

金属室温扭转试验方法

Metallic materials—Torsion test at room temperature

1 主题内容与适用范围

本标准规定了金属室温扭转试验方法的术语、符号、原理、试样、试验设备、试验条件、性能测定、测得性能数值的修约和试验报告。

本标准适用于金属材料，在室温下测定其扭转力学性能。

2 引用标准

GB 6397 金属拉伸试验试样

GB 8170 数值修约规则

3 原理

对试样施加扭矩，测量扭矩及其相应的扭角，一般扭至断裂，以便测定本标准定义的一项或几项扭转力学性能。

4 术语、符号

4.1 术语

4.1.1 试样平行长度：试样两头部或两夹持部分（不带头试样）之间的平行长度。

4.1.2 试样标距：试样上用以测量扭角的两标记间距离的长度。

4.1.3 扭转计标距：用扭转计测量试样扭角所使用试样部分的长度。

4.1.4 切变模量：切应力与切应变成线性比例关系范围内切应力与切应变之比。

4.1.5 规定非比例扭转应力：扭转试验中，试样标距部分外表面上的非比例切应变达到规定数值时，按弹性扭转公式计算的切应力。

注：表示此应力的符号应附以角注说明，例如 $\tau_{p0.015}$ 、 $\tau_{p0.3}$ 等，分别表示规定的非比例切应变达到0.015%和0.3%时的切应力。

4.1.6 屈服点：扭转试验中，扭角增加而扭矩不增加（保持恒定）时，按弹性扭转公式计算的切应力。如扭矩发生下降，则应区分上屈服点和下屈服点。

4.1.6.1 上屈服点：扭转试验中，以首次发生下降前的最大扭矩，按弹性扭转公式计算的切应力。

4.1.6.2 下屈服点：以屈服阶段中的最小扭矩，按弹性扭转公式计算的切应力。

4.1.7 抗扭强度：试样在扭断前承受的最大扭矩，按弹性扭转公式计算的切应力。

4.1.8 最大非比例切应变：试样扭断时其外表面上的最大非比例切应变。

4.2 符号

符号、名称和单位列于表1。

表 1

符 号	名 称	单 位
d_0 a_0 L_c L_0 L_e L R	圆形试样和管形试样平行长度部分的外直径 管形试样平行长度部分的管壁厚度 试样平行长度 试样标距 扭转计标距 试样总长度 试样头部过渡半径	mm
T T_p T_s T_{su} T_{sl} T_b ΔT	扭矩 规定非比例扭矩 (试验记录或报告中应附以所测应力的角注, 例如 $T_{p0.015}$ 、 $T_{p0.3}$ 等) 屈服扭矩 上屈服扭矩 下屈服扭矩 最大扭矩 扭矩增量	N·mm
φ φ_{\max} $\Delta\varphi$	扭角 最大非比例扭角 扭角增量	rad
I_p	极惯性矩	mm ⁴
W	截面系数	mm ³
G τ_p τ_s τ_{su} τ_{sl} τ_b	切变模量 规定非比例扭转应力 屈服点 上屈服点 下屈服点 抗扭强度	N/mm ²
γ_p γ_{\max}	非比例切应变 最大非比例切应变	%
n π	扭角轴放大倍数 圆周率	

5 试样

5.1 试样形状和尺寸

5.1.1 圆形试样的形状和尺寸见图1。试样头部形状和尺寸应适合试验机夹头夹持。推荐采用直径为10 mm，标距分别为50 mm和100 mm，平行长度分别为70 mm和120 mm的试样。如采用其他直径的试样，其平行长度应为标距加上两倍直径。

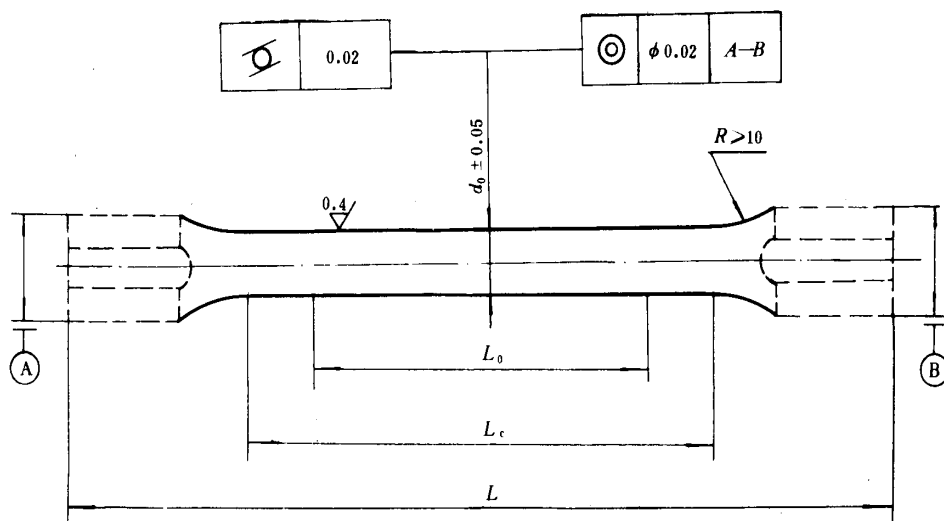


图 1 圆形试样

5.1.2 管形试样的平行长度应为标距加上两倍外直径。其外直径和管壁厚度的尺寸公差及内外表面粗糙度应符合有关标准或协议要求。试样应平直。试样两端应间隙配合塞头，塞头不应伸进其平行长度内。塞头的形状和尺寸可参照GB 6397中3.6.3.2的图3 (b)。

5.2 试样尺寸测量

5.2.1 圆形试样应在标距两端及其中间处两个相互垂直的方向上各测一次直径，并取其算术平均值，取用三处测得直径的算术平均值计算试样的极惯性矩；取用三处测得直径的算术平均值中的最小值计算试样的截面系数。

5.2.2 管形试样应在其一端两个相互垂直的方向上各测一次外直径，取其算术平均值。在同一端两个相互垂直的方向上测量四处管壁厚度，取其算术平均值。取用测得的平均外直径和平均管壁厚度计算管形试样的极惯性矩和截面系数。

5.2.3 按表2选用量具。量具应由计量部门定期进行检定。

表 2

mm

试样尺寸		量具的最小分度值 不大于
直径		0.01
壁厚	<1	0.002
	>1	0.01
标距		0.05

5.2.4 测量时应估读到量具最小分度的半个分度值。

6 试验设备

6.1 试验机

6.1.1 试验机扭矩示值相对误差应不大于±1%。

6.1.2 试验时,试验机两夹头中之一应能沿轴向自由移动,对试样无附加轴向力,两夹头保持同轴。

6.1.3 试验机应能对试样连续施加扭矩,无冲击和震动。

6.1.4 应具有良好的读数稳定性,在30s内保持扭矩恒定。

6.1.5 试验机应由计量部门定期进行检定。

6.2 扭转计

允许使用不同类型的扭转计测量扭角,推荐使用电子型扭转计,但均必须满足如下要求:

6.2.1 扭转计标距偏差应不大于±0.5%,并能牢固地装卡在试样上,试验过程中不发生滑移。

6.2.2 扭转计示值线性误差应不大于±1%。

6.2.3 扭转计应进行标定。

7 试验条件

7.1 试验在室温(10~35℃)下进行。

7.2 扭转速度:屈服前应在6°~30°/min范围内,屈服后不大于360°/min。速度的改变应无冲击。

8 性能测定

8.1 切变模量的测定

8.1.1 图解法:试验时,用自动记录方法记录扭矩-扭角曲线。扭矩轴比例的选择应使扭矩-扭角曲线的弹性直线段的高度超过扭矩轴量程的1/2以上。扭角轴放大倍数的选择应使扭矩-扭角曲线的弹性直线段与扭矩轴夹角不小于40°为宜。在所记录曲线的弹性直线段上,读取扭矩增量和相应的扭角增量,见图2。按公式(1)计算切变模量。

$$G = \frac{\Delta T \cdot L_e}{\Delta \varphi \cdot I_p} \dots \dots \dots (1)$$

式中 I_p 为:

圆形试样:

$$I_p = \frac{\pi d_0^4}{32} \dots \dots \dots (2)$$

管形试样:

$$I_p = \frac{\pi d_0^3 a_0}{4} \left[1 - \frac{3a_0}{d_0} + \frac{4a_0^2}{d_0^2} - \frac{2a_0^3}{d_0^3} \right] \dots\dots\dots (3)$$

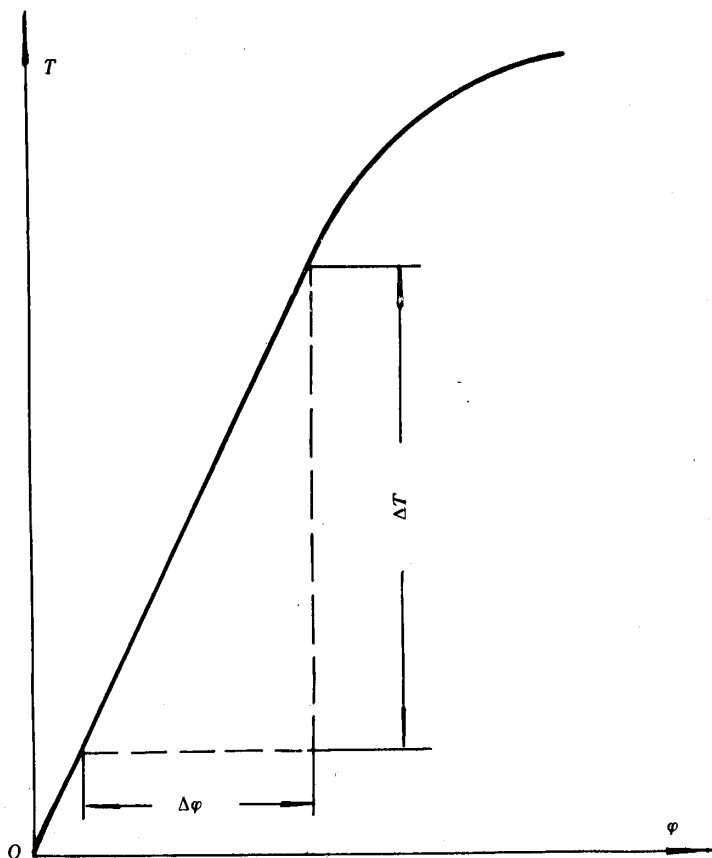


图 2

8.1.2 逐级加载法: 试验时, 对试样施加预扭矩, 预扭矩一般不超过相应预期规定非比例扭转应力 $\tau_{p0.015}$ 的 10%。装上扭转计并调整其零点。在弹性直线段范围内, 用不少于 5 级等扭矩对试样加载。记录每级扭矩和相应的扭角, 读取每对数据对的时间以不超过 10s 为宜。计算出平均每级扭角增量。按公式 (1) 计算切变模量。测定举例见附录 B。

注: 允许用最小二乘法将数据对拟合直线计算切变模量。

8.2 规定非比例扭转应力的测定

8.2.1 图解法: 试验时, 用自动记录方法记录扭矩-扭角曲线, 见图 3。应选择适当的扭矩轴比例, 使所要测定的应力对应的扭矩处于扭矩轴量程的 1/2 以上。选择扭角轴的放大倍数应使图 3 中的 \overline{OC} 段大于 5 mm。在记录得的曲线上延长弹性直线段交扭角轴于 O 点, 截取 \overline{OC} ($\overline{OC} = 2nL_e \gamma_p / d_0$) 段, 过 C 点作弹性直线段的平行线 CA 交曲线于 A 点, A 点对应的扭矩为所求扭矩 T_p 。按公式 (4) 计算规定非比例扭转应力。

$$\tau_p = \frac{T_p}{W} \dots\dots\dots (4)$$

式中 W 为:

圆形试样:

$$W = \frac{\pi d_0^3}{16} \dots \dots \dots (5)$$

管形试样:

$$W = \frac{\pi d_0^2 a_0}{2} \left[1 - \frac{3 a_0}{d_0} + \frac{4 a_0^2}{d_0^2} - \frac{2 a_0^3}{d_0^3} \right] \dots \dots \dots (6)$$

注: 图解法测定真实规定非比例扭转应力按附录 A (补充件) 进行。

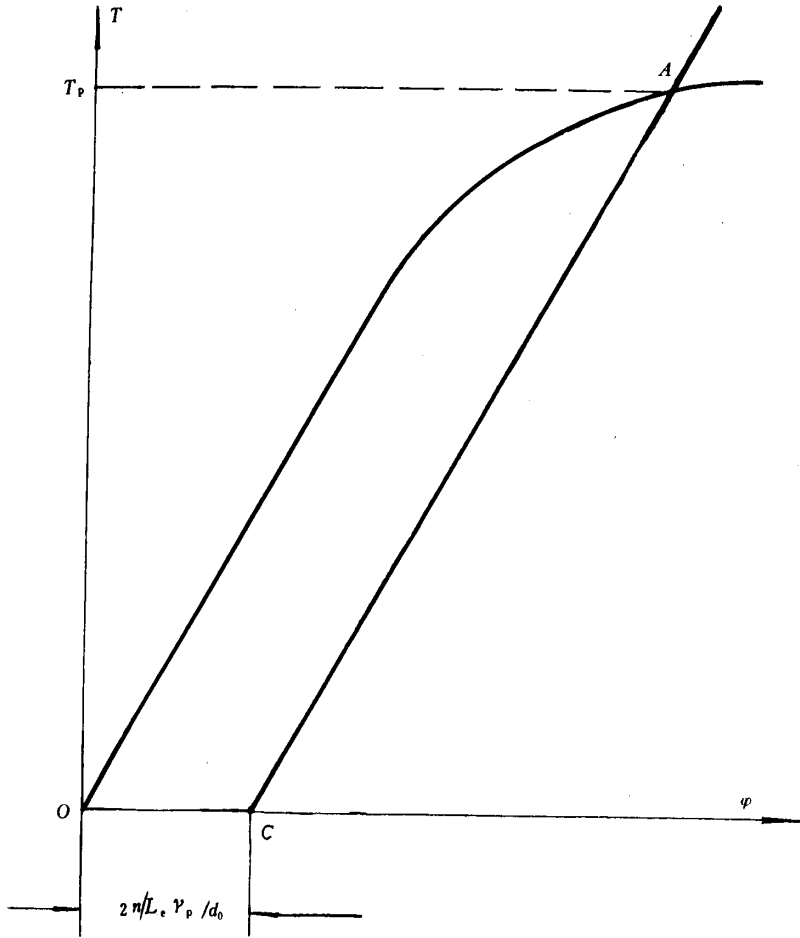


图 3

8.2.2 逐级加载法: 试验时, 按8.1.2对试样施加预扭矩后, 装卡扭转计并调整零点。在相当于规定非比例扭转应力 $\tau_{p0.015}$ 的70%~80%以前, 施加大等级扭矩, 以后施加小等级扭矩, 小等级扭矩应相当于不大于 10 N/mm^2 的切应力增量。读取各级扭矩和相应的扭角。读取每对数据对的时间以不超过10s为宜。

从各级扭矩下的扭角读数中减去计算得的弹性部分扭角, 即得非比例部分扭角。施加扭矩直至得到非比例扭角等于或稍大于所规定的数值为止。用内插法求出精确的扭矩, 按公式(4)计算规定非比例扭转应力。测定举例见附录C。

8.3 屈服点、上屈服点和下屈服点的测定

采用图解法或指针法进行测定(仲裁试验采用图解法)。试验时用自动记录方法记录扭转曲线(扭矩-扭角曲线或扭矩-夹头转角曲线), 或直接观测试验机扭矩度盘指针的指示。当首次扭角增加而扭

矩不增加（保持恒定）时的扭矩为屈服扭矩；首次下降前的最大扭矩为上屈服扭矩；屈服阶段中最小扭矩为下屈服扭矩。见图4。分别按公式（7）、（8）和（9）计算屈服点、上屈服点和下屈服点。

$$\tau_s = \frac{T_s}{W} \dots\dots\dots (7)$$

$$\tau_{su} = \frac{T_{su}}{W} \dots\dots\dots (8)$$

$$\tau_{sl} = \frac{T_{sl}}{W} \dots\dots\dots (9)$$

式中截面系数 W 按公式（5）或（6）计算。

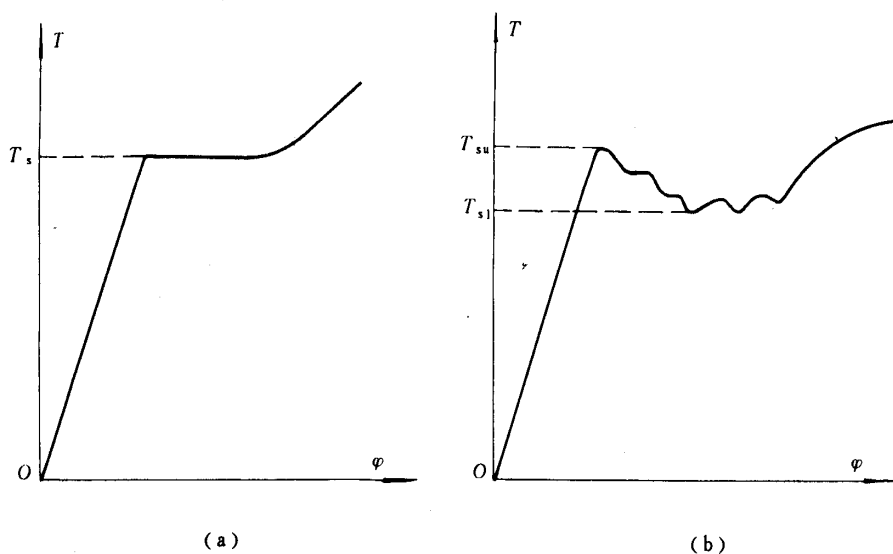


图 4

8.4 抗扭强度的测定

试验时，对试样连续施加扭矩，直至扭断。从记录的扭转曲线（扭矩 - 扭角曲线或扭矩 - 夹头转角曲线）或试验机扭矩度盘上读出试样扭断前所承受的最大扭矩。见图5。按公式（10）计算抗扭强度。

$$\tau_b = \frac{\hat{T}_b}{W} \dots\dots\dots (10)$$

式中截面系数 W 按公式（5）或（6）计算。

注：图解法测定真实抗扭强度按附录A（补充件）进行。

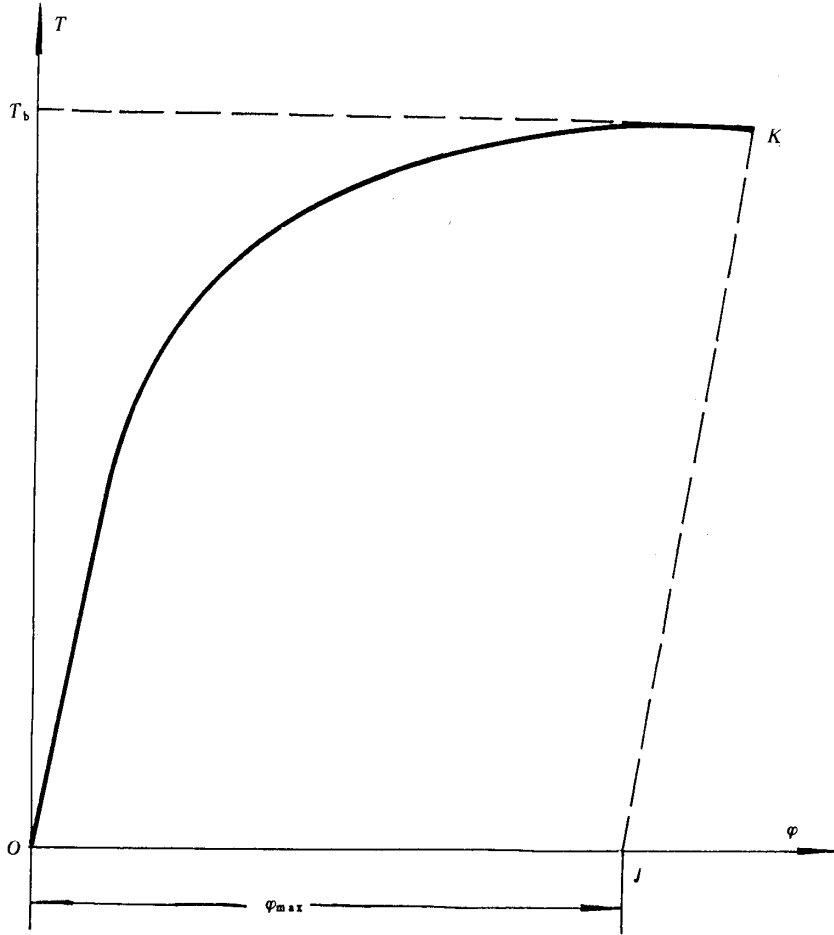


图 5

8.5 最大非比例切应变的测定

试验时，对试样连续施加扭矩，记录扭矩-扭角曲线，直至扭断。过断裂点K作曲线的弹性直线段的平行线KJ交扭角轴于J点， \overline{OJ} 即为最大非比例扭角，见图5。按公式(11)计算最大非比例切应变。

$$\gamma_{\max}(\%) = \arctg\left(\frac{\varphi_{\max} \cdot d_0}{2L_e}\right) \times 100 \dots\dots\dots (11)$$

9 测得性能数值的修约

测得性能数值按表3的规定修约，修约的方法按GB 8170执行。

表 3

扭转性能	修约到
G	100 N/mm ²
$\tau_p, \tau_s, \tau_{su}, \tau_{sl}, \tau_b$	1 N/mm ²
γ_{\max}	0.5%

10 试验报告

试验报告应包括以下内容：

- a. 材料牌号、工艺和热处理制度；
- b. 试样编号、尺寸、测定各项性能的结果；
- c. 委托单位、试验和校对人员、日期。

附录 A

真实规定非比例扭转应力与真实抗扭强度的测定方法
(补充件)

本附录仅当有关标准或协议提出此项测定要求时才执行。

A 1 适用范围

本附录适用于金属材料圆形试样的真实规定非比例扭转应力和真实抗扭强度的测定。

A 2 术语、符号

A 2.1 真实规定非比例扭转应力 τ_{tP} : 扭转试验中, 圆形试样标距部分外表面上的非比例切应变达到规定数值时, 按刘德维克-卡曼公式计算的切应力。

注: 表示此应力的符号应附以角注说明, 例如 $\tau_{tP0.015}$ 、 $\tau_{tP0.3}$ 分别表示规定非比例切应变达到 0.015% 和 0.3% 时的真实切应力。

A 2.2 真实抗扭强度 τ_{tb} : 扭转试验中, 圆形试样扭断时, 按刘德维克-卡曼公式计算的最大切应力。

A 3 试样、试验设备和试验条件

对试样、试验设备和试验条件的要求, 分别与本标准中第 5、6、7 章的要求相同。

A 4 测定方法

A 4.1 图解法测定真实规定非比例扭转应力

试验时, 按 8.2.1 记录扭矩-扭角曲线和作平行线图解确定交点 A 后, 以 A 点为切点, 过 A 点作曲线的切线 AT_1 交扭矩轴于 T_1 , 见图 A 1。读取 A 点扭矩 T_A 和扭矩 T_1 。按公式 (A 1) 计算真实规定非比例扭转应力。

$$\begin{aligned} \tau_{tP} &= \frac{4}{\pi d_0^3} \left[3T_A + \theta_A \left(\frac{dT}{d\theta} \right)_A \right] \\ &= \frac{4}{\pi d_0^3} [4T_A - T_1] \dots\dots\dots (A1) \end{aligned}$$

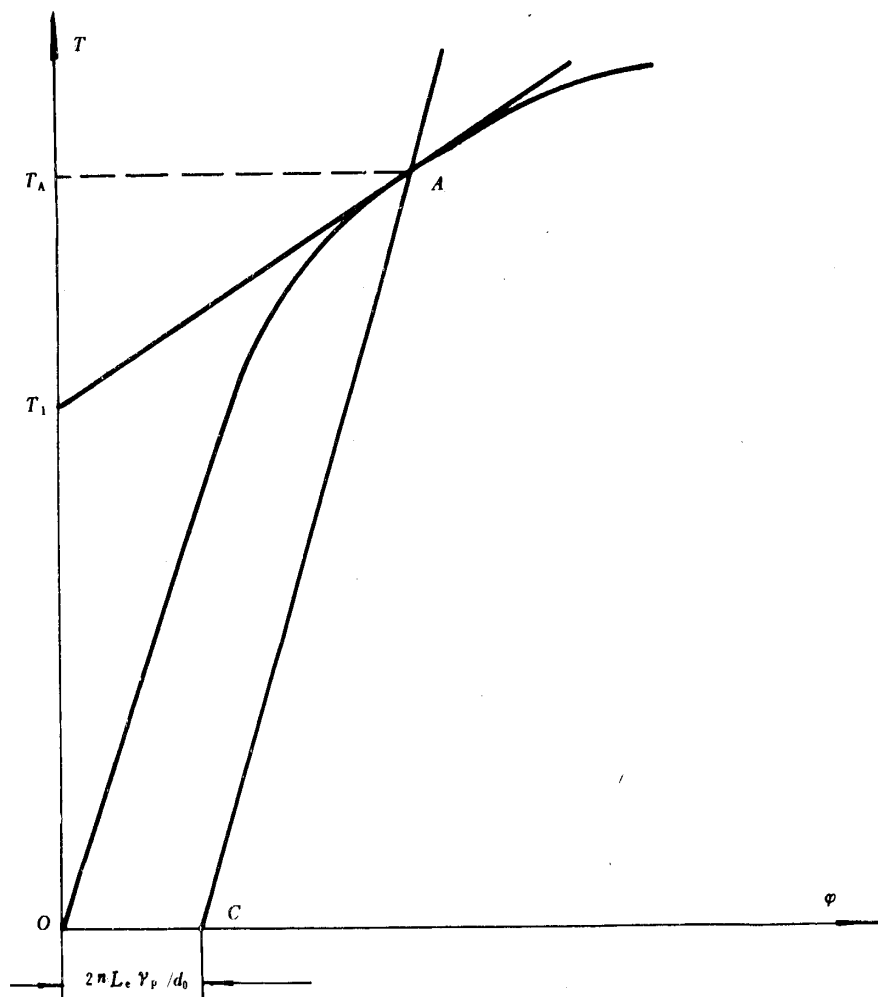


图 A 1

A 4.2 图解法测定真实抗扭强度

试验时，用自动记录方法记录扭矩-扭角曲线，直至试样扭断。以曲线上断裂点K为切点，过K点作曲线的切线KT_B交扭矩轴于T_B，见图A2。读取K点的扭矩T_K和扭矩T_B。按公式(A2)计算真实抗扭强度。

$$\begin{aligned} \tau_{tb} &= \frac{4}{\pi d_0^3} \left[3 T_K + \theta_K \left(\frac{dT}{d\theta} \right)_K \right] \\ &= \frac{4}{\pi d_0^3} [4 T_K - T_B] \dots\dots\dots (A2) \end{aligned}$$

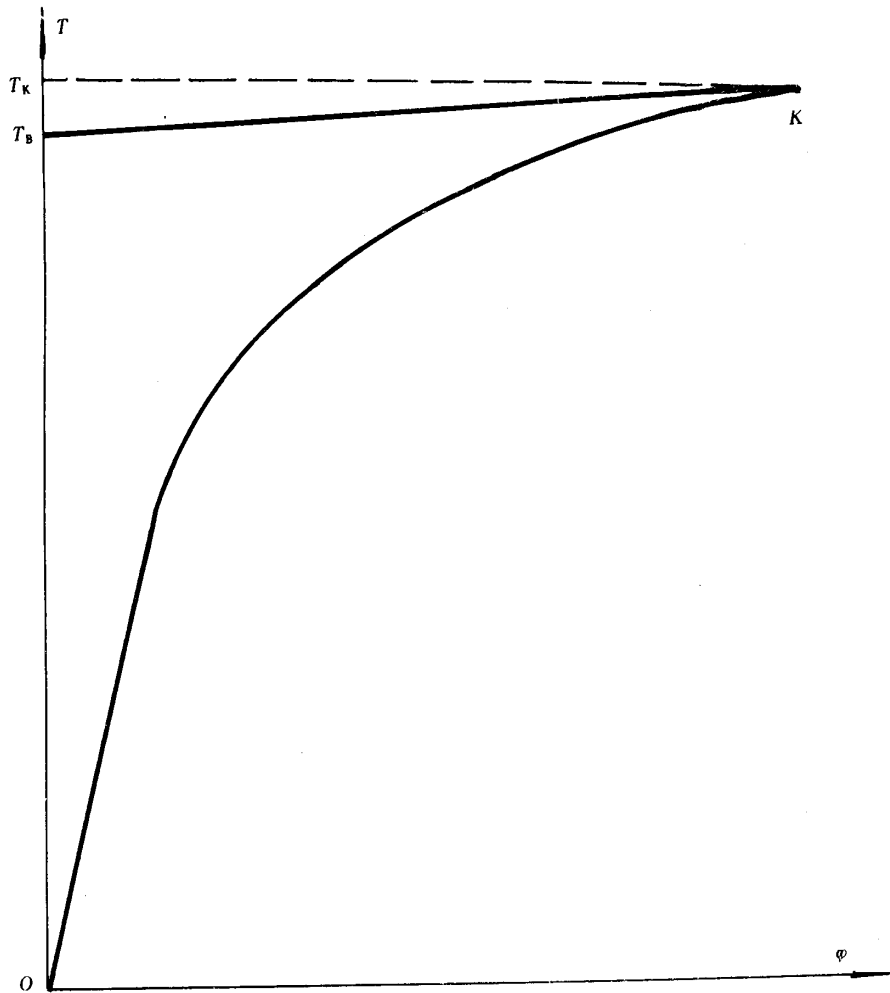


图 A 2

A 5 真实规定非比例扭转应力 τ_{tP} 和真实抗扭强度 τ_{tb} 的测定结果数值修约到 1 N/mm^2 。

附录 B

逐级加载法测定切变模量举例
(参考件)

试验材料: 钛合金
 试样尺寸: $d_0 = 10.00 \text{ mm}$
 扭转计标距: $L_e = 100.0 \text{ mm}$
 镜面至标尺距离: $s = 1000 \text{ mm}$
 极惯性矩: $I_p = 981.75 \text{ mm}^4$

委托单位:
 试样编号:
 扭转计类型: 镜式仪

表 B1

扭矩 T N·mm	扭矩增量 ΔT N·mm	标尺读数, mm		读数增量, mm		读数差 mm $\Delta l_{左} - \Delta l_{右}$	读数差平均值, mm Δl
		$l_{左}$	$l_{右}$	$\Delta l_{左}$	$\Delta l_{右}$		
10 000	5 000	0	0				20.1
15 000		24	5	24	5	19	
20 000		50	10	26	5	21	
25 000		74	15	24	5	19	
30 000		99	20	25	5	20	
35 000		125	25	26	5	21	
40 000		151	30	26	5	21	
45 000		176	35	25	5	20	

$$G = \frac{\Delta T \cdot L_e}{\Delta \varphi \cdot I_p} = \frac{\Delta T \cdot L_e}{\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta l}{s} \right) \cdot I_p} = \frac{5000 \times 100 \times 2000}{20.1 \times 981.75}$$

$$= 50\,676.08 \text{ N/m}^2$$

修约后为:

$$G = 5.07 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

附录 C

逐级加载法测定规定非比例扭转应力 $\tau_{P0.015}$ 举例
(参考件)

试验材料: 碳素钢

试样尺寸: $d_0 = 10.00 \text{ mm}$

扭转计标距: $L_e = 100.0 \text{ mm}$

扭转计分度: 0.00025 rad

截面系数: $W = 196.35 \text{ mm}^3$

预期规定非比例扭转应力 $\tau_{P0.015} = 250 \text{ N/mm}^2$

取初始预应力 $\tau_0 = 10\% \tau_{P0.015} = 25 \text{ N/mm}^2$, 相当于预扭矩 $T_0 = \tau_0 \cdot W = 4908 \text{ N}\cdot\text{mm}$, 整取 $T_0 = 5000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 。

相当于预期规定非比例扭转应力的80%的扭矩为:

$$T = 80\% \tau_{P0.015} W = 80 \times 250 \times 196.35 / 100 = 39270 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

整取 $T = 39000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 。

在预期规定非比例扭转应力的80%以前施加大等级扭矩, 以后施加小等级扭矩。大等级扭矩取3级, 每级为:

$$\Delta T = \frac{T - T_0}{3} = \frac{39000 - 5000}{3} = 11333 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

整取 $\Delta T = 11000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 。

小等级扭矩取 $\Delta T_1 = 2000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 。

试验记录见表 C 1。

表 C 1

扭矩 T N·mm	扭转计读数 分度	读数增量 分度	计算的比例扭角读数 分度	计算的非比例扭角读数 分度	
5 000	0	0	$\Delta A_{2000} = 10.3$		
16 000	53	53			
27 000	109	56			
38 000	165	56			
40 000	174	9			
42 000	186	12			
44 000	197	11			
46 000	207	10			
48 000	219	12			
50 000	232	13			
52 000	249	17		242.3	6.7
54 000	270	21		252.6	17.4
56 000	296	26		262.9	33.1

在线性比例范围内计算得的小等级扭矩的扭角平均增量为:

$$\Delta A_{2000} = \frac{232 - 0}{50000 - 5000} \times 2000 = 10.3 \text{ 分度}$$

从总扭角读数中减去按每2000 N·mm对应的比例扭角为10.3分度这样计算的比例扭角部分,即可得非比例扭角部分。

由于要测定的规定非比例扭转应力 $\tau_{P_{0.015}}$,其规定的非比例切应变为0.015%,所对应的扭转计分度数为:

$$\left(2 \times 0.015\% \times \frac{L_e}{d_0}\right) / 0.00025 = \left(2 \times \frac{0.015}{100} \times \frac{100.0}{10.00}\right) / 0.00025 = 12 \text{ 分度}$$

从表 C 1 中读出最接近非比例扭角为12分度时对应的扭矩为52000 N·mm,用内插法求出精确的扭矩值为:

$$T_{P_{0.015}} = 52000 + \left(\frac{54000 - 52000}{17.4 - 6.7}\right) \times (12 - 6.7) = 52990.65 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

则得:

$$\tau_{P_{0.015}} = \frac{T_{P_{0.015}}}{W} = \frac{52990.65}{196.35} = 269.879 \text{ N/mm}^2$$

修约后为:

$$\tau_{P_{0.015}} = 270 \text{ N/mm}^2$$

附加说明:

本标准由冶金工业部情报标准研究所提出。

本标准由冶金工业部钢铁研究总院、有色金属总公司有色金属研究总院负责起草。

本标准主要起草人梁新邦、邹林瑛、高舜芝、周瑞君、刘如珊。

本标准水平等级标记 GB 10128—88 Y