

夹芯型雷达吸波结构的多目标优化*

陈明继¹, 裴永茂², 方岱宁^{1,2}

(1. 清华大学 工程力学系 应用力学实验室,北京 100084;

2. 北京大学 工学院 湍流与复杂系统国家重点实验室,北京 100871)

(郭兴明推荐)

摘要: 通过引入一个无量纲参数,将重量和雷达吸波性能两个优化目标结合于同一个目标函数中,提出了针对含有多孔材料芯层的夹芯型雷达吸波结构(RASS)的一种多目标优化设计方法.优化模型为承受均布载荷的悬臂夹芯板,考虑4种不同形式的芯层.由传输矩阵法和周期矩量法计算出镜面反射率的平均值,作为表征吸波性能的指标;而面板屈服、芯层剪切破坏和面板起皱则作为优化设计中的力学性能约束.优化结果表明,以填充超轻质海绵体的复合材料二维点阵为芯层的夹芯结构,比含有多孔泡沫或六角蜂窝芯层的夹芯结构更适合作为轻质夹芯型雷达吸波结构.Kagome二维点阵则表现出优于正方二维点阵的吸波性能.

关键词: 夹芯结构; 多目标优化; 轻质; 雷达波吸收; 失效模式

中图分类号: TB34 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2010.03.007

引 言

雷达吸波材料(RAM)有着广泛的应用.传统的吸波材料,诸如微波暗室中使用的各种形状的海绵吸波体以及战机的隐身涂层,已经有了较好的发展^[1].然而,这些吸波材料一般由于太脆或太软而难以承载.此外,隐身涂层增加了战机重量,并带来高昂的维护费用.雷达吸波结构(RAS)是一种兼具吸波和承载功能的轻质多功能结构.它们通常可以取代传统战机密度较高的结构材料,从而减轻结构重量.雷达吸波结构的发展顺应了目前战机上复合材料使用不断增加的趋势,成为了国际上隐身材料研究的热点之一.

含有碳黑和碳纳米管等吸收剂的复合材料层合板型雷达吸波结构已有相关的制备研究^[2-4].然而,这种实心的雷达吸波结构相对密度大,不适用于厚度较大的结构.以多孔材料为芯层的夹芯结构具有高比刚高比强的优点^[5],在雷达吸波结构中有很好的应用前景.目前,关于各种夹芯型雷达吸波结构的实验和数值模拟研究已见诸报道,所研究的芯层形式包括:掺杂

* 收稿日期: 2009-11-26; 修订日期: 2010-01-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90816025; 10632060; 10640150395); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB601202); 爆炸科学与技术国家重点实验室基金资助项目(KFJJ08-15)

作者简介: 陈明继(1981—),男,福州人,博士生(Tel:+86-10-62772933;

E-mail:mj-chen04@mails.tsinghua.edu.cn);

方岱宁(联系人. E-mail:fangdn@mail.tsinghua.edu.cn).

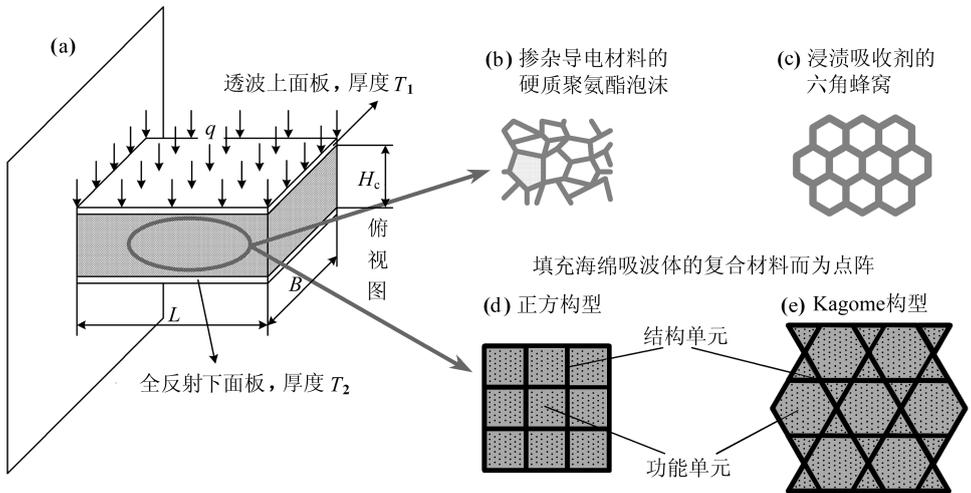
导电材料或由导电材料制备的硬质泡沫^[6-7],浸渍吸收剂的六角蜂窝^[8],以及填充海绵吸波体的复合材料二维点阵^[9-10].

在优化设计方面,只有单独对雷达吸波性能进行的研究,没有同时考虑结构的轻质和承载性能^[11-13].虽然在诸如结构致动^[14-15]和热、声处理^[16-18]等多功能设计中已经综合考虑了轻质和承载性能,但是对含有多孔材料芯层的夹芯型雷达吸波结构的多功能优化设计仍没有解决,原因是吸波性能的计算和表征,以及对目标函数中不同优化目标的权重分配还存在着困难.

本文中,我们引入一个无量纲的目标函数以结合重量和雷达吸波性能两个优化目标,从而提出了含有多孔材料芯层的夹芯型雷达吸波结构的一种多目标设计方法.优化模型为悬臂夹芯板,考虑4种不同形式的芯层.力学性能约束包括面板屈服、芯层剪切破坏和面板起皱.由传输矩阵法和周期矩量法计算出镜面反射率的平均值,作为表征吸波性能的指标.优化结果表明:以填充超轻质海绵体的复合材料二维点阵为芯层的夹芯结构,比含有多孔泡沫或六角蜂窝芯层的夹芯结构更适合作为轻质夹芯型雷达吸波结构,而 Kagome 二维点阵的吸波性能优于正方二维点阵.

1 优化模型和优化方程

4种不同芯层形式的夹芯型雷达吸波结构如图1所示.透波上面板由低介电常数的玻璃纤维增强复合材料(GFRC)制成,而全反射下面板则由导电性优良的碳纤维增强复合材料



(a) 承受均布载荷的悬臂夹芯板; (b) 掺杂导电材料的硬质聚氨酯泡沫芯层^[7]; (c) 浸渍吸收剂的六角蜂窝芯层^[8]; (d) 正方复合二维点阵芯层; (e) Kagome 复合二维点阵芯层^[9-10]

图1 优化模型示意图

(CFRC)制成.面板厚度 $T_1 = T_2 = T$,芯层高度 H_c .夹芯板的长度和宽度分别为 L 和 B .对于含有泡沫或六角蜂窝芯层的夹芯结构,无量纲化的重量指数 ψ 为

$$\psi = \frac{W}{\rho_1 B L^2} = \frac{(\rho_1 T + \rho_2 T + \rho_s V H_c) B L}{\rho_1 B L^2} = V \frac{H_c}{L} \frac{\rho_s}{\rho_1} + \frac{(\rho_1 + \rho_2) T}{\rho_1 L}, \quad (1)$$

其中, ρ_1 和 ρ_2 分别表示玻璃纤维复合材料和碳纤维复合材料面板的密度, ρ_s 和 V 为多孔芯层母体材料的密度和体积分数, W 表示整个结构的重量.复合二维点阵芯层则由结构单元和功能

单元组成,如图 1 所示.结构单元由玻璃纤维复合材料制成,而功能单元为密度 ρ_m 的超轻质海绵吸波体.于是,含有复合二维点阵芯层的夹芯结构的无量纲化重量指数为

$$\psi = \frac{W}{\rho_1 BL^2} = \frac{\rho_1 T + \rho_2 T + H_c [V\rho_1 + (1-V)\rho_m]}{\rho_1 L} = V \frac{H_c}{L} \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_1}\right) + \frac{H_c \rho_m}{L \rho_1} + \frac{(\rho_1 + \rho_2) T}{\rho_1 L}. \quad (2)$$

考虑悬臂夹芯板承受均布载荷 q 作用的情况,如图 1 所示.该情况类似于机翼承受均布风载荷.引入无量纲化载荷指数

$$\Pi = \frac{F}{E_1 BL} = \frac{q}{E_1}, \quad (3)$$

其中 E_1 为上面板的弹性模量.在这种载情况下,上下面板分别承受拉应力和压应力作用.4 种芯层形式的等效力学性能参数如表 1 所示^[5,19-20].其中, E_{c11} 和 σ_{bc} 分别表示沿板长度方向的弹性模量和强度. E_{c33} 和 τ_{bc} 分别表示沿板法线方向的弹性模量和剪切强度.带下标“s”的量表示母体材料的相应参数.

表 1 多孔材料的等效力学性能参数

构型	E_{c11}	σ_{bc}	E_{c33}	τ_{bc}
多孔泡沫	$V^2 E_s$	$0.3V^{1.5} \sigma_{bs}$	$V^2 E_s$	$0.2V^{1.5} \sigma_{bs}$
六角蜂窝	$1.5V^3 E_s$	$V^2 \sigma_{bs}/2$	VE_s	$V\tau_{bs}/2$
正方二维点阵	$VE_s/2$	$V\sigma_{bs}/2$	VE_s	$V\tau_{bs}/2$
Kagome 二维点阵	$VE_s/3$	$V\sigma_{bs}/3$	VE_s	$V\tau_{bs}/2$

当面板厚度远小于芯层高度时,可以假设弯曲正应力在面板横截面上均匀分布^[5].对于含有多孔泡沫和六角蜂窝的夹芯板,假设芯层承受剪力而面板承受弯矩^[5].计及非对称分布的上下面板弹性模量 E_1 和 E_2 ,可以推出弯曲中性层与上面板之间的距离为

$$z = \frac{\sqrt{E_2/E_1}}{1 + \sqrt{E_2/E_1}} H_c \triangleq \alpha H_c. \quad (4)$$

最大应力发生在悬臂端,其上面板中的拉应力 σ_1 ,下面板中的压应力 σ_2 和芯层中的切应力 τ_c 分别为

$$\sigma_1 = \frac{\Pi E_1}{4\alpha(T/L)(H_c/L)}, \quad \sigma_2 = \frac{\Pi(1-\alpha)E_2}{4\alpha^2(T/L)(H_c/L)}, \quad \tau_c = E_1 \Pi \left(\frac{H_c}{L}\right)^{-1}. \quad (5)$$

优化设计中,考虑 3 种破坏模式作为约束,包括面板屈服、芯层剪切破坏和面板起皱^[5]:

$$\begin{cases} (\sigma_1/\sigma_{b1}^T)^2 - 1 \leq 0 & \text{(上面板屈服),} \\ (\sigma_2/\sigma_{b2}^C)^2 - 1 \leq 0 & \text{(下面板屈服),} \\ (\tau_c/\tau_{bc})^2 - 1 \leq 0 & \text{(芯层剪切破坏),} \\ \sigma_2 \leq \left[\frac{3E_2^{1/3} E_{c33}^{2/3}}{[12(3-\nu_c)^2(1+\nu_c)^2]^{1/3}} \right] & \text{(下面板起皱),} \end{cases} \quad (6)$$

其中, σ_{b1}^T 和 σ_{b2}^C 分别表示上面板的拉伸强度和下面板的压缩强度. ν_c 为芯层的 Poisson 比.

对于以复合二维点阵为芯层的夹芯板,足够大的刚度使得芯层能够承受部分的弯曲正应力.于是,对于正方和 Kagome 二维点阵, α 的表达式分别为

$$\begin{cases} \alpha = 1 / \left(1 + \sqrt{\frac{8T/L + V(H_c/L)}{8(T/L)(E_2/E_1) + V(H_c/L)}} \right) & (\text{正方二维点阵}), \\ \alpha = 1 / \left(1 + \sqrt{\frac{12T/L + V(H_c/L)}{12(T/L)(E_2/E_1) + V(H_c/L)}} \right) & (\text{Kagome 二维点阵}). \end{cases} \quad (7)$$

对于以正方复合二维点阵为芯层的夹芯板,悬臂端应力的表达式为

$$\begin{cases} \sigma_1 = \Pi E_1 / \left\{ 2 \frac{T}{L} \frac{H_c}{L} \left[\alpha + \frac{(1-\alpha)^2 E_2}{\alpha E_1} \right] + \frac{V}{4} \left(\frac{H_c}{L} \right)^2 \left[\alpha + \frac{(1-\alpha)^2}{\alpha} \right] \right\}, \\ \sigma_2 = \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{E_2}{E_1} \sigma_1, \sigma_c^T = \frac{\sigma_1}{2} V, \sigma_c^C = \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{\sigma_1}{2} V, \tau_c = E_1 \Pi \left(\frac{H_c}{L} \right)^{-1}, \end{cases} \quad (8)$$

其中, σ_c^T 和 σ_c^C 分别表示芯层中的最大拉应力和最大压应力. 对于以 Kagome 复合二维点阵为芯层的夹芯板,悬臂端应力的表达式为

$$\begin{cases} \sigma_1 = \Pi E_1 / \left\{ 2 \frac{T}{L} \frac{H_c}{L} \left[\alpha + \frac{(1-\alpha)^2 E_2}{\alpha E_1} \right] + \frac{V}{6} \left(\frac{H_c}{L} \right)^2 \left[\alpha + \frac{(1-\alpha)^2}{\alpha} \right] \right\}, \\ \sigma_2 = \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{E_2}{E_1} \sigma_1, \sigma_c^T = \frac{\sigma_1}{3} V, \sigma_c^C = \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{\sigma_1}{3} V, \tau_c = E_1 \Pi \left(\frac{H_c}{L} \right)^{-1}. \end{cases} \quad (9)$$

以复合二维点阵为芯层的夹芯板,其芯层失效模式不同于式(6),而遵循复合材料点阵的 Hill-Tsai 准则^[21]:

$$[(\sigma_c^T/\sigma_{bc}^T)^2 + (\tau_c/\tau_{bc})^2] - 1 \leq 0, [(\sigma_c^C/\sigma_{bc}^C)^2 + (\tau_c/\tau_{bc})^2] - 1 \leq 0, \quad (10)$$

其中, σ_{bc}^T 和 σ_{bc}^C 分别表示芯层的拉伸和压缩强度,与表 1 中的 σ_{bc} 对应.

通常,材料的雷达吸波性能由如下形式的功率反射系数表征:

$$r = 10 \lg | P_r / P_i |, \quad (11)$$

其中, P_i 和 P_r 分别为入射波和镜面反射波的功率. 反射率越小,吸波性能越好. 反射率是雷达频率的函数,吸波材料设计要求在一定频率范围内保持低反射率. 本文中,我们采用设计频段 2~18GHz 内平均分布的 N 个频点上非对数形式反射率的平均值,作为评价吸波性能的指标,其表达式为

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N 10^{(r_k/10)} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N | P_r / P_i |_{k}. \quad (12)$$

多孔泡沫和六角蜂窝芯层的胞元尺寸远小于工作波长. 因此,芯层的吸波性能可以用等效介质的性能表示,其等效介电常数为^[22-23]

$$\begin{cases} \varepsilon_c = \varepsilon_s \frac{(\varepsilon_0 + 2\varepsilon_s) + 2(1-V)(\varepsilon_0 - \varepsilon_s)}{(\varepsilon_0 + 2\varepsilon_s) - (1-V)(\varepsilon_0 - \varepsilon_s)} & (\text{多孔泡沫}), \\ \varepsilon_c = \varepsilon_s \frac{(2-V)\varepsilon_0 + V\varepsilon_s}{V\varepsilon_0 - (2-V)\varepsilon_s} & (\text{六角蜂窝}), \end{cases} \quad (13)$$

其中, ε_c 和 ε_s 分别表示芯层及其母体材料的介电常数. ε_0 为自由空间的介电常数. 每一频率下的反射率可通过传输矩阵法(TMM)求解,进而由式(12)计算得出吸波性能指标 R_a .

与多孔泡沫和六角蜂窝芯层不同,复合二维点阵芯层的胞元尺寸通常与工作波长在同一量级. 这种情况下,传统的传输线理论和传输矩阵法不再适用于反射率的计算. 因此,我们提出并实现了一种基于周期矩量法(PMM)的计算方法^[10],用以求解含有复合二维点阵芯层的夹芯型雷达吸波结构的反射率.

至此,优化目标,即重量指数 ψ 和吸波性能指标 R_a , 以及力学性能约束,已分别由式(1)、(2)、(12)和式(6)、(10)给出. 含有各种形式芯层的夹芯型雷达吸波结构的优化设计,就是希望在满足力学性能约束的同时,使结构的 ψ 和 R_a 都尽可能小. 为便于分析,我们提出一个无量纲指标,将两个优化目标在同一个目标函数中予以综合考虑:

$$Q = \begin{cases} \frac{R_w - R_a}{\psi}, & R_a \leq R_w, \\ 0, & R_a > R_w, \end{cases} \quad (14)$$

其中, R_w 为设计所要求的额定反射率. 目标函数 Q 的物理含义为每单位重量的结构所能提供的超额反射率缩减. 优化程序倾向于选择那些 Q 值较大的夹芯型雷达吸波结构. 优化过程中,夹芯板的长度和宽度保持不变,设计参数取为无量纲化的芯层高度和体积分数. 对于含有多孔泡沫或六角蜂窝芯层的夹芯型雷达吸波结构,优化方程为

$$\begin{cases} \text{Find} & V, H_c/L \\ \text{make} & Q \rightarrow \max \\ \text{s. t.} & (\sigma_1/\sigma_{bl}^T)^2 - 1 \leq 0, (\sigma_2/\sigma_{b2}^C)^2 - 1 \leq 0, \\ & (\tau_c/\tau_{bc})^2 - 1 \leq 0, \\ & \sigma_2 \leq 3E_2^{1/3}E_c^{2/3}/[12(3-\nu_c)^2(1+\nu_c)^2]^{1/3}. \end{cases} \quad (15)$$

而对于以复合二维点阵为芯层的夹芯型雷达吸波结构,优化方程为

$$\begin{cases} \text{Find} & V, H_c/L \\ \text{make} & Q \rightarrow \max \\ \text{s. t.} & (\sigma_1/\sigma_{bl}^T)^2 - 1 \leq 0, (\sigma_2/\sigma_{b2}^C)^2 - 1 \leq 0, \\ & [(\sigma_c^T/\sigma_{bc}^T)^2 + (\tau_c/\tau_{bc})^2] - 1 \leq 0, \\ & [(\sigma_c^C/\sigma_{bc}^C)^2 + (\tau_c/\tau_{bc})^2] - 1 \leq 0, \\ & \sigma_2 \leq 3E_2^{1/3}E_c^{2/3}/[12(3-\nu_c)^2(1+\nu_c)^2]^{1/3}. \end{cases} \quad (16)$$

2 计算结果和讨论

我们考虑 $L = B = 0.3$ m 的方形夹芯板,面板厚度 $T_1 = T_2 = T = 1.2$ mm. 所选用的玻璃纤维复合材料(GFRC)和碳纤维复合材料(CFRC)为正交各向异性材料,两个主轴方向的性能相同. 材料的密度及其主轴方向的力学性能参数^[24]如表2所示. 玻璃纤维复合材料的介电常数为 $2.7\varepsilon_0$.

表2 面板所用玻璃纤维复合材料(GFRC)和碳纤维复合材料(CFRC)的相关参数

材料	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm})^{-3}$	弹性模量 E/GPa	拉伸强度 σ_b^T/MPa	压缩强度 σ_b^C/MPa	剪切强度 τ_b/MPa	Poisson 比 ν
GFRC	1.8	22	600	450	120	0.18
CFRC	1.45	57	670	410	110	0.07

硬质聚氨酯泡沫和 nomex 六角蜂窝的母体材料参数分别为^[5]

$$\rho_s = 1.2 \text{ g/cm}^3, \sigma_{bs} = 127 \text{ MPa}; \rho_s = 1.2 \text{ g/cm}^3, \tau_{bs} = 23 \text{ MPa}.$$

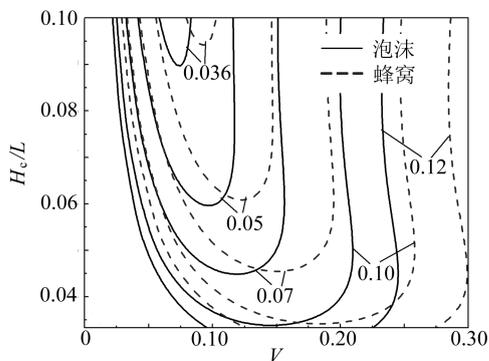
海绵吸波体是一种超轻质多孔材料,其密度为 $\rho_m = 0.096 \text{ g/cm}^3$, 介电常数为

$$\varepsilon_m = (2.07 - 1.10j)\varepsilon_0.$$

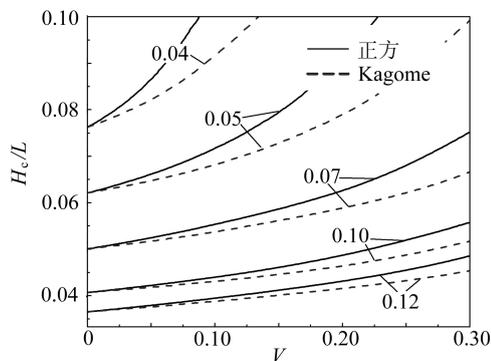
对于掺杂导电材料的硬质聚氨酯泡沫,浸渍吸收剂的六角蜂窝以及海绵吸波体,令其母体

材料的介电常数相等,均为 $\varepsilon_s = \varepsilon'_s - j\varepsilon''_s = (20 - 20j)\varepsilon_0$.

在设计参数的典型取值范围 $0.03 \leq H_c/L \leq 0.1, 0 < V \leq 0.3$ 之内,我们计算出含 4 种形式芯层的夹芯型雷达吸波结构的吸波性能指标 R_a , 其等高线如图 2 所示. 对于含多孔泡沫和六角蜂窝芯层的夹芯型雷达吸波结构(图 2(a)), 可以看出最小反射率所对应的体积分数分别为 $V = 0.06$ 和 $V = 0.08$. 将这两个 V 值代入式(13), 可以推出芯层材料的最佳介电常数约为 $(1.8 - 0.8j)\varepsilon_0$, 而填充在复合材料二维点阵孔隙中的海绵吸波体的介电常数 $\varepsilon_m = (2.07 - 1.10j)\varepsilon_0$, 与该最佳值相近. 含复合二维点阵芯层的夹芯型雷达吸波结构, 其反射率对体积分数变化的敏感度小于泡沫和蜂窝芯层的情况. 这是因为当体积分数在 0 到 0.3 之间变化时, 泡沫和蜂窝芯层的等效介电常数变化范围很大. 而对于复合二维点阵芯层, 结构单元和功能单元材料的独立设计使得体积分数为 $(1 - V)$ 的海绵吸波体始终占据芯层的大部分空间. 从图 2(b) 中可以看出, Kagome 二维点阵比正方二维点阵更有利于反射率缩减. 随着体积分数 V 的增加, Kagome 二维点阵对正方二维点阵的优势变得更加显著.

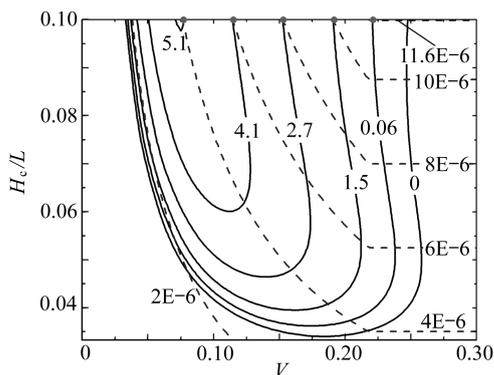


(a) 芯层为多孔泡沫和六角蜂窝

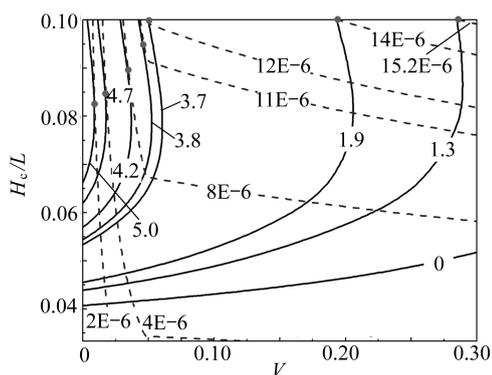


(b) 芯层为复合二维点阵

图 2 夹芯型雷达吸波结构吸波性能指标 R_a 的等高线图



(a) 含六角蜂窝芯层的夹芯型
雷达吸波结构



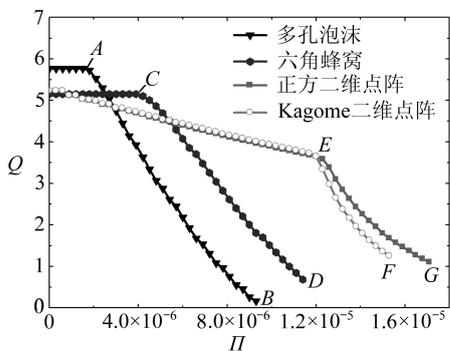
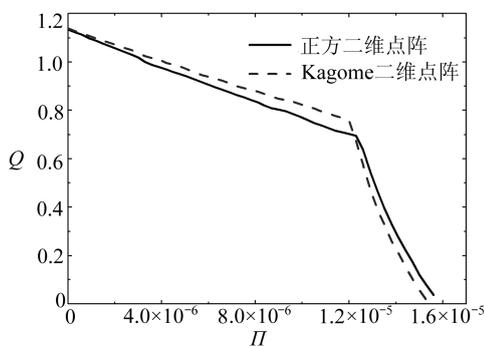
(b) 含 Kagome 复合二维点阵芯层的
夹芯型雷达吸波结构

图 3 目标函数(实线)和载荷指数(虚线)的等高线图

当设计要求的额定反射率取为 $R_w = 0.1$ 时,针对式(15)和(16)给出的优化方程,进行了优化设计. 将目标函数 Q (图 3 中实线)和载荷指数 II (图 3 中虚线)的等高线图相重叠,可以得到一定设计载荷下 Q 的最大值,及其所对应的设计参数 V 和 H_c/L , 如图 3 所示. 最大目标函数随设计载荷指数的变化关系如图 4(a) 所示.

对于含六角蜂窝芯层的夹芯型雷达吸波结构,由图 3(a)可以观察到两种主导的破坏模式,即芯层剪切破坏和下面板屈服.这两种破坏模式的分界线位于 $V = 0.22$ 处.当设计载荷指数小于 $4E-6$ 时,目标函数可以取到同一最大值 $Q = 5.1$,相应的设计参数为 $V = 0.07$ 和 $H_c/L = 0.1$,如图 3(a)所示.这一过程对应于图 4(a)中 C 点之前带实心圆的曲线.当设计载荷指数大于 $4E-6$ 时,优化的体积分数随设计载荷增大而增大,以避免芯层剪切破坏.因此,最大目标函数迅速减小,直至达到 0.06 ,此时相应的载荷指数为 $11.6E-6$,如图 3(a)所示.这一过程对应于图 4(a)中 C 点和 D 点之间的曲线.当设计载荷指数超过 $11.6E-6$ 时,将发生面板屈服,此时在参数范围 $H_c/L \leq 0.1$ 之内设计的夹芯结构无法再承受更大的载荷.多孔泡沫芯层的情况与六角蜂窝芯层的情况非常类似.

含 Kagome 复合二维点阵芯层的夹芯型雷达吸波结构的 Q 和 Π 的等高线如图 3(b)所示.芯层破坏和下面板屈服两种破坏模式的分界线位于 $V = 0.05$ 处.当设计载荷指数小于 $12E-6$ 时,优化的设计参数可以由 Q 和 Π 等高线的切点处得到.两个优化的设计参数都随设计载荷的增大而增大,以避免芯层破坏.正如图 4(a)中 E 点之前带空心圆的曲线所示,最大目标函数以较小的斜率随设计载荷增大而减小.当设计载荷指数大于 $12E-6$ 时,优化的无量纲芯层高度达到其上限值.优化的体积分数随设计载荷的增大而增大,以避免面板屈服的发生.因此,最大目标函数迅速减小,直至到达 1.3 ,此时对应的载荷指数为 $15.2E-6$,如图 3(b)所示.这一过程对应于图 4(a)中 E 点和 F 点之间的曲线.当设计载荷指数达到 $15.2E-6$ 时,在参数范围 $H_c/L \in [0.03, 0.1]$ 和 $V \in (0, 0.3]$ 之内设计的夹芯结构将无法承受更大的载荷.正方二维点阵的情况和 Kagome 二维点阵的情况类似.

(a) 额定反射率 $R_w = 0.1$ (b) 额定反射率 $R_w = 0.05$ 图 4 最大目标函数 Q 随设计载荷指数 Π 的变化曲线

从图 4(a)中可以看出,含复合二维点阵芯层的夹芯型雷达吸波结构的轻质和吸波性能优于含多孔泡沫或六角蜂窝芯层的夹芯型雷达吸波结构,尤其在设计载荷较大的情况下.当选取较小的额定反射率 $R_w = 0.05$ 时,目标函数中吸波性能的权重增大,Kagome 二维点阵对正方二维点阵的优势清楚地显现出来,如图 4(b)所示.

3 结 论

本文通过引入一个无量纲化目标函数来综合评价重量和雷达吸波性能两个优化目标,提出了针对含有多孔材料芯层的夹芯型雷达吸波结构的一种多目标优化设计方法.两个优化目标的权重可以通过选取不同的额定反射率进行调节.借助该方法,可以在 3 种破坏模式的约束下,优化得到不同设计载荷所容许的最大目标函数,及其所对应的优化设计参数.本文的优化

结果表明:以填充超轻质海绵体的复合材料二维点阵为芯层的夹芯结构,比含有多孔泡沫或六角蜂窝芯层的夹芯结构更适合作为轻质夹芯型雷达吸波结构,而 Kagome 二维点阵则表现出优于正方二维点阵的吸波性能。

参考文献:

- [1] Vinoy K J, Jha R M. *Radar Absorbing Materials: From Theory to Design and Characterization*[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [2] Oh J H, Oh K S, Kim C G, *et al.* Design of radar absorbing structures using glass/epoxy composite containing carbon black in X-band frequency ranges[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2004, **35**(1):49-56.
- [3] Chin W S, Lee D G. Development of the composite RAS (radar absorbing structure) for the X-band frequency range[J]. *Composite Structures*, 2007, **77**(4):457-465.
- [4] Lee S E, Kang J H, Kim C G. Fabrication and design of multi-layered radar absorbing structures of MWNT-filled glass/epoxy plain-weave composites[J]. *Composite Structures*, 2006, **76**(4):397-405.
- [5] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.
- [6] Yang J, Shen Z M, Hao Z B. Microwave characteristics of sandwich composites with mesophase pitch carbon foams as core[J]. *Carbon*, 2004, **42**(8/9):1882-1885.
- [7] Park K Y, Lee S E, Kim C G, *et al.* Fabrication and electromagnetic characteristics of electromagnetic wave absorbing sandwich structures[J]. *Composite Science Technology*, 2006, **66**(3/4):576-584.
- [8] Gao Z P, Luo Q. Reflection characteristics of impregnated absorbent honeycomb under normal incidence of plane wave[J]. *Journal of UEST of China*, 2003, **32**(4):389-394.
- [9] Fan H L, Yang W, Chao Z M. Microwave absorbing composite lattice grids[J]. *Composite Science Technology*, 2007, **67**(15/16):3472-3479.
- [10] Chen M, Pei Y, Fang D. Computational method for radar absorbing composite lattice grids[J]. *Computational Materials Science*, 2009, **46**(3):591-594.
- [11] Chambers B, Tennant A. Design of wide-band Jaumann radar absorbers with optimum oblique-incidence performance[J]. *Electronics Letters*, 1994, **30**(18):1530-1532.
- [12] Goudos S K, Sahalos J N. Microwave absorber optimal design using multi-objective particle swarm optimization[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2006, **48**(8):1553-1558.
- [13] Yuan H, Xiao G, Cao M S. A novel method of computation and optimization for multi-layered radar absorbing coatings using open source software[J]. *Materials and Design*, 2006, **27**(1):45-52.
- [14] Lu T J, Hutchinson J W, Evans A G. Optimal design of a flexural actuator[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2001, **49**(9):2071-2093.
- [15] Han L H, Lu T J, Evans A G. Optimal design of a novel high authority SMA actuator[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2005, **12**(3):217-227.
- [16] Lu T J, Valdevit L, Evans A G. Active cooling by metallic sandwich structures with periodic cores[J]. *Progress in Materials Science*, 2005, **50**(7):789-815.
- [17] Liu T, Deng Z C, Lu T J. Bi-functional optimization of actively cooled, pressurized hollow sandwich cylinders with prismatic cores[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*,

- 2007, **55**(12):2565-2602.
- [18] Wang X L, Lu T J. Optimized acoustic properties of cellular solids[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1999, **106**(2):756-765.
- [19] Zhang Y H, Qiu X M, Fang D N. Mechanical properties of two novel planar lattice structures [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, **45**(13):3751-3768.
- [20] Ashby M F, Evans A G, Fleck N A, et al. *Metal Foams: A Design Guide*[M]. Boston: Butterworth Heinemann, 2000.
- [21] Zhang Y H, Fan H L, Fang D N. Constitutive relations and failure criterion of planar lattice composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, **68**(15/16):3299-3304.
- [22] Johansson M, Holloway C L, Kuester E F. Effective electromagnetic properties of honeycomb composites, and hollow-pyramidal and alternating-wedge absorbers [J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2005, **53**(2):728-736.
- [23] Zhang H T, Zhang J S, Zhang H Y. Computation of radar absorbing silicon carbide foams and their silica matrix composites[J]. *Computational Materials Science*, 2007, **38**(4):857-864.
- [24] Kong J A. *Electromagnetic Wave Theory*[M]. New York: Wiley, 1990.
- [25] 陈祥宝. 聚合物基复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

Multi-Objective Optimization Design of Radar Absorbing Sandwich Structure

CHEN Ming-ji¹, PEI Yong-mao², FANG Dai-ning^{1,2}

(1. AML, Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China;

2. LTCS, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, P. R. China)

Abstract: By introducing a dimensionless parameter to couple the two objectives, weight and radar absorbing performance, in a single objective function, a multi-objective optimization procedure for radar absorbing sandwich structure (RASS) with cellular core has been proposed. The optimization models considered were one-side clamped sandwich panels with four kinds of cores which were subject to uniformly distributed loads. The average specular reflectivity calculated by transfer matrix method and periodic moment method was utilized to characterize the radar absorbing performance, while the mechanical constraints included facesheet yielding, core shearing and facesheet wrinkling. The optimization analysis indicated that sandwich structure with two-dimensional (2D) composite lattice core filled with ultra-lightweight spongy may be a better candidate of lightweight RASS than those with cellular foam or hexagonal honeycomb cores. The 2D Kagome lattice was found to outperform the square lattice with respect to radar absorbing.

Key words: sandwich structure; multi-objective optimization; lightweight; radar absorbing; failure mode