文章编号:1674-2974(2024)04-0043-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024169

基于 Taguchi-GA 协同的磁性磨料抛光性能预测及制备工艺参数寻优

王燎原[1],孙玉利[1†],张桂冠[2],吴鹏飞[1],易思广[1],孙业斌[1],左敦稳[1]
(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016;
2. 山东理工大学 先进制造研究院,山东 淄博 255049)

摘 要:通过改变黏结法磁性磨料的制备工艺参数来设计正交试验,制备不同系列规格的磁性磨料,并对其进行形貌和成分检测.以 3D 打印 AlSi10Mg 板为加工对象,通过平面磁力研磨试验,揭示磁性磨料制备工艺参数对磁力研磨质量的影响规律.基于回归分析,建立参数与响应之间的回归模型,通过遗传算法实现参数优化.结果表明,在 SiC 粒径为 18~25 μm,Fe 与 SiC 的质量比为 4.7,环氧树脂与聚酰胺的质量比为 2,固化温度为 100 ℃的条件下,材料去除率为 1.7 mg/min,表面粗糙度由原始的 3.90 μm 降低至 0.27 μm,降低率为 93.1%.

关键词:优化;遗传算法;磁性磨料;磁力研磨;抛光性能
中图分类号:TH16;TB333 **文献标志码**:A

Predicting Polishing Performance of Magnetic Abrasive and Optimizing Its Preparation Process Parameters Based on Taguchi-GA Synergy

WANG Liaoyuan[1], SUN Yuli[1†], ZHANG Guiguan[2], WU Pengfei[1], YI Siguang[1], SUN Yebin[1], ZUO Dunwen[1]
(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Institute for Advanced Manufacturing, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: In this study, an orthogonal experiment was designed by changing the preparation process parameters of bonded magnetic abrasives. Then, a series of magnetic abrasives with different specifications were prepared, and their morphology and composition were detected. Taking the 3D-printed AlSi10Mg plate as the processing object, the influence of the magnetic abrasive preparation process parameters on the polishing quality was revealed through the planar magnetic abrasive finishing experiment. A regression model between parameters and responses was established based on regression analysis, and the genetic algorithm optimized parameters. The results show that under the condition that SiC is 18~25 μm, the mass ratio of Fe to SiC is 4.7, the mass ratio of resin to

* **收稿日期**:2023-10-14
基金项目:南京航空航天大学博士研究生拔尖创新人才培养“引航计划”跨学科创新基金项目(KXKCXJJ202307),Interdisciplinary Innovation Fund for Doctoral Students of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (KXKCXJJ202307);南京航空航天大学研究生创新实验竞赛培育项目,Graduate Innovative Experiment Competition Cultivation Project Fund of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics;南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金项目(BCXJ22-08),Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Doctoral Dissertation Innovation and Excellence Fund (BCXJ22-08)
作者简介:王燎原(1992—),男,河南新乡人,南京航空航天大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail:sunyuli@nuaa.edu.cn

curing agent is 2, the curing temperature is 100 °C, the material removal rate is 1.7 mg/min, and the surface roughness is reduced from the original 3.90 μm to 0.27 μm with a reduction of 93.1%.

Key words: optimization; genetic algorithm; magnetic abrasive; magnetic abrasive finishing; polishing performance

磁力研磨是一种非传统的抛光技术,可通过变化的磁场力来驱动导磁性磨料,进而实现对工件的光整加工[1-2].作为加工工具,磁性磨料无疑是决定磁力研磨性能的关键[3].磁性磨料主要由铁基体、硬质磨料、结合剂或增稠剂组成.目前,磁性磨料的制备工艺主要有烧结法[4]、机械合金化法[5]、雾化快凝法[6]、黏结法[7]及简单混合法[8]等,其制备工艺参数对磁性磨料的品质起着决定性作用,也逐渐成为国内外学者研究的焦点.Chen等[9]对烧结法磁性磨料的表面形貌和成分进行了表征,研究了烧结时间及烧结温度对磁性磨料性能的影响,进而优化了磁性磨料的烧结工艺.Gao等[10]通过理论建模揭示了雾化快凝磁性磨料中铁磁体含量及磁性磨料粒径等参数对材料去除率的影响规律.Singh等[11]研究了退火温度对机械合金化磁性磨料的导磁及加工性能的影响,揭示了磁性磨料的微切削机理.Li等[12]通过理论结合实验的方法,探究了铁磁相与磨粒相的粒径比及质量比对磁性磨料抛光性能的影响,为黏结磁性磨料的制备提供了理论依据.Heng等[13]创新性地将碳纳米管和铁颗粒混合到金刚石研磨膏中,通过机械混合制得磁性磨料,有效解决了ZrO_2陶瓷材料的难抛光问题.

研究表明,黏结法相比于烧结法、机械合金化法及雾化快凝法,具有工艺简单、成本低、制备周期短等优点[14].同时,相比简单混合法磁性磨料,黏结法磁性磨料又展现出结合力强、加工效率高、服役寿命长等优点[15].因此,黏结法磁性磨料有望成为应用最广泛的加工工具.大多数公开文献直接以黏结法磁性磨料作为工具,对磁极转速、磁场强度、加工间隙等加工参数进行深入研究[16-17].然而,由于技术封锁和专利保护等原因,很少有公开文献对黏结法磁性磨料最关键的制备工艺参数进行详尽地剖析和优化,一定程度限制了磁力研磨技术的推广.

本文通过调节黏结法磁性磨料的4个关键参数,即磨粒相的粒径、Fe与SiC含量、黏结剂配比、固化温度,制备系列不同形貌和物理性能的磁性磨料.基于正交试验法,采用平面磁力研磨对3D打印AlSi10Mg板进行抛光.以材料去除量Δm和表面粗糙度降低率ΔR_a为指标,揭示了工艺参数与抛光性能之间的内在关系,建立其数学模型,并通过遗传算法(Genetic Algorithms,GA)进行参数优化.本文工作有望为黏结法磁性磨料的工艺优化提供有价值的研究思路.

1 磁性磨料的制备

黏结法磁性磨料的制备工艺流程如图1所示,具体步骤如下:

将环氧树脂和聚酰胺按一定比例混合作为胶黏剂,并加入40 mL丙酮进行稀释.向胶黏剂中加入质量分数为5%且表面用KH550改性过的纳米填料KH-Al_2O_3,以改善树脂固化物的力学性能[18].对黏结剂溶液超声分散5 min并磁力搅拌均匀.将黏结剂、Fe、SiC一同加入300 mL无水乙醇中,并搅拌均匀.然后,在水浴环境下对混合物持续搅拌以促使乙醇挥发,并获得黏稠状的混合物.利用模具将黏稠状混合物压制成坯,并将坯体在恒温箱中加热固化.之后,进行破碎、筛分以获得粒径为375~750 μm的磁性磨料.所用的粉体和胶黏剂的质量比为16∶3,Fe粒径为18~25 μm.

图2为本文所制备磁性磨料的形貌及成分表征.该磨料的制备参数为:SiC平均粒径为30 μm,Fe

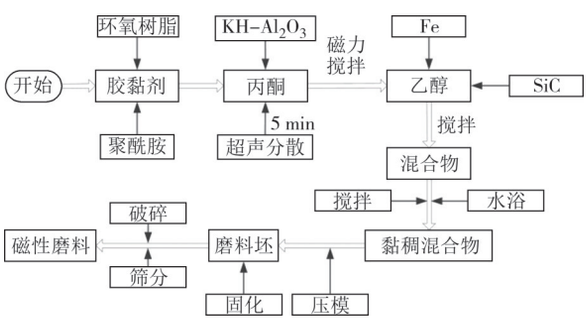
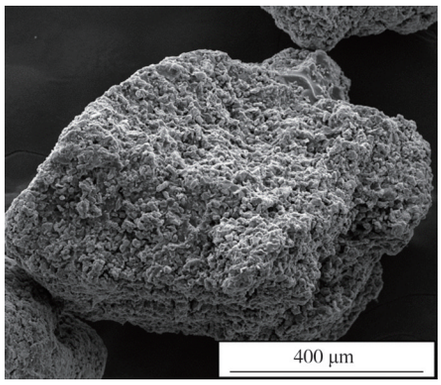
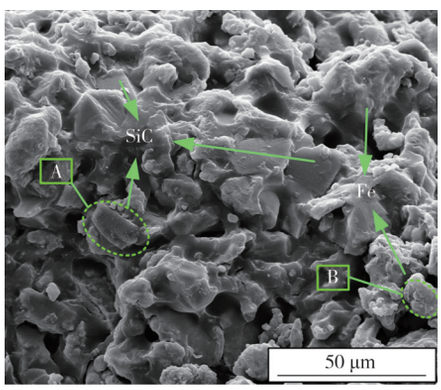


图1 黏结法磁性磨料的制备工艺流程

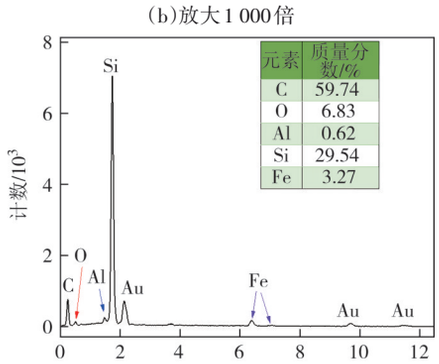
Fig.1 Process flow for the preparation of bonded magnetic abrasives



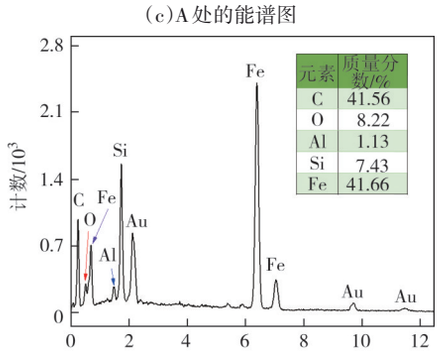
(a)放大140倍



(b)放大1 000倍



(c)A处的能谱图



(d)B处的能谱图

图2　磁性磨料的形貌及成分表征

Fig.2　Morphology and compositional characterization of the magnetic abrasive

与SiC的质量比为4∶1,环氧树脂和聚酰胺的质量比为5∶3,固化温度为90 ℃. 由图2可知,该磁性磨料整体上呈不规则状. Fe和SiC颗粒在基体中均匀分布. 对图2(b)中A和B两个区域进行EDS检测,结果分别如图2(c)和图2(d)所示. 分析可知,磁性磨料主要含C、O、Al、Si及Fe元素. 其中,C元素主要来自树脂及SiC,O元素主要来自树脂,Si元素主要来自SiC磨料,Al元素主要来自纳米Al_2O_3. A处Si谱峰最强且含量最高,B处Fe谱峰最强且含量最高,证实了两处分别为SiC和Fe.

2　试 验

2.1　加工原理

图3为磁力研磨试验原理图. 将7个轴向充磁、牌号为N30的圆柱形磁铁嵌入磁极头中,中心磁极为N极朝外,圆周均布的6个磁极为S极朝外. 磁性磨料沿着磁力线的方向排布以形成磁力刷并压覆于工件表面. 磁极高速旋转提供主加工运动,工件的往复运动实现横向进给.

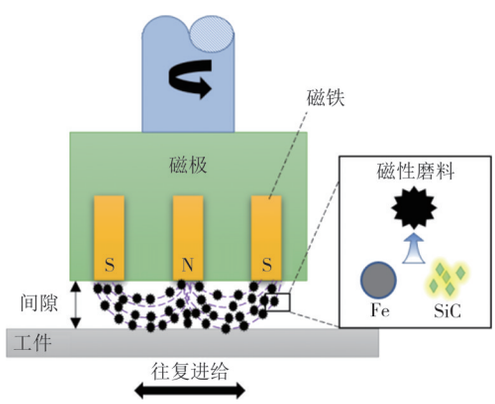


图3　磁力研磨试验原理图

Fig.3　Schematic diagram of magnetic abrasive finishing

2.2　方 法

工件是3D打印的AlSi10Mg薄板,尺寸为65 mm×45 mm×2 mm. 在试验前,其表面经过喷砂处理,表面粗糙度为4 μm. 每个工件抛光40 min,每间隔10 min更新一次磨料,以保证加工的一致性. 利用精密天平(Mettler Toledo, 精度0.000 1 g)测量工件加工前、后的质量,并计算差值Δm,用以表征材料去除效率;用针触式粗糙度测量仪(Mitutoyo)检测工件表面粗糙度R_a,在工件的加工区域均匀选取5个点记录表面粗糙度值并取其平均值作为该试件的R_a值. 用表面粗糙度降低率ΔR_a来表征抛光质量,其计算公式如下:

$$\Delta R_a = \frac{R_{a0} - R_{a1}}{R_{a0}} \tag{1}$$

式中：R_{a0}、R_{a1}分别为加工前、后的表面粗糙度.

用扫描电子显微镜(SEM, Quanta FEG 250)观察磁性磨料形貌;利用振动样品磁强计(VSM, Lake Shore 7404)检测磁性磨料的磁滞回线;利用激光共聚焦显微镜(UP-lambda,艾泰克仪器科技有限公司)观测工件表面的三维形貌.磁力研磨工艺参数如表1所示.

表1 磁力研磨工艺参数

Tab.1 Process parameters of magnetic abrasive finishing

参数	值
磁铁尺寸/(mm×mm)	ϕ8×15
磁极速度/(r·min^{-1})	1 500
加工间隙/mm	2
进给速度/(mm·s^{-1})	5
磁性磨料用量/g	3.5
润滑油用量/mL	2.5

2.3 磨料参数

本文主要研究磁性磨料的制备工艺参数和其抛光性能之间的对应关系.以SiC的粒径A：d_{mesh},单位为μm;B：Fe与SiC的质量比φ_{powder};C：环氧树脂和聚酰胺的质量比$\delta_{adhesive}$;D：固化温度T(单位为℃)为自变量.以材料去除量Δm和表面粗糙度降低率ΔR_a为研究指标,选用$L_{16}(4^5)$正交试验表开展试验.因素与水平如表2所示,正交试验结果如表3所示.在极差分析、方差分析、回归方程建模中,采用磨粒粒径范围的上限所对应的筛网目数作为相应的因素水平.

表2 因素与水平表

Tab.2 Factors and levels

水平	因素			
	A	B	C	D
1	7~12	4	2.50 (5∶2)	30
2	10~13	8	1.67 (5∶3)	60
3	25~30	2	1.25 (5∶4)	90
4	75~150	1	1.00 (5∶5)	120

3 结果与讨论

3.1 极差分析

利用Minitab软件对试验数据进行分析,其极差分析结果如表4所示.由表4可知,磁性磨料参数对Δm的影响程度的顺序为:D>A>B>C.当固化温度为90 ℃,SiC的粒径为25~30 μm,Fe与SiC的质量比为4∶1,环氧树脂和聚酰胺的质量比为5∶2时,Δm可达到最大值.

表3 正交试验结果

Tab.3 Orthogonal experimental results

标号	因素					Δm/mg	ΔR_a/%
	A	B	C	D	误差		
1	7~12	4	2.50	30	1	26.5	70.25
2	7~12	8	1.67	60	2	26.3	75.37
3	7~12	2	1.25	90	3	39.4	78.64
4	7~12	1	1.00	120	4	22.0	68.75
5	10~13	4	1.67	90	4	63.5	89.84
6	10~13	8	2.5	120	3	47.5	80.65
7	10~13	2	1.00	30	2	23.0	66.30
8	10~13	1	1.25	60	1	28.4	72.50
9	25~30	4	1.25	120	2	58.5	88.70
10	25~30	8	1.00	90	1	45.5	79.31
11	25~30	2	2.50	60	4	64.8	86.44
12	25~30	1	1.67	30	3	27.4	70.12
13	75~150	4	1.00	60	3	36.9	75.96
14	75~150	8	1.25	30	4	12.7	63.75
15	75~150	2	1.67	120	1	57.0	83.59
16	75~150	1	2.50	90	2	45.5	77.05

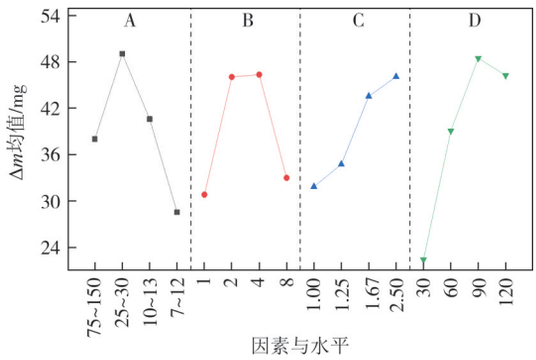
表4 极差分析结果

Tab.4 Results of range analysis

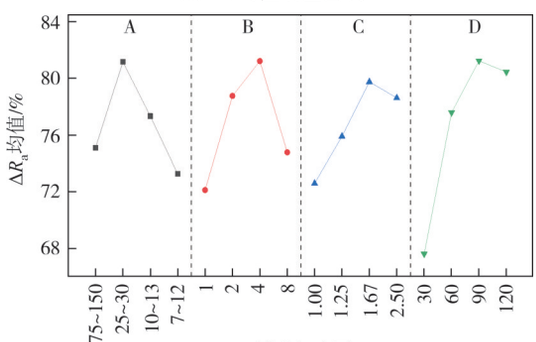
指标	水平	因素			
		A	B	C	D
Δm/mg	K_1	114.2	185.4	184.3	89.6
	K_2	162.4	132.0	174.2	156.4
	K_3	196.2	184.2	139.0	193.9
	K_4	152.1	123.3	127.4	185.0
	极差	82.0	62.1	56.9	104.3
	最优方案	$D_3A_3B_1C_1$			
ΔR_a/%	K_1	293.01	324.75	314.39	270.42
	K_2	309.28	299.08	318.92	310.27
	K_3	324.56	314.97	303.59	324.84
	K_4	300.36	288.42	290.32	321.69
	极差	31.55	36.33	28.60	54.42
	最优方案	$D_3B_1A_3C_2$			

磁性磨料参数对ΔR_a的影响程度的顺序为:D>B>A>C.当固化温度为90 ℃,Fe与SiC的质量比为4∶1,SiC的粒径为25~30 μm,环氧树脂和聚酰胺的质量比为5∶3时,ΔR_a可达到最大值.

图4为Δm和ΔR_a的均值响应曲线.由图4可知,随着SiC粒径的增加,Δm和ΔR_a先增加后减少,且极大值均在25~30 μm处取得.研究表明,磨料粒径越小,材料去除率越低[19].由于原始工件的R_a较高,在相同的时间,小粒径SiC不能有效地改善工件表面的微观不平度.但磨料粒径过大,将会使磁性磨料的微切削性能下降.图5为SiC粒径为75~150 μm的磁性



(a)Δm均值响应曲线



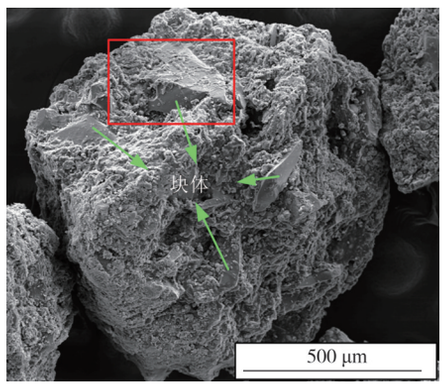
(b)ΔR_a均值响应曲线

图 4　Δm和ΔR_a的均值响应曲线

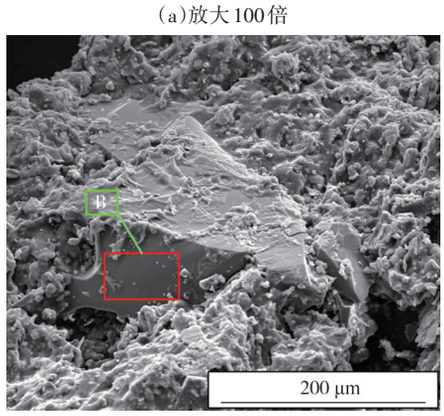
Fig.4　Mean response curves of Δm and ΔR_a

磨料形貌、成分及及其失效图解.图5(a)显示该磁性磨料表面嵌有数个较大的块状物.对图5(b)中方框所在区域B进行放大,并对B区域进行元素检测,结果如图5(c)所示.分析可知,该区域内C元素和Si元素含量极高,根据SiC的原子质量关系可确认块状物为SiC.由图5(d)可知,由于SiC的粒径较大,在相同的含量下,磁性磨料所能容纳的SiC颗粒数较少.在加工过程中,由于SiC频繁承受剪切力,而使得强度相对较低的基体优先发生微断裂.最终,含有SiC的大块碎片从磁性磨料上脱落,进而影响磁性磨料后续的切削性能.在研磨压力和切削速度一定时,仅通过增大磨料的粒径并不能有效提高材料去除率.包含了大量小粒径SiC的磁性磨料可使SiC在抛光中逐步脱落,既避免了切削性能的骤降,又保证了材料去除率.

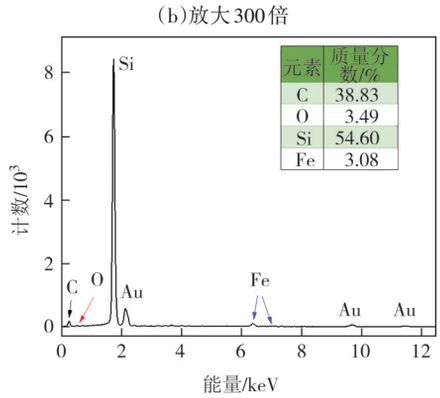
磁性磨料的导磁性能主要通过改变Fe与SiC的质量比φ_{powder}来进行调控.由图4可知,随着φ_{powder}的增加,Δm和ΔR_a都出现了先增加后下降的趋势.该现象可由图6所示的磁性磨料的磁滞回线来解释.随着Fe含量的增加,磁性磨料的磁化率和磁饱和强度增加.当φ_{powder}为1时,磁性磨料的导磁性最差.此时在磁极高速旋转下,大量的磁性磨料将挣脱磁场



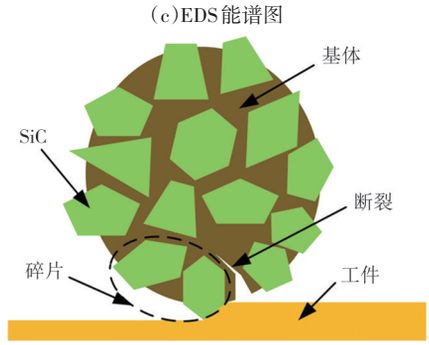
(a)放大100倍



(b)放大300倍



(c)EDS能谱图



(d)磁性磨料失效机理

图 5　SiC粒径为 75~150 μm的磁性磨料形貌、成分及其失效图解

Fig.5　Morphology, composition and failure analysis of magnetic abrasive containing the SiC with a diameter of 75~150 μm

力的约束而飞出加工区域,导致抛光质量下降.当φ_{powder}为8时,SiC含量较少,导致磁性磨料的切削性

能不足.分析可知,Fe含量越高,磁性磨料导磁性能越强,但磁性磨料导磁性能的增强是以牺牲其切削性能为代价而实现的.因此,存在折中的Fe含量,使两均值曲线出现极值点.

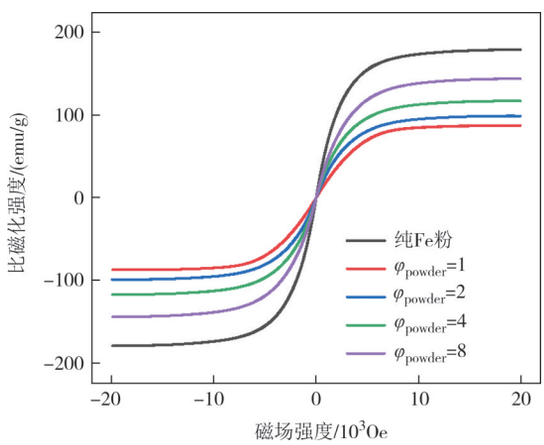


图6 磁性磨料的磁滞回线

Fig.6 Hysteresis loop of magnetic abrasives

由图4可知,随着$\delta_{adhesive}$的增大,Δm增加,但ΔR_a先增加后减少.该现象主要与树脂基体的力学性能密切相关.$\delta_{adhesive}$为1.00时磁性磨料的形貌图如图7所示.磁性磨料表面呈现出钝化和塑性变形的区域,而SiC的出露高度较小.Wang等[20]研究表明,聚酰胺兼具固化和增韧环氧树脂的作用.聚酰胺分子中含有较长的柔性亚甲基链结构,聚酰胺含量越高,环氧树脂固化物的冲击韧性越高,但刚性越低[21].在破碎大块磁性磨料的过程中,破碎叶片的高速冲击使得基体以塑性变形来抵消冲击能[18],致使SiC被包覆于基体中.同理,在抛光时SiC磨料也会向软的基体内部退让,致使磁性磨料的抛光能力减弱.

随着$\delta_{adhesive}$的增加,环氧树脂固化物刚性和硬度增加,但其宏观脆性也显著增大[22].当$\delta_{adhesive}$为2.50时,磁性磨料在频繁滑擦工件表面后,基体发生脆性微断裂,漏出新的切削刃,对材料去除有一定的促进作用,Δm仍然呈现增大趋势.但在加工到特定时间后,新的切削刃将会对已加工好的表面进行二次损伤,限制ΔR_a的进一步提升.$\delta_{adhesive}$为2.50时磁性磨料抛光后的工件表面形貌如图8所示,由图8可知,表面存在多条较深的划痕,整体表面质量下降,这也验证了上述分析结果.

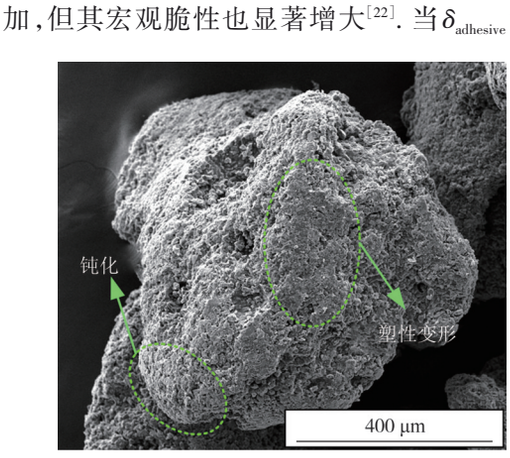


图7 $\delta_{adhesive}$为1.00时磁性磨料的形貌图

Fig.7 The morphology of magnetic abrasive when $\delta_{adhesive}$ of 1.00

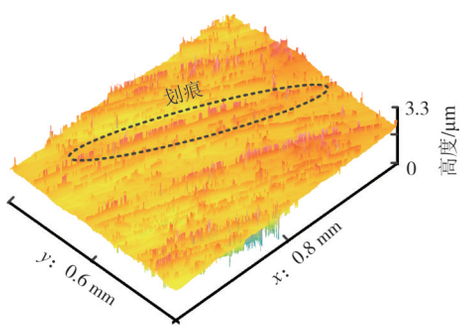


图8 $\delta_{adhesive}$为2.50时磁性磨料抛光后的工件表面形貌

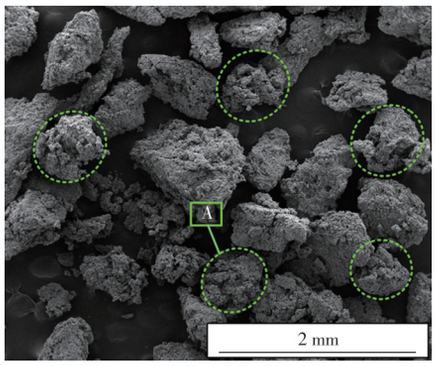
Fig.8 The surface morphology of workpiece after magnetic abrasive finishing with $\delta_{adhesive}$ of 2.50

固化温度T主要影响环氧树脂的固化反应过程.随着T的增加,环氧树脂的固化反应加快,其固化物的力学性能如硬度及刚性等可得到提高[23].当T为30 ℃时,Δm和ΔR_a均处于较低的水平,这是因为此条件下的树脂结合剂不能充分固化,导致磁性磨料的结合强度较低.当固化温度为30 ℃时,磁性磨料的形貌图如图9所示.由图9可知,大部分磁性磨料呈现松散状,表明黏结剂对各组分的把持力不足,不能满足高效、高质量抛光要求.

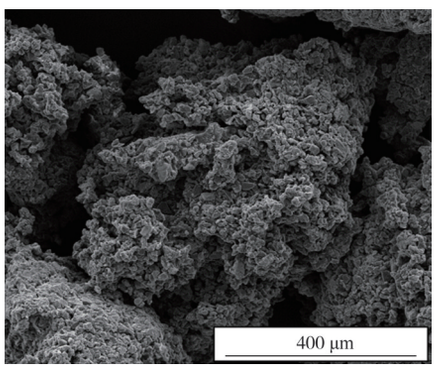
在一定范围内,随着T的增加,Δm和ΔR_a均增加.但当T提高到120 ℃时,树脂固化物发生变性,出现不同程度的软化和热变形的现象[24].当固化温度为120 ℃时,磁性磨料形貌如图10所示.由图10可知,磁性磨料在破碎时,部分区域被破碎叶片削平,呈现软塑状态,证实了该条件下基体发生了软化,磁性磨料的抛光性能也随之下降.

3.2 方差分析

为了进一步精确估计因素及误差的显著性,验证极差分析法的合理性,对响应数据进行方差分析,其结果如表5所示.分析可知,所选的四个因素对Δm和ΔR_a两个指标均有显著的影响,而误差的影响极小,证明了正交试验设计的合理性.根据F值的大



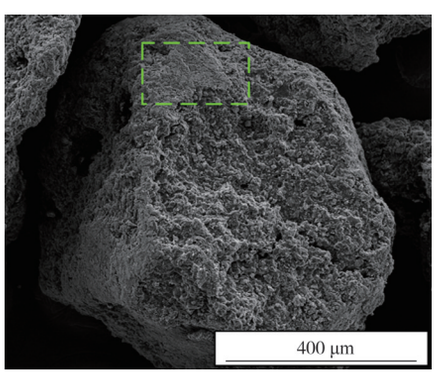
(a)放大30倍



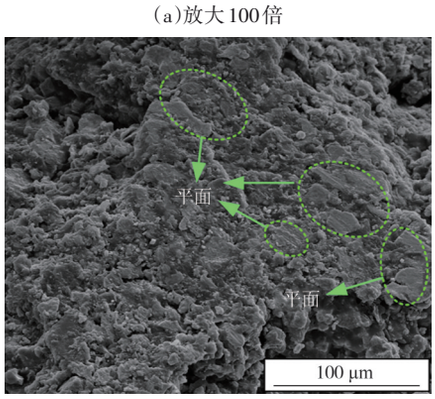
(b)A区域放大140倍

图9　当固化温度为30 ℃时,磁性磨料的形貌图

Fig.9　The morphology of magnetic abrasive at a curing temperature of 30 ℃



(a)放大100倍



(b)放大500倍

图10　当固化温度为120 ℃时,磁性磨料的形貌图

Fig.10　The morphology of magnetic abrasive at a curing temperature of 120 ℃

表5　方差分析结果

Tab.5　Analysis of variance results

指标	来源	自由度	调整离差平方和	调整均方	F值	显著性
Δm/mg	A	3	854.81	284.94	42.17	**
	B	3	826.17	275.39	40.75	**
	C	3	559.72	186.57	27.61	*
	D	3	1 671.58	557.19	82.46	**
	误差	3	20.27	6.76		
	总计	15	3 932.56			
ΔR_a/%	A	3	138.44	46.15	72.18	**
	B	3	196.59	65.53	102.50	**
	C	3	121.60	40.53	63.40	**
	D	3	470.68	156.89	245.40	**
	误差	3	1.92	0.64		
	总计	15	929.22			

注:*为显著;**为非常显著.

小,因素对Δm和ΔR_a的影响程度的顺序分别为:D>A>B>C,D>B>A>C,方差分析结果与极差分析结果相吻合.

3.3　回归方程

为了消除数据之间的量纲和取值范围差异的影响,提高回归模型的预测精度,对样本数据进行归一化处理.本文基于sk-learn框架,采用min-max归一化处理技术,将自变量的数据集成员映射到[0,1][25].其理论计算如下[26]:

$$x_{new}=\frac{x_{origin}-x_{min}}{x_{max}-x_{min}} \tag{2}$$

式中:x_{new}、x_{origin}、x_{min}、x_{max}分别为归一化的数据、原始数据、原始数据中的最小值和最大值.

利用Minitab软件对归一化的正交试验数据进行回归分析,分别建立关于Δm和ΔR_a的多元回归方程,结果如式(3)和式(4)所示.两方程的校正R平方分别为0.92和0.96,预示着回归模型对数据集具有良好的拟合效果.

$$\Delta m=11.04+38.3a+62.7b+14.41c+66.9d-49.8a^2-63.6b^2-42.6d^2 \tag{3}$$

$$\Delta R_a=58.82+18.93a+35.36b+23.99c+36.82d-21.95a^2-33.63b^2-17.9c^2-24.19d^2 \tag{4}$$

式中:a、b、c、d分别为归一化的自变量数据.

3.4　遗传算法寻优

遗传算法(GA)是受到遗传机制和自然选择的启发而衍生出的一种元启发式随机全局寻优算法.GA将被优化的参数进行编码,组成一条染色体,其

中每一个参数代表一个基因,每一个解对应一条染色体.类比生物进化论的思想,以适应度函数作为评价优劣的标准,经过选择、交叉、变异后,淘汰劣势个体,保留适应能力强的遗传信息,并遗传给下一代.在多代寻优后即可挑选出最优的个体,即问题的最优解[27-28].如图11所示,本文GA的运行流程主要包括种群初始化、适应度值计算、基因操作(选择、交叉和变异)、迭代终止判断等模块,并通过Python中的PyGAD框架实现编程和迭代计算,具体操作如下:

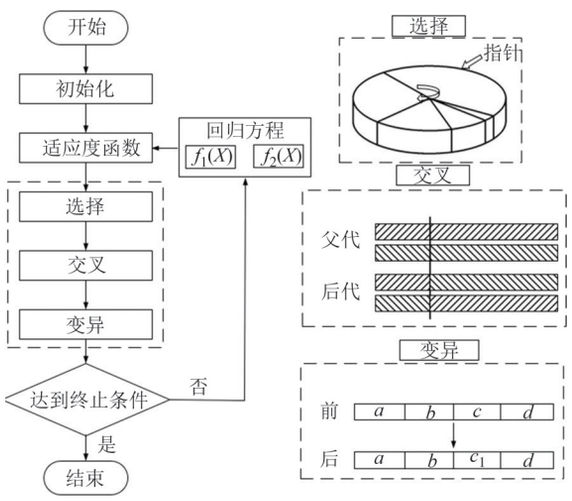


图11 GA算法流程图

Fig.11 GA flowchart

1)初始化.综合考虑问题的复杂程度、算法收敛速度、种群多样性,随机生成10条染色体,即初始生成10组解.每条染色体包含4段基因,分别对应4个待优化的参数.基因值分别在归一化的搜索空间[0,1]内随机取得.

2)适应度.适应度值是用来衡量解的优异性的重要指标,通常由特定的适应度函数$F(X)$求得.本文的适应度函数是来源于正交试验中的多元回归方程,表达式如式(5)所示.

$$F(X)=\alpha f_1(X)+\beta f_2(X) \tag{5}$$

式中:f_1和f_2分别代表关于Δm和ΔR_a的多元回归方程;X为某一自变量组合;α和β分别代表权重系数.当α=1且β=0时,$F(X)$可代表关于Δm的适应度函数;反之$F(X)$为关于ΔR_a的适应度函数.

3)选择.基于优胜劣汰的生存法则,将适应度较高的个体挑出来进行交配,以产生后代.本文基于轮盘赌选择法(Roulette Wheel Selection, RWS)原理进行选择操作.在RWS中,将圆轮划分为n份,代表种群中的n个个体.其中,每一份所占的面积正比于个体的适应度值.在轮子的圆周方向固定一个指针,当圆轮停止旋转后,被选中的个体可将遗传信息遗传至后代[29].因此,适应度大的个体被选中的概率大.在每一代的种群中,将有2个个体被选中.

4)交叉.交叉操作类似于遗传学中的基因重组技术,是GA生成后代个体的关键.本文将采用常见的单点交叉(Single Point Crossover,SPC)技术.在一对父母的染色体上随机选取一个截断点,截断点之后的基因序列将发生互换,以此来产生新的后代,发生基因互换的概率设为0.8[30].

5)变异.变异操作类似于遗传学中的基因突变,可以保证后代基因的多样性,通常以小概率发生.本文采用随机重置(Random Resetting, RR)方法,可从变量的搜索空间中随机选择一个后补的基因值替换掉对应位置的基因值,变异发生的概率设为0.01[31].

6)终止循环.当迭代次数超过500个周期即可终止循环.

3.5 优化结果

图12为适应度与迭代次数的关系曲线.由图12可知,随着迭代次数的增加,适应度曲线增加到某数值后趋于稳定,预示着在500个周期内GA可达到收敛.

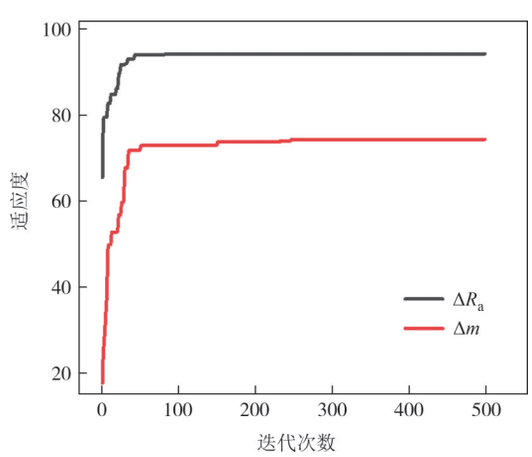


图12 适应度与迭代次数的关系曲线

Fig.12 Curves of the relationship between fitness and iteration count

表6为实验和GA寻优的结果对比,其中,因素A用筛网的目数表示.方案1和方案3数据分别为关于Δm及ΔR_a的正交试验优选方案.在此条件下,实验值和预测值之间的误差分别为3.8%和1.3%,证明了回归模型具有良好的预测功能.本文中SiC粒径的

第3水平位于25~30 μm之间,GA优化的值在此区间之外.综合考虑国标粒径、筛分难度和工程精度要求,均选用粒径为18~25 μm的SiC作为两响应的最优参数.同理,将其余参数也进行圆整化,结果如表6中圆整-GA行所示.针对Δm和ΔR_a,圆整-GA寻优误差分别为1.8%和2.7%,表明GA算法具有良好的寻优效果.

表6　实验和GA寻优的结果对比

Tab.6　Comparison between experimental results and optimization results of GA

优化指标	方案	方法	因素				实验值	预测值	误差/%
			A	B	C	D			
Δm/mg	1	Taguchi	500	4	2.5	90	70.5	73.18	3.8
	2	GA	638.16	4.49	2.48	100.87			
		圆整-GA	600~800	4.5	2.5	100	73.2	74.53	1.8
ΔR_a/%	3	Taguchi	500	4	1.67	90	91.2	92.35	1.3
	4	GA	708.31	4.68	2.01	99.24			
		圆整-GA	600~800	4.7	2	100	93.1	94.24	2.7

根据工程实践,在粗加工时往往通过加大材料去除率来实现表面平整度的快速提升.但在精加工阶段,则需要通过材料的微去除来进一步修饰和提升表面质量.因此,在本试验中可认为ΔR_a相较Δm具有更高的重要性和优先性.优选方案对比图如图13所示,由图13可知,方案4最终可实现93.1%的表面粗糙度降低率,同时也能保证一定的材料去除率.因此,最优方案为:SiC粒径为18~25 μm,Fe与SiC的质量比为4.7,环氧树脂与聚酰胺的质量比为2,固化温度为100 ℃,材料去除率为1.7 mg/min.

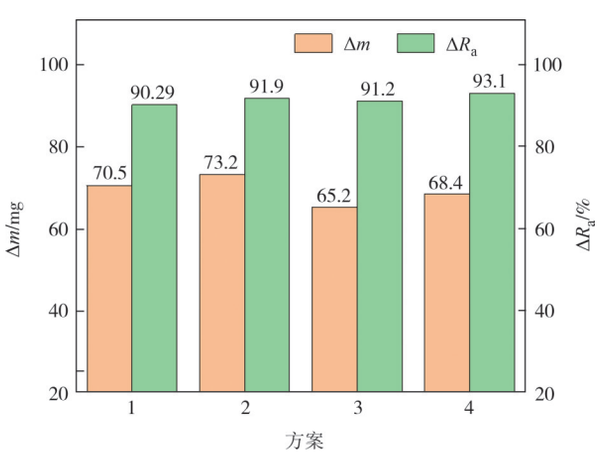
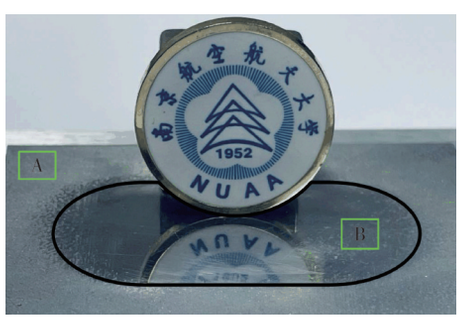


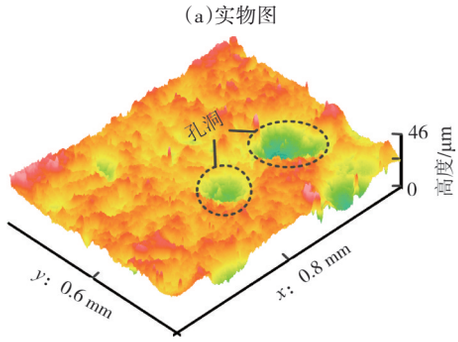
图13　优选方案对比图

Fig.13　Comparison of different optimal solutions

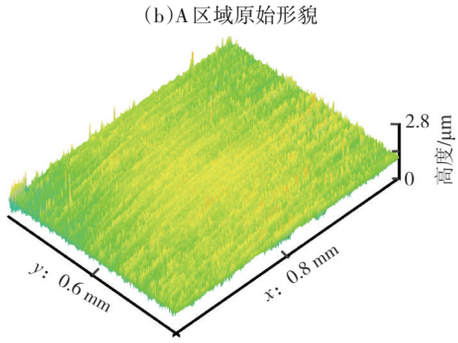
图14为最优方案的抛光效果图.未抛光的原始区域A比较粗糙且存在明显的凹坑,而抛光后的B区域出现了清晰的校徽倒影,原始工件的表面三维形貌得到了有效的提高.经过抛光后,表面粗糙度由原始的3.90 μm降低到0.27 μm,验证了该磁性磨料具有优异的抛光性能.



(a)实物图



(b)A区域原始形貌



(c)B区域抛光后形貌

图14　最优方案的抛光效果图

Fig.14　The polished effect image using the best solution

4 结 论

本文基于Taguchi-GA法对黏结法磁性磨料的制备工艺进行探究并实现了参数优化,所获得的结果如下:

1)基于正交试验建立了 Δm 和 ΔR_a 关于SiC粒径、Fe与SiC质量比、环氧树脂与聚酰胺质量比及固化温度的函数表达式,进而采用遗传算法实现参数优化,最终通过实验验证了模型的合理性.

2)SiC粒径显著影响磁性磨料的微切削性能.随着SiC目数的增加,Δm 和 ΔR_a 先增加后下降;Fe的含量主要影响磁性磨料的导磁性能.随着Fe与SiC的质量比的增加,Δm 和 ΔR_a 先增加后下降.

3)在一定范围内增加环氧树脂与聚酰胺质量比可提高磁性磨料基体的硬度和刚度,进而提高磁性磨料的抛光性能;在基体的耐热温度范围内,提高固化温度可显著提高磁性磨料的抛光性能.

4)在SiC粒径为18~25 μm,Fe与SiC的质量比为4.7,环氧树脂与聚酰胺的质量比为2,固化温度为100 ℃的条件下,材料去除率为1.7 mg/min,表面粗糙度由原始的3.90 μm降低至0.27 μm,降低率为93.1%.

5)本研究成果可为黏结法磁性磨料的优化提供技术参考,有望推动磁性磨料的广泛工程应用.

参考文献

[1] WU J Z, ZOU Y H, SUGIYAMA H. Study on finishing characteristics of magnetic abrasive finishing process using low-frequency alternating magnetic field [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1): 585-594.

[2] GUO J, LIU K, WANG Z F, et al. Magnetic field-assisted finishing of a mold insert with curved microstructures for injection molding of microfluidic chips[J]. Tribology International, 2017, 114: 306-314.

[3] WANG L Y, SUN Y L, CHEN F Y, et al. Experimental study on vibration-assisted magnetic abrasive finishing for internal blind cavity by bias external rotating magnetic pole [J]. Precision Engineering, 2022, 74: 69-79.

[4] AHMAD S, GANGWAR S, YADAV P C, et al. Optimization of process parameters affecting surface roughness in magnetic abrasive finishing process [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2017, 32(15): 1723-1729.

[5] SINGH P, SINGH L, SINGH S. Manufacturing and performance analysis of mechanically alloyed magnetic abrasives for magneto abrasive flow finishing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 161-169.

[6] GAO Y W, ZHAO Y G, ZHANG G X, et al. Characteristics of a novel atomized spherical magnetic abrasive powder [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(1): 283-290.

[7] AHN B W, LEE S H. Run-to-run process control of magnetic abrasive finishing using bonded abrasive particles [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226(12): 1963-1975.

[8] KWAK J S. Enhanced magnetic abrasive polishing of non-ferrous metals utilizing a permanent magnet [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(7/8): 613-618.

[9] CHEN Y, ZHANG M M, LIU Z Q. Study on sintering process of magnetic abrasive particles [J]. Advanced Materials Research, 2011, 337: 163-167.

[10] GAO Y W, ZHAO Y G, ZHANG G X, et al. Modeling of material removal in magnetic abrasive finishing process with spherical magnetic abrasive powder [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 177: 105601.

[11] SINGH A, SINGH P, SINGH S, et al. Effect of annealing temperature on the magnetic properties and finishing efficiency of mechanically alloyed magnetic abrasives [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 556: 169455.

[12] LI W H, LI X H, YANG S Q, et al. A newly developed media for magnetic abrasive finishing process: material removal behavior and finishing performance [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 260: 20-29.

[13] HENG L D, KIM J S, TU J F, et al. Fabrication of precision meso-scale diameter ZrO_2 ceramic bars using new magnetic pole designs in ultra-precision magnetic abrasive finishing [J]. Ceramics International, 2020, 46(11): 17335-17346.

[14] 赵文渊, 李文辉, 白小云, 等. 采用粘结法的磁性磨粒制备工艺及实验研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(5): 535-541.
ZHAO W Y, LI W H, BAI X Y, et al. Preparation technology and experimental study of magnetic abrasive particles by bonding method [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(5): 535-541. (in Chinese)

[15] KALA P, SHARMA V, PANDEY P M. Surface roughness modelling for double disk magnetic abrasive finishing process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 25: 37-48.

[16] GUO C, ZHANG D L, LI X H, et al. A permanent magnet tool in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing for 30CrMnSi grooves part[J]. Precision Engineering, 2022, 75: 180-192.

[17] WANG L Y, SUN Y L, CHEN F Y, et al. Modeling and simulation of the action mechanism of multi-particles in magnetic abrasive finishing for internal blind cavity using the discrete element method [J]. The International Journal of Advanced

Manufacturing Technology,2023,125(3):1179-1192.

[18] MI X Q,LIANG N,XU H F,et al. Toughness and its mechanisms in epoxy resins[J]. Progress in Materials Science,2022,130:100977.

[19] JIANG L Z,ZHANG G X,DU J J,et al. Processing performance of Al_2O_3/Fe-based composite spherical magnetic abrasive particles[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2021,528:167811.

[20] WANG L Y,SUN Y L,CHEN F Y,et al. Investigating the mechanical properties of epoxy resin composites modified by polyamide and nano-Al_2O_3[J]. Journal of Applied Polymer Science,2023,140(11):e53624.

[21] YANG J P,CHEN Z K,YANG G,et al. Simultaneous improvements in the cryogenic tensile strength,ductility and impact strength of epoxy resins by a hyperbranched polymer[J]. Polymer,2008,49(13/14):3168-3175.

[22] LI J J,ZHU W J,ZHANG S F,et al. Amine-terminated hyperbranched polyamide covalent functionalized graphene oxide-reinforced epoxy nanocomposites with enhanced toughness and mechanical properties[J]. Polymer Testing,2019,76:232-244.

[23] CZADERSKI C,MARTINELLI E,MICHELS J,et al. Effect of curing conditions on strength development in an epoxy resin for structural strengthening[J]. Composites Part B:Engineering,2012,43(2):398-410.

[24] MORTAIGNE B,REGNIER N. Study of epoxy and epoxy-cyanate networks thermal degradation to predict materials lifetime in use conditions[J]. Journal of Applied Polymer Science,2000,77(14):3142-3153.

[25] XIAO Z W,GANG W J,YUAN J Q,et al. Impacts of data preprocessing and selection on energy consumption prediction model of HVAC systems based on deep learning[J]. Energy and Buildings,2022,258:111832.

[26] LI W J,LIU Z Y. A method of SVM with normalization in intrusion detection[J]. Procedia Environmental Sciences,2011,11:256-262.

[27] ACAMPORA G,CHIATTO A,VITIELLO A. Genetic algorithms as classical optimizer for the quantum approximate optimization algorithm[J]. Applied Soft Computing,2023,142:110296.

[28] GOSSELIN L,TYE-GINGRAS M,MATHIEU-POTVIN F. Review of utilization of genetic algorithms in heat transfer problems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2009,52(9/10):2169-2188.

[29] TRAN H N,PHAN G T T,DO Q B,et al. Comparative evaluation of the performance of improved genetic algorithms and differential evolution for in-core fuel management of a research reactor[J]. Nuclear Engineering and Design,2022,398:111953.

[30] MCCALL J. Genetic algorithms for modelling and optimisation[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics,2005,184(1):205-222.

[31] KATOCH S,CHAUHAN S S,KUMAR V. A review on genetic algorithm:past,present,and future[J]. Multimedia Tools and Applications,2021,80(5):8091-8126.