

玻璃钢及蜂窝夹层的高频介电性能¹⁾

周 祝 林

(上海玻璃钢研究所)

玻璃钢的介电常数和介电损耗角正切都比较小, 是良好的透波材料。为了对这方面的性能更好地进行研究, 减少试验工作量, 以便更好地进行蜂窝夹层结构透波率的最优设计, 必须对此性能进行理论研究, 求出有实用价值的计算公式。现将我们进行的工作介绍如下。

一、玻璃钢的高频介电性能

玻璃钢的介电性能与原材料的介电性能有密切关系, 一些原材料的介电性能列于表 1^[1,2]。通常非极性聚合物(如聚乙烯、聚苯乙烯

表 1 一些原材料的介电性能

材 料	性 能 频 率	密 度 (kg/m ³)	ε		tg δ	
			10 ⁶ Hz	9.375×10 ⁹ Hz	10 ⁶ Hz	9.375×10 ⁹ Hz
E 玻璃		2540		6.13		0.0039
S 玻璃		2490		5.21		0.0068
D 玻璃		2160		4.00		0.0026
石 英		2200		3.78		0.0002
酚醛树脂		1250—1300	4.5—5.0		0.015—0.030	
环氧树脂		1200—1220	3.5—5.0	2.78	0.010—0.019	0.012
酚醛改性环氧		1160—1210	3.4		0.024	
饱和聚酯		1310—1380	3.1—3.3		0.0022—0.030	
不饱和聚酯		1100—1460	2.8—4.1	2.78*	0.006—0.026	0.005*
有机硅树脂		1260	2.9—5.0		0.003—0.050	

* 为未固化聚酯。

等)的介电性能数据比较低, ε 为 2—2.4, tg δ 为 0.0003 以下。

玻璃的介电性能数据随着含碱量减少而降低, 因此一般采用含碱量少的无碱玻璃纤维。

1. 玻璃钢介电常数

玻璃钢的介电常数也和力学性能一样^[3-5], 可以根据组分材料的性能和组分比来进行理论计算。

对于沿纤维方向玻璃钢的介电常数, 可以

把纤维和树脂当作并联的组合电容器^[6], 最后可求得单向玻璃钢沿纤维方向的介电常数为

$$\epsilon_{//} = V_f \epsilon_f + (1 - V_f - V_0) \epsilon_m + V_0 \epsilon_0, \quad (1)$$

式中下标 f 代表纤维, 下标 m 代表树脂, V_0 为空隙率。

求垂直纤维(或布层)方向的介电常数时, 可以先假设纤维为矩形排列, 取四分之一单元

1) 钟天麟、魏君南参加了试验工作。

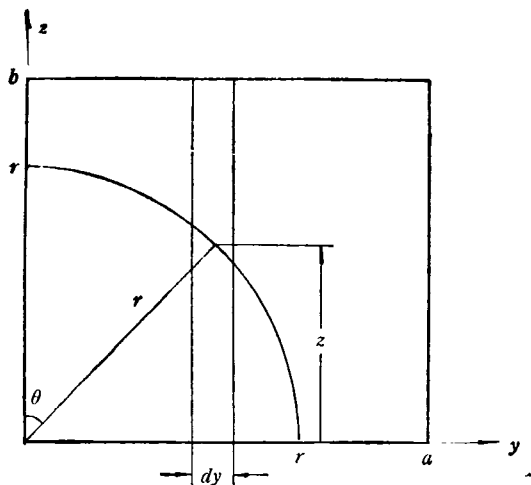


图1 计算模型

$$\left(r = \sqrt{\frac{4V_f}{\pi}} \right)$$

体(如图1所示),然后用串联、并联电容器的概念,再用积分方法,最后可求得横向介电常数的上、下限分别为

$$\begin{aligned} \epsilon'_1 &= \left\{ \epsilon_m \right\} / \left\{ \frac{b-r}{b} + \frac{\epsilon_m}{b(\epsilon_f - \epsilon_m)} \right. \\ &\quad \times \left[\frac{a\pi}{2} - \frac{2a^2\epsilon_m}{\sqrt{a^2\epsilon_m^2 - (\epsilon_f - \epsilon_m)^2 r^2}} \right] \text{tg}^{-1} \\ &\quad \times \left. \sqrt{\frac{a\epsilon_m - (\epsilon_f - \epsilon_m)r}{a\epsilon_m + (\epsilon_f - \epsilon_m)r}} \right\}, \\ \epsilon''_1 &= \left[\frac{a-r}{a} - \frac{b\pi\epsilon_f}{2a(\epsilon_f - \epsilon_m)} + \left(\frac{b\epsilon_f}{\epsilon_f - \epsilon_m} \right)^2 \right. \\ &\quad \times \frac{2(\epsilon_f - \epsilon_m)}{a\sqrt{b^2\epsilon_f^2 - (\epsilon_f - \epsilon_m)^2 r^2}} \text{tg}^{-1} \\ &\quad \times \left. \sqrt{\frac{b\epsilon_f + (\epsilon_f - \epsilon_m)r}{b\epsilon_f - (\epsilon_f - \epsilon_m)r}} \right] \epsilon_m. \end{aligned} \quad (2)$$

横向介电常数 ϵ_L 是 ϵ'_1 和 ϵ''_1 的平均值,即

$$\epsilon_L = (\epsilon'_1 + \epsilon''_1)/2. \quad (3)$$

对于双向玻璃布增强的玻璃钢,沿经纬方向的介电常数的理论计算公式为

$$\epsilon_L = \frac{n_L}{n_L + n_T} \epsilon_{//} + \frac{n_T}{n_L + n_T} \epsilon_{\perp}, \quad (4)$$

$$\epsilon_T = \frac{n_L}{n_L + n_T} \epsilon_{\perp} + \frac{n_T}{n_L + n_T} \epsilon_{//}, \quad (5)$$

式中 n_L, n_T 依次表示经纬纤维比。

玻璃钢横向介电常数与纤维含量的关系如

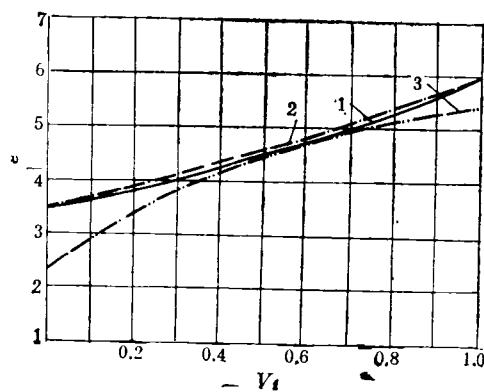


图2 横向介电常数与纤维含量的关系

1—公式(3); 2—公式(6); 3—公式(7)

图2所示。图2给出了文献[1,5]中的估算公式

$$\log \epsilon = V_f \log \epsilon_f + (1 - V_f) \log \epsilon_m \quad (6)$$

的计算结果和文献[7]中的经验公式

$$\epsilon = 5.45 - 0.03A \quad (7)$$

的计算结果。计算时取 $\epsilon_f = 6.13, \epsilon_m = 3.5$ 。

一些玻璃钢介电常数的测试值与理论值的比较列于表2。

表2 玻璃钢介电常数测试值与理论值比较

性能		材料	DAP 玻璃钢	酚醛-环氧玻璃钢	聚酯玻璃钢
树脂含量 A(%)			48	30	50
介电常数 ϵ	测试值		4.30	4.5-4.7	4.25-4.50
	理论值		4.25	4.6	4.15-4.60
	误差(%)		1.2	-2.1-2.2	-2.2-2.3

2. 玻璃钢介电损耗角正切的计算

对于有电介质的电容器，其电压和电流的变化相位差不再是 90° ，而是小于 90° 的一个角 φ 。角 φ 的余角 δ 称为介质的损耗角。根据电流的功率公式，可以推导出单向玻璃钢沿纤维方向的介电损耗角正切的计算公式为

$$\operatorname{tg} \delta_{\parallel} = \frac{V_f \epsilon_f \operatorname{tg} \delta_f + (1 - V_f - V_0) \epsilon_m \operatorname{tg} \delta_m + V_0 \epsilon_0 \operatorname{tg} \delta_0}{V_f \epsilon_f + (1 - V_f - V_0) \epsilon_m + V_0 \epsilon_0} \quad (8)$$

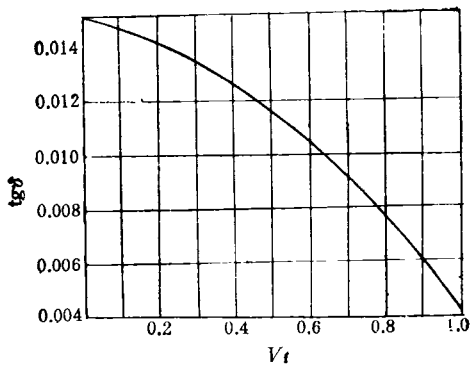


图3 单向玻璃钢横向和双向玻璃钢垂直布层方向的介电损耗角正切与纤维含量的关系

对于单向玻璃钢横向，或对于双向玻璃钢垂直布层方向，可以推导出介电损耗角正切的理论计算公式为

$$\operatorname{tg} \delta_{\perp} = \{ [V_f \epsilon_m \epsilon_0 \operatorname{tg} \delta_f + (1 - V_f - V_0) \epsilon_f \epsilon_0 \operatorname{tg} \delta_m + V_0 \epsilon_f \epsilon_m \operatorname{tg} \delta_0] \epsilon \} / \{ \epsilon_f \epsilon_m \epsilon_0 \} \quad (9)$$

对于双向玻璃钢，沿经纬方向的介电损耗角正切的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \delta_L &= \left(\frac{n_L}{n_L + n_T} \epsilon_{\parallel} \operatorname{tg} \delta_{\parallel} + \frac{n_T}{n_L + n_T} \epsilon_{\perp} \operatorname{tg} \delta_{\perp} \right) / \epsilon_L \\ \operatorname{tg} \delta_T &= \left(\frac{n_L}{n_L + n_T} \epsilon_{\perp} \operatorname{tg} \delta_{\perp} + \frac{n_T}{n_L + n_T} \epsilon_{\parallel} \operatorname{tg} \delta_{\parallel} \right) / \epsilon_T \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

单向玻璃钢横向和双向玻璃钢垂直布层方向的介电损耗角正切与纤维含量的关系见图3。计算时， ϵ_f 、 ϵ_m 的取值同前， $\operatorname{tg} \delta_f = 0.004$ ， $\operatorname{tg} \delta_m = 0.015$ 。

一些玻璃钢介电损耗角正切的测试值与理论值的比较列于表3。

表3 玻璃钢介电损耗角正切测试值与理论值比较

性能		材料	DAP 玻璃钢	酚醛-环氧玻璃钢	聚酯玻璃钢
树脂含量 $d(\%)$			48	30	50
介电损耗角正切 $\operatorname{tg} \delta$	测试值		0.0111	0.014—0.017	0.023—0.025
	理论值		0.0125	0.0168	0.022*
	误差(%)		-12.6	-20.0—1.2	4.3—12.0

* 计算时取 $\operatorname{tg} \delta_m = 0.026$ 。

二、玻璃钢蜂窝夹层的高频介电性能

蜂窝夹层是多孔材料，见图4。同样根据组合电容器的原理，理论上可以推导出蜂窝夹层的介电性能。

1. 蜂窝夹层的介电常数

蜂窝夹层介电常数的理论计算公式为

$$\epsilon_c = V_s \epsilon_s + (1 - V_s) \epsilon_0 \quad (11)$$

式中 ϵ_s 为蜂壁材料的介电常数， V_s 为

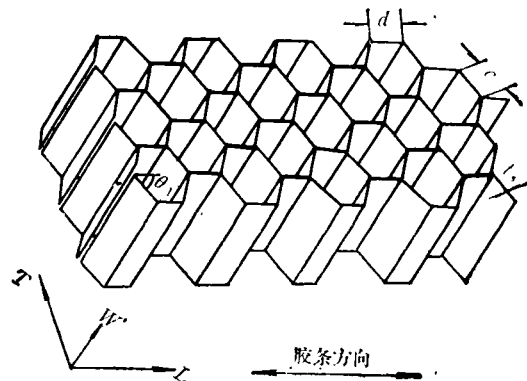


图4 蜂窝夹层结构

表 4 蜂窝夹层介电性能的测试值与理论值比较

性能		蜂窝边长 c (mm)	2.5	2.7	3	4
树脂含量 A (%)			40.5	43.8	44.3	45.0
密度 ρ_c (kg/m ³)			98.9	94.5	93.9	69.6
ϵ_c	测试值		1.133	1.153	1.130	1.107
	理论值		1.17	1.17	1.15	1.119
	误差 (%)		3.3	1.5	1.2	1.1
$\text{tg } \delta_c$ ($\times 10^{-3}$)	测试值		3.59	4.49	3.51	2.68
	理论值		4.38	4.15	3.54	2.80
	误差 (%)		-22.0	7.6	-0.9	-4.5

$$V_s = \frac{d/c + 1}{(d/c + \cos\theta)(\sin\theta + 2t_s/c)} (t_s/c), \quad (12)$$

式中 d, c, θ, t_s 见图 4.

蜂窝夹层介电常数与蜂窝边长 c 及树脂含量(正六边形蜂窝时)的关系如图 5 所示. 测试值与理论值的比较列于表 4.

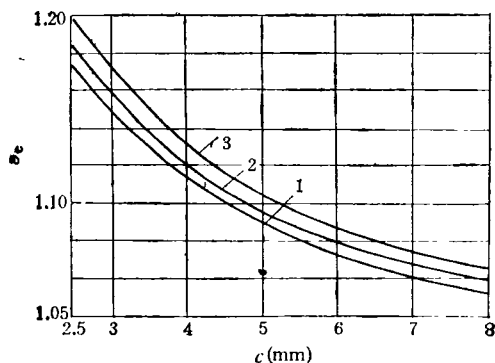


图 5 蜂窝夹层的介电常数与蜂窝边长及树脂含量的关系
1. $A = 40\%$; 2. $A = 45\%$; 3. $A = 50\%$

2. 蜂窝夹层的介电损耗角正切

蜂窝夹层介电损耗角正切的理论计算公式为 $\text{tg } \delta_c = \frac{V_s \epsilon_s \text{tg } \delta_s + (1 - V_s) \epsilon_0 \text{tg } \delta_0}{V_s \epsilon_s + (1 - V_s) \epsilon_0}$, (13)

式中 $\text{tg } \delta_s$ 为蜂窝壁材料沿纤维方向的介电损耗角正切, $\text{tg } \delta_0$ 为蜂窝孔中空气或气体的介电损耗角正切.

蜂窝夹层介电损耗角正切与蜂窝边长 c 的关系如图 6 所示. 测试值与理论值的比较列于表 4. 计算时, $\epsilon_f, \epsilon_m, \text{tg } \delta_f, \text{tg } \delta_m$ 的取值同前, 对于干燥空气, ϵ 为 1, $\text{tg } \delta$ 为零. 由于蜂窝是

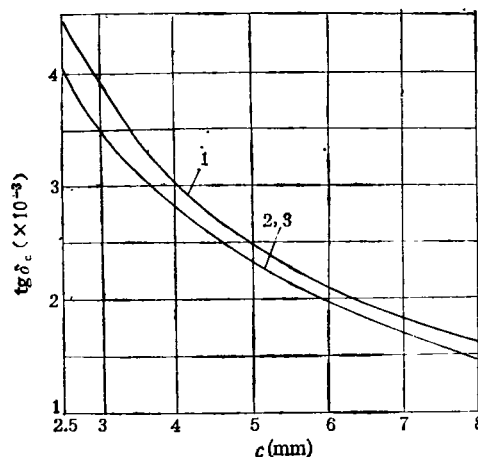


图 6 蜂窝夹层的介电损耗角正切与蜂窝边长及树脂含量的关系
1. $A = 40\%$; 2. $A = 45\%$; 3. $A = 50\%$

单层玻璃钢, 含有一定水分, 根据测试结果, 含水量为玻璃布重量的 0.13—0.24%. 取水的 ϵ_w 为 81, $\text{tg } \delta_w$ 为 0.55.

- [1] R. H. Cary, AD-A007956, Avionic Radome Materials, (1974).
- [2] 钱知勉, 塑料性能应用手册, 上海科学技术出版社, (1980).
- [3] 上海玻璃钢研究所, 玻璃钢结构设计, 中国建筑工业出版社, (1980), 69—82.
- [4] 朱颐龄, 力学与实践, No. 1 (1980), 1.
- [5] 周祝林, 机械工程材料, No. 4 (1979), 44—54.
- [6] 上海市高等工业学校物理学编写组编, 程守洙、江之永等改编, 普通物理学 (第二册), 人民教育出版社, (1978), 52—72.
- [7] 朱页等译, 增强塑料手册, 中国工业出版社, (1965), 131.