

1  
Wärmebehandlung  
der Bau- und  
Werkzeugstähle

3. Auflage

Herausgeber: Hanns Benninghoff

Signis  
Fachbuchreihe zur Fertigungstechnik  
Gruppe: Werkstoff, Oberflächen-  
und Wärmebehandlungstechnik

BAZ Buchverlag Basel

# 结构钢与工具钢热处理

中国机械工程学会热处理学会  
北京机械工程学会热处理分会

## 前 言

本书由西德、瑞士、奥地利的几位专家、学者分别编写各章节汇总而成，对象是热处理专业人员、热处理熟练工和大学学生，共有廿一章。第一章是瑞士U.Wyss博士撰写的序言；第二章、第三章是瑞士R.Winkelmann博士编写的“金属材料的机械性能试验”和“钢铁材料的生产和成形”；第四章至第八章为瑞士U.Wyss博士编写的“铁-碳状态图”，“过冷奥氏体的转变”，“转变过程对于硬化能力的实际影响—淬透性”，“应用Jominy端淬试样进行淬透性试验和它的实际应用”以及“回火”；第九章为西德U.J.Möller, U.Boor博士编写的“淬火和回火用的有机液体”；第十、十一章为瑞士R.Winkelmann博士编写的“加热与退火”和“时效硬化”；第十二、十三章为瑞士J.Heydecker博士编写的“感应淬火”和“火焰淬火”；第十四章为瑞士Otto H.C.Messner编写的“氧化和保护气氛”；第十五章为西德H.Kunst, D.Liedtke, 瑞士U.Wyss编写的“渗碳淬火”；第十六章为西德D.Liedtke编写的“渗氮和氮碳共渗”；第十七章为瑞士K.Dolder, 奥地利A.Kulmburg, R.Pototschnig, A.Schindler等编写的“工具热处理”；第十八章为瑞士U.Wyss博士编写的“钢件热处理变形的重要规律”；第十九章为西德R.Jönsson编写的“热处理时及热处理后工件形状和尺寸变化的校正”；第二十章为瑞士E.Adam编写的“热处理时温度的测量和调节”；第二十一章为“附表”。此书系1978年出版。

中国机械工程学会热处理学会与国外技术交流中获得此书，经有关专家阅读后认为此书内容丰富，有新的见解，是一本很好的教材和参考书。为此，由热处理学会组织翻译，委托北京市热处理分会出版，以供国内广大会员和从事热处理工作人员参考。

## 目 录

|       |                                              |
|-------|----------------------------------------------|
| 前 言   |                                              |
| 第 一 章 | 序..... ( 1 )                                 |
| 第 二 章 | 金属材料的机械性能试验..... ( 3 )                       |
| 第 三 章 | 钢铁材料的生产和成形..... ( 11 )                       |
| 第 四 章 | 铁-碳状态图 ..... ( 17 )                          |
| 第 五 章 | 过冷奥氏体的转变..... ( 25 )                         |
| 第 六 章 | 转变过程对硬化能力的实际影响—淬透性..... ( 33 )               |
| 第 七 章 | 应用《Jominy》端淬试样进行 淬 透 性 试验和它的实际应用..... ( 43 ) |
| 第 八 章 | 回火..... ( 49 )                               |
| 第 九 章 | 淬火和回火用的有机液体..... ( 59 )                      |
| 第 十 章 | 加热与退火..... ( 83 )                            |
| 第十一章  | 时效硬化..... ( 95 )                             |
| 第十二章  | 感应淬火..... ( 99 )                             |
| 第十三章  | 火焰淬火..... ( 115 )                            |
| 第十四章  | 氧化和保护气氛..... ( 121 )                         |
| 第十五章  | 渗碳淬火..... ( 137 )                            |
| 第十六章  | 渗氮和氮碳共渗..... ( 191 )                         |
| 第十七章  | 工具热处理..... ( 221 )                           |
| 第十八章  | 钢件热处理变形的重要规律..... ( 263 )                    |
| 第十九章  | 热处理时及热处理后工件形状和尺寸变化的校正..... ( 273 )           |
| 第二十章  | 热处理时温度的测量和调节..... ( 285 )                    |

# 第 一 章

## 序

U. 维 斯

### 1.1. 前言

尽管人们早已知道热处理对金属材料的机械性能, 以及工具、构件和机器的可靠性具有重要的意义, 但是直到前几年, 在广泛的技术领域内对热处理工艺的正确应用还没有引起应有的重视。经过专业主管部门积极地进行情报交流, 改变了这种状况, 目前, 热处理对构件强度、材料的宏观、微观和超微观组织以及内应力等因素起着决定性的影响已广泛地被人们所认识。

对许多直接或间接从事热处理工作的人, 以及由于本职工作对热处理有些了解的人来说, 对热处理工作仍然感觉很困难。这是由于和所有的机械加工不同, 在材料内部发生变化的过程是不可见的。根据确定的硬度、机械性能或避免出现尺寸变化和变形, 以至裂纹, 最后人们在实际生产过程中制订出合适的工艺, 这就对一般的机械加工方法提出了另外的要求。

以前, 对于给定材料、构件的可靠性几乎只由锻工和热处理工的传统实际经验来决定。随着现代高水平的材料科学逐步发展, 提出了热处理工艺的理论, 为此, 依靠科学基础知识在较短时间内将发展新的、更好的热处理工艺。但是要写出一部内容丰富的专业著作是困难的, 一般地说, 新的理论应用于实际是缓慢的。

本书企图对广大的热处理工、设计人员、制造工作人员介绍钢热处理的主要原理, 着重涉及在这个领域内需要重视的知识, 除了热处理重要原理和传统热处理工艺外, 也涉及新的工艺。因此, 本书可能对高等技术学校、热处理领域的研究人员以及技工学校教师有所帮助。

人们学习这本教材, 只要有生产实际经验, 不需由金属学专家直接帮助, 就应该有能力理解这本书籍。

### 1.2. 术语与缩写

目前在涉及技术术语、缩写和单位时使用许多各种各样的术语、缩写和单位。通过使用发现, 有些是不确切的。为使这些确定的定义与现有的国际习惯不相矛盾, 在本书中规定的定义优先采用 DIN 17014 标准中的热处理概念和术语。对于机械性能和缩写符号则使用标准中的有关规定。应用的有关专业的概念在书中有注释, 并有一部分是详尽解说。

### 1.3. 新的国际统一单位

随着国际单位制的实行, 在技术领域里正在改变着各种各样日常运用的单位和数值, 因此, 必然要出现一个改变老习惯的过渡时期。这种改变老习惯以获得新习惯的巨大工作必须加速进行。

迄今为止,普通单位中的重要而引人注目的改革是kp或kgf改为牛顿(N),以及强度度量单位用牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ )表示。牛顿是施于1公斤(kg)物质加速到1米/秒<sup>2</sup>( $\text{m}/\text{s}^2$ )的力。在地球上所谓1公斤的重量作为力的度量时,就要考虑地心吸力,相当于牛顿的9.81倍,因为地心吸力给1公斤物质以9.81米/秒<sup>2</sup>的加速度。牛顿和牛顿每平方米应力的数值为那些目前采用的单位kgf和 $\text{kgf}/\text{mm}^2$ 的9.81倍。

近似计算时用换算系数就足够了,例如 $60 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ 大约等于 $600 \text{ N}/\text{mm}^2$ 。在换算保证值时,必须采用换算系数9.81。此时必须把抗拉强度值凑成带尾数0的整数,把屈服点凑成0或5的整数,在确定 $\text{N}/\text{mm}^2$ 的新保证值时,要预先考虑到只带尾数0的整数。

缺口冲击韧性现在改为缺口冲击功,以单位焦耳(J)表示。这时这种功不再针对现在 $1 \text{ cm}^2$ 横截面而言( $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ )。1焦耳等于1牛顿米(Nm)。在换算保证值 $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 时,以Nm乘以试样横截面( $\text{cm}^2$ ),再乘上9.81,例如按现在DIN的标准试验时, $10 \text{ kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 得出下面的值: $10 \text{ kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2 \times 0.70 \text{ cm}^2 \times 9.81 \text{ N}/\text{kgf} = 68.67 \text{ J}$ ,凑成整数得69 J。这是略去小数凑成整数。在计算缺口冲击功时必须切实掌握这个计算方式。

在硬度测定时出现了如下情况,在换算为力的单位牛顿时,布氏硬度、维氏硬度和洛氏硬度的数值是不变的。到目前为止,公斤力仍同时存在,但是以后将用牛顿表示。由于相应的原因,这个定义说明数值是不变的。这时布氏硬度和维氏硬度的单位不再用 $\text{kgf}/\text{mm}^2$ 表示,而只用符号HB(布氏硬度)或HV(维氏硬度)的数值,为了完善,还可以把检验时的条件用符号来补充。

气体和液体的压力将来要用帕斯卡(pascal, pa)测量, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2$ 。巴(bar)已被采用,因为Pa只表示很低的压力。

$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N}/\text{m}^2 = 10 \text{ N}/\text{cm}^2 = 1.02$  大气压。毫巴(mbar) =  $10^{-3} \text{ bar}$  也在使用,和目前使用的大气压作为压力度量有了联系。

低压和真空度量目前大都用托(Torr)来度量。 $1 \text{ Torr} = 1 \text{ mmHg}$ 。人们逐渐习惯采用帕斯卡(pascal)。 $1 \text{ Torr} = 133.3 \text{ Pa} = 1.33 \text{ mbar}$ 。

在温度测量时似乎没有什么变化。虽然摄氏( $^{\circ}\text{C}$ )以凯氏( $^{\circ}\text{K}$ )代替,但是 $1^{\circ}\text{K}$ 很精确地等于 $1^{\circ}\text{C}$ 。重要区别在于0点。刻度盘上凯氏零点是 $-273.15^{\circ}\text{C}$ 。这是绝对零点。因此凯氏温度只有正值。摄氏表中某一个温度数值相当于凯氏温度表中 $273^{\circ}$ (准确的数值为273.15)以上的数值。本书中我们还是用摄氏来表示温度。

在热工方面,能的单位将来用焦耳(J或kJ)来代替卡(cal)。 $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$ ,即 $1 \text{ kcal} = 4.1868 \text{ kJ}$ 。为此,比热的值也改变为 $1 \text{ cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C} = 4.1868 \text{ J}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{K}$ ,即 $1 \text{ kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C} = 4.1868 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{K}$ 。

新旧单位换算表参阅21。

(李吉云译,朱沅浦校)

## 第二章 金属材料的机械性能试验

R. 温克尔曼

对热处理工作者而言，基本试验方法和材料特性值有：

### 2.1. 拉伸试验

如将一圆柱形或棱形试棒的一端固定，在另一端施加一轴向拉力  $F$ （以牛顿计），测得试棒起初延伸  $\Delta L$  的量，它与力  $F$  成正比。如将负荷  $F$  重新去除，则试棒回复到其原来的长度。因此说明试棒发生了弹性变形。如果现在使力  $F$  不断增加，最后达到一个值，在此值时，延伸量  $\Delta L$  不在与力  $F$  成正比，或者不断迅速增大。在去除负荷以后，发现此试棒不再完全回复到其原来的长度，形成一种持久的延伸。因此说此试棒发生了塑性变形。不断地使  $P$  增大，则试棒总是更加屈服，这就是说材料在试棒截面同时减小的情况下流动。最后试棒在一定的位开始收缩，同时  $F$  超过一最大值。尽管继续延伸，而  $F$  在收缩作用下减小，直至试棒在最细处破断。

为了表明这个过程，作出力  $F$  和延伸量  $\Delta L$  的关系曲线（图2.1）。这是由拉伸试验机直接作出的拉伸图。

为使与试棒截面积无关，或者可以对截面积不同的试棒进行比较，用应力  $R$  ( $N/mm^2$ ) 代替力  $F$  ( $N$ )，即以原来的试棒截面积  $S$  ( $mm^2$ ) 除力  $F$ 。如此得出的应力值只在弹性范围内在一定程度上与被拉伸试棒的真正应力互相一致。

2.1.1. 屈服限  $R_s$  ( $\sigma_s$ )/延伸限  $R_p$  ( $\sigma_{0.2}$ )

在2.1节中肯定，拉伸试验时有一个一定的力  $F$ 。在此力作用下试棒发生弹性变形，超过这个范围就称为塑性变形。如果对试棒施加的负荷超

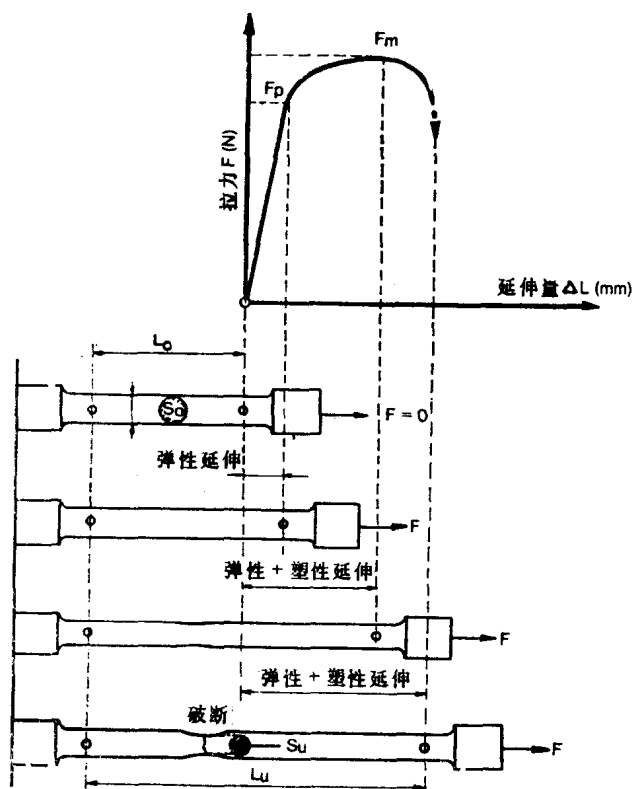


图2.1 拉伸试验时力和延伸量的关系简图：拉伸图

$F$ —拉力 ( $N$ )  
 $F_m$ —最大拉力 ( $N$ )  
 $F_p$ —比例极限时的拉力 ( $N$ )  
 $S_0$ —试棒初始截面积 ( $mm^2$ )  
 $S_u$ —破断截面积 ( $mm^2$ )  
 $L_0$ —初始测量长度 ( $mm$ )  
 $L_u$ —破断后的测量长度 ( $mm$ )

过这个极限, 则试棒不再回复到其原来的长度, 而呈现出一个新的长度  $L$ 。由此得出:

$$\text{永久延伸率} = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100(\%)$$

如在应力  $R = \frac{F}{S_0}$  时, 延伸率正好达到 0.2%, 则称此应力为

$$0.2\% \text{ 延伸限 } R_{p0.2}(\sigma_{0.2}) = \frac{F_{0.2}}{S_0} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

其中  $S_0$  相当于试棒的初始截面积。

许多钢材, 特别是软钢的拉伸图中, 在 0.2% 延伸限范围内出现不连续曲线。在这种情况下用容易测定的屈服限代替此延伸限:

$$\text{屈服限 } R_s(\sigma_s) = \frac{F_s}{S_0} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

对于奥氏体钢, 往往测定其 1% 延伸限而不是 0.2% 延伸限。

### 2.1.2. 抗拉强度 $R_m(\sigma_b)$

在曲线上的最高点时, 拉伸试验机显示出最大负荷  $F_m$ 。如将此力仍除以原来的试棒截面积  $S_0$ , 则得出:

$$\text{抗拉强度 } R_m(\sigma_b) = \frac{F_m}{S_0} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

这个材料特性值因为能以相当高的精度测定, 因此它在材料试验中具有重要意义。除了屈服限以外, 它主要用于根据机械性能区分钢材。

抗拉强度一般随着合金含量, 特别是含碳量的增加而增加。通过淬火、调质或冷作硬化同样可以使抗拉强度增加, 但其增加幅度低于屈服限。

### 2.1.3. 屈服限比(屈强比)

对于热处理工作者具有特别意义的是:

$$\text{屈服限比} = \frac{\text{屈服限}}{\text{抗拉强度}} = \frac{R_s}{R_m} \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_b} \right)$$

非合金正火钢的这个值平均为 0.7 (0.6~0.75)。通过淬火、调质、冷作硬化或通过添加合金元素可以使屈服限比显著地增加到接近 1。

### 2.1.4. 破断延伸率 A

破断延伸率或简称为延伸率, 是表征已破断试棒的永久(塑性)延伸的一个量度。为了测定破断延伸率, 要在拉伸试验之前在试棒的圆柱形或棱柱形杆上一定的距离内作出两个记号。这个距离称为测量长度  $L_0$  (图 2.1)。将两个破断部分拼合在一起之后, 这个距离就增加到  $L_1$ 。永久延伸即为  $L_1 - L_0$ 。如用测量长度  $L_0$  除这个值(100%), 则得:

$$\text{破断延伸率 } (d) = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \cdot 100(\%)$$

但是这个延伸率值与测量长度/试棒截面积之比有很大的依赖关系。只有当此测量长度比保持恒定时, 才能将延伸率值互相进行比较。目前在中欧主要应用:

$$\text{短测量长度 } L_0 = 5d \text{ 或 } L_0 = 5.65\sqrt{S_0}$$

其中  $d$  是试棒直径,  $S_0$  是非圆柱形试棒截面积。在特殊情况下也应用

$$\text{长测量长度 } L_0 = 10d \text{ 或 } L_0 = 11.3\sqrt{S_0}$$

在英国和美国一般应用其他试棒尺寸，得出的延伸率稍许高些。

延伸率是表征材料韧性的一个量度，但只在静态(静止的或缓慢增加的)拉伸应力下，而不是在动态(交变或冲击)应力下。对于在加工时或在操作时必须承受强烈变形的材料，要求具有高的延伸率。

延伸率一般随着抗拉强度和硬度的增加而减小。杂质及其他材料缺陷对它有十分强烈的影响。

#### 2.1.5. 破断收缩率 $Z(\psi)$

已破断试棒的破断平面具有不同程度地变小了的截面积  $S_1$  ( $\text{mm}^2$ ) (图 2.1)。如果用原来的截面积  $S_0$  除截面积减小量  $S_0 - S_1$ ，则得

$$\text{破断收缩率 } Z(\psi) = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100(\%)$$

这个值和延伸率一样，表明材料在静态或缓慢增加的拉伸应力下的韧性。但是高的收缩率在许多情况下标志着高的缺口冲击功(细粒的和均匀的组织)。低的收缩率大多相当于低的冲击功(不均匀的粗晶粒、杂质、偏析等)。

通过再结晶(正火)或调质往往可以使破断收缩率显著增加，添加合金元素也是如此。如果一种钢具有突出的纤维组织，则平行于纤维方向的纵向拉伸试棒就具有最大的破断收缩率，而横向试棒的一般却低得多。

#### 2.1.6. 试验条件和取样

因为抗拉强度，特别是韧性值与试验条件有很大的关系，所以必须始终严格遵守标准中规定的试验规范。在任何情况下都必须说明所按照的规范，说明试验温度、试验速度、试棒的标准或尺寸、带铸皮或轧皮的试棒。对于锻造材料，还必须注意试棒轴线位置与纤维方向的关系，即纵向、横向或切向试棒。对于经过淬火或调质的钢材、试棒，表面淬硬的深度也起着决定性作用。

### 2.2. 硬度试验方法

拉伸试验(参阅 2.1)向材料试验人员提供一些准确而且再现性很好的材料特性值。遗憾的是这种试验不是无损的。如果没有可供制作拉伸试棒之用的材料，或者待试材料难以进行切削加工或者硬而脆，则可利用许多硬度试验方法。这些方法可以直接应用于工件，比较简单而且迅速，因此成为热处理实践中不可缺少的辅助检验手段(参阅表 21.7、21.4 的硬度比较值)。

#### 2.2.1. 布氏硬度 HB

所谓一个物体的硬度通常是指该物体对于另一较硬物体压入的抗力。

例如将一个淬硬的钢球压入待试材料的表面，则材料上的对应地点一部分发生弹性变形，一部分发生塑性变形。负荷不断增加时，金属材料的塑性变形总是不断增加，永久的圆形压痕即接触变形面增大，而材料局部硬化。在给定的压力下，最后再也压不进去。因此永久压痕的大小决定于钢球直径和给定的试验压力，最终决定于材料的可变形性和硬度。因此，在给定的钢球直径和给定的试验压力下，压痕直径和硬度之间存在着直接的关系。

进行布氏试验时，在正常情况下应用直径 5 至 10 毫米的试验钢球，试验负荷在 1225 (125) 和 29420 (3000) 牛顿 (kgf) 之间。施加负荷时间为 5 至 15 秒、视硬度范围而定。如果

希望压痕较小(成品件,材料厚度较小时),也可以按照适当的试验规范应用较小的试验钢球和较低的试验负荷。产生的压痕直径用一测量放大镜测量,并查表求得布氏硬度 HB。

钢材的布氏硬度和抗拉强度之间存在着直接关系。在大多数情况中适用

$$\text{抗拉强度} = 0.35 \cdot \text{HB}$$

这样由布氏硬度计算出的抗拉强度只是近似值,必然始终与真正的抗拉强度有差别。对于奥氏体钢,例如 CrNi 不锈钢,以及有色金属采用其他的换算系数。

#### 2.2.2. 维氏硬度 HV

这种硬度试验方法以与布氏试验相同的原理为基础,但是应用一个特殊形状的金钢石角锥体作为试验物体。在正常情况下,试验负荷为 49(5)至 980(100)牛顿(kgf),在低负荷范围中为 1.96(0.2)至 49(5)牛顿(kgf)。用测量显微镜测量正方压痕的对角线,从而求得所产生压痕的大小。再由此按表查得维氏硬度 HV,在低硬度范围(约 HV 400 以下)中,它与布氏硬度相当一致。

#### 2.2.3 洛氏 B 硬度, HRB

上述两种硬度试验方法的共同缺点在于压痕的大小必须用测量放大镜或测量显微镜测出,然后由相应的表查得硬度值。Rockwell 氏的预负荷硬度试验法避免了这个缺点。这里用一个量表测量压痕的深度,量表直接定出硬度值。洛氏 B 试验法应用一个淬硬钢球(直径 1/16")作为试验物体。用 98 牛顿(10kgf)的预压力,并用 980 牛顿(100kgf)的总压力将钢球压入试件。压痕深度差可直接从量表上以硬度值读出。这种试验方法主要在美国广泛应用。

#### 2.2.4. 洛氏 C 硬度, HRC

这种试验方法与 HRB 的差别只在于用金钢石锥体代替钢球。预压力在此也是 98 牛顿(10kgf),但总压力为 1471 牛顿(150kgf)。

洛氏 C 试验法是在淬火车间实际工作中应用得最广的试验法。它主要用于试验淬透的、渗碳淬火的(渗碳深度至少 0.5 毫米)、火焰淬火的、感应淬火的或高温回火调质的工件。

#### 2.2.5. 用移动式仪器的硬度试验

上述各种硬度试验方法在大多数国家中已经作为标准方法而标准化了。一般是用固定式仪器,待试材料必须送到仪器上。但是上述四种方法:HB、HV、HRB 和 HRC 也可用移动式仪器求得,但其精度始终不能令人满意。

小型手提式硬度试验仪的数目是不少的,它们各按不同的试验方法工作,大多直接给出以 HB、HV、HRB 或 HRC 计的硬度值。但在这里为了结构简单而牺牲了测量精度。在淬火车间和材料库中,这些仪器作为固定式标准仪器的补充却往往起着重要作用。

最重要的移动式硬度试验仪按照下列原理工作:

##### 2.2.5.1. 压入式硬度试验仪

将本仪器放到试件的磨削表面上,这时一个金钢石测头在弹簧压力作用下压入表面。金钢石测头的行程可以例如从毛细管中的一根极细水银柱放大后读出。本仪器直接定出 HB、HV 或 HRC。

##### 2.2.5.2. 冲击式硬度试验仪

一根冲击杆端上的一个淬硬钢球被放到试件上。一根突然松开的弹簧冲击钢球,使钢球压入待试表面。所产生的压痕按布氏试验法测量并换算成 HB。只有当冲击方向准确地垂直于试验表面并且试件不弹动,即在实心零件上或在完美的支座上时,这种试验才能提供相当可

靠的硬度值。

与此相似的目前还有用得不多的波尔迪冲击锤，其冲击功是由一次普通锤击产生的。

这种方法不适用于硬材料。

#### 2.2.5.3. 回跳式硬度试验仪

如果一个具有硬的钢或金刚石球的测头由一定的高度落到待试材料的磨削表面上，则由于试件硬度的不同，它回跳的高度也不同。在硬材料上只产生微小的压痕，而回跳量大；在软的塑性材料上，却为产生明显的压痕而消耗功，回跳量就相应地小些。根据回跳量的大小查表，能以一定的近似程度换算成 HB、HV 或 HRC 值。

应用这种仪器时，主要必须注意待试表面以及试验仪的位置，视仪器用的自由落下试验物体而定。在这里，试验精度除了取决于表面质量以外，也与试件的质量及其支承有很大关系。

#### 2.2.5.4. 按压式硬度试验仪

这种试验仪和试验方法在很大程度上利用了传统的硬度定义：能划入另一种材料的材料，相对而言具有较高的硬度。例如，金刚石划入淬硬钢，淬硬钢划入软钢，软钢划入铜。用这种方法可以定出定量的硬度值。

从这个原理改进而成的试验方法就是按压式试验法。具有已知 HRC 硬度并经磨削的锐角试验笔在轻微的压力下撞击试件的磨削表面。如果待试材料比试验笔硬，则试验笔在表面上滑开，在相反的情况中，试验笔的棱角稍稍压入试件表面并固着不动。现在如果有一系列各种硬度的试验笔，就可以定出试件的硬度范围。这种方法的最佳适用硬度范围在 HRC55 和 67 之间。因为压入深度很小，可能存在的软皮会导致产生误差。

#### 2.2.5.5. 硬度试验锉

更简单一些的是与按压式硬度试验相近的锉试。专门应用于这个目的的一把干净的锉刀在轻微的压力下在待试表面上运动。一个有经验的试验者可以根据这时感觉到的阻力大致判断出硬度。

这个方法在实际工作中经常应用。它主要用于检验淬硬钢的软斑或软皮，而不能得出硬度的数据。

### 2.3. 缺口冲击弯曲试验

拉伸试验提供的特性值，只确定一种材料在静态单轴向拉伸应力下的性能。因为在动态下，主要在多轴向应力状态下，材料性能却完全不同了，这就必须应用相应的试验方法。如果一根缺口试棒受冲击而弯曲，则主拉伸应力横向地作用于缺口，缺口底部就发生多轴向应力状态，它使材料的变形能力暂时下降，从而使试件或多或少地变脆而断裂。这时测出使某一试件以这种方法断裂时所用的功。常用的缺口冲击弯曲试验提供缺口冲击功  $A_v$ （参阅 2.3.1.）。

#### 2.3.1. 缺口冲击功 $A_v$

将精确规定尺寸的缺口试棒（图 2.2）放在摆锤式冲击试验机中用一次冲击使之断裂。如果摆锤的轨道中没有试件，则摆锤摆向冲击试验机的另一侧，摆到最大高度（零位调节：制动功 = 0 J）。如果在轨道的最低点击碎一个试件，则这时所耗的冲击功就使摆高减

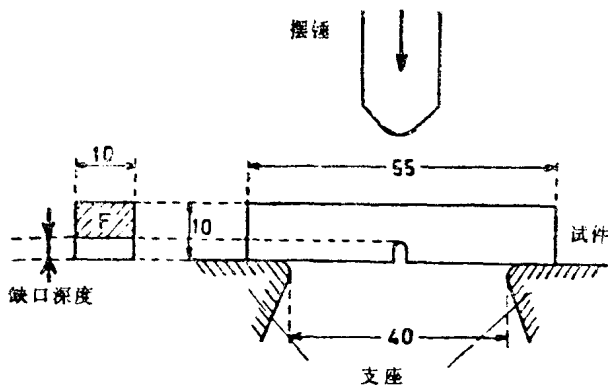


图2.2. 缺口冲击弯曲试件简图

小。它与最大摆高之差就是所求的制动功或冲击功（以J计），可以从冲击试验机上直接读出（图2.3）。

过去所用的缺口冲击韧性相当于单位试验截面积的缺口冲击功。缺口冲击功与试件形状和试验条件有很大关系，例如试件大小、缺口深度、冲击速度、缺口锐度（缺口半径）和试验温度。试件轴线与轧制方向或主要锻造方向的相对位置也可能起决定性的作用。

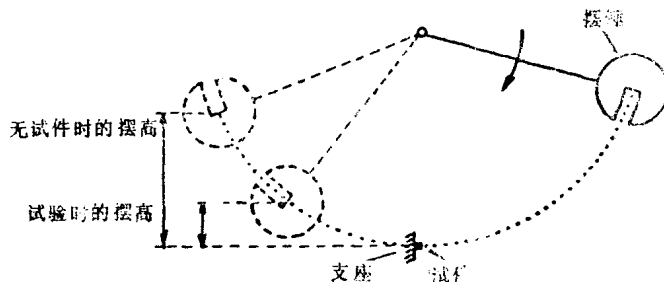


图2.3 摆锤式冲击试验机

### 2.3.. 2钢的种类和预处理对缺口冲击功的影响

使钢的组织细化或平衡（均质化）的一切措施都提高其缺口冲击值：

|            |                         |
|------------|-------------------------|
| 锻造或轧制      | 对于铸态，主要在纵向试件上使缺口垂直于纤维方向 |
| 扩散退火       | 对于铸态                    |
| 正火         | 在晶粒粗化或冷作硬化之后            |
| 调质         | 对于退火状态                  |
| 在浇铸过程中使钢镇静 |                         |
| 用镍或钼合金化    |                         |

下列各项使缺口冲击韧性劣化：

|      |        |
|------|--------|
| 过热   | 晶粒粗化   |
| 粗晶退火 | 晶粒粗化   |
| 渗碳   | 晶粒粗化   |
| 淬火   | 降低变形性能 |

在450—550℃之间回火 对于回火脆性的钢，例如Cr钢、CrNi钢和Mn钢，但不包括含钼钢

|         |                    |
|---------|--------------------|
| 冷成形     |                    |
| 时效      | 某些冷作硬化钢在200和300℃之间 |
| 钢渣杂质和偏析 | 在它们呈纤维状并平行于缺口时     |

晶界析出  
含碳量增加

### 2.3.3. 缺口冲击值与其它强度性能的关系

缺口冲击功一般随着钢的抗拉强度和硬度的增加而降低。如果一种钢的缺口冲击值不高，则拉伸试验时的收缩率大多也小。高的缺口冲击韧性大多表示收缩率大。与此相反，经过时效处理和时效硬化的钢，可能在缺口韧性低的同时，在拉伸试验中呈现良好的收缩率。关于缺口冲击功随拉伸试验获得的性能而变化的概况见回火图（参阅 8）。

### 2.3.4. 缺口冲击功与试验温度的关系

缺口冲击功一般在 20℃ 的试验温度下求得。如果在 -100 和 +100℃ 之间的温度下试验较大数量的相同钢材试件，则得出图 2.4 的曲线。

低于一临界温度时，缺口冲击值就开始剧烈地向下分散（陡降），最后在更低的试验温度时转入低位。

在比较各种钢材时，主要着眼于高位的位置和转变区的温度范围：高位愈高，曲线向左（向较低温度）移动的愈远，则钢材的抗脆断性愈大。

这个判据主要对于判断可焊结构钢有着重要作用。

为了确定转变温度，越来越多地应用 ISO-V 试件，过去也称为夏氏 V 型缺口试件。这时根据协议情况适用下列判据：

- 1) 缺口冲击功达到  $A_v = 28$  或 41 焦耳时的温度；
- 2) 达到高位缺口冲击功的 50% 时的温度；
- 3) 断面的无光泽部分和结晶状部份相等时的温度；
- 4) 测得试件侧向变宽 0.64 或 0.89 毫米时的温度。

陡降区除了因缺口锐度、试件大小和冲击速度的不同而移动以外，还因在较高温度后的下列材料性能，即因抗脆断性的劣化而移动。

过热  
粗晶退火  
渗碳  
回火  
时效  
冷成形加工

晶粒粗化  
晶粒粗化  
晶粒粗化  
对于回火敏感的钢在 450 至 550℃ 时  
某些冷作硬化钢在 200 和 300℃ 之间回火

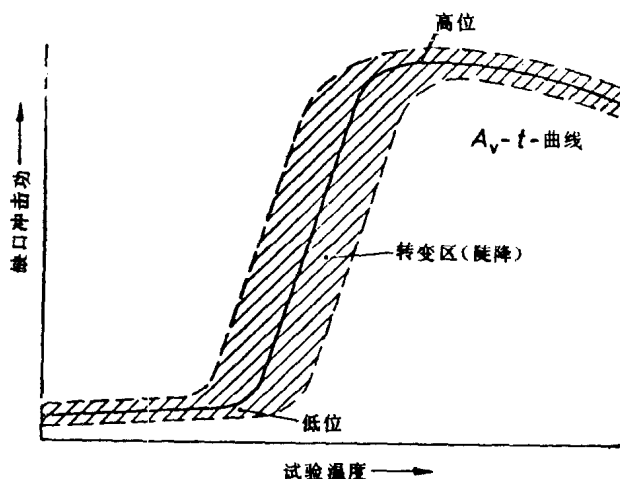


图 2.4 缺口冲击功—温度曲线，  
简图，据 DIN50115

（姜勋昭译，朱沅浦校）

Y88817

Y88818

Y88819

Y88820

## 第三章

## 钢铁材料的生产 和 成形

R、温克尔曼

## 3.1. 钢铁材料的生产

钢铁材料是由矿石经过冶炼而获得的。这时先生产预制合金、生铁，并且在添加废钢、废铁和铸件碎块以后生产钢、铸钢和各种铸铁。

## 3.2. 钢种

钢可以按照加工、性能和应用分成下列各组，其中当然只包括最重要的钢种。

## 3.2.1 按生产方法划分的钢种

|     |             |
|-----|-------------|
| Y 钢 | 吹氧          |
| M 钢 | 在西门子-马丁炉中熔炼 |
| E 钢 | 在电炉中熔炼      |

经过附加熔炼处理的钢有：

|       |                |
|-------|----------------|
| 真空钢   | 用真空法使熔液脱气      |
| 电渣重熔钢 | 钢锭用电渣重熔法提纯和均质化 |

## 3.2.2. 按脱氧程度划分的非合金可焊钢

|           |                       |
|-----------|-----------------------|
| U — 非镇静   | 未处理，表面光洁              |
| R — 镇静    | 用Si处理，均质              |
| RR — 特别镇静 | 大多是用Al处理的细晶粒钢，防脆断可靠性好 |

## 3.2.3 按成分划分的钢

|      |                    |
|------|--------------------|
| 非合金钢 | 碳素钢，合金元素含量低于低合金钢   |
| 低合金钢 | 下列成分的一种或几种在规定范围之内： |
|      | Mn + Si 1.5~3.0%   |
|      | Cr 0.3~0.5%        |
|      | Ni 0.3~0.5%        |
|      | W 0.2~0.3%         |
|      | Mo 0.05~0.1%       |
|      | V 0.05~0.1%        |

|     |                       |
|-----|-----------------------|
| 合金钢 | 合金元素含量高于上列数据或含有其他合金元素 |
|-----|-----------------------|

## 3.2.4 按应用状态时的组织划分的钢

|      |                              |
|------|------------------------------|
| 铁素体钢 | 例如可焊结构钢或低碳不锈钢                |
| 马氏体钢 | 经过淬火和回火（调质）的中等和高含碳量的钢以及高碳不锈钢 |
| 奥氏体钢 | 例如铬镍不锈钢，不可磁化的钢，耐热钢，高锰钢       |
| 莱氏体钢 | 碳化物含量高的合金工具钢                 |

### 3.2.5. 按应用范围划分的钢

|                  |                        |
|------------------|------------------------|
| · <u>钢·结·构</u>   | 大多非合金, 可焊              |
| · <u>机·器·制·造</u> |                        |
| · <u>仪·器·制·造</u> | 大多是耐蚀可焊铬镍钢 (参阅3.2.8.6) |
| · <u>工·具·制·造</u> | (参阅3.2.9)              |

### 3.2.6. 特殊用途的钢

|                    |                 |
|--------------------|-----------------|
| · <u>弹·簧·钢</u>     | 高温调质钢、淬火钢或冷作硬化钢 |
| · <u>阀·门·钢</u>     | 耐热和耐磨性能高的钢      |
| · <u>滚·动·轴·承·钢</u> | 耐磨性能好的淬火钢       |

### 3.2.7. 特殊热处理方法用的钢

|                      |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|
| · <u>渗·碳·钢</u>       | 特别适用于渗碳淬火 (参阅15) 的非合金钢、合金钢和低碳钢      |
| · <u>调·质·钢</u>       | 非合金钢和合金钢, 中等含碳量, 按淬透性分级别            |
| · <u>渗·氮·钢</u>       | 含Al或Cr的调质钢, 在渗氮 (参阅16) 时可达到高表面硬度    |
| · <u>火·焰·淬·火·钢·和</u> | 含碳量和淬透性适于这种方法的调质钢 (参阅12和13)         |
| · <u>感·应·淬·火·钢</u>   |                                     |
| · <u>时·效·硬·化·钢</u>   | 大多是奥氏体或马氏体高合金钢, 其成分容许进行时效硬化者 (参阅11) |

### 3.2.8. 有特殊使用性能的钢

#### 3.2.8.1. 冷韧钢

冷韧钢在较低温度下也保持其塑性变形能力 (抗脆断性), 这就是说, 在较低温度下仍显示高缺口冲击值。这种钢中有: 奥氏体 CrNi 钢, 铁素体 Ni 钢 (最高9%Ni) 和细晶粒钢 (RR钢)。

#### 3.2.8.2. 热强钢

铁素体或铁素体-珠光体钢, 在约600℃以下的温度时具有高的热拉伸性能。添加成分有Cr和 (或) Mo。

#### 3.2.8.3. 高热强钢

用于在550℃以上的温度下长期承受负荷, 至少含铬11%, 同时具有良好的抗氧化性能。

#### 3.2.8.4. 耐热钢

高铬钢, 在600℃以上的温度下对气体氧化作用具有更高的抗力。

#### 3.2.8.5. 难锈钢

含铜合金的钢, 在一段跑合时间以后, 锈蚀作用减慢。

#### 3.2.8.6. 不锈钢

表3.1.是最重要品种一览表。一切不锈钢的特征是其含铬量至少达12%。这时必须注意, 马氏体铬钢只有在经过调质的状态下才是不锈的, 而在退火状态下则不然, 因为退火时碳化物析出, 基体中的铬减少了。

#### 3.2.8.7. 不可磁化钢

所有纯奥氏体钢是不可磁化的, 例如铬镍不锈钢在退火状态时, 冷变形可使它弱磁化。还有奥氏体Mn钢、MnCr钢、MnNiCr钢, 但这些都不是不锈的

### 3.2.8.7. 超高强钢

这一组中有CrMo和NiCrMo调质合金钢以及可马氏体硬化的NiCoMo高合金钢，经过热处理，其延伸限可达900~1600N/mm<sup>2</sup>（参阅11.）。

### 3.2.8.9. 耐磨钢

其中包括：

- 1) 经过淬火并在低温下回火的钢，硬度在HRC65以下。
- 2) 淬火钢，含12%Cr和2~3%C（莱氏体）。
- 3) 韧性奥氏体高锰钢，含12~17%Mn，经过表面冷作硬化而具有耐磨性。

### 3.2.9 工具钢的分类

**冷加工用钢** 经过淬火和回火的钢，例如用作：

切削刀具  
锉和锯  
冲模  
印模  
拉丝模  
人造树脂压模

**热加工用钢** 热强钢和高热强钢，例如用作：

锻模  
压模  
压铸模  
热轧辊  
热模

**高速钢** 含有W、Mo和（或）V的碳化物的复合合金钢，用作：  
切削刀具，耐切削温度约达600℃

## 3.3. 钢铁材料的无屑成形

无屑成形的最重要方法及其产品的概况列于表 3.2 和 3.3 中。

## 3.4. 金属熔液冷凝过程及其无屑成形

任何金属在固态时都是由晶体的聚集组成的，这些晶体本身都是由许多原子按照一定的结合规律排列而成的。金属熔化而成为液体后，原子就立即由于其本身的运动而失去了固态时的规则排列。在熔融金属冷凝时原子又重新排列，这就是说形成一个空间点阵或一个晶体。

在金属熔液冷却时，凡是熔液达到或低于冷凝温度的地方，就产生第一批小晶体。这是极小的形成物，也称为晶核。由此晶核出发，晶体向四面八方生长到熔液之中，直至互相接触而继续生长受到阻碍时为止。但是这种生长并不是在各个方向都均匀，而是沿着一些优先的方向。这时产生枝状的枞树状形成物，即枝晶，它是由熔液冷凝成的金属的一个重要标志。

金属在金属模中冷凝时，例如在为轧制和锻造目的浇铸钢锭用的金属型中冷凝时，结晶

在导热的金属型壁上开始，从而由内向外产生一温度降。晶体沿着与此温度降相反的方向生长，即由边缘向中心，这时往往自然形成长杆状晶体。这种结晶方式称为横结晶。越向内部，温度降得越少，当它等于零时，剩余的熔液全部均匀地冷凝。这时不再产生杆状晶。而是产生粒状晶。与横结晶作用相反，这时是球状（粒状）结晶。

在用锻造和轧制方法热成形时，冷凝组织被破坏。在一般轧制和锻造温度下，在变形过程中立即察觉到重新排列的力，它使因变形而被摧毁的空间点阵重新建立起来。这个过程称为再结晶，这时新形成的晶界与原来晶界没有关系。

热成形时，冷凝时形成的不同浓度区域，枝晶及枝晶间非金属夹杂，随截面减小而相应地向纵向延伸，从而产生纵向纤维组织。

冷成形时，点阵的重新形成可能并不直接在成形过程中进行。原子保留在其已经移动了的位置上，这一点表现为硬度的增加，即硬化，和机械性能的改变。只有在加热到一定温度（再结晶温度）时，点阵才按破坏前的原子排列法重新形成。

表3.1. 最重要的不锈钢一览表

| 组 织                          | 铁 素 体                               | 马 氏 体                                | 奥 氏 体                                    |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|
| 成分 %<br>C<br>Cr<br>Ni<br>添加物 | 最大0.1<br>17~27<br>0~6<br>Mo, Ti, Nb | 0.2~1.0<br>12~19<br>0~4<br>Mo, Al, V | 最大0.15<br>12~25<br>8~52<br>Mo, Ti, Nb, N |
| 应用状态                         | 经过退火                                | 经过调质                                 | 经过固溶退火或冷成形                               |
| 可焊性                          | 差                                   | 不可焊                                  | 好                                        |
| 磁化性能                         | 可磁化                                 | 可磁化                                  | 弱磁化都不行                                   |

表3.2 铸造成形和烧结合形

| 成 形 方 法                      |                       | 性 能                                                  |
|------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------|
| 在砂型中浇铸<br>在金属型中浇铸<br>在旋转型中浇铸 | 砂型铸造<br>金属型铸造<br>离心铸造 | 铸造组织(参阅3.4),在许多情况中可用扩散退火(参阅10.3.4)和(或)正火(参阅10.3.1)控制 |
| 在金属型中连续浇铸                    | 连续铸造                  |                                                      |
| 由金属粉末混合物压制并将成形件烧结            | 烧结钢                   | 特别用于难以浇铸、难以成形和(或)难以切削的合金,例如高纯或多孔铁合金和磁铁               |