

双重孔径泡沫金属材料的强度和热性能多目标优化设计 *

寇东鹏 虞吉林

(中国科学技术大学中科院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230027)

摘要 对双重孔径泡沫金属稳态热传导过程进行了数值模拟, 发现相同密度下双重孔径泡沫金属导热系数高于单一孔径泡沫金属, 但随着孔径比增大, 材料导热系数减小. 通过对有限元计算结果的多项式拟合得到了目标函数, 建立了包含强度、隔热和轻质 3 个目标函数的多目标优化设计数学模型, 讨论了构件质量一定的情况下双重孔径泡沫金属材料设计参数的选取, 获得了满足强度要求, 同时隔热性能最优的泡沫金属孔径比、密度和构件厚度. 泡沫金属构件隔热参数——屈服应力图表明, 作为同时满足承载和隔热要求的泡沫金属板构件, 选用双重孔径泡沫金属的构件综合性能要显著优于单一孔径泡沫金属构件.

关键词 泡沫金属, 强度, 热性能, 多目标优化设计

中图法分类号 TB331

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2010)01-0104-07

MULTI-OBJECTIVE OPTIMUM DESIGN FOR STRENGTH AND HEAT INSULATION OF METAL FOAM WITH DUAL-SIZE CELLULAR STRUCTURE

KOU Dongpeng, YU Jilin

CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027

Correspondent: YU Jilin, professor, Tel: (0551)3600792, E-mail: jlyu@ustc.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (Nos.10672156, 10532020 and 90916026)

Manuscript received 2009-06-22, in revised form 2009-09-21

ABSTRACT Finite element simulations are performed to study the steady state heat conduction of dual-size metal foams. Simulation results reveal that for a given density, the thermal conductivity of dual-size foams is higher than that of uniform cell size foam. However, the effective thermal conductivity decreases while increasing the cell radius ratio r/R in dual-size foams. A multi-objective optimum design model considering structure strength, heat insulation and light mass requirement is developed, where the objective function is obtained through polynomial fitting of the numerical results. The model is solved by the constraint method and the optimum cell radius ratio, density and thickness of metal foam are obtained for dual-size metal foams. A comparison of the heat insulation capacity of the dual-size metal foam to the single-size metal foam having the same mass and yield strength shows that the heat insulation capacity of the former is much higher than that of the latter. Hence the dual-size foam structure is superior to that of the uniform cell foam when both load-bearing and heat insulation capacities are required.

KEY WORDS metal foam, strength, thermal property, multi-objective optimum design

多孔金属的性能与其他材料相比, 突出的优点在于其

多功能特性. 泡沫金属在工程应用中可能涉及其力学、热学等多方面的性能, 不同的性能要求对材料参数的选择甚至可能是矛盾的, 因此需要进行综合评估, 选取合适的材料参数. 除了对泡沫金属各单一性能作进一步研究外, 根据多样化的应用需求发展表征泡沫金属多功能特性的指标参数, 是进行泡沫金属多目标优化设计的重要内容.

随着对多孔金属力学性能认识的深入, 应用于包装、

* 国家自然科学基金项目 10672156, 10532020 和 90916026 资助

收到初稿日期: 2009-06-22, 收到修改稿日期: 2009-09-21

作者简介: 寇东鹏, 男, 1982 年生, 博士生

DOI: 10.3724/SP.J.1037.2009.00414

能量吸收及夹芯结构的泡沫金属构件设计方法已经取得很大进展^[1]。泡沫金属夹芯结构在各种加载条件下的最小质量设计已经被广泛研究^[2-6]。Evans 等^[7]对各种多孔材料(结构)的力学、热学、声学等性能作了综述并阐述了多目标优化目标参数的确定以及优化设计方法。Zhu 等^[8]对泡沫金属隔热构件沿热传导方向进行了密度梯度的设计,以使构件隔热性能最佳。Gu 等^[9]对不同构型的二维通孔结构的热扩散性能和承载性能进行了比较,讨论了同时考虑结构热阻、结构抗剪切刚度和结构重量 3 个参数的多目标优化设计问题。李录贤等^[10]建立了双参数优化模型,得到了夹层圆管最佳传热和最小重量优化设计结构。Rakow 和 Waas^[11]研究了泡沫金属夹芯构件弯曲变形对结构隔热性能的影响,对结构的应变-温度场变化过程进行了数值模拟和实验研究,为指导构件的参数选取提供了参考。在近空间飞行器等领域,泡沫金属复合结构以更优异的性能替代传统的承载材料并兼具隔热功能。本课题组^[12]曾提出了一种具有双重孔径的开孔泡沫金属结构,并对其刚度和强度进行了优化,但目前对同时考虑其力学和热学性能的多目标优化问题的研究尚未见报道。

本文首先对双重孔径泡沫金属的稳态热传导过程进行数值模拟,以研究双重孔径泡沫金属密度和孔径比对材料导热系数的影响,然后将结合双重孔径泡沫金属的力学性能和热性能,讨论同时满足结构强度和热性能要求的材料参数优化设计方法。

1 双重孔径泡沫金属的热性能

1.1 有限元模型

导热系数是表征材料热传导能力的基本参数,定义为单位温度梯度下,在垂直于热流方向的单位面积上所传导的热量。对于多孔材料,如泡沫金属,在计算材料导热系数时还须考虑对流及热辐射的影响,稳态热传导条件下材料等效导热系数可定性描述为

$$k_{\text{eff}} = k_{\text{solid}} + k_{\text{gas}} + k_c + k_r \quad (1)$$

式中, k_{solid} , k_{gas} , k_c 和 k_r 分别为固体热传导、气体热传导、对流和热辐射的贡献^[1,7]。与实体金属的导热系数(200—300 W/(m·K))相比,气体的导热系数(0.025 W/(m·K))很低,因此 k_{gas} 对泡沫金属导热系数的贡献很小。当多孔材料孔径低于 10 mm 时,孔内气体的自然对流很弱, k_c 可忽略^[13]。孔穴内的热辐射贡献 k_r 在固体材料导热系数大于 20 W/(m·K) 时也可忽略^[14]。因此,如不考虑强制对流传热,可以认为泡沫金属的等效热传导系数完全由基体材料的热传导 k_{solid} 决定。

对不同微观拓扑的二维多孔材料热性能的理论研究发现,多孔材料热传导系数与其相对密度成正比,但其比例系数与微观拓扑结构有关^[15],目前尚未发现微观结构对三维多孔材料热性能影响的理论研究。实验研究方面,由于测量技术和精度的限制,对多孔材料热传导可参考的

文献很少,且结果差别较大^[16,17],对泡沫金属传热性能的研究只有复模铸造法制备的、相对密度小于 0.1 的泡沫金属的实验结果^[14],尚未发现有渗流铸造法制备泡沫金属热性能的报道。本文将通过对单一孔径和双重孔径泡沫金属稳态热传导过程进行数值模拟,研究微观结构对泡沫金属热性能的影响。

双重孔径泡沫金属的几何单胞模型如图 1 所示。泡沫金属孔洞半径分别为 R 和 r ,半径为 R 的两个孔洞球心间距离为 a ,泡沫金属基体材料使用 ABAQUS 单元库中的 DC3D4 单元(四面体传热单元)模拟。通过网格尺寸收敛性分析^[12],单元尺寸为 $0.014a$ 。进行稳态热传导分析时,根据对称性对 4 个侧面施加绝热边界条件,单胞模型的上下表面温度分别保持为 T_{top} 和 T_{bottom} ,上下表面的温差将在基体材料内部产生沿 Y 方向的热流,通过记录沿 Y 方向流过基体材料的热流强度 q ,可以得到泡沫金属单胞的等效热传导系数 k_{eff} ,

$$k_{\text{eff}} = -\frac{qL}{T_{\text{top}} - T_{\text{bottom}}} \cdot k_s \quad (2)$$

式中, $L = a/\sqrt{2}$,为单胞的边长; k_s 为泡沫金属基体材料的导热系数,本文取为 250 W/(m·K)。

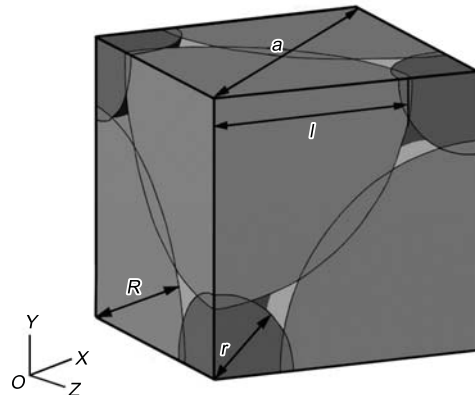


图 1 双重孔径泡沫金属单胞几何模型

Fig.1 Representative unit of open-cell metal foam with dual-size cellular structure

1.2 泡沫金属的热性能

图 2 为计算得到的不同孔径比的泡沫金属单胞导热系数与相对密度之间的关系,其中 ρ^* 和 ρ_s 分别为泡沫金属材料密度及基体材料密度。可以看到,随着相对密度的提高,泡沫金属的导热系数也逐渐增大,单一孔径泡沫金属($r/R=0$)的导热系数与相对密度基本成线性关系。双重孔径泡沫金属的导热系数高于单一孔径泡沫金属,但在本文研究的孔径比范围内,随着孔径比的增大,材料的导热系数减小,尤其对低密度泡沫金属,双重孔径泡沫金属导热系数随孔径比的增加明显下降。在相对密度较高时,改变双重孔径泡沫金属的孔径比对材料导热系数影响很小,相对密度为 0.18 时,各泡沫金属单胞模型的导热系

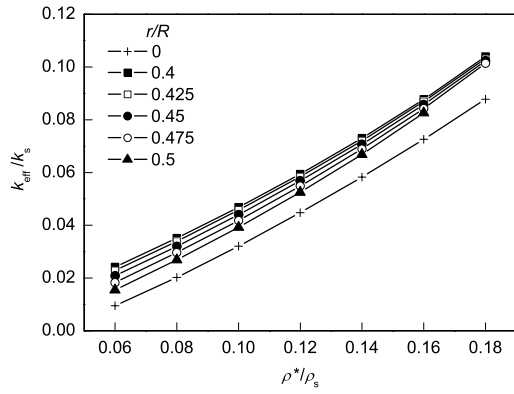


图 2 泡沫金属单胞的导热系数

Fig.2 Relationships between apparent thermal conductivity and relative density of metal foams with different ratios of r and R

数几乎相同.

2 双重孔径泡沫金属板的多目标优化设计

2.1 多目标优化设计问题的提出

在航空航天和汽车工业等领域,许多结构件需要同时满足强度、隔热和轻质的要求.如图 3 所示, x 方向上厚度为 d ,垂直 x 方向尺度足够大的泡沫金属隔热构件,在材料和结构的隔热防火性能标准测试中,隔热构件一侧通过高温气体由常温迅速升温至指定值,之后隔热构件高温侧温度基本保持不变,隔热构件背高温侧自由散热,通过测量背高温侧的温度来测试隔热构件的性能^[18].在实际应用中通常要求结构背高温一侧的温度低于某一设定温度 T_C ,结构的耐火度 T_F 可定义为结构背高温侧温度恰好为 T_C 时高温侧所能承受的最高温度^[15].因此,构件耐火度 T_F 可通过下式确定^[15]:

$$T_F = T_C + \frac{hd}{k_{\text{eff}}}(T_C - T_0) \quad (3)$$

式中, T_0 为泡沫金属的初始温度; h 为与泡沫金属外表面散热有关的常数,其取值范围为 $10\text{--}90\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,对于多孔金属隔热构件(通常为夹芯结构), h 主要表征了泡沫金属外表面向结构蒙皮散热对整个构件隔热性能的影响,在本文研究的孔隙率 $82\%\text{--}94\%$ 范围内,对单一孔径和双重孔径泡沫金属,与结构蒙皮黏接的泡沫金属表面积相差不大,因此,参照文献^[15],取 $h=50\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.定义隔热参数 I

$$I = \frac{T_F - T_C}{T_C - T_0} = \frac{hd}{k_{\text{eff}}} \quad (4)$$

将图 2 中双重孔径泡沫金属的导热系数代入式(4)得到泡沫金属板的隔热性能如图 4 所示.对于相同厚度的泡沫金属板,提高材料密度将显著降低结构隔热性能,对于相同密度的双重孔径泡沫金属,随着孔径比的提高,泡沫金属隔热构件隔热性能也提高.当相对密度大于 0.14 时,不同孔径比的双重孔径泡沫金属隔热性能基本相同.

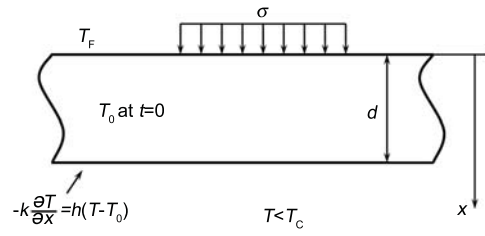


图 3 给定载荷和温度边界条件的泡沫金属隔热构件

Fig.3 Heat insulation panel of metal foam with specified boundary conditions

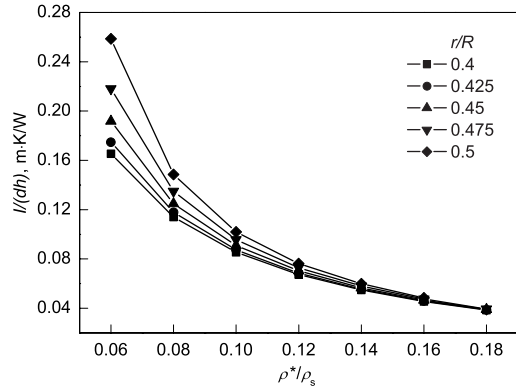


图 4 双重孔径泡沫金属的隔热性能

Fig.4 Heat insulation properties of dual-size metal foams

力学性能方面,随着密度的增大,材料屈服强度提高,相同密度下,孔径比为 0.425 左右时材料的屈服强度最大^[12].然而,相对密度的提高将明显降低泡沫金属板的隔热性能,在低密度下孔径比越大,泡沫金属板的隔热性能越好.此外,增加板厚也可提高结构的隔热性能.结构的轻质要求则希望泡沫金属的密度 ρ^*/ρ_s 和厚度 d 越小越好.因此,如图 3 所示涉及到 3 个决策变量 ρ^*/ρ_s , r/R 和 d 的双重孔径泡沫金属板,针对每一单一目标优化进行的参数选取与其他目标优化的参数选取是相互矛盾的,需要进行多目标优化设计,以选取同时满足强度、隔热和轻质要求的材料参数.对于如图 3 所示的隔热构件,优化问题可以表示为

最大化:

$$\sigma, I, 1/m \quad (5a)$$

决策空间:

$$\left. \begin{aligned} 0.06 \leq \rho^*/\rho_s \leq 0.2 \\ 0.4 \leq r/R \leq 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (5b)$$

其中,相对屈服强度 $\sigma = \sigma^*/\sigma_s = \sigma(\rho^*/\rho_s, r/R)$,隔热参数 $I = I(\rho^*/\rho_s, r/R, d)$,质量参数 m 定义为单位面积泡沫金属板的质量(即相对密度与厚度的乘积).

2.2 目标函数拟合

为了对式(5)的多目标优化问题进行求解,首先要得到目标函数关于设计参量的表达式.对多重孔径泡沫金属这类几何构型较为复杂的构件,难以得到目标函数 $\sigma(\rho^*/\rho_s, r/R)$ 及 $I(\rho^*/\rho_s, r/R, d)$ 的解析表达式.为此,

本文通过对有限元计算数据的多项式拟合获得目标函数表达式.

图 5 给出了不同孔径比双孔径泡沫金属的相对屈服强度与相对密度关系曲线. 利用该图提供的 n 个有限元

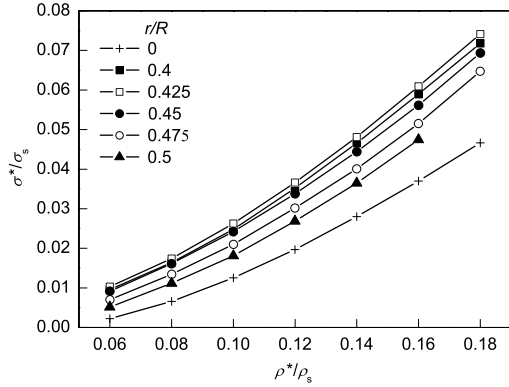


图 5 双重孔径泡沫金属的力学性能

Fig.5 Curves of relative strength σ^*/σ_s vs relative density ρ^*/ρ_s of metal foams with different r/R values

计算数据点 $[(\rho^*/\rho_s)_k, (r/R)_k, \sigma_k], k = 1, \dots, n$, 可以用式 (6) 拟合双重孔径泡沫金属相对屈服强度 σ . 式 (6) 中, 相对密度和孔径比的最高阶数分别为 $p-1$ 和 $q-1$, A_{ij} 为 $p \times q$ 的系数矩阵元. 为求得此系数矩阵, 构造多元函数 S 如式 (7) 所示. 式 (7) 中, $\omega((\rho^*/\rho_s)_k, (r/R)_k)$ 为权函数, 这里取为 1. 由最小二乘法可知, 为使函数 S 的值最小, 变量 $A_{00}, A_{01}, \dots, A_{(p-1)(q-1)}$ 需满足式 (8) 所示方程组. 对函数 S 求偏导并移项可得式 (9). 式 (9) 中, $\varphi_{ij} = [(\rho^*/\rho_s)_k]^i [(r/R)_k]^j$. 将有限元分析得到的各数据点代入式 (9), 进行矩阵运算即可求得系数矩阵 A .

图 6a 为 $p = q = 4$ 时得到的拟合多项式函数曲面图, 与有限元计算数据点的结果吻合较好. 拟合函数对应的系数矩阵 A 如式 (10) 所示.

同样地, 设双重孔径泡沫金属隔热参数 I 可用式 (11) 的多项式拟合. 式 (11) 中, 令 $p'=3, q'=4$ 得到的多项式函数曲面图与有限元计算数据点如图 6b 所示, 拟合多项式中的系数矩阵 B 如式 (12) 所示

$$\sigma(\rho^*/\rho_s, r/R) = \sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{q-1} A_{ij} (\rho^*/\rho_s)^i (r/R)^j \tag{6}$$

$$S(A_{00}, A_{01}, \dots, A_{(p-1)(q-1)}) = \sum_{k=1}^n \omega((\rho^*/\rho_s)_k, (r/R)_k) \cdot$$

$$\left[\sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{q-1} A_{ij} [(\rho^*/\rho_s)_k]^i [(r/R)_k]^j - \sigma_k \right]^2 \tag{7}$$

$$\frac{\partial S}{\partial A_{ij}} = 0 \quad (i = 0, 1, \dots, p-1; j = 0, 1, \dots, q-1) \tag{8}$$

$$\begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n (\varphi_{00}, \varphi_{00}) & \cdots & \sum_{k=1}^n (\varphi_{00}, \varphi_{0(q-1)}) & \cdots & \sum_{k=1}^n (\varphi_{00}, \varphi_{(p-1)(q-1)}) \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{k=1}^n (\varphi_{(p-1)(q-1)}, \varphi_{00}) & \cdots & \sum_{k=1}^n (\varphi_{(p-1)(q-1)}, \varphi_{0(q-1)}) & \cdots & \sum_{k=1}^n (\varphi_{(p-1)(q-1)}, \varphi_{(p-1)(q-1)}) \end{pmatrix} \cdot$$

$$\begin{pmatrix} A_{00} \\ \vdots \\ A_{0(q-1)} \\ \vdots \\ A_{(p-1)(q-1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n (\varphi_{00}, \sigma_k) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^n (\varphi_{0(q-1)}, \sigma_k) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^n (\varphi_{(p-1)(q-1)}, \sigma_k) \end{pmatrix} \tag{9}$$

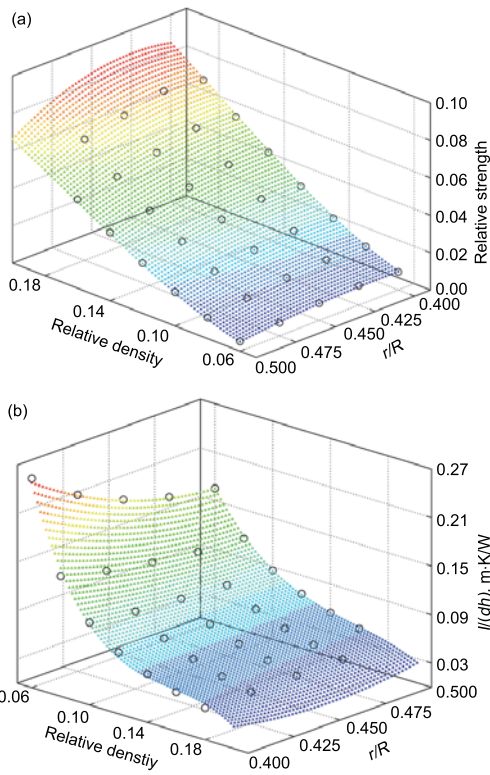


图 6 相对屈服强度的多项式拟合

Fig.6 Polynomial fitted curved surface and FEM calculated data of relative yield strength (a) and heat insulation parameter $I/(dh)$ (b)

$$A = 1.0 \times 10^4 \cdot \begin{pmatrix} -0.0002 & 0.0053 & -0.0635 & 0.1634 \\ 0.0017 & -0.0373 & 0.4433 & -1.1634 \\ -0.0038 & 0.0867 & -1.0132 & 2.5920 \\ 0.0029 & -0.0663 & 0.7619 & -1.9427 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$I(\rho^*/\rho_s, r/R, d) = dh \sum_{i=0}^{p'-1} \sum_{j=0}^{q'-1} B_{ij} (\rho^*/\rho_s)^i (r/R)^j \quad (11)$$

$$B = 1.0 \times 10^5 \cdot \begin{pmatrix} 0.0082 & -0.0836 & -0.0981 & 1.8983 \\ -0.0395 & 0.4461 & -0.0258 & -7.6041 \\ 0.0546 & -0.7031 & 1.3477 & 5.7186 \end{pmatrix} \quad (12)$$

对于单一孔径泡沫金属,其屈服应力和隔热参数是相对密度的函数,为与双重孔径泡沫金属进行比较,对单一孔径泡沫金属的相对屈服强度 σ 及隔热参数 I 分别用多项式及指数函数拟合,拟合曲线如图 7 所示,拟合函数式分别如式 (13) 和 (14) 所示. 联立式 (13) 和 (14) 消去 ρ^*/ρ_s 可得式 (15). 式 (13)—(15) 中所有物理量均使用国际单位制 (kg, m, s, K, W).

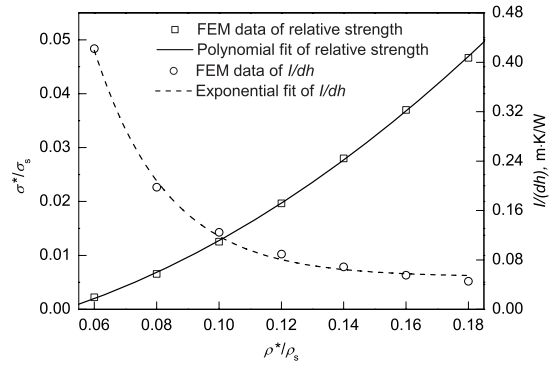


图 7 单一孔径泡沫金属的函数拟合

Fig.7 Fittings of parameters for uniform cell size foam

$$\sigma = -0.0062 + 0.0579(\rho^*/\rho_s) + 1.3185(\rho^*/\rho_s)^2 \quad (13)$$

$$I = h[m/(\rho^*/\rho_s)][0.047 + 4.33\exp(-40.95(\rho^*/\rho_s))] \quad (14)$$

$$I = mh[0.047 + 4.33\exp(-40.95 \cdot (\sqrt{\sigma/1.3185 + 0.0052} - 0.0219))]/ (\sqrt{\sigma/1.3185 + 0.0052} - 0.0219) \quad (15)$$

2.3 多目标优化设计问题求解

求解多目标优化设计问题的常用方法有约束法、分层序列法、评价函数法、功效系数法、目标规划法和逐步法等,本文使用约束法进行优化求解. 约束法求解多目标优化问题的主要思想是:在欲优化的多个目标中,选取一个主要目标,并给出其余目标的希望值作为分目标的可行满意解,从而将多目标优化问题转化为单目标优化问题. 在本文的研究中,以泡沫金属板隔热参数 I 为主要目标,给定相对屈服强度 σ 和单位面积质量 m 的希望值,式 (5) 的多目标优化问题可化为如下单目标优化问题:

$$\text{最大化: } I(\rho^*/\rho_s, r/R, d) \quad (16a)$$

$$\text{约束条件: } \left. \begin{aligned} \sigma(\rho^*/\rho_s, r/R) - \sigma^0 &= 0 \\ m(\rho^*/\rho_s, d) - m^0 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (16b)$$

$$\text{决策空间: } \left. \begin{aligned} 0.06 \leq \rho^*/\rho_s \leq 0.2 \\ 0.4 \leq r/R \leq 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (16c)$$

其中,相对屈服强度希望值 $\sigma^0 = [0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07]$, 固定 m 值为相对密度 0.1、厚度 100 mm 的泡沫金属板的质量参数,即令 $m^0 = 0.01$. 对应不同的 σ^0 值,通过式 (17) 可得到孔径比 - 相对密度 - 隔热参数空间内的一组曲线.

$$I = \left. \begin{aligned} & \frac{m^0 \cdot h}{(\rho^* / \rho_s)} \sum_{i=0}^{p'-1} \sum_{j=0}^{q'-1} B_{ij} (\rho^* / \rho_s)^i (r/R)^j \\ & \sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{q-1} A_{ij} (\rho^* / \rho_s)^i (r/R)^j - \sigma^0 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

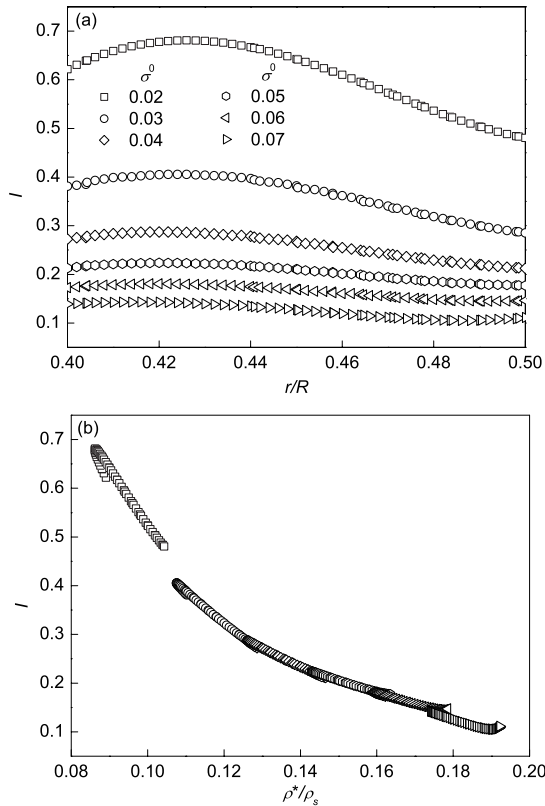


图 8 等质量泡沫金属板隔热参数 I 与孔径比 r/R 及相对密度 ρ^*/ρ_s 的关系
 Fig.8 Effects of r/R (a) and ρ^*/ρ_s (b) on the heat insulation index I of metal foam panel

图 8 给出了目标函数 I 与决策参数 r/R 和 ρ^*/ρ_s 的关系。可以看到，相对屈服强度希望值较低时，改变孔径比和相对密度对结构隔热性能的影响较为显著，优化作用较为明显。对于相同的相对屈服强度希望值，选择相对密度最低的泡沫金属能获得最佳的隔热性能，最优的孔径比则随 σ^0 的不同而略有差别。固定泡沫金属隔热构件的质量，取不同 σ^0 希望值时使构件隔热性能最优的泡沫金属相对密度、孔径比及构件厚度如表 1 所示。

图 9 给出了质量参数 $m^0=0.01$ 时泡沫金属板的 $I-\sigma$ 图，图中单一孔径泡沫金属的 $I-\sigma$ 曲线由式 (15) 确定。从图中可以看到，对于如式 (5) 的多目标优化设计问题，构件的质量一定时，对于给定的承载强度要求，可以通过对泡沫金属孔径比和相对密度的优化设计使构件的隔热性能达到某个上限，但进一步提高构件的隔热要求，则需要以降低构件的承载性能来实现，反之亦然，即无法求得使构件隔热性能和承载性能同时最优的“绝对最优解”。从图中还可以看到，双重孔径泡沫金属板构件综合性能要显著优于相同质量的单一孔径泡沫金属板。

表 1 等质量泡沫金属板的优化参数

Table 1 Optimal results of metal dual-size foam panel with identical mass

| σ^0 | I_{max} | Optimal parameter | | |
|------------|-----------|-------------------|-------|----------------|
| | | ρ^*/ρ_s | r/R | d, mm |
| 0.02 | 0.681 | 0.086 | 0.426 | 115.9 |
| 0.03 | 0.406 | 0.108 | 0.422 | 93.0 |
| 0.04 | 0.287 | 0.126 | 0.420 | 79.3 |
| 0.05 | 0.224 | 0.143 | 0.420 | 69.9 |
| 0.06 | 0.181 | 0.159 | 0.420 | 62.9 |
| 0.07 | 0.143 | 0.174 | 0.416 | 57.4 |

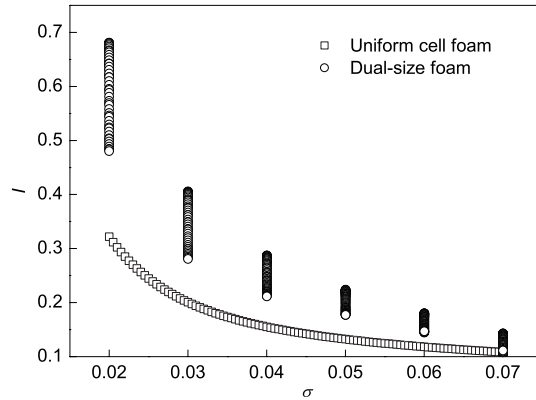


图 9 等质量双重孔径泡沫金属板的多目标优化效应
 Fig.9 Multi-object optimization of dual-size foam panel with identical mass

3 结论

(1) 渗流法制备泡沫金属引入二级孔洞将改变基体材料在泡沫金属中的分布，使材料的导热系数提高，在相对密度较低时，引入二级孔洞可以使材料导热系数提高 1 倍以上。但在双重孔径泡沫金属中，随着孔径比的增大，材料的热传导系数减小。

(2) 通过建立包含强度、隔热和轻质 3 个目标函数的多目标优化设计数学模型，采用约束法将多目标优化问题转化为单目标优化问题进行了求解。在构件质量一定的情况下，得到满足强度要求，同时使隔热性能最优的泡沫金属孔径比、相对密度和构件厚度。

(3) 获得了质量一定情况下不同孔径比泡沫金属板构件隔热参数 - 屈服应力图。结果表明，作为同时满足承载和隔热要求的泡沫金属板构件，选用双重孔径泡沫金属的综合性能要显著优于单一孔径泡沫金属板。

参考文献

[1] Ashby M F, Evans A G, Fleck N A, Gibson L J, Hutchinson J W, Wadley H N G. *Metal Foams: A Design Guide*. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000: 113
 [2] Hanssen A G, Langseth M, Hopperstad O S. *Int J Mech Sci*, 2001; 43: 153
 [3] Chen W, Wierzbicki T, Santosa, S. *Acta Mech*, 2002; 153: 183

- [4] Steeves C A, Fleck N A. *Int J Mech Sci*, 2004; 46: 561
- [5] Hanssen A G, Stobener K, Rausch G, Langseth M, Keller H. *Int J Crashworthiness*, 2006; 11: 231
- [6] Magnucka-Blandzia E, Magnucki K. *Thin-Walled Struct*, 2007; 45: 432
- [7] Evans A G, Hutchinson J W, Ashby M F. *Prog Mater Sci*, 1998; 43: 171
- [8] Zhu H, Sankar B V, Haftka R T, Venkataraman S, Blosser M. *Struct Multidisciplinary Optimization*, 2004; 28: 349
- [9] Gu S, Lu T J, Evans A G. *Int J Heat Mass Trans*, 2001; 44: 2163
- [10] Li L X, Li Y M, Hong L, Yan G R, Chen C Q, Shen S P. *Adv Mech*, 2008; 38: 256
(李录贤, 李跃明, 洪 灵, 闫桂荣, 陈常青, 申胜平. 力学进展, 2008; 38: 256)
- [11] Rakow J F, Waas A M. *AIAA J*, 2007; 45: 329
- [12] Kou D P, Li J R, Yu J L, Cheng H F. *Scr Mater*, 2008; 59: 483
- [13] Calmidi V V, Mahajan R L. *J Heat Transfer-Transactions ASME*, 1999; 121: 466
- [14] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*. 2nd ed, Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 283
- [15] Lu T J, Chen C. *Acta Mater*, 1999; 47: 1469
- [16] Carbonell R G, Whitaker S. In: Bear J, Corapcioglu M Y eds., *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*. Boston: Kluwer, 1984: 123
- [17] Hsu C T, Cheng P, Wong K W. *ASME J Heat Trans*, 1995; 117: 264
- [18] ASTM. *ASTM Standard Methods of Fire Tests of Building Construction and Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM, 1988: E119