

机头罩用玻璃钢蜂窝夹层板性能研究

上海玻璃钢研究所 周祝林 万友生^①

本文介绍机头罩用的玻璃钢蜂窝夹层结构的介电和力学性能, 讨论各参数对性能的影响及理论与实测值的比较。通过研究可以得出组份材料性能和结构尺寸参数对性能的关系, 在此基础上可以进行最优参数的选择, 设计出高质量的机头罩。

Study of the Properties of GRP Sandwich Structure with Honeycomb Core for Aircraft Nose

Zhou Zhulin Wan Yousheng
(Shanghai Research Institute of GRP)

The dielectric and mechanical properties of GRP sandwich structure with honeycomb core for aircraft nose are presented in this paper. The effect of the parameters on the properties, and the comparison between the theoretical and experimental values are discussed. The relationship of the properties of component material and the parameters of structural dimension may be got through the research. On this basis, we may select the optimum parameters for the design of aircraft nose with good quality.

一、前 言

为了使飞机雷达罩更好地满足气动力和透波性能的要求, 我所对一批机头罩材料的基本性能进行了测试, 比较了各种方案的性能数据, 从而选取了比较合适的材料和参数。更重要的是, 测试不同组份、不同结构形式的材料, 研究材料和结构本身的客观规律, 就可在此规律的基础上进行最优参数的选择, 设计出高质量的机头罩, 为发展我国航空工业作出应有的贡献。

二、试验结果

1. 电性能的试验结果

(1) 面板及蜂窝芯子的电性能测试结果列于表

1. 面板板材用 0.21mm 的 1:1 斜纹布制成, 经

A-151 处理。

(2) 蜂窝夹层结构板的透波性 (3.2cm 波长时) 列于表 2。

2. 力学性能的试验结果

(1) 面板板材的测试结果列于表 3。试样用 0.23mm 的 4:1 无碱单向布加 DAP 制成。玻璃布经沃蓝处理。

(2) 蜂窝芯子的力学性能

蜂窝芯子的力学性能列于表 4。蜂窝高度 h_c 为 8mm, 面板名义厚度 t_f 为 1.2mm。

(3) 夹层结构的力学性能

夹层结构的力学性能试验结果列于表 5。

三、试验结果的初步分析

1. 电性能

表 1 DAP 面板和蜂窝芯子的介电性能的测试结果

材料	面 板		蜂 窝 芯 子							
性能	ϵ_f	$\text{tg}\delta_f \times 10^{-2}$	ϵ_c				$\text{tg}\delta_c \times 10^{-3}$			
蜂格边长 C(mm)			2.5	2.7	3	4	2.5	2.7	3	4
平均值	4.30	1.11	1.133	1.14	1.14	1.107	3.59	4.26	3.77	2.68

^①杨云娣、钟天麟、魏君南等同志参加试验。

表 2 蜂窝夹层板透波率的试验结果

蜂格 边长 mm	极化 方向	蜂窝 方向	入 射 角 θ									
			0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
			$ T ^2$									
2.5	平行	经	82.5	85	87.6	92.9	94.9	96.5	97	89	82	40
		纬	80	80.2	85	90.8	95	98.9	98	91.5	78.8	29
	垂直	经	75	79	80.8	82.1	87	91.6	92	87	84.5	31
		纬	80	82	83.9	86	88	91	95	92	74.7	29
3	平行	经	84	84.5	87	91	92.5	94	94	87	80	69
		纬	85.8	85.5	88	93	94.4	96	95.8	89	80.5	66
	垂直	经	88.8	87	88.6	90	92	94	92.5	78.5	66	27
		纬	86	86.5	89	90.6	93	94	91.6	81	60	31
4	平行	经	78	79.5	84	90	93	96.5	96	90.5	84	66
		纬	74	81	85	90	94.8	97	96	96	83	73
	垂直	经	77.8	78	77.8	79.8	83	88	92	88	88	14.5
		纬	76	77.6	79.8	83	86.2	91	95.2	91.9	85.4	15.6

注: $hc=8\text{mm}$, $tf=1.2\text{mm}$.

表 3 面板板材的力学性能

性能	拉 伸					压 缩					弯 曲			
	$\sigma(\text{MPa})$		$E(\text{GPa})$		μ	$\sigma(\text{MPa})$		$E(\text{GPa})$			$\sigma(\text{MPa})$		$E(\text{GPa})$	
方向	经	纬	经	纬	经	经	纬	经	纬		经	纬	经	纬
平均值	402	113	21.7	10.4	0.158	227	139	22.0	9.3		453	193	21.0	8.5
离散系数 $C_V(\%)$	1.7	23	5.6	4.9	10.5	8.6	1.4	6.6	1.3		4.1	3.1	2.6	4.0

表 4 蜂窝芯子的力学性能

蜂格边长 $C(\text{mm})$		2.5		3		4	
方向		经	纬	经	纬	经	纬
剪 切	平均强度 $\tau_c(\text{MPa})$	1.48	1.80	1.19	1.40	0.814	1.12
	离散系数 $C_V(\%)$	13.1	21.0	6.8	11.4	10.7	9.6
	平均模量 $G(\text{GPa})$	70.2	133	64.4	95	37.5	63.9
	离散系数 $C_V(\%)$	12.9	15.1	15.9	19.9	6.2	11.1
平 压	平均强度 $\sigma_c(\text{MPa})$	3.87		2.43		2.02	
	离散系数 $C_V(\%)$	19.1		8.1		21	

注: 表中经、纬向指面板布层方向, 蜂格方向刚好相反。

(1) DAP 玻璃钢的介电性能, 从国内水平来看, 是比较好的, 但与国外比较还偏高。

(2) 玻璃钢蜂窝芯子的介电性能, 总的趋势是介电性能随着蜂格的增大而减少, 或随着容重的减少而减少, 这与国外的实测数据是一致的。

(3) 蜂窝夹层的透波性能, 随着面板厚度、蜂窝芯子厚度增加而减少, 平行极化的透波率比垂直极化的高。蜂格经纬向的测试结果有一定偏差, 入射角

在 $40\sim 60^\circ$ 左右, 透波率最高。

(4) 玻璃钢的介电性能 (ϵ , $\text{tg}\delta$) 与原材料的介电性能、组份比、成型工艺有一定关系。

(5) 蜂窝芯子的介电性能 (ϵ_c , $\text{tg}\delta_c$) 与蜂壁材料的介电性能、蜂格形状和大小有一定关系。

(6) 经分析认为, 为达到某一规定的透波率 (如 96%), 而又要尽量满足强度与刚度的要求, 应要求面板厚度不大于某一厚度, 而且树脂含量尽量少

一点。比如, 面板厚度为 1.1mm, 蜂窝芯子厚度为 7mm, 当树脂含量从 50%降低到 35%时, 介电常数 ε 从 4.3 增加到 4.6, 而介电损耗角正切 $\text{tg}\delta$ 从 0.0128

降低到 0.0085。以这两种情况的介电性能进行透波率的计算, 计算结果列于表 6。从表中可见, 平均透波率仅下降 0.063%。

表 5 夹层结构的力学性能

芯格边长 C(mm)			2.5		3		4	
h_c (mm)			7	8	7	8	7	8
tf(mm)			1.4	1.2	1.2	1.4	1.2	1.6
侧压强度	经向	平均值(MPa)	186	206	176	152	170	128
		离散系数 C_V (%)	12.0	2.5	14.0	4.5	14.5	6.2
	纬向	平均值(MPa)	162	161	152	140	163	146
		离散系数 C_V (%)	2.5	12.0	6.6	11.0	9.4	3.8
面板弹性模量	经向	平均值(MPa)	23.1	21.7	23.1	21.0	22.0	21.0
		离散系数 C_V (%)	3.5	2.2	3.2	2.5	7.1	5.1
	纬向	平均值(GPa)	13.9	12.8	12.4	12.7	12.4	13.6
		离散系数 C_V (%)	3.1	5.4	4.5	7.0	2.6	4.6

表 6 透波率的计算结果

入射角 θ 面板介电性能	$ T ^2$							$ T ^2$
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	
$\varepsilon = 4.3, \text{tg}\delta = 0.0128$	0.934	0.942	0.960	0.978	0.982	0.981	0.977	0.965
$\varepsilon = 4.6, \text{tg}\delta = 0.0085$	0.916	0.925	0.950	0.973	0.985	0.982	0.980	0.959

2. 力学性能

(1) 蜂窝越小, 剪切性能越高。如图 1 所示, 蜂格纵向的剪切性能比横向的高。(图中经纬向, 是指面板的布层方向, 蜂格的纵横向刚好相反)。

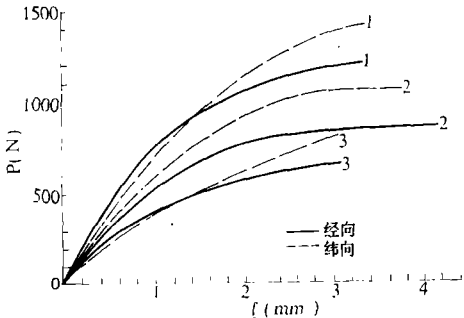


图 1 蜂窝夹层短梁弯曲的载荷—挠度曲线

1—芯格边长为 2.5mm, 2—芯格边长为 3mm, 3—芯格边长为 4mm

(2) 侧压强度 σ_f , 经向的比纬向的强度高, 侧压弹性模量 E_f , 经向的比面板板材的弹性模量 (表

3) 高出约 5%。而纬向的要比面板板材的弹性模量约高出 8~18%。

对面板板材及蜂窝夹层结构中面板的弹性模量的理论计算结果与实测值的比较列于表 7 中(实测值取侧压的试验结果, 不计及芯子的影响, 取各种面板厚度弹性模量的平均值, 作为比较)。

表 7 面板弹性模量的理论值与实测值的比较

项目	方向	弹性模量(GPa)			
		面板材料	蜂窝夹层结构中的面板		
			tf = 1.2mm	tf = 1.4mm	tf = 1.6mm
实测值	经向	21.9	22.4	21.1	19.8
	纬向	9.81	12.4	13.3	14.4
理论值	经向	21.5	21.5	19.9	20.2
	纬向	10.5	10.5	12.1	11.9
相对误差%	经向	-1.8	-3.9	-5.6	1.9
	纬向	7.0	-15	-9.6	-17.7

注: 树脂含量以 A = 50% 计算。

(下转第 5 页)

括：航空零件激光加工技术、航空零件电子束焊接技术、航空零件等离子加工技术、航空零件电解加工技术、电火花加工技术、磨粒流加工技术、高压水射流切割技术、离子注入技术、航空精密零件特种去毛刺技术、航空光学零件特种加工技术等 10 项综合性的课题。因为随着航空产品的发展，高硬度、高韧性、高强度、高脆性等难加工材料不断出现，制造精密、复杂、特殊零件的需要也应运而生，常规工艺在这方面已无能为力。因此特种工艺已是现代飞机、发动机、机载设备制造技术中必不可少的工艺技术。

4. 航空航天柔性制造试验室的研制。这是根据新型装备柔性制造系统发展规划提出的预选方案。这个试验室主要是为起示范作用和柔性技术基础及柔性单元研究试验而建立的，因为其本身有很多基础性技术要进行开发性的预先研究，所以把整个试验室的建立作为预研对象。

这些项目的提出，我们充分考虑到航空制造技术中的“需求牵引”技术和“发展推动”技术，同时根据“七五”预研项目的基础和格局及国外发展趋势，从航空科技发展的全局出发，注意宏观统筹，而且贯彻“缩短战线、突出重点”的方针而提出的。

四、几点建议

1. 航空制造技术的预研在航空预研总体规划中应同设计技术同步发展，要克服那种只要能设计出来就能把飞机“抠出来”的想法，应该把制造技术的发展放在应有的位置，并作为重点预研项目来抓。

2. 要重视预研成果的工程化（亦称中间试验），这个问题对制造技术来讲具有重要意义，因为制造技术的预研成果必须用于新机研制，用于生产，否则就

~~~~~  
(上接第 16 页) 从表 7 中可以看出，面板板材弹性模量的理论值与实测值很符合。

(3) 蜂窝夹层板的测压强度，是由面板的局部稳定或胶层强度控制，可用下式进行理论计算：

$$\sigma_f = K \sqrt{E_f E_c G_c} \quad (1)$$

式中 K 是与面板质量、胶层强度有关的常数，对这一批试样，常数 K 为 0.2~0.3。从 (1) 式中看出侧压强度不仅与面板性能 ( $E_f$ ) 有关，也与蜂窝芯子的弹性性能 ( $E_c$ ,  $G_c$ ) 有关。一般情况下，经向强度比纬向的要高。但随蜂格的变化，当  $G_c$  的变化比  $E_f$  的变化大时，会出现相反情况，即纬向的强度比经向强度高。

#### 四、结 论

材料工程

失去作用。国际上认为，一项制造技术的科研成果如果在 5~6 年得不到实际应用就将会被淘汰，也就是说其“储存”寿命只有 5~6 年。而我部多年来都没有很好解决制造技术预研成果工程化的经费问题。今后如何解决应给予重视。

3. 制造技术预研课题中有关飞机、发动机和机载设备的工艺课题，应统一归口，配套安排，既不能搞重复，也不能“重主机轻辅机”，以防出现“缺口”，影响新机研制的发展。

4. 处理好制造技术的预研、型号研制和技术改造三者之间的关系。三者各自的内涵有所不同，但关系也是非常密切的，因此既要有明确的分工，也要有机地结合才行。建议部里成立一个协调性的领导小组，管理这方面的工作。

5. 航空制造技术的预研工作，应该首先安排航空专用技术，因为这方面的技术，机电行业总不会介入的，如不抓紧安排，将误时误事。

6. 航空制造技术的通用性较强，应该实行“军民结合”的科研管理体制。目前看来，有关军用飞机技术的预研管理从上到下管理渠道是畅通的，经费出处也是明确的，但是民用飞机技术的预研管理体制尚未建立起来，经费出处尚不落实。当然军用预研成果转为民机应用是“军转民”的重要内容，但是因为民机还有适航性等方面的要求，与军机不同，所以并不能简单的“转化”，要经过一些中间环节的过渡才行。所以有一些课题要“两家抬”。当前干线飞机带有预研性的一些技术难题，也应纳入科研管理，同军用技术正在进行的课题结合起来，统一归口管理，而不是搞多渠道管理和课题的重复，以把有限的经费用在刀刃上，以取得更大的技术经济效果。

~~~~~  
经过试验研究，可得出下列几点结论：

1. 对于雷达罩，透波性能是主要的，要达到 95% 以上的透波率，要求面板厚度 $< 1.1\text{mm}$ ，蜂窝芯子高度 = 7.2mm。

2. 从刚度来讲，应尽可能增加面板和蜂窝芯子厚度，在厚度限制的情况下，一是采用高弹模量的玻璃纤维，二是减少树脂含量。这是国外玻璃钢雷达罩的树脂含量为 30~38% 的理由之一。

3. 当面板的树脂含量由 50% 下降到 35% 时，玻璃钢蜂窝夹层板的透波率下降不到 1%。

4. 从面板厚度来看，当树脂含量从 50% 下降到 35% 时，1.1mm 厚度的面板，由原来的四层 0.23mm 的单向布可以增加五层单向布还多一点，这样对强度、刚度都有利。

参考资料(略)