

1976

北京断裂力学交流会

第二次会议文集

北京断裂力学交流会秘书处编辑

1977年出版

目 录

前言.....	(1)
---------	-----

• 断裂力学在工程中的应用 •

裂纹体强度分析.....	中国科学院北京力学研究所十二室断裂力学组 (3)
30CrMnSiNiA超高强度钢的断裂韧性	
.....	中国科学院上海冶金研究所五室断裂韧性组 (12)
对大型汽轮发电机组转子脆断趋向的安全分析	
.....	西南交通大学基础课部断裂力学研究小组 (24)
断裂力学在大功率内燃机车钼铜合金球墨铸铁曲轴上的初步应用	
.....	大连机车厂试验室 (39)
900立米乙烯球 罐使用安全性的断裂力学分析.....	球罐断裂力学攻关组 (67)
带裂纹 $\phi 1010$ 毫米氨合成塔断裂力学安全分析	
.....	上海锅炉厂 浙江大学 合肥通用机械研究所 (79)
加劲板断裂特性的初步研究.....	北京航空学院503教研室 六二一所二十五室 (98)
	六二三所三室 六二八所 七〇八设计院
应用断裂力学方法分析涡喷-6发动机一级涡轮盘榫槽槽底裂纹	
.....	长沙工学院一系一〇二专业 (111)
	空军 5 7 1 2 工厂
LD10CS球壳疲劳泄漏及爆破试验.....	702所 袁 方 张俊华 连备忠 (121)
断裂力学在40°钢均衡梁断裂分析中的应用.....	铁道部科学研究院金化所金属室 (125)

• 测试技术 •

蠕变条件下裂纹扩展问题的初步研究.....	西安热工研究所 (130)
COD测试技术中一些问题的进一步探讨...	合肥通用机械研究所断裂韧性课题组 (141)
探讨采用电液伺服系统测定动态断裂韧度的方法	
.....	冶全部钢铁研究院物理室断裂力学组 (154)
用激光全息术测定应力强度因子 K_I 的尝试	西北工业大学力学教研室 (163)
激光散斑和全息干涉计量技术在断裂力学上的应用	
.....	中国科技大学五系激光全息组 (168)
论 J_{Ic} 和 K_{Ic} 相一致的条件	北京钢铁学院断裂韧性组 (174)
中强度钢断裂韧性 K_{Ic} 的测试	北京第二通用机械厂热工科 (185)
	北京钢铁学院断裂韧性组

J积分方法综述	冶金部钢铁研究院断裂力学组(191)
国产09MnTiCuRe低温钢宽板拉伸试验及其与COD试验的对比关系	天津大学焊接教研室(202)
关于 K_{Ic} 测试方法[ASTM E399]中几项规定的光弹性试验	重庆大学断裂力学小组(213)
用表面裂纹方法研究LD10CS铝合金的断裂特性	七〇三所五室断裂韧性小组(223)
平面应变断裂韧性(K_{Ic})试验方法中的若干问题	东北工学院金属物理专业(231)
稀土对转子钢韧性和断裂韧性的影响	北京钢铁学院断裂韧性组(236)
	北京第二通用机械厂热工科
亚临界热处理对转子钢断裂韧性(J_{Ic})的影响	北京钢铁学院断裂韧性组(246)
	北京第二通用机械厂热工科
用光弹性法测定应力强度因子 K_I 的初步尝试	西北工业大学力学教研室(250)

• 理论与计算 •

计算应力强度因子的无限相似单元法	北京大学数学力学系 应隆安(256)
断裂力学中的权函数	中国科学院北京力学研究所十二室断裂力学组(261)
用增量法求解非线性断裂力学问题	复旦大学力学教研室 欧阳尧(277)
旋转体环状裂纹应力强度因子计算的有限元法	上海交通大学170教研组(287)
复合型裂纹的断裂准则	中国科学院北京力学研究所 王自强(302)
论裂纹扩展的判据	陈 麓(312)
论Neuber关系 $K_o K_e = K_t^2$	
——J积分全量理论在切口顶端弹塑性应力应变场分析中的应用	冶金部钢铁研究院 蔡其巩(323)
晶界裂纹成长的一种可能的机构和蠕变断裂时间的估计	北京工业学院 范天佑(333)
	北京 大学 梁振亚
复合型断裂准则的极限载荷比较	浙江大学 王仁东(340)
I积分和弹塑性断裂准则	中国科学院北京力学研究所 王自强(363)
位错理论在应力强度因子计算方法中的应用	金属研究所 龙期威(367)
裂纹扩展速率 da/dN 与 K_I 间关系的探讨	陈 麓(371)
会议交流报告目录	(376)

前 言

北京断裂力学交流会第二次会议在中国科学院和北京市科技局的领导下，在湖北省科委热情支持下，于1976年11月11—22日在武汉召开。会议由中国科学院北京力学研究所主持。参加会议的有关工业部门和中国科学院有关研究所等138个单位共265名代表。大家欢聚一堂，热烈欢呼华国锋主席为我党领袖，热烈庆祝粉碎王、张、江、姚反党集团篡党夺权阴谋的伟大胜利，愤怒声讨“四人帮”的滔天罪行。代表们一致表示，以华国锋主席为首的党中央忠实地继承了毛主席遗志，采取了英明果断的措施，一举粉碎了“四人帮”反党集团，为党除了奸，为国除了害，为民平了愤，大快人心，大振人心，得到了全党全军和全国人民的衷心爱戴和热烈拥护。在这举国上下一片欢腾，热烈庆祝伟大历史性胜利的时刻，代表们心情无比激动，一致表示要以只争朝夕的精神，奋发图强，为我国社会主义革命和社会主义建设做出更大贡献。

断裂力学是研究材料和结构中裂纹扩展规律的学科。它在安全设计、合理选材、改进工艺、提高产品质量、制定科学的检验标准、正确评定结构可靠性、防止事故发生等方面具有重要的应用价值，受到航空、造船、交通、火箭、化工、机械、电力以及军工等部门的普遍重视。自从北京断裂力学交流会第一次会议以来，由于工业、农业和国防生产需要的强大推动，断裂力学发展迅速，成绩很大。

广大工人、干部、科技人员遵照毛主席一贯教导，坚持科学研究为无产阶级政治服务、为工农兵服务、与生产劳动相结合的方针，大搞群众运动，在完成一些国家重点工程和重点课题中取得了可喜成绩。一机部通用机械研究所、浙江大学、上海锅炉厂等单位，对5台带缺陷的氨合成塔进行了大量的断裂力学试验和安全分析，为放行使用提供了科学依据，为国家节约资金300万元，节省低合金钢材300吨；这些设备全部投入生产后，每年可为国家增产化肥200多万吨。北京力学研究所、姚孟电厂和西安热工研究所等单位对我国自行设计制造的第一台30万千瓦汽轮机高、中压转子进行了断裂力学实验和计算分析，给出了安全性评价，为该转子试运行和并网发电提供了科学依据。北京石油化工总厂组织了有钢铁研究院、一机部机电研究所、通用机械研究所、上海材料研究所、浙江大学、沈阳金属研究所和北京力学研究所等单位参加的“球罐攻关组”，对年产30万吨的乙烯装置进行了使用安全性分析，受到了有关方面的好评。大连机车厂、铁道部科学研究院把断裂力学应用到大功率内燃机车柴油机球墨铸铁曲轴的研究中，不仅保证了球铁曲轴的安全使用，而且大大提高了寿命。沈阳金属研究所、抚顺钢厂和七机部有关单位，应用断裂力学理论，在高压球形容器的研制中，较好地解决了强度和韧性的关系，合理选材，科学地改进工艺，顺利地完成了任务。北京第一机床厂、郑州机械研究所等

单位，通过断裂力学研究改进了热处理工艺，解决了铣床球铁主轴的断裂问题。北京钢铁学院的革命师生实行教学与生产劳动相结合，与北京第二通用机械厂工人一道，通过断裂力学的试验和科学分析，使报废的5万千瓦电机转子重新投入使用。一机部还组织有关单位研究了“电站大锻件缺陷对断裂强度的影响”，为修改锻件标准，以期合理使用进行着大量工作。冶金部系统许多单位，正在把断裂力学的概念用于材料研制和工艺改进上，为提高钢材质量进行着大量的工作。所有这一切都充分表明，断裂力学的发展，在我国有着广泛的群众基础，有着强大的生命力。它的健康发展，正在为我国的社会主义建设作出贡献。

广大科研人员坚持理论联系实际，走我国自己科学发展的道路，打破常规，勇攀高峰。两年来，在断裂力学的理论、测试和计算方法研究中都有令人鼓舞的创新。在J积分测试、计算和应用方面不断有所前进；对复合型断裂准则作了比较深入的探讨和研究；在计算方面也有所突破，如对有限元方法提出了一些新的设想；在应力强度因子计算方面也有新进展。

我国的断裂力学虽然有了很大发展，取得了不少成绩，但是还远远不能适应国民经济急速发展的需要。生产实际提出了大量的研究课题，急待我们去解决。在产品断裂控制、安全设计方面；在合理选材、提高产品质量方面；在用断裂韧性作为一项指标，指导新材料、新工艺研制方面；在制定合理质量标准、充分发挥产品潜力方面，断裂力学的研究和应用，已成为不可缺少的手段。

断裂力学是一门新兴的学科，不少领域正处于攻坚或探索阶段，在理论研究、测试技术和计算方法等方面都有广阔的发展前景。代表们认为，我国的断裂力学必须走自己发展的道路，坚决贯彻科学研究为无产阶级政治服务，为工农兵服务，与生产劳动相结合的方针；必须在广泛深入实际的基础上往高里提，正确处理好理论与生产实际的关系、群众运动与专业队伍的关系、普及与提高的关系，以及长远课题与近期任务的关系。

革命就是解放生产力，革命一定会促进生产力的发展。打倒“四人帮”，踢开绊脚石，必将迎来一个我国社会主义建设的新高潮。断裂力学要为此新高潮的到来贡献力量。我们要树雄心，立壮志，攀高峰，为实现伟大领袖和导师毛主席为我们规划的，敬爱的周总理在四届人大提出的在本世纪内全面实现农业、工业、国防和科学技术的现代化，把我国建设成为伟大的社会主义强国而努力奋斗。

这次会议共收到交流资料115篇。在这本文集里，我们收集了其中的37篇论文（有些重要报告已在公开刊物上发表过的，不再重复刊载），并在集后附上在会上进行交流的研究工作报告目录，以便读者查询。

裂纹体强度分析

中国科学院北京力学研究所十二室断裂力学组

一、引言

线弹性断裂力学的发展突破了传统强度分析的框框,为裂纹体强度分析开创了一条切实有效的途径,对高强度材料及玻璃一类的脆性材料,线弹性断裂力学的方法是相当可靠的;而传统的强度分析却与实验矛盾,对普通钢结构,线弹性断裂力学在控制各种巨型结构、大锻件、大截面装备的低应力脆断方面也取得了巨大成功。断裂力学的活动力随着工程实际的广泛而迫切的需要而不断增长。

但是线弹性断裂力学在理论上只适用于完全脆性的材料,也就是假定在断裂之前及断裂之中材料没有塑性变形的能力。对实际材料,如果裂纹顶端的塑性场完全为弹性场所包围并且限制在很小的范围之内,以至于外围的弹性场决定了核心部位的塑性变形,也决定了裂纹扩展的机制,那么线弹性断裂力学的分析可以导出完全可靠的结果,但是对大量的中、低强度钢制成的结构,裂纹扩展之前塑性区往往有了很大发展。线弹性断裂力学所设想的各种条件通常得不到满足。在这种情况下,线弹性断裂力学得出的结果不一定可靠,有时甚至会得到完全错误的判断,正是这个因素促使了弹塑性断裂力学的发展。但是,弹塑性断裂力学目前尚不成熟,无论是 J 积分准则还是COD准则都存在着一些疑问,需要从理论分析与实验技术上加以深入研究。即使将来找到了可靠的弹塑性断裂准则,联系到实际结构仍然要进行相当复杂的裂纹体弹塑性场分析,裂纹体线弹性应力场分析要用到复杂的数学方法,至于裂纹体弹塑性场分析不仅要用到更为复杂的数学方法,而且涉及到浩繁的计算工作量,这对工程实际应用是很不方便的。

本文主要目的就是避开复杂的裂纹顶端弹塑性场分析,从结构承载能力角度出发,利用渐近分析的概念把线弹性断裂力学与塑性极限分析联系起来,为裂纹体的强度分析提供一种简单而有效的方法。

二、受拉的中心裂纹板的强度分析

如图1所示,研究一块带有长为 $2a$ 的中心裂纹的矩形板,板的宽度为 W ,板的长度足够长,以至于不影响裂纹顶端的应力场,可近似看作是无限长板,无穷远处受均匀的拉伸应力 σ 的作用。

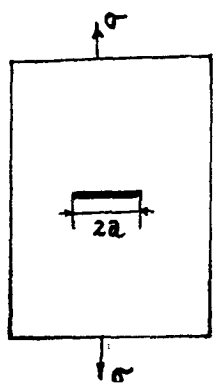


图 1

参照文献〔4〕, 线弹性断裂力学给出裂纹顶端的应力强度因子:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \frac{(1 - 0.5\lambda + 0.326\lambda^2)}{\sqrt{1 - \lambda}} \quad \lambda = \frac{2a}{W} \quad (1)$$

当 K_I 达到临界值时, 裂纹起始扩展, 因此有:

$$K_I = K_Q = \begin{cases} K_{Ic}, & \text{平面应变} \\ K_c, & \text{平面应力} \end{cases} \quad (2)$$

由公式 (1) 与 (2) 不难得到线弹性断裂力学确定的临界载荷:

$$\sigma_k = \frac{K_Q \sqrt{1 - \lambda}}{\sqrt{\pi a} f(\lambda)} \quad (3)$$

这里:

$$f(\lambda) = 1 - 0.5\lambda + 0.326\lambda^2 \quad (4)$$

公式 (3) 又可化为:

$$\frac{\sigma_k}{\sigma_Y} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \alpha \sqrt{\frac{1}{\lambda} - 1} \quad (5)$$

这里 α 是结构韧性参数:

$$\alpha = \frac{K_Q}{\sigma_Y \sqrt{W}} \quad (6)$$

下面将会看到 α 在判断结构会不会发生脆断问题上起着重要作用, 结构韧性参数 α 是材料断裂韧性 K_Q (K_{Ic} 或 K_c)、材料屈服限 σ_Y 及结构断面尺寸的综合参数。

另一方面参照文献〔5〕, 中心裂纹板的极限载荷 σ_L 为:

$$\frac{\sigma_L}{\sigma_Y} = \begin{cases} (1 - \lambda) & \text{平面应力} \\ \frac{2}{\sqrt{3}} (1 - \lambda) & \text{平面应变} \end{cases} \quad (7)$$

为了简化计算, 引入无量纲量:

$$\Phi = \frac{1}{\alpha} \frac{\sigma_Y}{\sigma_Y} \quad (8)$$

从公式 (5)、(8) 不难得到:

$$\Phi_k = \frac{1}{\alpha} \frac{\sigma_k}{\sigma_Y} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{\frac{1}{\lambda} - 1} \quad (9)$$

$$\Phi_L = \frac{1}{\alpha} \frac{\sigma_L}{\sigma_Y} = \begin{cases} \frac{1}{\alpha} (1 - \lambda), & \text{平面应力} \\ \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\alpha} (1 - \lambda), & \text{平面应变} \end{cases} \quad (10)$$

在图 2 上画出了 Φ_K 随裂纹几何参数 λ 的变化而变化的图象，不难看出，当 λ 趋于零时， Φ_K 趋于无穷大，这说明线弹性断裂力学对这种情况会给出错误的结果。

在图 2 上也画出了对不同的结构韧性参数 α ，无量纲极限载荷 Φ_L 随 λ 变化的曲线。

当 $\lambda = 0$ 时， Φ_L 给出无裂纹矩形板的极限载荷：

$$\Phi_L = \frac{1}{\alpha_0} = \begin{cases} \frac{1}{\alpha}, & \text{平面应力} \\ \frac{2}{\sqrt{3}\alpha}, & \text{平面应变} \end{cases} \quad (11)$$

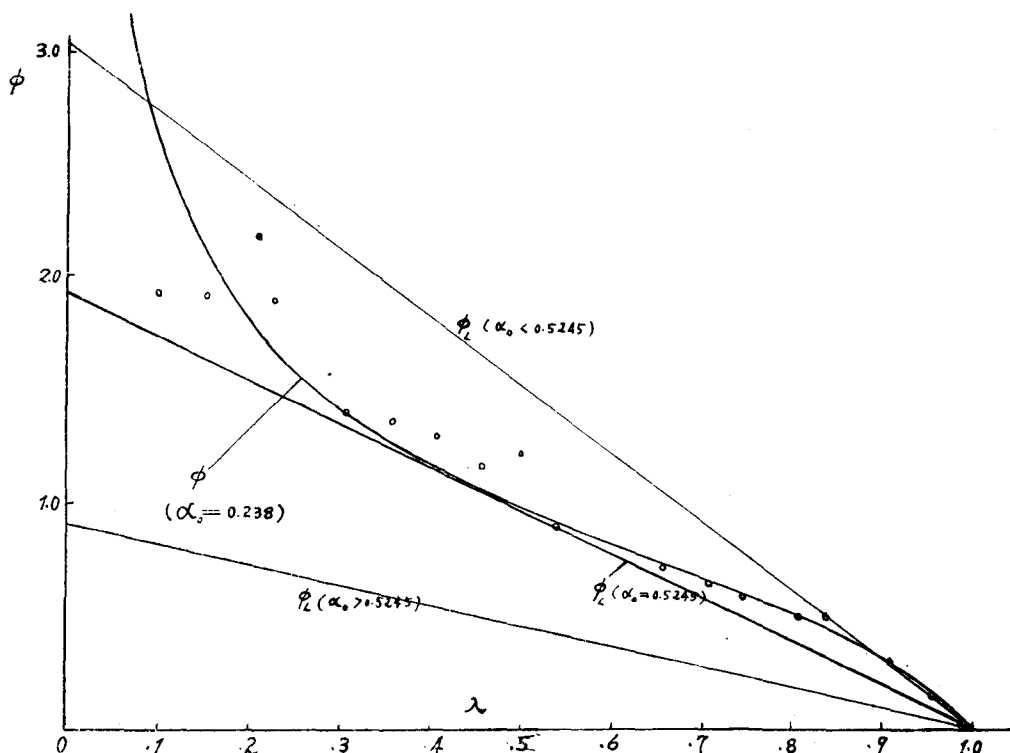


图 2

当结构韧性参数 α_0 充分大时，曲线 Φ_L 始终位于曲线 Φ_K 的下面。也就是说，线弹性断裂力学给出的临界载荷总是高于极限载荷。在这种情况下，结构的失效不是因为脆断，而是由于塑性流动，塑性极限分析给出的承载能力可以作为强度分析的依据。当结构韧性参数 α 充分小时，直线 Φ_L 穿过曲线 Φ_K 。在 $\lambda = 0$ 及 $\lambda = 1$ 附近，直线 Φ_L 位于曲线 Φ_K 的下面，而在中间部分，直线 Φ_L 高于曲线 Φ_K 。因此，可以设想在某个区间内 $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$ ，线弹性断裂力学给出的断裂载荷可以作为强度分析的依据，而在区间 $0 < \lambda < \lambda_1$ 及 $\lambda_2 < \lambda < 1$ 内，线弹性断裂力学给出的结果并不可靠，应该以极限载荷为基础，加以适当的修正。这种修正恰恰反映了弹塑性断裂的可能性，当 α_0 等于某个界限值 α_* 时，直

线 Φ_1 与曲线 Φ_K 在 $\lambda = \lambda_*$ 处相切, 此时, 线弹性断裂力学给出的断裂载荷只是在 λ 等于 λ_* 处与极限载荷相等, 其他地方均高于极限载荷。

现在回过头来考虑当结构韧性参数 α_0 小于界限值 α_* 时, 线弹性断裂力学适用的区间 $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$ 如何求得; 以及在线弹性断裂力学不适用区间 $0 < \lambda < \lambda_1$, $\lambda_2 < \lambda < 1$ 如何确定承载能力。为此, 利用渐近分析的概念, 设想对充分小的 λ , 塑性极限分析给出的结果是可靠的。因此, 在 $\lambda = 0$ 附近, 结构承载能力的无量纲参数 Φ 具有如下渐近性质:

$$\Phi \rightarrow \frac{1}{\alpha_0} (1 - \lambda), \quad \text{当 } \lambda \rightarrow 0 \text{ 时} \quad (12)$$

因此, 可以假定在区间 $0 < \lambda < \lambda_1$ 内, Φ 等于:

$$\Phi \approx \Phi_1 = \frac{1}{\alpha_0} (1 - \lambda - A\lambda^2) \quad (13)$$

在点 $\lambda \approx \lambda_1$ 处, 曲线 Φ_1 应该与曲线 Φ_K 相切。这就导致如下方程式:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1(\lambda_1) &= \Phi_K(\lambda_1) \\ \Phi_1'(\lambda_1) &= \Phi_K'(\lambda_1) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

利用公式(9)、(12), 方程(14)化为:

$$A = \frac{\Psi(\lambda_1)(1 - \lambda_1) - 1}{\{\Psi(\lambda_1)\lambda_1^2 + 2\lambda_1\}} \quad (15)$$

$$\alpha_0 = (1 - \lambda_1 - A\lambda_1^2) / \Phi_K(\lambda_1) \quad (16)$$

这里:

$$\Psi(\lambda) = -\frac{\Phi_K'(\lambda)}{\Phi_K(\lambda)} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{1 - \lambda} \right) + \frac{f'(\lambda)}{f(\lambda)} \quad (17)$$

当结构韧性参数给定之后, 从方程(15)、(16)可以求得 λ_1 及 A , 代回公式(13)即可求得在区间 $0 < \lambda < \lambda_1$ 内的曲线 Φ_1 。

同样在区间 $\lambda_2 < \lambda < 1$ 内, 有下述渐近式:

$$\Phi \rightarrow \frac{1}{\alpha_0} (1 - \lambda), \quad \text{当 } \lambda \rightarrow 1 \text{ 时} \quad (18)$$

因此, 可假定在这个区间内, Φ 等于:

$$\Phi = \Phi_2 = \frac{1}{\alpha_0} \{1 - \lambda - B(1 - \lambda)^2\} \quad (19)$$

在点 $\lambda = \lambda_2$ 处, 曲线 Φ_2 应与曲线 Φ_K 相切, 这就得到如下方程:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_2(\lambda_2) &= \Phi_K(\lambda_2) \\ \Phi_2'(\lambda_2) &= \Phi_K'(\lambda_2) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

公式(20)不难化为:

$$B = \frac{\{\Psi(\lambda_2)(1 - \lambda_2) - 1\}}{\{\Psi(\lambda_2)(1 - \lambda_2)^2 - 2(1 - \lambda_2)\}} \quad (21)$$

$$\alpha_0 = \{1 - \lambda_2 - B(1 - \lambda_2)^2\} / \Phi_K(\lambda_2) \quad (22)$$

从公式 (15)、(21) 导出确定界限值 λ_* 及 $(\alpha_0)_*$ 的方程:

$$\Psi(\lambda_*)(1 - \lambda_*) - 1 = 0$$

$$(\alpha_0)_* = -\frac{(1 - \lambda_*)}{\Phi_K(\lambda_*)} = -\frac{1}{\Phi_K'(\lambda_*)} \quad (23)$$

数值计算给出:

$$(\alpha_0)_* = 0.52454, \quad \lambda_* = 0.43733$$

表 1 给出不同的 α_0 值相应的 λ_1 , A, λ_2 , B 的数值。

表 1

α_0	λ_1	A	λ_2	B
0.1000	0.01005	1922	0.9788	15.42
0.15	0.02290	355.5	0.9517	6.596
0.20	0.04148	102.1	0.9127	3.511
0.25	0.06647	36.54	0.8606	2.081
0.30	0.09890	14.68	0.7941	1.301
0.35	0.1405	6.167	0.7128	0.8261
0.40	0.1940	2.531	0.6211	0.5094
0.45	0.2648	0.9035	0.5329	0.2760
0.50	0.3656	0.1786	0.4635	0.0851
0.52454	0.43733	0	0.43733	0

三、纯弯曲梁的强度分析

如图 3 所示, 梁的高度为 W , 裂纹长度为 a , 承受弯矩 M 的作用, 梁的厚度为 B 满足平面应变条件, 线弹性断裂力学给出:

$$K_I = \frac{6 \cdot M}{B \cdot W^{3/2}} f(\lambda) \quad (24)$$

$$f(\lambda) = \sqrt{\operatorname{tg} \frac{\pi \lambda}{2} \frac{1.305 + 0.2817 \left(1 - \sin \frac{\pi \lambda}{2}\right)^4}{\cos \frac{\pi \lambda}{2}}} \quad (25)$$

$$\lambda = \frac{a}{W} \quad (26)$$

由此, 断裂时弯矩:

$$M_K = \frac{K_{Ic} B \cdot W^{3/2}}{6 \cdot f(\lambda)} \quad (27)$$

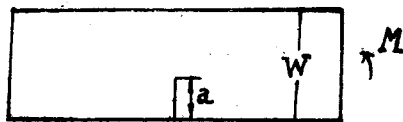


图 3

引入结构韧性参数 α 和无量纲弯矩 Φ :

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= K_{Ic} / \sigma_Y \sqrt{W} \\ \Phi &= \frac{1}{\alpha} \frac{4M}{B\sigma_Y W^2} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

则有:

$$\Phi_K = \frac{1}{\alpha} \frac{4 \cdot M_K}{B\sigma_Y W^2} = \frac{0.6667}{f(\lambda)} \quad (29)$$

另一方面塑性极限分析给出:

$$\begin{aligned} M_L &= 1.456 B \sigma_Y (W - a)^2 / 4 \\ \Phi_L &= \frac{1}{\alpha} \frac{4 M_L}{B \sigma_Y W^2} = 1.456 (1 - \lambda)^2 / \alpha \end{aligned} \quad (30)$$

$$\Phi_L = \frac{1}{\alpha_0} (1 - \lambda)^2, \quad \alpha_0 = \alpha / 1.456 \quad (31)$$

在 $\lambda = 0$ 附近, 无量纲弯矩有如下渐近性质:

$$\Phi \rightarrow \frac{1}{\alpha_0} (1 - \lambda)^2, \quad \text{当 } \lambda \rightarrow 0 \text{ 时} \quad (33)$$

设想在区间 $0 < \lambda < \lambda_1$ 内:

$$\Phi = \Phi_1 = \frac{1}{\alpha_0} \{ (1 - \lambda)^2 - A \cdot \lambda^2 \} \quad (34)$$

这样 $\Phi(0)$ 及 $\Phi'(0)$ 与公式(31)给出的相同。

在点 $\lambda = \lambda_1$ 处, 曲线 Φ_1 与 Φ_K 相切。

常数 A 与 λ_1 由下述方程给出:

$$A = \frac{(1 - \lambda_1) \{ \Psi(\lambda_1)(1 - \lambda_1) - 1 \}}{\lambda_1 \{ \Psi(\lambda_1)\lambda_1 + 1 \}} \quad (35)$$

$$\alpha_0 = \{ (1 - \lambda_1)^2 - A \lambda_1^2 \} f(\lambda_1) / 0.66667 \quad (36)$$

这里:

$$\Psi(\lambda) = \frac{\pi}{4} \left\{ \frac{1}{\sin \pi \lambda} + \operatorname{tg} \frac{\pi \lambda}{2} - \frac{4 \times 0.2817 \left(1 - \sin \frac{\pi \lambda}{2} \right)^3 \cos \frac{\pi \lambda}{2}}{\left[1.305 + 0.2817 \left(1 - \sin \frac{\pi \lambda}{2} \right)^4 \right]} \right\} \quad (37)$$

在 $\lambda = 1$ 附近, 可以假定

$$\Phi = \Phi_2 = \frac{1}{\alpha_0} \left\{ (1 - \lambda)^2 - B (1 - \lambda)^3 \right\} \quad (38)$$

在点 $\lambda = \lambda^2$ 处, 曲线 Φ_2 与 Φ_K 相切, 通过适当运算就可求得如下方程:

$$B = \frac{(1 - \lambda_2) \Psi(\lambda_2) - 1}{\{ (1 - \lambda_2)^2 \Psi(\lambda_2) - 1.5(1 - \lambda_2) \}} \quad (39)$$

$$\alpha_0 = \{ (1 - \lambda_2)^2 [1 - B(1 - \lambda_2)] \} f(\lambda_2) / 0.6667 \quad (40)$$

对于给出的 α_0 , 从方程 (35)、(36) 即可求出常数 A 与 λ_1 。从方程 (39)、(40) 可

求出常数B与 λ_2 。界限的结构韧性参数 $(\alpha_0)_*$ 及 λ_* 可由下述方程确定:

$$\Psi(\lambda_*)(1 - \lambda_*) - 1 = 0 \quad (41)$$

$$(\alpha_0)_* = (1 - \lambda_*)^2 f(\lambda_*) / 0.6667 \quad (42)$$

数值计算给出:

$$(\alpha_0)_* = 0.7915, \quad \lambda_* = 0.2363$$

表 2 给出不同的 α_0 值所对应的常数A, λ_1 , B, λ_2 。

表 2

α_0	λ_1	A	λ_2	B
0.2000	0.007195	3651	0.9090	3.662
0.2500	0.01140	1406	0.8578	2.343
0.3000	0.01671	626.4	0.7954	1.626
0.3500	0.02328	305.8	0.7224	1.193
0.4000	0.03116	159.5	0.6405	0.9085
0.4500	0.04070	86.00	0.5535	0.7092
0.5000	0.05222	47.03	0.4683	0.5598
0.5500	0.08609	25.71	0.3936	0.4398
0.6000	0.08321	13.63	0.3363	0.3367
0.6500	0.1047	6.773	0.2961	0.2429
0.7000	0.1333	2.916	0.2683	0.1541
0.7500	0.1749	0.8510	0.2487	0.06926
0.7915	0.2363	0	0.2363	0

四、理论分析与实验比较

文献〔1〕提供了一批有价值的受拉中心裂纹薄板的实验数据, 图 4 上的小三角表示了铝合金2219—T87在室温下的试验结果, 板宽均为24英寸, 板厚是0.100英寸。材料的平面应力断裂韧性 K_{Ic} 等于102千磅/英寸^{3/2}, 材料的屈服强度是58千磅/英寸²。相应的结构韧性参数 $\alpha = \alpha_0 = 0.359$ 。理论计算得到:

$$\lambda_1 = 0.149, \quad A = 5.28, \quad \lambda_2 = 0.697, \quad B = 0.760$$

理论计算得到的无量纲断裂载荷 Φ 用实线画出, 从图上不难看出, 计算结果与实验结果符合得相当好, 图 4 中的虚线表示了无量纲极限载荷。

图 2 上的小圆圈表示了铝合金7075—T7351在室温下的实验结果。板宽为 8 英寸, 板厚为0.250英寸, 材料的平面应力断裂韧性 K_{Ic} 为41千磅/英寸^{3/2}(裂纹起始扩展的应力强度因子), 材料的屈服强度 $\sigma_r = 61$ 千磅/英寸², 相应的结构韧性参数 $\alpha = \alpha_0 = 0.238$, 理论计算得到:

$$\lambda_1 = 0.0599, \quad A = 46.1, \quad \lambda_2 = 0.874, \quad B = 234$$

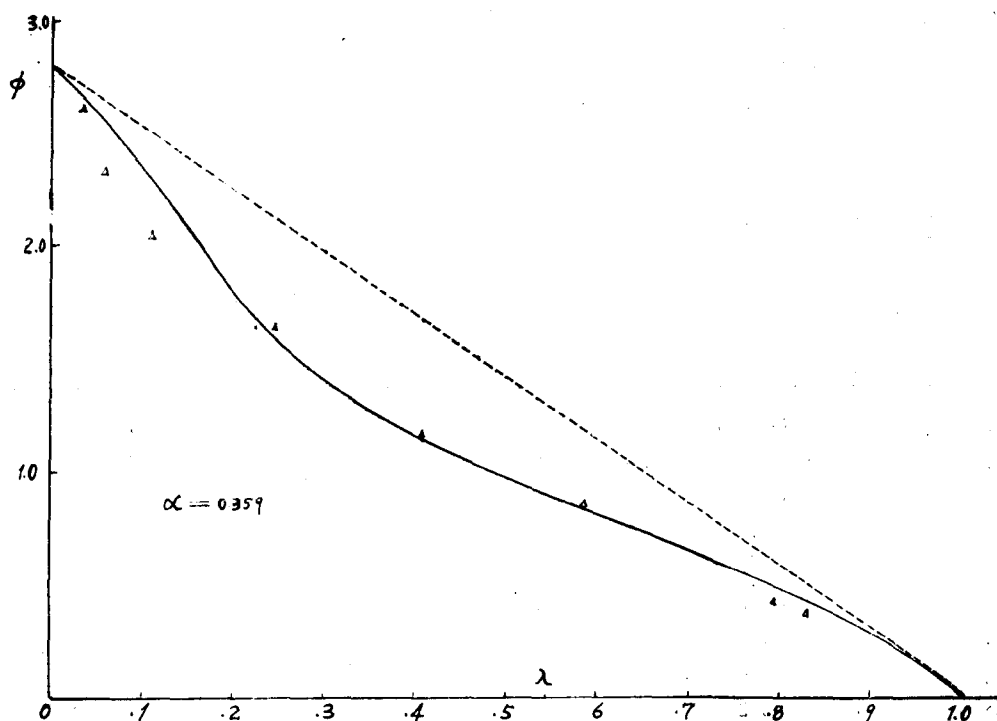


图 4

理论计算曲线用实验表示,可以看出除了个别点之外,理论计算与实验是相当符合的,个别分散点恰好是在线弹性断裂力学适用区间,考虑到开裂点的测量误差及平面应力断裂韧性 K_{Ic} 自身的分散性,可以认为这些分散点在允许的分散带之内。

五、小结与讨论

综合前面的分析,可以归纳出下面几点看法:

1. 结构韧性参数 $\alpha = \frac{K_{Ic}}{\sigma_r \sqrt{W}}$ 在判断含裂纹结构丧失承载能力的宏观机理上起重要作用。

当结构的几何形状及载荷系统给定时,就可以从理论上求得界限值 α_0 。当结构韧性参数 α 大于 α_0 时,结构不会发生脆断,而结构丧失承载能力的原因是塑性流动;当 α 小于 α_0 时,结构裂纹长度及韧带宽度充分小时将发生弹塑性断裂,其余情况发生线弹性断裂。

2. 结构韧性参数 α 是材料断裂韧性 K_{Ic} 、材料屈服强度 σ_r 及结构断面尺寸 W 的综合参数。

界限值 $(\alpha)_0$ 取决于结构的几何形状及加载方式。

3. 对于同样的加载结构,平面应变的界限值 $(\alpha)_0$ 通常要比平面应力的界限值 $(\alpha)_0$ 为高。而材料的断裂韧性通常是平面应变的 K_{Ic} 比平面应力的 K_{Ic} 为小。这两种因素互相

增强,使得平面应变状态的脆断倾向更为突出。

4.当结构韧性参数 α 小于界限值 α_* 时,用本文的方法可以求得两个参数 λ_1, λ_2 。当裂纹的无量纲长度 λ 位于区间 (λ_1, λ_2) 内时,线弹性断裂力学给出的断裂载荷可以作为强度分析的依据,在区间 $(0, \lambda_1)$ 内,由于裂纹长度不足,将发生弹塑性断裂,断裂载荷可以用渐近分析的方法得到,在区间 $(\lambda_2, 1)$ 内,则由于韧带宽度不够也发生弹塑性断裂,断裂载荷同样可用渐近分析的方法得出。

5.本文提出的方法原则上可适用于任何带裂纹结构的强度分析,但是应用本文的方法必须先进行线弹性断裂力学的分析和塑性极限分析,以此为基础,利用渐近分析的方法把线弹性断裂力学分析和塑性极限分析有机地联系起来,就能得到带裂纹结构强度分析的有效方法。

本文建议的方法是以线弹性断裂力学和塑性极限分析为基础的。因此必须受两方面的限制。首先是塑性极限分析已有的结果都是假定理想塑性材料,不考虑材料加工硬化,因此当材料的屈服强度 σ_s 与材料的极限强度 σ_b 相差很大时,理想塑性的极限分析往往不能得到准确的结果。再则当裂纹长度或韧带宽度过小时,滑移线场有时会发生变化。因此简单地引用已有结果不一定可靠,在这种情况下需要对塑性极限分析进行更细致的研究才能得到可靠结果。

另一方面,平面应力的断裂韧性 K_{Ic} 有两种情况,一种是指裂纹起始扩展的应力强度因子,另一种是指裂纹失稳扩展的应力强度因子。相应的结构韧性参数也有两个,在平面应力的情况下,对裂纹起始扩展而言,脆断的概念本来就无多大意义。因此,只能就分析方法来讨论。

本文提出的渐近分析只是各种可能的方式中的一种,可以提出更简单的或更复杂的渐近分析,但是究竟哪一种方案更好,应该通过实验来检验。

参 考 文 献

[1] Feddersen, C. E., Evaluation and predication of the residual strength of center cracked tension panels, in Damage Tolerance in Aircraft Structures ASTM STP 486.

[2] Broek, D., Elementary Engineering Fracture Mechanics.

[3] 力学所断裂力学组,用测 J_{Ic} 的方法定中强度钢的断裂韧性 K_{Ic} , 力学, 3 (1975)。

[4] Tada, H., Paris, P. C., Irwin, G. R., The Stress Analysis of Crack Handbook (1974).

[5] Качанов, А. М., Основные теории пластичности, Госу. Из. Тех. Тео. Литературы, Москва (1956) .

30CrMnSiNiA超高强度钢的断裂韧性

中国科学院上海冶金研究所五室断裂韧性组

一、前言

断裂韧性是评定带裂纹的金属材料和结构零件抵抗裂纹扩张能力的韧性参数,并定量的作为强度设计、寿命估算的可靠依据。近十多年来,国内外对断裂韧性的理论与测试技术有了较大的发展,对超高强度钢断裂韧性的研究已很普遍,在生产实践的应用中也相当成功。

众所周知,30CrMnSiNiA钢是国内生产比较成熟的一种超高强度钢,在飞机制造中,主要是用于受力构件。由于某些重要受力构件如起落架的螺桩、曲轴、摇臂、机翼的主梁、尾翼的对接螺栓等在使用时经常发生低应力脆性或疲劳断裂,曾引起人们的广泛注意,并对这些零部件的原有热处理工艺制度提出重新考核的问题。因此,对此钢进行断裂韧性的测试,具有明显现实和工程意义。本实验的目的是:(1)根据断裂力学的观点,比较原有热处理工艺制度是否合理;(2)通过不同实验温度下断裂韧性的测定,比较飞机在实际使用条件下的断裂韧性变化,为无损安全设计提供参数;(3)通过断口及显微组织的观察,试图寻找脆性的原因。

二、材料和试验方法

试验用钢是上钢五厂生产的 $\phi 35-40$ 毫米的棒料,锻成 20×40 毫米的毛坯。化学成分见表1:

表1

元素	C	Cr	Mn	Si	Ni	Mo	Cu	Al	P	S
成分	0.31	1.11	1.16	1.0	1.7	0.1	0.06	0.062	0.018	0.002

根据ASTM E399-74^[1]提出的规范,用三点弯曲试验测定平面应变断裂韧性 K_{Ic} 。试样尺寸:宽度B分别为10、12、15毫米,高度 $w = 2B$,长度 $l = 5w$,跨距 $S = 4w$ 。预制疲劳裂纹在Amsler高频疲劳试验机上进行,疲劳裂纹的长度一般为4毫米,使 $a/w \approx 0.5$;预制疲劳裂纹的整个过程中,裂纹尖端应力强度因子 $K_{I_{max}} \leq 0.6K_{Ic}$ 。

三点弯曲试验在岛津IS-10T电子式万能材料试验机上进行。双悬臂夹式张开仪及

放大器都是自制的,放大倍数约为300×,详细尺寸与线路见资料〔2〕。

三点弯曲试样平面应变断裂韧性 K_{Ic} 的表达式为:

$$K_{Ic} = \frac{PS}{Bw^{3/2}} \left[2.9 \left(\frac{a}{w} \right)^{1/2} - 4.6 \left(\frac{a}{w} \right)^{3/2} + 21.8 \left(\frac{a}{w} \right)^{5/2} - 37.6 \left(\frac{a}{w} \right)^{7/2} + 38.7 \left(\frac{a}{w} \right)^{9/2} \right]$$

式中: P——载荷, 公斤; a——试样裂纹长度, 毫米。

三、试验结果与分析

超高强度钢的断裂韧性取决于钢的合金成分、冶炼制度、热处理工艺、实验温度和微观结构等〔3-6〕。通过改变热处理制度是提高现有合金断裂韧性的一个重要途径。应用不同的实验温度, 考核现有合金断裂韧性的变化, 也是材料研制、设计选材的重要依据。为此, 我们做了不同回火温度、实验温度下的断裂韧性, 却贝冲击与疲劳预裂纹试样冲击性能的比较, 等温淬火与淬火回火性能的比较等实验。还通过电镜复型与扫描电镜观察断口, 用金相与穿透电镜薄膜技术研究了微观组织对断裂韧性的影响。

(1) 回火温度对断裂韧性的影响

回火温度对低合金超高强度钢断裂韧性的影响已有不少研究〔3-12〕。开始, 人们对用 K_{Ic} 能否反映低合金钢的回火脆性表示怀疑, 随着断裂韧性测试技术的发展与完善, 某些中碳低合金钢的回火脆性已为 K_{Ic} 测定所

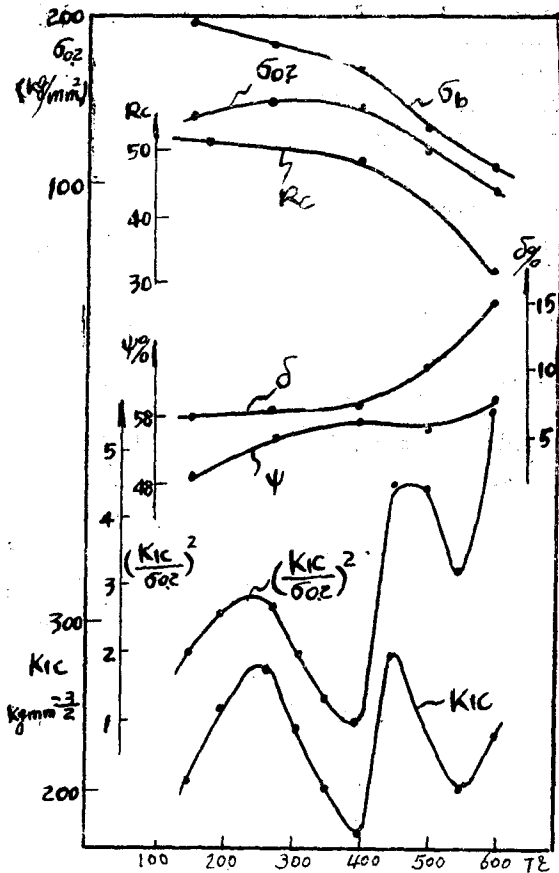


图1 力学性能与回火温度关系

证实。本实验中, 此钢在900℃加热半小时, 油淬, 在150—600℃分别回火三小时, 空冷, 力学性能和断裂韧性的结果见表2和图1。

从图 1 中明显看出，回火温度在 400℃ 以上，力学性能明显变化， $\sigma_{0.2}$ 、 σ_b 、 R_c 显著降低， δ 、 ψ 、 n 显著升高。在 400℃ 以下，几个主要参数如 $\sigma_{0.2}$ 、 δ 、 R_c 等变化缓慢。还发现在 400℃ 与 500℃ 回火，具有明显回火脆性；在 270℃ 和 450℃ 回火具有较高的断裂韧性值，而 450℃ 回火时的 K_{Ic} 比 270℃ 回火时的 K_{Ic} 值还高 8%，但屈服强度牺牲 28%；同时看出 450℃ 附近的 K_{Ic} 都显著下降，这意味着取得较高断裂韧性值的高温回火范围很窄，工业生产中不易掌握，而低温 270℃ 回火的 K_{Ic} 与 $\sigma_{0.2}$ 都比较高，综合性能较好，另外回火温度低还有缩短生产周期、降低成本的优点。图 1 还画出了裂纹尺寸特征参量 $[K_{Ic}/\sigma_{0.2}]^2$ 与回火温度的关系，可以看出，尽管高温回火时 K_{Ic} 提高不大，但允许最大裂纹尺寸可以增加 1—2 倍，这对于受力不大、应力集中、残余应力较大的薄弱部件，可适当选择此制度。

表 2 各种回火温度对 K_{Ic} 和光滑拉伸性能的影响

回火温度	K_{Ic}	σ_F	$\sigma_{0.2}$	σ_b	σ_K	S_K	ε_K	n	$\delta\%$	$\psi\%$	R_c
150℃	218.5	108	139	197	145	282	0.614	0.044	7	48.5	51
200	252										50
270	269	128	150	181.5			0.802	0.060	7.3	54.8	49
310	235										49
350	200										48
400	174.6	126	145.5	171	110	257	0.848	0.048	7.5	57	48
450	293.5										43
500	251.3	100.5	119.5	133.5	92.5	210	0.830	0.073	10	56	40
560	197.7										37
600℃	226.7*	88.5	95.5	110	72	179	0.913	0.110	14	60	31

σ_F —比例极限， σ_K —断裂应力， S_K —断裂真应力， ε_K —断裂真应变， n —硬化系数，
*表示 K_{Ic} 值。

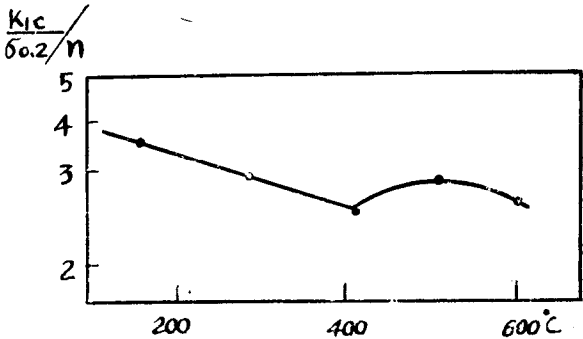


图 2 $\frac{K_{Ic}}{\sigma_{0.2}} / n$ 随回火温度的变化