

玻璃钢蜂窝夹层梁弯曲试验小结

上海新华玻璃厂研究所

一九七七年五月

目 录

一、概 述	1
二、试 验	1
1. 试样的制备	1
2. 试验方法	2
三、试验结果	3
1. 支距 l 改变的试验结果	3
2. 蜂窝夹层高度改变的试验结果	3
3. 蒙皮厚度改变的试验结果	4
4. 蜂格大小改变的试验结果	5
5. 蜂窝夹层深弯曲的电测结果	5
6. 试样破坏现象及看法	14
四、初步分析	15
1. 蜂窝芯子的剪切强度	17
2. 蒙皮的正应力	20
五、初步看法	23

玻璃钢蜂窝夹层梁弯曲试验小结

一、概述

根据“全国玻璃钢性能测试会议纪要”的要求，对玻璃钢蜂窝夹层梁弯曲试验进行了一些补充试验，自1976年以来进行了100多根不同蒙皮厚度，不同支距的弯曲试验，并进行20多根电测试验。自1971年10月以来，结合产品反测试方法研究，先后共进行了600多根玻璃钢蜂窝夹层梁的弯曲试验。试样有不同蜂格（蜂格边长 c 为3~15毫米），不同蜂窝高度（ h_c 为6~30毫米），不同蒙皮厚度（ t_f 为0.5~1.5毫米）不同支距（ l 为8~54厘米），不同宽度（ b 为4~10厘米），不同成型工艺等，进行弯曲强度及弯曲刚度试验。测试蒙皮的抗弯强度，蜂窝芯子的抗剪强度、以及蜂窝夹层梁的弯曲刚度和剪切刚度。以下进行一次小结，并对蒙皮强度进行一些初步分析，以供讨论测试方法及设计分析时参考。

二、试验

1. 试样的制备

结合产品的试样，试样的成型工艺与产品的成型工艺相同。补充试验的试样是307#聚酯，冷固化湿法成型，环己酮为3.5%，苯酸钴为3~3.5%，蜂窝芯子是用0.2毫米平纹布，蜂格边长 c 为8毫米。A、B、C三组试样的蜂窝芯子是机械印胶的，D组是手工印胶。蒙皮是用1:1无碱0.2毫米斜纹布，A组是二层布，B组是六层布，C、D组是四层布。成型好后加0.03 Kg/cm^2 的接触压力。成型时环境除B组是天晴外（苯酸钴为3%），其它几组均天阴雨（苯酸钴为3.5%）。

试样经水冷却砂轮加工后，除拉伸试样外，均不经热处理，自然干燥处理。

试样四月份成型，五月份加工，六月份开始试验。

2. 试验方法

试验按“玻璃钢蜂窝夹层结构测试方法”进行。试验结果按下列计算公式进行计算：

$$\text{蜂窝芯子的剪切强度: } \tau_c = \frac{P_B}{2b(h-t_f)} \quad (1)$$

$$\text{蒙皮的弯曲强度: } \sigma_f = \frac{P_B l}{4bt_f(h-t_f)} \quad (2)$$

三点弯曲测得的蜂窝芯子剪切模量：

$$G_c = \frac{pl}{4b(h-t_f)(f_{\text{中}} - \frac{pl^3}{48E_f J})} \quad (3)$$

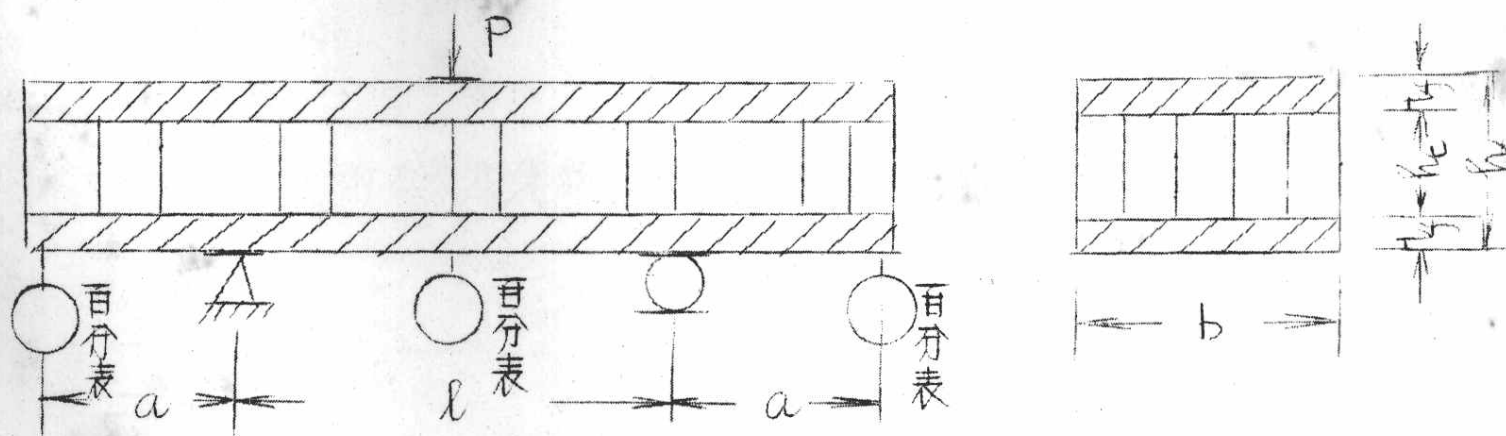
三点外伸弯曲测径：

$$\text{蒙皮的弹性模量: } E_f = \frac{pl^2 a}{16J f_{\text{外}}} \quad (4)$$

蜂窝芯子的剪切模量：

$$G_c = \frac{pl}{4b(h-t_f)(f_{\text{中}} - \frac{l}{3a} f_{\text{外}})} \quad (5)$$

式中 J 为蜂窝夹层梁的惯性矩， $J = \frac{1}{2} b t_f (h - t_f)^2$ ，其它符号见图一所示。



图一、三点外伸弯曲的示意图

三. 试验结果

1. 支距 l 改变的试验结果

同样的蜂窝夹层结构试样，改变三点弯曲支距的试验结果如表 1、2 所示。表 1 中的试样是 DAP 蒙皮，三层 0.2 毫米斜纹布，蜂窝芯子用 C-184 浸渍，蜂窝边长同样是 $c=8$ 毫米，玻璃布是 0.2 毫米平纹布。该组试样均是蒙皮与蜂窝芯子脱胶。表 2 为 307# 聚酯湿法成型冷固化。

支距 l 改变的试验结果之一

表 1

性能 \ 支距 l (cm)	15	20	25	30	35	40	44
蒙皮应力 σ_f	557	762	782	937	955	1112	1064
蜂窝芯子剪切应力 τ_c	6.2	6.1	5.3	5.1	4.6	4.4	3.9

注：1) 试样为纬向

2) 每组试样数量为 5 根，以下表中不注明的，均指 5 根试样的平均值。

支距 l 改变的试验结果之二

表 2

性能 \ 支距 l (cm)	16	40	54
蒙皮应力 σ_f	191	478	533
蜂窝芯子剪切应力 τ_c	2.40	2.38	1.98

注：1) 试样为 C 组纬向。

3) 每组试样数量为 3 根。

2. 蜂窝夹层高度改变的试验结果

蜂窝夹层架仅高度改变，其它一样的试验结果如表 3 所示。表 3 中的试样同表 1。

蜂窝夹层高度改变的试验结果

表3

性能 试样尺寸及试验条件	蜂窝高度 h_c (cm)				
	3	2.5	2	2	1.5
性能 (kg/cm ²)	试样宽度 $b=7\text{cm}$, 蒙皮厚度 $t_f=0.08\text{cm}$ (三层 2mm 布)			$b=7\text{cm}$, $t_f=0.056\text{cm}$ (二层 2mm 布)	
蒙皮应力 σ_f	618	797	998	1010	1150
蜂窝芯子剪切应力 τ_c	2.4	4.4	5.4	3.9	4.2

注：1) 试样为纵向，支距 $l=30\text{cm}$

3. 蒙皮厚度改变的试验结果

蜂窝夹层系仅蒙皮厚度变化，其它一样的试验结果如表 4.5 所示。表 4 为补充试验的试样。表 5 与表 1 的成型工艺相同。

蒙皮厚度改变的试验结果之一

表4

性能	组别	A (二层布)				B (六层布)		C (四层布)		D (四层布)	
		经向		纬向		经向		纬向		经向	
σ_f (kg/cm ²)	经向	1530		767		633		935			
	纬向	1142		400		533		534			
τ_c (kg/cm ²)	经向	2.8		4.3		2.3		3.5			
	纬向	2.1		2.2		2.0		2.0			

注：1) 试样宽度 $b=8\text{cm}$ ，蜂窝高度 $h_c=2\text{cm}$ ，支距 $l=54\text{cm}$ 。

2) 试验室温度 31°C ，湿度 76% 。

蒙皮厚度改变的试验结果之二

表5

性能	蒙皮厚度 t_f (cm)	0.05 (二层布)	0.08 (三层布)	0.10 (四层布)
	蒙皮应力 σ_f (Kg/cm ²)	1010	998	813
蜂窝芯子剪切应力 τ_c (Kg/cm ²)		3.9	5.4	5.3

注：1) 试样为纵向。

2) 试样的宽度 $b=7\text{cm}$ ，高度 $h=2\text{cm}$ ，支距 $l=30\text{cm}$ 。

4. 蜂格大小改变的试验结果

蜂窝夹层梁仅蜂格大小改变，其它条件一样的试验结果如表 6 所示。

蜂格大小改变的试验结果

表 6

性能 \ 蜂格边长 c (mm)		8	10	12	15
蒙皮应力 σ_f (Kg/cm ²)	经向	1628	1077	655	471
	纬向	1022	642	292	248
蜂窝芯子剪切 应力 τ_c (Kg/cm ²)	经向	5.9	4.0	2.4	1.8
	纬向	3.8	2.4	1.1	0.9

注：1) 试样为 307# 聚酯湿法冷固化成型。

2) 试样宽度 $b=8\text{cm}$ ，高度 $h=3\text{cm}$ ，蒙皮厚度 $t_f=0.1\text{cm}$ ，
支距 $l=54\text{cm}$ 。

3) 试验是试样成型好一年后再进行，试验室温度为 13°C ，湿度
为 90%。

5. 蜂窝夹层梁弯曲的电测试验结果

(1) 不同支距的电测结果

同样的蜂窝夹层梁，改变支距 l 时的电测结果如表 7 所示。此试样为 C
组纬向，电阻应变片的布置如图二所示，电阻应变片为 $2.8 \times 15(\text{mm})$ 。

不同支距的电测结果与计算结果比较

表 7

性能			支距 l (cm)	16		40		54	
				$\frac{l}{2}$ 处	$\frac{l}{4}$ 处	$\frac{l}{2}$ 处	$\frac{l}{4}$ 处	$\frac{l}{2}$ 处	$\frac{l}{4}$ 处
蒙皮应力	实 测 值	①	658	105 (227)	712	214 (240)	702	266 (337)	
		②	602	98 (132)	840	307 (415)	758	243 (249)	
σ_f (Kg/cm ²)	计 算 值	①	209	104.5	430	215	441	220.5	
		②	185	92.5	462	231	480	240	
实测值为计算值的 百分比 (%)			①	315	101 (217)	165	99 (112)	159	120 (153)
			②	325	106 (143)	182	133 (179)	158	101 (104)
实测时的荷载相对于 破坏荷载的百分比 (%)			①	97		83		93	
			②	97		100		94	

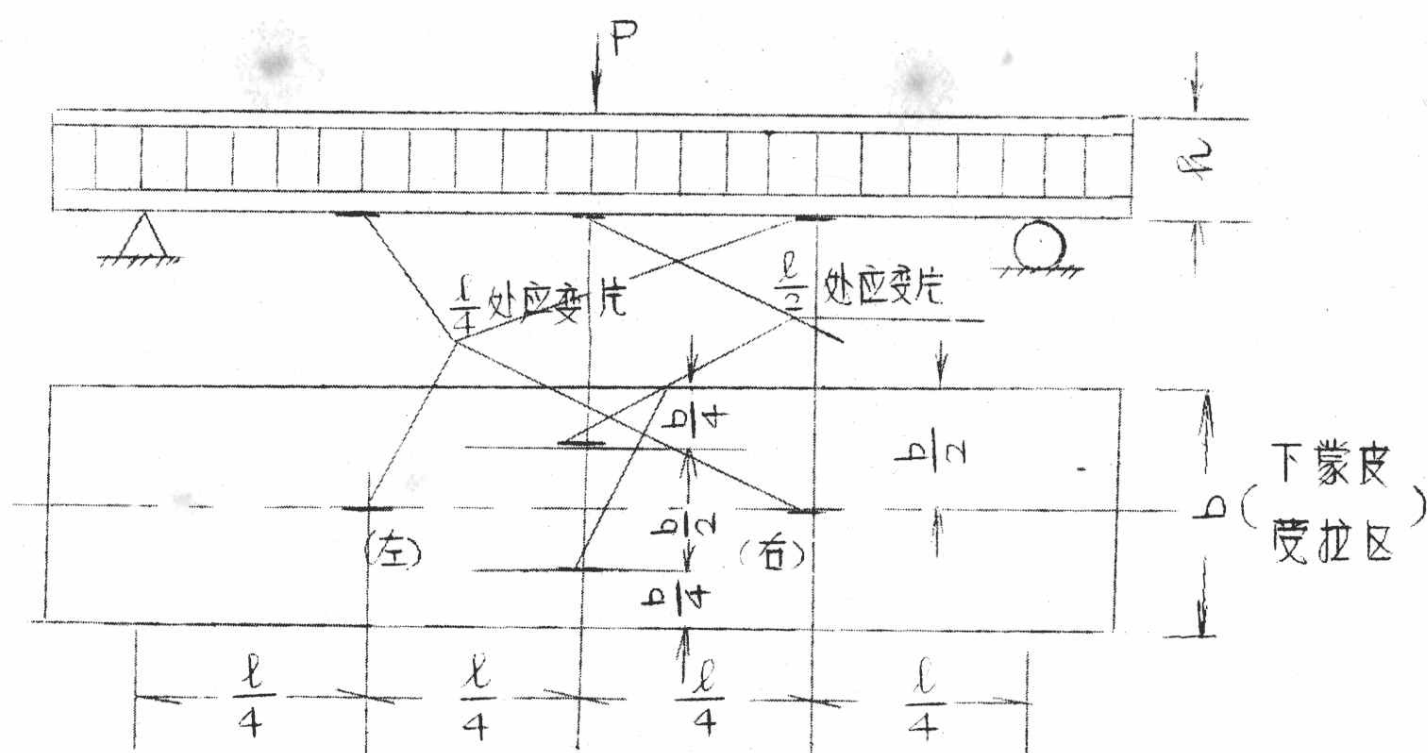
注：1) $\frac{l}{2}$ 处的电测结果是由二片应变片测得的平均值。 $\frac{l}{4}$ 处的电测结果是由左右 $\frac{l}{4}$ 处的二片应变片测得的平均值。() 内是左右较大者的电测结果。

2) 计算值是按公式 (2) 计算。实测值按 $\sigma_f = \epsilon E_f$ 计算、 E_f 取侧压试验结果， $E_f = 1.45 \times 10^5$ (Kg/cm²)。

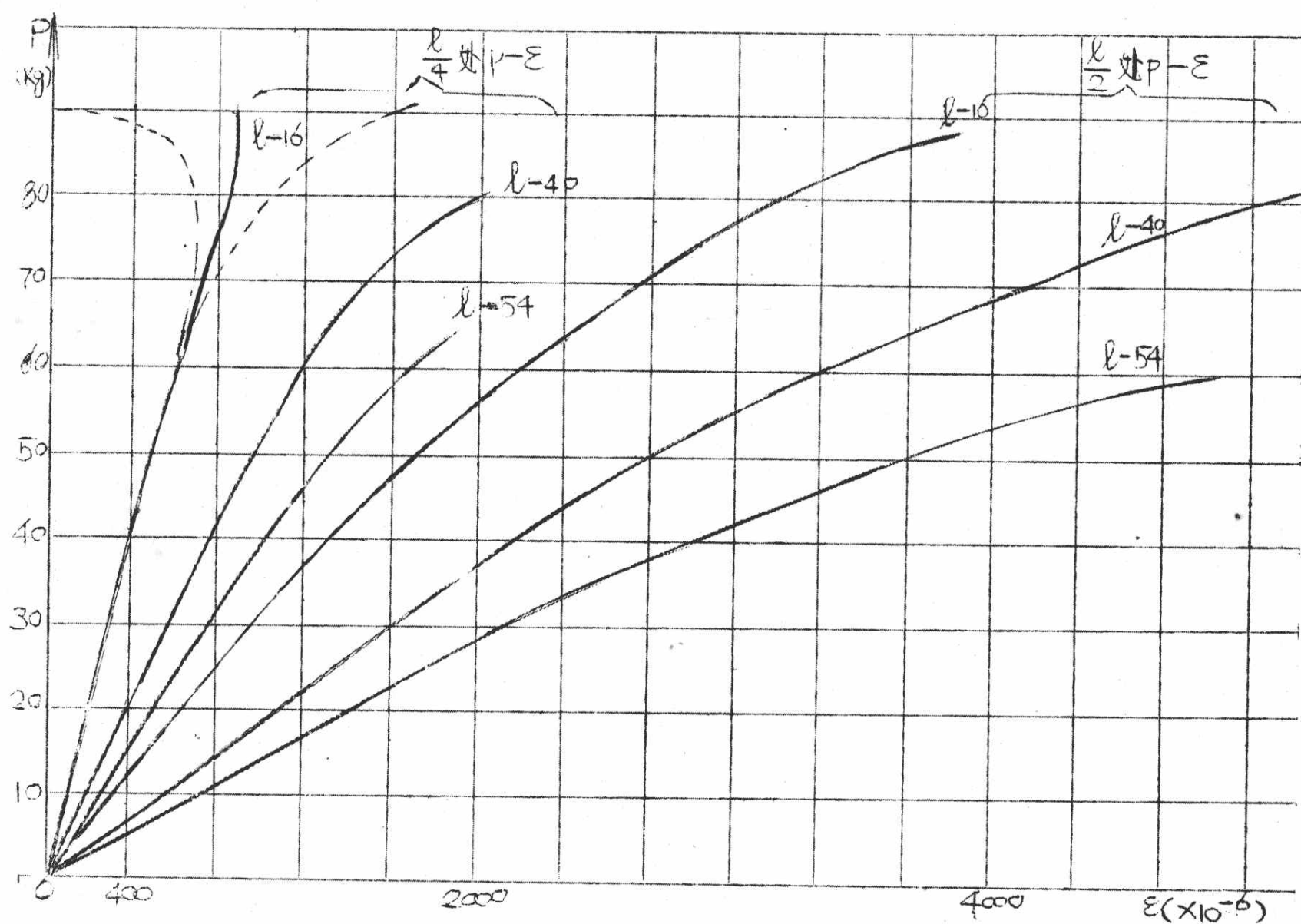
3) 试验室温度 31°C ，湿度 80%。

蜂窝夹层梁弯曲电测结果的荷载—应变 ($P-\epsilon$) 曲线如图三所示。图中虚线是左右 $\frac{l}{4}$ 处的电测结果。当蜂窝已剪切失稳后，左右变形开始出现不对称 (当然，若蜂窝芯子不均匀，一开始加载，就出现较明显的不对称变形) 越接近破坏，不对称变形越明显。

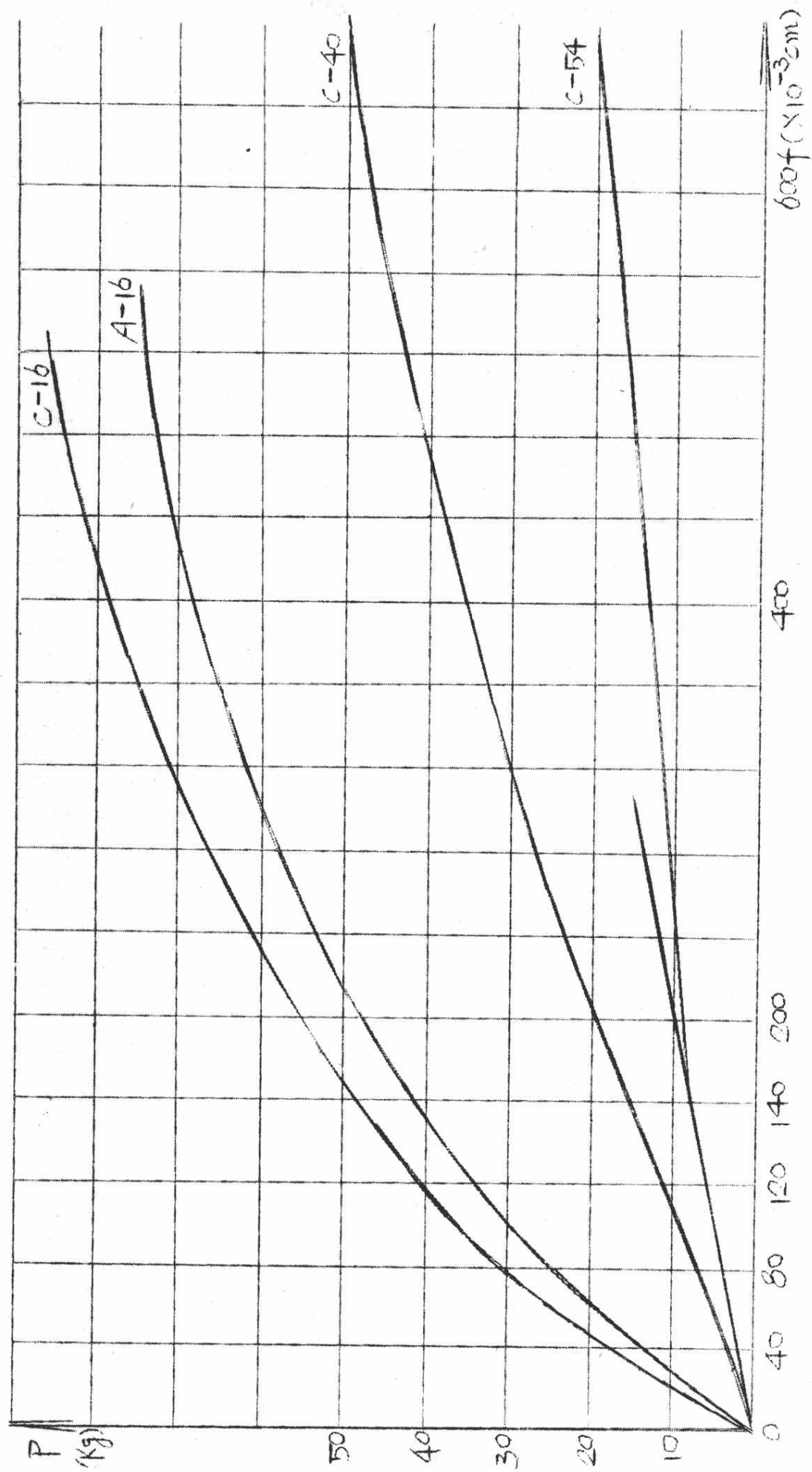
不同支距蜂窝夹层梁弯曲的荷载—挠度 ($P-f$) 曲线，如图四所示。



图二、三点弯曲电测时应变片布置的示意图



图三 不同支距蜂窝夹层梁弯曲的 $P-\epsilon$ 曲线
(支距 l 的单位是厘米)



图四 不同支距蜂窩夹层梁弯曲的 P- δ 曲线

(2) 不同蒙皮厚度的电测结果

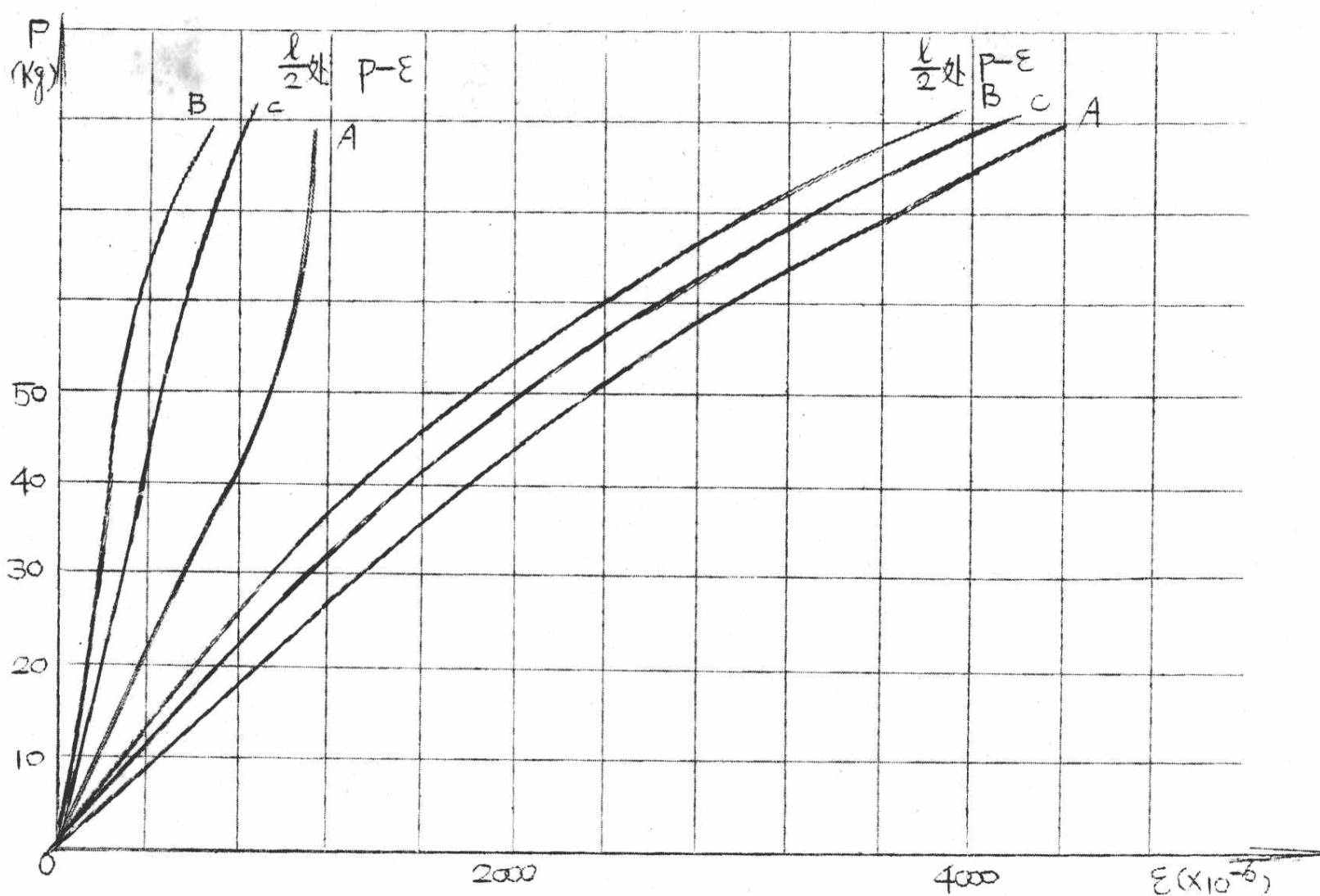
不同蒙皮厚度蜂窝夹层深弯曲的电测结果如表 8 所示。电测得到的 $p-\varepsilon$ 曲线如图五所示。试样支距 $l=16cm$ 。

不同蒙皮厚度的电测结果与计算结果比较

表 8

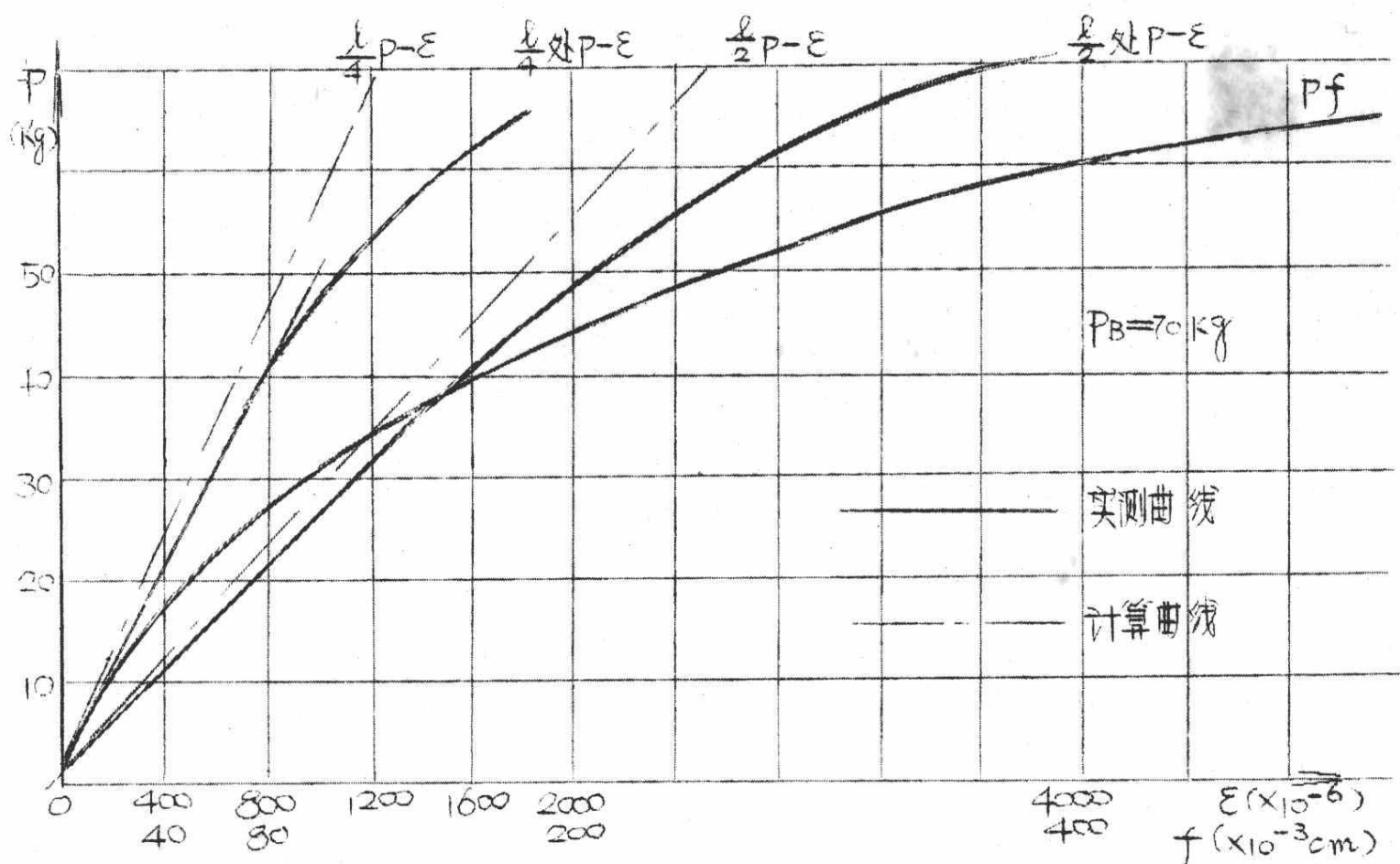
组 别 性 能			A (三层布)		B (六层布)		C (四层布)	
			$\frac{l}{2}$ 处	$\frac{l}{4}$ 处	$\frac{l}{2}$ 处	$\frac{l}{4}$ 处	$\frac{l}{2}$ 处	$\frac{l}{4}$ 处
蒙皮应力 $\sigma_f(Kg/cm^2)$	实 测 值	①	597	159 (214)	764	91 (104)	658	105 (227)
		②	596	265 (321)	658	110 (138)	/	/
		③	766	268 (369)	763	103 (104)	602	98 (132)
	计 算 值	①	425	212	132	66	209	104
		②	368	184	124	62	/	/
		③	425	212	120	60	185	93
实测值为计算值的 百分比 (%)		①	140	75 (101)	580	138 (158)	315	101 (217)
		②	162	144 (175)	530	178 (223)	/	/
		③	180	126 (174)	635	172 (173)	325	106 (143)
实测时的荷载相对 于破坏荷载的百分 比 (%)		①	100		88		97	
		②	100		94		/	
		③	100		84		97	

注：注解同表 (7)。

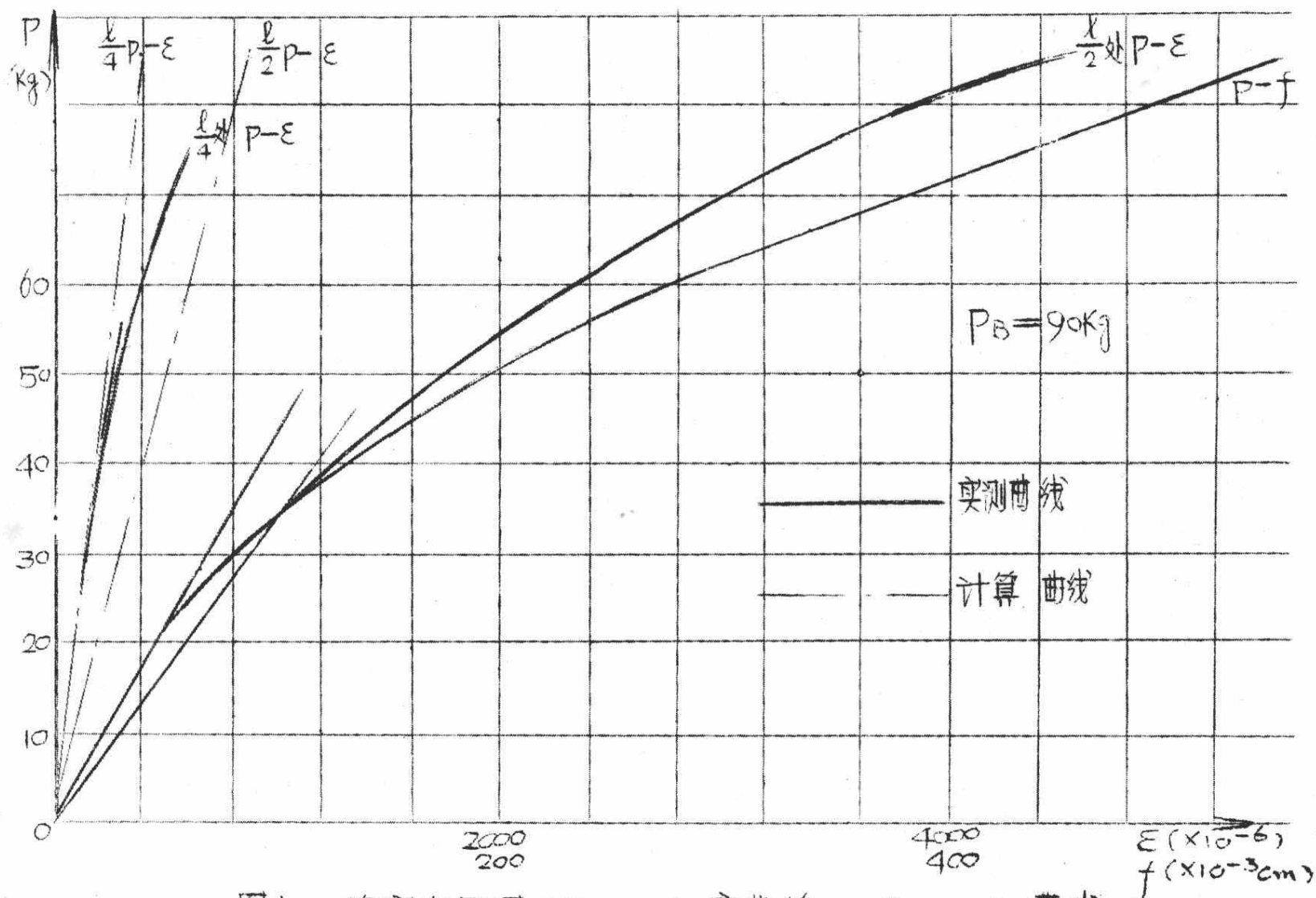


图五 不同蒙皮厚度蜂窝夹层梁弯曲的 $P-\epsilon$ 曲线

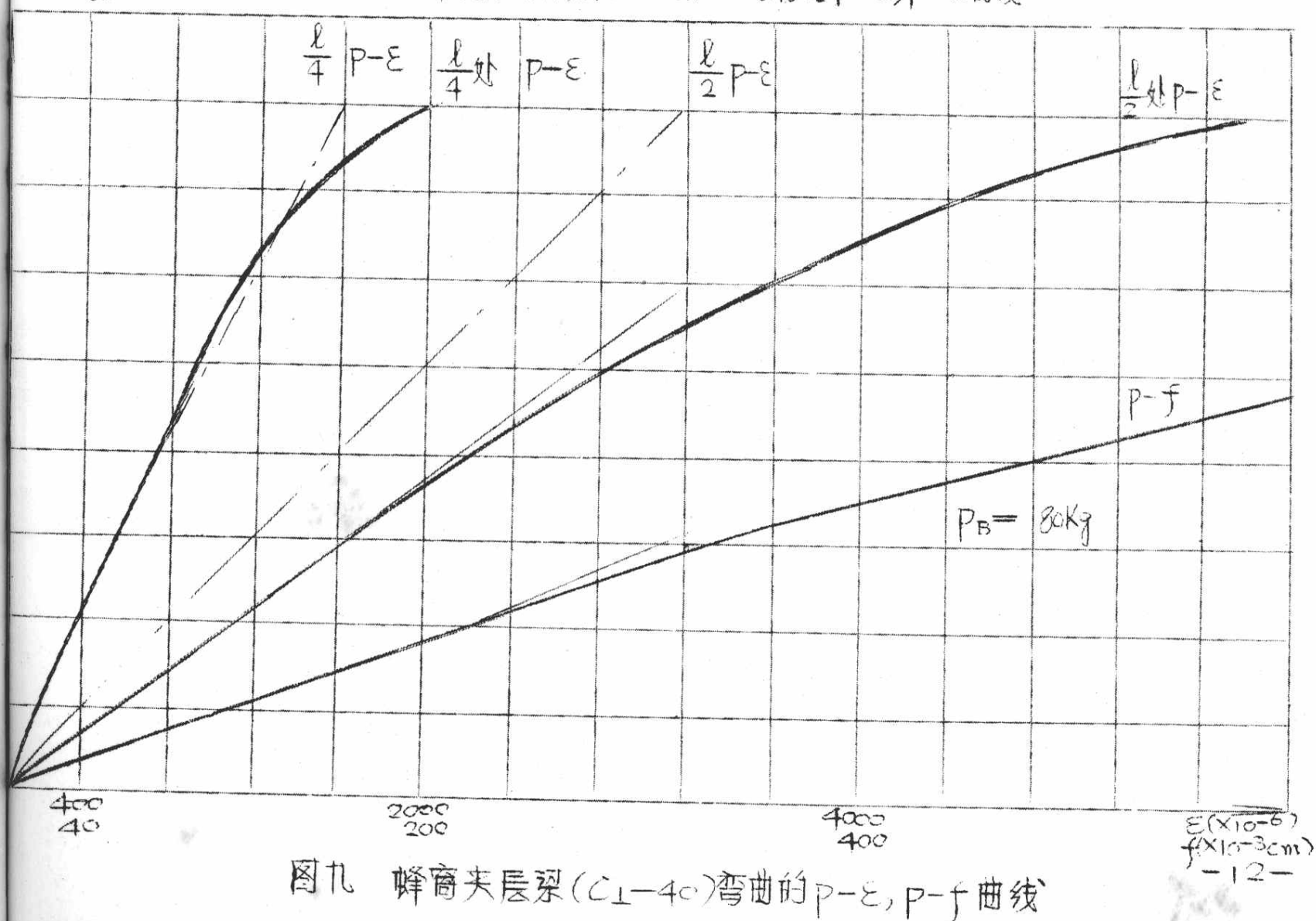
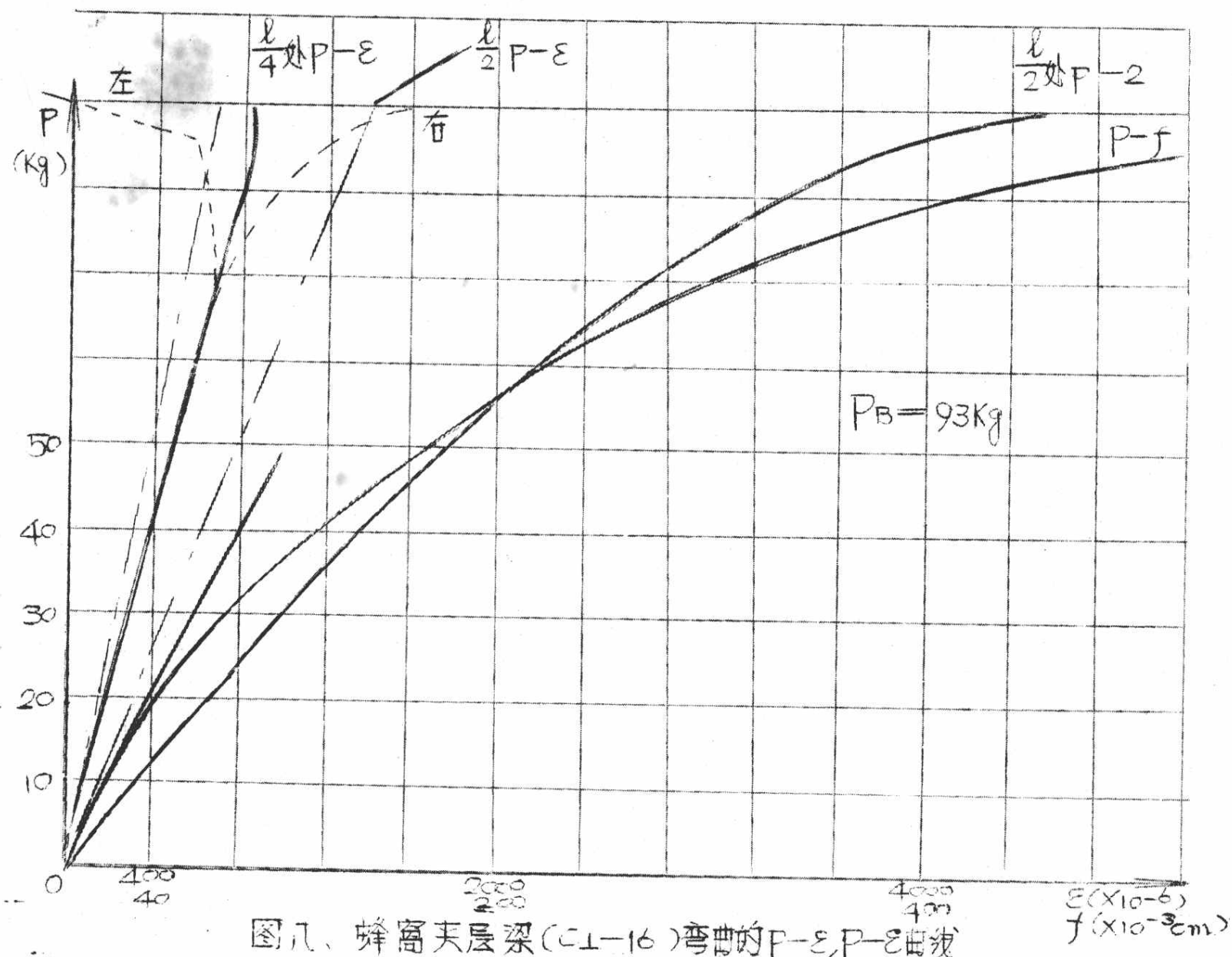
几根不同支距，不同蒙皮厚度蜂窝夹层梁弯曲的 $P-\epsilon$ ， $P-f$ 曲线如图六~十所示。试样编号中的字母表示蒙皮厚度不同（A者： $t_f=0.05cm$ ，B者： $t_f=0.15cm$ ，C者： $t_f=0.10cm$ ），字母后面的数字表示支距。

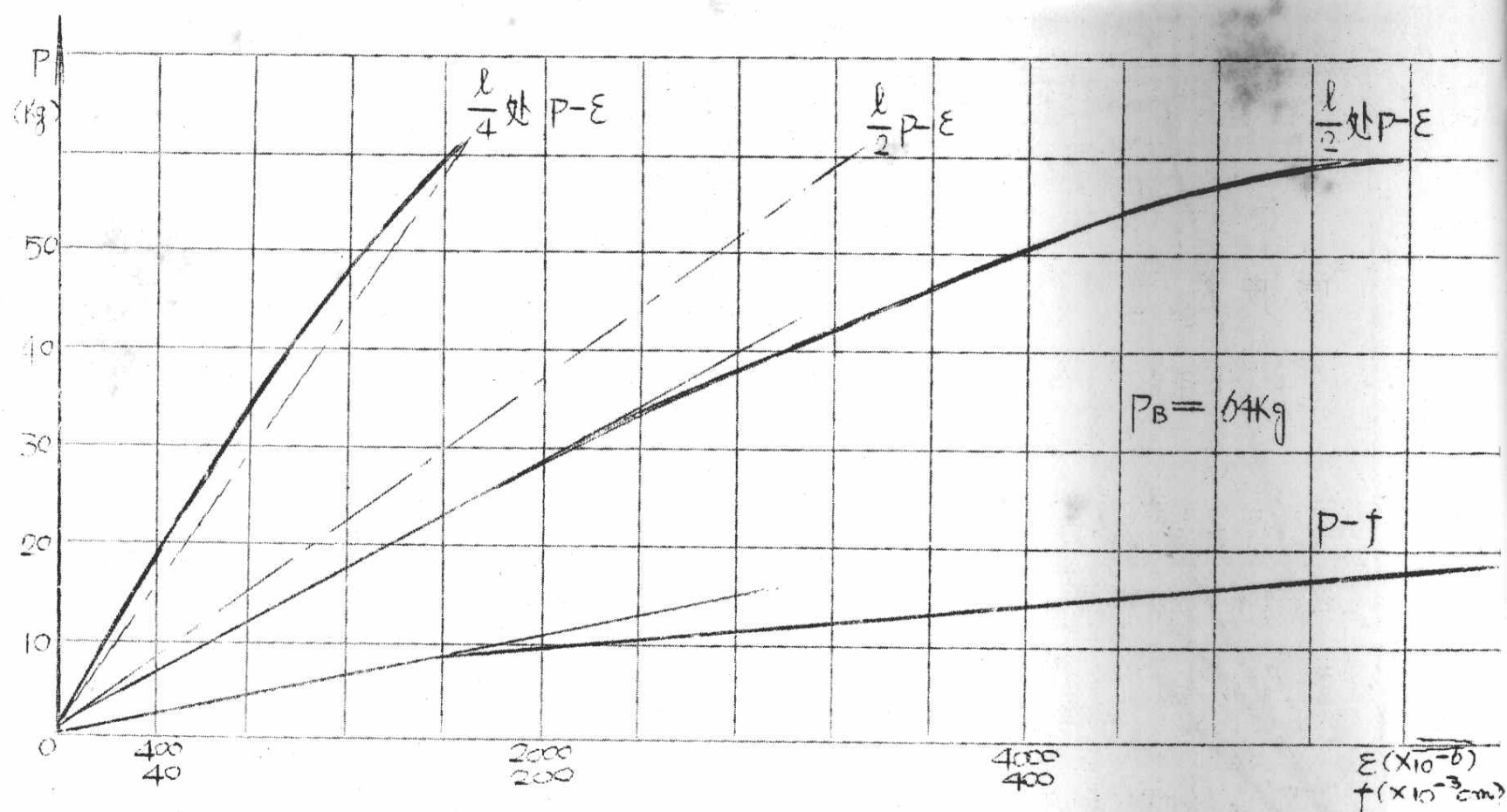


图六 蜂窝夹层梁(AL-16)弯曲的 $P-\epsilon$, $P-f$ 曲线



图七 蜂窝夹层梁(BL-16)弯曲的 $P-\epsilon$, $P-f$ 曲线





图十 蜂窝夹层梁 (C1-54) 弯曲的 $P-\varepsilon$, $P-f$ 曲线

(3) 不同蜂格的电测结果

不同蜂格蜂窝夹层梁弯曲的电测结果列在表9中。这组试样是307#聚酯湿法冷固化，试验是在相隔一年后测的。

不同蜂格蜂窝夹层梁弯曲的 $P-\varepsilon$ 曲线如图十一所示。

不同蜂格大小的电测结果与计算结果比较

表 9

性能		蜂格边长C(mm)	8	10	12	15
蒙皮应力 σ_f (Kg/cm ²)	实 测 值	①	906 (1127)	522 (547)	413 (468)	253
		②	/	568 (593)	285 (323)	225
	计 算 值	①	963	544	346	236
		②	/	666	265	203
实测值为计算值的百 分比 (%)		①	94 (117)	96 (101)	119 (135)	108
		②	/	84 (89)	108 (122)	111
实测值时的荷载为破 坏荷载的百分比 (%)		①	94	90	100	100
		②	/	86	90	92

注：1) 试样宽度 $b=8\text{cm}$ ，高度 $h=3\text{cm}$ ，蒙皮厚度 $t_f=0.1\text{cm}$ ，支距 $l=54\text{cm}$ 。试样纬向，应变片为 $3\times 5\text{mm}$ 。

2) 实测值按 $\sigma_f = \varepsilon E_f$ 计算， E_f 取蒙皮拉伸测试结果 $E_f = 1.35 \times 10^5 (\text{Kg/cm}^2)$ 。() 内的值， E_f 取侧压的测试结果。

3) 试验室温度 13°C ，湿度 93% 。

6. 试样破坏现象反看法

(1) 试样的破坏现象

蜂窝夹层梁弯曲破坏现象可分为三类：

a) 蒙皮破坏。当蒙皮比较薄，蜂格边长比较短，蜂窝高度比较低时，能发生蒙皮破坏，一般是上蒙皮（受压区）靠近加载压头附近折断，或下蒙皮（受拉区）当中拉断。如用 618 环氧湿法冷固化成型的蜂窝夹层梁试样，试样宽度 $b=6\text{cm}$ ，高度 $h=1.1\text{cm}$ ，支距 $l=50\text{cm}$ ，蜂格边长 $C=4.5\text{mm}$ ，蜂壁用 0.12mm 平纹布。下蒙皮当中拉断时的抗弯强度为

1814 Kg/cm^2 。

b) 蜂窝芯子剪切破坏而失去承载能力。我们所进行试验过的大多数试样，当荷载加到破坏荷载的 $30\sim 40\%$ 时，单层蜂壁出现 45° 方向半波的剪切失稳，随着荷载增大， 45° 方向半波形增大，然后发响、发白、最后失去承载能力。

c) 蒙皮与蜂窝芯子脱胶。当蒙皮与蜂窝芯子间无胶膜、由于流胶现象，很容易发生这种脱胶的破坏形式。破坏往往发生在成型的上蒙皮上。表1这组试样，主要发生这类破坏。

(2) 从试验结果得出以下看法：

a) 随着支距 l 的增加，破坏时蒙皮应力增加（实测的 $p-\varepsilon$ 曲线与计算的 $p-\varepsilon$ 曲线差距缩小），蜂窝芯子的剪应力降低，挠度增大。（表1、2，图三、四， $l\sim 10$ ）。

b) 随着试样高度 h 的减小，破坏时蒙皮应力增加，蜂窝芯子剪应力也增加（表3）。

c) 随着蒙皮厚度的增加，破坏时蒙皮应力减小（实测的 $p-\varepsilon$ 曲线与计算的 $p-\varepsilon$ 曲线差距增大），而按公式(1)计算的蜂窝芯子剪应力增加（表4、5 图六~八）。

d) 随着蜂格增大，破坏时蒙皮应力减少， $p-\varepsilon$ 曲线的非线性程度增加，蜂窝芯子剪应力也降低（表6、图十一）。

e) $\frac{l}{4}$ 处的电测结果，相对 $\frac{l}{2}$ 处而言，与计算结果较符合。支距 l 较短时，电测结果大于计算值，随着 l 的增大，与计算值较符合（图八~十）。

四、初步分析

从以上试验结果说明影响蜂窝夹层梁的性态的因素是很多的，我们遵循毛主席关于“研究任何过程，如果是存在着两个以上矛盾的复杂过程的话，就要用全力找出它的主要矛盾”。从大量的玻璃钢蜂窝夹层梁的试验结果