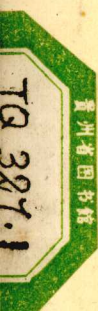


蜂窝夹层板剥离试验小结



上海联华玻璃厂研究所

一九七七年五月

目 录

一、 前 言	1
二、 试验结果	1
1、 不同蒙皮厚度蜂窝夹层板的剥离试验结果	1
2、 不同蜂格大小蜂窝夹层板的剥离试验结果	4
3、 不同成型工艺条件的蜂窝夹层板的剥离试验结果	5
4、 蜂窝夹层板在剥离试验中出现的一些特点	5
三、 初步分析与看法	8
1、 初步分析	8
2、 几点看法	18

蜂窝夹层板剥离试验小结

一 前 言

根据“玻璃钢全国性能测试会议”纪要的要求，我们进行了有关蜂窝夹层板剥离性能的补充试验，并结合产品试制，工艺参数选择，先后进行了200多根蜂窝夹层板试样的剥离试验（包括：不同蒙皮厚度，不同蜂窝大小，不同成型工艺，不同材料等）。试验按“玻璃钢蜂窝夹层结构试验方法”进行。以下对试验工作作一小结，供各单位讨论测试方法时参考。

二 试验结果

1. 不同蒙皮厚度蜂窝夹层板的剥离试验结果：

按“会议”纪要的要求，我们补做了不同蒙皮厚度试样的剥离试验，试样的蜂窝芯子同样是边长 c 为8毫米，蜂窝玻璃布厚为0.2毫米，蒙皮厚度分二层、四层、六层0.2毫米斜纹布三种。试样是用307聚酯湿法冷固化成型。成型时的压力为0.03公斤/厘米²。同一批成型好的试样，分二次进行试验。第一次是在试样成型好后2个月时进行试验。试验室的温度为24℃，湿度为95%。第二次是成型好后一年时再进行试验（该试样部分曾先做过弯曲刚度试验），试验室温度为18℃，湿度为94%。二次的试验结果分别列于表1、2中。

不同蒙皮厚度蜂窝夹层板的剥离试验结果

表 1

试 样 编 号			剥 离 强 度 $M(Kg/cm)$		备 注
			测 试 值	平均值	
纬 何	上 蒙 皮	A _上 -1~5	0.69, 0.70, 0.68, 0.88, 0.70	0.73	二层玻璃布
		B _上 -1~5	1.51, 0.84, 1.14, 1.25, 0.77	1.11	六层玻璃布
		C _上 -1~5	1.31, 1.26, 1.12, 1.40, 0.96	1.20	四层玻璃布
		D _上 -1~5	0.80, 0.75, 0.75, 0.77, 0.74	0.76	
	下 蒙 皮	A _下 -1~5	2.34, 2.19, 2.19, 2.34, 2.30	2.27	
		B _下 -1~5	2.26, 2.06, 2.09, 2.31, 2.25	2.19	
		C _下 -1~5	2.19, 2.31, 2.28, 2.30,	2.27	
		D _下 -1~5	2.41, 2.50, 2.41, 2.25,	2.39	
径 何	上	C _上 -1~3	1.13, 1.16, 1.02	1.10	
	下	C _下 -1~3	2.20, (1.81), 2.47	2.33	()者质量不好

注：1) A、B、C者蜂窝芯子为机械印胶，蜂窝胶条的胶是δφ胶。

2) D者蜂窝芯子为手工糊制，用634、618环氧十三乙烯四胺冷固化胶。

3) A、B、C蒙皮的实测厚度依次为0.59、1.68、1.16毫米。

不同蒙皮厚度蜂窝夹层板的剥离试验结果

表2

试 样 编 号			剥 离 强 度 $M(Kg-cm/cm)$	平均值
			测 试 值	
纬 向	上 蒙 皮	A _上 -1~4	0.72, 0.67, 0.73, 0.61	0.68
		B _上 -1~5	0.63, 0.81, 0.63, 0.85, 0.75	0.73
		C _上 -1	0.78,	0.78
		D _上 -1~4	0.78, 0.78, 0.70, 0.67	0.73
径 向	上 蒙 皮	A _上 -1~5	0.69, 0.66, 0.86, 0.84, 0.76	0.76
		B _上 -1~5	0.87, 1.03, 0.72, 1.35, 0.80	0.95
		C _上 -1~2	1.02, 1.02,	1.02
		D _上 -1~5	0.77, 0.83, 0.86, 0.94, 0.74	0.83

2、不同蜂格大小蜂窝夹层板的剥离试验结果。

同样的成型工艺 (307 聚酯冷固化), 同样蒙皮厚度 (四层 0.2 毫米斜纹布), 蜂格边长 C 分别为 8、10、15 毫米的蜂窝夹层板的剥离试验结果列于表 3 中

3、不同成型工艺条件的蜂窝夹层板的剥离试验结果。

蜂窝夹层板蒙皮剥离性能的高低是衡量蒙皮与蜂窝芯子胶接质量的主要指标之一, 因此, 蒙皮与蜂窝芯子胶接所采用的胶粘剂本身性能及蜂窝夹层板的成型工艺对蒙皮的剥离性能是敏感的。

(1) 胶粘剂对剥离性能的影响。二组不同胶粘剂的蜂窝夹层板的剥离试验结果如表 4 所示。A 组是用自力 2 号胶液, B 组是用 618 环氧冷固化的胶液。两组蒙皮全是 618 环氧树脂浸渍四层 0.2 毫米斜纹布的玻璃钢, 蜂格尺寸 C 为 4.5 毫米, 蜂窝的玻璃钢厚度为 0.12 毫米。

(2) 成型工艺对剥离性能的影响

同样的树脂配方、蜂格大小, 蒙皮厚度、仅是成型工艺不同 (加压大小

不同蜂格大小蜂窝夹层板的剥离试验结果

表3

试样组别			剥离强度 $M(Kg-cm/cm)$		备注
			测试值	平均值	
纬 向	上蒙皮	$C=8$	2.80, 2.75, 2.75, 2.77, 2.74	2.76	24°C 95% 18°C 76%
		$C=10$	2.66, 2.58, 2.89, 2.61,	2.69	
		$C=15$	2.45, 2.34, 2.31, 2.52,	2.40	
	下蒙皮	$C=8$	2.41, 2.41, 2.25, 2.50,	2.39	() 有较多 胶瘤, 平均 值未计入
		$C=10$	2.50, 2.50, (3.4), 2.70	2.60	
		$C=15$	1.25, 1.77, (3.6),	1.51	
径 向	上蒙皮	$C=8$	1.13, 1.16, 1.02,	1.10	
		$C=10$	1.05, 1.17, 2.92, 1.05	1.05	
		$C=15$	2.53, 2.63, 2.69,	2.62	
	下蒙皮	$C=8$	2.20, 2.47,	2.33	
		$C=10$	2.39, 2.47,	2.47	
		$C=15$	1.23, 1.75, 1.08	1.35	

不同胶粘剂的剥离试验结果

表4

试样组别			剥离强度 $M(Kg-cm/cm)$		备注
			测试值	平均值	
A			9.5, 9.6, 9.9, 8.1, 8.2	9.1	试样厚度1.7
B	上蒙皮		1.0, 2.9, 2.7, 1.8,	1.1	1厘米, 用木块
	下蒙皮		3.2, 3.5, 3.7, 3.7,	3.5	蜂窝夹层板加强

不同, 处理温度不同) 的蜂窝夹层板的剥离试验结果列于表5中。该试样的蜂窝芯子为1.45克/沙管纸制成的纸蜂窝, 蜂格边长 C 为6厘米。

各组成型后的热处理制度如下:

A组：室温 $\xrightarrow{\text{直升}}$ 90°C $\xrightarrow{0.5\text{小时}}$ 100°C $\xrightarrow{0.5\text{小时}}$ 120°C
(保温1小时) (2小时) (1小时)

B、C组：室温 $\xrightarrow{\text{直升}}$ 100°C $\xrightarrow{0.5\text{小时}}$ 120°C
(2小时) (2小时)

不同成型工艺的蜂窝夹层板的剥离试验结果

表 5

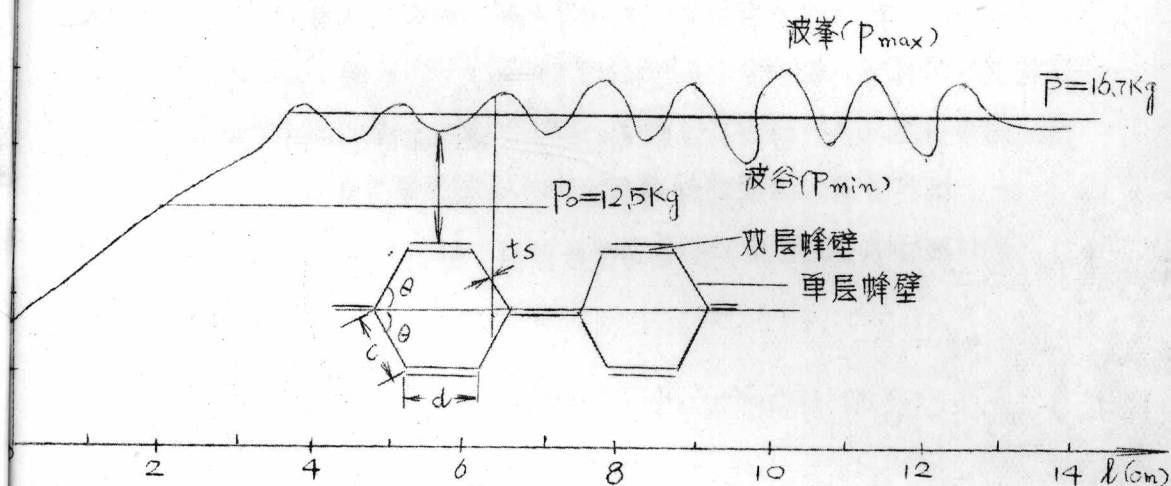
试样编号	剥离强度M (Kg-cm/cm)		备 注
	测 试 值	平均值	
A	a34, a37, a35, a33	a35	加205Kg/cm ² 压力; 蜂窩芯子 前处理: 60°C, 15 分钟。
B	a51, a44, a42, a50, a55	a48	加206 Kg/cm ² 压力; 蜂窩芯子前处理: 80°C, 10 分钟
C	a88, a54, a62, a47, a52	a61	加SiO ₂ 1.5%, 加206Kg/cm ² 压力; 蜂窩芯子前处理: 60°C, 15 分钟

注：全是犍甸、上蒙皮。

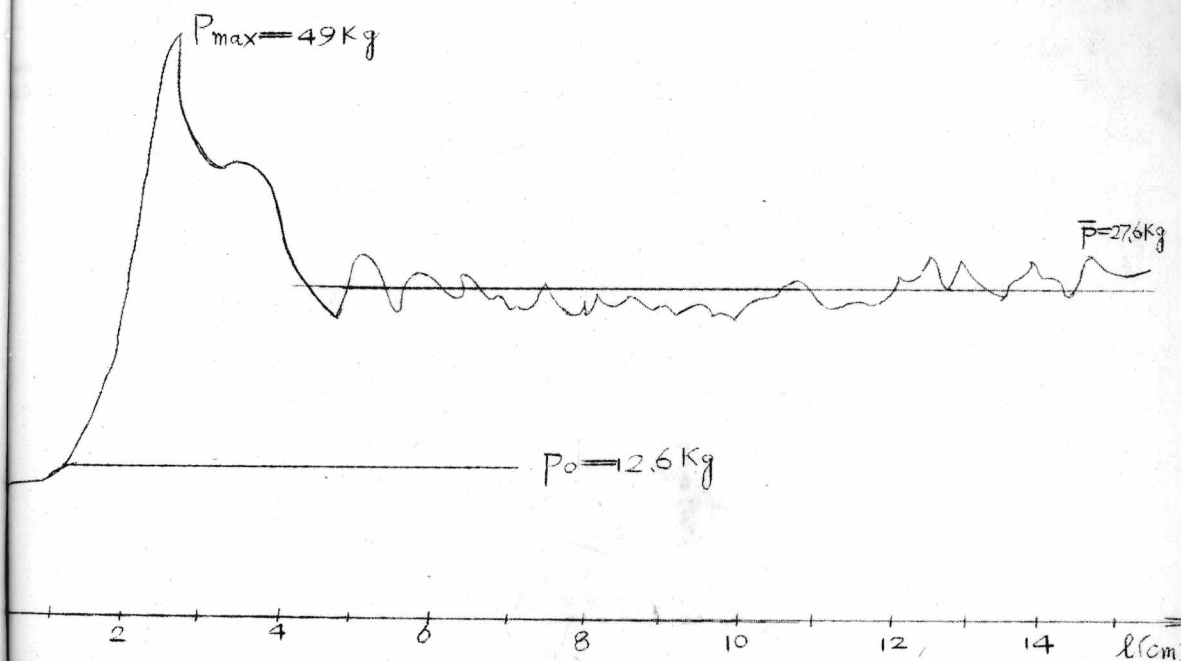
4. 蜂窝夹芯板在剥离试验中出现的一些特点

(1) 径、纬向蜂窝夹层板的平均剥离强度一般是径向比纬向大，而径向试样的剥离强度波动较大，如图一所示，波峰是单层蜂窝壁处，波谷是双层蜂窝壁处。因单层蜂窝壁与试样轴线成 θ 角，因此单层蜂窝壁在与轴线垂直的断面的面积，要比与轴线一致的蜂窝壁增加 $\frac{1}{\cos\theta}$ 倍，面积增大了，因此，剥离强度也增大。

(2) 上下蒙皮的剥离强度，对于湿法成型的蜂窝夹层板而言，相差很大。一般来讲，上蒙皮的剥离强度仅为下蒙皮的 $\frac{1}{3}$ 左右。而对于用胶膜或涂胶液的蜂窝夹层板，相差不大。湿法成型的下蒙皮或用胶膜、胶液的上下蒙皮，在剥离刚开始时，大多数要出现较大的波峰，如图二所示。这主要是刚开始剥离时，蒙皮与蜂窝芯子之间还未出现裂缝，需要较大的剥离力矩，而一旦



图一、经向蜂窝试样剥离时 $P-l$ 曲线

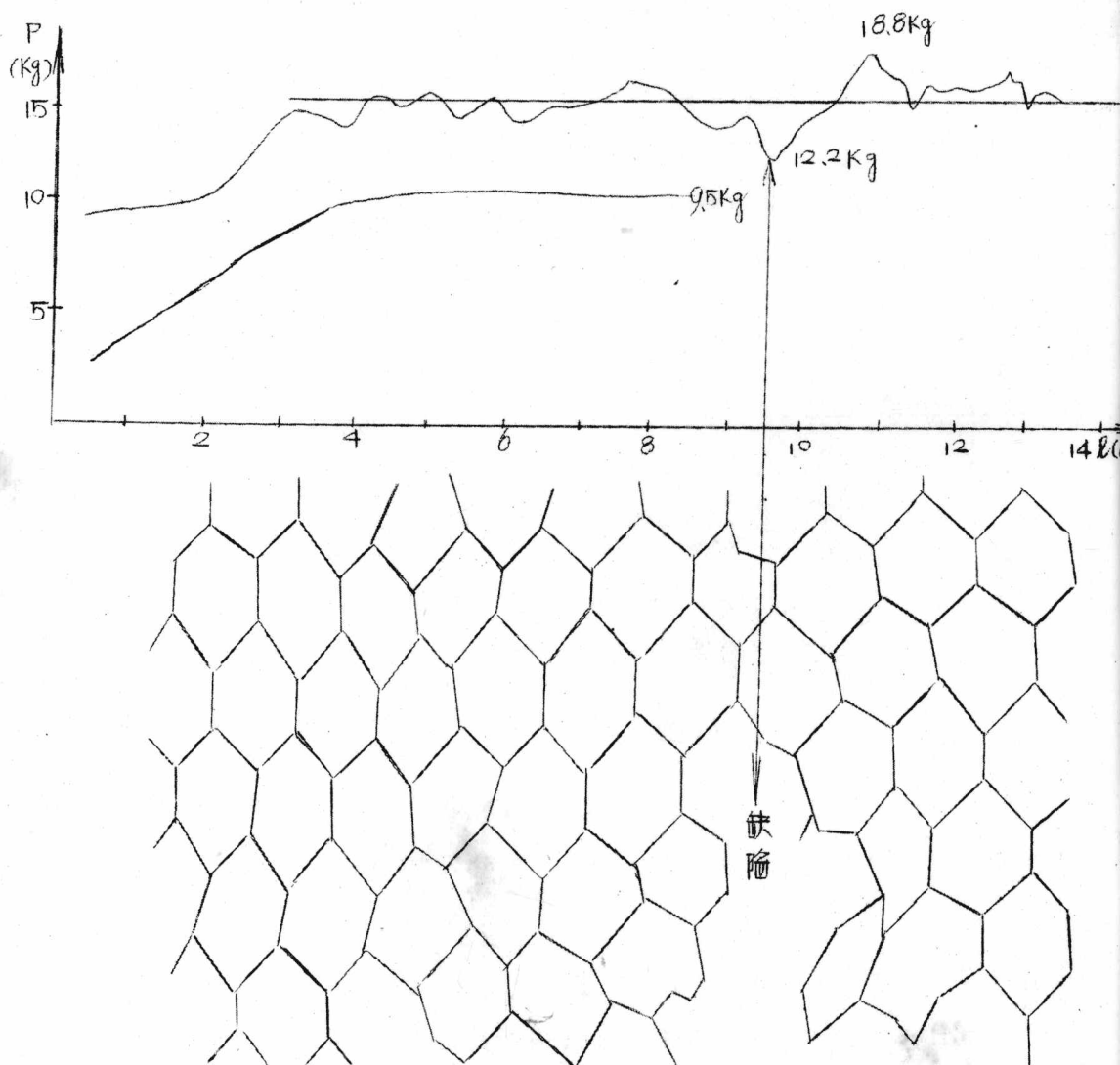


图二、湿法成型的下蒙皮剥离的 $P-l$ 曲线

出现裂缝，随着沿裂缝方向扩展，剥离力矩有所降低，并趋于较平稳状态。从剥离破坏的试样可以看到，下蒙皮在与蜂壁连接处有较大胶瘤，这些胶瘤使蜂壁与蒙皮牢固地粘接，而剥离时裂缝往往沿着树脂与玻璃布的界面上扩展，结果连蒙皮本身的树脂也有很大部分被粘到蜂窝芯子的胶瘤上。

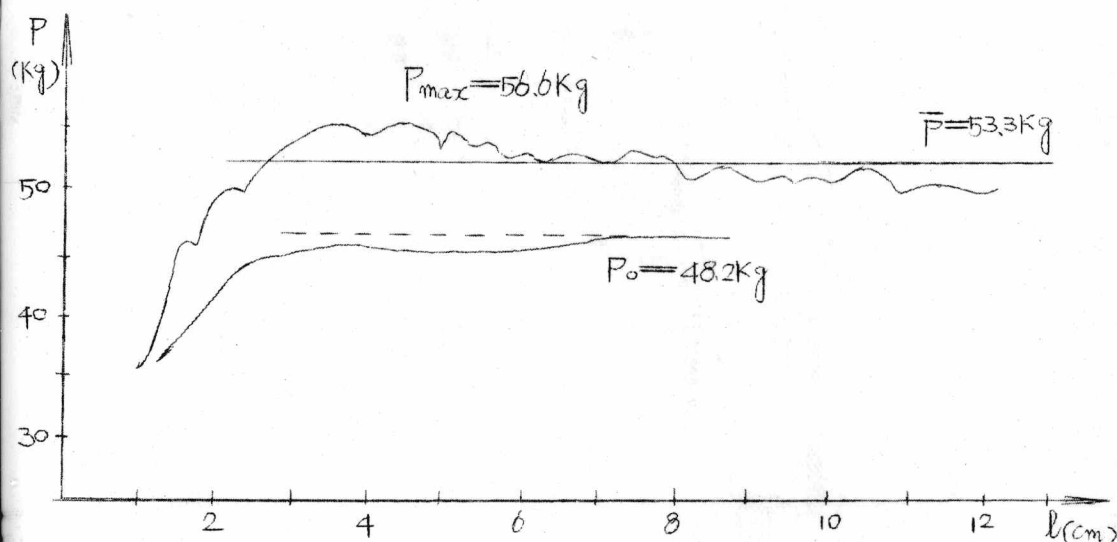
(3) 试样缺陷对剥离强度的影响

试样缺陷对剥离强度的影响是很敏感的，如图三所示。



(4) 厚蒙皮对剥离强度的影响

当蒙皮的厚度太厚时，要把蒙皮卷到滚筒上，需要较大的弯矩，此弯矩会使蒙皮的表面层发白。剥离这样的试样，所测得的剥离强度就不正确。如图四所示。在剥离力较大一段区域内，蒙皮出现发白，重复测试的初剥离力要比实际的小，这主要是蒙皮在第一次剥离时已损伤。



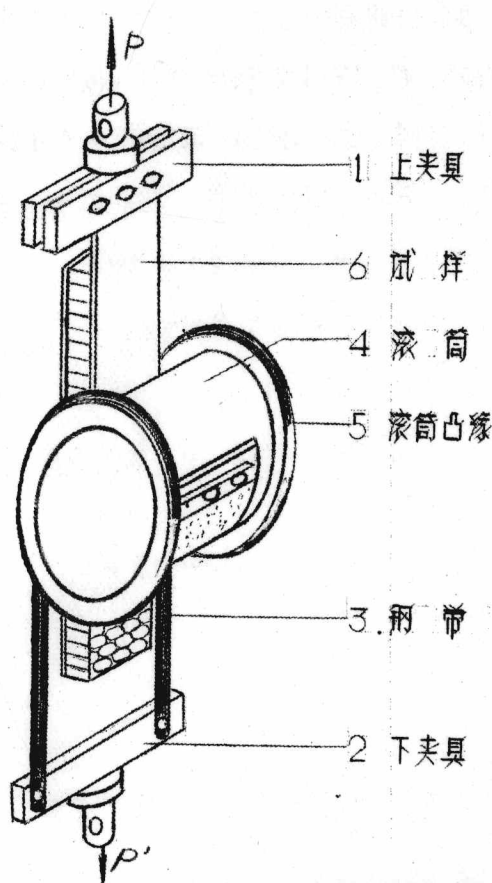
图四 厚蒙皮蜂窝夹层板剥离的 $P-l$ 曲线

三 初步分析与看法

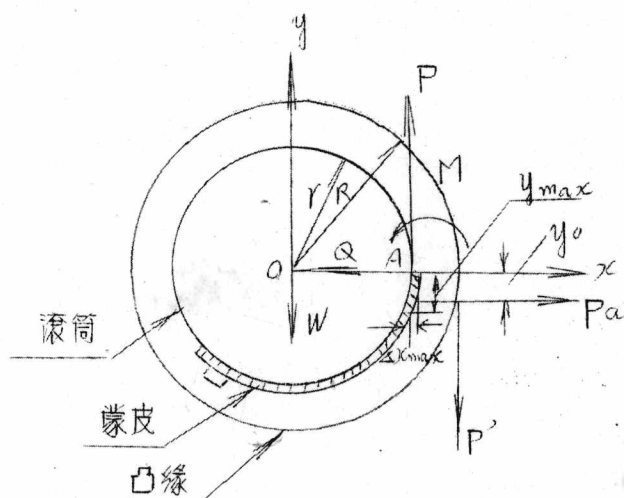
t. 初步分析

(1) 剥离强度计算公式的推导。

蜂窝夹层板蒙皮剥离试验的装置如图五所示。开动试验机后，下夹其向下匀速移动，而滚筒匀速向上滚动，结果蒙皮从蜂窝夹层板上剥离开。若在蒙皮与滚筒相切点 A 处剖开，把试样剪掉，代入作用内力，则在滚筒上作用的力如图六所示。图六中、 P 为上夹其上的拉力，即试验机上的荷载读数； P' 为下夹其两条钢带上的合力； M 为蒙皮的内弯矩； α 为蒙皮的内剪力；



图五 剥离试验的装置



图六 剥离时滚筒的受力简图

p_a 为蒙皮与蜂窝芯子胶层的总拉力，该力与图示的 x 轴的距离为 y_0 。这 y_0 取决于蒙皮与蜂窝芯子胶接的胶层的厚薄及其性能。 w 为滚筒的重量。试样的重量较轻，在分析时略去。由于滚筒处于匀速运动，所有的作用力应平衡，可以列出下列三个平衡方程式：

$$\sum x = 0 \quad p_a + a = 0 \quad (1)$$

$$\sum y = 0 \quad p - p' - w = 0 \quad (2)$$

$$\sum M_o = 0 \quad p r + M + p a y_o - p' R = 0 \quad (3)$$

$$\text{由 (2) 式得:} \quad p' = p - w \quad (2')$$

把 (2') 式代入 (3) 式得：

$$p a y_o = p(R - r) - wR - M \quad (4)$$

式中 $p a y_o$ 为蒙皮与蜂窝芯子的剥离力矩。 wR 是滚筒自重产生的力矩， M 是蒙皮本身弯曲成滚筒一样曲率半径时产生的弯矩。 wR 和 M 的数值可以从已剥离过的蜂窝夹层板重复试验一次来得到，此时，图六中的胶层作用力 p_a 已不存在，从方程式 (2)、(3) 中取消 p_a ，并用 p_o 、 p_o' 代替 p 、 p' ，最后求得：

$$p_o(R - r) = wR + M \quad (5)$$

则蜂窝夹层板剥离强度（单位宽度的剥离力矩）可以由 (4)、(5) 式最后得：

$$M = \frac{p a y_o}{b} = \frac{(p - p_o)(R - r)}{b} \quad (6)$$

式中 b 为试样宽度。

若试样的蒙皮较厚，钢带也较厚时，在计算剥离强度时，应计及其厚度的影响，此时，在 (3)、(4)、(5)、(6) 式中依次用 $(r + \frac{t_f}{2})$ 、 $(R + \frac{\delta}{2})$ 代替 r 、 R ，剥离强度的计算公式为：

$$M = \frac{(P - P_0) \left[\left(R + \frac{\delta}{2} \right) - \left(r + \frac{t_f}{2} \right) \right]}{b} \quad (7)$$

式中 δ 为钢带厚度, t_f 为蒙皮厚度。钢带厚度 δ 为 ≤ 0.2 毫米, 一般蒙皮的厚度 t_f 为 ≤ 1 毫米。滚筒直径 $d = 2r = 100$ 毫米, 滚筒凸缘直径 $D = 2R = 125$ 毫米。滚筒若蒙皮厚度 t_f 以 1 毫米计算, 计算公式 (6) 与 (7) 的相对误差为 3.2%。对于一般的夹层结构, 蒙皮均较薄, 因此用公式 (6) 计算误差较小。但是对较厚的蒙皮, 有一定误差。如我们这批不同蒙皮厚度的蜂窝夹层板, B 组的蒙皮实测厚度为 1.68 毫米, 按 (6) 式计算的剥离强度偏大 6%。

(2) 剥离试样蒙皮的极限厚度

作为剥离试验的试样, 主要是测定蒙皮与蜂窝芯子的粘接性能, 因此, 在试验过程中, 要求蒙皮本身不损伤。在剥离试验过程中, 要把蒙皮弯曲成曲率半径为滚筒半径的曲面, 弯矩与曲率半径有如下关系:

$$\frac{M(x)}{EJ} = \frac{1}{\rho(x)} \quad (8)$$

用 $\rho(x) = r$ 代入, 则得蒙皮的内弯矩为:

$$M = \frac{E_f J_f}{r} \quad (9)$$

式中 E_f 为蒙皮材料的弹性模量, J_f 为蒙皮的惯性矩, 为:

$$J_f = \frac{b t_f^3}{12}$$

被剥离的蒙皮承受着拉力 P (试验机的荷载读数) 和弯矩, 产生如下的正应力

$$\sigma_f = \sigma_f^P + \sigma_f^M = \frac{P}{b t_f} \pm \frac{1}{2} \frac{E_f t_f}{r} \quad (10)$$

从试验中的破坏现象可以发现，对于厚蒙皮，主要是在受压区的蒙皮表面层发白，因此，蒙皮的极限厚度为：

$$t_f^{ul} = \frac{2r\sigma_f^B}{E_f} \quad (11)$$

若取一般玻璃钢的弯曲试验结果：

$$E_f = 1.5 \times 10^5 \quad (\text{Kg/cm}^2)$$

$$\sigma_f^B = 3000 \quad (\text{Kg/cm}^2)$$

则求得： $t_f^{ul} = 2$ 毫米

从玻璃钢弯曲的破坏过程中可以看出，虽然一般玻璃钢的弯曲强度大于 3000 Kg/cm^2 ，但较早时在受压区就发响，发白，若取 σ_f^B 为 2500 ， $2000 (\text{Kg/cm}^2)$ ，求得蒙皮的极限厚度分别为 1.66 毫米， 1.33 毫米。由此可见，作为剥离试验的试样，其蒙皮厚度不宜过厚，应在 $t_f \leq 1$ 毫米内。试验也已表明，六层 $\alpha 2$ 毫米斜纹布蒙皮（实测玻璃钢厚度 t_f 为 1.68 毫米）剥离时已出现发响，发白现象。

(3) 影响蒙皮剥离强度的主要因素

从以上分析可知，在蒙皮厚度不超过极限厚度时，蒙皮厚度对剥离强度的影响是极小的。试验夹具，试验过程中的各因素，均是外因，并不是主要因素。影响剥离强度的主要因素，应该是内在因素，这主要包括以下几个方面：

4、胶粘剂方面。蜂窝夹层板蒙皮的剥离破坏如同其它胶接破坏一样，不外是两个方面，或是胶粘剂本身内聚力不够而破坏，或是胶粘剂与被胶粘的元件间的附着力不够而破坏。内聚力的大小主要取决于胶粘剂的性能。附着力的多少，不仅与胶粘剂有关，还与界面的特性有关。由于蒙皮在剥离时，有一定的剥离角，不论是那种破坏，与胶粘剂的性能都有直接关系。

蒙皮被滚筒剥离时，因受滚筒表面的拘束，因此剥离后成为曲率半径为

γ 的圆筒形曲面，而试样是很刚硬的（若不刚硬，试验方法要求胶上一块刚度较大的木板或夹层结构板），在剥离过程中，仍保持平直，如图五所示，则在剥离过程中蒙皮在水平方向的位移为：

$$\Delta x = r - \sqrt{r^2 - y^2} \quad (12)$$

在蒙皮与蜂窝芯子还连接的区域内，这位移是由二部分组成，一是胶层的变形，一是蜂窝芯子的变形。当两者均是完全弹性时，胶层刚破坏处的最大位移，近似地为：

$$\Delta x_{\max} = \Delta x_a + \Delta x_c = \sigma_c \left[\frac{(\frac{d}{c} + \cos \theta) \Delta \sin \theta}{(\frac{d}{c} + 1)} \left(\frac{c}{t_s} \right) \frac{t_a}{E_a} + \frac{h_c}{E_c} \right] \quad (13)$$

当峰高为正六边形时，则为：

$$\Delta x_{\max} = \sigma_c \left[0.65 \left(\frac{c}{t_s} \right) \frac{t_a}{E_a} + \frac{h_c}{E_c} \right] \quad (13')$$

式中， t_s, c, d, θ 如图一所示依次是峰壁厚度、单层、双层峰壁的峰格边长、单层峰壁夹角的二分之一。 t_a, E_a 是胶层的厚度和弹性模量。 h_c, E_c 为蜂窝芯子的高度和弹性模量。 σ_c 为蜂窝夹层板的平拉强度。把 (13') 式代入 (12) 式，最后求得：

$$y_{\max} = \sqrt{2r\sigma_c \left[0.65 \left(\frac{c}{t_s} \right) \frac{t_a}{E_a} + \frac{h_c}{E_c} \right] - \sigma_c^2 \left[\left(\frac{c}{t_s} \right) \frac{t_a}{E_a} + \frac{h_c}{E_c} \right]^2} \quad (14)$$

括号内第二项相对第一项而言，是很小，可以略去，则：

$$y_{\max} = \sqrt{2r\sigma_c \left[0.65 \left(\frac{c}{t_s} \right) \frac{t_a}{E_a} + \frac{h_c}{E_c} \right]} \quad (14')$$

$y_{\max}$ 的物理意义是从液筒表面与蒙皮的相切点 A 到层胶最后剥离破坏点的距离，如图六、图八所示。由 (14') 式可以看出，当平拉强度越高时， y 值越大，因此，剥离强度也越高。

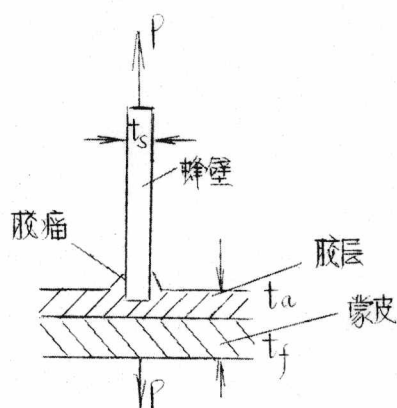
当胶粘剂是弹塑性或完全塑性材料，而蜂窝芯子仍是当作完全弹性时，可以用胶粘剂的极限应变 ε_a^{ul} 来计算，最后求得：

$$\gamma_{max} = \sqrt{2\gamma(\varepsilon_a^{ul} t_a + \varepsilon_c h_c) - (\varepsilon_a^{ul} t_a + \varepsilon_c h_c)^2} \quad (15)$$

同样略去根号内的第二项，则得：

$$\gamma_{max} = \sqrt{2\gamma(\varepsilon_a^{ul} t_a + \varepsilon_c h_c)} \quad (15')$$

式中 ε_c 是蜂窝芯子相对于平均拉强度 σ_c 的应变。如图七所示，蜂壁与蒙皮胶接面积与成型工艺有关。胶接的宽度可以按下式估计：



$$t_b = t_s + \varphi t_a \quad (16)$$

式中 φ 为与成型工艺有关的常数。对于有胶膜而无胶瘤的蜂窝夹层板， φ 近似地取 2，对于有胶膜，又有胶瘤的， φ 可取 3~4。对于湿法成型的上蒙皮，在没有进行专门措施的情况下， φ 值基本上可以当作零。则 ε_c 为：

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\varepsilon_a \cdot E_a \left(\frac{d}{c} + 1\right) \left(\frac{t_s + \varphi t_a}{c}\right)}{E_c \left(\frac{d}{c} + \cos\theta\right) \sin\theta} \quad (17)$$

当蜂窝为正六边形时，则为：

$$\varepsilon_c = \frac{1.54 \varepsilon_a E_a}{E_c} \left(\frac{t_s + \varphi t_a}{c}\right) \quad (17')$$

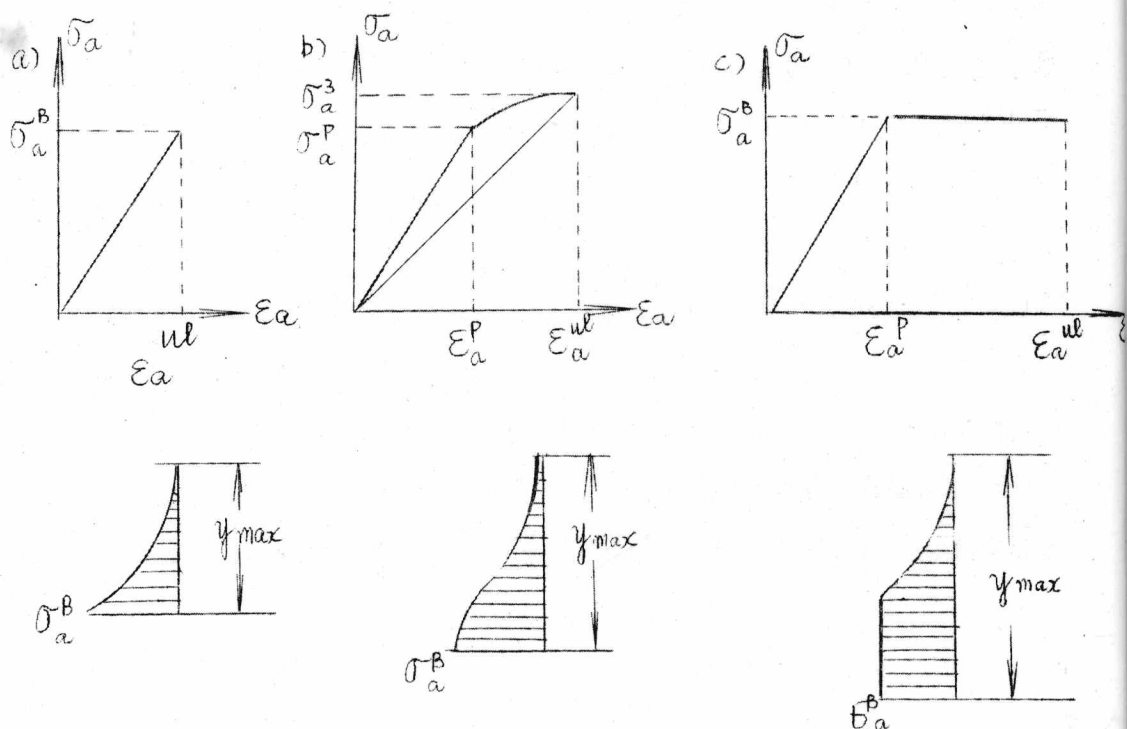
把 (17') 式代入 (15') 式中，则得

$$\gamma_{max} = \sqrt{2\gamma \left[\varepsilon_a^{ul} t_a + \frac{1.54 \varepsilon_a E_a h_c}{E_c} \left(\frac{t_s + \varphi t_a}{c}\right) \right]} \quad (18)$$

式中 ε_a 对于弹塑性与完全塑性是不同的。对于弹塑性材料， ε_a 可以

取 ε_a^{ul} , 但是 E_a 不再是弹性阶段的弹性模量, 而是用破坏时的割线模量代入。对于完全塑性材料, ε_a 是用弹性阶段的比例极限应变代入, E_a 仍是弹性阶段的弹性模量。

用不同性能胶粘剂制成的蜂窝夹层板, 蒙皮剥离时, 胶层上的应力分布示意图如图八所示。



图八 剥离时胶层中应力分布的示意图

从以上初步分析可知, 为了提高蒙皮与蜂窝芯子的胶接强度, 应选用韧性的胶粘剂。

B、成型工艺方面, 在树脂、胶粘剂品种, 配方已选定的情况下, 成型工艺主要是树脂含量的控制, 胶层厚度的选择, 玻璃布表面处理, 产品成型的加压条件及热处理条件等几方面。总的目的除非是以下两个方面: 一方面通过适当的成型工艺, 使固化后的树脂、胶粘剂有很好的性能, 另一方面是