

基于模糊综合理论的格架条带级进模排样评价

袁佳健¹, 毛建中², 雷从一², 张小民², 王 犇³

(1. 湖南交通职业技术学院 机电工程学院, 湖南 长沙 410132; 2. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082;
3. 国核宝钛锆业股份公司, 陕西 宝鸡 721013)

摘要: 格架条带是核燃料组件中的关键零件。为对冲制格架条带的级进模排样方案进行较客观的量化综合评价, 针对格架条带的行业特点和应用环境, 构建了考虑产品、模具、经济3个方面的多层次综合评价指标体系, 并基于模糊综合理论建立了用于评价格架条带级进模排样方案的模型; 通过对排样的有限元模拟分析, 得到用于综合评价的原始数据, 开展了对某试验型格架条带级进模排样的量化综合评价, 最后通过物理冲制试验, 验证了较优排样方案的可行性。结果表明: 利用排样方案的有限元模拟分析结合模糊综合理论建立的综合评价模型, 能够在格架条带的级进模排样设计阶段提供低成本且较为客观的有益指导, 有助于更好地优化模具设计和提升产品的冲制质量与效益。

关键词: 格架条带; 级进模; 排样; 模糊综合理论; 综合评价

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.034

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 10-0243-07

Layout evaluation on grid strip progressive die based on fuzzy synthesis theory

Yuan Jiajian¹, Mao Jianzhong², Lei Congyi², Zhang Xiaomin², Wang Ben³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Communication Engineering Polytechnic, Changsha 410132, China;
2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. State Nuclear Bao Ti Zirconium Industry Co., Ltd., Baoji 721013, China)

Abstract: The grid strip is a key part of components in nuclear fuel assembly. In order to conduct a more objective and quantitative comprehensive evaluation on the progressive die layout scheme for punching grid strip, a multi-level comprehensive evaluation index system was constructed considering the three aspects including product, die and economy according to the industry characteristics and application environment of the grid strip, and based on the fuzzy synthesis theory, a model for evaluating the progressive die layout scheme of the grid strip was established. Then, the original data for comprehensive evaluation was obtained by the finite element simulation analysis (FESA) of the layout, and the quantitative comprehensive evaluation was carried out on the progressive die layout of a certain experimental grid strip. Finally, the feasibility of the optimized layout scheme was verified through the physical punching test. The results show that the comprehensive evaluation model established by the combination of FESA of the layout scheme with the fuzzy synthesis theory can provide low-cost and objective helpful guidance in the layout design stage of the progressive die for the grid strip, and it is beneficial for the better optimization of die design and the improvement of punching quality and efficiency for product.

Key words: grid strip; progressive die; layout; fuzzy synthesis theory; comprehensive evaluation

定位格架是核燃料组件的重要组成部分, 是反应堆内核心的骨架支撑结构, 由多种类型的条带和导向管组装而成; 格架条带的产品质量将直接影响核燃料组件在堆内的稳定运行^[1], 因此,

研究如何评价冲制格架条带的级进模排样, 对优化级进模结构、提升条带冲制质量和效益具有重要的工程应用价值, 进而促进我国核电安全、稳定发展。

级进模排样是指在需要冲裁的料带上进行多个冲制工位的布局设计, 是模具设计过程中最核心的参照依据, 排样设计的优劣将对冲制产品的精度、成本、效率以及模具寿命等造成重要影响^[2]。面对各行业中种类繁杂的冲制产品, 级进模的排样难以有确定性的设计准则, 需要权衡的因素具有一定模

收稿日期: 2021-10-12; 修订日期: 2022-01-13

基金项目: 国家科技重大专项 (761215007)

作者简介: 袁佳健 (1991-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: danny66163@163.com

通信作者: 毛建中 (1963-), 男, 博士, 教授

E-mail: maojianzhong66@163.com

糊性,通常由模具设计人员根据产品特征和技术要求进行经验设计,人为主观因素的影响大,排样方案的优劣难以在设计之初进行综合性的评价与验证,常需要在模具制造和产品生产期间加以改进,往往需要耗费较多的时间和物料成本。

近年来,许多国内外学者利用模糊综合理论对难以进行综合评估的设计方案进行了广泛研究,取得了大量成果。饶东等^[3]针对列车驾驶界面布局设计方案,建立了多层次评价指标体系和模糊综合评价模型,并对列车驾驶界面布局进行了综合的量化评价。Yeo S H 等^[4]对具有模糊性的产品概念设计方案,使用多层次模糊评价方法进行了综合评价。雍昭君^[5]建立了无人机三维摄影方案的多层次模糊综合评价模型,确定了影响摄影建模精度的各参数的权重值,并通过实测数据验证了评价结果的准确性。罗曦等^[6]利用模糊综合理论对烟草配送的车组方案进行了综合评价,较为全面、客观地反应了车组方案的服务水平。朱学梅^[7]对输变电工程的设计方案建立了多层次的模糊评价体系,用于确定最优的输电方案。常瑜等^[8]基于模糊综合评价法建立了扫地车造型设计方案的量化评价模型,得到了相对最佳的设计方案。

当前,针对级进模排样方案的研究主要集中在产品冲制的完整性和模具设计的合理性方面^[9],对于如何客观地量化评价排样方案的研究极少,并且现有对排样的研究常忽略冲制产品的行业背景和实际应用情况,难以对排样方案形成综合性的分析。所以,本文以格架条带的级进模排样方案为对象,针对核电用格架条带材料价格昂贵、冲制特征复杂、试验成本高等特点^[10],通过有限元模拟初步分析格架条带的排样方案,利用模糊综合理论从产品、模具、经济 3 个方面建立排样方案的评价指标体系和评价模型,进行格架条带级进模排样方案的量化综合评价研究,以期对格架条带的级进模设计与冲制产品质量和效益的提升提供帮助。

1 模糊综合评价模型建立

模糊综合评价是一种基于模糊隶属度理论,实现定性、定量相结合的评价方法,可对一些具有不确定性、模糊性的难量化问题进行主、客观结合的综合评价。本文将根据格架条带的行业特点与使用情况,基于模糊综合理论提出一种适用于格架条带级进模排样的综合评价模型。

1.1 综合评价指标体系

为了保证级进模排样评价的科学性和全面性,需要对冲制产品的生产过程和应用环境进行充分的研究。格架条带级进模排样综合评价指标的建立,首先要保证冲制产品的性能满足设计要求,产品的冲裁精度、成形精度、整体形变是决定排样方案是否合理的关键指标;其次,由于格架条带的特征复杂,常需要将较多的冲裁、成形工序进行组合,模具压力中心和冲床压力中心难以适配,甚至部分冲制工序必须为可编程控制的间歇工序,这些因素均将导致格架条带冲制模具的稳定性受到影响;另外,进行格架条带大规模生产时,级进模的排样还将对生产效率和模具成本产生显著影响。

综上所述,提取影响格架条带生产和应用的主要因素,按分类层和指标参数层构建格架条带级进模排样的综合评价指标体系,如图 1 所示。

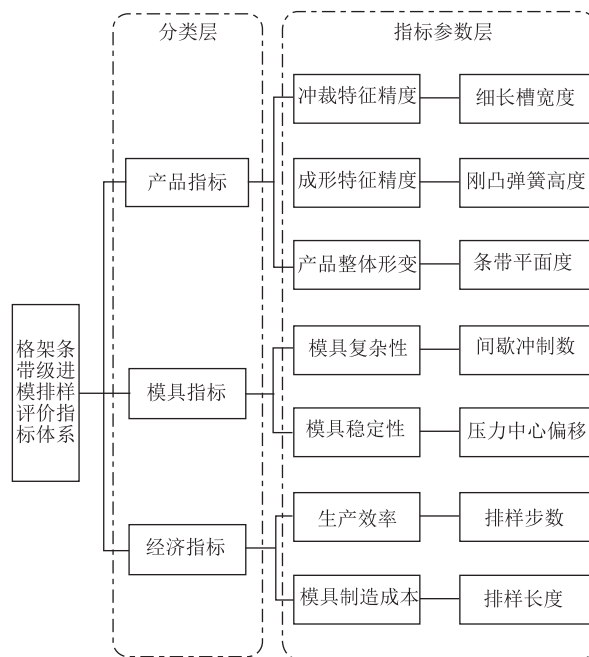


图 1 格架条带级进模排样综合评价指标体系

Fig. 1 Comprehensive evaluation index system for layout of grid strip progressive die

1.2 模糊综合评价模型

由于格架条带冲制的物理试验周期长、成本大,本文通过对排样过程进行有限元模拟分析,从模拟结果中获取指标参数层的各项数据,再基于隶属度函数进行模糊变换,从而获得各类指标参数的评价矩阵,之后将获得的评价矩阵及其权重值进行逐层模糊运算,最终获得格架条带级进模排样的模糊综合评价模型。现对该评价模型的建立要素和过程进行阐述。

1.2.1 建立评价因素集

评价指标体系包含分类层和指标参数层, 定义包含 n 个分类的因素集 $U = \{u'_1, u'_2, \dots, u'_i, \dots, u'_n\}$, $i=1, \dots, n$, 定义第 i 个分类包含 m_i 个指标参数, 即 $u'_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ij}, \dots, u_{im_i}\}$, $j=1, \dots, m_i$ 。

1.2.2 建立评价权重集

为反应各因素在目标评价中的重要程度, 实现定量与定性相结合的复杂问题分析, 采用层次分析法确定各评价要素的权重, 对各项指标进行两两比较判断, 权值使用数字 1~9 及其倒数作为衡量标准^[11], 构建的 h 个要素的权重判断矩阵 A 如下:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1h} \\ a_{21} & a_{22} & a_{cg} & a_{2h} \\ \vdots & a_{gc} & \cdots & \vdots \\ a_{h1} & a_{h2} & \cdots & a_{hh} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $a_{cg} = 1/a_{gc}$, $g, c=1, \dots, h$ 。对权重判断矩阵进行归一化处理, 得到各要素的相对权重向量 $W = (\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_h)^T$, 并进行比较矩阵的一致性检验, 保证各因素重要程度之间的协调性。计算一致性的指标 CI 为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - q}{q - 1} \quad (2)$$

式中: q 为权重判断矩阵的阶数; λ_{\max} 为权重判断矩阵的最大特征根。

计算平均一致性的指标 CR 为:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

式中: RI 为与权重判断矩阵的阶段数相关的判断指数。当 $CR < 0.1$ 时, 认为权重判断矩阵的一致性可接受, 否则需要对权重判断矩阵进行修正^[12]。

1.2.3 建立评语集

评语集 V 为各种评价结果所组成的集合, 定义 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$, 其中 k 表示评价等级数量。本文采用 5 级评语集, 评语等级和含义如表 1 所示。

表 1 评价等级与对应说明

Table 1 Evaluation level and corresponding description		
等级	分值	含义
很好	5	完全满足设计要求, 性能很好
好	4	基本满足设计要求, 性能较好
一般	3	部分满足设计要求, 性能一般
较差	2	基本不满足设计要求, 性能较差
差	1	完全不满足设计要求, 性能差

1.2.4 建立模糊关系矩阵

由于格架条带级进模排样的综合评价指标体系均由连续型因素组成, 选用三角形隶属度函数来表达各评价因素与评价等级之间的隶属度。利用有限元模拟得到各项指标参数, 基于隶属度函数进行模糊转换, 从而形成指标参数层的模糊向量。定义指标参数层中 b 个参数对应的模糊向量构成了指标参数层的模糊评价关系矩阵 M , 表示为:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1k} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{b1} & m_{b2} & \cdots & m_{bk} \end{bmatrix} \quad (4)$$

采用 $M(\bullet, +)$ 模型进行模糊运算, 第 i 个分类的模糊评价向量 S_i 为:

$$S_i = W_b \cdot M = [\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_b] \cdot \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1k} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{b1} & m_{b2} & \cdots & m_{bk} \end{bmatrix} = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ik}] \quad (5)$$

式中: W_b 为第 i 个分类中各指标参数的相对权重向量。

因此, 通过计算所有分类的模糊评价向量得到分类层的模糊评价结果矩阵 S 为:

$$S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1k} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

同样, 采用 $M(\bullet, +)$ 模型进行模糊运算, 得到最终的格架条带级进模排样方案的总评价向量 E 为:

$$E = W_n \cdot S = [\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_n] \cdot \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1k} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nk} \end{bmatrix} = [e_1, e_2, \dots, e_k] \quad (7)$$

式中: W_n 为 n 个分类的相对权重向量。

定义评价等级的分值为向量 $Q = [5, 4, 3, 2, 1]$, 则可将格架条带级进模排样评价的综合满意度转化为量化分值 $score = Q \cdot E^T$ 。综合评分越高, 则代表排样方案越好, 反之则代表方案越差。

2 格架条带级进模排样综合评价实例

2.1 评价对象

以某试验型格架条带的级进模排样为对象, 应

用本文提出的综合评价方法进行研究，试验型格架条带如图 2 所示。通过对该试验型格架条带进行特征分析，初步设计出 6 种级进模排样方案，不同方

案在冲裁顺序、成形先后、布局长度等方面存在差异，但理论上均能完成该试验型格架条带的级进模冲制。

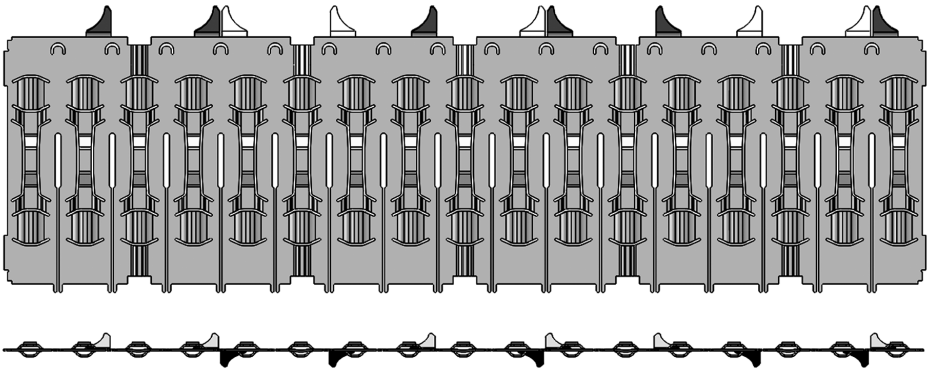


图 2 某试验型格架条带图
Fig. 2 Diagram of a certain experimental grid strip

2.2 基于有限元模拟的格架条带级进模排样分析

使用 AUTOFORM 软件模拟格架条带级进模的冲制过程，严格按照排样方案进行冲裁、成形工序的布局，并在对应工序处设置导正钉进行定位约束。

排样方案 1 的模拟结果如图 3 所示。在有限元模拟的后处理中，记录格架条带的开口细长槽宽度、刚凸高度、弹簧高度等数据信息，数据采集部位如图 4 所示。

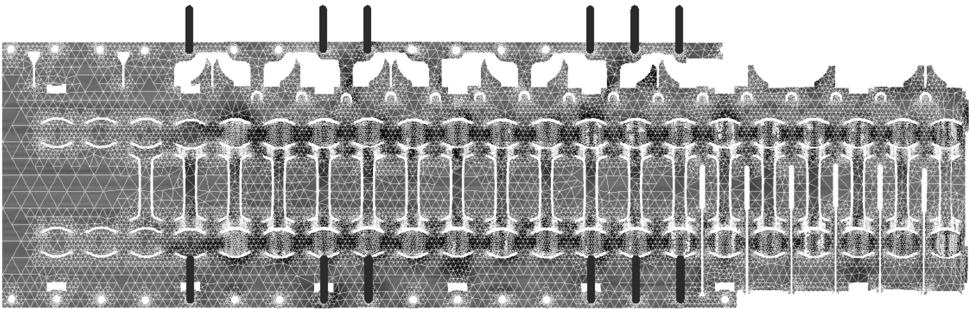


图 3 排样方案 1 的有限元模拟图
Fig. 3 Finite element simulation diagram of layout plan 1

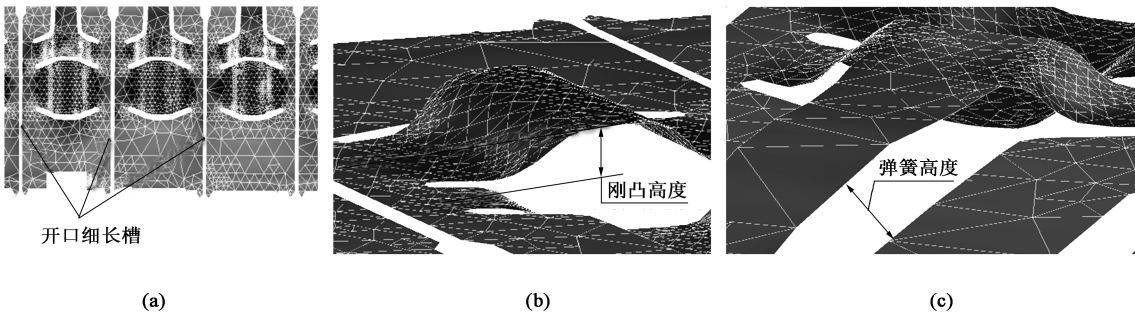


图 4 格架条带参数采集部位图
(a) 开口细长槽宽度 (b) 刚凸高度 (c) 弹簧高度
Fig. 4 Collection location maps of grid strip parameters
(a) Opening slender slot width (b) Rigid convex height (c) Spring height

以有限元模拟条带主平面上的法向距离最大值作为条带平面度的数据；收集有限元模拟排样中每道工

序的冲裁力和成形力数据，结合排样中的工序位置坐标，利用式 (8) 和式 (9) 计算压力中心的坐标位置。

$$X = \frac{F_1x_1 + F_2x_2 + \cdots + F_px_p}{F_1 + F_2 + \cdots + F_p} = \sum_{e=1}^p F_e x_e / \sum_{e=1}^p F_e \tag{8}$$

$$Y = \frac{F_1y_1 + F_2y_2 + \cdots + F_py_p}{F_1 + F_2 + \cdots + F_p} = \sum_{e=1}^p F_e y_e / \sum_{e=1}^p F_e \tag{9}$$

式中： X 为沿模具送料方向的压力中心坐标数据； Y 为沿垂直于模具送料方向的压力中心坐标数据； F_e 为工序 e 的冲裁力和成形力大小； x_e 为工序 e 沿模具送料方向的坐标数据； y_e 为工序 e 沿垂直于模具

送料方向的坐标数据； $e = 1, \cdots, p$ ； p 为排样中的工序数量。

以压力中心位置和排样中心位置的距离作为压力中心偏移量。对全部的 6 种格架条带级进模排样方案进行有限元模拟后，统计所需评价指标参数的平均值，如表 2 所示。其中，开口细长槽的宽度尺寸为格架组装的技术指标，其设计值为 0.50 (−0.004~+0.109) mm；刚凸高度为限制燃料棒空间位置的技术指标，其设计值为 1.36 (±0.076) mm；弹簧高度为提供燃料棒夹持力的技术指标，设计值为 1.65 (±0.075) mm。

表 2 6 种排样方案的有限元模拟指标参数
Table 2 Finite element simulation index parameters of six layout schemes

方案	细长槽宽度/ mm	刚凸高度/ mm	弹簧高度/ mm	条带平面度/ mm	间歇冲制数/ 个	压力中心 偏移/mm	排样步数/ 步	排样长度/ mm
1	0.52	1.34	1.63	2.19	14	34.25	46	561.79
2	0.54	1.36	1.64	2.23	12	23.20	44	549.19
3	0.66	1.35	1.64	4.12	12	10.73	46	561.79
4	0.57	1.35	1.63	3.57	14	16.33	44	549.19
5	0.59	1.34	1.64	3.28	13	20.27	41	511.59
6	0.62	1.34	1.63	3.89	12	17.73	41	511.59

2.3 综合评价指标权重集建立

根据评价权重集的建立要求，邀请 6 位级进模设计人员，详细地为其介绍格架条带的行业、应用背景，采用均值法对专家评价数据进行汇总，建立两两比较矩阵，得出产品、模具和经济 3 个分类对排样评价的权重判断矩阵 A ，以及与各指标参数对应分类的权重判断矩阵 $A_1 \sim A_3$ ，见式 (10)~式 (13)。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 3 \\ 1/4 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 2 \\ 2 & 1 & 1/2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 & 4 \\ 1/2 & 1/3 & 1/4 & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 5 \\ 1/5 & 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

对权重判断矩阵 A 进行一致性检查，查询 3 阶矩阵的判断指数 $RI = 0.58$ ，计算得到 $CR = 0.0158 < 0.1000$ ，说明权重判断矩阵 A 具有较好的一致性。

对其他权重判断矩阵进行相同检验，均满足一致性条件。对权重判断矩阵 A 进行归一化处理，得到相对权重向量 $W = (0.6232, 0.1373, 0.2395)^T$ ，整理全部权重判断矩阵归一化处理后的评价指标权重如表 3 所示。

表 3 评价指标权重
Table 3 Evaluation index weight

评估分类	权重/%	评估指标参数	权重/%
产品	62.32	冲裁特征精度	16.11
		刚凸成形精度	27.72
		弹簧成形精度	46.58
		条带整体变形	9.60
模具	13.73	模具复杂性	33.33
		模具稳定性	66.67
经济	23.95	生产效率	83.33
		模具制造成本	16.67

2.4 综合模糊评价模型与结果

收集专家对各项指标参数的评语形成模糊关系矩阵，采用 $M(\bullet, +)$ 模型进行模糊运算，得到各排样方案的综合评分。如排样方案 1 中产品类指标的模糊评价向量 S_1 为：

$$S_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5833 & 0.4167 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8824 & 0.1176 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4692 & 0.5308 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

格架条带级进模排样方案 1 的总评价向量 E_1 为:

$$E_1 = [0.1611 \quad 0.2771 \quad 0.4658 \quad 0.0960] \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5833 & 0.4167 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8824 & 0.1176 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4692 & 0.5308 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0 \quad 0.6639 \quad 0.2690 \quad 0.0671 \quad 0] \quad (15)$$

排样方案 1 的综合量化评分 $score_1$ 为:

$$score_1 = Q \cdot E_1^T = 3.5968 \quad (16)$$

对 6 种格架条带级进模排样方案进行综合评价, 结果见表 4, 发现第 2 种排样方案具有最高的量化

得分 4.4611, 说明排样方案 2 是现有 6 套方案中从产品、模具和经济多方面考虑下的最优方案, 排样方案 2 如图 5 所示。

表 4 综合量化评分结果

Table 4 Comprehensive quantitative scoring results

排样方案	1	2	3	4	5	6
综合评分	3.5968	4.4611	4.1342	3.8392	3.0604	3.1517

2.5 格架条带级进模排样方案的物理验证

根据格架条带排样方案 2 进行级进模设计与制造, 并进行格架条带冲制试验, 试验结果如图 6 所示。试验结果表明, 排样方案 2 能够顺利冲出满足设计要求的格架条带, 且在格架条带的产品性能、模具制造生产等多方面具有较好的综合表现。

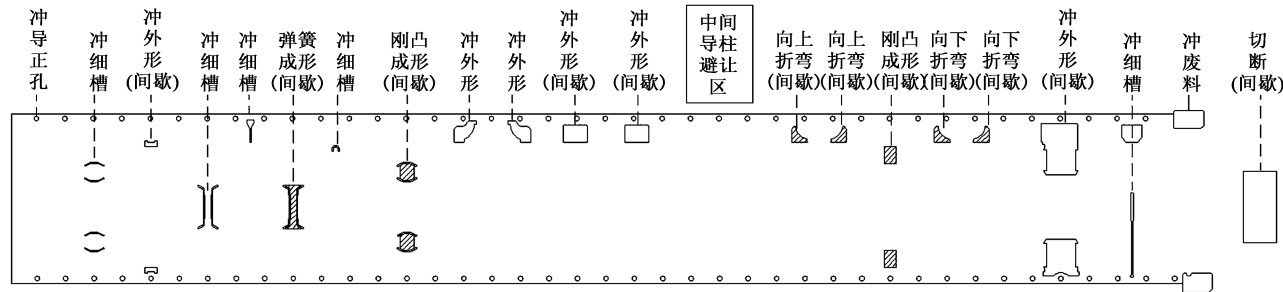


图 5 排样方案 2 的布局图

Fig. 5 Arrangement diagram of layout plan 2



图 6 排样方案 2 的冲制效果图

Fig. 6 Punching effect diagram of layout plan 2

3 结论

(1) 针对格架条带材料昂贵、试验成本高的特殊性, 本文对级进模排样方案进行了有限元模拟分析, 为排样的综合评价提供了可供比对、分析的数据, 同时也初步验证了排样方案的可行性, 有利于在模具设计早期发现问题, 极大地减少了格架条带级进模的设计和试验成本。

(2) 本文根据格架条带的行业背景和实际应用情况, 从产品、模具和经济 3 个方面构建了多层次的模糊综合评价指标体系和评价模型, 以较为客观

的方式进行了格架条带级进模排样方案的量化综合评价, 实现排样方案合理性的直观体现, 并通过物理试验, 证明了较优排样方案的可行性。

(3) 利用级进模排样方案的有限元模拟分析结合模糊综合评价指标体系和模型的建立, 为级进模的排样设计和量化综合评价提供了一种低成本且较为科学有效的方法, 有助于更好地针对不同行业的特点进行级进模的设计优化与冲制产品质量和效益的提升。

参考文献:

[1] Li Y L, Cao H, Wang S H, et al. Load shifting of nuclear power plants using cryogenic energy storage technology [J]. Applide En-

- ergy, 2014, 113, 1710–1716.
- [2] 袁博, 陈淑花. 压簧折弯多工位级进模具设计 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 190–193.
Yuan B, Chen S H. Design on multi-station progressive die for pressure spring bending [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 190–193.
- [3] 饶东, 陈悦源, 吕文龙. 基于多层次模糊理论的列车驾驶界面布局综合评价 [J]. 包装工程, 2021, 42 (4): 61–69.
Rao D, Chen Y Y, Lyu W L. Comprehensive evaluation of human-machine interface layout in train driving cab based on the multi-level fuzzy theory [J]. Packaging Engineering, 2021, 42 (4): 61–69.
- [4] Yeo S H, Mak M W, Balon S A P. Analysis of decision-making methodologies for desirability score of conceptual design [J]. Journal of Engineering Design, 2004, 15 (2): 195–208.
- [5] 雍昭君. 无人机倾斜摄影测量三维建模精度多层次模糊综合评价研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
Yong Z J. Research on Multi-level Fuzzy Comprehensive Evaluation of 3D Modeling Accuracy of UAV Tilt Photogrammetry [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019.
- [6] 罗曦, 张鹭, 杨欢. 基于模糊综合评价和神经网络的烟草配送车组评价模型 [J]. 物流技术, 2021, 40 (2): 60–66.
Luo X, Zhang Y, Yang H. Evaluation model of tobacco distribution fleet based on fuzzy comprehensive evaluation and neural network [J]. Logistics Technology, 2021, 40 (2): 60–66.
- [7] 朱雪梅. 基于模糊层次分析法的输变电工程设计研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- Zhu X M. Research on Design of Power Transmission and Transformation Engineering Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.
- [8] 常瑜, 刘宝顺, 田园. 基于层次分析法的扫地车造型模糊综合评价方法及应用 [J]. 机械设计, 2017, 34 (3): 121–125.
Chang Y, Liu B S, Tian Y. Method and application of fuzzy comprehensive evaluation of sweeping vehicle modeling based on AHP [J]. Journal of Machine Design, 2017, 34 (3): 121–125.
- [9] 李勇. 基于虚拟技术的冲制生产线级进模排样技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
Li Y. Research on Layout Technology for Progressive Die Used in Punching Production Line Based on Virtual Technology [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [10] 吕晓芳. 镍基合金核燃料格架条带冲压成形数值仿真与试验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
Lyu X F. Nickel-based Alloy Nuclear Fuel Spacer Grid Stamping Numerical Simulation and Experiment Study [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [11] 冯永岗. 列车驾驶仿真器操作评价系统的设计与开发 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
Feng Y G. The Design and Development of the Operation Evaluation System of Train Driving Simulator [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [12] Wang K, Zhao N, He Q. A quality analysis method for three-dimensional model in aircraft structural parts design [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13 (3): 1–16.

AFDEX

INTELLIGENT METAL FORMING SIMULATOR

智能化金属成形模拟软件

◆**易用**: 简单、友好, 且在不断优化的操作界面, 大量的学习向导以及应用实例, 使工程师不但上手轻松, 更不会在使用中气馁, AFDEX 可以帮助您轻松分析锻造工艺。

◆**准确**: 超过 500 个实际生产应用案例, 包含复杂的冷温热多工位锻造、闭塞锻造、径向锻造、辊锻、辗环等几乎所有锻造成形工艺的模拟。AFDEX 的准确性和能力, 已经在全球百余家制造企业的生产中得到了验证。

◆**各种结果同时展示**: AFDEX 的后处理平台, 可以在运算的同时, 实时显示各种结果: 变形形状、节点的速度、应变、应变率、应力、金属流线、某点流动、边界节点应力、界面应力、温度分布、损伤、磨损、体积变化、载荷等。

◆**自动分析多工位工艺, 轻松进行模具分析**: AFDEX 可以自动对多工位的锻造工艺进行模拟, 无需用户的干预。模具分析与优化是工程师的重要工作, 在 AFDEX 中, 您只需要点击两下鼠标, 即可以对模具进行模拟分析, 结果实时展示给用户。

◆**丰富的材料库与设备模型**: AFDEX 中提供了丰富的开放式材料数据库, 包括美日德标的各种黑色金属、轻合金以及模具钢等两百余种材料数据。用户也可根据自己的需要定制材料库。另外, AFDEX 集成了实际生产中常用的设备模型, 包括液压机、机械压力机、螺旋

压力机、锻锤等。可以满足用户各种成形条件下模拟的需要。

◆**适合多种人群使用**: AFDEX 不强迫锻造工程师了解软件执行的相关理论和有限元方法, 在 AFDEX 的开发理念中, 即使是新手也能轻松的学习和使用它。同时 AFDEX 提供了多国语言界面的支持。

◆**卓越的成本效益**: AFDEX 更了解中国, 专为中国用户而制定的低成本运作政策, 显著降低了用户的采购及使用成本, 具有卓越的成本效益。

◆**我们能够提供的不仅是软件**: AFDEX 一直坚持的开发商与服务商一体化, 可以提供更好的本土化服务与定制服务。中韩技术团队, 为您提供终身的维护服务。在软件之外, 我们更可以为您提供工艺技术开发与制造服务, 协助您进行工艺开发、优化设计、学术研究、装备与生产线建设。

BRIMET 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司

地址: 北京市海淀区学清路 18 号 2 层 邮编: 100083

电话: 010-82415037, 82415024 传真: 010-62943911

E-mail: info@afdex.com.cn, afdexcn@gmail.com

HTTP://WWW.AFDEX.COM.CN

(以上数据和资料由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司提供)