

火力发电厂高级工培训教材

---

# 电厂金属与金属监督

上海市电力工业局 庄肖曾  
教育培训中心 何国群 合编  
顾家珍

中国电力出版社

# 前 言

本书是根据国家电力公司制定的高级工岗位培训火力发电厂热能动力专业“电厂金属材料”教学大纲编写的，主要目的是使学员掌握火力发电厂设备零件的选材、用材、失效分析和金属监督的基本知识。本书也可供电力设计和生产部门有关技术人员参考。

本书主要内容包括：金属的主要性能，金属学及热处理基本知识，常用金属材料，锅炉、汽轮机用钢以及火力发电厂金属监督，低合金钢和耐热钢的焊接等五个方面。本书在编写过程中，考虑到高级工岗位培训学员的特点，力图做到从教学实际效果出发，既阐述了基本概念，反映新理论，又紧密结合电厂生产实际。

本书计量单位除硬度值外，统一采用我国的法定单位，单位符号一律用国际符号。如强度的单位一律用  $\text{MN}/\text{m}^2$  ( $\text{MPa}$ )，它同工程单位制中的  $\text{kgf}/\text{mm}^2$  的关系为  $1\text{MN}/\text{m}^2 \approx 0.1\text{kgf}/\text{mm}^2$  (误差 2%)；冲击韧性  $a_k$  的单位采用  $\text{J}/\text{cm}^2$ ，它同工程单位制中的  $\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$  的关系为  $1\text{J}/\text{cm}^2 = 0.1\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$  (误差 2%)。硬度值仍沿用  $\text{kgf}/\text{mm}^2$  为单位，但通常不予标注。

本书由上海市电力工业局教育培训中心庄肖曾、俞画屏、颜家珍三位同志合编。庄肖曾担任主编，俞画屏担任副主编，颜家珍参加编写。俞画屏编写第一章至第七章，颜家珍编写第八章并负责全书标准的核对，庄肖曾编写第九章并负责全书的统稿工作。

书中的金相图片均选自水利电力出版社 1986 年 4 月出版的《金相图谱》一书。在此对该书的编写人员表示感谢。

由于我们水平有限，时间又很仓促，书中难免存在缺点和错误，恳切希望广大读者批评指正。

编 者

1998 年 10 月

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 金属的主要性能</b> .....	1
第一节 金属在常温下的机械性能 .....	1
第二节 金属在高温下的机械性能 .....	9
第三节 金属的稳定性 .....	12
复习题 .....	13
<b>第二章 金属的晶体结构和结晶</b> .....	14
第一节 金属的晶体结构 .....	14
第二节 实际金属晶体中的缺陷 .....	17
第三节 金属的结晶过程和同素异晶体转变 .....	21
复习题 .....	26
<b>第三章 金属的合金结构和铁碳合金相图</b> .....	27
第一节 二元合金状态图的概念 .....	27
第二节 铁碳合金的基本组元和相 .....	32
第三节 Fe-Fe <sub>3</sub> C 相图分析 .....	36
第四节 Fe-Fe <sub>3</sub> C 相图的应用 .....	51
复习题 .....	54
<b>第四章 金属的变形加工</b> .....	56
第一节 塑性变形对金属组织和性能的影响 .....	57
第二节 回复与再结晶 .....	64
第三节 金属的热加工 .....	67
第四节 金属的断裂 .....	69
复习题 .....	72
<b>第五章 钢的热处理</b> .....	74

第一节	钢在加热和冷却时的组织转变 .....	75
第二节	钢的退火与正火 .....	94
第三节	钢的淬火 .....	99
第四节	钢的回火 .....	106
第五节	钢的表面热处理 .....	110
复习题	.....	115
<b>第六章</b>	<b>常用金属材料 .....</b>	<b>118</b>
第一节	碳钢 .....	119
第二节	铸铁 .....	129
第三节	有色金属合金及轴承合金 .....	141
第四节	合金钢 .....	148
复习题	.....	174
<b>第七章</b>	<b>火力发电厂用耐热钢 .....</b>	<b>176</b>
第一节	金属的抗氧化性 .....	176
第二节	金属在高温时的机械性能 .....	178
第三节	耐热钢在高温时的组织稳定性 .....	185
第四节	耐热钢的强化原理和合金元素的作用 .....	189
第五节	耐热钢的分类 .....	193
第六节	锅炉、汽轮机主要零部件用耐热钢 .....	196
复习题	.....	213
<b>第八章</b>	<b>金属焊接 .....</b>	<b>215</b>
第一节	焊接接头组织、焊接应力与变形 .....	215
第二节	金属材料的可焊性 .....	219
第三节	电厂常用焊接材料 .....	222
第四节	碳钢与低合金钢的焊接 .....	252
第五节	耐热钢管及阀门焊接 .....	255
复习题	.....	266
<b>第九章</b>	<b>火力发电厂主要零部件金属事故分析 及金属监督 .....</b>	<b>268</b>

第一节	锅炉、汽轮机主要零部件金属事故分析 .....	268
第二节	火力发电厂金属监督的基本内容 .....	284
第三节	火力发电厂金属监督的常规技术手段 .....	288
复习题	.....	302
参考文献	.....	304

# 第一章 金属的主要性能

金属材料是火力发电厂（简称火电厂）热力设备及其它机械设备的重要材料，常用的有数十种，其物理、化学和高温机械性能不但可以满足热力设备的要求，而且具有较好的工艺特性。

金属材料以合金为主，因为合金的机械性能和工艺性能比纯金属的好，而且成本也低。在纯金属中加入一定量的其它金属或非金属，经熔炼后，可以获得我们所要求的某些特殊性能的合金。如轴承合金、耐热钢、凝汽器冷却管材料等。

选择材料时必须综合考虑材料的使用性能、工艺性能和经济合理性等。对一般机器零件，主要考虑材料的使用性能。

## 第一节 金属在常温下的机械性能

这里所指的机械性能，是指在常温下金属材料受到外力作用时的性能，即力学性能。主要指标包括：弹性、塑性、强度、硬度、冲击韧性和疲劳强度等。

### 一、弹性和塑性

金属受外力作用产生变形，当外力去掉后变形恢复的性能称弹性。随外力的消失而消失的变形称弹性变形。

金属受外力作用产生变形，当外力去掉后变形不恢复的性能称塑性。外力消失而不能恢复的变形称塑性变形。

下面以一个拉伸试验说明问题。

将一定形状和尺寸的低碳钢试样，在拉伸试验机上进行拉伸试验。在试样两端缓慢加荷载，试样受到轴向拉力而伸长。随着荷载加大，伸长量随之增加，直至试样拉断，如图 1-1 所示。

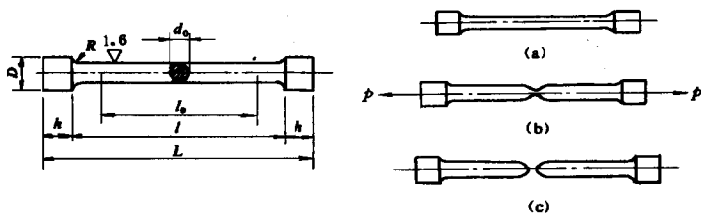


图 1-1 试验拉伸过程示意图

若将试样从开始直至断裂前所受的力  $p$  与对应伸长  $\Delta L$  绘成拉伸图，此图能反映该金属在拉伸时的弹性变形、塑性变形、直至断裂全过程的力学特性。图 1-2 为低碳钢的拉伸曲线图。

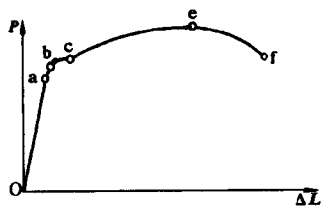


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

以应力  $\sigma$  (单位面积上的拉力  $p/F$ ) 和应变  $\epsilon$  (单位长度的伸长量  $\Delta L/l_0$ ) 来代替拉伸曲线上的  $p$  和  $\Delta L$ ，则绘制的应力与应变关系的曲线，称为应力—应变曲线。如图 1-3 所示。

图中  $Oa$  为直线段。当应力超过  $a$  点将偏离直线。 $Oa$  段的应力与应变成正比。 $a$  点对应的应力值称比例极限，用  $\sigma_p$  表示。

在比例极限内：
$$\sigma = E\epsilon$$

式中  $\sigma$ ——正应力， $\text{MN/m}^2$ ；

$E$ ——比例常数，弹性模量  $\text{MN/m}^2$ ；钢在室温下的弹



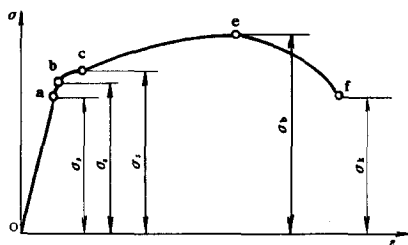


图 1-3 低碳钢的应力—应变曲线

性模量  $E \approx 206000 \text{MN/m}^2$ ;

$\epsilon$ ——应变变量。

金属的  $E$  值随温度升高而降低。 $E$  也表示了在单位变形程度下的应力。对要求变形小的零件就要选用  $E$  值较大的金属材料。如汽轮机的主轴、叶片等。

当应力大于  $\sigma_p$ ，从 a 点到 b 点，试样还处于弹性变形状态，即外力消失后变形也随之全部消除。如应力大于 b 点，卸去载荷后，变形只能部分消除，保留一部分塑性变形。b 点所对应的应力称弹性极限，以  $\sigma_e$  表示。在 bc 之间材料处于弹塑性变形状态。 $\sigma_p$  与  $\sigma_e$  非常接近。

当应力超过  $\sigma_e$  以后，再增加载荷到 c 点，这一过程中将出现一段近于水平的线段，即载荷几乎不变而应变继续增加，并明显地出现塑性变形，这种现象称屈服，c 点称屈服点。c 点所对应的开始产生屈服的应力叫屈服极限，用  $\sigma_s$  表示，它代表材料在拉力作用下开始产生塑性变形的最低应力值。有些材料无明显的水平段，屈服极限很难测出，通常将产生 0.2% 塑性变形时的应力作为屈服极限，以  $\sigma_{0.2}$  表示，称条件屈服极限。屈服极限是工程上的一个重要强度指标。

当试样产生屈服后，在增加载荷同时，塑性变形继续增

大。随着塑性变形量的增大，试样产生的变形抗力也不断加大，这就产生了所谓的“加工硬化”现象。

当载荷继续增加至e点，这时试样某处截面急剧缩小，变形主要出现在“缩颈”附近。继续变形时，缩颈处断面不断缩小，使试样上作用的载荷愈来愈小，因此应力随之降低，最后在f点发生断裂。

与拉伸曲线上最高点e相对应的应力值称为拉伸极限强度，以 $\sigma_b$ 表示。 $\sigma_b$ 表示材料的最大变形抗力，它是工程设计和选材的主要依据之一。

金属材料的塑性一般有两种表示方法，一种是以其延伸率 $\delta$ 来表示，即

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中  $\delta$ ——延伸率；

$l_0$ ——试样拉伸前的标距长度，mm；

$l$ ——试样拉断后的标距长度，mm。

另一种方法是用断面收缩率 $\psi$ 来表示材料的塑性，即

$$\psi = \frac{F_0 - F}{F_0} \times 100\%$$

式中  $\psi$ ——断面收缩率；

$F_0$ ——试样拉伸前的截面积， $\text{mm}^2$ ；

$F$ ——试样拉断后的最小截面积， $\text{mm}^2$ 。

$\delta$ 和 $\psi$ 的数值愈大，则表示材料的塑性愈好。塑性好是金属材料能够顺利进行塑性变形加工的必要条件。如需采用冷轧、冷锻、冷冲、冷弯等成型工艺的零件，必须选用具有一定塑性的材料。

## 二、强度

强度是金属材料在外力作用下抵抗变形和断裂的性能。

强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗扭强度等。工程上金属材料的强度指标主要是屈服极限  $\sigma_s$  和抗拉强度  $\sigma_b$ 。金属材料在超过  $\sigma_s$  的应力下工作，会使零件产生塑性变形；在超过  $\sigma_b$  的应力下工作时，会引起零件断裂破坏。

### 三、硬度

金属材料抵抗更硬的物体压入其内的能力，叫做硬度。材料的硬度愈高，表示其在表面一个很小的体积范围抵抗变形和破坏的能力愈强，塑性变形愈困难，所以它是一个同强度、塑性密切相关的重要性能指标，而不是一个单纯的物理量。硬度以一定压力  $P$  下压痕的深度或压痕单位面积所承受的载荷值来表示。

常用的硬度测定方法有布氏硬度法、洛氏硬度法和维氏硬度法。

#### 1. 布氏硬度

用一定直径的淬火钢球，在一定压力下压入试件表面，保持一定时间后卸载，测量试件压痕直径，并算出压痕面积。载荷值除以压痕面积，得单位压痕面积所受应力，即为测得的布氏硬度值，以 HB 表示。一般只标明大小，而不标注单位。布氏硬度试验原理如图 1-4 所示。

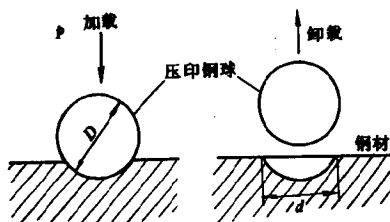


图 1-4 布氏硬度试验原理图

## 2. 洛氏硬度

用一定形状的坚硬压头，以一定压力压入金属表面，根据测得的压痕深度来计算硬度。一般规定以压入深度 $0.002\text{mm}$ 作为一个硬度单位。按材料软硬程度的不同，可以选用各组不同压头和总载荷。因此测出的洛氏硬度标度有三种：HRA（用 $120^\circ$ 金刚石圆锥压头， $58.8\text{N}$ 总载荷）、HRB（用 $1.588\text{mm}$ 直径钢球， $98\text{N}$ 总载荷）、HRC（用 $120^\circ$ 金刚石圆锥压头， $147\text{N}$ 总载荷）。

洛氏硬度试验示意如图 1-5 所示。

## 3. 维氏硬度和显微硬度

用一定载荷，将顶角为 $136^\circ$ 的金刚石四棱锥形压头压入被测试件表面，测量压痕对角线长度，计算出压痕面积，以单位面积上的载荷值来表示硬度，用符号 HV 表示。维氏硬度试验原理简图见图 1-6。

显微硬度实质上是小载荷的维氏硬度，压痕对角线以微米( $\mu\text{m}$ )计量，显微硬度用 HM 表示。显微硬度用以测量金相显微组织中某些组成相的硬度。

## 四、冲击韧性

### 金属材料抵抗瞬间冲击载

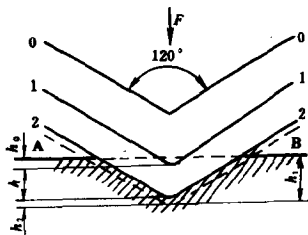


图 1-5 洛氏硬度试验示意图

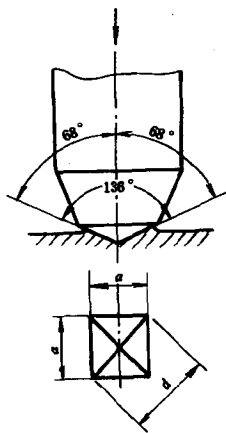


图 1-6 维氏硬度试验原理简图

荷的能力，称做冲击韧性。

冲击韧性一般用一次摆锤弯曲冲击试验来测定，如图1-7所示。

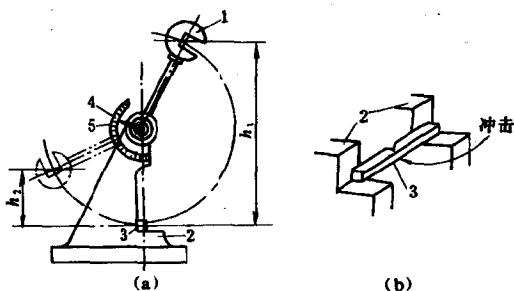


图 1-7 单次冲击试验原理图

(a) 冲击试验机；(b) 试样安放

1—摆锤；2—试验台；3—试样；4—指针；5—刻度盘

将标准冲击试样一次冲断，以试样缺口处单位面积上的冲击功来表示冲击韧性  $a_k$  值，即

$$a_k = \frac{A_k}{F}$$

式中  $a_k$ ——冲击值， $J/cm^2$ ；

$A_k$ ——一次冲断试样所消耗的冲击功， $J$ ；

$F$ ——试样缺口处截面积， $cm^2$ 。

冲击值的大小与很多因素有关，如试样形状、粗糙度、内部组织、环境温度等。汽轮机 Cr-Mo 钢转子当温度低于低温脆性转变温度时，其冲击韧性明显下降。如冲击能量不太大，而重复冲击次数较多，其承受冲击的能力不决定于冲击值，而主要决定于强度。例如球墨铸铁的冲击韧性虽不大，但同样可以用来制造柴油机曲轴。

## 五、疲劳强度

长期承受交变载荷作用的零件,在发生断裂时的应力,远低于材料的屈服强度,这种现象叫疲劳损坏。金属材料在无数次交变载荷作用下,不致引起断裂的最大应力叫做疲劳强度,用 $\sigma_{-1}$ 表示。

零件承受最大交变应力 $\sigma_{\max}$ 愈大,则引起断裂的应力循环次数 $N$ 愈低。将引起断裂的最大交变应力 $\sigma_{\max}$ 与应力循环次数 $N$ 的关系绘成曲线,即为疲劳曲线,如图1-8所示。

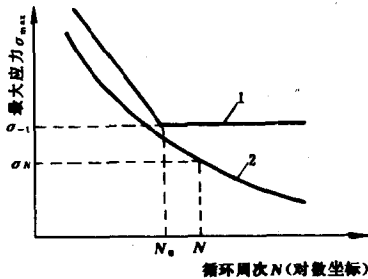


图 1-8 疲劳曲线示意图

在水平段处的交变应力即为 $\sigma_{-1}$ 。但有些金属材料的疲劳曲线无明显的水平段。因此在工程上以零件使用寿命规定其应力循环次数,在此循环次数的最大交变应力 $\sigma_{\max}$ 称为有限疲劳强度极限。汽轮机的叶片是以 $N=25 \times 10^6$ 来决定其疲劳强度极限的。

材料内部有夹杂物、表面划痕或结构形状引起应力集中而导致产生微裂纹,随着应力循环次数增加造成裂纹扩展,应力循环达到一定次数后,致使零件不能承受其载荷而造成突然破坏。

减小零件表面粗糙度，改善零件结构形状和提高材料冶金质量均能提高疲劳强度。

## 第二节 金属在高温下的机械性能

电厂热力设备在高温、应力下长期工作，金属的性能与室温性能差别很大，主要是因为金属内部的组织要发生显著的变化，如我们后面要讲到的珠光体的球化、石墨化、合金中碳化物的数量和结构发生的变化等等。因而金属如在高温下工作，其机械性能的变化与温度值、温度变化幅度、温度变化率和高温下工作时间的长短等均有关。

室温下，金属受外力作用，如零件不是立即损坏，那么基本上不会因时间的延长而损坏（某些金属除外），即强度与承载时间无关；高温下，工作情况就不同，零件在加载时不一定损坏，但随着时间延长，即使载荷值不变，零件也可能损坏，即强度与承受载荷时间有关。例如，退火状态的45号钢在 $500^{\circ}\text{C}$ 时的瞬间强度为 $\sigma_b = 400\text{MN}/\text{m}^2$ ，而加应力为 $300\text{MN}/\text{m}^2$ ，经20min左右会断裂。所以金属在高温下工作不能以瞬间强度作为性能指标。

金属在高温下的机械性能主要包括以下几个方面：

(1) 蠕变——金属在一定的温度和应力作用下，随着时间增加发生缓慢的塑性变形的现象。

(2) 持久强度——金属在高温和应力长期作用下抵抗断裂的能力，它是指在一定温度和规定持续时间内引起断裂的最大应力值。热力设备一般是指在一定高温值下工作 $10^5\text{h}$ 产生断裂的应力值，即为该温度时的持久强度，以符号 $\sigma_{T_0}^T$ 表示，其中 $T$ 表示温度。

(3) 应力松弛——零件在高温和应力长期作用下，虽总的变形量不变，但应力随着时间的增加而逐渐下降的现象。

(4) 热疲劳——金属受热时，如果膨胀受阻，出现温度梯度，或者材料本身不均匀会产生热应力。如金属零件的温度梯度出现周期性改变（例如汽轮机启动时转子表面温度高于心部温度，在停机时转子表面温度低于心部温度），热应力也将产生周期性变化。金属材料经受多次周期性热应力作用而遭到的破坏称为“热疲劳”破坏。

(5) 热脆性<sup>①</sup>——指钢在 400~500℃ 长期受热后会出现冲击韧性明显下降的现象。

(6) 低温脆性——低碳钢和高强度合金钢在某些工作温度下有较高的冲击韧性，但当温度下降到某一温度后，其冲

- ① 对钢来讲，随试验温度变化，在某些温度范围，材料韧性值呈现急剧下降（见图 1-9）。常用冲击试验以检验这些脆性发展情况，如冷脆、蓝脆、重结晶脆、红脆等现象，冷脆现象将在下一段中专门述及。

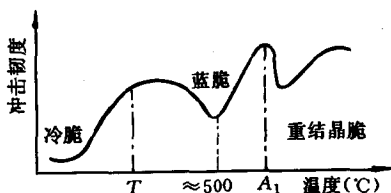


图 1-9 钢的几个脆性温区

蓝脆现象是指钢在加热到 500℃ 左右时，出现冲击值严重下降的现象，这时表面氧化色呈蓝色，因此称为蓝脆。在  $A_1$ — $A_3$  温度区间，钢中为  $\alpha$  与  $\gamma$  两相混合组织，冲击韧度较低，称为重结晶脆。在更高温度，若钢中含硫量较高时，会在晶界上产生 FeS-Fe 的共晶液体，冲击韧度下降，称为红脆。

上述脆性都是指正在该温度时出现的脆性现象，当温度下降离开该温度时，这种脆性不再存在；但有些脆性现象却是在某一温度加热后，冷却至室温仍然保留，如第一类、第二类回火脆性。此外，在大致相当蓝脆温度长期停留（数百至数千小时），冷到室温仍然存在脆性，称为热脆，热脆现象对在蓝脆温区使用的锅炉、容器及管道等很重要。



击韧性  $\alpha_k$  值和断裂韧性  $k_{1c}$  ① 值显著降低而造成材料的脆化现象。该温度称低温脆性转变温度 FATT。

金属低温脆性转变温度也就是脆性断面面积占 50% 时的温度。

低温脆性转变温度随材料成分、冶金质量、零件表面质量、热处理不同而不同。FATT 不是不变的，金属在高温工作过程中有逐渐升高的现象。Cr-Mo-V 钢（大型汽轮机转子钢材）的 FATT 为  $80\sim 120^\circ\text{C}$  左右，由于其高于室温，如果汽轮机运行不当，将有可能产生转子脆断事故。国外有些电厂以 FATT 作为划分冷态和热态启动的界线。我国哈尔滨汽轮机厂引进美国西屋公司技术生产的 600MW 机组汽轮机转子和北仑港电厂从法国引进的 600MW 汽轮机转子出厂前的超速试验要求在热箱内进行，其原因之一是转子心部温度要超过 FATT 后才允许做超速试验。由于 FATT 随着运行时

- 
- ① 断裂韧性  $K_{1c}$  是近代提出的表征材料强度与韧性综合的性能指标，它是材料在一定应力作用下抵抗其由于内部微小缺陷或缺口（如气泡及夹杂物）等所产生的裂纹扩展以致破断的能力。过去在设计金属结构件时，假定材料是连续而均匀的无缺陷的介质，因此认为材料的屈服点越高，则对于相同的工作应力，结构件就越安全。但是实际上金属材料本来存在着由于内部缺陷所产生的裂纹或类似裂纹的界面（如夹杂物），因此构件常在达到一定应力状态时（远低于设计的载荷）就使其裂纹扩展而发生早期脆断。为此在设计构件时许可应力应该小于能使裂纹突然扩展的应力才能防止脆断。在选用材料时，强度并不一定越高越好，而应选用强度高但韧性也好的材料，甚至强度稍差一些而韧性好的高强度钢比强度更高而韧性差的材料更为安全。在过去传统的材料机械性能的指标中，冲击断裂包括裂纹的产生与扩展两个过程，冲击值  $\alpha_k$  是材料强度与塑性的综合；但事实上材料中本来存在着裂纹，因此冲击值不能正确反映问题的实质；而断裂韧性是材料强度与韧性的综合，它与材料内部原来存在的缺陷或裂纹的尺寸实际上决定了使构件脆断的应力大小。断裂韧性已成为设计超高强度钢构件时衡量其可靠性的一个重要的性能指标。