

# 轧制差厚板筒形件充液拉深成形影响因素的灰色关联分析

张华伟<sup>1,2</sup>, 李 渊<sup>2</sup>, 吴佳璐<sup>1,2</sup>

(1. 广东石油化工学院 机电工程学院, 广东 茂名 525000; 2. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 针对轧制差厚板零件在传统拉深成形工艺中易产生成形缺陷的问题, 将充液拉深工艺引入轧制差厚板筒形件的成形中, 并通过数值模拟技术对轧制差厚板充液拉深成形过程进行了研究。分析了液池压力对轧制差厚板成形性能的影响, 并通过正交试验结合灰色理论讨论了不同工艺参数对轧制差厚板成形性能的影响规律。研究表明: 充液拉深成形工艺相对于传统拉深成形工艺能够获取成形性能更好的轧制差厚板。随着液池压力的增加, 轧制差厚板筒形件最大厚度减薄率呈现先减小后增大的趋势, 而过渡区最大移动量逐渐减小, 采用 10 MPa 的液池压力能够获取较小的最大厚度减薄率, 并将过渡区最大移动量限制在较低水平。摩擦因数、压边力以及液池压力对于轧制差厚板充液拉深成形性能的影响程度是依次降低的, 采用灰色关联分析获取的优化工艺参数组合可以提高轧制差厚板的成形性能。

**关键词:** 轧制差厚板; 充液拉深; 厚度减薄率; 灰色关联分析; 正交试验; 筒形件

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.02.008

**中图分类号:** TG386      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2023) 02-0062-06

## Grey relation analysis on influencing factors for hydroforming tailor rolled blank cylindrical parts

Zhang Huawei<sup>1,2</sup>, Li Yuan<sup>2</sup>, Wu Jialu<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China;  
2. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** For the problem that the tailor rolled blank (TRB) parts were prone to forming defects in the traditional deep drawing process, the hydroforming process was introduced into the forming process of TRB cylindrical parts, and the hydroforming process of TRB was studied by numerical simulation technology. Then, the influence of liquid pool pressure on the formability of TRB was analyzed, and the influencing laws of different process parameters on the formability of TRB were discussed by the orthogonal test combined with the grey theory. The research indicate that the TRB with better formability can be acquired by the hydroforming process compared with the traditional deep drawing process. As the liquid pool pressure increasing, the maximum thickness thinning rate of TRB cylindrical parts decreases first and then increases, and the maximum movement amount of transition zone gradually decreases. When the liquid pool pressure is 10 MPa, the maximum thickness thinning rate is smaller, and the maximum movement amount of transition zone is restricted to a low level. The influencing degree of friction factor, blank holder force and liquid pool pressure on the formability of TRB hydroforming decreases in turn, and the optimized process parameters combination obtained by grey correlation analysis can improve the formability of TRB.

**Key words:** tailor rolled blank (TRB); hydroforming; thickness thinning rate; grey relation analysis; orthogonal test; cylindrical part

轧制差厚板 (Tailor Rolled Blank, TRB), 简称差厚板, 自从 20 世纪 90 年代诞生以来, 因其特有的几何型面和力学性能, 在汽车制造领域发挥着越

来越重要的作用<sup>[1-3]</sup>。然而, 采用传统的拉深工艺完成差厚板的成形易引发起皱、破裂、回弹、过渡区偏移等缺陷, 限制了其进一步应用<sup>[4-6]</sup>。充液拉深成形是一种新型特种成形工艺, 将其应用于差厚板零件的制造能够抑制成形缺陷, 提高成形质量和成形性能, 简化工艺并降低成本<sup>[7]</sup>。板材的充液拉深工艺是通过向凹模中充满高压液体, 凸、凹模合模时形成反向液压, 从而实现复杂零件的一次成形<sup>[8-9]</sup>。

Kleiner M 等<sup>[10]</sup>对差厚板充液拉深成形过程进行了仿真, 并对差厚板进行了优化。Urban M 等<sup>[11]</sup>

收稿日期: 2022-04-07; 修订日期: 2022-07-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51475086); 广东石油化工学院校级科研基金项目 (2020rc020); 茂名市科技计划立项项目 (2022025)

作者简介: 张华伟 (1983-), 男, 博士, 副教授

E-mail: zhanghw@neuq.edu.cn

以及 Van Putten K 等<sup>[12]</sup>完成了差厚板柔性轧制工艺以及充液拉深成形工艺的有限元模拟，并实现了差厚板零件厚度和刚度的优化。Groche P 等<sup>[13]</sup>通过差厚板管材液压试验分析了退火工艺对差厚板充液拉深成形性能的影响。张艳峰等<sup>[14]</sup>研究了不同加载压力对最终零件成形效果的影响，并对不同阶段进行了工艺优化。灰色理论是由华中科技大学的邓聚龙教授<sup>[15]</sup>首先提出，用来解决“外延明确，内涵不明确”的“小样本，贫信息”问题，差厚板充液拉深的影响因素分析问题亦属于此范畴，非常适于采用灰色理论来求解。目前，很多学者已经开始在材料成形领域的研究中运用灰色理论进行成形优化<sup>[16]</sup>。

本文通过有限元分析软件 LS-DYNA 研究了轧制差厚板筒形件的充液拉深成形性能，模拟了差厚板筒形件的充液拉深成形过程，讨论了液池压力对厚度减薄率和过渡区移动量的影响。最后，采用正交试验结合灰色理论分析了液池压力、压边力、摩擦因数等工艺参数对轧制差厚板成形性

能的影响规律。

## 1 轧制差厚板筒形件充液拉深成形模拟

本文所用轧制差厚板材料牌号为 SPHC，其力学性能如表 1 所示<sup>[17]</sup>。压边圈以及凸凹模定义为刚体，板料定义为变形体，考虑到薄侧与厚侧的厚度差异，压边圈采用分块式。压边圈的运动速度设置为  $5000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，凸模的下行速度为  $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。板料的直径为  $\Phi 200 \text{ mm}$ ，轧制差厚板薄侧和厚侧的厚度分别为 1.2 和 2.0 mm。网格划分采用 4 节点 BT 壳单元，网格尺寸为 5 mm。凸模尺寸为  $\Phi 100 \text{ mm}$ ，厚板侧凸模圆角尺寸为 5.2 mm，薄板侧凸模圆角尺寸为 6.3 mm。凹模尺寸为  $\Phi 104 \text{ mm}$ ，圆角尺寸为 6 mm。板料与凸模和高压液体之间的摩擦因数分别为 0.125 和 0.030。采用 LS-DYNA 动力显示求解算法进行求解计算，差厚板筒形件充液拉深的有限元模型如图 1 所示。

表 1 轧制差厚板力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of TRB

板料厚度 $t/\text{mm}$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	屈服强度 $R_{eL}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	硬化指数 $n$	厚向异性系数 $r$	强化系数 $K/\text{MPa}$	最大伸长率 $A/\%$
1.2	186	170.7	237.5	0.27	1.98	443.0	42.5
45.2	2.0	196	179.5	264.9	0.24	1.50	472.5

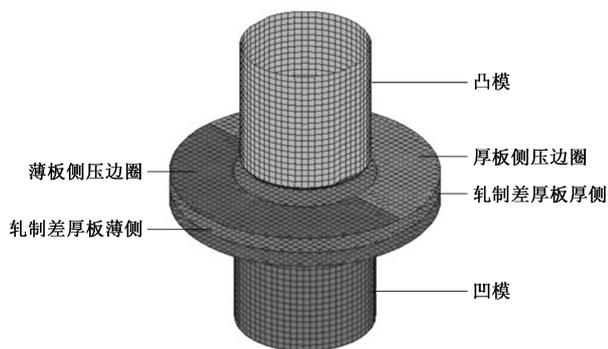


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

## 2 模拟结果分析与讨论

### 2.1 液池压力对厚度减薄率的影响

液池压力与轧制差厚板筒形件最大厚度减薄率的关系如图 2 所示。由图 2 可知，随着液池压力的增加，轧制差厚板筒形件的最大厚度减薄率呈现先减小后增大的趋势。液池压力从 0 MPa 变化至 10 MPa 的过程中，零件的最大厚度减薄率不断减

小。液池压力为 0 MPa 时对应传统拉深成形工艺，这也意味着与传统拉深成形工艺相比，充液拉深成形工艺能够抑制轧制差厚板厚度的过度减薄，提高轧制差厚板的成形性能。当液池压力达到 10 MPa 时，最大厚度减薄率取得最小值。当液池压力超过 10 MPa 时，随着液池压力的进一步增加，最大厚度减薄率逐渐增大，零件出现严重的厚度减薄，直至发生破裂。当液池压力小于 10 MPa 时，由于液池压力处于较低水平，摩擦保持效应较弱，厚度减薄率较大，摩擦保持效应随着液池压力的升高而逐渐显现，产生有益的摩擦，板料的切向流动被抑制，厚度减薄率降低。但是，当液池压力大于 10 MPa 后，随着液池压力的增加，高压液体与轧制差厚板表面的摩擦力进一步增大，有益的摩擦转变为有害摩擦，板料承受的拉应力显著提升，板料厚度减薄严重，直至引起侧壁拉裂或底部圆角破裂。

### 2.2 液池压力对过渡区移动量的影响

图 3 为轧制差厚板筒形件过渡区中心的偏移情况。图 3 中，轧制差厚板筒形件底部过渡区向厚板侧移动，位移为正值；而法兰过渡区向薄板侧移动，位

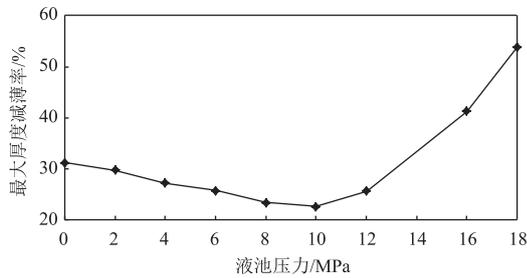


图2 液池压力对轧制差厚板筒形件最大厚度减薄率的影响曲线

Fig. 2 Effect curve of liquid pool pressure on maximum thickness thinning rate for TRB cylindrical part

移为负值；侧壁部分则从向薄板侧移动逐渐转变为向厚板侧偏移。由图3可以看出，随着液池压力值的增加，无论底部过渡区或法兰过渡区的最大移动量均逐渐减小，几乎呈线性变化的趋势，而法兰过渡区的最大移动量在不同液池压力的作用下均略大于底部过渡区。此外，轧制差厚板传统拉深成形（液池压力为0 MPa）时的过渡区最大移动量远大于充液拉深成形。液池压力为0 MPa时，筒形件底部过渡区最大移动量为5.0060 mm，法兰过渡区部位靠近内边缘的最大移动量较小、外边缘的最大移动量较大，达到5.2350 mm。在液池压力达到18 MPa时，底部过渡区的最大移动量仅为0.0849 mm，法兰过渡区的最大移动量也仅有0.1130 mm。原因在于，无论对于底部过渡区或者法兰过渡区，随着液池压力值的增加，高压液体对轧制差厚板下表面的作用力增大，静水压力和摩擦保持效应更为显著，引起的切向摩擦力会进一步抑制由轧制差厚板薄、厚两侧板料厚度和性能差异而导致的材料流动状态的差异，使得轧制差厚板各部分的流动更为均衡，过渡区最大移动量减小。

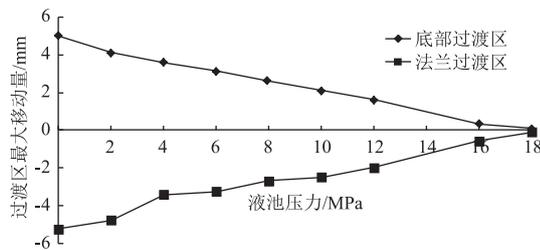


图3 液池压力对轧制差厚板筒形件过渡区最大移动量的影响曲线

Fig. 3 Effect curves of liquid pool pressure on maximum movement amount of transition zone for TRB cylindrical part

综上所述，采用10 MPa的液池压力完成轧制差厚板筒形件的充液拉深成形，能够抑制轧制差厚板零件厚度的过分减薄并将过渡区最大移动量限制在较低水平，保证了轧制差厚板零件能够获得良好的成形性能。

### 3 正交试验与灰色关联分析

由第2节研究结果可知，液池压力直接关系到差厚板最大厚度减薄率与过渡区最大移动量，为轧制差厚板成形性能的关键影响因素之一。然而，轧制差厚板的成形性能还决定于其他成形参数。采用正交试验结合灰色理论可以有效分析各种因素的影响水平，获取理想的参数组合，在不降低分析精度的前提下减少试验样本的数目<sup>[18]</sup>。本文针对影响轧制差厚板筒形件充液拉深成形的5个主要工艺参数进行正交试验，获取灰色关联分析所需要的原始数据。通过灰色关联法完成轧制差厚板筒形件充液拉深的多目标参数优化，计算过渡区最大移动量、最大厚度减薄率与工艺参数之间的关联系数及总目标函数的关联度，计算不同工艺参数在不同水平下的平均灰色关联度及其极差值。极差值越大，表示该工艺参数对目标函数的影响越大，确定不同工艺参数中平均灰色关联度最大的水平组合，即为最优工艺参数组合。

#### 3.1 正交试验设计

除了液池压力之外，压边力、摩擦因数也对轧制差厚板的成形过程具有较大的影响。由于轧制差厚板自身几何形状和力学性能的特殊性，将薄板侧和厚板侧的液池压力、压边力分开考虑，再加上摩擦因数，从而设计5因素4水平正交试验<sup>[19]</sup>，并以拉深深度为50 mm时筒形件底部中心的过渡区最大位移量和最大厚度减薄率作为衡量标准，正交试验结果如表2所示。

#### 3.2 灰色关联分析

以正交试验结果轧制作为数据基础，通过灰色理论进一步分析轧制差厚板充液拉深成形性能的影响因素。灰色关联分析的计算步骤为<sup>[20]</sup>：

第1步，建立目标值*i*的原始数据矩阵 $x_i$ 。

$$x_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k), \dots, x_i(m)) \quad (1)$$

式中： $x_i(k)$ 为目标值*i*的原始数据矩阵中的第*k*个元素向量； $i=1, 2, \dots, n$ ，*n*为目标值个数，本文中*n*=2，分别为底部过渡区最大移动量和最大厚度减薄率； $k=1, 2, \dots, m$ ，*m*为指标个数，本文中*m*=5，分别为薄板侧压边力、厚板侧压边力、薄板侧液池压力、厚板侧液池压力和摩擦因数。

第2步，求初值化变换矩阵 $x'_i$ 。

$$x'_i = (x_i(1)/x_i(1), x_i(2)/x_i(1), \dots, x_i(k)/x_i(1), \dots, x_i(m)/x_i(1)) = (x'_i(1), x'_i(2), \dots, x'_i(k), \dots, x'_i(m)) \quad (2)$$

第3步，求差序列 $\Delta_{0i}(k)$ 。

表 2 正交试验结果  
Table 2 Results of orthogonal test

试验序号	薄板侧压边力/ kN	厚板侧压边力/ kN	薄板侧液池压力/ MPa	厚板侧液池压力/ MPa	摩擦因数	底部过渡区最大 移动量/mm	最大厚度减薄率/ %
1	60	40	2.0	2.0	0.03	2.550	17.857
2	60	30	2.5	2.5	0.02	<b>2.163</b>	16.975
3	60	50	1.5	1.5	0.05	3.029	19.178
4	60	60	3.0	3.0	0.10	3.919	23.764
5	50	40	2.5	1.5	0.10	4.014	22.857
6	50	30	2.0	3.0	0.05	2.398	18.172
7	50	50	3.0	2.0	0.02	2.554	17.536
8	50	60	1.5	2.5	0.03	2.821	18.196
9	70	40	1.5	3.0	0.02	2.297	<b>16.972</b>
10	70	30	3.0	1.5	0.03	2.418	17.757
11	70	50	2.0	2.5	0.10	3.745	23.980
12	70	60	2.5	2.0	0.05	3.012	19.905
13	80	40	3.0	2.5	0.05	2.615	19.159
14	80	30	1.5	2.0	0.10	3.305	23.441
15	80	50	2.5	3.0	0.03	2.422	18.116
16	80	60	2.0	1.5	0.02	2.566	18.391

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0^i(k) - x_i'(k)| \quad (3)$$

式中： $x_0^i(k)$  为第  $i$  个目标值向量。

第 4 步，计算灰色关联系数  $\xi_{0i}(k)$ 。

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta_{0i}(k) + \phi \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)}{\Delta_{0i}(k) + \phi \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)} \quad (4)$$

式中： $\max_i \max_k \Delta_{0i}(k)$  为差序列的最大值；

$\min_i \min_k \Delta_{0i}(k)$  为差序列的最小值； $\phi$  为偏差系数，本文确定为 0.5。

第 5 步，计算灰色关联度  $\gamma_{0i}$ 。

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_{0i}(k) \quad (5)$$

为了分析不同充液拉深工艺参数组合下筒形件的底部过渡区最大移动量和最大厚度减薄率，需要利用灰色理论先求得各自对应的灰色关联系数，最后综合计算灰色关联度。首先，选定基准对原始数据进行初值化变换，即无量纲化处理，本文工艺参数优化的目标是获得更小的底部过渡区最大移动量和最大厚度减薄率，因此，通过分析表 2 中的正交试验结果，确定正交试验中的最优结果为 2.163 和 16.972（见表 2 粗体）为基准数据。将表 2 中的结果数据分别代入式（1）~式（4）中，求得各水平上不同因素的灰色关联系数，再将各目标函数的灰

色关联系数代入式（5），即可计算得到整体的综合灰色关联度，结果如表 3 所示。

表 3 灰色关联系数与灰色关联度  
Table 3 Grey correlation coefficients and gray correlation degrees

试验 序号	灰色关联系数		灰色关联度
	底部过渡区最大移动量	最大厚度减薄率	
1	0.7051	0.7984	0.7518
2	1.0000	0.9991	0.9996
3	0.5166	0.6137	0.5651
4	0.3451	0.3403	0.3427
5	0.3333	0.3732	0.3533
6	0.7975	0.7449	0.7712
7	0.7030	0.8614	0.7822
8	0.5845	0.7411	0.6628
9	0.8735	1.0000	0.9368
10	0.7840	0.8170	0.8005
11	0.3691	0.3333	0.3512
12	0.5216	0.5444	0.5330
13	0.6719	0.6157	0.6438
14	0.4476	0.3513	0.3995
15	0.7813	0.7539	0.7676
16	0.6967	0.7118	0.7042

表 4 为不同工艺参数在各水平下的平均灰色关联度及其极差值。由表 4 能够看出,中水平的薄板侧压边力、低水平的厚板侧压边力、较高水平的薄板侧液池压力、高水平的厚板侧液池压力、低水平的摩擦因数在各自因素中的平均灰色关联度最大,该参数组合即为最优参数组合。因此,经过灰色关联分析后,得到的最优工艺参数组合为:薄板侧压边力为 60 kN,厚板侧压边力为 30 kN,薄板侧液池压力为 2.5 MPa,厚板侧液池压力为 3.0 MPa,摩

表 4 不同因素的灰色关联度与极差

Table 4 Grey correlation degrees and ranges of different factors

工艺参数	平均灰色关联度				极差值
	低水平	中水平	较高水平	高水平	
薄板侧压边力	0.6424	0.6648	0.6554	0.6288	0.0360
厚板侧压边力	0.7427	0.6714	0.6165	0.5607	0.1820
薄板侧液池压力	0.6410	0.6446	0.6634	0.6423	0.0223
厚板侧液池压力	0.6058	0.6166	0.6643	0.7046	0.0988
摩擦因数	0.8557	0.7457	0.6283	0.3617	0.4940

表 5 采用最优工艺参数组合时的数值模拟结果

Table 5 Numerical simulation results obtained by optimal process parameters combination

参数	工艺参数					结果	
	薄板侧压边力/ kN	厚板侧压边力/ kN	薄板侧液池压力/ MPa	厚板侧液池压力/ MPa	摩擦因数	底部过渡区最大移 动量/mm	最大厚度减薄率/ %
数值	60	30	2.5	3.0	0.02	2.148	16.834

## 4 结论

(1) 随着液池压力的增加,轧制差厚板筒形件的最大厚度减薄率呈现先减小后增大的趋势,底部过渡区和法兰过渡区的最大移动量均逐渐减小。与传统拉深成形工艺相比,充液拉深成形工艺能够抑制轧制差厚板过渡区移动以及厚度的过分减薄,提高轧制差厚板的成形性能。

(2) 综合来看,采用 10 MPa 的液池压力完成轧制差厚板筒形件的充液拉深成形,能够获取较小的最大厚度减薄率并将过渡区最大移动量限制在较低水平,保证了轧制差厚板零件能够获得良好的成形性能。

(3) 各工艺参数对轧制差厚板筒形件充液拉深成形性能的影响程度大小为:摩擦因数>厚板侧压

边力>厚板侧液池压力>薄板侧压边力>薄板侧液池压力,按照参数种类进一步简化为:摩擦因数>压边力>液池压力。

再根据各工艺参数的平均灰色关联度的极差值来判断该工艺参数对目标函数的影响程度大小,极差值越大表示该工艺参数对目标函数的影响就越大。因此,由表 4 可以看出,极差值最大的参数为摩擦因数,这说明摩擦因数对轧制差厚板筒形件充液拉深成形性能的影响是最大的,极差值最小的参数为薄板侧液池压力,表明薄板侧液池压力对轧制差厚板筒形件充液拉深成形性能的影响是最小的,按照这种方法分析其他参数的影响程度大小,最后得到各工艺参数对轧制差厚板筒形件充液拉深成形性能的影响程度排序为:摩擦因数>厚板侧压边力>厚板侧液池压力>薄板侧压边力>薄板侧液池压力。如果按照不同种类的参数进行影响程度的排序为:摩擦因数>压边力>液池压力。

采用灰色关联分析得到的最优工艺参数组合进行数值模拟,结果如表 5 所示。由表 5 可以看出,经过优化后工艺参数可以获取更低水平的最大厚度减薄率和底部过渡区最大移动量,进而提升轧制差厚板的成形性能和成形质量。

边力>厚板侧液池压力>薄板侧压边力>薄板侧液池压力,按照参数种类进一步简化为:摩擦因数>压边力>液池压力。

(4) 通过灰色关联分析得到的最优工艺参数组合为:薄板侧压边力为 60 kN,厚板侧压边力为 30 kN,薄板侧液池压力为 2.5 MPa,厚板侧液池压力为 3.0 MPa,摩擦因数为 0.02,通过该组工艺参数进行数值模拟可以得到更优的目标参数值,改善轧制差厚板的成形性能。

## 参考文献:

- [1] Adnan M F, Abdullah A B, Samad Z. Springback behavior of AA6061 with non-uniform thickness section using Taguchi method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 89 (5-8): 2041-2052.
- [2] Zhang S J, Liu X H, Liu L Z. A tensile specimen of tailor rolled blanks with equal probability in yield and its mechanical behavior

- analysis [J]. *Materials*, 2018, 11 (5): 693-711.
- [3] Meyer A, Wietbrock B, Hirt G. Increasing of the drawing depth using tailor rolled blanks-Numerical and experimental analysis [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48 (5): 522-531.
- [4] Zhang H W, Liu X H, Liu L Z, et al. Forming limit and thickness transition zone movement for tailor rolled blank during drawing process [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2016, 23 (3): 185-189.
- [5] Zhang H W, Guan Y P, Wu J L, et al. Transverse bending characteristics in U-channel forming of tailor rolled blank [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2016, 23 (12): 1249-1254.
- [6] 张华伟, 吴佳璐, 刘相华, 等. 轧制差厚板方盒形件起皱缺陷研究 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2016, 37 (11): 1554-1558.  
Zhang H W, Wu J L, Liu X H, et al. Study on wrinkle defect in square box of tailor rolled blank [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2016, 37 (11): 1554-1558.
- [7] Krux R, Homberg W, Kleiner M. Properties of large-scale structure workpieces in high-pressure sheet metal forming of tailor rolled blanks [J]. *Steel Research International*, 2005, 76 (12): 890-896.
- [8] Zhang S H, Zhou L X, Wang Z T, et al. Technology of sheet hydroforming with a movable female die [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43 (8): 781-785.
- [9] Palumbo G, Zhang S H, Tricarico L, et al. Numerical/experimental investigations for enhancing the sheet hydroforming process [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46 (11): 1212-1221.
- [10] Kleiner M, Homberg W, Krux R. High-pressure sheet metal forming of large scale structures from sheets with optimized thickness distribution [J]. *Steel Research International*, 2005, 76 (2-3): 177-181.
- [11] Urban M, Krahn M, Hirt G, et al. Numerical research and optimization of high pressure sheet metal forming of tailor rolled blanks [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177 (1-3): 360-363.
- [12] Van Putten K, Urban M, Kopp R. Computer aided product optimization of high-pressure sheet metal formed tailor rolled blanks [J]. *Steel Research International*, 2005, 76 (12): 897-904.
- [13] Groche P, Mirtsch M. Tailored profiles made of tailor rolled strips by roll forming-Part 2 of 2 [J]. *Steel Research International*, 2012, 83 (1): 106-114.
- [14] 张艳峰, 郎利辉, 曾一畔, 等. 变截面薄壁复杂铝合金管件充液成形压力参数对零件成形的影响 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (4): 89-95.  
Zhang Y F, Lang L H, Zeng Y P, et al. Influence of pressure parameters for hydroforming on forming of complex thin-walled aluminum alloy pipe with variable section [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (4): 89-95.
- [15] 邓聚龙. 灰理论基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.  
Deng J L. *Basis of Grey Theory* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2002.
- [16] 王智, 谢延敏, 胡静, 等. 基于改进灰色神经网络模型的板料成形缺陷预测研究 [J]. *中国机械工程*, 2013, 24 (22): 3075-3079.  
Wang Z, Xie Y M, Hu J, et al. Research on defect prediction in sheet metal forming based on improved gray neural network model [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24 (22): 3075-3079.
- [17] Zhang H W, Liu X H, Liu L Z, et al. Study on nonuniform deformation of tailor rolled blank during uniaxial tension [J]. *Acta Metallurgica Sinica: English Letters*, 2015, 28 (9): 1198-1204.
- [18] 姜银方, 王飞, 李新城, 等. 基于正交试验和神经网络的激光拼焊板回弹预测 [J]. *塑性工程学报*, 2009, 16 (3): 40-44.  
Jiang Y F, Wang F, Li X C, et al. Study on the springback prediction in laser TWBs forming based on orthogonal experiment and neural network [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2009, 16 (3): 40-44.
- [19] 林忠钦, 刘罡, 李淑慧, 等. 应用正交试验设计提高 U 形件的成形精度 [J]. *机械工程学报*, 2002, 38 (3): 83-89.  
Lin Z Q, Liu G, Li S H, et al. Application orthogonal experiment design in increasing dimensional accuracy of U-shaped parts [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38 (3): 83-89.
- [20] 贺全智, 李辉. 基于灰色系统理论的筒形件变薄拉深工艺优化与预测 [J]. *塑性工程学报*, 2019, 26 (3): 57-62.  
He Q Z, Li H. Optimization and prediction of ironing process for cylindrical parts based on grey system theory [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2019, 26 (3): 57-62.

新资讯  
新营销  
新媒体



《QC检测》神页



《机加工》神页



QC检测仪器-公众号



天下机械-公众号

天下机械网 [www.qctms.cn](http://www.qctms.cn)  
QC检测仪器网 [www.qctester.com](http://www.qctester.com)

【神页: 扫码直接阅读、  
收藏、下期自动更新。】