

ICS 77.040.10

H 22



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 37782—2019

## 金属材料 压入试验 强度、硬度和应力-应变 曲线的测定

Metallic materials—Indentation test—Determination of strength, hardness and  
stress-strain curve

2019-08-30 发布

2020-07-01 实施

国家市场监督管理总局  
中国国家标准化管理委员会

发布



## 目 次

前言.....	I
引言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 符号和说明.....	2
5 试验原理.....	4
6 试验设备.....	4
7 试样.....	5
8 试验条件.....	5
9 试验程序.....	6
10 试验结果的有效性.....	11
11 试验报告.....	12
附录 A (规范性附录) 试验设备的日常核查.....	13
附录 B (规范性附录) 参考试样.....	14
附录 C (资料性附录) 强度、硬度和应力-应变曲线压入测试示例.....	15
参考文献.....	22



## 前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由中国钢铁工业协会提出。

本标准由全国钢标准化技术委员会（SAC/TC 183）归口。

本标准起草单位：西南交通大学、冶金工业信息标准研究院、成都微力特斯科技有限公司、沈阳飞机工业（集团）有限公司、宝山钢铁股份有限公司、国合通用测试评价认证股份公司、中国航发北京航空材料研究院。

本标准主要起草人：蔡力勋、包陈、陈辉、董莉、李荣锋、刘晓坤、余南阳、金冬岩、方健、李璞、胡本润。

## 引 言

已有的仪器化压痕试验方法基于压入力和深度的实时测量,实现了金属材料的硬度、弹性模量等材料参数的确定,但无法确定应力-应变曲线。本标准在此基础上,可对均匀变形阶段的应力-应变曲线进行有效表征<sup>[1]-[3]</sup>,同时在试验原理、试验方法、数据处理等方面进行了规范,主要体现在:

——基于压入试验力-深度实时测量曲线,通过所建立的力学模型,可以获得被测材料的弹性模量、抗拉强度、硬度和应力-应变曲线;

——实现布氏、洛氏、维氏硬度之间的换算;

——实现抗拉强度与布氏、洛氏、维氏硬度之间的换算。

本标准提供一种测定金属材料的弹性模量、抗拉强度、洛氏硬度和均匀变形阶段的应力-应变曲线的压入试验方法。

# 金属材料 压入试验 强度、硬度和应力-应变曲线的测定

## 1 范围

本标准规定了压入法测定金属材料弹性模量、抗拉强度、硬度和应力-应变曲线的试验原理、试验设备、试样、试验条件、试验程序、试验结果的有效性和试验报告。

本标准适用于均质、各向同性、拉伸硬化规律呈现幂指数特征（幂指数为常数）的金属材料的弹性模量、抗拉强度、洛氏硬度和均匀变形阶段的应力-应变曲线的测定，抗拉强度与硬度之间的转换，以及布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度之间的转换。

注：当用于测定存在明显屈服平台或表现为线性硬化的金属材料的应力-应变曲线时，所得试验结果可能存在较大误差。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法

GB/T 7997 硬质合金 维氏硬度试验方法

GB/T 10623 金属材料 力学性能试验术语

GB/T 21838.1 金属材料 硬度和材料参数的仪器化压入试验 第1部分：试验方法

GB/T 21838.2 金属材料 硬度和材料参数的仪器化压痕试验 第2部分：试验机的检验和校准

JJG139 拉力、压力和万能试验机检定规程

## 3 术语和定义

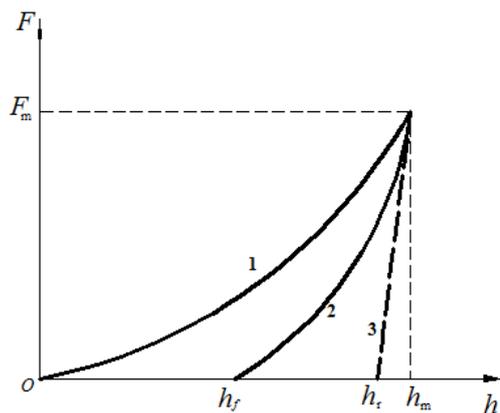
GB/T 10623、GB/T 21838.1 和 GB/T 21838.2 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### **力-深度曲线 force-depth curve**

施加于压头上的力和压头垂直压入材料表面的深度之间的曲线。

注：力-深度曲线来源于加载-卸载过程中所采集的数据，典型的力-深度曲线见图1。



说明:

1——加载曲线;

2——卸载曲线;

3——卸载曲线最大载荷处的切线。

图 1 典型的球形压入试验力-深度曲线示意图

### 3.2

#### 参考应力-应变曲线 referenced stress-strain curve

根据 GB/T 228.1 拉伸试验方法测定的参考试样的真应力-真应变曲线。

### 3.3

#### 零点 zero point

当压头初次接触试样且力为零时，深度与时间测量值的初始零位。

注：零点用于确定准确的压入深度值。

### 3.4

#### Hollomon 模型 Hollomon model

用于描述符合幂律材料硬化特征的应力-应变曲线关系的数学模型。

### 3.5

#### 优度 goodness

根据本标准方法测得的相同试样不同压入位置的材料应力-应变试验曲线的接近程度。

## 4 符号和说明

本标准使用的符号和说明见表 1。

表1 符号和说明

符号	说明	单位
$A_c$	球形压头与试样的有效接触投影面积	$\text{mm}^2$
$C$	压入试验力-深度曲线拟合系数	
$D$	球形压头直径	mm
$D_B$	用于布氏硬度试验的球形压头直径	mm
$D_R$	用于洛氏硬度试验的球形压头直径	mm
$d$	卸载后球形压头与试样的接触投影直径	mm
$E_l$	压入法测得材料弹性模量	GPa
$E_i$	球形压头的弹性模量	GPa
$F_B$	测定布氏硬度的试验力	N
$F_V$	测定维氏硬度的试验力	N
$F_m$	最大试验力	N
$F_t$	测定洛氏硬度的主试验力	N
$F_0$	测定洛氏硬度的初试验力	N
$HR_l$	压入法测得材料的洛氏硬度	—
$h$	试验力作用下的压入深度	mm
$h_c$	对应于 $F_m$ 时压头与试样接触的深度	mm
$h_f$	卸载后残余压痕的深度	mm
$h_m$	可用于确定应力-应变曲线时力-压入深度试验曲线加载段的最大压入深度	mm
$h_r$	卸载曲线最大力处的切线与深度轴的截距（见图 1）	mm
$h_{rc}$	测定洛氏硬度时卸除主试验力后，在初试验力下的压痕残留深度	mm
$h_u$	多级卸载试验中每级卸载刚开始时的压入深度	mm
$h_0$	加载曲线上力为零时对应的压入深度	mm
$l$	测定维氏硬度时压痕对角线的平均长度	mm
$m$	压入试验力-深度曲线拟合指数	—
$k$	给定标尺的洛氏硬度常数	—
$N$	Hollomon 模型中材料硬化指数	—
$R_{mI}$	压入法测得的材料抗拉强度	MPa
$r_i$	同一试样上第 $i$ 个压入点应力-应变测量曲线的优度	—
$S$	接触刚度	N/mm
$\varepsilon$	应变	—

表1 符号和说明 (续)

符号	说明	单位
$\nu_i$	压头的泊松比	—
$\nu_s$	试样的泊松比	—
$\sigma$	应力	MPa
$\sigma_s$	材料的屈服应力	MPa
$\sigma_y$	Hollomon 模型中材料参考屈服应力	MPa

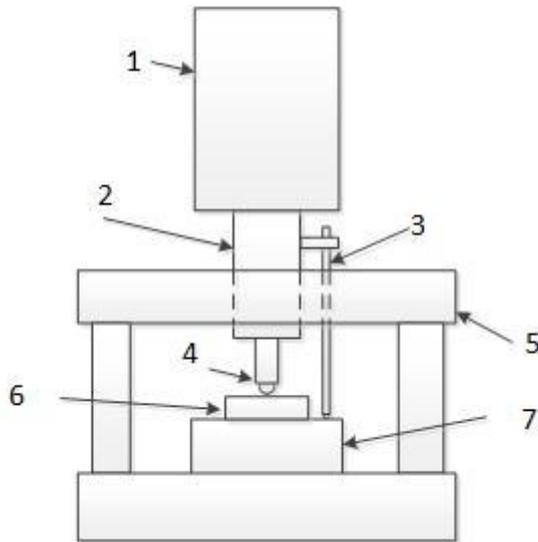
5 试验原理

采用球形压头对试样连续加载并卸载得到图 1 所示的典型力-深度试验曲线。根据力-深度试验曲线的卸载段数据确定试验材料的弹性模量  $E_t$ ，根据力-深度试验曲线的加载段确定试验材料塑性参数  $\sigma_y$  和  $N$ ，并通过由式 (1) 的 Hollomon 模型还原出材料的应力-应变曲线，进而确定材料抗拉强度和硬度的估计值。

$$\sigma = \begin{cases} E_t \varepsilon & (\sigma \leq \sigma_y) \\ E_t^N \sigma_y^{1-N} \varepsilon^N & (\sigma > \sigma_y) \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

6 试验设备

6.1 试验设备包括驱动装置、压头、试样夹具、力和位移测量装置等部件，并应符合附录 A 的要求。典型的压入试验设备结构如图 2 所示。



说明:

- 1——驱动装置;
- 2——力测量系统;
- 3——位移测量系统;
- 4——压头;

- 5——机架；
- 6——试样；
- 7——夹具。

图 2 压入试验设备结构图

6.2 驱动装置应具备对试样连续施加试验力的能力。

6.3 应采用硬质合金制成的球形压头，允许的压头直径为 0.8mm~2mm。

压头应具有下列特性：

- 硬度：按 GB/T 7997 测定时，硬度应不低于 1500HV10；
- 密度： $\rho=14.8\text{g/cm}^3 \pm 0.2\text{g/cm}^3$ ；
- 球直径变动量：不大于 0.25 $\mu\text{m}$ ；
- 球形偏差：不大于 0.25 $\mu\text{m}$ ；
- 球表面粗糙度：不大于 0.2 $\mu\text{m}$ ；

推荐的化学成分如下：

- 钴 5.0%~7.0%；
- 除碳化钨之外的所有碳化物 2.0%；
- 碳化钨（WC）余量。

在不少于 3 个位置处测量压头的直径。压头的直径与其标称直径之差应不超过 $\pm 0.0035\text{mm}$ 。

6.4 夹具应具备对试样进行固定、位置调整的能力，安装好的试样应保证不产生变形、翘曲，试样与夹具之间不产生影响深度测量的相对位移，同时应保证测试面与压头轴向的垂直度满足 9.1 要求。

6.5 试验设备应具备测量试验力和压入深度的能力。力测量系统分辨力应优于 0.1N，准确度应不低于 0.5 级。位移测量系统分辨力应优于 0.1 $\mu\text{m}$ ，1mm 测量范围内的准确度应不低于 0.5 级。

6.6 试验设备应具备采集和存储压入试验数据的能力。

6.7 试验设备应按照 JJG139 定期进行校准。

6.8 正式试验前应采用满足附录 B 要求的参考试样按照附录 A 的规定对试验设备进行日常核查。

## 7 试样

7.1 除非产品或材料标准中另有规定，试样表面应平坦光滑，并且不应有氧化皮、油脂等外来污物。试样的表面应能保证压入深度的精确测量，试样表面宜进行抛光处理，表面粗糙度应优于 Ra0.8。

7.2 试样厚度应足够大，以保证试验结果不受夹具的影响。试样厚度至少应为压入深度的 20 倍，试验后的试样背面应无明显变形。

7.3 试样上下表面应平行，且平行度应不高于 0.02mm/50mm。

## 8 试验条件

8.1 除非另有规定，试验一般在 10℃~35℃ 室温下进行。对于温度要求严格的试验，室温应为 23℃ $\pm 5^\circ\text{C}$ 。试验过程中环境温度应保持稳定。

8.2 应避免环境对试验结果造成不利影响的冲击和振动等干扰。

### 9 试验程序

#### 9.1 安装试样

试样应固定在合适的夹具内，应确保试样与夹具接触面之间无杂物。安装好的试样测试面应垂直于试验力的方向。

#### 9.2 选择压痕中心

任一压痕中心与试验区域边缘的间距应不低于压痕直径的4.5倍，相邻压痕中心的间距应不低于压痕直径的5倍。

#### 9.3 试验过程

9.3.1 根据试验材料的种类选择合适的压头直径。对于轻质合金材料，推荐采用直径不低于1.5875mm的压头；对于普通钢材，推荐采用直径不低于1mm的压头。

9.3.2 对试样进行单次加载、卸载试验，加载阶段以位移控制，位移速率应为1μm/s~5μm/s，卸载阶段以力控制，力控制速率应为40 N/s~100N/s。

9.3.3 记录整个试验过程中的试验力*F*和深度*h*，最大压入深度*h<sub>m</sub>*与压头直径*D*之间的关系应满足式（2）要求：

$$\frac{h_m}{D} \geq 0.04 \dots\dots\dots (2)$$

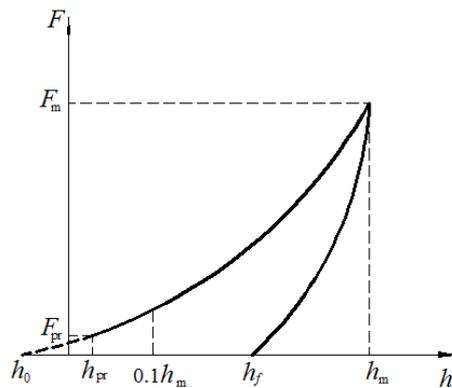
9.3.4 每个试样的第一次压入试验为预试验，不计入最终试验结果，应保证至少4个有效压入点。

#### 9.4 数据处理

##### 9.4.1 零点的确定

9.4.1.1 对于每次试验，都应单独确定零点。在力-深度曲线最初10%的位移范围内，应采集足够多的数据点，以便有效确定零点。

9.4.1.2 参照图3，采用二次多项式拟合0~10%*h<sub>m</sub>*范围内的数据，然后外推确定零点。



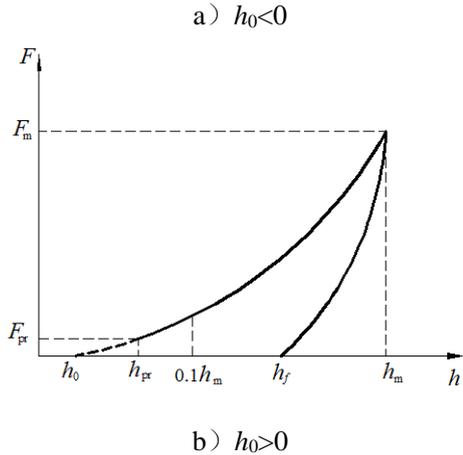


图3 确定零点示意图

9.4.1.3 通过上述外推方法确定零点时，力-深度试验曲线在深度坐标轴上的截距即为 $h_0$ 。

9.4.1.4 将力-深度试验曲线沿深度坐标轴平移 $h_0$ ，使力-深度曲线的起始点回到坐标原点，得到零点修正后的力-深度曲线。

9.4.2 弹性模量的确定

弹性模量的确定按以下步骤进行：

a) 采用式 (3) 拟合经零点修正后的卸载阶段的力-深度曲线：

$$F = B(h - h_f)^k \dots\dots\dots (3)$$

式中， $B$ 、 $k$ 为拟合参数。拟合范围选为初始卸载点至卸载曲线上部的25%~50%，观察拟合曲线和卸载曲线的逼近效果，调整拟合范围，直到确定出最佳的拟合参数。

b) 对式 (3) 进行微分，并在 $h_m$ 处取值，可得接触刚度 $S$ ：

$$S = \left. \frac{dF}{dh} \right|_{h=h_m} = Bk(h_m - h_f)^{k-1} \dots\dots\dots (4)$$

c) 按式 (5) 计算接触深度 $h_c$ ：

$$h_c = h_m - \eta \frac{F}{S} \dots\dots\dots (5)$$

式中， $\eta=0.75$ 。获得 $h_c$ 后，则可按式 (6) 计算有效接触面积 $A_c$ ：

$$A_c = \pi(Dh_c - h_c^2) \dots\dots\dots (6)$$

d) 按式 (7) 计算弹性模量压入折合模量 $E_r$ ：

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A_c}} \dots\dots\dots (7)$$

式中， $\beta$ 为与压头材料、几何形状及压深有关的参数，由附录A确定。

e) 按式 (8) 计算弹性模量 $E_{I1}$ ：

$$E_1 = \frac{1 - \nu_s^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \dots\dots\dots (8)$$

注 1: 如果  $\nu_s$  未知, 可以参照公开发表的数据。如果无参考数据, 可以选择  $\nu_s=0.3$ 。

注 2: 弹性模量测试示例见附录 C.1。

9.4.3 应力-应变曲线的确定

9.4.3.1 对于符合式 (1) 所描述的拉伸硬化规律呈现幂指数特征的金属材料, 首先由图 1 所示力-深度试验曲线的卸载段根据 9.4.2 所述方法确定弹性模量  $E_1$ 。

9.4.3.2 在  $h/D \leq 0.04$  范围内对经零点修正后的力-深度曲线 ( $F-h$  曲线) 的加载段按式 (9) 拟合,

$$F = Ch^m \dots\dots\dots (9)$$

注: 当  $h/D > 0.04$  时, 可能导致力-深度曲线的加载段出现上凸的情形, 此时将不适用于本标准方法求解材料的塑性参数。

9.4.3.3 获得拟合系数  $C$  和指数  $m$  后, 按以下迭代方法确定式 (1) 中的材料塑性参数  $\sigma_y$  和  $N$ :

- a) 设定参考屈服应力的迭代初值  $\sigma_{y(i)}$ , 进而得到参考屈服应变  $\varepsilon_{y(i)} = \sigma_{y(i)}/E$ , 代入式 (10) 分别求得硬化指数  $N_{(i)}$  和参考屈服应力  $\sigma_{y(i+1)}$ 。

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{(i)} = 2m_c - 2.2 \\ \sigma_{y(i+1)} = \left[ \frac{C(1 + N_{(i)})}{6.88(1 + m_c) \left(\frac{E}{5}\right)^{N_{(i)}} D^{2-m}} \right]^{\frac{1}{1-N_{(i)}}} \dots\dots\dots (10) \end{array} \right.$$

式中  $m_c = (b_1 \varepsilon_{y(i)}^2 + b_2 \varepsilon_{y(i)} + b_3)(m - b_4) + b_5$ ,  $b_1 \sim b_5$  的值列于表 2。

表 2 参数  $b_1 \sim b_5$  的值

材料范围	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
$E \leq 120\text{GPa}$	-3928	127.7	0.6528	1.444	1.457
$E > 120\text{GPa}$	6243	75.91	0.7040	1.454	1.453

- b) 若  $\left| \frac{\sigma_{y(i+1)} - \sigma_{y(i)}}{\sigma_{y(i)}} \right| \leq 0.002$ , 则  $\sigma_{y(i)}$  和硬化指数  $N_{(i)}$  为所求材料塑性参数; 若

$\left| \frac{\sigma_{y(i+1)} - \sigma_{y(i)}}{\sigma_{y(i)}} \right| > 0.002$ , 则将  $\sigma_{y(i+1)}$  作为新的迭代初值, 并重复第 a) 步迭代计算, 直到

满足  $\left| \frac{\sigma_{y(i+1)} - \sigma_{y(i)}}{\sigma_{y(i)}} \right| \leq 0.002$  时停止迭代计算。

c) 在确定被测材料的弹性模量  $E_1$  和塑性参数  $\sigma_y$  和  $N$  后, 即可根据式 (1) 还原出被测材料的应力-应变曲线。

注: 弹性模量测试示例见附录 C.2。

9.4.4 抗拉强度的确定

抗拉强度  $R_{m1}$  按式 (11) 计算:

$$R_{m1} = E_1^N \sigma_y^{1-N} \left( \frac{N}{e} \right)^N \dots\dots\dots (11)$$

式中  $e$  为自然常数。

注: 抗拉强度测试示例见附录 C.3。

9.4.5 洛氏硬度的确定

洛氏硬度由式 (12) 计算:

$$HR_1 = 0.91996k - 459.98 \frac{F_t^{1/m} - F_0^{1/m}}{C^{1/m}} + 11.803 \quad (\text{球形标尺: B、E、F、G、H、K}) \dots\dots (12)$$

式中,  $k=130$ ,  $F_0=98.07N$ , 参数  $F_t$  见表 3。

注: 洛氏硬度测试示例见附录 C.4。

表 3 不同标尺洛氏硬度相关参数

标尺	$F_t$ (N)
HRB	980.7
HRE	980.7
HRF	588.4
HRG	1471
HRH	588.4
HRK	1471

9.4.6 不同标尺硬度之间的换算

9.4.6.1 布氏硬度 HBW 与洛氏硬度 HR (球形标尺: B、F) 之间按式 (13) 换算

$$HBW = \frac{\alpha_{11} (\alpha_{12}^{1/m} - \alpha_{13}^{1/m})}{k - HR} \dots\dots\dots (13)$$

式中,  $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}$  为常数, 见表 4。

表4 不同标尺硬度换算公式中的常数值

硬度符号	$\alpha_{11}$	$\alpha_{12}$	$\alpha_{13}$	/
HBW10/3000-HRB	7580	0.1322	0.1322	/
HBW10/500-HRB	1263	7.934	0.7934	/
HBW10/500-HRF	1263	4.759	0.7934	/
硬度符号	$\alpha_{21}$	$\alpha_{22}$	$\alpha_{23}$	$\alpha_{24}$
HBW10/3000-HV	25.42	0.02768	0.1578	0.0575
HBW10/500-HV	4.236	0.1661	0.1578	0.0575
硬度符号	$\alpha_{31}$	$\alpha_{32}$	$\alpha_{33}$	$\alpha_{34}$
HR-HV	298.2	0.0575	20.52	0.1578

9.4.6.2 布氏硬度 HBW 与维氏硬度 HV 之间按式 (14) 换算

$$HBW = \frac{\alpha_{21} [\alpha_{22} \alpha_{23}^N (1+m)]^{1/m} \left( \frac{E^N \sigma_y^{1-N}}{1+N} \right)^{1/m-1}}{\alpha_{24}^N} HV \dots\dots\dots (14)$$

式中,  $\alpha_{21}, \alpha_{22}, \alpha_{23}, \alpha_{24}$  为常数, 见表 4。

9.4.6.3 洛氏硬度 HR 球形标尺 (B、E、F、G、H、K 等) 与维氏硬度 HV 之间按式 (15) 换算

$$HV = \frac{\alpha_{31} \alpha_{32}^N (F_t^{1/m} - F_0^{1/m}) \left( \frac{E^N \sigma_y^{1-N}}{1+N} \right)^{1-1/m}}{[\alpha_{33} \alpha_{34}^N (1+m)]^{1/m} (k - HR)} \dots\dots\dots (15)$$

式中,  $\alpha_{31}, \alpha_{32}, \alpha_{33}, \alpha_{34}$  为常数, 见表 4。

注: 不同标尺硬度换算示例见附录 C.5。

9.4.7 硬度与抗拉强度的换算

9.4.7.1 布氏硬度与抗拉强度由式 (16) 换算:

$$HBW = \frac{\eta F_B^{1-1/m} [\beta_{11} (e \beta_{12} / N)^N (1+m) D_B^{2-m} R_m]^{1/m}}{\pi D_B (1+N)^{1/m}} \dots\dots\dots (16)$$

式中,  $\eta=0.102$ ,  $e$  为自然常数,  $\beta_{11}=8.142$ ,  $\beta_{12}=0.1578$ 。

9.4.7.2 洛氏硬度与抗拉强度由式（17）换算：

$$HR = k - \frac{(F_t^{1/m} - F_0^{1/m})[\beta_{11}(e\beta_{12}/N)^N(1+m)D_R^{2-m}R_m]^{-1/m}}{S(1+N)^{-1/m}} \quad (\text{球形标尺: B、E、F 等}) \dots (17)$$

9.4.7.3 维氏硬度与抗拉强度由式（18）换算：

$$HV = \frac{2\eta\beta_{21}(e\beta_{22}/N)^N R_m \sin \frac{\theta}{2}}{1+N} \dots (18)$$

式中， $\beta_{21}=1.986$ ， $\beta_{22}=0.05753$ 。

注：硬度与抗拉强度换算示例见附录 C.6。

10 试验结果的有效性

10.1 宜在同一试样的测试表面上确定  $n$  ( $n \geq 4$ ) 个压入点，压入点的设置应满足 9.2 的规定。由同一试样测试表面上的  $n$  个压入点得到  $n$  条应力-应变测量曲线。

10.2 将各压入点的应力-应变测量曲线按相同规则离散为  $w$  ( $w \geq 20$ ) 个数据点，得到应力-应变数据  $(\sigma_{j,i}, \epsilon_{j,i})$  ( $i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,w$ )。

10.3 按式（19）计算同一应变水平  $\epsilon_j$  下应力  $\sigma_{j,i}$  的平均值  $\sigma_{j,mean}$ ：

$$\sigma_{j,mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{j,i} \dots (19)$$

10.4 按式（20）计算各压入点应力-应变测量曲线的优度  $r_i^{[4]}$ ：

$$r_i = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^w (\sigma_{j,i} - \sigma_{j,mean})^2}{\sum_{j=1}^w \sigma_{j,i}^2}} \dots (20)$$

10.5 当  $n$  个压入点应力-应变测量曲线的优度  $r_i$  均不小于 0.95 时，则试验结果有效。以  $n$  个压入点应力-应变测量曲线的平均结果作为试验结果。

10.6 当优度  $r$  低于 0.95 时，如果出现图 4 所示的某一试验曲线明显偏离其他试验曲线情形，应首先去除有较大偏离的应力-应变曲线，同时增加压入点获得一条新增的应力-应变曲线。若包含新增压入点的应力-应变曲线结果满足 10.5 所述的有效性判定条件，则试验结果有效，否则试验结果无效。

10.7 当优度  $r$  低于 0.95 时，若由同一试样测试表面上  $n$  ( $n \geq 4$ ) 个压入点得到的应力-应变曲线分布于图 5 所示的较大分散带内时，则试验结果无效。

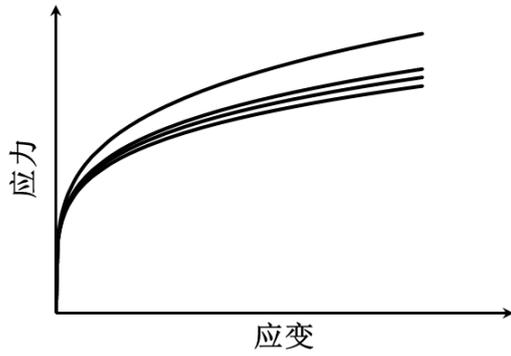


图 4 应力-应变测试结果偏离示例

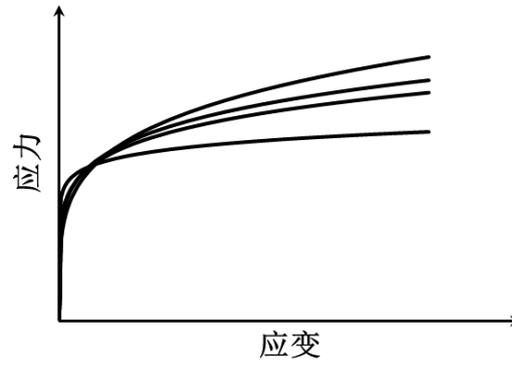


图 5 无效应力-应变测试结果示例

## 11 试验报告

试验报告至少应包括如下信息：

- a) 本标准编号；
- b) 试验条件；
- c) 材料名称、牌号；
- d) 试样标识；
- e) 试验过程中的异常情况；
- f) 试验结果。

附录 A  
(规范性附录)  
试验设备的日常核查

### A. 1 总则

A. 1.1 日常核查应定期进行，但在试验之前应进行检验。

A. 1.2 日常核查宜在 $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 的温度下，使用按附录B规定的参考试样进行日常核查。若在此温度范围以外进行检验，则应在检验报告中注明。

### A. 2 方法

A. 2.1 应首先对9.4.2所述弹性模量的确定过程中所需的参数 $\beta$ 进行标定，按以下步骤进行：

- a) 对参考试样的单个压入点进行多级加卸载试验，根据9.4.2所述方法调整 $\beta$ 值使由式(8)计算的压入弹性模量与参考试样的弹性模量的定值结果一致，从而得到 $\beta$ 与 $h_u/D$ 的关系。
- b) 拟合 $\beta$ 与 $h_u/D$ 的关系曲线，并用式(A.1)描述：

$$\beta = k_0 + k_1 \left( \frac{h_u}{D} \right) + k_2 \left( \frac{h_u}{D} \right)^2 \dots\dots\dots \text{(A.1)}$$

A. 2.2 日常核查按以下步骤进行：

- a) 在参考试样上选择3个压入点进行单级加卸载压入试验，并根据9.4.1所述方法得到零点修正后的压入试验力-深度曲线。
- b) 参照9.4.2和9.4.3求得参考试样的3个压入点的Hollomon模型参数 $\sigma_{yi}$ 、 $N_i$  ( $i=1,2,3,4$ )，并根据式(1)得到参考试样的3个压入点的应力-应变测量曲线。
- c) 将3个压入点的应力-应变测量曲线按相同规则离散为 $w$  ( $w \geq 20$ )个数据点，得到应力-应变数据 $(\sigma_{j,i}, \varepsilon_{j,i})$  ( $i=1,2,3, j=1,2,\dots,w$ )。将参考试样的参考应力-应变曲线按相同规则离散为 $w$ 个数据点，得到应力-应变数据 $(\sigma_j, \varepsilon_j)$ 。
- d) 按式(A.2)各压入点应力-应变测量曲线的优度 $r_i^{[4]}$ ：

$$r_i = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^w (\sigma_{j,i} - \sigma_j)^2}{\sum_{j=1}^w \sigma_{j,i}^2}} \dots\dots\dots \text{(A.2)}$$

式中， $\sigma_j$ 为参考应力-应变曲线上对应于应变水平 $\varepsilon_j$ 的应力值， $\sigma_{j,i}$ 为3个压入点应力-应变测量曲线上对应于应变水平 $\varepsilon_j$ 的应力值。

- e) 当3个压入点应力-应变测量曲线的优度 $r_i$ 均大于0.95时，则认为试验设备的整体性能能够满足要求。

A.2.3 当日常核查结果不符合要求时，应按照制造商的设备故障检修指南排查原因。如果结果仍不符合要求，则日常核查失败。

附录 B  
(规范性附录)  
参考试样

### B.1 通则

B.1.1 每个参考试样应有通过其拉伸试验获得的参考应力-应变曲线。

B.1.2 对每一个参考试样，都应规定其适用的深度或力范围。

试样性能限制压入力范围。例如，超过某一特定力，脆性试样会开裂；低于某一特定力，表面粗糙度或者微尺度不均匀性会导致分散的试验结果。

### B.2 材料选择

制作参考试样的材料应具有如下的特性：均匀的成分和性能，表面化学性质稳定，无明显时间相关性，式（1）所述的Hollomon模型应能严格描述拉伸应力-应变曲线。

### B.3 加工

B.3.1 参考试样的厚度应不小于2mm，或者是最大压入深度的20倍，两者当中取较大者。

B.3.2 参考试样的上下表面的平行度应不低于0.02mm/50mm。

B.3.3 参考试样的试验面不应有影响压入深度测量的凹痕、划伤、氧化皮等缺陷。试验面应尽可能光滑，其表面粗糙度应优于 $R_a0.8$ 。

B.3.4 参考试样的加工应采用对其表面性能影响最小的方式来进行，从而保证利用压入试验方法获得的试样的表面性能与试样整体性能尽可能接近。

B.3.5 应在合适的位置对参考试样作标记。

### B.4 定值

B.4.1 对参考试样进行定值及其数据处理，给出定值结果。

B.4.2 推荐采用GB/T 228.1所规定的方法对参考试样材料进行拉伸试验，以获得的拉伸应力-应变曲线作为参考试样的参考应力-应变曲线。

B.4.3 参考试样的定值报告应包含如下信息：

- a) 注明采用本标准附录；
- B) 定值日期；
- B) 定值机构的信息；
- d) 定值设备的相关数据、定值方法、设备和定值方法的可溯源信息；
- e) 用于描述应力-应变曲线的Hollomon模型参数 $E$ 、 $\sigma_y$ 、 $N$ 的定值结果；
- f) 参考试样的序列号。

## 附录 C

(资料性附录)

## 强度、硬度和应力-应变曲线压入测试示例

## C.1 应力-应变曲线测试示例

图C.1~图C.3介绍了多种金属材料压入试验测定的应力-应变曲线。

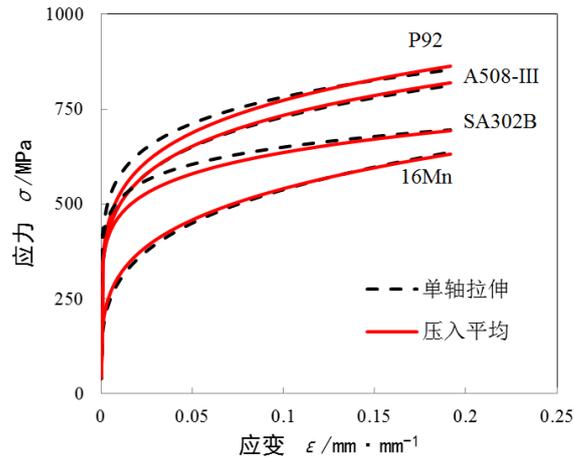


图 C.1 P92、A508-III、SA302B、16Mn 应力-应变曲线示例

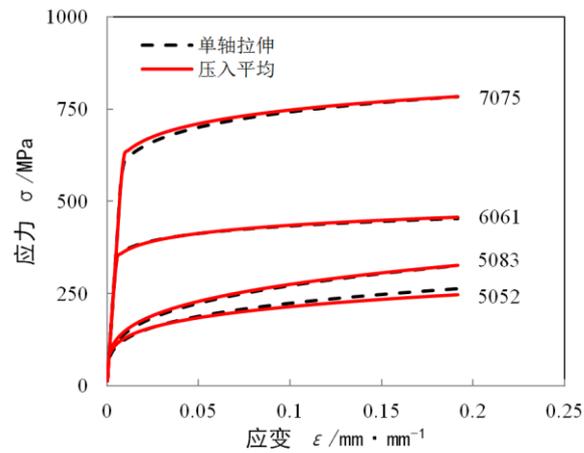


图 C.2 7075、6061、5083、5052 铝合金应力-应变曲线示例

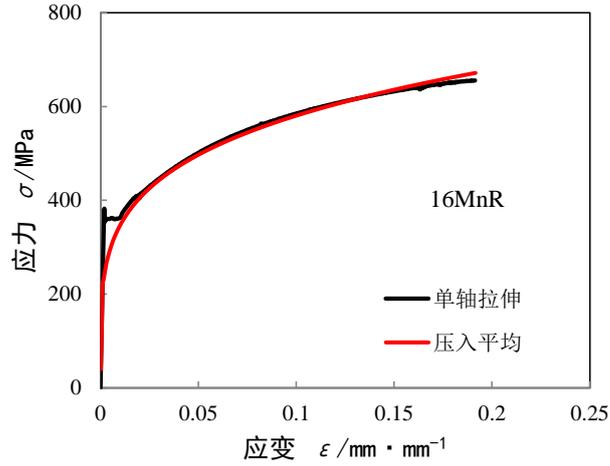


图 C.3 16MnR 钢应力-应变曲线示例

C.2 弹性模量测试示例

表C.1介绍了多种金属材料压入试验测定的弹性模量。

表 C.1 压入试验测得弹性模量示例

材料	压入测得模量 /GPa	拉伸测得模量 /GPa	相对误差 e/%
16Mn	208.9	214.5	-2.6
A508-III	208.3	210.4	-1.0
316L	192.3	195.0	-1.4
1Cr12Mo	194.7	200.3	-2.8
SA302B	221.8	221.4	0.2
316H	212.4	212.1	0.1
5083 铝合金	69.7	70.3	-0.8
6061 铝合金	72.1	71.0	1.6
7075 铝合金	72.3	73.0	-0.9
7050 铝合金	71.6	72.7	-1.5
5052 铝合金	70.7	69.5	1.8
T2	107.9	109.5	-1.5
TA17	107.3	110.2	-2.6

### C.3 抗拉强度测试示例

表C.2介绍了多种金属材料压入试验测定的抗拉强度。

表 C.2 压入试验测定抗拉强度示例

材料	拉伸测得抗拉强度 /MPa	压入测得抗拉强度 /MPa	相对误差 $e/\%$
T91	833	810	2.8
9Ni	751	798	-5.9
16Mn	521	522	-0.2
P92	769	721	6.7
SA302B	601	592	1.5
5083 铝合金	270	284	-4.9
6061 铝合金	402	394	2.0
7075 铝合金	683	678	0.7
5052 铝合金	197	203	-3.0
16MnR	556	552	0.7

### C.4 洛氏硬度测试示例

表C.3介绍了多种金属材料压入试验测定的洛氏硬度。

表 C.3 压入试验测定洛氏硬度 HRB 示例

材料	洛氏硬度试验结果	压入试验预测结果	相对误差 $e/\%$
16Mn	79.1	81.5	3.1
P92	95.4	96.5	1.1
A508-III	93.4	93.4	0
3Cr13	84.9	87.9	3.5
60Si2Mn	101.0	99.2	1.8
A302B	90.0	92.1	2.3

表 C.3 (续) 压入试验测定洛氏硬度 HRB 示例

材料	洛氏硬度试验结果	压入试验预测结果	相对误差 $e/\%$
5083 铝合金	37.6	36.1	3.9
2024 铝合金	79.1	77.2	2.4
T91	102.6	101.2	1.4
7050 铝合金	86.9	88.7	2.0
16MnR	86.1	84.1	2.2

C.5 不同标尺硬度换算示例

图C.4~图C.11介绍了多种金属材料不同标尺硬度换算结果。

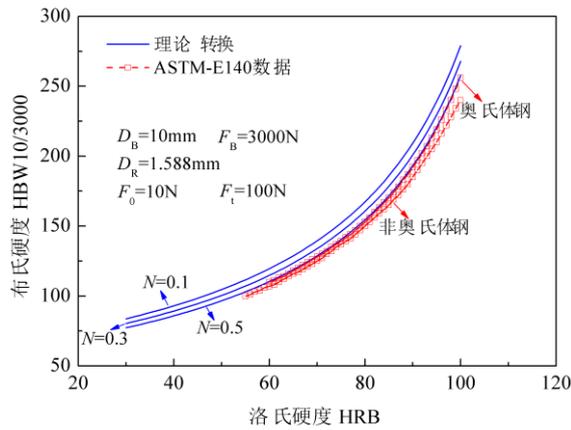


图 C.4 钢材 HBW10/3000 与 HRB 的换算示例

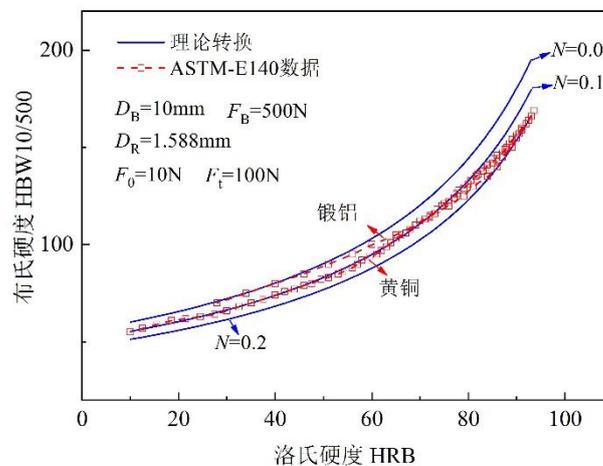


图 C.5 锻铝和黄铜 HBW10/500 与 HRB 的换算示例

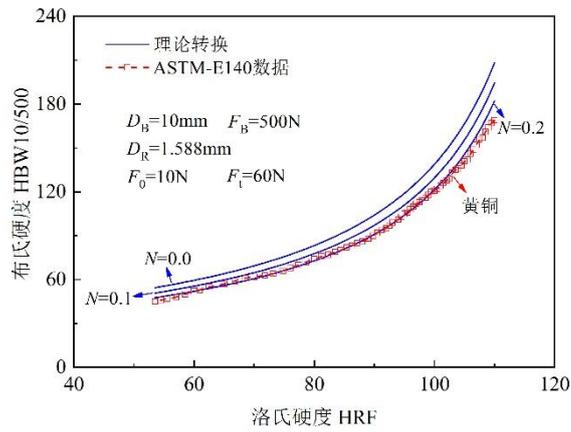


图 C.6 黄铜 HBW10/500 与 HRF 的换算示例

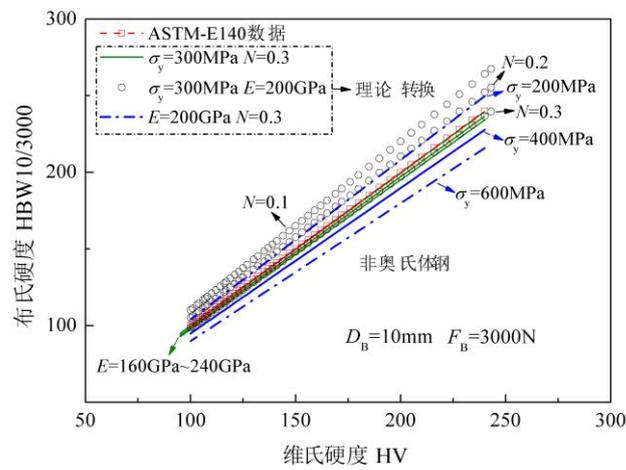


图 C.7 非奥氏体钢 HBW10/3000 与 HV 的换算示例

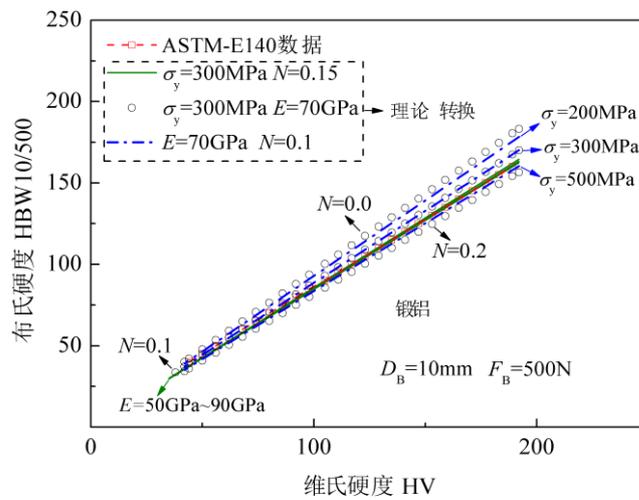


图 C.8 锻铝 HB10/500 与 HV 的换算示例

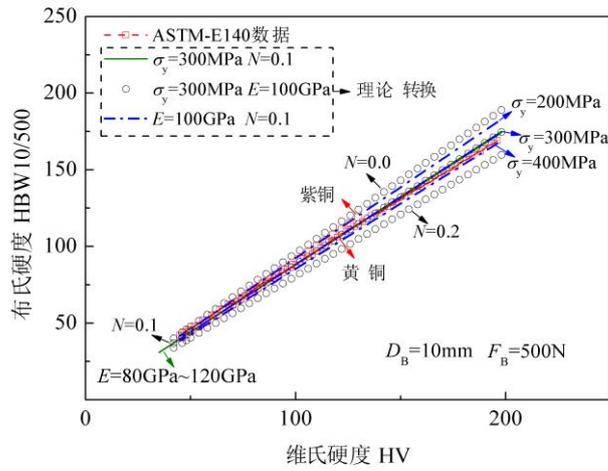


图 C.9 黄铜和紫铜 HBW10/500 与 HV 的换算示例

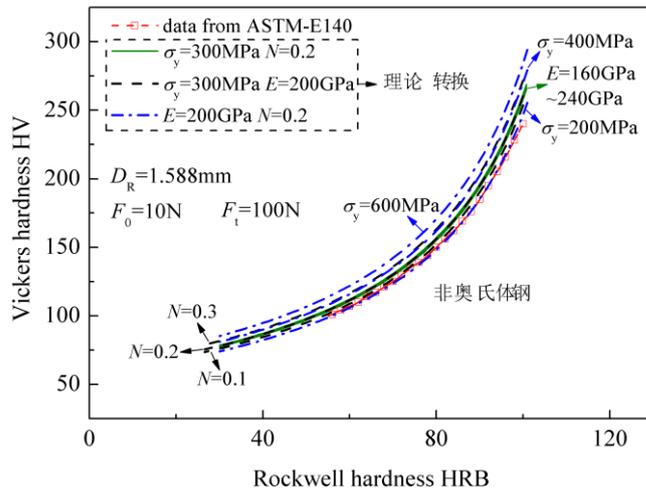


图 C.10 钢材 HV 与 HRB 的换算示例

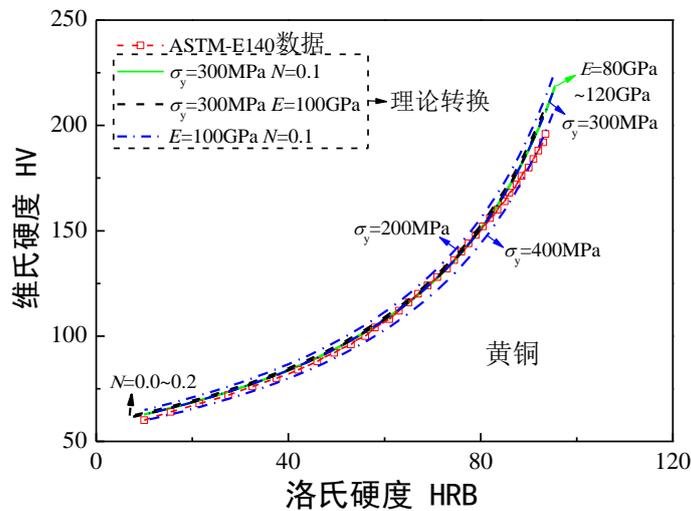


图 C.11 黄铜 HV 与 HRB 的换算示例

## C.6 抗拉强度与不同标尺硬度换算示例

图C.12~图C.14介绍了多种金属材料不同标尺硬度换算结果。

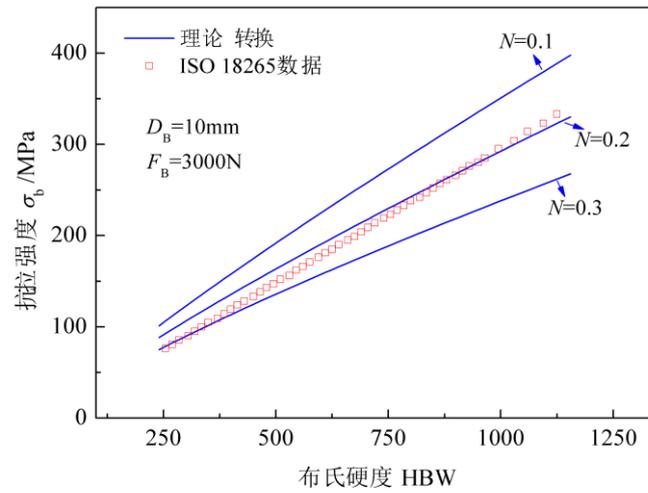


图 C.12 抗拉强度与 HBW 的换算示例

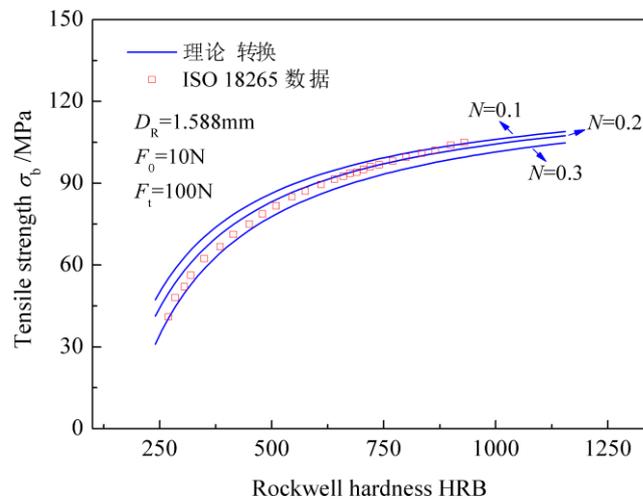


图 C.13 抗拉强度与 HRB 的换算示例

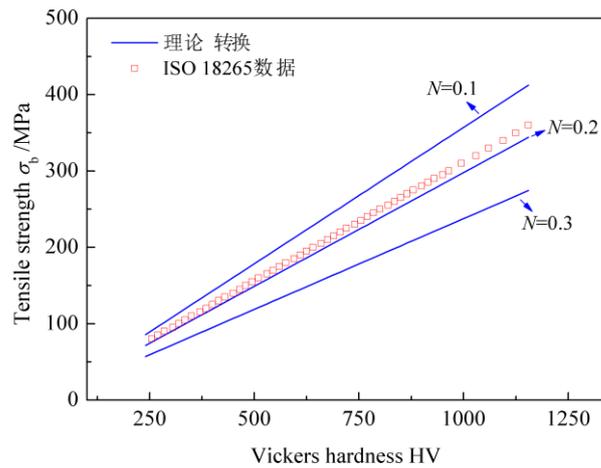


图 C.14 抗拉强度与 HV 的换算示例

#### 参考文献

- [1] Oliver WC, Pharr GM. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [2] ISO 14577-1:2015, *Metallic materials-Instrumented indentation test for hardness and materials parameters-Part1: Test method*. Geneva: International Organization for Standardization, 2002.
- [3] Chen H, Cai LX. Theoretical conversions of different hardness and tensile strength for ductile materials based on stress-strain curves. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49(4): 1090-1101.
- [4] 张世强. 曲线回归的拟合优度指标的探讨. *中国卫生统计*, 2002,19(1): 9-11.