

电站、石油化工、压力容器、工业锅炉用

热强钢高温强度性能数据汇编

吴天禄 程廷锡 杨忠涛 邵红斌

一九八五年十二月



前 言

本书介绍的金属材料高温强度性能包括高温屈服强度、高温抗拉强度、蠕变与持久强度及相应的高温短时塑性与持久塑性。它们是电站机组、工业锅炉、石油化工及压力容器设备高温受力构件静强度设计的选材依据。例如，在锅炉受压元件强度设计中以材料的基本许用应力作为选材依据。基本许用应力则主要决定于材料的屈服强度 σ_s^T 、抗拉强度 σ_b^T 及持久强度 σ_D^T 。而且对这些强度值还有所规定， σ_s^T 、 σ_b^T 必须取大量试验结果的统计最小值， σ_D^T 为大量试验结果的十万小时持久强度平均值。在机组设备的运行部门，例如电厂、化工厂，则往往以这些强度指标在运行期间的变化作为继续安全运行的判断依据，常常以大量的实物抽样作材料的强度性能检验。在材料的生产部门（例如钢厂）与使用部门（设备制造厂）之间，则以材料强度性能保证值（或下限值）作为合格出厂及入厂验收的准绳。自然，材料的研制单位，则以取得较高的强度性能作为主要的科研目标。劳动安全监察部门则以高温强度作为安全控制的法定标准。在材料的研制、生产、使用与机组设备的运行中，其每一个流通环节均以高温强度指标作为质量控制的标准，以期最终保证设备的安全可靠运行。

由此可见，如何测试并合理、客观地评定材料的高温强度性能的工作影响面广，涉及许多行业，如设计与制造，运行与监察，以及各种标准及规程的制订、修改。但是，国内常用钢种现有的高温强度性能数据大多残缺不全，即使现有标准载列的亦有数据不多，依据不足等疑虑。例如，20钢的高温短时强度是参照国外的，JB2194-77许用应力表中，II1102，无铬8号钢，都没有高温短时强度数据。一些常用钢种的持久强度性能数据大多不全，现供设计的数据，大部分是钢种研制阶段或试生产初期的数据以及国外同类钢种的参考数据。有些钢种冶炼工艺已有变动，有些材料（如II11）热处理规范作了调整。鉴于上述原因，原有的数据已很难反映我国目前大生产条件下的材料高温强度水平。

为此，近十年来，国内作了大量工作，测得了一批高温强度性能数据，有些则是一些单位经联合试验研究取得的。我们收集了这些数据，经过整理，分析与计算，把所得结果比较系统地介绍出来，供各单位利用。这些数据都是近期大生产条件下抽样检验的结果。因此有代表性。

本书收集的高温强度性能数据，得来殊非易事，是通过大量的长时的试验研究取得的，是一项耗资巨大的工作。数据极为宝贵。我们暂以汇编的形式发表，以便尽早推广应用，在实际生产中及早发挥效益。其中有些数据可供构件强度设计人员直接采用；有些还可供制订与修改各种行业的材料标准及构件强度设计的许用应力标准；有些则可供机组设备运行部门在安全运行监督工作中作为参考。

电站机组的设计寿命为10万小时，目前，对大型机组将提高到20—30万小时。此外，到目前为止，已有大批机组超期服役。对这些长期运行及超期服役机组安全运行的可靠性如何，是一项急待研究的课题。安全运行的可靠性与材料在运行期间高温强度的弱化倾向有关。本书收集了这方面的试验资料，以供进一步的研究与参考。

根据数据的不同来源及高温强度的各种影响因素,在验证了数据统计分布规律的基础上,提出了计算高温强度置信区间的两个公式

$$\lg t \equiv f(\sigma, T) \pm u_p \sigma \quad (\text{持久寿命})$$

$$\sigma = f(T) \pm \sum_{i=1}^3 \left(0.9 \sqrt{\frac{n+1}{n}} \hat{\rho} + \sqrt{\frac{t_c S}{n-1}} \right) \quad (\text{高温短时强度})$$

根据上述公式,我们提出了在95%信度下置信区间的下限值,作为推荐的下限值,它带有统计意义。一般泛指的下限值,定义不够明确,缺乏统计依据。统计结果除可作一般设计参考外,还可用于可靠性设计。不难看出,下限值除了与材料的平均强度有关外,还与其分散程度有关。平均强度高而分散程度大的材料,其下限值并不一定就高,有时恰恰相反。

书中列出的一些结果,都标明了经验公式及计算方法,这些内容在第一章及附录里都尽可能作了详细介绍。推荐的一些经验公式及统计处理方法是属于最常用的,既不是唯一的,也不一定就是最合理的,尚须共同研究与探讨。

本书第一章介绍了高温持久强度与高温短时拉伸试验的一些基本规律及知识、数据处理与统计计算公式。第二章是各钢种强度性能的原始数据及统计计算结果。附录介绍了强度数据统计分布规律的验证、统计计算方法及实例。

有许多同志做了大量的测试工作,其中参加联合试验,做了大量试验研究工作并协助收集数据的同志有杨宜科、李德元、董富、郝振西、宋传国、徐振林、李嘉熲、朱延久、王德泰、邹德泉、梁锋等同志,还有沈华琪同志参加编辑审校工作,在此一併致谢。

由于编者接触面有限,一定会有不少宝贵数据未及收入,还望大家推荐。此外,本书谬误之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编者 一九八五年十二月

目 录

第一章 高温强度试验

1.1 高温持久强度	1
1.1.1 高温持久强度试验	1
1.1.2 高温持久强度曲线	1
1.1.3 持久强度公式	1
1.1.4 蠕变断裂时间的统计分布规律	2
1.1.5 持久强度的内插与外推	3
1.1.6 运行材料的持久强度	7
1.1.7 高温持久塑性	7
1.2 高温短时拉伸性能	8
1.2.1 高温短时拉伸试验	8
1.2.2 高温屈服强度	9
1.2.3 高温抗拉强度	10
1.2.4 高温塑性性能	10
1.2.5 高温短时拉伸强度的统计分布规律	11
1.2.6 高温短时拉伸强度的统计处理方法	12
1.2.7 高温短时拉伸强度与温度之间的关系	14

第二章 高温强度性能

2.1 10钢	16
2.2 20钢	29
2.3 20g钢	52
2.4 16Mn钢	67
2.5 16Mng钢	69
2.6 12MoCr 钢(运行)	80
2.7 10CrMo910钢(运行)	87
2.8 15CrMo 钢	101
15CrMo 钢(运行)	135
2.9 CSN15123钢(运行)	140
2.10 CSN15225钢(运行)	146
2.11 12Cr1MoV钢	149
12Cr1MoV钢(联邦德国进口大口径钢管)	179

12Cr1MoV钢(运行)	194
2.12 10MoWVNb钢(革106)	219
2.13 18MnMoNb钢	226
2.14 20MnMoNb钢	232
2.15 12MoVWBSiRe钢(无路8号钢)	234
2.16 12Cr2MoWVB钢(102钢)	251
2.17 12Cr3MoVSiTiB钢(Π11钢)	285
2.18 X20CrMoWV121钢(F11钢)	308
2.19 Cr11MoV钢	314
2.20 Cr17Ni13W钢	317
2.21 QT40—10铸钢	319

附 录

1. 多元线性回归分析及计算	323
2. 蠕变断裂时间的对数正态分布验证	327
3. 高温短时拉伸强度的正态分布验证	331
4. 高温短时拉伸强度的统计计算	336

第一章 高温强度试验

1.1 高温持久强度

1.1.1 高温持久强度试验

金属在一定的温度和持续的应力作用下会发生缓慢的塑性变形,这种现象称为金属的蠕变。在温度和应力的持续作用下,蠕变变形逐渐增加,最终发生断裂,这种断裂称为蠕变断裂。导致断裂的初始应力称为蠕变断裂应力。把这种应力作为材料的性能指标来讨论时称为蠕变断裂强度。由于这种性能属于长时性能,所以又称它为持久强度。

一些在高温受力状态下工作的构件需以持久强度作为主要的设计指标。锅炉、汽轮机燃气轮机机组的设计寿命一般为数万至十万小时,需要根据相应时间的持久强度进行设计。随着生产技术的发展,各种构件的工作温度和工作应力越来越高,就需选用具有较高持久强度性能的材料制造。持久强度性能成为决定高温金属材料使用价值的重要因素。

持久强度是材料在规定的温度和规定的时间下保持不失效的最大应力。通常,以试样在恒定温度和恒定拉伸负荷下到达某规定时间发生断裂的蠕变断裂应力表示。记为 σ_D^T 单位为 kgf/mm^2 。例如 σ_{10}^{600} 表示 600°C 十万小时断裂的持久强度。

持久强度试验是一种测定试样蠕变断裂时间的试验方法,它是在专用的蠕变或持久强度试验机上进行的。试验期间使试样保持恒定温度和恒定拉伸负荷,测定其到达断裂所持续的时间。试验按《高温拉伸持久试验法》进行。

在各种温度 T 和应力 σ 下。测出多个试样的断裂时间 t ,作出各种温度下的 $\sigma-t$ 曲线。再根据曲线外推出多种温度下到达规定断裂时间的应力,即为所需的持久强度。

1.1.2 高温持久强度曲线

蠕变断裂应力与蠕变断裂时间之间的关系曲线称持久强度曲线。在双对数坐标上,它的基本形状如图 1-1。应力随时间的增加逐渐下降,有两个转折,把曲线分隔为三个下降区。第一区下降平缓,第二区下降较快,第三区下降又趋缓和。转折处过渡比较平滑,转折的出现有早有迟。长时性能较差,高温下组织稳定性较差的材料,转折出现得较早。图 1-2 为不同温度下的持久强度曲线,它表达了断裂时间与温度和应力三者之间的关系。显然在 σ, T, t 直角坐标系中是一个三维曲面。

1.1.3 持久强度公式

持久强度公式是把应力、温度、断裂时间之间的关系用数学方法表示的一种解析表达式,目前已有百余种,大多数是一种经验公式。持久强度公式的普遍形式为

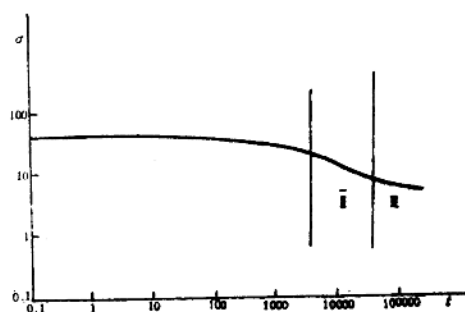


图 1-1 典型的持久强度曲线

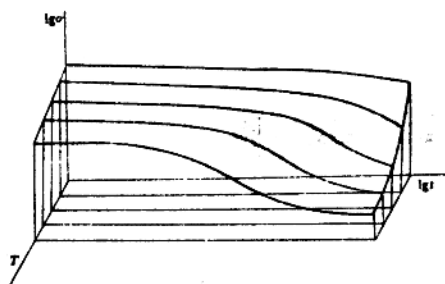


图 1-2 不同温度下的持久强度曲线组成的曲面

$$F(T, \sigma, t) = 0 \quad (1)$$

T ——温度

σ ——应力

t ——时间

当温度相同时, $T = \text{常数}$, 公式 (1) 便为

$$F(\sigma, t) = 0 \quad (2)$$

当 σ 与 t 之间为分离函数时可以表示为

$$t = F(\sigma) \quad (3)$$

常用的有幂函数和指数函数两种形式

$$t = A\sigma^{-B} \quad (4)$$

$$t = Ae^{-\beta} \quad (5)$$

A, B, α, β ——与材料和温度有关的常数。

因温度相同, (4)、(5) 又称等温线公式, 本书是以等温线公式 (4) 计算的。

当温度不同, 但应力可以成为分离函数时式 (1) 可以表示为

$$F(T, t) = P(\sigma)$$

它是时间—温度参数公式的一般形式。常用的有以下两种

$$\lg t - \frac{Q}{RT \ln 10} = P(\sigma) \quad (\text{K-D 公式}) \quad (7)$$

$$T(C + \lg t) = P(\sigma) \quad (\text{L-M 公式}) \quad (8)$$

Q ——蠕变激活能

R ——气体常数, 1.986467 卡/克分子

C ——L-M 参数

T ——绝对温度 K

t ——断裂时间 h

σ ——应力 kgf/mm^2

$P(\sigma)$ ——时间温度参数, 一般为 $\lg \sigma$ 的三次多项式, 也可根据需要选取高于三次的多项式。

本书分别用公式 (7) 和 (8) 进行计算。

时间温度参数 P 与 σ 之间的关系曲线 $P \sim \sigma$ 称时间—温度参数综合曲线或简称参数曲线。曲线的形状见图 1-3。在外推中, 可以利用综合曲线确定外推应力。本书也给出了材料的时间—温度参数综合曲线。

1.1.4 蠕变断裂时间的统计分布规律

在金属材料高温强度试验中, 由于受冶金、热处理, 生产工艺及测试技术等多种因素的影响, 同一种材料的试样, 在同一试验条件(温度相同、应力相同)下, 其断裂时间有很大差别。从本书后面所列数据可以看出, 在相同温度和相同应力下断裂时间可以相差若干倍。这种离散倾向是普遍存在的, 它的规律性可以用统计方法进行研究。

持久强度断裂时间的统计分布是描述断裂时间取值概率与断裂时间取值之间的规律的一种寿命分布函数。经我们多年研究证明(见附录), 它服从对数正态分布函数

$$P = \int_{-\infty}^{\lg t} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\lg t - \mu)^2}{2\sigma^2}} d\lg t \quad (9)$$

t ——断裂时间

p ——断裂时间 $\leq t$ 事件出现的概率

μ ——正态分布参数, 平均值

σ ——正态分布参数, 根方差

断裂时间的对数正态分布规律是持久强度统计计算的基础。根据式 (9) 可以计算断裂时间的分散区间。在相同试验条件下, n 个试样的断裂时间为 $\lg t_i, i = 1, 2, \dots, n$, 则分散区间为

$$\lg t = \overline{\lg t} \pm u_p \sigma$$

$$\overline{\lg t} \text{——平均值, } \overline{\lg t} = \sum_{i=1}^n \lg t_i / n$$

u_p ——标准正态分布分位数, 95% 信度时 $u_p = 1.96$

$$\hat{\sigma} \text{——根方差的估计量 } \hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\lg t_i - \overline{\lg t}]^2}{n-1}}$$

大约有95%的试样其断裂时间处于分散区间

$$\lg t = \overline{\lg t} \pm 1.96 \hat{\sigma}$$

之内。大约有97.5% (当指单边估计时, 应另加高于上限值的概率 2.5%) 的试样其断裂时间可望大于

$$\lg t = \overline{\lg t} - 1.96 \hat{\sigma}$$

1.1.5 持久强度的内插与外推

持久强度试验只能测定在规定应力规定温度下的断裂时间, 要得到规定断裂时间下的应力或温度, 就需根据一定的经验公式进行内插或外推。在试验参数范围内求取时为内插, 例如内插温度和内插应力; 当在试验参数范围以外求取时为外推, 例如外推长时区的强度。

在计算持久强度时, 首先需选定经验公式, 再采用适当的拟合方法求出公式的常数。拟合方法一般有最小二乘法, 最大似然函数法及线性回归方法。

本书以等温线公式 (4) 外推时, 用最小二乘法计算, 比较方便。对 (4) 取对数 (令 $y = \lg \sigma$,

$x = \lg t$, $a = \frac{\lg A}{B}$, $b = -\frac{1}{B}$, 则可线性化为

$$y = a + bx$$

设 n 个试验点为 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$ 数据结构方程

$$y_i = a + bx_i$$

最小二乘原理是说结构方程偏差平方和

$$D^2 = \sum (y_i - (a + bx_i))^2$$

最小时就是所求的最佳曲线。定出的参数 a 及 b 为最佳参数。解偏导方程

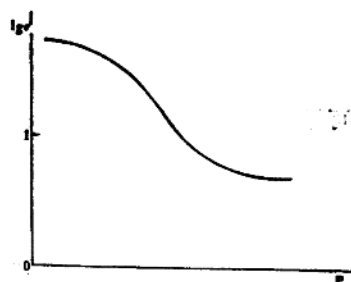


图 1—3 时间温度参数综合曲线

$$\begin{cases} \frac{\partial D^2}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial D^2}{\partial b} = 0 \end{cases}$$

可得

$$a = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} \sum y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum x_i^2 \end{vmatrix}$$

$$b = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} n & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum x_i y_i \end{vmatrix}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} n & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{vmatrix}$$

分散带为

$$y = a + bx \pm u_p \hat{\sigma}$$

u_p ——标准正态分布分位数，信度95%时， $u_p = 1.96$

$$\hat{\sigma} \text{——根方差, } \hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum [y_i - (a + bx_i)]^2}{n-1}}$$

在本书中，对试验点较多的曲线均列出了 a 、 b 、 $\hat{\sigma}$ 及分散带

$$y = a + bx \pm 1.96 \hat{\sigma}$$

上述公式表明，大约有95%的试验点落在分散带内。大约有97.5%的试验点，其强度对数值高于

$$y = a + bx - 1.96 \hat{\sigma}$$

分散带及下限值见图1-4。

a 、 b 及 $\hat{\sigma}$ 也可用带有双变量统计计算性能的一般计算器直接算出，比较方便。

$\hat{\sigma}$ 可使用计算器根据下式计算

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{S_1}{N-2}}$$

$$S_e = L_{yy} - \frac{L_{xy}^2}{L_{xx}} \text{—— 剩余误差}$$

$$L_{xy} = \sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)$$

$$L_{yy} = \sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2$$

$$L_{xx} = \sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2$$

N ——试验点数

其中, $\sum_{i=1}^N x_i$, $\sum_{i=1}^N x_i^2$, $\sum_{i=1}^N y_i$, $\sum_{i=1}^N y_i^2$ 及 $\sum_{i=1}^N x_i y_i$ 在双变量计算器上均可由相应的运算键直接取得。

当用方程(7)、(8)进行外推时需用线性回归方法。设 $P(\sigma)$ 为 $\lg \sigma$ 的三次多项式 (本书除 102 钢用 4 次多项式外其他均用三次) (7)、(8) 可整理为

$$\lg t = c_0 + c_1 \lg \sigma + c_2 \lg^2 \sigma + c_3 \lg^3 \sigma + \frac{Q}{RT \ln 10} \quad (10)$$

$$\lg t = c + c_1 \lg \sigma / T + c_2 \lg^2 \sigma / T + c_3 \lg^3 \sigma / T + c_4 / T \quad (11)$$

在(10)中, 令

$$\lg t = y$$

$$\lg \sigma = x_1$$

$$\lg^2 \sigma = x_2$$

$$\lg^3 \sigma = x_3$$

$$\frac{1}{T} = x_4$$

$$\frac{Q}{RT \ln 10} = c_4$$

在式(11)中, 令

$$\lg t = y$$

$$c = c_0$$

$$\frac{\lg \sigma}{T} = x_1$$

$$\frac{\lg^2 \sigma}{T} = x_2$$

$$\frac{\lg^3 \sigma}{T} = x_3$$

$$\frac{1}{T} = x_4$$

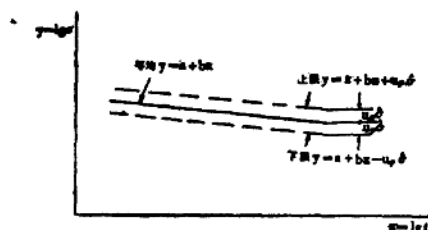


图 1-4 等温线外推持久强度曲线分散带

则两式均可化为统一的线性多项式:

$$y = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_4 x_4 \quad (12)$$

根据 n 个试验点 $(\sigma_i, T_i, t_i) i = 1, 2, \dots, n$, 可以得到包含 n 个方程的数据结构方程组

$$y_i = c_0 + c_1 x_{1i} + c_2 x_{2i} + c_3 x_{3i} + c_4 x_{4i} \quad (13)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

用多元线性回归方法借助计算机可以解得各系数 c_0, c_1, c_2, c_3, c_4 及根方差 $\hat{\sigma}$ 。

平均值方程为

$$\hat{y} = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_4 x_4 \quad (14)$$

分散带为

$$y = \hat{y} \pm u_p \hat{\sigma} \quad (15)$$

u_p ——标准正态分布分位数, 信度为 95% 时, $u_p = 1.96$

$$\hat{\sigma} \text{——根方差, } \hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p - 1}}$$

$\hat{y}_i$ 为第 i 个试验点的计算值或称回归值

$$\hat{y}_i = c_0 + c_1 x_{1i} + c_2 x_{2i} + c_3 x_{3i} + c_4 x_{4i}$$

P 为自变量数,

根据回归分析, 分散带应为

$$y = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_4 x_4 \pm \delta u_p \hat{\sigma} \quad (16)$$

δ ——分散区间系数, 观察值离某平均值越远, 则 δ 越大。

曲线从中间起向两边呈喇叭形放射, 这并不符合断裂时间的分散规律。根据我们大量统计研究表明, 分散带随 $\lg t$ 的增加呈指数形收缩, 因此, 我们取分散区间为常数 $\pm u_p \sigma$ 是偏保守的。长时区偏安全。

各材料外推公式的系数 c_0, c_1, c_2, c_3, c_4 及 σ 在第二章有表列出。

95% 信度下置信区的下限值则为

$$y = \hat{y} - u_p \hat{\sigma} \quad (17)$$

由参数法确定的持久强度曲线的分散带, 平均值及下限值见图 1-5。

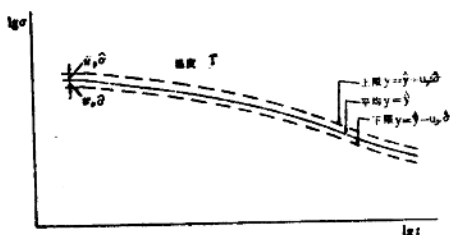


图 1-5 参数外推持久强度曲线的分散带
(曲线只画出了一个试验温度)

用参数法计算可以进行温度内插, 例如, 从 540°C 到 640°C 我们只试验了某几档温度, 需要知道该温度区间内其他各种温度下的断裂时间或应力时只要将该温度代入公式 (14)、(15)、(17) 就可以得到相应的时间或应力。为便于设计人员使用, 书中, 对用参数法计算的几个钢种, 每隔 5°C 列出了持久强度的计算值(平均值及下限值)。根据公式 (14)、(15)、(17), 当给定温度和时间计算持久强度时我们用牛顿迭代法借助计算机算出。

本书给出了参数曲线。根据所需的温度及外推时间算出参数值 P , 再在参数曲线上找

出该参数值 P 所对应的应力，即为所求的持久强度值。

用参数方法外推时，试验温度和试验应力的选择非常重要，在不致引起材料组织发生变化的前提下，尽可能扩大试验温度和试验应力的范围。做到10万小时的外推值包含在试验温度和试验应力的范围内，避免在参数曲线上外推应力。例如外推540°C十万小时持久强度为6kgf/mm²则最低的试验温度应做到540°C，在较高温度档下，最低应力应做到低于6kgf/mm²

当然，上述两个公式并不是普遍适用的，对有些材料可能还需要选用另外的参数公式，例如纯经验性的M—H公式，它几乎与K—D及L—M公式同样著称。选取参数公式的原则是看等应力线簇的形状，由等应力线

$$\lg t = f(T, P), (P = f(\sigma), \sigma = \text{常数})$$

确定 $\lg t$ 与 T 之间的函数关系，再定出参数 P 的时间—温度函数的具体表达式。本书为统一起见，只选用了K—D与L—M公式。

1.1.6 运行材料的持久强度

高温受力构件，具有一定的设计寿命，例如电站机组的螺钉为2万小时，汽包及主蒸汽导管为十万小时。50~60年代投入运行的机组目前均已超过设计寿命。今后将会出现更多的超期服役机组。这些机组安全运行的可靠性将逐步下降。定期割管作持久强度试验是监督材料性能变化的基本方法。在这方面我们积累了不少数据。经统计表明，运行材料的短时强度下降明显，长时强度下降则不如短时强度下降明显。运行材料10⁴及10⁵小时的持久强度随运行时间的增加呈幂函数下降，如图(1-6)。个别一次的取样试验会带来较大的偶然性，例如早期我们曾见过一组试验，得到过运行材料10⁵小时持久强度高于原始材料的不合理结论，但是大量的试验结果则是符合上述下降规律的。

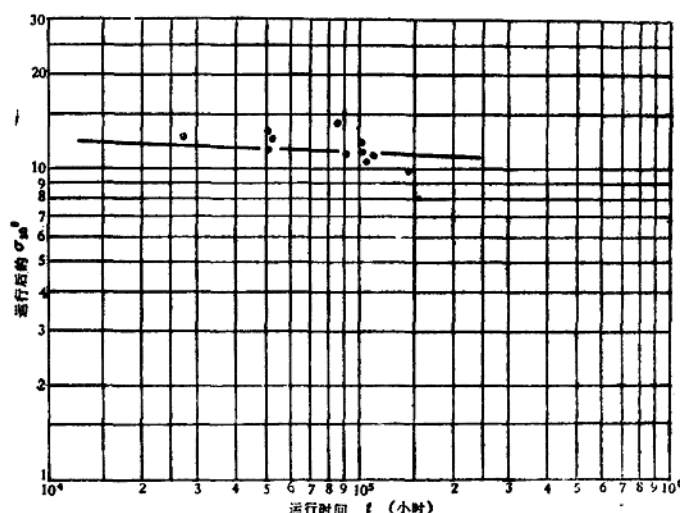


图 1-6 运行材料的十万小时持久强度 σ_{10^5} 与运行时间之间的关系

经过运行的材料，特别是经十万小时以上运行的材料还存在十万小时持久强度，似乎难以理解，但这是大量试验事实。其实因为设计应力较低，实际上是在极保守的应力下运

行的。根据持久曲线的斜率 $b = \frac{\Delta \lg \sigma}{\Delta \lg t}$ 一般仅 0.1 左右, 故只要有 20% 的强度储备, 就可提供一个数量级的剩余寿命。

1.1.7 高温持久塑性

高温持久塑性是指材料在一定温度与一定应力的长期作用下发生塑性变形的能力。它是材料高温性能的重要指标之一。过低的持久塑性会引起脆性破坏, 例如低合金 CrMoV 钢螺钉的脆断。

在圆棒试样拉伸持久强度试验中, 持久塑性以试样断裂后的伸长率 δ 及断面收缩率 ψ 表示。

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} 100\% \quad (18)$$

l_0 ——试样工作部分原长

l ——试样工作部分在断裂后的长度

$$\psi = \frac{S_0 - S}{S_0} = \frac{d_0^2 - d^2}{d_0^2} 100\%$$

d_0 ——试样断裂前的直径

d ——试样断裂后在断口处的直径

在管子爆破试样持久强度试验中, 持久塑性以管子爆破以后的周长变化率 δ 表示

$$\delta = \frac{L - L_0}{L_0} 100\% \quad (19)$$

L_0 ——管子爆破前的外径周长

L ——管分爆破后外径的周长

L_0 可以有二种表示方法, 一种是测量破口处的最大周长, 所得塑性用 $\delta(\text{破口})$ 表示, 另一种是用爆破后管子的平均周长表示, 所得塑性以 $\delta(\text{平均})$ 表示。

必须指出, 用上述伸长率 $\delta[\delta(\text{破口})、\delta(\text{平均})]$ 及收缩率 ψ 表示的持久塑性是一种很不规一化的指标, 它除了取决于材料本身的塑性变形能力以外还与试样的形状、尺寸及受力状态有关, 更重要的还与试验温度及应力有关。例如同样的圆棒试样, 直径不同, 工作长度不同, 所得到的上述塑性指标是不同的; 即使相同尺寸的圆棒试样, 所得塑性指标也因试验温度和试验应力的不同而有差别。对相同形状尺寸的试样, δ 与温度和应力之间的变化规律可以象持久强度参数公式那样用一种称状态方程的经验公式表示。

可见只有相同形状、尺寸的试样, 在相同的试验条件(温度、应力)下, 所得到的持久塑性指标才有可比性。

本书所列的塑性指标 δ 及 ψ , 均指明了试样的尺寸及试验参数。

1.2 高温短时拉伸性能

1.2.1 高温短时拉伸试验

高温短时拉伸试验是在恒定的温度, 规定的拉伸时间或拉伸速度下, 以单向拉伸载荷把试样拉断的试验方法。它是测定材料高温强度指标和塑性指标的最基本的力学试验方

法。这些性能指标是高温受力构件强度设计的基本依据。

试验在带有高温加热炉的一般万能材料试验机上进行，设备及操作应符合YB941—78《金属高温拉力试验法》。

以拉伸载荷 P 作纵座标，试样两标距间的伸长量 Δl 作横座标画出的载荷伸长曲线称为拉伸曲线 $P-\Delta l$ 见图1-7。oe段为弹性变形区，卸载后试样变形可以恢复原状，但其中op段载荷 P 与 Δl 呈线性关系，pe段则稍有偏离。e点以后开始产生塑性变形。到达S点时出现载荷不增加而伸长继续增加的现象，在拉伸曲线上出现一个平台，这种现象称屈服现象。在屈服阶段以后，试样开始出现大量的均匀塑性变形，载荷相应增加，一直达到最高点b。在这一阶段塑性变形抗力随变形量的增加而增加的现象称加工硬化现象。ob点以后，试样开始出现缩颈，随后的塑性变形集中在缩颈区，载荷随着缩颈截面的急剧减小而逐渐下降，直到k点时断裂。本书所列的大部材料，在室温时有明显的屈服现象，当 250°C 以上时，屈服现象逐渐消失。

1.2.2 高温屈服强度

高温屈服强度 σ_s 是材料开始塑性变形时的最小应力，即应力—应变曲线上S点对应的应力。超过S点后均匀塑性变形逐渐增大，达到 S_u 点时变形突然增加，以后载荷又下降到 S_L 点。 S_u 点称上屈服点， S_L 点称下屈服点。下屈服点比较稳定，一般都以下屈服点对应的应力作为屈服强度：

$$\sigma_s = \frac{P_{SL}}{F_0} \quad (20)$$

σ_s ——屈服强度 kgf/mm^2

P_{SL} ——下屈服点对应的载荷 kgf

F_0 ——试样原始截面积 mm^2

P_{SL} 应取试验机载荷指针回转的最低值作为下屈服点的载荷，见图1-8。

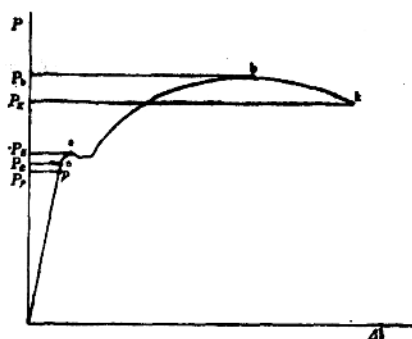


图 1-7 典型的拉伸曲线图

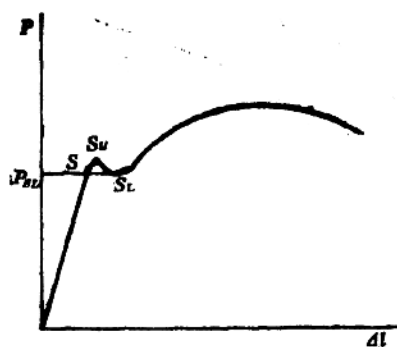


图 1-8 由下屈服点 S_L 确定屈服强度 σ_s

有些材料在室温时有明显的屈服现象，在高温时就不出现屈服现象了。本书所列的材料当超过 250°C 时大多就不出现屈服现象。也有些材料在室温时就不出现屈服现象，这时使用条件屈服强度来表达。一般以残余应变量为0.2%时的应力称为条件屈服强度，记为 $\sigma_{0.2}$ 。

在拉伸曲线图中在横轴上 $\Delta l = 0.2\% l_0$ 点引平行于线性段的直线，交点载荷 $P_{0.2}$ 对应的应力即为 $\sigma_{0.2}$ ，见图1-9。

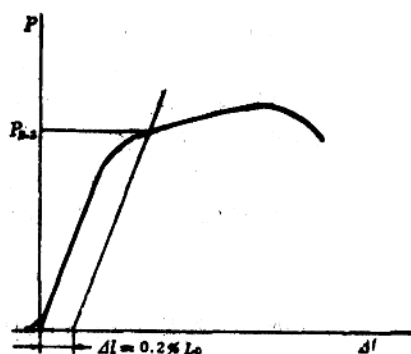


图 1-9 由斜率法确定条件屈服极限

$$\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0} \quad (21)$$

$\sigma_{0.2}$ ——残余应变为 0.2% 的条件屈服强度 kgf/mm^2

$P_{0.2}$ ——残余应变为 0.2% 的载荷 kgf

F_0 ——试样原始截面积 mm^2

1.2.3 高温抗拉强度

材料抵抗均匀塑性变形的最大应力称抗拉强度。在拉伸曲线图上即为最高载荷点b所对应的应力。

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \quad (22)$$

σ_b ——抗拉强度 kgf/mm^2

P_b ——最大载荷点b对应的载荷 kgf

F_0 ——试样原始截面积 mm^2

超过 b 点，试样开始局部塑性变形，出现缩颈现象。抗拉强度对应于最高载荷点，因此，就名义应力而言，它也是应力最高点。但是就实际应力来说，它却不是最高应力点，在 b 点以后虽然载荷有所减少但因试样截面急剧减少，缩颈处的应力还是不断增加的，到达 k 点，则为实际应力的最高点。

1.2.4 高温塑性性能

金属受力超过弹性极限以后，即使卸去载荷，也会留下一定的残余变形，这种变形称材料的塑性变形。材料塑性变形的能力有大有小，可以用塑性指标来量度。过低的塑性易使材料发生脆性破坏。在单向拉伸条件下塑性有延伸率和断面收缩率两大指标。

(1) 延伸率 δ

试样断裂后，在标距范围内的伸长量与原长之比称延伸率

$$\delta = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% \quad (23)$$

Δl ——标距范围内的伸长量， $\Delta l = l - l_0$

l ——试样断裂后的标距长度

l_0 ——试样的原始标距长度

因塑性变形在试样的各个部位是不均匀的，因此延伸率是变形率的一种平均性量度指标。试样尺寸，缩颈的形状和断裂的部位都可影响塑性变形的分布，进而影响其平均变形率。一般断口处于正中的试样，延伸率较大。截面积相同，较短的试样，延伸率较大。为此需取比例试样进行试验，本书有两种，一种为 10 倍，一种为 5 倍，分别以 δ_5 及 δ_{10} 表示，

两者不能混淆, 对断口距标记端小于 $\frac{1}{3}l_0$ 的要用补长法修正到正中位置。

(2) 断面收缩率

试样断口处截面积的收缩量与初始截面积之比称断面收缩率。

$$\psi = \frac{\Delta F}{F_0} \times 100\% \quad (24)$$

ΔF ——截面积的收缩量, $\Delta F = F_0 - F$

F ——断裂后的断口截面积

F_0 ——试样初始截面积

对于圆柱形试样

$$\psi = \frac{d_0^2 - d^2}{d_0^2} = 1 - \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 \quad (25)$$

d ——试样断面直径

d_0 ——试样初始直径

材料的塑性指标随温度而变化。基本上呈一抛物线规律。在中温处有一最小值。

1.2.5 高温短时拉伸强度的统计分布规律

由于受冶金、热处理、加工工艺及试验因素等影响, 高温短时强度(σ_s 及 σ_b)数据有一定的离散性。对不同成分的材料, 由于其强化机制等因素的影响, 其离散程度还表现出明显的差别。这种离散特性可以用统计分布函数来描述。经我们研究证明(详见附录), 强度取值概率与强度取值之间的规律服从正态分布函数

$$P = \int_{-\infty}^{\sigma_b} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\sigma_b - \mu)^2}{2\sigma^2}} d\sigma_b \quad (26)$$

P ——抗拉强度 $\leq \sigma_b$ 出现的概率

σ_b ——抗拉强度

σ ——正态分布参数, 根方差

μ ——正态分布参数, 平均值

在高温受力条件下工作的各种电站及化工设备, 安全运行的可靠性尤为重要。如何根据抽样试验得到的大量带有一定离散性的数据, 对钢种的性能作出综合的客观评价, 对安全设计, 合理选材和合理同材具有重要意义。在数据统计中借助分布函数对试验对象作出各种统计评价是最基本的方法。它可以提供材料的各项可靠性指标。例如:

在一定信度下, 其分散区间为

$$\sigma_b = \mu \pm u_p \sigma \quad (27)$$

$$\mu = \frac{\sum \sigma_{bi}}{n}$$

μ ——平均值

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \mu)^2}{n-1}}$$

u_p ——标准正态分布分位数, 信度为95%时 $u_p = 1.96$

一定信度下的置信区下限值为

$$\sigma_b = \mu - u_p \hat{\sigma} \quad (28)$$

例如区间估计的信度取95%, 则上式的意思是说, 大概有97.5% (指单边估计, 应加2.5%上限概率) 的把握其强度水平可望高于

$$\sigma_b = \mu - 1.96 \hat{\sigma}$$

对平均强度水平相同的两种材料, 则分散区间大的一种, 其下限值就低, 这说明这种材料的强度水平不稳定, 大大小小, 参差不齐, 可靠性就差。信度要求越高, 这种结论越明显。例如当信度取99.5%时 $u_p = 3$ 则下限值为

$$\sigma_b = \mu - 3 \hat{\sigma} \quad (30)$$

第二项 $3\hat{\sigma}$ 起的作用就大了。当可靠性(信度)要求较高时, 平均水平高, 性能分散大的材料, 其下限值反而可能比平均水平低, 但性能不太分散的材料低。这时设计者当然应该选用后一种材料。不用统计分析的方法就反映不出上述矛盾。

例如, 有1、2两种钢, 通过试验, 得到各自的分布为

$$P_1 = \int_{-\infty}^{x_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_1} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} dx$$

$$P_2 = \int_{-\infty}^{x_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_2} e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} dx$$

μ_1, μ_2 ——分别为1、2种钢的强度平均值 $\mu_1 > \mu_2$

σ_1, σ_2 ——分别为1、2种钢的根方差 $\sigma_1 > \sigma_2$ 则它们的强度下限值分别为

$$x_1 = \mu_1 - u_p \sigma_1$$

$$x_2 = \mu_2 - u_p \sigma_2$$

显然, 只要选取一定大小的信度使

$$u_p \geq \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sigma_1 - \sigma_2} \quad (\mu_1 > \mu_2, \sigma_1 > \sigma_2)$$

则有 $x_1 \leq x_2$

可见, 材料1的平均值比2高($\mu_1 > \mu_2$)但分散比2大($\sigma_1 > \sigma_2$)则在信度较大的条件下(对应的

分位数 $u_p \geq \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sigma_1 - \sigma_2}$)材料1的下限值会比材料2的下限值低($x_1 \leq x_2$)它们的概率分布密度

函数见图1—10。

1.2.6 高温短时拉伸强度的统计处理方法

根据高温屈服强度及抗拉强度数据的来源及分散情况, 可以在一定程度上区分一些影响因素。经研究, 比较完整的强度数据, 可以区分出三种影响因素, 一是冶金因素, 主要