

激光定向能量沉积 NiCo-FGMs 的磨削工艺优化

辛博, 曹刚, 秦嘉鑫, 赵显力
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为解决激光定向能量沉积(laser-directed energy deposition, L-DED)成型工艺制备的镍钴基功能梯度材料(NiCo-FGMs)磨削后表面质量一致性较差这一问题,基于正交试验分析了磨削工艺参数对 NiCo-FGMs 的磨削力和表面粗糙度的影响规律,并建立相应的预测模型.针对粗加工与精加工的不同加工目标,利用第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)结合熵权法与逼近理想解的排序方法即熵权 TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution)法进行了多目标磨削工艺参数优化,并进行验证.结果表明:粗加工磨削参数采用 $a_p = 53.61 \mu\text{m}$, $v_s = 29.99 \text{ m/s}$, $v_w = 311.89 \text{ mm/min}$;精加工磨削参数采用 $a_p = 14.96 \mu\text{m}$, $v_s = 29.99 \text{ m/s}$, $v_w = 300.92 \text{ mm/min}$.经两道工序加工,表面粗糙度标准差从 $0.195 \mu\text{m}$ 降至 $0.101 \mu\text{m}$,有效提高 NiCo-FGMs 的表面粗糙度一致性.

关键词: 镍钴基功能梯度材料(NiCo-FGMs);激光定向能量沉积(L-DED);磨削力;表面粗糙度
中图分类号: TH 161 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)02-0085-11

Grinding Process Optimization of Laser-Directed Energy Deposited NiCo-FGMs

XIN Bo, CAO Gang, QIN Jia-xin, ZHAO Xian-li

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: XIN Bo, E-mail: xinbo@me.neu.edu.cn)

Abstract: In order to solve the problem of poor surface quality consistency after the grinding of nickel-cobalt-based functional gradient materials (NiCo-FGMs) prepared by laser-directed energy deposition (L-DED) and forming process, the influence laws of the grinding process parameters on the grinding force and surface roughness of NiCo-FGMs were analyzed based on the orthogonal experiments, and the corresponding prediction model was established. For the different processing objectives of rough machining and finish machining, the multi-objective grinding process parameter optimization was carried out and verified by using the second-generation non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) and the entropy weight technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method. The results showed that the rough machining parameters are used $a_p = 53.61 \mu\text{m}$, $v_s = 29.99 \text{ m/s}$, $v_w = 311.89 \text{ mm/min}$, and the finish machining parameters are used $a_p = 14.96 \mu\text{m}$, $v_s = 29.99 \text{ m/s}$, $v_w = 300.92 \text{ mm/min}$. After the two-stage machining, the standard deviation of surface roughness is reduced from $0.195 \mu\text{m}$ to $0.101 \mu\text{m}$, which effectively improves the surface roughness consistency of NiCo-FGMs.

Key words: nickel-cobalt-based functional gradient materials (NiCo-FGMs); laser-directed energy deposition (L-DED); grinding force; surface roughness

近年来,随着金属基复合材料(metal matrix composites, MMC)及其增材制造技术的快速发展,利用激光定向能量沉积(L-DED)成型工艺制备的功能梯度高温合金(functional graded

收稿日期: 2023-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52005093);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2203014);辽宁省科学技术计划面上项目(2023-MS-085).

作者简介: 辛博(1988—),男,吉林通化人,东北大学副教授,博士生导师.

superalloy) 因其在不同部位具有不同的性能与功能, 可满足苛刻的服役环境对同一零部件的不同部位的不同性能要求, 在航空航天领域中极具工程应用价值^[1]. 镍钴基功能梯度材料(NiCo-FGMs) 作为一种典型的耐高温 MMC, 可应用于航空发动机、高速飞行器等产品中, 并可显著提升产品的高温服役性能. 然而 L-DED 成型 NiCo-FGMs 的毛坯表面粗糙度较差, 表面完整性普遍较低, 需要通过机械加工来改善表面粗糙度和尺寸精度^[2]. 同时 L-DED 成型零件由于快速加热和冷却, 熔池内的温度梯度大, 导致晶粒生长不均匀, 不同区域会出现不同的切削性能. 而残余应力在释放过程中也会导致材料变形, 影响加工精度.

目前大多数学者的研究主要集中于利用各种难加工材料制备特殊的功能梯度材料(functional graded materials, FGMs) 以获得独特的性能方面, 并关注其微观结构和力学性能属性^[3-4]. Sim 等^[5]充分研究 M2-Cu 梯度材料的微尺度切削, 并实现切削力的精准预测. Oyelola 等^[6]研究功能梯度 Ti6Al4V/WC 构件的车削加工特性, 分析材料变化对切削力、刀具磨损和表面完整性的影响规律. 针对 FGMs 的铣削工艺研究, Wang 等^[7]研究 25% 梯度区间的 NiFe-FGMs 铣削参数选择策略及其对刀具磨损的影响规律. Noh 等^[8]研究 20% 梯度区间的 SAE 316L-Inconel 718 梯度材料的微观结构和力学性能, 以及不同铣削方法和加工路径的刀具磨损和铣削力特性. 相比于车削与铣削工艺, 磨削工艺更适合于改善金属复合材料的表面粗糙度和精度. Guo 等^[9]研究 Al/SiCp MMC 的高速磨削工艺特性, 证明增加磨削速度能提高 Al/SiCp MMC 的表面完整性. Zhang 等^[10]建立并验证了考虑基体和增强材料不同去除机制的 TiC/GT35 MMC 表面粗糙度预测模型. 而 NiCo-FGMs 连续变化的材料力学性能, 使得其磨削加工表面一致性较差. 同时, NiCo-FGMs 作为典型的难加工材料, 使得磨削过程中会造成砂轮较快磨损, 加剧表面一致性的恶化^[11].

综上, 目前国内外学者对于 L-DED 成型 NiCo-FGMs 零件的磨削机理和工艺参数优化研究较少, 特别是对磨削力和表面完整性随材料性能变化的研究更少. 因此, 本文以镍钴基梯度合

金属材料(K447A-Stellite-6) 为研究对象, 开展磨削工艺参数对 NiCo-FGMs 磨削力以及加工表面质量的影响研究. 采用正交试验方法研究了磨削深度、砂轮线速度和进给速度对 NiCo-FGMs 磨削力和表面粗糙度的影响, 并且建立了相应的预测模型. 同时针对粗加工与精加工两道工序阶段, 分别使用 NSGA-II 对磨削深度、砂轮线速度和进给速度 3 个磨削参数进行优化. 通过遗传算法获得相应的 Pareto 解集, 并采用熵权 TOPSIS 法进行多目标决策, 获得最优参数组合. 最终得到在粗加工与精加工两阶段不同目标函数下的最佳磨削参数, 从而提高加工效率, 实现表面粗糙度一致性.

1 试验条件和步骤

1.1 增材制备工艺

本文成型材料为等离子体感应熔融雾化工艺制备的 K447A, Stellite-6 球形粉末(粒度: K447A, 53~105 μm ; Stellite-6, 47~165 μm), 粉末电镜图见图 1, 化学成分如表 1 所示. L-DED 成型制备工艺参数见表 2.

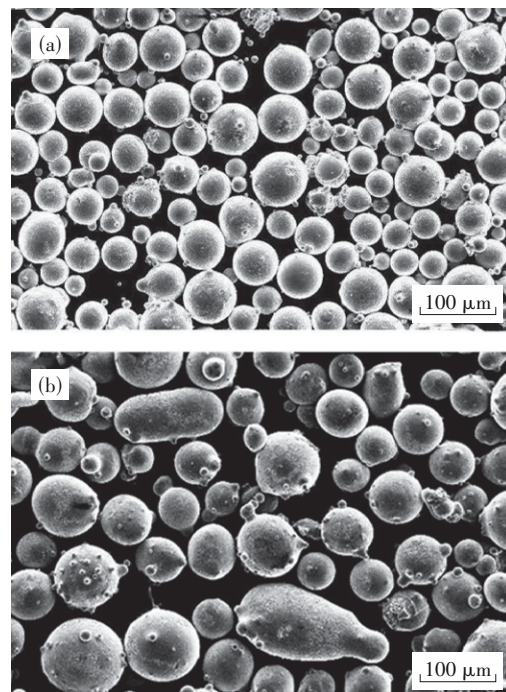


图 1 K447A 和 Stellite-6 粉末的 SEM 图像

Fig. 1 SEM images of K447A and Stellite-6 powders
(a)—K447A 粉末; (b)—Stellite-6 粉末.

表1 K447A和Stellite-6粉末的化学组成(质量分数)
Table 1 Chemical composition of K447A and Stellite-6 powders (mass fraction) %

材料	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ti	Fe	Al	Co	Ni	W	Ta	Hf
K447A	0.14	0.03	0.01	8.69	0.72	1.16	0.12	5.58	10.33	Bal.	10.31	3.11	1.58
Stellite-6	1.15	1.10	0.50	29.00	1.00	—	3.00	—	Bal.	3.00	4.00	—	—

表2 NiCo-FGMs试件制备工艺参数
Table 2 Preparation process parameters of the NiCo-FGMs specimen

变量	数值
激光功率/W	1 600
送粉速率/(g·min ⁻¹)	15
激光扫描速度/(mm·min ⁻¹)	600
搭接率/%	40
送粉/保护气体	N ₂
基板预热温度,时间	300 °C, 10 min

本文采用SVW80C-3D五轴联动增/减混合加工中心增材系统完成定向能量沉积制造NiCo-FGMs试样.加工中心主要由YLS-2000光纤激光发生器(IPG光电公司,美国马萨诸塞州牛津)、RC-PGF-D-2双筒仓负压给粉机(中科瑞胜激光科技有限公司,中国南京)和基板预热器(台州欧力电器有限公司,中国台州)等组成,同轴送粉载气为高纯度氮气.退火后的铸造Inconel 718(100 mm×100 mm×10 mm)作为基体.试验前,将粉末在真空中干燥,对基板抛光去除表面氧化层,并用乙醇清洗.以25%梯度材料为过渡分别制备5种梯度材料:100% Stellite-6, 25% K447A, 50% K447A, 75% K447A, 100% K447A,成型试样如图2所示.

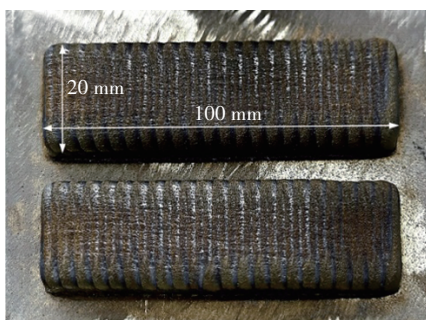


图2 NiCo-FGMs试样

Fig. 2 Specimen of NiCo-FGMs

1.2 拉伸强度分析

本文根据GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》设计并制作拉伸试样尺寸,拉伸试件尺寸如图3所示.

使用WDW-1000E微机控制电子式万能试

验机进行静载位移控制拉伸试验,拉伸速率0.5 mm/min,室温22 °C,初始标距均为13 mm,记录拉伸曲线,直至断裂.拉伸结果如图4所示.

由图4可知,随着材料的梯度变化,其力学性能有所差异.当Stellite-6质量分数为100%时,材料的拉伸强度和屈服强度均达到最高值,分别为1 197.56, 844.34 MPa.随着K447A质量分数的增加,材料的屈服强度和拉伸强度均呈下降趋势,当梯度材料K447A质量分数为100%时,材料的屈服强度和拉伸强度达到最小值,分别为927.7, 609.2 MPa.



图3 拉伸试样

Fig. 3 Tensile specimen

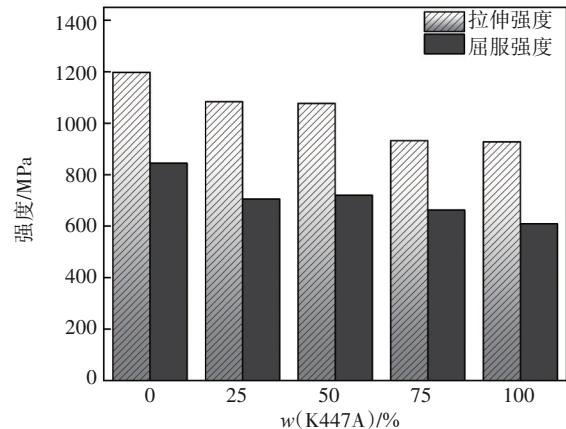


图4 拉伸试验结果

Fig. 4 Tensile test results

1.3 磨削试验工艺

磨削试验在SVW80C-3D增/减复合加工中心减材系统上进行,如图5所示,磨具为磨粒尺寸为74 μm的电镀金刚石砂轮(φ100 mm×5 mm).采用KWR75B型六轴测力仪(坤威科技有限公司,中国北京)测量磨削力,测量精度为0.2 N,采样频率为1 000 Hz.采用OLS4100型3D测量激光显微镜测量表面粗糙度R_a,每个试样沿磨削进给方向取3个测量点测量粗糙度,取平均值作为最终数据.

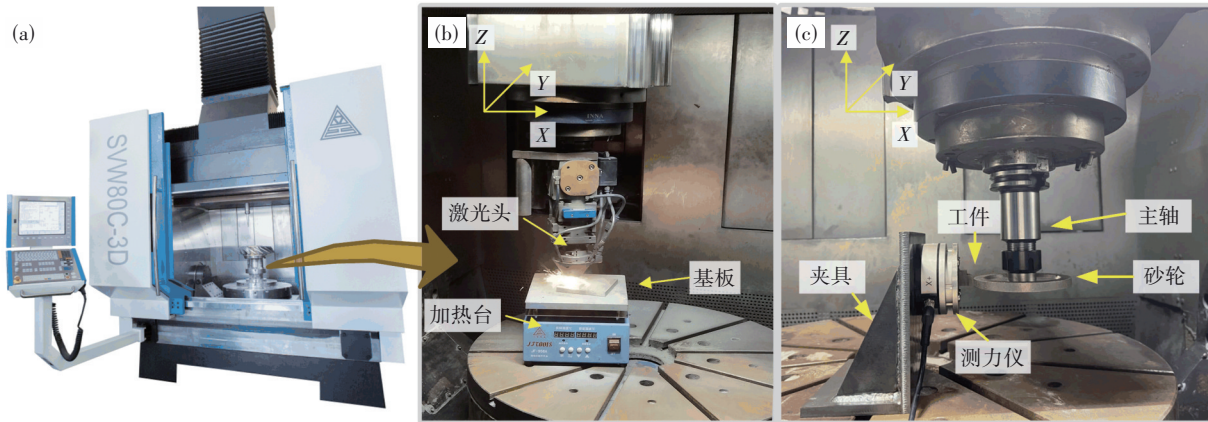


图5 SVW80C-3D五轴联动增/减复合加工中心

Fig. 5 SVW80C-3D five-axis linkage increase/decrease composite machining center

(a)—加工机床;(b)—增材系统;(c)—减材系统.

为了研究磨削参数(磨削深度 a_p 、砂轮线速度 v_s 、进给速度 v_w)对磨削力和表面粗糙度的影响规律,本文采用三因素四水平正交试验法对不同梯度材料分别进行磨削试验,正交试验表如表3所示.磨削方式采用逆磨,无润滑剂.每组试验重复进行3次,并统计测量值的平均值.

表3 正交试验表
Table 3 Orthogonal experimental table

序号	$a_p/\mu\text{m}$	$v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_w/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$
1	10	15	300
2	10	20	500
3	10	25	700
4	10	30	900
5	25	15	500
6	25	20	300
7	25	25	900
8	25	30	700
9	40	15	700
10	40	20	900
11	40	25	300
12	40	30	500
13	55	15	900
14	55	20	700
15	55	25	500
16	55	30	300

2 试验结果与分析

2.1 磨削力结果分析

磨削力是由磨粒与工件材料相互接触过程中发生的摩擦力、弹塑性变形抗力等作用形成的,与磨削表面质量之间有密切的联系,是评价

工件材料磨削性能的重要参量.正交试验所得磨削力结果如表4所示,其中 F_n 为法向磨削力, F_t 为切向磨削力.

采用极差分析法对磨削力正交试验结果进行极差分析,确定出各个工艺参数对法向磨削力影响的主次关系,其结果如图6所示.通过对试验结果的极差(R)分析可知,3个磨削参数对平均法向磨削力的相对影响程度为 $a_p(60.03) > v_w(10.6) > v_s(9.46)$,即磨削深度对平均法向磨削力的影响最大,砂轮线速度的影响最小.同理,各磨削参数对平均切向磨削力的相对影响程度为 $a_p(27.41) > v_s(6.61) > v_w(5.49)$,即磨削深度对平均切向磨削力的影响最大,进给速度的影响最小.图7为不同梯度材料中磨削参数对磨削力的影响趋势图,从该图中可以看出砂轮线速度 v_s 对法向磨削力 F_n 和切向磨削力 F_t 整体呈负相关,工件进给速度 v_w 和磨削深度 a_p 对法向磨削力 F_n 和切向磨削力 F_t 整体呈正相关.

2.2 粗糙度分析结果

当采用同一组磨削参数磨削NiCo-FGMs时,由于材料组分沿磨削方向发生变化,导致工件不同位置磨削后表面粗糙度不一致,因此本文引入各梯度材料磨削后表面粗糙度标准差来分析磨削后表面粗糙度一致性,标准差越小,表明粗糙度一致性越好.

正交试验所测的表面粗糙度结果如表5所示.采用极差分析法对表面粗糙度正交试验结果进行极差分析,确定磨削参数对各梯度材料磨削后表面粗糙度标准差影响的主次关系,结果如图8所示.通过对试验结果的极差分析可知,磨削参数对各梯度材料表面粗糙度标准差的相对影响

程度为 $v_s(0.31) > v_w(0.08) > a_p(0.04)$, 即砂轮线速度对表面粗糙度标准差的影响最大, 磨削深度的影响最小. 图 9 为磨削参数对不同梯度材料磨削后表面粗糙度 R_a 的影响趋势图, 从该图中可以

看出砂轮线速度 v_s 对表面粗糙度 R_a 呈负相关, 不同梯度材料中工件进给速度 v_w 和磨削深度 a_p 对表面粗糙度 R_a 的影响无明显规律.

表 4 磨削力结果
Table 4 Grinding force results

序号	0% K447A		25% K447A		50% K447A		75% K447A		100% K447A	
	F_n	F_t	F_n	F_t	F_n	F_t	F_n	F_t	F_n	F_t
1	11.99	4.59	15.05	8.69	10.12	5.75	11.12	5.99	23.37	12.65
2	17.27	6.56	20.27	11.25	11.87	6.29	16.25	9.29	28.78	15.12
3	14.21	6.46	19.30	10.59	14.96	7.82	18.43	9.63	20.34	8.46
4	7.96	4.23	16.63	8.06	13.78	6.78	17.80	8.77	17.16	7.33
5	14.00	5.60	39.51	23.75	23.86	13.53	31.22	16.39	66.46	31.55
6	33.57	12.86	33.41	19.12	19.01	10.37	28.05	15.98	44.33	21.39
7	39.60	16.59	45.32	24.14	31.15	15.70	45.71	23.22	60.79	24.60
8	34.59	11.74	36.18	17.49	30.61	15.40	37.57	18.21	56.95	23.86
9	83.87	36.24	65.22	38.67	39.56	22.35	54.78	29.15	111.60	50.81
10	37.79	14.75	57.70	30.67	40.84	21.29	53.94	25.83	66.84	27.45
11	48.25	20.82	40.30	21.90	28.98	15.22	43.17	23.79	88.03	37.27
12	62.60	23.83	53.58	25.58	41.72	21.28	58.75	27.38	89.41	34.74
13	96.26	41.87	88.00	51.26	67.95	37.15	73.17	39.61	145.20	63.06
14	59.92	24.46	75.86	40.76	57.34	29.60	69.44	35.44	110.56	43.23
15	72.37	30.43	55.15	29.66	39.34	19.79	57.13	30.64	112.42	43.83
16	72.50	28.17	58.48	28.21	44.33	23.28	67.05	31.23	104.82	40.91

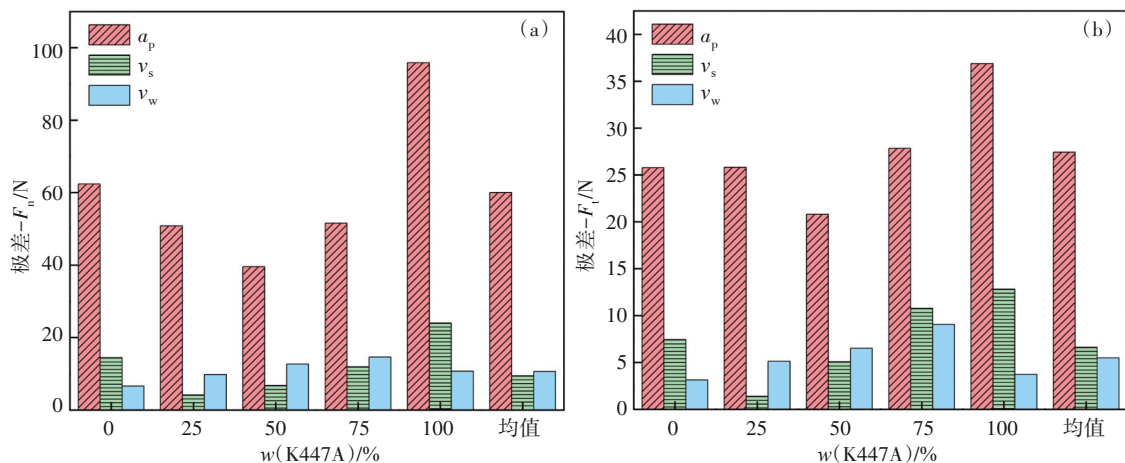


图 6 磨削参数对不同梯度材料磨削力的影响极差

Fig. 6 Range of influence of the grinding parameters on the grinding force of materials with different gradients

(a) —法向磨削力; (b) —一切向磨削力.

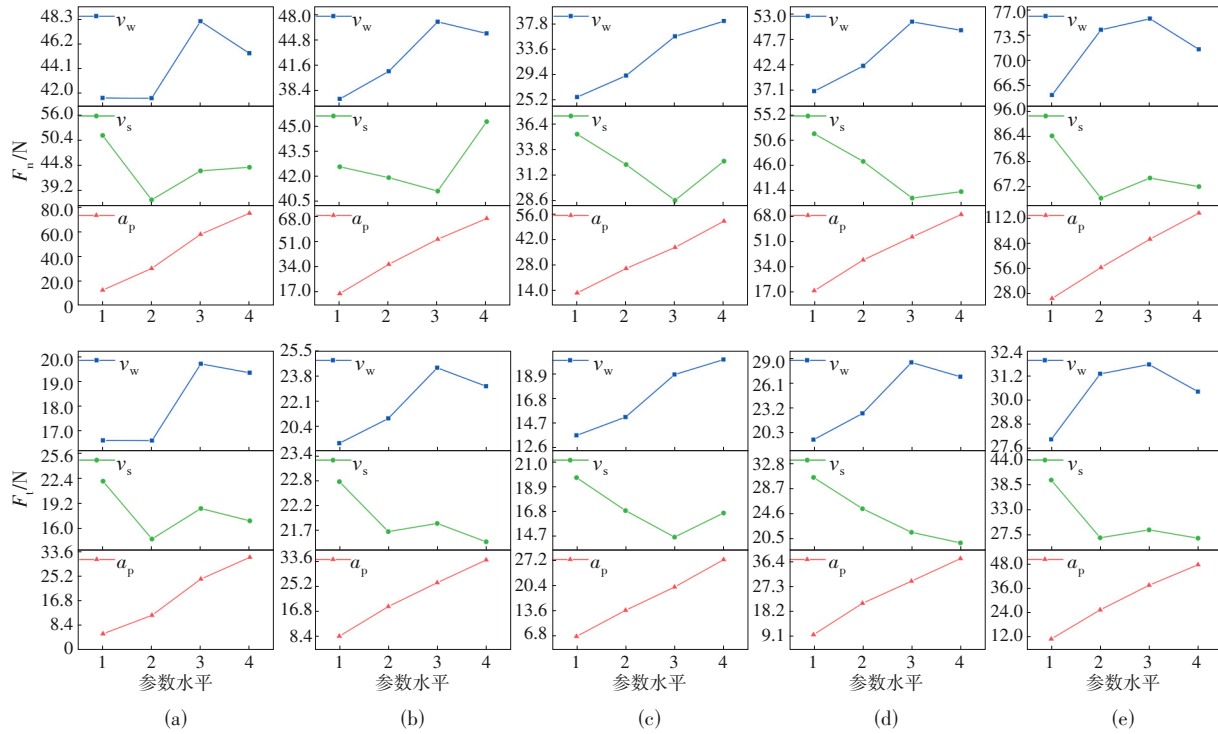


图 7 不同梯度材料中磨削参数对磨削力的影响趋势

Fig. 7 Impact trend of the grinding parameters on the grinding force in different gradient materials

(a)—0% K447A; (b)—25% K447A; (c)—50% K447A; (d)—75% K447A; (e)—100% K447A.

表 5 粗糙度测量结果
Table 5 Roughness measurement results

序号	R_a					标准差	平均值
	0% K447A	25% K447A	50% K447A	75% K447A	100% K447A		
1	1.38	0.75	2.01	1.24	1.09	0.464	1.29
2	1.17	0.74	1.68	0.98	1.03	0.349	1.12
3	0.71	0.66	1.34	0.92	1.00	0.272	0.93
4	0.57	0.73	0.99	0.79	0.98	0.177	0.81
5	1.26	0.80	2.09	1.14	1.11	0.484	1.28
6	0.94	0.81	1.68	0.95	1.14	0.343	1.10
7	0.68	0.67	1.17	0.88	0.91	0.207	0.84
8	0.46	0.63	0.85	0.71	0.96	0.195	0.72
9	0.85	0.88	2.04	1.24	1.15	0.483	1.23
10	0.68	0.78	2.01	1.16	1.18	0.523	1.16
11	0.63	0.77	1.07	0.99	0.94	0.178	0.88
12	0.51	0.67	0.88	0.72	0.97	0.179	0.75
13	0.79	0.95	2.20	1.58	1.16	0.567	1.34
14	0.88	0.75	1.47	0.95	1.04	0.274	1.02
15	0.66	0.70	1.01	0.91	0.89	0.148	0.83
16	0.51	0.67	0.93	0.84	0.93	0.183	0.77

μm

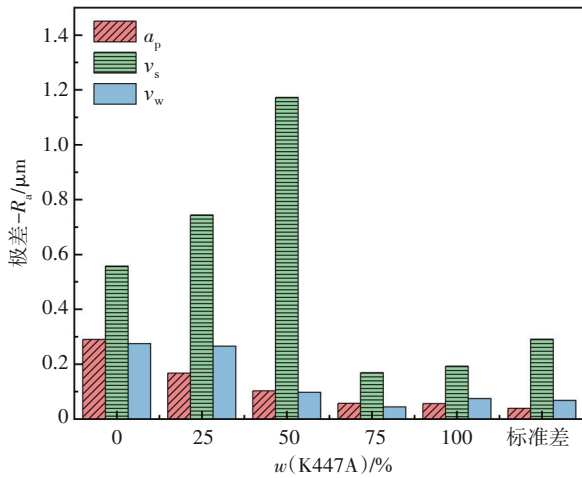


图 8 磨削参数对不同梯度材料表面粗糙度的影响极差
Fig. 8 Range of influence of the grinding parameters on the surface roughness of materials with different gradients

3 工艺参数优化

3.1 预测模型

为研究磨削工艺参数优化问题,首先需要建立磨削力与磨削参数之间的数学模型.由于法向磨削力 F_n 作用于砂轮的切入方向,可以引起砂轮轴和工件的变形,加速砂轮钝化,且法向磨削力过大容易引起工件表面烧伤,对工件精度和加工表面质量影响较大,因此在磨削工艺参数优化过程中引入平均法向磨削力数学模型作为极小值目标函数.

本文基于多指数拟合分析方法,建立平均法向磨削力 F_n 与粗糙度标准差 σ 经验公式预测模型:

$$F_n = C_1 a_p^{b_1} v_s^{b_2} v_w^{b_3}, \quad (1)$$

$$\sigma = C_2 a_p^{d_1} v_s^{d_2} v_w^{d_3}. \quad (2)$$

其中: C_1, C_2 为修正参数; b_1 和 d_1, b_2 和 d_2, b_3 和 d_3 分

别为磨削深度、砂轮线速度、进给速度的影响系数.以式(1)为例,对等式两边取对数可得式(3):

$$\lg F_n = \lg C + b_1 \lg a_p + b_2 \lg v_s + b_3 \lg v_w. \quad (3)$$

设 $y = \lg F_n, b_0 = \lg C, x_1 = \lg a_p, x_2 = \lg v_s, x_3 = \lg v_w$, 则式(3)可转化为多元线性方程:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3. \quad (4)$$

对正交试验结果进行多元线性回归分析,利用 MATLAB 软件进行求解可得平均法向磨削力与粗糙度标准差的经验公式预测模型:

$$F_n = 10^{-0.050} a_p^{0.907} v_s^{-0.097} v_w^{0.176}, \quad (5)$$

$$\sigma = 10^{1.19} a_p^{-0.062} v_s^{-1.57} v_w^{0.165}. \quad (6)$$

对平均法向磨削力经验公式预测模型与粗糙度标准差经验公式预测模型进行显著性分析,平均法向磨削力 F_n 预测模型的方差分析(ANOVA)结果如表 6 所示.当显著水平 $\alpha=0.005$ 时,由表 6 可知,临界值 $F_{\alpha}(3, 12)=7.23$,表中 F 值远大于临界值 7.23,说明回归方程显著.表面粗糙度标准差 σ 预测模型的方差分析结果如表 7 所示,表中 F 值远大于临界值 7.23,说明回归方程显著. F_n 预测模型确认系数 $R^2=0.969>0.8$, σ 预测模型确认系数 $R^2=0.843>0.8$,表明这 2 个预测模型均具有良好的拟合精度.

2 个经验公式预测模型的预测值与试验值对比如图 10 所示.从图 10 可知,平均法向磨削力经验公式预测模型的平均误差为 9.27%,表面粗糙度标准差 σ 经验公式预测模型的平均误差为 14.08%,2 个模型的预测值与试验值无显著差异,预测效果较好.

3.2 多目标优化与决策

在实际 NiCo-FGMs 工件磨削加工过程中,主要有粗加工与精加工两道主要工序.在粗加工过程中,最大程度去除多余材料,提高加工效率

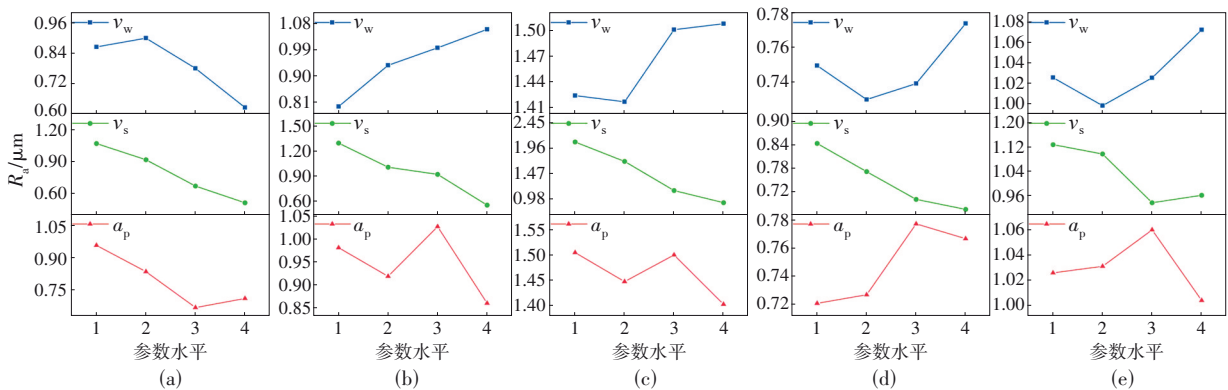


图 9 磨削参数对不同梯度材料表面粗糙度的影响趋势

Fig. 9 Impact trend of the grinding parameters on the surface roughness of materials with different gradients

(a)—0% K447A; (b)—25% K447A; (c)—50% K447A; (d)—75% K447A; (e)—100% K447A.

是粗加工的主要目标;而在精加工过程中,提高工件表面光洁度、尺寸精度和公差是精加工最终目标.因此本文引入平面磨削材料去除率计算模型^[12]来代表粗加工磨削效率:

$$Z_w = \frac{V}{t} = \frac{8}{15} \sin \frac{180\tau (ka_p d_s)^{\frac{1}{2}}}{\pi d_s} \tan \frac{\theta}{2} k^2 a_p^2 d_s \times (v_s + v_w) \left(\frac{1}{ka_p d_s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中: θ 为磨粒顶角; k 为实际磨削深度与理论磨削深度之比; τ 为真实接触弧长与运动接触弧长之比; d_s 为砂轮的直径.

已知参数如下:砂轮直径 $d_s=100$ mm, $k=$

0.94, $\tau=0.75$,磨粒顶角 $\theta=106^\circ$.代入式(7)可得单颗磨粒瞬时的材料去除率计算公式为

$$Z_w = 6.254 a_p^{\frac{3}{2}} \sin(4.297 a_p^{\frac{1}{2}}) (v_s + v_w). \quad (8)$$

为实现 NiCo-FGMs 各梯度位置加工表面粗糙度一致性,提高加工效率,本文在工艺参数优化过程中,分别对粗加工和精加工 2 个阶段进行参数优化.在粗加工阶段,以材料去除率和法向磨削力为优化目标函数,运用第二代非支配排序遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithm- II, NSGA- II) 进行多目标优化组合求解^[13],该算法降低了非劣排序遗传算法的复杂性,具有运行速度快、解集的收敛性好等优点,被广泛应用于工程问题优化中.

表 6 平均法向磨削力预测模型方差分析
Table 6 ANOVA of the average normal grinding force prediction model

变量	自由度	平方和	均方	F 值
回归	3	1.044 187	0.348 062	126.117 6
残差	12	0.033 118	0.002 760	—
总计	15	1.077 305	—	—

表 7 粗糙度标准差预测模型方差分析
Table 7 ANOVA of the roughness standard deviation prediction model

变量	自由度	平方和	均方	F 值
回归	3	0.517 136	0.172 379	21.542 84
残差	12	0.096 020	0.008 002	—
总计	15	0.613 156	—	—

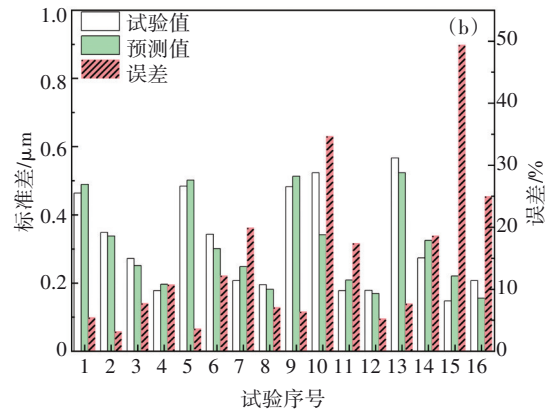
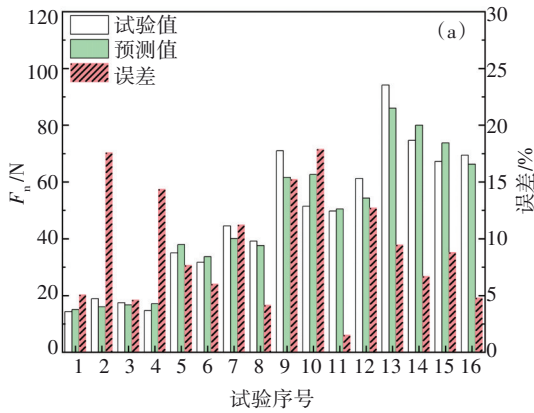


图 10 预测值与试验值对比

Fig. 10 Comparison of predicted and experimental values

(a)—磨削力经验公式预测;(b)—粗糙度标准差经验公式预测.

优化目标函数及约束条件如下:

$$\left. \begin{aligned} \min F_n(a_p, v_s, v_w), \\ \max Z_w(a_p, v_s, v_w); \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} 10 \mu\text{m} \leq a_p \leq 55 \mu\text{m}, \\ 15 \text{ m/s} \leq v_s \leq 30 \text{ m/s}, \\ 300 \text{ mm/min} \leq v_w \leq 900 \text{ mm/min}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

在精加工阶段,以各梯度材料表面粗糙度标准差和法向磨削力为优化目标函数,同理运用 NSGA- II 进行多目标优化组合求解,优化目标函

数及约束条件如下:

$$\left. \begin{aligned} \min F_n(a_p, v_s, v_w), \\ \min \sigma(a_p, v_s, v_w); \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} 10 \mu\text{m} \leq a_p \leq 55 \mu\text{m}, \\ 15 \text{ m/s} \leq v_s \leq 30 \text{ m/s}, \\ 300 \text{ mm/min} \leq v_w \leq 900 \text{ mm/min}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

设置 NSGA- II 算法的参数为:初始种群个数 $N=200$;最大迭代次数为 500;交叉概率为 0.8;帕累托前端系数为 0.3,在 MATLAB 软件中调用

gamultiobj 函数进行迭代寻优,得到 2 组 Pareto 前沿解集如图 11 所示.优化后的每组 Pareto 最优解集中包含 200 组最优解.

由于非劣解数目太多,难以满足工程实际的需要,为了从众多 Pareto 最优解中选择一组最佳参考值且能够满足设计者的要求,本文引入熵权 TOPSIS 法^[14]对 Pareto 解集进行综合评价,根据各个方案与理想解之间的相对贴近度对各方案进行排序,从而得出全局最优解,结果如表 8 和表 9 所示.

根据表 8 相对贴近度的大小可以确定在粗加

工阶段中第 76 种方案为最佳参考方案,对应的工艺参数组合为最优磨削工艺参数组合: $a_p=53.61 \mu\text{m}$, $v_s=29.99 \text{ m/s}$, $v_w=311.89 \text{ mm/min}$, 此时预测的法向磨削力 $F_n=65.18 \text{ N}$, 材料去除率 $Z_w=1\ 953.24 \text{ mm}^3/\text{s}$.

根据表 9 确定在精加工阶段中第 65 种方案为最佳参考方案,对应的工艺参数组合为最优磨削工艺参数组合: $a_p=14.96 \mu\text{m}$, $v_s=29.99 \text{ m/s}$, $v_w=300.92 \text{ mm/min}$, 此时预测的法向磨削力 $F_n=20.35 \text{ N}$, 表面粗糙度标准差 $\sigma=0.16 \mu\text{m}$.

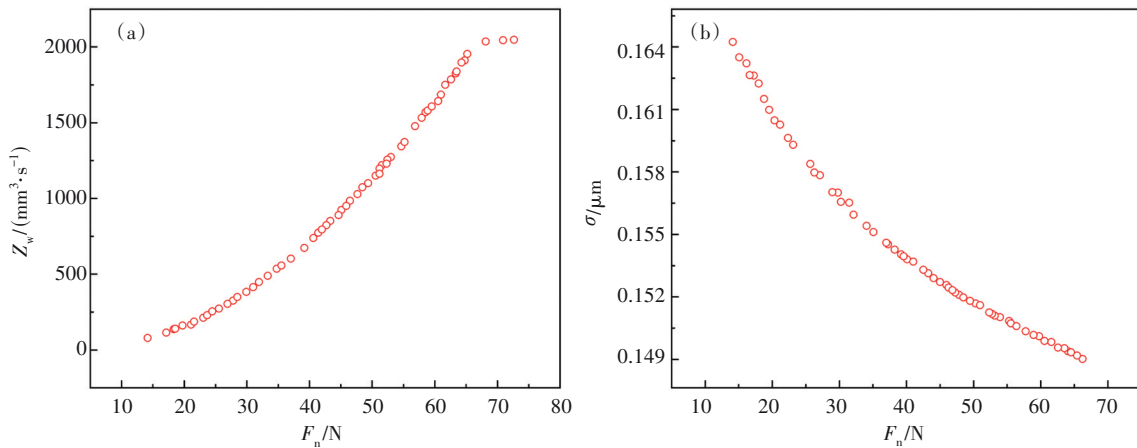


图 11 Pareto 前沿解集

Fig. 11 Pareto front solution set

(a)—粗加工;(b)—精加工.

表 8 粗加工各方案与理想解之间的相对贴近度

Table 8 Relative closeness between each scheme and ideal solution in rough machining

方案	正理想解距离	负理想解距离	相对贴近度	排序
76	0.383 065	0.538 008	0.584 110	1
121	0.383 110	0.537 717	0.583 950	2
9	0.389 791	0.545 486	0.583 235	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
43	0.460 695	0.291 348	0.387 408	200

表 9 精加工各方案与理想解之间的相对贴近度

Table 9 Relative closeness between each scheme and ideal solution in finish machining

方案	正理想解距离	负理想解距离	相对贴近度	排序
65	0.229 899	0.612 230	0.727 003	1
126	0.235 464	0.621 043	0.725 088	2
15	0.230 347	0.602 385	0.723 384	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
190	0.616 914	0.267 685	0.302 606	200

3.3 优化结果验证分析

对上述熵权 TOPSIS 法决策得到的最优磨削工艺参数组合进行磨削试验验证分析,所得试验

结果如表 10 所示.采用上述粗加工优化结果组合对工件进行磨削试验,所测的表面粗糙度标准差为 $0.195 \mu\text{m}$; 材料去除率为 $1\ 979.6 \text{ mm}^3/\text{s}$; 平均

法向磨削力 F_n 为 59.78 N, 预测值与试验值的相对误差为 8.28%。采用精加工优化结果组合对工件进行磨削试验, 所测表面粗糙度的标准差为 $0.101 \mu\text{m}$; 材料去除率为 $173.17 \text{ mm}^3/\text{s}$; 平均法向磨削力 F_n 为 20.58 N, 预测值与试验值的相对误差为 1.13%。综上所述, 本优化模型可以较好地完成优化目标。

采用 VHX-1000E 超景深显微镜对不同梯度位置拍摄的形貌照片如图 12 所示。从图中可以看

出, 在粗加工阶段工件表面存在大量凹坑状材料剥落和较深的条状犁沟刻痕, 这是金刚石磨粒在磨削过程中直接将工件表面“撕裂”所形成的。工件表面还存在较大面积的深色磨削烧伤, 这是由于在磨削时瞬时高温使工件表层局部组织发生变化, 工件表面出现氧化变色的现象。在精加工阶段工件表面材料存在少量较浅的材料剥落和条状犁沟刻痕, 且在不同梯度位置工件表面形貌整体较为均匀与一致, 表面完整性与一致性较好。

表 10 磨削试验结果

Table 10 Grinding experiment results

工序	$a_p/\mu\text{m}$	$v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_w/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	F_n/N	$\sigma/\mu\text{m}$	$Z_w/(\text{mm}^3\cdot\text{s}^{-1})$
粗加工	54	30	311.89	59.78	0.195	1979.6
精加工	15	30	300.92	20.58	0.101	173.17

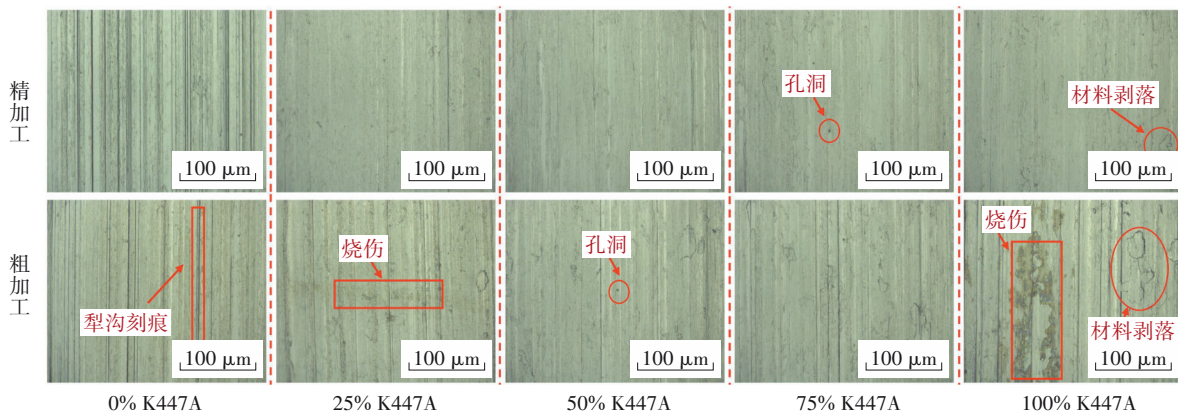


图 12 磨削加工表面形貌图

Fig. 12 Surface topography of the grinding process

4 结 论

1) 通过正交试验方法设计 NiCo-FGMs 试件磨削试验, 运用极差分析, 得到磨削参数对平均法向磨削力 F_n 的相对影响程度为磨削深度 $a_p >$ 进给速度 $v_w >$ 砂轮线速度 v_s , 磨削参数对平均切向力 F_t 的相对影响程度为磨削深度 $a_p >$ 砂轮线速度 $v_s >$ 进给速度 v_w , 砂轮线速度 v_s 对法向磨削力 F_n 和切向磨削力 F_t 整体呈负相关, 工件进给速度 v_w 和磨削深度 a_p 对法向磨削力 F_n 和切向磨削力 F_t 整体呈正相关。通过极差分析, 得知磨削参数对 NiCo-FGMs 各梯度位置表面粗糙度标准差 σ 相对影响程度为砂轮线速度 $v_s >$ 进给速度 $v_w >$ 磨削深度 a_p 。

2) 建立了法向磨削力与磨削参数之间的数学模型以及磨削后 NiCo-FGMs 各梯度位置表面粗糙度标准差与磨削参数之间的数学模型。对该

模型进行方差及显著性分析, 结果表明该模型显著且拟合程度良好。

3) 针对粗加工与精加工两道工序运用 NSGA-II 算法进行磨削工艺参数组合寻优并运用熵权 TOPSIS 法进行综合决策。根据综合目标和工艺要求, 选择 $a_p = 53.61 \mu\text{m}$, $v_s = 29.99 \text{ m/s}$, $v_w = 311.89 \text{ mm/min}$ 作为粗加工最优工艺参数组合, 选择 $a_p = 14.96 \mu\text{m}$, $v_s = 29.99 \text{ m/s}$, $v_w = 300.92 \text{ mm/min}$ 作为精加工的最优工艺参数组合, 并对优化结果进行试验验证。结果表明, 该优化模型可用于提高 NiCo-FGMs 表面粗糙度一致性以及磨削加工效率。

参考文献:

- [1] Tyagi S A, Manjaiah M. Laser additive manufacturing of titanium-based functionally graded materials: a review [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(8): 6131-6148.

