

基于工艺参数优化的高温合金加工技术研究

夏万亮^{1*}, 张波^{1#}, 陆于佳²

¹上海工具厂有限公司技术中心, 上海

²上海工具厂有限公司数控刀具厂, 上海

收稿日期: 2026年3月13日; 录用日期: 2026年4月5日; 发布日期: 2026年4月13日

摘要

高温合金因其优异的力学性能和耐高温特性, 广泛应用于航空航天、能源动力等关键领域。然而, 其固有的难加工特性严重制约了加工效率与经济效益的提升。为实现高温合金的高效高质加工, 本文开展基于智能算法的工艺参数优化研究。首先, 引入并采用萤火虫算法这一新兴的元启发式优化方法, 以表面粗糙度最小化和材料去除率最大化为优化目标, 构建幂函数形式的表面粗糙度预测模型, 建立了工艺参数多目标优化模型。最后, 设计GH4169侧铣工程应用案例, 对比传统经验参数与优化参数的加工效果。结果表明, 优化后参数在满足表面粗糙度 $\leq 1.5 \mu\text{m}$ 工艺要求的前提下, 材料去除率提升125%, 表面粗糙度降低30.9%, 实现了加工效率与表面质量的协同提升。本研究将智能算法与工程实践紧密结合, 形成了一条从“理论建模”到“参数优化”再到“工程验证”的完整技术路径。研究成果为攻克高温合金高效精密加工难题提供了具有实用价值的参考, 并证实了智能优化算法在复杂制造工艺参数决策中的巨大潜力。

关键词

高温合金, 参数优化, 萤火虫算法, 工程应用

Research on Superalloy Processing Technology Based on Process Parameter Optimization

Wanliang Xia^{1*}, Bo Zhang^{1#}, Yujia Lu²

¹Technology Center, Shanghai Tool Works Co., Ltd., Shanghai

²CNC Tool Factory, Shanghai Tool Works Co., Ltd., Shanghai

Received: March 13, 2026; accepted: April 5, 2026; published: April 13, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

Because of its excellent mechanical properties and high temperature resistance, superalloys are widely used in key fields such as aerospace, energy and power. However, its inherent difficult-to-machine characteristics seriously restrict the improvement of processing efficiency and economic benefits. In order to achieve high-efficiency and high-quality processing of superalloys, this paper carried out research on process parameter optimization based on intelligent algorithms. Firstly, the firefly algorithm, an emerging meta-heuristic optimization method, is introduced and adopted. The surface roughness prediction model in the form of power function is constructed with the minimization of surface roughness and the maximization of material removal rate as the optimization objectives, and the multi-objective optimization model of process parameters is established. Finally, the engineering application case of GH4169 side milling is designed, and the processing effect of traditional empirical parameters and optimized parameters is compared. The results show that the optimized parameters increase the material removal rate by 125 % and reduce the surface roughness by 30.9% on the premise of meeting the process requirements of surface roughness $\leq 1.5 \mu\text{m}$. The synergistic improvement of processing efficiency and surface quality is realized. This study closely combines intelligent algorithms with engineering practice, forming a complete technical path from “theoretical modeling” to “parameter optimization” to “engineering verification”. The research results provide a practical reference for solving the problem of high efficiency and precision machining of superalloys, and confirm the great potential of intelligent optimization algorithms in the decision-making of complex manufacturing process parameters.

Keywords

Superalloy, Parameter Optimization, Firefly Algorithm, Engineering Application

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高温合金是航空航天、能源动力等关键领域的“核心基石”，核心源于其在极端环境下无可替代的综合性能。这类以铁、镍、钴为基体的材料，能在 600°C 以上的高温环境中保持超高强度、优异的抗氧化性与抗蠕变能力，即便承受高温高压、粒子冲刷或腐蚀等严苛考验，仍可长期稳定工作数千小时。

然而，高温合金的优异性能背后，是其加工硬化显著、切削热集中、切削抗力大的难加工特性，严重制约了加工效率与表面质量的协同提升[1]。针对高温合金 GH4169 铣削参数优化问题，国内外学者已开展大量智能算法应用研究：朱悦宏等[2]采用遗传算法实现 GH4169 高速铣削参数优化，虽提升了加工效率，但算法易陷入局部最优，难以兼顾多目标协同优化；王宗荣等[3]通过模糊正交优化完成难加工合金参数设计，仅适用于少参数、低维度场景，无法适配多约束复杂工艺问题；部分学者采用粒子群算法优化切削参数，虽收敛速度较快，但对初始种群依赖度高，优化结果稳定性不足[4]。

现有研究中，萤火虫算法作为一种全局搜索能力强、收敛效率高的元启发式优化算法，已在工业优化领域得到应用[5][6]，但在 GH4169 铣削参数多目标优化中的应用仍属空白。基于此，本文创新性引入萤火虫算法，构建以表面粗糙度最小化和材料去除率最大化为目标的 GH4169 侧铣参数多目标优化模型，通过工程案例验证优化效果，形成“理论建模 - 参数优化 - 工程验证”的完整技术路径。本文的研究贡

献在于：弥补了传统智能算法在 GH4169 多目标铣削参数优化中的不足，验证了萤火虫算法在复杂制造工艺参数决策中的适用性，为高温合金 GH4169 的高效精密加工提供了具有实用价值的工艺参考。

2. 萤火虫算法

为破解高温合金难加工瓶颈、实现高效高质加工目标，本文聚焦工艺参数的精准优化，创新性引入萤火虫算法这一新兴元启发式优化方法，构建多目标优化模型，为加工过程提供科学的参数决策支撑。萤火虫算法源于对自然界萤火虫群体发光、觅食行为的模拟，作为元启发式优化方法的重要分支，其具备强大的全局搜索能力和收敛效率，尤其擅长解决多约束、非线性的复杂优化问题。

2.1. 萤火虫算法优化的特点

Yang 等开发了一种名为萤火虫算法(Firefly Algorithm, FA)的算法[7]-[10]。萤火虫以其闪烁的灯光进行社交互动，这些光不仅用于吸引繁殖伙伴，还能驱赶潜在的捕食者。这些光的强度遵循一个物理规律，即与两萤火虫之间距离的平方成反比，公式为 $I = 1/r^2$ 。在萤火虫的交往中，通常是雄性先发出光信号，而雌性则对此作出反应，可能是通过发出恒定或闪烁的光。这两者之间的距离直接影响它们的吸引力，距离越远，光的强度越弱[5]。基于这一现象，萤火虫算法(FA)被提出，它模拟萤火虫的光交流，使用吸收因子、随机性因子等参数进行优化。与其他算法如遗传算法、人工蜂群算法和粒子群算法相比，FA 具有自动细分和多模态问题处理的优势[11]-[13]。

在本文中，根据其应用和适用性使用了 FA 优化算法来处理所考虑的问题，对以表面质量和生产效率为目标的工艺参数优化进行了尝试。

2.2. 萤火虫算法的主要步骤

萤火虫算法不能直接对种群变量直接进行优化，在每次迭代初始化后，通过随机因子(a)，吸收系数(b)和萤火虫之间的距离(r)来更新参数。通过这种方式，这些工艺参数被改变，并通过目标函数进行评估。将目标函数值与前一次迭代得到的值相关联，所有的迭代都是为了寻找性能参数的最优结果而进行的，最大迭代次数($tmax$)控制搜索过程[14]，图 1 展示了萤火虫算法的优化步骤。

萤火虫算法中的主要步骤：

- (1) 在给定问题变量的范围内初始化随机萤火虫位置，并定义 FA 算法的控制参数。
- (2) 对给定的问题定义目标函数和约束变量。
- (3) 评估所有萤火虫的光照强度(即目标函数值)。
- (4) 选择强度值高的最佳萤火虫。
- (5) 计算每个萤火虫距离最佳萤火虫的距离，更新萤火虫位置。
- (6) 评估萤火虫的强度。
- (7) 萤火虫强度和位置的排序。
- (8) 选择当前迭代的最佳萤火虫，并将其替换，如果发现它比上一次迭代的“最佳萤火虫强度值”更好，否则只保留上一轮的解。
- (9) 更新结果，如果迭代次数达到最大生成限制，则转到步骤 10，否则转到步骤 5。
- (10) 在试验结束时得到的萤火虫强度值即为该优化问题的最优最优解。

在 FA 中，强度(I)表示适应度函数的解(f)。强度的变化在式 1 中给出。

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (1)$$

其中， I_0 是光源的光强， γ 是光的吸收系数。萤火虫的吸引力(b)与其光照强度(β)成正比。因此，可以

定义一个类似于式 1 的式 2 来描述吸引度 β 。

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (2)$$

式中： β_0 为距离 $r=0$ 处的吸引力。

位置为 s_i 和 s_j 的萤火虫“ i ”和“ j ”之间的空间表示为欧氏距离，该距离由式 3 给出。

$$r_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (s_{ik} - s_{jk})^2} \quad (3)$$

其中， n 表示模型的维数。吸引力较小的萤火虫(i)会向吸引力最大的萤火虫(j)移动。通过这种方式，FA 参数将根据式 4 进行更新。

$$s_i(t+1) = s_i(t) + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (s_j(t) - s_i(t)) + \alpha \varepsilon_i \quad (4)$$

其中， ε_i 是一个随机数。萤火虫位置更新包括 3 项：第 i 只萤火虫当前位置、对另一只美丽萤火虫的意愿、随机化约束(α)和随机数(ε_i)。

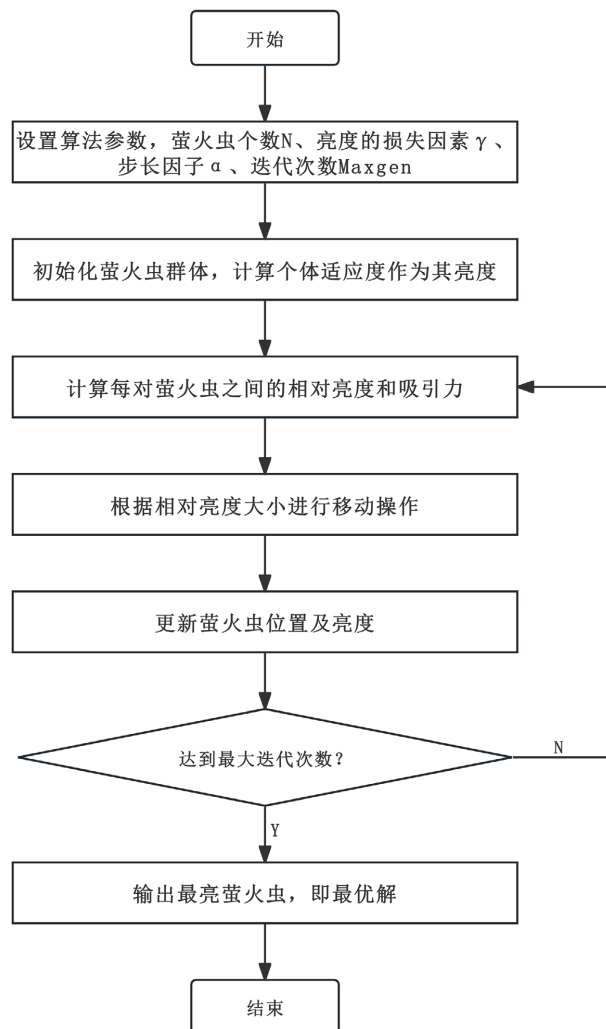


Figure 1. FA algorithm optimization
图 1. FA 算法优化

3. 切削参数优化模型

本文以高温合金 GH4169 侧铣为研究对象,以表面粗糙度最小化和材料去除率最大化为双优化目标,结合金属切削理论与工程实际,构建铣削工艺参数多目标优化模型[15][16]。优化目标函数基于幂函数形式的表面粗糙度预测模型和理论推导的材料去除率模型建立,优化框架如图 2 所示。

3.1. 铣削工艺参数优化目标函数

在建立铣削参数优化模型时,需保证模型在约束条件下能精准匹配工程实际,确保最优参数既满足表面质量要求,又能实现加工经济性指标最优化[17]-[19]。本文选取主轴转速 n 、进给速度 v_f 、切削深度 a_p 、切削宽度 a_e 为待优化工艺参数,构建双目标优化函数,实现表面质量与加工效率的协同优化[18]。图 2 展示了优化模型的优化框架图。

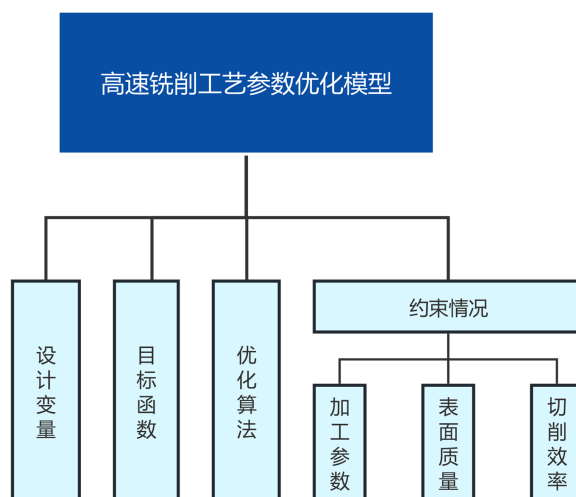


Figure 2. FA algorithm optimization framework diagram
图 2. FA 算法优化框架图

本文将采用两个优化目标:最小化表面粗糙度和最大化材料去除率[19]。

(1) 最小的表面粗糙度:在切削加工中,表面粗糙度是一个关键的技术指标,它直接反映了切削加工性能[20]。根据切削理论的分析[21],优化目标函数应选择表面粗糙度最小化,本文针对高温合金 GH4169 侧铣加工特性,结合金属切削理论与现有研究成果,选取主轴转速 n 、进给速度 v_f 、切削深度 a_p 、切削宽度 a_e 为实验因素;构建幂函数形式的表面粗糙度预测模型作为优化目标函数,实现表面粗糙度最小化,其数学表达式如式(5)所示,其中表面粗糙度 S_a 的表达式如式 5 所示。

$$S_a = S_a(n, f_z, a_e, a_p) = kn^a f_z^b a_e^c a_p^d + C \quad (5)$$

其中: S_a 为加工表面粗糙度,单位为 μm ; n 为主轴转速,单位为 r/min ; v_f 为进给速度,单位为 mm/min ; a_p 为切削深度,单位为 mm ; a_e 为切削宽度,单位为 mm ; k 为工艺系数, a 、 b 、 c 、 d 为各工艺参数的影响指数, C 为修正常数。

(2) 最大材料去除率:建立切削效率的目标函数,切削效率一般是指完成一个工件所需时间,在这里把它表示为与 v_f 、 a_p 、 a_e 有关材料去除率[22],表达式如式 6 所示,把对最大切削效率的优化转化为表面去除率的优化:

$$Q = v_f a_e a_p \quad (6)$$

其中 v_f 为进给速度单位为 mm/min, v_f 又可以用 z 、 d 、 v_c 、 f_z 来表示, 如式 7:

$$v_f = fn = f_z zn = zf_z \frac{v_c}{\pi d} \quad (7)$$

其中 f 为刀具的每转进给量, 单位为 mm/r, d 为刀具直径, 单位为 mm。

所以也可以用: 刀具齿数 z , 刀具直径 d , v_c , f_z 、 a_p 、 a_e 来表示表面去除率, 如式 8:

$$Q = \frac{z}{\pi d} v_c f_z a_e a_p \quad (8)$$

建立最大表面去除率的目标模型[23], 表达式如式 9 所示:

$$w_1 = \max(Q) = \max(v_c f_z a_e a_p) \quad (9)$$

3.2. 铣削工艺参数优化模型约束

在铣削加工时, 决策变量应该满足以下的约束条件[24]:

(1) 主轴转速 n : $n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$

式中, n_{\min} 、 n_{\max} 为机床主轴的最低、最高转速。

(2) 进给速度 v : $v_{f \min} \leq v_f \leq v_{f \max}$

式中, $v_{f \min}$ 、 $v_{f \max}$ 为机床最低、最高进给速度。

(3) 步距 a_e : $0 \leq a_e \leq a_{e \max}$

式中, $a_{e \max}$ 铣削加工最大步距。

(4) 切深 a_p : $0 \leq a_p \leq a_{p \max}$

式中, $a_{p \max}$ 铣削加工最大切削速度。

(5) 粗糙度 S_a : $S_a \leq S_{a \max}$

式中, $S_{a \max}$ 为工艺要求的表面最大粗糙度。

上一节已确定了铣削参数的优化目标和约束。数控铣床技术参数如表 1 所示, 求解的目标是在满足这些条件的基础上, 找到最优解。优化目标函数定义如下[25], 表达式如式 10 所示:

$$\begin{aligned} & \text{sim}(S_a, [x_1, x_2, x_3, x_4]) \\ & \frac{1}{Q} = \frac{\pi d}{z} \frac{1}{x_1 x_2 x_3 x_4} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别对应 n 、 v_f 、 a_p 、 a_e 。

Table 1. CNC milling machine technical specifications

表 1. 数控铣床技术参数

约束目标	约束范围
数控铣床额定主轴转速范围	$1 \text{ r/min} \leq n \leq 24000 \text{ r/min}$
	$10 \text{ mm/min} \leq v_{fx} \leq 60000 \text{ mm/min}$
数控铣床各个进给轴额定范围	$10 \text{ mm/min} \leq v_{fy} \leq 60000 \text{ mm/min}$
	$10 \text{ mm/min} \leq v_{fz} \leq 60000 \text{ mm/min}$
	$0 \text{ r/min} \leq n \leq 24000 \text{ r/min}$
刀具铣削参数推荐范围	$0 \text{ mm/min} \leq v_f \leq 5000 \text{ mm/min}$
	$0 \text{ mm} \leq a_p \leq 1 \text{ mm}$
	$0 \text{ mm} \leq a_e \leq 1 \text{ mm}$

综上所述，以表面质量和生产效率为目标的铣削工艺参数优化模型如式 11 所示[26]：

$$\text{s.t.}, \begin{cases} n_{\min} < n < n_{\max} \\ v_{f\min} < v_f < v_{f\max} \\ a_{p\min} < a_p < a_{p\max} \\ a_{e\min} < a_e < a_{e\max} \\ S_a = S_a(n, v_f, a_p, a_e) \leq S_{a\max} \\ MRR = v_f a_p a_e \geq MRR_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

4. 铣削参数优化工程应用

4.1. 基于萤火虫算法的切削参数优化

在多目标优化问题中，表面粗糙度最小化与材料去除率最大化存在相互制约的矛盾关系，无法同时达到全局最优，其最优解为帕累托最优解集，即无法在改善一个优化目标的同时，不降低另一个优化目标的性能。

本文通过使用萤火虫算法根据式 11 所示模型进行双目标优化，设置最优前端输入参数为 6，目标函数为 2，种群数为 60，最大迭代次数为 200，交叉率为 0.8，突变概率 0.05。运行算法后得到 Pareto 部分关键解如表 2 所示，解集涵盖不同表面粗糙度与材料去除率的参数组合，可根据工程实际的工艺要求灵活选择。

Table 2. Pareto optimal solution set of GH4169 side milling process parameters (Partial)

表 2. GH4169 侧铣工艺参数帕累托最优解集(部分)

	主轴转速 n (r/min)	进给速度 V_f (mm/min)	切削深度 a_p (mm)	切削宽度 a_e (mm)	表面粗糙度 S_a (μm)	材料去除率 Q (mm^3/r)
1	18000	1000	10	0.1	1.250	100.0
2	20000	1200	12	0.1	1.485	144.0
3	15000	1500	8	0.2	1.860	240.0
4	12000	2000	6	0.3	2.350	360.0
5	10000	3000	4	0.4	2.980	480.0

本研究面向企业实际生产的 GH4169 侧铣加工需求，工艺要求表面粗糙度 $S_a \leq 1.5 \mu\text{m}$ (满足后续精加工的表面质量与余量要求)，因此在帕累托最优解集中，选择满足 $S_a \leq 1.5 \mu\text{m}$ 约束下材料去除率最大的解作为工程验证点(表 2 中序号 2)，对应主轴转速 $n = 20,000 \text{ r/min}$ 、进给速度 $V_f = 1200 \text{ mm/min}$ 、切削深度 $a_p = 12 \text{ mm}$ 、切削宽度 $a_e = 0.1 \text{ mm}$ 的参数组合，该验证点实现了工程工艺约束与加工效率最大化的双重目标，具备实际应用价值。

4.2. 基于萤火虫算法的切削参数优化应用

为直观验证萤火虫算法优化参数的有效性，本研究选取企业生产中 GH4169 侧铣加工的经验传统参数作为对照组，该参数为行业内针对 GH4169 粗/半精铣削的通用参数，兼顾加工稳定性与刀具寿命，具体数值结合工程实践与现有研究确定[27]-[29]。

本实验选取高温合金 GH4169 为加工对象，如图 3 所示，实验设备为 Aplos FGV1060L 立式加工中心；刀具采用整体硬质合金 D12 四刃立铣刀(牌号 GU25UF，普智鑫涂层)，刀具参数如表 3 所示；加工

过程采用高压切削液冷却；表面粗糙度通过 Mitutoyo Surftest SJ-201 粗糙度测量仪测量，每次取 3 个不同位置测量，取平均值作为最终结果，加工后的工件表面如图 4 所示。以高温合金 GH4169 的侧铣工艺为应用对象，实现面向表面质量和加工效率的工艺改进。



Figure 3. On-site photo of superalloy side milling test
图 3. 高温合金侧铣试验现场图



Figure 4. Machined workpiece surface
图 4. 加工后工件表面

Table 3. Main parameters of the milling cutter
表 3. 铣刀主要参数

直径(mm)	12	刀齿数	4
长度(mm)	75	刃长(mm)	25

Table 4. Comparison of processing effect**表 4.** 加工效果对比

	主轴转速 n (r/min)	进给速度 V_f (mm/min)	切削深度 a_p (mm)	切削宽度 a_e (mm)	表面粗糙度 S_a (μm)	材料去除率 Q (mm^3/r)
原参数	8000	800	8	0.1	2.150	64.0
优化参数	20000	1200	12	0.1	1.485	144.0
变化率	+150%	+50%	+50%	0	-30.9%	+125%

按照上述实验方案开展 GH4169 侧铣对比实验，传统经验参数与萤火虫算法优化参数的具体数值及加工效果实测数据如表 4 所示，其中材料去除率根据式 6 计算，表面粗糙度为实际测量值，通过变化率直观体现优化参数的提升效果。由表 4 可知，相较于企业传统经验参数，经萤火虫算法优化后的工艺参数，表面粗糙度从 2.150 μm 降至 1.485 μm ，降低幅度达 30.9%，且优化后表面粗糙度 $\leq 1.5 \mu\text{m}$ ；材料去除率从 64.0 mm^3/min 提升至 144.0 mm^3/min ，提升幅度达 125.0%。

优化后的工艺参数通过“高主轴转速 + 低每齿进给量 + 大切削深度 + 小切削宽度”实现切削优化，最终达成提质增效目标：20,000 r/min 的高速切削使切削区温度升至材料塑性软化区间，降低切削力，缓解加工硬化问题；进给速度和切削深度提升的同时，每齿进给量降至 0.015 mm/z，既通过小进给量降低表面残留面积、优化粗糙度，又依托大切深在刀具和机床承载范围内提升材料去除率；0.1 mm 小切宽则有效降低刀具径向切削力，减少变形与振动，同时减小刀具与工件接触面积，降低切削热生成并利于散热，避免刀尖过热崩刃、保障加工稳定性，该参数组合适配 GH4169 加工硬化强、导热差、高温强度高的高温合金特性，实现了加工效率与表面质量的协同提升。

5. 结语

本文围绕高温合金 GH4169 侧铣加工效率与表面质量难以协同提升的工程难题，开展基于萤火虫算法的工艺参数多目标优化研究，完成了从理论建模、算法优化到工程验证的系统性研究工作，主要结论与研究成果如下：

(1) 针对 GH4169 侧铣加工，选取主轴转速、进给速度、切削深度、切削宽度为待优化参数，构建幂函数形式的表面粗糙度预测模型，以表面粗糙度最小化和材料去除率最大化为目标，建立工艺参数多目标优化模型；

(2) 引入萤火虫算法求解多目标优化模型，得到涵盖不同表面粗糙度与材料去除率的帕累托最优解集，结合企业实际工艺要求($S_a \leq 1.5 \mu\text{m}$)，选择满足质量约束下材料去除率最大的解作为工程验证点；

(3) 设计 GH4169 侧铣对比实验，对比传统经验参数与优化参数的加工效果，结果表明优化参数使表面粗糙度降低 30.9%、材料去除率提升 125%，实现了加工效率与表面质量的协同提升，有效验证萤火虫算法在 GH4169 工艺参数优化中的可行性与有效性。

后续研究可进一步结合刀具结构参数(如 R 角、螺旋角、不等分齿距)，开展工艺参数与刀具结构参数的协同优化，进一步提升高温合金的加工效果。

基金项目

高精度五轴立卧加工中心研制及其生产线集成和应用验证项目(CYLGG-2024-1-27)。

参考文献

[1] 宁福达. 镍基高温合金高速铣削切屑形成机理与表面粗糙度研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学,

- 2014.
- [2] 朱悦宏, 田龙, 李云虎, 等. 基于遗传算法的高温合金 GH4169 高速铣削参数优化的研究[J]. 世界有色金属, 2017(10): 118-120.
- [3] 王宗荣, 左敦稳, 王眠. TC4 钛合金高速铣削参数的模糊正交优化[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2005(6): 709-712.
- [4] 王宸, 杨洋, 袁海兵, 等. 基于混合粒子群算法的数控切削参数多目标优化[J]. 现代制造工程, 2017(3): 77-82.
- [5] Kumar, P.G.A., Jeyanthi, P.A. and Devaraj, D. (2022) Hybrid Multi-Objective Method Based on Ant Colony Optimization and Firefly Algorithm for Renewable Energy Sources. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, **36**, Article ID: 100810. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100810>
- [6] Liu, Y., Wang, Y., Zhou, M. and Huang, J. (2023) Improvement of Computational Efficiency and Accuracy by Firefly Algorithm and Random Forest for Compressive Strength Modeling of Recycled Concrete. *Sustainability*, **15**, Article 9170. <https://doi.org/10.3390/su15129170>
- [7] 郭圣淼. 基于遗传算法的加速器驱动嬗变研究装置堆顶屏蔽优化设计[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2023.
- [8] Yang, X. and Suash Deb, (2009) Cuckoo Search via Lévy Flights. 2009 *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC)*, Coimbatore, 9-11 December 2009, 210-214. <https://doi.org/10.1109/nabic.2009.5393690>
- [9] Yang, X. (2010) A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm. In: Cruz, C., González, J.R., Pelta, D.A., Krasnogor, N. and Terrazas, G., Eds., *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*, Springer, 65-74. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12538-6_6
- [10] 余飞. 基于群智优化算法的频谱感知和频谱分配研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
- [11] 袁成志. 基于改进群体智能优化算法的图像处理应用研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
- [12] 张智伟. 基于工况识别自适应 ECMS 混合汽车能量管理策略研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2023.
- [13] 丁群. 基于群体智能和深度强化学习的无人机路径规划研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
- [14] Paisarnvirosrak, N. and Rungrueng, P. (2023) Firefly Algorithm with Tabu Search to Solve the Vehicle Routing Problem with Minimized Fuel Emissions: Case Study of Canned Fruits Transport. *LOGI—Scientific Journal on Transport and Logistics*, **14**, 263-274. <https://doi.org/10.2478/logi-2023-0024>
- [15] 艾兴, 刘战强, 等. 高速切削加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [16] 刘战强. 高速切削技术的研究与应用[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2001.
- [17] 张科雷. 40CrNi2Si2MoVA 超高强度钢高速铣削机理研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- [18] 王洋. 高速切削 Ti6Al4V 硬质合金刀具磨损预测研究[D]: [硕士学位论文]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2017.
- [19] 马晓云, 林建平. 淬硬模具钢 SKD61 的高速铣削加工研究[J]. 机械工程材料, 2004, 28(6): 27-29.
- [20] 闫雪, 陶华, 高晓斌, 等. 300M 超高强度钢高速铣削切削力建模研究[J]. 机械强度, 2008, 30(5): 860-863.
- [21] 李迎. 高速切削工艺参数优化模型研究及发展趋势[J]. 电子机械工程, 2010, 26(1): 1-9.
- [22] Schulz, H. and Hock, S. (1995) High-Speed Milling of Dies and Moulds—Cutting Conditions and Technology. *CIRP Annals*, **44**, 35-38. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)62270-7](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)62270-7)
- [23] Zuperl, U. and Cus, F. (2003) Optimization of Cutting Conditions during Cutting by Using Neural Networks. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **19**, 189-199. [https://doi.org/10.1016/s0736-5845\(02\)00079-0](https://doi.org/10.1016/s0736-5845(02)00079-0)
- [24] Cus, F. and Balic, J. (2003) Optimization of Cutting Process by GA Approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **19**, 113-121. [https://doi.org/10.1016/s0736-5845\(02\)00068-6](https://doi.org/10.1016/s0736-5845(02)00068-6)
- [25] 丁同梅, 周正武, 王太勇. 切削参数多目标优化设计[J]. 机械工程与自动化, 2006(4): 79-81.
- [26] 刘洋, 兰天旭, 张胜文, 等. 船用柴油机关键件铣削加工参数优化的研究[J]. 机械设计与制造, 2011(1): 178-180.
- [27] 谢书童, 郭隐彪. 双刀并行数控车削中的切削参数优化方法[J]. 中国机械工程, 2014, 25(14): 1941-1946.
- [28] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [29] Wang, Z.G., Rahman, M., Wong, Y.S. and Sun, J. (2005) Optimization of Multi-Pass Milling Using Parallel Genetic Algorithm and Parallel Genetic Simulated Annealing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **45**, 1726-1734. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.03.009>