

基于 Krging 的压射机构铸造工艺参数多目标优化

朱阳辉^{1,2} 游东东^{1,2} 朱权利^{1,2}
(1.华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术研究中心;
2.华南理工大学广东省金属新材料制备与成形重点实验室)

摘 要 压射机构是挤压铸造设备中进行充填成形的重要装置,其组件的配合间隙决定了充型过程中的精度和稳定性。为了使压射过程中组件的配合间隙变化最小,针对初始间隙值、浇注温度等压射机构与工艺的关键参数,以间隙率和温差为目标,提出了一种基于 Kriging 元模型的多目标优化方法。结果表明,所建 Kriging 元模型精度高于 0.97;最优工艺参数:铸件浇注温度为 701 ℃,压室预热温度为 338 ℃,压室壁厚为 16 mm,初始间隙为 0.106 1 mm,压射速度为 56 mm/s。优化后,间隙率减小了 10%,换热温差减小了 49%,充型过程更加稳定。

关键词 压射机构;工艺参数;多目标优化;挤压铸造

中图分类号 TG233.1;TG249.2 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.05.015 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Multi-objective Optimization of Injection Mechanism and Casting Process
Parameters Based on the Krging Model
Zhu Yanghui^{1,2}, You Dongdong^{1,2}, Zhu Quanli^{1,2}
(1.National Engineering Research Center of Near-net-shape Forming for Metallic Materials,
South China University of Technology; 2.Guangdong Key Laboratory for Advanced
Metallic Materials Processing, South China University of Technology)

Abstract: Injection mechanism is important for filling and forming in squeeze casting equipment. The fit clearance of its components greatly affects the accuracy and stability in the injection process. To minimize the change of fitting clearance during injection, a multi-objective optimization method based on the Kriging metamodel was proposed which taken into account for the clearance rate and temperature difference as the objectives, and considered the key parameters of the injection mechanism and process such as initial clearance and pouring temperature. The results show that the accuracy of Kriging metamodel is higher than 0.97. Meanwhile, the optimized process parameters were presented as follows: casting pouring temperature of 701 ℃, shot-sleeve preheating temperature of 338 ℃, shot-sleeve wall thickness of 16 mm, initial clearance of 0.1061 mm and injection velocity of 56 mm/s, where the clearance rate is reduced by 10% and the heat transfer temperature difference is reduced by 49% after optimization. In addition, the filling process is more stable.

Key Words: Injection Mechanism, Process Parameters, Multi-objective Optimization, Squeeze Casting

收稿日期:2020-10-22;修改稿收到日期:2020-11-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875209);广东省自然科学基金资助项目(2017A030313320)
第一作者简介:朱阳辉,男,1996 年出生,硕士研究生,广州(510640),E-mail:zyh19961208@163.com
通信作者:游东东,男,1973 年出生,副教授,广州(510640),E-mail:youdde@scut.edu.cn
引用格式:朱阳辉,游东东,朱权利. 基于 Krging 的压射机构铸造工艺参数多目标优化[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(5):592-596.
ZHU Y H, YOU D D, ZHU Q L. Multi-objective optimization of injection mechanism and casting process parameters based on the Krging model[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(5):592-596.

[10] 李日.铸造工艺仿真 ProCAST 从入门到精通[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[11] 侯华,叶云. 金属工艺学实习教程[M]. 北京:国防工业出版社,2008.

[12] CHEN L W, HOU H, JIN Y C, et al. Indirect squeeze casting process of aluminum alloy based on response surface method[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(4): 1 174-1 179.

[13] CHEN L W, ZHAO Y H, HOU H, et al. Development of AZ91D magnesium alloy-graphene nanoplatelets composites using thixomolding process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 778:359-374.

[14] HOU H, ZHAO Y H. Simulation for the fluctuation effect on the dendrites growth with phase field method[J]. Materials Science Forum., 2011, 1534: 1 338-1 348.

[15] 侯华,靳玉春,赵宇宏,等.液态成型工艺及 CAD[M]. 北京:国防工业出版社,2012.

[16] 陈国桢,肖树则,姜不居.铸件缺陷和对策手册[M]. 北京:机械工业出版社,1996.

[17] CHEN T, LIAO D M, ZHOU J X. Numerical simulation of casting thermal stress and deformation based on finite difference method[J]. Mater. Sci. Forum, 2013, 762: 224-229.

[18] 刁宝成,焦永和.计算机图形学[M].北京:高等教育出版社,1999.

(编辑:张正贺)

挤压铸造技术结合了铸造成形和塑性加工的优势,成形品质更好、生产效率更高,被广泛应用于汽车和航空航天等领域^[1~3]。压射机构是挤压铸造设备的核心机构,主要由冲头和压室组成,二者的配合情况对设备可靠性和铸件的品质有重要影响。关于压射机构的研究,主要集中在冲头和压室的传热以及变形方面,以了解冲头和压室的配合情况。AHMAD R 等^[4]采用直接微分法和伴随变量法设计单元的灵敏度,开发了不同的数值模拟压室的传热和变形;LITTLEFAIR B 等^[5]提出了一种柔度矩阵方法进行活塞机构变形预测,并与雷诺方程的数值解结合预测油膜厚度,其试验测量采用非侵入式的超声波传感器实现;宋雷等^[6]针对压室进行了有限元模拟,研究了压室的温度和变形的变化过程。YOU D D 等^[7]提出了一种新的摩擦润滑模型以研究压射机构的温度和变形,计算结果与试验数据一致,并与通用模型的模拟数据进行了对比,模拟精度得到提高。

压射机构的配合情况主要受浇注温度、压射速度等铸造工艺参数的影响,因此需要寻找一组最优的工艺参数,以改善配合精度从而提高机构稳定性。传统优化设计方法通常将有限元模型直接与优化算法耦合,优化迭代时间长且优化效率较低。半参数化的 Kriging 元模型不仅能近似描述各参数与响应之间的物理特性,并且通过替代有限元模型进行优化分析,可显著提高优化效率,在工程实际中应用广泛^[8,9]。另一方面,非支配排序遗传算法 II (NSGA-II) 是一种解决多目标优化问题的有效技术,利用快速非支配排序方法、精英策略和拥挤的比较算子来获得 Pareto 最优解^[10]。JIANG P 等^[11]、YANG Y 等^[12]通过集成 Kriging 和 NSGA-II,完成对激光焊接工艺参数的优化,结果显示优化后的最佳工艺参数能有效、可靠地生成预期的焊缝形状。

因此,为控制压射机构中配合间隙,提高充型过程中的精度和稳定性,本课题以压射工艺参数中的浇注温度、压室预热温度、压室壁厚、初始间隙和压射速度作为自变量,采用有限元仿真软件 MSC.MARC 模拟压射机构的热力耦合过程,获取工艺参数与间隙率以及传热温差的数据,建立 Kriging 元模型,并采用 NSGA-II 算法获取最优目标的工艺参数,旨在为其应用提供参考。

1 压射机构充型仿真

压射机构中铝液首先被浇注到压室中,然后由冲头将铝液推射进模具型腔,此阶段,压室和冲头承受的是周期性的热载荷和机械载荷。该过程主要涉及热传导和接触作用,是典型的热力耦合过程。

在 MSC.MARC 软件中建立压射机构的几何模型,

将考虑浇注温度(T_c)、压室预热温度(T_m)、压室壁厚(H)、初始间隙(C_0)和压射速度(V)作为仿真的输入,探索输入与最大传热温差(T_d)、最大间隙率(R_g)两个目标之间的物理特性。为此,给上述 5 个工艺参数设置了参数区间,分别为 $[680, 760]$ 、 $[100, 400]$ 、 $[16, 36]$ 、 $[0.05, 0.15]$ 、 $[40, 80]$ 。同时,设定初值进行仿真,分别为 720 °C、110 °C、16 mm、0.1 mm、40 mm/s。

在前处理中,将组件假设为连续弹性固体,并且均为各向同性材料;为提高模拟仿真的效率,底座不计入本次计算,并且对压室和冲头作了简化,只截取 1/4 模型进行分析,三维模型和网格见图 1。其中,冲头、压室和铸件的材质分别为 QT450 球墨铸铁、H13 钢和 A356 铝合金,各组件材料性能见表 1^[13]。

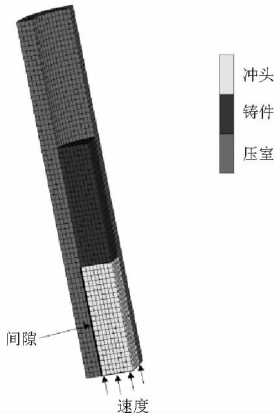


图 1 机构网格划分

Fig.1 Meshment of the mechanism component

表 1 各组件的材料参数

Tab.1 Material parameters of various components

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏 模量/ GPa	泊松 比	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	热膨胀 系数/ (10^{-5}K^{-1})
QT450	7 060	169	0.257	32.0	595	1.29
H13	7 800	210	0.3	32.23	478	1.15
A356	2 700	68.9	0.33	167	896	—

经过前处理与热力耦合仿真模拟,可以得到不同时间、不同节点的温度和位移。为了得到相应的传热温差和间隙率,对其数据进行相应的后处理。

后处理中,选取冲头内部距离上表面 10 mm 处的节点,压室上的节点对应于冲头该节点的路径,从而可以得到压射机构的实时间隙值(C_i)和最大传热温差(T_d);并且定义最大间隙率(R_g)为实时间隙与初始间隙的比值,用来对比在不同参数下的间隙变化程度。

$$T_d = T_p - T_s \tag{1}$$

$$C_i = C_0 - (D_p - D_s) \tag{2}$$

$$R_g = -\frac{C_i}{C_0} \times 100\% \tag{3}$$

式中, T_p 和 T_s 分别为冲头和压室上相应节点的温度;

D_p 和 D_s 分别为冲头和压室上相应节点的变形量; R_g 取负值是为了优化的一致性。

2 物理试验与有限元仿真的对比验证

2.1 物理试验平台搭建

为验证有限元仿真的有效性,搭建了物理试验平台,见图 2。该试验平台的参数与仿真设定的初值一致,其包括压室、冲头、压射杆、底座等组件以及 K 型热电偶、千分尺测距仪、应变片和预热圈等测试部件。压射机构预热到 110 ℃ 时,将 720 ℃ 的铝液浇注入压室,通过推杆与压力机上的螺纹杆联接,实现冲头在压室内的垂直移动。

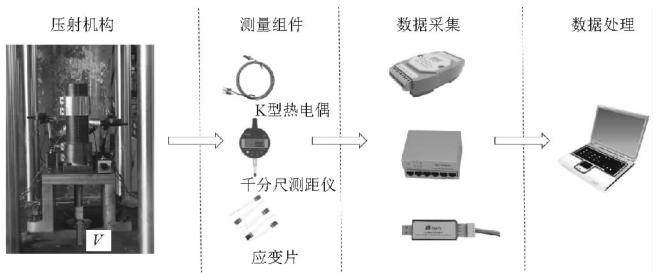


图 2 物理试验平台
Fig.2 Physical test platform

各组件以及测试部件的安装位置见图 3。

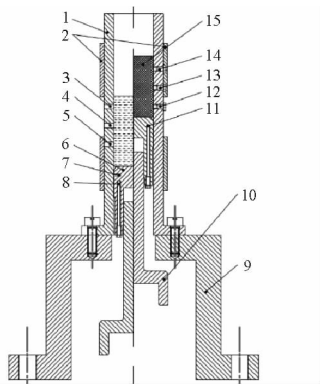


图 3 压射机构装配图
Fig.3 Structure and installation of injection mechanism

1.压室 2.预热圈 3、4、5.千分尺测距仪 6.冲头 7.应变片
8、11、12、13、14.热电偶 9.底座 10.推杆 15.铸件

2.2 物理试验与仿真试验的对比

压射机构的充型过程在 120 s 内完成,因此按照式(1)和式(2)计算得到的趋势图见图 4。可以看到,有限元仿真值与物理试验有相同的趋势;间隙率的最大误差不超过 5%,温差的最大误差不超过 12%。实际中铸件在浇注时温度变化较快,即试验中铸件温度与模拟所设置参数可能存在出入,因此,可认为该数据在误差范围内,有限元仿真准确有效。另外,在 20 s 之后,温差和实时间隙都出现了极值,且趋势一致,表明温差对实时

间隙存在约束作用。仿真得到传热温差和间隙率分别为 21.2 ℃、-0.75%;试验得到传热温差和间隙率分别为 24.1 ℃、-0.73%。

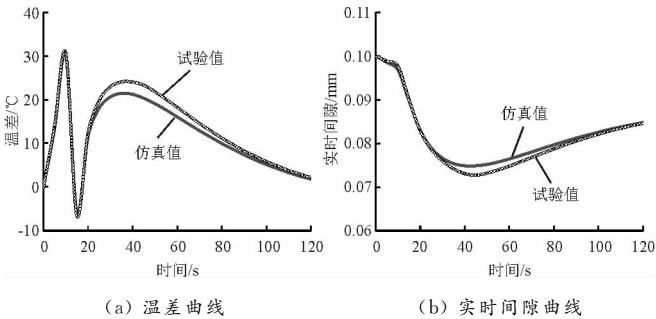


图 4 不同情况下的响应图
Fig.4 Response graphs in different cases

3 多目标 Kriging 元模型的构建

3.1 Kriging 元模型理论

Kriging 元模型是一种具有统计性的近似技术,兼具全局近似和局部最优的优势,被不断应用到各个领域,现已衍生出多种 Kriging 方法^[14~16]。普通 Kriging 模型通常被描述为一个多项式函数和一个随机分布函数之和:

$$y(x) = \beta \cdot f(x) + z(x) \quad (4)$$

式中, x 为设计向量; $y(x)$ 为未知的预测响应; $f(x)$ 为提供全局回归模型的已知函数; β 为待定系数; $z(x)$ 为随机过程,其均值为 0,方差为 σ^2 ,协方差非零,提供全局模型的局部近似。

$z(x)$ 的协方差矩阵可以描述为:

$$C_{ov}[z(x^i), z(x^j)] = \sigma^2 R[R(x^i, x^j)] \quad (5)$$

$$i, j = 1, \dots, m$$

式中, m 为采样点数目; R 为对角化对称的 m 维相关矩阵; $R(x^i, x^j)$ 为样本点 x^i, x^j 之间的相关函数。

选择高斯函数作为相关函数:

$$R(x^i, x^j) = \exp \left[- \sum_{k=1}^n \theta_k |x_k^i - x_k^j|^2 \right] \quad (6)$$

式中, θ_k 为未知相关参数; x_k^i 和 x_k^j 为样本点 x_i 与 x_j 在第 k 个方向上的坐标。

一旦确定了相关函数,就可以通过以下方法由响应 $y(x)$ 获得未试验 x 处的预测值 $\hat{y}(x)$:

$$\hat{y}(x) = \hat{\beta} f(x) + r^T(x) R^{-1} (y - f \hat{\beta}) \quad (7)$$

式中, $\hat{\beta}$ 为 β 的估计值; y 为包含样本点响应值的 m 维向量; f 为 n 维单位向量; $r^T(x)$ 为预测点与已知采样点之间的 m 维相关向量,即

$$r^T(x) = \{R[x, x^1], R[x, x^2], \dots, R[x, x^n]\}^T \quad (8)$$

式中的估计系数 $\hat{\beta}$ 和方差 $\hat{\sigma}^2$ 由下式决定:

$$\hat{\beta} = (f^T R^{-1} f)^{-1} f^T R^{-1} y \tag{9}$$

$$\hat{\sigma}^2 = (y - f\hat{\beta})^T R^{-1} (y - f\hat{\beta}) / m \tag{10}$$

方程的最大似然估计通过最大化 $-[n\ln(\sigma^2) + \ln R]/2$ 来确定。

3.2 Kriging 建模

压射机构中热力耦合的非线性程度较高,考虑的工艺参数越多,计算量将呈指数增长,这样优化就很难实现。Kriging 预测模型可以作为压射机构中有限元模型的近似系统。因此,有关温差和间隙率的 Kriging 数学表达如下:

$$y(T_d, R_g) = f(T_c, T_m, H, C_0, V) \tag{11}$$

针对式(11),建立了样本集和验证集,样本集用于 Kriging 建模,验证集用于 Kriging 模型验证。回归模型选择 0 阶多项式,相关函数选择高斯函数,其响应值通过模拟获得。

NSGA-II 算法在求解多目标函数问题时具有优势,因此利用 NSGA-II 算法进行求解。图 5 为算法求解的流程图。

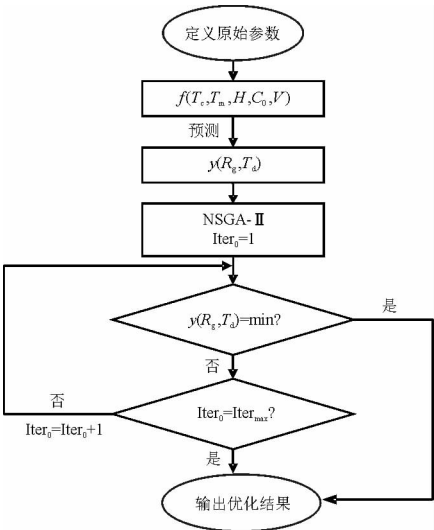


图 5 优化流程图

Fig.5 Flow chart of algorithm solution

4 结果分析与对比

4.1 Kriging 模型的预测效果

为验证 Kriging 模型的预测能力,将验证集代入建立的 Kriging 模型中,得到预测值,并与仿真结果做对比,见图 6。

一般通过拟合优度 (R^2) 来判断搭建的模型的精度, R^2 的取值范围为 0~1, R^2 的值越接近 1,说明预测模型的预测效果越好。表 2 为验证集关于间隙率和温差的拟合优度值和均方误差, R^2 的值均高于 0.97,均方误差 (R_{ms}) 也在 0.04 左右,说明 Kriging 元模型能够精

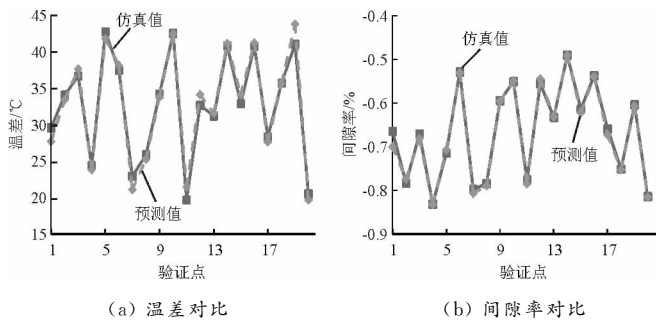


图 6 模型精度验证

Fig.6 Model accuracy verification

确地预测到未知的响应,也建立了近似的输入输出关系。

表 2 Kriging 元模型在各指标下的结果

Tab.2 Results of Kriging meta-model under each index

响应	验证集	
	R^2	R_{ms}
R_g	0.991	0.03
T_d	0.974	0.05

4.2 多目标优化结果

采用 NSGA-II 算法实现对工艺参数的多目标寻优,获取这两个优化目标间的折中解。图 7 为多目标优化解,包括 Pareto 解。最后选取的最优加工目标的工艺参数分别为 701 ℃、338 ℃、16 mm、0.106 1 mm、56 mm/s,间隙率和换热温差分别为 -0.817%、11.6 ℃。

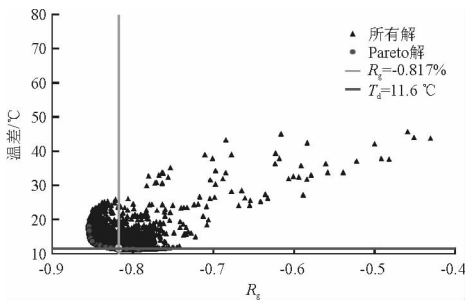


图 7 多目标优化解

Fig.7 Multi-objective optimization solutions

为验证该最优工艺参数的可行性,进行仿真和试验验证,得到的趋势图见图 8,可见仿真和试验曲线具备较高的拟合度,其误差不超过 5%。同时,仿真得到传热温差和间隙率分别为 13.9 ℃、-0.803%;试验得到换热温差和间隙率分别为 14.2 ℃、-0.80%。二者得到的结果与基于 Kriging 元模型得到的优化解十分接近,并且相对于图 5 的初始结果更小,说明优化后,冲头和压室之间的配合间隙变化程度减小。优化前后的温差和间隙率见表 3,可见优化后的传热温差减小了 49%,间隙率减小了 10%。因此,可以判定,优化后的压射机构工艺参数能够减小压射机构的配合间隙变化,使充型过程更加稳定。

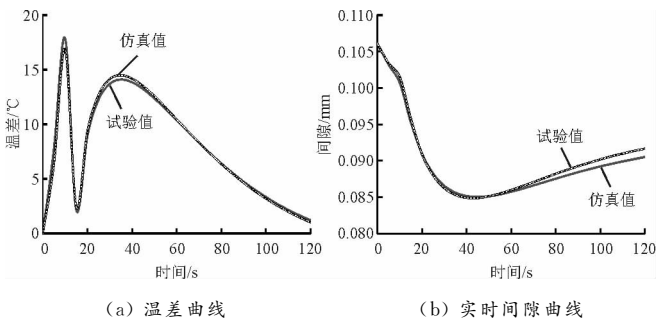


图 8 不同情况下的响应图

Fig.8 Response graphs in different cases

表 3 优化前后的结果对比

Tab.3 Comparison of results before and after optimization

响应	优化前			优化后		
	预测值	仿真值	试验值	预测值	仿真值	试验值
$R_g/\%$	-0.741	-0.749	-0.73	-0.817	-0.803	-0.80
$T_d/^\circ\text{C}$	22.9	21.2	24.1	11.6	13.9	14.2

5 结 论

(1)通过 MSC.MARC 的有限元热力耦合模型得到挤压铸造中的传热温差和实时间隙试验结果有相同趋势,误差较小。因此仿真数据可用来代替物理试验数据进行参数近似优化。

(2)Kriging 元模型在对温差和间隙率的预测中,预测精度高于 0.97,可近似代表各工艺参数与传热温差、间隙率的物理关系。

(3)在 Kriging 元模型的基础上,利用 NSGA-II 算法优化得到传热以及间隙率差异的帕累托解。在优化后,铸件浇注温度为 701 ℃,压室预热温度为 338 ℃,压室壁厚为 16 mm,初始间隙为 0.106 1 mm,压射速度为 56 mm/s。优化后的传热温差和间隙率相比于原始参数分别减小了 49%和 10%,说明压室和冲头的配合情况较稳定,并通过物理试验验证了该结果的有效性。

参 考 文 献

[1] SOUISSI S, AMAR M B, BRADAI C, et al. Microstructure characterization and tensile properties of direct squeeze cast and gravity die cast 2017A wrought Al alloy[J]. International Journal of Material Forming, 2013, 6(2): 249-254.

[2] LI Y Y, ZHANG W W, ZHAO H D, et al. Research progress on squeeze casting in China[J]. China Foundry, 2014, 11(4): 239-246.

[3] 张卫文, 齐丕骧, 朱德智, 等. 铸造技术路线图: 挤压铸造[J]. 铸造, 2017, 66(6): 535-540.

[4] AHMAD R, GETHIN D T, LEWIS R W. Design element concept of squeeze casting process[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(10): 4 760-4 788.

[5] LITTLEFAIR B, CRUZ M D L, MILLS R, et al. Lubrication of a flexible piston skirt conjunction subjected to thermo-elastic deformation: A combined numerical and experimental investigation[J]. Journal of Engineering Tribology, 2014, 228(1): 69-81.

[6] 宋雷, 邵明, 游东东. 利用有限元的挤压铸造压室热-力耦合分析[J]. 现代制造工程, 2012(11): 19-22.

[7] YOU D D, WANG X, CHENG X Y, et al. Friction modeling and analysis of injection process in squeeze casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 239: 42-51.

[8] YOU D D, JIANG X M, CHENG X Y, et al. Bayesian kriging modeling for spatiotemporal prediction in squeeze casting[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1-4): 355-369.

[9] JIANG P, WANG J, ZHOU Q, et al. An enhanced analytical target cascading and kriging model combined approach for multidisciplinary design optimization[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 1-11.

[10] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[11] JIANG P, WANG C C, ZHOU Q, et al. Optimization of laser welding process parameters of stainless steel 316L using FEM, Kriging and NSGA-II [J]. Advances in Engineering Software, 2016, 99(9): 147-160.

[12] YANG Y, CAO L C, ZHOU Q, et al. Multi-objective process parameters optimization of laser-magnetic hybrid welding combining Kriging and NSGA-II [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 49(2): 253-262.

[13] PINEAU F, DAMOURS G. Prediction of shear-related defect locations in semi-solid casting using numerical flow models[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(4): S878-S882.

[14] FAYAD I, BAGHDADI N, BAILLY J S, et al. Regional scale rain-forest height mapping using regression-kriging of spaceborne and airborne LiDAR data: Application on French Guiana[J]. Remote Sensing, 2016, 8(3): 240.

[15] LUDKOVSKI M. Kriging metamodels and experimental design for Bermudan option pricing[J]. Journal of Computational Finance, 2018, 22(1): 37-77.

[16] HAN Z H, ZHANG Y, SONG C X, et al. Weighted gradient-enhanced kriging for high-dimensional surrogate modeling and design optimization[J]. AIAA Journal, 2017, 55(12): 4 330-4 346.

(编辑: 张正贺)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com