

基于改进 TOPSIS-灰色关联分析的 QSn7-0.2 锡青铜 变薄拉深多目标优化

申 博¹, 郭文孝^{2,3}

(1. 山西水利职业技术学院 机电工程系, 山西 太原 030006; 2. 中国煤炭科工集团太原研究院有限公司, 山西 太原 030006; 3. 山西天地煤机装备有限公司, 山西 太原 030006)

摘要: 为提高 QSn7-0.2 锡青铜连杆衬套变薄拉深成形质量、实现降本增效, 将优劣解距离法 (TOPSIS) 与灰色关联分析法相结合, 提出一种改进 TOPSIS-灰色关联分析多目标评价体系, 以 QSn7-0.2 锡青铜连杆衬套为研究对象, 选定变薄率、凹模锥角、拉深速度、摩擦因数为工艺因素变量, 设计 4 因素 5 水平正交试验, 并在 ABAQUS 软件中进行变薄拉深工艺数值模拟分析。以成形件屈服强度、抗拉强度、残余应力、拉深力为综合优化目标, 利用 CRITIC 法对多个优化目标权重进行客观赋值, 将多目标优化问题转换为单目标优化问题, 最终获得 QSn7-0.2 锡青铜变薄拉深最优工艺参数组合为: 变薄率为 42%、凹模锥角为 9°、拉深速度为 $16 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.15。最优工艺参数组合下工件的屈服强度为 587 MPa、抗拉强度为 643 MPa、残余应力为 173 MPa、拉深力为 626 kN, 成形质量更优更均衡。

关键词: QSn7-0.2 锡青铜; TOPSIS-灰色关联分析; CRITIC 法; 变薄拉深; 拉深力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.10.017

中图分类号: TG376 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 10-0129-08

Multi-objective optimization on ironing of QSn7-0.2 tin bronze based on improved TOPSIS-grey correlation analysis

Shen Bo¹, Guo Wenxiao^{2,3}

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Shanxi Conservancy Technical Institute, Taiyuan 030006, China;
2. China Coal Technology & Engineering Group Taiyuan Research Institute Co., Ltd., Taiyuan 030006, China;
3. Shanxi Tiandi Coal Mining Machinery Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

Abstract: In order to improve the quality of ironing for QSn7-0.2 tin bronze connecting rod bushing and achieve cost reduction and efficiency improvement, combining the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) with grey relation analysis, an improved TOPSIS-grey relation analysis multi-objective evaluation system was proposed. Then, for QSn7-0.2 tin bronze connecting rod bushing, taking thinning rate, die cone angle, deep drawing speed and friction factor as process factor variables, the orthogonal test of four factors and five levels was designed, and the numerical simulation analysis on ironing process was carried out by software ABAQUS. Furthermore, taking yield strength, tensile strength, residual stress and deep drawing force of forming parts as the comprehensive optimization objectives, the weights of multiple optimization objectives were objectively assigned by CRITIC method, and the multi-objective optimization problem was converted into a single objective optimization problem. Finally, the optimal process parameters for QSn7-0.2 tin bronze ironing are obtained as the thinning rate of 42%, the die cone angle of 9°, the deep drawing speed of $16 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ and the friction factor of 0.15. Under the optimal combination of process parameters, the yield strength, tensile strength, residual stress and deep drawing force of workpiece are 587 MPa, 643 MPa, 173 MPa and 626 kN, respectively, and the forming quality is better and more balanced.

Key words: QSn7-0.2 tin bronze; TOPSIS-grey correlation analysis; CRITIC method; ironing; deep drawing force

变薄拉深是一种先进的等体积塑性成形工艺, 常被用于回转类零件加工, 其成形件表面质量高、

力学性能优、材料利用率高, 是目前高精度、高性能无缝回转体零件的主要成形工艺之一^[1-3], 在航天航空、武器装备、汽车交通等制造领域有着非常广泛的应用。相较旋压成形工艺而言, 虽然变薄拉深工艺的模具成本更高, 产品力学性能相对略低, 但其加工效率、产品精度和表面质量更好, 适用于如弹壳等力学性能要求略低的小型精密零件加工。

国内外诸多学者对变薄拉深成形质量的影响因素

收稿日期: 2024-04-15; 修订日期: 2024-07-19

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB4703604); 山西省专利转化专项计划项目 (202305002); 新工科背景下校企融合物联网机电人才培养模式研究项目 (DZ24156)

作者简介: 申 博 (1984-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: 61359199@qq.com

进行了研究,如广州中国科学院工业技术研究院李彦波等^[3]采用有限元仿真法对罐用铝材拉深成形后产生的不均匀制耳质量问题进行了研究;西北工业大学王俊彪等^[4]就变薄拉深成形次数和各道次变薄量分配对旋压件成形质量的影响进行了研究;南京理工大学吴晟等^[5]运用 Dynaform 软件对瓣状盒进行有限元仿真分析,得到了合理的冲压速度、摩擦因数、压边力和拉伸筋的取值范围;国外学者 Adamovic D 等^[6]研究了变薄拉深成形过程中金属材料流动对成形件质量的影响规律。多数学者对于变薄拉深的研究皆涉及到工艺参数与成形质量的影响关系,但其主要集中于改善成形缺陷、探索成形过程中材料流动变形规律两方面,而对于工艺参数与力学性能之间关系的研究少之又少。对于锡青铜成形工艺也有着较多研究,如昆明理工大学张雄超等^[7]研究了半固态触变反挤压锡青铜的组织演变和力学性能;中北大学王亚飞^[8]研究了去应力退火对强力旋压锡青铜筒形件的残余应力、组织及性能的影响规律;昆明理工大学肖寒等^[9]研究了退火温度对触变挤压锡青铜轴套零件的微观组织、元素分布、磨损性能和力学性能的影响规律。多数学者在设计多目标参数优化时,往往选择主观赋权法或均匀赋权法对评价指标权重进行赋值,存在较大主观性,最优目标评价体系较为单一,如杨锋等^[10]的优化过程中利用均匀赋权法对评价指标(尺寸精度)进行权重分配,即内径公差、圆度误差 2 个评价指标采用相同权重,皆为 1/2 权重,导致其优化结果具有较强的主观性。

本文以 QSn7-0.2 锡青铜连杆衬套为研究对象,提出一种改进 TOPSIS-灰色关联分析多目标综合评价体系,选取变薄率、凹模锥角、拉深速度、摩擦因数作为工艺因素自变量,采用冷成形变薄拉深工艺,设计了 4 因素 5 水平正交试验,以屈服强度、抗拉强度、残余应力、拉深力为多目标评价指标。在 ABAQUS 软件中进行了该工艺的数值模拟分析,利用 CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) 对评价指标层进行客观赋权,利用灰色关联贴进度对试验结果进行综合评价,得到最优工艺参数组合,并对最优工艺参数下的工件成形质量进行验证,为 QSn7-0.2 锡青铜连杆衬套零件变薄拉深成形工艺提供了理论指导。

1 有限元建模

1.1 结构建模

在 ABAQUS 软件中先分别建立凸模与毛坯的三

维结构模型,具体结构参数如表 1 所示,再在软件中建立具有不同变薄率与凹模锥角的凸模,将不同结构的凹模、凸模、毛坯按相应要求装配到位,组成具有不同工艺参数组合的变薄拉深模型,结果如图 1 所示。本次有限元数值模拟采用 3 道次冷变薄拉深工艺,3 道次变薄率分别为 40%、35%和 25%。

表 1 连杆衬套三维模型尺寸 (mm)

Table 1 Three-dimensional model sizes of connecting rod bushing (mm)

参数	毛坯			凸模	
	长度	壁厚	内径	长度	直径
数值	70	10.6	Φ48.2	280	Φ48.2

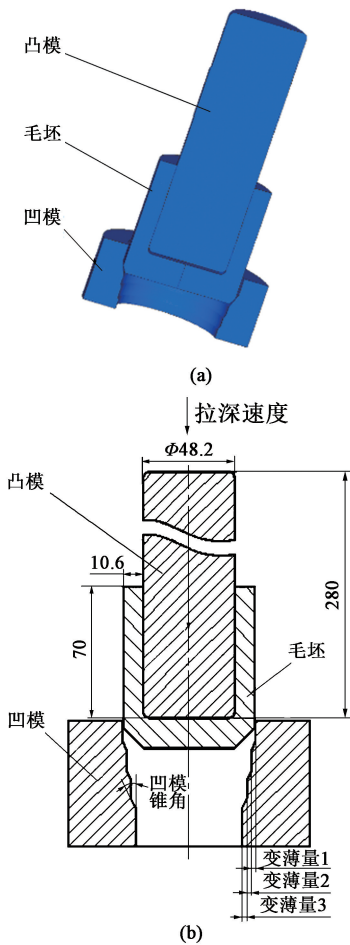


图 1 连杆衬套变薄拉深仿真模型
(a) 三维模型 (b) 模型尺寸

Fig. 1 Simulation model of ironing for connecting rod bushing
(a) 3D model (b) Model sizes

1.2 材料模型

本次变薄拉深试验材料采用 QSn7-0.2 锡青铜,其化学成分如表 2 所示^[9]。该材料被视为连杆衬套最佳材料选择之一,而变薄拉深亦是连杆衬套最佳

表 2 QSn7-0.2 锡青铜的化学成分（%，质量分数）
Table 2 Chemical compositions of QSn7-0.2 tin bronze（%，mass fraction）

Sn	Al	Si	Pb	P	Fe	Sb	Bi	杂质	Cu
6.0~8.0	≤0.01	≤0.02	≤0.02	0.10~0.25	≤0.05	≤0.002	≤0.002	<0.15	余量

成形工艺之一。QSn7-0.2 锡青铜经变薄拉深后，金属材料冷作硬化，具有优越的力学性能。

将 QSn7-0.2 锡青铜制备成标准的拉伸试棒与压缩试块，在 0.001 、 0.01 、 0.1 和 $1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的应变速率下进行拉伸与压缩试验，得到 QSn7-0.2 锡青铜材料的性能参数与应力-应变曲线。在 ABAQUS 软件中创建 QSn7-0.2 锡青铜材料属性，并输入相关材料参数，其弹性模量为 1.1 GPa 、泊松比为 0.3 、材料密度为 $8800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。得到的应力、应变数据如表 3 所示。

表 3 QSn7-0.2 锡青铜应力、应变参数
Table 3 Stress and strain parameters of QSn7-0.2 tin bronze

序号	应力/MPa	塑性应变
1	220.0	0.00
2	255.0	0.01
3	285.0	0.02
4	311.0	0.03
5	335.0	0.04
6	354.0	0.05
7	372.0	0.06
8	376.0	0.07
9	398.0	0.08
10	408.0	0.09
11	416.1	0.10

1.3 网格模型

本次 ABAQUS 数值模拟采用 C3D8R 网格划分方式，C3D8R 网格属于 8 节点 6 面体线性减缩积分单元，发生剪切变形时不易自锁，且对位移的求解结果比较精确，当网格发生大面积扭曲时，仍可以保证很高的分析精度，可以有效保障此次数值模拟结果的准确性。分别对变薄拉深毛坯内外圆、壁厚、高度实施布种，种子节点分别为 250、20、100，共划分出 264420 个网格，如图 2 所示。

2 试验设计

2.1 正交试验参数选择与设计

根据 QSn7-0.2 锡青铜连杆衬套实际变薄拉深生

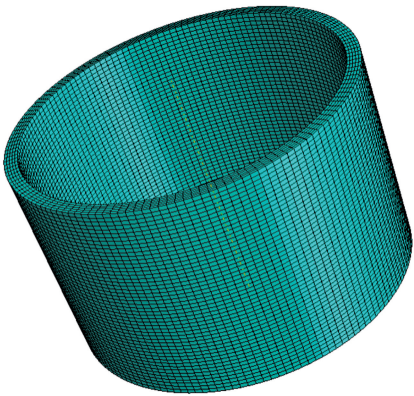


图 2 C3D8R 网格
Fig. 2 C3D8R meshing

产工艺分析，选取对工件成形质量有较明显影响的 4 个工艺参数作工艺因素变量，分别为变薄率、凹模锥角、拉深速度与摩擦因数，并以屈服强度、抗拉强度、残余应力、拉深力作为 QSn7-0.2 锡青铜连杆衬套成形质量评价指标。其中，屈服强度与抗拉强度是连杆衬套最重要的力学评价指标；而力学性能高低直接影响连杆衬套的使用性能，是考核连杆衬套性能的重要指标；残余应力会影响连杆衬套存储过程中的变形，而变薄拉深属于大塑性变形，其加工过程中会产生较大的残余应力，残余应力在存储过程中会随着时间自然释放，引起工件变形，从而使得工件尺寸精度发生变化；拉深力会影响模具使用寿命，较小的拉深力会使凸模与凹模拥有较长使用寿命，从而降低生产成本，实现降本增效^[11]。最终建立 4 因素 5 水平的正交试验 $L_{25}(5^4)$ ，各工艺参数的水平取值如表 4 所示。

2.2 正交试验结果

将表 4 中工艺因素及水平代入标准正交试验表 $L_{25}(5^4)$ 中进行 QSn7-0.2 锡青铜变薄拉深正交试验设计，共 25 组试验。在 ABAQUS 软件中进行数值模拟分析，得到工件残余应力与其变形过程中的拉深力；通过子程序将变薄拉深有限元仿真结果输出，并作为第 2 次试样拉伸分析的材料模型输入，通过分析试样拉伸过程，得到工件的抗拉强度与屈服强度；最后通过实际拉伸试验对仿真结果进行修正。变薄拉深正交试验结果如表 5 所示。

特种成形栏目由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司赞助刊出

表 4 正交试验因素与水平表
Table 4 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素			
	变薄率 $C/$ %	凹模锥角 $\alpha/$ ($^{\circ}$)	拉深速度 $v/$ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	摩擦因数 μ
1	30	9	10	0.10
2	33	12	12	0.15
3	36	15	14	0.20
4	39	18	16	0.25
5	42	21	18	0.30

表 5 正交试验设计方案及结果
Table 5 Design schemes and results for orthogonal test

试验序号	工艺因素				试验结果			
	变薄率 $C/$ %	凹模锥角 $\alpha/$ ($^{\circ}$)	拉深速度 $v/$ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	摩擦因数 μ	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	残余应力/ MPa	拉深力/ kN
1	30	9	10	0.10	506	530	256	523
2	30	12	12	0.15	514	542	263	588
3	30	15	14	0.20	519	557	212	609
4	30	18	16	0.25	529	583	248	693
5	30	21	18	0.30	528	578	184	797
6	33	9	12	0.20	517	546	276	577
7	33	12	14	0.25	526	569	259	636
8	33	15	16	0.30	529	579	229	656
9	33	18	18	0.10	538	605	244	708
10	33	21	10	0.15	535	596	249	740
11	36	9	14	0.30	550	574	298	628
12	36	12	16	0.10	562	602	250	672
13	36	15	18	0.15	561	599	235	675
14	36	18	10	0.20	577	628	269	729
15	36	21	12	0.25	577	614	239	753
16	39	9	16	0.15	563	604	215	640
17	39	12	18	0.20	573	623	249	694
18	39	15	10	0.25	582	632	270	710
19	39	18	12	0.30	587	651	255	771
20	39	21	14	0.10	582	873	197	842
21	42	9	18	0.25	573	617	173	676
22	42	12	10	0.30	572	615	172	654
23	42	15	12	0.10	583	635	221	724
24	42	18	14	0.15	588	641	184	723
25	42	21	16	0.20	592	667	178	742

3 TOPSIS-灰色关联分析

优劣解距离法 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS) 是由 Hwang C L 和 Yoon K S^[12] 在 1981 年首次提出。TOPSIS 的评价原理是利用评价目标与已知目标序列中最优解、最劣解之间的距离来进行最优解顺序排列,其最优的基本要求是评价目标最贴近最优解,同时最远离最劣解。其中,最优解是指各评价目标中所有指标皆为最优,最劣解是指各评价目标中所有指标皆为最劣^[13]。

3.1 指标层各指标权重确定方法

本次研究采用 CRITIC 客观赋权法, 与传统赋权法相比, CRITIC 客观赋权法对指标层各指标之间的对比强度、冲突性进行了较充分考虑, 所以其赋权更为客观, 与各指标实际权重体现也更为接近^[13]。CRITIC 客观赋权法的具体计算步骤如下。

(1) 数据归一化处理

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}}, & \text{正向指标} \\ \frac{\max\{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}}, & \text{负向指标} \end{cases} \quad (1)$$

式中: y_{ij} 为数据归一化处理后的指标序列; x_{ij} 为原始指标序列; $\min\{x_{ij}\}$ 和 $\max\{x_{ij}\}$ 为原始指标序列中的最小值和最大值; i 为第 i 组试验数据; j 为第 j 项评价指标。

数据归一化处理中有两种指标处理方式, 分别为正向指标处理方式与负向指标处理方式。对于正向指标, 是指评价指标值越大越好, 而对于负向指标, 则是指评价指标值越小越好^[14]。

(2) 对比强度计算

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$V_j = \frac{\sigma_j}{x_j} \quad (3)$$

式中: σ_j 为第 j 项评价指标的标准差; \bar{x}_j 为第 j 项评价指标的平均值; V_j 为第 j 项评价指标的对比强度; n 为试验组数。

(3) 冲突性计算

$$r_{lj} = \frac{\sum_{h=1}^{n'} (y_{hl} - \bar{y}_l)(y_{hj} - \bar{y}_j)}{\sqrt{\sum_{h=1}^{n'} (y_{hl} - \bar{y}_l)^2 \sum_{h=1}^{n'} (y_{hj} - \bar{y}_j)^2}} \quad (4)$$

$$T_j = \sum_{l=1}^m (1 - r_{lj}), l \neq j \quad (5)$$

式中: r_{lj} 为第 l 项与第 j 项评价指标的相关系数, $l, j=1, \dots, m$; m 为评价指标数量; T_j 为第 j 项评价指标与其他指标的冲突性; y_{hl}, y_{hj} 分别为第 h 个评价对象的第 l 项与第 j 项评价指标数据经归一化处理后的指标序列, $h=1, \dots, n'$; n' 为评价对象数量; \bar{y}_l, \bar{y}_j 分别为 n' 个评价对象中第 l 项和第 j 项评价指标数据经归一化处理后的平均值。

(4) 信息量计算

$$G_j = \frac{\sigma_j}{x_j} \times \sum_{l=1}^m (1 - r_{lj}) = V_j \times T_j \quad (6)$$

式中: G_j 为第 j 项评价指标的信息量。

信息量 G_j 是指标变异性与冲突性的乘积, 用来衡量该指标在整个综合评价体系中的权重占比。

(5) 指标权重计算

$$\omega_j = \frac{G_j}{\sum_{j=1}^m G_j} \quad (7)$$

式中: ω_j 为第 j 项评价指标的权重。

根据表 5 正交试验结果, 按式 (1) ~ 式 (7) 对各评价指标进行客观权重赋值, 结果如表 6 所示。

表 6 指标权重系数

Table 6 Weight coefficients of index

指标	屈服强度	抗拉强度	残余应力	拉深力
权重系数	0.1005	0.1313	0.3370	0.4306

3.2 改进 TOPSIS-灰色关联系数计算

(1) 最优序列确定

$$Y_i^* = \{Y_1^*(j), Y_2^*(j), \dots, Y_i^*(j)\} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中: Y_i^* 为评价指标序列在第 i 组试验的最优值; $Y_i^*(j)$ 为第 j 项评价指标在第 i 组试验的最优值。

(2) 最劣序列确定

$$Y_i^0 = \{Y_1^0(j), Y_2^0(j), \dots, Y_i^0(j)\} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中: Y_i^0 为评价指标序列在第 i 组试验的最劣值; $Y_i^0(j)$ 为第 j 项评价指标在第 i 组试验的最劣值。

(3) 最优参考序列灰色关联度计算

$$R^*(j) = \frac{\min_i \min |Y_i^*(j) - Y_i(j)| + 0.5 \max_i \max |Y_i^*(j) - Y_i(j)|}{|Y_i^*(j) - Y_i(j)| + 0.5 \max_i \max |Y_i^*(j) - Y_i(j)|} \quad (10)$$

$$R_l = \sum_{j=1}^m \omega_j R^*(j) \quad (11)$$

式中: $R^*(j)$ 为最优参考序列灰色关联度; $Y_i(j)$ 为数据标准化后的第 j 项评价指标的第 i 组试验序列; $\min |Y_i^*(j) - Y_i(j)|$ 为 $Y_i^*(j)$ 与 $Y_i(j)$ 差值绝对值的最小值; $\min_i \min |Y_i^*(j) - Y_i(j)|$ 为 n 组试验中 $Y_i^*(j)$ 与 $Y_i(j)$ 差值绝对值最小值集中的最小值; $\max |Y_i^*(j) - Y_i(j)|$ 为 $Y_i^*(j)$ 与 $Y_i(j)$ 差值绝对值的最大值; $\max_i \max |Y_i^*(j) - Y_i(j)|$ 为 n 组试验中 $Y_i^*(j)$ 与

$Y_i(j)$ 差值绝对值最大值集中的最大值; R_1 为各评价指标最优参考序列的加权总和。

(4) 最劣参考序列灰色关联度计算

$$R^0(j) = \frac{\min_i \min |Y_i^0(j) - Y_i(j)| + 0.5 \max_i \max |Y_i^0(j) - Y_i(j)|}{|Y_i^0(j) - Y_i(j)| + 0.5 \max_i \max |Y_i^0(j) - Y_i(j)|} \quad (12)$$

$$R_2 = \sum_i \omega_j R^0(j) \quad (13)$$

式中: $R^0(j)$ 为最劣参考序列灰色关联度; R_2 为各评价指标最劣参考序列的加权总和; $\min |Y_i^0(j) - Y_i(j)|$ 为 $Y_i^0(j)$ 与 $Y_i(j)$ 差值绝对值的最小值; $\min_i \min |Y_i^0(j) - Y_i(j)|$ 为 n 组试验中 $Y_i^0(j)$ 与 $Y_i(j)$ 差值绝对值最小值集中的最小值; $\max |Y_i^0(j) - Y_i(j)|$ 为 $Y_i^0(j)$ 与 $Y_i(j)$ 差值绝对值的最大值; $\max_i \max |Y_i^0(j) - Y_i(j)|$ 为 n 组试验中 $Y_i^0(j)$ 与 $Y_i(j)$ 差值绝对值最大值集中的最大值。

(5) 灰色关联贴近度计算

$$Q = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (14)$$

式中: Q 为灰色关联贴近度。

根据表 5 与表 6, 按式 (8) ~ 式 (14) 计算各评价序列灰色关联贴近度^[15], 结果如表 7 所示。

表 7 基于 TOPSIS 灰色关联贴近度

Table 7 Grey correlation closeness degree based on TOPSIS

序号	灰色关联贴近度	排序	序号	灰色关联贴近度	排序
1	0.5303	7	14	0.4522	23
2	0.4755	14	15	0.4698	17
3	0.5392	6	16	0.5650	5
4	0.4549	22	17	0.4986	11
5	0.4727	15	18	0.4695	19
6	0.4707	16	19	0.4643	21
7	0.4696	18	20	0.4829	13
8	0.5031	10	21	0.6220	2
9	0.4658	20	22	0.6357	1
10	0.4314	24	23	0.5292	8
11	0.4229	25	24	0.5921	4
12	0.4948	12	25	0.6076	3
13	0.5110	9			

3.3 结果分析

本次通过建立改进 TOPSIS-灰色关联分析目标综合评价模型, 对 QSn7-0.2 锡青铜变薄拉深成形质量进行综合评价, 得到每组正交试验结果的灰色关联贴近度, 灰色关联贴近度越接近 1 说明该工件综

合质量越高。该评价模型的评价结果充分考虑了指标层各评价指标对 QSn7-0.2 锡青铜变薄拉深成形的影响, 使各评价指标同时达到最优。

各工艺参数灰色关联贴近度均值如表 8 所示, 灰色关联贴近度均值主效应如图 3 所示。从各工艺因素灰色关联贴近度均值极差可以看出, 变薄率对 QSn7-0.2 锡青铜变薄拉深综合质量影响最为明显。从图 3 均值主效应变化规律可知, 最佳工艺因素组合为 C5 α 1 v 4 μ 2, 即变薄率为 42%、凹模锥角为 9°、拉深速度为 16 mm·s⁻¹、摩擦因数为 0.15。各工艺因素对工件综合质量的影响顺序为: 变薄率>拉深速度>凹模锥角>摩擦因数。

表 8 多工艺参数的灰色关联贴近度均值

Table 8 Mean values of grey correlation closeness degree for various process parameters

水平	工艺因素			
	变薄率	凹模锥角	拉深速度	摩擦因数
1	0.4945	0.5222	0.5038	0.5006
2	0.4681	0.5148	0.4819	0.5150
3	0.4701	0.5104	0.5013	0.5137
4	0.4961	0.4859	0.5251	0.4972
5	0.5973	0.4929	0.5140	0.4997
极差	0.1292	0.0363	0.0432	0.0178
排序	1	3	2	4

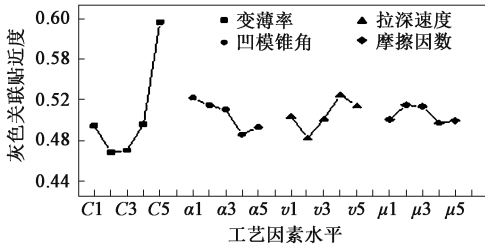


图 3 灰色关联贴近度均值主效应图

Fig. 3 Main effect graph of mean value for grey correlation closeness degree

3.4 试验验证

将基于改进 TOPSIS-灰色关联分析得到的 QSn7-0.2 锡青铜变薄拉深最优工艺因素 C5 α 1 v 4 μ 2 设置为边界条件, 在 ABAQUS 中进行最优工艺因素组合下的变薄拉深数值模拟, 结果如表 9 所示。

表 9 优化结果

Table 9 Optimal results

参数	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	残余应力/ MPa	拉深力/ kN
最优组合	587	643	173	626
正交最优序列	572	615	172	654
提升百分比/%	2.62	4.55	0.58	-4.28

由表 9 可见：通过改进 TOPSIS-灰色关联分析优化，QSn7-0.2 锡青铜连杆衬套变薄拉深成形后的屈服强度为 587 MPa，比正交最优序列提升 2.62%；抗拉强度为 643 MPa，比正交最优序列提升 4.55%；残余应力为 173 MPa，与正交最优序列基本持平；拉深力为 626 kN，比正交最优序列降低 4.28%。

3.5 可靠性验证

对数值模拟结果及 QSn7-0.2 锡青铜变薄拉深多目标优化结果的可靠性进行验证，模具与工件尺寸与数值模拟中三维模型保持一致，工艺因素中变薄率与凹模锥角通过凹模结构保证，根据三维模型中不同凹模锥角（9°、12°、15°、18°和 21°）与变薄率（30%、33%、36%、39%和 42%）的凹模结构尺寸进行不同组合凹模工装制备；拉深速度通过液压机保证，通过改变液压机 Z 轴速度，将下压速度分别控制在 10、12、14、16 和 18 mm·s⁻¹；摩擦因数采用具有不同粘度润滑油保证，本次试验所用润滑油粘度分别为 20、30、40、50 和 60，粘度越高，摩擦因数越小。

按最优工艺因素组合进行 QSn7-0.2 锡青铜连杆衬套的变薄拉深试验，将成形后的工件制成拉伸试片，如图 4 所示，拉伸试片尺寸如图 5 所示，对拉伸试片进行测试，结果如表 10 所示。通过对比发现，实际试验结果较模拟结果略大，这是由于在实际变薄拉深成形过程中，摩擦模型时刻存在变化，非固定值，且由剪切摩擦、库伦摩擦等多种摩擦模型动态交织，而非仿真模拟中单一的剪切摩擦与摩擦因数，实际摩擦相较仿真略大，导致成形过程中摩擦力略大，从而引起变形增大，使得拉深力等实际试验结果相对模拟结果略大；其次，实际试验中的毛坯并非仿真中设置的性能完全均匀，实际试验毛坯性能与理想仿真毛坯性能上存在一定的差异，其毛坯硬度偏向工艺范围上限，导致拉深力等实际试验结果相对模拟结果略大；但试验结果与模拟结果相对误差最大为 5.20%，相对误差较小，证明优化结果可靠性良好。



图 4 QSn7-0.2 锡青铜拉伸试片
Fig. 4 QSn7-0.2 tin bronze tensile test piece

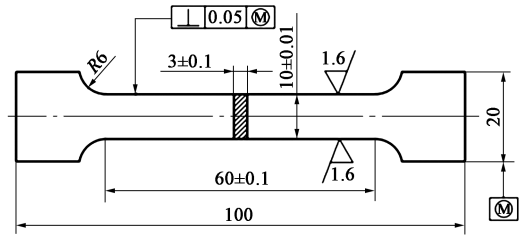


图 5 拉伸试片具体尺寸
Fig. 5 Specific sizes of tensile test piece

表 10 可靠性验证结果
Table 10 Reliability verification results

参数	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	残余应力/ MPa	拉深力/ kN
数值模拟	587	643	173	626
工艺试验	593	651	182	633
相对误差/%	1.02	1.24	5.20	1.12

4 结论

- (1) 采用 CRITIC 客观赋权法对 QSn7-0.2 锡青铜变薄拉深综合评价指标权重进行赋值，屈服强度为 0.1005、抗拉强度为 0.1313、残余应力为 0.3370、拉深力为 0.4306。
- (2) 基于改进 TOPSIS-灰色关联分析评价模型，对 QSn7-0.2 锡青铜变薄拉深成形质量进行分析，工艺因素对成形质量的影响顺序为：变薄率>拉深速度>凹模锥角>摩擦因数。
- (3) 基于改进 TOPSIS-灰色关联分析评价模型，对 QSn7-0.2 锡青铜变薄拉深工艺进行优化，最优工艺参数组合为：变薄率为 42%、凹模锥角为 9°、拉深速度为 16 mm·s⁻¹、摩擦因数为 0.15。最优工艺参数组合下屈服强度为 587 MPa、抗拉强度为 643 MPa、残余应力为 173 MPa、拉深力为 626 kN，成形质量更优。
- (4) 采用改进 TOPSIS-灰色关联分析综合评价模型，可成功实现对 QSn7-0.2 锡青铜变薄拉深成形工艺的优化提升具有很好的指导意义。

参考文献：

[1] 南海，端木樊杰，李静媛，等. 变薄拉深对 430 不锈钢表面起皱的影响 [J]. 钢铁，2019，54（1）：56-62.
Nan H, Duanmu F J, Li J Y, et al. Effect of thinning drawing on surface ridging of 430 stainless steel [J]. Iron and Steel, 2019, 54（1）：56-62.

[2] 肖善超. 弹壳多模一次连续变薄拉深工艺研究 [D]. 秦皇岛：

燕山大学, 2012.

Xiao S C. Research on Multi-mode-one-off Ironing Process for Cartridge Case [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.

- [3] 李彦波, 刘荣丰, 刘红武, 等. 基于 JSTAMP/NV 的 AA5042 薄壁筒形件变薄拉深仿真 [J]. 计算机辅助工程, 2012, 6 (21): 68-71.
Li Y B, Liu R F, Liu H W, et al. Ironing simulation on AA5042 thin wall cylindrical work-piece based on JSTAMP/NV [J]. Computer Aided Engineering, 2012, 6 (21): 68-71.
- [4] 王俊彪, 贾建军. 多道次变薄拉深的模拟与优化设计 [J]. 西北工业大学学报, 1997, 3 (15): 348-354.
Wang J B, Jia J J. The simulation and optimization of multistep ironing process [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1997, 3 (15): 348-354.
- [5] 吴晟, 张跃. 铝合金瓣状盒冲压工艺设计及数值分析 [J]. 模具制造, 2016, 16 (10): 34-38.
Wu S, Zhang Y. Design of stamping process and numerical analysis for aluminum petal-shape box based on orthogonal experiments [J]. Die & Mould Manufacture, 2016, 16 (10): 34-38.
- [6] Adamovic D, Mandic V, Jurkovic Z, et al. An experimental modelling and numerical FE analysis of steel-strip ironing process [J]. Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette, 2010, 17 (4): 435-444.
- [7] 张雄超, 陈磊, 肖寒, 等. 半固态触变反挤压锡青铜的组织演变和力学性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51 (6): 2240-2249.
Zhang X C, Chen L, Xiao H, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of semi-solid thixotropic reverse extrusion tin bronze [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (6): 2240-2249.
- [8] 王亚飞. 去应力退火对强力旋压锡青铜筒形件残余应力、组织及性能影响 [D]. 太原: 中北大学, 2021.
Wang Y F. Effect of Stress Removing Annealing on Residual Stress, Microstructure and Properties of Strongly Rotated Tin Bronze Cylindrical Parts [D]. Taiyuan: North University of China, 2021.
- [9] 肖寒, 崔鋈昕, 熊迟, 等. 退火温度对触变挤压锡青铜轴套组织性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50 (11): 4119-4127.
Xiao H, Cui Y X, Xiong C, et al. Effect of annealing temperature on microstructure and properties of thixo-extruded tin bronze bushing [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50 (11): 4119-4127.
- [10] 杨锋, 樊文欣, 汤传尧, 等. 基于 Simufact 锡青铜连杆衬套错距旋压灰色关联度优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (1): 82-84.
Yang F, Fan W X, Tang C Y, et al. Optimization of the grey correlation degree of connecting rod bush and dip distance spinning based on Simufact software [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38 (1): 82-84.
- [11] 王兴雷. 某 H70 弹壳体成形工艺数值模拟及实验研究 [D]. 太原: 中北大学, 2023.
Wang X L. Numerical Simulation and Experimental Research on the Forming Process of a H70 Shell Body [D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [12] Hwang C L, Yoon K S. Multiple Attribute Decision Making [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981.
- [13] 魏子茹, 卢延辉, 王鹏宇, 等. 基于 CRITIC 法的灰色关联理论在无人驾驶车辆测试评价中的应用 [J]. 机械工程学报, 2021, 57 (12): 99-108.
Wei Z R, Lu Y H, Wang P Y, et al. Application of grey correlation theory based on CRITIC method in autonomous vehicles test and evaluation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57 (12): 99-108.
- [14] 胡涛, 王栋, 孙曜, 等. 基于改进 CRITIC-LRA 和灰色逼近理想解排序法的空战威胁评估 [J]. 兵工学报, 2020, 41 (12): 2561-2569.
Hu T, Wang D, Sun Y, et al. Air combat threat assessment of improved CRITIC-LRA and grey TOPSIS [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41 (12): 2561-2569.
- [15] 信桂新, 杨朝现, 杨庆媛, 等. 用熵权法和改进 TOPSIS 模型评价高标准基本农田建设后效应 [J]. 农业工程学报, 2017, 33 (1): 238-249.
Xin G X, Yang C X, Yang Q Y, et al. Post-evaluation of well-facilitated capital farmland construction based on entropy weight method and improved TOPSIS model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (1): 238-249.

请关注更加新颖的公众号

www.qctester.com

