

低循环疲劳问题简介

中国科学院力学研究所 曾春华

疲劳问题跟工程机械和其它工业部门有着极为密切的关系。几乎所有工程机械都受重复交变载荷的作用，因而普遍存在着疲劳问题。据统计，工程机械大多数构件的破坏都是由于疲劳引起的，而疲劳破坏又往往起源于构件或结构的关键部位应力集中区。低循环疲劳的研究内容正是关键部位应力集中区的应力—应变，同时估算构件或结构的使用寿命。

一、低循环疲劳的概念

材料的疲劳曲线（或称 S-N 曲线）如图 1 所示。按其破坏的循环数 N 一般可分为三个区域：

短寿命区——破坏循环数在 10^4 以内或更少一些，应力水平 S 较高；

中等寿命区——破坏循环数 N 大致在 $10^4 \sim 10^6$ 的范围内，应力水平中等；

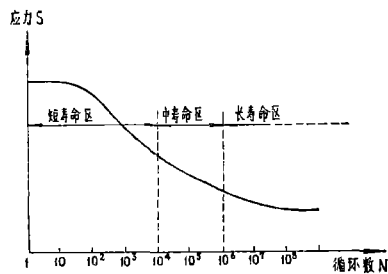


图 1 材料的疲劳曲线

长寿命区——破坏循环数 N 在 10^6 以上，应力水平较低，位于疲劳极限或条件疲劳极限的附近。

属于短寿命区的疲劳问题就是低循环疲劳问题。

严格地说，低循环疲劳是研究构件或结构在周期性外载荷作用下关键部位（即薄弱环节）

节），如孔洞、沟槽和圆角等应力集中或应变集中区的循环应力—应变行为，从而估算结构或构件的疲劳寿命。

低循环疲劳跟中等寿命区、长寿命区的疲劳有较大区别。在中等寿命区和长寿命区，应力水平一般比较低，材料是在弹性范围内工作的，应力和应变成正比，材料对交变应力的抗力和对交变应变的抗力完全一致。低循环疲劳即短寿命区的疲劳问题中，应力水平较高，交变应力一般都超过比例极限，每一循环都可能产生相当大的塑性变形，破坏情况很接近于静力破坏，应力和应变不成比例，材料对交变应力的抗力和对交变应变的抗力不完全一致。

在结构或零件中，从总体来说，材料是在弹性范围内工作。但在应力集中区或应变集中区，材料通常都进入了塑性变形状态，这时由于塑性屈服，应力就成了不稳定或处于流变状态。在此情况下，应变就成为控制材料疲劳性能的主要参数了。构件或结构在反复循环应变的作用下，就会导致破坏，所以低循环疲劳又叫做低循环应变疲劳。

整个构件或结构的寿命完全取决于关键部位如孔洞、沟槽、圆角处的寿命。只要把这些薄弱环节控制住，整个结构的安全就得到了保证。所以从某种意义上讲，研究低循环疲劳问题是解决疲劳问题的主要手段和方法。

二、低循环疲劳问题的广泛性

低循环疲劳问题涉及的范围十分广泛，在工程机械中也很突出。例如推土机的前梁和车架、起重机的主臂和副臂、挖掘机的缓冲阀、装载机的动臂、混凝土机械的搅拌曲臂等等，都存在着严重的低循环疲劳问题；工程机械的动力设备方面，低循环疲劳问题更为严重。

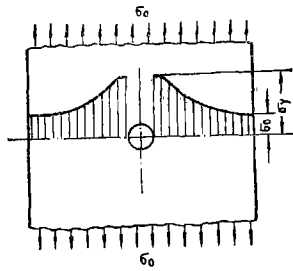


图2 带孔板的应力分布

这里举一例子加以说明。设有一块中心带孔的板材，在外载荷的作用下，虽然其名义应力 σ_0 低于材料的屈服极限 σ_y ，是在弹性范围内工作，但孔边（孔的附近）已进入塑性范围，孔边的应力—应变行为与整板绝然不同，如图2所示，在孔边会产生不可逆的残余变形。卸载时，在弹性恢复力作用下局部应变区恢复原状，进入压缩变形，当弹性恢复力到达一定值时，使压缩进入屈服，从而形成了拉压应变循环，这就是低循环疲劳问题。

即使是光滑的、表面看来无应力集中区的构件或结构，由于金属内部晶粒的取向或微观缺陷的存在，各个晶粒的强度也会不同，在外载荷作用下，整个构件虽处于弹性状态，而个别晶粒已进入塑性状态，构成微观的应变集中，这也是低循环疲劳问题。

推土机在推土时，其推杆横梁和前梁拐轴孔处就严重受到低循环疲劳的损害，特别是前梁拐轴孔处经常造成疲劳破坏。

工程机械中发动机的各个部件，特别是旋转部件，是在复杂条件下工作的，部件的工作应力虽然在弹性变形范围内，但由于部件中有应力集中，局部产生塑性变形，这也是低循环疲劳问题。

在影响工程机械寿命的各因素中，低循环疲劳的比重较大，可以说，低循环疲劳是影响工程机械寿命的主要因素之一。实际上，任何一个构件的疲劳破坏必然经历这样的过程，即在循环载荷作用下，首先在薄弱部位的应力集中区产生塑性变形，继而产生微观裂纹，再扩

展为工程上可检测的裂纹及宏观裂纹，直到最后断裂。整个过程中，应变疲劳起主导作用，也就是说低循环疲劳是十分重要的。

三、低循环疲劳的寿命问题

低循环疲劳寿命受许多因素，比如（1）材料的低循环疲劳性能；（2）设计因素如应力集中、温度场的分布、振动载荷；（3）工艺因素如机械连接和焊接质量等的影响。

怎样从实验数据入手预测机械构件的低循环疲劳寿命？这是十分令人关注的问题。通常引用下列经验公式：

$$(1) \text{Coffin 公式: } N^a \Delta \epsilon_p = C$$

式中 N —循环到破坏的周次

$\Delta \epsilon_p$ —塑性应变

a —指数（多数合金 $=0.5$ ）

C —与塑性有关的常数

$$(2) \text{Manson 公式: } \Delta \epsilon = \frac{3.5(\sigma_b - \sigma_{\text{平均}})}{E}$$

$$N_f^{12} + \left[\log e \frac{100}{100 - \psi \%} \right]^{0.6} N_f^{0.6}$$

式中 $\Delta \epsilon$ —总应变

N_f —循环至断裂的周次

σ_b —最大应力

$\sigma_{\text{平均}}$ —平均应力

E —杨氏模量

$\psi \%$ —断面收缩率

$$(3) \text{Manson-Coffin 公式: } \Delta \epsilon_p (N_f)^c = 1$$

式中 $\Delta \epsilon_p$ —塑性应变；

N_f —破坏的循环数， $0.5 \leq c \leq 0.7$

此外还有通用斜率法、频率修正方程等，最近又提出了高温时蠕变、疲劳交互作用效应的应变区域划分法。

从上面的公式我们可以看到，低循环疲劳寿命主要与材料的抗拉强度、断面收缩率有关；对要求控制径向应变时，断面收缩率最重要。近年来，由于断裂力学的飞速发展，进一步揭示出低循环疲劳寿命与断裂韧性有关；并且说明在高应力低循环情况下，材料的疲劳裂纹扩展仅与断裂韧性有关，与抗拉强度关系不

大。由于疲劳破坏初期是一种塑性变形，所以现在比较一致的看法是：要得到高的低循环疲劳寿命，必须有高的屈服强度和高的断裂韧性，尤其要有良好的塑性，而材料的抗拉强度是次要的。因此，要提高低循环疲劳寿命，可以从两方面入手，一方面调整化学成分，研制新材料；另一方面改进工艺。

四、低循环疲劳的研究现状

疲劳问题虽然较早就被人们所知道，但是真正引起人们重视却不到二、三十年的历史。近二十年来，国际上对低循环疲劳进行了广泛的研究，大体从三方面入手：一是基础理论的研究，研究低循环疲劳的微观机理，即怎样才能解析引起明显塑性变形和断裂特征的微观组织及原子效应；另一是应用研究，从实验数据入手，找出估算寿命的经验公式，直接引用到

机械寿命的计算上；三是测试技术和实验科学的研究，包括循环应力-应变曲线、应变-寿命曲线的测定，研制能实现各种加载波形及应变速率控制的试验设备，开展能实现总应变和塑性应变控制以及自动控制疲劳裂纹扩展的试验。

国际上对于测试技术也有重大的进展，美国首先制出各种电液伺服的疲劳试验机，接着英国的 Instron 公司、日本的岛津公司、西德的 Schenck 公司都相继制造了计算机控制的随机低循环疲劳试验设备。

但是，应当指出，低循环疲劳问题目前仍处于实验研究和经验公式阶段，理论和机理研究尚处于摸索的过程。国内对于低循环疲劳问题的研究刚刚开始，必须急起直追，迎头赶上世界先进水平。

一种简单的机械阻抗测试系统

国家建委建筑机械研究所 郑昌信

随着机械阻抗法广泛用于车辆、金属结构、农机、飞机、船舶、机床、施工机械、大型动力机械基础、混凝土捣实^[1]、液压系统和人体等的振动分析。近几年来，国内许多单位都相继积极准备开展这方面的研究工作。但是，鉴于国内目前尚不能生产传递函数测量仪这一实际情况^[2]，能否采用别的代替手段来从事机械阻抗研究呢？我们经过一段时间的摸索，认为对于一些不十分复杂的试验对象，可以采用（图1）的测试系统代替传递函数测量仪进行机械阻抗研究，并能得到令人满意的结果。

一、系统方框图及分析

（图1）中，BT6 超低频频率测试仪由三个部份组成：①信号发生器（ $10^{-4} \sim 159.9 \text{ N}_z$ ）②相关滤波器，③数字显示器。

信号发生器给出一定电压和频率的正弦信号（仪器还可给出方波和三角波）经功率放大

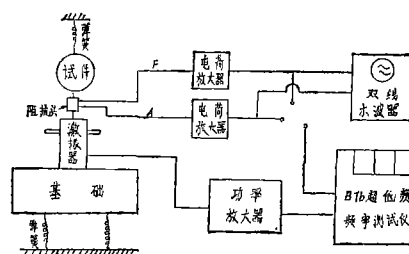


图 1

器放大后，推动激振器对试件激振。阻抗头（图2）则将试件的受力与加速度信号由电荷放大器放大后，分别单独的输回到BT6。BT6的相关滤波器对试件的响应信号进行滤波后，再进行加速度或力的幅值及对于原信号的相位角显示（仪器可用直角坐标，极坐标，对数坐标三种方式显示）。此时仪器显示的相位角是指试件