

拉伸试验的夹持原理

李健康

(沙洲职业工学院, 江苏 张家港 215600)

摘要: 针对常见的延性金属拉伸实验的柱面试样, 通过进行拉伸试样的受力和失效形式分析, 导出拉伸试验时试样夹持段和夹具必须满足的基本条件, 并结合实际试样的两种典型的拉伸试验, 材料屈服强度试验和极限强度试验, 给出了初始预紧压力、系统摩擦特性参数和试样的几何尺寸、材料性能参数之间必须满足的制约关系。目的是建立夹持原理的确定性分析模型, 为试验标准制定、试验设备和试样的设计、试验操作提供依据。同时, 为随机分析做前期准备。

关键词: 拉伸试验; 柱面拉伸试样; 夹持原理; 确定性分析

中图分类号: O346 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-8429(2008)01-0001-07

The Gripping Principle in the Static Tension Test

LI Jian-kang

(Shazhou Professional Institute of Technology, Zhangjiagang 215600, China)

Abstract: Against the cylindrical or prismatic sample in the static tension test for ductile metal and with the force analyses and the failure analyses on the sample for tension, the paper concludes the essential condition the gripping section of the sample and the jig are to meet with in the static tension test. Based on the two typical static tension for the real samples--the yielding strength test and the limit strength test of materials, the paper summarizes the controlling relationship to be meet with between the initial pre-pressure, the parameters of friction system and the sizes of the sample, the property of the material. The purpose of the paper is to set up a deterministic model analyses with the gripping principle, which will lay the theoretical foundation for establishing the test standard, designing the test equipment and the sample and operating the test, meanwhile make the first-phase preparations for the random analyses.

Key words: tension test; sample for cylindrical or prismatic tension; Gripping principle; deterministic analysis

0 引言

拉伸试验是质量检验和材料性能测试研究中应用最为广泛的试验形式。拉伸试验的加力和试验过程是简单和方便的, 但拉伸试样夹持段的受力和试验所涉及的因素却是很复杂的。对于材料的极限应力试验和等截面杆件的极限拉力测试, 不仅需要进行极限状态下的受力分析, 还需要考虑夹持过程中随机因素影响。

夹持原理是试验标准的制定、试验设备的设计和试样的设计、试验操作的基本依据。也是进行夹具设计和试验分析的基础。拉伸试验夹持的有效性涉及试验机的结构构造和试样的形状、材质, 测试

目的等诸多方面。而夹持问题的研究, 需要从试验机的机械结构和被测试样的材料力学两方面统一加以考虑。这是目前尚缺乏的工作, 是各种试验标准和实验指导书都没有涉及的内容。

本文首先针对常见的延性金属拉伸实验的柱面试样, 通过进行拉伸试样的受力和失效形式分析, 导出拉伸试验时试样夹持段和夹具必须满足的基本条件, 并结合实际试样的两种典型的拉伸试验, 材料屈服强度试验和极限强度试验, 给出几何尺寸、材料性能参数之间必须满足的制约了初始预紧压力、系统摩擦特性参数和试样的关系。目的是建立夹持原理的确定性分析模型, 为试验标准制

收稿日期: 2008-01-10

作者简介: 李健康 (1956-), 男, 沙洲职业工学院动力工程系教授, 博士。

定、试验设备和试样的设计、试验操作提供依据。同时，为复杂的随机分析做前期准备。

1 拉伸夹持的受力分析

1.1 分析模型

假定试样材料是均匀连续的，对夹持段不考虑材料的强化效应，以屈服极限确定最大承载能力。几何与尺寸是准确确定的，不考虑由尺寸误差带来的影响。夹具的强度是足够的，分析中只考虑夹具的几何参数对受力的影响，不考虑夹具材料强度不足可能产生的破坏。此外，摩擦特性分析是以静态摩擦为基础的。

1.2 拉伸试样的描述

常见的拉伸试样从形状分，一类是圆柱形（如图 1 a）、c）；另一类是板试样（如图 1 b）、d））。其中 a）、b）为材料拉伸试验的标准试样形状。线材或型材质量检验用的是等截面形状的圆柱或棱柱试样（图 c）、d））。从夹持力施加的方式分，一类是柱面夹持试样（如图 1），另一类是楔面夹持试样（如图 2）。柱面夹持试样是试样靠垂直于柱面上的压力所产生的摩擦力来夹持拉伸试样。其中圆柱试样的夹持力是作用在环面上的，而板试样的夹持力是作用在接触平面上的。而楔面夹持试样是靠作用在楔面上的支持力来夹持拉伸试样。本文先研究柱面夹持试样。

1.3 拉伸夹持的受力分析

考虑到在现行试验机上夹持柱面夹持试样采用的是楔型液压机构（图 3），两夹具之间在理论上是平行的。因此，可以假定夹持机构施加的力沿试件的轴线方向是均匀分布的。

夹持提供的摩擦力与拉力平衡（图 4），而摩擦力需小于临界摩擦力，有：

$$T = F_f < \mu_0 q S \quad (1)$$

式中： μ_0 —夹持块与试样之间的摩擦系数；

q —夹具施加的正压力；

S —夹持块与试样的接触面积。

对锥面或楔面（图 3）夹持块，拉力 T 与预紧压力 P_0 满足：

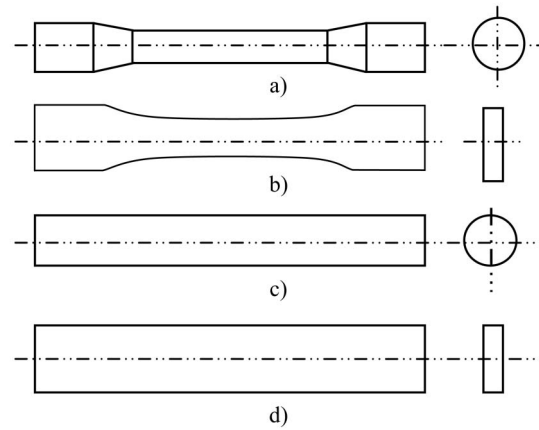


图 1 柱面夹持的拉伸试样

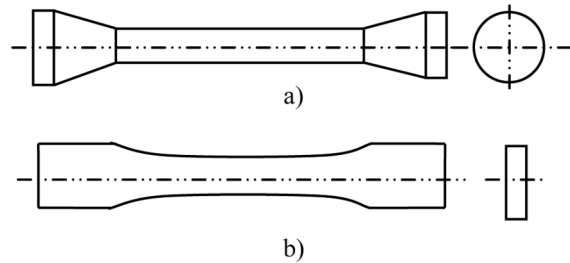


图 2 楔面夹持拉伸试样

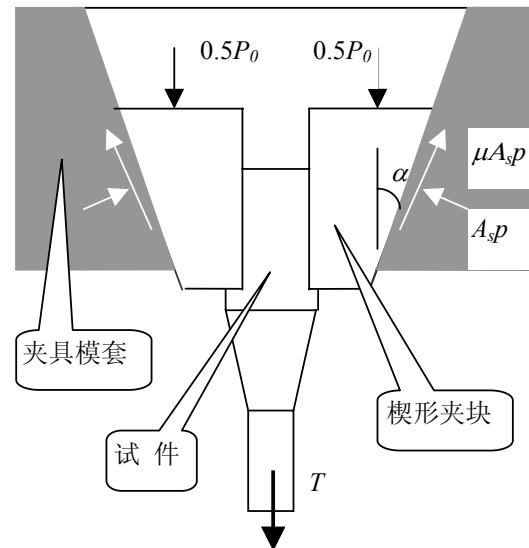


图 3 柱面夹持示意图

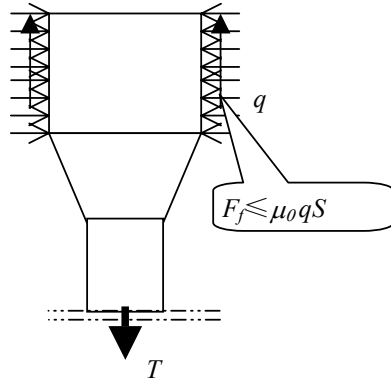


图4 试样的夹持力

$$\begin{cases} T + P_0 = pA_s(\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \\ qS = pA_s(\cos \alpha - \mu \sin \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

式中： T —夹持拉力； μ —夹持块与夹具套之间的摩擦系数； p —夹具套施加于夹持块的分布压力； A_s —夹具套与夹持块之间的接触面积； α —锥面夹持的半锥角。

由上可得初始预紧压力 P_0 引起的初始夹持压力 p_0 和 q_0 ：

$$\begin{cases} p_0 = \frac{P_0}{A_s(\mu \cos \alpha + \sin \alpha)} \\ q_0 = \frac{(\cos \alpha - \mu \sin \alpha)P_0}{(\mu \cos \alpha + \sin \alpha)S} = \operatorname{ctg}(\varphi_m + \alpha) \frac{P_0}{S} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\varphi_m = \arctg \mu$ 是夹持块与夹具套之间的摩擦角。要保证不使试样被夹坏， P_0 应满足：

$$P_0 < S\sigma_s \operatorname{tg}(\varphi_m + \alpha) \quad (4)$$

式中： σ_s 是试样材料的屈服极限。

1.4 轴力分布

试样的轴力分布如（图5）下：

$$N(x) = \begin{cases} \int_{s(x)} \mu_0 q(x) dS(x), & 0 \leq x \leq l_0 \\ N, & l_0 < x \leq l_0 + l_1 \end{cases} \quad (5)$$

1.5 不同实验要求夹持段必须满足的力学条件

对塑性材料，测试屈服极限时要求：

$$T \geq T_s = A_l \sigma_s \quad (6)$$

此处 A_l —试样测试部分横截面的面积。测试强度极限时要求：

$$T \geq T_b = A_l \sigma_b \quad (7)$$

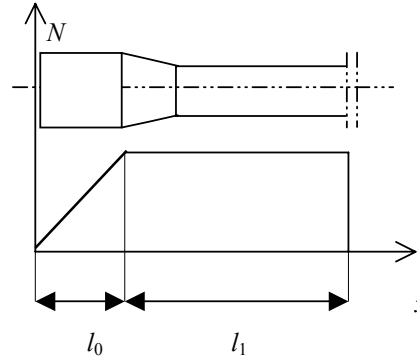


图5 柱面夹持下试样的轴力图

2 拉伸试样的临界分析

2.1 最大拉力

2.1.1 夹持处的失效类型及判定准则

夹持处的失效形式有两种：一是试样从夹具中拔出，另一种是夹持处的材料达到塑性屈服。

考虑拔出失效，此时摩擦力具有的特征是达到最大值。考虑到拉力与摩擦力的平衡，注意到夹持力的均匀分布假定，夹持力应满足式（1）。

考虑塑性屈服失效，按照第三强度理论试样在夹持处的材料最大剪应力将满足：

$$\tau = \tau_s \text{ 或 } \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s \quad (8)$$

2.1.2 由摩擦确定的最大拉力

考虑试样不被拔出，由式（1）和式（2），有：

$$\frac{T}{P_0} < \frac{1}{\frac{\operatorname{tg}(\varphi_m + \alpha)}{\mu_0} - 1} \quad (9)$$

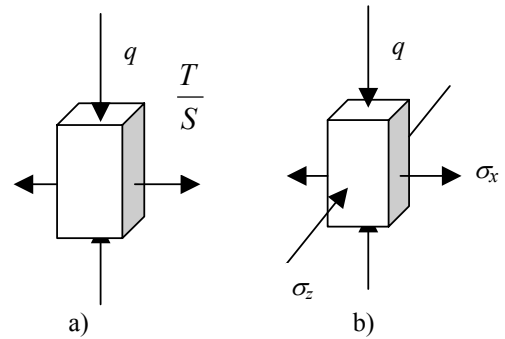


图6 柱面夹持夹持段表面与内部的应力状态

2.1.3 试样夹持段的表面所能承受的拉力

从试样夹持部分接触表面任一点的应力状态 (图 6a)) 考虑, 将应力状态的数值代入式 (8), 可得:

$$\frac{T}{S} + q < \sigma_s \quad (10)$$

上式结合式 (2), 有:

$$T < \frac{S\sigma_s \lg(\varphi_m + \alpha) - P_0}{1 + \lg(\varphi_m + \alpha)} \quad (11)$$

这是考虑试样表面不失效时, T 必须满足的条件。

2.1.4 试样内部所能承受的拉力

考虑试样夹持部分试样内部任一点应力状态 (图 6b)), 对圆柱面夹持, 因为夹持正压力并非与整个圆柱面周向都分布, 而是沿 y 方向相向夹紧 (图 7), 所以:

$$\sigma_y = -q, \sigma_z = 0, \sigma_x = \frac{N(x)}{A(x)} \quad (12)$$

式中 $A(x)$ 是 x 处的横截面积。失效时有

$$\sigma_x + q = \sigma_s \quad (13)$$

对板柱面夹持与圆柱面相同。有:

$$q = \sigma_s - \sigma_x = \sigma_s - \frac{T}{A_0} \quad (14)$$

上式结合式 (2), 考虑试样夹持部分试样内部任一点的应力状态, 不失效时 T 必须满足的条件为:

$$T < \frac{A_0 [S\sigma_s \lg(\varphi_m + \alpha) - P_0]}{A_0 + S\lg(\varphi_m + \alpha)} \quad (15)$$

式中 A_0 是试样夹持段的横截面的面积。由于通常 S 大于 A_0 , 所以式 (15) 确定的临界拉力较小。

2.2 初始预紧压力 P_0 应满足的条件:

令

$$\gamma = \frac{\mu_0}{\lg(\varphi_m + \alpha) - \mu_0} \quad (16)$$

γ 是一个表征系统摩擦特性的参数。当 $\gamma > 0$ 时, 对屈服强度试验而言, 由上式及式 (6)、式 (9) 可得:

$$P_0 > \frac{\sigma_s}{\gamma} A_1 \quad (17)$$

将式 (6) 代入式 (11) 得:

$$P_0 < \{S\lg(\varphi_m + \alpha) - A_1[1 + \lg(\varphi_m + \alpha)]\}\sigma_s \quad (18)$$

代入式 (15) 得:

$$P_0 < \left[\left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) S\lg(\varphi_m + \alpha) - A_1 \right] \sigma_s \quad (19)$$

对强度极限试验而言, 由式 (16) 及式 (7)、式 (9) 可得:

$$P_0 > \frac{\sigma_b}{\gamma} A_1 \quad (20)$$

将式 (7) 代入式 (11) 得:

$$P_0 < \left\{ S\lg(\varphi_m + \alpha) - \frac{\sigma_b}{\sigma_s} A_1 [1 + \lg(\varphi_m + \alpha)] \right\} \sigma_s \quad (21)$$

代入式 (15) 得:

$$P_0 < \left[\left(1 - \frac{A_1}{A_0} \frac{\sigma_b}{\sigma_s}\right) S\lg(\varphi_m + \alpha) - A_1 \frac{\sigma_b}{\sigma_s} \right] \sigma_s \quad (22)$$

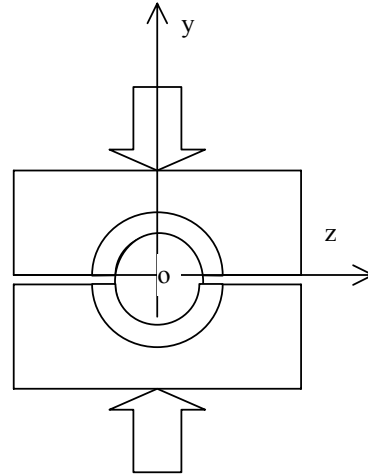


图 7 柱面夹持夹持段端面情况

2.3 屈服强度试验中摩擦特性、试样材料与几何参数之间的制约关系

考察式 (16)、式 (17), 当 $\gamma > 0$ 时, 式 (17) 要由设备满足的条件。由式 (17)、式 (18) 可得:

$$\{Stg(\varphi_m + \alpha) - A_1[1 + tg(\varphi_m + \alpha)]\}\sigma_s > \frac{\sigma_s}{\gamma} A_1,$$

即：

$$S > (1 + \frac{1}{\mu_0}) A_1 \quad (23)$$

同理，由式 (17)、式 (19) 可得：

$$\frac{1}{\mu_0 S} + \frac{1}{A_0} < \frac{1}{A_1} \quad (24)$$

若将式 (23) 取 $S = (1 + \frac{1}{\mu_0}) A_1$ 代入式 (24)，则

有：

$$A_0 > (1 + \frac{1}{\mu_0}) A_1 \quad (25)$$

以上是当 $\gamma > 0$ 时，对夹持段几何尺寸的要求。需要说明的是式 (23)、式 (24)、式 (25) 是当 $\gamma > 0$ 时保证屈服强度试验能够进行的必要条件，但还不是充分条件。

当 $\gamma < 0$ 时，式 (17) 自然成立，考虑到 $P_0 \geq 0$ ，由式 (18) 可得：

$$S > [1 + ctg(\varphi_m + \alpha)] A_1 \quad (26)$$

由式 (19) 可得：

$$S > \frac{A_0 A_1}{A_0 - A_1} ctg(\varphi_m + \alpha) \quad (27)$$

将式若取 $S = [1 + ctg(\varphi_m + \alpha)] A_1$ 代入式 (27)，

则有：

$$A_0 > [1 + ctg(\varphi_m + \alpha)] A_1 \quad (28)$$

以上是当 $\gamma < 0$ 时，对夹持段几何尺寸的要求。需要说明的是式 (28)、式 (27)、式 (26) 是当 $\gamma < 0$ 时保证屈服强度试验能够进行的必要条件，并且也是充分条件。

2.4 强度极限试验中摩擦特性、试样材料与几何参数之间的制约关系

对强度极限试验，当 $\gamma > 0$ 时，由式 (20)、式 (21) 可得：

$$\frac{S}{A_1} > (\frac{1}{\mu_0} + 1) \frac{\sigma_b}{\sigma_s} \quad (29)$$

而由式 (22) 得：

$$\frac{1}{\mu_0 S} + \frac{1}{A_0} < \frac{\sigma_s}{\sigma_b} \frac{1}{A_1} \quad (30)$$

考虑式 (30) 并取 $S = (\frac{1}{\mu_0} + 1) \frac{\sigma_b}{\sigma_s} A_1$ ，则有：

$$\frac{A_0}{A_1} > (1 + \frac{1}{\mu_0}) \frac{\sigma_b}{\sigma_s} \quad (31)$$

以上是当 $\gamma > 0$ 时，对夹持段几何尺寸的要求。需要说明的是式 (31)、式 (30)、式 (29) 是当 $\gamma > 0$ 时保证强度极限测试能够进行的必要条件，但还不是充分条件。

当 $\gamma < 0$ 时，同理，式 (20) 自然成立，考虑到 $P_0 \geq 0$ ，由式 (21) 可得：

$$\frac{S}{A_1} > [1 + ctg(\varphi_m + \alpha)] \frac{\sigma_b}{\sigma_s} \quad (32)$$

由式 (24) 可得：

$$\frac{ctg(\varphi_m + \alpha)}{S} + \frac{1}{A_0} < \frac{1}{A_1} \frac{\sigma_b}{\sigma_s} \quad (33)$$

将式若取 $\frac{S}{A_1} = [1 + ctg(\varphi_m + \alpha)] \frac{\sigma_b}{\sigma_s}$ 代入式 (35)，

则有：

$$\frac{A_0}{A_1} > [1 + ctg(\varphi_m + \alpha)] \frac{\sigma_b}{\sigma_s} \quad (34)$$

以上是当 $\gamma < 0$ 时，对夹持段几何尺寸的要求。需要说明的是式 (34)、式 (33)、式 (32) 是当 $\gamma < 0$ 时保证强度极限测试能够进行的必要条件，并且也是充分条件。

2.5 系统摩擦特性

参数 $\gamma > 0$ 或 $\gamma < 0$ 决定了夹紧装置的特点：前者需要借助初始压力 P_0 才能保证试样不被拔出，对

屈服强度测试要求 $P_0 > \frac{\sigma_s}{\gamma} A_1$, 对极限强度测试

要求 $P_0 > \frac{\sigma_b}{\gamma} A_1$, 且 γ 越大, P_0 可取越小值。同时

需要考虑夹持段的表面和内部是否屈服失效问题。由式 (23)、式 (24)、式 (25) 及式 (29)、式 (30)、式 (31) 可知, 对接触面积 S 和夹持段的横截面积 A_0 都有要求。对相同的 A_1 , μ_0 越小, σ_b / σ_s 越大, 要求的 S 和 A_0 越大。

后者, 系统摩擦特性的参数 $\gamma < 0$, 机构可自我锁紧, 夹持不会发生试样的拔出失效。此时只需考虑试样夹持段的表面和内部是否屈服失效。由式 (26)、式 (27)、式 (28) 及式 (32)、式 (33)、式 (34) 可知, 对接触面积 S 和夹持段的横截面积 A_0 都有要求。对相同的 A_1 , $(\varphi_m + \alpha)$ 越小, σ_b / σ_s 越大, 要求的 S 和 A_0 越大。

2.6 临界分析小结

(1) 夹持系统按系统的摩擦特性参数 γ 分为两种: 一是外紧系统, 二是自紧系统。对外紧系统 $\gamma > 0$, $\lg(\varphi_m + \alpha) > \mu_0$; 对自紧系统 $\gamma < 0$,

$$\lg(\varphi_m + \alpha) < \mu_0。$$

(2) 外紧系统存在三种可能的失效: 拔出失效、表面失效和夹持内部屈服失效。自紧系统存在两种可能的失效: 表面失效和夹持内部屈服失效。

(3) 对外紧系统为保证试样不被拔出, P_0 是必须的。屈服强度测试要求式 (17), 极限强度测试要求式 (20)。但 P_0 过大会产生表面失效和夹持内部屈服失效: 若式 (18) 不满足, 则当屈服强度测试时会发生表面屈服; 若式 (19) 不满足, 则当屈服强度测试时会发生夹持段横截面屈服。同理, 若式 (21) 不满足, 则当强度极限测试时会发生表面屈服; 若式 (22) 不满足, 当强度极限测试时会发生夹持段横截面屈服。可见, 夹具初始预紧压力 P_0 的设置不可太小, 又不宜过大。太小了试样的初始预紧得不到保证, 过大易发生屈服失效。

实际操作时需根据试样的材料屈服极限和尺寸进行调整, 以不发生屈服失效为界。

(4) 对外紧系统试样的几何尺寸存在必须满足的条件: 式 (23)、式 (24)、式 (25), 和式 (29)、式 (30)、式 (31)。

(5) 自紧系统理论上无需初压, P_0 可以为零。但试样的几何尺寸依然存在必须满足的条件: 式 (26)、式 (27)、式 (28), 和式 (32)、式 (33)、式 (34)。

(6) 常见的失效类型

考察试验能够正常进行的力学条件, T 和 P_0 需要同时满足式 (1)、式 (4)、式 (6)、式 (7) 或式 (9) 以及式 (11)、式 (15)。如果这些条件中的一个或几个不满足将发生相应的失效。失效类型也可由这些关系式的满足情况进行分类。如: 仅由式 (1) 不满足, 其它均满足时发生的是弹性失效, 并且失效的形式是拔出。当式 (4) 不满足时, 发生的失效为初始夹持失效。式 (11)、式 (15) 不满足, 其它均满足时, 进行屈服强度测试和极限强度测试时将发生夹口处的失效。

(7) 试样材料与夹块之间的摩擦系数 μ_0

从式 (1) 看摩擦系数 μ_0 越大越好。

(8) 试样与夹块之间的接触面积 S

从保证夹持有效看接触面积 S 越大越好, 从减小试样尺寸看 S 越小越好。对于板试样不仅要考虑接触面积还要考虑试样的厚度。对于圆柱试样, 接触面积 S 的计算按投影面积计算。因为夹持正压力并未与圆柱面周向垂直。

(9) 夹块的几何参数 α 、摩擦与润滑参数 φ_m

由式 (9), 为了保证试样不致被拔出, 夹块的几何参数 α 、摩擦与润滑参数 φ_m 较小为好, 但从式 (4)、式 (11)、式 (15) 考虑几何参数 α 不宜过小, 过小会发生屈服失效, 还限制了夹具对试样直径或试样厚度的调整范围。对于一台试验机而言几何参数 α 是由厂家设计时确定的。 φ_m 与润滑状态有关, 设计时其值本身小。只要试验机日常保养正常、润滑良好就能保证试样不致被拔出。

3 经验、实验与验证

上面的理论分析结果中, 与试样和操作相关的内容可以从实验操作人员长期的经验中得到印证。也可以通过有目的的实验进行验证。经验是在进行

其它试验时,偶然发生的。实验进行验证则是为验证而特意安排的。

3.1 调整初试压力试验

现在许多试验机都带有夹持压力调整系统,可以进行 P_0 力的调整。通常操作时对做过的试样是凭经验设置,对新的试样一方面是用对比的方法,确定大致的调整范围,另一方面是用预备试件做预备试验进行摸索、调整。尽管有一套操作程序和方法,仍然不能避免时常在夹持力过小或过大时有试样拔出和被夹扁的情况发生。

验证试验,取做材料力学实验的普通低碳钢试件若干,调整 500KN 试验机的初试压力,最大时就会夹扁;最小时试验中会拔出。

3.2 改变夹持长度试验

试样的夹持长度,操作时是尽可能全部利用。做验证试验,发现若夹持力不够,会拔出;夹持力过大会夹扁。如果夹持长度过短,即使夹扁了也会拔出。

3.3 改变夹头摩擦特性试验

通常情况下进行拉伸试验时,只要夹紧力调整合适、夹持长度合适,夹头与试样之间一般不会发生打滑现象。但进行板的拉伸试验时,由于板比夹头宽,要求的夹持力较大,有时常发生板与夹块之间打滑现象,有时即使夹头压力已调整到最大也没有办法,但有时换一副新的夹块可能就解决了。因为,新夹块的摩擦系数大。做验证试验时,用新、旧夹块各一套,新的装在上夹头上,旧的在下面,可以看到加载时板与下夹块之间打滑的情况。

3.4 等粗试样拉伸试验

用板、钢筋、钢丝、铁丝、钢绞线加工成等粗的试样进行极限强度(拉断)试验。结果发现用板、

钢筋做的试样可以在普通夹具上进行极限强度试验,但偶尔有在夹口处断的情况。铁丝、钢丝、钢绞线在普通夹具上进行极限强度试验时都在夹口处断。铁丝经适当保护后也能在普通夹具上间或可以进行极限强度试验。钢丝、钢绞线则必须在专制的特长夹具上才能进行极限强度试验,但也不是个个成功。

试验结果一方面验证了理论分析结果:接触面积对夹持具有影响;另一方面,试验结果与理论分析结果产生了矛盾:由式(25)、式(28)、式(31)、式(34)表明,要使拉伸试验能够进行,夹持段的横截面面积 A_0 必须大于工作段的横截面面积 A_l 。而进行(哪怕个别的)的等粗试样是 A_0 等于 A_l 的。

4 结束语

以理想弹塑性材料为模型,分析了拉伸试验过程中初始夹持力、试样几何尺寸、试样与夹具摩擦特性等对夹持的影响,建立了影响试样夹持的各个因素之间的制约关系。针对屈服极限测试和强度极限测试,找到了保证试验能够正常进行的条件。

根据经验和实验对理论分析结果进行了印证和验证。结果表明理论分析的结论与实际检验是一致的。但对等粗试样拉伸试验,出现了超出理论分析结果的事实。表明本文的分析存在局限性。这种局限性是由模型的确定性假定引起的,不是逻辑错误,分析结果对于确定性因素控制现象仍然是有效的。等粗试样拉伸试验的问题涉及尺寸和材料性能的随机性分布问题,不能由确定性的材料模型得到解释,需要采用考虑材料的随机性模型进行分析。随机性分析工作也已完成,将另文给出。

参考文献:

- [1] 张德英,邢永晟,何德怀.重要用途钢丝绳国家标准起草说明[J].金属制品,2006,32(5):42-46.
- [2] 秦万信.钢丝绳标准存在的问题探讨[J].金属制品,2007,33(1):50-52.
- [3] 孙骥钊.西气东输管道工程焊接施工及验收规范的编制过程及主要内容[J].石油工程建设,2001,27(6):1-2.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局.金属材料室温拉伸试验方法[S](GB/T-228).北京:中国标准出版社,2002.