

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.035

猪舍废气净化系统填料结构多目标拓扑优化设计与试验

王昱^{1,2} 牟剑^{1,2} 曾志雄^{1,2} 吕恩利^{1,2} 刘喜佳¹ 涂彬¹

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 针对猪舍废气净化系统的填料结构, 提出同时考虑结构机械性能与净化空间需求进行填料结构设计。将填料结构视为一种周期性结构, 基于逆向均匀化方法和参数化水平集方法相结合的多目标拓扑优化方法, 对周期性结构的单胞拓扑结构进行优化。以填料结构的最大等效体积模量和最大等效渗透率为优化目标, 以等效孔隙率为约束条件, 通过 Hashin - Shtrikman 属性边界得到等效体积模量及等效渗透率的极值, 运用帕累托优化法求得满足多目标条件的帕累托最优解。根据帕累托最优解设计了不同孔隙率的填料结构构型, 并通过试验验证填料结构设计方法的可行性与正确性。试验表明, 填料结构前后端压力差与填料结构孔隙率成反比, 与前端风速成正比; 当填料结构孔隙率分别为 80%、85% 和 90% 时, 稳定后平均除氨效率分别为 66%、62% 和 58%。本研究可为猪场废气净化系统填料结构设计提供参考, 可根据不同猪舍对风阻与净化效率的实际要求选择填料结构。

关键词: 猪舍; 废气净化; 拓扑优化设计; 填料; 周期结构

中图分类号: TU264+.3; TK414.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)07-0329-06

OSID:



Structural Optimization Design of Packing Material for Waste Gas Purification System of Pig House

WANG Yu^{1,2} MU Jian^{1,2} ZENG Zhixiong^{1,2} LÜ Enli^{1,2} LIU Xijia¹ TU Bin¹

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The structure of packing material was designed for waste gas purification system of pig house, and structural mechanical properties and purification space requirements were both considered in the designing process. The packing material was regarded as a kind of periodic structure, and the topology of the cell structure was optimized based on a multi-objective optimization method that combined the reverse homogenization method and the parametric level set method. In the optimization design, the maximum effective bulk modulus and the maximum effective permeability of the packing material were taken as the optimization objectives, and the effective porosity was taken as the constraint. The maximum values of effective bulk modulus and effective permeability coefficient were obtained by Hashin - Shtrikman property boundary. Pareto optimization method was used to achieve the Pareto optimal solution satisfying the multi-objective conditions. Three numerical examples achieved structural designs of the packing material under different porosities, and the feasibility and correctness of the proposed design method was verified by experiments. The experimental data showed that the pressure difference between front and rear of the packing material was inversely proportional to the porosity of the packing structure and directly proportional to the inlet wind speed. When the porosities of packing material were 80%, 85% and 90%, the average ammonia removal efficiencies were 66%, 62% and 58%, respectively. The research result can provide a reference for the design of the packing structure for waste gas purification system, and the proper packing material can be selected according to the actual requirement of wind resistance and purification efficiency in different pig houses.

Key words: pig house; waste gas purification; topological optimization design; packing material; periodic structure

收稿日期: 2020-09-10 修回日期: 2020-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51705161、31971806)、国家重点研发计划项目(2016YFD0701100)和广州市基础科学研究计划基础与应用基础研究项目(202102020870)

作者简介: 王昱(1987—), 女, 副教授, 博士, 主要从事结构优化设计方法和智能畜牧装备研究, E-mail: yu-wang@scau.edu.cn

0 引言

随着人们对肉食需求的日益增长,畜禽产业不断发展壮大。猪肉在整个肉食产业中占有很大比例。生猪养殖过程中产生的废气对畜禽及环境的危害日益严重。废气主要包括氨气(NH_3)、甲硫醇(CH_4S)、硫化氢(H_2S)、甲胺(CH_3NH_2)和挥发性有机化合物(VOSs)等空气污染物。这些污染物不但会降低牲畜的免疫力、代谢能力和生产能力,而且对养殖人员的健康造成威胁。如果将废气排放到空气中会加剧空气污染,导致产生酸雨等极端气候问题。因此,在大力发展肉食产业的同时,对养殖过程中产生的废气进行净化处理是国内外关注的重点问题^[1-2]。

化学吸收法是一种主要采用的畜禽养殖末端废气净化方法,在填料中与洗涤液反应,生成新的无害气体,从而达到脱臭目的^[3]。填料为废气与洗涤液提供发生化学反应所需的物理空间,是影响废气净化效率的关键因素^[4-8]。填料结构应具有承受填料自身重量和外界压力载荷的刚度,使其在自身重力或外界压力载荷作用下维持形状的稳定^[9]。同时,鉴于填料对猪舍内通风量的影响,需要考虑填料孔中气体的渗透率,以减小废气排放过程中的空气阻力。

在考虑填料材料的前提下,设计高效的填料结构、加快净化速度、提升处理效率已成为填料结构研究中的关键问题。目前,采用填料结构进行有害气体过滤的研究相对较少^[10-11],而现有的在一定孔隙率下达到最大体积模量、渗透率的填料结构设计研究存在不足。自20世纪90年代SIGMUND^[12]提出微结构拓扑优化理论以来,以材料力学性能及其性能组合为目标的优化方法在微结构材料设计方面得到了广泛应用^[13-16],但鲜有研究关注针对废气净化填料的**最大体积模量、渗透率的微结构结构设计及其性能验证**。

本文基于拓扑优化方法设计符合多项设计目标的周期排列填料结构。以一个具有周期性边界的基本单元(又称单胞)为设计域,通过基于参数化水平集方法(Parametric level set method, PLSM)^[17]和逆向均匀化方法(Reverse homogenization method, RHM)^[18]相结合的多目标拓扑优化方法对单胞内部结构进行优化,从而得到满足多项属性要求的最优解。利用废气净化试验台对所设计填料结构的实际风阻与除氨效率进行试验验证,为猪场填料结构设计提供参考。

1 填料单胞结构拓扑优化

利用基于PLSM和RHM相结合的多目标拓扑优化方法,对填料结构进行拓扑优化设计。在PLSM中,固体材料相是由一个水平集函数来表示。在任意点上的弹性张量为

$$\mathbf{C}(x) = \mathbf{C}_{base} H(\Phi(x)) \quad (1)$$

式中 \mathbf{C}_{base} ——固体材料的弹性张量

$H(\Phi(x))$ —— x 处对于水平集函数 $\Phi(x)$ 的Heaviside函数值

通过计算Darcy-Stokes粘性矩阵 \mathbf{K} 对材料的渗透率进行插值,即

$$\mathbf{K}(x) = \mathbf{K}_d H(\Phi(x)) + \mathbf{K}_s (1 - H(\Phi(x))) \quad (2)$$

式中 \mathbf{K}_d ——Darcy刚度张量

\mathbf{K}_s ——Stokes刚度张量

流体通过固态材料相时服从达西定律,而流体相为斯托克斯流。假设设计域的体积为 $|Y|$,孔隙率计算式为

$$V = 1 - \frac{1}{|Y|} \int_Y H(\Phi(x)) dY \quad (3)$$

假设填料结构材料是由周期性微结构体(单胞)组成,图1a为宏观坐标 x 下的周期结构,图1b为微观坐标 y 下的单胞结构,微结构体的几何尺寸极小于材料的特征尺寸。因此,周期性结构的等效性能可以由微结构体的性能通过均匀化方法进行计算。拓扑优化的设计域为一个单胞,该材料宏观的等效体积模量 B^H 和等效流体渗透率 k^H 均可以用数值均匀化方法^[19-20]计算。

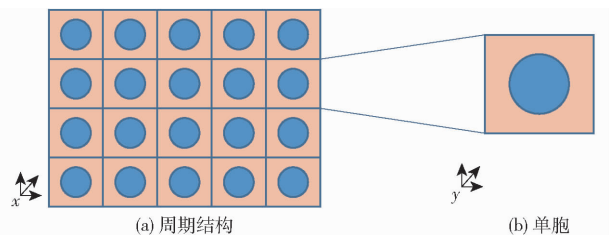


图1 周期排列填料结构示意图

Fig. 1 Schematics of periodic arrangement of packing structure

2 多目标优化问题

本设计考虑的多目标优化问题以一定孔隙率为约束条件,填料结构达到最大体积模量、最大渗透率和最大比表面积为目标。在求解多目标优化问题时,需要寻求帕累托最优解^[21]。很多方法可以得到帕累托最优解,包括序贯优化法、约束法、权重法、极小极大法、折衷规划法、目标规划、成对比较法、权衡法和替代的价值权衡法。其中,被广泛应用的折衷

规划目标函数^[22-23]表达式为

$$l(X) = \left(\sum_{i=1}^k w_i^p \left| \frac{f_i^{\max} - f_i(X)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (4)$$

式中 $f_i(X)$ ——第 i 个目标函数

f_i^{\min} ——获得的 f_i 最小值

f_i^{\max} ——获得的 f_i 最大值

w_i ——第 i 个目标 f_i 的权重

p 间接控制每一个目标的权重。当 $p = 1$ 时, 其是简单的权重法; 当 $p \rightarrow \infty$ 时, 其是极小极大法; 当 $p \geq 2$ 时, 括号中的值越大, 权重越大。

其中, $p = 1$ 时的权重法是最容易实现的一种方法, 所以本文在求解多目标优化问题中寻求帕累托最优解用的方法是权重法。

基于权重法, 本文所涉及的多目标拓扑优化设计问题表示为

$$\begin{cases} \text{Min} J = w_B \frac{B_{\max} - B^H(\alpha)}{B_{\max} - B_{\min}} + w_k \frac{k_{\max} - k^H(\alpha)}{k_{\max} - k_{\min}} \\ \text{Sub} \begin{cases} V(\alpha) = V^* \\ g(C^H(\alpha), K^H(\alpha)) \leq 0 \\ h(\alpha) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中 α ——设计变量

$B^H(\alpha)$ ——微结构等效体积模量

B_{\max} ——体积模量函数最大值

B_{\min} ——体积模量函数最小值

w_B ——第 1 项材料性能目标的权重

w_k ——第 2 项材料性能目标的权重

$k^H(\alpha)$ ——微结构等效渗透率

$K^H(\alpha)$ ——渗透率约束

$C^H(\alpha)$ ——体积模量约束

k_{\max} ——渗透率函数最大值

k_{\min} ——渗透率函数最小值

V^* ——多孔材料指定孔隙率

$V(\alpha)$ ——多孔材料实际孔隙率

等式约束 $h(\alpha) = 0$ 表示相关的平衡方程。不等式 $g(C^H(\alpha), K^H(\alpha)) \leq 0$ 表示等效本构属性的约束, 包括对称性约束。在此研究中考虑了各向同性流体及结构弹性性能的立方对称性。

在求解多目标拓扑优化解之前, 通过 Hashin - Shtrikman 属性边界^[24], 求解 B_{\min} 、 B_{\max} , 并通过单目标优化求解 k_{\max} 。填料结构为多孔结构, 其孔隙率应占到整体结构的 80% 以上, 否则会产生填料堵塞, 降低过滤效率。当形成封闭的孔隙时, 渗透率为 0, 所以在孔隙率为 80%、85%、90% 时 k_{\min} 为 0, 表 1 给出了不同孔隙率下等效体积模量与渗透率极值。

表 1 等效体积模量和等效渗透率的极值

Tab.1 Extreme values of effective volume modulus and permeability

V/%	k_{\max}	k_{\min}	B_{\max}	B_{\min}
80	0.016 4	0	0.074 7	$8.212 4 \times 10^{-5}$
85	0.020 8	0	0.054 7	$7.708 0 \times 10^{-5}$
90	0.026 8	0	0.036 3	$7.261 1 \times 10^{-5}$

3 数值算例

通过优化设计方法设计不同目标等效体积模量、渗透率和孔隙率的三维复合材料微结构。设定填料结构材料相材料属性为: 弹性模量 $E = 1$ MPa, 泊松比 $\nu = 0.3$ 。体积模量权重 w_B 和渗透率权重 w_k 均为 0.5。

三维微结构优化设计结果如表 2 所示。可以看出, 由水平集函数的零水平集所表示出的拓扑结构材料边界清晰。由于本研究的目标等效体积模量和等效渗透率是实现一个范围的交叉属性。因此, 所获得的填料结构材料等效性能在一定孔隙率下需符合 Hashin - Shtrikman 属性边界。本文所设计的填料结构材料的体积弹性模量符合要求。根据上述数值算例的结果可以看出, 所提出的优化设计方法能够设计具有不同孔隙率、等效体积模量和渗透率的三维复合材料微结构。这反映了所提出优化设计方法的可靠性和有效性。由此可以得到填料结构设计的宏观结构图。

表 2 三维微结构优化设计结果

Tab.2 Results of optimization design of 3D microstructures

材料等效性能	单胞结构	单胞结构的 5 × 5 × 5 阵列
$V = 80\%$ $B = 0.038 3$ $k = 0.012 1$		
$V = 85\%$ $B = 0.029 9$ $k = 0.015 1$		
$V = 90\%$ $B = 0.023 2$ $k = 0.016 7$		

由表 2 可知, 不同孔隙率单胞构型的等效体积模量随孔隙率增大而减小, 等效渗透率随孔隙率增大而增大。可根据对填料刚度和空气阻力的需求, 选择合适的孔隙率, 并对填料构型进行优化设计。

根据已有相关微结构拓扑优化设计方法的结果,微结构构型常常依赖于优化的初始构型。由于3个算例所使用的初始构型相同,以致孔隙率为80%、90%的单胞结构所得的优化后的微结构构型相近。这是因为优化方法在求解过程中,经过前期拓扑变化后,进入形状优化的阶段并逐步趋向收敛。因此,即使孔隙率80%、90%的单胞结构具有相同拓扑结构,但其边界形状却具有较大的差别。由于本优化设计中,两项材料性能目标的权重均设为0.5,可根据对不同性能的侧重调整权重,获得符合性能需求的设计结果。

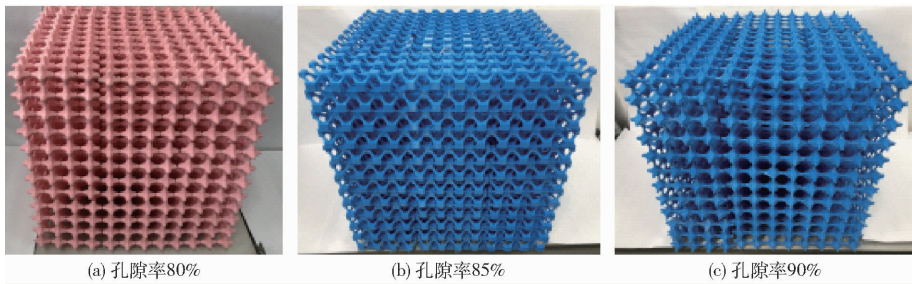


图2 3D打印填料结构实物图

Fig. 2 Physical maps of 3D printing packing structure

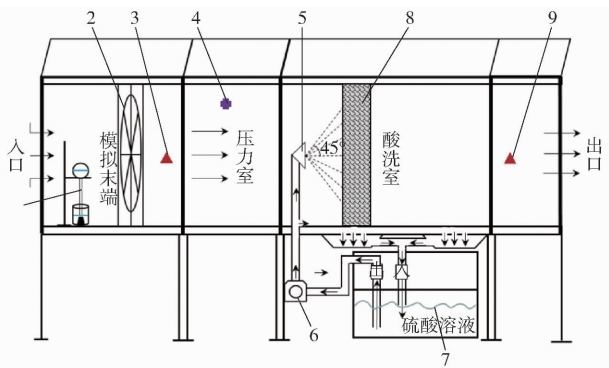


图3 试验台原理图

Fig. 3 Illustrative diagram of experimental platform

1. 超声波雾化装置 2. 负压风机 3、9. 氨气传感器 4. 压差传感器 5. 酸洗喷头 6. 酸洗泵 7. 酸洗箱 8. 填料结构

浓度进行监测。通过PLC控制系统实时采集净化系统内的氨气浓度、压差等数据。

4.2 试验结果分析

通过废气净化系统试验台进行孔隙率填料结构的风阻测定。运用负压风机,通过调节风机频率改变填料前端风速,同时测定不同风速下通过填料结构的后端风速,运用风速与压力的转换关系得到前后端压力,通过压力差来评价填料结构的风阻效果。系统数据采集频率为10 s,实物图如图4所示。

通过调节风机频率,测定范围选取10~40 Hz,频率间隔选取3 Hz,每个频率连续测定前后端压差10 min,取压差平均值进行风阻评价。3种孔隙率填料结构前端风速与前后端压力差的关系如图5所

4 试验

4.1 试验设计

利用3D打印机制造数值算例中的3种不同孔隙率的模型,打印尺寸为300 mm×300 mm×300 mm,如图2所示。华南农业大学工程学院针对猪场废气净化技术搭建了废气净化试验台^[25],试验台原理图如图3所示,整个试验通过超声波雾化氨水方法生成氨气,由负压风机将生成的氨气吸入试验台,模拟猪场末端排出的氨气。试验台架的进出口处装有4~20 mA信号型氨气传感器,对填料结构前后端氨气

示。由图5可得,填料结构前后端压力差与填料结构孔隙率成反比,与前端风速成正比,与优化设计目标相符。



图4 试验台架实物图

Fig. 4 Physical map of experimental platform

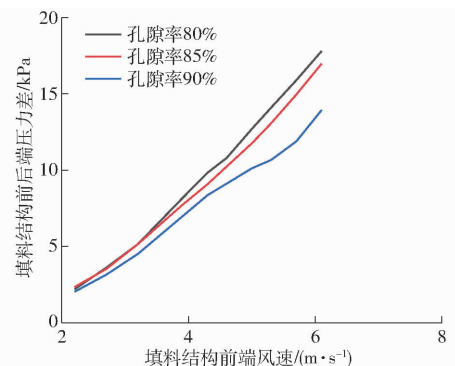


图5 3种孔隙率的填料结构风阻变化曲线

Fig. 5 Wind resistance curves of three kinds of porosity packing structures

通过废气净化系统试验台进行填料结构除氨效率试验。系统每10 s采集1次数据,将采集的数据

从 PLC 数据库导出。洗涤液为 pH 值等于 2 的硫酸溶液,试验台入口处氨气质量浓度在 25.96 ~ 33.39 mg/m³ 之间波动,不同填料结构下除氨效率如图 6 所示。试验中,随着喷淋的洗涤液逐步覆盖填料,除氨效率由初始状态上升至稳定值。当填料结构孔隙率分别为 80%、85% 和 90% 时,稳定后平均除氨效率分别为 66%、62% 和 58%。根据数据可知孔隙率越小的填料结构所达到的除氨效率越高,但

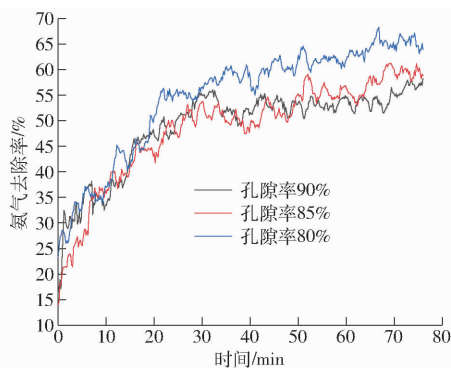


图 6 3 种孔隙率的填料结构除氨效率变化曲线

Fig. 6 Change curves of ammonia removal efficiency of three kinds of porosity packing structures

是填料风阻越大。

5 结束语

基于逆向均匀化方法和参数化水平集方法提出用于设计具有多项属性的三维复合材料微结构的优化方法,应用该方法对废气填料结构进行优化设计。该方法成功地将数值均匀化方法和高效的 PLSM 方法相结合。数值算例证明,该优化方法可通过设计固体材料的分布在一定孔隙率和比表面积下获得等效刚度(体积模量)与质量传输性能(渗透率)的帕累托最优解,从而达到提高猪舍废气净化效率的目的。通过试验验证了填料结构设计方法的可行性与正确性,通过风阻试验和除氨效率试验验证了不同孔隙率的填料结构设计目标与实际风阻相吻合,并分析了不同填料孔隙率对除氨效率的影响。经试验测得当填料结构孔隙率为 80%、85% 和 90% 时,稳定后平均除氨效率分别为 66%、62% 和 58%。本研究可为提高猪舍废气净化处理的净化效率与填料风阻性能提供参考。

参 考 文 献

- 钱翌,宋开慧,赵荣敏. 氨气污染与 PM_{2.5} 的关系研究进展[J]. 环境工程,2018,36(5):84-88,99.
QIAN Yi, SONG Kaihui, ZHAO Rongmin. Research advances in relationship between ammonia pollution and PM_{2.5} [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(5): 84-88, 99. (in Chinese)
- CAROLINE V H, DEMEYER P, EVELINE I P V. Mitigating emissions from pig and poultry housing facilities through air scrubbers and biofilters: state-of-the-art and perspectives[J]. Biosystems Engineering, 2015, 134(4): 74-93.
- 王黎虹,赵旭涛,齐国庆,等. 化学填料塔工艺净化恶臭废气的研究[J]. 工业安全与环保,2007(1):43-45.
WANG Lihong, ZHAO Xutao, QI Guoqing, et al. Study on treatment of odorous waste gas by chemical-packing column [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2007(1): 43-45. (in Chinese)
- ROLAND W M, JOHAN P M P, NICO W M O. Biotrickling filter for the treatment of exhaust air from a pig rearing building: ammonia removal performance and its fluctuations[J]. Biosystems Engineering, 2012, 113(3): 242-252
- 郭霞,李伯阳,莫文锐,等. 低浓度有毒有害气体净化技术及研究进展[J]. 环境科学导刊, 2016, 35(增刊): 125-131.
GUO Xia, LI Boyang, MO Wenrui, et al. Advances of technologies of purifying poisonous and harmful gas with low concentration [J]. Environmental Science Survey, 2016, 35(Supp.): 125-131. (in Chinese)
- 朱仁成,张雅丽,徐淑敏,等. 废气生物净化用填料的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(7): 146-151, 181.
ZHU Rencheng, ZHANG Yali, XU Shumin, et al. Review in biological filters for the waste gas purification [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(7): 146-151, 181. (in Chinese)
- 徐晓军. 恶臭气体生物净化理论与技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- 杨亮,刘春红,郭昱辰,等. 基于 EMD-LSTM 的猪舍氨气浓度预测研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 353-360.
YANG Liang, LIU Chunhong, GUO Yuchen, et al. Prediction of ammonia concentration in fattening piggery based on EMD-LSTM [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 353-360. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2019s054&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.054. (in Chinese)
- ZHU R, LI S, BAO X, et al. Evaluation of new type of synthetic filler for the removal of NO_x [J]. Asian Journal of Chemistry, 2015, 27(1): 361-364.
- MOHAMMAD J J, AMIR H M, ALIREZA R, et al. Experimental optimization of a spray tower for ammonia removal [J]. Atmospheric Pollution Research, 2018, 9(4): 783-790.
- 王艾伦,金敬岗,汪开英. 畜禽场微生物除臭技术的研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(1): 18-21, 28.
WANG Ailun, JIN Jinggang, WANG Kaiying. Research progress on microbial deodorization technologies in livestock farms [J].

- Chinese Journal of Animal Science,2019,55(1):18-21,28. (in Chinese)
- [12] SIGMUND O. Materials with prescribed constitutive parameters; an inverse homogenization problem[J]. International Journal of Solids and Structure,1994,31(17):2313-2329.
- [13] CHENG K T, OLHOFF N. An investigation concerning optimal design of solid elastic plates[J]. International Journal of Solids and Structures,1981,17(3):305-323.
- [14] EMÍLIO C N S, JUN S O F, KIKUCHI N. Optimal design of periodic piezocomposites[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,1998,159(1):49-77
- [15] 刘书田,郑新广,程耿东. 特定弹性性能材料的微观结构设计优化[J]. 复合材料学报,2001(2):124-127.
LIU Shutian, ZHENG Xinguang, CHENG Gengdong. Microstructure design optimization of materials with specific elastic properties[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2001(2):124-127. (in Chinese)
- [16] 王凤稳,张卫红,孙士平,等. 多相材料传热微结构的多目标优化设计[J]. 力学学报,2007(5):708-714.
WANG Fengwen, ZHANG Weihong, SUN Shiping, et al. Multi-objective design of the multi-phase microstructure for thermal conductivity optimization[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2007(5):708-714. (in Chinese)
- [17] LUO Z, TONG L. A level set for shape and topology optimization of large-displacement compliant mechanisms [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,2008,76(6):862-892.
- [18] BENDSØE M P, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering,1988,71(2):197-224.
- [19] HASSANI B, HINTON E. A review of homogenization and topology optimization III—topology optimization using optimality criteria[J]. Computers & Structures,1998,69(6):739-756.
- [20] KANG H, LIN C Y, HOLLISTER S J. Topology optimization of three dimensional tissue engineering scaffold architectures for prescribed bulk modulus and diffusivity[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization,2010,42(4):633-644.
- [21] PARETO V. L'Insegnamento Dell'economia politica[J]. Giornale degli Economisti,1890(1):533-536.
- [22] SAVE M, PRAGER W. Mathematical programming[M]. New York: Plenum Press,1985.
- [23] KAISA M, MARKO M M. On cone characterizations of weak, proper and Pareto optimality in multiobjective optimization[J]. Mathematical Methods of Operations Research, 2001,53(2):233-245.
- [24] HASHIN Z, SHTRIKMAN S. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials [J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids,1963,11(2):127-140.
- [25] 曾志雄,董冰,吕恩利,等. 猪舍环境无线多点多源远程监测系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(2):332-340,349.
ZENG Zhixiong, DONG Bing, LÜ Enli, et al. Design and experiment of wireless multi-point and multi-source remote monitoring system for pig house environment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(2):332-340,349. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2002036&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.036. (in Chinese)