

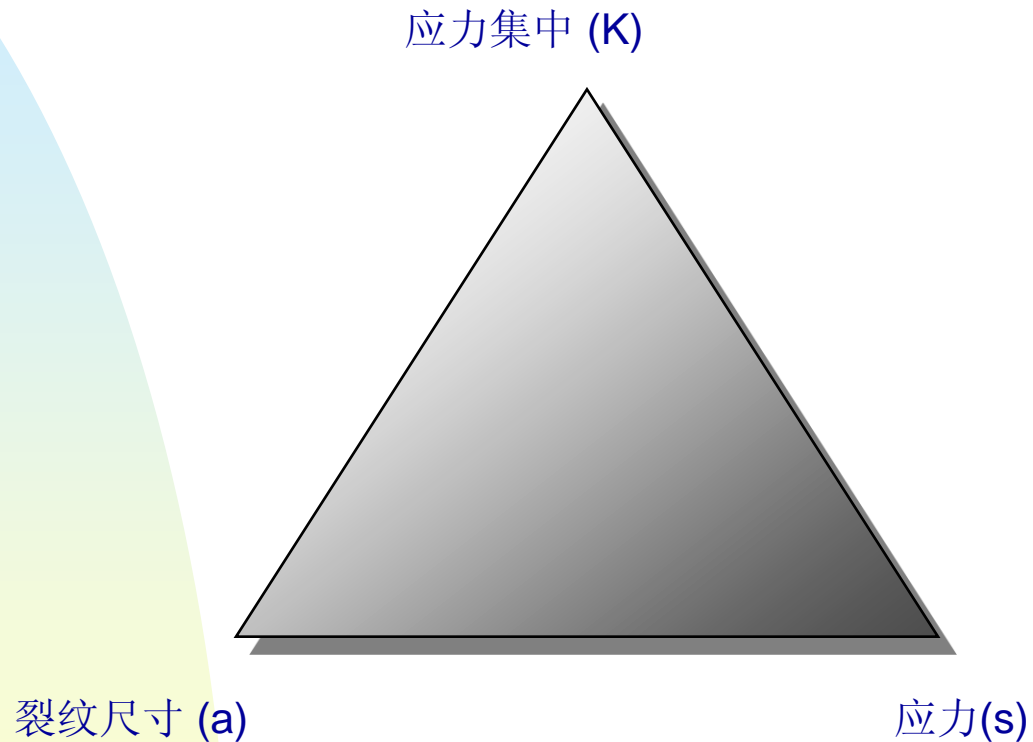
第19章

疲劳裂纹扩展

疲劳裂纹扩展方法 (LEFM)

- 有初始裂纹后还有多少寿命?
- 对于一个部件的安全寿命或者检查图表是什么?什么时候发生断裂?
- 裂纹扩展基于线弹性断裂力学(LEFM)
- 关联应力强度因子和裂纹扩展率
- 它用一个接一个循环计算来预测寿命
- 在航空,海洋工程和电站等领域应用很多

裂纹-力学三角关系



断裂力学-四边形关系

裂纹初始长度 (a_f)

循环失效次数 (N_f)

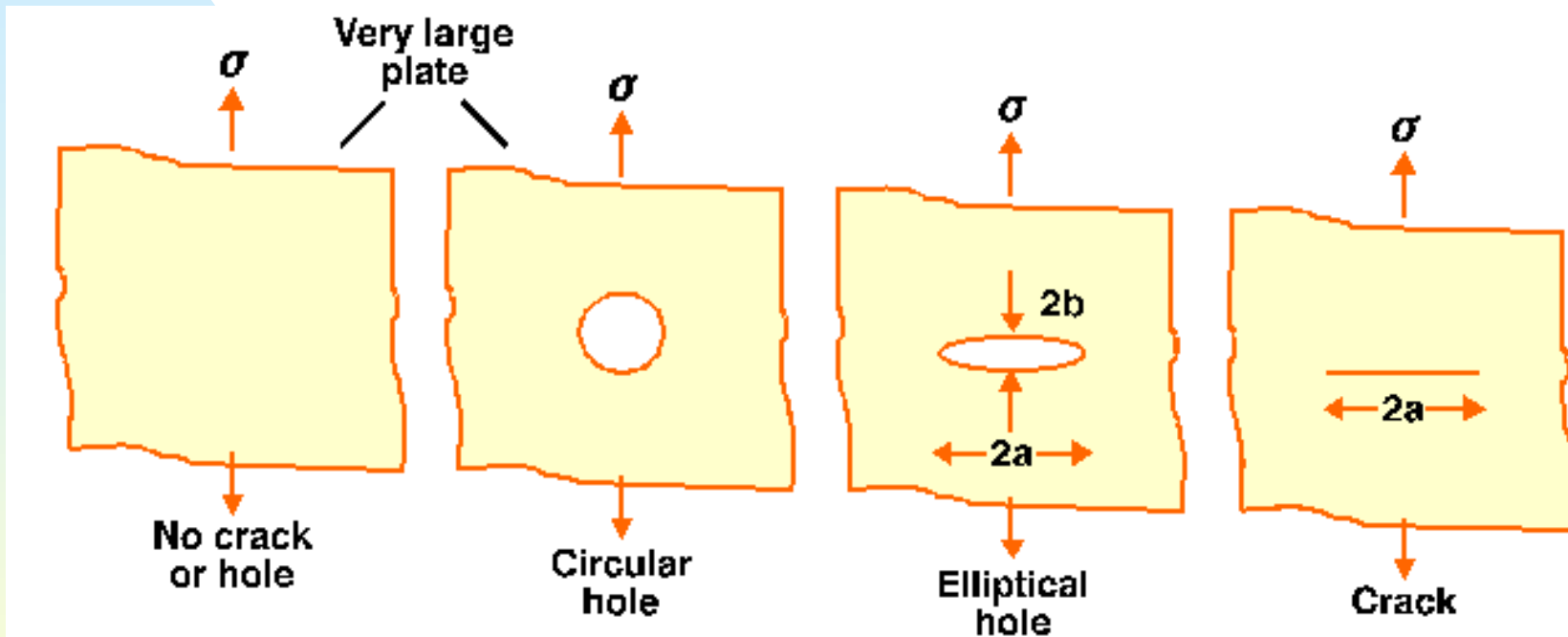


初始裂纹长度 (a_i)

应力范围 (DS)

裂纹应力集中

一个裂纹是一个极端的应力/应变集中



弹性应力集中

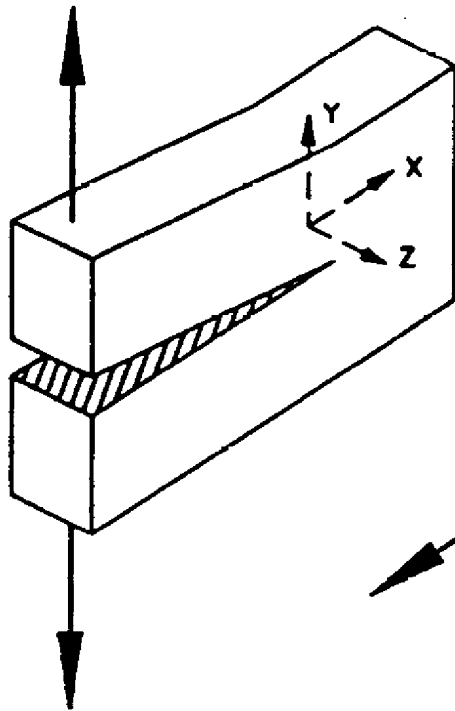
$$\sigma_{\max} = K_t \sigma$$

$$K_t = 3$$

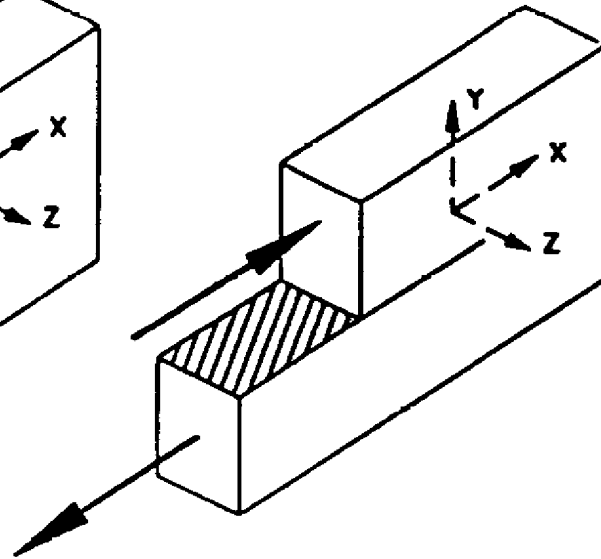
$$K_t = (1 + 2a/b)$$

$$b = 0 \rightarrow K_t = \infty$$

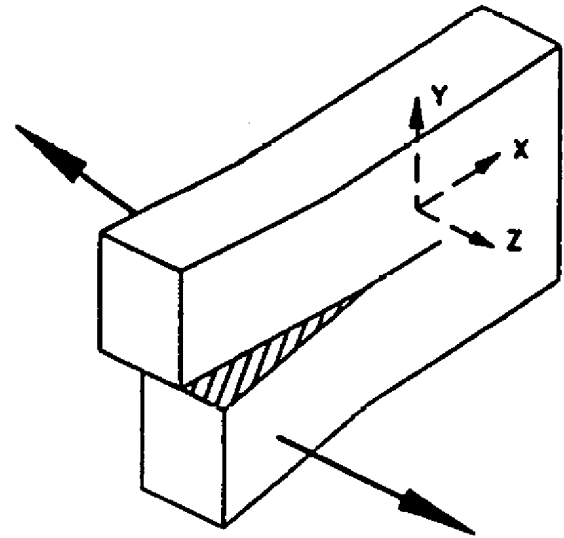
裂纹开口模型



Mode I



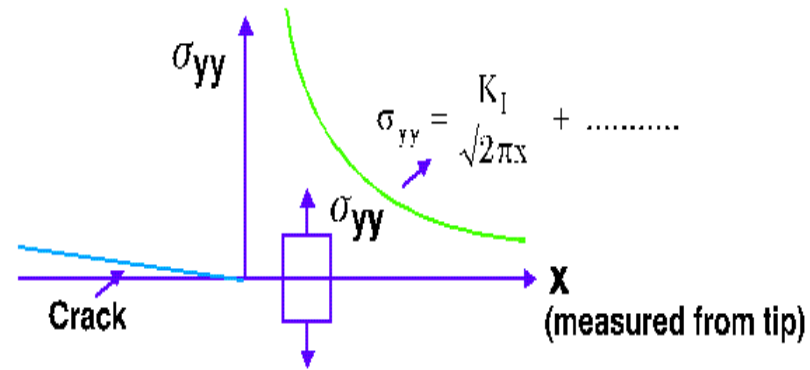
Mode II



Mode III

裂纹力学特性

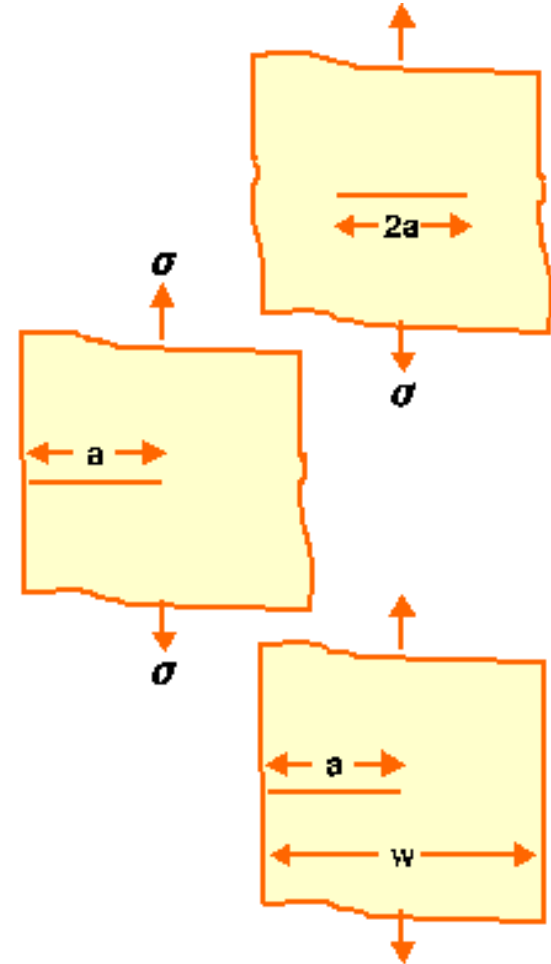
- 应力集中因子 K_I



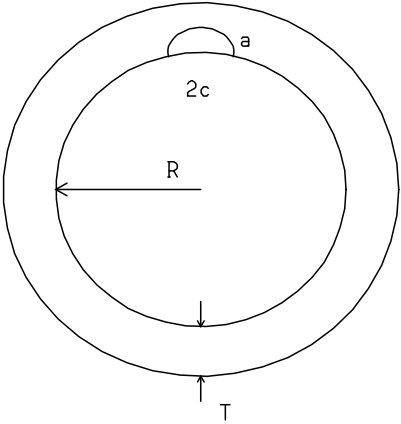
- 通常 K 的格式:
 $K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$ 几何函数
 $Y = Y(a/w, B, \dots)$

典型几何函数

- 无限平面直裂纹
 - ◆ $Y = 1$
- 半无限平面边裂纹
 - ◆ $Y = 1.12$
- 无限平面边裂纹
 - ◆ $Y = 1.12 - 0.231(a/w) + 10.55(a/w)^2 - 21.72(a/w)^3 + 30.30(a/w)^4$

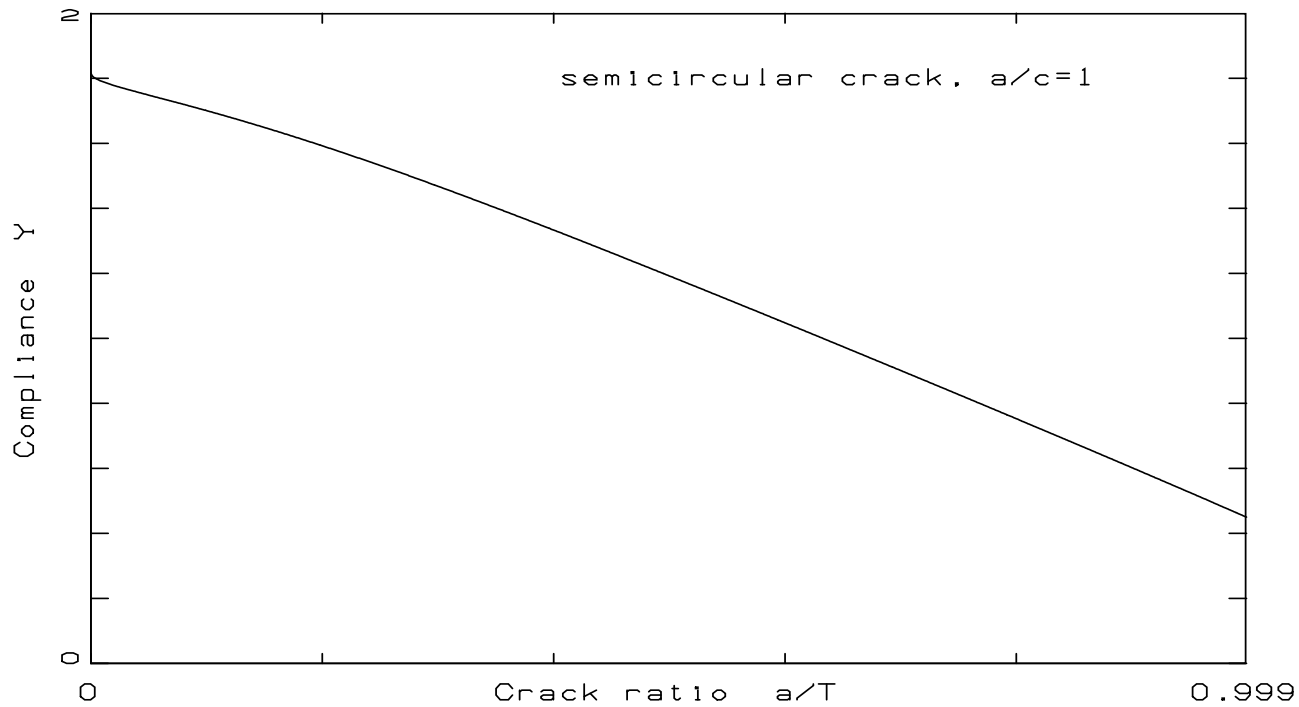


线弹性断裂力学

Fracture Mechanics K Solution Library	
Specimen type : Internal surface crack under a hoop stress	
Enter any changes (none) :	
	<p>Dimensions</p> <p>Radius, R (mm) : 10</p> <p>Thickness, T (mm) : 5</p> <p>Aspect ratio, AC : 1</p> <p>Par. angle, THETA : 90</p>

线弹性断裂力学

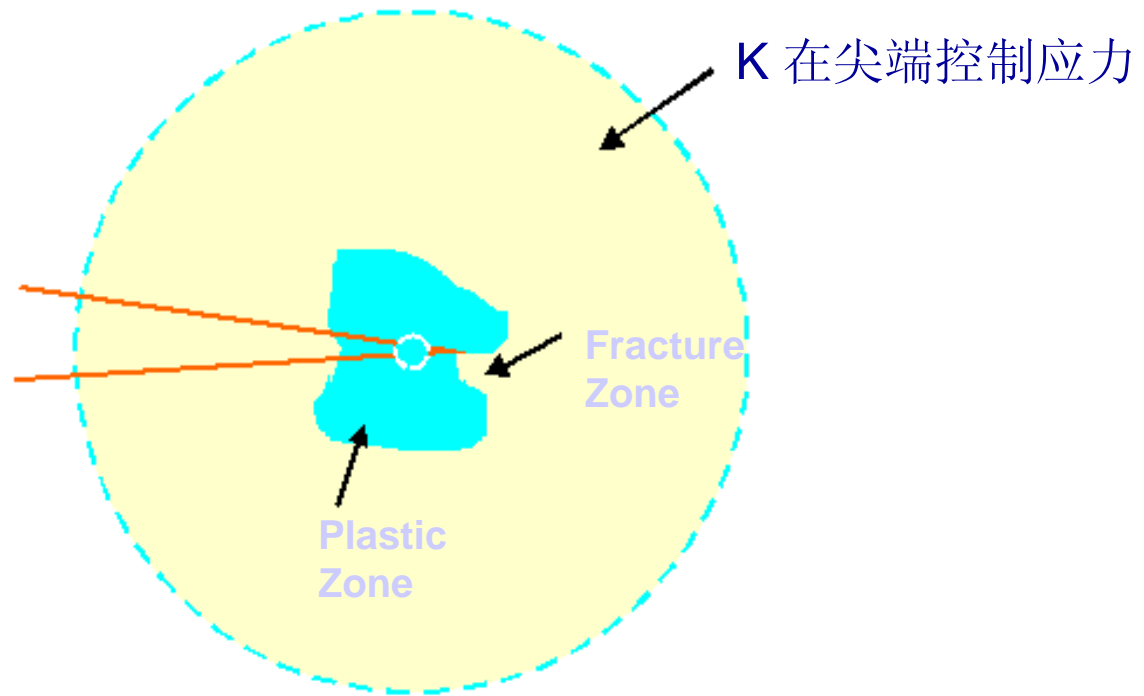
DISPLAY OF DTA.KSN



DTA

Y Function for an Internal Crack in a Tube

K 控制的裂纹



- 在小规模的屈服 K 控制尖端所有的事情-塑性-增长-断裂
- 当 $K = K_{IC}$ 断裂发生 (断裂韧性)

小规模屈服假设

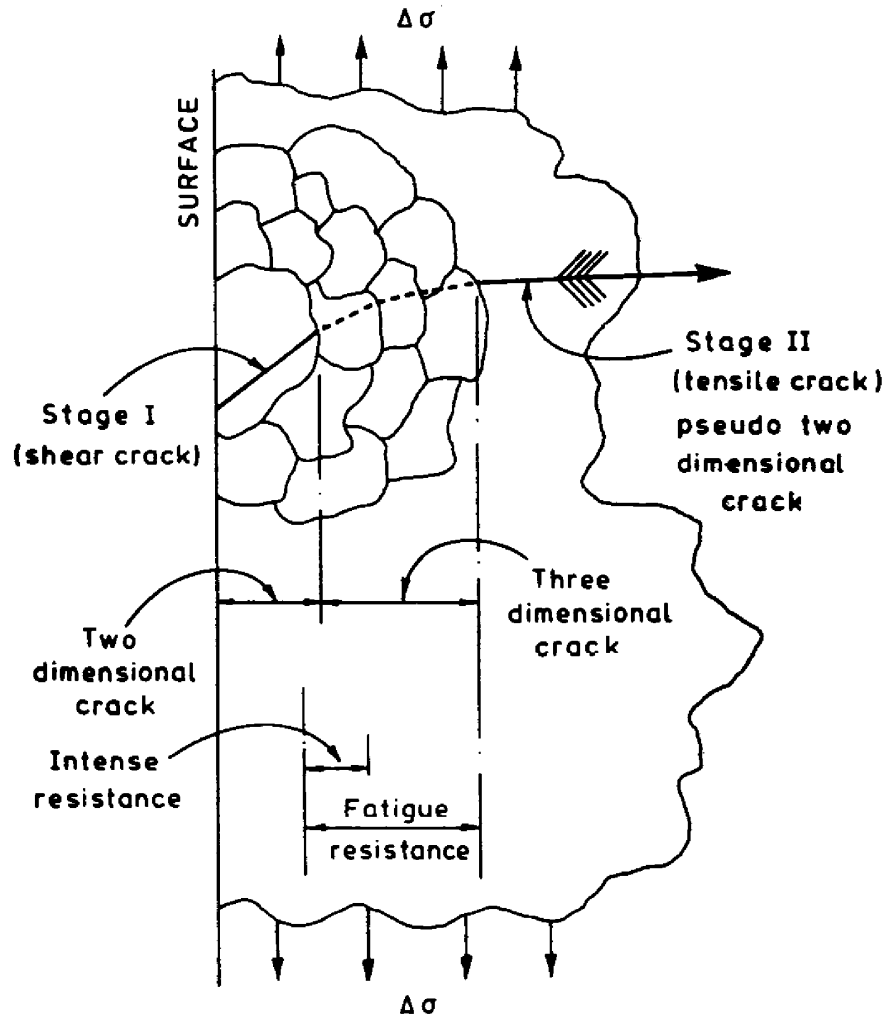
- 塑性区大小:

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2$$

- 对于LEFM来说,塑性区域相对裂纹长度和部件几何尺寸必须是小的:

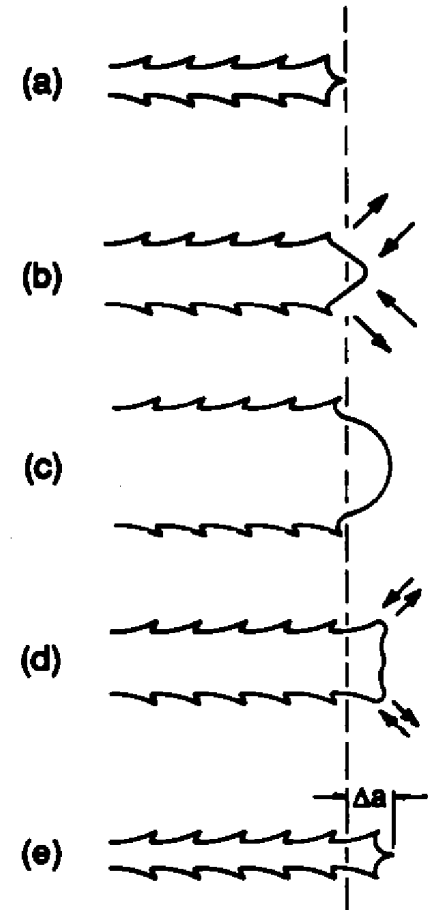
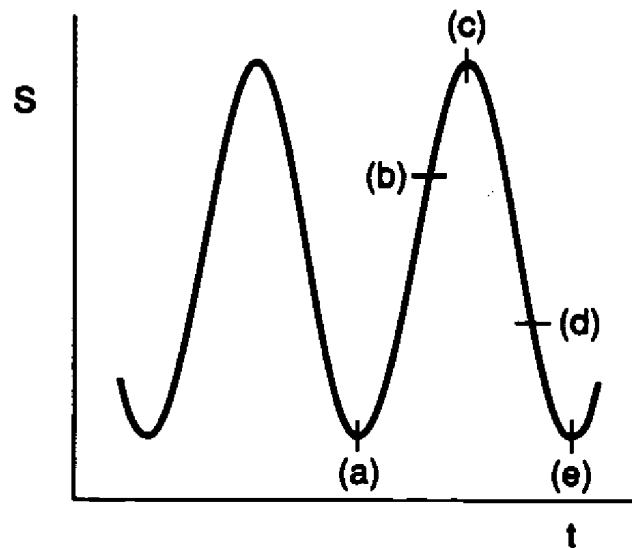
$$r_p \leq \frac{1}{25} (a, t, b, w, \dots)$$

疲劳裂纹扩展步骤

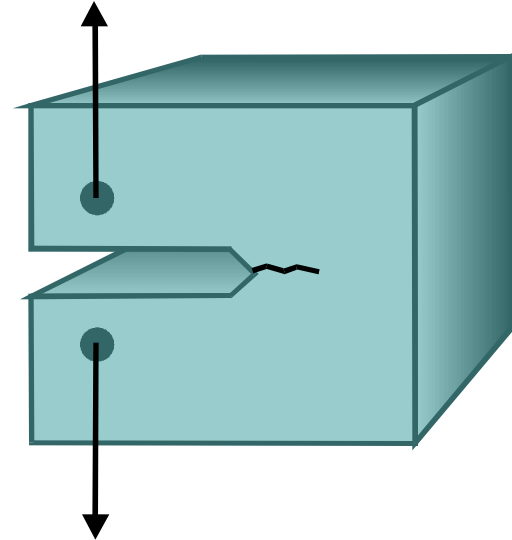
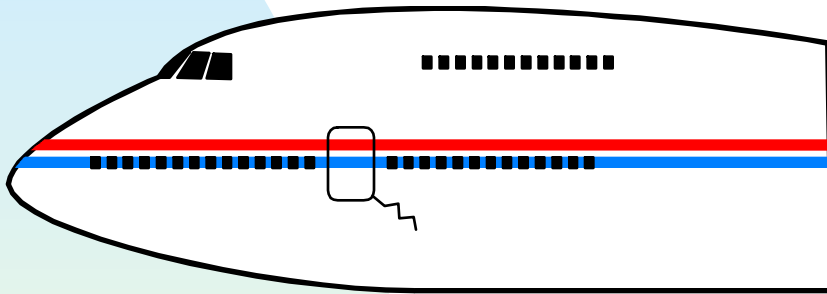


疲劳裂纹扩展机制

- 交变塑性
- 腐蚀

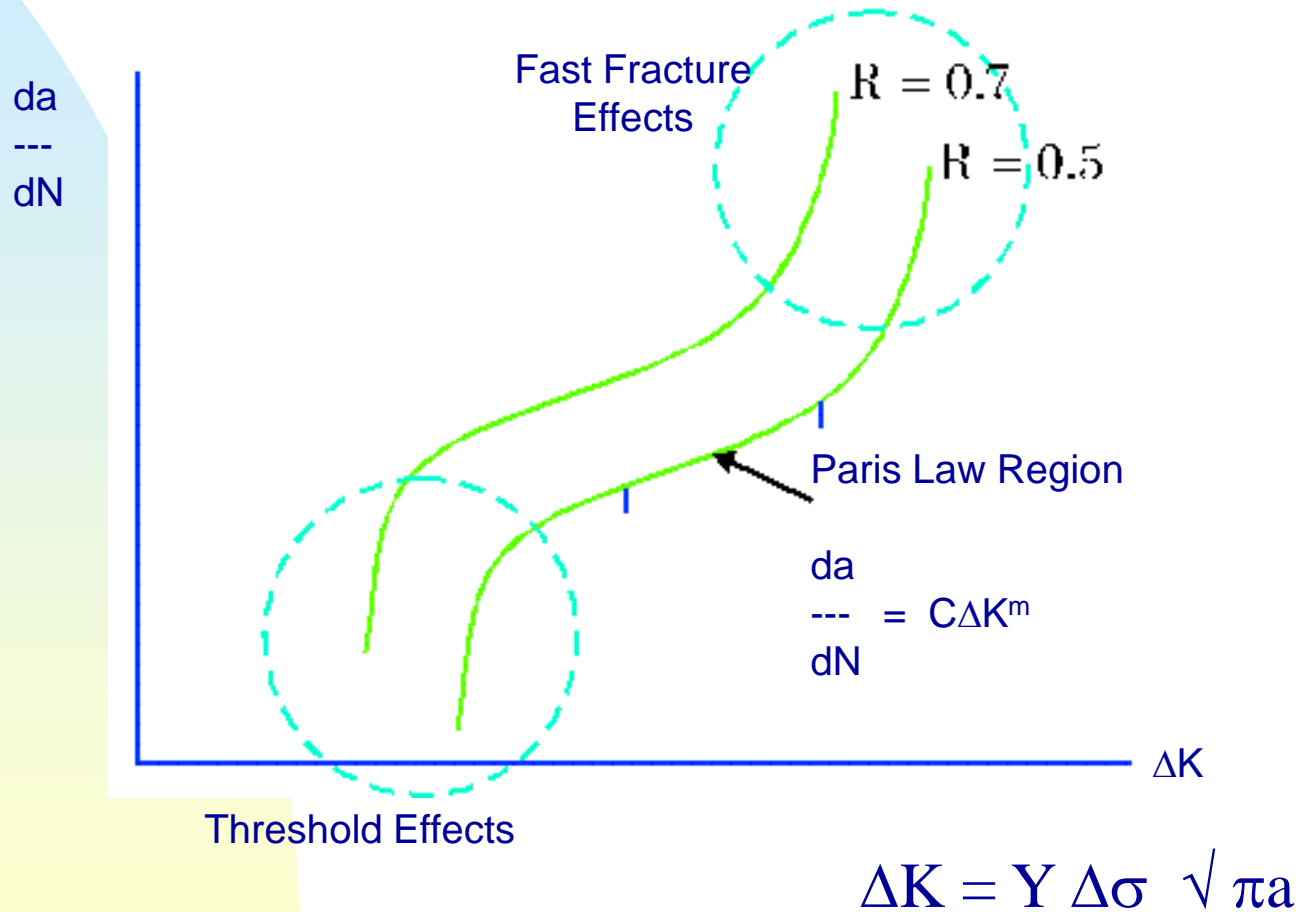


裂纹增生的模型-相似性

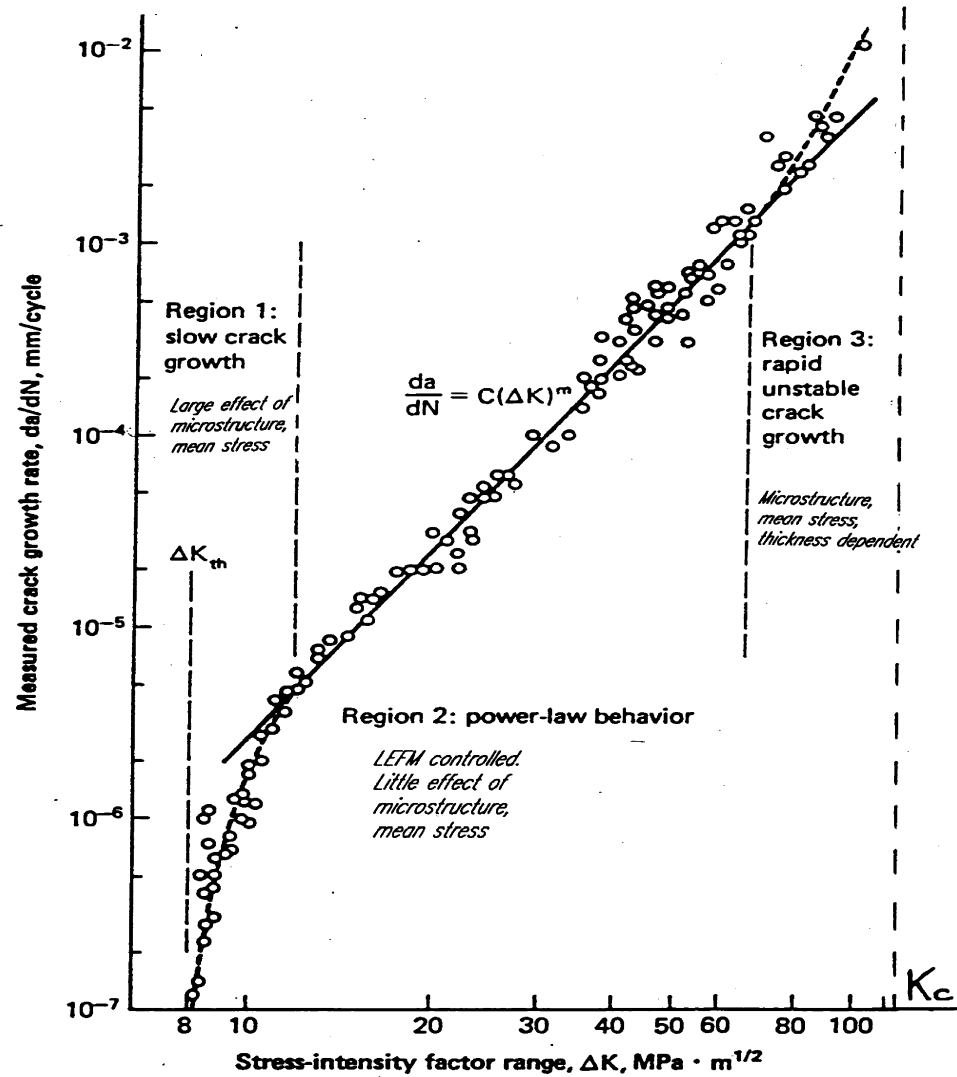


如果两个裂纹有相同的应力集中因子,裂纹以同样速率扩展

通过 ΔK 控制裂纹增长率



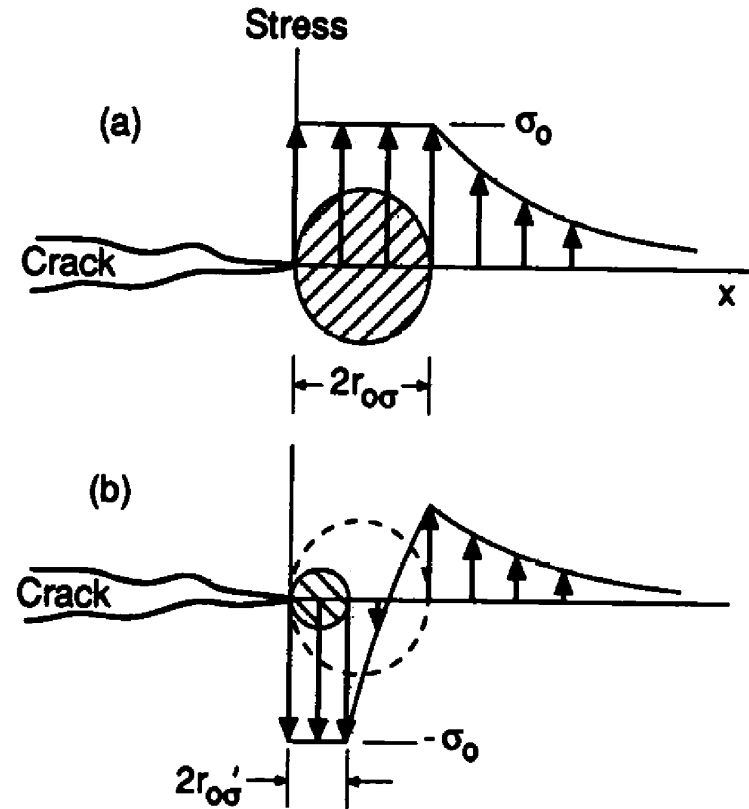
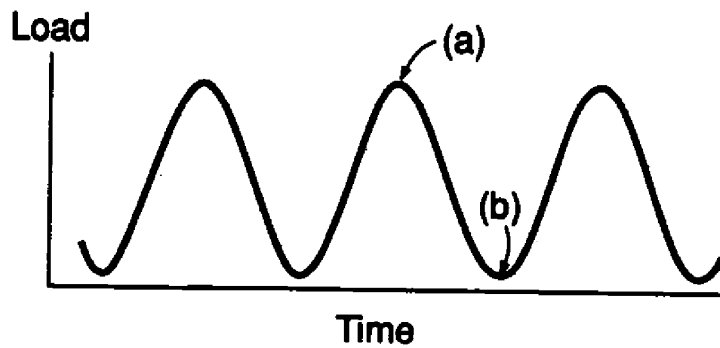
增长率



影响裂纹增长率的因素

- 裂纹尖端塑性 (裂纹闭合)
- 平均应力
- 临界区域
(对于低载荷或者短裂纹)
- 变幅加载(过载)
- 环境

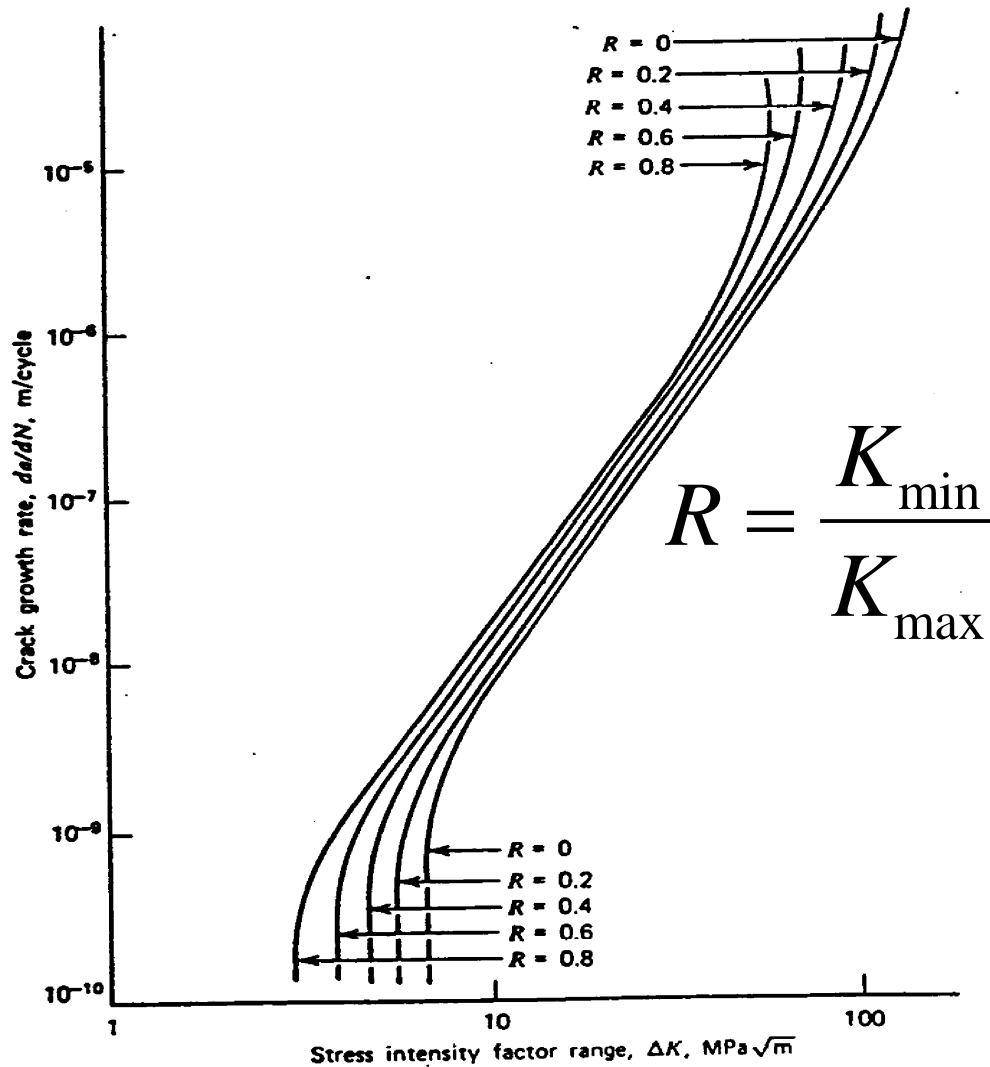
裂纹尖端塑性



塑性区和裂纹闭合

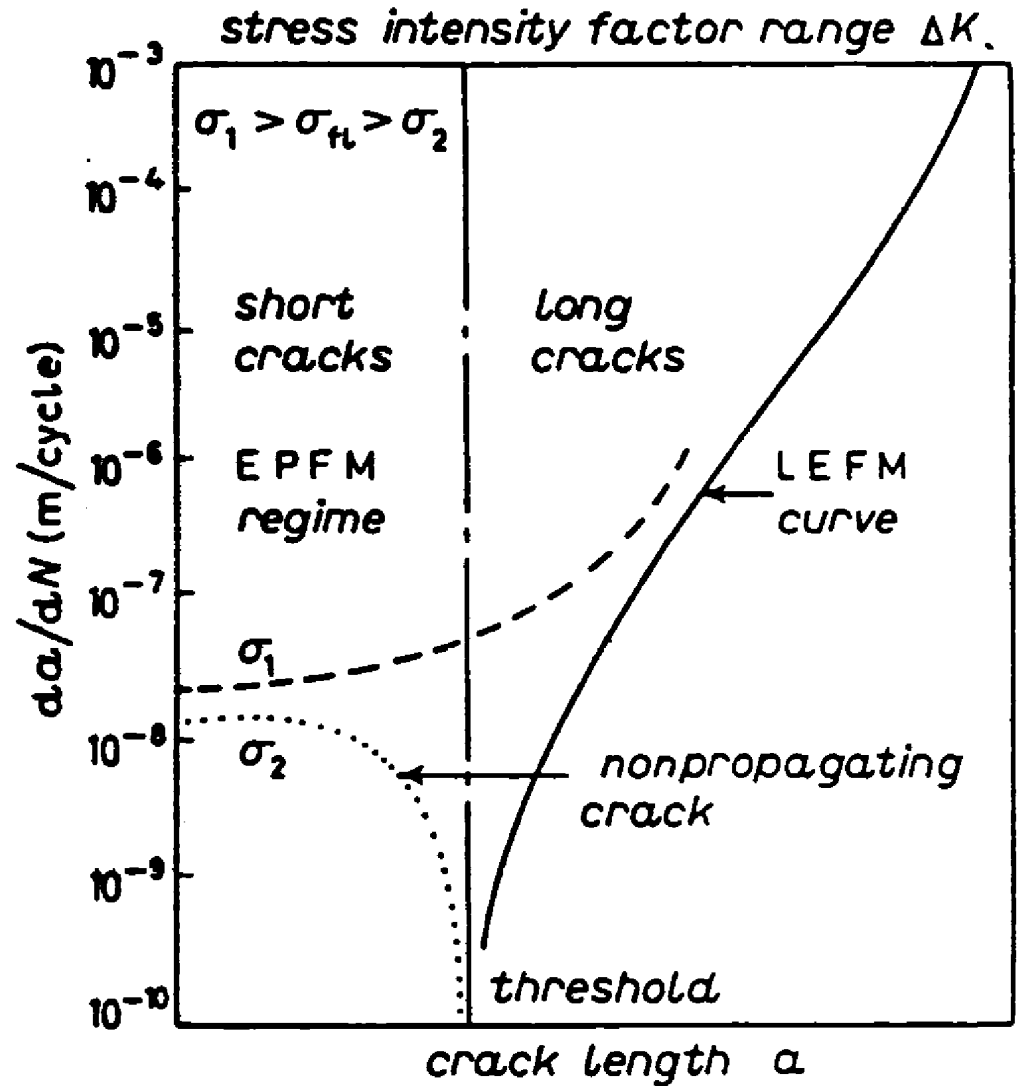
- 当裂纹增长,小的塑性区围绕裂纹尖端开始展开
- 塑性变形区被保持弹性的材料包围
- 材料卸载时,塑性区引起裂纹面相向拉力,从而引起裂纹闭合
- 裂纹闭合可以由下面因素引起:
 - ◆ 过载
 - ◆ 腐蚀作用
 - ◆ 面粗糙

平均应力 (R-RATIO 影响)



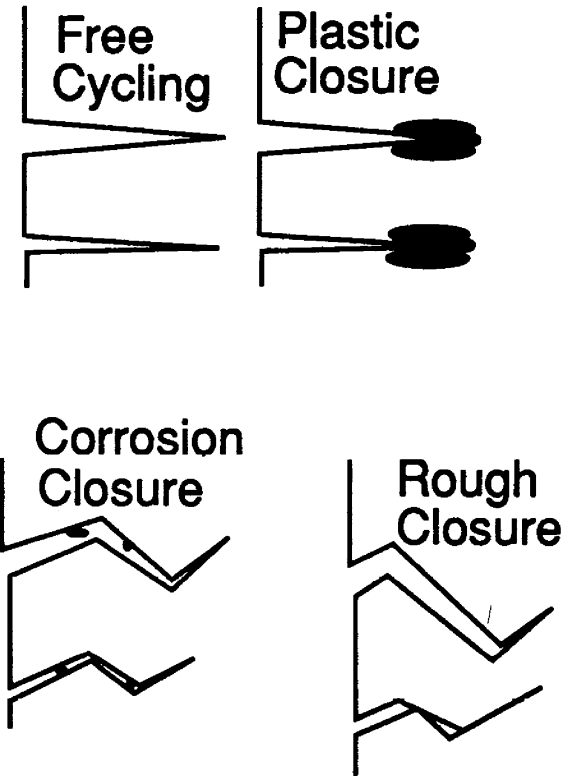
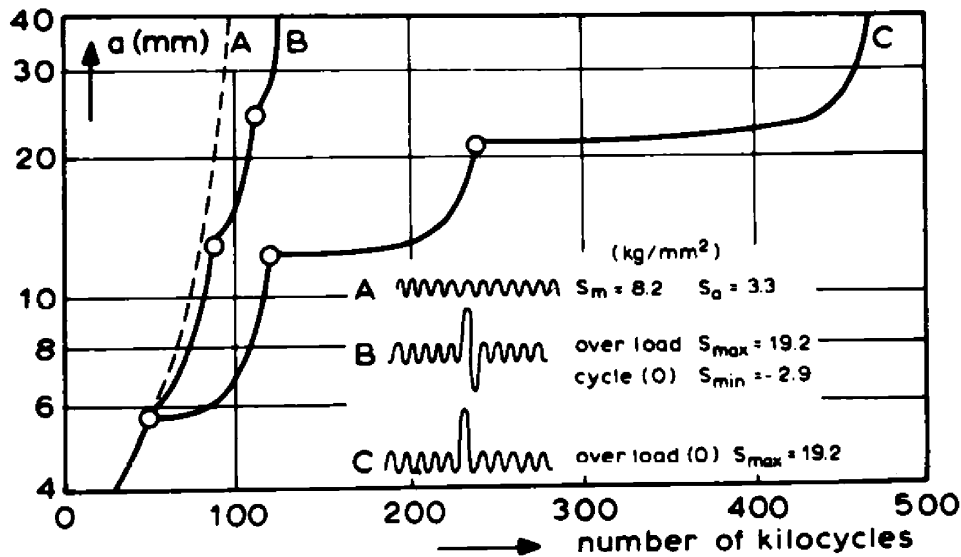
短裂纹

- 短裂纹:
 - 它们不受闭合影响.
 - LEFM 通常不适合它们.
 - 它们特点是比长裂纹有更高的裂纹扩展率.
- 注:
 - 当 ΔK 小于阈值 ΔK_{th} 时候裂纹不扩展.



变幅值加载

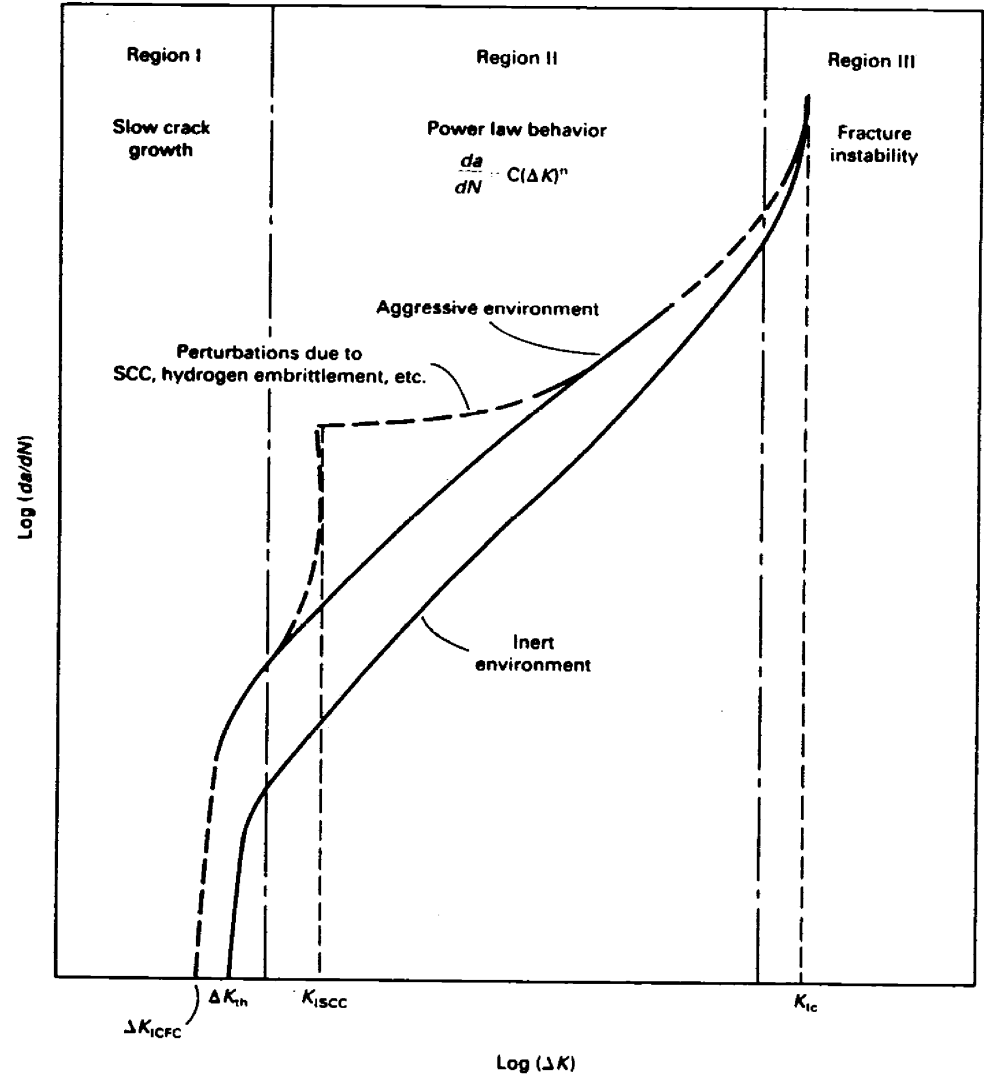
高-低次序 改变裂纹闭合状态



Closure, by whatever mechanism, reduces the stress intensity range

环境

裂纹扩展率在腐蚀环境下比在空气中高。
在真空中最低。



裂纹扩展准则

- 有很多关于裂纹扩展的准则:
 - ◆ Paris (the most known)
 - ◆ Forman (MSC/Fatigue uses similar method for fast fracture correction)
 - ◆ Lucas-Klesnil
 - ◆ Elber
 - ◆ Walker
 - ◆ Wheeler
 - ◆ Willenborg (MSC/Fatigue uses extension of this model)

有效的 ΔK 方法

- **MSC.Fatigue** 裂纹扩展分析的关键时对表象的 ΔK (基于外载荷的) 修正为有效的 ΔK (也就是裂纹扩展驱动力实际上认为在裂纹尖端)
- 惯用的方法

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R, \Delta K_{TH}, K_{IC}, history, environment)$$

- **MSC.Fatigue** 方法

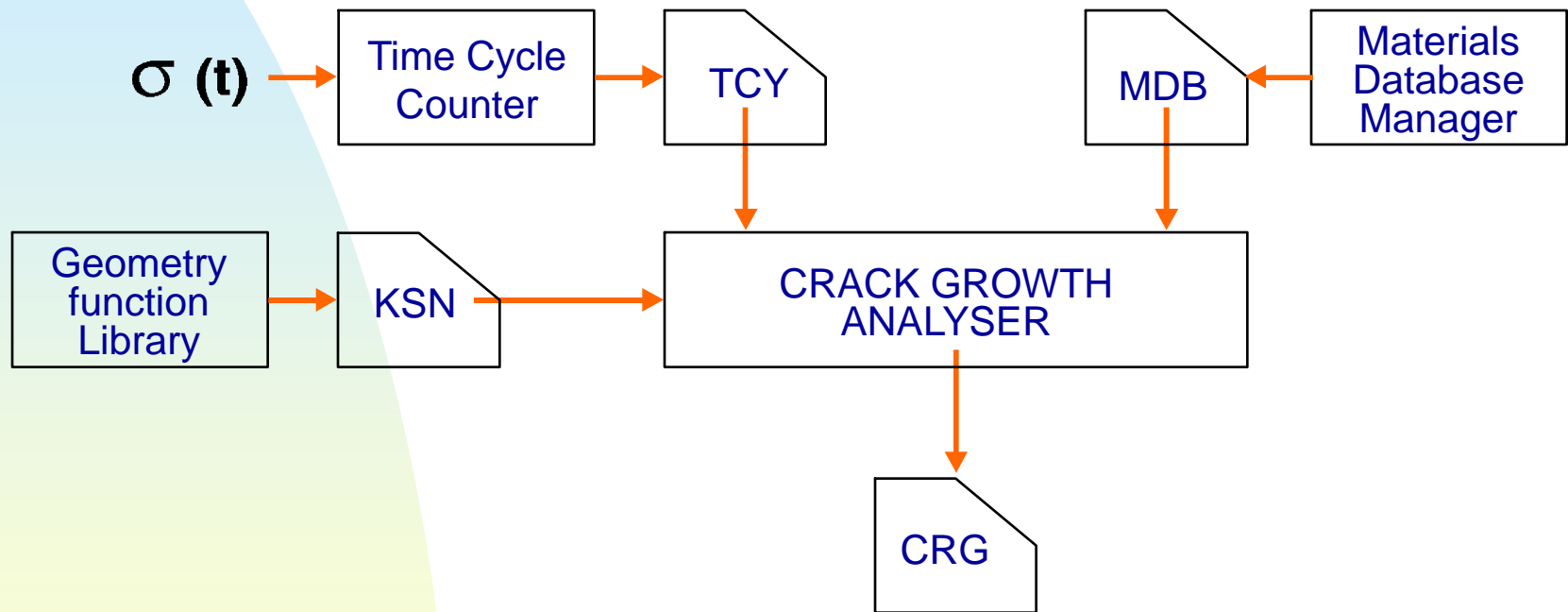
$$\Delta K_{eff} = f(\Delta K, R, \Delta K_{TH}, K_{IC}, history, environment)$$

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_{eff}^m$$

MSC.FATIGUE 裂纹扩展分析步骤

- 输入下一个循环
- 查表计算表象 ΔK
- 对下面情形修正 ΔK
 - ◆ 闭合/短 裂纹
 - ◆ 切口区域影响
 - ◆ 静断裂模型贡献
 - ◆ 时间历程影响
 - ◆ 环境影响
- $da = C \Delta K_{\text{eff}}^m$
- $a = a+da$ (如果没有快速断裂,进入下一个循环)

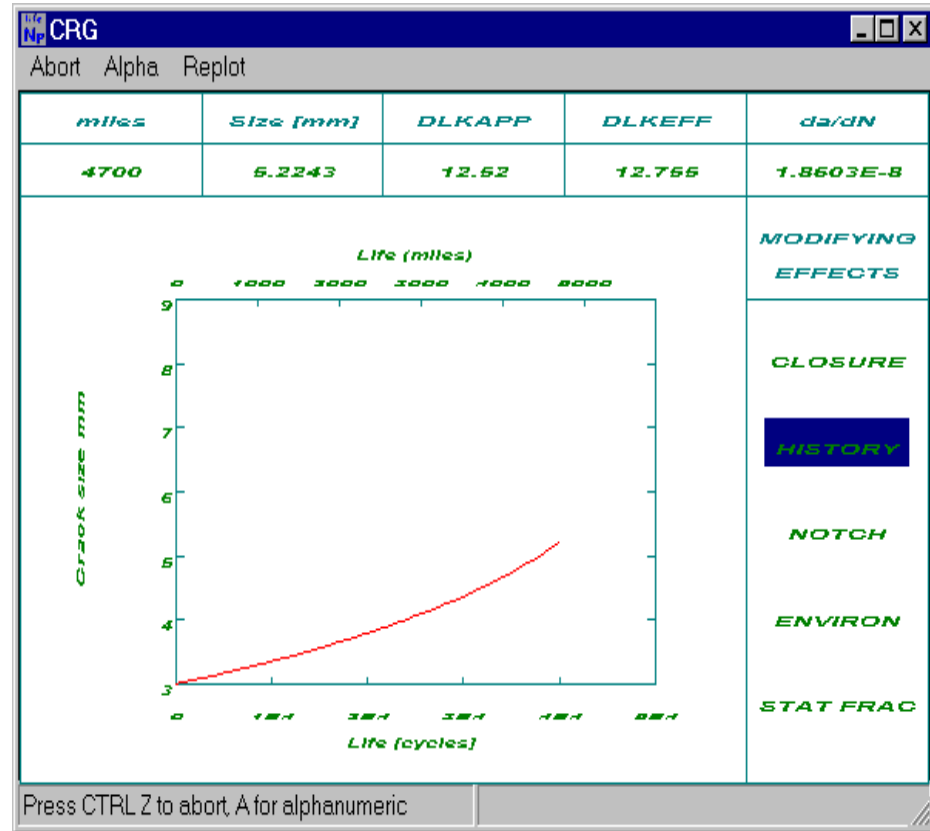
MSC.FATIGUE实现



一个个循环的裂纹扩展

特征:

- ◆ 一个个循环模拟
- ◆ 时间序列雨流计数
- ◆ 多环境下的材料特性
- ◆ Kitagawa 最小裂纹尺寸
- ◆ 法值
- ◆ 裂纹闭合和延迟
- ◆ 自定义寿命
- ◆ 断裂韧性失效准则
- ◆ 表面或者内裂纹
- ◆ 改进的Paris准则
- ◆ (改进的 Willenborg模型)



方法总结

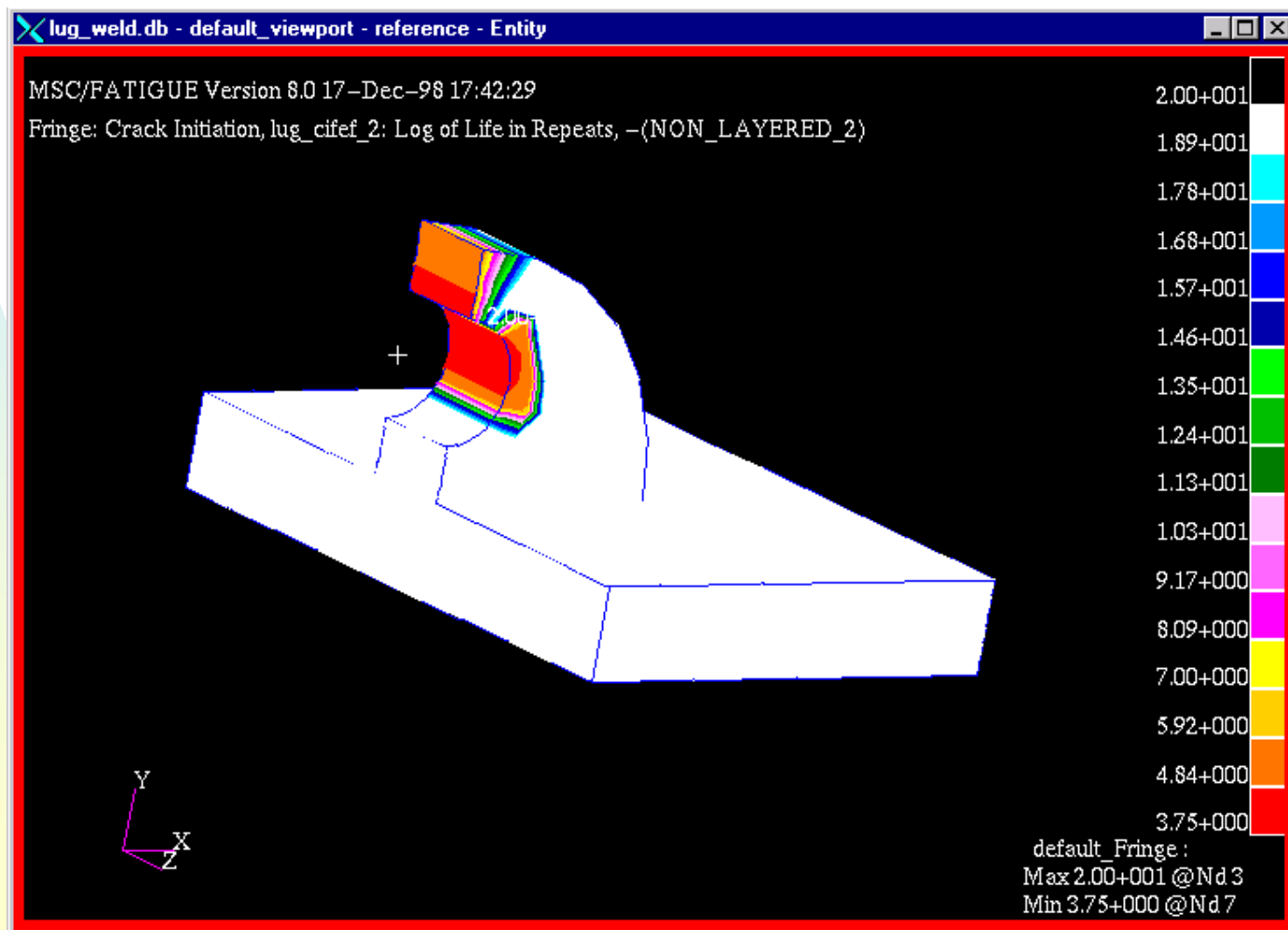
- 确定临界区域和选择单元/节点用于名义应力
- 从柔度函数库中确定几何
- 确定裂纹尺寸
- **MSC.Fatigue** 计算一个个循环的裂纹长度变化直到快速断裂发生
- 如果所有的参数模拟都正确,寿命评估通常落在一个**2**倍因子的范围内

MSC/FATIGUE 裂纹扩展分析应用

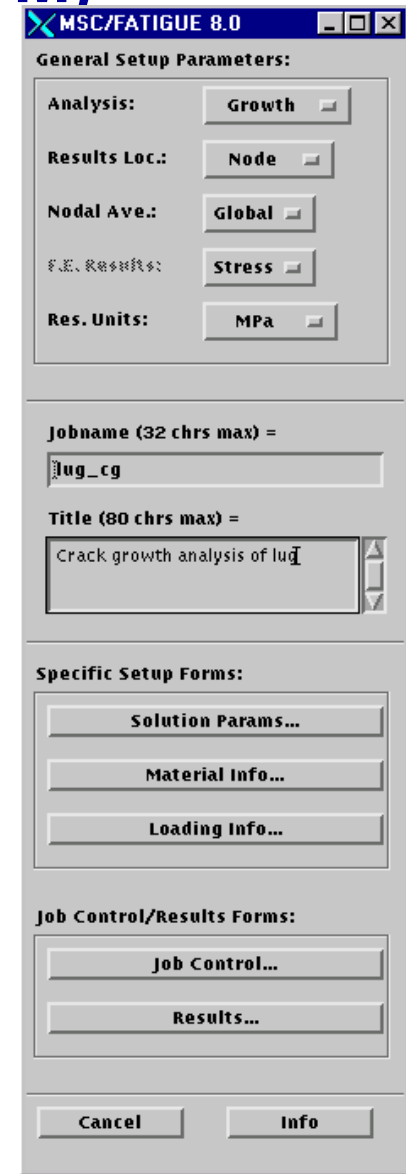
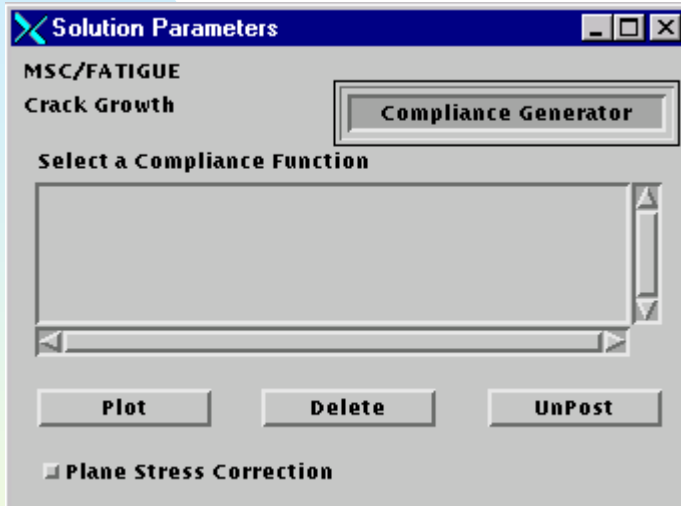
- 设计分析
- 试验程序的预测
- 检查策略
- 失效研究
- 决策支持

例子: 裂纹扩展分析

- 拖钩问题
- 单载荷



线弹性断裂力学 (LEFM)



载荷设置

PTIME - Load X-Y Data

Source Filename:

Filename:

Description 1:

Description 2:

Load type:

Units:

Number of fatigue equivalent units:

Years:

Current Time Directory:

Number of Static Load Cases:

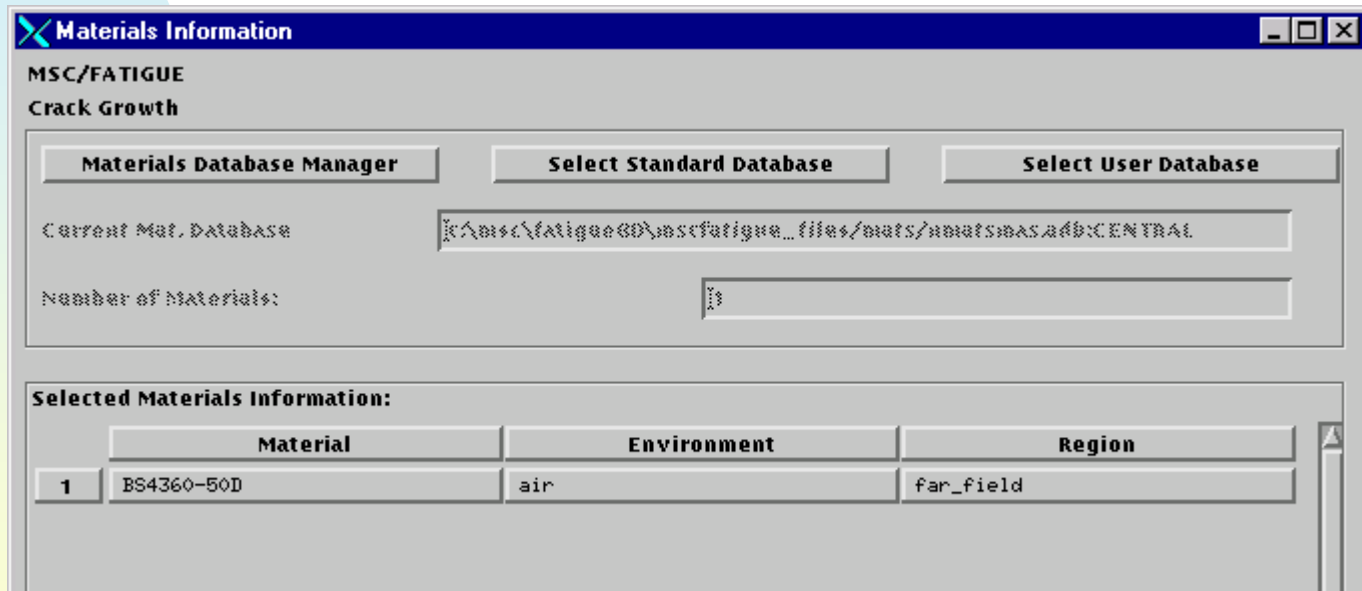
Fill Down OFF

Selected Static Load Cases:

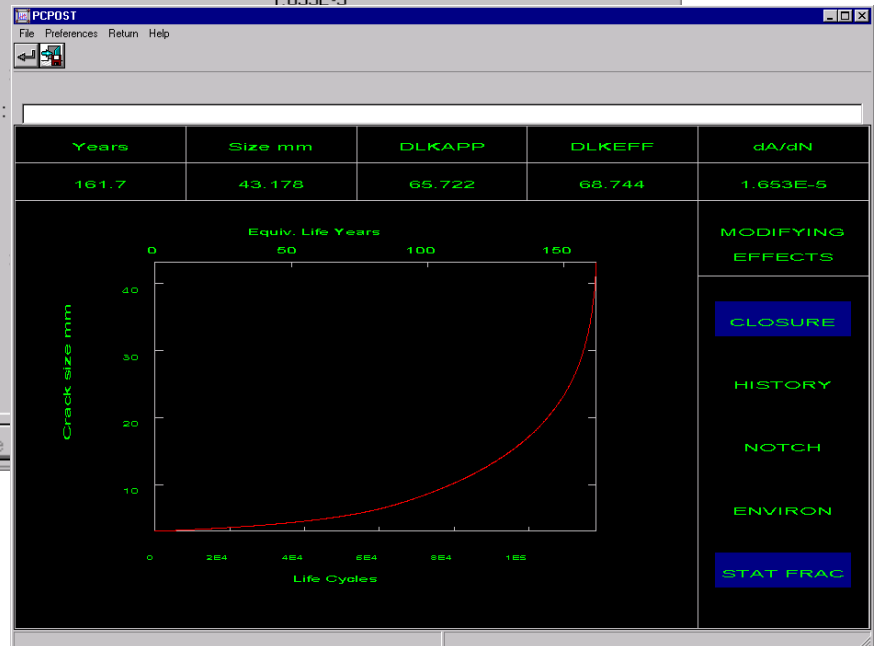
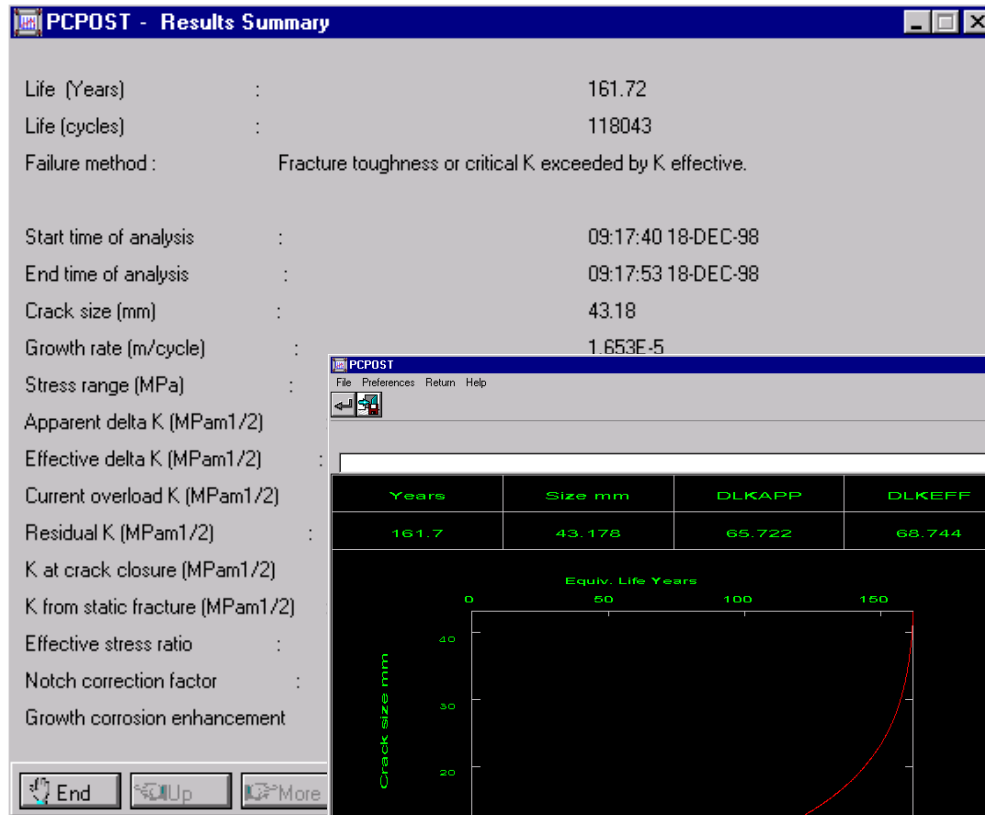
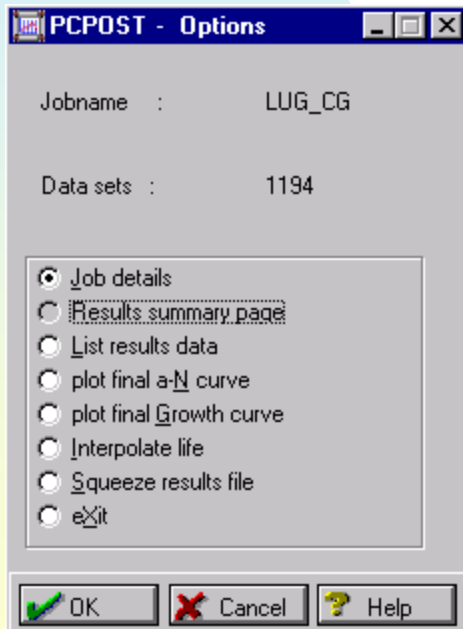
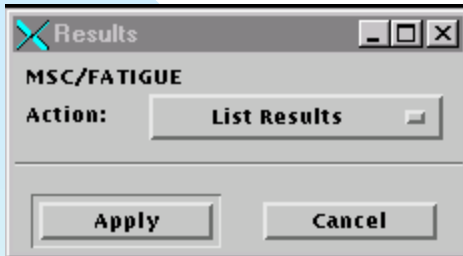
	Load Case ID	Time History	Load Magnitude
1	1,1-3,1-1-	LUGLOAD	1.

材料设置

- 创建一个只有节点223的组:far_field



执行 LEFM 分析



练习

- 快速开始手册 第7章