

## 实验技术与实验方法

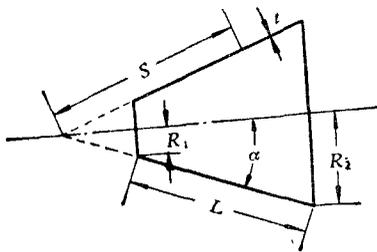
## 锥壳在全面外压下超临界状态的实验研究

樊世荣

**提要** 本文是锥壳外压实验研究初步总结。实验测出了上临界值而将壳体保持在完全弹性条件下；测出了载荷与最大挠度的关系曲线及失稳前、后和临界点对应的波形典型曲线而使壳体不发生过分变形；实现了单个壳体上的变参数变边界条件的重复实验。文中讨论了固支和简支的差别，提出了一个考虑边界条件的关于  $P/P_N \sim 1 - \eta$  关系的建议，对设计有参考意义。文中总结了超临界状态力和波形的变化，为理论研究提供了准备。

## 符 号

$\alpha$	圆锥壳半顶角	$\eta$	$R_1/R_2$
$t$	壁厚	$E$	杨氏模量
$R_1$	小端平行圆半径	$\mu$	波松比
$R_2$	大端平行圆半径	$W$	中面法向位移, 向内为正
$L$	斜长	$S$	母线方向坐标, 离顶点距离比全锥斜长
$P$	外压	$\varphi$	周线方向坐标, 圆周角
$\zeta$	波形中心位移与厚度之比 $W_{max}/t$	$N_s$	母线方向中面内力
$n$	周向波数	$\tau_s$	中面剪力
$m$	$W_{max}$ 对应点与底圆的无因次坐标 $S$ 之差	$M_s$	母线方向弯矩
$\nu$	$P_{H1-1}/P_{B1-1}$	$\psi$	$P_{B1-1c}/P_{B1-1g}$
		下标	
		$B$	相应于上临界值
		$H$	相应于下临界值
		$j - i$	相应于第 $j$ 级波第 $i$ 个波
		$b$	相应于塑性坍塌
		$N$	相应于两端简支当量圆筒, 即厚度、平均曲率半径、母线长度相同之圆筒。
		$a$	相应于简支边界壳
		$g$	相应于固支边界壳
		$c$	相应于理论计算值



示意图

## 一、实验技术

## (一) 实验设备

本实验采用控制壳体内腔体积变化的实验装置<sup>[6]</sup> (照片1)。采用了应变式圆板压力传感器, 及沿  $S$ 、 $\varphi$  运动, 可调倾角的  $W$  测量装置。

本文于1978年7月收到。

## (二) 试件边界条件技术及其它

1. 卷制试件和电铸铜试件(铝胎)。

2. 固支边界: 用胶粘接或武德合金铸造, 电铸锥壳利用胎具腐蚀时边缘剩一段来保证固支。

3. 简支边界: 将壳体置于刀口状的圆环上, 以丙酮胶形成密封薄膜。在完成简支弹性实验后铸造环氧树脂消除多余边的可转动性实现固支。

4. 壳体的局部固定: 将锥头或钢框胶到壳上或浇铸武德合金改变壳长; 以环氧树脂加厚(或粘肋条)失稳区, 使失稳在别处发生。

## 二、实验结果及分析

### (一) 典型锥壳的表现及分析

1. 壳体在施加体积改变( $\Delta V$ )试验机上的表现

加  $\Delta V$ , 壳体承载  $P$  变高, 初挠曲扩大到壳体承载达第一次极值,  $P$  对  $\zeta$  的导数为零, 即是 J. Singer 定义的开始失稳临界值  $P_0$ 。我们称一级第一波上临界值, 记为  $P_{B1-1}$  (照片 3)。这时的挠度肉眼看不出来, 参照未加载之壳体(照片 2)

再加  $\Delta V$ ,  $P$  降低到某值时可能跳跃, 但大多不跳跃<sup>1)</sup>继续降低形成凹入波。载荷  $P$  与波形中心位移  $W_{max}$  稳定地描出  $P \sim W_{max}$  (图 1)。

其下极值点定义为一级第一波下临界值, 记为  $P_{B1-1}$  (照片 4、5)。

再加  $\Delta V$ ,  $P$  提高到一个比  $P_{B1-1}$  低的值壳体发生跳跃, 出现一级波的第二个, 载荷记为  $P_{B1-2}$ 。跳跃后  $P$  下降, 第一波的位移相应减少(照片 6)。

再加  $\Delta V$  则重复上述现象, 直到周向布满一级波。在此过程中  $P_{B1-i}$  常小于  $P_{B1-1}$ 。波形一般逐个出现, 但也有两个同时出现的(强调指出, 第一波从未与其它波同时出现)。

再加  $\Delta V$ ,  $W$  增大  $P$  增高, 在超过  $P_{B1-n}$  的某值一级波的根部之间出现小波为二级波(照片 7), 载荷记为  $P_{B2-1}$ 。出现第一个二级波后  $P$  下降了(它是跳跃出现的)。

再加  $\Delta V$  出现其它二级波, 常有  $P_{B2-i} > P_{B2-(i-1)}$  直到出现  $n$  个二级波(照片 8)。

再加  $\Delta V$  载荷超过  $P_{B2-n}$  继续上升, 到某些值时载荷逐次突降形成一些新的样子, 相应载荷记为  $\dots P_{B3-i} \dots, P_{B4-i} \dots$ , 最后超出了弹性范围在一级波和扩大了二级波之交

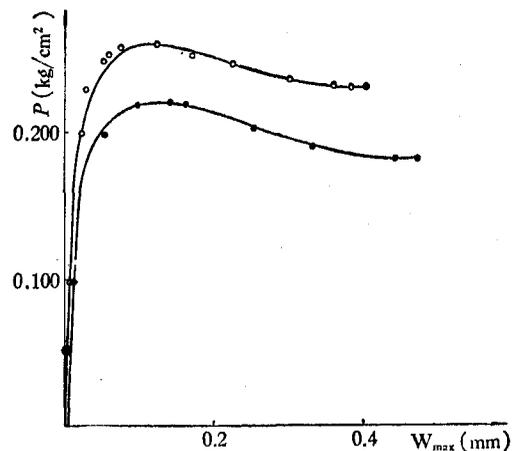


图 1 典型的  $P$  与  $W_{max}$  的关系曲线  
锥壳 No. 26. 测量点  $\varphi = 159^\circ$ ,  $s = 0.774$ ,  
接缝在  $12.5^\circ$  处

1) 跳跃与否与壳体参数和实验机特性有关, 这一点我们在另外的文章中分析。

叉处(凸出)发生塑性皱折,  $P$  上不去, 产生所谓“塑性坍塌”, 即为 J. Singer 的  $P_b$  (照片 9)。

### 2. 初挠曲及“塑性”对壳体表现的影响

一级第一波常出在初挠度最大处, 初挠曲使开始几个波上临界值降低, 甚至使第一波的  $P \sim \zeta$  曲线无极值, 使判断失稳困难, 使每一级波的各波相应载荷分散, 使高级波出现在低一级波之前, 例如有  $P_{B1-i} > P_{B1-1}$ ,  $P_{B2-1} < P_{B1-1}$ ,  $\dots$ 。

“塑性”将影响到三级波不出现, 二级波不出现甚至只出现一个波就“塑性坍塌”, 其影响随  $R/t$  减小而增大。

### 3. 对上述现象的几点分析

① 破坏载荷有必要重新研究, 重新定义, 以  $P_{B1-1}$  作边界固支壳设计载荷对外形要求不严而一次使用的壳体过于保守。若允许  $\zeta$  达 10~20 则  $P$  可增加 30~40%。J. Singer<sup>[3]</sup> 建议  $P_i$  为设计载荷, 用  $P_{B2-n}$  行吗?

② 关于开始失稳的局部性: 本实验和高速摄影分析<sup>[1]</sup> 都有此结论。它预示理论研究时, 位移函数假设成局部波可能更好; 假定位移函数为周期函数时, 波数  $n$  可取非整数; 壳体接缝不影响  $P_{B1-1}$ , 只要不比别处弱就行。

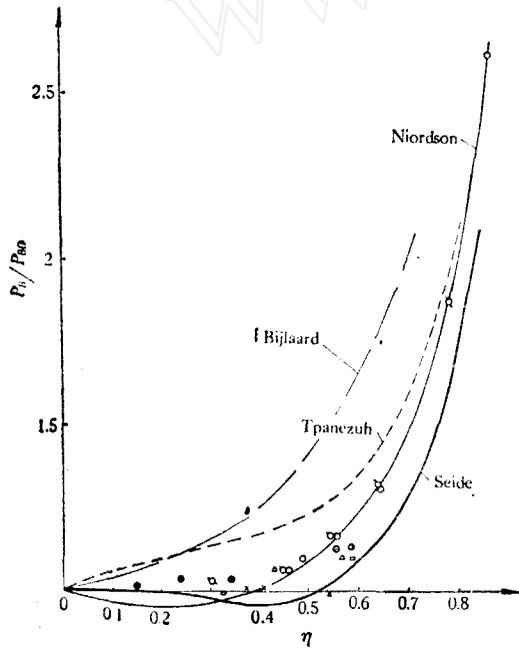


图2 单壳变参数实验之  $(P_B/P_{B0}) \sim \eta$  关系和理论曲线之对比

( $P_{B0}$  是  $\eta$  为 0 时之  $P_B$ )

○ No. 18  $\alpha=15^\circ$  上固支, 下简支. ◊ No. 9  $\alpha=30^\circ$  上固支, 下简支. × No. 9  $\alpha=30^\circ$  上固支, 下固支. △ No. 15  $\alpha=45^\circ$  同上. □ No. 20  $\alpha=60^\circ$  同上. ⊕ No. 5  $\alpha=30^\circ$  同上

ard<sup>[10]</sup> 的理论曲线及本实验均以全锥结果作标准进行比较, 见图 2, 看到 Bijlaard 和

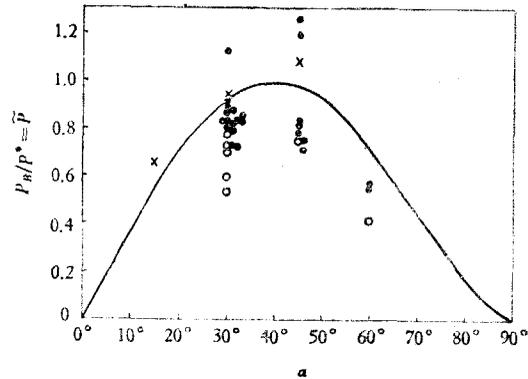


图3 锥角  $\alpha$  对  $\bar{P}$  的影响

$P^*$ —— $R, t, E$  相同之  $\alpha=40^\circ$  壳之  $P_B$ .

●——环氧树脂合边界 ○——丙酮胶合边界 ×——电铸壳

### (二) 关于上临界值

我们采用非破坏方法通过改变一个壳的参数描出相应曲线和理论比较。这里去掉了初挠曲,  $E, t$ , 边界不统一等因素影响的主要部分。

1. 斜削比  $\eta$  的影响: 实验证明  $\eta$  是锥壳区别筒壳的主要参数。我们把 P. Seide<sup>[8]</sup>, Niordson<sup>[1,8]</sup>, Трапезин<sup>[5,9]</sup>, Bijla-

Трапезин 的结果与实验相差较大, Seide 和 Niordson 的结果则比较接近, 后者更好些(注意理论为两端简支, 而实验为上边界固支)。

2.  $\alpha$  的影响: P. Seide 理论的  $\tilde{P}-\alpha$  曲线和我们的实验比较一致(图 3)。将不同  $\alpha$  壳的  $(P_B/P_{B_0})-\eta$  结果标入图 2, 看到它们趋势基本相同。结合后面  $\alpha$  影响  $w(s)$  很小的结论, 可以认为计算中关于  $\alpha$  的考虑, 象 Seide 那样, 已经够了。

### (三) 关于 $P-\zeta$ 曲线

我们的主要试验结果列于表中(本刊略)。图 1 给出了  $P-w_{\max}$  典型曲线。由于铍青铜箔、赛璐珞板卷制的壳弹性很好, 测完  $P_H$  后  $P_B$  降低很少(3%左右), 所以可以信赖, 电铸壳结果仅供参考。

1. 固支  $\nu$  主要分布在 0.8~0.85 之间, 简支  $\nu$  在 0.67~0.815 之间。由初挠度对  $\nu$  影响的实验研究可以认为这些  $\nu$  的下界较好反映了理想壳的  $\nu$  值。由于锥壳尚无非线性理论结果,  $\nu$  值按当量圆筒绘于图 4<sup>[9]</sup>。  $P_H$  比  $P_B$  值低 20%~33%, 说明了研究超临界状态的必要性。

2. 实验数值分析表明, 在下临界值时中面应变的二次项有不可忽略的比重, 而四次项只占二次项的百分之几。因此在所研究的参数下, 以 L. H. Donnell 方程为基本形式的计及  $w$  二次项的方程<sup>[2]</sup> 对处理工程问题, 已足够精确。它的二次项研究  $P_{H1-1}$  以前的超临界状态是必不可少的。

### (四) $W(s, \varphi)$ 曲面的分析

由于我们把超临界状态变为稳定状态, 所以对刚失稳波形作了测量和分析。我们只重点研究通过  $W_{\max}$  的纵、横二坐标线上之  $W$ , 记为  $W(s)$ ,  $W(\varphi)$ 。

1. 关于  $W(s)$  的分析: 失稳前瞬时和刚失稳状态  $W(s, \varphi)$  是没有重大区别的(或者说质的区别已发生但量上还未显出)。大位移曲线例如  $W_3(s)$  (相应  $P_{H1-1}$ ) 才更多地反映壳体屈曲位移特性。由许多全锥的  $W_2(s)$  (刚失稳状态),  $W_3(s)$  (图 5), 得出如下看法:

① 头部 30~40%,  $w \approx 0$ , 这一特点在加到  $\zeta_{H1-1}$  前基本不变。将这段加固及去掉近锥顶部分就不应影响壳体承载能力, 这与图 2 曲线呼应。

顶部  $\Phi 41.5$  固支时  $m_H$  及  $W(s)$  形状与全锥基本相同。

②  $m$  值为 0.22~0.28。在  $P_{B1-1}$  与  $P_{H1-1}$  之间变化不大。

③  $\alpha$  及  $R/t$  对  $W(s)$  的影响不显著。这支持了  $\eta$  是锥壳主要参数的理论, 在一定范围内假设  $W(s)$  时可不计  $\alpha$ 、 $R/t$ 。

④ 超过  $\zeta_{H1-1}$  增大位移时  $m$  可增大到 0.35 以上, 顶部会变得只有  $0.1L$  不动。这说明对理论研究有用的  $W_2(s)$ ,  $W_3(s)$  不能用有稳压装置试验机上失稳波形测量结果代替。

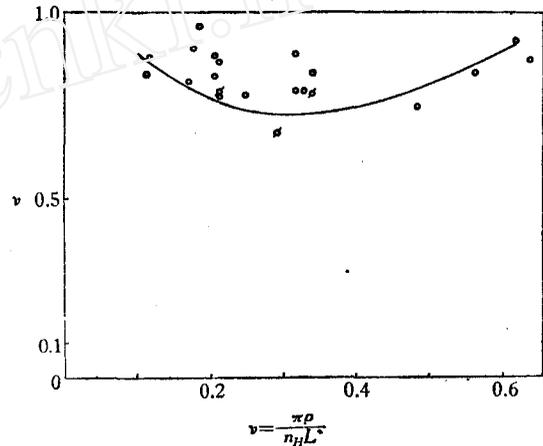


图 4  $\nu$  值实验和圆筒壳理论之比较  
○——底边固支  $\rho = 0.7R_1$ ,  $n_H$  为实验值  
□——底边简支  $L^* = 0.6L$

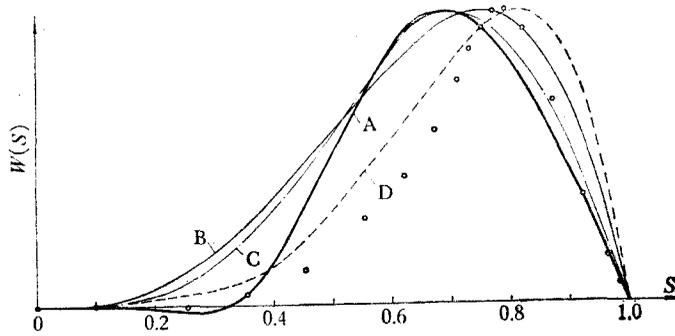


图5  $w(s)$  理论和实验对比

A—Seide 级数解 B—Taylor  $9.48s^3(1-s)$  C—Трапезин 1  $7.7s^3(1-0.759s)\sin\pi s$  D—Трапезин 2  $6.74s^4(1-s^2)$  ○—试验点  $P = P_{H1-1}$  (No. 25 壳)

2. 关于  $W(\varphi)$ : 典型结果见图 6.

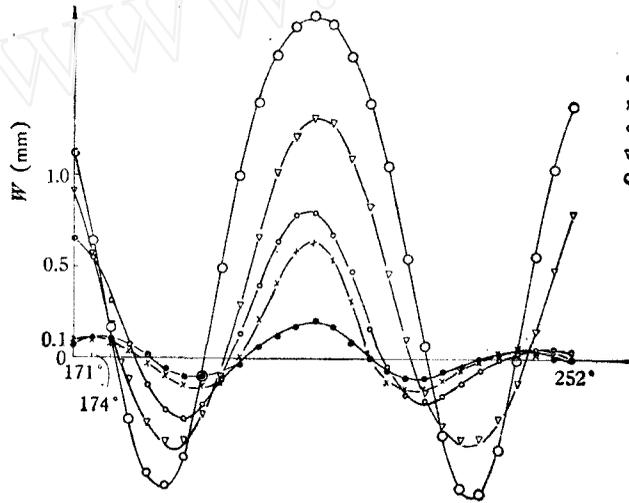


图6 典型的周向波形在超临界状态下的变化 壳 No. 30

	$360^\circ/n$	$n$
● $P_{B1-1}$	$37.2^\circ$	9.7
× $P_{H1-1}$	$36^\circ$	10
○ $P_{H1-2}$	$39^\circ$	9.2
▽ $P_{H1-3}$	$47.3^\circ$	7.6
○ $P_{B1-n} < P < P_{B2-1}$	$50.4^\circ$	7.1

①  $W(\varphi)$  可以认为是在初挠度扩大的基础上形成的。它和初挠度的波长可以有较大不同,这一结论与前人相似。

②  $W(\varphi)$  一般都是衰减型周期波,即由中心向两侧周期变化,但迅速衰减。如刚失稳的曲线还可认为接近正弦曲线的话,则随着位移的加大(达到下临界值)就愈明显地

带有衰减型的特征。壳体失稳总以一个波开始，这不是偶然的。测量出来的衰减波型  $W(\varphi)$  对寻找更正确的  $W(s, \varphi)$  有参考意义。

③ 既然只出现一个衰减型波，则  $n$  的确定便成了问题。我们取两个极值点之间算是半波长(凸凹点之间)。并以此计算  $n$ 。 $n$  可不为整数。

④ 测量表明(图 6)， $n$  在不同超临界阶段不同。在  $n_{B1-1}$  和  $n_{H1-1}$  之间差别不大(可近似认为相等)但  $n_{H1-1}$  和  $n_{H1-n}$  之间可差到 3，和  $n_b$  差得更多。用肉眼可以观察到后几个波出现时前几个波波形扩大，中心距离拉开的现象。这说明全面出波大变形状态的  $n$  和理论对比不恰当，只能用  $n_{B1-1}$  或  $n_{H1-1}$  去比。

(五) 边界条件

目前，锥壳理论都假定简支边界，而实验几乎都为固支 (J. Singer<sup>[3]</sup> 的除外)。

Ф. С. Исабаева 在筒壳实验<sup>[4]</sup>中采用了简支边界，用间接实验的方法证明了简支的真实性，并通过统计指出：固支比简支临界值高 0.3~0.5 倍， $n$  值也高；失稳时的  $\zeta$  和跳跃终了的  $\zeta$  值都是简支的大；而且超临界波形也有较大差别。由我们的实

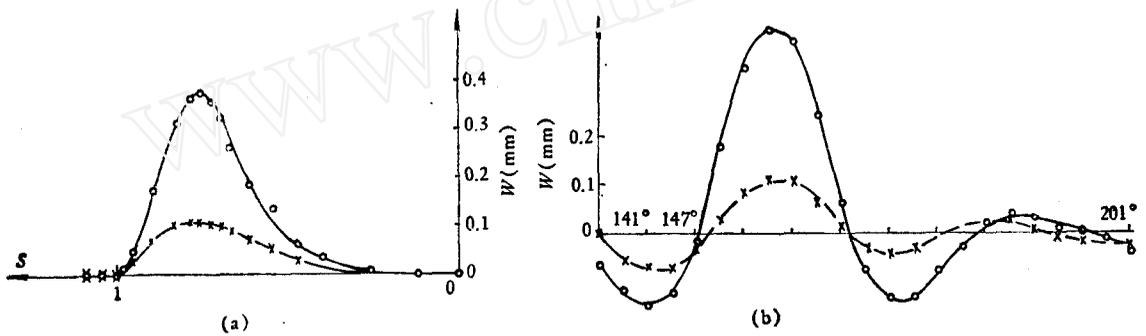


图 7 典型的固支边全锥波形 壳 No. 26

(a)  $w(s)$   $\varphi = 159^\circ$  (缝在  $12.5^\circ$ ) (b)  $w(\varphi)$   $s = 0.774$   
 $\times$ — $P = P_{B1-1}$   $\circ$ — $P = P_{H1-1}$

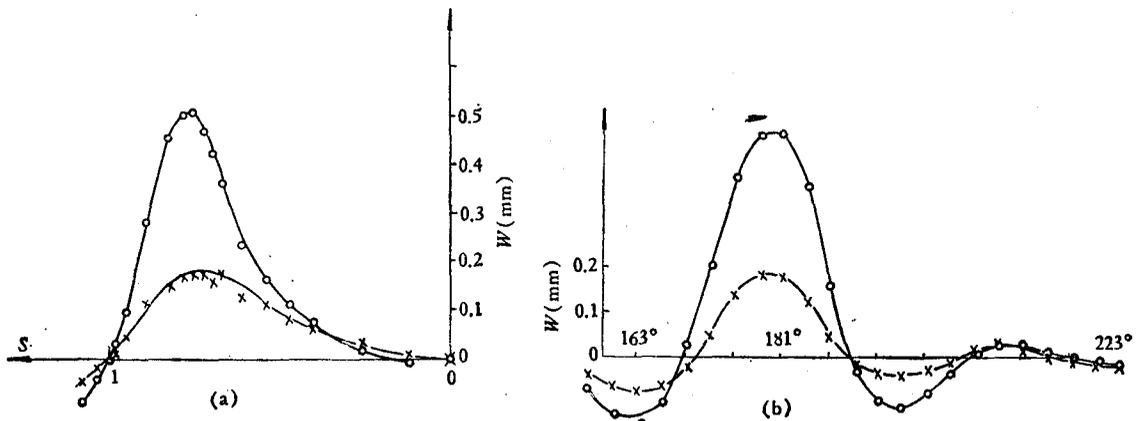


图 8 典型的简支边全锥波形 壳 No. 26

(a)  $w(s)$   $\varphi = 181^\circ$  (缝在  $34.5^\circ$ ) (b)  $w(\varphi)$   $s = 0.774$   
 $\times$ — $P = P_{B1-1}$   $\circ$ — $P = P_{H1-1}$

验看来她的大部分实验结果是可信的。

下面叙述我们的实验结果：

### 1. 对 $W(s, \varphi)$ 的影响

① 同一壳同一失稳区两种边界的  $W(s)$  见图 7、8。二者除下边界处外几乎无区别。从几个壳的测量看出，简支  $m_H$  比固支减少 0.01。在离固支边界 0.01~0.02 处测量出明显的转动，然而  $W(s)$  差别小并不象 Трапезин<sup>[5]</sup> 所预言的那样一定导致临界值的差别也是可忽略地小。

我们的实验测量表明简支点内、外有几乎相同的转动。直到  $P_{H1-1}$  在刀口支持处仍没有办法向位移。多余边完全不影响实验结果（多余边宽 11mm，4mm 对应的  $P_{B1-1}$  完全相同）。

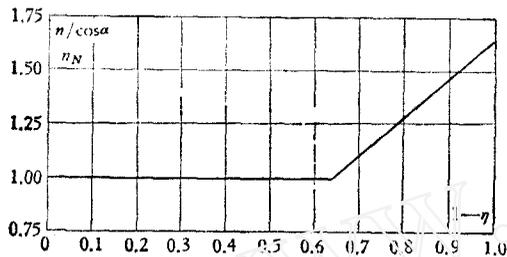


图 9 P. Seide 的  $\left(\frac{n/cos \alpha}{n_N}\right) - (1 - \eta)$  理论关系

这说明此简支边界较好满足

$$W = M_s = N_s \Rightarrow \tau_s = 0$$

②  $W(\varphi)$  两种边界都是衰减型周期波。但简支的  $n_{B1-1}$  一般比固支约小 1， $n_{H1-1}$  也如此。这当然影响  $P$ ，因此仅看  $W(s)$  是片面的。

③ 简支  $W(s, \varphi)$  在  $\zeta > \zeta_{H1-1}$  时与固支有更大差别。

在简支条件下没有看到次级波的出现(照片 10, 11)。波形在一个波的时候就明显扩大(指  $\zeta > \zeta_H$ )，在其它波出现后更进一步扩大，例如壳 No. 27。  $n_{H1-1} = 8.2$ ， $n_b = 5$ 。

综合前面对  $n$  的研究，我们认为 J. Singer 和 Weingarten 的实验结果与理论值相差 1~3 也不能说明理论不合理。因为实验与理论对应不同的超临界状态和不同的边界条件。本实验与我们对理论的修正值较好地符合。此外，P. Seide 理论给出的图 9 的关系我们认为基本上是合理的。

我们没有直接测量  $\eta$  变化对  $n$  的影响(技术上没有困难)。但由  $\eta < 0.4$  时  $P$  和  $W(s)$  不变的实验结果可以认为  $\eta$  在小于 0.4 时  $W(\varphi)$  基本不变， $n$  保持常数。而当量圆筒的波数在该区间则是变化的。

试验结果的计算表明图 9 上  $1 - \eta > 0.6$  的图线是合理的。

Weingarten 和 Seiae<sup>[4]</sup> 和 J. Singer<sup>[3]</sup> 的实验都不承认有图 9 的关系存在。我们认为他们的观察可能正确，但他们的结论则不合理，因为他们和理论对比的不是  $n_b$ 。他们看到的是大位移的波数，其规律完全可能与刚失稳不同。

### 2. 对 $P_{B1-1}$ 及 $P_B - (1 - \eta)$ 曲线的影响

由试验结果总表(略)看到简支边全锥  $P_{B1-1}$  比固支低 13—22%  $P_{B1-1g}$  左右，平均 17.8%。很明显  $\eta = 1$  时上边界的影响应该与这个值相同，而  $\eta = 0$  时应该无影响(见四、1、①)。在图 2 上上边界固支之实验与 Niordson 之结果符合则  $(P_{B1-1}/P_N) - (1 - \eta)$  基本为水平线(在  $(1 - \eta) > 0.6$  修正为曲线而保证在  $(P_B/P_{B0}) - \eta$  曲线上  $\eta < 0.4$  时  $P_B/P_{B0} = 1$ )。

通过对实验值的分析指出 Seide 曲线是比较符合上述综合实验结果的。进而不同边界四条曲线给在图 10 上(作了稍保守的调整)。Weingarten 及 Seide 的实验结论<sup>[4]</sup> 为否定

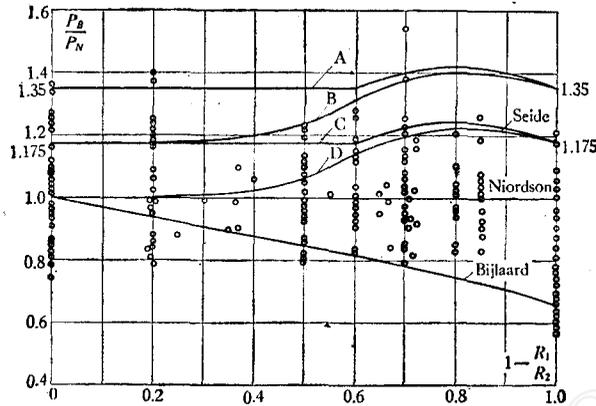


图 10 实验数据和理论比较图。取自 [4] (不包括本实验)

A、B、C、D 为我们建议的半椭圆曲线组合。

A. 上固支 下固支 C. 上固支、下简支

B. 上简支 下固支 D. 上简支 下简支

Seide<sup>[2]</sup> 理论曲线而承认 Niordson 的曲线, 这不恰当。他们的实验都是固支, 而这种情况我们也说 Niordson 曲线趋势合理。但在 Seide 理论所研究的那种简支情况则 Seide 曲线是对的。

### 3. 对 $P \sim \zeta$ 曲线及 $\nu$ 的影响

简支  $\zeta_B$ 、 $\zeta_H$  一般比固支大, 特别是  $\zeta_H$ 。在  $\zeta_H$  附近近水平的一段长, 简支实验确定  $\zeta_H$  时不能希望  $P$  有较大回升, 在  $P$  不下降时就要停止增加  $\zeta$ , 否则就会出现塑性变形。这和 Исабаева 在筒壳中指出的简支跳跃终了  $\zeta$  比固支大的结论相呼应。

一般  $P_{B1-1}$  即是简支壳最高载荷。

$\nu$  值简支比固支低约 5—10%。

## 三、综合结论

(一) 实验表明我们采用的实验技术基本上实现了壳体超临界阶段的稳定化; 在金属壳上测出  $P_{B1-1}$  而将壳体保持在完全弹性的条件下; 测出了  $P-W_{max}$ 、 $P-\Delta V$  曲线及各个重要阶段之  $W(s)$ 、 $W(\varphi)$  使壳体不发生过分变形; 实现了一壳体变参数变边界的重复实验; 实验证明我们采用的简支边界和固支边界基本符合要求。

(二) 超临界研究表明, 较薄的壳  $P$  可超过  $P_{B1-1}$  许多。对第一波的超临界阶段平均有  $\nu_s$  为 0.842,  $\nu_a$  为 0.77。这说明结果为何分散及研究  $P_{H1-1}$  以前的超临界阶段的必要性。

实验结果分析指出, 计及  $W$  二次项的有限挠度理论对研究  $P_{H1-1}$  必要而充分。

(三)  $W(s, \varphi)$  的测量指出: 大位移的形状与刚失稳有明显不同。和理论可以对比的  $n$  值比通常得到的大。对比  $n$  还要指明是什么边界条件, 简支时  $n_B$ 、 $n_H$  比固支约小 1。测得的  $W(s)$ 、 $W(\varphi)$  可作为理论研究的依据。

(四) 同一个壳上对比不同边界的研究方法, 特别是简支铸成固支的方法, 有优点。几个壳  $\phi$  平均值为 0.823。因此理论实验对比时要边界条件相同。我们以图 10 上 A、B、C、

$D$  四曲线的形式给出  $(P_B/P_N)-(1-\eta)$  建议采用的公式(这里未考虑初挠曲,  $E$  误差等因素, 为此在实际应用中应加一个安全系数), 简单表示如下:

上, 下均为简支:  $(P_B/P_N)-(1-\eta)$  曲线同 P. Seide 的理论曲线<sup>[8]</sup>.

上简支, 下固支: 为上述曲线上移 0.175

上固支, 下简支:

$$\begin{aligned} P_B &= P_{B\eta=0.4} = P_{N\eta=0.4} \times 1.175 & \eta \leq 0.4 \\ P_B/P_N &= 1.175 & \eta > 0.4 \end{aligned}$$

上, 下均为固支:

$$\begin{aligned} P_B &= P_{B\eta=0.4} = P_{N\eta=0.4} \times 1.35 & \eta \leq 0.4 \\ P_B/P_N &= 1.35 & \eta > 0.4 \\ P_N &= 2.6 E t^{5/2} \sin \alpha \cos^{3/2} \alpha / R_i^{3/2} (1 + \eta)^{3/2} (1 - \eta) \end{aligned}$$

\* \* \*

近年来仍未见到锥壳外压超临界研究(无论实验还是理论), 然而锥壳外压下边界条件的研究则有了长足的进步。

J. Singer<sup>[12,13]</sup>, M. Baruch<sup>[14]</sup>, A. B. Кармишин<sup>[15]</sup> 的研究是有代表性的。

[13] 给出典型固支简支结果之比, 他认为该比值不随  $\eta$  变化而近于常值, 这与本实验不一致。[14] 中边界对上临界值影响的实验结果和我们相近, 它的工作在前。

令人感兴趣的是[15] 给出的多种边界条件下临界压力随  $\eta$  变化之曲线和我们由实验分析给出的半经验曲线(图 10A ~ D) 竟十分相似。而从工程观点看, 我们的曲线又简单些, 偏安全些。不仅如此, 对比[15] 看到, 我们关于波形的测定(不同边界) 以及关于波数变化曲线的分析都和数字分析的最新成果互相支持。

### 参 考 文 献

- [1] Seide, P., NASA TND-1510.
- [2] Dill, E. H., NASA TND-826.
- [3] Singer, J., and Abraham, E., Department of aeronautical engineering Technion Israel Institute of Technology, Haifa (1962).
- [4] Weingarten, V. I., Seide, P., *AIAA J.*, 3, No. 5(1965).
- [5] Трапезин, И. И., Расчеты на прочность 6, (1960).
- [6] Kaplan, A., Fung, Y. C., NACA TN 3212, (1954).
- [7] David, A. E., *Exp. Mech.*, 4(1964).
- [8] Seide, P., Proc. of the Symposium on the theory of thin elastic shells, (1959).
- [9] Вольмир, А. С., Устойчивость упругих систем, (1963).
- [10] Bijlaard, P. P., NASA TN-D 1510.
- [11] Исабаева, Ф. С., Изв. казанск фил АН СССР сер физ. матем и механ в, № 14, (1960).
- [12] Singer, J., *AIAA J.*, 4, 2(1966).
- [13] Singer, J., Proc. of the fifth Isreal annual conference on aviation and astronautics, Jerusalem Academic Press Ltd, Jerusalem Isreal, February (1963), p. 135—146.
- [14] Baruch, M. and Singer, J., *Isreal Journal of Technology*, 5, 1—2, (1967), 12—24.
- [15] Кармишин, А. В., Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций, (1975).

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE POSTBUCKLING BEHAVIOUR OF CONICAL SHELL SUBJECTED TO OVERALL EXTERNAL PRESSURE

Fan Shi-rong

### Abstract

The results of experimental investigation of conical shell subjected to external pressure are presented. Measurements of upper critical values were taken with the conical shell maintained in entire elastic conditions; the curves of load versus maximum radial deflection and typical wave form corresponding to the prior, after and just critical points were also plotted with the conical shell not excessively deformed; the experiments are repeated on a single shell with variable parameters and boundary conditions. Also discussed in this paper is the difference between the fixed and simple support, a suggestion is made as to the  $(p/p_N) - (1 - \eta)$  relations with consideration of the boundary conditions, it may serve as a reference for the design. The paper summarized the variation of force and wave form under postbuckling condition, which was provided as a basis for theoretical research.