

用扭角计测定扭转机械性能的方法

一二四厂 周 泰

扭转试验能够客观地反映材料（脆性或塑性）的各种机械性能指标，是测试金属机械性能的重要方法之一。飞机上有许多属于产生扭转变形的构件，如发动机的转动轴、承载的卷弹簧、螺旋桨等。设计这些构件时所选用的材料，必须测出扭转时的各种机械性能数字指标（ G 、 τ 、 $\tau_{0.3}$ 、 τ_b 、 t_K ），提供计算构件强度的准确数值，才能使设计的构件安全可靠。用千分表扭角计测定扭转机械性能时比用马腾式光学引伸计效率高。现将测试情况介绍如下。

一、试验材料、机器和仪器

试验所用材料列入表1；所用机器为 K-50 型扭转试验机（选用50公斤-米表盘）；试样受扭时用的测量仪器——千分表及扭角的测定如图1、2。

表1 材料、试样尺寸及拉伸性能

材料名称	试样直径 d 毫米	试样标距 L_0 毫米	拉伸性能 公斤力/毫米 ²		
			σ_p	σ_s	σ_b
碳素钢	13.8	190	30	35	63

1. 扭角计的装置和原理

将画好标距的试样装在试验机上，加以扭矩，使其达到初剪应力 τ_0 （ τ_0 按试验方法规定计算）。将A、B夹环夹于试样标距上，然后装上千分表（其最小分格为0.002毫米），就可用来测量两截面间之相对扭角。千分表距试样中心之距离为 b ，当试样受扭时，两截面间的相对转动可通过千分表测出 ΔA ，从而得到下式：

$$\Delta\varphi \approx \operatorname{tg} \Delta\varphi = \frac{\Delta A}{Kb} \quad (\text{弧度})$$

式中 K 为千分表的放大倍数。

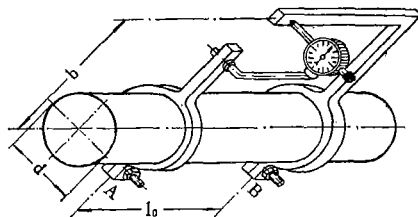


图1 千分表装置示意图

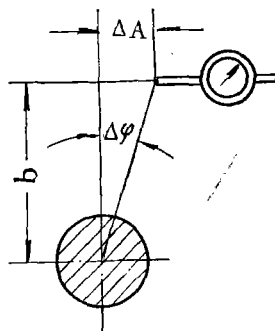


图2 试样两截面受扭示意图

2. 最大破断扭矩之预计

$\tau_b \approx 0.6\sigma_b = 0.6 \times 63 = 37.8$ （公斤力/毫米²）；

$$\begin{aligned} M_b &= W \times \tau_b = \frac{\pi d^3}{16} \times 37.8 \\ &= \frac{3.14 \times 13.8^3}{16} \times 37.8 \approx 20 \text{ 公斤力-米}; \end{aligned}$$

为在扭矩和扭角曲线上求 M_K 、 θ 和 $dM/d\theta$ 值，在绘图仪上放方格纸（因上述扭角计只能测量微量变形），试验机测力度盘对零后，把角度盘上的刻度调整为零。

二、试验方法

1. 剪切弹性模量G的测定及计算公式

将画好标距的试样装在试验机上, 加以初扭矩 (钢的 τ_0 为3公斤力/毫米², 其它金属为预期 τ_p 的10%), 然后装上扭角计。

施加等级扭矩, 使剪应力不大于 τ_p 之值 (施加扭矩不少于6次), 记录相应的扭角读数。剪切弹性模量G按下式计算:

$$G = ML_0 / \varphi J_p \text{ (公斤力/毫米}^2\text{)}$$

式中:

M——扭矩(减去初扭矩), 公斤力-毫米;

φ ——试样扭转角度(取直线部分), 弧度;

L_0 ——试样标距长度, 毫米;

J_p ——试样极惯性矩, 毫米⁴ (圆试样 $J_p = \pi d^4 / 32$)。

2. 比例极限 τ_p 的测定

在测G的基础上继续逐级施加等级扭矩, 直至平均扭角增加率达到或超过1.5倍时, 试验暂停。计算扭角未产生与直线偏离部分的平均值, 将此值增加50%, 与此相对应的扭矩即为 M_p 值。 τ_p 按下式计算:

$$\tau_p = M_p / W, \text{ 公斤力/毫米}^2;$$

式中:

M_p ——扭矩, 公斤力-毫米;

W——试样断面系数, 毫米³ (圆试样 $W = \frac{\pi d^3}{16}$)。

3. 屈服强度 $\tau_{0.3}$ 的测定

在测得 M_p 的基础上, 继续施加等级扭矩, 直到残余剪应变 γ 超出0.3%为止。根据所得到的扭矩M及扭角 φ , 计算 M_p 以及 M_p 以后各级扭矩相对应的剪应变 γ ($\gamma = \frac{\varphi d}{2L_0} \times 100\%$)。

将 γ_p 加0.3%即为 $\tau_{0.3}$ 的总剪应变。根据此值, 从测得的M及 φ (或 γ) 记录中查算 $M_{0.3}$ 。

$$\tau_{0.3} = M_{0.3} / W, \text{ 公斤力/毫米}^2 \text{ (} M_{0.3}$$

——扭矩, 公斤力-毫米)。

4. 真实扭转强度极限 t_k 的测定

在测得 $M_{0.3}$ 的基础上, 继续施加扭矩, 直至试样断裂。取试样断裂前曲线上数点 φ 之值, 算出单位扭角 θ ($\theta = \varphi / L_0$, 单位为弧度/毫米)。根据各 $\Delta\theta$ 及与其对应的各扭矩 ΔM 之值, 作 $\Delta M - \Delta\theta$ 曲线, 用图解法求出曲线上相当于最大扭矩处的 $dM/d\theta$ 值, 即该点切线与横坐标轴夹角的正切值(图3)。

$$t_k = \frac{4}{\pi d^3} \left(3M_k + \theta \frac{dM}{d\theta} \right), \text{ 公斤力/}$$

毫米², (式中 M_k 为试样断裂前之最大扭矩, θ 为试样断裂时的单位扭角)。

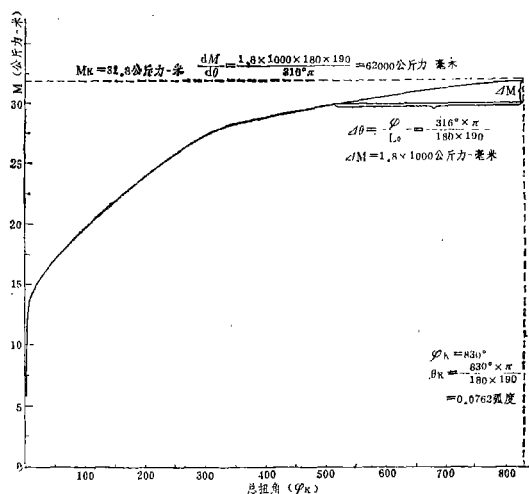


图3 扭转曲线

5. 扭转强度极限 τ_b 的测定

在试样上加扭矩直至破断, 记下扭矩 M_b 及标距的扭转角度。

$\tau_b = M_b / W$, 公斤力/毫米² (M_b 为试样断裂前的最大扭矩)。

τ_p 、 $\tau_{0.3}$ 、 τ_b 及 t_k 的计算结果均精确到0.5公斤力/毫米²。

计算G值时, 若 ≥ 50 时进为100, < 50 时舍去。

三、试验结果及计算

根据试验结果 (见表2) 计算下列扭转性能

1. 剪切弹性模量G

因 $G = ML_0 / \varphi J_p = 32 ML_0 / \varphi \pi d^4$, 选 $M =$

$M_1 - M_0 = 7000 - 1600 = 5400$ (公斤力-毫米), $\varphi = 2.2^\circ = 2.2^\circ \times \pi / 180^\circ = 0.0383$ (弧度), $J_p = 3558$ (毫米⁴), $L_0 = 190$ (毫米)

所以 $G = 5400 \times 190 / 0.0383 \times 3558 = 7600$ 公斤力/毫米²。

2. 比例极限 τ_p

因 $\tau_p = M_p / W = 16M_p / \pi d^3$, φ 由 $M = 11200$ 公斤力-毫米以前求得之平均扭转角,

$$\varphi = \frac{3.6^\circ}{(11200 - 1600) / 600} = 0.225^\circ \text{ (扭矩每增}$$

加600公斤力-毫米时之扭角), M 之扭角 $= 1.5$

$\varphi = 1.5 \times 0.225^\circ = 0.3375^\circ$, 用内插法计算,

$M_p = 11200 + 600 \times 0.1125^\circ / 0.375^\circ = 11380$ 公斤力-毫米, $W = 516$ 毫米³。

所以 $\tau_p = 11380 / 516 = 22.1$ 公斤力/毫米²。

3. 屈服强度 $\tau_{0.3}$

$$\text{因 } \tau_{0.3} = \frac{M_{0.3}}{W} = \frac{16M_{0.3}}{\pi d^3}, W = 516.$$

$$\gamma = \frac{\varphi d}{2L_0}, \text{ 此处 } \gamma = 0.003, \varphi = \frac{2L_0 \gamma}{d}$$

$$= \frac{2 \times 190 \times 0.003}{13.8} = \frac{1.14}{13.8} = 0.0826 \text{ (弧度)}$$

(或 $\varphi = 4.73^\circ$), $M_{0.3}$ 的 $\varphi_{0.3} = \varphi_{\tau_p} + \varphi =$

$3.6^\circ + 0.3375^\circ + 4.73^\circ = 8.6675^\circ$, 用内插法计算,

$M_{0.3} = 13600 + \frac{600 \times 3.1675}{3.3} = 13600$

$+ 576 = 14176$ 公斤力-毫米, 所以 $\tau_{0.3}$

$$= \frac{14176}{516} = 27.5 \text{ 公斤力/毫米}^2.$$

4. 用图解法求真实扭转强度极限 t_k

$$t_k = \frac{4}{\pi d^3} (3M_k + \theta_k \frac{dM}{d\theta}), \text{ 已知 } M_k$$

$$= 31800 \text{ 公斤力-毫米}, \theta_k = \frac{\varphi_k}{L_0} = \frac{830^\circ \times \pi}{180^\circ \times 190}$$

$$= 0.0762 \text{ (弧度)}, \text{ 由图解法得 } \frac{dM}{d\theta}$$

$$= \frac{1800 \times 180^\circ \times 190}{316^\circ \times 3.14} = 62000 \text{ 公斤力-毫米}, \text{ 所}$$

$$\text{以 } t_k = \frac{4}{3.14 \times 13.8^3} (3 \times 31800$$

$$+ 0.0762 \times 62000) = 48.5 \text{ 公斤力/毫米}^2.$$

扭转强度极限 τ_b 的计算

$$\text{因 } \tau_b = \frac{M_b}{W} = \frac{16M_b}{\pi d^3}, W = 516 \text{ 毫米}^3,$$

$$\text{所以 } \tau_b = \frac{31800}{516} = 61.6 \text{ 公斤力/毫米}^2.$$

注: 用第一节 $\Delta\varphi \approx \text{tg} \Delta\varphi = \frac{\Delta A}{K_b}$ 公式, 将千分表

格数计算成弧度或角度 (下表为角度), 以便计算结果时应用。

表 2 扭转试验记录表

扭 矩 M	扭转角度 φ	扭角增量 $\Delta\varphi$	扭 矩 M	扭转角度 φ	扭角增量 $\Delta\varphi$
1.6	0	0	14.2	8.8	3.3
5.8	1.8	0	14.8	25.0	16.2
6.4	2.0	0.2	15.0	42.0	17.0
7.0	2.2	0.2	16.0	—	—
7.6	2.4	0.2	17.0	57.0	15.0
8.2	2.6	0.2	18.0	63.5	6.5
8.8	2.8	0.2	19.0	75.0	11.5
9.4	3.0	0.2	20.0	90.0	15.0
10.0	3.2	0.2	21.0	118.0	28.0
10.6	3.4	0.2	22.0	163.0	45.0
11.2	3.6	0.2	24.0	224.0	61.0
11.8	4.2	0.6	26.0	—	—
12.4	4.6	0.4	28.0	320.0	96.0
13.0	5.0	0.4	30.0	514.0	194.0
13.6	5.5	0.5			

× × × ×

(上接第 7 页)

三、结 论

1. Al-Cu 系铸造合金基体的热稳定性 (指在 300°C 下长期工作) 与介稳相 θ' 的稳定性有关, θ' 相愈细密, 愈稳定, 合金的热强性愈高。

2. 合金中加入 Mn 和 Zr 可提高 θ' 相的稳定性及形成弥散相强化基体, 从而提高合金的热强性。

3. RE 对 θ' 相稳定性的影响不大, 但 RE 与合金中的 Al、Cu 等形成金属间化合物, 使晶界强化, 明显地改善了合金的高温性能。

4. Zn 降低 θ' 相的稳定性。Zn 对合金高温性能的有利作用, 可能与 Zn 进入金属间化合物, 进一步强化晶界有关。