

# 钢的高温弹性模量 $E$ 值的测定研究

(承德钢铁公司, 承德 067002) 颜景星  
(河北理工大学, 唐山 063000) 徐树成

**摘 要:** 介绍了根据实际生产需要测试 20 # 钢的高温弹性模量  $E$  值的方法和依据的原理、试件的设计、加热温度设定和试验结果。

**关键词:** 试件设计; 加热温度; 钢的高温弹性模量  $E$  值

**中图分类号:** TG113. 25<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2006) 01-0086-03

## 前 言

热带厂由于工艺的优化导致了精轧坯料厚度的改变, 由 30mm 变为 20mm。精轧前立轧薄带坯调宽时带坯产生弯曲。由于使用立轧薄带坯允许轧制压力公式  $P' = (L_1 + 0.3B) \frac{\pi^2 E h^{3/2}}{12 B^2}$  时要使用钢的高温弹性模量  $E$  值<sup>[1]</sup>。钢在 900 °C 以上的弹性模量  $E$  参数值未见公开报导。为了实现精轧前立轧调宽, 对钢在 900 °C 以上的弹性模量  $E$  参数值做实验测试。

## 1 基本原理和假定

### 1.1 基本原理

由欧拉公式可知, 对于一个圆柱形细长杆, 其弹性模量值为<sup>[2]</sup>

$$E = \frac{PL^2}{\pi J} \quad (1)$$

式中  $P$  ——给圆柱体两端施加的压力, N  
 $L$  ——圆柱形细长杆的长度, mm  
 $J$  ——圆柱形细长杆的横截面惯性矩, mm<sup>4</sup>

### 1.2 基本假设

- 1) 被压试验杆各向同性;
- 2) 做试验时, 若试验杆长度为  $L$ , 其中部  $\frac{3}{4}L > L^* > \frac{1}{4}L$  段, 试验杆的温度是均匀的;
- 3) 试验杆端部横截面上的压力是均匀分布的;

颜景星 E-mail: zjlhig@sohu.com

作者简介: 颜景星, 承德钢铁公司热带厂, 副高级工程师, 硕士

收稿日期: 2005-05-12; 修订日期: 2005-10-13

- 4) 由于试验杆横截面较小, 受压时其端部视为铰支<sup>[2]</sup>;
- 5) 采用分段加载速度以减少试验时间。

## 2 试件设计

### 2.1 试验杆的设计

如图 1 所示, 试验杆的设计应遵循以下原则:

- 1) 试验杆的设计必须满足欧拉公式细长杆的使用范围;
- 2) 操作方便;
- 3) 根据力学试验机的使用范围来设计试验杆的直径和长度, 以减少相对误差;
- 4) 为了组装和使用试件时的安全, 试验杆端部要倒角, 倒角后的端部面积为  $S$ :

$$S \times \sigma' \geq \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

式中  $\sigma'$  ——细长杆高温下的屈服极限

### 2.2 保温罩的设计

试件从加热炉中取出到试验结束的时间间隔与采用的试验方法及加载速度有关, 其试验时间可采用实际模拟的方法取得 (也可做实验时实际计时)。试验时试件的几何尺寸较小, 高温下空冷的温降很大, 且试验杆中心与侧表面的温差大, 因此必须对试验杆采取保温措施。

#### 2.2.1 保温罩长度的设计

如图 1 所示, 保温罩长度要与试验杆的长度相匹配。为了不影响试验结果, 保温罩要比试验杆稍短, 比试验杆的长度短 10mm。

#### 2.2.2 保温罩厚度的设计

如图 1 所示, 为了试验易操做、温降小, 保温罩的厚度为 2mm, 保温罩的径向温度梯度较大, 不

能太薄。

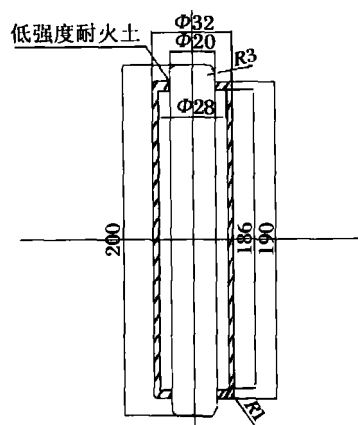


图 1 试件组装剖面示意图

Fig 1 Sample that has built up section diagram

### 2.2.3 保温罩内径的设计

保温罩受压失稳前会产生弯曲, 若试验杆与保温罩内壁相距太近就可能影响试验结果。试验杆刚刚失稳就与保温罩内壁接触, 计算机输出的失稳曲线的失稳点就会模糊。试验杆外表面与保温罩内壁的相对距离可选为 4mm~5mm, 本次实验取 4mm。

### 2.2.4 试件的组装

试验杆与保温罩是组装在一起加热和做承压试验的, 试验杆与保温罩既要为一整体, 试验时保温罩又不能受力。保温罩至少一端是与试验杆活性联结的, 在试验杆失稳前保温罩与试验杆必须有一端脱开。脱开端用低强度耐火土密封。

### 2.3 试验杆材质的选取

试验杆材质的选取与应用领域密切相关, 具体的讲与企业的产品品种结构相一致。根据承钢热电厂的实际情况选择碳素钢中的 20 # 钢为代表做试验。

## 3 加热温度设定

试件出炉后会有温降。加热温度应等于设定的试验温度  $T_1$  和做实验期间试验杆的温降  $\Delta T$  之和。即:

$$T_2 = T_1 + \Delta T \quad (2)$$

式中  $T_2$  ——试验杆的加热温度

试验杆温降的解析求解复杂。现以秒为插分时间单位, 用有限插分法<sup>[3]</sup>求试验杆的温降。试验杆两端露出保温罩部分的辐射和传导散热忽略不计。

### 3.1 保温罩的温降和径向温度分布

#### 3.1.1 保温罩平均温降的计算方法

因为测试钢在 900 °C 以上的弹性模量  $E$  值, 试件的温降主要考虑辐射, 计算时忽略对流散热。依据文献 [4] 保温罩每秒辐射出去的热量为:

$$Q_1 = F_1 C_1 \left( \frac{273 + T_4}{100} \right)^4 \quad (3)$$

式中  $F_1$  ——保温罩外侧的辐射面积

$C_1$  ——保温罩的辐射系数

$T_4$  ——保温罩外侧的辐射温度

其中  $C_1 = C_0 \varepsilon$

$C_0$  ——黑体的辐射系数,  $C_0 = 5.6976795 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4$

$\varepsilon$  ——保温罩的黑度<sup>[5]</sup>

每秒中试验杆给保温罩辐射的热量为:

$$Q_2 = C \left[ \left( \frac{T_5 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_6 + 273}{100} \right)^4 \right] F_2 \phi_1 \quad (4)$$

式中  $C$  ——吸收辐射系数

$$C = \frac{5.697679}{\left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \phi_2 + 1 + \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \phi_1} \quad (5)$$

$T_5, T_6$  ——试验杆外表面及保温罩内侧温度

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  ——分别为保温罩、试验杆的黑度

$\phi_1, \phi_2$  ——分别为试验杆对保温罩、保温罩对试验杆的角度系数

其中,  $\phi_2 = \frac{F_2}{F_1}$ ;  $\phi_1 = 1$ ;  $F_1', F_2$  分别为保温

罩内表面和试验杆外表面的辐射面积 ( $\text{m}^2$ )。

保温罩每秒热量的变化量为:

$$Q = Q_1 - Q_2 \quad (6)$$

保温罩每秒的平均温降为<sup>[5]</sup>:

$$T_3 = Q / m c_p \quad (7)$$

式中  $m$  ——保温罩的质量, g

$c_p$  ——保温罩的定压比热,  $c_p = 0.4814 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

#### 3.1.2 保温罩的径向温度分布

保温罩内侧接受试验杆辐射的热量, 外侧向空间辐射, 参照文献 [3~4], 以保温罩壁厚中心为分界线, 中心以外的部分可看作在空冷的高温钢筒外侧半圆环; 中心以内, 部分可看作是在加热的高温钢筒的内侧半圆环, 并以保温罩壁中心的温度为保温罩的平均温度, 其外表面温度可视为

$$T_8 = T_9 - \Delta T_1 \quad (8)$$

保温罩内表面温度为

$$T_{10} = T_9 + \Delta T_1 \quad (9)$$

式中  $T_8, T_{10}$  ——保温罩的外表面、内表面温度  
 $T_9$  ——保温罩的平均温度  
 $\Delta T_1$  ——保温罩每秒的平均温降

将式 (8) 代入式 (3), 式 (9) 代入式 (4), 并由式 (6)、式 (7) 可求保温罩每秒的温降。

3.2 试验杆的温降

因为试验杆在试件出炉第一秒与保温罩温度相等并由式 (9) 决定试验杆在试件出炉后前 2s 内无温降。试验杆以后各秒的温降可由式 (4) 和式 (7) 求得。试验时加热曲线如图 2 所示。

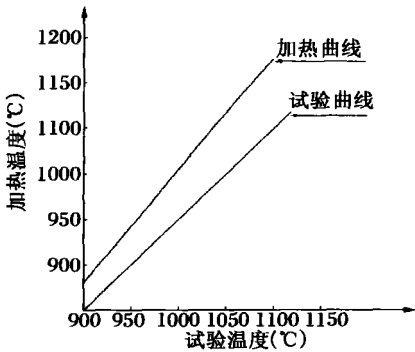


图 2 加热曲线图

Fig. 2 Heating chart for test

3.3 均热时间的设定

由于是高温均热，为了防止试验杆产生再结晶均热时间应是越短越好。均热时间主要取决于试件的结构、大小及加热过程。一般应限定在 10min 以内。做一炉试件试验的时间也不宜过长，一般应限定在 10min 以内，故，一炉试件也不宜装的太多。

4 试验结果

依据承钢热带厂的产品型号在河北理工大学完成了 20 # 钢的高温弹性模量  $E$  参数值的测试试验,得到了图 3 所示的曲线。图 3 所示的曲线是根据实验数据对点标定后由 AUTOCAD-2005 拟合完成的。

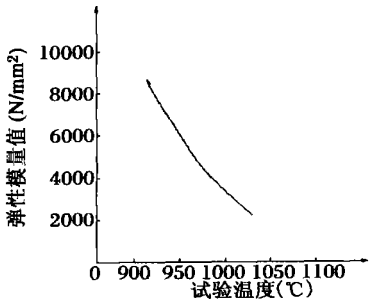


图 3 弹性模量测试曲线

Fig. 3 Elastic modulus test chart

5 应用实测与实验结果的比较

使用立轧机调宽伊始，为了测定立轧时使得不同宽度薄板坯失稳时的轧制压力，曾经在现场测得一些数据，经计算转换得到的  $E$  值与实验得到的  $E$  值进行比较，其结果见表 1。

表 1 应用实测  $E$  值与实验  $E$  值的比较

Tab. 1 Comparison of used practical tested  $E$  value and tested  $E$  value in experiment

| 应用实测<br>$E$ 值 | 温度 $^{\circ}\text{C}$ | 1000 $^{\circ}\text{C}$ | 950 $^{\circ}\text{C}$ | 980 $^{\circ}\text{C}$ |
|---------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
|               | 板宽 mm                 | 486                     | 420                    | 524                    |
|               | $E$ 值 $\text{N/mm}^2$ | 3100                    | 5700                   | 4200                   |
| 实验 $E$ 值      | $E$ 值 $\text{N/mm}^2$ | 3200                    | 5500                   | 4000                   |
| 误差            | %                     | 3.15                    | 3.51                   | 5.00                   |

分析产生误差的原因：

- 1) 实验时在测量温度时有误差。
- 2) 实验时试件与上下压头的垂直度也存在误差。
- 3) 实验过程中温度损耗没有计算。
- 4) 仪器设备本身存在的误差。

6 结 论

根据实验结果可知，随着温度的增加，弹性模量值在逐渐的减小，弹性模量值减小的幅度也在减小；应用实测  $E$  值与实验  $E$  值的数值之差较小，其误差均在误差允许范围之内。由此可以看出，实验是稳定的，结果是可信的。

参考文献

[ 1 ] 颜景星. 立轧薄带坯允许轧制压力的研究与应用. 钢铁研究学报, 2002. 13(2) :73~76  
[ 2 ] 刘鸿文. 材料力学(下册). 北京: 人民教育出版社, 1979. 4, 159~172  
[ 3 ] 路煜, 程林. 传热原理与分析. 北京: 科学出版社, 1997. 10, 110~116  
[ 4 ] 蔡乔芳. 加热炉. (高等学校教学用书). 1980. 3, 130~145, 161~173  
[ 5 ] 饭田修一著, 张质贤译. 物理学常用数表. 北京: 科学出版社, 1979. 3, 89~90

(下转第 93 页)

- continuum modeling of materials. Physical Review Letters, 2001. 87, 135501
- [ 4 ] Hertel T, Walkup R, Avouris P. Deformation of carbon nanotubes by surface van der Waals force. Physical Review B, 1998. 58, 13870~13873
- [ 5 ] Chang T, Gao H. Size-dependent elastic properties of a single-walled carbon nanotube via a molecular mechanics model. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2003. 51, 1059~1074
- [ 6 ] Girifalco L A, Hodak M R, Lee S. Carbon nanotubes, buckyballs, ropes, and a universal graphitic potential. Phys. Rev. B, 2000. 62(19): 13104~13110
- [ 7 ] Zhang P, Huang Y, Geubelle P H, Klein P A, Hwang K C. The elastic modulus of single-wall carbon nanotubes: a continuum analysis incorporating interatomic potentials. Int. J. Solid Structure, 2002. 39, 3893~3906
- [ 8 ] Qian D, Wagner G J, Liu W K, Feng Y M, Ruoff R S. Mechanics of carbon nanotubes. Applied Mechanics Reviews, 2002. 55(6): 495~532
- [ 9 ] 曹安源. 定向生长碳纳米管薄膜的研究. [博士学位论文], 北京: 清华大学, 2001
- [ 10 ] Cao Anyuan, Dickrell Pamela L, Sawyer W Gregory, et al. Super-Compressible Foamlike Carbon Nanotube Films. Science, 2005. 310(5752): 1307~1310

## Experimental research of compression plastic properties of aligned multi-wall carbon nanotubes

ZENG Pan YANG Xue-gui LIANG Ji WANG Rui

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084 China)

**Abstract:** The Compression and unloading experiments of aligned carbon nanotubes samples have been carried out and the experimental curves have been obtained. During compression process, the samples behave the nonlinear stress-strain relationships and the transient modulus increase with compression deformation. The stress-strain relationship in case of unloading is another curve and the two processes form a whole loop-line. There is an unrecoverable plastic deformation for these samples when unloading is end. The TEM and SEM have been applied to investigate the micro-structure of these carbon nanotube samples and the special deformation mechanisms have been found. All these can provide an experimental basis for further research of nonlinear properties of carbon nanotubes.

**Key words:** multi-wall carbon nanotubes; aligned; compression experiment; plastic deformation

(上接第 88 页)

## Test study of heat elastic modulus $E$ value of steel

YAN Jing-xing

(Iron and Steel Group in Chengde, Chengde 067002 China)

XU Shu-cheng

(Hebei University of Technology, Tangshan 063000 China)

**Abstract:** This text has introduced the test method and principle for test heat elastic modulus  $E$  value of 20 # steel according to needs of practical production and plan of sample and heating temperature and result of test.

**Key words:** design of sample; heating temperature; heat elastic modulus  $E$  value of steel