

基于拓扑优化的砂型铸造金属芯骨结构优化方法

王 圣 殷亚军 周建新 沈 旭 计效园
(华中科技大学材料成型与模具技术国家重点实验室)

摘 要 金属芯骨可以增强型芯透气性,提高型芯强度。但其结构设计方法单一,主要依靠人工经验,导致金属芯骨材料分配不合理。提出了一种基于拓扑优化的砂型铸造金属芯骨结构优化方法。该方法采用 SIMP(Solid Isotropic Material with Penalization)拓扑优化模型对金属芯骨结构进行优化,并将优化后的金属芯骨应用于砂芯中进行抗弯强度试验。结果表明,优化前后砂芯抗弯强度相当,且与优化前芯骨相比,优化后芯骨质量减少 59.9% 以上,优化效果明显。

关键词 金属芯骨;拓扑优化;砂型铸造;SIMP

中图分类号 TG242;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.07.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



An Optimization Method of Metal Core Bar for Sand Casting Based on
Topology Optimization

Wang Sheng, Yin Yajun, Zhou Jianxin, Shen Xu, Ji Xiaoyuan
(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology,
Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: Metal core bar can enhance the air permeability and improve the core strength. However, the traditional design method of metal core bar is very simple and mainly relies on artificial experience which makes the metal core bar material distribution unreasonable. Therefore, a topology optimization method for metal core bar structure was proposed in the sand casting. SIMP(Solid Isotropic Material with Penalization) topology optimization model was used to optimize the structure of metal core bar. Meanwhile, the optimized metal core bar was applied to the bending strength experiment of sand core. The experimental results reveal that difference between the bending strength before and after optimization can be neglected. Compared with the normal shape of the metal core bar, the weight of the optimized core bar is reduced by more than 59.9%, exhibiting a satisfied effects.

Key Words: Metal Core Bar, Topology Optimization, Sand Casting, SIMP

在绿色、轻量化技术指标要求下,高性能航天航空、武器装备、汽车动力、能源等核心装备的关键铸件朝着复杂化、大型化、一体化制造方向发展^[1]。砂型铸造具有生产成本低、应用合金种类广泛等特点,被广泛应用于上述装备的复杂关键零件的制造。在传统砂型铸造生产大型复杂铸件过程中,需将砂芯分成几块分别制备组装,同时要考虑装配定位和精度问题,导致制作周期长、成本高,难以制造复杂型腔模具。随着激光 3D 打印技术的成熟,复杂砂型(芯)形状制造变得简单^[2]。但铸造过程对复杂砂型(芯)性能要求是多元化的,不同结构、不同壁厚部位对砂型的强度、溃散性、发气量的要求不同。而在型芯中添加金属芯骨可以增强型芯透气性

和溃散性,提高型芯强度,解决发气量大等问题^[3],可以从一定程度上满足砂型(芯)的多元化要求。在愈发复杂庞大的砂型(芯)中,金属芯骨数量越来越多,分布也更复杂^[4~6]。传统金属芯骨的设计都是依赖经验进行,为寻求简便,通常将其设计为圆柱体,结构单一。虽然其在一定程度上能满足砂型(芯)的力学性能要求,但存在性能过剩、资源浪费、成本增加的问题。

目前,结构优化由于能够得到最优的分布,被越来越多地用于材料成形领域,具体可分为尺寸优化、形状优化和拓扑优化等。尺寸优化与形状优化是通过改变目标的尺寸或形状,从而达到优化目的。而拓扑优化通过寻求结构中节点最优连接方式,在设计中找到最佳的

收稿日期:2021-02-08;修改稿收到日期:2021-03-03
基金项目:国家自然科学基金联合基金资助项目(U1808216);国防科技重点实验室基金资助项目(6142A02190303)
第一作者简介:王圣,男,1995 年出生,硕士研究生,武汉(430070),E-mail:wangsheng9502@163.com
通信作者:殷亚军,男,1985 年出生,副教授,武汉(430070),E-mail:yinyajun436@hust.edu.cn
引用格式:王圣,殷亚军,周建新,等. 基于拓扑优化的砂型铸造金属芯骨结构优化方法[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(7):853-857.
WANG S, YIN Y J, ZHOU J X, et al. An optimization method of metal core bar for sand casting based on topology optimization[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7):853-857.

材料分布,从而得到满足力学性能要求的轻量结构^[7~9]。拓扑优化现已广泛运用于航空航天、军工、汽车等领域的关键零件设计,也常被用于建筑、桥梁等结构设计。因为该方法最终目的是寻求最佳材料分布,所以拓扑优化对于产品的轻量化、绿色化生产具有重要意义,但在砂型铸造领域中,拓扑优化研究报道很少^[10,11]。

因此,本课题提出一种基于拓扑优化的金属芯骨优化方法。该方法通过对砂芯与金属芯骨浇注充型过程中的受力进行分析,并将其受力条件作为初始条件,对金属芯骨进行拓扑优化,最终达到用最少的材料满足砂芯性能要求的目的。完成金属芯骨拓扑优化后,设计砂芯抗弯强度试验,对比优化前后金属芯骨对砂芯抗弯强度的影响。结果表明,优化后的金属芯骨可以满足砂芯力学性能要求。金属芯骨拓扑优化方法的提出不仅弥补了芯骨形状设计的空白,也为实际生产中金属芯骨的设计提供指导,同时也为铸造工艺优化研究提供参考。

1 金属芯骨拓扑优化方法

传统拓扑优化方法包括均匀化方法、变密度法、可移动组件法等。其中变密度法是应用最为广泛的拓扑优化方法之一。因此,本课题基于变密度法开展金属芯骨的拓扑优化研究,主要包括金属芯骨的变密度材料插值模型(SIMP)、优化准则求解方法、敏度过滤以及拓扑优化的整体流程。

1.1 变密度材料插值模型(SIMP)

在变密度材料插值模型中,引入了单元密度概念。即将金属芯骨设计区域离散为有限元模型后,以离散单元的密度 $\rho(x)$ 作为设计变量,单元密度于 $[0,1]$ 区间变化,密度为 0 的单元为空单元,密度为 1 的单元为固体单元^[12~16]。其次,该方法假设材料的物理常数与材料密度 ρ 之间存在非线性关系,即认为金属芯骨单元的杨氏模量 $E(x)$ 与 $\rho(x)$ 的关系为 $E(x)=\rho(x)^p E_0$,并可推导出下式。

$$\begin{cases} K=\rho(x)^p K_0 \\ k_e=\rho(x)^p k_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, K 为金属芯骨在优化过程中的总刚度矩阵; K_0 为金属芯骨优化前的总刚度矩阵; p 为惩罚系数; k_e 为金属芯骨优化过程中的单元刚度矩阵; k_0 为金属芯骨的单元刚度矩阵。该模型的目标值设置为金属芯骨的总体柔度 C ,通过对单元密度的更新迭代以求出芯骨柔度的最小值,其数学模型如下^[14]:

$$\begin{cases} \text{find } \rho^e \\ \min C=U^T F=\sum_{e=1}^N (\rho^e)^p u_e^T k_0 u_e \\ s.t. \begin{cases} KU=F \\ \sum_{e \in \Omega} \rho^e(\rho) v^e \leq V^* \\ 0 < \rho_{\min} \leq \rho < 1 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中, ρ^e 为金属芯骨单元密度; U 为位移矩阵; F 为芯骨受力向量; u_e 为单元位移矩阵; v^e 为金属芯骨优化过程中单元体积; Ω 为金属芯骨设计区域; V^* 为设置的金属芯骨优化后体积; $\rho_{\min}$ 为设置的单元最小密度。

1.2 优化准则法与敏度过滤

优化准则算法是根据工程假设建立迭代公式,然后利用数值法循环求解。再根据 SIMP 拓扑优化的目标函数与约束条件,其构成的拉格朗日函数如下:

$$L=C(\rho)+\lambda\left(\sum_{i=1}^N \rho_i v_i-V^*\right)+\lambda_1(KU-F)+\lambda_2\left(\rho_{\min}-\rho\right)+\lambda_3\left(\rho_{\max}-\rho\right) \quad (3)$$

式中, $\lambda, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为拉格朗日乘子, λ 为标量,其他为向量, v_i, ρ_i 分别为第 i 单元的密度和体积。当 ρ 取极值时为 ρ^* ,应该满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \rho}=\frac{\partial C(\rho)}{\partial \rho}+\lambda \frac{\partial\left(\sum_{i=1}^N \rho_i v_i\right)}{\partial \rho}+\lambda_1 \frac{\partial(KU)}{\partial \rho}-\lambda_2+\lambda_3=0 \\ \sum_{i=1}^N \rho_i v_i=V^*, KU=F \\ \lambda_2\left(\rho_{\min}-\rho\right)=0, \lambda_3\left(\rho_{\max}-\rho\right)=0 \\ \rho_{\min}<\rho<\rho_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

由于外载荷不随密度变化,故有 $\frac{\partial F}{\partial \rho}=0$ 。又当约束条件取上、下边界 $\rho_{\max}=\rho$ 或 $\rho_{\min}=\rho$ 时,设计变量的上、下约束不起作用,即 $\lambda_2=0$ 或 $\lambda_3=0$ 。当 $\rho_{\min}<\rho<\rho_{\max}$ 时,上下约束都不起作用,即 $\lambda_2=0, \lambda_3=0$,此时可以将 Kuhn-Tucker 条件改写为:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \rho}=\frac{\partial C(\rho)}{\partial \rho}+\lambda \frac{\partial\left(\sum_{i=1}^N \rho_i v_i\right)}{\partial \rho}+\lambda_1 \frac{\partial(KU)}{\partial \rho}=0 & (\rho_{\min}<\rho<\rho_{\max}) \\ \frac{\partial L}{\partial \rho}=\frac{\partial C(\rho)}{\partial \rho}+\lambda \frac{\partial\left(\sum_{i=1}^N \rho_i v_i\right)}{\partial \rho}+\lambda_1 \frac{\partial(KU)}{\partial \rho} \leq 0 & (\rho_{\max}=\rho) \\ \frac{\partial L}{\partial \rho}=\frac{\partial C(\rho)}{\partial \rho}+\lambda \frac{\partial\left(\sum_{i=1}^N \rho_i v_i\right)}{\partial \rho}+\lambda_1 \frac{\partial(KU)}{\partial \rho} \geq 0 & (\rho_{\min}=\rho) \\ \sum_{i=1}^N \rho_i v_i=V^*, KU=F \end{cases} \quad (5)$$

进一步的优化问题的自迭代条件为^[14]：

$$\rho_{n+1} = \begin{cases} \max(\rho_{\min}, \rho_e^n - m) & [\rho_e^n B^\eta < \max(\rho_{\min}, \rho_e^n - m)] \\ \rho_e^n B^\eta & \max(\rho_{\min}, \rho_e^n - m) < \rho_e^n B^\eta < \min(1, \rho_e^n + m) \\ \min(1, \rho_e^n + m) & [\rho_e^n B^\eta > \min(1, \rho_e^n + m)] \end{cases} \quad (6)$$

$$B = \frac{-\frac{\partial C}{\partial \rho^e}}{\lambda \frac{\partial V}{\partial \rho^e}} \quad (7)$$

式中, n 为迭代次数; η 为阻尼因子; m 为偏移值。

在有限元计算过程中, 由于设计区域内离散变量存在奇异性问题, 仅通过优化准则方法求解出的优化结果会出现网格依赖性、棋盘格、局部最优解等现象, 这种数值计算不稳定现象的出现往往导致最终计算结果不可用, 或者结果制造十分困难。为避免这些现象出现, 引入敏感度过滤, 以消除这种不稳定现象。将下式代入式(7)中, 即可完成敏感度过滤^[14]。

$$-\frac{\partial C}{\partial \rho^e} = \frac{1}{\rho} \sum_{f=1}^N \hat{H}_f \rho^f \frac{\partial c}{\partial \rho^e} \quad (8)$$

式中, $\hat{H}_f$ 为卷积算子; $\hat{H}_f = r_{\min} - \text{dist}(e, f)$, $\{f \in N | \text{dist}(e, f) \leq r_{\min}\}$, $r_{\min}$ 为最小单元直径; $\text{dist}(e, f)$ 为目标单元 e 与邻近单元 f 的中心距离。卷积算子确定的即为过滤区域, 当处于过滤区域外时 $\hat{H}_f$ 为 0。式(8)表明, 仅在目标单元 $r_{\min}$ 区域以内的单元才会对敏感度计算产生影响。

1.3 金属芯骨拓扑优化流程

拓扑优化过程步骤如下：

①对金属芯骨设计区域进行有限单元划分, 定义需优化的区域, 设计约束、载荷等边界条件, 初始化单元设计变量。

②计算单元材料特性参数, 求解有限元方程, 得到单元刚度矩阵、节点位移、组装刚度矩阵。

③根据有限元方程的求解结果, 计算金属芯骨最小柔度：

$$\min C = U^T F = \sum_{e=1}^N (\rho^e)^p u_e^T k_e u_e \quad (9)$$

④为避免优化不稳定现象进行敏感度过滤。

⑤根据优化准则法循环求解金属芯骨单元密度并更新。

⑥若求解结果满足设置的收敛条件, 则将芯骨优化结果输出, 否则重新执行步骤。

判断是否收敛通常有两种方法：一是以前后两次迭

代的金属芯骨单元密度为参考, 当前后两次迭代求得的单元密度结果接近, 即可认为收敛。二是以前后两次迭代求解的金属芯骨最小柔度为参考, 当前后两次最小柔度值十分接近, 也可认为收敛。

金属芯骨拓扑优化算法流程图见图 1。

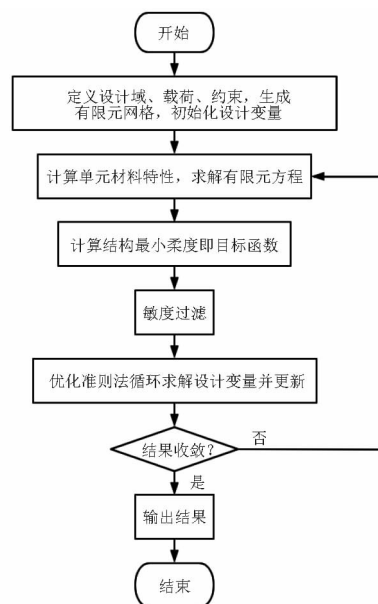


图 1 拓扑优化流程图

Fig.1 Flow chart of topology optimization

2 砂芯强度试验

2.1 试验设计

测量砂芯强度的试验包括砂芯抗压强度试验、抗拉强度试验、抗弯强度试验等。考虑到在实际铸造过程中, 砂芯主要承受力为径向力, 因此选择以径向加载为主的三点抗弯试验测试砂芯强度, 砂芯尺寸见图 2。

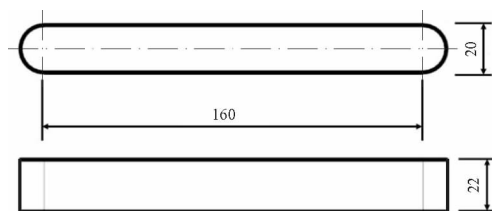


图 2 砂芯尺寸

Fig.2 Sand core sizes

根据三点抗弯试验受力方式, 对金属芯骨进行拓扑优化设计, 见图 3。在迭代优化 57 步后, 其优化结果趋向稳定, 结果见图 3b。根据拓扑优化结果, 绘制金属芯骨的 3D 打印模型, 见图 4。选择 361L 不锈钢并打印出金属芯骨实体, 见图 5, 其中图 5a 为优化前金属芯骨, 图 5b 为优化后金属芯骨。

砂芯材料选择 50~100 目硅砂, 无机粘结剂 JNY-F61 与固化剂 JNY-30, 型砂与粘结剂质量比为 100:3,

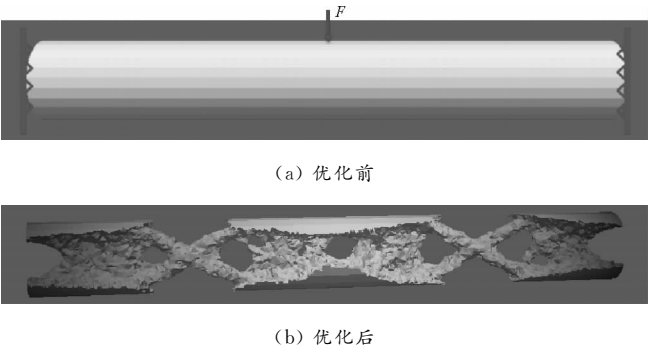


图 3 优化前后金属芯骨情况

Fig.3 The metal core bar before and after optimization

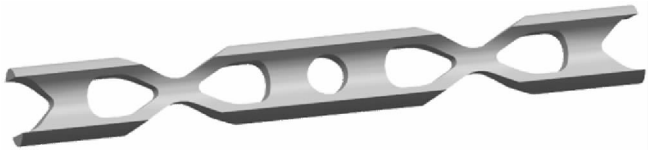


图 4 金属芯骨 3D 打印模型

Fig.4 3D printing model of metal core bar

粘结剂与固化剂质量比为 100 : 18。制作砂芯时,分别在砂芯中不添加芯骨,添加优化前芯骨,添加优化后芯骨,起模放置 24 h 后进行抗弯试验。

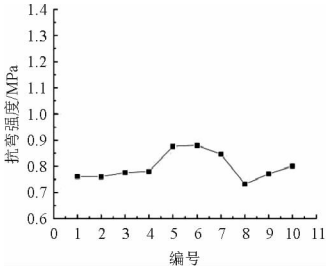


图 6 无芯骨砂芯抗弯强度
Fig.6 Bending strength of sand cores without core bar

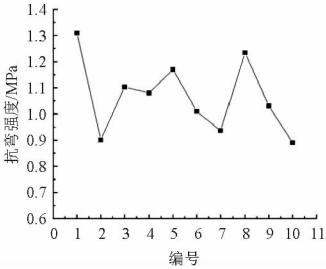


图 7 优化前芯骨砂芯抗弯强度
Fig.7 Bending strength of sand cores with metal core bar before optimization

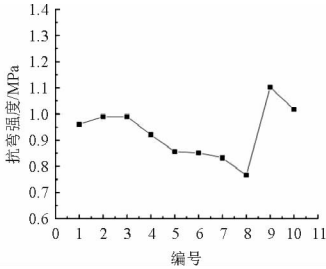


图 8 优化后芯骨砂芯抗弯强度
Fig.8 Bending strength of sand cores after optimization

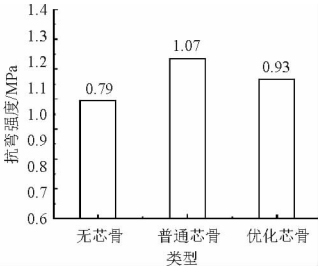
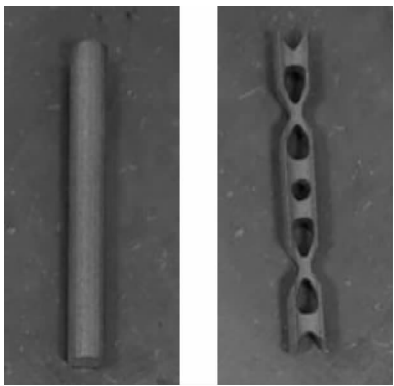


图 9 抗弯强度平均值比较
Fig.9 The comparison of the average bending strength at different conditions

了 35.44%,但优化后芯骨平均抗弯强度仅有 0.93 MPa,提高了 17.72%,相对于普通芯骨其强度有所下降。

通过反复试验并对试验过程进行观察,发现试样加载后断裂多发生在芯骨端面处,所以推测优化后强度的下降可能是优化后金属芯骨端面不平整导致的。故将优化后金属芯骨端面进行圆滑处理,处理前后的金属芯骨见图 10。随后再次进行试验,其试验结果见图 11。

图 12 为不同处理后砂芯抗弯强度平均值对比。可以看出,对优化结果圆滑处理后,其砂芯平均抗弯强度明显提高,从圆滑处理前的 0.93 MPa 提升至 1.08 MPa,提升了 16.13%,且比普通芯骨强度 1.07 MPa 略高。即普通芯骨可以满足的砂芯抗弯强度,优化后砂芯一样可以满足。由此推断出对优化结果圆滑处理后的



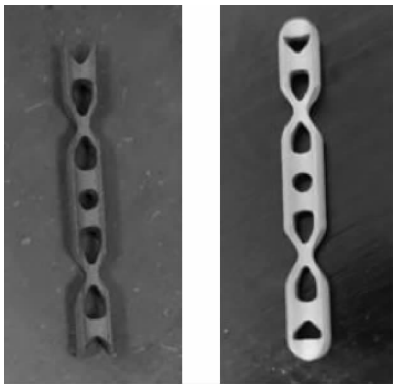
(a) 优化前金属芯骨 (b) 优化后金属芯骨

图 5 金属芯骨拓扑优化前后对比

Fig.5 Metal core bars before and after topology optimization

2.2 试验结果与分析

试验共制作无芯骨砂芯、优化前芯骨砂芯、优化后芯骨砂芯试样各 20 枚,除去人为因素导致强度下降较多的试样后,每种砂芯随机选择 10 枚试样的测试结果为最终试验结果,见图 6~图 8。图 9 为 3 种砂芯的抗弯强度对比。可以看出,添加芯骨后砂芯强度有明显的提升,其中普通芯骨平均抗弯强度达到 1.07 MPa,提高



(a) 圆滑处理前金属芯骨 (b) 圆滑处理后金属芯骨

图 10 金属芯骨圆滑处理前后对比

Fig.10 Comparison of metal core bar before and after smooth treatment

芯骨,可以满足砂芯的性能需求,且优化前芯骨质量为

9.62 g,优化后质量为 3.85 g,相比下降了约60%,优化效果明显。

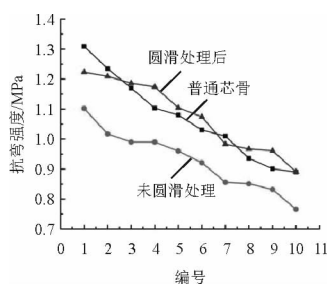


图 11 不同处理后芯骨抗弯强度对比

Fig.11 Comparison of bending strength of core bar at different conditions

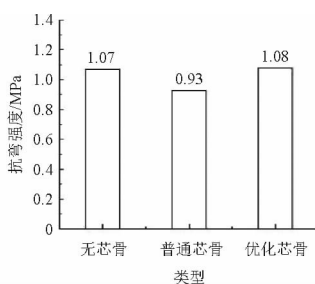


图 12 不同处理后芯骨抗弯强度平均值

Fig.12 Average bending strength after different treatment

3 结 论

(1)采用拓扑优化方法对金属芯骨进行优化,优化后金属芯骨体积比优化前减少了约 60%,优化效果明显。

(2)通过金属芯骨优化前后砂芯强度对比,发现砂芯强度变化不大,从而验证了芯骨拓扑优化方法的可行性。

(3)拓扑优化后金属芯骨端面不平整,在砂芯内产生应力的集中导致砂芯强度降低,可通过对端面圆滑处理解决这一问题。

参 考 文 献

- [1] 周建新,殷亚军,沈旭,等.铸造充型凝固过程数值模拟系统及应用[M].北京:机械工业出版社,2020.
- [2] WEN S, SHEN Q, WEI Q, et al. Material optimization and post-processing of sand moulds manufactured by the selective laser sintering of binder-coated Al_2O_3 sands[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 93-102.
- [3] 李浩.型砂发气性检测及工艺试验研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2016.
- [4] 周建新.铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势[J].铸造,2012,61(10): 1105-1115.
- [5] 周建新,廖敦明.铸造 CAD/CAE[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [6] 于波,孙逊.铸造技术的发展现状与趋势[J].铸造设备与工艺,2017(2): 65-70.
- [7] HAFTKA R T, GÜRDAL Z, KAMAT M P. Elements of Structural Optimization, 3rd ed. Elements of Structural Optimization[M]. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic, 1992.
- [8] 钱令希,钟万勰,隋允康,等.工程结构优化设计[J].工程机械,1988(5): 20-29.
- [9] 高杰.基于参数化水平集的结构/材料多尺度拓扑优化设计研究[D].武汉:华中科技大学,2019.

- [10] MARTIN P B, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71(2): 197-224.
- [11] BENDSOE M P. Optimal shape design as a material distribution problem[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 1989, 1(4): 193-202.
- [12] 朱杰.基于变密度 SIMP 方法的二维悬臂梁结构拓扑优化[J].电子器件与信息技术,2018,15(9): 110-114.
- [13] 罗震,陈立平,黄玉盈,等.连续体结构的拓扑优化设计[J].力学进展,2004,34(4): 463-476.
- [14] 左孔天.连续体结构拓扑优化理论与应用研究[D].武汉:华中科技大学,2004.
- [15] 刘志强,王明强.基于 SIMP 拓扑优化理论的结构概念设计研究[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2006(1): 65-68.
- [16] WANG F, LAZAROV B S, SIGMUND O, et al. On projection methods, convergence and robust formulations in topology optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2011, 43(6): 767-784.

(编辑:刘晨辉)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志,是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

《特种铸造及有色合金》杂志社



地址:武汉市江岸区江大路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

