

金属薄板的压缩试验

陈 荣 锦

(国防科学技术大学)

提要 本文详细讨论了薄板压缩试验中三个难题的解决方法。目前已达到: 能够精确测试金属薄板的最小厚度为 0.085mm; 从自动描绘的应力应变 $\sigma-\epsilon$ 曲线(即载荷变形的关系曲线)上判读的弹性模量 E 和屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 的误差分别为 $\pm 2\%$ 和 $\pm 1\%$; 每测一片试件仅八分钟。基本解决了常温下测定薄板压缩性能存在的问题。

一、引 言

工程技术上大量采用受力蒙皮结构以来,对金属板材的各项性能需要深入了解,因而薄板压缩试验成为重要的试验项目之一。通常要求能够精确测得 E 、 $\sigma_{0.2}$ 并绘制 $\sigma-\epsilon$ 曲线等。薄板试件侧向自由而两端受压,容易失稳,其临界应力 σ_{cr} 远比 $\sigma_{0.2}$ 小。然而试验测得的 $\sigma-\epsilon$ 曲线,又要求曲线上的最大应力 σ_{max} 满足 $\sigma_{cr} \geq \sigma_{max} \geq \sigma_{0.2}$ 的条件,才能供工程实际使用。要使 $\sigma_{cr} \geq \sigma_{0.2}$, 试件必须像(图 1)那样进行适当的侧向约束,以避免过早失稳。为了试验的顺利进行,必须解决下列三个问题:

1. 设计一套合理的约束装置,使它既能防止试件失稳,又能尽量减小由于侧向约束的摩擦力影响而导致纵向抗压能力的增加。

2. 设计一套合理的载荷导向装置和试件几何形状,以保证试件头部不致提前压坏。

3. 选择或自制合适的仪器,以便精确测得标距内的变形。

解决这些问题,困难很多,我们调查了国内外的现有资料和现状,经过两年多的摸索,基本解决了上述的问题。

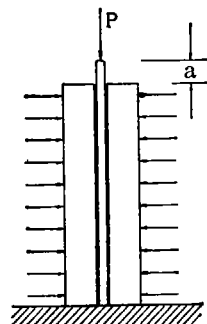


图 1 薄板压缩试验示意图

二、金属薄板压缩试验装置

1. 约束装置: 薄板压缩试验为防止失稳的约束装置型式很多,大致可分为二类,一类是低刚度夹紧,主要保证试验过程中摩擦力不变;另一类是高刚度夹紧,着重防止高应力时出现局部失稳。前者在应力接近于 $\sigma_{0.2}$ 时,极易引起试件局部失稳而使试验失败;而后者则易引起摩擦力的增加而影响试验精度。吸取两者的优点,我们设计了如图 2 所示的约束装置。它采用低刚度的弹性夹紧,高刚度的刚性限位,这样既保证了试验的精度,又

本文于 1979 年 7 月 17 日收到。

可很方便地控制摩擦力的大小。用一片薄板弹簧从侧向压紧试件,当试件纵向压缩而侧向膨胀时,板簧内力的微量增加,可以忽略不计。这就保证了夹紧力不变,即试件与夹板间的摩擦力保持为一定值。用两个限位螺钉来防止试件受压时突然失稳,因为螺钉受压的刚度远远大于板簧的弯曲刚度。这种板簧和限位螺钉结合使用的装置,可使应力小于 $\sigma_{0.2}$ 时,基本上由板簧起夹紧作用,即摩擦力保持不变;而在接近 $\sigma_{0.2}$ 容易失稳时,限位螺钉起主要作用,使侧向变形很难突然增大,避免了局部失稳。这时摩擦力虽然略有增加,但对 $\sigma-\epsilon$ 曲线并没有明显的影响,所以对 $\sigma_{0.2}$ 数值的影响是可以略而不计的。

使摩擦力成为一个定值后,能提高试验精度,简化数据处理;但它还是给试验带来不便,应尽可能使之减小。采用细石墨粉调以仪表油作为润滑剂,可以大大减小摩擦力。

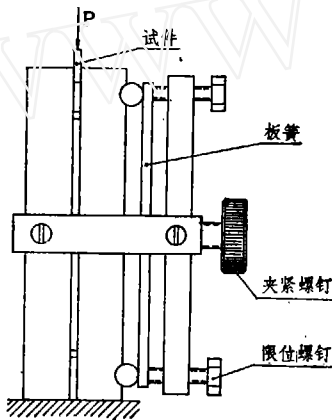


图2 约束装置示意图

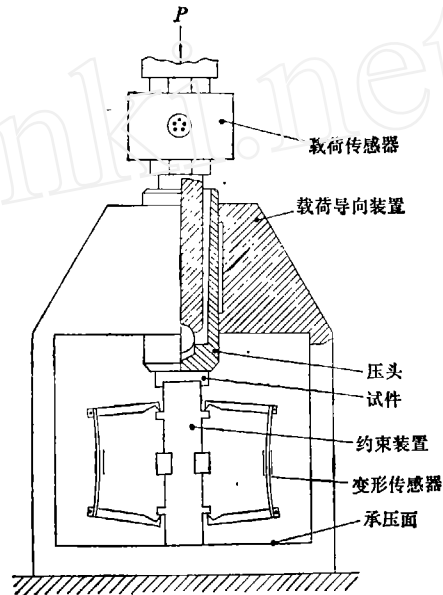


图3 薄板压缩试验装置示意图

2. 载荷导向装置: 一般试验机的横梁和压头,在试验过程中都作不同程度的多自由度运动,造成试件偏心受压,致使头部(如图1中a段)局部失稳而压坏。为此,必须设计一套载荷导向装置,使压在试件头部的压头只允许一个自由度运动。对于ZDM-5000/91型螺杆式万能试验机,根据其特点,载荷导向装置的压头可允许两个自由度运动,即允许上下运动和绕运动的轴线转动。因为试验机的杠杆系统限制了转动的可能性,所以导向装置实际上只作一个自由度运动,这就简化了导向装置并提高其精度。装置的压头与框架间的配合(图3),不宜过紧或过松。过紧则摩擦力引起了载荷旁路,使试件实受载荷变小;过松造成压头端面作多自由度运动,致使试件偏心受压。压头端面要求与框架的承压面平行,否则也将引起试件偏心受压。

3. 试件设计: 采用上述两个装置后,对一般薄板就可以顺利进行试验,但对厚度小于0.5mm的薄板,尤其是厚度小于0.25mm的薄板,困难更大。薄板压缩试验必须满足下式

$$a \geq (\sigma_{0.2}/E + 0.002)L + b$$

式中 L 为试件总长度; b 为必要的间隙;以免压头碰到约束装置。但从防止试件头部局部失稳这个条件来看, a 受板厚 t 的限制,可用下式表示

$$a = nt$$

式中 n 值的大小, 与试验装置有关, 一般取 $n \leq 3$, 因为头部弯曲刚度不大, 如 n 值取得过大, 就容易失稳。要满足上述两个条件, 这就决定了一个试验装置可能测试的最薄尺寸。以 $\sigma_{0.2} = 53 \text{ kg/mm}^2$ 的 65 Mn 钢来说, 用一般形状的试件在本室的约束装置上试验, 只能压试厚度大于 0.12 mm 的薄板。如欲测试更薄的, 可改用短试件, 但效果不明显, 而且会增加测量变形等的困难。改进试件的设计(如图 4a), 可使头部的弯曲刚度约为标距段的 1.5 倍。这样一般厚度的试件, 可以顺利地进行试验。对于厚度小于 0.5 mm 的薄板, 可把头部弯成(图 4b)所示的形状, 则弯曲刚度可提高几倍乃至几十倍, 从而避免了局部失稳。由于这一改进, 试验时可取 $n = 6$, 对 $\sigma_{0.2} = 53 \text{ kg/mm}^2$ 的 65 Mn 钢, 我们已顺利地绘得了厚度为 0.085 mm 的薄板的 σ - ε 曲线。

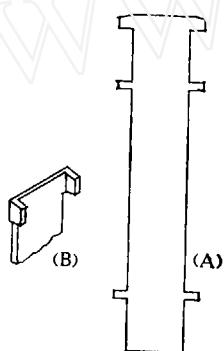


图 4 薄板压缩试件示意图

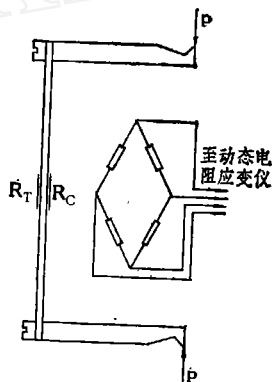


图 5 变形传感器工作原理图

4. 变形传感器的选择: 薄板压缩试验时, 试件几乎全部被夹住, 增加了变形测量的困难。我们自制的电阻式弓形变形传感器(图 5), 它的灵敏度和精度都高, 稳定性好, 而且使用方便。和动态电阻应变仪、函数记录仪配合使用时, 变形放大倍数可高达几千倍, 特别适用于薄板试验, 其测量结果与操作人员的技术水平无关。

这套薄板压缩试验装置, 已用于十一种牌号的钢、铝、钛等合金试件二百多片的试验, 使用性能良好。所测试的板厚在 0.085 mm 至 2.58 mm 范围内; 测一片试件只需八分钟, 仅为薄板拉伸试验的二倍, 具备了作为常规试验的基本条件。

三、试验结果分析

1. 关于摩擦力的处理: 分析试验结果时, 遇到的主要困难是摩擦力的处理问题。试验时试件相对于约束装置是处在连续不断地滑动的过程, 摩擦力是滑动摩擦力。假设摩擦力 Q_f 是均布于试件全表面上, 则试件各横截面所受的轴力可简化为(图 6)所示。试件上端实受载荷 P_n , 即传感器所受载荷 P_0 ; 下端实受载荷 $P_{nb} = P_0 - Q_f$ 。试件标距段距离两端大致相等, 则标距内各截面的平均实际载荷 P_n 可用下式算得

$$P_n = P_0 - Q_f/2$$

在计算标距内平均应力时应该用 P_n , 所以

$$\sigma = P_n/F_0 = (P_0 - Q_f/2)/F_0$$

上式的算法,即应力相对于不计摩擦力时的坐标零点上移了 $\sigma_f/2(\sigma_f = Q_f/F_0)$.

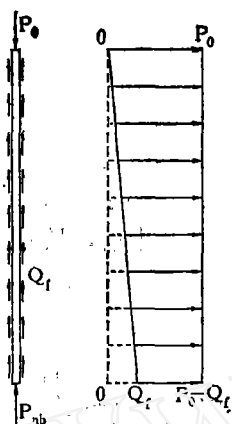


图6 试件各截面所受的轴力图

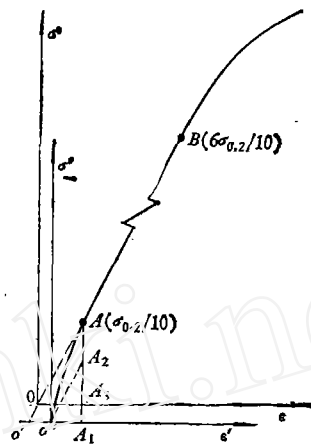


图7 应力应变曲线的摩擦力修正图

摩擦力的大小与夹紧力、试件表面状况、润滑剂、变形速度等有关,每一片试件都是不相同的。从约束装置的设计可知,当试件受力在弹性范围内,摩擦力 Q_f 是不随试件内应力的增大而改变(初始阶段除外),也就是约束装置分担的载荷是一个定值。当加载使摩擦力达到这个定值之后,再增加的载荷全部由试件的上端传到试件的下端。观察 σ - ϵ 曲线的初始非线性部分,可以看到有的应力突然上升而应变为零,有的应力上升很快而应变增长较慢,当应力达到一定水平(一般小于 $\sigma_{0.2}/10$) 时,就看不到摩擦力变化的影响了。这是通过摩擦力把压在试件头部的载荷的一部分传递给约束装置来分担的一个复杂过程,是符合约束装置的设计思想的。因为弹性阶段摩擦力为一固定值,所以计算弹性模量 E 时,可取超过 $\sigma_{0.2}/10$ 的两点来计算;设取二点应力为 $\sigma_{0.2}/10, 6\sigma_{0.2}/10$ (应使 $6\sigma_{0.2}/10 < \sigma_p$), 其对应应变为 ϵ_1, ϵ_2 , 则 E 为

$$E = \sigma_{0.2}/2(\epsilon_2 - \epsilon_1)$$

式中 $\sigma_{0.2}, \epsilon_1, \epsilon_2$ 均为图上直接读得的数据, $(\epsilon_2 - \epsilon_1)$ 已自动消去了摩擦力的影响。

σ_f 可以用作图法求得。如(图7),延 A, B 两点的连线交 ϵ' 轴于 O' , 过 A 作 ϵ' 轴的垂线 AA_1 , 作 $O'A_2$ 平行 AB 且交 AA_1 于 A_2 , 则 A_2A 即为 σ_f 。取 $A_1A_3 = AA_2/2$, 过 A_3 作 ϵ' 轴的平行线交 $O'A$ 于 O , 点 O 就是 σ - ϵ 曲线的真正原点。在求割线模量时,割线应从 O 点引出。

2. 试验结果及误差分析: 我们先后测试了铝合金试件 82 片, 合金钢 122 片, 钛合金 9 片。各组试验测得的 $E, \sigma_{0.2}$ 的平均值如表 1 所列。试验质量的评定, 一般从分析 $E, \sigma_{0.2}$ 的分散度就可得到肯定的结论。记某一试件的值为 $E_i, \sigma_{0.2i}$ 及同组试件(同一张板材)的平均值为 $E_m, \sigma_{0.2m}$, 则分散度 δ_i 可用下式表示

$$\delta_i = \frac{E_i - E_m}{E_m} \times 100\% \quad \left(\text{或} \quad \frac{\sigma_{0.2i} - \sigma_{0.2m}}{\sigma_{0.2m}} \times 100\% \right)$$

在某一分散范围内的试件数 n 占试件总数 A 的百分比记为

$$\chi = \frac{n}{A} \times 100\%$$

则 δ 、 χ 关系如表 2 所列。

表 1

材料 牌号	厚度 (mm)	$E(10^3 \text{ kg/mm}^2)$		$\sigma_{0.2}(\text{kg/mm}^2)$		材料 牌号	厚度 (mm)	$E(10^3 \text{ kg/mm}^2)$		$\sigma_{0.2}(\text{kg/mm}^2)$	
		纵向	横向	纵向	横向			纵向	横向	纵向	横向
LD10CS	1.5	7.5	7.5	44.0	43.5	LF6M	1.5	7.1	7.1	18.0	17.5
	0.6	7.5	7.4	44.5	44.0		0.8	7.3	7.2	18.5	18.5
	0.5	7.4	7.3	44.0	44.0	LY12CZ	0.8	6.9	7.0	31.5	31.0
1Cr21Ni 5Ti	2.6	20.0	22.0	67.5	74.0		0.5	7.4	7.4	34.0	34.6
	2.0	21.5	20.5	52.5	51.5	LC9CS	1.2	6.8	6.6	51.5	50.5
	1.5	21.0	20.5	56.0	54.5		0.5	6.8	6.9	51.0	51.0
	1.0	20.5	22.5	56.5	69.0	LC4CS	1.2	6.9	6.9	50.0	52.0
	0.8	21.5	22.0	44.5	45.5		1.0	20.5	22.0	43.5	46.5
1Cr18Ni 9Ti	2.0	19.0	20.5	35.0	37.0	30CrMn SiA	0.8	21.0	23.5	54.5	46.0
	1.5	22.5	22.5	27.0	31.5		0.5	23.5	22.0	65.0	109.0
	1.0	20.5	21.5	31.0	32.0		0.213	19.5	20.5	57.0	91.5
	0.5	23.5	19.5	31.5	43.5		TC1	0.6	11.5	—	60.5
	0.183	19.5	19.5	29.5	28.5	65Mn	0.084	20.5	—	52.5	—

表 2

$\delta(\%)$	钢、钛合金		铝 合 金			
	压 缩		压 缩		拉 伸	
	$\chi_E(\%)$	$\chi_\sigma(\%)$	$\chi_E(\%)$	$\chi_\sigma(\%)$	$\chi_E(\%)$	$\chi_\sigma(\%)$
<1	54.3	48.4	72	78	83	70
1—1.9	34.9	31.5	21	19	13	25
2—2.9	9.3	8.9	7	3	4	5
3—3.9	0.8	8.1	0	0	0	0
4—4.9	0.7	3.1	0	0	0	0
≥ 5	0	0	0	0	0	0

从表 2 中看出钢、钛合金的分散度较大, 可能是试件取样不严, 掺杂了边料造成的。严格按照要求取样的铝合金, δ_E 、 δ_σ 在 2% 以下者占 95% 左右, 说明压缩试验的质量是好的。从(表 2) 还可看出拉伸试验和压缩试验的分散度一致。假设同一种材料其力学性能的均匀性是一致的, 那末就可以认为拉压试验的精度是一致的。

计算 E 、 $\sigma_{0.2}$ 值时, 有关因素相对误差的绝对值如(表 3) 所列。计算 E 、 σ 的公式如下:

$$E = PL_0 / F_0 \cdot \Delta L$$

$$\sigma = P/F_0$$

则 E 、 σ 的误差可用下式来计算

$$\delta_E = \sqrt{\delta_P^2 + \delta_D^2 + \delta_c^2 + \delta_L^2 + \delta_F^2 + \delta_{\Delta L}^2}$$

$$\delta_\sigma = \sqrt{\delta_P^2 + \delta_D^2 + \delta_c^2 + \delta_F^2}$$

根据(表 3)用上式进行计算,拉伸和压缩的相对误差均略大于 1%。误差因素越少,其正负号同的概率就越大,所以用本法计算可能偏小。若采用绝对值和法计算误差,应力的误差仍为 1% 左右;但弹性模量的误差超过 2%,有些保守。所以根据本试验情况取 $\delta_{\sigma T} = \delta_{\sigma C} = 1\%$, $\delta_{ET} = \delta_{EC} = 2\%$ 是适宜的,弹性模量 E 是比较稳定的值,其分散度主要决定于试验技术。而屈服强度 $\sigma_{0.2}$,受热处理和机械加工等的影响较大,且载荷和试件横截面积的测量技术简单,引起的误差较小,所以其分散度主要决定于材料的均匀性。根据(表 2)铝合金拉压分散度对比来看,说明确定 $\delta_\sigma = 1\%$, $\delta_E = 2\%$ 是符合实际的。

表 3

误差因素	标距 L_0	面积 F_0	变形 ΔL	载 荷 P	摩擦力 Q	载荷偏心
压缩试验	$\delta_L < 0.1\%$	$\delta_F < 0.5\%$	$\delta_{\Delta L} < 0.5\%$	$\delta_P < 0.5\%$	$\delta_Q < 0.5\%$	$\delta_e < 0.5\%$
拉伸试验	$\delta_L < 0.1\%$	$\delta_F < 0.5\%$	$\delta_{\Delta L} < 0.5\%$	$\delta_P < 1.0\%$	—	—

3. 材料的力学性能对比: 根据退火和时效处理的铝合金的试验结果,可看出纵向(沿轧制方向)和横向(沿宽度方向)材料的压缩力学性能基本是一致的, E 相差最大不超过 3.5%, $\sigma_{0.2}$ 最大不超过 4.7%。而未作退火或时效处理的合金钢, E 相差最大达到 12%; 而 $\sigma_{0.2}$ 甚至相差 60% 以上。从这里可以看出热处理、机械加工等对 E 、 $\sigma_{0.2}$ 的影响是不能忽视的。

拉伸和压缩的力学性能对比,必须是用同批号最好是同一张板材作的试件来进行试验,否则在有限的试验中可能得不到正确的结论,甚至会得出相反的结论。(表 4)为同批号材料的拉伸和压缩的性能数据。(图 8)为有代表性的厚度为 0.5mm 的铝合金 LC9CS 纵横材料的拉压 σ - ϵ 曲线对比。过去认为拉伸和压缩时材料的力学性能差不多;或认为纵向材料的压缩力学性能和横向材料的拉伸性能相同。从(表 4)和(图 8)可以看出这两种看法是值得商榷。拉伸和压缩的力学性能是与材料的热处理条件、加工情况、厚度、受

表 4

材 料 牌 号	厚度 (mm)	$E(\text{kg/mm}^2)$						$\sigma_{0.2}(\text{kg/mm}^2)$					
		纵 向 板			横 向 板			纵 向 板			横 向 板		
		E_C	E_T	E_C/E_T	E_C	E_T	E_C/E_T	$\sigma_{0.2C}$	$\sigma_{0.2T}$	$\sigma_{0.2C}/\sigma_{0.2T}$	$\sigma_{0.2C}$	$\sigma_{0.2T}$	$\sigma_{0.2C}/\sigma_{0.2T}$
LF6M	1.5	7105	7013	1.013	7104	7073	1.004	17.87	16.88	1.059	17.64	17.12	1.030
LF6M	0.8	7255	6844	1.060	7234	6933	1.043	18.30	16.47	1.111	18.30	16.65	1.099
LY12CZ	0.8	6917	6614	1.046	6978	6855	1.018	31.35	31.47	0.994	30.99	30.75	1.008
LY12CZ	0.5	7373	7043	1.047	7392	7131	1.037	34.12	33.15	1.029	34.34	32.53	1.056
LC9CS	0.5	6798	6979	0.975	6871	6840	1.005	51.13	48.15	1.062	51.23	46.27	1.107

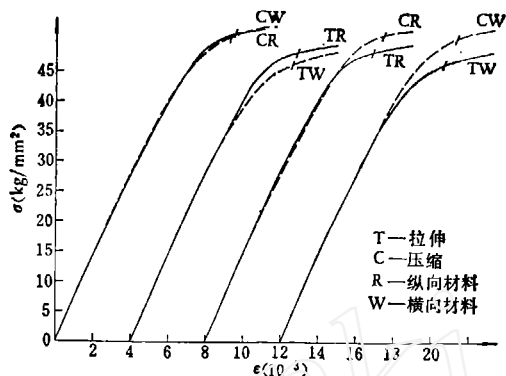


图 8 0.5mm 厚铝合金 L C9CS 薄板拉伸和压缩的 σ - ϵ 曲线

载历史等的差异而有所不同的,不能简单地用某一个固定的说法去概括它。若要真正了解它,必须依靠精确的试验,进行深入的研究。

本试验装置也适用于非金属材料的薄板压缩试验,曾与兄弟单位专门测试玻璃钢的试验法(仿造国外的)进行玻璃钢薄板压缩对比试验。材料和工艺条件等相同,试件由兄弟单位提供,分别测厚度为 1mm 和 2mm 的各 5 片。仿造法测 E 的最大分散度为 14.7%,两种厚度的 E 相差 22.3%;均因局部失稳而未测出真实的强度极限 σ_b 。本法测 E 的最大分散度为 6.2%,两种厚度的 E 相差 2.5%;厚度为 1mm 的试件因局部失稳未测出 σ_b ,厚度为 2mm 的测出了 σ_b 。根据这情况,可以认为本法也适用于测厚度大于 2mm 的玻璃钢板材。

本试验研究得到周明鸿教授热情指导,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] American National Standard Z115—16 “Standard Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature” ASTM, Designation: E9-70 (Reapproved 1973) and E9-77.
- [2] American National Standard B1011—1973 “Standard Methods of Test for Young’s Modulus at Room Temperature” ASTM, Designation: E111-61 (Reapproved 1972).
- [3] Lueth, R. C. and Hale, T. E., “Compressive Strength of Cement Carbides-Failure Mechanics and Testing Methods” Materials Research and Standards, Am. Soc. Testing Mats. MTRSA, 10, 2(1970).
- [4] Ramberg, Walter, and Miller, James A., “Determination and Presentation of Compressive Stress-Strain Data for Thin Sheet Material”, Journal Aeronautical Sciences, JASCA, November (1946).
- [5] Miller, James A., “A Fixture for Compressive Tests of Thin Sheet Metal Between Lubricated Steel Guides” Nat. Advisory Committee for Aeronautics Technical Note No. 1022, NACNA, April (1946).
- [6] Aitchison, C. S. and Miller, J. A., “Tensile and Compressive Test of Some Sheets of Aluminum Alloy, 1025 Carbon Steel, and Chromium-Nickel Steel” NACA TN. 840.
- [7] Latour, Harry, and Wolford, Don S., “Single-Strip Compression Test for Sheet Materials”, Proceedings, Am. Soc. Testing Mats, ASTEA, 45(1945).
- [8] CMN225—55 金属板压缩试验载《金属材料标准试验方法汇集》,一机部六所(1958).

COMPRESSION TEST OF THE METALLIC THIN SHEET

Chen Rong-jin

Abstract

This paper presents the solution of three difficult problems in the compression test of thin metallic sheets at room temperature. The smallest thickness of tested sheet is 0.085 mm. The error of modulus of elasticity E and yield strength $\sigma_{0.2}$ read from the load-elongation ($P-\Delta L$) curve is $\pm 2\%$ and $\pm 1\%$ respectively.

www.cnki.net