

疲劳强度问题简介

北京航空学院五〇八教研室

一九八〇年三月

一、引 言

在結構和零件中，常常受到随時間作周期性变化的应力，这种应力称为“交变应力”或“循环应力”。例如，汽缸內活塞往复推动連杆运动时，連杆中的应力即随時間作周期性变化。由于彈性振动和反复冲击也会引起交变应力，如鍛压机的鍛錘每打击工件一次，就使錘杆受到一次冲击載荷，多次不断冲击，錘杆即受到交变应力的作用。在交变应力作用下，零构件发生的破坏現象叫做“疲劳破坏”。

早在100多年前，铁路工程方面就出現过疲劳破坏。自1862年起，开始对机車車軸进行疲劳試驗研究。近年来，在各工业部門蓬勃兴起，其涉及范围十分广泛，需要考虑疲劳强度问题的有：飞机、航空发动机、汽車、拖拉机、起重运输机械、铁路、桥梁以及化工容器等。最近二十多年中，航空方面出現了大量的疲劳破坏事件。1951年英国“鵝式”飞机因翼梁破坏在澳大利亚失事；1952年美国F-86型歼击机因机翼主接头疲劳破坏而連續发生事故；特别是，1954年英国噴气式客机“慧星I号”，由于气密座艙疲劳連續两次发生的灾难性事故，引起了人們极大注意。此外，直升机旋翼軸頸、噴气发动机主軸和渦輪叶片、飞机起落架等都经常出現疲劳裂紋。据統計，飞机在外場使用发生的强度问题中，大部份是因疲劳而引起的。

产生这种情况的原因，主要是由于冶金工业的发展，提高了材料靜强度，但它的疲劳强度却很少增加，甚至沒有增加，于是，按照靜强度条件設計出的零构件，在疲劳强度方面就相对地不够了。其次，由于电子计算机的发展和应用，应力分析越来越准确，这样，强度儲备实际上也比过去有所降低。並且由于在疲劳理論分析和試驗研究方面目前尚存在有很多不足之处，因此，导致了疲劳損伤的加剧。

以上所列举的一些疲劳破坏、和靜力破坏相比，有本质的不同。疲劳破坏的主要特征表现在：

- (1) 在交变应力远小于靜强度极限的情况下，破坏就可能发生。
- (2) 疲劳是永久性、局部性損伤的递增过程。疲劳裂紋要经历应力的多次重复才会出現。

(3) 疲劳裂纹出现时，即使对于塑性材料，也常常没有显著的塑性变形，好象脆性材料断裂一样。因此，事先的维护和检验不易觉察出来，这就表现出疲劳破坏的危险性。

(4) 在疲劳破坏的断口上，一般呈现两个区域，一部份是光滑的，一部份是粗粒状的（图1）。破坏时，首先从某一点裂纹开始扩展，该点常称做“疲劳源”。裂纹从疲劳源逐渐向四周扩展。由于反复的变形，裂开的两个面，时而挤压，时而分离，这样就形成了光滑区域。随着裂纹的扩大，截面被削弱得愈来愈厉害，直到截面残存部分的抗力不足时，就会在某一次载荷作用下，突然断裂。在这种“一次断裂”的表面上，材料呈粗粒状。零构件在实际工作中，如果交变应力的变化是不规则的，有时应力变化较大，有时应力变化较小，则在光滑区域上，还可观察到贝壳状的纹迹（图2）。

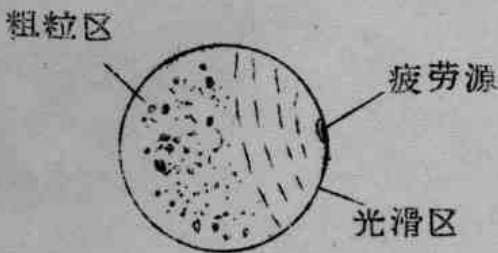


图 1

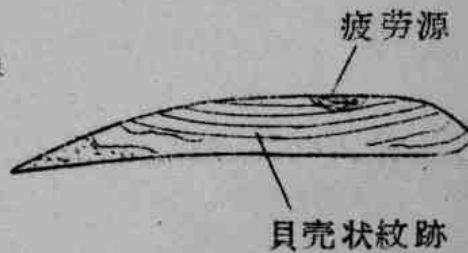


图 2

掌握这些疲劳破坏的特征，有助于从断口和外形上来断判一个零构件的破坏是由静力还是由疲劳所引起的。

二、S-N 曲线和疲劳极限

当交变应力规则地变化时，可用正弦波形表示应力 σ 随时间 t 变化的情况（图3）。由图可见，交变应力 σ 在两个极值之间作周期性的变化。这两个极值中代数数值较大的一个叫做“最大应力” σ_{max} ；较小的一个叫做“最小应力” σ_{min} 。最大应力和最小应力的代数平均值 σ_m 叫做“平均应力”：

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

σ_a 叫做“应力幅”，它和 σ_{\max} 、 σ_{\min} 存在以下关系：

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

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a ; \quad \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \quad (3)$$

应力的变化范围为 $2\sigma_a$ ，常称做“应力振程”，最小应力与最大

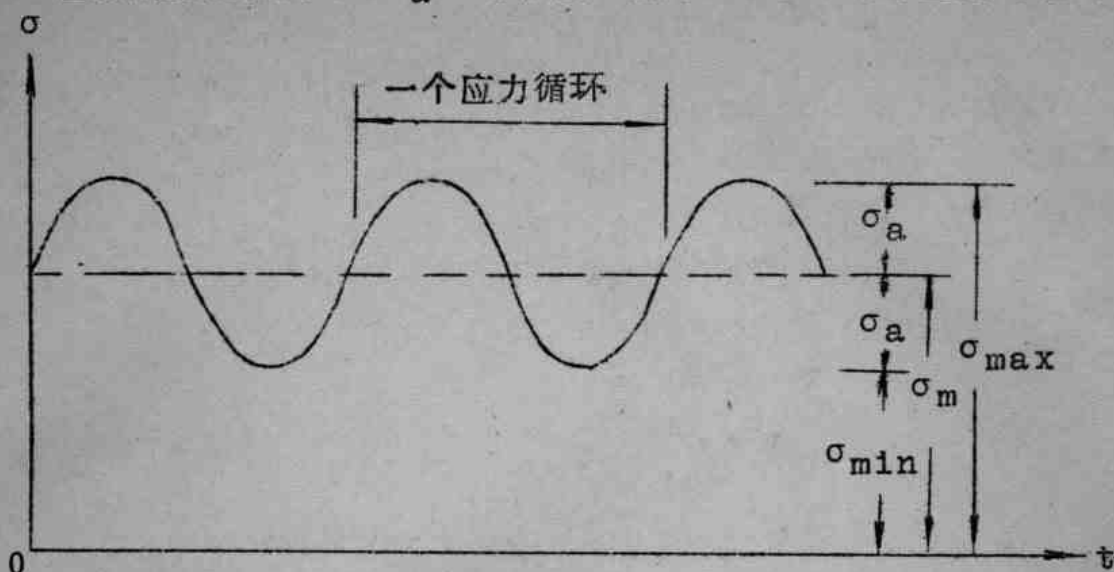


图 3

应力的比值：

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (4)$$

叫做“应力比”或“循环特征”。

如图 3 所示，任一交变应力可以看作是由两部份应力合成的。一部份是数值等于平均应力 σ_m 的“静应力”；另一部份是在平均应力上、下变化的“动应力”。可见交变应力与一般静应力不同，它需要用两个参量来表示其大小，而称之为“应力水平”。在给定 R 或 σ_m 的条件下，应力水平可用 σ_{\max} 或 σ_a 表示。

应力每循环一个周期叫做一个“应力循环”。当 $\sigma_m = 0$ 或 $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$ 时（图 4，a），此种循环叫做“对称循环”，对称循环的应力比为

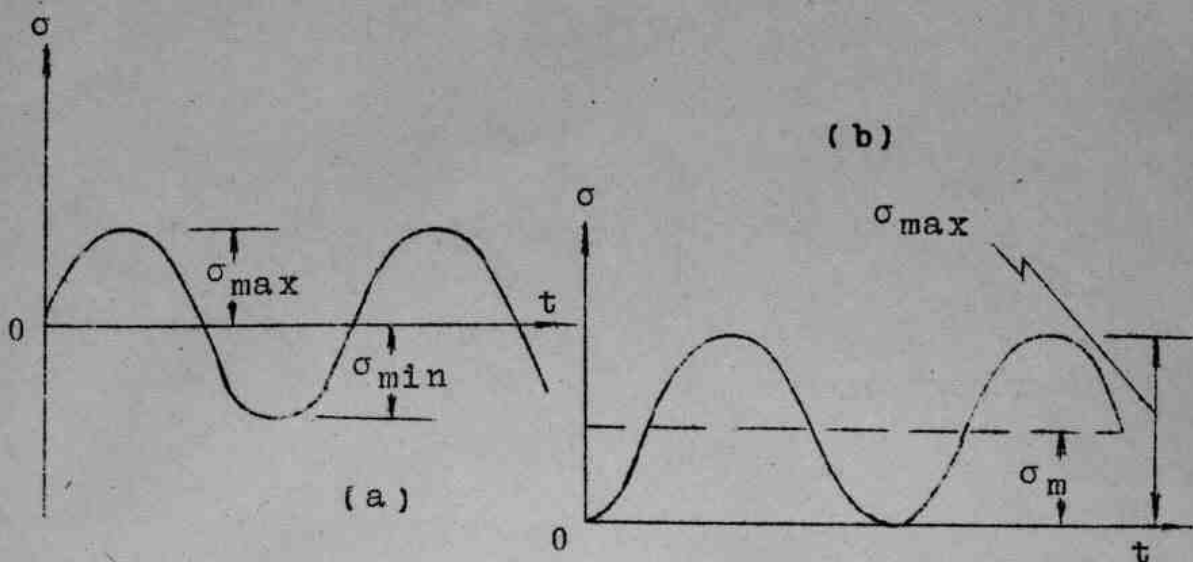


图 4

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = -1$$

当 $\sigma_{\min} = 0$ 时 (图 4, b), 这种循环称做“脉动循环”, 脉动循环的应力比是 $R = 0$ 。当 R 等于任意数值时, 则属于非对称循环 (图 3)。在静载荷情况下, 动应力部份趋近于零, 即 $\sigma_a \rightarrow 0$, 此时 $\sigma_{\max} = \sigma_{\min} = \sigma_m$, 故应力比为 $R = +1$ 。

材料的疲劳性能是由试验测定的, 以下我们就介绍利用“旋转弯曲”测定疲劳性能的方法。首先准备一组 8~10 根材料和尺寸相同的光滑小试件, 直径 6~10mm。试验时, 每次取一根试件装在图 5 所示的试验机空心轴夹头中, 空心轴由两个轴承支持于机座上, 形如一简支梁。砝码重力通过中间二轴承施加在试件端部, 于是, 试件承受纯弯曲。当电动机带动空心轴转动时, 试件也随之转动, 但由于砝码重力始终是朝下的, 故试件表面上一点每转一圈, 就经历一次应力循环。连续开动机器, 施加交变应力, 直到试件破坏为止。根据试验机上的计数器读数, 可得到使试件破坏所需的应力循环数 N , 即试件的“疲劳寿命”。应力循环中的最大应力 σ_{\max} (弯曲应力) 是按砝码重力求出的。试验结果表明, 对各个试件施加不同的应力, 其疲劳寿命也不相同, 应力越小, 疲劳寿命就越长。如以最大应力 σ_{\max}

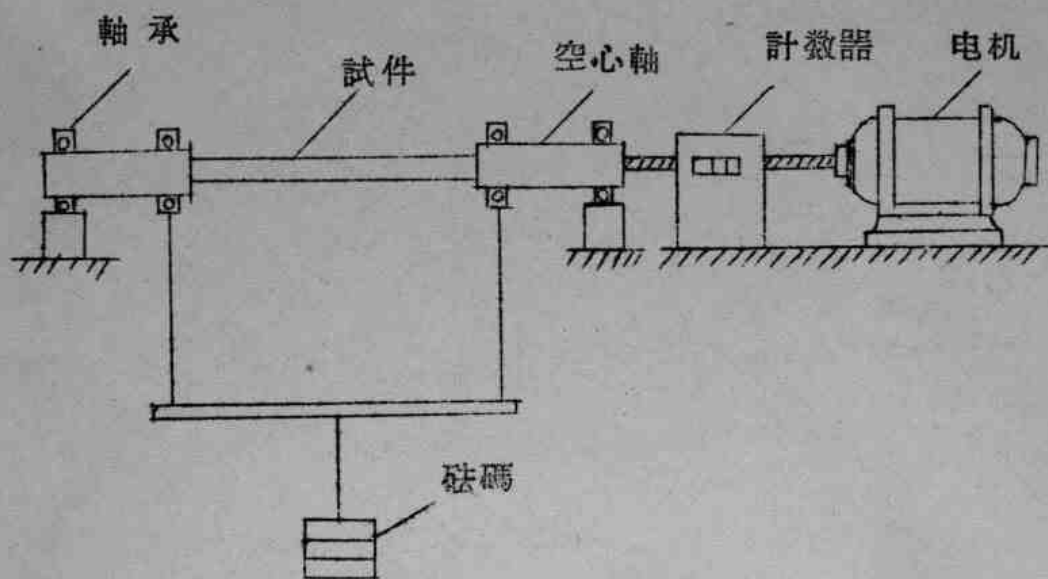


圖 5

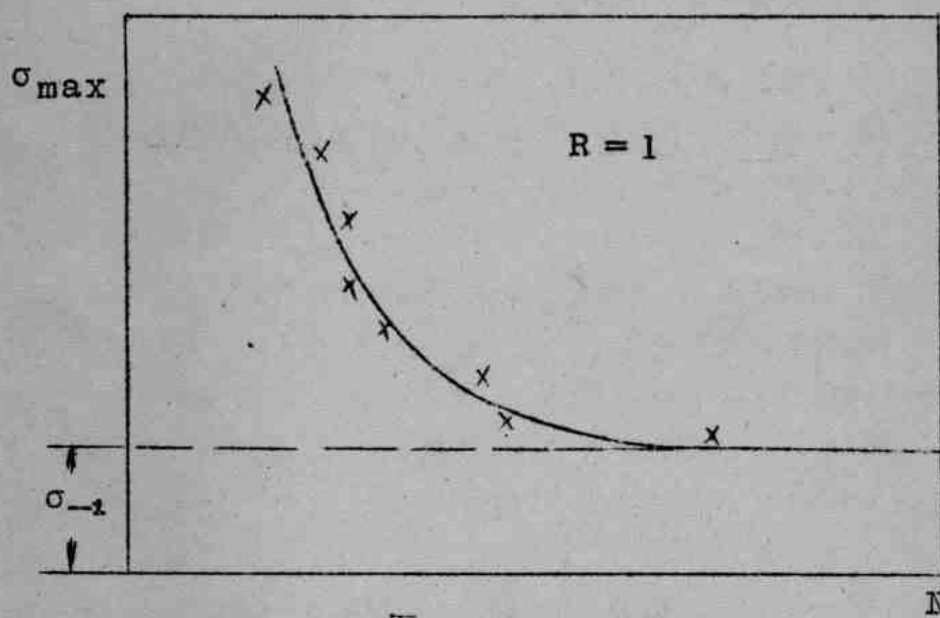


圖 6

為縱坐標，疲勞壽命 N 為橫坐標，則可繪出 $S-N$ 曲線（應力—壽命曲線），如圖 6 所示。旋轉彎曲試驗屬於對稱循環，應力比 $R=1$ 。 $S-N$ 曲線中水平直線段的縱坐標稱為“疲勞極限” σ_{-1} ，下標 -1 表示對稱循環的情況。當 σ_{max} 大於 σ_{-1} 時，試件經歷有限次應力循

环即发生破坏；当 σ_{\max} 小于 σ_{-1} 时，则试件可经受无限次应力循环而不破坏。

目前，绘制 $S-N$ 曲线时，为了匀称地表示各数据点，习惯上都以 $\lg N$ 作为横坐标。图7是典型的炭钢 $S-N$ 曲线；图8是典型的铝

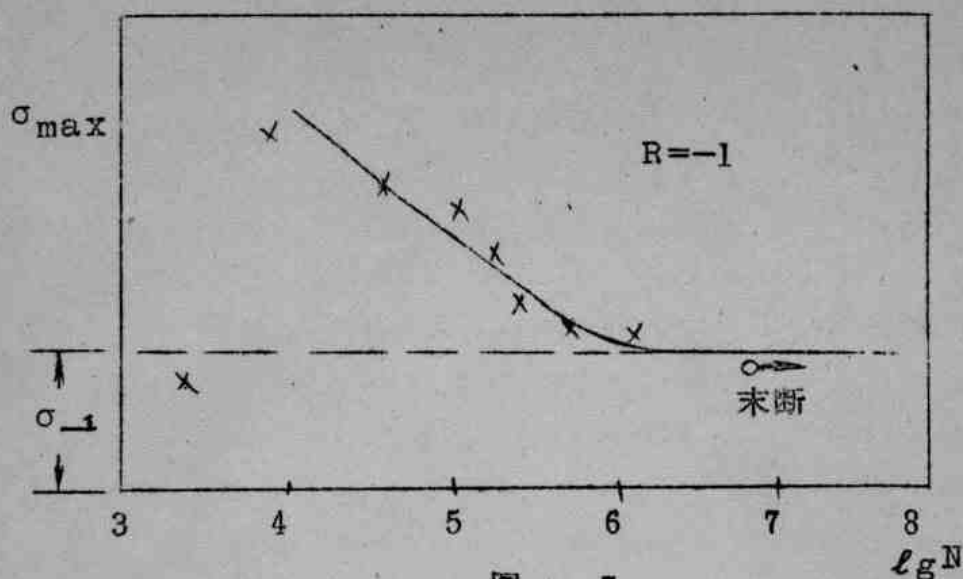


图 7

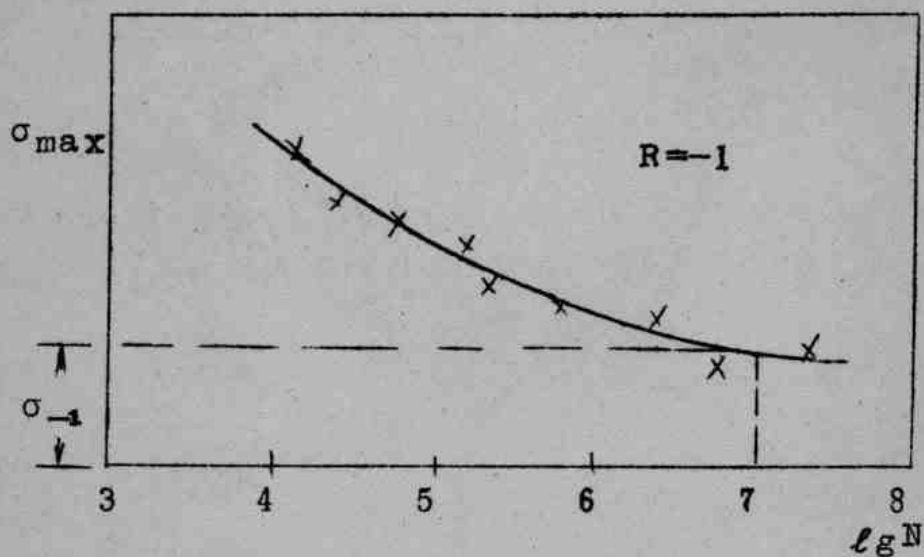


图 8

合金 $S-N$ 曲线。由图可见，炭钢 $S-N$ 曲线存在有水平直线段，并且如果试件经 10^7 次循环仍不破坏时，则实际上它将可承受无限次的循环。然而铝合金 $S-N$ 曲线没有水平直线段，因此，常以某一指定

的破坏循环数 N 所对应的最大应力 σ_{\max} 作为“条件疲劳极限” σ_{-1} 。这个指定的破坏循环数称为“循环基数”，铝合金循环基数常取 10^7 循环以上。

应力水平的高、低取决于试件的破坏循环数的多、少，破坏循环数越多，表示应力水平越低。接近疲劳极限的应力即属低应力水平。

各种材料的 $S-N$ 曲线的形状有很大差异，特别是对铝合金材料，即使是同类型材料的 $S-N$ 曲线有时也差别很大。一般材料的 $S-N$ 曲线，按其破坏循环数的多少可分为三个区域：

① 短寿命区——指的是破坏循环数大致在 10^4 以内，应力水平较高。

② 中等寿命区——破坏循环数大致在 $10^4 \sim 10^6$ 范围内。

③ 长寿命区——破坏循环数在 10^6 以上，应力水平较低。

对于中等寿命区，表达 $S-N$ 曲线的经验公式一般有两种：

① 幂函数

$$\sigma_a^m N = C$$

式中 m 及 C 是待定常数， m 值与应力比、材料性质和试件外形等有关。将上式两端取对数，并移项后得到

$$\lg \sigma_a = -\frac{1}{m} \lg N + \frac{1}{m} \lg C$$

可见，应力幅 σ_a 与破坏循环数 N 成幂函数关系，即相当于在双对数坐标中， σ_a 与 N 成线性关系，或在等间距坐标中 $\lg \sigma_a$ 与 $\lg N$ 成线性关系。

② 指数函数

$$e^{\alpha \sigma} N = C$$

式中 α 及 C 是待定常数， σ 表示 σ_{\max} 或 σ_a ，

$$e = 2.718$$

将上式两端取对数：

$$\alpha \sigma \lg e = \lg C - \lg N$$

上式表明， σ 与 N 成指数函数关系，即相当于 σ 与 $\lg N$ 成线性关系。

对于中、长寿命区，S-N曲线可由以下经验公式表示：

$$\sigma = C \left(1 + \frac{A}{N^\alpha} \right)$$

式中C、A和 α 为待定常数。C为 $N \rightarrow \infty$ 时的应力幅 σ_a 或最大应力 σ_{max} ，可代以疲劳极限。

三、等寿命曲线

现代轴向加载疲劳试验机，可以进行各种非对称循环的疲劳试验，如指定任一应力比或任一平均应力。在一定的应力比下，利用一组试件，进行疲劳试验，可以测得一条S-N曲线。当应力比改变时，材料的S-N曲线也有所变化。当给定若干个应力比数值时，则可测得一族S-N曲线，图9就是根据某种铝合金板材试验结果得到的不同应力比的S-N曲线族。

如在 $N=10^7$ 处作一垂直线（图9中虚线），则该线与各条S-N曲线交点的纵坐标，表示在指定寿命为 10^7 时对应各应力比的最大应力 σ_{max} 。根据每一应力比R及其对应的 σ_{max} ，可计算出 σ_{min} 和 σ_m 。以 σ_{max} 和 σ_{min} 为纵坐标， σ_m 为横坐标，则可绘出“等寿命曲线”，如图10所示。曲线 \widehat{AB} 为 σ_{max} ；曲线 $\widehat{A'B}$ 为 σ_{min} ，它们分别表示材料经 10^7 应力循环发生疲劳破坏所需的 σ_{max} 和 σ_{min} 。在曲线 \widehat{AB} 和 $\widehat{A'B}$ 包围的面积内，表示材料经 10^7 循环不会发生疲劳破坏的交变应力范围。

在对称循环条件下， $\sigma_m=0$ ，此时

$$\sigma_{max} = -\sigma_{min} = \sigma_a = \sigma_{-1}$$

式中 σ_{-1} 是以 10^7 为循环基数的条件疲劳极限。在静载荷条件下：

$$\sigma_{max} = \sigma_{min} = \sigma_m = \sigma_b \text{ (强度极限) , 如图15-10}$$

中的B点所示。若用直线联接O、B二点，则 \overline{OB} 为一倾斜 45° 的直线。因为，曲线 \widehat{AB} 和 $\widehat{A'B}$ 分别表示 σ_{max} 和 σ_{min} ，并且 \overline{OB} 线上各点的纵坐标等于横坐标 σ_m ，所以，曲线 \widehat{AB} 、曲线 $\widehat{A'B}$ 与直线 \overline{OB} 所夹的垂直线段均为 $\sigma_a \cdot \sigma_a$ 就是在给定 σ_m 下材料经 10^7 循环发生疲劳破坏所需的应力幅。

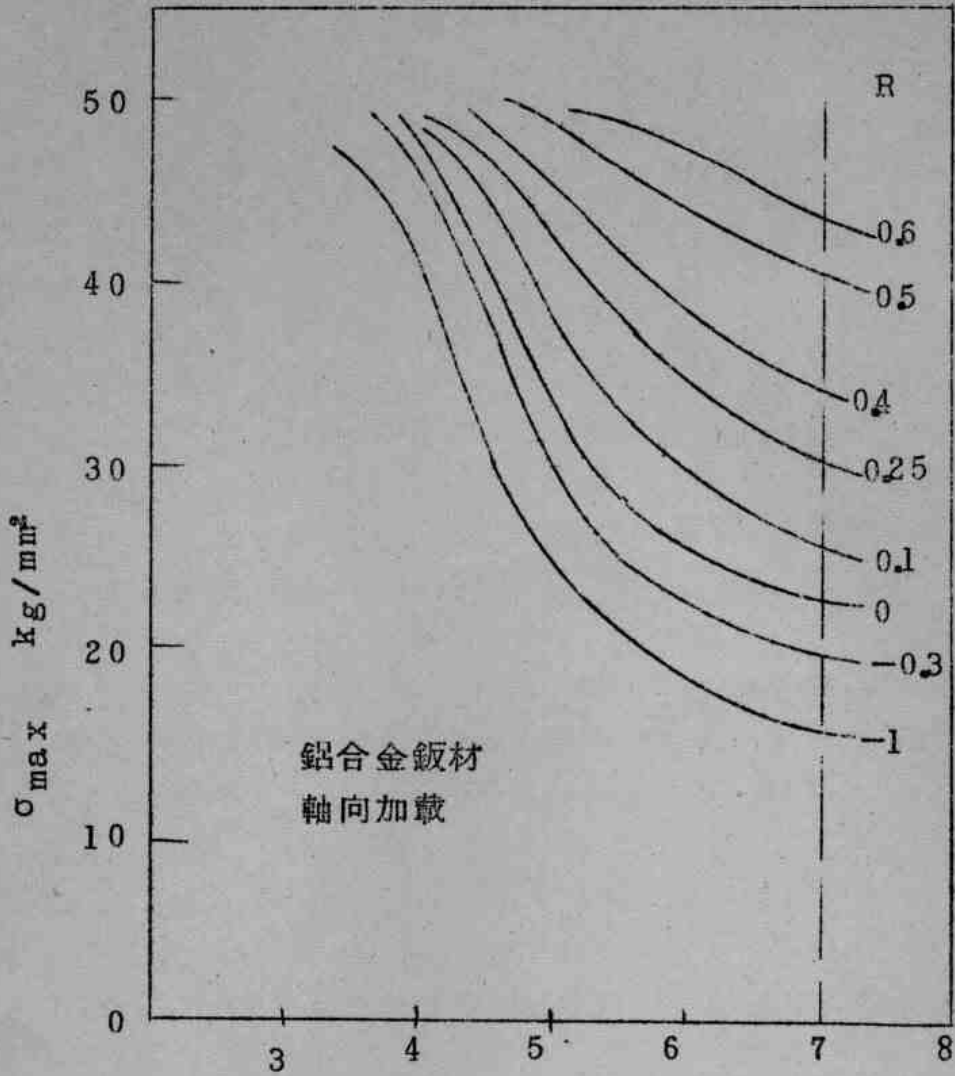


图 9

对于炭鋼來說， 10^7 循环的等寿命曲綫，实际上表示材料经受无限次循环而不发生疲劳破坏的 σ_{max} 和 σ_{min} 值，也就是在各种平均应力 σ_m 下的疲劳极限图。按以上所述原理，每指定一疲劳寿命，根据 $S-N$ 曲綫族，即可作出一等寿命曲綫，可見等寿命曲綫表示的是在指定寿命下交变应力的极限值。

习惯上，还常常将等寿命曲綫繪成图 11 所示的形式，即以 σ_m 为横座标； σ_a 为纵座标。曲綫 AB 上任一点的横座标与纵座标之和表示 σ_{max} 。在曲綫与座标軸所包圍的面积內，表示材料经某一指定循环不会发生疲劳破坏的交变应力范围。

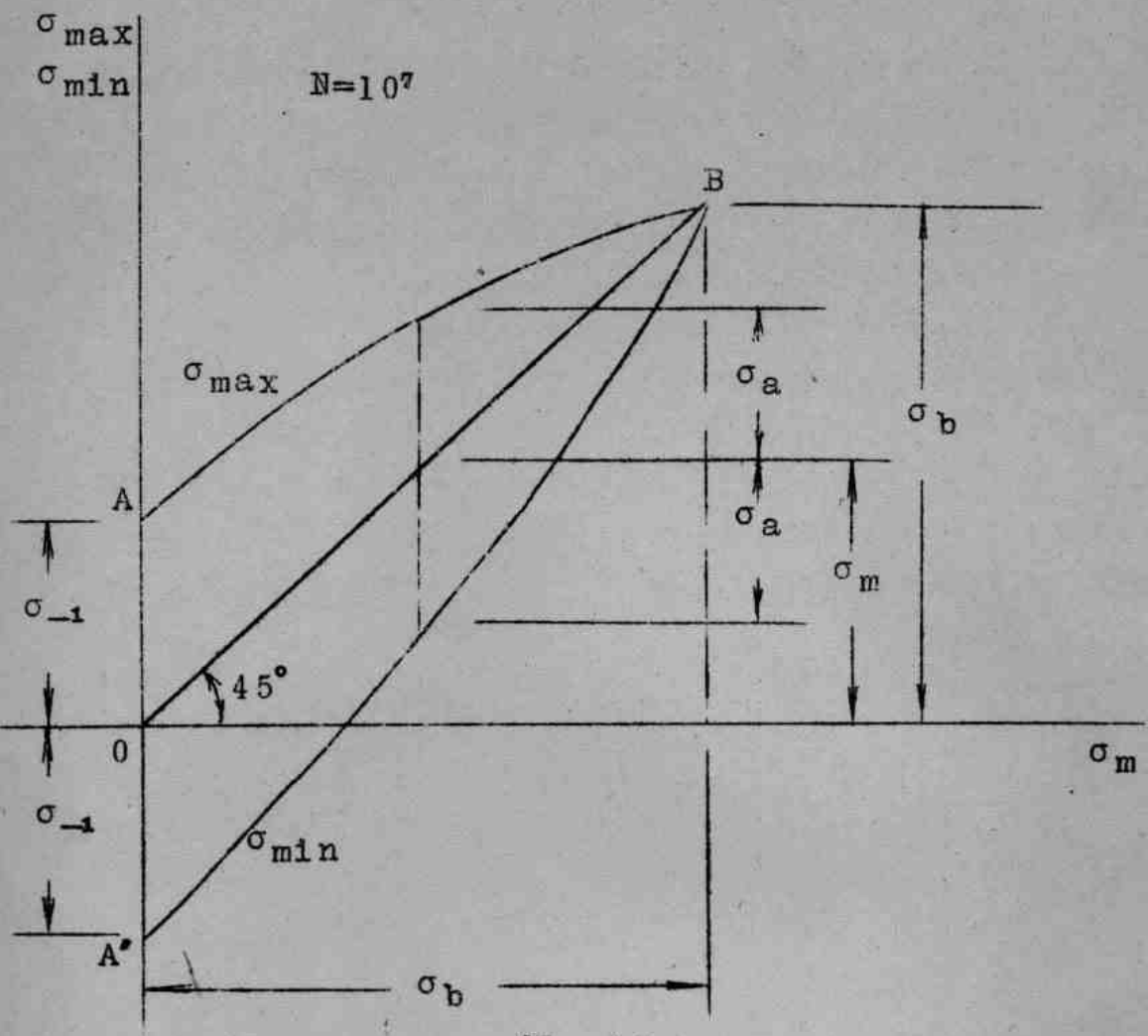


图 10

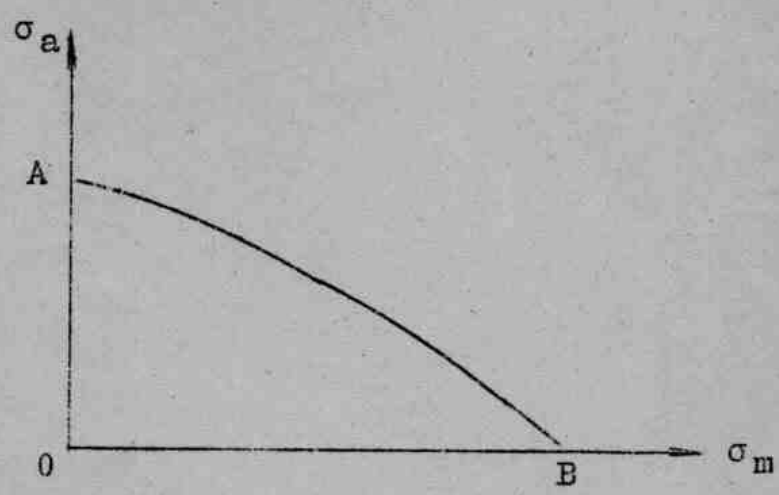


图 11

四、影响疲劳极限的主要因素

在二、三节中已经介绍了材料在交变应力作用下的疲劳性能，它是根据光滑小试件的疲劳试验结果得到的。但实践经验指出：零构件的疲劳强度与材料疲劳强度有所不同，零构件的疲劳强度不仅取决于材料性质，而且与其外形、尺寸大小以及加工工艺等因素有关。因此，本节将分别介绍这些因素对疲劳极限的影响。

(一) 零构件外形的影响——应力集中系数

在构件外形突然变化或材料不连续的局部地区，如轴的直径改变处、键槽、螺紋、孔洞、壁板开口处等，常常产生很大的局部应力。如图12所示中间带有小圆孔的薄板，承受拉力 P 的作用。在远离圆孔的横截面A—A上，其应力是均匀分布的。但在B—B横截面上，靠近孔边缘的局部范围内，则应力很大，这种应力局部增大的现象叫做“应力集中”。

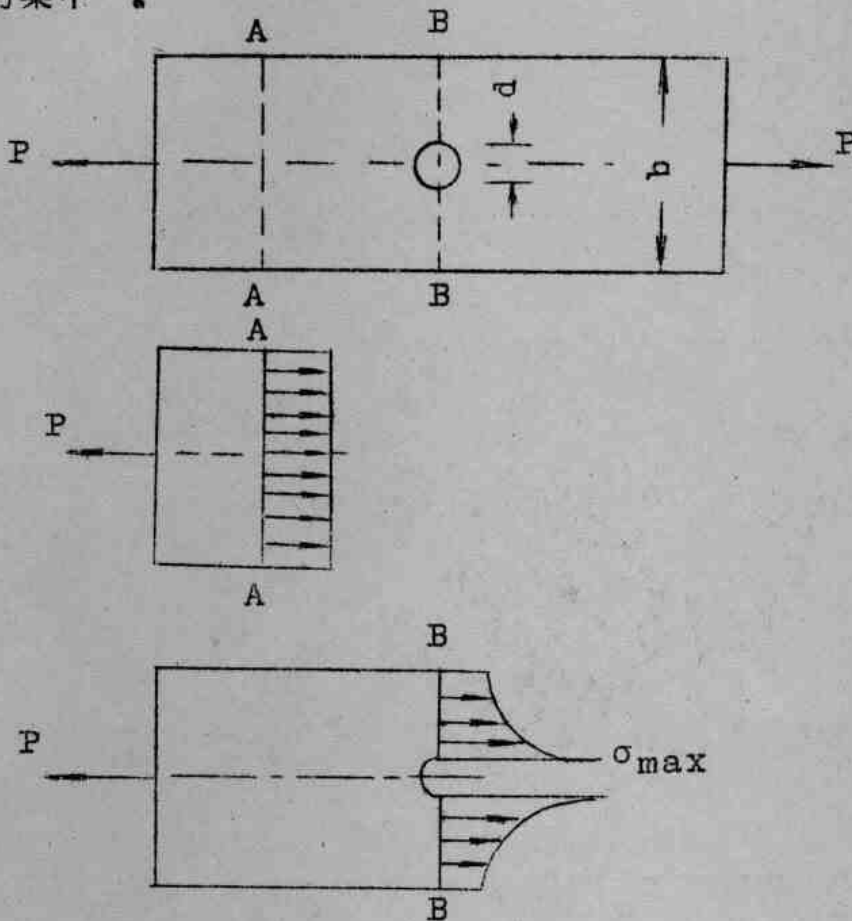


图 12

对于塑性材料制成的构件，在静力作用下，应力集中对强度几乎没有影响，或影响很小。因为具有局部应力的不均匀分布情况，只能维持到最大应力峰值 σ_{\max} 达到屈服应力以前。当 σ_{\max} 达到屈服应力时，虽然载荷 P 继续增加，但已屈服的部份，只产生变形，应力不再增加。而同一截面上未屈服的部份，应力将随着拉伸变形的增加而增加，以负担增大的载荷。这些部份应力的继续增加，将会赶上那些已经屈服部份的应力，从而使得整个截面的应力在破坏前就趋于均匀化。这就是在静力作用下对塑性材料的构件为什么不考虑应力集中的理由。

然而，应力集中对疲劳强度则影响极大，并且是各种影响因素中最重要的因素。因为大量的破坏事件和试验研究都曾指出：零件在交变应力作用下，截面绝大部分材料还处于弹性阶段时，疲劳裂纹就会在应力集中区开始形成并逐步扩展。

应力集中的严重程度用“应力集中系数” K_t 来表示：

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad (5)$$

式中： σ_{\max} 为局部应力。 σ_n 叫做“名义应力”，它是在不考虑外形变化的条件下求得的。譬如，对于图12的受拉薄板，若板厚为 t ，则横截面 B—B 的名义应力等于

$$\sigma_n = \frac{P}{(b-d)t}$$

名义应力是按材料力学方法计算得到的，而局部应力则是按“弹性力学”理论计算方法或“光弹性”实验方法得到的。

由于实际零件应力集中的存在，零件疲劳极限要比无应力集中的光滑试件疲劳极限低，降低的倍数用“有效应力集中系数” K_σ 来表示：

$$K_\sigma = \frac{(\sigma_{-1})_d}{(\sigma_{-1})_d^K} \quad (6)$$

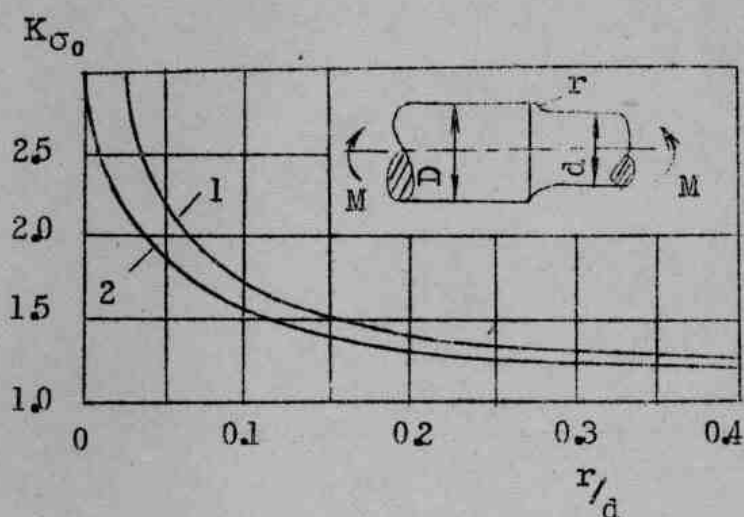
式中 $(\sigma_{-1})_d^K$ 为零件疲劳极限； $(\sigma_{-1})_d$ 为与零件同尺寸的光滑大试件疲劳极限， K_σ 总是大于1的。应该指出：根据疲劳试验测定 K_σ 值时， $(\sigma_{-1})_d^K$ 指的是在应力集中处的名义应力值。符号 K_σ 表示弯曲和拉—压时的有效应力集中系数，对于扭转的情况，有效应力集中

系数用 K_{τ} 表示:

$$K_{\tau} = \frac{(\tau_{-1})_d}{(\tau_{-1})_d^K} \quad (7)$$

式中: $(\tau_{-1})_d^K$ 是零件扭转时的疲劳极限; $(\tau_{-1})_d$ 是光滑大试件扭转时的疲劳极限。

图13、图14和图15分别表示在对称循环下弯曲、拉—压和扭转时的有效应力集中系数曲线,它们是根据 $D/d=2$ 、 $d=30 \sim 50$ mm大试件的试验结果得到的。当 $D/d < 2$ 时,则有效应力集力系



曲线1 — $\sigma_b = 120 \text{ kg/mm}^2$

曲线2 — $\sigma_b = 50 \text{ kg/mm}^2$

图13 弯曲时有效应力集中系数

数须用下式修正:

$$K_{\sigma} = 1 + \xi (K_{\sigma_0} - 1) \quad (8)$$

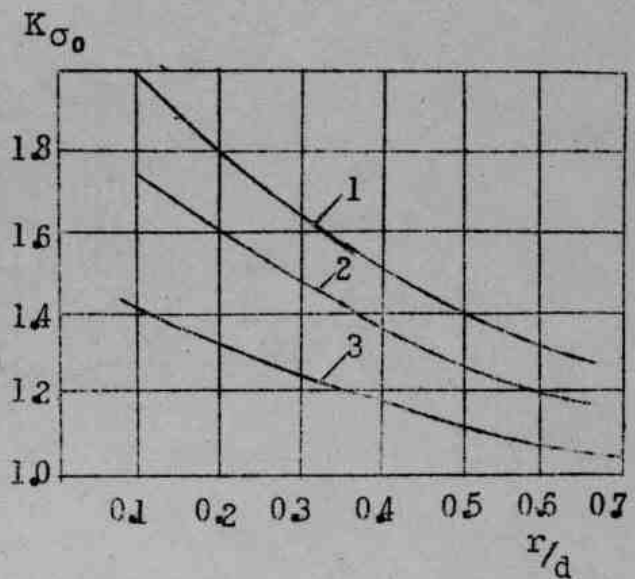
$$K_{\tau} = 1 + \xi (K_{\tau_0} - 1) \quad (9)$$

式中: K_{σ_0} 与 K_{τ_0} 均为 $D/d=2$ 时的有效应力集中系数。修正系数 ξ 可由图16中查得。如果钢材强度极限 σ_b 介于 $50 \sim 120 \text{ kg/mm}^2$ 之间,则可利用内插法求 K_{σ_0} 或 K_{τ_0} 值。

由图13~图15可以看到,钢材的 σ_b 愈高,则有效应力集中系数 K_{σ_0} 及 K_{τ_0} 愈大,所以应力集中对高强度钢的疲劳极限影响较大。

曲綫1 — $\sigma_b = 120 \text{ kg/mm}^2$
 曲綫2 — $\sigma_b = 80 \text{ kg/mm}^2$
 曲綫3 — $\sigma_b = 40 \text{ kg/mm}^2$

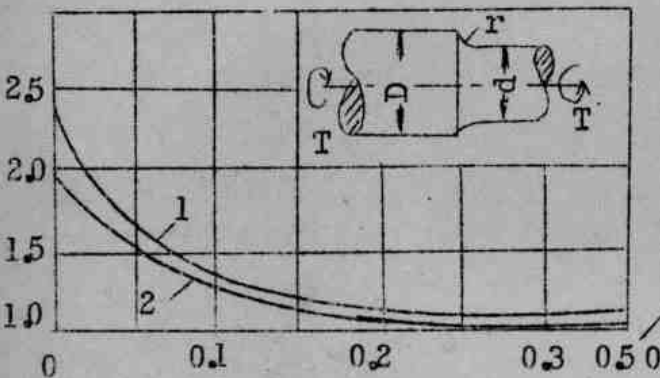
图 14 拉—压时有效应力集中系数



当给定直径 d 时，圆角半径 r 愈小，应力集中也愈严重。

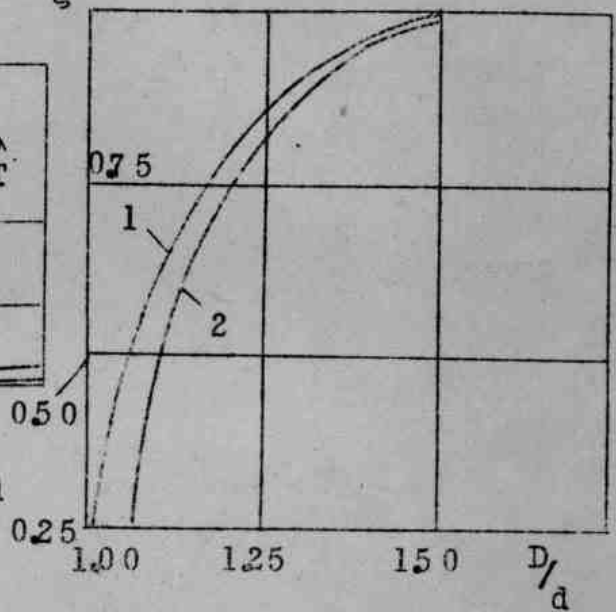
K_{τ_0}

ξ



曲綫1 — $\sigma_b = 120 \text{ kg/mm}^2$
 曲綫2 — $\sigma_b = 50 \text{ kg/mm}^2$

图 15 扭轉时有效应力集中系数



曲綫1 — 弯曲及拉—压
 曲綫2 — 扭轉

图 16 修正系数曲线

(二) 零构件尺寸的影响——尺寸系数

試驗結果指出：疲劳极限随尺寸的增大而降低。其降低的原因，可借助“应力梯度”的概念来解释。如图 17 所示大小两个圆截面杆承受弯矩的作用，在最大应力 σ_{max} 相同的条件下，大试件的应力梯度 $t_g \theta$ 小，接近 σ_{max} 的高应力区较厚，有较多的金属结晶颗粒受到高

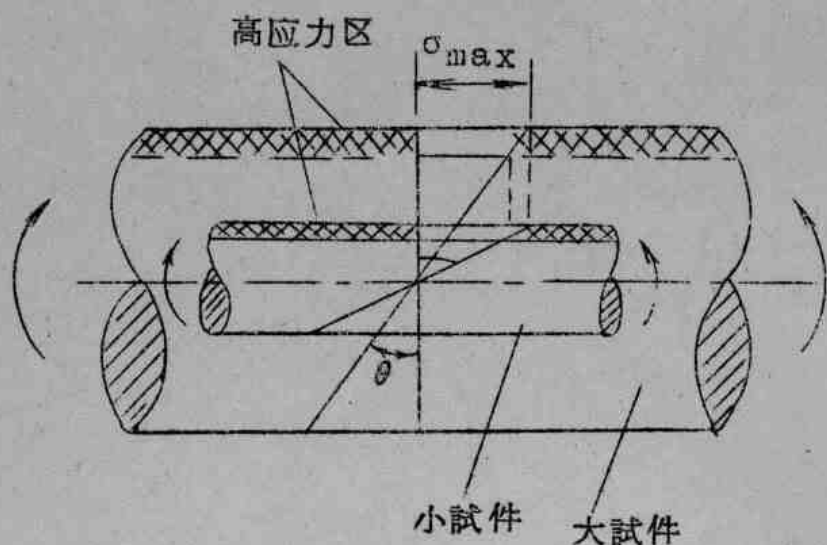


图 17

应力的作用。对疲劳强度来说，至少要有一定量的晶粒达到某一应力极限值时，才会产生疲劳裂纹，这样，大试件出现疲劳裂纹的可能性必然就比较大。另一方面，高强度钢的金属晶粒比较细小。在尺寸相同的情况下，晶粒越小，则高应力区所包含的晶粒个数越多，也就容易形成出现疲劳裂纹的条件。因此，高强度钢受尺寸影响较为严重。

尺寸大小的影响，可用“尺寸系数”表示。设在对称循环下光滑大试件的疲劳极限为 $(\sigma_{-1})_d$ ，光滑小试件的疲劳极限为 σ_{-1} ，则二者的比值称为尺寸系数 ϵ ：

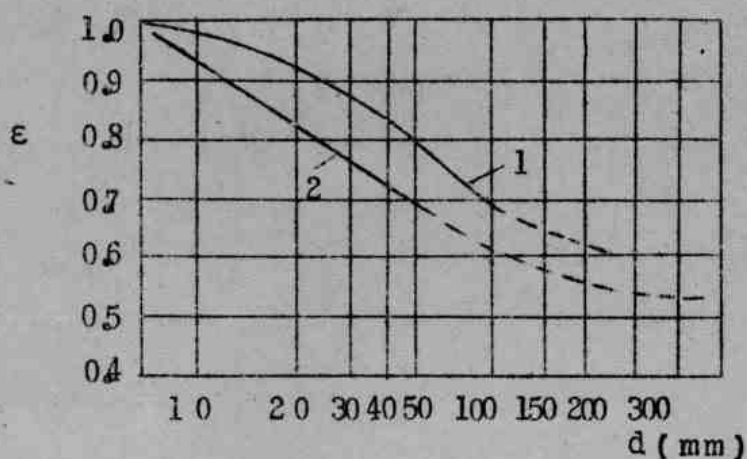
$$\epsilon = \frac{(\sigma_{-1})_d}{\sigma_{-1}} \quad (10)$$

由于 $(\sigma_{-1})_d < \sigma_{-1}$ ，所以 ϵ 是小于1的。图18给出了尺寸系数 ϵ 的曲线，这些曲线是根据旋转弯曲试验结果得到的，也可以近似地应用于反复扭转的情况。由这些曲线可明显地看到疲劳极限的降低程度，特别是高强度钢受尺寸的严重影响。

在轴向加载时，由于不存在应力梯度，尺寸影响不大，故可取 $\epsilon=1$ 。

(三) 表面加工的影响——表面加工系数

经验告诉我们：表面加工质量对零构件静强度无显著影响，但对疲劳强度则影响甚大。因此在进行疲劳强度计算时，应考虑这一因素。



曲綫 1: $\sigma_b = 50 \text{ kg/mm}^2$

曲綫 2: $\sigma_b = 120 \text{ kg/mm}^2$

图 18 零件尺寸系数

表面加工对疲劳极限的影响，可用“表面加工系数” β 表示。 β 是某种加工试件的疲劳极限与光滑试件（磨削加工）的疲劳极限之比，它是一个小于1的系数，表示疲劳极限降低的百分数。图19给出了钢材在不同表面加工方法下 β 与静强度极限 σ_b 的关系。由图可知，表面加工系数随材料静强度的增大而降低，亦即材料静强度越高，表面光洁度对疲劳极限的影响越大。因此，对于高强度合金钢，特别需要注意慎重加工，保证有足够的光洁度，否则将会冒着有使优质钢浪费的危险。

例1. 如图20所示轴由钢材制成。已知： $D=44 \text{ mm}$ ， $d=40 \text{ mm}$ ，圆角半径 $r=2 \text{ mm}$ ，强度极限 $\sigma_b=90 \text{ kg/mm}^2$ ，试求出此轴在对称循环下弯曲时的有效应力集中系数 K_{σ_0} 。

解：

$$\frac{D}{d} = \frac{44}{40} = 1.1, \quad \frac{r}{d} = \frac{2}{40} = 0.05$$

由图13曲线中可查得 $D/d=2$ 、 $r/d=0.05$ 时的 K_{σ_0} 值：

对于 $\sigma_b=120 \text{ kg/mm}^2$ 的钢材， $K_{\sigma_0}=2.25$ 。

对于 $\sigma_b=50 \text{ kg/mm}^2$ 的钢材， $K_{\sigma_0}=1.90$ 。

对于 $\sigma_b=90 \text{ kg/mm}^2$ 的钢材， K_{σ_0} 值可用内插法求得：