

国产核燃料锆合金格架刚凸冲压工艺参数优化

赖相鹏^{1,2}, 周源^{1*}, 池雪丰², 龚树河², 赵颖春²

¹四川大学物理学院, 辐射物理及技术教育部重点实验室, 四川 成都

²国核铀业发展有限责任公司, 北京

收稿日期: 2024年12月23日; 录用日期: 2025年1月9日; 发布日期: 2025年4月9日

摘要

在科研人员的技术攻关下, 我国已经具备某型号核燃料锆合金格架的国产化制造能力, 包括带材、条带的制造以及格架的组装、焊接能力。为进一步优化国产锆合金条带关键特征的成形性能, 针对国产锆合金条带上的刚凸特征, 基于Dynaform软件开展模拟仿真, 并设计了正交模拟试验, 将最大减薄率、最大主应变和成形高度作为评价指标, 优化了冲压速度、压边力、摩擦系数和冲压间隙等工艺参数。在一定的冲压工艺参数范围内, 影响格架刚凸冲压的工艺因素中, 最大减薄率、成形高度偏差受冲压速度和压边力影响较大, 受摩擦系数和冲压间隙影响较小, 而最大主应变反之。结合冲压试验验证, 采用优化后的工艺参数方案, 最大减薄率降低8.3%, 成形高度与名义值偏差减小40%, 刚凸特征减薄率与成形高度偏差均有减少, 与模拟仿真结果具有一致性。针对刚凸上非线性特征难以检测问题, 使用包络图法检验刚凸合格性, 检验结果表明格架刚凸较好被包络在包络曲线中, 可认为该工艺参数满足刚凸冲压工艺要求。该冲压工艺参数为实际生产加工指导提供了依据。

关键词

锆合金, 冲压工艺, 国产条带, 刚凸, 正交试验

Optimization of Dimple Stamping Process Parameters of Zirconium Alloy Grid for Domestic Nuclear Fuel

Xiangpeng Lai^{1,2}, Yuan Zhou^{1*}, Xuefeng Chi², Shuhe Gong², Yingchun Zhao²

¹College of Physics, Sichuan University, Key Laboratory of Radiation Physics and Technology, Ministry of Education, Chengdu Sichuan

²State Nuclear Uranium Resource Development Co., LTD, Beijing

Received: Dec. 23rd, 2024; accepted: Jan. 9th, 2025; published: Apr. 9th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 赖相鹏, 周源, 池雪丰, 龚树河, 赵颖春. 国产核燃料锆合金格架刚凸冲压工艺参数优化[J]. 核科学与技术, 2025, 13(2): 99-109. DOI: 10.12677/nst.2025.132011

Abstract

Under the technical breakthroughs of researchers, China has developed the capability to domestically manufacture a certain zirconium alloy grid, including the production of strips as well as the assembly and welding capabilities of the grid. To further optimize the formability of key features of domestically produced zirconium alloy strips, the dimple characteristics on the zirconium alloy strips were simulated based on Dynaform software, and orthogonal simulation experiment were designed, and the maximum thinning rate, maximum principal strain and forming height were used as evaluation indexes, and the influence of process parameters such as punching speed, edge pressing force, friction coefficient and punching clearance on the forming quality of dimple was studied. Within a certain range of stamping process parameters, among the process factors affecting the dimple stamping of the grid, the maximum thinning rate and the forming height deviation are greatly affected by the stamping speed and the edge pressing force, and the friction coefficient and stamping clearance are less affected, while the maximum principal strain is the opposite. Based on the verification of the stamping experiment, the optimized process parameter scheme was adopted, resulting in a maximum thinning rate reduction of 8.3%, a reduction of 40% in the deviation between the forming height and the nominal value, and a qualified dimple feature size with reduced thinning rate and forming height deviation, which is consistent with the simulation results. In order to solve the problem that the nonlinear features on the dimple are difficult to detect, the envelope diagram method is used to test the qualification of the dimple, and the test results show that the dimple of the grid is better enveloped in the envelope curve, and it can be considered that the process parameters meet the requirements of the dimple stamping process. The actual production and processing guidance of the stamping process parameters provides a basis.

Keywords

Zirconium Alloy, Stamping Process, Domestic Strips, Dimple, Orthogonal Experiment

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

格架是核反应堆燃料组件的重要组成部件,对于核反应堆堆芯的热工水力性能和燃料组件机械性能有重要影响。压水堆核燃料组件的格架主要由锆合金和镍基合金经冲压、组装、焊接等一系列工艺制造而成。锆合金是核反应堆中被广泛应用的金属材料,具有较好的核特性、优异的热物理性质。但相较于其他应用于反应堆中的金属材料,如镍基合金,锆合金各向异性明显、弹性较好,作为堆芯结构件时能提供较好的机械性能,但进行条带冲压成形时容易发生减薄开裂或成形尺寸不达标的问题。近些年来,越来越多学者开展了锆合金的成形性能相关研究[1]-[3],开发具有优良性能的新型锆合金也成为了研究热点[4]-[8]。其中,弹簧、刚凸的成形问题是锆合金格架条带成形性能研究的重点问题:一、锆合金条带成形过程中弹簧与刚凸处最易出现减薄、开裂的问题;二、弹簧、刚凸成形高度超标则在拉棒时易刮伤燃料棒表面,成形高度不足则无法起到夹持燃料棒的作用;三、弹簧、刚凸存在圆弧特征,尺寸检测较难开展;四、燃料组件破损失效事故大多数为弹簧、刚凸与燃料棒之间的微动磨损引起。

许多研究结果显示,在冲压成形过程中,优化冲压工艺参数可改善零件的成形性能[9],例如冲压速

度[10]-[12]、压边力[13]、冲压间隙[14]、摩擦系数等。利用有限元技术开展冲压模拟并结合冲压试验验证是冲压成形研究的有效方法。陈鹏等[15]利用 Autoform 软件对汽车左右侧边梁加强板的冲压成形过程和回弹开展模拟研究,模拟结果和实际生产结果基本相符,并且制件的最终成形质量和回弹量符合技术要求。李轩颖等[16]利用 Dynaform 软件对某型飞机钛合金钣金件开展热冲压成形有限元模拟研究,以试件壁厚分布为评价指标对成形温度、变形速度及摩擦系数开展优化,根据优化结果,对钛合金进行热冲压成形试验,实际成形效果与模拟结果较为吻合。张勇[17]利用 Dynaform 软件以某型越野车引擎盖内板为研究对象开展冲压速度、压边力、凸凹模间隙和摩擦系数等工艺参数优化研究,并对模拟得出的优化工艺方案进行试验验证,证明了仿真结果的可靠性。由于铝合金带材成本和模具调整价格昂贵,采用模拟仿真的方法开展铝合金条带冲压工艺研究具有时间和成本上的优势。邓振鹏等[18]设计了正交试验,利用 Dynaform 软件对铝合金薄板材料开展了有限元模拟冲压优化,采用优化的工艺参数冲压的薄板带材没有出现开裂现象,模拟结果与试验结果具有一致性。李烨琪等[19]开展铝合金模拟与冲压试验,结果表明模拟与冲压试验结果具有一致性,调节带材的硬化能力和各向异性行为可改善带材冲压性能。雷从一[20]研究了冲压速度、冲压间隙、压边力等冲压工艺参数对铝合金板料减薄的影响,并建立了能够准确预测铝合金最大减薄率的支持向量机预测模型。

铝合金条带一般由级进模冲压而成,同一片条带采用同一种冲压速度、压边力、摩擦系数,为确保条带上所有特征成形情况良好,在开发冲压工艺时往往有一定的裕度,对部分特征而言存在一定的优化空间。然而在以往的研究中,学者较多开展铝合金整条带的力学性能参数以及可冲性研究,较少考虑局部关键特征如弹簧、刚凸的成形性能优化。在科研人员的技术攻关下,我国已经具备某核燃料组件铝合金格架的国产化制造能力,包括带材、条带的制造、清洗以及格架的组装、焊接能力。为进一步优化国产铝合金条带关键特征的成形性能,本研究使用 Dynaform 软件对某核燃料组件格架刚凸的成形特性开展了模拟仿真,并利用正交模拟试验的方法得出优化后的工艺参数,最后开展了条带冲压试验,试验结果表明采用该冲压工艺参数冲压的刚凸特征成形高度均匀,符合技术条件要求,同时减小了刚凸的减薄开裂风险。该冲压工艺参数为实际生产加工指导提供了依据。

2. 条带冲压仿真模型建立

2.1. 冲压模具模型建立

条带冲压工艺设计,需要从多方面进行综合考虑。为建立条带国产化能力,科研人员设计并制造了一套冲压模具,并开发了一套经工艺鉴定的某核燃料组件铝合金条带冲压工艺方案,格架冲压模具见下图 1 所示。该套冲压工艺方案主要有以下优点:自动化程度高、冲制能力强、设施先进、易于操作和维护、设施成本适中、尽可能采用国产设备便于升级改造。同时,由于铝合金带材比较贵,在模具设计时考虑节约材料以降低条带成本。经多次方案修改,对比非国产化工艺,国产化冲压工艺方案在材料利用率上增加了约 30%。由于该套模具为级进模,在需要冲压相关成形特征时,气缸会将对应冲头顶出,可实现让步等操作,由于格架条带特征较多,条带种类也较多,因此为节省成本,结合条带的特性,利用该模具可同时进行 14 种不同格架条带的冲压。在研究冲制间隙对刚凸成形性能的影响时,只需更换对应特征的凹、凸模。

基于已形成的国产化冲压方案,利用 Solidworks 软件中对格架刚凸三维模型中性面进行建模。在 Dynaform 软件中根据实际冲压方案设定工艺参数,带材冲压过程采用双动模型。模型采用 BT 单元,凹模、凸模及压边圈设置为刚体。刘鲜茵[21]对铝合金带材冲压工艺的相关研究表明,网格单元尺寸为 0.1 mm 时,可在减小计算时长的同时获得较高的模拟精度,因此本研究采用 0.1 mm 的网格单元尺寸,模型如图 2 所示。

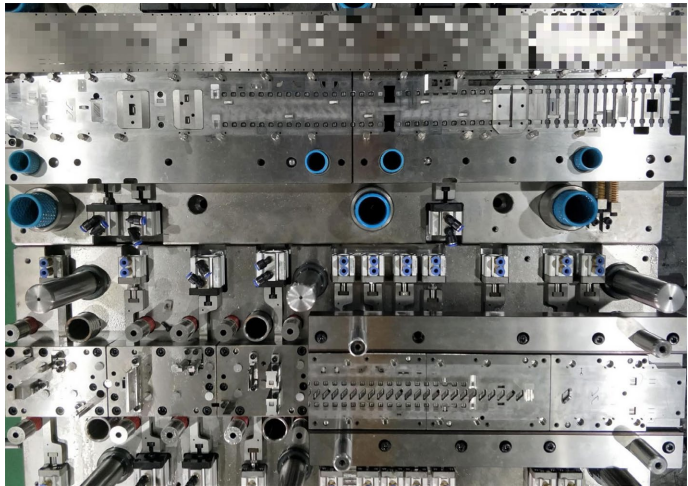


Figure 1. Stamping die of mixing grid
图 1. 格架冲压模具

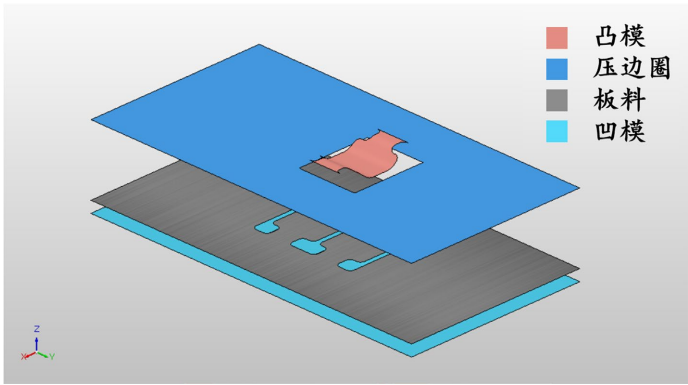


Figure 2. Stamping simulation model of dimple
图 2. 刚凸冲压仿真模型

采用 3-Parameter_Barlat’s 89 材料模型进行模拟，该材料模型为各向异性模型，适用于薄板冲压成形等弹塑性变形研究。本研究采用某公司生产的国产锆合金薄板带材，国产锆合金材料模型参数按照表 1 进行设置，加载方式为 swift [22]。其中，E 为弹性模量， ν 为泊松比，K 为强化系数，n 为硬化指数，YS 为屈服强度， $\bar{r}$ 为平均各向异性系数。

Table 1. Domestic zirconium alloy material model parameters
表 1. 某国产锆合金材料模型参数

E/MPa	ν	K/MPa	n	YS/MPa	$\bar{r}$
89330.978	0.377	673.177	0.353	398.898	6.34

2.2. 预冲压试验

在以往的研究中，对核反应堆格架用锆合金、镍合金带材的相关研究[23]-[25]表明，采用上述建模方法、材料模型可用于模拟薄板带材冲压模拟，实验结果与仿真结果具有一致性。但本研究所采用的新材料(国产锆合金)、新产品结构需要对模型进行仿真验证，受限于试验材料成本、模具调试等费用较为昂贵，

因此采用预冲压实验生产的条带产品进行仿真验证, 该产品经质量检验以及工艺鉴定合格。综上, 采用预冲压试验进行模型验证, 模拟仿真结果的准确度能得到较好的保证。

为了验证该冲压模型及材料模型适用于该国产锆合金带材冲压模拟, 以 JDM125 高速冲床进行锆合金带材, 控制方式为位移控制, 模具间隙为 1.00 t, 摩擦系数为 0.125 (油润滑), 冲压速度为 80 mm/s, 压边力为 10 kN。为了保证结果合理性, 冲压出 30 个刚凸特征, 取 30 次试验平均值作为对比标准。其中, 本研究使用超景深显微镜测量最大减薄率, 使用轮廓仪测量刚凸成形高度, 图 3 为刚凸圆角处观察结果, 图 4 为轮廓仪。

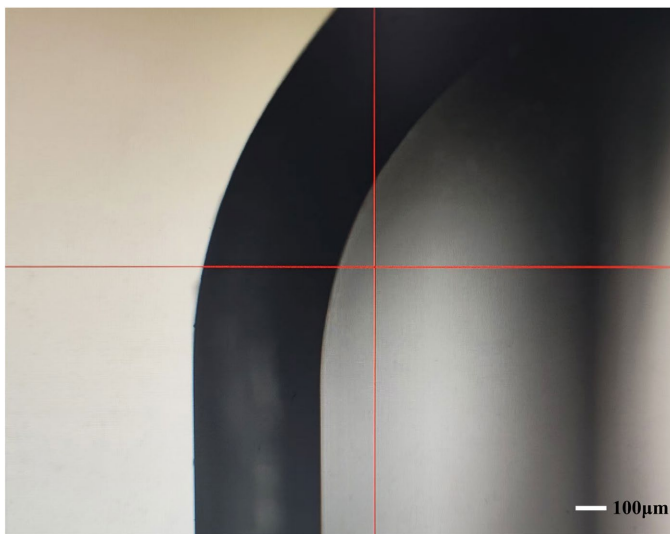


Figure 3. Measurement of dimple thickness reduction

图 3. 格架刚凸减薄率测量

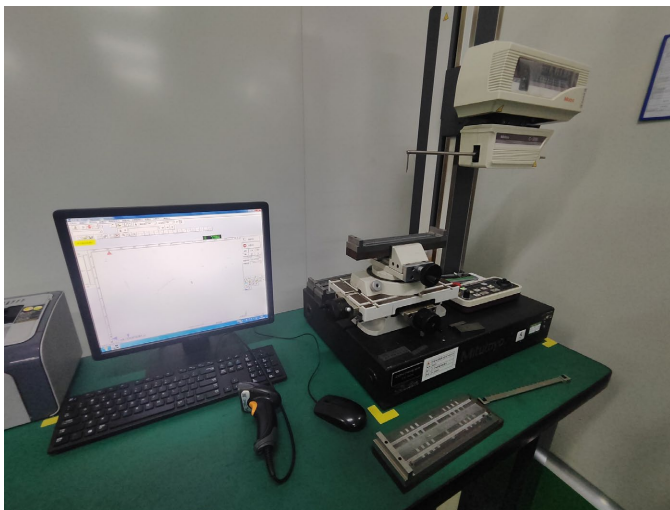


Figure 4. Profilometer

图 4. 轮廓仪

根据前期工作研究并结合冯斌[23]的相关工作, 刚凸圆角处减薄率较大, 因此减薄率测量时取条带圆角处的最大减薄率为刚凸最大减薄率的取值。对预冲压试验与模拟仿真结果如下表 2 所示, 两者吻合较好, 最大减薄率偏差为 0.136%, 成形高度偏差较小(0.001 mm)。因此可采用该有限元模拟方法开展本研究。

Table 2. Comparison between experimental and numerical results
表 2. 模拟值与实验值比较

	最大减薄率	误差/%	成形高度偏差/mm
试验	9.558	0.136	0.010
仿真	9.694		0.011

3. 正交模拟试验

基于前期工作，工艺参数在一定范围内可保证冲压出合格的条带产品，本研究旨在一定工艺参数范围内寻找最优工艺参数。该工艺参数范围冲压速度为 60~120 mm/s，压边力范围为 10 kN~40 kN，摩擦系数为 0.075~0.225，冲压间隙为 0.9~1.2 t。本次模拟仿真将最大减薄率 Y1、最大主应变 Y2，成形高度偏差的绝对值 Y3 作为评价指标进行综合分析。

最大减薄率与最大主应变是评价材料成形性能优劣的典型指标，在材料冲压工艺开发与优化方面具有相当的指导意义。减薄率是指板料在生产中的厚度变化，减薄率越大，带材的厚度越小；减薄率越小，带材越不容易开裂，成形质量越好，是评价板材成形性能优劣的较为直观的指标。最大主应变是带材成形后所产生的应变，主应变越大则产生的应力越大，板材越容易开裂，成形质量就越差，也可以用来评价板材的成形情况。同时在工业生产中，较关注产品的宏观指标，例如条带平面度、成形表面有无裂纹、弹簧成形高度等等，这些宏观指标直接决定了产品质量。本研究选取成形高度作为评价指标之一，成形高度指弹簧、刚凸上的燃料棒接触平面与带材平面的距离。偏差越小、成形高度越均匀，弹簧、刚凸越能在保持良好的夹持作用的同时不会刮伤燃料棒表面。在研究中，均认为这三种评价指标越小越好。

本研究属于多目标优化研究，因此采用正交试验设计作为多目标优化研究的研究方法。正交试验设计是利用正交表安排与分析多试验变量的一种设计方法。该方法在试验变量的全部参数值组合中，挑选部分有代表性的参数组合进行试验，通过对这部分试验结果的分析了解全面试验的情况，找出最优的参数组合[26][27]。正交试验方法是一种机械加工领域成熟的方法，其有效性已经得到过验证[28]。

3.1. 正交模拟试验结果分析

将冲压速度、压边力、摩擦系数和冲压间隙这 4 个因素作为冲压成形性的影响因素。在板料成形过程中，冲压速度主要影响材料的成形速度，从而影响材料的成形极限图以及硬化特征；压边力主要影响材料的起皱与破裂，压边力过大则容易导致破裂；压边力过小则容易导致起皱；摩擦通过影响内应力的影响而厚度；冲压间隙对冲裁断面质量，冲裁力和产品成形形状误差都有很大影响，对于本研究主要影响成形尺寸。以上 4 种因素作用在材料冲压成形中的作用各不相同，在以往的研究中，研究者在不考虑这 4 个因素间的交互作用的条件下，试验及仿真结果具有一致性，同时可以获得良好的优化结果[2][18][21][29]。因此本研究假设这 4 个因素之间不存在交互作用，采用 L16_4_5 正交表进行正交试验设计，共进行 16 次模拟。正交模拟试验方案及模拟结果如表 3 所示。

对格架刚凸进行极差计算分析[30]， k_n 为各因素在第 n 个水平下实验指标的平均值， k 值越小，该因素影响越显著，结果见表 4。极差 R 值越大，该因素影响越显著。

正交模拟试验结果表明对于指标 Y1，影响因素的主次顺序为 $A > B > D > C$ ，最优试验方案为 A3B1C1D4；对于指标 Y2，影响因素的主次顺序为 $D > C > B > A$ ，最优试验方案为 A3B3C2D4 & A3B4C2D4；对于指标 Y3，影响因素的主次顺序为 $B > A > D > C$ ，最优试验方案为 A3B1C1D3。对于冲压速度，最优试验结果均为 A3；对于压边力，选取 B1 为最优参数可获得最小 Y1 及 Y3，同时也可以获

得次优的 Y2；对于摩擦系数，选取 C1 为最优参数可获得最小 Y1 及 Y3；对于冲制间隙，选取 D3 为最优参数可获得最小 Y1 及 Y3。综上，得出最优试验方案组合为 A3B1C1D3，即冲压速度取 100 mm/s，压边力取 10 kN、摩擦系数取 0.075 (脂润滑)、冲压间隙取 1.1 t。

Table 3. Orthogonal experiment schemes and simulation results

表 3. 正交试验方案及模拟结果

	A	B	C	D	Y1	Y2	Y3
方案	冲压速度	压边力	摩擦系数	冲裁间隙	最大减薄率	最大主应变	成形高度偏差
	mm/s	kN		mm	%		mm
1	60	10	0.075	0.9 t	9.843	0.280	0.018
2	60	20	0.125	1.0 t	9.68	0.314	0.011
3	60	30	0.175	1.1 t	10.229	0.287	0.030
4	60	40	0.225	1.2 t	10.611	0.215	0.047
5	80	10	0.125	1.1 t	9.360	0.275	0.032
6	80	20	0.075	1.2 t	9.322	0.217	0.022
7	80	30	0.225	0.9 t	10.819	0.239	0.071
8	80	40	0.175	1.0 t	10.152	0.329	0.051
9	100	10	0.175	1.2 t	9.172	0.241	0.005
10	100	20	0.225	1.1 t	9.652	0.298	0.007
11	100	30	0.075	1.0 t	9.568	0.311	0.027
12	100	40	0.125	0.9 t	9.188	0.198	0.011
13	120	10	0.225	1.0 t	9.995	0.301	0.007
14	120	20	0.175	0.9 t	10.572	0.314	0.025
15	120	30	0.125	1.2 t	14.613	0.179	0.075
16	120	40	0.075	1.1 t	9.527	0.272	0.017

Table 4. Calculation results of range analysis

表 4. 极差分析结果

试验指标	k	A	B	C	D
Y1	k1	10.091	9.592	9.565	11.065
	k2	9.913	9.806	10.710	9.800
	k3	9.395	11.307	10.031	9.683
	k4	11.177	9.870	10.269	10.028
	极差 R	1.782	1.715	1.145	1.382
	最优水平	A3	B1	C1	D3

续表

Y2	k1	0.274	0.274	0.270	0.258
	k2	0.265	0.286	0.241	0.314
	k3	0.262	0.254	0.293	0.283
	k4	0.267	0.254	0.263	0.213
	极差 R	0.012	0.032	0.052	0.101
	最优水平	A3	B3 & B4	C2	D4
Y3	k1	0.026	0.015	0.021	0.031
	k2	0.044	0.032	0.032	0.024
	k3	0.013	0.051	0.028	0.022
	k4	0.031	0.032	0.033	0.037
	极差 R	0.031	0.036	0.012	0.015
	最优水平	A3	B1	C1	D3

3.2. 优化结果对比

将获得的最优方案进行模拟验证，结果如图 5 所示。与原带材相比，在减薄率和主应变分布图中，位于带材圆角处的最大减薄率和最大主应变较工艺优化前均有所降低，格架刚凸最大减薄率从图 5(a)的 9.694%降为图 5(c)的 9.132%，最大主应变从图 5(c)的 0.304 降为图 5(d)的 0.251。结合表 5，成形高度与名义值偏差绝对值从 0.011 降至 0.007。这三项评价指标均有所改善，经正交试验优化后，刚凸的冲压性能有所改善。

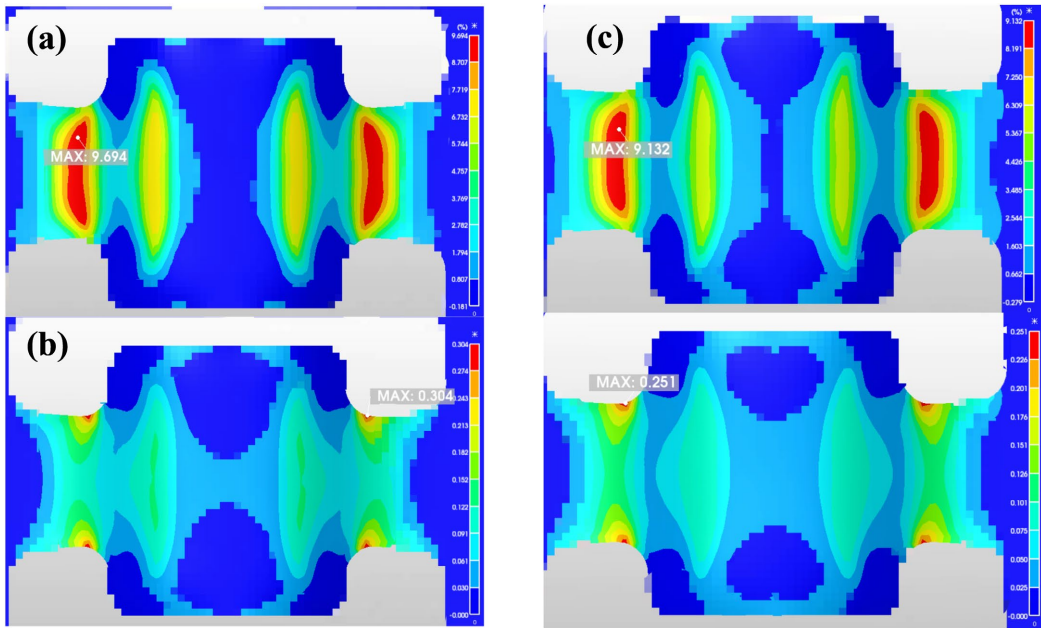


Figure 5. Comparison of nephogram before and after optimization
图 5. 优化前后云图对比

Table 5. Comparison of optimization results
表 5. 优化结果对比

试验方案	Y1	Y2	Y3
模拟优化前	9.694	0.304	0.011
模拟优化后	9.132	0.251	0.007

同时，可以看出刚凸容易发生减薄现象的区域主要集中于带材圆角处，其它部位则不容易发生减薄；主应变较大的区域也位于带材圆角处，其它部位的主应变较小。说明条带圆角处比其它部位的成形性能差，与以往的研究结论具有一致性。

4. 条带冲压试验

4.1. 减薄率与成形高度

根据优化后的工艺参数方案对锆合金带材进行试验验证，其他试验条件与预冲压试验条件相同，为了检验该冲压方案进行多次冲压作业是否较易导致冲模产生疲劳现象，共进行 216 次刚凸冲压作业。由于成形尺寸较易测量，最大减薄率相对较难测量，故对所有刚凸的成形尺寸进行全检，对其中 30 个刚凸的最大减薄率进行抽检，成形高度如图 6 所示。检测结果表明，成形尺寸均匀，符合技术条件要求的成形高度公差要求，连续对刚凸特征进行 216 次冲压后，成形高度偏差并无增大，该冲制工艺参数符合批量化生产要求。按某型核燃料组件格架条带技术条件要求，条带的最大减薄率不能超过 15%，采用优化后工艺参数冲制的刚凸全部满足技术条件要求。结合表 6，可以看出减薄率较优化前降低了 8.3%，成形高度与名义值偏差减小了 40%，提高了刚凸冲压成形的质量。

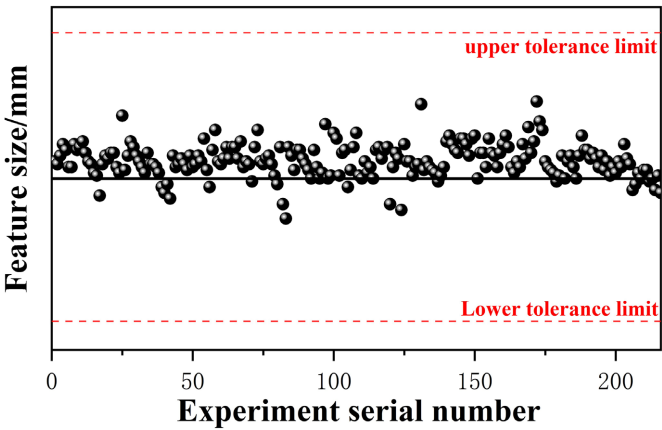


Figure 6. Measurement results of forming height
图 6. 成形高度测量结果

Table 6. Comparison of punching experiment results
表 6. 冲压试验结果对比

试验方案	最大减薄率%	成形高度偏差/mm
试验优化前	9.588	0.010
试验优化后	8.792	0.006

4.2. 包络图分析

因弹簧、刚凸中存在较多非线性特征,尤其是存在较多的圆弧特征难以确定圆心。为验证使用该工艺方案冲压的弹簧、刚凸符合标准,开展了轮廓包络图检测。轮廓包络图检测通过上下偏差值,确定一个轮廓区间,然后用轮廓仪划出轮廓线,将由于轮廓仪作出来的的轮廓线(测量曲线)放在设计的轮廓区间(包络图),如果测量曲线在包络图区间内就视为合格。否则,视为不合格。误差包络法能实现相对快速的检测,但这种方法存在不足。可以满足快速、定性检测的需求,而不能定量给出检测数据。这种方法在模具调试完成后,在实际生产中是可以采用进行条带冲制质量的监测。

据图 7 包络图测量结果显示,该批刚凸较好被包络在包络曲线中,使用该冲压工艺参数冲压的刚凸特征合格,因此可认为该冲压工艺满足技术条件要求。

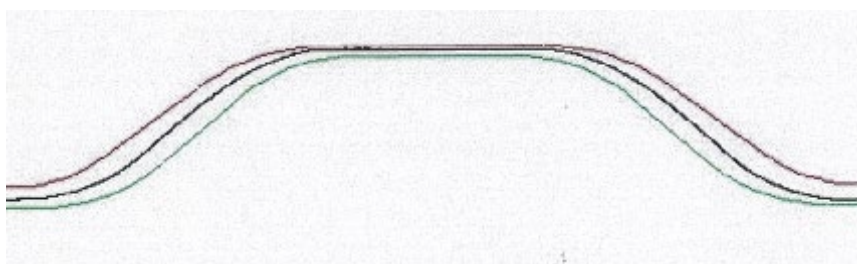


Figure 7. Envelope diagram measurement results

图 7. 包络图测量结果

5. 结论

1) 影响格架刚凸冲压的工艺因素中,最大减薄率、成形高度偏差受冲压速度和压边力影响较大,受摩擦系数和冲压间隙影响较小,而最大主应变反之。

2) 优化后的工艺参数方案为:冲压速度为 100 mm/s、压边力为 10 kN、摩擦系数为 0.075、冲压间隙为 1.1 t,经冲压试验验证,相比优化前最大减薄率降低 8.3%,成形高度与名义值偏差减小 40%。

3) 本研究采用优化工艺参数经冲压试验及包络图验证,刚凸成形高度均匀且符合技术条件要求,刚凸最大减薄率减小,与数值模拟优化结论一致。该冲压工艺参数为实际生产加工指导提供了依据。

基金项目

本研究得到了山东省重点研发计划资助——核动未来科技示范工程一期(2022SFGC0501)支持。

参考文献

- [1] 袁佳健,毛建中,张小民,等. 铝合金条带冲压成形的多目标工艺优化[J]. 锻压技术, 2023, 48(7): 93-99.
- [2] 张伟刚,葛新锋. 铝合金薄板冲压工艺的多种种群社会群体算法优化[J]. 机械设计与制造, 2023(10): 75-80.
- [3] 刘榕镇. 新型铝合金薄板带材冲压性能及其影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [4] Rogachev, S.O., Sundeev, R.V. and Nikulin, S.A. (2021) Effect of Severe Plastic Deformation by High-Pressure Torsion at Different Temperatures and Subsequent Annealing on Structural and Phase Transformations in Zr-2.5% Nb Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **865**, Article 158874. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158874>
- [5] Lai, P., Lu, J., Zhang, H., Liu, Q., Zeng, Q., Guo, X., et al. (2020) The Corrosion Behavior of M5 (Zr-1Nb-0.12O) Alloy in 360°C Water with Dissolved Oxygen. *Journal of Nuclear Materials*, **532**, Article 152079. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152079>
- [6] Nikulin, S.A., Rozhnov, A.B., Belov, V.A., Li, E.V. and Glazkina, V.S. (2011) Influence of Chemical Composition of Zirconium Alloy E110 on Embrittlement under LOCA Conditions—Part 1: Oxidation Kinetics and Macrocharacteristics

- of Structure and Fracture. *Journal of Nuclear Materials*, **418**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.07.017>
- [7] Steinbrück, M. and Böttcher, M. (2011) Air Oxidation of Zircaloy-4, M5® and ZIRLO™ Cladding Alloys at High Temperatures. *Journal of Nuclear Materials*, **414**, 276-285. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.04.012>
- [8] Yagnik, S. and Garde, A. (2019) Zirconium Alloys for LWR Fuel Cladding and Core Internals. In: Odette, G.R. and Zinkle, S.J., Eds., *Structural Alloys for Nuclear Energy Applications*, Elsevier, 247-291. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-397046-6.00007-1>
- [9] 龙玲, 殷国富, 宋超, 等. 基于支持向量机的随机聚焦搜索算法优化冲压成形工艺[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(5): 220-225.
- [10] Simões, V.M., Oliveira, M.C., Laurent, H. and Menezes, L.F. (2019) The Punch Speed Influence on Warm Forming and Springback of Two Al-Mg-Si Alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, **38**, 266-278. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.020>
- [11] Jin, C.K., Jang, C.H. and Kang, C.G. (2015) Die Design Method for Thin Plates by Indirect Rheo-Casting Process and Effect of Die Cavity Friction and Punch Speed on Microstructures and Mechanical Properties. *Journal of Materials Processing Technology*, **224**, 156-168. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.05.002>
- [12] Fathi, H., Emadoddin, E., Mohammadian Semnani, H.R. and Mohammad Sadeghi, B. (2016) Effect of Punch Speed on the Formability Behavior of Austenitic Stainless Steel Type 304L. *Metals and Materials International*, **22**, 397-406. <https://doi.org/10.1007/s12540-016-5495-x>
- [13] Dewang, Y., Panthi, S.K. and Hora, M.S. (2018) Some Aspects of Blank Holding Force in Stretch Flanging Process. *Materials Today: Proceedings*, **5**, 6789-6798. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.338>
- [14] Chang, Y., Han, S., Li, X., Wang, C., Zheng, G. and Dong, H. (2018) Effect of Shearing Clearance on Formability of Sheared Edge of the Third-Generation Automotive Medium-Mn Steel with Metastable Austenite. *Journal of Materials Processing Technology*, **259**, 216-227. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.038>
- [15] 陈鹏, 段磊, 马舟, 等. 汽车左右侧边梁加强板冲压工艺优化及回弹控制研究[J]. 锻压技术, 2023, 48(12): 72-80.
- [16] 李轩颖, 徐雪峰, 付春林, 等. 某型飞机钛合金钣金件热冲压成形工艺参数优化[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(1): 92-97.
- [17] 张勇. 基于 DynaForm 技术和正交试验的引擎盖内板冲压工艺参数优化[J]. 锻压技术, 2018, 43(4): 64-69.
- [18] 邓振鹏. 新铝合金薄板带材的可冲性及冲制工艺优化[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [19] 李焯琪, 刘劲松, 邓偲瀛, 等. 材料特性对铝合金带材冲压成形影响的数值模拟研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2020, 39(3): 30-35.
- [20] 雷从一. 铝合金条带成形机理及冲制工艺优化[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [21] 刘鲜茵. 新型铝合金格架条带冲制成形及工艺优化[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2022.
- [22] Swift, H.W. (1952) Plastic Instability under Plane Stress. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **1**, 1-18. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(52\)90002-1](https://doi.org/10.1016/0022-5096(52)90002-1)
- [23] 冯斌. 基于 MLP 的铝合金凸成形减薄率预测[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [24] 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]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [25] 何平. 基于有限元分析的特种条带冲压模具数字化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [26] 邓聪颖, 殷国富, 方辉, 等. 基于正交试验的机床结合部动态刚度优化配置[J]. 机械工程学报, 2015, 51(19): 146-153.
- [27] 孙明楠, 殷国富, 胡腾. 基于模态柔度的机床结合部动态刚度正交优化方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(4): 90-96.
- [28] 莫远东, 王雅芝, 黄舒琦, 等. 基于集成正交实验与 CNN 方法的微细电火花微孔加工精度[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(4): 261-272.
- [29] 何鹏, 瞿二虎, 李凤玲. 基于正交试验法的冲压工艺优化及数值模拟研究[J]. 模具制造, 2023, 23(10): 1-4.
- [30] Lakshmi, M. and Das, R. (2023) Performance Evaluation of CNN-Based Crack Detection for Electrical Discharge Machined Steel Surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, **238**, 738-751. <https://doi.org/10.1177/09544089221146464>