

基于响应面法的摩擦旋压温升研究

孙守义, 王 进, 李宝阁, 曹高威, 张新月

(青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266000)

摘要: 为了探究摩擦旋压过程中进给速度、主轴转速及锥形件的成形角度等工艺参数对温升的影响规律以及各因素间的交互作用, 进行了 Box-Behnken 实验设计。基于实验设计和测温实验, 建立了铝合金摩擦旋压过程中温升相对进给速度、主轴转速、锥形件的成形角度等工艺参数的响应面模型并分析了不同因素对摩擦旋压中温升影响的原因。结果表明: 成形角度对温升的影响最大, 其次是主轴转速及进给速度; 工艺参数的不同会影响旋压力的大小和刀具在工件上走过的路程, 从而产生不同的加工温度。改变旋压加工中的刀具形式, 可显著提升板料温度, 提高工件的成形性。当进给比较小时, 不仅加工过程中温升提高, 工件的表面质量也得到改善。

关键词: 摩擦旋压; 温升变化; 响应面法; 进给速度; 主轴转速; 锥形件成形角度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.005

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 12-0035-06

Study on temperature rise for friction spinning based on response surface method

Sun Shouyi, Wang Jin, Li Baoge, Cao Gaowei, Zhang Xinyue

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266000, China)

Abstract: A Box-Behnken experimental design was conducted to investigate the influence laws of process parameters such as feeding rate, spindle speed and forming angle of tapered part on the temperature rise in friction spinning process and the interaction between these factors. Based on the experimental design and temperature measurement experiments, the response surface model of the temperature rise relative to the process parameters such as feeding rate, spindle speed and forming angle of tapered part during the aluminum alloy friction spinning process was established, and the causes of different factors affecting the temperature rise in friction spinning were analyzed. The results show that the forming angle has the biggest influence on the temperature rise, followed by the spindle speed and the feeding rate, and the difference of process parameters could affect the value of spinning force and the distance that the tool travels on the workpiece, resulting in different processing temperatures. Changing the tool form in the spinning process can significantly increase the temperature of sheet and improve the formability of workpiece. When the feeding ratio is relatively small, not only the temperature rise in the processing process is increased, but the surface quality of the workpiece is also improved.

Key words: friction spinning; temperature rise change; response surface method; feeding rate; spindle speed; forming angle of tapered part

摩擦旋压工艺将摩擦棒作为旋压刀具, 通过刀具与工件间的滑动摩擦产生热量, 在不使用外部加热设备的条件下, 提高加工温度。相较于传统旋压, 摩擦旋压在加工过程中依靠摩擦热的产生来降低加工硬化对工件的影响, 提升材料的可成形性。相较于加热旋压而言, 通过摩擦产热代替外部加热, 节省了时间、投资和维护的成本。应用于较难成形的

轻质金属和一般的金属材料, 可以提高材料旋压成形的性能, 成形壁厚更厚的工件。通过选择合适的工艺参数, 例如轴向进给速度、主轴转速及锥形件成形角度控制摩擦热的产生, 以在局部区域影响晶粒的结构和硬度^[1-2]。

图1为铝合金板材通过摩擦旋压制造带法兰工件的旋压成形装置。在接触区, 温度因摩擦而急剧升高, 摩擦棒通过轴向与法向进给使材料变形并生成所需的几何形状。摩擦旋压工艺可以实现更大的变形, 产生更复杂的几何形状, 并且可以专门设置工件特性^[3]。当选用旋轮作为加工刀具, 加工过程中旋轮因接触摩擦发生转动, 无法将测温导线黏附于旋轮之上, 因此, 不具备接触式测量加工温度的

收稿日期: 2022-09-27; 修订日期: 2022-12-23

基金项目: 山东省重点研发计划项目 (2019GGX102023)

作者简介: 孙守义 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1769420635@qq.com

通信作者: 王 进 (1978-), 男, 博士, 教授

E-mail: wangjin@qut.edu.cn

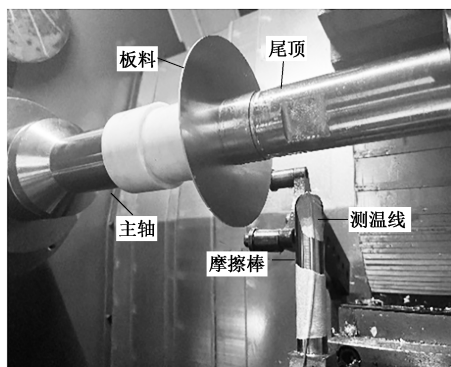


图 1 旋压成形装置

Fig. 1 Spinning device

条件。在摩擦旋压中，摩擦棒与工件之间属于线接触，板料随主轴旋转，但摩擦棒不旋转，具备接触式测温的条件。加工过程中，在摩擦棒的摩擦区域产生温度聚集，摩擦热会向板料、空气及刀具扩散，将电偶丝贴于摩擦棒并靠近摩擦区域处，热量通过热传导达到摩擦棒上方的测温线，实现接触式测量加工温度的目的。

目前，许多学者针对摩擦旋压已进行了大量研究。Benjamin L 等^[1]的实验结果表明摩擦旋压是一种创新的成形技术，它突破了传统工艺的现有成形极限，并在高效制造未来由管材和板材制成的轻质结构中具有影响零件性能的巨大潜力。Hess S 等^[2]使用现代统计分类和回归方法阐述了摩擦旋压工艺，特别是法兰加工的工艺原理、工艺特点和重要参数。Homberg W 等^[3]通过摩擦旋压方式，探究了影响工件性能的因素，发现可以在半成品和侧面上制造与应用几何形状，除了各种形状外，还可以产生非常锋利的几何形状和渐变过渡。Gao P F 等^[4]设计了摩擦旋压中的新工具系统，可控制材料流动，通过更少的材料实现零件的加工，显著减少现有工具和机器负载，从而提高耐用性。Werner H 等^[5]介绍了摩擦旋压中转速与进给对表面纹理的影响，较高的转速和较低的进给速度可以提高表面质量。Benjamin L 等^[6]展示了如何使用现代统计分类和回归方法对法兰表面粗糙度进行分析和经验建模。此外，阐述了摩擦旋压工艺的工艺原理，特别是法兰加工的工艺特点和重要参数。Hess S 等^[7]选取进给比和旋轮与芯模之间的间隙偏离率这两个工艺参数为研究变量，探究了锥形件剪切旋压中壁厚偏差和圆度的关系。国内学者虽对摩擦旋压的研究较少，但其对加热旋压及普通锥形角旋压加工的研究对摩擦旋压也具有一定的指导意义。温涛等^[8]通过实验探究

了铝锂合金的热机械变形机理，发现旋压变形可以提高材料的拉伸强度。陈永来等^[9]采用有限元方法对铝锂合金半球壳体旋压成形进行仿真分析，优化了旋压成形工艺参数，并采用旋压方法制备了铝锂合金半球。汪发春等^[10]研究了旋压过程中材料出现的破裂、起皱、扭曲和扩径等现象并提出了解决措施，辅以精密整形和热处理工序，研制了几何尺寸和力学性能均满足要求的 5A06 铝合金曲母线型体，为类似形状制件的旋压成形提供了参考。刘光军等^[11]采用 ABAQUS 软件对 6061 铝合金无芯模的热旋压过程进行数值模拟，系统分析了管坯厚度方向的不均匀变形。

以响应面方法作为实验设计的基础，确定以进给速度、主轴转速以及锥形件的成形角度作为自变量因素，分析 3 个因素对旋压加工中温升的影响程度，建立了工艺参数与硬度的回归分析预测模型，并且揭示了各工艺参数间的交互作用。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

铝合金由于可塑性强、比强度高和抗蚀性好，使得旋压塑性加工工艺成为铝合金锥形类零件的有效成形方法^[12]。选定三系铝合金板材为摩擦旋压加工的母材，板材直径为 $\Phi 142$ mm，厚度为 1.5 mm。

1.2 实验方案

机床设备如图 2a 所示，测温装置如图 2b 所示。摩擦棒材料采用高速钢，表面沉积 CrTiAlN 等耐热耐磨高硬涂层，可以显著减少磨损。摩擦棒圆角半径为 10 mm，刀具安装角度为 90° 。设置各工艺参数的大小，并通过摩擦旋压实验确定各工艺参数及其交互作用对加工温升的影响规律。根据机床参数，设计合理的锥形件尺寸，已有芯模直径为 $\Phi 50$ mm，所设计的锥形件直径必须大于芯模直径，且设计的锥形件尺寸需满足在加工开始时不会因摩擦棒的剪切而破坏，图 3 为设计的不同锥形件的尺寸。为防止加工时间过长，热量向周围介质扩散，摩擦棒的进给采取单道次。

摩擦旋压过程中，影响温升变化的因素很多，其中摩擦棒的进给速度 $V(A)$ 、主轴转速 $n(B)$ 、锥形件成形角度 $\alpha(C)$ 均会对摩擦旋压过程中的温升 ΔT 产生影响。本文采用 Box-Behnken 的设计方法，设计了 17 组实验，针对不同影响参数设置了合理的分布范围，通过设置影响参数的不同取值确定影响



图 2 机床 (a) 及测温设备装置 (b)
Fig. 2 Machine tool (a) and temperature measuring equipment (b)

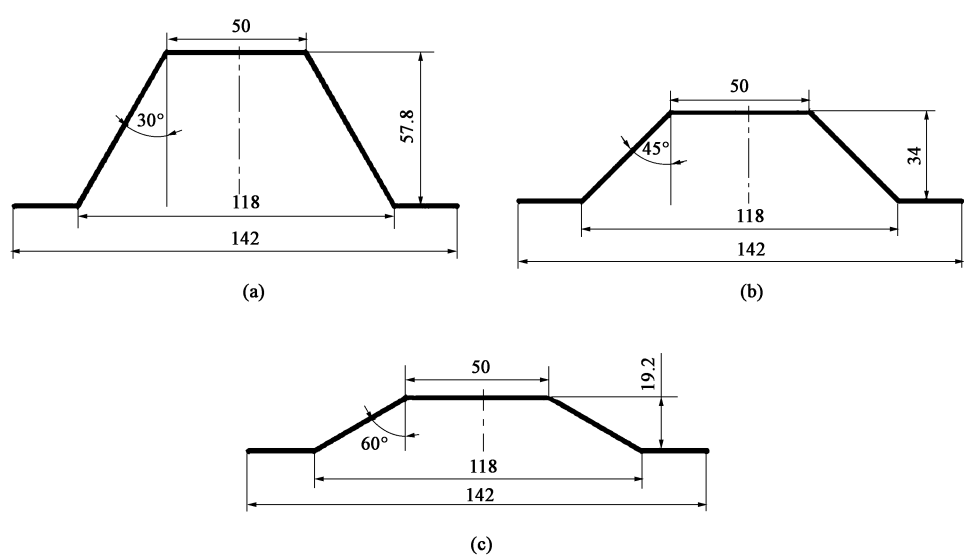


图 3 不同锥形件的尺寸
(a) 30°锥形件 (b) 45°锥形件 (c) 60°锥形件
Fig. 3 Dimensions of different conical parts
(a) 30° conical part (b) 45° conical part (c) 60° conical part

温升变化的规律。不同参数间组成了 3 因素 3 水平的实验设计表, 各因素水平见表 1, 实验结果见表 2。

表 1 实验设计因素和水平

Table 1 Factors and levels for experimental design

水平	因素		
	$A/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$B/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$C/(^{\circ})$
-1	50	200	30
0	100	400	45
1	150	600	60

A 、 B 、 C 这 3 个因素是摩擦旋压过程中影响加工温度的关键变量, 各因素大小按梯度设置, 本文

旨在通过响应面法找到 A 、 B 、 C 这 3 因素中对温升影响最显著的因素及各因素间的交互作用。

2 结果及分析

2.1 实验结果

本文基于响应曲面法进行了 Box-Behnken 设计, 这种方法考虑了实验的随机误差, 计算简单, 并且所得预测模型连续, 是解决实际问题的有效手段^[13-14]。部分零件实物图如图 4 所示。图 5 中给出了在室温 24.7℃、进给速度为 100 mm·min⁻¹ 与主轴转速为 600 r·min⁻¹ 下测量得到的 45°与 60°锥形件加工时的温升曲线。摩擦旋压时铝合金板料会产生强力变形, 考虑到强力旋压时的高速变形, 铝合金坯料在旋

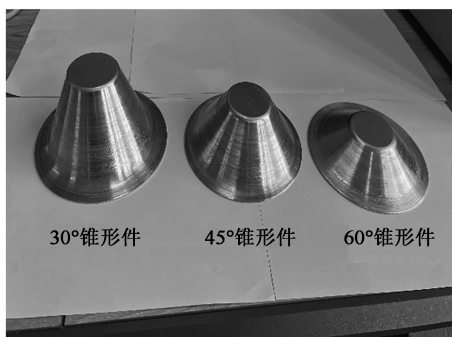
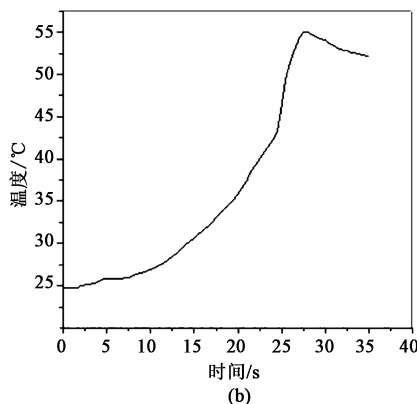
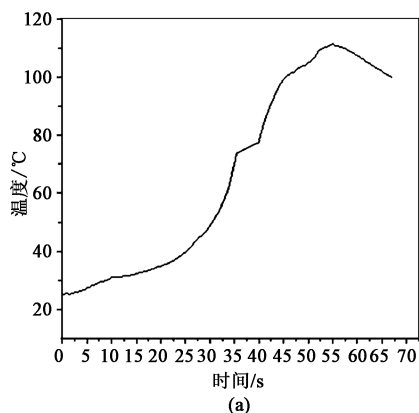


图 4 零件实物图

Fig. 4 Physical picture of parts

图 5 进给速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和主轴转速为 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时不同锥度下的温升曲线

(a) 45°锥形件 (b) 60°锥形件

Fig. 5 Temperature rise curves under different tapers at feeding rate of $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ and spindle speed of $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$

(a) 45° conical part (b) 60° conical part

摩擦旋压通过摩擦棒与板料的挤压产生摩擦热并实现板材成形,较传统旋压工件表面的精度较差,当进给比较大时,不仅摩擦产热较少,工件表面也会产生明显的压痕。选取因素 $A = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、因素 $B = 400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和因素 $A = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、因素 $B = 600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 两组 30° 锥形件的成形结果进行对比,如图 6 所示。在进给比较大时,工件表面有明显的压痕,这是由于摩擦棒在单位时间内的加工路径短,工件所受的挤压力较大所导致,而降低进给比后,工件的表面质量得到明显改善。

2.2 模型分析

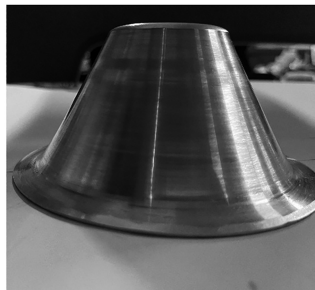
回归模型分析如表 3 所示。本文建立模型的 P 值为 0.0001,结果远小于 0.01,这说明该回归模型具有十分显著的意义^[10]。分析得到 $R^2 = 0.9709$, $R^2_{\text{adj}} = 0.9334$ (其中, R^2 为相关系数,表示实验数据与拟合函数的吻合程度; R^2_{adj} 为调整后的相关系数,同样表示数据与拟合函数的吻合程度)。说明该模型与实际情况拟合较吻合。因素 A 的 P 值为

压变形时与摩擦棒产生剪切与挤压,发生高速变形的同时产生大量的热量,随着加工时间的增加,加工温度会变化得越来越快。

摩擦旋压的产热主要来源于摩擦棒与板料之间的摩擦生热。由图 5 可知,实验过程中当产生的热量大于散失的热量时,加工温度会持续升高。此外,板料上的润滑油会随着主轴的旋转而飞溅,摩擦棒的工作角度为 90° ,在加工初期会与板料贴合,使得部分润滑油损失,加工中后期缺乏润滑油保护,因此,在加工过程中摩擦力温升 ΔT 逐渐增大,并且呈现指数型变化。



(a)



(b)

图 6 不同进给比下的工件表面

(a) 0.25 (b) 0.083

Fig. 6 Workpiece surfaces at different feeding ratios

表 2 实验结果

Table 2 Experimental results

方案	A	B	C	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$
1	0	0	0	81.0
2	-1	0	1	14.5
3	0	0	0	79.0
4	-1	-1	0	35.0
5	1	-1	0	105.0
6	1	1	0	72.0
7	0	0	0	65.2
8	-1	0	-1	53.0
9	1	0	1	31.0
10	0	0	0	79.6
11	-1	1	0	26.0
12	0	-1	-1	118.0
13	1	0	-1	168.0
14	0	1	-1	56.0
15	0	-1	1	30.4
16	0	0	0	81.3
17	0	1	1	28.0

表 3 响应面结果分析

Table 3 Response surface result analysis

因素	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
模型	24171.74	9	2685.75	25.91	0.0001
A	1415.12	1	1415.12	13.65	0.0077
B	7657.03	1	7657.03	73.88	<0.0001
C	10592.40	1	10592.40	102.20	<0.0001
AB	144.00	1	144.00	1.39	0.2770
AC	888.04	1	888.04	8.57	0.0221
BC	2425.56	1	2425.56	23.40	0.0019
A ²	725.05	1	725.05	7.00	0.0332
B ²	89.00	1	89.00	0.86	0.3849
C ²	151.45	1	151.45	1.46	0.2660
残差	725.50	7	10.364		
失拟项	541.25	3	180.42	3.92	0.1101
绝对误差	184.25	4	46.06		
总和	24897.24	16			

0.0077，因素 B 的 P 值小于 0.0001，因素 C 的 P 值同样小于 0.0001，说明影响温升的 3 个因素均达到极其显著的水平；交互项 BC 的 P 值小于 0.01，同样达到极其显著的水平；交互项 AC 的 P 值为 0.0221，A² 项的 P 值为 0.0332，二者的显著性概率均在 0.01~0.05 范围内，说明二者达到了显著的水平，而 AB、B² 和 C² 项均不显著。

因素 C 的 F 值大于因素 B 的 F 值，远大于因素 A 的 F 值，虽然因素 A、B、C 均显著，但因为因素 C 对实验结果具有极大的影响，故包含因素 C 的交

互项 AC 和 BC 同样显著。当主轴转速相对高时，单位时间内摩擦棒在板料上经过的轨迹更长，而短时间内热量向外界散失得较慢，故而能达到更高的加工温度。同理，进给速度较慢时，单位时间内摩擦棒在板料上经过的轨迹更长，但进给慢意味着加工时间变长，加工中产生的热量有更多的时间向周围介质扩散，因而温升不如提高主轴转速明显。成形角度的不同会产生不同大小的旋压力，旋压力的大小主要取决于摩擦棒与板料之间的剪切与挤压，成形角度越小，摩擦棒与坯料之间的剪切挤压力就越大，产热增加。

探究进给速度、主轴转速及成形角度等参数对摩擦旋压中加工温升的影响，基于表 2 所示实验结果与表 3 所示响应面数值分析，在得到回归预测模型后，根据参数项与交互项的显著值，去掉不显著的 AB 与 B² 项，式（1）为摩擦旋压温升 ΔT 的回归预测模型：

$$\Delta T = 77.22 - 13.30A + 30.94B - 36.39C - 14.90AC - 24.62BC - 13.12A^2 - 6.00C^2 \quad (1)$$

温升与各因素间形成一个三维空间图，可以直观地反映出各自变量对温升的影响，图 7 为各因素交互对加工温升的影响。

根据交互因素 AB、BC、AC 响应面图，得到不同影响参数间的因素交互对摩擦旋压中加工温升的影响。图 6a 表明进给速度越慢、主轴转速越快时，摩擦棒单位时间内在板料上走过的路程便越多，所能达到的加工温度便越高；图 6b 表明进给速度越小、成形角度越小时，总的加工路程变长，板料与摩擦棒之间的挤压力增大，故而在磨擦旋压加工过程中，加工时所能达到的温度便越高；图 6c 表明主轴转速越高、成形角度越小时，摩擦棒在单位时间内在板料上通过的路程越长，铝合金板料与摩擦棒之间的挤压力越大，所得到的加工温度便会越高。

3 结论

- （1）利用摩擦热可显著提升摩擦旋压中的板料温度，从而提升材料的成形性。
- （2）基于响应面实验模型，获得回归预测模型，得到了摩擦旋压中温升的变化规律。
- （3）在 3 种影响加工温升的因素中，其显著性的排列顺序为：成形角度 C>主轴转速 B>进给速度 A。
- （4）因素 C 对于温升的影响很大，包含因素 C 的交互因素 AC 与 BC 对于温升的影响极其显著，因

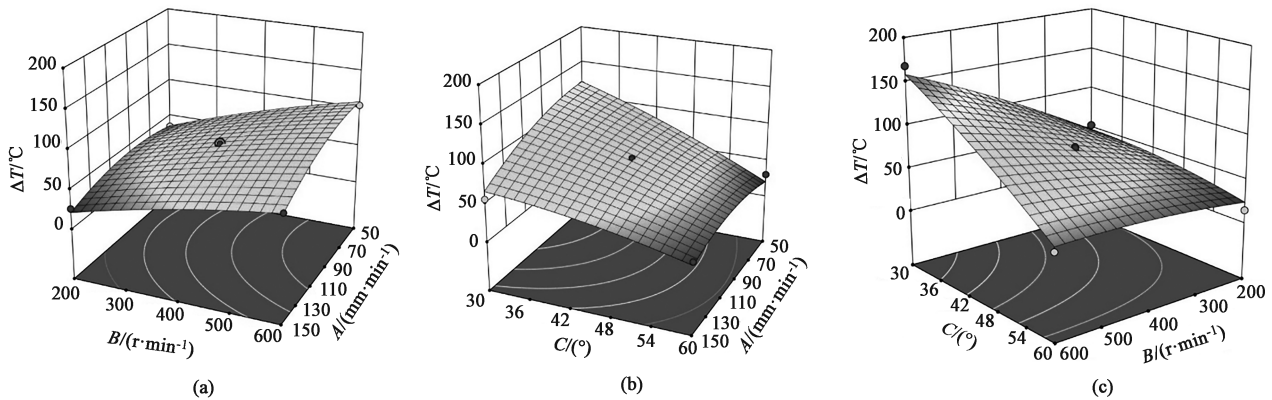


图 7 交互因素响应曲面图

(a) AB (b) AC (c) BC

Fig. 7 Response surface diagrams of interaction factors

素 AB 对于温升的影响不显著。分析了交互因素 AB 、 AC 、 BC 对温升的影响：当进给速度越小、主轴转速越大时，温升越明显；当进给速度越小、成形角度越小时，温升越明显；当主轴转速越大、成形角度越小时，温升越明显。

参考文献：

- [1] Benjamin L, Anatolii A, Werner H, et al. Friction-spinning—Possibility of grain structure adjustment [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 207: 1749–1754.
- [2] Hess S, Lossen B, Biermann D, et al. Analysis of the surface roughness obtained in a friction spinning process based on empirical models [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 74 (9–12): 1655–1665.
- [3] Homberg W, Hornjak D, Beerwald C. Manufacturing of complex functional crated workpieces with the friction-spinning process [J]. *International Journal of Material Forming*, 2010, 3: 943–946.
- [4] Gao P F, Yan X G, Li F G, et al. Deformation mode and wall thickness variation in conventional spinning of metal sheets [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021 (prepublish). DOI: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2021.103846.
- [5] Werner H, Benjamin L, Struwe A. Friction-spinning—An innovative incremental forming process for the manufacturing of functional graded parts [J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 2443: 554–557.
- [6] Benjamin L, Werner H. Friction-spinning—Influence of tool and machine parameters on the surface texture [J]. *Key Engineering Materials*, 2015, 3974: 651–653.
- [7] Hess S, Lossen B, Biermann D, et al. Analysis of the surface roughness obtained in a friction spinning process based on empirical models [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 74: 9–12.
- [8] 温涛, 陈永来, 杜玥, 等. 旋压变形对 2195 铝锂合金组织和性能的影响 [J]. *载人航天*, 2020, 26 (6): 717–722.
Wen T, Chen Y L, Du Y, et al. Spinning deformation on the microstructure and mechanical properties of 2195 Al-Li alloy [J]. *Manned Spaceflight*, 2020, 26 (6): 717–722.
- [9] 陈永来, 温涛, 朱宏伟, 等. 2195 铝锂合金半球壳体旋压件制备与其组织性能研究 [J]. *航天制造技术*, 2019, (1): 17–21.
Chen Y L, Wen T, Zhu H W, et al. Preparation of 2195 hemispherical shell spinning parts and their microstructure properties [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2019, (1): 17–21.
- [10] 汪发春, 聂兰启, 陈永清, 等. 5A06 铝合金壳体热旋成形工艺研究 [J]. *模具制造*, 2019, 19 (8): 29–32.
Wang F C, Nie L Q, Chen Y Q, et al. Study on hot spin forming process of 5A06 aluminum alloy shell [J]. *Die & Mould Manufacture*, 2019, 19 (8): 29–32.
- [11] 刘光军, 丁桦, 姜壹夫, 等. 6061 铝合金热旋压变形不均匀性的数值模拟和实验研究 [J]. *热加工工艺*, 2023, 52 (5): 96–101.
Liu G J, Ding H, Jiang Y F, et al. Numerical simulation and experimental study on deformation inhomogeneity of 6061 aluminum alloy under hot spinning [J]. *Hot Working Technology*, 2023, 52 (5): 96–101.
- [12] 张晋辉, 牛婷, 温凯, 等. 铝合金锥形件强旋壁厚与旋压力分布研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2020, 41 (8): 239–243.
Zhang J H, Niu T, Wen K, et al. Study on strong wall thickness and rotation pressure distribution of aluminum alloy conical parts [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41 (8): 239–243.
- [13] 潘和勇, 樊文欣, 李涵, 等. 基于响应曲面法的强力旋压锡青铜筒形件硬度研究 [J]. *塑性工程学报*, 2019, 26 (1): 240–244.
Pan H Y, Fan W X, Li H, et al. Research on hardness of strong spinning tin bronze cylinder parts based on response surface method [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2019, 26 (1): 240–244.
- [14] 李宝阁, 王进, 张会, 等. 基于响应面法的无芯模成形精度研究 [J]. *精密成形工程*, 2022, 14 (3): 34–39.
Li B G, Wang J, Zhang H, et al. Research on forming precision of coreless die based on response surface method [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2022, 14 (3): 34–39.