

钛合金 Kagome 点阵 SPF/DB 成形工艺及结构优化

武永^{1,2}, 吴迪鹏^{1,2}, 陈明和¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 航空航天结构力学与控制全国重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 超塑成形/扩散连接工艺 (SPF/DB) 可成形钛合金复杂曲面变厚度混合点阵结构, 但因非均匀塑性变形会导致点阵内筋壁厚不均, 对此类点阵结构的设计优化属于典型的多设计变量的高度非线性问题。将 Kriging 响应面模型和遗传算法引入到 SPF/DB 工艺制备的 Kagome 点阵结构优化设计中, 并基于 SPF/DB 制造和面压缩性能的有限元仿真结果, 构建了 Kriging 响应面, 获得了结构参数对表面凹陷深度和面抗压强度的影响规律, 采用遗传算法获得优化后的结构参数, 并进行了实验验证。采用厚度为 0.8 mm 的芯板和 1.2 mm 的面板, 利用 SPF/DB 工艺制备了 Kagome 点阵结构, 发现在筋条与焊接点的过渡圆角处产生集中变形, 最大减薄率为 37.8%, 面抗压强度为 4.36 MPa, 证明了结构参数的有效性。

关键词: TC31 钛合金; 点阵结构; 超塑成形/扩散连接; 表面凹陷; 面抗压强度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.022

中图分类号: TG302

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 05-0162-06

SPF/DB forming process and structural optimization on titanium alloy Kagome lattice

Wu Yong^{1,2}, Wu Dipeng^{1,2}, Chen Minghe¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The mixed lattice structures with complex curved surfaces and variable thickness of titanium alloy can be formed by superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB) process. But due to non-uniform plastic deformation, the wall thickness of ribs in the lattice is uneven, and the design optimization of such lattice structures is a typical highly nonlinear problem with multiple design variables. Therefore, the Kriging response surface model and genetic algorithm were introduced into the optimal design of the Kagome lattice structure prepared by SPF/DB process, and based on the finite element simulation results of SPF/DB manufacturing and surface compression performance, the Kriging response surface was constructed. Then, the influence laws of the structural parameters on the surface depression depth and the surface compressive strength were obtained, and the optimized structural parameters were obtained by genetic algorithm for experimental verification. The results show that for the core plate with thickness of 0.8 mm and the panel with thickness of 1.2 mm, in the Kagome lattice structure prepared by SPF/DB process, it is found that concentrated deformation occurs at the transition fillet between rib and welding point, and the maximum thinning rate is 37.8% and the surface compressive strength is 4.36 MPa, demonstrating the validity of the structural parameters.

Key words: TC31 titanium alloy; lattice structure; superplastic forming/diffusion bonding; surface depression; surface compressive strength

随着飞行器速度的提高, 迫切需要发展轻量化和功能一体化结构的设计及制造技术^[1]。空心点阵

结构是一种典型的轻量化结构, 兼具隔防热^[2]、抗冲击^[3]、电磁波吸收屏蔽^[4]等功能, 在航空航天领域的应用前景广阔。点阵结构的制备方法包括: 熔模铸造^[5]、增材制造^[6]、塑性成形/焊接^[7]、超塑成形/扩散连接 (Superplastic Forming/Diffusion bonding, SPF/DB)^[8]等。其中, 超塑成形/扩散连接可低成本、批量制造复杂曲面的薄壁空腔类点阵结构, 具有良好的力学性能和尺寸精度。

轻量化结构设计及制造的重点在于结构优化和

收稿日期: 2023-03-26; 修订日期: 2023-05-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51805256); 中央高校基本科研项目 (56XAC21017); 国家博士后基金资助项目 (2020M670792)

作者简介: 武永 (1986-), 男, 工学博士, 副教授

E-mail: wuyong@nuaa.edu.cn

选择合适的制造工艺参数^[9-10]。Xu L 等^[11]建立了传热和力学性能三阶响应优化模型,给出了几何变量与点阵结构性能的关系。Wu Y 等^[12]采用 SPF/DB 工艺制备金字塔点阵桁架结构时发现,因各位置的塑性变形不均匀,所制造的点阵结构壁厚不均,与设计结构存在差异。与增材制造点阵结构相比,SPF/DB 点阵结构的参数与性能的关系更复杂,迫切需要研究 SPF/DB 点阵结构的结构优化。代理模型是一种比较直接有效的方法,包括多项式模型^[13]、径向基函数模型^[14]、Kriging 模型^[15]等。基于多项式的响应面模型,易于计算,应用广泛;径向基函数模型,适于解决非线性、多变量的工程问题,拟合度极好,计算较长;Kriging 模型,具有计算效率高、响应面拟合效果好、精度高等特点,特别适用于非线性工程优化问题^[16]。Du D H 等^[17]采用混合优化算法实现了高精度分层 Kriging 模型的优化,可应用于火箭发动机的结构动力学优化。

针对 Kagome 点阵结构的 SPF/DB 制造工艺,综合考虑 SPF/DB 工艺的非均匀塑性变形导致的形状尺寸和力学性能变化的设计优化尤其重要。本文采用均匀化毛坯设计方法,仿真 SPF/DB 工艺制备的 Kagome 点阵的表面凹陷深度和面抗压强度。基于仿真结果,构建 Kriging 响应面模型,获得结构参数对表面凹陷深度和面抗压强度的综合影响,通过遗传算法优化结构参数,并进行了实验验证。本研究为点阵结构的 SPF/DB 工艺提供了一种优化方法,以促进钛合金夹芯结构在航空航天领域的应用。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料与点阵结构

实验材料为宝钛集团有限公司生产的 TC31 钛合金轧制板材。利用面板-芯板-芯板-面板 4 层预制毛坯,采用 SPF/DB 工艺制备点阵结构件,面板厚度为 1.2 mm,芯板厚度为 0.8 mm,正方形板材尺寸为 160 mm×160 mm。芯板如图 1 所示,其中,圆点区域为扩散焊点,焊点直径 d 、六边形边长 a 和筋条宽度 b 这 3 个设计变量影响了点阵结构的轻量化系数及强度。

1.2 优化方法

SPF/DB 点阵结构的结构强度与表面质量主要取决于筋条截面尺寸和筋条与面板的夹角。为了优化结构强度与表面质量,建立了目标函数与约束条件^[18]:

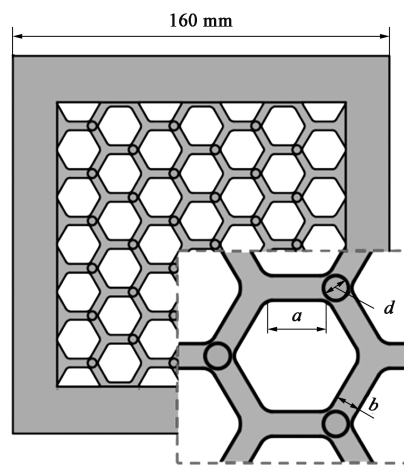


图 1 Kagome 点阵结构的 SPF/DB 工艺芯板示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SPF/DB process core sheet for Kagome lattice structure

$$\begin{cases} x = [b, a, d] \\ \max y(x) = \sigma_p \\ g(x) = h \leq 0.2 \text{ mm} \\ 3 \text{ mm} \leq b \leq 6 \text{ mm} \\ 8 \text{ mm} \leq a \leq 12 \text{ mm} \\ \Phi 3 \text{ mm} \leq d \leq \Phi 6 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为设计变量; $y(x)$ 为目标函数; $g(x)$ 为不等式约束函数; h 为表面凹陷深度; σ_p 为面抗压强度。

采用均匀化设计方法建立样本,方案如表 1 所示。

表 1 Kagome 点阵结构的参数设计方案 (mm)

Table 1 Design schemes on parameters of Kagome lattice structure (mm)

| 序号 | b | a | d |
|----|-----|------|------------|
| 1 | 3.0 | 8.4 | $\Phi 3.6$ |
| 2 | 3.3 | 9.2 | $\Phi 4.5$ |
| 3 | 3.6 | 10.0 | $\Phi 5.4$ |
| 4 | 3.9 | 10.8 | $\Phi 3.0$ |
| 5 | 4.2 | 11.6 | $\Phi 3.9$ |
| 6 | 4.5 | 8.0 | $\Phi 4.8$ |
| 7 | 4.8 | 8.8 | $\Phi 5.7$ |
| 8 | 5.1 | 9.6 | $\Phi 3.3$ |
| 9 | 5.4 | 10.4 | $\Phi 4.2$ |
| 10 | 5.7 | 11.2 | $\Phi 5.1$ |
| 11 | 6.0 | 12.0 | $\Phi 6.0$ |

Kriging 响应面模型同时考虑了全局和局部的共同影响因素,其输出参数等于全局设计值与局部偏差的和,表达式为:

$$y(x) = \mathbf{f}^T(x)\boldsymbol{\beta} + z(x) \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\beta}$ 为函数回归系数矩阵; $\mathbf{f}(x)$ 为变量 x 的多项式函数, 代表设计空间的全局模型; $z(x)$ 表示均值为 0、方差为 σ^2 的高斯随机函数, 代表局部偏差, 其协方差函数可以表示为:

$$\text{cov}[z(x_i), z(x_j)] = \sigma^2 R(x_i, x_j) \quad (3)$$

式中: $R(x_i, x_j)$ 为两个不同设计变量 x_i 、 x_j 之间的变异函数, 表达式如式 (4) 所示; i 、 j 为设计变量编号, 文中共 3 个设计变量, 即 $i=1, 2, 3, j=1, 2, 3$ 。

$$R(x_i, x_j) = \exp\left(\sum_{k=1}^n -\theta_k |x_i^k - x_j^k|\right)^2 \quad (4)$$

式中: θ_k 为与第 k 个数据点相关的参数, $k=1, \dots, n$; n 为数据点数量, 文中 $n=11$; x_i^k 和 x_j^k 为设计变量 x_i 和 x_j 的第 k 维分量的值。

可通过最大似然估计函数来估计参数 θ_k , 其表达式为:

$$\theta_k = -\frac{1}{2} [n \ln(\sigma^2) + \ln(\det(\mathbf{R}))] \quad (5)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R(x_1, x_1) & R(x_1, x_2) & R(x_1, x_3) \\ R(x_2, x_1) & R(x_2, x_2) & R(x_2, x_3) \\ R(x_3, x_1) & R(x_3, x_2) & R(x_3, x_3) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\det(\mathbf{R})$ 为行列式 \mathbf{R} 的值。

利用最小二乘估计法, 可以得到 $\boldsymbol{\beta}$ 为:

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Y} \quad (7)$$

式中: \mathbf{F} 为多项式方程结果组成的矩阵; \mathbf{Y} 为仿真点对应的响应值矩阵。

方差 σ^2 可以用式 (8) 表示:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} (\mathbf{Y} - \mathbf{F})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{Y} - \mathbf{F}) \quad (8)$$

最终生成的 Kriging 响应面的目标函数的预测值和预测方差为:

$$y(x) = \mathbf{f}^T(x)\boldsymbol{\beta} + \mathbf{r}^T(x)\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{Y} - \mathbf{F}) \quad (9)$$

$$\sigma_{y(x)}^2 = \sigma^2 \left[1 + \frac{[\mathbf{f}^T(x)\boldsymbol{\beta} - \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}(x)]^2}{\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F}} - \mathbf{r}^T(x)\mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}(x) \right] \quad (10)$$

式中: $\sigma_{y(x)}^2$ 为预测结果的方差; $\mathbf{r}(x)$ 被用于描述已知变量与随机变量间的相关性, 可以用式 (11) 表示。

$$\mathbf{r}(x) = [R(x_i, x_1), R(x_i, x_2), R(x_i, x_3)]^T \quad (11)$$

最后, 基于建立的 Kriging 响应面模型, 采用遗传算法工具求解模型最优解, 优化结构参数。

1.3 有限元模型

采用 ABAQUS 6.14 的动态显示算法对 SPF/DB 点阵结构件进行仿真, 上、下模具的距离为 20 mm, 以中性面单侧为数模, 仿真模型如图 2 所示。上、下模具被设置为 C3D4 单元的刚体面, 固定不动; 设置面板与芯板为 C3D8R 单元的可变形实体, 输入高温拉伸应力-应变曲线为材料模型^[19]; 模型单元尺寸为 0.4 mm, 单元总数为 811395 个。扩散连接区域采用绑定节点代替; 各表面之间的接触模型采用库仑摩擦模型, 摩擦因数为 0.1^[20], 成形气压曲线如图 3 所示。

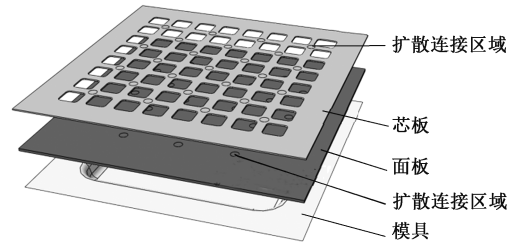


图 2 SPF/DB Kagome 点阵结构件的仿真模型

Fig. 2 Simulation model of SPF/DB Kagome lattice structure component

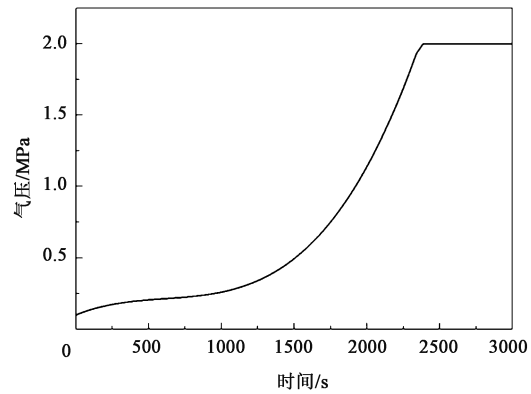


图 3 超塑成形的气压加载曲线

Fig. 3 Gas pressure loading curve of superplastic forming

1.4 SPF/DB 成形实验及压缩实验

在真空 SPF/DB 机床上开展成形实验, 在 920 °C 温度、30 MPa 压力下扩散连接 60 min, 再在 920 °C 下按照图 3 所示气压加载曲线充入氩气, 完成超塑成形, 获得点阵结构试样。在 SPF/DB 成形样件上切取面抗压强度测试样件, 尺寸为 90 mm×60 mm×20 mm, 按照 GB/T 1453—2022^[21], 在 UTM5504X 万能实验机上进行压缩实验, 压下速度为 0.5 mm·min⁻¹。

2 结果与讨论

表 2 为不同结构参数下 Kagome 点阵结构的仿真

及响应结果。其中, h^{sim} 为仿真获得的表面凹陷深度, σ_p^{sim} 为仿真获得的面抗压强度, h^{pre} 为 Kriging 响应面模型预测的表面凹陷深度, σ_p^{pre} 为 Kriging 响

表 2 不同结构参数下 Kagome 点阵结构的仿真及响应结果
Table 2 Simulation and response results of Kagome lattice structure under different structure parameters

| 序号 | h^{sim}/mm | $\sigma_p^{\text{sim}}/\text{MPa}$ | h^{pre}/mm | $\sigma_p^{\text{pre}}/\text{MPa}$ |
|----|----------------------------|------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 1 | 9.66 | 2.05 | 9.66 | 2.02 |
| 2 | 9.67 | 1.95 | 9.67 | 1.99 |
| 3 | 9.75 | 1.87 | 9.74 | 1.85 |
| 4 | 9.52 | 1.16 | 9.50 | 1.16 |
| 5 | 9.55 | 1.06 | 9.56 | 1.06 |
| 6 | 9.51 | 3.91 | 9.49 | 3.91 |
| 7 | 9.54 | 3.70 | 9.55 | 3.70 |
| 8 | 9.31 | 2.09 | 9.31 | 2.20 |
| 9 | 9.36 | 2.35 | 9.37 | 2.03 |
| 10 | 9.49 | 1.46 | 9.47 | 1.76 |
| 11 | 9.62 | 1.47 | 9.62 | 1.38 |

应面模型预测的面抗压强度。采用平均相对误差 $AARE$ 来评价响应面模型拟合的准确度。 $AARE$ 的计算公式为:

$$ARRE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{|A_k - A'_k|}{A_k} \times 100\% \quad (12)$$

式中; A_k 为仿真值; A'_k 为预测值。

经计算, 采用 Kriging 响应面模型预测的表面凹陷与面抗压强度的 $AARE$ 分别为 2.4% 和 4.5%, 预测精度高, 可用于多目标遗传算法优化。

图 4 为 Kriging 响应面模型的优化结果, 其中表面凹陷深度为点阵结构的中性面至凹陷最低点的距离。如图 4a 所示, 随着焊点直径增加、六边形边长增加和筋条宽度减小, 表面凹陷深度增加。在图 4b 中, 随着焊点直径增加、六边形边长增加、筋条宽度减小, 面抗压强度减小, 并且六边形边长对面抗压强度的影响最大, 其次为筋条宽度和焊点直径。图 4c 为 SPF/DB 制备的 Kagome 点阵结构的密度与面抗压强度关系, 通过遗传算法获得的最优结果为: $b=4.4\text{ mm}$, $a=8.2\text{ mm}$, $d=\Phi 6\text{ mm}$ 。

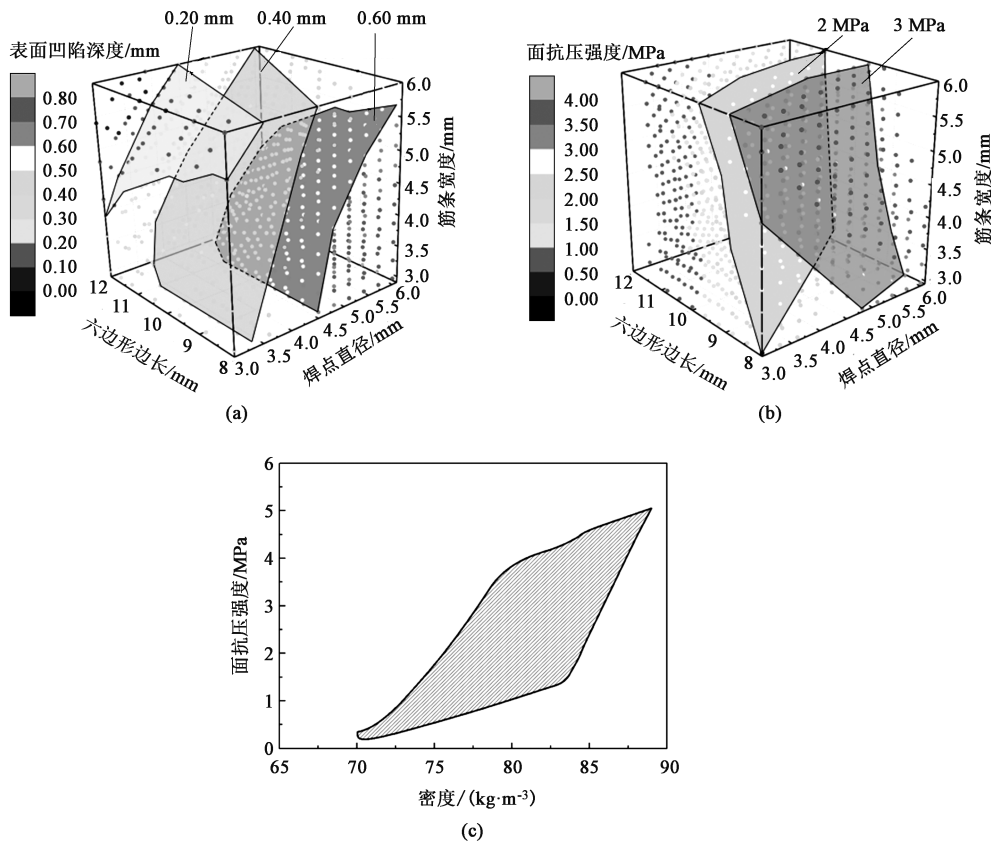


图 4 Kriging 响应面模型优化结果
(a) 表面凹陷深度 (b) 面抗压强度 (c) 面抗压强度与密度的关系

Fig. 4 Optimization results of Kriging response surface model

(a) Surface depression depth (b) Surface compressive strength (c) Relationship between surface compressive strength and density

根据仿真优化的 Kagome 点阵结构参数,采用有限元仿真和实验研究了 SPF/DB 工艺,如图 5 所示,可以很好地成形 Kagome 点阵结构构件。在筋条与焊点间的过渡圆角处发生集中变形,最大等效应变为 0.99,最小厚度为 0.52 mm。图 5b 为位移分布,其中区域 A 与区域 B 的轮廓、减薄率的仿真结果和实验结果如图 6 所示。

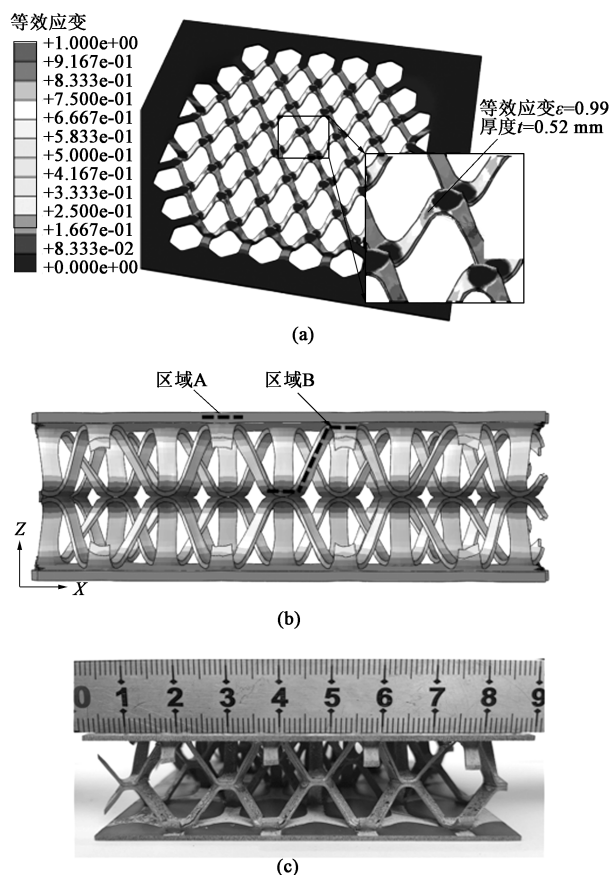


图 5 仿真云图及实验件

(a) 等效应变云图 (b) 位移云图 (c) Kagome 实验件

Fig. 5 Simulation cloud maps and experiment part

(a) Equivalent strain cloud map (b) Displacement cloud map

(c) Kagome experiment part

图 6a 中,点阵结构面板与模具紧密贴合,但扩散焊点受到筋条的拉应力作用,发生蠕变变形,出现了表面凹陷,测量实验件的最大表面凹陷深度为 0.18 mm,仿真结果为 0.23 mm。图 6b 和图 6c 为筋条处的轮廓与壁厚变化,筋条与水平面的夹角约为 55° , AARE 为 3.0%。实验件筋条的最大减薄率为 37.8%,有限元仿真的最大减薄率为 38.0%,误差约为 0.5%,仿真与实验结果匹配良好。Kagome 点阵结构的面压缩曲线如图 6d 所示,实验测试的面抗压强度为 4.36 MPa,仿真结果为 4.56 MPa,误差为

4.4%。因此,仿真模型能够准确地预测 Kagome 点阵结构的外形尺寸和压缩性能,证明了基于有限仿真结果优化出的结构参数的有效性。

3 结论

(1) 基于有限元仿真数据结果,采用 Kriging 响应面模型和遗传算法,优化了 SPF/DB 制备的 Kagome 点阵结构的结构参数,准确预测了表面凹陷深度、面抗压强度等,并得到实验验证。

(2) 采用 0.8 mm 厚的芯板和 1.2 mm 厚的面板,利用 SPF/DB 工艺制备了尺寸精度和面抗压强度良好的 Kagome 点阵结构,并且变形集中在筋条与焊接点的过渡圆角处,最大应变和减薄率分别为 0.99 和 37.8%,面抗压强度为 4.36 MPa。

参考文献:

- [1] Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams [J]. Progress in Materials Science, 2001, 46 (6): 559-632.
- [2] Kim T, Hodson H P, Lu T J. Fluid-flow and endwall heat-transfer characteristics of an ultralight lattice-frame material [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47 (6-7): 1129-1140.
- [3] Lu T J, Hess A, Ashby M. Sound absorption in metallic foams [J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85 (11): 7528-7539.
- [4] Xue Z, Hutchinson J W. Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2003, 45 (4): 687-705.
- [5] Wadley H N G. Multifunctional periodic cellular metals [J]. Philosophical Transactions, 2006, 364 (1838): 31-68.
- [6] Wieding J, Jonitz A, Bader R. The effect of structural design on mechanical properties and cellular response of additive manufactured titanium scaffolds [J]. Materials, 2012, 5 (8): 1336-1347.
- [7] Kooistra G. Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminium [J]. Acta Materialia, 2004, 52 (14): 4229-4237.
- [8] Tan Z L, Bai L S, Bai B Z, et al. Fabrication of lattice truss structures by novel super-plastic forming and diffusion bonding process in a titanium alloy [J]. Materials & Design, 2016, 92: 724-730.
- [9] Niu T, Jiang B, Zhang N, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-Ti₂AlNb interface [J]. Composites and Advanced Materials, 2021, 30: 2092971X-2633366X.
- [10] Du Z H, Ma S B, Han G Q, et al. The parameter optimization and mechanical property of the honeycomb structure for Ti2AlNb based alloy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 65: 206-213.
- [11] Xu L, Ruan Q C, Shen Q Y, et al. Optimization design of lattice

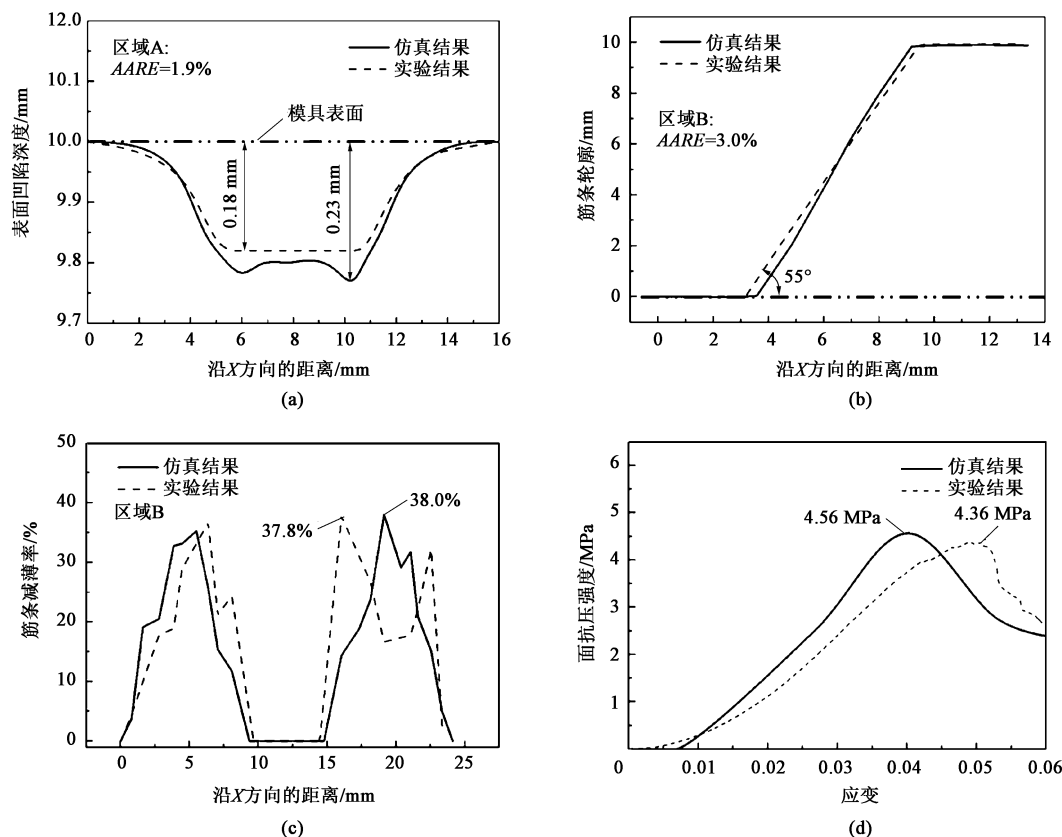


图6 仿真及实验结果对比

(a) 表面凹槽轮廓 (b) 筋条轮廓 (c) 筋条减薄率 (d) 面压缩曲线

Fig. 6 Comparison of simulation and experimental results

(a) Outline of groove on surface (b) Outline of ribs (c) Thinning rate for ribs (d) Surface compression curve

structures in internal cooling channel with variable aspect Ratio of gas turbine blade [J]. *Energies (Basel)*, 2021, 14 (13): 3954: 1-27.

[12] Wu Y, Wu D P, Ma J, et al. A physically based constitutive model of Ti-6Al-4V and application in the SPF/DB process for a pyramid lattice sandwich panel [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2021, 21 (106): 1-17.

[13] Li W X, Sun F F, Wang P, et al. A novel carbon fiber reinforced lattice truss sandwich cylinder: Fabrication and experiments [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 81: 313-322.

[14] Siong Tok D K, Shi Y R, Tian Y T, et al. Factorized f-step radial basis function model for model predictive control [J]. *Neurocomputing*, 2017, 239: 102-112.

[15] Jeong S, Myrayama M, Yamamoto K. Efficient optimization design method using Kriging model [J]. *Journal of Aircraft*, 2005, 42 (2): 413-420.

[16] Cai S P, Zhang P, Dai W X, et al. Multi-objective optimization for designing metallic corrugated core sandwich panels under air blast loading [J]. *The Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2021, 23 (4): 1192-1220.

[17] Du D H, He E M, Li F, et al. Using the hierarchical Kriging model to optimize the structural dynamics of rocket engines [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 107 (4): 106248.

[18] Niu X Q, Xu F X, Zou Z. Bionic inspired honeycomb structures and multi-objective optimization for variable graded layers [J]. *The Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2023, 25 (2): 215-231.

[19] 吴迪鹏, 武永, 陈明和, 等. TC31 钛合金板材高温流变行为及组织演变研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48 (12): 3901-3910.

Wu D P, Wu Y, Chen M H, et al. High temperature flow behavior and microstructure evolution of TC31 Titanium alloy sheets [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48 (12): 3901-3910.

[20] Liu Z Q, Wang X S, Jiao X Y, et al. Prediction of microstructure evolution during hot gas forming of Ti2AlNb-based alloy tubular component with square cross-section [J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 15: 1156-1163.

[21] GB/T 1453—2022, 夹层结构或芯子平压性能试验方法 [S]. GB/T 1453—2022, Test method for flatwise compression properties of sandwich constructions or cores [S].