

板料成形

## 薄壁大尺寸铌钪合金零件强力旋压的数值模拟研究

闫静锴<sup>1</sup>, 雒亚涛<sup>2</sup>, 李 冰<sup>2</sup>, 关铂镔<sup>1</sup>, 周兵营<sup>1</sup>, 吴向东<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191; 2. 西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 探究了工艺参数对薄壁大尺寸铌钪合金零件强力旋压工艺的影响规律, 以指导实际的生产过程。在实际工艺的基础上, 利用 Abaqus/Explicit 软件建立其强力旋压的有限元模型, 并通过正交试验极差分析法对旋轮与芯模间隙、旋轮进给比以及旋轮与旋压件之间的摩擦因数等工艺参数对旋压件贴模性的影响规律进行研究。结果表明, 强力旋压过程中旋轮进给比对旋压件贴模性的影响程度最大, 而旋轮与芯模间隙的影响程度最小。对于薄壁大尺寸铌钪合金零件, 当旋轮进给比为  $0.24 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 、旋轮与旋压件间的摩擦因数为 0.05、旋轮与芯模间隙为 3 mm 时, 强力旋压的贴模性最好, 平均贴模间隙均值仅为 1.003 mm。采用得到的工艺参数进行试验, 进一步验证了有限元仿真分析的准确性。

**关键词:** NbHf10-1 铌钪合金; 强力旋压; 贴模性; 进给比; 贴模间隙

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.07.010

**中图分类号:** V261.3<sup>+</sup>3; TG386.3<sup>+</sup>2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 07-0064-07

## Numerical simulation study on power spinning for Nb-Hf alloy part with thin wall and large size

Yan Jingkai<sup>1</sup>, Luo Yatao<sup>2</sup>, Li Bing<sup>2</sup>, Guan Bobin<sup>1</sup>, Zhou Bingying<sup>1</sup>, Wu Xiangdong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In order to explore the influence laws of process parameters on the power spinning process for Nb-Hf alloy part with thin wall and large size and further guide the actual production process, based on the actual process, the finite element model of power spinning was established by software Abaqus/Explicit, and the influence laws of process parameters such as gap between spinning wheel and core die, feeding ratio of spinning wheel and friction coefficient between spinning wheel and spun parts were studied by the range analysis method of orthogonal test. The results show that the feeding ratio of spinning wheel has the greatest influence on the die fittingness of spinning parts during the power spinning process, while the gap between spinning wheel and core die has the least influence. For the thin-walled and large-sized Nb-Hf alloy parts, when the feeding ratio of spinning wheel is  $0.24 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ , the friction coefficient core between spinning wheel and spun parts is 0.05 and the gap between spinning wheel and core die is 3 mm, the power spinning has the best die fittingness, the average die fittingness gap is only 1.003 mm. The test with the obtained process parameters further verifies the correctness of the finite element simulation analysis.

**Key words:** NbHf10-1 Nb-Hf alloy; power spinning; die fittingness; feeding ratio; die fittingness gap

铌钪合金作为一种新型耐高温材料, 具有优异的高温力学性能和加工性能, 其借助常规成形技术可制成多种零件, 在航空航天领域得到了广泛应用。其中, 铌钪合金被选为液体火箭发动机的喷管基体材料, 可使辐射冷却喷管的耐温耐压水平得到显著提升, 由于喷管为大尺寸、变厚度曲母线锥形件, 只能采用强力旋压成形加工。强力旋压不仅改变毛

坯的形状, 且显著改变其壁厚, 曾向东<sup>[1]</sup>针对铌合金材料强力旋压的可行性进行了研究, 并对火箭喷管零件用 Nb521 铌钪合金的强力旋压工艺进行了理论分析和试验验证。雒亚涛等<sup>[2]</sup>采用理论和试验方法研究了 Nb521 铌钪合金强旋的一次极限减薄率和喷管零件两道次强力旋压减薄率的分配, 并对喷管口部凸缘的翻边工艺进行了仿真分析。强力旋压作为旋压成形的一种, 直接影响喷管的制造过程, 对其进行数值模拟研究有助于喷管的精密成形。

杨锋等<sup>[3]</sup>对在 Abaqus 有限元软件中进行 30Cr3 钢的强力旋压仿真试验, 将 Vague 集引入正交试验进行工艺参数优化, 得到了各工艺参数对旋压件成

收稿日期: 2022-09-16; 修订日期: 2022-12-25

作者简介: 闫静锴 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: y390245543@163.com

通信作者: 吴向东 (1970-), 男, 博士, 副教授

E-mail: xdwu@buaa.edu.cn

形质量的影响顺序,为实际生产提供了理论指导。田野等<sup>[4]</sup>对筒形件进行了数值模拟分析,对正反旋及旋轮进给比进行了研究,得出一般情况下正旋形式较好而且进给比为  $0.4 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$  时能够顺利成形并具有较高的生产效率。曹振鹏等<sup>[5]</sup>基于有限元模型对超大口径药形罩强力旋压的应力应变场进行了研究,结果表明,药形罩的圆角处和接触区的应力值较大,在实际成形过程中更易破裂,应重点关注。李帆等<sup>[6]</sup>针对大型筒体对轮强力旋压成形过程进行了数值模拟,研究了减薄率、进给比和主轴转速对成形精度的影响,得出影响程度顺序依次为减薄率>进给比>主轴转速,并且各参数的增大均会降低成形精度。郝花蕾等<sup>[7]</sup>对 3A21 铝合金厚板的强力旋压成形进行了有限元模拟,并结合试验分析了旋轮圆角半径、进给比及旋轮间隙对成形件贴模度、壁厚的影响,得出过大的旋轮圆角半径影响成形件的贴模度和壁厚,而较小的旋轮进给比和合适的间隙则有助于提高成形件的贴模度和壁厚均匀性。杜驰等<sup>[8]</sup>对 D406A 钢大直径圆筒强力旋压进行了模拟,分析了旋轮成形角、进给比和减薄率对成形壁厚均匀性的影响,认为提高成形角和增大减薄率会使壁厚非均匀性增大,而在一定范围内增大进给比则可使成形质量提高。Marghmaleki I S 等<sup>[9]</sup>对旋压过程进行了数值研究,采用了三维显式有限元分析方法模拟了铝圆板的旋压过程,并研究了热效应对常规旋压过程的影响。吴统超等<sup>[10]</sup>研究了旋压间隙对大型复杂薄壁壳体多道次复合旋压中第 2 道次成形质量的影响。孙于晴等<sup>[11]</sup>基于 Abaqus 建立了 30CrMnSiA 合金的筒形件对轮旋压的有限元模型,对其加工过程进行数值模拟,认为当轮旋压成形过程中内外表面应力对称分布时,可改善工件的内应力状态。席奇豪等<sup>[12]</sup>研究了毛坯厚度对 QSn7-0.2 合金旋压筒形件性能及微观组织的影响,得出随毛坯厚度的增大,布氏硬度、抗拉强度和屈服强度逐渐增大,伸长率逐渐减小。詹梅等<sup>[13]</sup>建立芯模自转与旋轮公转的两种筒形件正旋有限元模型,认为芯模自转模型较旋轮公转模型更适合于筒形件流动旋压的模拟分析。

从上述研究可以看出,学者们基于强力旋压的数值模拟研究探明了工艺参数的影响规律,并进一步指导了实际旋压成形过程。然而,有关铌钨合金大型变壁厚曲母线零件的强力旋压有限元数值仿真的研究较少,为此,本文以铌钨合金材料的薄壁大尺寸喷管为研究对象,在分析实际工艺的基础上,利用 Abaqus 建立其强力旋压有限元模型,并对旋轮与芯模间隙、

旋轮进给比及润滑等工艺参数对旋压件贴模性的影响规律进行研究,旨在为实际生产过程提供一定指导。

## 1 成形方案制定

本文所研究的零件形状和尺寸如图 1 所示,其材料为 NbHf10-1 铌钨合金,具有大尺寸、变厚度和薄壁曲母线的特点。

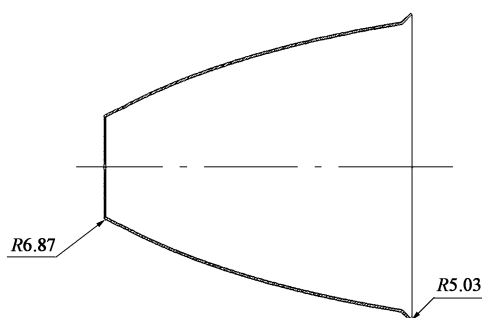


图 1 旋压件外轮廓

Fig. 1 Outer contour of spinning part

强力旋压成形材料一次旋压极限减薄率的经验计算公式为:

$$\psi_{\max} = \frac{Z}{0.17 + Z} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\psi_{\max}$  为材料的一次旋压极限减薄率;  $Z$  为材料的断面收缩率。

由式 (1) 可得, NbHf10-1 铌钨合金材料的一次旋压极限减薄率的理论值约为 80%。同时,结合 NbHf10-1 铌钨合金在多种减薄率下的强力旋压工艺试验,可确定 NbHf10-1 铌钨合金的一次强力旋压极限减薄率的安全值为 70% 更加合适。本文所研究的零件的最大减薄率约为 80.5%, 大于安全值 70%, 因此,需通过两次旋压成形。

考虑到实际成形零件的多截面变壁厚特性,拟采用变厚度毛坯进行两次旋压成形。图 2 展示了该零件的成形工艺流程,先由厚度为 3.6 mm 的平板毛坯通过冲压预成形得到变厚度毛坯,再由两次强力旋压成形为最终零件。

## 2 有限元模型建立

### 2.1 几何与材料模型

本文利用 Abaqus 软件对 NbHf10-1 铌钨合金的强力旋压成形过程进行数值模拟,所研究的旋压过程中主要发生坯料的塑性变形,因此,将坯料设为变形体,而旋轮与芯模设为离散刚体。预制坯划分

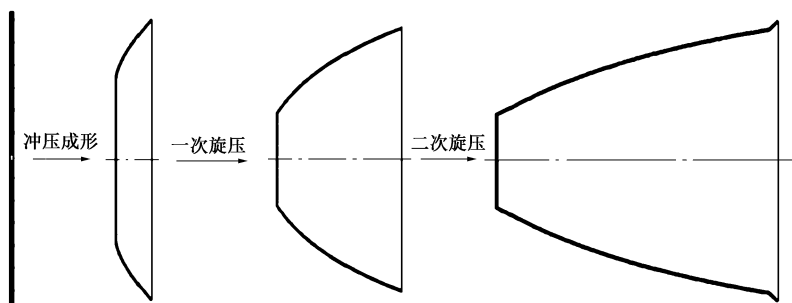


图 2 NbHf10-1 铌钪合金零件成形工艺流程

Fig. 2 Forming process flow of NbHf10-1 Nb-Hf alloy part

网格使用 S4R 壳单元。另外,考虑到尾顶用于对坯料施加压力而迫使其由于摩擦力随芯模共同旋转,因此在有限元建模中可利用均匀压强代替尾顶施加的压力,同时通过设置坯料与芯模间的摩擦来使两者同步旋转。为了准确模拟所研究的强力旋压过程,本文通过单向拉伸试验获得了 NbHf10-1 铌钪合金的真实应力-真实应变数据并将其输入至 Abaqus 中,最终建立的强力旋压一次旋压有限元模型如图 3 所示, NbHf10-1 铌钪合金的弹性模量为 84.37 GPa,屈服强度为 340 MPa,应变硬化指数  $n$  为 0.17,真实应力-真实应变曲线如图 4 所示。

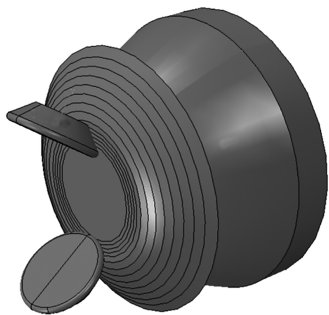


图 3 强力旋压有限元模型

Fig. 3 Finite element model of power spinning

## 2.2 接触边界条件与分析步

在本文所研究的强力旋压过程中,主要存在芯模与坯料、旋轮与坯料两组接触关系。由于在 2.1 节中将旋轮与芯模设为离散刚体,而将坯料设为变形体,因此,采用罚接触法模拟上述两组接触关系,其在接触面存在刚体时更适用于塑性成形分析。在定义接触对时,将刚体表面作为主面,变形体表面作为从面,同样选用罚接触模拟接触面间的摩擦关系。考虑到在实际旋压成形中,坯料需由于摩擦力而随芯模同步旋转,因此其摩擦因数设为 0.4;而旋轮与坯料表面相对光滑,因此,摩擦因数设置为 0.01。

边界条件的设定需结合实际旋压过程中坯料、

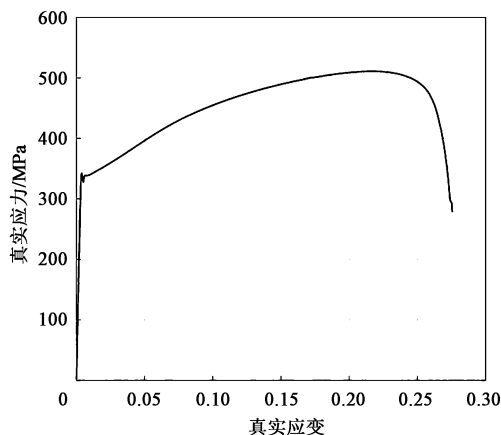


图 4 NbHf10-1 铌钪合金的真实应力-真实应变曲线

Fig. 4 True stress-true strain curve for NbHf10-1 Nb-Hf alloy

芯模及旋轮间的运动关系而定。在本文所研究的强力旋压过程中,芯模仅绕其自身轴线转动,坯料随芯模同步旋转并由于旋轮的进给而贴合在芯模外表面,旋轮按一定轨迹做进给运动并由于其与坯料的接触而仅绕自身轴线旋转。因此,对于芯模,约束其 3 个平移自由度和 2 个转动自由度,设置其绕自身轴线的转动角速度;对于坯料,不做任何约束,使其发生充分的塑性变形;对于旋轮,使用幅值曲线约束其进给运动轨迹,同时约束其除绕自身轴线转动外的所有自由度,具体细节将在 2.3 节中介绍。

分析步的设定同样基于旋压实际过程,主要包括旋转分析步和进给分析步。其中,在旋转分析步中,设定芯模的转动角速度并在坯料与尾顶接触区域施加均匀压强,实现坯料与芯模的共同旋转;在进给分析步中,设定旋轮运动轨迹并约束其自由度,实现旋轮的特定进给。

## 2.3 旋轮轨迹

旋轮轨迹的准确建立是进行强力旋压数值模拟研究的关键,本文所研究的旋轮轨迹需结合零件贴模后的外轮廓尺寸及旋轮与坯料间的间隙确定。由于旋轮

自身绕其轴线旋转,因此,为了便于在 Abaqus 中定义旋轮运动轨迹,以旋轮质心运动代表整个旋轮的轮运动。根据几何解析得到旋轮质心的一系列离散坐标点后,将其与时间一一对应输入到 Abaqus 的幅值曲线中,进而可完成旋轮运动轨迹的定义。以一次旋压过程为例,旋轮质心轨迹的具体解析步骤如下。

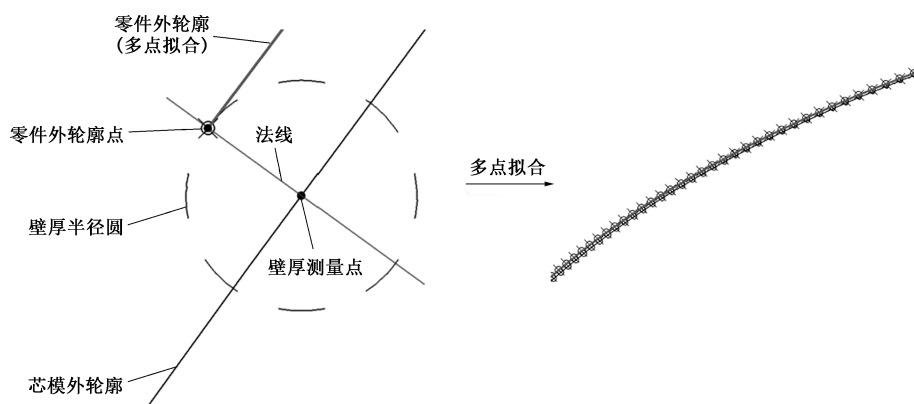


图5 一旋零件外轮廓解析示意图

Fig. 5 Analysis schematic diagram of outer contour for one spinning part

(2) 通过几何解析得到旋轮的质心运动轨迹,具体方法如图6所示。首先,根据旋轮进给速度确定零件接触点;其次,在零件接触点处作零件外轮廓的法线,将该法线平移至旋轮质心处,并与旋轮圆角相交于旋轮接触点;然后以旋轮接触点为基准点,平移旋轮至零件接触点处,此时得到旋轮质心的坐标;最终,将得到的多个旋轮质心拟合即可得到旋轮的质心运动轨迹。

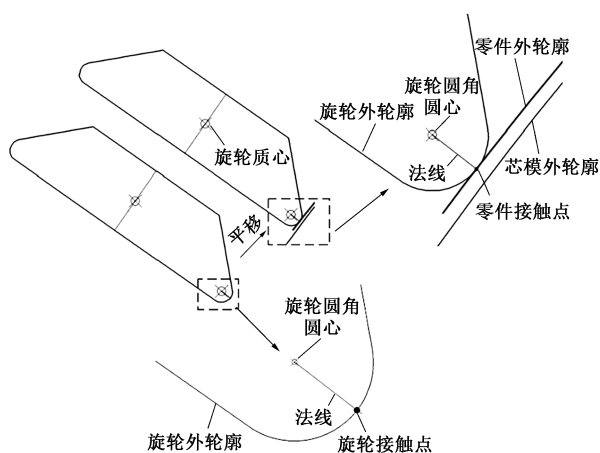


图6 旋轮质心运动轨迹解析示意图

Fig. 6 Analysis schematic diagram of motion trajectory for mass center of spinning wheel

利用上述步骤,可解析得到旋轮质心运动轨迹。此外,由于在本文所研究的强力旋压过程中,

(1) 通过几何解析得到一旋零件的外轮廓,具体方法如图5所示。首先,确定实际壁厚测量点;其次,绘制芯模在该壁厚测量点的法线;然后,以实测壁厚为半径画圆,并取其与法线的交点作为一旋零件外轮廓点;最终,根据得到的各个零件外轮廓点进行拟合,即可得到最终的一旋零件外轮廓。

旋轮在进给的同时会绕其中心旋转,因此,在定义旋轮轨迹时,需要设置局部坐标系以约束旋轮自由度。该局部坐标系原点为旋轮质心,方位与旋轮安装角相关。因此,将上述得到的旋轮质心坐标按式(2)转换,最终得到 Abaqus 模型中的旋轮运动轨迹。

$$\begin{cases} X_1 = X \cos \theta - Y \sin \theta \\ Y_1 = Y \cos \theta + X \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为局部坐标系的方位角,其逆时针旋转为正,顺时针旋转为负;  $X$  和  $Y$  分别为旋轮质心的坐标;  $X_1$  和  $Y_1$  分别为坐标变换后局部坐标系下的旋轮质心坐标。

### 3 工艺参数对成形结果的影响规律

#### 3.1 正交试验设计

在控制其他因素基本不变的情况下,强力旋压成形过程中工艺参数的选择将直接决定板料的变形过程,并对旋压件的质量产生很大的影响,因此,需要确定合理的工艺参数。本文采用正交试验方法研究工艺参数对 NbHf10-1 铌钎合金强力旋压成形结果的影响规律,正交试验设计如下。

(1) 因素的选取,影响强力旋压成形结果的工艺参数主要包括芯模转速、旋轮进给比、旋轮与旋



压件之间的摩擦因数、旋轮与芯模的间隙、旋轮的工作角度、旋轮的圆角半径等, 本文将旋轮与转速进给比、旋轮与旋压件之间的摩擦因数以及旋轮与芯模的间隙作为影响因素进行正交试验分析。

(2) 水平的选取, 根据强力旋压成形过程中工艺参数的工程经验数值, 并结合均匀采样的原则对各因素的水平进行选取, 实际工程中芯模的转速约为  $76\sim 83\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 经过合理的放缩之后, 芯模转速选择  $150、225$  和  $300\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$  较为合适, 对应的旋轮进给比为  $0.48、0.32$  和  $0.24\text{ mm}\cdot\text{r}^{-1}$ 。由于旋轮与旋压件之间为滚动摩擦, 摩擦因数通常认为在  $0\sim 0.05$  间为最佳值, 因此, 文中设计的正交试验中摩擦因数分别为  $0、0.01$  和  $0.05$ 。为了保证旋压件的质量, 并达到最终实际生产的壁厚要求, 旋轮与芯模的间隙将分别取为  $1.5、2.0$  和  $3.0\text{ mm}$ 。设计的 3 因素 3 水平的强力旋压工艺参数分析正交试验表如表 1 所示。

3.2 贴模性

在旋压成形过程中, 贴模性是极为重要的一项指标, 它对旋压工艺设计和旋压装备设计制造等均有着重要的作用, 因此, 本次正交试验选取贴模性为目标参数, 并选择以旋压件与芯模间隙的平均值作为贴模性的判断标准。

本文采用了正交试验中常用的极差分析法来分析因素的显著性主次关系与影响趋势, 如表 2 所示。从表 2 中可以看到, 对于 NbHf10-1 铌钎合金强力旋压贴模性而言, 3 个工艺参数的影响显著性的主次顺序为: 旋轮进给比>旋轮与旋压件间摩擦因数>旋轮与芯模间隙。图 7 为这 3 个工艺参数对贴模性的影响规律。

表 1 强力旋压工艺参数正交试验方案  
Table 1 Orthogonal test scheme for power spinning process parameters

方案	因素			空白列
	A 旋轮进给比/ (mm·r <sup>-1</sup> )	B 旋轮与旋压件 间摩擦因数	C 旋轮与芯模 间隙/mm	
1	0.48	0.00	1.5	1
2	0.48	0.01	2.0	2
3	0.48	0.05	3.0	3
4	0.32	0.00	2.0	3
5	0.32	0.01	3.0	1
6	0.32	0.05	1.5	2
7	0.24	0.00	3.0	2
8	0.24	0.01	1.5	3
9	0.24	0.05	2.0	1

表 2 正交试验结果  
Table 2 Orthogonal test results

方案	A 旋轮进给比/ (mm·r <sup>-1</sup> )	B 旋轮与旋压 件间摩擦因 数	C 旋轮与芯模 间隙/mm	旋压件与芯模 间隙的平均值/ mm
1	0.48	0.00	1.5	4.87
2	0.48	0.01	2.0	7.99
3	0.48	0.05	3.0	2.92
4	0.32	0.00	2.0	2.72
5	0.32	0.01	3.0	3.53
6	0.32	0.05	1.5	2.09
7	0.24	0.00	3.0	1.44
8	0.24	0.01	1.5	2.48
9	0.24	0.05	2.0	2.14
极差	3.28	2.28	1.69	—

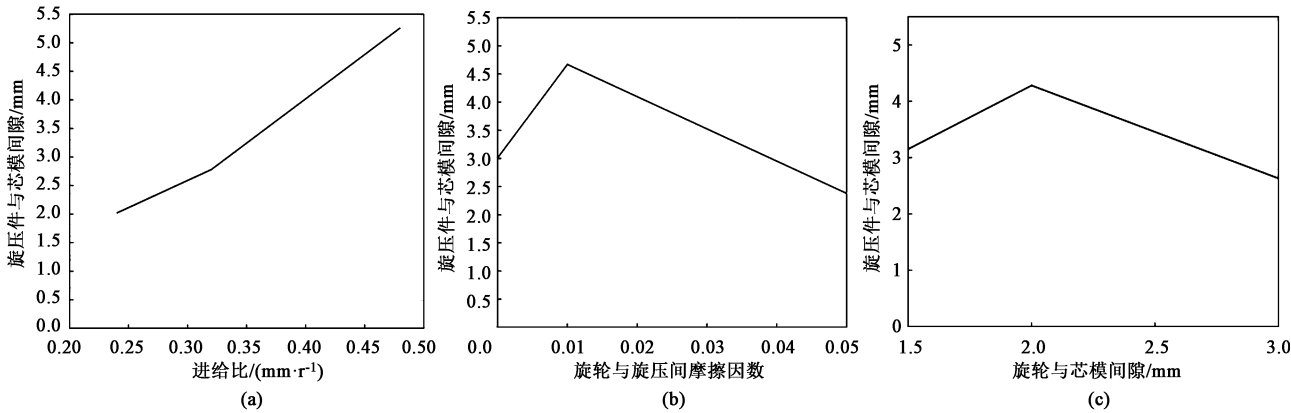


图 7 工艺参数对贴模性的影响趋势

(a) 进给比 (b) 旋轮与旋压件间摩擦因数 (c) 旋轮与芯模间隙

Fig. 7 Influence trends of process parameters on die fittingness

(a) Feeding ratio (b) Friction coefficient between spinning wheel and spun parts (c) Gap between pinning wheel and core die

依据图7可知,进给比为 $0.24 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 、旋轮与旋压件间的摩擦因数为0.05、旋轮与芯模间隙为3.0 mm为最优工艺参数组合,由于正交表中没有该

项组合,因此,采用所得的最优工艺参数再次进行仿真,以验证分析结果的准确性,得到如图8所示的仿真结果。

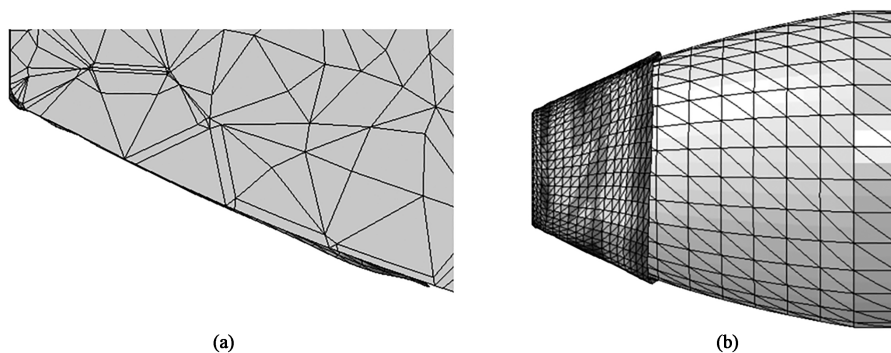


图8 有限元模拟结果

(a) 截面图 (b) 侧视图

Fig. 8 Finite element simulation results

(a) Sectional view (b) Side view

通过对图8所示贴模度进行分析,得到此时旋压件与芯模间隙的平均值为1.0035 mm,优于表2中所有的仿真结果,表明本文采用的正交试验设计是正确的,可以为后续铌合金强力旋压的精确成形提供依据。

## 4 试验

根据上述有限元仿真结果以及正交试验参数调整思路进行试验,初始芯模转速取为 $83 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,且随着旋轮的前进适当降低芯模转速,进给比保持在 $0.24 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ ,旋轮与芯模间隙调整为3.0 mm,旋轮与旋压件间的摩擦因数为0.05,试验结果如图9所示,通过分析表明,试验得到的零件满足设计要求,验证了本文有限元仿真结果的准确性。



图9 旋压试验件

Fig. 9 Spinning test piece

## 5 结论

(1) 通过对正交试验结果进行极差分析可知,对于NbHf10-1铌钨合金强力旋压贴模性而言,3个工艺参数影响显著性的主次顺序为:进给比>旋轮与旋压件间摩擦因数>旋轮与芯模间隙。

(2) 依据正交试验分析结果可知,本文所取工艺参数范围内的最优参数为:进给比为 $0.24 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ ,旋轮与旋压件间的摩擦因数为0.05,旋轮与芯模的间隙为3.0 mm。采用最优参数进行了仿真和试验验证,结果表明本文采用的正交试验设计是准确的,可为后续铌合金强力旋压的精确成形提供指导。

### 参考文献:

- [1] 曾向东. 铌合金零件的强力旋压加工 [J]. 精密成形工程, 2014, 6 (2): 24-31.  
Zeng X D. Spinning processing of niobium alloy parts [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6 (2): 24-31.
- [2] 锥亚涛, 翟宝力. 薄壁大尺寸铌钨合金喷管精密旋压成形工艺研究 [J]. 火箭推进, 2016, 42 (6): 68-73.  
Luo Y T, Zhai B L. Research on precision spinning-pressure forming process of large-size thin-walled nozzle made of niobium tungsten alloy [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2016, 42 (6): 68-73.
- [3] 杨锋, 朱小兵, 钟茵, 等. 基于Vague集的强力旋压工艺参数优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 110-115.  
Yang F, Zhu X B, Zhong Y, et al. Optimization on power spinning process parameters based on Vague set [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 110-115.

- [4] 田野, 张海峰, 田维鑫. 金属强力旋压成形的数值模拟分析 [J]. 铸造技术, 2015, 36 (1): 191-194.  
Tian Y, Zhang H F, Tian W X. Numerical simulation analysis of power spinning for metallic [J]. Foundry Technology, 2015, 36 (1): 191-194.
- [5] 曹振鹏, 梁嵬, 青格勒, 等. 超大口径药形罩强力旋压应力应变场有限元分析 [J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2017, 40 (1): 98-101.  
Cao Z P, Liang W, Qing G L, et al. Large diameter liner power spinning finite element analysis of stress and strain fields [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2017, 40 (1): 98-101.
- [6] 李帆, 朱成成, 申宇星, 等. 大型筒体对轮强力旋压成形特征与规律研究 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (7): 11-18.  
Li F, Zhu C C, Shen Y X, et al. Characteristics and rules of counter-roller flow-forming of large tube [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (7): 11-18.
- [7] 郝花蕾, 杨文华, 吉卫. 3A21 厚板强力旋压成形有限元模拟 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (10): 59-65.  
Hao H L, Yang W H, Ji W. Numerical simulation of power spinning for 3A21 thick plate [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (10): 59-65.
- [8] 杜驰, 韩冬, 李增辉, 等. D406A 钢大直径圆筒强力旋压数值模拟研究 [J]. 锻压装备与制造技术, 2016, 51 (3): 96-100.  
Du C, Han D, Li Z H, et al. Numerical simulation research of power spinning process for D406A steel large diameter cylinder [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2016, 51 (3): 96-100.
- [9] Marghmaleki I S, Beni Y T, Noghrehabadi A R, et al. Finite element simulation of thermomechanical spinning process [J]. Procedia Engineering, 2011, 10: 3769-3774.
- [10] 吴统超, 詹梅, 蒋华兵, 等. 旋压间隙对大型复杂薄壁壳体多道次旋压中第二道次成形质量的影响 [J]. 西北工业大学学报, 2011, 29 (1): 74-81.  
Wu T C, Zhan M, Jiang H B, et al. Exploring effect of spinning gap on forming quality of second pass spinning of large-sized complicated thin-walled shell [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29 (1): 74-81.
- [11] 孙于晴, 韩冬, 杨延涛, 等. 大直径 30CrMnSiA 筒形件对轮旋压成形过程的数值模拟 [J]. 锻压装备与制造技术, 2018, 53 (6): 89-94.  
Sun Y Q, Han D, Yang Y T, et al. Research on precision of spinning forming of large diameter 30CrMnSiA cylinder [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2018, 53 (6): 89-94.
- [12] 席奇豪, 樊文欣, 冯再新. 毛坯尺寸对 QSn7-0.2 合金旋压筒形件性能及微观组织的影响 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (4): 48-52.  
Xi Q H, Fan W X, Feng Z X. Influence of blank size on performance and microstructure of QSn7-0.2 alloy spinning cylinder parts [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (4): 48-52.
- [13] 詹梅, 马上官. 筒形件旋压有限元分析中芯模和旋轮相对运动的处理方法 [J]. 精密成形工程, 2011, 3 (6): 107-111.  
Zhan M, Ma S G. The Treatment of relative motion between mandrel and roller in numerical simulation for tube spinning [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3 (6): 107-111.

+++++  
(上接第 56 页)

- [6] 田晨晟. 大型盲孔及半盲孔件自由锻方法分析及成形工艺研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.  
Tian C S. Free Forging Method Analysis and Forming Technology Research of Large Blind Hole and Semi Blind Hole Forgings [D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [7] 司家勇, 宋思远, 廖晓航, 等. DP 工艺 FH4169 合金热加工高通量测试方法 [J]. 中国有色金属学报, 2016, 26 (6): 1024-1213.  
Si J Y, Song S Y, Liao X H, et al. High-through put testing on hot working of delta-processed GH4169 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26 (6): 1024-1213.
- [8] 官英平, 王振华, 赵德利, 等. 高合金钢表面热锻开裂行为的物理模拟与数值模拟 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (10): 59-63.  
Guan Y P, Wang Z H, Zhao D L, et al. Physical and numerical simulations of surface cracking behavior during hot forging for high alloy steel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (10): 59-63.
- [9] Teng Z H, Liao D M, Wu S C, et al. An adaptively refined XFEM for the dynamic fracture problems with microdefects [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 103: 102255.
- [10] 路研. 新型超高强度钢的合金优化及其组织性能研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.  
Lu Y. Study on Alloy Optimization and Microstructure of New Super High Strength Steel [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [11] 董节功, 周旭东, 朱锦洪, 等. 径向锻造三维成形锻透性的数值模拟 [J]. 机械工程材料, 2007, 31 (3): 76-78.  
Dong J G, Zhou X D, Zhu J H, et al. FEM simulation of forging penetration efficiency of radial forging in 3D [J]. Material for Mechanical Engineering, 2007, 31 (3): 76-78.
- [12] 戚业磊, 高锦张, 王元华, 等. 芯轴拔长接砧区域工艺参数的研究 [J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43 (1): 10-14.  
Xian Y L, Gao J Z, Wang Y H, et al. Research on the process parameters of mandrel drawing in Anvil's connection area [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014, 43 (1): 10-14.
- [13] 陈英, 钟志平, 边翔, 等. 核电压力壳锻件芯轴拔长工艺 V 砧砧角的常温模拟研究 [J]. 塑性工程学报, 2000, 7 (3): 52-56.  
Chen Y, Zhong Z P, Bian Y, et al. Modeling research on the anvil angle of mandrel drawing for RPV forging at room temperature [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2000, 7 (3): 52-56.