

# 团体标准

T/CSTM 00278—2021

---

## 金属材料强度、应力应变关系的 圆环压缩试验方法

Ring compression test method for strength and stress-strain  
relationship of metallic materials

2021-02-23 发布

2021-05-23 实施

中关村材料试验技术联盟

发布

## 前 言

本文件参照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容有可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国材料与试验团体标准委员会航空材料领域委员会（CSTM/FC53）提出。

本文件由中国材料与试验团体标准委员会航空材料领域委员会（CSTM/FC53）归口。

CSTM标准公布使用

# 金属材料强度、应力应变关系的圆环压缩试验方法

## 1 范围

本文件规定了测定金属材料强度、应力应变关系的圆环压缩试验的试验设备、试样、试验步骤、试验数据处理和试验报告。

本文件适用于均质、各向同性、应变硬化规律呈现幂指数特征的金属材料在均匀变形阶段的强度、应力应变关系的测定。存在明显屈服平台或表现为线性硬化的金属材料可参照使用。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 10623 金属材料 力学性能试验术语

JJG 139 拉力、压力和万能试验机检定规程

## 3 术语和定义、符号

### 3.1 术语和定义

GB/T 10623 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1.1

**Hollomon 模型** Hollomon model

用于描述符合幂律硬化特征材料应力应变关系的数学模型。

#### 3.1.2

**优度** goodness

采用多个圆环试样测得的应力应变曲线中，单个圆环试样的应力应变测量曲线与平均应力应变曲线的接近程度。

### 3.2 符号

本文件使用的符号和说明见表1。

表1 符号和说明

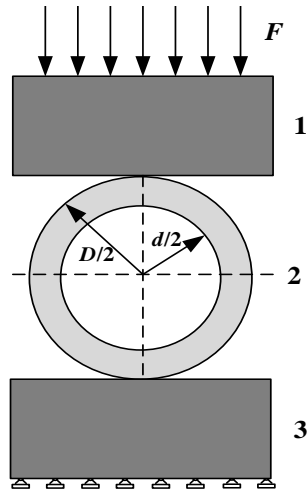
符号	说明	单位
$b_{ij}$	无量纲参数, $i=1, 2, j=1, 2$	—
$B$	圆环的宽度	mm
$c_i$	无量纲参数, $i=1, 2$	—
$C$	圆环压缩试验加载曲线拟合系数	—
$d$	圆环的内直径	mm
$D$	圆环的外直径	mm
$E_t$	圆柱压头材料的弹性模量	MPa

表1 符号和说明 (续)

符号	说明	单位
$E_r$	采用本标准方法测得的弹性模量	MPa
$E^*$	特征弹性模量	MPa
$F$	施加于圆环上的力	N
$F_u$	力-位移曲线初始卸载点的力	N
$F_L$	圆环的极限力	N
$F_p$	预加力	N
$h$	圆环在力方向所产生的位移	mm
$h_0$	零点平移截距	mm
$h_u$	力-位移曲线初始卸载点的位移	mm
$h_{um}$	经零点修正后的力-位移曲线初始卸载点的位移	mm
$k$	公式(1)中的几何参数	—
$m$	圆环压缩试验加载曲线拟合指数	—
$n$	Hollomon 模型中材料硬化指数	—
$N$	平行试样数量	—
$q_1$	经零点修正后的力-位移曲线卸载阶段拟合系数	—
$q_2$	经零点修正后的力-位移曲线卸载阶段拟合指数	—
$r_i$	优度, $i=1, 2, \dots, N$	—
$R_{p0.2}$	规定塑性延伸率为 0.2%时的强度	MPa
$R_m$	抗拉强度	MPa
$S_L$	力-位移曲线的加载刚度	N/mm
$S_u$	力-位移曲线初始卸载点的卸载刚度	N/mm
$a_0$	弹性变形系数	—
$a_1$	无量纲有效体积系数	—
$a_2$	等效应变系数	—
$a_3$	无量纲有效体积指数	—
$a_4$	等效应变指数	—
$\beta$	求解材料弹性模量时考虑压头弹性模量影响的修正系数	—
$\varepsilon$	等效应变	mm/mm
$\varepsilon_y$	Hollomon 模型中材料参考屈服应变	mm/mm
$\sigma$	等效应力	MPa
$\sigma_y$	Hollomon 模型中材料参考屈服应力	MPa
$\rho$	圆环内外径比值 $d/D$	—

#### 4 试验设备

- 4.1 试验设备包括试验机、圆柱压头、力和位移测量装置等。典型圆环压缩加载示意图如图 1 所示。
- 4.2 试验机应具备对试样连续施加力的能力。
- 4.3 圆柱压头直径应大于圆环外径，具有足够的刚度和硬度。压头材料的硬度不低于 HRC 60，弹性模量  $E_f$  不低于  $2 \times 10^5$  MPa。
- 4.4 试验设备应具备测量力和位移的能力。力测量系统的准确度应不低于 1 级，位移测量系统的准确度应不低于 1 级，应按 JJG 139 定期进行检定。
- 4.5 试验设备应具备采集和存储试验数据的能力。
- 4.6 测量圆环尺寸的量具分辨力应优于  $1 \mu\text{m}$ 。



标引序号说明：  
1——上压头；  
2——圆环试样；  
3——下压头。

图1 典型圆环压缩加载示意图

## 5 试样

5.1 圆环外径应在 5mm~20mm 范围内，内外径比值应在 0.6~0.7 范围内，圆环的宽度  $B$  应满足  $D/10 \leq B \leq D/3$ ，圆环试样如图 2 所示。

5.2 平行试样应不少于 3 个。尺寸公差和形位公差按一般公差处理。

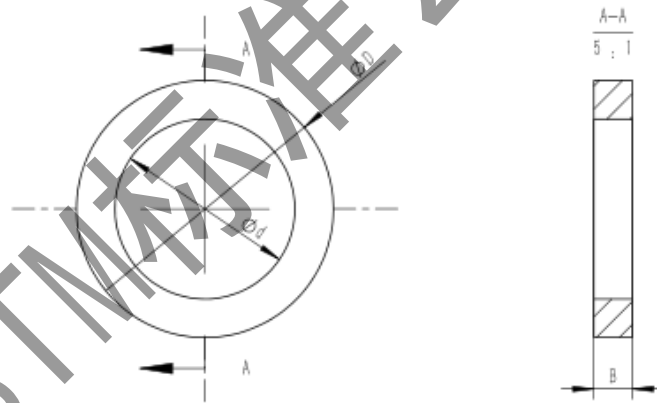


图2 圆环试样

## 6 试验条件

6.1 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℃±5℃。试验过程中环境温度应保持稳定。

6.2 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。

## 7 试验步骤

7.1 测量圆环外径  $D$ 、内径  $d$  和宽度  $B$ 。应在圆周上均分 3 点测量圆环的几何尺寸，取各次测量结果的平均值作为最终结果。

7.2 圆环按试验机加载方向放置在圆柱压头中心位置，圆环和压头表面洁净。

7.3 按以下步骤预实验确定卸载点位移：

- a) 任选一个圆环作为预试验试样，确定卸载点位移；
- b) 对预试验试样预加力  $F_p$ ， $F_p$  不超过  $0.2F_L$ ， $F_L$  由公式 (1) 计算：

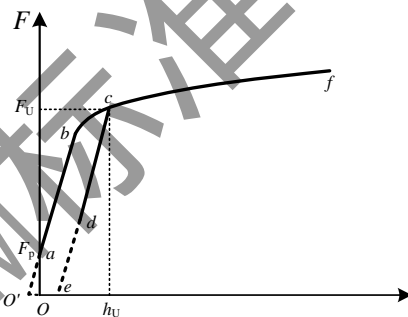
$$\begin{cases} F_L = \alpha_1 \alpha_2 k D^2 \sigma_y \\ \alpha_1 = b_{11} \rho^{b_{12}} \\ \alpha_2 = b_{21} + b_{22} \rho \dots\dots\dots (1) \\ k = c_1 \left(\frac{B}{D}\right)^2 + c_2 \frac{B}{D} \end{cases}$$

参数  $b_{11}$ 、 $b_{12}$ 、 $b_{21}$ 、 $b_{22}$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  列于表 2。由于公式(1)中  $\sigma_y$  未知，首个试样的  $F_L$  可采用 200MPa~400MPa 预估，当试验获得了  $\sigma_y$  后，后续试样试验以该结果计算  $F_L$ 。

表 2 参数  $b_{11} \sim b_{22}$  的值

$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{21}$	$b_{22}$	$c_1$	$c_2$
0.06390	-3.315	0.8258	-0.7371	0.3651	0.9284

- c) 采用位移控制对预试验试样连续加载位移至  $0.15D$ ，加载速率  $0.1\text{mm}/\text{min} \sim 0.3\text{mm}/\text{min}$ ；
- d) 按图 3 作初始加载段  $ab$  的线性段的平移线  $ce$ ，平移量  $O'e = (0.003 \pm 0.001)D$ ；
- e) 平移线  $ce$  与力-位移曲线相交于  $c$  点， $h_u$  即为卸载点位移。



标引序号说明：  
 $abc$ ——首次加载曲线；  
 $cd$ ——卸载曲线；  
 $dcf$ ——第二次加载曲线。

图 3 卸载法确定弹性模量示意图

7.4 选用除预试验试样外的圆环按 7.5 和 7.6 进行正式试验。

7.5 按图 3 对圆环进行加载-卸载-加载试验。首先以位移控制加载至位移  $h_u$ ，加载速率  $0.1\text{mm}/\text{min} \sim 0.3\text{mm}/\text{min}$ 。然后以力控制卸载至  $(0.2 \sim 0.5)F_L$  或  $(0.2 \sim 0.5)F_u$ ，最后以位移控制第二次加载至  $0.15D$ ，加载速率与第一阶段加载保持一致。

7.6 记录整个试验过程中的力  $F$  和位移  $h$ 。

## 8 试验数据处理

### 8.1 零点修正

8.1.1 对于每次试验，均应单独确定零点。在力-位移曲线线性位移范围内，应采集足够多的数据点，以便有效确定零点。

8.1.2 按图 4 采用线性方程拟合力-位移曲线的初始线性段，然后外推确定零点。

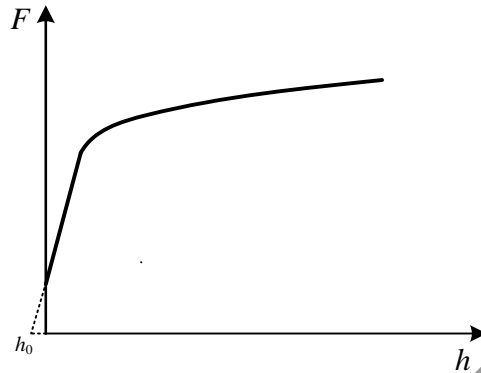


图 4 确定零点示意图

8.1.3 通过上述外推方法确定零点时，力-位移曲线在位移坐标轴上的截距即为  $h_0$ 。

8.1.4 将力-位移试验曲线沿位移坐标轴平移  $h_0$ ，使力-位移曲线的起始点回到坐标原点，得到修正后的力-位移曲线。

### 8.2 应力应变曲线的绘制

8.2.1 测定应力-应变曲线的原理参见附录 A。

8.2.2 由公式 (2) 拟合经零点修正后的力-位移曲线卸载阶段 ( $0.7F_u \sim F_u$ )，卸载区数据采集点不少于 50 个。

$$F = q_1 h^{q_2} \dots\dots\dots (2)$$

8.2.3 将公式 (2) 对  $h$  求导，并在经零点修正后最大卸载位移  $h_{um}$  处取值，按公式 (3) 计算弹性模量：

$$\begin{cases} E_r = \frac{S_u}{\alpha_0 B} \\ S = q_1 q_2 (h_{um})^{q_2-1} \\ \alpha_0 = \beta(1+\rho)(1-\rho)^{3.198} \\ \beta = 0.0632 \ln\left(\frac{E_r}{E^*}\right) + 0.5708 \\ h_{um} = h_u - h_0 \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$$E^* = 2 \times 10^5 \text{MPa}.$$

8.2.4 采集的载荷、位移数据按公式 (A.2) 拟合，当  $E < 100 \text{GPa}$  时，取零点修正后力-位移曲线的加载段位移范围  $0.07D \sim 0.15D$  中采集的所有载荷、位移数据进行载荷-位移关系拟合；当  $E > 100 \text{GPa}$  时，加载段位移拟合范围取为  $0.05D \sim 0.15D$ 。

8.2.5 获得拟合系数  $C$  和指数  $m$  后, 由公式 (4) 确定参数  $n$  和  $\sigma_y$ , 根据公式 (A.3) 得到应力应变曲线。参数  $b_{31}$ 、 $b_{32}$ 、 $b_{41}$ 、 $b_{42}$ 、 $b_{43}$  的取值见表 3。

$$\begin{cases} \sigma_y = \left[ \frac{C(1+n)}{k\alpha_1\alpha_2^{n+1}D^{2-m}E^n(m+1)} \right]^{\frac{1}{1-n}} \\ n = \frac{m+1-\alpha_3-\alpha_4}{\alpha_4} \dots\dots\dots (4) \\ \begin{cases} \alpha_3 = b_{31}\rho^{b_{32}} \\ \alpha_4 = b_{41} + b_{42}\rho + b_{43}\rho^2 \end{cases} \end{cases}$$

表 3 参数  $b_{31} \sim b_{43}$  的值

$b_{31}$	$b_{32}$	$b_{41}$	$b_{42}$	$b_{43}$
0.03160	-3.146	0.1829	2.052	-1.457

8.3  $R_{p0.2}$  的确定

在得到应力应变曲线后, 可按 GB/T 228.1 确定材料的规定塑性延伸强度  $R_{p0.2}$ 。

8.4  $R_m$  的确定

$R_m$ 按公式 (5) 计算:

$$R_{m-r} = E^n \sigma_y^{1-n} \left( \frac{n}{e} \right)^n \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$e=2.7183$ 。

8.5 异常试验结果的判断

8.5.1 有  $N$  个独立试样, 将所得应力应变曲线的应变离散为  $w$  个数据点 ( $w \geq 20$ ), 应力由公式 (A.3) 计算获得, 进而得到应力应变数据  $(\sigma_{ji}, \varepsilon_{ji})$  ( $i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, w$ )。

8.5.2 按公式 (6) 计算同一应变  $\varepsilon_j$  下应力  $\sigma_{ji}$  的平均值  $\sigma_{jmean}$ , 则试验材料的平均应力应变关系曲线由数据点  $(\varepsilon_j, \sigma_{jmean})$  ( $j=1, 2, \dots, w$ ) 构成。

$$\sigma_{jmean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{ji} \quad (j=1, 2, \dots, w) \dots\dots\dots (6)$$

8.5.3 按公式 (7) 计算单个试样的应力应变测量曲线与平均应力应变曲线之间的优越度  $r_i$ 。

$$r_i = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^w (\sigma_{ji} - \sigma_{jmean})^2}{\sum_{j=1}^w \sigma_{ji}^2}} \quad (i=1, 2, \dots, N) \dots\dots\dots (7)$$

8.5.4 当所有试样的优越度  $r_i$  均不小于 0.95 时, 则试验结果有效。

8.5.5 当存在一个试样的优越度  $r_i$  低于 0.95 时, 出现如图 5 所示显著偏离情形, 应去除有较大偏离的应力应变曲线。若剩余曲线不少于 3 条, 则其余结果视为有效; 若剩余曲线少于 3 条, 可增加试样获得一条新增的应力应变曲线, 使得结果满足 8.5.4 所述的有效判定条件, 否则试验结果



无效。

8.5.6 当两个及以上试样的优度  $r_i$  低于 0.95 时，不同试样的测试应力应变曲线之间或测试应力应变曲线与单轴拉伸结果之间存在如图 6 所示较大分散性。分散性原因来自材料分散性或试样尺寸误差，试验结果是否可用，由相关方商定。

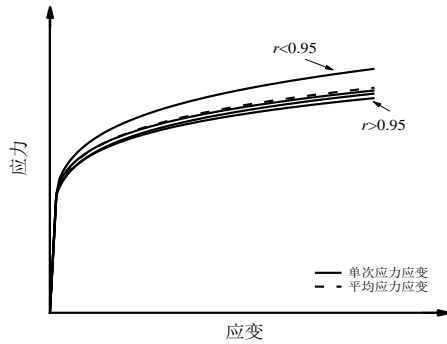


图5 应力-应变测试结果偏离示例

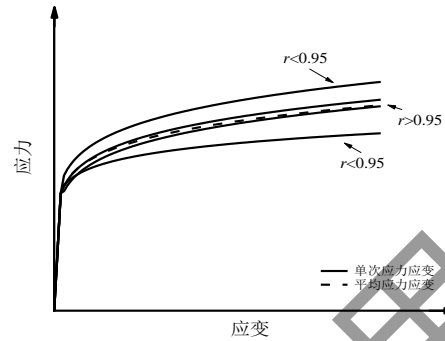


图6 应力-应变测试结果分散示例

## 9 试验报告

试验报告至少应包括下列内容：

- a) 本文件编号；
- b) 试样标识；
- c) 材料名称、牌号；
- d) 试验条件；
- e) 试验结果；
- f) 试验者及试验日期。

附录 A  
(资料性)  
测定应力应变关系的原理

A.1 对圆环进行压缩加载，得到图 A.1 所示的力-位移曲线，且满足公式 (A.1) 和公式 (A.2)：

a) 弹性变形阶段：

$$F = S_L h \dots\dots\dots (A.1)$$

b) 弹塑性变形阶段：

$$F = Ch^m \dots\dots\dots (A.2)$$

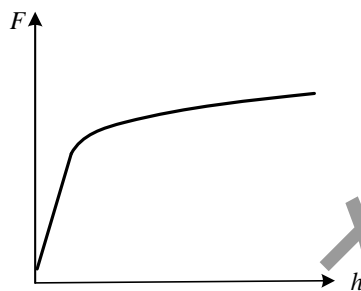


图 A.1 典型的圆环压缩试验力-位移曲线

A.2 对于任意受载构元有效变形域内的总形变能可表示为能量中心 M 点材料代表性体积单元的变形能密度和有效变形域体积之积，而复杂应力状态下能量中值点 RVE 的变形能密度可根据 von Mises 等效原理等效为简单应力状态下变形能密度。假设圆环材料满足均质、各向同性和幂律应变硬化，其应力-应变关系可用 Hollomon 模型描述见公式 (A.3)：

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ K\varepsilon^n & \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

$$K = E^n \sigma_y^{1-n}。$$

A.3 对于受外载压缩圆环试样，有效变形域内的形变能 U 可表示为公式 (A.4)：

$$U = \begin{cases} \frac{EV\varepsilon^2}{2} & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \frac{KV}{1+n} \varepsilon^{n+1} & \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases} \dots\dots\dots (A.4)$$

A.4 在弹性变形阶段，假定有效变形域体积和等效应变满足公式 (A.5)：

$$\frac{V}{V_e^*} \varepsilon^2 = f\left(\frac{h}{D}\right) \dots\dots\dots (A.5)$$

式中，

$$V_e^* = BD^2。$$

A.5 将公式 (A.5) 代入公式 (A.4) 可得公式 (A.6)：

$$U = \frac{EBD^2}{2} f\left(\frac{h}{D}\right) \dots\dots\dots (A.6)$$

A.6 施加在圆环上的外力所做的功  $W$  见公式 (A.7) :

$$W = \int_0^h Fdh = \frac{S_L h^2}{2} \dots\dots\dots (A.7)$$

A.7 在准静态加载条件下, 根据功能原理  $W=U$ , 则有公式 (A.8)

$$\frac{S_L}{2} h^2 = \frac{EBD^2}{2} f(h) \dots\dots\dots (A.8)$$

A.8 对比公式 (A.8) 两端位移项, 可知函数  $f(h)$  的量纲为  $h^2$ 。为避免初始加载非线性影响, 可采用卸载刚度  $S_u$  替代  $S_L$ , 则弹性模量  $E_r$  可表为公式 (A.9) :

$$E_r = \frac{S_u}{\alpha_0 B} \dots\dots\dots (A.9)$$

式中:

$\alpha_0$ ——弹性变形系数。

A.9 在弹塑性变形阶段, 假定有效变形域体积和等效应变分别满足公式 (A.10) :

$$\begin{cases} \frac{V}{V_{ep}^*} = \alpha_1 \left(\frac{h}{D}\right)^{\alpha_3} \\ \varepsilon = \alpha_2 \left(\frac{h}{D}\right)^{\alpha_4} \end{cases} \dots\dots\dots (A.10)$$

式中:

$$V_{ep}^* = kD^3;$$

$\alpha_1$ ——无量纲有效体积系数;

$\alpha_2$ ——等效应变系数;

$\alpha_3$ ——无量纲有效体积指数;

$\alpha_4$ ——等效应变指数。

A.10 将公式 (A.10) 代入公式 (A.4) 可得公式 (A.11) :

$$U = \frac{KkD^3 \alpha_1 \alpha_2^{n+1}}{n+1} \left(\frac{h}{D}\right)^{\alpha_4(n+1)+\alpha_3} \dots\dots\dots (A.11)$$

A.11 在准静态加载条件下, 根据功能原理  $W=U$ , 则有公式 (A.12)

$$\int_0^h Fdh = \frac{E^n \sigma_y^{1-n} kD^3 \alpha_1 \alpha_2^{n+1}}{n+1} \left(\frac{h}{D}\right)^{\alpha_4(n+1)+\alpha_3} \dots\dots\dots (A.12)$$

A.12 以  $h$  对公式 (A.12) 两端分别求导, 可得公式 (A.13) :

$$F = \frac{E^n \sigma_y^{1-n} kD^2 \alpha_1 \alpha_2^{n+1} [\alpha_4(n+1) + \alpha_3]}{1+n} \left(\frac{h}{D}\right)^{\alpha_4 n + \alpha_4 + \alpha_3 - 1} \dots\dots\dots (A.13)$$

A.13 对比公式 (A.2) 弹塑性变形阶段圆环压缩力-位移关系可以得到 Hollomon 模型参数, 见公式 (A.14) :

$$\begin{cases} n = \frac{m+1-\alpha_3-\alpha_4}{\alpha_4} \\ \sigma_y = \left[ \frac{C(1+n)}{k\alpha_1\alpha_2^{n+1}D^{2-m}E^n(m+1)} \right]^{\frac{1}{1-n}} \dots\dots\dots (A. 14) \end{cases}$$

参数  $\alpha_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 可借助有限元分析获得。

CSTM标准公布使用

附 录 B  
(资料性)  
主要起草单位和主要起草人

本文件主要起草单位：西南交通大学、北京航空材料研究院、中航试金石检测科技（大厂）有限公司、苏州热工研究院。

本文件主要起草人：蔡力勋、包陈、韩光照、何玉怀、王翔、李鲁林、梁博、吕洋、周峰峦、余伟炜、於旻、刘晓坤、范敏郁、骆佳楠。

---

CSTM标准公布使用