

BP 神经网络口罩齿模参数优化

王 钧, 李 玮, 许 静, 王周梅, 王泰恒

(西南林业大学 机械与交通学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 针对齿模在旋压时由于结构复杂和切削刃口优化不够导致的落料或拉深不顺利的问题展开研究。对齿模切削刃口进行多组正态分布参数的超声波剪切有限元分析, 模拟出不同切削刃口参数下的切断位移和剪切强度变化, 并且对结果进行齐性检验和极差分析, 以确保数据的可靠性, 并分析了各数据对结果的影响程度。通过 Matlab 软件, 对不同切削刃口参数和不同剪切强度、切断位移的关系构建 BP 神经网络, 并进行拟合训练, 通过神经网络反向模拟, 推算出切削刃口的最佳参数, 再将得到的参数值应用到实际的切削加工实验中, 利用实验结果来验证预测的齿模切削刃口最佳参数的正确性和可靠性。研究成果为此类新型模具的设计提供了一种优化方案, 为抗疫物资的生产提供了最优的加工数据。

关键词: 口罩; 齿模; 切削刃口; 剪切强度; 切断位移

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.029

中图分类号: TQ330.4⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 04-0218-11

Optimization on parameter of mask tooth mold by BP neural network

Wang Jun, Li Wei, Xu Jing, Wang Zhoumei, Wang Taiheng

(School of Machinery and Transportation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: The problems of blanking or deep drawing unsmoothly caused by the complex structure and insufficient cutting edge optimization of tooth mold during spinning were studied, and through the ultrasonic shear finite element analysis of multiple sets of normal distribution parameters on the cutting edge of tooth mold, the cutting displacement and shear strength changes under different cutting edge parameters were simulated. Then, the homogeneity test and range analysis on the results were carried out to ensure the reliability of the data, and the influence degree of each data on the results was analyzed. Furthermore, through Matlab software, the BP neural network was constructed for the relationship between different cutting edge parameters and shear strengths, cutting displacements, and the fitting training was carried out. Through neural network reverse simulation, the optimal cutting edge parameters were deduced, and the obtained parameter values were applied to the actual cutting experiment. The experimental results were used to verify the correctness and reliability of the predicted optimal parameters for the cutting edge of tooth mold. Thus, the study result provides an optimization scheme for the design of such new molds, and provides optimal processing data for the production of anti-epidemic materials.

Key words: mask; tooth mold; cutting edge; shear strengths; cutting displacement

齿模是一种新型的压力模具, 其原理与传统的锻压工艺类似, 但其结构更精密、成形条件更为苛刻、效率更高。N95 口罩作为后疫情时代防疫的必备用品, 是通过口罩齿模对多层无纺熔喷布进阶旋压成形、超声波发热焊接、废料切除和鼻梁耳带连接等多种工艺制造而成的。

口罩齿模是制造 N95 口罩的核心部件, 其主要

功能是压力熔接和切断, 相当于金属冲压的拉深和落料工艺。工艺过程为: 将连续不间断运行的多层无纺熔喷布利用超声波配合滚压、切割, 从而压出口罩表面纹路, 且压而不穿, 使 3~4 层无纺熔喷布密实地压连在一起, 并留有薄薄的半透明层, 以保证过滤性和密封性。为了能够完成高速的连续压型和切断, 口罩齿模的设计和制造必须非常精确, 其切削刃口工艺参数的选择就是口罩成形的关键。

口罩齿模与传统模具不同的地方在于其结构设计中将需要制造的物体特征按照一定规律排布在回转体的周向上, 在模具旋转过程中完成口罩的熔接和切断工艺, 该方法大大提升了加工效率和产品精度。但是, 该模具整体为回转体, 特征小而多, 通常

收稿日期: 2022-07-20; 修订日期: 2022-10-28

基金项目: 云南省教育厅基金资助项目 (2022Y569)

作者简介: 王 钧 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: 270254127@qq.com

通信作者: 李 玮 (1967-), 女, 博士, 教授

E-mail: 772074913@qq.com

一个齿模就拥有上千个 0.5 mm 的矩形块, 矩形块之间的距离密集, 不易加工, 导致此种模具的设计和制造难度较大。同时, 该齿模还存在结构复杂、切断模和压缩齿不能很好地配合工作、切断模参数不够优化、不能高速地将无纺熔喷布完全切断、或切断过深、切断连续、粘连、压切不匹配等问题^[1-2]。

同时, 随着现代数学和软件集成科学的不断发展, 也为制造工程师和设计师提供了全新的思路和方法。智能人工神经网络在金属成形加工方面有了全新的优化方式, 通过对输入、输出的参数进行智能拟合, 利用中间的“黑箱”关系获取最优参数, 使加工结果达到其预测效果。该方法大大减少了生产周期, 节约了生产成本, 具有加工误差小、精度高等特点。

因此, 本文通过研究齿模的外形特征, 对齿模切削刃口参数进行了正交多组剪切有限元实验, 根据实验结果, 预测出齿模切削刃口参数与切断位移、剪切强度之间的数学模型。针对该数学模型, 利用 Matlab 软件, 选择不同参数、不同剪切强度和切断位移来构建 BP 神经网络, 对其进行拟合训练, 通过反向模拟推算出切削刃口的最佳参数值, 再将得到的参数值应用到实际的切削加工实验中, 利用实验结果来验证预测的口罩齿模切削刃口最佳参数的正确性和可靠性, 为口罩制造这种新型、前沿产业提供一定的理论支持和借鉴。

1 模具介绍及其特征介绍

1.1 模具结构介绍

“热压力齿模”又称为齿模、压辊或碾辊, 其结构如图 1a 所示, 图 1b 为该齿模结构实体图, 图 1c 为该齿模结构的工作场景图。该齿模主要由以下部分构成:

(1) 轴肩, 主要用于安装轴承, 使整个齿模达到旋转的目的, 具有加工同轴度高的特点;

(2) 齿模肩, 主要用于所要加工的口罩尺寸的调整, 该部件安装在口罩机的滑槽中, 便于同一排的两个齿模调整间距;

(3) 抗粘连凸块, 主要用于将废料通过凸点进行压紧, 避免出现切断不完全和粘连现象, 方便清理;

(4) 空白区, 主要为口罩的非粘连部分提供空隙, 使该部分不产生压力, 保证口罩达到多层过滤的效果;

(5) 铭牌区域, 主要用于在口罩上压上铭牌信息, 一般根据具体的要求进行设计;

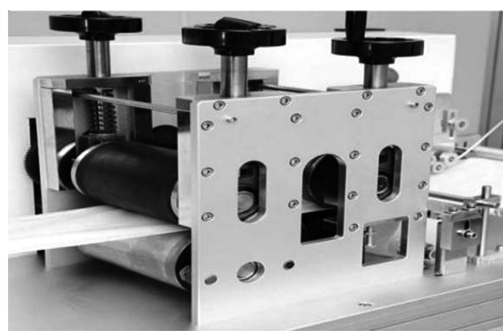
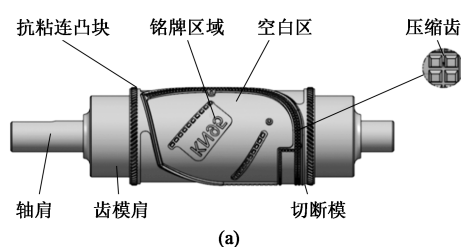


图 1 齿模外形及其应用

(a) 齿模结构特征图 (b) 齿模结构实体图
(c) 齿模工作场景图

Fig. 1 Tooth mold shape and its application

(a) Characteristic diagram of tooth mold structure
(b) Entity diagram of tooth mold structure (c) Working scene diagram of tooth mold

(6) 切断模, 切断模的关键部件为一个三角形刃口, 该刃口的作用是在旋转过程中将废料完全切除, 保证有用的部分能够完全脱落且不发生粘连和胶接, 该部分功能的实现即为本次研究的关键问题;

(7) 压缩齿, 用于在口罩的周向按照其形状完成压紧、拉深工艺。

该模具的主要特点为凸点多、结构复杂、排列紧密, 其中切削刃口最佳切削刃口参数的设定是整个模具是否能将口罩加工工艺顺利完成的关键。

1.2 切削刃口结构特点介绍

图 2 为齿模切削刃口及其口罩切断平面的示意图, 齿模的切削刃环绕在圆柱形的齿模周向, 并且刃口均垂直于轴心, 按照其外形特征的位置关系, 沿回转体周向布置。齿模工作时, 每旋转 1 圈, 齿模上的压缩齿特征和切削刃同时运动, 在“无纺熔喷布”上压出如图 2b 所示的特定的口罩轮廓特征, 同时完成切断工艺^[3]。由图 2b 可以看出, 将模具

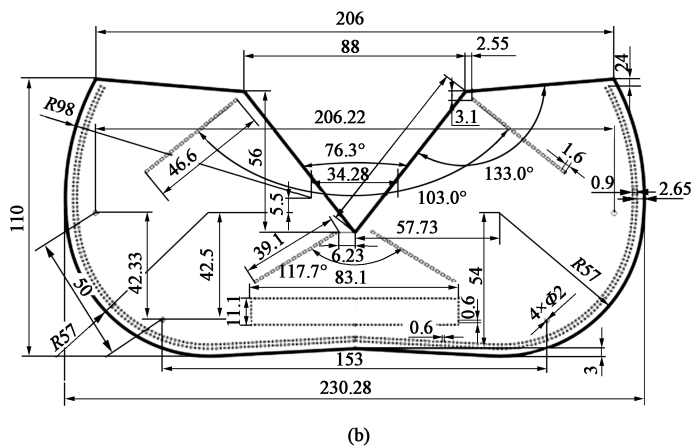
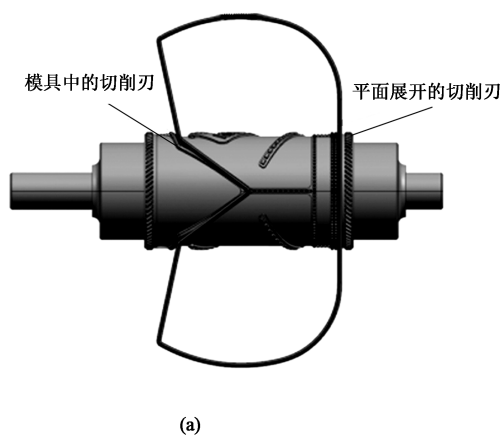


图2 齿模刃口 (a) 及其口罩切断平面尺寸 (b) 示意图

Fig. 2 Schematic diagrams for cutting edge of tooth mold (a) and dimensions of its mask cutting plane (b)

中的切削刃特征展开后即为其制作的口罩在平面中的特征, 旋转1圈正好能够切出1个口罩。

通过上述分析可知, 口罩齿模能够精确地将口罩压形, 并且切断的关键在于切削刃口结构参数的选择是否最优, 从而保证口罩制造工艺的顺利完成。

口罩齿模切削刃口的设计是口罩制作工艺中的关键步骤, 也是本文的主要研究对象, 其具体尺寸如图3所示, 其中 C 为刃口斜面长度, 每个具体参数的设计要求如下。

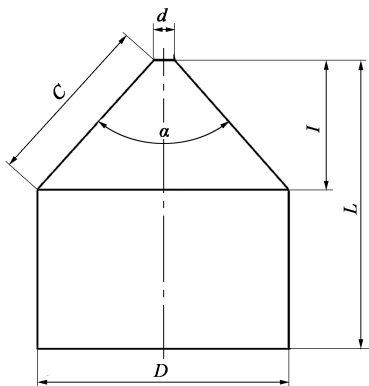


图3 齿模切削刃口结构参数图

Fig. 3 Structure parameters diagram for cutting edge of tooth mold

(1) 参数 D 为整个切削刃口的底面宽度, 该宽度会影响整个切削刃口的锥度变化。

(2) 参数 L 为整个切削刃口的高度, 该高度最好与其余的压缩齿高度保持一致。如果切削刃口过高, 会造成其余的压缩齿不能接触无纺熔喷布, 导致压模不到位; 如果切削刃口过低, 又会切不断无纺熔喷布, 导致粘连。

(3) 参数 d 为切削刃口的顶面宽度, 与正常的切削刃概念相比, 该齿模的刃口底面具有一定宽度,

不似普通的切削刃, 需尽量薄, 以追求刀刃的锋利度。如果切削刃太薄, 虽然方便了无纺熔喷布的切断, 但是由于该齿模刃口除了具有切断功能, 还需要将切断的部分四周封边以方便收纳管理。所以, 参数 d 应保持在一定的范围内, 使其既可以将其压紧、封边, 也可以将其切断。

(4) 参数 I 为切削刃口的高度, 整个刃口不能全部都是有锥度的, I 的尺寸变化会影响刃口的锋利度和锥度。压切时, 布料首先沿着 I 尺寸部分的锥度逐渐张开从而被撕裂, 达到 $(L-I)$ 尺寸部分时张开达到最大值, 直至完全脱离。

(5) 参数 α 为刃口部分的角度, 通过该角度的选择, 确定锥度的大小。

综上所述, 以上几个参数的选择是相互影响的, 单一参数的变化也能够对其他参数产生影响。

1.3 切削刃口结构参数之间的数学关系

由于所有的参数都是相关联的, 部分参数尺寸之间存在相互的限制区间, 所以, 在阐述各个参数之前, 还需要对其数据之间的关系进行研究, 使参数的选择既保证各个参数之间的真实性和准确性, 也为了后续的BP神经网络的数据样本提供前期准备。

切削刃口各参数之间的数学关系如式(1)所示, 通过相应的三角函数关系将其中的数值关联起来。因此, 在做多组实验时, 也可以利用式(1)进行多组数据样本的获取。

$$\begin{cases} D = C \times \cos(180^\circ - \alpha) \\ d = D - 2C \times \sin(180^\circ - \alpha) \\ d < D < 1.5 \text{ mm} \\ d > 0.1 \text{ mm} \\ (L - I) > 0.3 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

如式 (2) 所示, 为相应参数的限制条件:

$$\begin{cases} 2.0\text{ mm} > D > 0.5\text{ mm} \\ 1.1\text{ mm} > L > 0.9\text{ mm} \\ 120^\circ > \alpha > 30^\circ \\ 0.4\text{ mm} > d > 0.1\text{ mm} \\ I < L \end{cases} \quad (2)$$

各参数尺寸必须遵循以下条件:

(1) D 最大为 2.0 mm, 因为超过 2.0 mm 将对整个齿模的紧凑布局产生影响, D 值过大会造成相邻两个齿之间的间距太小, D 值过小则加工制造时小特征不便于加工;

(2) L 的限制区间比较小, 其高度和其余齿保持一致即可;

(3) α 为切断的主要影响因素, 其变化区间在 $30^\circ \sim 120^\circ$ 之间;

(4) d 是压切时的接触面, 所以, 该面的尺寸变化区间较小;

(5) I 的变化需要跟随 D 和 α 的改变而改变, 但 I 原则上不能大于 L , 在实际使用中 I 一般不会超过 L 的 $2/3$ 。

2 有限元受力分析

齿模压切的对象为无纺熔喷布, 无纺熔喷布是一种特殊的纤维材料, 不是通过纺织而是将聚丙烯 (PP 材料) 融化后通过“喷纱”工艺制成。主要原理为: 超细纤维的过滤和静电驻极吸附细菌, 通过重力沉降和惯性碰撞以及布朗运动、静电吸附等方式拦截微粒^[4]。环境中的微粒随气流通过无纺熔喷布滤层时, 纤维中立体网状结构会阻碍气流前进, 使得气流无数次改变运动速度和行进方向而绕过纤维前行, 从而隔绝病毒^[5]。

无纺熔喷布的结构如图 4 所示, 一般分为 3 层: 中间 1 层为高熔融指数的聚丙烯通过融化喷射工艺制造成熔喷层, 如果是更高要求的医用 N95 口罩则该层的层数更多; 上、下两层为聚丙烯层, 通过这样的结构达到防范病毒的作用。

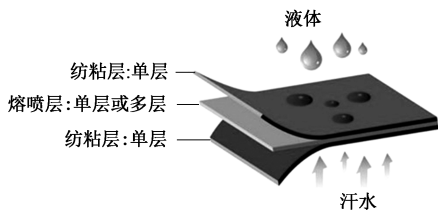


图 4 无纺熔喷布结构图

Fig. 4 Structure diagram of non-woven meltblown cloth

无纺熔喷布是采用聚丙烯 (PP 材料), 通过热熔后在压力下喷出所形成的布料, 其材料参数如表 1 所示^[6]。

表 1 无纺熔喷布的物化参数

Table 1 Physical and chemical parameters of non-woven meltblown cloth

参数	数值
弹性模量/($\times 10^8\text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$)	0.896
泊松比	0.4103
抗剪模量/($\times 10^8\text{ Pa}$)	3.16
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	890
张力强度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)	27600000
热导率/($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	0.147
比热容/($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	1881

2.1 运动分析

如图 5 所示, 为口罩压切成形的工作原理示意图, 口罩齿模在旋压作用下依靠自身的轮廓特征, 在超声波的配合下对无纺熔喷布进行压形或切断, 同时两端的输送辊将整条无纺熔喷布压紧, 为其提供一定的张力, 保持压型完整。

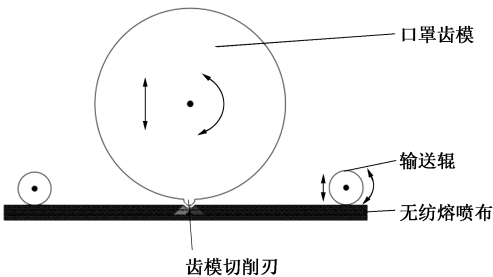


图 5 口罩压切成形示意图

Fig. 5 Schematic diagram of mask pressing and molding

口罩的切削分为两部分: (1) 齿模的压切成形; (2) 高频振动产生的超声波, 经过一定的保压时间, 在保压压力的作用下, 将无纺熔喷布切断焊接。所以, 在进行该部分的有限元分析时, 应考虑力场和声场的影响。

2.2 超声波热流密度场计算

超声波的热流密度主要取决于以下各项因素: 超声波的振幅 A 、超声波的振动频率 f 、超声波的总功率 P 、由齿模提供的静压力 F 、超声波提供的切融温度 T 、切融时间 t 。超声波的总功率 P 取决于无纺熔喷布的厚度 δ 和无纺熔喷布的硬度 h , 该总功率 P 可按式 (3) 进行计算。

$$P = kh^{\frac{3}{2}}\delta^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

式中: k 为系数。

在有限元分析时, 为了方便实施操作, 一般认为超声波产生的共振使无纺熔喷布的材料分子之间产生了相互摩擦而融合在一起, 因此在构建有限元时, 主要确定的是功率和振幅的关系, 如式 (4) 所示。

$$P = 4\mu S_0 FAf \quad (4)$$

式中: S_0 为齿模和无纺熔喷布的接触面积; μ 为齿模和无纺熔喷布接触时的摩擦因数。

为了保证在进行有限元仿真时最大程度地接近超声波和齿模工作时的温度, 首先需要得到其热源分布情况。假设其热源在实际中是均匀分布的, 所以, 在齿模施加的载荷作用下引起的热载荷也是均匀分布的, 故超声波热流密度 Q 如式 (5) 所示。

$$Q = \frac{F_w V}{S_D} \quad (5)$$

式中: F_w 为无纺熔喷布变形时的受力; V 为超声波的平均速度; S_D 为施加变形的区域面积。

假设式 (5) 中的超声波平均速度与大多数声波一样, 均遵循正弦的规律在变化, 则积分下的超声波平均速度如式 (6) 所示。

$$V = \frac{1}{T} \int_0^T 2\pi f A \cos(2\pi f t) dt = 4Af \quad (6)$$

计算出 V 后, 要算出超声波热流密度 Q 值还需要知道 F_w , 也就是无纺熔喷布变形时的受力大小。 F_w 是超声波提供的切融温度 T 、静压力 F 及切融时间 t 的偏导函数, 按照一般的求偏导方法即可, F_w 的计算方法如式 (7) 所示。

$$F_w(T, F, t) = \sqrt{\left(\frac{Y_T}{2}\right)^2 - \left(\frac{F/S_D}{2}\right)^2} \cdot S(t) \quad (7)$$

式中: Y_T 为取决于温度的屈服强度值; $S(t)$ 为齿模和无纺熔喷布的接触面积。

通过上述论证能够求出超声波热流密度 Q 的具体数据, 其过程在有限元中也可作为基础支撑。

2.3 无纺熔喷布剪切模型的构建

无纺熔喷布通过聚丙烯材质热熔后经喷纱成形, 在光学显微镜下看还是一根根丝状的物体, 正因为能够达到最小 $1 \mu\text{m}$ 左右的极细纤维交织层, 才能很好地抵御病毒的入侵, 其显微镜下的结构如图 6 所示。

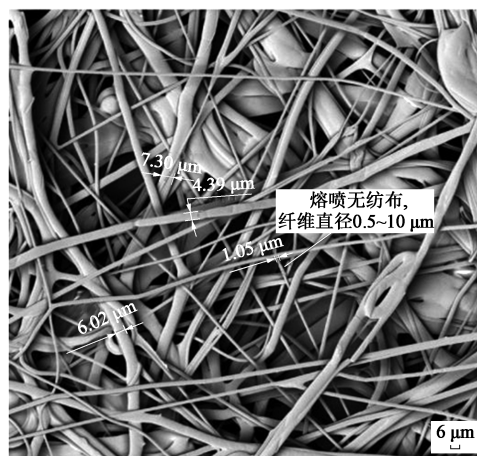


图 6 无纺熔喷布显微示意图

Fig. 6 Schematic diagram of microscope for non-woven meltblown cloth

2.4 有限元计算

本文研究的模具材料为 3Cr2W8V 合金工具钢, 其元素含量如表 2 所示。

表 2 3Cr2W8V 合金工具钢的化学成分 (% , 质量分数)

Table 2 Chemical compositions of 3Cr2W8V alloy tool steel (% , mass fraction)

C	Si	Mn	Cr	W	V	S	P
0.3~0.4	≤0.4	≤0.4	2.2~2.7	7.5~9.0	0.2~0.5	≤0.03	≤0.03

其物理性能如表 3 所示^[7]。

表 3 3Cr2W8V 合金工具钢的主要物理性能

Table 3 Main physical properties of 3Cr2W8V alloy tool steel

参数	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比热/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	切变模量/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	热导率/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	线膨胀系数/ ($\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	电阻率/ ($\Omega \cdot \text{m}$)
数值	8.35	0.465×10^3	8600	20.09	12	22600	0.13	0.5×10^{-6}

2.5 有限元模型简化

按照上述的力学参数, 基于 NX 有限元模块进行模型的网格划分, 划分后的有限元模型如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 其模型结构非常复杂, 在有限元中, 当处理的模型过于复杂时, 会造成仿真结果不拟合, 即使有结果也和实际差别非常大, 不收敛。所以, 在做仿真前需要将仿真对象提取出来进



图 7 有限元模型图

Fig. 7 Finite element model diagram

行简化，有利于保证仿真结果的真实性^[8]。简化后的有限元模型如图 8 所示。

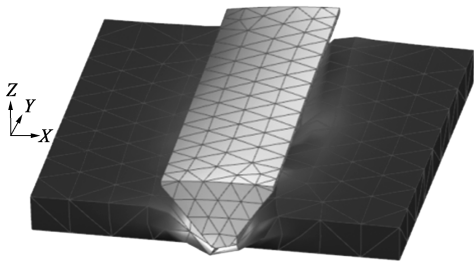


图 8 简化后的切削刃口有限元模型

Fig. 8 Finite element model of simplified cutting edge

2.6 多组实验参数样本获取

由于最终的目的是将有限元结果提供给 BP 神经网络进行优化，所以，需要先获得限制范围内的切削刃口的不同参数值。按照正交实验法，将 D 、 L 、 I 、 d 、 α 进行正交参数排布以提供作为实验的数据基础，获得多组对照实验数据。

由于参数 C 受到 α 和 I 的影响，故不参与直接计算，只需计算出 α 和 I 即可得到 C 。其余数据按照实际可行区间进行正态排布，各数据之间的关系按照式（1）和式（2）进行计算，其数据的分布如表 4 所示。

2.7 多组实验有限元验证计算

由于实际物体较为复杂，如果使用实物进行实验。每一套模具均需花费昂贵的费用，所以采用有限元法进行实验。由于多组数据难以全部展示，故挑选其中的 3 组数据进行展示，部分有限元结果如图 9 所示。

通过上述参数的具体数据，配合简化后数据模型的切削刃口参数，分别建立 3D 模型供有限元使用，得出其实验结果。

2.8 数据分析

在构建 BP 神经网络之前，还需要对数据组进行一次方差分析，通过方差分析可以更好地分析数据之间的变化对结果的影响程度，方差分析如式（8）所示。

表 4 BP 神经网络的样本数据汇总

Table 4 Summary of sample data of BP neural network

序号	D / mm	d / mm	α / ($^{\circ}$)	I / mm	L / mm	切断位移/ mm	剪切强度/ MPa
1	1.50	0.40	120.00	0.51	1.10	1.02	2.02
2	1.45	0.38	115.26	0.61	1.09	0.95	2.20
3	1.39	0.37	110.53	0.70	1.08	0.94	3.47
4	1.34	0.35	105.79	1.03	1.07	0.90	3.30
5	1.29	0.34	101.05	0.76	1.06	0.87	4.95
6	1.24	0.32	96.32	0.59	1.05	0.86	5.90
7	1.18	0.31	91.58	0.48	1.04	0.86	6.42
8	1.13	0.29	86.84	0.39	1.03	0.80	7.50
9	1.08	0.27	82.11	0.33	1.02	0.75	7.89
10	1.03	0.26	77.37	0.28	1.01	0.75	8.63
11	0.97	0.24	72.63	0.23	0.99	0.74	9.20
12	0.92	0.23	67.89	0.19	0.98	0.70	10.80
13	0.87	0.21	63.16	0.16	0.97	0.67	10.90
14	0.82	0.19	58.42	0.46	0.96	0.66	12.00
15	0.76	0.18	53.68	0.39	0.95	0.62	12.30
16	0.71	0.16	48.95	0.32	0.94	0.60	12.60
17	0.66	0.15	44.21	0.25	0.93	0.53	14.00
18	0.61	0.13	39.47	0.21	0.92	0.53	14.30
19	0.55	0.12	34.74	0.57	0.91	0.52	15.30
20	0.50	0.10	30.00	0.93	0.90	0.50	16.11

$$k_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_k - \bar{Y})^2 \tag{8}$$

式中： k_{ij} 为因素 i 在水平 j 下的实验方差值； N 为因素 i 在水平 j 下的实验次数； Y_k 为第 k 次实验的结果， $k=1, \dots, N$ ； \bar{Y} 为实验结果的平均值。

在数据分析时，如果使用公式手动计算存在效率低、错误率高、不够全面等问题。现代统计学软件的出现很好地解决了该问题，本文使用 IBM 公司的 SPSS 软件进行相应地分析和计算极差值，为本文中的分析计算提供更精确的数据支持。表 5 为各项参数对切断位移和剪切强度的极差分析结果^[9]。其中， K 值为某因素某水平时的方差和； K_{avg} 值为某因素某水平时的方差平均值； R 值表示因素的极差值，在本文中可以理解为此因素对求解目标的影响程度。表 6 为对应因素水平。

表 5 中共有两组数据，分别为：各项因素对切断位移的极差分析和各项因素对剪切强度的极差分析。从表 5 中可以看出：对于各因素对切断位移的影响程度而言， $d>D>\alpha>L>I$ ；而对于各因素对剪切强度的影响程度而言， $D>d>\alpha>L>I$ 。图 10 表达了各个因素各个水平的试验数据平均值情况。对于产品的设计来说，在多组曲线的交点周围可以基本确定该范围的数据最佳。

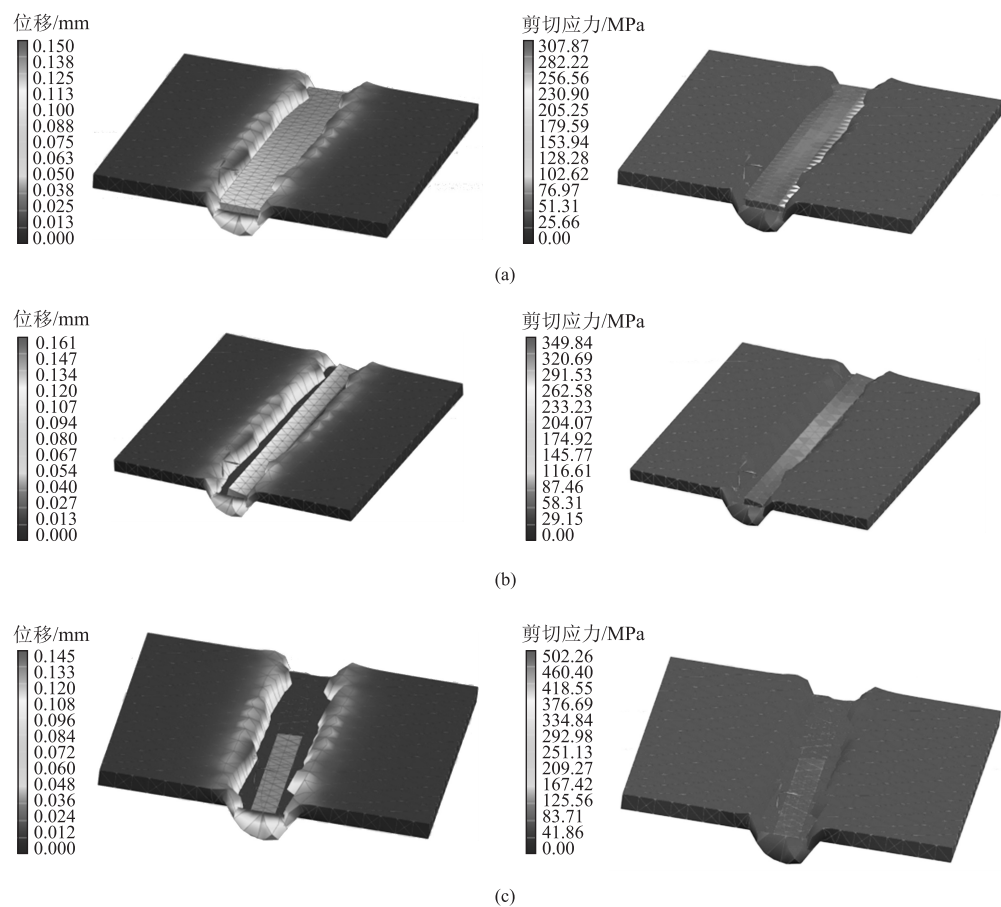


图 9 部分有限元结果

(a) 第 1 组位移、剪切云图 (b) 第 10 组位移、剪切云图 (c) 第 20 组位移、剪切云图

Fig. 9 Part results of finite element model

(a) Displacement and shear nephograms of group 1 (b) Displacement and shear nephograms of group 10

(c) Displacement and shear nephograms of group 20

表 5 各因素对切断位移和剪切强度的极差结果

Table 5 Range results of each factor on cutting displacement and shear strength											
结果	水平	切断位移					剪切强度				
		<i>D</i>	<i>d</i>	α	<i>I</i>	<i>L</i>	<i>D</i>	<i>d</i>	α	<i>I</i>	<i>L</i>
<i>K</i> 值	1	1.55	2.08	6.40	5.27	7.95	45.71	59.71	28.26	88.32	43.65
	2	6.02	5.49	4.41	2.94	3.52	98.32	84.32	54.92	38.22	51.53
	3	3.39	3.39	1.88	3.35	1.75	24.77	24.77	36.90	25.42	38.90
	4	1.84	2.79	1.06	1.81	1.05	6.77	8.97	28.30	8.42	29.60
	5	1.97	1.02	1.02	1.40	0.50	4.22	2.02	31.41	19.41	16.11
<i>K</i> _{avg} 值	1	0.52	0.52	0.91	0.66	0.88	15.24	14.93	4.04	11.04	4.85
	2	0.67	0.69	0.73	0.74	0.70	10.92	10.54	9.15	9.55	10.31
	3	0.85	0.85	0.63	0.84	0.58	6.19	6.19	12.30	6.36	12.97
	4	0.92	0.93	0.53	0.91	0.53	3.38	2.99	14.15	4.21	14.80
	5	0.98	1.02	0.51	0.70	0.50	2.11	2.02	15.71	9.71	16.11
最佳水平		5	5	1	4	1	1	1	5	1	5
<i>R</i> 值		0.47	0.50	0.40	0.25	0.38	13.13	12.91	11.67	6.83	11.26

表 6 因素水平表
Table 6 Factors and levels

水平	D/mm	d/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	L/mm	I/mm
1	0.55	0.12	105.79	0.23	0.92
2	0.87	0.19	72.63	0.39	0.98
3	1.18	0.31	53.68	3.00	1.06
4	1.34	0.37	44.21	0.76	1.08
5	1.45	0.40	34.74	0.90	1.10

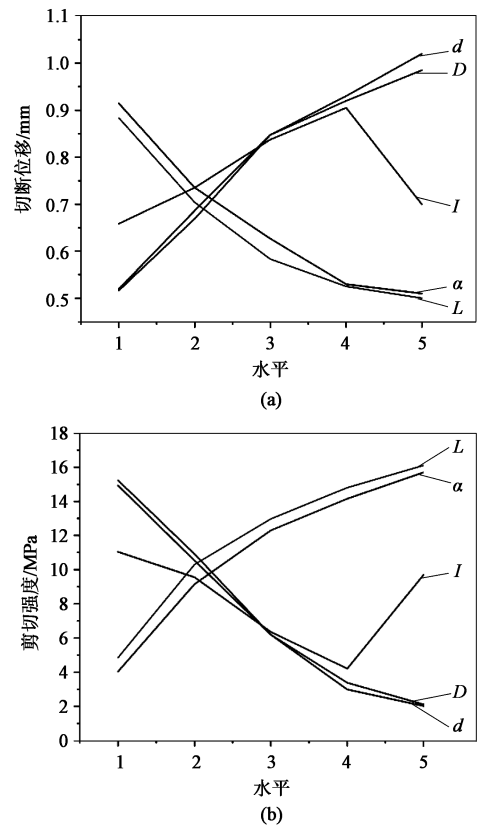


图 10 不同因素、水平下的均值曲线
(a) 切断位移 (b) 剪切强度
Fig. 10 Curves of mean value under different factors and levels
(a) Cutting displacement (b) Shear strength

3 构建 BP 神经网络

BP 神经网络在本文中的主要作用为：通过对输入和输出的样本训练来模拟出其中的关系。本文中的输入为齿模的 D 、 d 、 α 、 I 、 L 数据，输出为切断位移和剪切强度（图 11）。通过对无法用数据模型表达的隐含层进行“黑箱”样本训练，可以达到输入理想的切断位移和剪切强度值，反向推导出最优的齿模切削刃口参数值，以达到参数设计的最优化^[10]。

3.1 理论依据

BP 神经网络是一种黑箱预测，输入 X 与对应的隐含层进行不断拟合，其结果再通过激活函数后得到

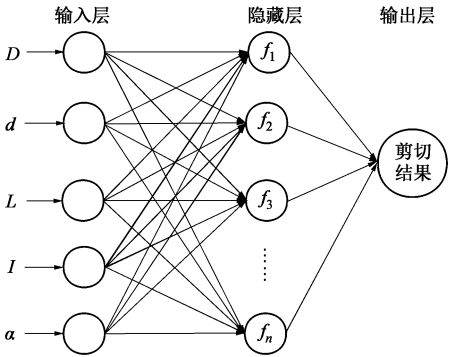


图 11 BP 神经网络原理图
Fig. 11 Principle diagram of BP neural network

了激活函数的最终值。其数学表达式如式（9）所示。

$$Y_{\text{out}} = \sum_{z=1}^n f_z(\omega X), z = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中： Y_{out} 为输出值； f_z 为激活函数； n 为隐藏层层数； ω 为权重。

通过构建输入、输出之间的关系，可以获得其预测值 y ，如式（10）所示。

$$y = \sum_{z=1}^n V_s f_z(\omega X), z = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中： V_s 为隐含层到输出层之间的权重。

求出的预测值不一定等于真实值，将真实值和预测值进行对比，即可得到其误差函数 J ，如式（11）所示。

$$J = (d - y)^2 \quad (11)$$

式中： d 为真实值。

为了求出误差函数和权重值对预测值的影响，在数学中可使用求偏导的方法进行求解，故本文对 J 和 ω 求偏导，如式（12）所示。

$$\frac{\partial J}{\partial \omega} = \frac{\partial J}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial Y_{\text{out}}} \cdot \frac{\partial Y_{\text{out}}}{\partial \omega} \quad (12)$$

系统的性能指标将随着迭代次数的增加而减小，经过权值的不断调整，性能指标不断降低，网络最后达到稳定状态^[11-12]。

3.2 训练结果

图 12 为训练值、预测值与真实值的对比图，将通过有限元计算出的数据分成 3 组，其中 90% 的数据用来训练，5% 的数据用来预测，5% 的数据用来对比，通过对比结果可以看出，3 组对比数据的拟合效果均达 0.96 以上（总分数为 1），整体数据排布线性且收敛，训练情况很好，也表示了其输入和输出值之间的关系已经训练得很接近。

3.3 训练结果对比检测

训练后的数据，使用任意的随机数据进行输入

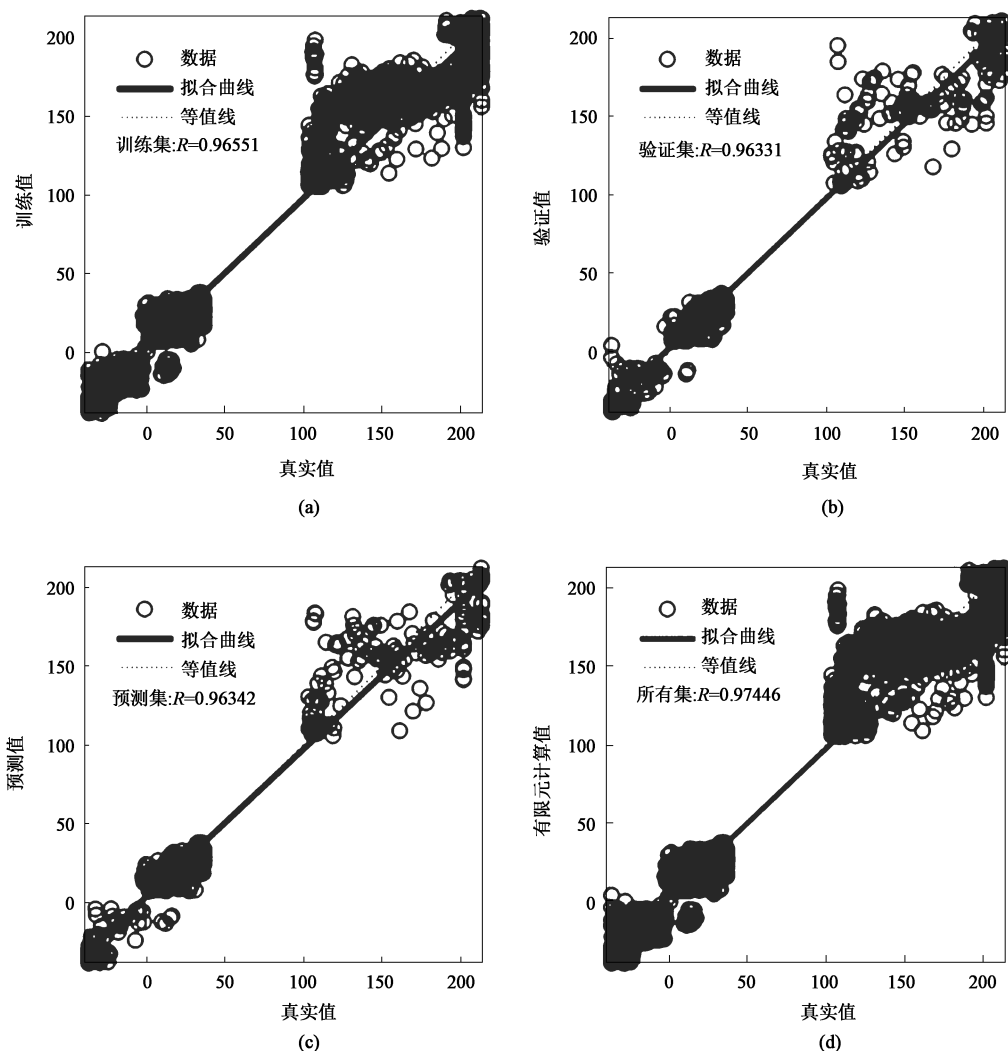


图 12 训练集、验证集、预测集与真实值对比图

(a) 训练集拟合情况 (b) 验证集拟合情况 (c) 预测集拟合情况 (d) 所有集拟合情况

Fig. 12 Comparison diagrams of training set, verification set, prediction set and real value

(a) Fitting of training set (b) Fitting of verification set (c) Fitting of prediction set (d) Fitting of all sets

不断训练,通过其正向传播和逆向反馈不断学习训练,最终达到稳定值。通过不断地迭代,当误差达到最小时训练停止。

此时,可以将输入数据和最初的实验真实值进行对比,对比真实值和预测值之间的误差,以检验该网络的拟合效果。如图 13 所示,为其 D 、 d 、 α 的真实值和预测值的偏差对比图。

3.4 结果求解

如图 14 所示,为输出的齿模参数最优结果。按照图 14 中的方式,输入指令 $y = \text{sim}(\text{net}, [0.18, 180])$,该指令表示:利用上述中的 BP 神经网络训练结果,输入其想要得到的最佳结果,切断位移为 0.18 mm,剪切强度为 180 MPa。完成后输出其最优参数组合为: $D = 1.6809$ mm、 $d = 0.2847$ mm、

$\alpha = 126.4890^\circ$ 、 $I = 0.2318$ mm、 $L = 1.2423$ mm,以上结果为通过上述拟合得到的最佳齿模参数。

4 实验验证

4.1 程序编写

通过上述的实验计算后,得到切削刃口的最佳参数为 $D = 1.6809$ mm、 $d = 0.2847$ mm、 $\alpha = 126.4890^\circ$ 、 $I = 0.2318$ mm、 $L = 1.2423$ mm,通过该实验结果绘制相应的齿模。绘制完成后通过编程软件编制相应的数控加工程序。如图 15 所示,为该齿模的数控加工路径示意图,按照该加工路径,生成该齿模的 NC 数控程序。

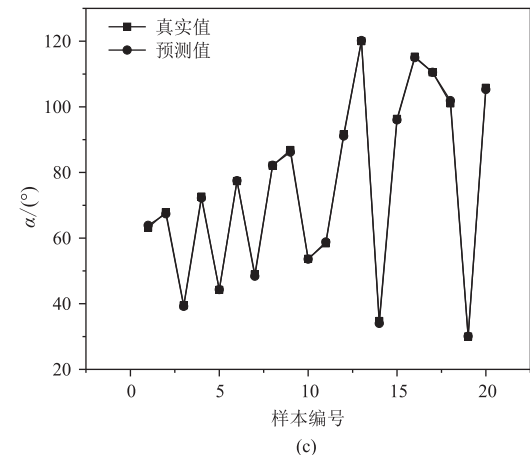
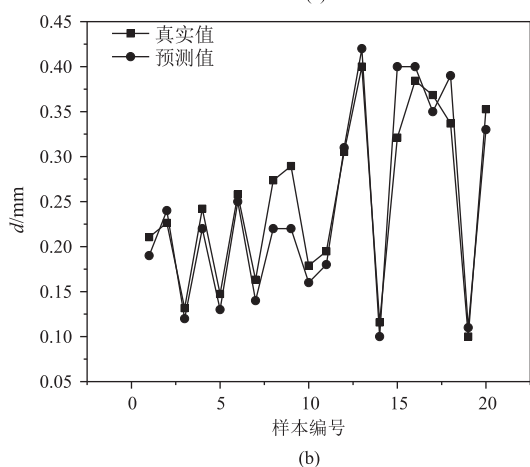
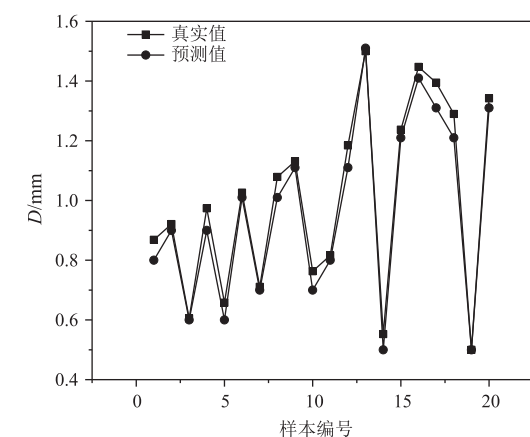


图 13 真实值及预测值偏差对比图

(a) D (b) d (c) α

Fig. 13 Comparison diagrams of deviation between actual values and prediction values

4.2 数控加工

如图 16 所示,为该齿模的实际数控加工场景图。将上述的数控程序通过后处理导出后,在数控加工中心上按照以下的工序依次进行:工件装夹、装刀具、对刀、寻找工件坐标、上传程序后,就可以按照相应的加工工艺进行模具的加工。此过程过于复杂,此处只做大概阐述^[13]。

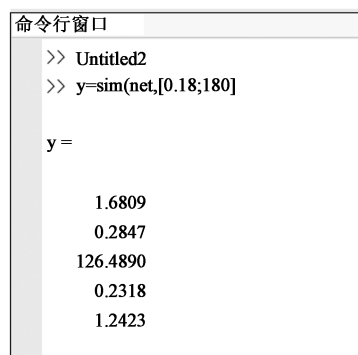


图 14 输出的齿模参数最优结果

Fig. 14 Optimal results of output tooth mold parameters

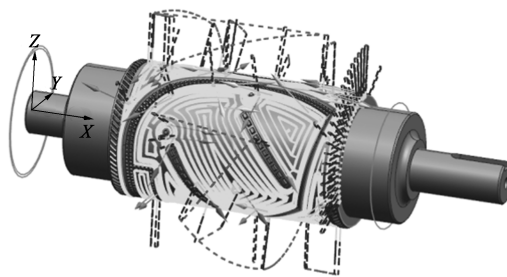


图 15 数控加工路径图

Fig. 15 NC processing path diagram

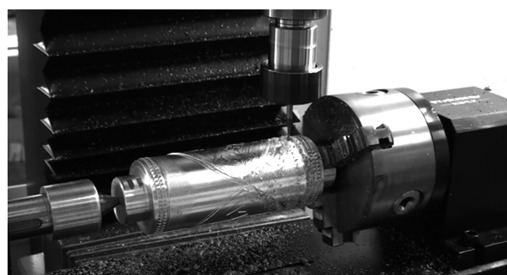


图 16 数控加工图

Fig. 16 NC machining diagram

4.3 实际环境验证

按照上述步骤将该齿模模具加工完成后,就可以开始实验,由于口罩的生产需要符合相应的卫生标准,所以,必须要在无尘无菌和特殊的光线下进行生产,特殊的光线是为了减少细菌的滋生,并且在生产时对无纺熔喷布进行照射。从图 17 中可以看出,在切割口罩的过程中切割顺滑,并且切割效果良好,口罩落料完整,能够将口罩完整切割下来。使用本文采用的方法获得的最优参数进行加工,优化效果明显。

5 结语

综上所述,本文对齿模切削刃口参数的 20 组单



图 17 无菌无尘暗光实验室切割实验

Fig. 17 Cutting experiment in aseptic and dust-free dark light laboratory

因素数据进行了有限元剪切分析,分别得到了不同刃口参数选择下的切削效果。通过有限元的计算数据,利用 Matlab 软件进行 BP 神经网络的构建,以结果为输入反向推出其切削刃口的最优参数值,不仅优化了该齿模切削刃口的结构,而且通过实验验证了研究数据的正确性和可靠性。本文为此类新型模具的设计提供了优化的参考,为此类模型提供了优化的思路,为抗疫装备的制造提供了可靠的技术借鉴。

本文虽然已经拥有了较为完整的研究思路,但是由于制造成本过高,在多组实验中未能全部开展实物验证实验,在后续的科研中希望加以完善。

参考文献:

- [1] 刁文海, 罗一鸣. 口罩熔接齿模的数控编程与工艺设计 [J]. 机电工程技术, 2020, 49 (11): 201-203.
Diao W H, Luo Y M. CNC programming and process design of mask welding tooth die [J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2020, 49 (11): 201-203.
- [2] 张桂花, 谢正. 基于 UG12.0 的 N95 口罩齿模加工铣削策略探讨 [J]. 装备制造技术, 2022, (3): 131-134, 142.
Zhang G H, Xie Z. Discussion on machining and milling strategy of N95 mask tooth die based on UG12.0 [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2022, (3): 131-134, 142.
- [3] 魏文强, 程国飞, 丁立刚, 等. 基于 CimatronE 的口罩机熔接齿模滚筒高效加工 [J]. 模具制造, 2020, 20 (5): 70-72.
Wei W Q, Cheng G F, Ding L G, et al. Efficient processing of mask machine welding tooth mold drum based on CimatronE [J]. Mold Manufacturing, 2020, 20 (5): 70-72.
- [4] 叶霖, 朱青. 浅谈熔喷布工艺、质量及抑菌作用机制 [J]. 山东化工, 2021, 50 (23): 76-78.
Ye L, Zhu Q. On the technology, quality and antibacterial mechanism of meltblown cloth [J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50 (23): 76-78.
- [5] 闻奇勤, 汪利斌. 聚丙烯熔喷布过滤性能的影响因素研究 [J]. 广东化工, 2021, 48 (21): 85-87, 92.
Wen J Q, Wang L B. Study on the influencing factors of filtration performance of polypropylene meltblown cloth [J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48 (21): 85-87, 92.
- [6] 王明芳, 周凤. 基于环境因素的驻极熔喷布及静电纺丝膜性能研究 [J]. 辽宁丝绸, 2022, (2): 1-3.
Wang M F, Zhou F. Research on the properties of electret meltblown cloth and electrospinning film based on environmental factors [J]. Liaoning Silk, 2022, (2): 1-3.
- [7] 邵亚军. 3Cr2W8V 模具钢高速铣削建模优化与热塑失稳研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
Shao Y J. Research on Modeling Optimization and Thermoplastic Instability of High-speed Milling of 3Cr2W8V Die Steel [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [8] 谢映光, 梁满朝, 王成磊, 等. 铝合金控制臂锻造工艺及模具有限元模拟优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 7-13.
Xie Y G, Liang M C, Wang C L, et al. Forging process of aluminum alloy control arm and finite element simulation optimization of die [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 7-13.
- [9] 汪永明, 李俊, 谈莉斌, 等. 基于正交实验的弯链板 U 弯冲压成形数值仿真 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (12): 46-53.
Wang Y M, Li W, Tan L B, et al. Numerical simulation of U-bend stamping forming of bent chain plates based on orthogonal experiment [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (12): 46-53.
- [10] Sun X, Lei Y. Research on financial early warning of mining listed companies based on BP neural network model [J]. Resources Policy, 2021, 73: 102223.
- [11] 张坚, 双远华, 胡建华, 等. 基于改进的 BP 神经网络无缝钢管连轧轧制力的预测 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 153-160.
Zhang J, Shuang Y H, Hu J H, et al. Prediction of continuous rolling force of seamless steel pipe based on improved BP neural network [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 153-160.
- [12] 郭全法, 张贵豪, 王普, 等. 基于遗传优化 BP 神经网络的发动机曲轴扭转减振器优化 [J]. 现代制造工程, 2019, (12): 24-31.
Wu Q F, Zhang G H, Wang P, et al. Optimization of engine crankshaft torsional damper based on genetic optimization BP neural network [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019, (12): 24-31.
- [13] 杨根, 张立昌, 林何, 等. 航空叶片精锻模具设计与数控加工 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (15): 109-113.
Yang G, Zhang L C, Lin C, et al. Design and CNC machining of precision forging die for aviation blades [J]. Machine Tools and Hydraulics, 2020, 48 (15): 109-113.