

压力容器的疲劳失效

浙江工学院

天津市轻工业设计院翻印

目 录

第一章 概论	1
一、 压力容器的疲劳失效现象	1
二、 压力容器疲劳失效的特点	3
第二章 低周疲劳问题	4
一、 典型的疲劳曲线	4
二、 曼森-柯芬关系	6
三、 平均应力的影响和修正	10
四、 多向应力的影响	18
五、 累积损伤问题	20
第三章 疲劳裂纹扩展	27
一、 疲劳裂纹扩展的过程	27
二、 疲劳裂纹亚临界扩展的规律	33
三、 影响裂纹扩展的因素	41
第四章 以疲劳分析为基础的设计方法	63

一、 A S M E规范中关于疲劳分析的规定	6 3
二、 B S 5 5 0 0中的有关规定	7 8
三、 对设计规范的分析比较	8 0
第五章 带缺陷容器的疲劳寿命	8 4
一、 A S M E规范的有关规定	8 5
二、 英国的指导性的技术文件	9 6
〔注：上述疲劳分析的有关章节，选自张康达同志编的“压力容器的疲劳失效”讲议〕	

第一章 总 论

锅炉和压力容器的长期使用实践表明：由于选材和结构设计不当，焊接、制造、热处理等工艺过程所存在的问题，施工中检验的疏忽和由于操作中材质受到腐蚀、疲劳、蠕变等作用的结果，常常会发生各种型式的破坏和失效。特别是近年来随着石油化工、核电站的大型化，压力容器壁厚截面和超厚截面板应用得愈来愈多，低合金高强度钢也应用得愈来愈广泛，因此各种型式的破坏和失效均有出现。为了进一步研究分析破坏事故的情况，许多国家都对压力容器的事故进行了系统的统计和调查。

从统计数据来看，在各种破坏事故中疲劳裂纹的扩张和腐蚀及应力腐蚀是主要的原因，所占的比例最高。因此，国外自60年代以来，十分重视有关压力容器的疲劳失效的研究工作和应力腐蚀研究工作。这里将着重阐述有关压力容器的疲劳研究方面所涉及的一些问题。

一、压力容器的疲劳失效现象：

结构材料承受交变反复载荷的作用而产生的破坏是一种疲劳破坏。发生疲劳破坏时一般没有明显的塑性变形，它总是在局部高应力区附近发生当这种局部高应力区中的峰值应力超过材料的屈服强度时，晶粒之间发生滑移，逐渐地产生了微裂纹，这种微裂纹不断

扩展，最后就会发生疲劳断裂。

在压力容器中的反复应力常常表现在以下几个方面：

- 1 频繁的间断操作和开停工造成压力和各种载荷的交变；
- 2 运行时出现的压力波动；
- 3 运行时出现的周期性温度变化；
- 4 在正常的温度变化时，容器及其部件的膨胀和压缩受到了约束；
- 5 外加的载荷反复交变和产生的强迫振动等。

在过去相当长的时期里，疲劳常常不是压力容器设计时必须考虑的因素，这主要是因为它不像高速回转机件那样需要承受相当高循环次数的反复载荷。同时，制造压力容器的材质通常都具有较高的塑性，它们能吸收较大的应变能而不致造成裂缝的迅速扩展。

可是近年来情况发生了变化。首先是随着各国压力容器设计规范的修订，安全系数都有下降，这样，容器中实际承受的应力水平有了较大的提高。同时，随着容器的不断大型化，特厚材料的应用也不断增加，这些材料中的缺陷更易发生，并且低合金高强度钢的应用也日益广泛，这些材料和它们的焊缝也同样容易形成各种缺陷，这些都使得压力容器增加了疲劳失效的危险性。因此疲劳失效问题成了近年来各国的注意中心之一。许多技术先进的国家均在自己的压力容器设计规范中制定了相应的条款。并且在他们的有关锅炉和

压力容器的研究发展计划中也都提出了近期的和远期的研究方向和目标。

二、压力容器疲劳失效的特点：

由于疲劳裂纹总是从高应力区形成和发展的，而在压力容器中的焊缝、接头周围，特别是在开孔和接管的附近，这种高应力区往往因为变形的不协调而很易形成，因此，疲劳失效总是在这些局部区域发生。

在压力容器局部高应力区内的峰值应力（象通常的开孔接管附近）常常可以达到容器主体薄膜应力的 $2 \sim 4$ 倍。若筒体的许用应力是以 $n = 1.5$ 计算，则这些峰值应力也就可以达到材料屈服强度的 $1.33 \sim 2.66$ 。

这样高的峰值应力所造成的疲劳失效现象就和通常在高速回转机件中所碰到的高循环疲劳不同了。后者在设计时常以循环等数 $N > 10^7$ 次所得的持久限作为设计的依据，而一般材料的持久限大体为材料强度限的 $0.4 \sim 0.5$ 左右。显然在压力容器不能以此作为设计依据。对于压力容器中的疲劳失效现象实际上是一种高应力低循环疲劳。因此我们将着重说明高应力低循环疲劳的有关问题。

第二章 低周疲劳问题

一、典型的疲劳曲线：

材料承受反复交变载荷时，能经受的循环次数是与交变应力的变化幅度有关的。描绘这两者关系的曲线称为疲劳曲线，如图1所示。

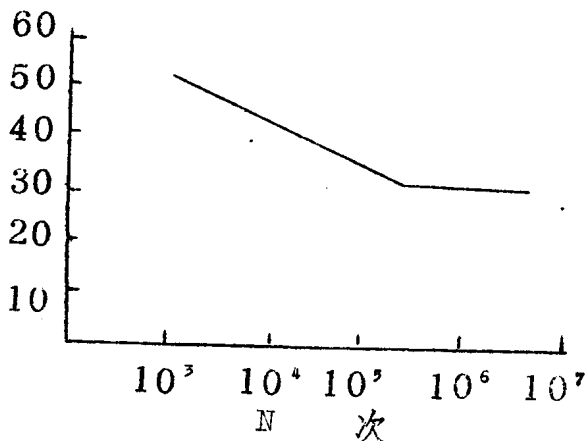


图 1—1 典型的疲劳曲线

通常的疲劳曲线是由试验所得，从图1可见当 $N > 10^7$ 次时，曲线变得平坦，这一最小应力变化幅就是材料的持久限。当 $N < 10^7$ 时，应力变化幅将逐渐升高，而进入 $N = 10^2 \sim 10^5$ 次的低循环区域。

在低循环区内进行疲劳试验时发现：由于应力值超过了材料的屈服限，这时的塑性流动造成了应力值的不稳定，因此，用应力变

幅来整理数据比较困难，数据相当分散，疲劳曲线不可靠，所以在
这种低循环区内通常是采用应变值作为控制变量。因此，这种高应
力低循环疲劳有时也常被称为应变疲劳。

这样，就提出了一个“虚拟应力”的概念。所谓“虚拟”应力
变化幅就是假定在弹性范围基础上进行计算，则该值即为材料的弹
性模数乘以应变幅：

$$S = \frac{1}{2} E \varepsilon_t \quad (2-1)$$

式中 S ——虚拟应力幅， K s i；

E ——材料的弹性模数 K s i；

ε_t ——总应变值。

很明显，当材料在弹性范围工作时，虚拟应力幅与真实应力幅
相等；而当材料在塑性范围工作时，总应变 ε_t 中包括弹性应变和
塑性应变，因此它就不是材料所承受的真实应力了。用虚拟应力整
理的疲劳曲线见图 2—2。

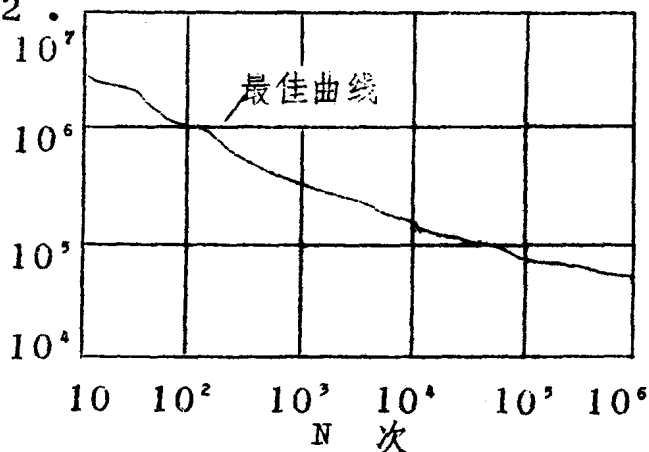


图 2—2 材料的最佳曲线

还应指出，由于试件中的缺口很易形成局部区域的应力集中，它将直接影响试件的试验结果，因此在进行疲劳试验时必须保持“无缺口”的试验条件。这种无缺口的试件所得结果整理的曲线，通常称之为“最佳”曲线，如图 2—2 所示。

二、曼森—柯芬关系 (MANSON—COFFIN)

为了表达低循环疲劳中的总应变值和破坏的循环次数间的关系，曼森—柯芬提出了以下关系式。

$$N^m \epsilon_t = C \quad (2-2)$$

式中：N——破坏的循环次数；

ϵ_t ——材料的总应变量；

$m \cdot C$ ——与材料性能有关的指数和常数。

经研究，指数 m 与材料进入塑性范围后材料发生的应变硬化指数 n 有关，也与试验温度有关。在常温条件下试验，钢的应变硬化指数 n 与 m 的关系如图 2—3 所示。一般钢材的 m 值在 $0.3 \sim 0.8$ 之间。根据曼森—柯芬的建议，可取 $m = 0.5$ 。

而材料常数 C 与材料在静拉伸试验时的断裂延性 ϵ_f 有关。多数试验结果表明， C 值在 $(1 \sim \frac{1}{2}) \epsilon_f$ 之间。

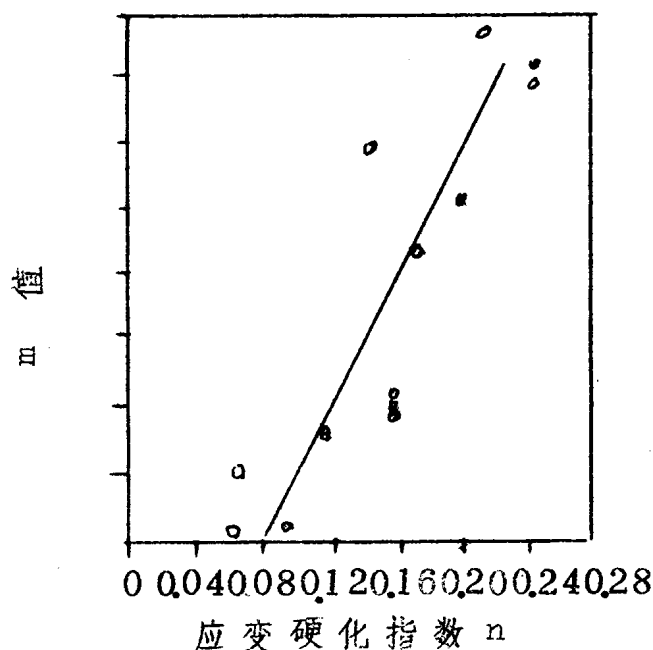


图 2—3 指数 m 与应变硬化指数 n 的关系

断裂延性是指材料断裂时的真实应变。它由材料拉伸试验时的断面收缩率决定。

设材料拉伸试件原长为 l_0 ，受力变形后的长度为 l_1 ；试件原来断面积为 F_0 ，受力变形后的断面积为 F_1 ；在体积不变的情况下，应保持

$$F_0 \cdot l_0 = F_1 \cdot l_1 \quad (2-3)$$

$$\text{即} \quad \frac{l_1}{l_0} = \frac{F_0}{F_1} \quad (2-4)$$

而断面收缩率 φ 为

$$\varphi = \frac{RA}{100} = \frac{F_0 - F_1}{F_0} = 1 - \frac{F_1}{F_0} = 1 - \frac{l_0}{l_1} \quad (2-5)$$

所以 $\frac{l_0}{l_1} = \lambda - 4, \quad \frac{l_1}{l_0} = \frac{\lambda}{\lambda - 4} \quad (2-6)$

而应变值 $\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{l_1}{l_0} - \lambda = \frac{\lambda}{\lambda - 4} - \lambda$

所以 $\lambda + \varepsilon = \frac{\lambda}{\lambda - 4} \quad (2-7)$

根据塑性力学 $\varepsilon_f = \ln(\lambda + \varepsilon)$

所以 $\varepsilon_f = \ln \frac{\lambda}{\lambda - 4} = \ln \frac{100}{100 - RA} \quad (2-8)$

若 $C = \frac{\lambda}{2} \varepsilon_f$

则有 $C = \frac{\lambda}{2} \ln \frac{100}{100 - RA} \quad (2-9)$

因此，从曼森-柯芬关系，可得

$$N_0^{\circ}, \quad \varepsilon_t = \frac{\lambda}{2} \ln \frac{100}{100 - RA} \quad (2-10)$$

而“虚拟”应力幅

$$S = \frac{\lambda}{2} E \varepsilon_t \quad (2-11)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (2-12)$$

$$S = \frac{E}{2} \varepsilon_e + \frac{1}{2} E \varepsilon_p$$

$$= \Delta \sigma + \frac{E}{2} \varepsilon_p$$

式中 ε_e —— 弹性应变部分；

ε_p —— 塑性应变部分。

在弹性范围内，应力幅

$$\Delta \sigma = \frac{1}{2} E \varepsilon_e \quad (2-13)$$

将 (2-12)，(2-13) 代入 (2-11) 得

$$S = E \left(\frac{\varepsilon_t}{2} \right) = E \left(\frac{\varepsilon_p}{2} \right) + \Delta \sigma \quad (2-14)$$

考虑到在塑性范围内，总应变 ε_t 中的弹性应变分量所占比例较小，柯芬提出 (2-10) 式中的 ε_t 可以用 ε_p 代入，故可得

$$S = \frac{E}{4N} \ln \frac{100}{100 - R_A} + \Delta \sigma \quad (2-15)$$

这就是根据曼森—柯芬关系所得的低循环疲劳的理论关系式。

式中的 $\Delta \sigma$ 可取为材料的持久限 σ_e 。这时当 N 值很大时， S 就接近 σ_e ，与高循环疲劳的结论相一致。但在低循环区内，将出现一定的误差。经试验证明，当 $N = 1000$ 次时，误差较大；但 $N < 1000$ 次时，因 $\Delta \sigma$ 在 S 中所占比例愈来愈小，所以误差将减小。但这些误差在工程计算中是可以允许的。

从以上关系可见，只要通过试验得到材料的断面收缩率 R_A ，弹性模数 E 和持久限 σ_e ，就可直接绘制疲劳曲线，图 2—4 就是奥氏体不锈钢绘出的结果。

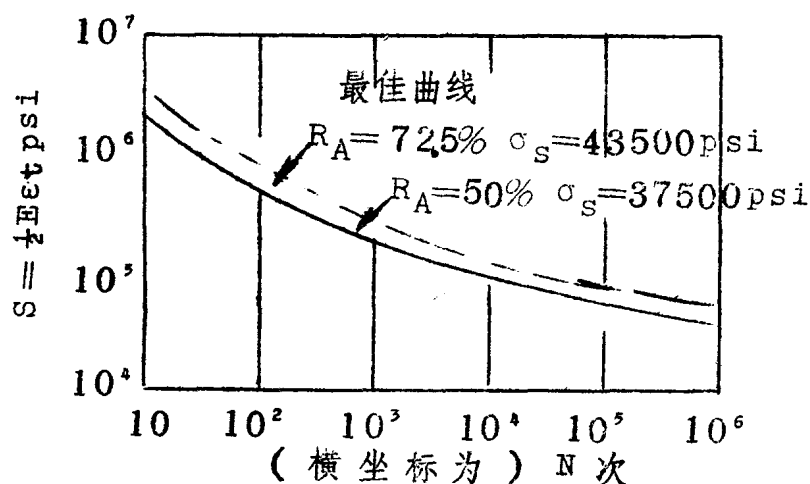


图 2—4 奥氏体不锈钢的疲劳曲线

据介绍，对其它材料，若用以上方式所得的曲线与实际试验结果比较，也较接近，并偏保守。故在没有相应低循环试验数据的情况下可以用上述理论公式结果进行计算。

三、平行应力的影响与修正：

在压力容器的疲劳失效问题中要使用疲劳曲线时，还应注意平均应力的影响与修正的问题。因为疲劳试件的试验都是指平均应力为 0 的对称反复循环试验所得的结果，而实际使用的压力容器却很少甚至没有这类对称反复循环载荷，因此必须对平均应力进行相应的修正。

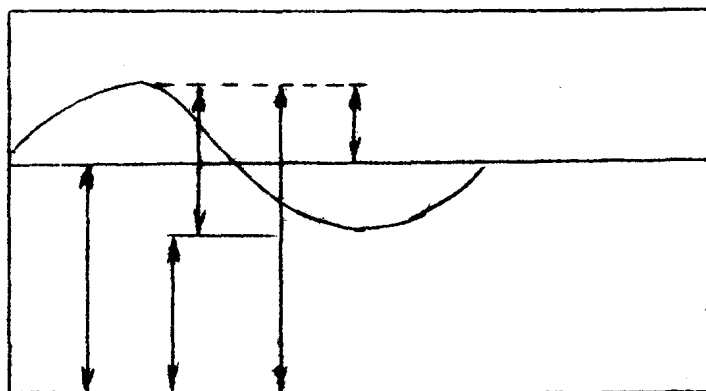


图 2—5 循环载荷的 $\sigma - t$ 关系

一般情况下应力与时间的关系可用图 2—5 表示。其中

$\sigma_{\max}$ —— 循环期中的最大应力（代数 σ 值）；

$\sigma_{\min}$ —— 循环期中的最小应力（代数值）；

σ_m —— 平均应力分量；

$$\sigma_m = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$$

σ_a ——交变应力分量（即交变应力幅）

$$\sigma_a = \frac{1}{2} (\sigma_{max} - \sigma_{min})$$

从疲劳试验得到的疲劳曲线都是对称循环（即 $\sigma_m = 0$ ）的结果。为了能将这些结果用于压力容器的设计计算，就应该考虑平均应力对疲劳寿命的影响，即把交变应力转换成相当于平均应力为0时产生同样破坏的应力，这应力称为当量交变应力；或者对疲劳曲线作出某种修正，以适应压力容器的实际情况。

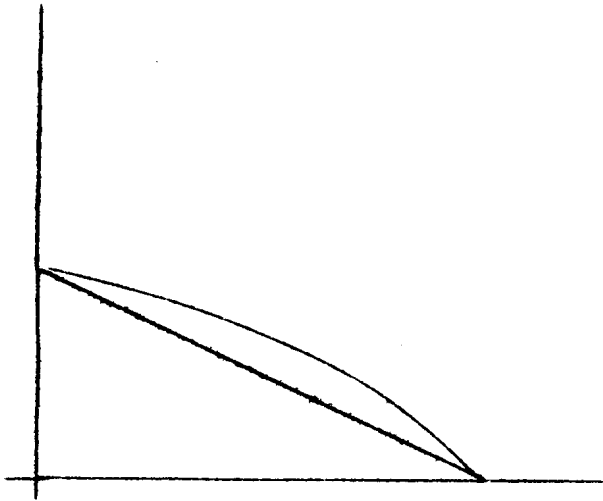


图 2—6 G o o d m a n 曲线

高循环区的影响：

平均应力增加时，试验结果表明在同一循环次数下发生破坏的应力幅将下降。也就是说非对称循环的交变应力作用下，平均应力增加会使持久限下降。古德曼（G O O D M A N）曾提出了平均应力的修正方法，见图 2 6。图中横座标为平均应力分量，纵座标为

交变应力分量。古德曼指出，相当于静载荷作用时，抗拉强度 σ_u 为最高限，而在对称循环作用时，交变应力幅等于持久限 σ_e 时为最高限。这两种极限相当于图中纵、横坐标上的 σ_e 和 σ_u 的位置。若处于不同的平均应力和交变应力幅情况下，古德曼认为在两点间直线以下的区域均属安全。因此在非对称循环时，交变应力幅 σ_a 将随平均应力 σ_m 的增加而沿 $\sigma_e - \sigma_u$ 直线而下降。

对于小于材料的蠕变温度的情况下，皮特逊 (PETERSON) 指出，沿用古德曼直线似感保守，他建议用一条三次曲线来代替。即应该保持以下的关系。

$$\sigma_e = \frac{7 \sigma_a}{8 - [1 + (\sigma_m / \sigma_u)]^3} \quad (2-18)$$

若材料处于压缩应力，则允许承受的应力幅将会比拉应力的低。这时不考虑压缩时的疲劳破坏。

2 低循环疲劳区的影响：

由于压力容器的局部应力水平往往高于材料的屈服强度。因此需根据不同情况分析平均应力的影响。理想塑性材料的应力—应变关系如图 2-7 所示。若作用有从 σ_1 到 0 的交变载荷，则在第一次循环时有：

$$\sigma_{\min} = 0, \quad \sigma_{\max} = \sigma_1$$

这时，计算平均应力

$$\sigma'_m = \frac{\sigma_1}{2}$$

交变应力幅为 $\sigma_a = \frac{\sigma_1}{2}$

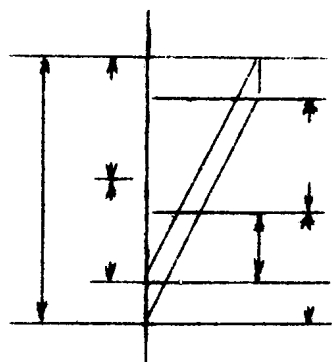


图 2—7 $\sigma > \sigma_y$ 的 $\sigma - \varepsilon$ 曲线

而以后的循环，由于材料的屈服现象，所以实际的循环是沿着 D B 线往返。这时，尽管应力变化幅仍为 $0 - \sigma_1$ ，但材料中所承受的实际应力却为 $\sigma_{min} = -(\sigma_1 - \sigma_y)$

而 $\sigma_{max} = \sigma_y$

因此，
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{\sigma_y + \sigma_1 - \sigma_y}{2}$$

$$= \frac{\sigma_1}{2}$$

≈ 1.4 ≈