

基于 FEM 和 DOE 分析的超声切刀结构设计与振动特性研究

李永亮¹, 杜彦斌¹, 梁强¹, 杨承志²

1. 重庆工商大学 智能装备绿色设计与制造重庆市重点实验室, 重庆 400067

2. 重庆凌焕机电设备有限公司, 重庆 401320

摘要:目的 针对工程实践中超声切刀尺寸难以解析计算且有特定结构尺寸要求的超声切刀难以设计等问题, 建立了装夹式组合超声切刀结构优化及振动特性的高效设计、分析方法。方法 依托某工程实践超声切刀设计要求, 以结构尺寸参数化的阶梯形变幅杆和固定渐变刀刃体装夹设计成组合式超声切刀, 通过对变幅杆单一结构尺寸因素对组合超声切刀有限元模态固有纵振频率、输出变形大小等振动特性的影响分析, 合理选取结构尺寸取值范围, 构建了四因素两水平的全因子仿真实验, 进行了多结构因素交互影响分析, 建立了显著因素的谐振频率回归方程, 并基于此以简谐共振频率为目标, 优化设计了 28 kHz 装夹式超声切刀。结果 通过有限元模态分析、谐响应分析验证了优化设计的超声切刀在固有纵振、谐振频率与目标设计的一致性, 且仿真输出振幅满足超声切割振幅要求, 仿真最大等效应力远小于材料的安全许用屈服强度; 通过数控加工、阻抗测试验证了实验测试频率与设计、仿真频率的一致性, 且阻抗值满足设计要求; 将超声切刀安装至切割系统中进行加工实验, 通过与普通刀具、激光等工艺加工手段进行对比, 设计切刀输出频率与振幅稳定, 切割质量好, 效率高。结论 研究表明: 采用的超声切刀结构设计、仿真、分析等方法对有特定尺寸要求的复杂切刀设计、优化及工程应用具有很好的指导意义。

关键词: 超声切刀; FEM 分析; 析因交互影响分析; 振动特性

中图分类号: TB559 **文献标识码:** A **doi:** 10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0004.003

Structural Design and Vibration Characteristics of Ultrasonic Cutter Based on FEM and DOE Analysis

LI Yongliang¹, DU Yanbin¹, LIANG Qiang¹, YANG Chengzhi²

1. Chongqing Key Laboratory of Green Design and Manufacturing of Intelligent Equipment, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

2. Chongqing Linghuan Electromechanical Equipment Co., Ltd., Chongqing 401320, China

Abstract: Objective In view of the problems that the ultrasonic cutter size is difficult to be calculated analytically and the ultrasonic cutter with specific structural size requirements is difficult to be designed in engineering practice, an efficient design and analysis method for the structural optimization and vibration characteristics of the clamped combination ultrasonic cutters was established. **Methods** The method was based on the design requirements of an engineering practice ultrasonic cutter, and a combination ultrasonic cutter was designed with a stepped variable amplitude horn and a fixed gradient blade body clamped by the structural dimension parameterization. The study analyzed the influence of the single structural size factor of the ultrasonic horn on the vibration characteristics of the finite element modal inherent longitudinal vibration frequency and output deformation size of the combined ultrasonic cutter, reasonably selected the range of structural size values, constructed a four-factor, two-level full-factor simulation experiment, conducted a multi-structural factor interaction analysis, and established a resonant frequency regression equation with significant factors. Based on

收稿日期: 2023-02-08 **修回日期:** 2023-03-10 **文章编号:** 1672-058X(2024)04-0017-09

基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTC2020JCYJ-MSXMX0276); 重庆市教委科学技术项目(KJQN201900827).

作者简介: 李永亮(1982—), 男, 山东威海人, 工程师, 从事先进制造技术研究.

引用格式: 李永亮, 杜彦斌, 梁强, 等. 基于 FEM 和 DOE 分析的超声切刀结构设计与振动特性研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2024, 41(4): 17—25.

LI Yongliang, DU Yanbin, LIANG Qiang, et al. Structural design and vibration characteristics of ultrasonic cutter based on FEM and DOE analysis[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(4): 17—25.

this, with the simple harmonic resonant frequency as the target, the 28 kHz clamped ultrasonic cutter was designed and optimized. **Results** Through finite element modal analysis and harmonic response analysis, the consistency of the optimized ultrasonic cutter in the inherent longitudinal vibration and resonant frequency with the target design was verified. The simulation output amplitude met the ultrasonic cutting amplitude requirements, and the simulation maximum equivalent force was much smaller than the safe allowable yield strength of the material. The consistency of the experimental test frequency with the design and simulation frequency was verified through CNC machining and impedance testing, and the impedance value met the design requirements. The ultrasonic cutter was installed into the cutting system for processing experiments, and through comparison with ordinary tools, laser, and other processing methods, the designed cutter had stable output frequency and amplitude, good cutting quality, and high efficiency. **Conclusion** The results show that the proposed ultrasonic cutter design, simulation, analysis, and other methods have good guidance for the design, optimization, and engineering application of complex cutters with specific dimensional requirements.

Keywords: ultrasonic cutter; FEM Analysis; analysis of causal interaction effects; vibration characteristics

1 引言

超声切割技术已广泛应用于汽车塑料内饰及包覆皮革、航空制造用的复合蜂窝材料、注塑制品飞边、食品以及光学玻璃、陶瓷等脆硬材料的加工领域^[1-3],具有切割阻力小、不易崩边,质量好、刀具寿命长等优点^[4-5]。

超声切割系统主要包括了频率发生器、换能器、超声切刀三部分,其工作原理是利用换能器将电能转化成的切刀的高频机械动能作用到被切物质,使其局部发生快速热熔、软化,甚至疲劳断裂,从而实现切割的目的^[6]。超声切刀结构上有整体式刀具,有装夹式刀具等^[7]。张云电等^[8]研究了用于食品加工的宽刃超声切割刀头的纵向振动特性;周胜利等^[9]基于兰杰文阵子的结构原理,设计了指数型截面的一体式矩形超声切刀;尤晓镇等^[10]对装有特种切刀片的超声切刀进行了有限元分析及实验测试;王根^[11]针对吸波蜂窝材料的切割进行了超声圆盘刀的设计、切割机理研究、振动切削性能有限元及实验分析等。研究内容主要围绕着谐振频率、切刀振幅、切割力负载等超声切刀振动特性的分析。黄秀秀等^[12]基于断裂力学理论,引入了动态应力强度因子,构建了直刃超声切刀的切割机理、仿真、实验一体化的研究;纪华伟等^[13]应用四端网络法分析了超声切割系统的力负载对谐振频率、阻抗的影响;董昕嶝^[14]针对超声切刀结构响应的近似模型进行了改进粒子群算法寻优方式,并基于向量回归法进行了切刀的结构优化设计。SR Kim 等^[15]通过有限元仿真、正交实验设计等方法,对超声变幅器开槽结构尺寸与其谐振频率、振幅均匀性的影响进行了研究和实验验证,获得了较好的实验结果。

上述的研究为超声切刀的设计与研究提供了参考,然而设计上缺乏成熟、高效的模式,研究内容主要针对单一变幅切刀,复合刀体研究较少,且因为切刀体曲面数字化复杂,一体化刀具解析计算困难,设计难以

移植,基于此提出了应用单一变幅杆和固定刀头组合的方式进行联合设计、仿真,可以为复合超声切刀的高效设计提供设计依据。此外,在结构尺寸设计中,由于汽车内饰零部包覆材料切割加工中往往对切刀的结构“避空”尺寸或刀刃尺寸有特定要求,而目前文献中鲜有见到对有特定结构尺寸要求的超声切刀的设计与研究,基于组合式超声切刀结构设计、有限元和析因联合分析的方法可以为工程中有特定结构尺寸的超声切刀设计、分析、参数望目寻优提供理论和设计依据。

2 超声切刀结构及主尺寸初定

2.1 设计基础及切刀结构选型

设计内容来源于某汽车 A/B 装饰柱包覆塑料材料的切割,设计需求是应用超声切割技术完成包覆余料的切割,同时将切口封闭,结合零件尺寸大小,为便于工业机器人夹持刀具加工,要求切刀刀刃长度在 50 mm 左右。零件图如图 1 所示。

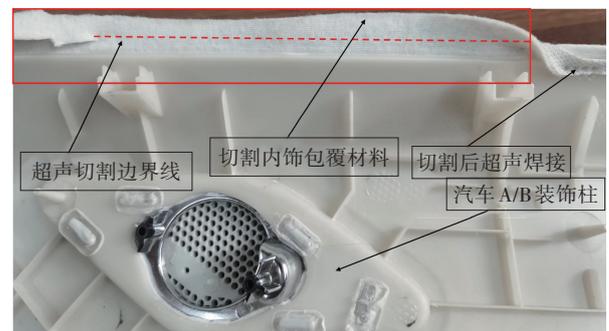


图 1 汽车 A/B 装饰柱零件及切割加工图

Fig. 1 Diagram of automobile A/B trim pillar parts and cutting requirements

工程中常见超声切刀结构如图 2 所示。1[#]超声切刀为整体式,2[#]、3[#]为装夹式超声切刀。1[#]超声切刀设计简单,振动特性稳定,但磨损后需重新更换切刀,经济性不好;2[#]超声采用成品钨钢刀片,耐磨损,经济性好,但刀片装配处易发热,不易长时间使用,且振动频

率不稳,刀尖易断;3# 刀具为螺纹直连装夹式超声切刀,刀刀部分可根据工况进行设计,一体设计,频率稳定,螺纹紧固连接,刚性较好,发热小,经济性好。



图 2 工程中不同形式的超声切刀

Fig. 2 Different forms of ultrasonic cutters in engineering

综合上述几种超声切刀的特点,同时考虑切割材料为塑料包覆件,切割接触应力不大且切割过程主要依靠刀刃及长刃口的高频纵振,超声切刀的频率范围在设计上选择 28~30 kHz,结构上采用螺纹直连装夹式超声切刀。刀体设计上采用工程中易于计算的阶梯形变幅杆,用于切刀的振幅放大,切刀由阶梯形变幅杆与切刀体通过螺纹紧固装配而成,主要结构如图 3 所示。

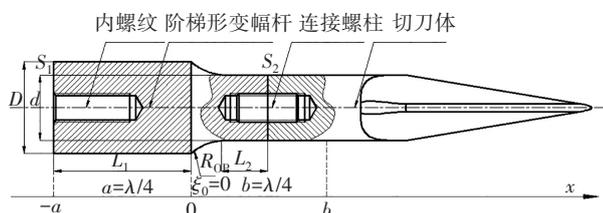


图 3 螺纹直连装夹式超声切刀结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the threaded direct-connected clamping ultrasonic cutter

鉴于刀具需要有较高的强度、硬度及耐磨性的工程要求,切刀的材料可选择淬火 45 钢、不锈钢、钛合金等,考虑工艺及加工特性,选用钛合金 Ti-6Al-4V 作为超声切刀的材料,材料主要属性参数如表 1 所示。

表 1 钛合金材料性能参数表

Table 1 Performance parameters of titanium alloy material

材 料	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E / (\text{Gpa})$	泊松比
Ti-6Al-4V	4.42×10^3	104.8	0.31

2.2 阶梯形变幅杆设计

阶梯形变幅杆是超声切刀形成纵振且实现振幅放大的基体,是由截面积不同的两段圆柱均匀杆组成^[16],理想状态下,在忽略横波的影响下,纵向声波在细杆类的声速公式为式(1):

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

其中, E 为杨氏模量, ρ 为棒材的密度。

由材料参数可计算出超声波在该材料内的纵波声速为 4 864.5 m/s。根据传播声速,选择目标谐振频率 28 kHz,结合波长计算式(2):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

其中, c 为纵波传输速率, f 为谐振频率。可计算出纵波在该材料内传输的波长为 173.73 mm,而变幅杆长度上通常取半波长的整数倍,因此变幅杆长度可取值半波长 86.87 mm。在超声加工中,谐振频率最重要,其次是放大系数。为便于计算,避免大的截面跃变,大端直径结合超声换能器末端直径尺寸选取 25 mm,小端直径便于放样建模,设计小端直径尺寸为 16 mm,此外可设计振动节点面在 $\lambda/4$ 处,即大小端长度尺寸 $a=b=43.43$ mm,此时阶梯形变幅杆有最大放大系数 M_p 计算如式(3):

$$M_p = \frac{\xi_2}{\xi_1} = \frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{\sin ka}{\sin kb} = N^2 = 2.44 \quad (3)$$

ξ_1 为输入端质点振动位移, ξ_2 为输出振动端质点振动位移, S_1 为大端截面面积, S_2 为小端截面面积, $k = \omega/c$ 为圆波数, ω 为圆频率, N 为面积系数。

工程中为避免阶梯形变幅杆应力集中,通常在截面跃变处设置过渡圆弧,且存在一个最优过渡圆弧使得设计频率与计算频率一致,为此参考相关文献^[21],通过查表得到近似圆弧尺寸 $R_{op} = 8$ mm。初定阶梯形变幅杆主要参数如表 2 所示。

表 2 阶梯形变幅杆体初定参数表

Table 2 Preliminary parameters of step-shaped variable-amplitude cutter

频率	大端直径	小端直径	谐振长度
f/kHz	D/mm	d/mm	$(\lambda/2)L/\text{mm}$
28	25	16	86.87
大端 (a)	小端 (b)	过渡圆弧 (R_{op})	放大系数 (N^2)
43.43	43.43	8	2.44

2.3 超声切刀体设计

超声切割汽车 A/B 柱包覆塑料材料加工中,切割过程不仅要利用刀具的高频纵振,还需要刀具有较长的切割刃,便于随机械手或人工实现大尺寸零件的切割加工,切刀体承载着传递声波机械能的重要作用,因此切刀体的刚性好,耐磨,且抗弯曲强度大是切割切刀体设计的关注点。对比现有的刀体几种结构形式,为提高切刀体结构刚性,同时使机械振动声波均匀聚能传输,刀刃设计上采用尺寸渐变的切刀体,提升整体切刀刚性,设计刀刃长度在 50 mm 左右。为便于与 $\phi 16$ mm 的阶梯变幅杆体相连,避免连接处的能量突变与应力集中,三维建模上采用圆弧拉伸切除的方式实

现结构连接。在切刀体与阶梯形变幅杆的连接上,采用螺纹的紧固连接方式。

综上,超声切刀由阶梯形变幅杆与切刀体装夹组合而成,设计并进行三维建模,模型如图 4 所示。

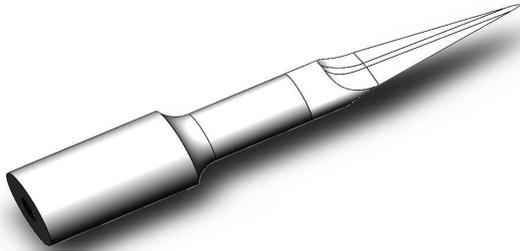


图 4 装夹式超声切刀结构图

Fig. 4 Structural diagram of clamped ultrasonic cutter

3 有限元分析

3.1 模态分析

超声加工是一种高频振动系统,超声切割要求系统发生纵向简谐振动。有限元模态可以描述任何结构的动力学特性,一般包括频率、振型、阻尼 3 个因素。超声切割系统就是要研究在超声换能器的定频、纵向激励下,在超声切刀的固有纵向振动特性下,使超声切刀系统产生谐振响应,并以一定量的放大振幅输出,进行切割加工。因此,研究超声切割刀的固有模态动力学特性意义重大。

应用 Ansys Workbench 的 Modal 模块分别做阶梯形变幅杆和整个超声切刀的模态分析。通过导入 X_T 三维模型文件,去除倒角、螺纹孔等分析影响因素,设置材料属性,划分四面体网格,定义网格大小为 5 mm,同时在 Analysis Settings 中设置提取的模态阶数为 15 阶,设计提取的频率变化范围为 20~30 kHz,进行求解,可以发现在目标频率范围内只有三阶固有频率,其特性如表 3 所示。

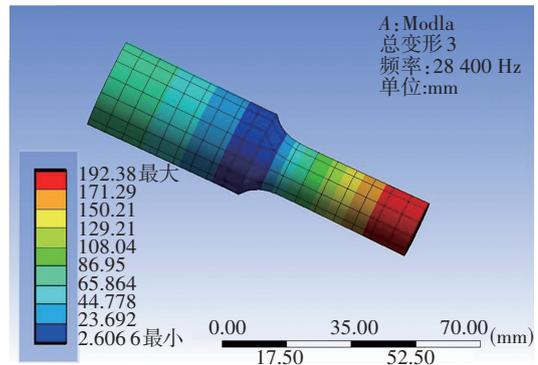
表 3 超声变幅切割刀固有模态特性对比表

Table 3 Comparison of the natural mode characteristics of ultrasonic variable-amplitude cutters

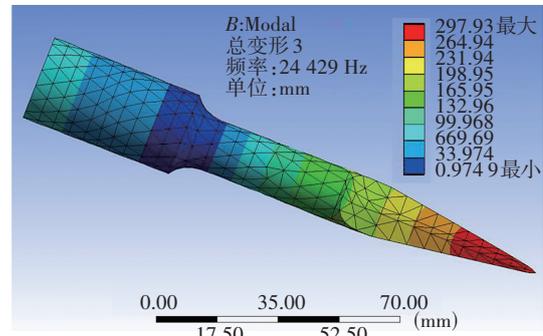
模态特性	固有频率/Hz	振型
阶梯变幅杆	25 058	弯曲振
	25 059	弯曲振
	28 400	纵振
装夹式组合超声切刀	24 419	纵振
	24 789	弯曲振
	29 430	弯曲振

此外,为排除网格类型及大小对求解精度的影响,经多次设置,求解计算验证,发现当前的设置对变幅刀体的固有频率及振型影响不大,计算结果精度可靠。表 3 数据表明:阶梯形变幅杆的纵振频率在 28.4 kHz,与设计误差在 1.4% 左右,满足原有设计需求,但加上

切刀体后,纵振频率变为了 24.4 kHz,固有纵振模态分析如图 5 所示。



(a) 阶梯形变幅杆



(b) 超声切刀组合体

图 5 超声切刀固有模态振动特性图

Fig. 5 Natural mode vibration characteristics of ultrasonic cutter

结果表明:阶梯形变幅杆与切刀体的组合固有频率远小于设计 28 kHz 的目标纵振频率。这主要由于振动系统固有频率如式(4)所示,切刀体的增加使得整个振动系统的系统质量和系统刚度都发生了改变,从而使得纵振频率发生了下降。

$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

f 为固有频率 (Hz); ω_0 为固有角频率 (rad/s); K 为系统刚度系数 (N/m); m 为系统质量 (kg)。

3.2 固有模态影响因素分析

式(4)表明,在材料确定的情况下,振动系统的固有频率只跟系统的质量和刚度系数有直接关系,而刚度系数表达式为 EA/L , E 为材料的弹性模量, A 为回转杆类零部件的截面积, L 为零件长度,而零部件的结构尺寸同样会影响到系统质量,为达到系统响应需求的固有谐振频率,探求切刀结构尺寸对固有纵振频率的影响,固定切刀体结构及小端直径 d ,对图 3 的主要结构尺寸 L_1 、 L_2 、 D 、 R_{op} 进行单因素有限元模态振动特性影响分析。为便于分析,在 Workbench 中的利用 Design Modeler 重新参数化建模阶梯形变幅杆结构尺寸,导入切刀体部件生产新的几何部件进行模态分析。设置结

构尺寸参数 L_1 的变化范围为 21~43.43 mm 随机取 1~5 mm 的计算步长,计算后结果如图 6 所示。图 6 的数据结果表明:固有纵振频率 f 随 L_1 尺寸的增大而降低,说明随 L_1 结构尺寸的增加,其对振动系统结构刚性系数的降低量和系统质量的增加总体相当。此外数据还表明固有纵振最大形变也是随着 L_1 尺寸的增大而降低。虽然模态分析中,形变具体数值无实际参考意义,但其结果为归一化的相对比值,可以衡量输出最大振幅相对大小。

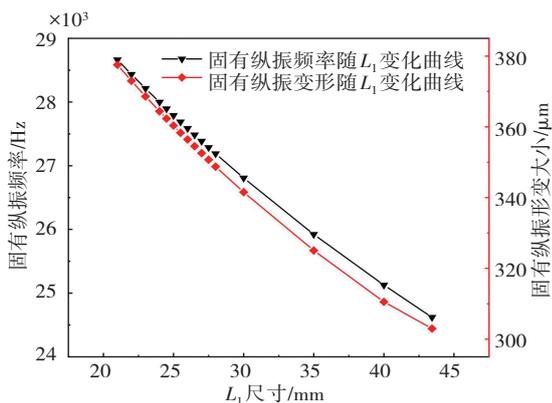


图 6 L_1 对组合超声切刀固有模式振动特性影响

Fig. 6 Effect of L_1 on natural mode vibration characteristics of combined ultrasonic cutter

设置结构尺寸参数 L_2 的变化范围为 26 mm ~ 36.24 mm 随机取 1~5 mm 的计算步长,计算结果如图 7 所示。图 7 数据结果表明:固有纵振频率 f 同样随 L_2 尺寸的增大而降低,总体上也近似呈单调递减关系,其对系统固有模式振动特性影响与 L_1 结构尺寸影响相当。此外数据还表明固有纵振最大形变也是随着 L_2 尺寸的增大而降低,说明随着 L_2 的增加输出最大振幅逐渐减小。

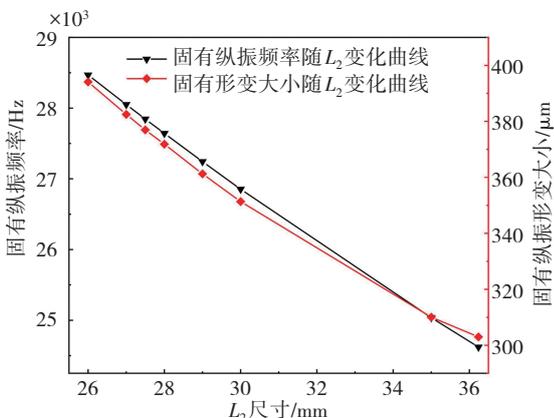


图 7 L_2 对组合超声切刀固有模式振动特性影响

Fig. 7 Effect of L_2 on natural mode vibration characteristics of combined ultrasonic cutter

同理可以设置大径 D 及过渡圆弧 R_{op} 的尺寸变化范围,大径 D 的尺寸范围设置为 17~41 mm 之间,主要是大径尺寸一方面需要大于小径尺寸,另一方面为避免横波

影响,通常大径截面尺寸应小于纵波波长的 $\lambda/4$,而过渡圆弧 R_{op} 取值 4~50 mm,尺寸过大可能存在无法建模的状态,经求解分析得到的模态分析结果如图 8、图 9 所示。两个图中的数据表明总体上固有纵振频率随着大径尺寸 D 、过渡圆弧 R_{op} 的增加都呈递减趋势,但递减的程度随尺寸选取步长越来越大,且局部有先升后降的趋势,在输出振幅变形上,总体呈单调递减趋势。

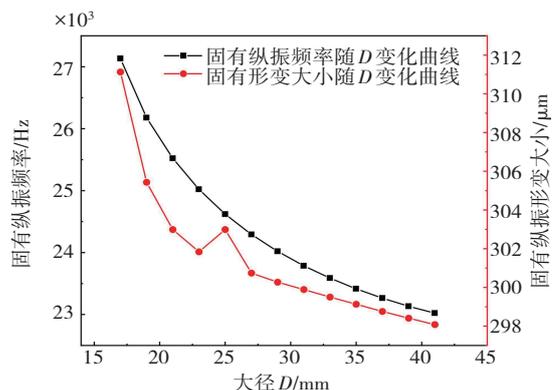


图 8 D 对组合超声切刀固有模式振动特性影响

Fig. 8 Effect of D on natural mode vibration characteristics of combined ultrasonic cutter

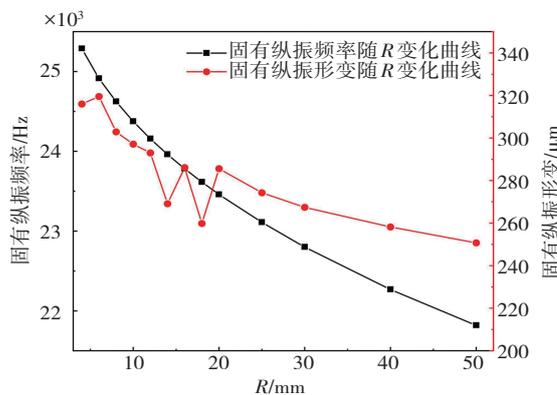


图 9 R_{op} 对组合超声切刀固有模式振动特性影响

Fig. 9 Effect of R_{op} on the natural mode vibration characteristics of combined ultrasonic cutter

综上所述,从单尺寸因素上分析,阶梯变幅杆的主要结构尺寸的变化对于组合切刀的固有纵振频率均有不同程度的影响,总体上 L_1 、 L_2 尺寸的变化规律呈单调递减趋势,而大径 D 及过渡圆弧 R_{op} 的变化只能总体上呈单调状态,局部存在波浪形变化状态,然而在输出振幅变形对比上,4 个结构尺寸参数均呈现出单调递减趋势。单尺寸因素的有限元模态分析可以为超声切刀的设计及频率修正、振幅调整提供理论依据。然而,实际工程中,一个结构尺寸的参数的改变可能会引起其他尺寸参数的改变,同时有可能存在着不同结构尺寸交互影响的情况,且从影响因素上无法准确判断哪个影响因素更大,因此有必要对结构尺寸进行多因素的交互影响分析。

4 尺寸交互析因与响应优化设计

4.1 DOE 析因实验设计

为对比阶梯变幅杆主要结构尺寸因素对组合切刀固有纵振频率的影响差异,检验各因素影响的独立性或交互效应,同时基于望目特性,实现目标频率下的有特定结构尺寸要求的参数求解,选取上述 4 个结构尺寸作为实验因素,进行四因素两水平的有限元实验设计,探究其对固有纵振频率的影响^[17]。选取目标纵振频率为 28 kHz,因此,在实验分析中,参考单因素固有模态影响图,并尽可能选取覆盖目标频率的尺寸范围,同时又能兼顾较大的变形输出,采用全因子 DOE 分析设计法,每个因子取高低两个水平,设置一个中点,各因子的取值如表 4 所示。一共进行 18 次因子实验,全因子实验数据如表 5 所示。

表 4 DOE 实验各因素水平设计表

Table 4 Design of each factor level of DOE experiment

因素	低水平/mm	高水平/mm
L_1	24.0	44.0
L_2	27.0	37.0
D	20.0	26.0
R_{op}	8.0	20.0

表 5 全因子实验设计及结果表

Table 5 Full factorial experimental design and results

标准序	L_1	L_2	D	R_{op}	固有频率/Hz	固有形变
7	24	37	26	8	27 338	350.53
2	44	27	20	8	28 863	378.16
5	24	27	26	8	31 510	488.12
10	44	27	20	20	27 827	350.22
1	24	27	20	8	34 381	580.37
14	44	27	26	20	26 314	341.07
12	44	37	20	20	24 637	280.3
11	24	37	20	20	29 227	357.74
6	44	27	26	8	27 822	380.5
3	24	37	20	8	30 312	407.95
17	34	32	23	14	27 542	356.59
4	44	37	20	8	25 476	296.72
13	24	27	26	20	31 157	474.99
18	34	32	23	14	27 542	356.67
16	44	37	26	20	22 951	272.84
15	24	37	26	20	25 934	319.1
9	24	27	20	20	33 148	521.78
8	44	37	26	8	24 123	294.62

4.2 实验结果分析

在 Minitab 中应用统计中的分析因子设计,以固有纵振频率为响应,选择前两阶项数进行统计分析,在标准化

的 Pareto 图中可以初步评估各项响应的显著性^[18]。筛选显著因素的对应项,重新进行响应统计分析,可以得到筛选后的标准化的 Pareto 图,如图 10 所示。图 10 中数据表明因子 L_1 、 L_2 、 D 、 R_{op} 的影响值均超过了临界值 2.18,对固有纵振频率均具有显著性影响,且 $L_1 \times D$ 存在着交互显著影响,从其交互影响图也可以表明二者之间的效应线明显不平行,也进一步说明二者的交互作用对固有纵振频率有着显著性的效应影响^[19]。

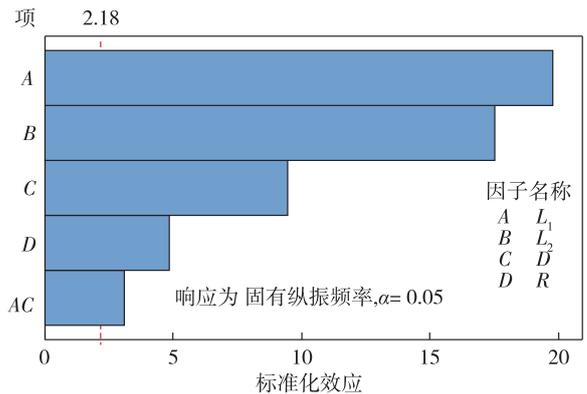


图 10 固有纵振频率效应的 Pareto 图

Fig. 10 Pareto diagram of natural longitudinal frequency effect

对于各个水平因素的显著影响也可以从主效应图中进行分析判断。可以明显看出 L_1 、 L_2 的参考线较为陡峭,说明这两个水平的主效应量值较大, D 、 R_{op} 次之。

图 11 为固有纵振频率的残差诊断四合一图,图 11 中结果表明残差点分布没有明显的模式和异常值,残差正态概率图基本反映出一条直线,因此残差呈正态分布,残差与拟合值图的结果表明观测点随机分布在中心线两侧,无规律可辨识的模式,而在残差与观测顺序图中,可发现图中的残差也是围绕中心线随机分布,综上数据统计模型符合回归的假设^[20]。

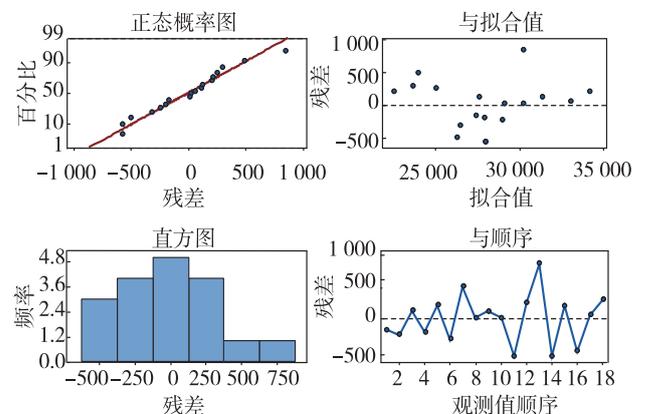


图 11 固有纵振频率交互作用残差图

Fig. 11 Residual diagram of natural longitudinal frequency interaction

4.3 回归分析与响应优化设计

结合以上的因子分析,可以得到固有纵振频率的

回归方程式(5),回归方程的变量参数主要以显著性因子为主:

$$\text{固有频率} = 66\ 253 - 484.0L_1 - 387.8L_2 - 741D - 89.9R + 11.53L_1 * D \quad (5)$$

为判断回归方程的合理性,对统计模型中的响应变异百分比 $R-sq$ 进行分析,可以算得其值为 98.56%,说明模型可解释该值以上的变异观测点,使其接近数据拟合线上。同时在回归模型中可测得 $R-sq$ (预测)数值为 96.95%,两个数据较为接近,拟合性较好,模型整体统计不存在失拟的状况,模型弯曲 P 值为 0.045,在 95%的置信区间内,预测能力较好。

对模型进行基于 28 kHz 望目的响应优化设计,通过参数取值范围调整可求得多组目标纵振尺寸组合,如在 $L_1 = 34\ \text{mm}$, $L_2 = 32\ \text{mm}$, $D = 23\ \text{mm}$, $R_{op} = 15.3\ \text{mm}$ 的优化参数上,通过有限元仿真求得固有纵振频率为 27 409 Hz,与目标 28 kHz 误差为 2.11%,符合回归方程的可靠置信区间内。此外,响应优化设计可以针对定参数进行优化设计,如对过渡圆弧 R_{op} 固定的预测,在尺寸参数 $L_1 = 33.45\ \text{mm}$, $L_2 = 31.75\ \text{mm}$, $D = 22.42\ \text{mm}$, $R_{op} = 13.0\ \text{mm}$ 的情况下,固有纵振频率为 28 075 Hz,与目标频率误差为 0.26%,满足超声波频率发生器的追频范围。

通过 DOE 的回归分析与望目寻优设计,可以在多个结构参数交互影响分析,以及同一个目标频率多种结构尺寸方案的寻优设计,极大地降低了工程计算与仿真的复杂性,尤其是适合有特定结构尺寸要求的超声切刀的设计。

5 谐波响应仿真与实验分析

5.1 谐波响应仿真分析

结构的固有纵振频率是其可能发生纵振变形的一种趋势,要验证超声切刀在超声换能器产生的周期位移载荷下的持续响应情况及振幅和应力分布情况,必须对其进行谐波响应分析。为了得到超声切刀在简谐高频振动系统中的振动特性,应用 Workbench 工具箱中的 Harmonic Response 模块进行完全法谐波响应分析,以 DOE 优化设计目标纵振频率为 28 075 Hz 的主结构尺寸参数作为谐波响应的结构模型。通过导入三维结构模型、设置材料属性,划分网格,同时在分析设置中,为接近固有纵振频率,设置线性扫频范围为 26~30 kHz,设置求解方案间隔为 100,添加位移载荷或者力负载,结合换能器输出端位移载荷为 10 μm ,本文加载的声压幅值载荷,根据式(6),可计算出压力幅值为 37.8 Mpa。在求解方案中,插入基于几何模型的总变形,基于新建路径的变形,进行求解。

$$P = \rho c u = -\rho c A \omega \quad (6)$$

谐波频响图 12 的数据表明:随着扫频频率的增加,切刀端头的选取的单元点的振幅先增后减,在 28 120 Hz,达到了峰值,说明超声切刀在此频率作用下,与超声换能器可以产生共振,发出最大的振动特性,这与固有模态的 28 075 Hz 误差非常小,为此在求解总体变形、等效应力、定向变形中设置求解频率为 28 120 Hz。

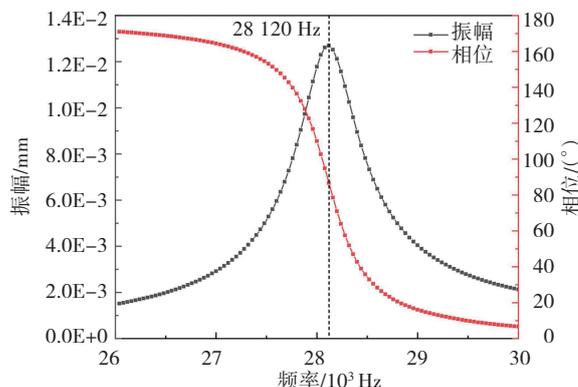


图 12 超声切刀谐波响应频响图

Fig. 12 Harmonic response frequency response diagram of ultrasonic cutter

总变形图 13 的结果表明超声切刀在谐波扫频状态下,超声切割刀的振动特性为纵振,且在小端端部达到了最大变形 46.8 μm ,在过渡圆弧后端有最小振幅,这符合超声变幅器的纵振变化特性规律。

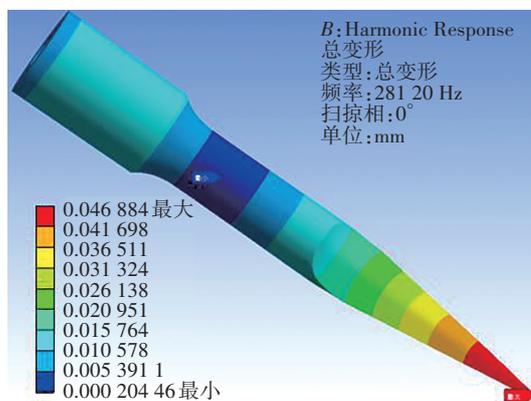


图 13 超声切刀谐波响应总体变形图

Fig. 13 Overall deformation diagram of harmonic response of ultrasonic cutter

为探求超声变幅切刀的变形及切刀放大系数,在 Modal 中插入两点路径,并求解基于该路径的变形,图 14 的结果表明基于路径的变形是与总体变形基本一致,同时也可以求解出近似放大系数为 4.75。

图 15 等效应力图的结果表明在共振频率作用下,超声切刀在过渡圆弧下端、切刀圆弧下端均呈现了较大的应力,最大应力为 97.68 Mpa,平均应力为 38.65 MPa,这都远小于材料的屈服强度 825~895 MPa 的 70%的安全许用屈服强度,切刀运行基本可靠。

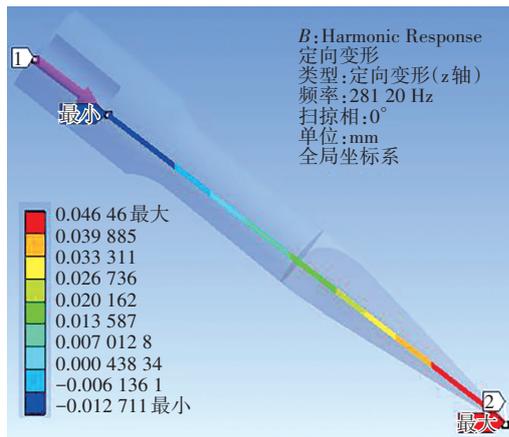


图 14 超声切刀谐波响应定向变形图

Fig. 14 Directional deformation diagram of harmonic response of ultrasonic cutter

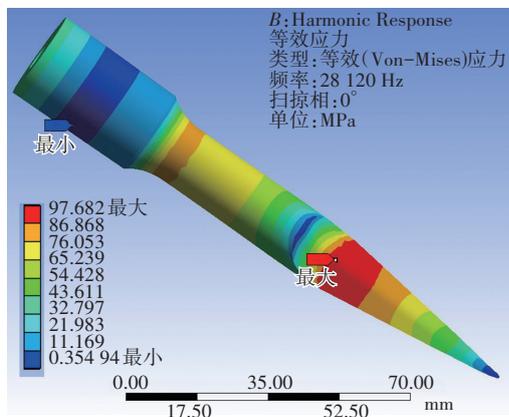


图 15 超声切刀谐波响应等效应力图

Fig. 15 Equivalent stress diagram of harmonic response of ultrasonic cutter

5.2 阻抗实验测试

为了验证超声切刀 FEM 仿真与 DOE 设计的可靠性与合理性,应用数控技术进行超声切刀加工,并应用阻抗分析仪对连接的超声换能器与超声切刀进行频率、阻抗分析,测试如图 16 所示。

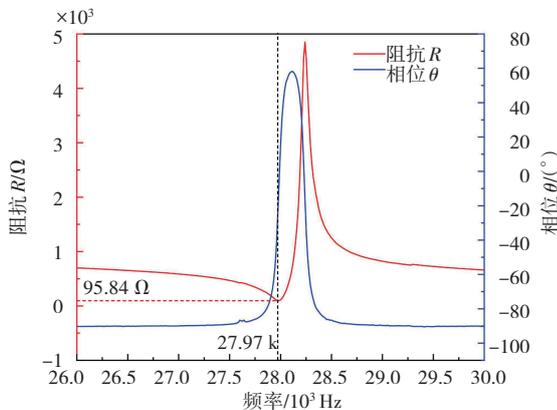


图 16 超声切刀阻抗实验测试图

Fig. 16 Impedance test diagram of ultrasonic cutter

阻抗分析的结果表明对超声换能器和变幅杆一体测量时,阻抗分析仪采集共振频率为 27 973 Hz,谐振频

率与固有模态纵振频率、谐波响应频率误差均较小,与目标频率变化率在 0.1% 以内,满足共振要求,从阻抗分析上来看,超声换能器和切割刀一体测量的阻抗为 95.84 Ω,按照阻抗分析仪的技术指标,阻抗值满足超声切割/焊接的技术指标要求。

5.3 切割实验测试

为验证切刀设计的可行性与工程实用性,将超声切刀安装至手持式超声切割加工系统中可发现系统中追频谐振频率为 28.14 kHz,与设计频率、换能器频率误差值较小,能够产生纵向共振,且切刀组合连接处、刀尖处无发热和尖啸声,点击启动后,切刀运行平稳,频率稳定。在切割加工中,为对比几种工艺的优缺点进行了超声、普通刀具、激光 3 个切割实验,结果如图 17 所示,可明显看到并感受到普通刀具切割效率低,有飞边,易磨损;激光切割效率高,热影响大,烟尘大,危害大,且成本高,工装复杂;而超声切割效率高,成本低,切口光洁自封闭,易长时间加工,且冷刀加工,无尘无害。切割实验的结果表明设计的装夹式超声切刀工程实践效果较好,设计可行,分析可靠。

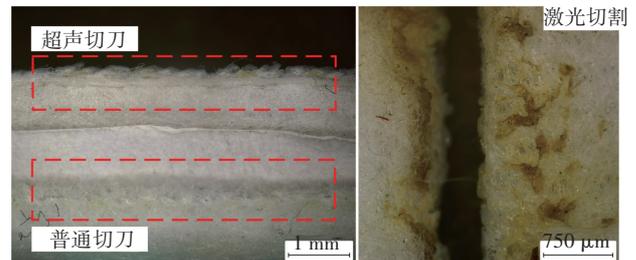


图 17 超声切刀加工实验及加工效果对比图

Fig. 17 Processing experiment and processing effect comparison of ultrasonic cutter

6 结论

(1) 有特定结构尺寸要求的超声切刀结构上可以采用螺纹连接的阶梯形变幅杆(或其他单一变幅杆)与切刀体装夹的设计方式实现快速结构设计。

(2) 通过模态分析可以发现以固定切刀体的阶梯形变幅杆主结构尺寸参数对组合超声切刀固有纵振频率及输出形变影响不一。结果显示,随着大小径长度 L_1 、 L_2 的增加,固有纵振频率呈单调递减趋势,而随着大径 D 及过渡圆弧 R_{op} 的增加,固有纵振频率影响上总体上呈单调递减状态,局部存在多种波浪式变化,集中表现为可能存在的交互影响,在输出形变对比上,随着四个结构尺寸的增加均呈现出单调递减趋势。

(3) 通过构建基于目标谐振频率的多结构尺寸因素的 DOE 析因实验,可以发现 L_1 、 L_2 、 D 、 R_{op} 及 $L_1 \times D$ 均为显著性影响因素,并构建了基于显著性影响因素的固有频率回归方程。基于多目标望目优化设计,设计了具有特定结构尺寸的 28 kHz 的装夹式超声切刀,进

行了谐波响应分析,验证了优化设计在谐振频率的一致性,结构应力及应变的合理性,进行了数控加工及阻抗测试,验证了设计、仿真与阻抗测试在固有纵振频率的一致性,且阻抗值符合要求,实验样品加工,具有效率高,无飞边,切口自封,刀具工作时长等优点。

(4) 研究为有特定结构尺寸要求的组合式超声切刀的结构设计及振动特性研究提供了理论设计、仿真分析、析因分析、望目寻优等方法,可以为组合式超声切刀或结构尺寸谱系化的超声切刀的高效设计与工程实践提供理论和技术支持。

参考文献(References):

- [1] 冯若. 超声手册[M]. 南京:南京大学出版社,1999.
FENG Ruo. Ultrasonic manual[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1999.
- [2] 曹凤国. 超声加工技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
CAO Feng-guo. Ultrasonic machining[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [3] HONG H C H. Machining technology for composite materials[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.
- [4] 许超,袁信满,关艳英,等. 超声加工技术的应用及发展趋势[J]. 金属加工(冷加工),2022(9):1—6.
XU Chao, YUAN Xin-man, GUAN Yan-ying, et al. Application and development trend of ultrasonic processing technology [J]. Metal Processing(Cold Processing), 2022(9): 1—6.
- [5] 文立伟,严飙,肖军,等. 复合材料超声切割系统及稳定性研究[J]. 航空制造技术,2010(17):49—52.
WEN Li-wei, YAN Biao, XIAO Jun, et al. Research on ultrasonic cutter system and stability of composites[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2010(17): 49—52.
- [6] 高军,崔巍. 超声切割技术在复合材料加工领域的应用[J]. 航空制造技术,2008(4):50—52.
GAO Jun, CUI Wei. Ultrasonic cutting technology applying in the field of composite material processing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(4): 50—52.
- [7] CARDONI A, LUCAS M, CARTMELL M, et al. A novel multiple blade ultrasonic cutting device[J]. Ultrasonic, 2004, 42(1): 69—74.
- [8] 张云电,陈健,储瑞,等. 宽刃超声波切割刀的研究与设计[J]. 机电工程,2017,34(12):1382—1386.
ZHANG Yun-dian, CHEN Jian, CHU Rui, et al. Structural design of wide edge ultrasonic cutter[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(12): 1382—1386.
- [9] 周胜利,姚志远,沙金. 超声切割刀动力学分析和结构优化设计[J]. 中国机械工程,2013,24(12):1631—1635.
ZHOU Sheng-li, YAO Zhi-yuan, SHA Jin. Dynamic analysis and structural optimization design of an ultrasonic cutter[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(12): 1631—1635.
- [10] 尤晓镇,隆志力,傅惠,等. 基于有限元模型的超声切割刀优化设计[J]. 压电与声光,2015,37(6):1083—1087.
YOU Xiao-zhen, LONG Zhi-li, FU Hui, et al. Optimization design of ultrasonic knife cutting system based on finite element model[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015, 37(6): 1083—1087.
- [11] 王根. 吸波蜂窝材料超声切削盘状刀具设计与性能研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2021.
WANG Gen. Research on design and performance of ultrasonic cutting disc tool for absorbing honeycomb material[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2021.
- [12] 黄秀秀,胡小平,于保华,等. 基于断裂力学的Nomex蜂窝复合材料超声切割机理研究[J]. 机械工程学报,2015,51(23):205—212.
HUANG Xiu-xiu, HU Xiao-ping, YU Bao-hua, et al. Research on ultrasonic cutting mechanism of Nomex honeycomb composites based on fracture mechanics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(23): 205—212.
- [13] 纪华伟,虞文泽,胡小平,等. 刀具负载对蜂窝复合材料超声切割声学系统阻抗特性的影响[J]. 中国机械工程,2016,27(18):2507—2512.
JI Hua-wei, YU Wen-ze, HU Xiao-ping, et al. Influence of load on resonance frequency and resonance impedance of an ultrasonic cutting acoustic system [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(18): 2507—2512.
- [14] 董昕嶝. 基于近似模型的超声切割刀具优化技术研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2016.
DONG Xin-di. Research on optimization technology of ultrasonic cutting tool based on approximate model[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2016.
- [15] KIM S R, LEE J H, YOOC D, et al. Design of highly uniform spool and bar horns for ultrasonic bonding [J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2011, 58(10): 2194—2201.
- [16] 郑建新,侯雅丽. 阶梯形变幅杆数值设计研究[J]. 机械设计,2015,32(5):91—94.
ZHENG Jian-xin, HOU Ya-li. Numerical design for stepped horn[J]. Journal of Machine Design. 2015, 32(5): 91—94.
- [17] 许寒飞,何煦,李扬,等. 正交试验设计(DOE)对熔融混炼工艺参数的优化研究[J]. 信息记录材料,2021,22(11):10—12.
XU Han-fei, HE Xu, LI Yang, et al. Study on optimization of melting and mixing process parameters by orthogonal design of experiments (DOE) [J]. Information Recording Materials, 2021, 22(11): 10—12.
- [18] 翟璐璐,刘海波,桓恒. 基于DOE设计的叶片电解加工工艺优化[J]. 航空制造技术,2021,64(9):45—52.
ZHAI Lu-lu, LIU Hai-bo, HUAN Heng. Optimization of electrochemical machining process of blade based on DOE design[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(9): 45—52.
- [19] 徐亮,戴婷,陈涛,等. 基于DOE实验设计方法的聚丙烯焊接工艺优化[J]. 广州化学,2021,46(2):75—80.
XU Liang, DAI Ting, CHEN Tao, et al. Improvement on laser welding of polypropylene by DOE experimental design method[J]. Guangzhou Chemistry, 2021, 46(2): 75—80.
- [20] 黄永程. 基于全因子DOE薄壁塑件成型多目标工艺分析[J]. 塑料,2021,50(1):29—33.
HUANG Yong-cheng. Multi-objective process analysis of Thin-Walled plastic parts based on full factor DOE [J]. Plastics, 2021, 50(1): 29—33.

责任编辑:田静