

第四章 压力容器设计

CHAPTER IV Design of Pressure Vessels

4.5 疲劳分析 (Fatigue Analysis)

4.1 概述

4.2 设计准则

4.3 常规设计

4.4 分析设计

4.5 疲劳分析

4.6 压力容器设计技术进展

4.5.1 概述

4.5.2 低循环疲劳曲线

4.5.3 压力容器的疲劳设计

4.5.4 影响疲劳寿命的其它因素

4.5 疲劳分析

教学重点：

压力容器的疲劳设计。

教学难点：

低循环疲劳曲线低的修正。

4.5 疲劳分析

4.5.1 概述

压力容器疲劳失效增加的原因:

- (1) 疲劳载荷的增加;
- (2) 高强度材料的广泛应用

疲劳失效的特点:

- (1) 没有明显的塑性变形;
- (2) 应力水平低;
- (3) 起源于局部高应力区

用于描述疲劳载荷的参数:

最大应力

$$\sigma_{\max}$$

最小应力

$$\sigma_{\min}$$

平均应力

$$\sigma_m$$

交变应力符

$$\sigma_a$$

应力比

$$R$$

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

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

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$$

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$$

$$R = -1 \quad \text{即} \quad \sigma_m = 0$$

对称循环;

$$R = 0 \quad \text{即} \quad \sigma_{\min} = 0$$

脉动循环;

$$R = +1 \quad \text{即} \quad \sigma_{\min} = \sigma_{\max}$$

静载.

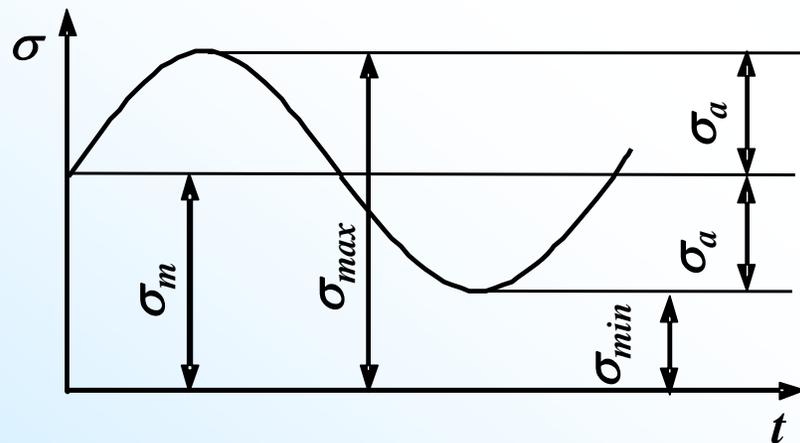
高循环疲劳: $N > 10^5$;低循环疲劳: $N = 10^2 \sim 10^5$ 

图4-62 应力循环曲线

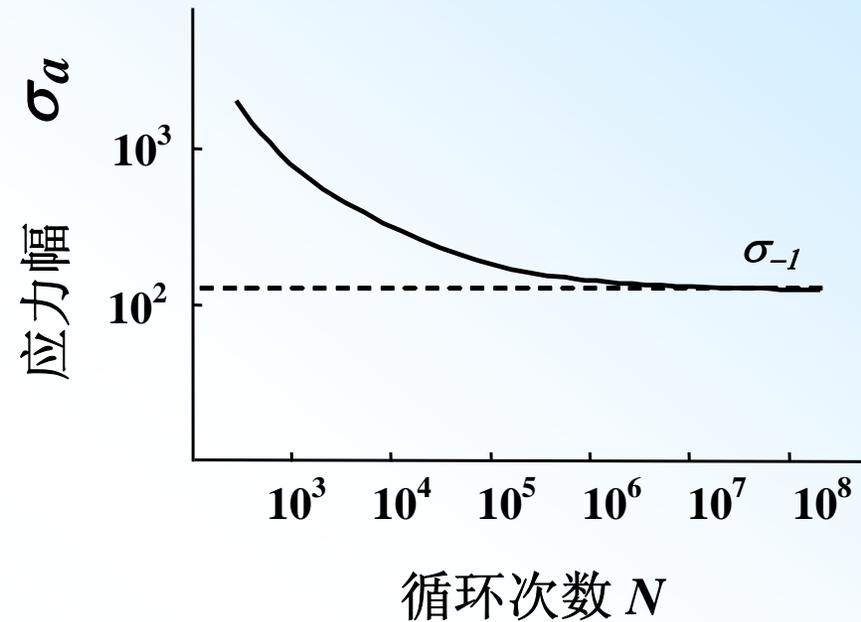


图4-63 高循环疲劳曲线

4.5.2 低循环疲劳曲线

低循环疲劳计算曲线

$$S = \frac{1}{2} E \varepsilon_t \quad (4-92)$$

$$\sqrt{N} \varepsilon_p = C \quad (4-93)$$

式中

$$C = \frac{1}{2} \varepsilon_f$$

$$\varepsilon_f = \ln \frac{100}{100 - \psi}$$

式中 ε_f 材料拉伸试验中断裂时的真应变

ψ 断裂时的断裂收缩率。

$$C = \frac{1}{2} \ln \frac{100}{100 - \psi} \quad (4-94)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_p + \varepsilon_e$$

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

$$\sigma_a = \frac{1}{2} E \varepsilon_e$$

$$S = \frac{1}{2} E \varepsilon_p + \sigma_a \quad (4-95)$$

$$S = \frac{E}{4\sqrt{N}} \ln \frac{100}{100 - \psi} + \sigma_a$$

$$S = \frac{E}{4\sqrt{N}} \ln \frac{100}{100 - \psi} + \sigma_{-1} \quad (4-96)$$

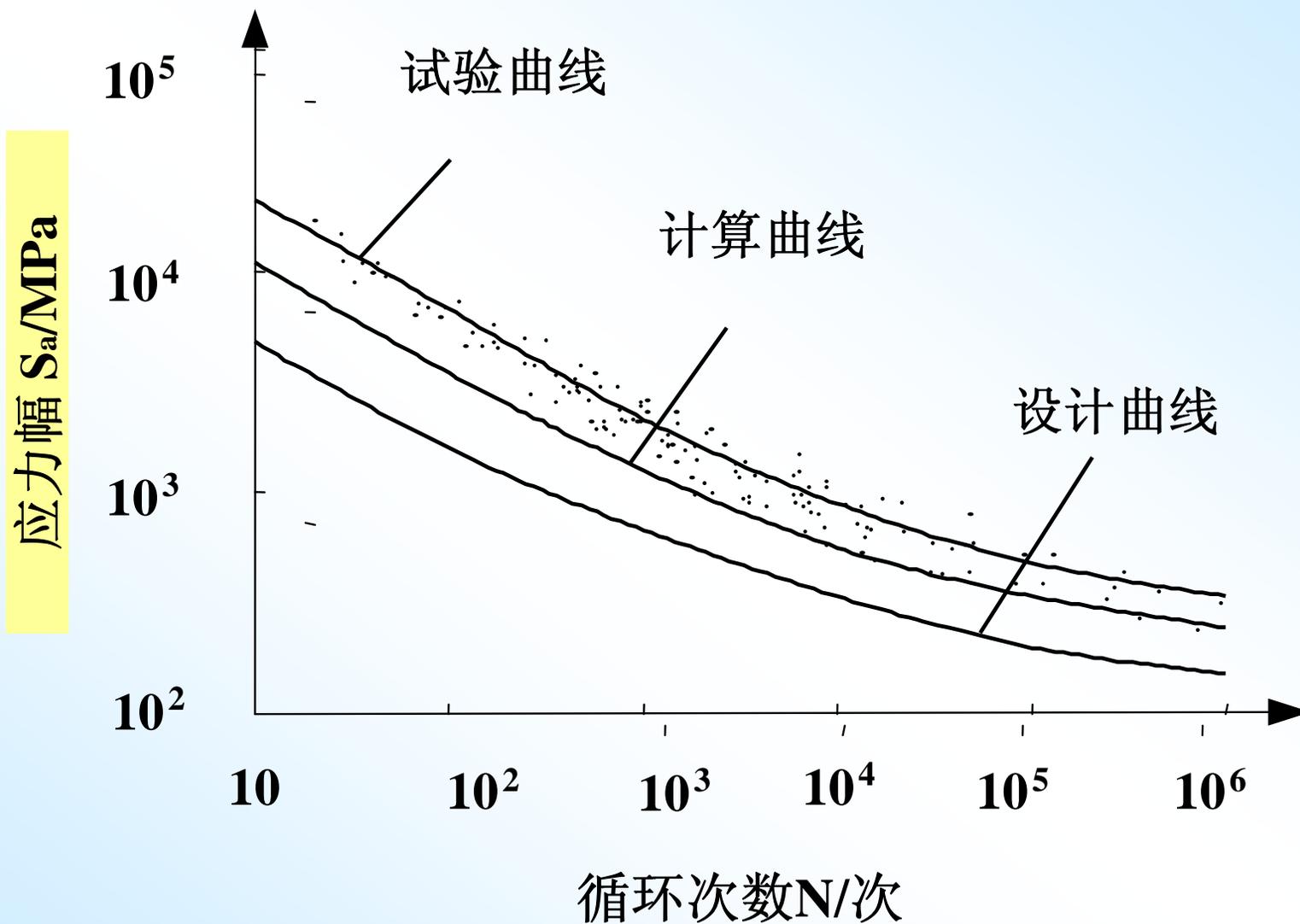


图4-64 低循环疲劳曲线

平均应力对疲劳寿命的影响

压力容器承受的主要载荷 (脉动循环载荷):

$$\sigma_{\min} = 0 \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2}$$

Goodman 方程:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_b} = 1$$

(4-97)

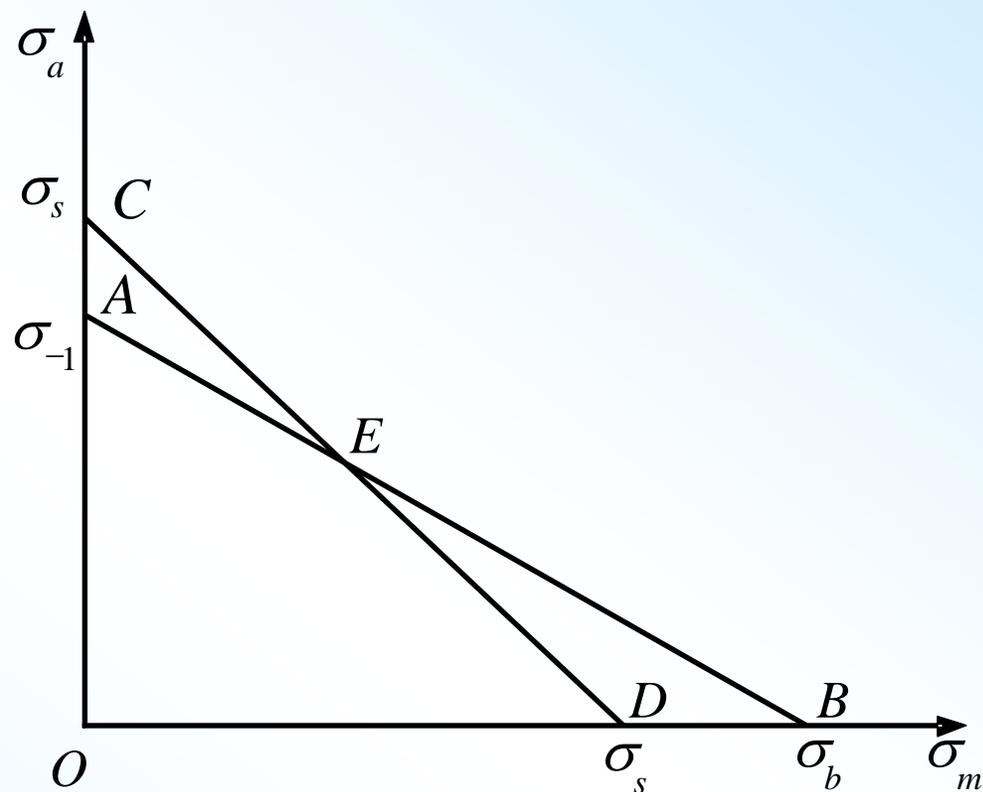


图 4-65 平均应力的影响: Goodman 直线

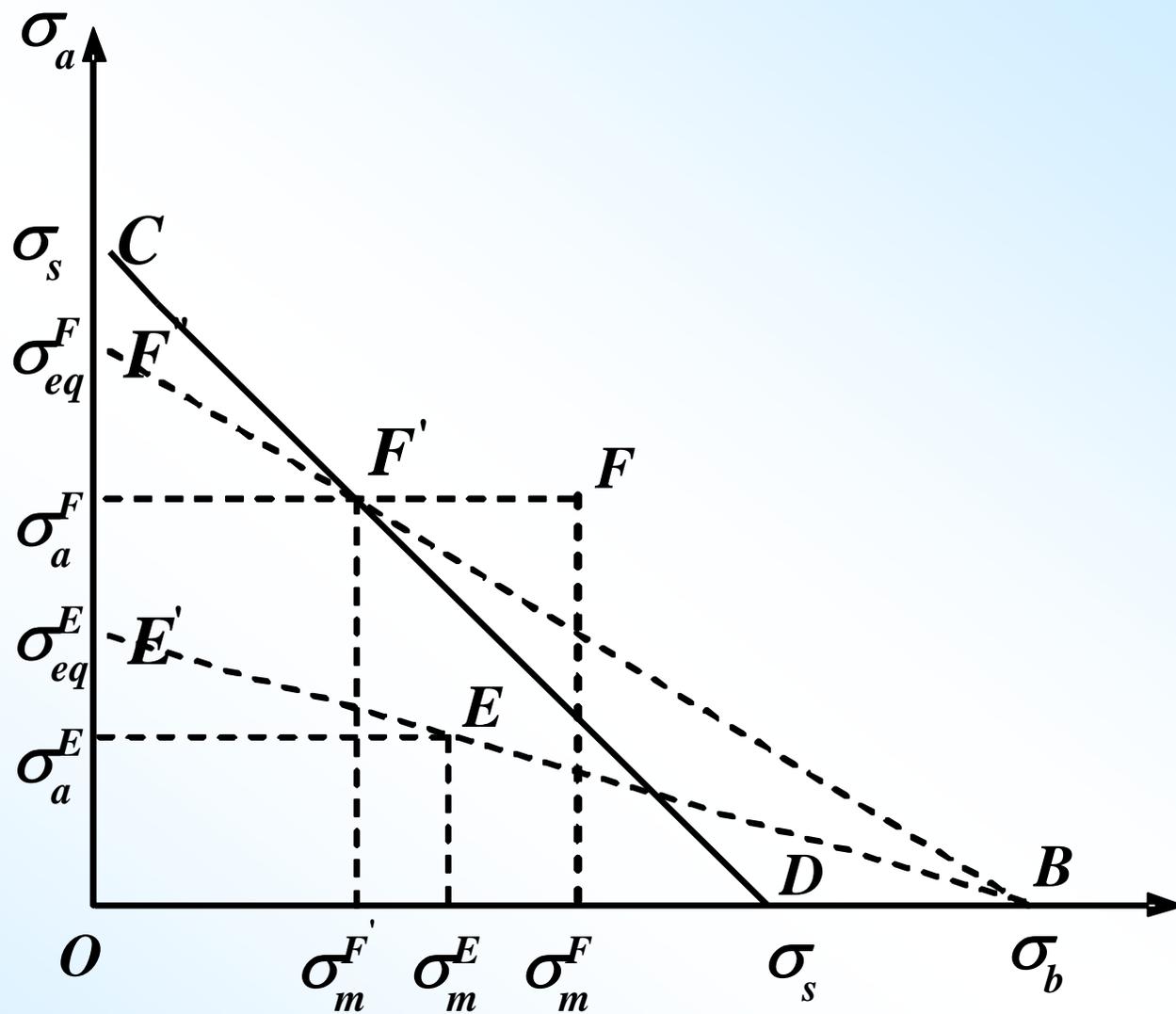
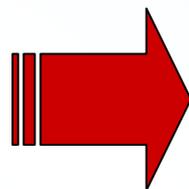


图4-66 平均应力的调整

平均应力调整及当量交变应力幅的求法

平均应力不等于0的
交变应力幅 σ_a



平均应力等于0的交变应力
幅 σ_a

$$(1) \quad \sigma_a + \sigma_m \leq \sigma_s$$

$$\sigma_{eq}^E = \frac{\sigma_a^E}{1 - \sigma_m^E / \sigma_b}$$

(4-98)

$$(2) \quad \sigma_s < \sigma_a + \sigma_m < 2\sigma_s$$

$$\sigma_{eq}^F = \frac{\sigma_a^F}{1 - (\sigma_s - \sigma_a^F) / \sigma_b} \quad (4-99)$$

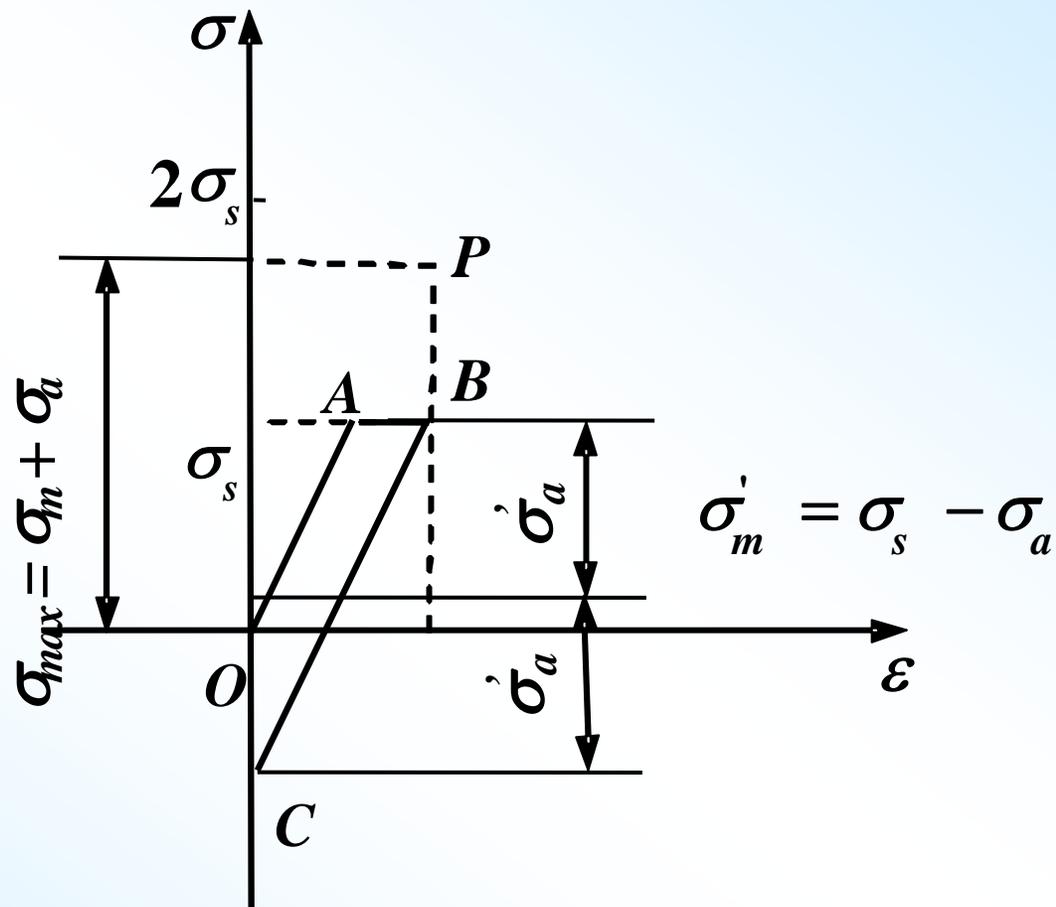


图4-67 $\sigma_s < \sigma_{\max} < 2\sigma_s$ 时应力应变关系

4.5.2 低循环疲劳曲线

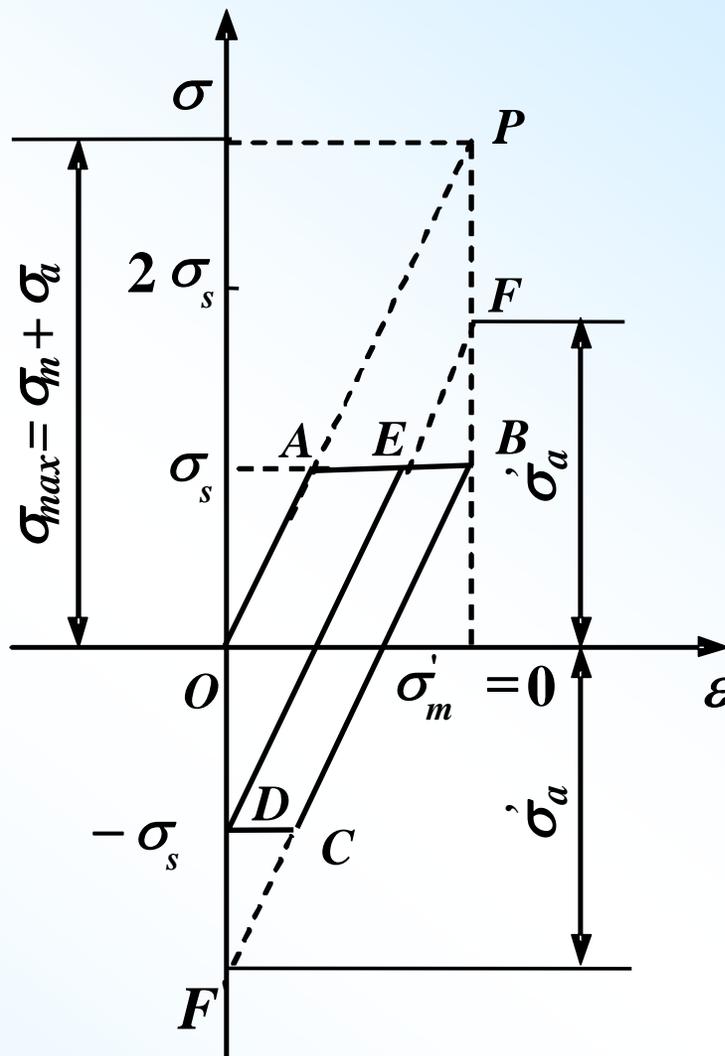


图4-68 当 $\sigma_a + \sigma_m \geq 2\sigma_s$ 时应力应变关系

$$(3) \quad \sigma_a + \sigma_m \geq 2\sigma_s$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_s - \sigma_s}{2} = 0, \text{ 不需要调整 } \sigma_a$$

低循环疲劳曲线的修正

$$\sigma_a^F = \sigma_{eq}^F \left(\frac{\sigma_b - \sigma_s}{\sigma_b - \sigma_{eq}^F} \right) \quad (4-100)$$

4.5.2 低循环疲劳曲线

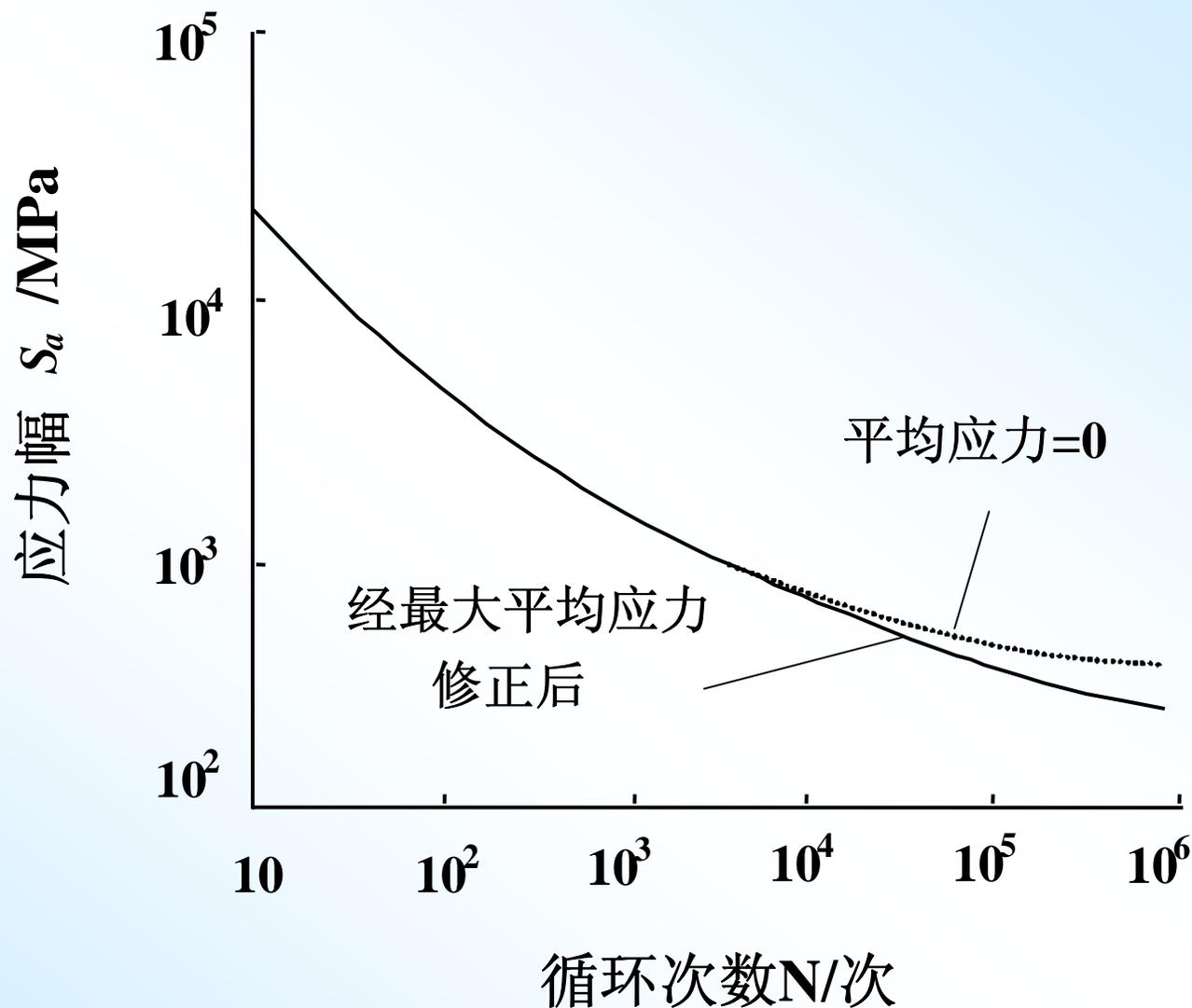


图4 - 69 经平均应力修正后的疲劳曲线

4.5.3 压力容器的疲劳设计

(1) 压力容器的疲劳设计

压力容器疲劳设计应在一次应力强度和一次加二次应力强度满足限制条件的前提下进行，其基础是应力分析。目前，疲劳设计方法主要有三种，即基于试验的疲劳设计、以断裂力学为基础的疲劳设计和采用设计疲劳曲线的疲劳设计。

a. 基于试验的疲劳设计

所设计的压力容器的应力循环次数应小于疲劳试验得到的循环次数，试验用容器和所设计的容器应一致。此设计成本高，一般用于方案设计，以及在腐蚀、高温等特种条件下使用的压力容器疲劳设计。

4.5.3 压力容器的疲劳设计（续）

b. 以断裂力学为基础的疲劳设计

假设初始裂纹尺寸，根据断裂模型确定最终裂纹尺寸，再利用合适的裂纹扩展速率计算公式，推算出断裂发生时的循环次数，要求计算出的循环次数大于压力容器所需要的循环次数。该方法已列入ASME VIII-3，用于超高压容器设计。

4.5.3 压力容器的疲劳设计（续）

c. 采用设计疲劳曲线的疲劳设计

设计疲劳曲线有两类。一类是以应力范围 σ_R 定义的疲劳强度，设计疲劳曲线为应力范围和应力循环次数的关系曲线，即 σ_R - N 曲线。另一类是以应力幅 S_a 定义的疲劳强度，设计疲劳曲线为应力幅和应力循环次数的关系曲线，即 S_a - N 曲线。JB4732、ASME VIII-2 等规范标准均采用 S_a - N 曲线。

4.5.3 压力容器的疲劳设计（续）

采用 S_a - N 曲线的疲劳设计主要包括确定交变应力幅、根据交变应力幅由疲劳设计曲线确定允许循环次数、疲劳强度校核等。

① 交变应力幅的确定

先通过应力分析确定与时间相对应的各应力量 $P_L + P_b + Q + F$ ，再计算各主应力及主应力差，然后确定在整个应力循环中各主应力差的最大波动范围，其中绝对值最大的波动范围的一半即为交变应力幅 S_{alt} 。

4.5.3 压力容器的疲劳设计（续）

② 用设计疲劳曲线计算允许的循环次数

JB4732提供了循环次数在 10^6 以内、抗拉强度在**552MPa**以下及**793~896MPa**之间的两类碳素钢、低合金钢的设计疲劳曲线（使用温度不超过**375°C**，如图**4-71**所示）以及奥氏体不锈钢及高强度螺柱材料的设计疲劳曲线。这些曲线均根据应变控制的低循环疲劳试验曲线，经最大平均应力影响的修正，取安全系数而得。

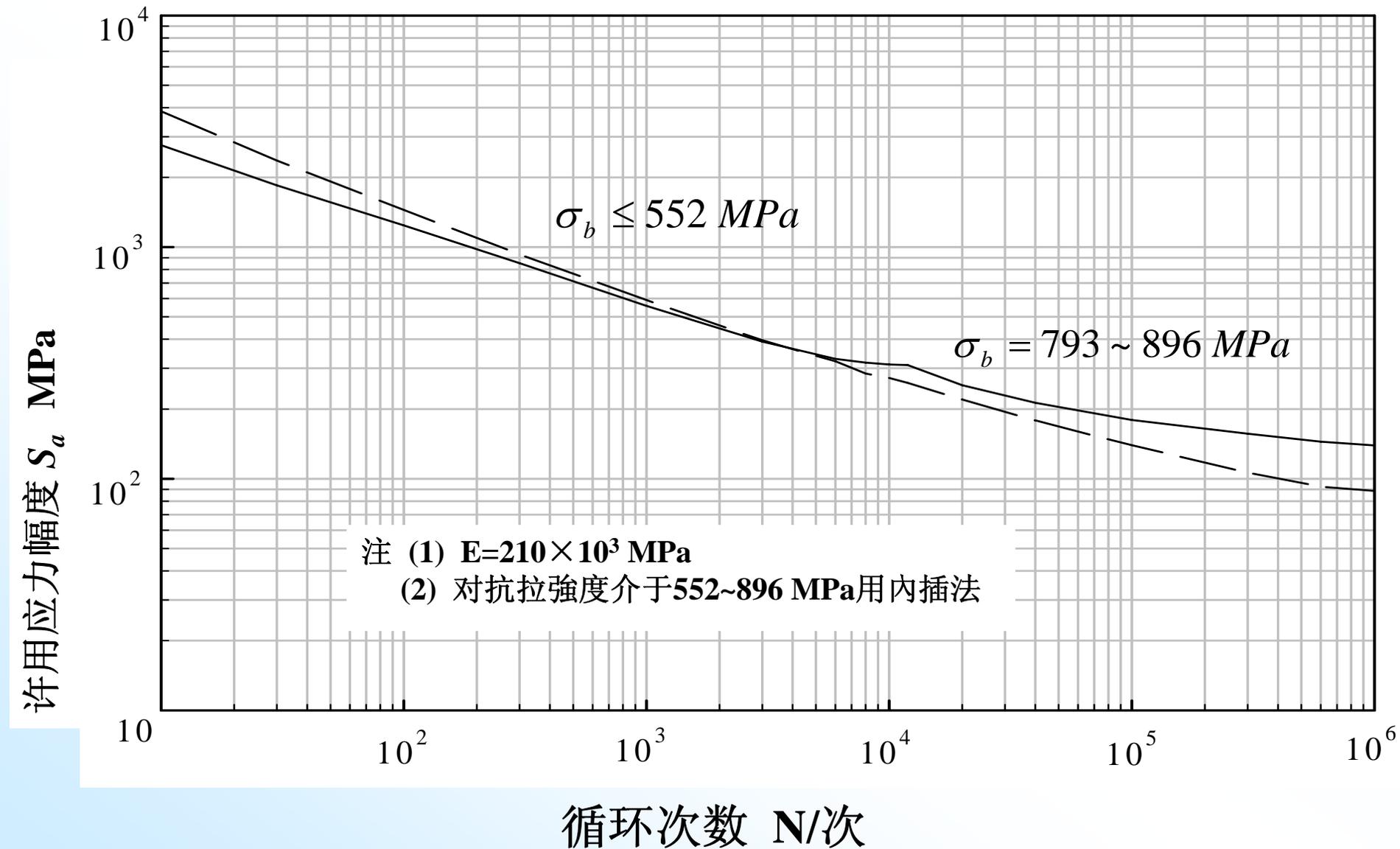


图4-71 温度不超过375°C的碳钢、低合金钢的设计疲劳曲线

4.5.3 压力容器的疲劳设计（续）

在ASME及我国的标准中，应力幅的安全系数为2，疲劳寿命的安全系数为20，此值是三项系数的乘积：数据分散度2尺寸因素2.5表面粗糙及环境因素4。

4.5.3 压力容器的疲劳设计（续）

③疲劳强度校核

上面计算出的交变应力幅 S_{alt} 应作设计温度的校正，若设计疲劳曲线注明的材料弹性模量为 E_t ，则设计温度下的交变应力幅为 $S'_{alt} = S_{alt} \frac{E}{E_t}$ 。由 S'_{alt} 在相应材料的设计疲劳曲线上查出对应的允许循环次数 N ，它不应小于由容器操作条件所给出的预计循环次数 n ，否则须采取措施降低峰值应力，重新设计。

4.5.3 压力容器的疲劳设计（续）

（2）变幅载荷与疲劳累积损伤

压力容器在实际运行中所受的改变载荷幅有时是随时间变化的，其大小载荷幅的作用顺序甚至是随机的，若总按其中的最大幅值来计算改变应力幅就太保守。对于变幅疲劳或随机疲劳问题，工程上普遍采用线性疲劳累积损伤准则来解决。

4.5.3 压力容器的疲劳设计（续）

设一压力容器所受的各种交变应力幅为 S_{a1} 、 S_{a2} 、 S_{a3} ……，它们单独作用时的疲劳寿命分别为 N_1 、 N_2 、 N_3 ……。若 S_{a1} 、 S_{a2} 、 S_{a3} ……作用次数分别为 n_1 、 n_2 、 n_3 ……，则各交变应力幅对结构造成的损伤程度分别为 n_1/N_1 、 n_2/N_2 、 n_3/N_3 ……。线性疲劳累积损伤准则认为各交变应力幅造成的损伤程度累计叠加不应超过1，即

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots \leq 1 \quad (4-101)$$

4.5.3 压力容器的疲劳设计（续）

显然，线性疲劳累积损伤准则认为累积损伤的结果与不同交变应力幅作用顺序无关，而实际上作用顺序是有影响的，例如高应力幅作用在前，造成应力集中区屈服，卸载后便会产生一定的残余压缩应力，这将使以后的低应力幅造成的损伤程度下降，因此在这种情况下，累积损伤可以超过1。不过压力容器在设计时很难预测在使用中不同交变载荷的作用顺序，鉴于线性累积损伤准则计算方便，工程上仍大量使用。如果考虑作用顺序及其它因素的影响，问题则复杂得多，目前尚无成熟的理论和方法。

容器不需要做疲劳分析的规定

JB4732规定，对于常温抗压强度 $\sigma_b < 550\text{MPa}$ 的钢材，若下列4条中总循环次数不超过1000次，容器整体部位可以不做疲劳分析。

- ①包括启动和停车在内的全范围压力循环的预计（设计）循环次数；
- ②压力波动范围超过设计压力20%的工作压力循环的预计（设计）循环次数；
- ③容器上包括接管在内的任意相邻两点之间波动的有效次数；有效次数和循环次数及温差波动的范围有关。
- ④由热膨胀系数不同的材料组成的部件（包括焊缝），当 $(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T > 0.00034$ 时的温度波动循环次数。

4.5.4 影响疲劳寿命的其他因素

(1) 容器结构

应力的大小对压力容器的疲劳寿命起决定性的作用。结构中有可能引起应力集中的部位，都会影响容器的疲劳寿命。应力集中导致容器疲劳承载能力降低的程度可用疲劳强度减弱系数 K_f 来表示, K_f 的定义为

$$K_f = \frac{\text{无缺口试件在}N\text{次循环次数下破坏时的应力}}{\text{缺口试件在}N\text{次循环次数下破坏时的应力}}$$

4.5.4 影响疲劳寿命的其他因素（续）

（2）容器表面性能

疲劳裂纹一般在容器表面上形核，容器表面状态对疲劳寿命有显著的影响。粗糙表面上的沟痕会引起应力集中，改变材料对疲劳裂纹形核的能力。残余应力会改变平均应力和容器的疲劳寿命。压缩残余应力可提高疲劳寿命，拉伸压力残余应力则起降低作用。提高容器的表面质量、在表面引入压缩残余应力都是提高压力容器疲劳寿命的有效途径。

4.5.4 影响疲劳寿命的其他因素（续）

（3）环境

许多压力容器并非在室温下承受交变载荷，因此，应考虑温度对容器疲劳寿命的影响。在低于材料蠕变温度的范围内，温度升高，容器的疲劳寿命下降，但不严重，可以通过温度对材料弹性模量的影响来反映。如果温度超过蠕变温度，容器受蠕变和交变载荷联合作用，情况会变得非常复杂，目前尚缺乏足够的实验数据。因此，分析设计标准要求设计温度低于钢材蠕变温度。

4.5.4 影响疲劳寿命的其他因素（续）

腐蚀性介质对容器的腐蚀表现在使容器表面的粗糙度增加、降低材料抗疲劳性能以及减小容器有效承载截面、提高实际工作应力，从而使得容器的疲劳寿命大大降低。腐蚀与交变载荷联合作用所引起的腐蚀疲劳是压力容器最危险的失效形式之一，但由于腐蚀介质的多样化，使得对腐蚀和交变载荷共同作用下的研究变得十分复杂，尚未形成规范，因而分析设计标准中未考虑腐蚀对钢材抗疲劳性能的影响。