

Z-pin 增强泡沫夹层结构面压缩性能研究

杜 龙, 矫桂琼, 黄 涛

(西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710072)

摘要: Z-pin 增强泡沫夹层结构作为一种新兴的复合材料夹层结构形式, 能够克服传统蜂窝夹层结构的诸多缺陷。采用预浸碳纤维增强 Rohacell[®] 夹芯, 进行 Z-pin 角度为 15° 和 25°, 夹芯厚度分别为 12.7mm 和 8mm 两种 Z-pin 增强泡沫夹层结构的面内压缩性能试验, 并与相同批次和尺寸的未增强件进行对比, 考察其对传统泡沫夹层结构的增强作用。试验发现 X 状 Z-pin 增强能够大幅度提高夹层结构的压缩强度与刚度。同时, 增强材料表现出与传统泡沫夹层结构不同的压缩变形与破坏模式。证实 Z-pin 的弹性屈曲控制着结构的压缩强度, 夹芯厚度和 Z-pin 角度影响 Z-pin 屈曲的计算长度, 从而成为材料压缩强度的控制因数。在此基础上, 考虑面板对 Z-pin 的有限转动约束, 通过引进约束修正系数改进现有的压缩强度预测模型, 预测值与试验结果更加接近。

关键词: 夹层结构; Z-pin 增强; 压缩性能

中图分类号: TB332

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2008)04-0101-06

为改善传统蜂窝夹层结构的“电报效应”和抗潮湿性能差等主要缺陷, 用泡沫取代蜂窝作为夹层结构的芯材成为一种理想的选择, 但泡沫芯材的不足之处在于强度和刚度较低。近年来, 国外研究者提出一种新型的 Z-pin 增强泡沫 (X-

cor[®]) 夹层结构^[1,2], 它是将经过树脂预浸的细长复合材料纤维杆 (一般为预浸碳纤维杆) 或者金属丝 (Z-pin) 按一定角度嵌入闭孔泡沫芯材中, 并在两头预留出小部分植入上下面板, 经固化形成的整体结构 (图 1)。

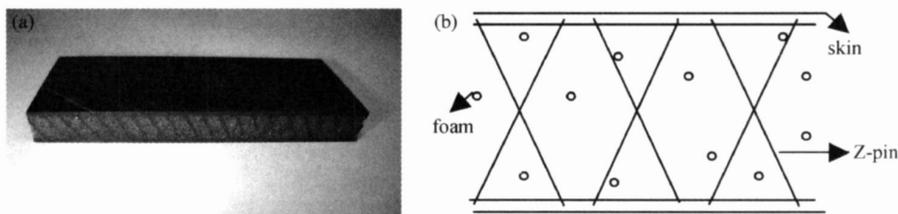


图 1 Z-pin 增强夹层结构试件及结构示意图

Fig. 1 Z-pin reinforced sandwich sample and sketch map

2001 年美国陆军试验室的 Kunkel 等和 Skorsky 飞机公司的 Carstensen^[2] 等先后发表了关于 Z-pin 增强夹层结构力学性能的研究报告。研究表明, 在含和不含冲击损伤的情况下, 该种材料与具有相同压缩和剪切强度的蜂窝夹层结构相比, 可以减重 10% ~ 15%。O'Brien^[3] 等研究了 Z-pin 增强泡沫夹层和层压板过渡区破坏机理。Cartie^[4] 等通过试验

研究准静态和动态下 Z-pin 增强泡沫夹层结构面压缩问题, 揭示了 Z 向销钉和泡沫相互作用的抗压机理。Vaidya^[5] 等研究了垂直植入的碳针增强泡沫夹层在高应变率冲击下的力学响应, 并与蜂窝夹层结构作了比较。Rice^[6] 等研究了 Z-pin 增强泡沫夹层梁的三点弯曲破坏模式, 比较不同尺寸和跨距下夹层结构板的弯曲破坏。国内, 田旭^[7] 等试制了 X-cor[®] 夹层结构并对其基本性能进行试验研究。黄涛^[8] 等对横向增强泡沫夹层结构的方法和性能进行论述, 并预测了前景。

提高泡沫夹芯的压缩性能是进行横向增强的主要目标之一, 本工作通过不同 Z-pin 角度和夹芯厚

收稿日期: 2007-05-26 修订日期: 2007-10-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10572116), 航空科学基金资助项目 (04B53013)

作者简介: 杜龙 (1981-), 男, 博士研究生, 研究方向为先进复合材料及其结构的力学行为。

度的 Z-pin 增强泡沫夹层结构面内压缩性能试验, 研究其对泡沫芯材的增强效果及其压缩破坏机理, 并改进了现有的压缩强度预报模型。

1 试验

本试验中泡沫芯材选用 Degussa 公司生产的

Rohacell® 71WF 闭孔聚甲基丙烯酸酯亚胺 PMI 泡沫, 面板为碳纤维增强树脂基复合材料, 树脂基体为 BA9912, 增强材料为 T300 碳纤维, 以 (0°, 90°, ±45°)_s 铺设 8 层, 为准各向同性层合板。Z-pin 为 T300 预浸碳纤维, 浸润树脂为与面板树脂相同体系的 BA9912, 平均直径 0.27mm。试件参数示于表 1。

表 1 Z-pin 增强夹层结构压缩试验件

Table 1 Specimen for compression test of Z-pin reinforced sandwich

Specimen type	Core thickness / mm	Z-pin	Z-pin angle	Specimen dimensions
I	12.7	Carbon fiber	15°	40mm × 50mm × 16.4mm
II	8		25°	40mm × 50mm × 11.1mm

所有试件 Z-pin 密度皆为 0.133pin/mm², 且每组试件皆有相同批次和尺寸的未增强对比件。试验在 NSTRAN-5567 试验机上进行, 加载速率为 0.5mm/min, 采用引伸计 (COD 规) 测量压缩位移, 进而可以得到试件的压缩模量。典型压缩应力-应变曲线如图 2 所示。压缩试验结果示于表 2。

从试验结果可以看出, Z-pin 增强能够大幅提高泡沫夹层结构的压缩性能, 无论是压缩刚度还是强度都比传统的泡沫夹层结构有极大的改善, 15° Z-pin 增强使夹芯厚度为 12.7mm 试件的压缩模量提高到 4.03 倍, 压缩强度提高到 4.26 倍; 25° Z-pin 增强使夹芯厚度为 8mm 试件的压缩模量提高到 8.72 倍, 压缩强度提高到 7.35 倍。

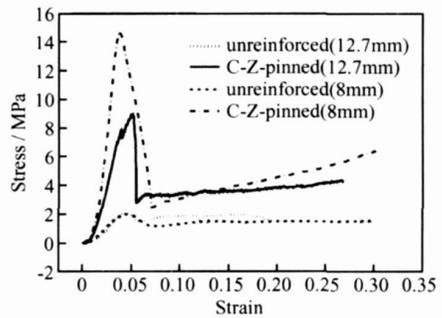


图 2 增强与未增强泡沫夹层结构试件典型压缩应力-应变曲线

Fig. 2 Representative compressive stress versus strain curves of reinforced and unreinforced foam core sandwich

表 2 压缩试验结果

Table 2 Results of compression test

Specimen type	Z-pin angle	Compression modulus / MPa	Compression strength / MPa
I	Unreinforced	73.0	2.13
	Reinforced	294.0	8.95
II	Unreinforced	63.5	2.01
	Reinforced	554.0	14.71

无论泡沫夹芯的厚度为 12.7mm 还是 8mm, 未增强试件的压缩都经历了“弹塑性变形—达到极限强度—载荷跌落—进入屈服平台—致密化增强”的阶段, 对应于闭孔泡沫“孔壁弹性变形—孔壁屈服—孔壁挤压致密化”的变形特征。同时, 由于泡沫结构本身的特殊性, 压缩变形的非线性特征比较明显。另外, 从未增强件的压缩应力-应变曲线可以看出, 达到极限强度后, 到材料的致密化增强需要经过了一个比较长的平台阶段, 压缩变形较大。

图 3 为增强试件的压缩破坏模式。在压缩试验中, 当载荷达到某个值时试件开始不断地发出“劈啪”声, 这种响声一直持续到试件达到极限强度以后, 其原因是泡沫与 Z-pin 之间的界面开裂或者极少部分 Z-pin 被劈断而产生的声响。在夹芯厚度 12.7mm 试件的中, 随着响声的出现应力-应变曲线也开始发生波动, 试件刚度下降。但是对于夹芯厚度为 8mm 试件的试验中并没有出现这种现象, 当达到试件的极限压缩强度时, 随着一声较大的声响, 应

力迅速下降。对于夹芯厚度为 12.7mm 的试件, 应力的下降幅度很大, 几乎是呈直线下降; 而对于夹芯厚度为 8mm 的试件, 应力-应变曲线的下降是呈斜线。究其原因, 应该与 Z-pin 体积分数有关, 8mm 试件 Z-pin 体积分数大于 12.7mm 试件, 而泡沫芯子中较大体积分数 Z-pin 的存在使其能更快地进入致密化阶段。

试件达到极限压缩强度前后, 试件侧面并没有观察到比较明显的裂纹, 而观察到边缘 Z-pin 存在

屈曲现象, 这证实了文献 [4] 的结论, 即 Z-pin 增强泡沫夹层结构的压缩强度不再是由泡沫控制而是由 Z-pin 的弹性屈曲控制。

图 4 比较了达到极限压缩强度后, 继续加压过程中未增强试件与增强件的侧面变形情况。未增强件的压缩变形比较平和, 侧面整体微微外鼓。增强件在继续施压过程中侧面开始出现一些裂纹, 并鼓出许多小包, 表明 Z-pin 在泡沫中发生了屈曲甚至断裂。

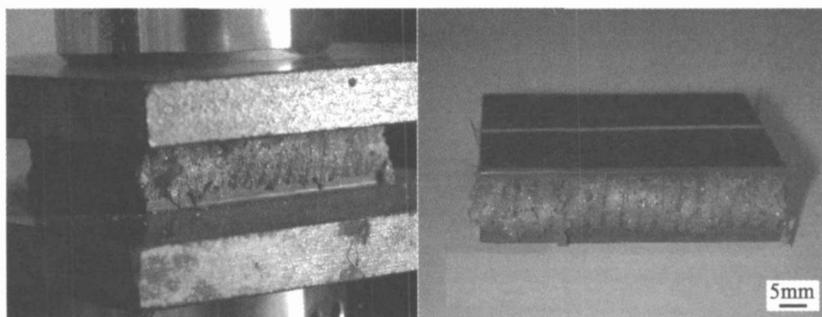


图 3 Z-pin 增强泡沫夹层结构试件压缩破坏

Fig. 3 Compressive failure of Z-pin reinforced foam core sandwich

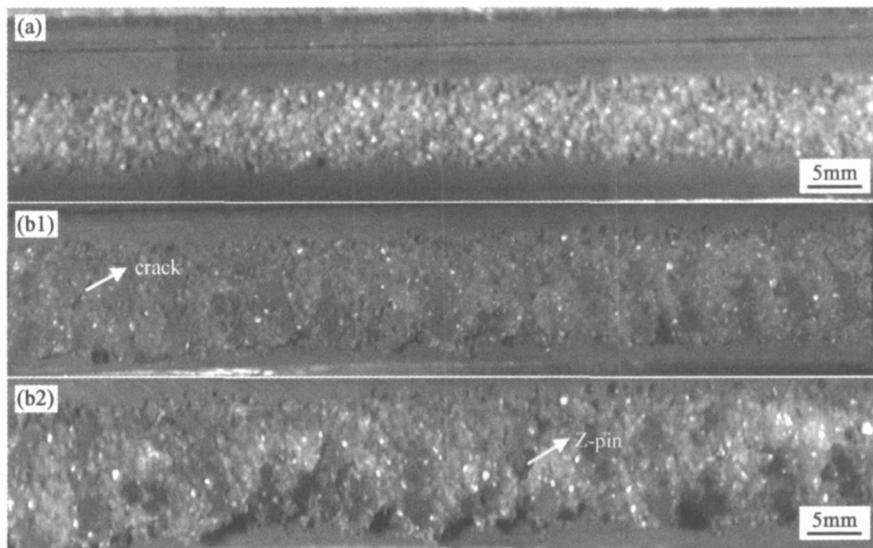


图 4 压缩过程中试件侧面照片

(a) 未增强试件 (b) 增强试件

Fig. 4 Photos of specimen side faces under compression

(a) unreinforced specimen; (b) reinforced specimen

2 Z-pin 增强泡沫夹层结构的压缩强度

在 Z-pin 增强泡沫夹层结构的压缩试验中, 当材料达到极限压缩强度时观察到 Z-pin 的屈曲, 同时试件外侧面并没有明显的变形和泡沫开裂。剑桥

的 Cartie' 等^[4]认为, Z-pin 的受压弹性屈曲控制着结构的压缩强度, 而泡沫可以看作是抵抗 Z-pin 屈曲的弹性基础, 但计算结果比试验值低。这是因为碳针两端存在有限转动而并不是完全无转动约束的铰支, 需要考虑这种转动约束效应对压缩强度的影响。

为了将 Z-pin 两端的有限约束考虑进去, 作者对弹性基础上的压杆屈曲模型进行修正, 并考虑到不可忽略 Z-pin 的体积分数较低时泡沫的压缩承载, 计及泡沫对压缩强度的影响。采用压杆在不同支承条件下计算屈曲载荷时修正计算长度的方法, 将 Timoshenko^[9] 给出的弹性基础上简支压杆屈曲载荷计算公式作如下修正:

$$P_{buc} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} \left(m^2 + \frac{\beta l^4}{m^2 \pi^4 EI} \right) \quad (1)$$

其中, l 为 Z-pin 长度, EI 为 Z-pin 弯曲刚度。 β 为泡沫的弹性基础模量, 屈曲半波数 $m = \frac{l}{\pi} \sqrt[4]{\frac{\beta}{EI}}$ μ 称为约束修正系数, 其值大小反映面板对 Z-pin 的约束情况, 与试件各组分材料性质、Z-pin 植入面板长度和加工工艺等有关。

忽略 Z-pin 在泡沫中造成的应力扰动, 当 Z-pin 达到屈曲强度时泡沫内的应力:

$$\sigma_c = \frac{4E_c P_{bus}}{\pi d_p^2 E_s c \cos \omega} \quad (2)$$

其中, d_p 为 Z-pin 直径, E_c 为泡沫弹性模量, E_s 为 Z-pin 拉伸模量, c 为夹芯厚度。

这样有平衡方程:

$$\sigma_{max} = \frac{n P_{buc} \cos \omega}{A} + \sigma_c \frac{A_c}{A} \quad (3)$$

其中, A 为受压面积, A_c 为泡沫的压缩面积, n 为大小为 A 的压缩面积内的 Z-pin 数。

而 Z-pin 体积分数有关系式:

$$f = \frac{n \pi d_p^2}{4A \cos \omega} \quad (4)$$

将式 (4) 代入 (3), 并根据 $\frac{A_c}{A} \approx 1$, 最后得到 Z-pin 增强泡沫夹层结构的压缩强度为:

$$\sigma_{max} = f \sigma_p \cos^2 \omega + \sigma_c \quad (5)$$

其中, $\sigma_p = P_{bus} / A_p$ 为 Z-pin 压缩失稳临界应力, $A_p = \pi d_p^2 / 4$ 为 Z-pin 横截面积。

在上面的模型中, 有两个重要的参数: 弹性基础模量 β 和约束修正系数 μ , 下面将分别予以讨论。

β 反映弹性基础上单位长度的杆件在单位横向变形下受到的基础反力。泡沫芯材的弹性基础模量可以通过将钢针拉过泡沫的方法测量^[4], 试验装置如图 5。

将泡沫用钢针穿过后架在两个钢性垫块上, 在泡沫上加压, 加载速度为 0.1 mm/min, 记录载荷-位移曲线。弹性基础模量由下式计算:

$$\beta = \frac{\Delta P}{h_c \Delta s} \quad (6)$$

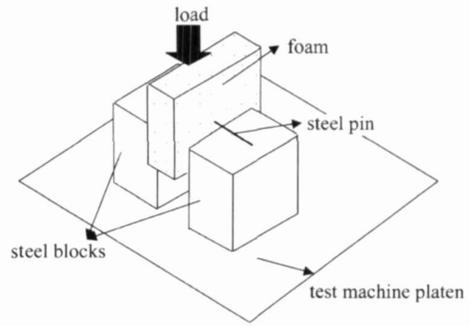


图 5 弹性基础模量的测定

Fig 5 Measurement of foundation modulus

其中, $\frac{\Delta P}{\Delta s}$ 为载荷-位移曲线上直线段的斜率, h_c 为泡沫厚度。

μ 的数值大小反映面板对 Z-pin 的约束强弱, 根据欧拉屈曲理论, 其值应该介于 0.5~1 之间, 反映约束介于固支与铰支之间。 μ 值的精确测量相对困难。由于 μ 只与各组分材料性质、Z-pin 植入面板长度和试件加工工艺等有关, 而与泡沫芯材和 Z-pin 长度等其他因数无关, 如果采用化学或者物理的方法去掉 Z-pin 增强泡沫夹芯中的泡沫, 只留下面板与 Z-pin 组成的空间网架结构, 可以在不改变面板对 Z-pin 约束的情况下, 通过压缩失稳试验得到两端未知约束 pin-core 的压缩失稳临界应力 σ'_{max} , 于是可以由式 (7) 反算出 μ , 进而可以由式 (5) 计算 Z-pin 增强泡沫夹层结构的压缩强度。

$$\mu = \frac{\pi \cos \omega}{l} \sqrt{\frac{fEI}{\sigma'_{max} A_p}} \quad (7)$$

反算出的 μ 约为 0.89 左右, 表明 Z-pin 端的约束更接近铰支。

为了验证本文模型的合理性, 根据文献 [4] 中对挖去泡沫后 Z-pin 与面板组成的空间网架结构的压缩试验数据, 计算 Z-pin 增强泡沫夹层结构的压缩强度, 模型预测值与文献模型和试验结果的比较列于表 3。

可以看出, 虽然改进模型的预测结果好于文献模型给出的结果, 但仍然低估了 Z-pin 增强泡沫夹层结构的压缩强度。这可能与弹性基础模量的准确性有关。同时, Z-pin 与泡沫之间的界面也有待进一步的研究。另外, 由于工艺等原因, 各 Z-pin 与面板之间的结合也存在一定差异, 得到的约束系数应该是一个平均的结果。

图 6 表明随着 Z-pin 体积分数的增大, 夹层结构的面压缩强度呈线性增加, 这与常识相符。同时, 压缩强度也随着 Z-pin 模量的增大而提高。图 7 表

表 3 压缩强度预测值与试验结果的比较 / MPa

Table 3 Compare of compression predicted data and experimental results

Core thickness/ mm	Foam	Z-pin	Volume fraction of pin / %	Experimental values / MPa	Prediction results / MPa	
					Reference model	Improved model
10	Rohacell 31	Ti pin	3.6	11.2	6.32	8.8
	Rohacell 51				9.02	11.6
	Rohacell 31	C pin			6.32	8.6

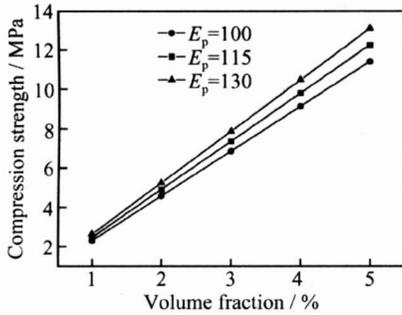


图 6 不同 Z-pin 模量时体积分数对压缩强度的影响

Fig. 6 Relations between compression strength and Z-pinned volume fraction at various Z-pin modulus

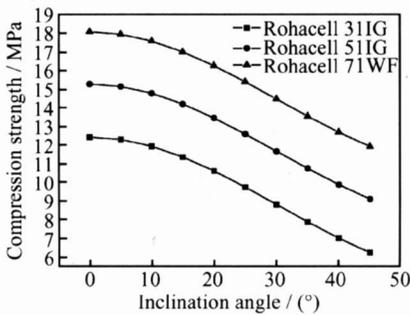


图 7 不同泡沫芯材时 Z-pin 倾角对压缩强度的影响

Fig. 7 Relations between compression strength and Z-pin inclination angle at various foam cores

明 Z-pin 倾斜角度越大, 压缩强度越低。不同的泡沫芯材由于其对 Z-pin 的支承情况不同而影响夹层结构的压缩强度, Rohacell 71WF 相比 Rohacell 311G 具有更大的模量和密度, 从而提高了受压 Z-pin 的弹性屈曲强度。

3 结 论

(1) Z-pin 增强能够大幅地提高泡沫夹层结构的压缩性能, 使其从变形至破坏都有着与未增强件不同的响应过程。

(2) 通过引进约束修正系数, 对现有的 Z-pin 增强泡沫夹层结构的压缩强度预测模型进行改进, 预测结果好于原有模型。

(3) Z-pin 增强泡沫夹层结构具有良好的可设计性, 可以通过改变材料参数优化结构的压缩性能。压缩强度随着 Z-pin 体积分数、模量的增大而提高, 随着 Z-pin 倾角的增大而减小。

参考文献:

- [1] KAY B F. RWSTD airframe technology foundation for the 21st century [A]. In: American Helicopter Society 57th Annual Forum [C]. Washington, 2001. 911-918.
- [2] CARSTENSEN T C, KUNKEL E, MAGEE C. X-cor advanced sandwich core material [A]. 33rd International SAMPE Technical Conference [C]. Seattle, 2001. 452-466.
- [3] O'BR IEN K T, PARIS I L. Exploratory investigation of failure mechanisms in transition regions between solid laminates and X-cor truss sandwich [J]. Composite Structures, 2002(57): 189-204.
- [4] CARTIE D, FLECK N. The effect of pin reinforcement upon the through-thickness compressive strength of foam-cored sandwich panels [J]. Composites Science and Technology, 2003(63): 2401-2409.
- [5] VAIDYA U K, NELSON S. Processing and high strain rate impact response of multi-functional sandwich composites [J]. Composite Structures, 2001(52): 429-440.
- [6] RICE M C, FLEISCHER C A, ZUPAN M. Study on the collapse of pin-reinforced foam sandwich panel cores [J]. Experimental Mechanics, 2006(46): 197-204.
- [7] 田旭, 肖军, 李勇. X-cor 夹层结构试制与性能研究 [J]. 飞机设计, 2004(1): 22-25.
- [8] 黄涛, 矫桂琼, 徐婷婷. Z 向增强泡沫夹层结构复合材料 [J]. 纤维复合材料, 2005(3): 19-23.
- [9] T MOSHENKO S P, GERE J M. Theory of elastic stability [M]. New York: McGraw-Hill, 1961.

Through-Thickness Compression Properties of Z-Pin Reinforced Foam Core Sandwich

DU Long JIAO Gu-qing HUANG Tao

(School of Mechanics and Civil Construction, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract As a novel sandwich structures, Z-pin reinforced foam core sandwich can overcome the limitations of traditional honeycomb core sandwich. A series experiments were carried out to investigate the responses of Z-pinned foam core sandwich under compressive loading, including inclination angles of 15° and 25° with foam core thickness of 12.7mm and 8mm, and each group of them had a contrasted one. Experimental results showed Z-pinned foam core could reinforce the compression modulus and strength of sandwich markedly, and had a deformation and failure map which was different from unreinforced one under compression. The thickness of foam core and inclination angle of pin were dominated factors of compression strength, by influencing the effective length of Z-pin buckling. Considered the actual restriction of face sheets, the existing compression strength model was ameliorated by employing restriction correction coefficient, made the prediction results approach and agree better with the measured results.

Key words sandwich; Z-pin reinforced; compression properties

(上接第 87页)

Microwave Absorbing Prediction of Fe_3O_4 / Conductive Polyaniline Nanocomposites with Core-Shell Structure

HAN Xiao¹, WANG Yuan-sheng²

(1. State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering of Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Department of Training, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract In consideration of the interactions of Fe_3O_4 / conductive polyaniline nanocomposites with core-shell structure, the effective electromagnetic parameter formula of the composite system was derived from the classical Maxwell-Garnett formula. The numerical simulation results show that the permeability of the surrounding media (μ_h) increases with the increasing volume fraction. The super-exchange electromagnetic coupling resonance phenomena of the electromagnetic parameter has made the microwave absorbing structure with the thickness of 2mm reach the maximum microwave attenuation when the proportion of core/shell is 0.6, and with the increasing volume fraction, the maximum microwave absorption peak increases and shifts to low frequency. The optimization results show that the four-level microwave absorbing structure with volume fraction of 0.3 has the optimal absorbing property and the minimum of reflectivity is -62dB.

Key words core-shell structure; effective electromagnetic parameter; microwave absorbing property; optimization