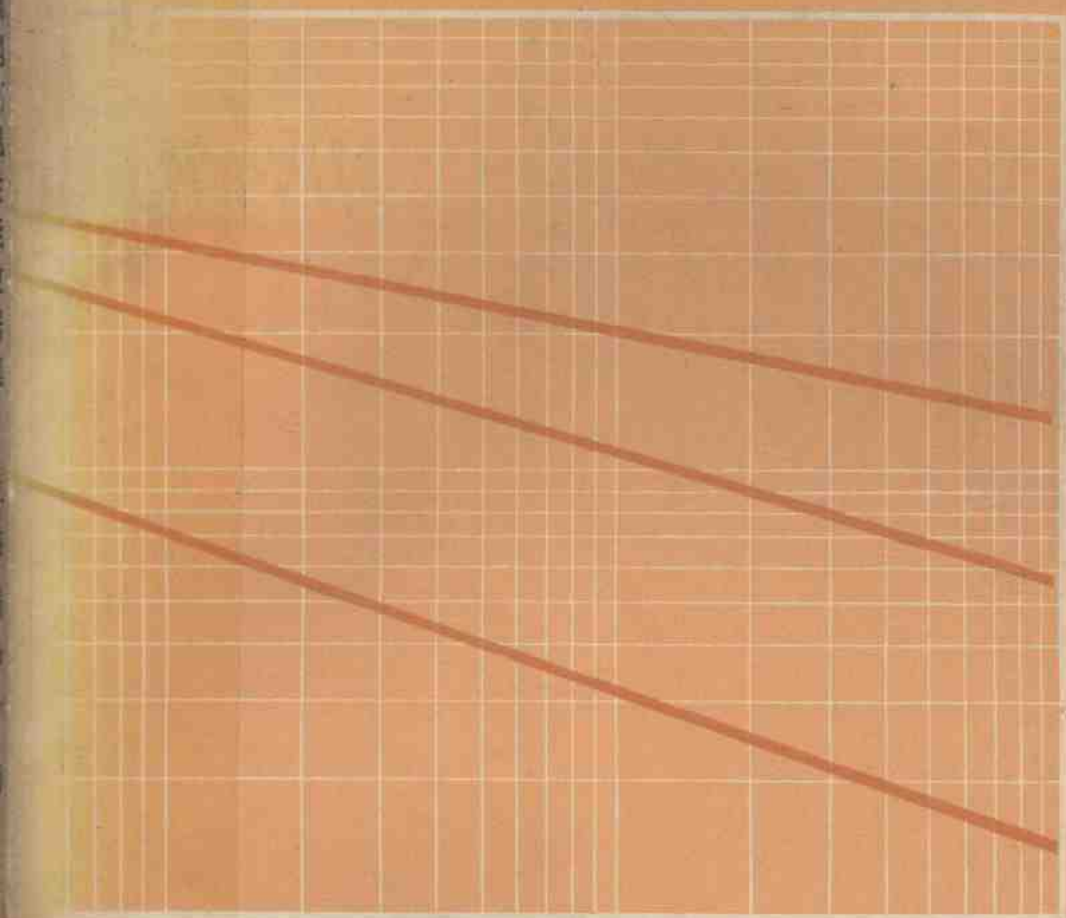




# 热强钢高温性能数据集

上海锅炉厂编

上海人民出版社

# 热强钢高温性能数据集

上海锅炉厂编

上海人民出版社

### 内 容 提 要

本书主要汇集了动力机组常用热强钢的高温长期性能试验资料,其中包括蠕变试验、持久强度(包括管子爆破持久强度)试验、松弛试验等。书中有成熟钢种的性能,也有试验钢种和经过运行的钢的性能。有关蠕变、持久、松弛的基本概念和试验方法,本书也作了简要介绍。

本书可供热强钢试验研究人员,汽轮机、锅炉及动力机械行业的设计、工艺制造和科研人员参考,对电厂和冶金工厂亦有参考价值。

### 热强钢高温性能数据集

上海锅炉厂 编

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海群众印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 15.5 字数 329,000

1975年1月第1版 1975年1月第1次印刷

印数 1—40,000

统一书号: 15171·153 定价: 0.87 元

# 毛主席语录

鼓足干劲, 力争上游, 多快好省地建设社会主义。

我们的方针要放在什么基点上? 放在自己力量的基点上, 叫做自力更生。

通过实践而发现真理, 又通过实践而证实真理和发展真理。

# 前 言

在毛主席革命路线指引下,坚持独立自主、自力更生的方针,近十年来我国热强钢的试验研究取得了很大的成绩,在大量试验的基础上掌握了一批国内外成熟钢种的性能和生产工艺,研制了不少资源立足于国内的新型热强钢种,积累了一定数量的热强性能数据。这些数据对新钢种的研究和试验方法的探讨,均有一定的参考价值。

本书汇编了上海锅炉厂及原一机部汽轮机锅炉研究所的蠕变试验、持久强度试验、管子内压爆破持久强度试验和应力松弛试验的结果。除了成熟钢种的性能之外,还列出了某些试验钢种和经过运行的钢的性能<sup>\*</sup>。在第一章,对蠕变、持久强度、应力松弛的基本概念及试验方法作了简要的介绍。

一机部机械研究院提供了12Cr3MoVSiTb(II-11)的试验资料,冶金部钢铁研究院提供了12Cr2MoWVB(钢102)的试验资料,上海材料研究所提供了Mn18Cr10MoVB(K9)的试验资料,帮助了本书的编写工作。

对本书的缺点和错误,请读者批评指正。

编 者 一九七三年十二月

<sup>\*</sup> 本书所列的一些试验钢种的性能资料,是在不同条件下进行试验得出的数据,仅供参考,不能作为设计依据。

# 目 录

## 第一章 钢的热强性能试验

|                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| 第一节 钢的蠕变.....1     | 3. 外推方法讨论.....7     |
| 1. 蠕变曲线.....1      | 4. 钢的持久塑性.....10    |
| 2. 条件蠕变极限.....2    | 第三节 钢的应力松弛.....11   |
| 3. 蠕变极限的计算.....3   | 1. 应力松弛.....11      |
| 第二节 钢的持久强度.....5   | 2. 应力松弛的经验公式.....12 |
| 1. 持久强度的经验公式.....5 | 3. 应力松弛试验.....12    |
| 2. 持久强度的计算.....6   |                     |

## 第二章 性能资料

|                                 |                              |
|---------------------------------|------------------------------|
| 1. 20.....15                    | 20. 20Cr3MoWV.....124        |
| 2. St45.8.....23                | 21. 25Cr2MoV.....126         |
| 3. St35.8.....25                | 22. 25Cr2Mo1V.....130        |
| 4. 16Mn.....26                  | 23. 20Cr1Mo1V1.....144       |
| 5. 10MnPNbRe.....27             | 24. 20Cr1Mo1VTiB.....149     |
| 6. 15MnV.....28                 | 25. 20Cr1Mo1VNbB.....152     |
| 7. 12MnMoV.....30               | 26. ZG20CrMoV.....162        |
| 8. 15CrMo.....32                | 27. ZG15Cr1Mo1V.....163      |
| 9. 12MoWCrSiVB.....36           | 28. Cr11MoV.....168          |
| 10. ČSN15123.....41             | 29. Cr12WMoV.....170         |
| 11. 10CrSiMoV7.....42           | 30. Cr12WMoNbVB.....173      |
| 12. 12Cr1MoV.....44             | 31. Cr11WMoNbVNB.....174     |
| 13. 12Cr2MoVSiB.....76          | 32. Cr11WMoNbVNB2.....181    |
| 14. 13SiMnWVB(无铬7号钢).....82     | 33. Cr17Ni13W.....183        |
| 15. 12MoVWBSiRe(无铬8号钢).....88   | 34. Mn18Cr10MoVB(K9).....185 |
| 16. 12Cr2MoWVB(钢102).....97     | 35. Mn30Al4Mo1WVNbB.....198  |
| 17. 12Cr3MoVSTiB(II-11).....114 | 36. Mn17Cr7MoVNbBZr.....201  |
| 18. 17CrMo1V.....121            | 37. Cr15Ni35W3Ti3AlB.....210 |
| 19. 27Cr2Mo1V.....123           |                              |

# 第一章 钢的热强性能试验

动力机组的参数愈高,则其热效率亦愈高。参数的提高意味着钢材的工作温度提高,承受的负荷增大,这就要求所用的钢材具有更高的热强性。

例如我国生产的 400 吨/时锅炉的参数为  $540\sim 555^{\circ}\text{C}$ 、140 大气压,在过热器管壁温度为  $580^{\circ}\text{C}$  以下时,采用 12Cr1MoV 或 12MoVWBSiRe 钢。当锅炉的参数为  $555^{\circ}\text{C}$ 、170 大气压时(如我国制造的 935 吨/时锅炉),过热器管壁温度达到  $620^{\circ}\text{C}$  左右,这时 12Cr1MoV 钢已不能胜任,需要采用热强性更高的 12Cr3MoVSiTiB 钢、12Cr2MoWVB 钢以至于某些马氏体或奥氏体热强钢。又如 3000 瓩燃气轮机参数是  $620^{\circ}\text{C}$ ,高温段所用叶片材料是 Cr17Ni13W 钢,容量更大的 2.5 万瓩燃气轮机参数是  $750^{\circ}\text{C}$ ,一般的奥氏体热强钢已不能胜任,需要采用具有更高热强性的铁基合金。

在生产中还经常遇到这样的情况:机组中某一重要部件的运行时间已达到了它的设计寿命,例如锅炉过热器或蒸汽管道的运行时间已达到了它的设计寿命 10 万小时(约 12 年),这时就通过热强性试验及其他试验手段来确定其强度储备,以此来判断是否需要换管或采取相应的安全措施,以防止爆管事故。

这些例子说明了钢的热强性在动力机械发展中所起的作用。

本章介绍钢的热强性能试验(包括蠕变、持久强度及应力松弛)的基本概念和一般的试验方法。由于钢的热强性能试验研究还是一门比较新的学科,某些强度机理至今还不十分清楚,测试技术、特别是数据处理方面也不很成熟,很多问题都有待进一步摸索和探讨。

## 第一节 钢 的 蠕 变

### 1. 蠕变曲线

在一定的温度下,金属即使所受应力小于屈服极限,也会随着时间的增长而缓慢地产生永久塑性变形,这种现象叫蠕变。对某些低熔点金属如铅、锡等,在室温下就会产生蠕变;对于钢,当温度超过  $300\sim 350^{\circ}\text{C}$  时才有蠕变行为。

典型的蠕变曲线如图 1 所示。

$Oa$ ——开始部分,是加上负荷后所引起的瞬时形变。如果施加的应力超过该温度下的弹性极限,则这种开始部分实际上是由弹性形变  $Oa'$  和塑性形变  $a'a$  组成。这一形变还不标志蠕变现象的发生,而是由外加负荷引起的一般变形过程。

$ab$ ——蠕变第一阶段,也称为蠕变的不稳定阶段,这一阶段的蠕变速度很大,它随时间增长而逐渐降低。

$bc$ ——蠕变第二阶段,或称为蠕变的稳定阶段,此时金属以恒定的蠕变速度进行变形。这一阶段曲线倾角  $\alpha$  的正切值表示蠕变速度。

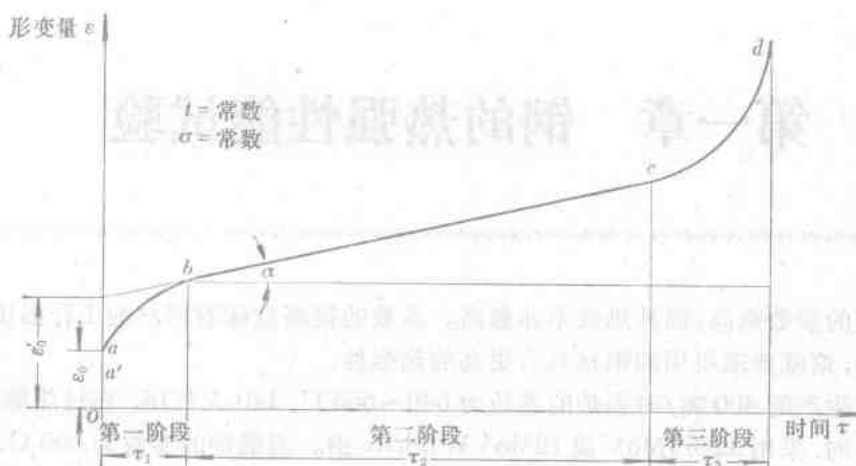


图1 典型蠕变曲线

$cd$ ——蠕变第三阶段,即蠕变的最后阶段,在这阶段中蠕变速度增加,直至 $d$ 点发生断裂。

不同的金属在不同条件下得到的蠕变曲线是不同的,同一种金属蠕变曲线的形式也随应力和温度不同而不同。但各种蠕变曲线都保持三个基本组成部分,不过各个阶段持续时间有长有短。图2表示了温度不变时应力对蠕变曲线的影响。图3表示了应力不变时温度对蠕变曲线的影响。

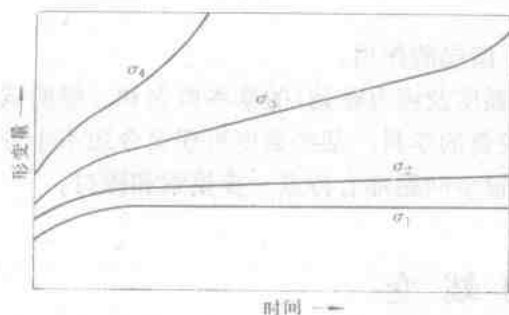


图2 温度不变时不同应力下的蠕变曲线  
( $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3 < \sigma_4$ )

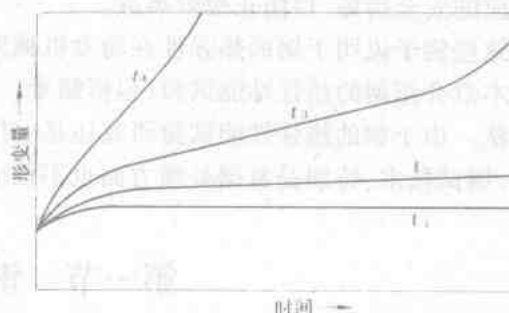


图3 应力不变时不同温度下的蠕变曲线  
( $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ )

在给定的温度、应力很小的情况下,蠕变第二阶段即稳定阶段将持续很久,甚至蠕变第三阶段可能不发生。相反,在给定的温度、应力很大的情况下,蠕变第二阶段便很短甚至完全消失,这时蠕变只有第一阶段和第三阶段,试样将在很短时间内发生断裂。

## 2. 条件蠕变极限

在工程上,以“条件蠕变极限”作为统计依据。根据不同的需要,条件蠕变极限有不同的定义,通常应用的有两种。

一种是在给定温度下,引起规定变形速度的应力值。这里所指的变形速度是蠕变第二阶段的恒定变形速度。在电站锅炉、汽轮机和燃气轮机制造中,规定的变形速度大多是 $1 \cdot 10^{-5}\%$ /小时或 $1 \cdot 10^{-4}\%$ /小时。以 $\sigma_{1 \cdot 10^{-4}}$ 代表蠕变速度为 $1 \cdot 10^{-5}\%$ /小时的条件蠕变极



为此  $\sum_{i=1}^n v_i^2$  对  $a$  及  $b$  的一阶偏导数分别为零:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sum_{i=1}^n v_i^2}{\partial a} &= 0 \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^n v_i^2}{\partial b} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将式(7)代入式(8), 则有

$$\left. \begin{aligned} 2 \sum_{i=1}^n (a + bx_i - y_i) &= 0 \\ 2 \sum_{i=1}^n (a + bx_i - y_i) x_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

化简可得

$$\left. \begin{aligned} an + b \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n y_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 &= \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

解联立方程(10), 可求得系数  $a$  及  $b$ :

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{1}{D} \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix} \\ b &= \frac{1}{D} \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{vmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中

$$D = \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix}$$

以试验值  $x_i, y_i$  代入式(11), 求得  $a, b$ , 便可得出所求的直线方程  $y = a + bx$ , 即

$$\lg \sigma = a + b \lg v \quad (12)$$

再以所规定的蠕变速度  $v$  代入, 则可得到相应的蠕变极限  $\sigma$ 。

〔例〕 下表为一种钢的蠕变试验数据:

| 应 力, 公斤/毫米 <sup>2</sup> | 12                    | 8                     | 6                     | 5                     |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 蠕变速度, %/小时              | $3.30 \times 10^{-4}$ | $1.03 \times 10^{-4}$ | $2.95 \times 10^{-5}$ | $1.63 \times 10^{-5}$ |

需要求出蠕变速度分别为  $10^{-3}\%$ /小时、 $10^{-4}\%$ /小时和  $10^{-5}\%$ /小时时的蠕变极限值, 即求出  $\sigma_{1 \cdot 10^{-3}}, \sigma_{1 \cdot 10^{-4}}, \sigma_{1 \cdot 10^{-5}}$ 。

令

$$y = \lg \sigma \quad x = \lg v$$

| $\sigma_i$          | $y_i$  | $v_i$                 | $x_i$                 | $x_i^2$                | $x_i y_i$                 |
|---------------------|--------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| 12                  | 1.0792 | $3.30 \times 10^{-4}$ | -3.4815               | 12.1208                | -3.7572                   |
| 8                   | 0.9031 | $1.03 \times 10^{-4}$ | -3.9872               | 15.8978                | -3.6008                   |
| 6                   | 0.7782 | $2.95 \times 10^{-5}$ | -4.5302               | 20.5227                | -3.5254                   |
| 5                   | 0.6990 | $1.63 \times 10^{-5}$ | -4.7878               | 22.9230                | -3.3467                   |
| $\sum y_i = 3.4595$ |        |                       | $\sum x_i = -16.7867$ | $\sum x_i^2 = 71.4643$ | $\sum x_i y_i = -14.2301$ |
| $n = 4$             |        |                       |                       |                        |                           |

$$\Delta = \begin{vmatrix} n & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{vmatrix} = 4 \times 71.4643 - 16.7867 \times 16.7867 = 4.0639$$

$$a = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} \sum y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum x_i^2 \end{vmatrix} = \frac{3.4595 \times 71.4643 - 16.7867 \times 14.2301}{4.0639} = 2.0557$$

$$b = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} n & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum x_i y_i \end{vmatrix} = \frac{4 \times (-14.2301) - 3.4595 \times (-16.7867)}{4.0639} = 0.2838$$

所要求的直线方程即为

$$y = 2.0557 + 0.2838x$$

| $v$       | $x$ | $y = a + bx$ | $\sigma = \lg^{-1} y$ |
|-----------|-----|--------------|-----------------------|
| $10^{-2}$ | -2  | 1.4881       | 30.8                  |
| $10^{-4}$ | -4  | 0.9205       | 8.3                   |
| $10^{-5}$ | -5  | 0.6367       | 4.3                   |

结果求得

$$\sigma_{1 \cdot 10^{-2}} = 30.8 \text{ 公斤/毫米}^2$$

$$\sigma_{1 \cdot 10^{-4}} = 8.3 \text{ 公斤/毫米}^2$$

$$\sigma_{1 \cdot 10^{-5}} = 4.3 \text{ 公斤/毫米}^2$$

## 第二节 钢的持久强度

### 1. 持久强度的经验公式

在给定的温度下,使材料经过规定时间发生断裂的应力叫持久强度。有些零件如锅炉过热器管,对蠕变速度的限制不严,但必须保证在使用期间内不致破坏。这些零件的主要设计依据便是持久强度。

在锅炉、汽轮机和燃气轮机制造中,机组的设计寿命一般为数万以至十万小时,这就要根据相应时间的持久强度来进行设计。而材料的持久强度试验当然不可能都进行这么长时间。实际上都是由一些时间较短的试验点,根据经验公式,用外推方法求得长时间的持久强度。具体做法上有参数法、对数法等,分别以提高试验温度和加大试验应力来缩短试验时间。

下面仅以对数法外推作一些简要叙述。应用较多的对数法经验公式有两种:

$$\tau = A\sigma^{-B} \quad (13)$$

$$\tau = Ce^{-D\sigma} \quad (14)$$

式中  $A, B, C, D$  是与试验温度、材料有关的常数。

将(13)、(14)两式两端分别取对数,则有

$$\lg \tau = \lg A - B \lg \sigma \quad (15)$$

$$\lg \tau = \lg C - D \sigma \lg e \quad (16)$$

与蠕变极限的经验公式一样, 式(15)表明断裂时间  $\tau$  的对数值与应力  $\sigma$  的对数值之间呈线性关系, 式(16)表明断裂时间  $\tau$  的对数值与应力  $\sigma$  之间呈线性关系。式(15)称为对数坐标关系, 式(16)称为半对数坐标关系。两者中又以对数坐标关系即式(15)应用更为普遍。本书都应用了式(15)进行持久强度数据的外推处理。

## 2. 持久强度的计算

从式(15)出发, 可以从较短时间的试验数据外推出长时间的持久强度值。通常用 4~8 根试样, 求出不同应力下的断裂时间, 即可进行外推。一般认为外推到一个数量级(即外推到最长试验时间的十倍)得到的外推值是较可靠的。

在式(15)中, 令  $y = \lg \sigma$ ,  $x = \lg \tau$ ,  $a = \frac{\lg A}{B}$ ,  $b = -\frac{1}{B}$ , 将方程(15)化为标准直线方程

$$y = a + bx \quad (17)$$

与式(6)相同, 用最小二乘法处理, 则得

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{1}{\Delta} \left| \begin{array}{cc} \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{array} \right| \\ b &= \frac{1}{\Delta} \left| \begin{array}{cc} n & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{array} \right| \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中

$$\Delta = \left| \begin{array}{cc} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{array} \right|$$

[例] 下表为一种钢的持久强度试验数据:

| 应 力, 公斤/毫米 <sup>2</sup> | 19  | 18   | 17   | 15   |
|-------------------------|-----|------|------|------|
| 断裂时间, 小 时               | 178 | 2086 | 4664 | 9776 |

需要求出 100、10000、100000 小时的持久强度值, 即求出  $\sigma_{10^2}$ 、 $\sigma_{10^4}$ 、 $\sigma_{10^5}$ 。

令

$$y = \lg \sigma \quad x = \lg \tau$$

| $\tau_i$ | $x_i$  | $x_i^2$ | $\sigma_i$ | $y_i$  | $x_i y_i$ |
|----------|--------|---------|------------|--------|-----------|
| 178      | 2.2504 | 5.0643  | 19         | 1.2788 | 2.8778    |
| 2086     | 3.3193 | 11.0178 | 18         | 1.2553 | 4.1667    |
| 4664     | 3.6688 | 13.4601 | 17         | 1.2304 | 4.5141    |
| 9776     | 3.9902 | 15.9217 | 15         | 1.1761 | 4.6929    |

$$\sum x_i = 13.2287 \quad \sum x_i^2 = 45.4639 \quad \sum y_i = 4.9406 \quad \sum x_i y_i = 16.2515 \quad n = 4$$

标关系,都还是近似的。在常用的对数座标中,试验点并不真正符合线性关系,实际上是一条具有二次转折的曲线,只是曲线的某些区域比较接近于直线,才近似地用线性方法处理。对于不同材料和不同温度,转折的位置和形状是各不相同的。有人认为转折的原因是与金属断裂性质的变化有关,即转折以前是晶内断裂,转折以后是晶界断裂。但是试验并不完全证实这种观点。因此又提出下面一种观点,即转折的原因是在高温载荷下由于扩散过程钢的组织变化所引起。对于试验温度、介质和时间的作用具有较高组织稳定性的钢,转折不明显或在更长的试验时间以后出现。对于某些组织不稳定的钢,转折就非常明显,因此直线外推的方法还只是很粗略的方法。

试验点可能发生转折的时间范围是很大的,在一定的温度下,有的钢种在几百小时就发生转折,有的钢种在几千到一万小时才发生转折,而有的钢种在数万小时尚未发生转折。图4列出了某珠光体钢 620°C 持久强度试验点的分布情况。图中细线是用最小二乘法直线外推结果。粗线是按试验点的连接线。试验点的这种分布形式是比较典型的,在试验中经常遇到。由图可以看出,直线外推的结果明显地偏高。

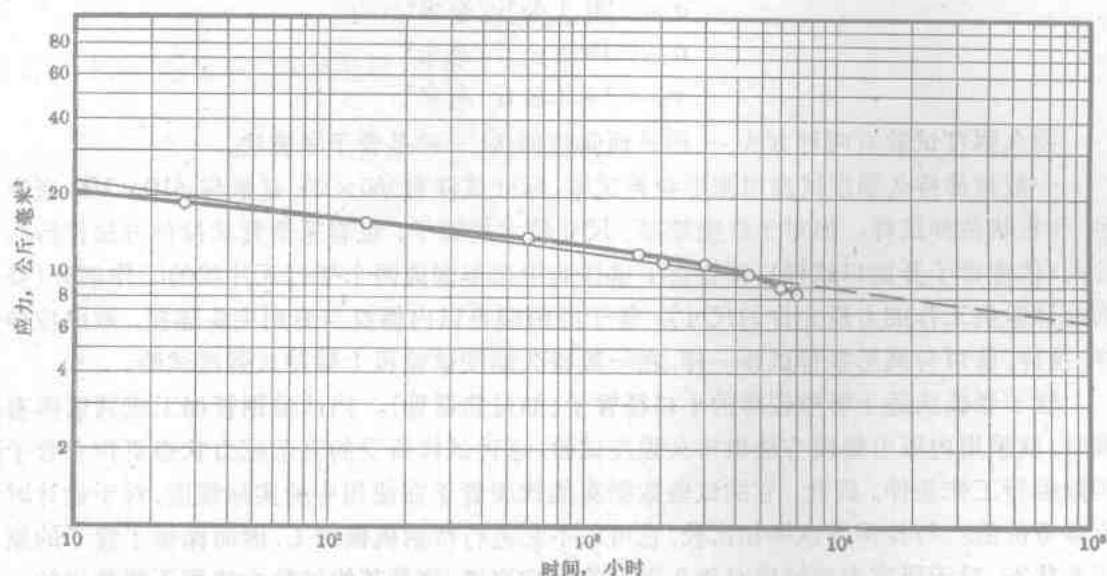


图4 试验曲线的转折对持久强度外推的影响

在有的情况下,即使是试验点间的线性关系很好,也不能说明直线外推结果的可靠。图5列出了经过运行的钢材与未经运行的钢材 540°C 持久强度的比较。由图可以看出,运行后钢材的试验点都在下面,但它的斜率较小,如果按照直线外推,运行后钢材的持久强度  $\sigma_{10^5} = 12.3$  公斤/毫米<sup>2</sup>,原始状态钢材的持久强度  $\sigma_{10^5} = 10.7$  公斤/毫米<sup>2</sup>。即得出运行后钢材持久强度比未经运行原始状态钢材持久强度还要高的结论。这个矛盾可以用试验点的转折来解释,如果进行更长时间的试验,那么试验点将不按照直线分布而出现转折。

根据国外长达 10 万小时的持久强度试验,同样证实在对数座标中,试验点的分布是一条有转折的曲线(图6、图7、图8)。图6列出的曲线,转折在 1 千小时附近发生。图7列出的曲线,转折到几万小时才发生。在时间短时,曲线斜率较小。随着时间的增加,曲线斜率逐渐增加。在通过斜率最大的区域即转折区域以后,斜率又逐渐减小。图8列出的曲线说明,试验温度愈高,折点位置向短时方向移动。

上面的一些试验说明由短时间(从数千小时至几万小时)直线外推长时间(数万小时至

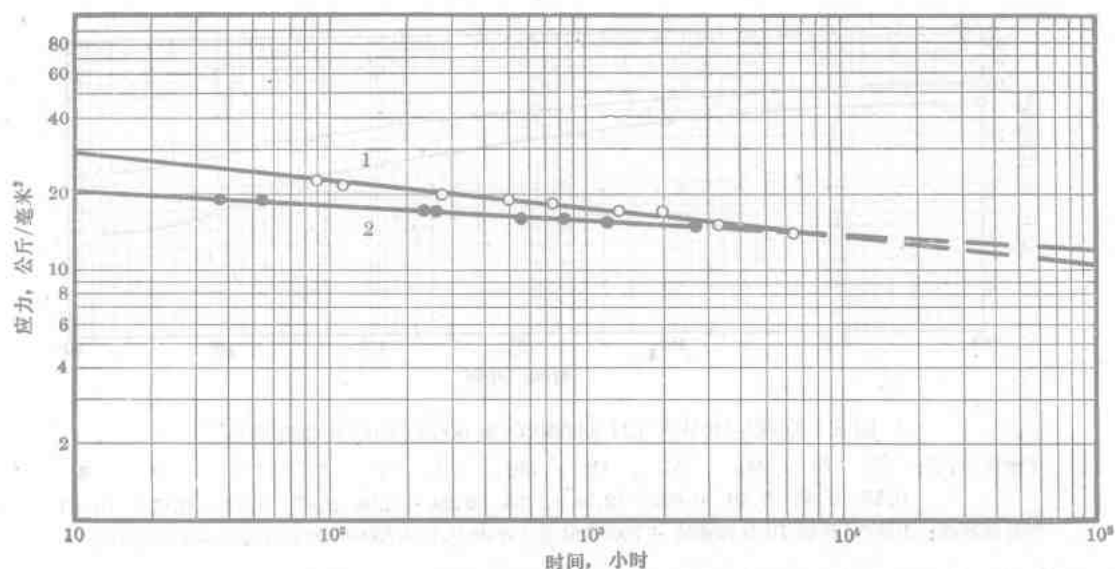


图5 经过运行的钢材与未经运行的钢材 540°C 持久强度的比较

1—12Cr1MoV 大口径钢管; 2—12Cr1MoV 大口径钢管在温度 540°C、100 大气压参数下运行 27000 小时

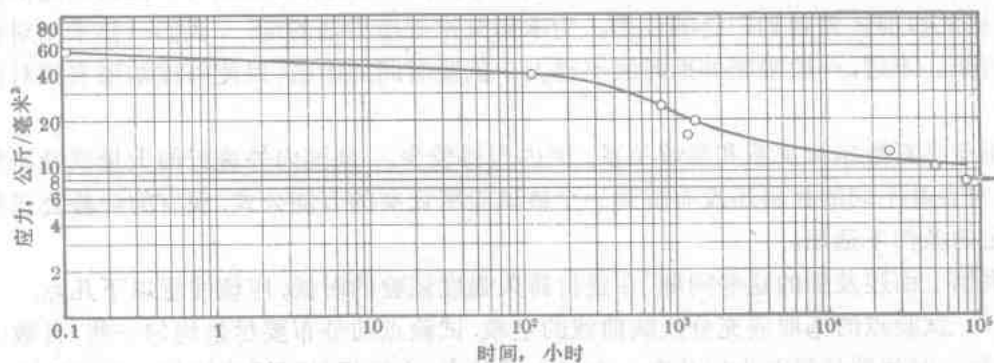


图6 10CrMo910 钢 550°C 的持久强度曲线

化学成分, %: C Si Mn Al Cr Mo Ni V N P S  
0.11 0.11 0.46 0.05 2.25 1.08 0.02 0.03 0.021 0.019 0.019

热处理状态: 835°C 保温 30 分钟炉冷 + 650°C 空冷

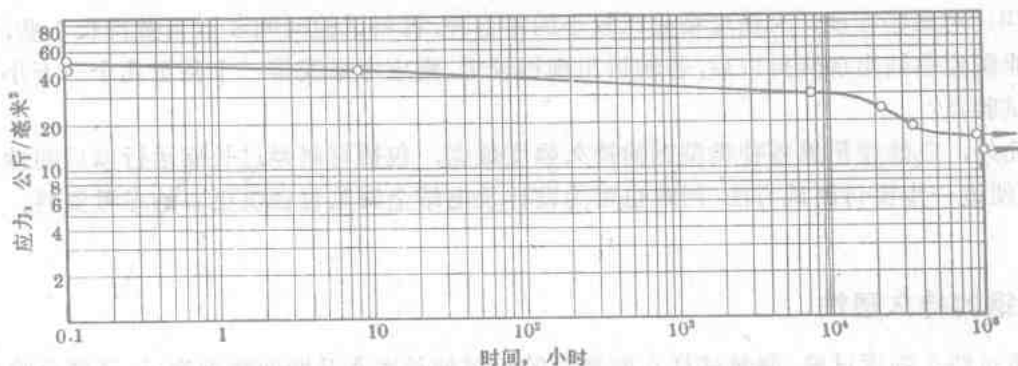


图7 28NiCrMo44 钢 500°C 的持久强度曲线

化学成分, %: C Si Mn Al Cr Mo Ni V N P S  
0.27 0.28 0.46 0.006 0.78 0.37 1.25 0.03 0.007 0.015 0.025

热处理状态: 865~870°C 保温 55 小时油冷 + 630°C 炉冷

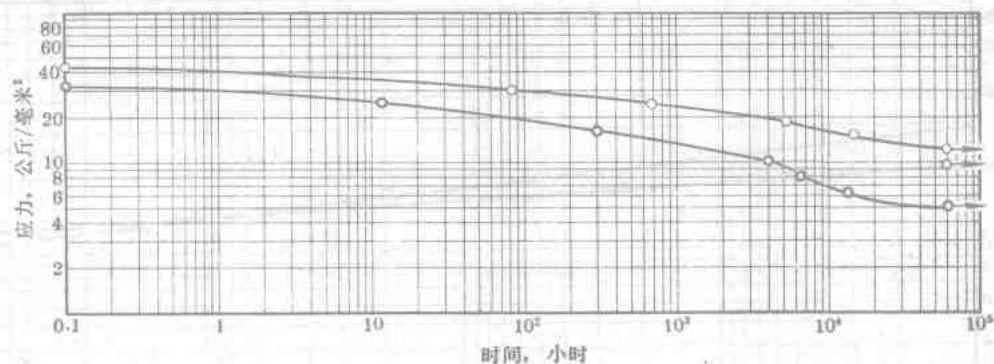


图8 X15CrMoWV 121 钢 550°C 和 600°C 的持久强度曲线

化学成分, %: C Si Mn Al Cr Mo Ni V W N P S  
 0.15 0.38 0.40 0.022 12.58 1.38 0.24 0.33 0.63 0.020 0.012 0.011  
 热处理状态: 1050°C 保温 10 分钟油冷 + 700°C 保温 1 小时空冷 + 750~780°C 保温 5~6 小时炉冷

10 万小时) 的持久强度, 往往会造成一些偏差。要准确估计金属材料的持久强度值, 尚须对外推方法作进一步的研究。

但是, 对数坐标直线外推方法的特点是简单, 在一定的限制条件下, 能得到近似的外推结果, 因此目前还是得到广泛的应用。为求得外推处理方法的统一, 我们一律采用对数直线外推方法。不过, 一般限制外推时间不得大于试验时间的十倍, 以使外推结果有相对的正确性。

至于半对数坐标关系和参数关系, 国内用得较少。从国内外进行的大量试验研究工作来看, 对各种不同的材料还没有找到一个被试验所证实的万能公式, 现有的经验公式都只是在一定的条件下适用。

根据上面述及到的这些问题, 在进行持久强度试验的时候, 应该注意以下几点:

(1) 试验点的选取应充分反映曲线的全貌, 试验点的分布要尽量均匀一些, 自数十小时以上, 每一时间数量级至少应分布一个以上试验点, 在转折处可适当增加一些试验点。

(2) 若单纯用曲线未转折前的试验数据直线外推可能导致外推结果偏高; 同样, 若单纯选用第一转折后至第二转折以前的试验数据则可能导致外推长期结果偏低, 因此试验点大多集中在数千小时时于外推不利。

(3) 对某些在设计时强度裕量比较小的零部件, 材料试验时间要适当做得长一些, 例如尽可能做到曲线出现转折以后, 若转折出现得较迟, 则应考虑安排一个甚至几个一万小时以上的试验点。

此外, 应继续积累各种类型钢的持久强度数据, 包括材料经过长期运行以后的性能数据, 以便进一步探讨测试方法, 同时也可为设计及电站金属监督提供更多的参考资料。

## 4. 钢的持久塑性

通过持久强度试验, 测量试样在断裂后的相对伸长率  $\delta$  及断面收缩率  $\psi$ , 还能反映出钢的持久塑性。持久塑性是材料的一个重要指标, 过低的持久塑性会使材料在设计使用期未到之前发生脆性破坏。例如在电厂中运行的低合金 Cr-Mo-V 螺栓钢就经常发生脆断。

曾经试图用外推的方法来确定持久塑性的变化规律, 但都没有成功。通过一些长时间



持久强度试验对断裂塑性 $\sigma$ 、 $\psi$ 的研究,发现 $\sigma$ 、 $\psi$ 并不总是随时间的增加而降低,一般最初随时间的增加塑性减小,当接近折点的时间范围时,塑性通常达到最小值,时间更长,塑性又稍有增加。

对于持久塑性的具体指标,目前没有统一的规定,对于低合金Cr-Mo-V钢,一般希望持久塑性不低于3~5%。

管子爆破持久塑性的评定,目前也没有统一的方法,一般以测量管子爆破后的圆周长来评定。设管子破口最大胀粗处的周长为 $l_1$ ,原始管子的周长为 $l_0$ ,则

$$\delta_{(\text{破口})} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (20)$$

又设管子爆破后的平均周长为 $l_{\text{平}}$ ,则

$$\delta_{(\text{平均})} = \frac{l_{\text{平}} - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (21)$$

### 第三节 钢的应力松弛

#### 1. 应力松弛

金属在高温和应力状态下,如维持总变形不变,随着时间的延长,应力逐渐地减低的现像叫应力松弛。

可以用下列条件来表示松弛:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{\text{弹}} + \varepsilon_{\text{塑}} = \text{常数} \quad (22)$$

$$T = \text{常数} \quad \sigma \neq \text{常数}$$

式中  $\varepsilon_0$ ——总变形;  
 $\varepsilon_{\text{弹}}$ ——弹性变形;  
 $\varepsilon_{\text{塑}}$ ——塑性变形;  
 $T$ ——试验温度(或工作温度);  
 $\sigma$ ——试样或零件所受的应力。

由上面条件可以看出,试样或工件的松弛过程是弹性变形减小、塑性变形增加的过程,并且两者是同时而且等量发生的。

锅炉、汽轮机和燃气轮机的许多零件,如紧固件、弹簧、汽封弹簧片等,处于松弛条件下工作,当这些紧固零件应力松弛到一定程度后,就会引起汽缸和阀门漏汽,安全阀过早起跳,影响机组正常运行。

图9是在总变形量一定时应力随时间而降低的曲线。由图可以看出,整个松弛曲线可以分成两个阶段,第一阶段应力随时间急剧降低,第二阶段应力下降逐渐缓慢,逐渐趋向于恒定。目前对松弛机理还没有完整的认识,一般认为第一阶段松弛主要发生在晶界上,晶界的扩散过程起主要作用;第二阶段松弛主要发生在晶粒内部,由嵌镶块的转动或移动所引起。

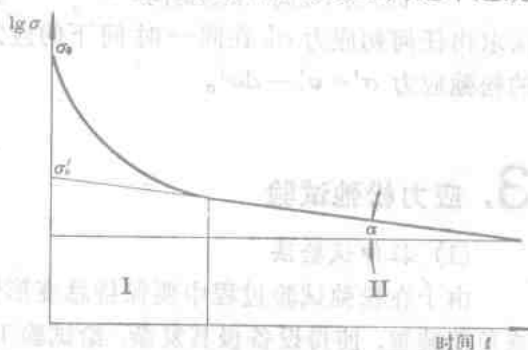


图9 应力松弛曲线

松弛和蠕变有差别也有联系。它们的差别从它们的含意上就可以看出：蠕变是在恒定应力下，塑性变形随时间的增加而逐渐增大；松弛是在恒定总变形下，应力随时间的增加而逐渐降低。松弛和蠕变也有一定的联系。可以认为，松弛时发生的过程，是在某种应力作用下进行的蠕变，这种应力因范性形变的增加而随时降低。

## 2. 应力松弛的经验公式

在松弛第二阶段，应力与时间满足下面的经验公式：

$$\sigma = \sigma'_0 e^{-\frac{t}{t_0}} \quad (23)$$

将上式两边取对数，得

$$\lg \sigma = \lg \sigma'_0 - \frac{t}{t_0} \cdot \lg e \quad (24)$$

上式表明，应力  $\sigma$  的对数值与时间  $t$  呈线性关系。在工程上需要知道 10000 或 20000 小时后的剩余应力值，运用公式 (24) 的半对数关系就可求出。

$$\text{设} \quad y = \lg \sigma \quad x = t \quad \lg \sigma'_0 = a \quad -\frac{1}{t_0} \lg e = b$$

则式 (24) 化为标准直线方程

$$y = a + bx \quad (25)$$

用最小二乘法确定系数  $a$  及  $b$ ，与前面计算蠕变极限和持久强度的方法相同。

通常还引入  $S_0 = \frac{\sigma'_0}{\sigma_0}$  及  $t_0 = \frac{1}{\lg a}$  (参见图 9) 来分别表示晶间和晶内的稳定性，叫晶间

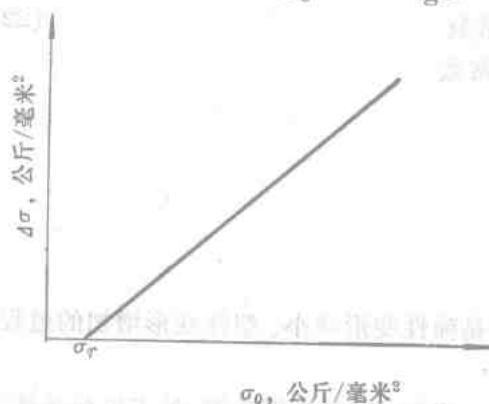


图 10 应力的下降值  $\Delta\sigma$  与初应力  $\sigma$  的关系(在同一试验时间)

稳定系数和晶内稳定系数。 $S_0$  和  $t_0$  数值愈大表示钢材抗松弛性能愈好。

松弛的另一个特性是：对某一相同的试验时间，应力的下降值  $\Delta\sigma$  与初应力  $\sigma_0$  之间具有简单的线性关系，如图 10 所示。直线与横座标的交点  $\sigma_r$  称松弛极限，它的直观意义是材料不引起松弛的最大应力。松弛极限  $\sigma_r$  的数值很小，而且往往等于零，所以它在设计上并未获得实际运用。但是根据图 10 所示的应力下降值  $\Delta\sigma$  与初应力  $\sigma_0$  之间的线性关系，可以由某几个初应力在同一试验时间下作出的  $\Delta\sigma-\sigma_0$  直线用外推或内插的方法求出任何初应力  $\sigma'_0$  在同一时间下的应力下降值  $\Delta\sigma'$ ，从而求出初应力  $\sigma'_0$  在同一时间下的松弛应力  $\sigma' = \sigma'_0 - \Delta\sigma'$ 。

## 3. 应力松弛试验

### (1) 拉伸试验法

由于在松弛试验过程中要保持总变形恒定，并测定其应力的变化，需要一套复杂的自动减负荷装置，使得设备极其复杂，给试验工作带来很大的困难，因为它要求试验机能瞬时自动调整加于试样的载荷，以保持试样标距部分的总变形在试验过程中恒定不变。实际上，现



在的拉伸式松弛试验机并不能完全做到这一点,而是当试样产生一定微量伸长时,才启动减荷装置以减小加于试样上的载荷,使试样恢复原来的总伸长。结果在试验过程中试样的总伸长并不是恒定的,所得的松弛曲线也不是平滑的。图 11 列出理想的和实际试验所得的伸长-时间曲线及应力-时间曲线的示意图。

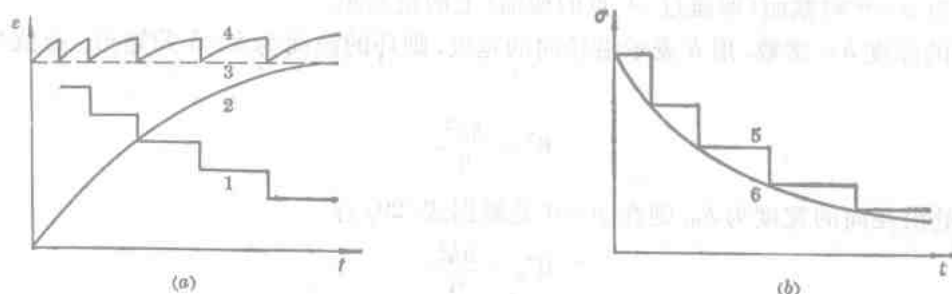


图 11 应力松弛试验中伸长-时间曲线(a)及应力-时间曲线(b)

1—实际弹性应变-时间曲线; 2—塑性应变-时间曲线; 3—理想总应变-时间曲线;  
4—实际总应变-时间曲线; 5—实际应力-时间曲线; 6—理想应力-时间曲线

由图可以看出,这种试验实际上是“多级”蠕变,也就是在周期分级降低应力下的蠕变。但当每级的伸长量和应力降低量极微时,实际所得的曲线和理想曲线将大致重合。

## (2) 环状试样试验法

由于用拉伸试验法进行松弛试验的复杂性,现在多采用环状试样试验法。这种环状试样如图 12 所示。

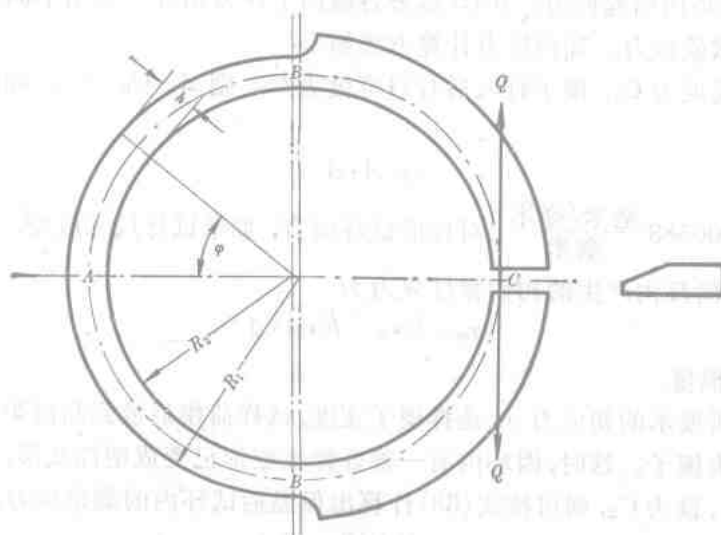


图 12 松弛试验用的环状试样

( $\phi 70$  毫米型标准试环,  $R_1=28.6$  毫米,  $R_2=25.0$  毫米)

在试环开口处  $C$  打入楔子,相当于对  $BAB$  工作截面加上一个弯矩,试环工作部分  $BAB$  夹角为  $\varphi$  处的截面上受到的弯矩为

$$M_{\varphi} = -(Qr + Qr \cos \varphi) = -Qr(1 + \cos \varphi) \quad (26)$$

根据弹性力学,该截面上的应力为

$$\sigma = \frac{M_{\varphi}}{W} = \frac{-Qr(1 + \cos \varphi)}{W} \quad (27)$$

这里  $W$  为材料抗弯矩。