$$

Rosenfield 和 Hahn^[3]认为 a/R 不可能完全取决于 ϵ_f ,两个 ϵ_f 相同的钢,其均匀伸长率 ϵ_u 可能有很大差别, ϵ_u 大的, a/R 要小些,因此他们给出另一个经验公式

$$a/R = 0.88(\epsilon_f - \epsilon_u) \quad (1.4)$$

其中 ϵ_u 是在最大载荷处的均匀真应变。因此,在应用 Bridgman 公式时必须指出,其中 a/R 应用哪个经验关系。现在普遍认为(1.4)式较好。

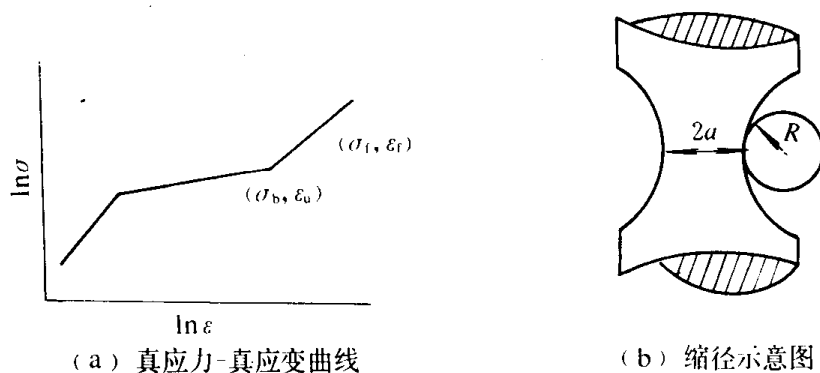


图 1.1 缩颈修正示意图

b Д-С(Д авидинков—Спиридонова)公式⁽⁴⁾

$$\bar{\sigma}_t/\sigma_t = 1 + a/4R \quad (1.5)$$

其中 a/R 采用(1.2)式。上式在形式上比较简单,但是很少有人采用。

c 陈箴公式⁽⁵⁾

作者假定,缩颈区的主应力面是个椭球面,与之正交的是双曲线(Bridgman 和 Д-С 均假定是圆环),由此导出

$$\bar{\sigma}_t/\sigma_t = (1/2)[1 + (1 + R/a)\ln(1 + a/R)] \quad (1.6)$$

其中 a/R 采用(1.4)式。对比计算表明,陈箴的公式较好。因此在本手册中一律采用陈箴公式。

断裂真应力的测定采用标准拉伸试样进行。但是应当注意,因为 $a/R \geq 0$, 所以 $\sigma_t \leq \bar{\sigma}_t$ 。

1.2 工程弹性模量

工程弹性模量的测定方法参照 ASTM E111—61 标准进行。在此需要指出两点:

a 工程弹性模量是用光滑的标准拉伸试样进行的,为了使数据更为可靠,应采用长标距、小直径试样,即 $l_0 = 11.3 \sqrt{F_0}$ 、 $\phi 5\text{mm}$ 的长标距试样。

b 弹性模量是结构不敏感量。因此,对于给定化学成分的材料最好采用退火状态或高温回火状态下的试样,以便消除因淬火产生的相变应力或组织应力的影响。一般的趋势是,在相同的淬火温度下,随着回火温度的提高,实测弹性模量会逐渐增加到一个稳定值,这个稳定值才是材料的工程弹性模量。

1.3 应变硬化指数

在本手册中,材料的硬化指数测定方法参照 ASTM E646—78 和 GB5028—85 执行。采用以下两种公式:

a Hollomon 公式⁽⁶⁾

$$\sigma = \alpha \epsilon_p^n \quad (1.7)$$

在塑性变形远大于弹性变形时,亦可用 ϵ 代替 ϵ_p 。在过去的文献中提供的硬化指数多半采用 Hollomon 公式。

b R-O(Ramberg-Osgood)公式⁽⁶⁾

$$\begin{aligned} \epsilon/\epsilon_s &= \sigma/\sigma_s + \beta(\sigma/\sigma_s)^m & (\sigma > \sigma_s) \\ \epsilon/\epsilon_s &= \sigma/\sigma_s & (\sigma \leq \sigma_s) \end{aligned} \quad (1.8)$$

在理想情况下有 $n \equiv 1/m$,但是,实测结果会略有偏离。

近年来,在文献中越来越多地采用 R-O 公式,因为它更接近实际。

1.4 单试样法测定 J_{1c} 的近似公式

在本手册中,一般不采用如电位法、声发射法等监测开裂点的单试样测定 J_{1c} 的方法,加工的试样都是为测定 K_{1c} 或 J_R 阻力曲线而准备的。然而,在某些情况下,用 J_R 阻力曲线法很难获得足够的试验点数,而试验用材料又不允许采用 K_{1c} 试验方法,此时可采用单试样法测定 J_{1c} 的近似公式⁽⁷⁾

$$\begin{aligned} J_{1c} &= \frac{J'}{1 + 4\Delta a/(W-a)} & (1.9) \\ J' &= \frac{\Delta U}{B(W-a)} \end{aligned}$$

式中 W ——试样宽度;

B ——试样厚度;

a ——裂纹深度;

Δa ——裂纹扩展量;

ΔU ——停机点处的载荷-位移曲线下的面积。

凡用此法测定的 J_{1c} 值均在相应处注明。根据我们的经验,用(1.9)式测定的 J_{1c} 值与 $J_{0.2}$ 接近。

1.5 疲劳裂纹扩展速率和门槛值

在本手册中,疲劳裂纹扩展速率和门槛值试验参考两个标准。它们是 GB6398—86 和五二研究所(82)所研七字第 41 号文——关于“金属材料疲劳裂纹扩展速率的试验方法”(以下简称内标)。在总体上两上标准是一致的,但是有以下三点不同:

a 门槛值的实测定义略有差异。国标附录 C 中定义的实测门槛值为:疲劳裂纹扩展速率等于 10^{-10} m/cycle 所对应的应力强度因子范围,而内标测定的是条件门槛值,其实测定义是:疲劳裂纹扩展速率等于 $(2 \sim 10) \times 10^{-10}$ m/cycle 所对应的应力强度因子范围。内标中的定义是基于晶体结构考虑。在晶格点阵内,原子排列是不连续的,严格地说,连续介质力学的假定已不成立。宏观裂纹扩展,在微观上就是点阵上的原子被迁移,而原子迁移的最小距离只能是一个点阵间隙。因点阵结构不同,点阵间隙 ρ 与点阵常数 a 之间有如下关系:

$$\rho = (\sqrt{2}/2 \sim \sqrt{2})a$$

对于铁基合金, $a=2.54 \times 10^{-10} \text{m}$, 因此有

$$\rho \approx (2 \sim 4) \times 10^{-10} \text{m} \quad (1.10)$$

就是说, 从连续观点出发, 疲劳裂纹稳定扩展的最小速率应当与 ρ 相当, $da/dN < \rho$ 时, 疲劳裂纹扩展将是不稳定的, 带有随机性质。这就是我们提出的条件门槛值定义的根据。显然, 国标和内标的定义并无原则矛盾, 只是内标定义的物理意义更明确。考虑到许多门槛值数据是在 1986 年前测定的, 为了保持整体性, 在本手册中一律采用条件门槛值的定义。

应当指出, 不同类型的材料, ρ 的取值范围是变化的。对于组织均匀的穿晶断裂的铁基合金, $\rho \approx (2 \sim 4) \times 10^{-10} \text{m}$, 而对于沿晶断裂为主的材料, 例如铸钢、铸铁、钛合金等, ρ 应该取晶粒或第二相颗粒尺寸, 一般有 $\rho \approx (5 \sim 10) \times 10^{-10} \text{m}$ 。总之 ρ 应该为不连续的最小尺寸, 具体数值应由试验决定。条件门槛值应与门槛速率 ρ 一一对应给出。

b 门槛值的测定方法和预估

实验测定门槛值是一件十分费时费力的工作。实测一个门槛值数据, 有时需要几天甚至十几天时间。如果能预先估计出门槛值的近似大小, 做到心中有数, 将会大大地减少试验人员的盲目性, 提高自觉性。国内外参考标准中均未提供预先估计门槛值的方法。在内标中, 根据文献[8,9], 提供了一个门槛值的预估公式

$$\begin{aligned} \Delta K_{\text{th}} &= \Delta K_0 (1-R)^m \\ \Delta K_0 &= E \epsilon_f \sqrt{(2\pi\rho)} \end{aligned} \quad (1.11)$$

其中 ρ 对应于门槛值速率, 可根据上面所述原则选取。 ΔK_0 是 $R=0$ 时的门槛值, 它是材料常数, 与应力比无关, 也可称作有效门槛值。 m 是个材料常数, 其变化范围为 $0.5 \sim 1.0$, 在 $R \leq 0.2$ 情况下, 作为近似估计可取 $m \approx 1.0$ 。根据我们的实测经验, (1.11) 式具有很高的精度, 与大部分实测数据吻合在 15% 之内。

国标附录 C 中推荐三种降 K 法测定门槛值。但明确指出: “对降 K 试验结果的可靠性有疑问时, 可用升 K 试验进行验证。”内标中推荐的方法, 实质上是降 K —升 K 混合法。即开始分级降载, 降载要求与国标附录 C 完全一致, 当载荷降到 $da/dN \approx (2 \sim 4) \times 10^{-10} \text{m/cycle}$ 时, 恒载观测, 此时随循环数增加, ΔK 略有增加, 但 da/dN 有时变化很大。手册中实测的门槛值如图 1.2 所示, 即在恒载下疲劳裂纹扩展速率稳定增加到 ρ 时所对应的 ΔK 值。

与光滑试样的 $S-N$ 曲线相似, 在双对数坐标中, $da/dN-\Delta K$ 曲线也存在两种基本类型, 参见图 1.3, 其中曲线 a 是典型的, 即在门槛区附近, 随着 da/dN 的减少, ΔK 渐进地趋近于一个极限值——门槛值 ΔK_{th} 。在该情况下, 应取与实测门槛值相对应的最高的 da/dN 作为门槛速率 ρ 。对于曲线 b 则没有明显的门槛值, 此时定义一个条件门槛值尤为必要。也就是说, 实测的门槛值应当与一个确定的门槛速率 ρ 相对应, 否则将没有意义。

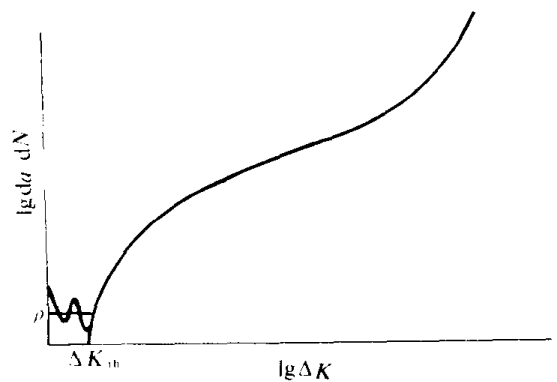


图 1.2 测定条件门槛值示意图

c 数据整理

GB6396—86 中只要求提供 $da/dN-\Delta K$ 数据表和数据图。考虑到疲劳裂纹扩展速率试验