基于响应面法的大型锥筒件内凸缘缩口 成形工艺参数优化

李碧聪¹,李国俊¹,张治民¹,郭为民²

(1.中北大学 材料科学与工程学院,太原 030051;2.晋西工业集团有限责任公司,太原 030027)

摘要:目的 探究大型锥筒件内凸缘缩口成形的最佳工艺参数。方法 首先,根据内凸缘缩口成形的工艺原 理,使用三维软件构建内凸缘缩口成形的仿真模型,并用 Deform 进行仿真成形。在此基础上,以缩口件高 度和成形载荷作为内凸缘成形质量的判断依据,基于响应面法得到关于缩口件高度和成形载荷的回归预测 模型。分析不同的摩擦因数、挤压速度和凹模锥度对内凸缘成形质量的影响,优化得到最佳的成形工艺参 数,最后进行物理试验验证。结果 通过响应面法拟合得到了缩口件高度和成形载荷关于3因素的多元非线 性模型,模型通过 F 检验得出的显著性概率 P 值均小于 0.000 1,失拟项值均大于 0.05,且模型预测值与试 验模拟值的关系接近直线,充分说明了该数学模型的合理性。当摩擦因数为 0.3、挤压速度为 3 mm/s、凹模 锥度为 9°时,毛坯的成形载荷最小,为 90 kN,缩口件高度最低,为 1 350 mm,与模型预测相比,误差均 小于 10%。结论 优化后的工艺参数使内凸缘成形质量高、表面光滑无缺陷、成形载荷小,为大型锥筒的内 凸缘成形工艺提供了参考。

关键词:内凸缘;缩口成形;响应面法;缩口件高度;成形载荷;工艺优化 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.04.021 中图分类号:TG312 文献标识码:A 文章编号:1674-6457(2023)04-0197-08

Optimization of Necking Forming Process Parameters for Inner Flange of Large Conical Cylinder Part Based on Response Surface Method

LI Bi-cong¹, LI Guo-jun¹, ZHANG Zhi-min¹, GUO Wei-min²

School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
 Jinxi Industry Group Co., Ltd., Taiyuan 030027, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the best process parameters for the necking forming of the inner flange of the large conical cylinder part. Firstly, according to the process principle of the inner flange necking forming, the simulation model of the

收稿日期: 2022-12-11

Received: 2022-12-11

基金项目:山西省自然科学基金资助项目(201801D121106)

Fund: Natural Science Foundation of Shanxi (201801D121106)

作者简介:李碧聪(1996—),男,硕士生,主要研究方向为铝合金精密塑性成形技术。

Biography: LI Bi-cong (1996-), Male, Postgraduate, Research focus: precision plastic forming technology of aluminum alloy.

通讯作者:李国俊(1969—),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向为铝合金精密塑性成形技术。

Corresponding author: LI Guo-jun (1969-), Male, Master, Professor-level senior engineer, Research focus: precision plastic forming technology of aluminum alloy.

引文格式:李碧聪,李国俊,张治民,等.基于响应面法的大型锥筒件内凸缘缩口成形工艺参数优化[J].精密成形工程, 2023, 15(4): 197-204.

LI Bi-cong, LI Guo-jun, ZHANG Zhi-min, et al. Optimization of Necking Forming Process Parameters for Inner Flange of Large Conical Cylinder Part Based on Response Surface Method[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(4): 197-204.

inner flange necking forming was built by 3D software, and the simulation forming was performed with Deform. On this basis, the height of the necked part and the forming load were used as the basis for judging the forming quality of the inner flange, and the regression prediction model about the height of the necked part and the forming load was obtained based on the response surface method. The effects of the different friction factors, extrusion speed and concave die taper on the forming quality of the inner flange were analyzed for optimization to get the best forming process parameters, and finally physical tests were conducted for verification. The response surface method was used to fit the multivariate nonlinear model of necked part height and forming load with respect to three factors. The probability of significance *P*-values obtained when the model passed through the *F*-test were all less than 0.000 1 and the mismatched term values were all greater than 0.05. In addition, the relationship between the values predicted by the model and the values simulated by the experiment was close to a straight line, which fully illustrated the reasonableness of the mathematical model. When the friction factor, extrusion speed and die taper were 0.3, 3 mm/s and 9°, respectively, the forming load of the workpiece reached a minimum of 90 kN and the height of the necked part was a minimum of 1 350 mm. Compared with the predictions by the model, the errors were less than 10%. The optimized process parameters contribute to high quality inner flange forming, smooth surface without defects and low forming load, which provides a reference for the inner flange forming process of large conical cylinders.

KEY WORDS: inner flange; necking forming; response surface method; height of necked part; forming load; process optimization

近年来,大型锥筒件在航空和航天中的应用越来 越广泛,特别是薄壁锥筒带内凸缘连接构件,而此类零 件结构复杂,对精度和性能要求较高,目前国内对于该 特性零件的生产主要采用切削加工、旋压技术^[1-4],但 机械加工使原材料浪费严重、性能较低;旋压技术变 形不均匀,存在压尾、折叠、开裂等缺陷。因此,寻 求节材、高效的内凸缘成形方法已经成为亟需解决的 难题。

缩口工艺是一种应用广泛的塑性加工技术,具有 变形均匀、缺陷较少的优点,得到了国内外学者的广 泛认可[5-7]。孙浩博等[8]针对大型锥形筒件传统制造方 法成形性能较差的缺点,提出了一种大型管坯分区冷 却缩口、多次扩口混合的热模压成形方法。张稳等^[9] 利用管材的拉伸试验和 ABAOUS 软件研究了管材缩 口的应力应变特征,得到了 5A06 管的极限缩口系数。 李晓冬等[10]采用正交试验研究了管坯厚度、管坯直径 等参数对铝合金管缩口增厚过程的影响 ,得到了缩口 增厚的成形规律。张国智[11]研究了缩口件过渡段的变 形机理,用能量法和矢量分析法建立了缩口件不同过 渡形式克服总能量的理论模型,为精密缩口工艺提供 了依据。刘泽等^[12]针对"肚大口小"的筒形件,提出 了一种分瓣式内外支撑缩口成形方法,解决了传统工 艺金属流线不完整的缺陷。Lu^[13]根据 Levy-Mises 方 程,提出了一种近似方法,用于计算球形凹模缩口预 成形、缩口比和加载速率。上述成果均证明了缩口工 艺的可行性和适用广泛性,但对于大型锥筒件内凸缘 缩口成形的研究甚少。文中提出采用缩口工艺成形内 凸缘,在数值模拟的基础上应用响应曲面法得到最佳 的工艺参数,用物理试验验证该工艺的可靠性,为内 凸缘的成形提供技术支持。

1 目标零件的成形工艺介绍

1.1 零件特征

带内凸缘特征的大型锥筒件如图 1 所示,筒件为 旋转体,总高 1 300 mm,外径 ¢448 mm,内凸缘直 径 ¢360 mm,凸缘高度 288 mm。





1.2 成形工艺方案设计

由图 1 可知,该零件结构可分为上、中、下 3 部 分,下面部分为锥形,中间部分为直壁段,上面部分 为带内凸缘的直壁筒形,针对该类结构件性能高、一 致性好的要求,决定采用一体化的塑性成形方法^[14-15]。 根据零件的特点,提出如图 2 所示的工艺方案,成形



图 2 成形方案 Fig.2 Forming scheme

过程为:棒料镦粗+反挤压出直壁筒体+缩口出锥形 体+缩口成形出内凸缘。

2 内凸缘成形有限元数值模拟及响 应面试验设计

2.1 内凸缘成形原理

本文主要研究内凸缘的缩口过程。图 3a 为传统 的内凸缘内翻边成形方法,但此方法凸模与坯料完全 接触,脱模困难。图 3b、c 为内凸缘的缩口成形原理 图,由图可知,凸模与坯料在锥形段部分相接触,在 直壁段部分留有间隙,此间隙距离即为内凸缘的厚 度。坯料在凸模的带动下向下运动,随着运动的进行, 坯料的外凸缘部分与凹模接触,外凸缘在凹模给予的 径向压力下开始朝内变形,坯料与凸模侧壁接触后停 止朝内运动,最后形成内凸缘。



图 3 成形原理

Fig.3 Forming principle: a) inward flanging; b) before necking forming; c) after necking forming

2.2 有限元模型及仿真分析

模型选用的材料为 6061 铝合金,有限元模型中

的工件设为塑性体,其他结构均设为刚性体,毛坯网 格划分数量为 100 000,根据 6061 铝合金的热加工温 度范围,选择毛坯温度为 450 ℃,模具温度为 420 ℃。 图 5 为模拟得到的坯料高度图,可知,缩口件的高度 为 1 420 mm,从内凸缘的成形原理分析,坯料的锥 形段和中间直壁部分均不变形,仅有外凸缘朝内变形 形成内凸缘,坯料的壁厚在变形前后未发生变化,根 据塑性变形的体积不变原理,变形后的缩口件高度应 为 1 330 mm,而模拟得到的高度为 1 410 mm,相差 甚多,说明变形后坯料的壁厚不均匀,筒壁的直线度 不够好,内凸缘成形形状不规则,因此,必须对各工 艺参数对缩口件高度的影响规律进行研究,得到最优 的工艺参数。



图 4 有限元模型 Fig.4 Finite element model Fig.5

图 5 坯料高度 Fig.5 Height of workpiece

2.3 响应面模型建立

响应面法是一种采用多元二次回归方程拟合设 计变量与响应目标之间的函数关系,通过对回归方程 的分析寻求最优工艺参数,解决多变量问题的统计方法^[16-17],因此,本研究利用响应面法来探究各工艺参数对坯料内凸缘成形均匀性的影响。

内凸缘成形过程中,合理的凹模锥度^[18-19]可以提 高金属的流动性及变形的均匀性,凹模结构如图6所 示。金属坯料与凸凹模间合理的摩擦因数可以提高产 品的表面质量^[20-22],降低成形载荷。凸模的下压速率 也能够影响成形载荷^[23-25],对坯料的变形均匀性和等 效应变有很大的影响。因此,选取摩擦因数*A*、挤压 速度*B*和凹模锥度*C*作为设计变量。



图 6 缩口凹模 Fig.6 Concave die for necking forming

根据变形完成后的坯料高度可以判断内凸缘的 成形质量,因此,将缩口件高度 *R*₁ 作为第一响应变 量。成形载荷越小,说明金属流动性越好,变形越均 匀,故将成形载荷 *R*₂ 作为第二响应变量。设计变量 因素水平如表 1 所示。

表 1 成形工艺参数水平 Tab.1 Forming process parameter level

Factor	Low level	High level
Friction factor A	0.3	0.7
Extrusion speed $B/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	1	5
Bottom die taper angle $C/(^{\circ})$	3	9

通过 Design-Expert 软件生成 Box-Behnken 试验 方案表,其结果见表 2。

3 响应面模型的拟合与分析

3.1 响应面模型的拟合

根据表 2 的模拟结果,建立缩口件高度和成形载 荷与摩擦因数、挤压速率、凹模锥度之间的多元非线 性回归方程,如式(1)—(2)所示。

 $\begin{array}{ccc} R_1 = 1 \ 910.20 + 14.25A + 4.50B - 27.00C - 0.5AB - 5.50AC - \\ 1.50BC - 7.60A^2 - 14.10B^2 - 7.10C^2 \end{array} \tag{1}$

 $R_2 = 99.20 + 40.12A - 15.13B - 53.00C - 6.50AB - 25.75$ $AC + 3.75BC + 30.40A^2 + 55.90B^2 + 20.15C^2$ (2)

图 7a、b 为缩口件高度 R₁和成形载荷 R₂的模型 预测值与试验值关系图,由图可知,预测值和试验 值都较为接近直线,说明关于缩口件高度和载荷值 的两个模型可以有效解释 3 个因素的影响关系,可 信度较高。

表 2 试验方案及响应目标 Tab.2 Test scheme and response objectives

Number	A	$B/(\mathrm{mm}\cdot\mathrm{s}^{-1})$	<i>C</i> /(°)	R_1/mm	R_2/kN
1	0.3	1	6	1 366	143
2	0.7	3	9	1 380	109
3	0.5	5	9	1 359	107
4	0.5	3	6	1 410	103
5	0.5	3	6	1 411	98
6	0.5	1	9	1 457	144
7	0.5	5	3	1 424	199
8	0.5	3	6	1 415	95
9	0.5	1	3	1 416	256
10	0.3	3	3	1 400	139
11	0.3	3	9	1 365	83
12	0.3	5	6	1 380	145
13	0.5	3	6	1 407	90
14	0.7	1	6	1 398	239
15	0.7	3	3	1 437	268
16	0.7	5	6	1 410	215
17	0.5	3	6	1 405	110







3.2 响应面结果分析

表 3 和表 4 分别为缩口件高度和成形载荷的方 差分析表,由表 3、4 可知,拟合得到的缩口件高度 和成形载荷模型的 P 值均小于 0.000 1,失拟项值大 于 0.05,说明模型的显著性高,且模型的决定系数 接近于 1,说明拟合度较高。由表 3 的分析结果可以 看出,3 个因素的显著性概率排序为:凹模锥度 C< 摩擦因数 A<挤压速度 B,说明在缩口件高度响应面 模型中,凹模锥度影响最大,挤压速度影响较小。 从表 4 分析可知,3 个因素显著性概率排序为:摩擦 因数 A≈凹模锥度 C<挤压速率 B,说明在载荷值模型 中,摩擦因数和凹模锥度影响都较大,挤压速度相 对于其他两个因素影响较小,但3个因素显著性概 率都远小于0.05,说明3个因素对于成形载荷值都 有很大影响。

为了更直观地观察内凸缘成形过程中设计变量 与响应目标之间的关系,利用 3D 图形进行分析,图 8 所示为各设计变量间的交互作用对缩口件高度的影 响关系 3D 图。由图 8a 可知,当凹模锥度为定值时, 缩口件高度随摩擦因数的增大而增大,随挤压速度的 增大而先增大后减小,当摩擦因数为 0.3、挤压速度 为 1 mm/s 时,缩口件高度最低。由图 8b 可知,当摩 擦因数为定值时,缩口件高度随着凹模锥度的增大而 减小。由图 8c 可知,当挤压速度一定,摩擦因数为 0.3、凹模锥度为 9°时,缩口件高度最小。

表 3 缩口件高度方差分析 Tab.3 Variance analysis of height of necked part

Factor	Sum of squares	DF	Mean square	F value	P value	Significance
Model	9 092.54	9	1 010.28	30.52	< 0.000 1	Significant
A-A	1 624.50	1	1 624.50	49.08	0.000 2	
<i>B-B</i>	162.00	1	162.00	4.89	0.062 6	
C-C	5 832.00	1	5 832.00	176.19	< 0.000 1	
AB	1.00	1	1.00	0.030 2	0.866 9	
AC	121.00	1	121.00	3.66	0.097 5	
BC	9.00	1	9.00	0.271 9	0.618 1	
A^2	224.38	1	224.38	6.78	0.035 2	
B^2	801.85	1	801.85	24.23	0.001 7	
C^2	194.69	1	194.69	5.88	0.045 7	
Residual	231.70	7	33.10			
Lack of fit	172.50	3	57.50	3.89	0.111 4	Not significant
Pure error	59.20	4	14.80			
Cor total	9 324.24	4	14.80			

表 4 成形载荷方差分析 Tab.4 Variance analysis of forming load

Factor	Sum of squares	DF	Mean square	F value	P value	Significance
Model	60 545.98	9	6 727.33	47.30	<0.000 1	Significant
A-A	12 880.12	1	12 880.12	90.56	<0.000 1	
B-B	1 830.13	1	1 830.13	12.87	0.008 9	
C-C	22 472.00	1	22 472.00	158.01	<0.000 1	
AB	169.00	1	169.00	1.19	0.311 8	
AC	2 652.25	1	2 652.25	18.65	0.003 5	
BC	56.25	1	56.25	0.395 5	0.549 4	
A^2	3 891.20	1	3 891.20	27.36	0.001 2	
B^2	13 157.09	1	13 157.09	92.51	<0.000 1	
C^2	1 709.57	1	1 709.57	12.02	0.010 4	
Residual	995.55	7	142.22			
Lack of fit	760.75	3	253.58	4.32	0.095 7	Not significant
Pure error	234.80	4	58.70			
Cor total	61 541.53	16				







图 9 所示为各设计变量间的交互作用对载荷值 的影响关系 3D 图,由图 9a 可知,当凹模锥度为定值 时,成形载荷值随着摩擦因数的增大而不断增大,随 着挤压速度的增大而先减小后增大。由图 9b 可知, 当摩擦因数为定值时,成形载荷值随着凹模锥度的增



Fig.9 Surface of forming load R_2 : a) influence value of *A-B* interaction on the forming load; b) influence value of *B-C* interaction on the forming load; c) influence value of *A-C* interaction on the forming load

大不断减小。由图 9c 可知,当挤压速度一定,摩擦 因数为 0.3、凹模锥度为 9°时,成形载荷值最小。 综上所述,若要使缩口件高度变化最小的同时缩 口力较小,需要满足的条件有:1)润滑条件要好, 尽可能减少模具与坯料之间的摩擦;2)在满足液压 机吨位的条件下,可以适当提高液压机下压速率,提 高工作效率;3)在满足凹模极限抗拉强度的条件下, 尽可能增大凹模锥度。通过 Design-expert 软件对模 型进行优化,得到最优参数为:摩擦因数 *A*=0.3,挤 压速度 *B*=3 mm/s,凹模锥度 *C*=9°,预测结果为缩口 件高度 *R*₁=1 365 mm,成形载荷 *R*₂=83 kN。

4 物理试验验证

为了验证带内凸缘锥筒件优化结果的准确性,进行物理试验验证。试验在1250 kN液压机上进行, 滑块下压速度为3 mm/s,为了有更好的润滑条件, 使用汽油、二硫化钼和石墨混合作为润滑剂,尽可能 涂抹均匀,图10为试验过程。

图 11 为成形结果,由图可知,试制品表面光滑, 无缺陷产生,经过测量可知,缩口件高度为1 350 mm, 成形所需的最大载荷为 90 kN,与预测值进行对比, 误差均小于 10%,说明该模型对缩口件内凸缘成形优 化有非常好的效果。



图 10 物理试验 Fig.10 Physical test

图 11 试验结果 Fig.11 Test result

5 结论

1)建立了缩口件高度 R_1 和成形载荷 R_2 关于 3 因素的多元非线性回归方程, R_1 =1 910.20+14.25A+ 4.50B-27.00C-0.5AB-5.50AC-1.50BC-7.60 A^2 -14.10 B^2 -7.10 C^2 ; R_2 =99.20+40.12A-15.13B-53.00C-6.50AB-25.75AC+3.75BC+30.40 A^2 +55.90 B^2 +20.15 C^2 。

2)通过 3D 图分析可知:随着摩擦因数 A 的增 大,缩口件高度增大,成形载荷也不断增大;随着挤 压速度 B 的增大,缩口件高度先增大后减小,成形载 荷先减小后增大;随着凹模锥度 C 的增大,缩口件高度逐渐减小,成形载荷也不断减小。

3)通过响应面法得到了最佳的几何参数组合, 即摩擦因数为 0.3、下压速度为 3 mm/s、凹模锥度为 9°,并进行了试验验证,结果表明,成形载荷的误差 为 7.7%,缩口件高度的误差为 3.7%,充分证明了模 型的合理性。

参考文献:

- 张洪瑞, 詹梅, 郑泽邦, 等. 航天大型薄壁回转曲面 构件成形制造技术的发展与挑战[J]. 机械工程学报, 2022, 58(20): 166-185.
 ZHANG Hong-rui, ZHAN Mei, ZHENG Ze-bang, et al. Development and Challenge of Forming Manufacturing Technologies for Aerospace Large-Scale Thin-Wall Axisymmetric Curved-Surface Components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(20): 166-185.
 HAO Zeng-liang, YANG Zhe-yi, WEI Wei, et al. Finite
- [2] HAO Zeng-Iiang, YANG Zhe-yi, WEI Wei, et al. Finite Element Simulation and Microstructure of Two-Pass Inner Spinning Process of Curved-Generatrix Cone Cylindrical Parts with Annealing/Quenching[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(12): 3305-3314.
- [3] 晏畅,肖刚锋,夏琴香,等. 锥筒形件剪切-拉深复合旋压成形可旋性表征方法研究[J]. 锻压技术, 2021, 46(5): 94-100.
 YAN Chang, XIAO Gang-feng, XIA Qin-xiang, et al. Research on Characterization Method of Spinnability in Share Days Days in Characterization Characterization Characterization Characterization Spinnability in Share Days Days in Characterization Spinnability in Share Days in Characterization Spinnability in Spinnability in

Shear-Deep Drawing Composite Spinning for Conical Cylindrical Part[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(5): 94-100.

- [4] 肖刚锋,张义龙,夏琴香,等. 镍基高温合金锥筒形件拉深旋压时成形质量及组织性能研究[J]. 锻压技术,2021,46(9):190-196.
 XIAO Gang-feng, ZHANG Yi-long, XIA Qin-xiang, et al. Research on Forming Quality, Microstructure and Properties for Ni-Based Superalloy Conical-Cylindrical Parts during Deep-Drawing Spinning[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(9):190-196.
 [5] CHEN C Y, CHEN T C. Experimental and Numerical
- [5] CHEN C Y, CHEN T C. Experimental and Numerical Analysis of Titanium Alloy Microtube Tube-End Nosing Forming[J]. Materials Science Forum, 2018, 920: 16-21.
- [6] OBA W, IMAIZUMI Y, KAJIKAWA S, et al. Two-Step Forming for Improvement of Forming Limit in Rotary Nosing with Relieved Die for Reduction of Tube Tip[J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 1743-1748.
- [7] LIU Gui-hua, GUO Yong-qiang, JIANG Zhi. Influence of Heating Models on Necking Deformation during Tube Extrusion Process[J]. Advanced Materials Research, 2011, 189-193: 1778-1781.
- [8] 孙浩博,陈响军,徐斌,等.大型锥形筒件热成形数 值模拟与工艺优化[J].塑性工程学报,2021,28(5): 192-201.

SUN Hao-bo, CHEN Xiang-jun, XU Bin, et al. Numerical Simulation and Process Optimization on Thermal Forming of Large-Scale Conical Cylinder[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(5): 192-201.

 [9] 张稳,鄂大辛,高志纯. 5A06 管材力学性能测试及其 缩口成形性的有限元分析[J]. 精密成形工程,2017, 9(1):41-46.
 ZHANG Wen, E Da-xin, GAO Zhi-chun. Mechanical

Property Testing and Finite Element Analysis of Nosing Formability of 5A06 Tube[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(1): 41-46.

[10] 李晓冬,徐雪峰,魏科,等. 5A02 铝合金管材缩口增 厚的影响显著性及成形规律研究[J].塑性工程学报, 2021,28(2):63-69.

LI Xiao-dong, XU Xue-feng, WEI Ke, et al. Study on Influence Significance and Forming Law of Necking and Thickening of 5A02 Aluminum Tube[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(2): 63-69.

- [11] 张国智. 缩口件不同过渡段形式的变形机理研究[J]. 机械设计与制造, 2022(5): 48-51.
 ZHANG Guo-zhi. Study on Deformation Mechanism of Different Transition Forms of Necking Part[J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(5): 48-51.
- [12] 刘泽,张星,于建民,等."肚大口小"筒形件的缩口挤压成形工艺研究[J]. 热加工工艺,2018,47(7):115-120.

LIU Ze, ZHANG Xing, YU Jian-min, et al. Research on Necking Extrusion Forming Process of Cylindrical Parts with "Big Belly and Small Mouth"[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(7): 115-120.

- [13] LU Y H. Study of Preform and Loading Rate in the Tube Nosing Process by Spherical Die[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005, 194(25/26): 2839-2858.
- [14] 李馨家,崔振山,冯超,等.核电封头-过渡锥体一体 化成形全工艺过程多尺度模拟[J].塑性工程学报, 2016,23(6):1-7.

LI Xin-jia, CUI Zhen-shan, FENG Chao, et al. Multi-Scale Simulation on the Whole Integrated Forming Process for Nuclear Pressure Vessel Head and over Cone[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23(6): 1-7.

- [15] 黄秀冬, 刘雪冬, 杜冰, 等. 新能源汽车铁芯冲裁粘 压一体化成形工艺[J]. 模具工业, 2022, 48(9): 35-39. HUANG Xiu-dong, LIU Xue-dong, DU Bing, et al. Integrated Manufacturing Process with Blanking Adhesive Pressing for New Energy Vehicle Iron Core[J]. Die & Mould Industry, 2022, 48(9): 35-39.
- [16] 高冲,刘淑梅,霍文军.基于响应面法的铝合金连杆 锻造工艺优化[J]. 热加工工艺, 2020, 49(11): 97-100.
 GAO Chong, LIU Shu-mei, HUO Wen-jun. Optimization of Forging Process for Aluminum Alloy Connecting Rods Based on Response Surface Method[J]. Hot

Working Technology, 2020, 49(11): 97-100.

- [17] 赵继全,曲周德,武川,等.基于多尺度建模与响应 面法的 55NiCrMoV7 模具钢调质热处理工艺优化[J]. 精密成形工程, 2022, 14(2): 74-82.
 ZHAO Ji-quan, QU Zhou-de, WU Chuan, et al. Optimization of Quenching and Tempering Heat Treatment Process for 55NiCrMoV7 Die Steel Based on Multi-Scale Modeling and Response Surface Methodology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(2): 74-82.
- [18] 高亚男, 鲍远通. 模具参数对热镦不锈钢/碳钢复合螺 栓的影响[J]. 中国金属通报, 2018(4): 279-280.
 GAO Ya-nan, BAO Yuan-tong. Influence of Die Parameters on Hot Upsetting Stainless Steel/Carbon Steel Composite Bolt[J]. China Metal Bulletin, 2018(4): 279-280.
- [19] 郝花蕾, 孙志超, 吉卫. AA6061 管锥形模轴压失稳起 皱过程建模仿真[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(5): 171-177.
 HAO Hua-lei, SUN Zhi-chao, JI Wei. Buckling Process Modeling of AA6061 Tube under Axial Compression on Conical Die[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(5): 171-177.
- [20] 刘存平, 龚利华, 郭晟, 等. 盒型件拉深工艺参数优 化设计研究[J]. 机械工程与自动化, 2022(6): 138-140. LIU Cun-ping, GONG Li-hua, GUO Sheng, et al. Study on Optimization Design of Process Parameters of Deep Drawing for Box-Shaped Parts[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2022(6): 138-140.
- [21] CHEN Ping, LIU Xiao-jie, HUANG Ming-ji, et al. Numerical Simulation and Experimental Study on Tribological Properties of Stamping Die with Triangular Texture[J]. Tribology International, 2019, 132: 244-252.
- [22] 王俊杰,杨建,成小乐,等.摩擦系数及模角对钨合 金静液挤压过程的影响研究[J].重型机械,2021(6): 56-62.
 WANG Jun-jie, YANG Jian, CHENG Xiao-le, et al. The Influence of Friction Coefficient and Mold Angle on the Process of Static Extrusion Process of Tungsten Alloy[J]. Heavy Machinery, 2021(6): 56-62.
- [23] ZHAO Ying, PEI Jiu-yang, GUO Li-li, et al. Effects of Extrusion Speed of Continuous Extrusion with Double Billets on Welding Performance of 6063 Al Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(6): 1561-1571.
- [24] LIU Xuan, ZHANG Zhi-qiang, HU Wen-yi, et al. Effects of Extrusion Speed on the Microstructure and Mechanical Properties of Mg₉Gd₃Y_{1.5}Zn_{0.8}Zr Alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(4): 313-319.
- [25] YI Jie, LIU Zhi-wen, ZENG Wen-qi. Isothermal Extrusion Speed Curve Design for Porthole Die of Hollow Aluminium Profile Based on PID Algorithm and Finite Element Simulations[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(7): 1939-1950.