

基于 GRA-RSM 的排气尾管冲压多工序精度传递预测与控制

董 翔^{1,2}, 宋燕利^{1,2}, 沈海波³, 路 珏^{1,2}, 李玮灏^{1,2}

(1. 武汉理工大学 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 汽车工程学院, 湖北 武汉 430070;
3. 赛恩特实业有限公司, 广东 佛山 528311)

摘要: 为了提高不锈钢排气尾管的成形质量, 提出了基于变形回弹的冲压多工序精度传递预测与控制方法。以选取的点云处的均方根回弹值作为精度评价指标, 考虑到拉伸和卷圆工序对构件回弹值的复合叠加效果, 通过灰色关联分析法筛选出与评价指标关联度较大的影响因素, 建立了基于响应面法的精度传递预测模型, 对回弹造成的误差在时域上的传递进行了表征。采用遗传算法对上述模型进行求解, 得到拉伸-卷圆工序的最佳工艺参数, 使得排气尾管成形后的回弹最大值降低了 13.2%, 均方根回弹值降低了 12.2%, 各测量点的回弹值差异减少, 有效地提升了排气尾管的成形精度, 有利于提高后续焊接工艺质量的稳定性。

关键词: 排气尾管; 回弹; 灰色关联分析; 传递模型; 精度预测

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.11.014

中图分类号: TP182

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 11-0101-08

Prediction and control on stamping multi-process precision transfer for exhaust tail pipe based on GRA-RSM

Dong Xiang^{1,2}, Song Yanli^{1,2}, Shen Haibo³, Lu Jue^{1,2}, Li Weihao^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
3. Scien-tech Co., Ltd., Foshan 528311, China)

Abstract: In order to improve the forming quality of stainless steel exhaust tail pipe, a prediction and control method of stamping multi-process precision transfer based on deformation springback was proposed. Taking the root mean square springback value at the selected point cloud as the precision evaluation index, considering the composite superposition effect of drawing and rolling processes on the workpiece springback value, the influencing factors that were closed related to the evaluation index were screened out by the grey relational analysis method, the precision transfer prediction model based on response surface method was established, and the transmission of the error caused by springback in the time domain was characterized. Then, the above model was solved by the genetic algorithm, and the optimal process parameters of drawing and rolling processes were obtained, which reduced the maximum springback value of the exhaust tail pipe after forming by 13.2% and the root mean square springback value by 12.2%. Thus, the difference of springback values at various measuring points was reduced, which effectively improved the forming precision of the exhaust tail pipe and was beneficial to improve the quality stability for the subsequent welding process.

Key words: exhaust tail pipe; springback; grey correlation analysis; transfer model; precision prediction

薄壁构件冲压成形的精度预测与控制是保证成形质量的关键技术, 其准确度会对模具结构、零件

制造及装配等整条工业生产工艺链造成影响^[1], 长期以来一直受到众多国内外学者的重视。

回弹作为冲压成形中不可避免的现象, 是影响成形精度的主要原因。其本质是成形完成模具离开构件后残余弹性能的释放。对于室温成形来说, 材料性能、成形工艺参数等是影响回弹的主要因素^[2-4]。如何有效地对覆盖件进行冲压回弹预测与控制已成为研究热点。

回弹预测的方法主要包括解析法和有限元分析法^[5]。解析法可以清楚地表达各应力、应变之间的

收稿日期: 2021-12-06; 修订日期: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51975440); 新能源汽车科学与关键技术学科创新引智基地项目 (B17034); 教育部创新团队发展计划 (IRT13087); 湖北省重点研发计划 (2020BAB143)

作者简介: 董 翔 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: Xiangdong9709@163.com

通信作者: 宋燕利 (1979-), 男, 博士, 教授

E-mail: ylsong@whut.edu.cn

关系,但建立板料回弹分析模型时,通常需要考虑中性面偏移、压边力、摩擦力等参数对板料回弹的影响,计算过程较为繁琐复杂^[6]。对于工程应用问题,有限元分析法更加快速高效,并可根据分析结果与统计方法相结合的方式构建预测模型。Oujebbour F Z 等^[7]针对回弹和失效相冲突的问题,采用法线边界相交与归一化法线约束方法,生成了一组 Pareto 最优解,可以有效地解决高度非线性多准则参数和形状优化问题。Mrabti I E 等^[8]运用神经网络与粒子群算法,建立 U 形件拉深工艺回弹值的预测模型,使得最终回弹值有效减少。

为解决回弹导致的精度损失,往往通过工艺参数优化与模面补偿等方法进行回弹反复修正^[9]。魏鑫等^[10]通过响应面法对汽车后轮罩工艺参数进行优化,降低了最大回弹量和最大减薄率。段磊等^[11]对汽车前梁后部零件进行回弹仿真,并通过回弹补偿的方式修改模面,使得最终零件精度达到理想效果。有关薄壁构件冲压回弹的研究很多,但主要是以拉延工序为主。实际上,薄壁构件冲压成形通常是多工序制造流程,相邻工序之间残余应力释放均会对最终构件的回弹值有不同的贡献,因此,从多工序角度进行精度调控具有重要的意义。本团队前期针对铝合金驾驶室顶棚不同工序空间域上的回弹值预测和调控研究结果证实,多工序回弹传递精度调控能够有效地提高覆盖件的成形质量^[12]。

对于排气尾管而言,由于其尺寸薄、直径大、非对称弯曲的形状特征,多工序冲压过程的影响因素众多,精度控制难度较大。然而,不锈钢排气尾管精度预测及控制的相关研究却鲜有报道。基于此,本文对不锈钢排气尾管进行了多工序成形仿真分析,通过建立基于响应面法的排气尾管冲压多工序精度传递模型,实现回弹预测,并对最终拉延-卷圆的多工序工艺参数进行优化。

1 排气尾管多工序冲压成形模拟

1.1 工艺分析与材料选用

本文以不锈钢排气尾管为研究对象,其直径为 $\Phi 54$ mm,厚度为 1 mm,具有厚度小、型面复杂、非对称弯曲的特点,如图 1 所示。它的全流程制造工艺分为落料—拉延—卷圆—焊接—整形 5 个工序,其中,拉延工序和卷圆工序为冲压成形过程。为了保证后续焊接质量的稳定性,要求冲压成形结束后构件具有良好的精度。在实际生产过

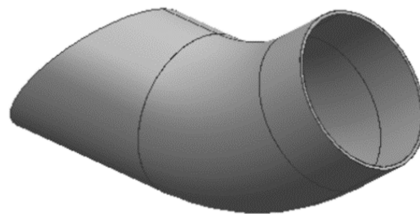


图 1 排气尾管模型图

Fig. 1 Model drawing of exhaust tail pipe

程中,拉延工序完成后产生的回弹会对卷圆工序造成影响。因此,对排气尾管进行多工序冲压成形有限元模拟,获得不同工序的回弹值,并进行进一步分析。

选用的材料为 SUS436MT 铁素体不锈钢,该种不锈钢中 Cr 元素含量较高^[13],形成的富铬相可以有效地增强耐腐蚀性,防止氧化,满足排气尾管在温度较高和酸性条件下使用的要求;且其退火后产生均匀的 $\{111\}$ 退火织构^[14],有利于保证成形质量。根据国家标准 GB/T 228.1—2021^[15]进行单向拉伸试验,设备型号为 CMT5205/5305 系列试验机,试样总长度为 135 mm,平行长度为 50 mm,应变速率为 0.01 s^{-1} ,图 2 为单向拉伸的断后试样图,获得的部分材料属性如表 1 所示,图 3 为材料的真应力-真应变曲线。

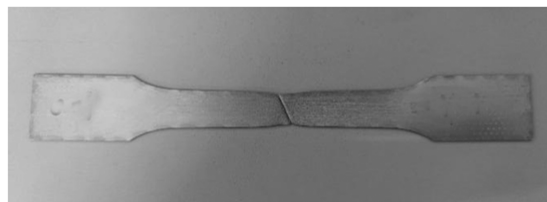


图 2 单向拉伸的断后试样图

Fig. 2 Diagram of broken specimen by uniaxial tension

表 1 SUS436MT 不锈钢的材料属性

Table 1 Material properties of SUS436MT stainless steel

参数	板厚/ mm	泊松比	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	硬化 指数	断后伸长率/ %
数值	1.0	0.3	275	442	0.246	30.3

1.2 多工序成形的有限元建模

为了提高成形质量,在进行多工序成形模拟之前,需要进行随形坯料设计。将零件展开,得到非规则形状的坯料,并在其上选取多个测量点,跟踪记录由测量点构成的点云在不同工序下的自由回弹值。图 4 为落料后得到的坯料形状特征图,其上的坐标即代表测量点的位置,分布较为分散。

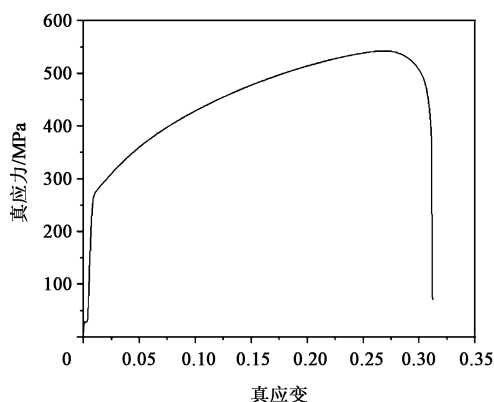


图 3 SUS436MT 不锈钢的真应力-真应变曲线

Fig. 3 True stress-true strain curve of SUS436MT stainless steel

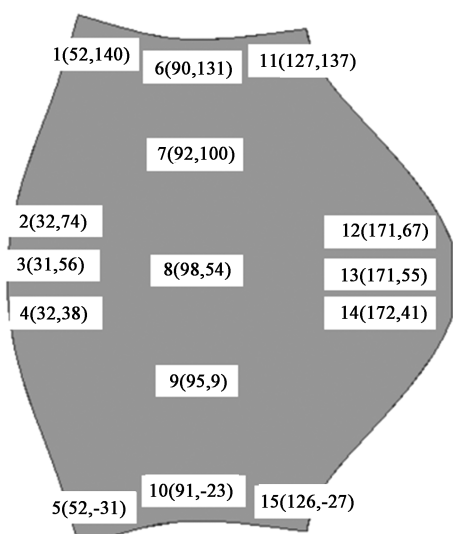


图 4 坯料形状与位置点特征图

Fig. 4 Feature diagram of blank shape and position points

将提取的模面和坯料边界线导入 Autoform 中，赋予模型相应的材料属性与边界条件。考虑到材料各向异性的影响，选择 Hill 屈服模型应用于金属材料的成形仿真，具有较高的准确度。模拟单元选择弹塑性壳单元，利用软件自动划分网格功能进行网格划分（三角形），容错公差设置为 0.05 mm，网格最大边长为 20 mm，自适应网格细化设置为 5 级。

其中，拉伸工序将坯料冲压为底部带有弧度的 U 形件，如图 5 所示，上模压住坯料下行，使之最终与下模贴合，压边圈放置在坯料的两侧，有利于成形过程的稳定性，防止坯料在模具内晃动。该工序的工艺参数初始设置为默认值。

在拉伸工序基础上，卷圆工序中压机通过滑块自上而下运动，将 U 形件两侧向内挤压形成弯管。如图 6 所示，U 形件放置于圆筒压边和下模的中间

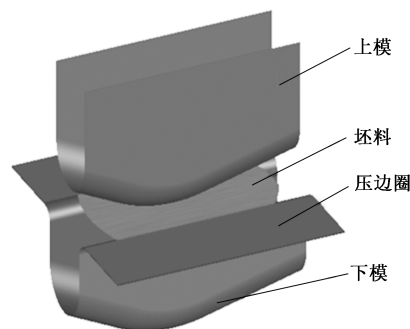


图 5 拉伸工序有限元模型

Fig. 5 Finite element model of drawing process

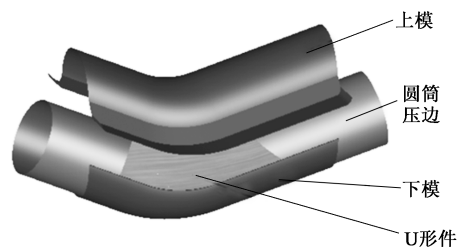


图 6 卷圆工序有限元模型

Fig. 6 Finite element model of coiling process

位置，其中间部分圆筒的作用一方面可以对 U 形件起到固定约束的作用，另一方面可以充当下模的一部分，上模将两侧坯料压在其上来完成卷圆。工艺参数初始设置为默认值。

1.3 有限元模拟初步结果分析

对完成前处理设置的有限元模型进行求解，采用的回弹计算方法为自由回弹，得到排气尾管各区域的自由回弹值。分别提取拉伸工序后和拉伸-卷圆工序后点云处的自由回弹值，其结果如图 7 所示。可以看出，拉伸工序产生的回弹值范围在 -0.5 ~ 0.5 mm 之间，出现中部一些区域向内凹陷、两端向外扩张的现象，拉伸-卷圆工序后产生的回弹值范

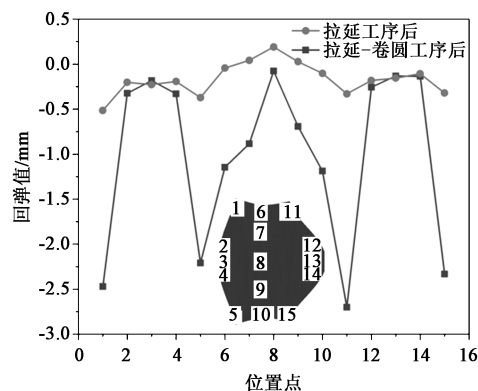


图 7 多工序成形过程中的自由回弹值

Fig. 7 Free springback values in multi-process forming process

围在 $-3.0\sim 0.0$ mm 之间,较大的回弹值主要分布在预留焊缝区域,出现张口现象。拉延工序产生的回弹波动范围为卷圆工序的 $1/3$,有必要考虑他们复合叠加作用对最终零件精度的影响。

2 建立基于变形回弹的成形精度传递预测模型

根据上述有限元模拟结果,通过灰色关联分析法 (Grey Relational Analysis, GRA)^[16]对拉延、卷圆不同工序的工艺参数进行处理,筛选出两个工序中对回弹影响较大的主要工艺参数,然后使用响应面法 (Response Surface Method, RSM)^[17]建立成形精度传递预测模型,实现对变形回弹的预测,模型求解后可获得较优的工艺参数组合,试验流程如图 8 所示。

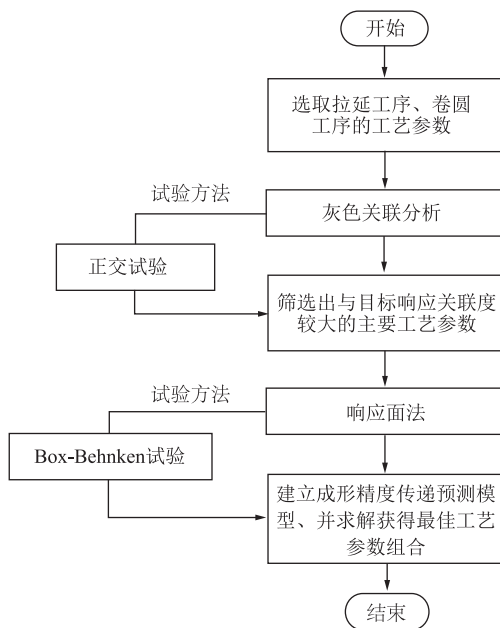


图 8 试验流程图

Fig. 8 Flow chart of experiment

2.1 基于灰色关联分析的工艺参数筛选

由于多工序的工艺参数数量较多,如表 2 所示,直接进行模型的构建则过于繁琐,需要筛选出较重

表 2 各工序的工艺参数

Table 2 Process parameters of each process

工序	拉延工序	卷圆工序
工艺参数	压边力 F_1	圆筒压力 F_2
	摩擦因数 μ_1	摩擦因数 μ_2
	模具间隙 d_1	模具间隙 d_2
	冲压速度 v_1	冲压速度 v_2

要的影响因素。灰色关联分析法可以计算各工艺参数与均方根回弹值的关联度,该方法按照各参数与目标响应变化趋势的异同程度,判断其关联度的强弱。

首先,系统各参数的物理意义不同,需要进行无量纲化处理,本文采用均值法:

$$x_i(k) = \frac{x'_i(k)}{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x'_i(k)} \quad (1)$$

式中: $x'_i(k)$ 为第 i 个序列中第 k 个响应的原始数据, $k=1, 2, \dots, m$; m 为原始数据的数量; $x_i(k)$ 为无量纲化后的数据值。

然后,计算目标响应与因素变量之间的灰色关联系数,如式 (2) 所示。

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (2)$$

式中: $x_0(k)$ 为目标响应序列; $\zeta_i(k)$ 为第 i 序列中第 k 个响应的灰色关联系数; $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为二级最小差; $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为二级最大差; ρ 为分辨系数,可以避免关联系数失真,一般取 0.5。

将得到的灰色关联系数序列取平均值,即为目标响应与因素变量的灰色关联度 r_{0i} , 记作:

$$r_{0i} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \zeta_i(k) \quad (3)$$

进行多组正交试验,并通过上述计算过程进行处理,得到各工序的工艺参数与点云处均方根回弹值的灰色关联度如表 3 所示。可以看出,拉延工序的压边力 F_1 、摩擦因数 μ_1 、模具间隙 d_1 和卷圆工序的摩擦因数 μ_2 、模具间隙 d_2 与均方根回弹值的灰色关联度较大,均大于 0.7,选取这 5 个工艺参数为主要影响因素。

表 3 各工艺参数的灰色关联度

Table 3 Grey correlation degree of each process parameter

工艺参数	灰色关联度	大小顺序
压边力 F_1	0.733	5
摩擦因数 μ_1	0.783	3
模具间隙 d_1	0.857	2
冲压速度 v_1	0.539	7
圆筒压力 F_2	0.600	6
摩擦因数 μ_2	0.763	4
模具间隙 d_2	0.950	1
冲压速度 v_2	0.538	8

2.2 成形精度传递预测模型

每个工序完成之后均会因应力释放产生相应的回弹，且会对最终产品的回弹造成影响，即变形回弹具有传递特征。而每个工序的回弹值可以通过该工序的工艺参数进行调控，因此，成形精度传递预测模型通过最终产品回弹值与不同工序工艺参数之间的回归方程来建立。

本文采用响应面法建立排气尾管成形精度传递预测模型，该方法在解决多变量的非线性问题时具有较高的可靠性^[18]。模型的构建既要在能够描述真实函数的前提下尽可能简单，也要设计尽可能少的待定系数以减少数值分析的工作量，根据工程经验，选用二次多项式形式，其表达式如下：

$$\hat{y}(x)=\beta_0+\sum_{a=1}^n\beta_ax_a+\sum_{a=1}^n\beta_{aa}x_a^2+\sum_{a=1}^n\sum_{b\geq a}^n\beta_{ab}x_ax_b$$

(4)

式中： $\hat{y}(x)$ 为目标响应； x_a 、 x_b 为因素变量； a 、 b ($b\geq a$) = 1, 2, ..., n ； n 为因素变量数量，本文中 $n=5$ ； β_0 、 β_a 、 β_{aa} 、 β_{ab} 为待定系数。

以上文得到的压边力 F_1 、摩擦因数 μ_1 、模具间隙 d_1 、摩擦因数 μ_2 和模具间隙 d_2 为因素变量，以点云处的均方根回弹值为目标响应，设计各试验因素变量的取值水平表，如表 4 所示。采用 Box-Behnken 试验设计方法^[19]，在因素和水平数相同的条件下，该方法不存在轴向点，需要试验的次数较少，共设计 44 组不同的试验组合。使用 Autoform 分别进行仿真模拟，将得到的数据进行处理，得到每个试验的均方根回弹值 e ，其结果如表 5 所示。

表 4 试验的因素水平表

Table 4 Factors and levels of experiment

因素	水平		
	-1	0	1
F_1/kN	40	50	60
μ_1	0.11	0.13	0.15
d_1/mm	1.1	1.2	1.3
μ_2	0.11	0.13	0.15
d_2/mm	1.1	1.2	1.3

根据试验结果，对均方根回弹值 e 与工艺参数进行二项式回归拟合，得到精度传递预测模型，如式 (5) 所示。

表 5 Box-Behnken 试验方案及结果
Table 5 Scheme and results of Box-Behnken experiment

序号	F_1/kN	μ_1	d_1/mm	μ_2	d_2/mm	e/mm
1	40	0.13	1.1	0.13	1.2	1.3587
2	50	0.11	1.2	0.15	1.2	1.3463
3	40	0.13	1.3	0.13	1.2	1.3940
4	50	0.13	1.2	0.11	1.1	1.2039
5	40	0.13	1.2	0.13	1.1	1.2417
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
43	50	0.13	1.3	0.11	1.2	1.3677
44	50	0.11	1.3	0.13	1.2	1.4089

$$e=3.08508-0.040727F_1-13.40198\mu_1-1.54619d_1-2.44979\mu_2+0.47894d_2+0.05675F_1\mu_1+0.02085F_1d_1-0.083625F_1\mu_2-0.0054F_1d_2-7.6375\mu_1d_1+19.5\mu_1\mu_2+4.8375\mu_1d_2-1.3d_1\mu_2+0.510d_1d_2+4.9\mu_2d_2+0.000246F_1^2+46.34896\mu_1^2+0.59813d_1^2-0.58854\mu_2^2-0.39354d_2^2$$

(5)

对拟合的二项式模型进行方差分析，检验模型的可靠性，结果如表 6 所示。可以看出，模型的 $P<0.0001$ ，说明模型具有较高的显著性，失拟项的 P 值为 0.2383，大于 0.0500，即失拟项不显著，能够较好地反映因素变量与目标函数之间的关系。同时进行误差分析，得到决定系数 $R^2=0.9651$ ，修正系数 $R^2_{\text{adj}}=0.9348$ ，拟合效果较好，具有较高的预测准确度。图 9 为均方根回弹值的试验值与模型预测值的对比。

表 6 二项式模型方差分析
Table 6 Variance analysis of binomial model

来源	平方和	均方	F 值	P 值
模型	0.250	0.013	31.84	<0.0001
残差	9.053×10^{-3}	3.936×10^{-4}	—	—
失拟项	8.553×10^{-3}	4.276×10^{-4}	2.57	0.2383
纯误差	5.000×10^{-4}	1.667×10^{-4}	—	—
总离差	0.260	—	—	—

3 模型求解

式 (5) 成形精度传递预测模型能够很好地预测排气尾管的均方根回弹值。在实际生产中，为了满足后续工艺的稳定性，应使成形结束后其值尽可能的小，降低因精度误差导致焊接缺陷产生的概率。因此，需要在建立模型的基础上进行精度调控，构

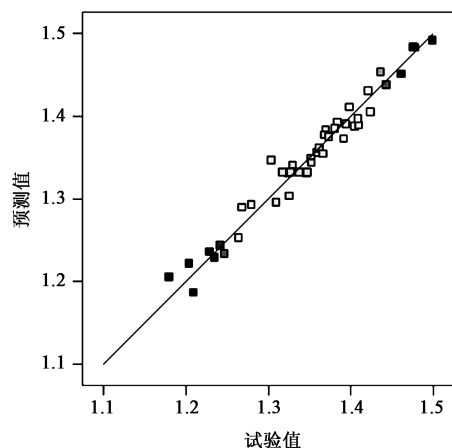


图 9 目标响应的试验值与预测值对比

Fig. 9 Comparison of target response between experimental and predicted values

造的目标函数为:

$$\text{Min}(e) = f(F_1, \mu_1, d_1, \mu_2, d_2)$$

$$\begin{cases} 40 \text{ kN} \leq F_1 \leq 60 \text{ kN} \\ 0.11 \leq \mu_1 \leq 0.15 \\ 1.1 \text{ mm} \leq d_1 \leq 1.3 \text{ mm} \\ 0.11 \leq \mu_2 \leq 0.15 \\ 1.1 \text{ mm} \leq d_2 \leq 1.3 \text{ mm} \end{cases} \quad (6)$$

采用遗传算法对上述二次非线性模型进行求解, 将各参数编码化后进行选择、交叉、变异操作, 计算求得最优解。设置遗传算法的种群规模为 100, 交叉概率为 0.6, 变异概率为 0.01, 经过 300 次迭代, 得到当 $F_1 = 52.8162 \text{ kN}$, $\mu_1 = 0.1213$, $d_1 = 1.1034 \text{ mm}$, $\mu_2 = 0.1330$, $d_2 = 1.1064 \text{ mm}$ 时, 目标函数值最小, 图 10 为模型求解时最优解的进化过程。经过圆整后得到压边力 F_1 为 53 kN, 摩擦因数 μ_1 为 0.12, 模具间隙 d_1 为 1.1 mm, 摩擦因数 μ_2 为 0.13, 模具间隙 d_2 为 1.1 mm, 此时排气尾管成形后的均方根回弹值最小。

4 优化结果验证

对排气尾管成形精度传递预测模型求解获得的优化方案进行验证, 得到排气尾管成形之后各点云处的回弹值, 如图 11 所示。可以看出, 零件的回弹值相较优化前有较明显的减小, 点云处的均方根回弹值, 即评价指标的数值由 1.3677 mm 降至 1.2006 mm, 减少了 12.2%, 说明该模型能够较好地对比排气尾管的成形精度进行预测和调控。

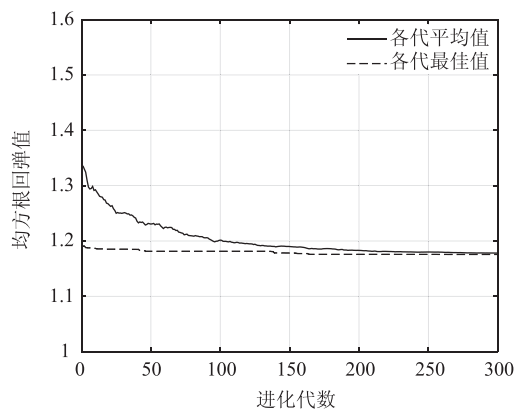


图 10 最优解进化过程

Fig. 10 Evolution process of optimal solution

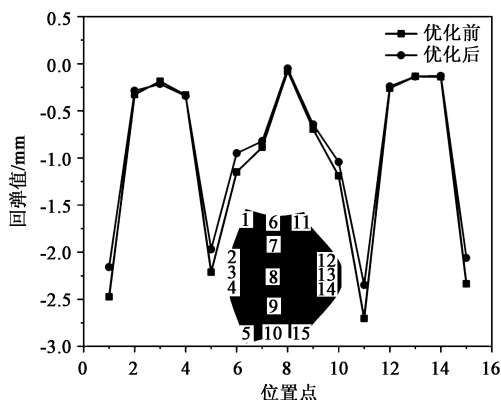


图 11 排气尾管优化前后点云处的自由回弹值对比

Fig. 11 Comparison of free springback value at point cloud before and after optimization of exhaust tail pipe

图 12 和图 13 分别为优化前后排气尾管的回弹值和应变分布云图, 其最大值和最小值出现的位置未发生明显变化, 但回弹的最大数值由 -2.955 mm 降至 -2.566 mm , 降幅为 13.2%, 回弹值差异减小; 同时, 应变值也略微降低, 说明应力、应变集中现象没有加剧, 没有因对构件的制造精度进行调控而造成成形性变差, 增强了他们之间的协调性, 降低了缺陷产生的可能性。

5 结论

(1) 对排气尾管的拉延-卷圆冲压过程进行多工序成形仿真, 由回弹造成的成形精度误差具有传递性, 综合考虑各工序工艺参数对变形回弹的影响, 有利于提高最终零件的成形质量。

(2) 通过灰色关联分析法, 得到与均方根回弹值关联度较大的主要影响因素, 并通过响应面法建立了成形精度传递预测模型, 可以实现对最终排气

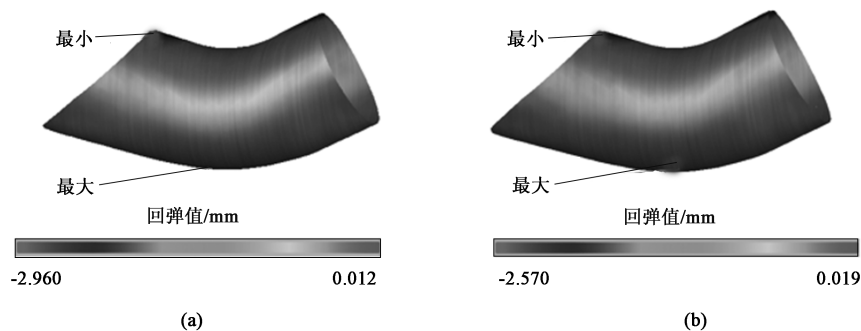


图 12 排气尾管优化前 (a) 和优化后 (b) 自由回弹值分布云图对比

Fig. 12 Comparison of free springback value distribution nephograms before (a) and after (b) optimization of exhaust tail pipe

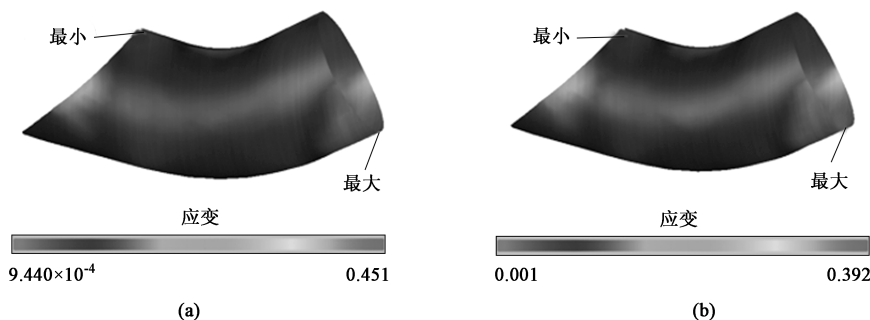


图 13 排气尾管优化前 (a) 和优化后 (b) 应变分布云图对比

Fig. 13 Comparison of strain distribution nephograms before (a) and after (b) optimization of exhaust tail pipe

尾管的回弹值进行预测。

(3) 通过遗传算法对精度传递预测模型进行求解, 得到最佳工艺参数: 压边力 F_1 为 53 kN, 摩擦因数 μ_1 为 0.12, 模具间隙 d_1 为 1.1 mm, 摩擦因数 μ_2 为 0.13, 模具间隙 d_2 为 1.1 mm。

(4) 应用各工序的最佳工艺参数, 使得排气尾管成形后的最大回弹值降低了 13.2%, 点云处的均方根回弹值降低了 12.2%。

参考文献:

- [1] 桂婉婷, 孙玲, 张民权, 等. 不同材料模型和测量方法对冲压回弹预测精度的影响 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (3): 34-40.
Gui W T, Sun L, Zhang M Q, et al. Influence of different material models and measurement methods on stamping springback prediction accuracy [J]. Journal of Plastic Engineering, 2021, 28 (3): 34-40.
- [2] Lin J P, Hou Y, Min J Y, et al. Effect of constitutive model on springback prediction of MP980 and AA6022-T4 [J]. International Journal of Material Forming, 2020, 13 (5): 1-13.
- [3] 徐虹, 刘猛, 国志鹏, 等. 动车组变曲率 L 型截面铝合金门立柱拉弯精度控制 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53 (2): 77-83.
Xu H, Liu M, Guo Z P, et al. Accuracy control of stretch bending for variable curvature L-section aluminum alloy door column of EMU [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53 (2): 77-83.
- [4] Wang J, Li J T, Fu C Y, et al. Study on influencing factors of bending springback for metal fiber laminates [J]. Composite Structures, 2021, 261: 113558.
- [5] Wagoner R H, Lim H, Lee M G. Advanced Issues in springback [J]. International Journal of Plasticity, 2013, 45: 3-20.
- [6] Zhang D J, Cui Z S, Ruan X Y, et al. An analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after U-bending [J]. Computational Materials Science, 2007, 38 (4): 707-715.
- [7] Oujebbour F Z, Habbal A, Ellaia R. Optimization of stamping process parameters to predict and reduce springback and failure criterion [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2015, 51 (2): 495-514.
- [8] Mrabti I E, Touache A, Hakimi A E, et al. Springback optimization of deep drawing process based on FEM-ANN-PSO strategy [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 64: 1-13.
- [9] 刘文杰, 雷声. 汽车纵梁成形回弹及补偿 [J]. 精密成形工程, 2019, 11 (3): 127-132.
Liu W J, Lei S. Forming springback and compensation of auto girder [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11 (3): 127-132.
- [10] 魏鑫, 王雷刚, 王钊, 等. 基于响应面法的汽车后轮罩工艺

- 参数优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 70-77.
- Wei X, Wang L G, Wang Z, et al. Optimization on process parameters for automobile rear wheel cover based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 70-77.
- [11] 段磊, 夏磊, 李庆宝, 等. 汽车前梁后部零件全工序成形回弹仿真及模面补偿研究 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 62-69.
- Duan L, Xia L, Li Q B, et al. Research on whole process forming springback simulation and die surface compensation for rear part of automobile front member [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 62-69.
- [12] 耿平. 铝合金车身覆盖件全工序成形模拟与精度控制 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- Geng P. Simulation and Precision Control for the Whole Forming Process of Aluminum Alloy Automotive Body Panels [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [13] 刘洪涛. 1Cr17 铁素体不锈钢的成形性能研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- Liu H T. Research on Formability of 1Cr17 Ferritic Stainless Steel [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [14] Fu J W, Cui K, Li F, et al. Texture and anisotropic mechanical properties of ferritic stainless steel stabilized with Ti and Nb [J]. Materials Characterization, 2020, 159: 110027.
- [15] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
- GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile test—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [16] 范雷, 颜培, 陈仕齐, 等. 镁合金低温切削性能及工艺参数优化 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54 (7): 53-63, 69.
- Fan L, Yan P, Chen S Q, et al. Optimization of process parameters and performances of cryogenic cutting of magnesium alloy [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54 (7): 53-63, 69.
- [17] 洪旗, 史耀耀, 路丹妮, 等. 基于灰色关联分析和响应面法的复合材料缠绕成型多目标工艺参数优化 [J]. 复合材料学报, 2019, 36 (12): 2822-2832.
- Hong Q, Shi Y Y, Lu D N, et al. Multi-response parameter optimization for the composite tape winding process based on grey relational analysis and response surface methodology [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2019, 36 (12): 2822-2832.
- [18] 王震虎, 周巧英, 刘开勇, 等. 基于响应面模型的车身多目标轻量化设计 [J]. 中国机械工程, 2018, 29 (1): 75-81.
- Wang Z H, Zhou Q Y, Liu K Y, et al. Multi-objective lightweight design of BIWs based on response surface model [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29 (1): 75-81.
- [19] 陈鑫, 王匀, 张太良, 等. 基于数值模拟和响应面法的 CVT 带轮轴终锻成形优化研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (12): 30-36.
- Chen X, Wang Y, Zhang T L, et al. Research on optimization of final forging forming of CVT pulley shaft based on numerical simulation and response surface method [J]. Journal of Plastic Engineering, 2020, 27 (12): 30-36.

·····

(上接第 100 页)

- [7] 何凌, 邓汝荣, 黄雪梅. 阶梯长圆盒形件拉深级进模设计 [J]. 模具工业, 2018, 44 (1): 22-25.
- He L, Deng R R, Huang X M. Drawing progressive die design of step long-roll rectangular box [J]. Die & Mould Industry, 2018, 44 (1): 22-25.
- [8] 吴良周, 龙智雄, 赵成寅, 等. 方形罩壳成形工艺与模具设计 [J]. 模具工业, 2019, 45 (11): 9-14.
- Wu L Z, Long Z X, Zhao C Y, et al. Forming process of square enclosure and the die design [J]. Die & Mould Industry, 2019, 45 (11): 9-14.
- [9] 杨晓龙, 刘莎莎, 王栓强. 薄壁零件成形工艺与模具设计 [J]. 模具工业, 2014, 40 (6): 36-38.
- Yang X L, Liu S S, Wang S Q. Forming process and design of die for thin-walled part [J]. Die & Mould Industry, 2014, 40 (6): 36-38.
- [10] 虞婕华, 黄幸. 拉伸件制造工艺及复合模设计 [J]. 模具制造, 2020, 20 (6): 28-29.
- Yu J H, Huang X. Manufacturing technology of drawing parts and design of compound die [J]. Die & Mould Manufacture, 2020, 20 (6): 28-29.
- [11] 仇建桐, 邓沛然, 邵威, 等. 6061 铝合金热拉深成形研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (9): 124-131.
- Qiu J T, Deng P R, Shao W, et al. Study on hot deep drawing of 6061 aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (9): 124-131.
- [12] 刘志良. 高矩形罩壳拉深成形工艺改进 [J]. 模具工业, 2016, 42 (8): 31-34, 41.
- Liu Z L. Improvement of drawing process for high rectangle cover [J]. Die & Mould Industry, 2016, 42 (8): 31-34, 41.
- [13] 赖辉. 冲裁工艺中对材料的充分利用及搭边值的优化 [J]. 制造业自动化, 2011, 33 (23): 44-46.
- Lai H. Fully use materials by blanking and optimization of overlapping value [J]. Manufacturing Automation, 2011, 33 (23): 44-46.
- [14] 张成浩. 不锈钢外壳拉深成形工艺设计与改进措施 [J]. 模具工业, 2015, 41 (1): 35-38.
- Zhang C H. Drawing forming process design and improvement measures of stainless steel shell [J]. Die & Mould Industry, 2015, 41 (1): 35-38.