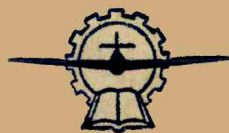


低循环疲劳試驗手册



国外航空编辑部

1975年10月

目 录

从材料力学观点

低循环疲劳试验中的材料力学-D.T.Raske 和 JoDean Morrow..... (4)

从材料的基础的研究观点

材料的循环变形和断裂行为的基础研究-C.E.Feltner 和 M.R.Mitchell (21)

从材料评定观点

轴向加载方法

I 低循环疲劳试验设备-M.H.Hirschberg..... (45)

II 高温试验方法-C.H.Wells (56)

III 控制应变的试验方法-T.Slot, R.H.Stentz 和 J.T.Berling (64)

IV 高温材料行为-D.C.Lord 和 L.F.Coffin, Jr. (82)

反复弯曲方法

用反复弯曲来评定工程材料-M.R.Gross..... (96)

从热疲劳观点

热疲劳的评定-A.E.Cardén (106)

绪 言

近十五年来，对控制循环应变而不是循环应力的金属疲劳试验已经产生了极大的兴趣。通常所指的低循环疲劳试验，目前已经发展到了如此完善的阶段，至少在该领域内从事工作的人们中间已成为一门学科。本技术特刊收集了这个领域内几位专家目前所用的方法、技术和技巧方面所积累的部分资料。因此，这是一本几位作者个人认为最适合他们特殊试验要求的实践和观点的论文集。虽然在许多篇论文中有很多地方是共通的，但这里无意表示赞同。读者可以根据自己的特殊需要来确定最合适的一种方法和综合几种方法。必须进一步强调，这里主要是与零件有很大差别的试样试验，因此，在考虑这个工作成果与真正零件设计的关系时必须注意到这个重要的差别。

对低循环疲劳试验的兴趣，直接起源于当金属承受相当少的控制循环应变的循环次数时所需的数据。它一方面来自寻求一种研究金属的基础性能的方法，着重研究如何解释能够引起明显变形和断裂特征的微观组织和原子效应的机理，另一方面来自寻求定量的数据研究入手以便预测承受类似于实验室循环过程下工程零件的寿命。后一项已经成为发展低循环疲劳试验方法的主要推动力。

最近十五年来技术的进展，趋向于使用愈来愈高温的工程结构材料，从而带来了工作过程中热的瞬态的严重性和频率的增加。这种倾向可以用循环热应力或其它形式的循环载荷来表达，而这些都直接属于控制应变性能范畴。承受这些条件的一些零件有蒸汽涡轮转子和壳体，飞机和地面燃气涡轮叶片和盘子，核压力容器和核燃料元件。设计程序大部分是根据为了处理这些问题而开展的实验室试验所得到的实验数据。因此，低循环疲劳试验在我们的技术推进中已经起着重要的作用。

因为本刊物专讨论低循环制度下的疲劳试验，这就有必要把它和一般的疲劳试验加以区别。按照定义，低循环疲劳破坏发生在少于 50,000 循环，它是用试样的应力应变滞后环和测量塑性应变范围来进一步表示其特性的。为了满足这些要求，在高循环疲劳试验中一般不常加考虑的某些特殊试验技术显得很重要。对于在低循环次数内发生破坏，就必须控制应变而不是应力。这就要特别强调应变检测装置和测量与控制用的有关仪器。而且所施加的负荷常接近全反复，因为，在塑性应变范围内平均应力很快就松弛。于是就出现几乎相等的拉伸和压缩负荷，这就要求夹持系统能够从试验机传递这些负荷给试样时不产生滑移和偏心。由于必须避免试验时弄弯试样和进行可靠的应变测量，试样形状就变得很重要。虽然这个问题在所有的疲劳试验中都存在，但对于低循环疲劳来说显得格外重要。

本特刊的内容编排主要根据是所选用的负荷，也就是按轴向负荷、弯曲、扭转或其它形式。绝大多数的工作是在单轴负荷（拉-压）或弯曲下进行的。比较多的篇幅是拉压负荷，采用弯曲的仅有一篇论文。读者不要以此推论偏重于现有这一事实，而必须选择最适合于个人所需要的试验。

控制应变试验亦能分为恒温的和循环温度的（热疲劳）。在循环温度中加于试样上的机械应变可以完全或部分由热膨胀推得。虽然在实验室中进行这是一项比较复杂的试验，但事

实上它可以比较真实地反映使用条件。有一章专写这一重要课题。

其余几篇文章讨论单轴试验：从金属研究观点、材料力学观点和高温试验观点。当方法中出现某些重复时，我们认为这强调了各研究者和各实验室一致要阐明的普遍方面。亦说明了几种手段抓住了同一个问题：夹具的选择、试样的设计、应变测量、仪器、试验机等。

本特刊是美国材料试验学会 E-9 疲劳委员会循环应变疲劳Ⅶ分会的一个贡献。

美国通用电气公司冶陶实验室，
美国材料试验学会 E-9 委员会
Ⅶ分会主席：小 L.F.Coffin

低循环疲劳试验中的材料力学

D.T. Raske 和 JoDean Morrow¹

摘 要

本文的目的是从材料力学观点概述评定金属低循环疲劳抗力的方法,包括金属疲劳性能和反复范性应变对金属机械性能影响的讨论。用各种循环应变范围所得到的几种稳定滞后环顶部轨迹来确定循环应力—应变曲线。提出了一个用数学来表示滞后环顶部轨迹的表达式,并讨论了测定稳定循环应力—应变性能的许多实验方法。

介绍了低循环疲劳试验技术和结果的表达方法,研究了循环应变振幅的弹性部分和塑性部分与疲劳寿命的关系问题,提出了运用这些关系近似地表达应变—寿命曲线的一种方法。

符 号

A	真实的或瞬时的面积
A_f	断裂时的面积
A_0	原始面积
b	疲劳强度指数, $\log \sigma_s - \log 2N_f$ 曲线的斜率
c	疲劳延性指数, $\log (\Delta \epsilon_p / 2) - \log 2N_f$ 曲线的斜率
D	真实的瞬时直径
D_0	原始直径
e	工程应变, 当应变是弹性时等于 S/E
E	弹性模数
K	强度系数, 在方程 $\sigma = K \epsilon_p^n$ 中, K 是产生一个单位真实塑性应变时的应力
L	瞬时的标距长度
L_f	断裂时的标距长度
L_0	原始标距长度
n	一次应变硬化指数
n'	循环应变硬化指数
N_f	疲劳寿命, 到破坏的循环数
$2N_f$	到破坏的反复数
P	轴向载荷

1. 分别为 Illinois 大学理论力学和应用力学系的助教和教授, Morrow 又是美国材料试验学会会员。

P_f	断裂时的轴向载荷
S	工程应力, 轴向载荷除以原始面积 P/A_0 。
$S_{t,y}$	拉伸屈服点, 通常取下屈服点
S_u	极限拉伸强度
$S_{y,s}$	偏移屈服强度
$S'_{y,s}$	循环偏移屈服强度
ϵ	真实应变, 当应变是弹性应变时等于 σ/E
ϵ_e	应变的弹性部分
ϵ_f	真实断裂延性, 一次拉伸断裂的真实应变
ϵ'_f	疲劳延性系数, $\log(\Delta\epsilon_p/2) - \log 2N_f$ 曲线的截距
ϵ_n	一次拉伸缩颈处的真实应变
ϵ_p	应变的塑性部分
$\Delta\epsilon$	总应变范围
$\Delta\epsilon_e$	弹性应变范围
$\Delta\epsilon_p$	塑性应变范围
ν	泊桑比
σ	真实应力, 轴向载荷除以实际面积, P/A
σ_a	应力振幅
σ_f	真实断裂强度, 一次拉伸断裂时的真实应力, P_f/A_f
σ'_f	疲劳强度系数, $\log \sigma_a - \log 2N_f$ 曲线的截距
$\sigma_{t,y}$	真实拉伸屈服点
$\sigma_{y,s}$	真实偏移屈服点

每一个低循环疲劳试验研究组织都曾开展适合于他们特殊需要和试验能力的方法和程序。因此, 到目前为止低循环疲劳试验仍是非标准的。

本文的目的是从材料力学观点概述评定金属低循环疲劳抗力的方法, 也就是用有代表性的特定金属做的光滑试样, 测定其应变和机械抗力。一般采用轴向应变, 以便与金属的一次拉伸性能可以方便地找出定量的关系。

影响因素诸如温度变化、腐蚀环境、材料的不均匀性、缺口等, 要加以避免或保持不变。这样就能够对承受反复应变和应力的金属机械抗力作定量的描写, 使这种抗力与结构件的形状或型式以及所用金属的使用环境无关。

很明显, 这种方法忽略或隐瞒了许多重要的疲劳特性, 而这些特性对于实际工程师来说恰恰是感兴趣的; 然而, 仍然可以认为是表征金属本身低循环疲劳抗力的一种有价值的和有效的方法。

从这个意义上来说, 我们的方法类似于一般的拉伸试验。为了定量地测定金属的刚度、强度和延性要进行大量的试验。尽管这种金属在使用中很少经受简单的拉伸, 并存在着一般拉伸试验时不予评定的很多影响因素, 然而, 设计工程师还是需要拉伸试验结果, 以便指导他们对一种结构件的潜在抗力作出判断。

试 样

低循环疲劳试验所用的试样,其全部尺寸和形式常常取决于现有金属备料的形状。甚至当不存在这个问题时,还要考虑可能影响设计的其它一些因素。很明显,必须根据所用试验机的负荷容量来考虑试样的尺寸。为了保证试样在工作截面处破坏,一般来说,用来固定在试验机上的试样螺纹端部亦必须设计得大一些,通常螺纹端部与工作截面积之比为4到6是可靠的。

几种成功的低循环疲劳试样形状及其使用范围的说明示于图1。

选择合理的试样尺寸和形状还需要按被研究的金属强度和延性而定。因此,在进行大量的疲劳试验之前,我们就必须测定金属的拉伸性能。如果合理地设计,疲劳试样亦能用作一次拉伸试验的试样。

精致地加工直的和轴向加载的试样是重要的;但是在正常情况下,工作截面的最后加工不需要像长寿命疲劳试样那样精致,因为低循环疲劳试验通常用应变来表示,其结果的分散度通常没有像长寿命的试验结果那么大。可从如图2所示的SAE4340钢看出。其理由之一是塑性的作用排除了产生分散的许多因素。对于高延性金属的低循环疲劳尤其是这样,因为在疲劳试验时利用大量的循环塑性变形消除了内应力,并大大地减小划伤和其它一些应力集中的影响。此外,短寿命时应变—寿命曲线的斜率是大的,分散度对寿命只起小的变化。当希望较长寿命和低延性金属时,为了得到没有残余应力的光滑表面,就必须与一般所用的长寿命试样同样精致。

加工完毕以后,测量试样的直径和硬度。通常,在工作截面三个部位测量试样的直径,在每一个部位上直径至少测量两次(相隔 90°),并用这两个数的平均值来计算面积。如果这些面积相差很大,那么这根试样应该舍弃或仅用做预先的或探索性试验。

为了保证试样的均匀性,每根都必须测量硬度。通常取工作截面邻近肩部的三点硬度值的平均数是可靠的。如果有可能的话,应该用维氏或布氏硬度,因为这两种硬度与金属的强度有比较好的关系¹¹¹²。但是,如果要试验大量的硬度值不同的试样,只要分成各个硬度组,用洛氏硬度就行了。

当完成这些准备工作之后,要将试样贮存在抽空的钟罩式容器中,或分别装在盛有有没有腐蚀作用的无水盐的试管中。

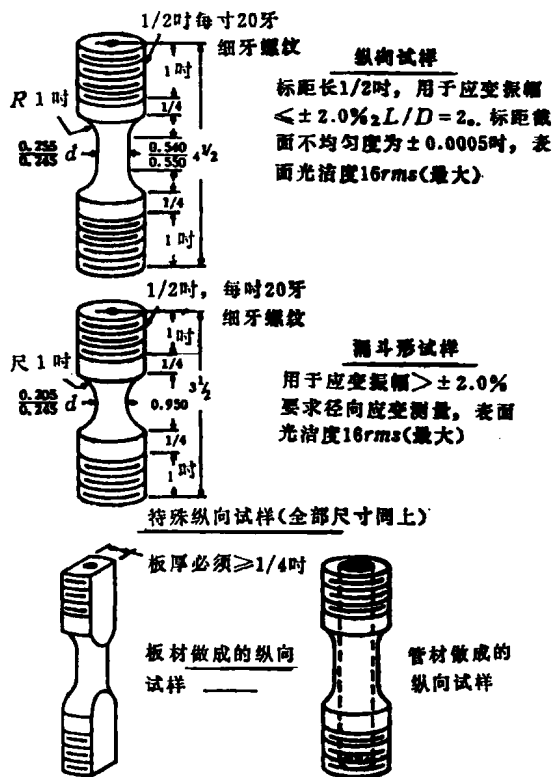


图1. 试样设计

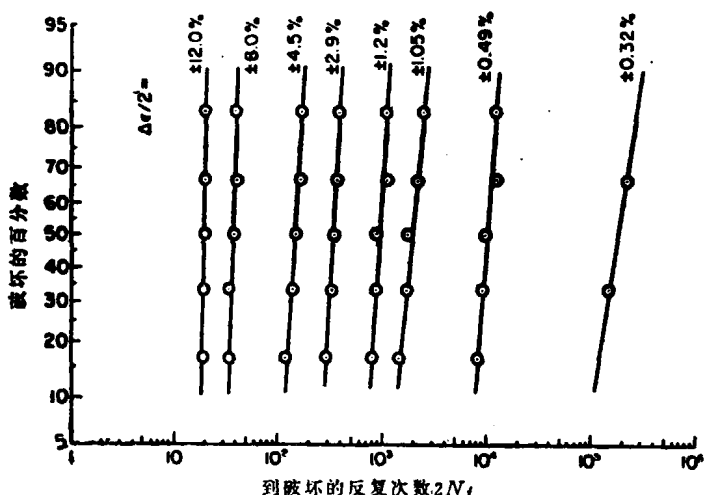


图 2. SAE4340 全反复应变循环疲劳寿命的分散度 (见参考文献 11)

拉 伸 试 验

后边将可看出，一次拉伸试验结果能当作半次循环疲劳结果来使用。除了测定列于表 1 的工程应力—应变性能之外，亦应测定列于表 2 的真实应力—应变性能。而绝大多数工程师不习惯于使用真实应力和应变及真实应力—应变性能，这些性能在附录中作了详细的定义。这些性能如通常所用的工程应力—应变性能一样亦示于图 3 中的应力—应变曲线上。

表 1. 工程应力—应变性能^a

性 能	定 义	注
E, 弹性模量, 磅/吋 ²	在虎克定律范围内, 产生单位弹性应变的应力(当 $\epsilon = 1$ 时, $\sigma = E$)	低应力时, 取应力—应变曲线的斜率。
S_{ty} , 拉伸屈服点, 磅/吋 ²	产生突然大屈服时的应力; 如有一“平顶”屈服区, 就采用这点的应力	通常取下屈服点
S_{ys} , 拉伸屈服点强度, 磅/吋 ²	产生一个规定塑性应变时的应力, 通常取 0.2%	由 E 的斜率作一条偏移线来测得 (见图 3)
S_u , 极限拉伸强度, 磅/吋 ²	最大载荷时的工程应力, P_{max} / A	一般由缩颈而定 (产生缩颈时的工程应力)
% RA, 断面收缩百分 数.....	产生断裂时, 横截面面积减缩的百分数 $100(A_0 - A_f) / A_0$	断裂后在最小截面测量 A_f
ν , 泊桑比.....	径向应变与纵向应变之比值	应力低于屈服点时, 纵向应变与径向应变之比值

a) 比例极限、延伸率和工程韧性决定忽略。因为它们的定义是任意和使人误解的，同时与疲劳没有直接关系。

表 2. 真实应力—应变性能

性 能	定 义	注
$E, \sigma_{t,y}$ 和 $\sigma_{y,t}$ ………	$E, \sigma_{t,y}$ 和 $\sigma_{y,t}$ 均与表 1 中的定义相同	小应变时, 真实与工程值通常是相同的
σ_f , 真实断裂强度, 磅/吋 ² ……	产生断裂的真实拉伸应力, P_f / A_f	必须修正由于缩颈 ^a 而产生的侧向力的影响
ϵ_f , 真实断裂延性……	产生断裂的真实塑性变形, $l_n (A_0/A_f)$	与%RA有关, $\ln (100/100 - \%RA)$
n , 应变硬化指数……	塑性变形的能力, 与应力成正比	取 $\log \epsilon_p - \log \sigma$ 曲线 ^b 的斜率
K , 强度系数, 磅/吋 ²	$\sigma = K \epsilon_p^n$ 方程中 ^c , 产生单位真实塑性应变的真实应力	如果按图 16 来修正, 则 $K = \sigma_f / \epsilon_f^n$

- a) 断裂载荷除以断裂面积高于修正值 (例如, 当%RA=70%时约高 20%), 这与缩颈的严重程度有关 (见文献 1, 第 250 页)
- b) 缩颈出现时, 亦能看成等于真实应变 (见附录)
- c) 若 $\epsilon_f < 1$, 为了得到 K , 流变曲线被外推, 塑性应变为 1

测量真实应力—应变性能的方法可简化到同时测定拉伸试样的载荷和面积。对于粗糙的手动控制试验, 要实现这一目的可以采用带球顶的千分尺, 将千分尺卡在试样直径上, 读出瞬时载荷。为了得到一个与直径成比例的电讯号, 可以采用较完善的仪器—夹子应变计。不管采用那一种方法, 测定试验过程中的真实应力和应变、断裂载荷和试样面积都必须小心地测量。

测得一次应力—应变性能之后, 就可以估算所研究金属的循环应力—应变性能。

对每一种金属来说, 都有一个强化或硬化范围, 此范围能用冷加工、退火、热处理等来实现。如果一种金属开始是软的, 它将循环硬化; 如果开始是硬的, 则可能软化^[2], 并将达到某中间状态, 这种状态表明特定金属在特定条件下的一种稳定条件。开始状态由一次应变硬化指数 n 来表示。对于大多数承受循环载荷的金属来说, 循环应变硬化指数值 n' 在 0.10 和 0.20 之间。因此, 若 n 开始是低的 (“硬”金属), 其循环性能 n' 将会增高, 另一方面, 开始的 n 高时 (“软”金属), n' 将减小。这种行为简略地示于图 4。这些随循环而变化的情况亦可通过测量许多整体材料的性能反映出来, 其中包括压入硬度^[3-5]。循环对一次拉伸试验所测得的性能的影响示于表 3。

上述讨论表明, 一次拉伸试验所测得的流变性能不能反映金属抗反复应变的能力, 因此, 这些性能必须在完成随循环而产生变化之后来测定。

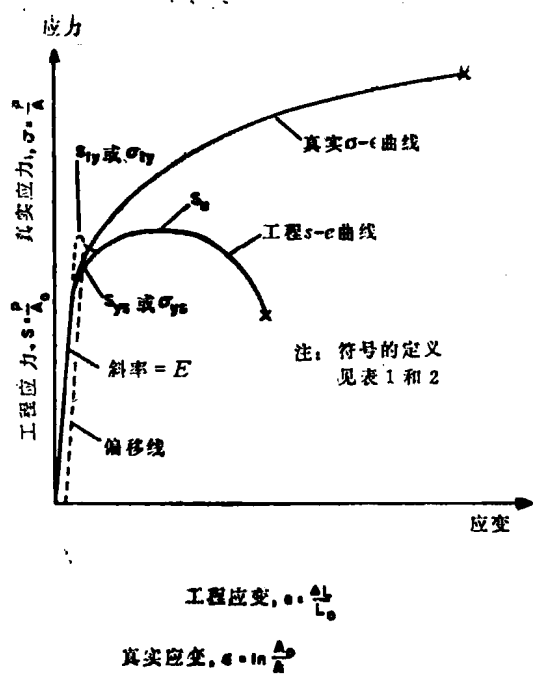


图 3. 应力—应变性能确定

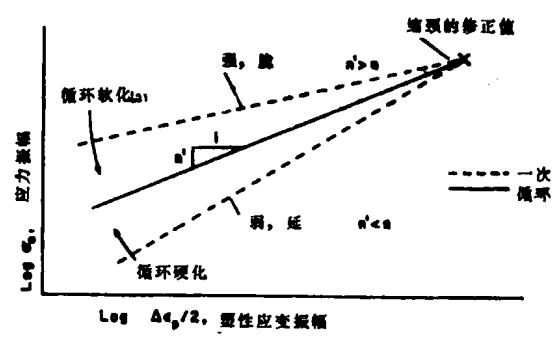


图 4. 一次和循环应变硬化指数的比较

循环应力—应变曲线

表 3. 力学性能随循环而变化

力学性能	循环的影响
E, 弹性模量 硬度 S _{cy} , 拉伸屈服点 ^a S _{ys} , 偏移屈服强度 S _u , 极限强度	影响极微 这些都是流变性能, 因为它们与塑性变形的难易密切相关, 并均可随循环而变化。如果金属循环硬化, 它们就增高, 如果循环软化, 它们就减小。如果金属处于稳定状态, 它们就保持不变。开始的 n 和 S _u / S _{ys} 能用来估计金属将发生循环软化或硬化的情况
σ _f , 真实断裂强度 ε _f , 真实断裂延性, %RA, 面积收缩百分数	这些性能可划作为断裂性质, 因为它们是断裂抗力的量度。它们可能由于循环会引起一些变化, 但不至于到达流变性能变化的那种程度 ^b
n, 应变硬化指数	这亦是一种流变性能, 并能随循环而大大地起变化。所有金属的循环应变硬化指数几乎都在 0.10 < n' < 0.20 范围内变动。若 n 开始是低的 (相当硬的金属), n' 将增高; 若 n 开始是高的, 则 n' 将减小。在 0.10 到 0.20 范围内, n 仅起微小变化。

- a) 由于循环应力，屈服点现象可能消失。在低于屈服点下经多次循环之后，滞后环张开，屈服点消失^[4]。说明是循环软化。在较高的循环应力下，同一种金属则可能硬化。
- b) 对疲劳试样和部件的“延性消耗”和“剩余强度”损耗曾作过许多研究，发现直到出现大裂纹的疲劳后期，强度和延性并没有显著下降。

开始时的循环性能变化速率大大地受循环应变范围的影响，然而在疲劳寿命的头几个百分数期间，变化量随反复循环而快速减小。只要控制条件不变，金属将很快地趋近稳定状态，这种状态反映在最终硬度值和趋近稳定的机械滞后环上。由不同应变范围相联的几个稳定环顶点所画出的光滑曲线称为循环应力—应变曲线。Morrow 指出，这种曲线能用数学式来表达：

$$(\Delta\epsilon/2) = (\Delta\epsilon_c/2) + (\Delta\epsilon_p/2) = (\sigma_a/E) + \epsilon'_f (\sigma_a/\sigma'_f)^{1/n'} \dots\dots\dots (1)$$

此方程与附录中一次应力—应变曲线方程 20 相似。方程 1 中， σ'_f 和 ϵ'_f 分别为疲劳强度系数和疲劳延性系数，它们与材料其它性能的关系叙述于表 4。

循环硬化的金属，其循环应力—应变曲线高于一次应力—应变曲线；循环软化的金属，其循环应力—应变曲线低于一次的曲线。由于循环，退火纯金属的屈服强度有可能增加 5 倍或更大。如果开始时进行高度的冷作硬化，同样的金属其屈服强度下降 2 倍多。图 5 示出了典型的循环硬化和软化金属的这一行为。

表 4. 疲劳性能^a 及其与材料其它性能的近似关系

疲 劳 性 能	定 义	注
ϵ'_f 疲劳延性系数……	产生一次反复破坏所需的真实应变，取 $\log (\Delta\epsilon_p/2) - \log 2N_f$ 曲线在 $2N_f = 1$ 处的截距	接近 $0.002 (\sigma'_f/S_{ys})^{1/n'}$ ；对于钢来说， ϵ'_f 是于振幅 ϵ_f 和 $\epsilon_f/2$ 之间，其范围约在 0 和 1 之间
c ，疲劳延性指数……	反复寿命所做的功，与塑性变形振幅成正比，取 $\log (\Delta\epsilon_p/2) - \log 2N_f$ 曲线的斜率	对金属来说是一个常数，约在 0.50 ~ 0.70 之间，代表性值为 0.60；此值可能与硬度、试验温度无关
σ'_f ，疲劳强度系数，磅/吋 ² ，	产生一次反复循环所需的真实应力，取 $\log \sigma_a - \log 2N_f$ 曲线中 $2N_f = 1$ 处的截距	与真实断裂强度成正比，实际上 $\sigma'_f \approx \sigma_f$ ，对于热处理过的金属约在 100 和 500 千磅/吋 ² 范围
b ，疲劳强度指数（即 Basquin 指数）	反复寿命所做的功，与应力振幅成正比，取 $\log \sigma_a - \log 2N_f$ 曲线的斜率	对于软金属其最大值约为 -0.12，随着硬度的增加而减小，其最小值约为 -0.05，金属热处理到高硬度时可以再次升高

a) 用光滑仔细制备的实验室试样，在控制全反复循环下测得的。

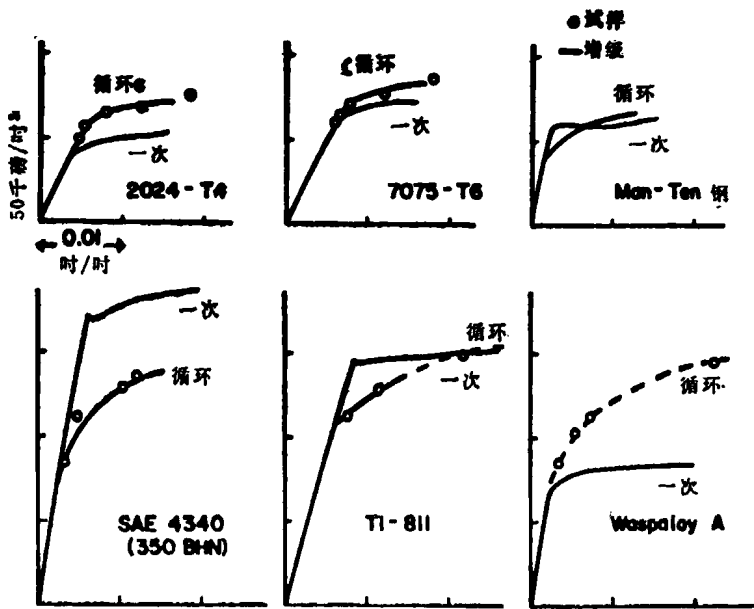


图 5. 几种材料的一次和循环应力—应变曲线 (见文献 7)

因为绝大多数金属在循环应变振幅改变以后反而很快地稳定下来, 这就能够用一根试样来测定循环应力—应变曲线。下面介绍 Illinois 大学测定这种曲线所用的三种技术。

多级试验—测定循环应力应变曲线的多级试验是用一根试样在几种应变振幅水平下循环加载。每一水平的循环次数必须足以达到稳定, 但次数不能过多, 以免产生严重的疲劳损伤。采用重叠而稳定的滞后环, 并通过环的顶部画出一条光滑的曲线, 就可得循环应力—应变曲线。

增级试验—产生循环应力—应变曲线的另一种方法是试样承受逐级减少然后增加应变振幅, 如图 6 所示。通常最大应变振幅为 $\pm 1.5\%$ 到 2.0% 就足以使金属很快地稳定化, 在到达稳定之前没有产生缩颈、破坏或弯曲的危险。然后用重叠的滞后环顶部轨迹确定循环应力—应变曲线。

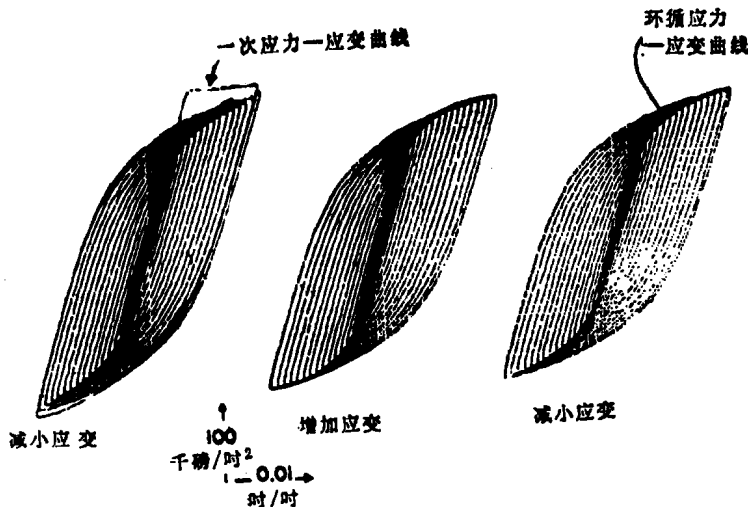


图 6. 淬火和回火的 SAE4142 (380BHN) 增级应力—应变记录 (见参考文献 7)

产生这些曲线的一种方法是运用 Data-Trak 函数发生器 (MTS 公司), 控制 MTS 电液闭环试验系统的应变电平, 此方法与 Felter 和 Mitchell 描写的相似。利用这种设备, 将试验系统放在最大应变振幅上, 并用 Data-Trak 提供一个均匀减小和增加的应变增幅包迹。图 7 描绘了用这样的设备所得出的典型条带图记录。通常 Data-Trak 和试验系统弄成同位, 以致零应变振幅在 40 个循环后达到, 最大应变振幅在另一个 40 循环后达到。采用这种方法, 循环应力—应变曲线在减少和增加应变振幅三或四级之后就可产生。

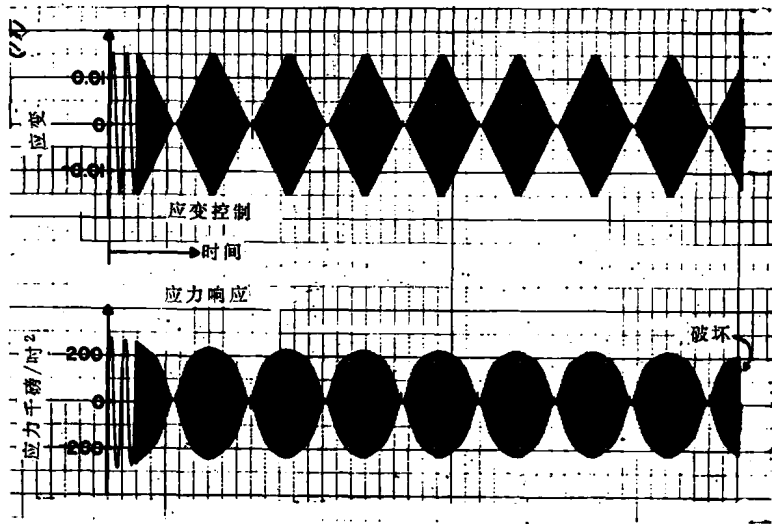


图 7. 淬火和回火的 SAE1045 钢(450BHN)增级应变—时间, 应力—时间记录(见参考文献 7)

频谱应变后一次拉伸—获得循环应力—应变曲线的第三种方法是在减小和增加一系列应变等级后拉断试样, 此方法与上述方法相似。拉伸试验在减小一级应变振幅, 出现循环稳定后进行。试验结果^[7]表明, 这个曲线与前面所讨论过的两种方法所测定的曲线能很好地相适应。然而, 由于这种技术要求拉伸和压缩曲线各用一个试样, 因此推荐增级试验。

控制应变的低循环疲劳试验

试验顺序—测定金属的低循环疲劳抗力, 通常需要 7 至 10 根试样, 对于绝大多数金属来说, 这种低循环疲劳抗力用在 ± 2.0 和 $\pm 0.2\%$ 之间应变振幅下试验就能充分地描写。其结果是类似于图 8 所示的应变—寿命曲线。

试验的进行必须使数据点均匀地分布在 $\log$ -寿命轴线上。为了实现这一点, 应变—寿命曲线就要采用近似表示以便估算疲劳寿命。用拉伸试验、循环应力—应变曲线和一次控制应变疲劳试验的结果作为开始的近似值, 疲劳试验应变振幅必须选择得使其塑性应变大于 10^{-3} 和接近 10^3 反复次数³后破坏。经验表明, $\pm 1\%$ 的应变振幅, 对于所有钢(不管强度如何)和绝大多数延性金属都能满足这个要求。图 9 示出了各种强度和延性金属在这个应变振幅下的典型滞后环和应变—寿命曲线。

3. Illinois 大学习惯采用到破坏的反复次数 $2N_f$ 来表示疲劳代替了到破坏次数 N_f

用这种近似法之前，必须建立应变与疲劳寿命关系方程。如图 8 所示，总应变振幅能分解成弹性部分和塑性部分，在低循环疲劳试验中，应变振幅的塑性部分由疲劳延性性能来表征，弹性部分由金属的疲劳强度性能来表征。

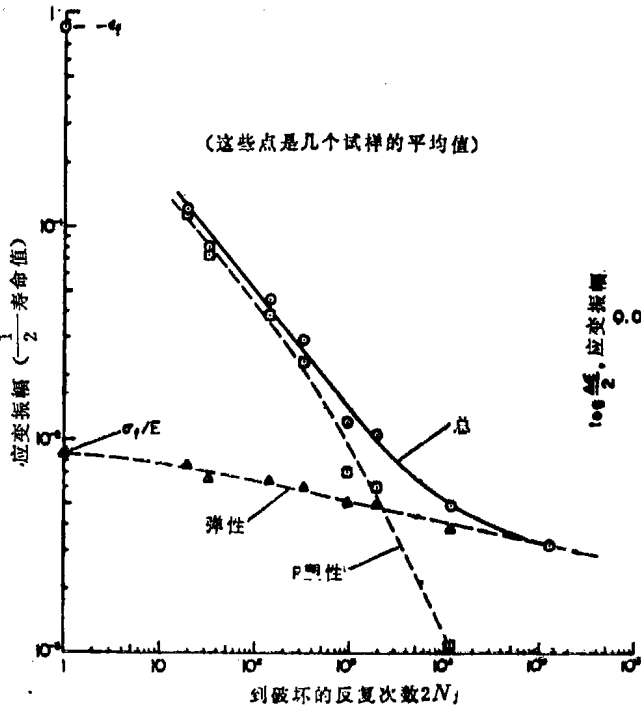


图 8. SAE4340 钢的寿命与弹性应变、塑性应变和总应变的关系(见参考文献 11)

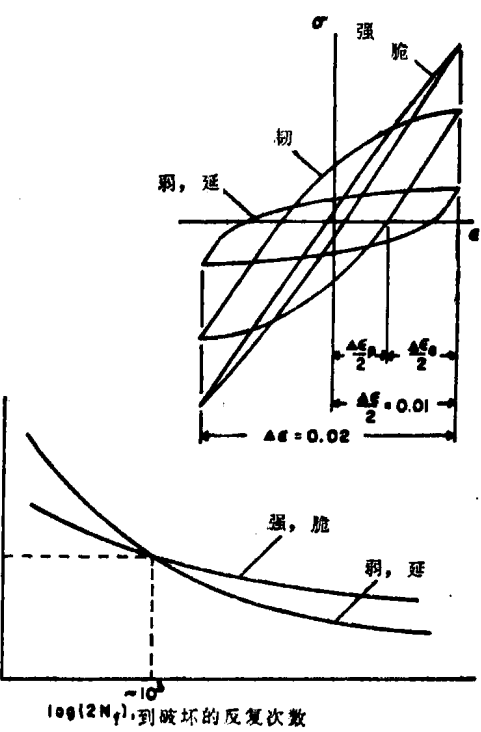


图 9. 延性金属和高强度金属对±1% 循环应变反应的概略图

应变振幅⁴log-log 曲线通常是一直线。如图 10 所示，一次反复时的塑性应变截距被定义为疲劳延性系数，并近似地表达为：

$$\epsilon'_f = 0.002 (\sigma'_f / S'_{ys})^{1/n'} \dots\dots\dots (2)$$

这里 $\sigma'_f = \sigma_f$, S'_{ys} 是 0.2% 偏移循环屈服强度^[9]。图 10 的曲线斜率亦可认为是疲劳延性性能，定义为疲劳延性指数 c 。因此塑性应变振幅能写成

$$(\Delta \epsilon_p / 2) = \epsilon'_f (2N_f)^c \dots\dots\dots (3)$$

图 10 亦示出了强度高和延性好的金属疲劳延性的大致水平。图中表明，曲线的斜率可以稍有差别，延性较好的金属其曲线向上方移动，而延性较差的金属其曲线则向下方移动。

疲劳强度性能—1910 年 Basquin 提出对数应力振幅和对数疲劳寿命之间存在线性关系，如图 11 所示。将一次反复的截距定义为疲劳强度系数，疲劳强度指数 b 定义为曲线的斜率。因此，对于应力振幅就可写出类似于方程 3 的关系式：

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \dots\dots\dots (4)$$

4. 因为塑性应变在试验过程中常常是变化的，因此采用寿命值的一半。

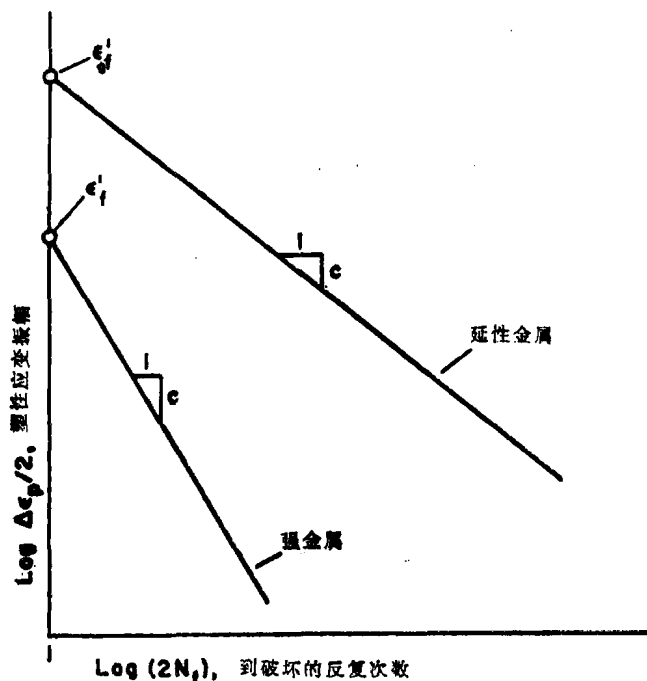


图 10. 表示强度和延性对塑性应变—寿命曲线影响的略图

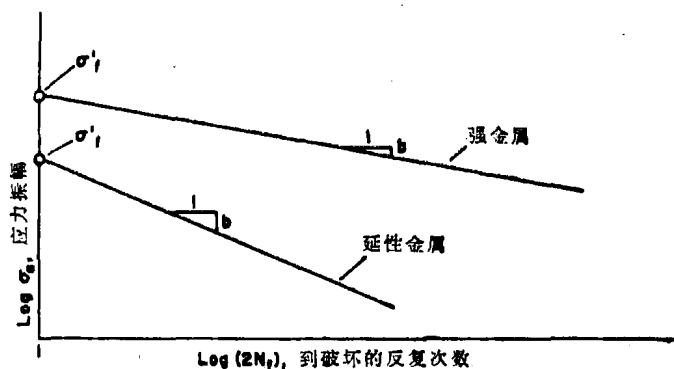


图 11. 表示强度和延性影响的应力—寿命曲线略图

这里 σ_a 取应力振幅寿命值的一半。方程 4 亦能由方程 1 和 3 来推导，消去 $\Delta\epsilon_p$ ，令 $n'c=b$ ，则得

$$(\Delta\epsilon_p/2) = \epsilon'_f (\sigma_a/\sigma'_f)^{1/n'} = \epsilon'_f (2N_f)^c \dots\dots\dots (5)$$

因为弹性应变振幅是由 σ_a/E 而定的，因此就可推导出弹性应变和寿命之间的关系式

$$(\Delta\epsilon_e/2) = (\sigma_a/E) = (\sigma'_f/E) (2N_f)^b \dots\dots\dots (6)$$

图 11 表明，延性金属的疲劳强度通常比强金属小，而斜率通常是延性金属陡。这些性能和材料其它性能的关系亦叙述于表 4。

于是应变—寿命曲线就能近似地表示如下：首先用方程 2 计算出的疲劳延性系数确定反复截距，并用真实断裂强度近似表示疲劳强度系数。根据试验中所记录的滞后环确定 $\pm 1\%$

试验时的塑性应变振幅的一半寿命。这样就在应变—寿命曲线上产生一个基准点，通过这一点和塑性应变—寿命曲线所得到的疲劳延性系数画一直线。同样，弹性应变—寿命曲线通过弹性应变振幅的一半寿命和疲劳强度系数画出这一条线。将方程 3 和 6 所表示的这些线综合而作出如图 12 所示的总应变—寿命曲线。这条曲线的方程可写成：

$$(\Delta\epsilon/2) = (\Delta\epsilon_e/2) + (\Delta\epsilon_p/2) \dots\dots\dots (7)$$

运用方程 3 和 6，这就变成：

$$(\Delta\epsilon/2) = [(\sigma'_f/E) (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c] \dots\dots\dots (8)$$

随后的试验结果可改善应变—寿命曲线的近似性。长寿命时准确的应变—寿命曲线特别重要，因为应变振幅的微小变化就能引起试样寿命变化几个数量级。因此，首先要尽力在较大应变振幅下做试验。亦由于通常高应变振幅时的分散度小，试验的疲劳寿命能够比较有把握地来预测。如果超过一种金属的情况下进行试验，那就不能采用这个试验顺序。当超过一种金属进行试验时，通常是在每一应变振幅下用某一条件的各个试样来完成这种试验。这种试验顺序比较合适，因为各个试验之间一般不需要再标定。

应变振幅超过±1.5% 通常是进入压缩，这些试验有两个目的：第一，因为许多金属产生循环软化，可利用这个特性去消除试样在第一次拉伸加载过程中发生局部缩颈区的可能性。为了避免这个问题，先用压缩试验可以使金属充分软化。第二，用这种方法进行试验为材料提供了一次压缩曲线的开始部分。

上述讨论的试验顺序，在表 5 中作了归纳，表 5 还叙述了每种试验及所得数据之应用。

试 验 方 法

Illionis 大学绝大多数的低循环疲劳试验是用 20 千磅的 MTS 闭环、伺服控制液压试验系统来进行的，这种试验系统与 Feltner 和 Mitchell 所描写的相似。为了保证试样的同心度采用了图 13 所示的液体金属夹具。在参考文献 12 里详细地用图形叙述了一种这样的试验系统。

当试验设备调整平衡和标定好以后，首先遇到的是试验频率的选择。对于循环频率从 0.1 约到 10 赫芝和等温状态下，我们发现工程上感兴趣的金属其室温寿命没有什么大的差别。如果没有保持等温状态，由于塑性作用而发热就可以引起金属冶金性能的变化。但这种情况在室温低循环疲劳中很少遇到，试验频率与试验系统容量有较大关系。

虽然 MTS 电液闭环试验系统的频率能约达 100 赫芝，但记录设备和引伸计的动特性通常只能限制在实际频率下使用。一般，当我们控制应变试验要求小于 10³ 循环破坏时，频

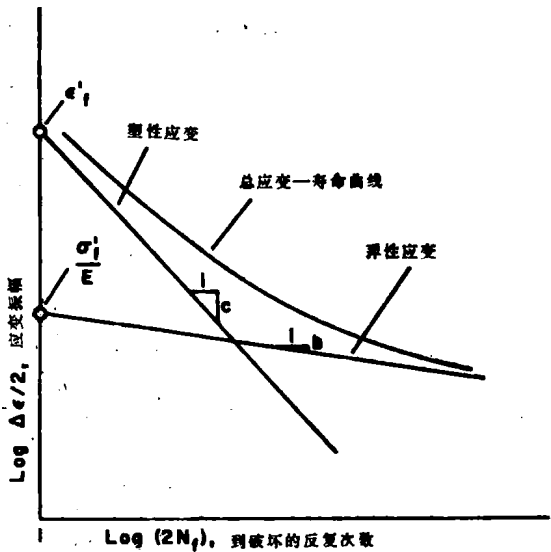


图 12 寿命与弹性、塑性和总应变振幅的关系

率为 0.1 到 0.5 赫芝，寿命大于这个数值时，频率为 1 到 2 赫芝。当 X-Y 记录仪传动快于 0.1 赫芝时，将得到粗糙的滞后环，在这样低频率下滞后环相隔一段记录下来。18Ni 马

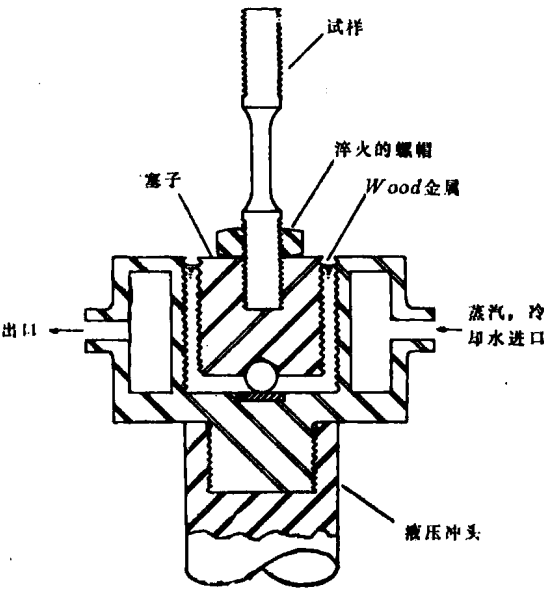


图 13. 低循环疲劳试验自位夹具

表 5. 试验顺序和用途摘要

范 围	实 验 结 果	用 途
拉伸试验	E , 弹性模量, 磅/吋 ² S_y , 拉伸屈服强度, 磅/吋 ² S_u , 极限拉伸强度, 磅/吋 ² %RA, 断面收缩率 应力—应变曲线	通用, 亦用于校对合适的引伸计。 与循环屈服强度比较, 以确定硬化与软化程度 确定缩颈处产生的应变 ϵ_u , 亦用来估算 10^6 反复时的疲劳强度。 用来计算真实断裂塑性, ϵ_f 用来计算应变硬化指数, n
循环应力—应变曲线	S'_{ys} , 循环屈服强度, 磅/吋 ² 循环应力—应变曲线	与一次屈服强度比较, 确定硬化或软化程度 用来计算循环应变硬化指数 n' 和疲劳延性系数, 亦用来预测循环塑性应变
±1%控制应变疲劳试验	$\Delta\epsilon_p / 2$, 一半寿命的塑性应变振幅 $\Delta\epsilon_e / 2$, 一半寿命的弹性应变振幅	用来估算疲劳延性指数 c 和塑性应变—寿命曲线 用来估算疲劳强度指数 b 和弹性应变—寿命曲线
控制应变循环疲劳试验	应变—寿命曲线	用来评定金属承受低循环疲劳和提供设计数据