

花键齿形加工过程成形误差分析方法研究

孙光照¹, 孙 浩¹, 仇凤权¹, 管浩宇², 崔敏超², 马 楠²

¹中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 黑龙江 哈尔滨

²西北工业大学航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2025年7月25日; 录用日期: 2025年8月17日; 发布日期: 2025年8月28日

摘 要

花键联接由于具有接触面积大、承载能力高等优点, 在航空航天、汽车工业、重型机械等领域得到了广泛的应用, 其加工质量直接影响传动系统的稳定性和可靠性。滚轧成形加工工艺虽然能够有效提升花键的表面性能, 但在理论上仍然缺乏系统性的研究。本文针对渐开线花键轴的滚轧成形过程, 分析了其运动规律及齿形误差的形成机理, 并提出了解决齿形加工误差的三种办法: 改变模具齿距 p 、保持定传动比传动、改变进给方式。通过对比三种方法的适用性与实际可行性, 选择在轴向进给方式下加工的方法来消除齿形加工误差。结合体积不变准则和实际加工参数, 确定最小坯料直径为50.13 mm, 为滚轧成形精度控制提供了理论依据与工艺参考。

关键词

渐开线花键, 滚轧成形, 齿形误差, 最小坯料直径

Research on the Forming Error Analysis Methods for Spline Tooth Profile Machining Processes

Guangzhao Sun¹, Hao Sun¹, Fengquan Zhang¹, Haoyu Guan², Minchao Cui², Nan Ma²

¹AECC Harbin Dongan Engine Co., Ltd, Harbin Heilongjiang

²Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aero Engine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 25th, 2025; accepted: Aug. 17th, 2025; published: Aug. 28th, 2025

Abstract

Due to their large contact area and high load-bearing capacity, spline connections are widely used in

文章引用: 孙光照, 孙浩, 仇凤权, 管浩宇, 崔敏超, 马楠. 花键齿形加工过程成形误差分析方法研究[J]. 机械工程技术, 2025, 14(4): 509-517. DOI: 10.12677/met.2025.144050

aerospace, automotive, and heavy machinery industries. The machining quality of splines directly affects the stability and reliability of transmission systems. Although the rolling forming process has proven effective in enhancing the surface performance of splines, systematic theoretical investigations on this process remain limited. This study focuses on the rolling forming process of involute spline shafts, analyzing the kinematic characteristics and identifying the underlying causes of tooth profile errors. Three approaches are proposed to mitigate these errors: modifying the die pitch p , maintaining a constant transmission ratio, and altering the feed method. Through comparative analysis of the feasibility and applicability of these strategies, axial feeding is selected as the most effective method for minimizing tooth profile errors. Based on the principle of volume constancy and actual process parameters, the minimum required billet diameter is determined to be 50.13 mm. The findings provide a theoretical foundation and practical guidance for improving the precision of spline rolling forming.

Keywords

Involute Spline, Roll Forming, Profile Error, Minimum Billet Diameter

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

随着我国装备制造业的迅猛发展,工业产品中对高精度、形状复杂零配件的需求量越来越大,其技术性能指标的要求也越来越高[1]。在现代民用及军用工业中,花键的应用越来越广泛,由于花键联接具有接触面积大、承载能力高、定心性好、导向性好、应力集中较小、轴与毂的强度削弱较小等优点,其作为传递力和扭矩的关键零件,在汽车工业、航空航天、重型机械等行业中得到了广泛的应用[2] [3]。

传统的花键加工方法为铣削、滚齿或插齿等切削加工方式,不但生产效率低、浪费材料,而且由于切削加工会破坏金属内部的纤维组织流线,生产出来的花键强度弱、寿命短、承载能力低。据统计,在花键的所有失效形式中,由花键表面性能不足所引起的疲劳、磨损和腐蚀等占了 70%以上。因此,提高花键的表面质量是提高零件性能的关键。如今,花键加工领域发展的主流是采用一些少、无切削的精密冷成形新工艺加工。这种工艺不破坏零件表面纤维,所制备的花键齿面具有金属纤维连续性好、齿面强度高、耐磨性好,形成效率高和节约材料等优点,有效地提高零件表面性能,因此在大批量高强度、高精度的花键类零件的生产中,塑性成形工艺受到越来越多的重视与应用。

轴向增量式滚轧成形是一种优质、高效、低成本的无切削加工工艺,其作为金属塑性加工的一个重要分支,具有节省材料、加工效率高、所需时间短、力学性能好,表面精度高、环保、耗能少等塑性成形所具有的一般优点。美国霍华德代表肯尼福公司起草了相关冷成型专业的美国国家技术标准,并编著了美国机械加工滚轧工艺手册,为先进精密滚轧成型加工技术的发展做出了杰出的贡献[4]。瑞士 EmstGrob 公司已开发生产出冷滚轧成形设备,其开发的 C6 和 C9 系列冷轧机及其改进型 12/14NC 和 KRM12/14NC 具有调整时间短,精度和生产效率高,成本低及可调性等优点[5]。日本九州大学、三菱重工的 R. Matsunaga 和 R. Kamashita 等人采用滚压加工工艺制造了离合器中的花键套筒,并对其开展了相关的研究分析工作[6]。

花键轴滚轧成形过程虽然比较短暂,但由于花键表面本身结构复杂,滚轧成形时毛坯的金属流动、受力状态等都是实时变化的,具有许多的不确定性,影响加工过程的因素很多,对其理论分析也非常复杂。滚轧渐开线花键轴时,花键和模具齿形之间并非严格按照齿廓啮合基本定律进行啮合。针对以上问

题, 本文对啮合过程中各点的运动规律进行研究, 分析其对成形加工过程造成的影响。主要介绍在滚轧时齿形加工误差的产生原因及其解决办法, 并根据体积不变准则计算实际加工过程中的花键轴毛坯最小直径。

2. 花键齿形误差分析

在齿轮滚轧成形过程中, 由于模具和毛坯之间的啮合过程不符合齿廓啮合基本定律, 使得被加工工件的齿形轮廓在前后两次滚轧中出现错位, 最终在轧制过程中引起齿形加工误差[7], 一般表现为多齿、少齿或齿廓错位, 如图 1 所示。

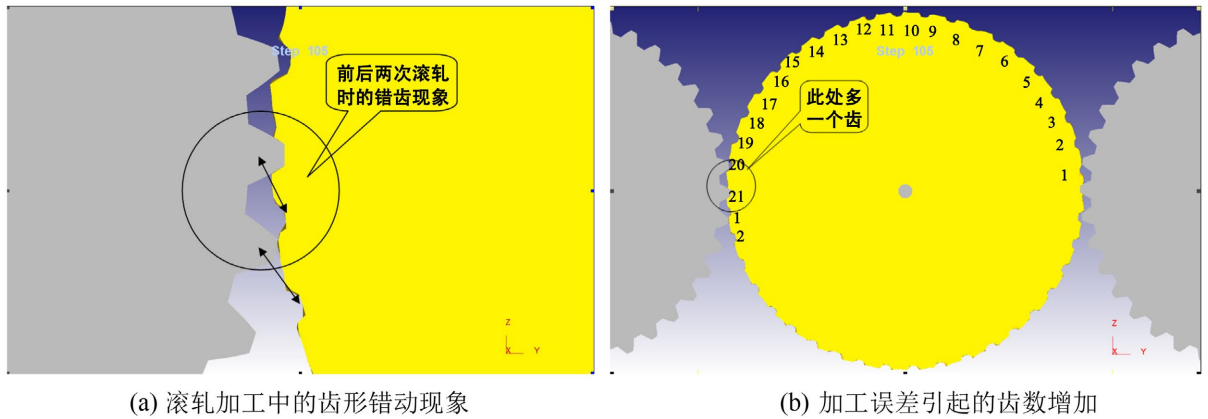


Figure 1. Schematic diagram of tooth profile machining error
图 1. 齿形加工误差示意图

在滚压过程中, 由于模具的径向进给运动, 中心距连续变化, 使得模具渐开线齿廓压入毛坯表面, 且压入深度随模具径向进给量的增加而不断增加, 模具与毛坯之间的啮合点在毛坯上扫过的轨迹也不是标准的圆, 而是更接近于反阿基米德螺线[8], 如图 2(a)所示。

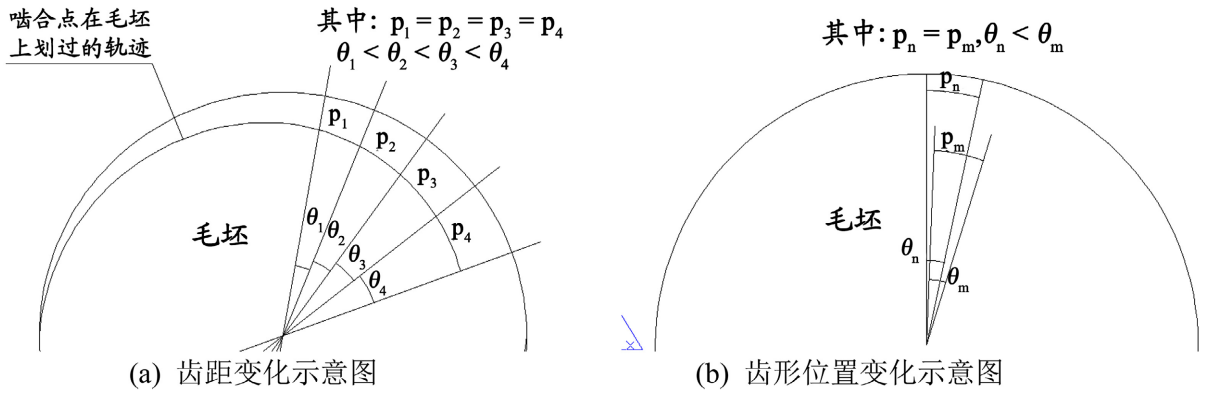


Figure 2. The influence of radial feed on tooth pitch and tooth profile position
图 2. 径向进给对齿距和齿形位置的影响

在不考虑滑动的情况下, 毛坯的转动靠模具的摩擦力带动, 毛坯上节点的线速度和模具上节点的线速度在滚轧过程中始终保持恒等, 毛坯在任一时间段滚过的弧长保持恒定, 即毛坯节圆上齿距 p 与模具节圆齿距 p 相同, 但由于圆弧的曲率不断加大, 曲率半径随之减小, 相同齿距 p 对应的圆心角则逐渐增大, 如上图 2(a)所示。工件同一位置前后两次被模具滚轧的位置也发生偏移, 如上图 2(b), 由此引起齿形

加工误差。

设模具和工件的角速度分别为: w_1 , w_2 , 节圆上的线速度分别为: v_1 , v_2 , 节圆半径分别为: r_1 , r_2 , 滚轧完成后工件的角速度、节点处线速度以及节圆半径分别用 w_2^0 , v_2^0 , r_2^0 表示, 且 $\Delta r = r_2 - r_2^0$ 。则有如下关系式[9]:

$$\begin{aligned} v_1 &= w_1 r_1 \\ v_2 &= w_2 r_2 = w_2 (r_2^0 + \Delta r) \\ v_1 &= v_2 = v_2^0 \\ i_{1,2} &= \frac{w_1}{w_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{r_2^0 + \Delta r}{r_1} \end{aligned} \quad (2-1)$$

当 $\Delta r \rightarrow 0$ 时, $i_{1,2} = (r_2^0 + \Delta r)/r_1 \rightarrow r_2^0/r_1$, 即传动比逐渐减小。

另一方面, 参考理论齿距计算公式:

$$\begin{aligned} p_k &= \pi m = \frac{\pi d_b}{z \cos \alpha} = \frac{\pi d_b}{z} \cdot \frac{r_k}{r_b} = \frac{2\pi r_k}{z} = \frac{l_k}{z} \\ \theta_k &= \frac{l_k}{r_k} = \frac{p_k}{r_k} = \frac{2\pi}{z} \end{aligned} \quad (2-2)$$

其中, p_k 表示理论齿距, d_b 表示基圆直径, r_k 表示啮合点与工件旋转中心的距离, 即节圆半径, l_k 表示对应的节圆周长。由上式可知, 在理想情况下, $p_k \propto r_k$ 以及 $p_k \propto l_k$, 若 r_k , l_k 随模具的径向进给运动不断减小, p_k 也应按一定比例随之逐渐减小, 以使 p_k 所对应的圆心角保持恒定, 如图 3 所示。

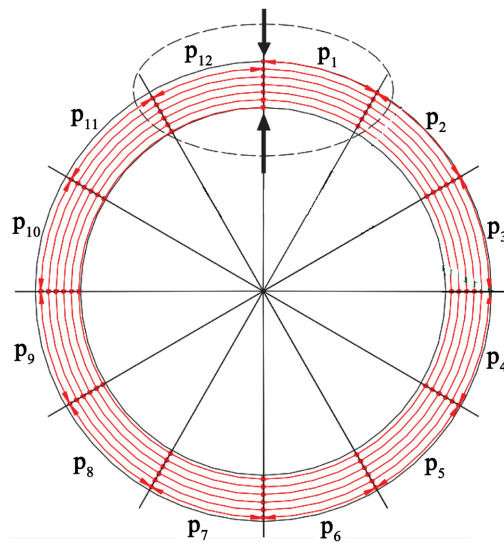


Figure 3. Changes in pitch p
图 3. 节距 p 的变化

此时, 模具和工件在切向上的线速度差($v_2 - v_1$)与 Δr 成正比。以下速度关系可用示意图表示, 参照图 4(a)。图中 v 为模具节点处的瞬时速度, v_f 为模具的径向进给速度。

$$\begin{aligned} w_2 &= w_2^0 \\ i_{1,2} &= \frac{w_1}{w_2} = \frac{w_1}{w_2^0} = i_{12}^0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_2 &= w_2 r_2 = w_2 (r_2^0 + \Delta r) \\
 v_2^0 &= w_2^0 r_2^0 = w_2 r_2^0 \\
 v_1 &= w_1 r_1 = w_2^0 r_2^0 = v_2^0 \\
 v_2 - v_1 &= v_2 - v_2^0 = w_2 r_2 - w_1 r_1 = w_2 (r_2^0 + \Delta r) - w_2 r_2^0 = w_2 \Delta r
 \end{aligned}
 \tag{2-3}$$

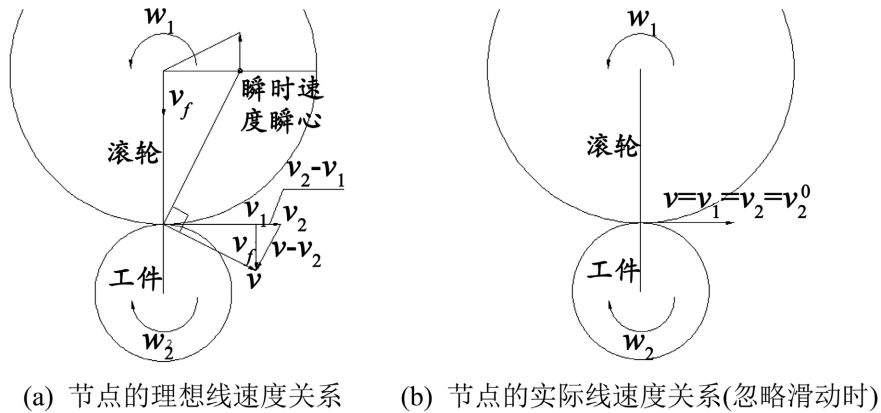


Figure 4. The linear velocity relationship of nodes under radial feed

图 4. 径向进给下节点的线速度关系

3. 齿形加工误差解决方法

对于齿形加工误差, 传统的解决办法一般多采用制定较为严格的分齿条件, 如精确计算坯料直径、增大齿顶圆接触弧长以补偿滑动量、限制最小加工齿数以增大摩擦角等措施[10]。但由上述分析可知, 齿形加工误差的原因, 主要为径向进给方式下齿距 p 需按比例随节圆半径的减小而不断减小, 而实际滚轧时毛坯的转动靠其外圆表面摩擦带动, 使得得到的齿距 p 保持不变, 引起滚轮和工件之间的传动比不再保持恒定, 所以, 可从以下三个方面入手以寻求消除齿形加工误差的方法: 改变模具齿距 p 、保持定传动比传动、改变进给方式。现分别分析其对齿形加工误差的影响。

3.1. 改变模具齿距 p

由于毛坯上的理论齿距 p 需按比例随节圆半径的减小而不断减小, 而实际滚轧时毛坯的转动靠其外圆表面摩擦带动, 使得得到的齿距 p 保持不变。

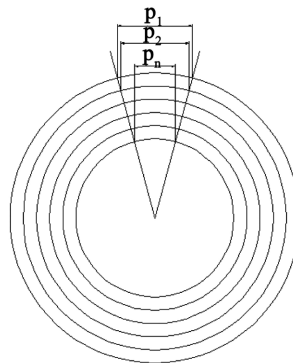


Figure 5. Changes in tooth pitch

图 5. 齿距的变化

改变模具齿距 p , 即不考虑滑动的情况下, 使模具上的节距随毛坯节圆上的理论齿距 p 变化而变化, 参考图 5 以及公式(3-1)。

设在压入过程中, 共有 n 个齿参与滚压, 则有:

$$\begin{aligned}\Delta p_s &= p_1 - p_n \\ \Delta p_k &= \frac{\Delta p_s}{n-1} = \frac{p_1 - p_n}{n-1} \\ p_2 &= p_1 - \Delta p_k \\ p_3 &= p_1 - 2\Delta p_k \\ &\vdots \\ p_n &= p_1 - (n-1)\Delta p_k\end{aligned}\quad (3-1)$$

模具上相邻齿之间的齿距大小, 以及齿距变化量可按公式(3-1)确定。但采用此方法改变模具的节距, 所要求的制造精度较高, 同时会增加模具的制造成本。

3.2. 定传动比传动

定传动比传动即采用速度控制的方式控制模具和毛坯的角速度, 使模具和毛坯在节点处保持一定的相对滑动速度, 得到随节圆半径变化而变化的齿距 p 。

$$\begin{aligned}p_1 &= \frac{2\pi r_1}{z_1} = \frac{l_1}{z_1} \\ p_2^0 &= \frac{2\pi r_2^0}{z_2} = \frac{l_2^0}{z_2} \\ p_2 &= \frac{2\pi r_2}{z_2} = \frac{l_2}{z_2} \\ \therefore p_1 &= p_2^0 \\ \Rightarrow \frac{p_1}{p_2} &= \frac{p_2^0}{p_2} = \frac{\frac{2\pi r_1}{z_1}}{\frac{2\pi r_2}{z_2}} = \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{z_2}{z_1} = \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{r_2^0}{r_1} = \frac{r_2^0}{r_2} = \frac{r_2^0}{r_2^0 + \Delta r}\end{aligned}\quad (3-2)$$

假定模具转速保持恒定, 则有如下关系:

$$\begin{aligned}v_1 &= w_1 r_1 \\ v_2 &= w_2 r_2 = w_2 (r_2^0 + \Delta r) \\ v_2^0 &= w_2^0 r_2^0 \\ \frac{z_1}{z_2} &= \frac{r_1}{r_2^0} \\ \frac{p_1}{p_2} &= \frac{\frac{l_2^0}{z_2}}{\frac{l_2}{z_2}} = \frac{l_2^0}{l_2} = \frac{v_2^0}{v_2} = \frac{w_2^0 r_2^0}{w_2 r_2} = \frac{w_2^0}{w_2} \cdot \frac{r_2^0}{r_2^0 + \Delta r}\end{aligned}\quad (3-3)$$

由上面两式可得 $w_2^0/w_2 = 1$, 即当模具转速不变的情况下, 毛坯角速度始终保持恒定。所以采用定传动比传动的方法, 可有效消除齿形加工误差。

但此方法在实际设计中不易实现, 主要由于进给机构和滚压机主机的传动系统一般是两个相互独立

的系统,即工件夹持机构和模具之间没有相关联的传动系统来协调两者的运动。而且,在滚轧机模具旋转工作时,转速较高,采用伺服控制系统亦很难精确控制工件夹持机构的转速使之完全符合定传动比传动的要求,并且其精度和可靠性均不能保证。

3.3. 轴向进给方式

在轴向进给方式下,模具(主轴)轴线与毛坯轴线之间的相对位置关系不变。在滚轧开始阶段,毛坯外表面与模具刃角区域接触,滚轮靠轧入段齿顶圆弧与毛坯外表面接触产生的摩擦力带动毛坯转动,此接触点可视为两齿廓传动的节点;随着毛坯的轴向进给运动,节点也随之逐渐向工件侧移动,最终到达模具和成形工件分度圆相切处,如图6。

根据齿廓啮合基本定律:两轮传动比等于连心线被节点所分两段长度的反比。由此可知,节点的变化造成滚轮和工件之间的传动比也是不断变化的,由此也会引起齿形加工误差;但与径向进给方式相比,齿形加工误差只发生在滚轧开始阶段,因为当毛坯前端齿形完全成形后,其与模具整形区齿形之间形成标准的啮合关系,毛坯和模具之间构成“齿轮传动副”,模具通过此传动副带动毛坯件按标准传动比所要求的转速旋转,由此便消除了齿形加工误差对成形精度的影响。

通过对比可知,三种方法均可消除齿形加工误差,但改变模具节距会大大增加模具的制造成本,而定传动比传动的方法在实际设计中不易实现。综合考虑,本文采用在轴向进给方式下加工的方法来消除齿形加工误差。

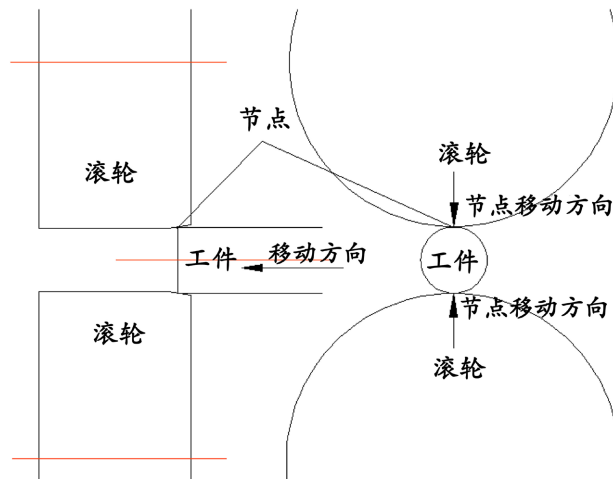


Figure 6. Node motion trend under axial feed mode
图6. 轴向进给方式下的节点运动趋势

4. 毛坯最小直径

花键塑性成形工艺遵循体积不变准则,即滚轧成形后花键轴各部分(包括:齿根圆以内部分、各个齿面,以及端部隆起部分)的总体积,应等于成形前圆柱形毛坯件的体积。因此,坯料直径计算是否合适将直接影响滚压过程中的金属流动,坯料直径太小将导致局部填充不满,影响成形质量。但坯料直径太大则需增加滚压次数,以使多余的材料朝轴向方向流动,此时材料流动所需变形能将增大。

增量式渐开线花键轴滚轧成形是一种无切屑的生产加工方法,金属材料在塑性成形中发生的金属物理变化(如位错密度的增加)会导致体积增大,然而,这种体积的增大非常微小,在计算塑性应变时几乎可以忽略不计,花键轴滚轧前坯料直径 d 的理论计算可参照成形前与成形后工件(花键轴)体积不变的原则

确定。

由于渐开线花键轴形状复杂,描述其形状的参数较多,花键的模数、齿数是决定滚前毛坯直径的主要因素,压力角、齿顶圆直径、齿根圆直径也影响着毛坯直径。对于标准渐开线花键轴,滚轧前坯料的直径可按式确定[11]:

$$\frac{\pi}{4}d^2L = \frac{\pi}{4}d_f^2L + zSL + V \quad (4-1)$$

式中, d 表示滚轧前的坯料直径, L 表示花键轴长度, d_f 表示齿根圆直径, z 表示齿数, S 表示齿根圆以上的单个齿形截面积, V 表示花键轴成形后端面突起的体积。其中 V 无法通过增加坯料直径的方法对其进行补偿,在计算中可忽略,由公式(4-1)可得:

$$d = \sqrt{d_f^2 + \frac{4}{\pi}zS} \quad (4-2)$$

$$S = \frac{1}{4} \left[\frac{d_b^2}{3} (\tan^3 a_a - \tan^3 a_f) + d_a s_a - d_f s_f \right]$$

式中, d_b 表示毛坯分度圆直径, a_a 表示齿顶圆压力角, a_f 表示齿根圆压力角, s_a 表示齿顶圆弧齿厚, s_f 表示齿根圆弧齿厚。根据被加工工件参数: $m = 1.25$, $z = 40$, $\alpha = 30^\circ$, $xm = +0.3125$, $d = 50 \text{ mm}$, $d_a = 51.75 \text{ mm}$, $d_f = 48.7 \text{ mm}$ 。通过计算得出毛坯的最小直径为 $d = 50.13 \text{ mm}$ 。

由于在滚轧花键齿形时,金属材料会发生一定的轴向流动,按体积不变准则计算的最小毛坯直径不能完全充填模具型腔,其填充效果如图 7 所示。因此设计毛坯直径时应考虑到材料的轴性流动,取毛坯直径稍大于最小毛坯直径。

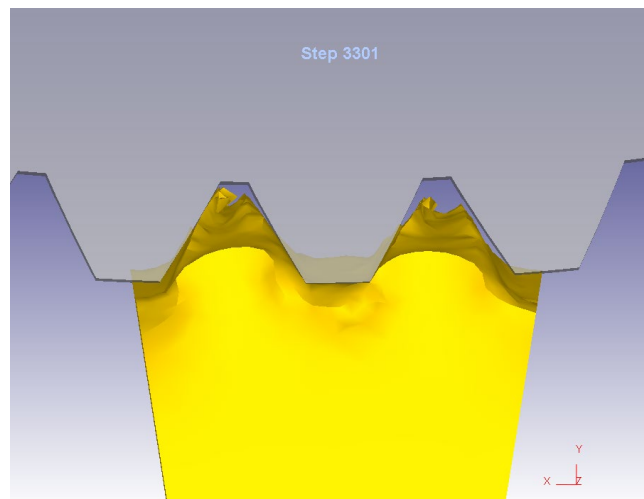


Figure 7. Filling effect with billet diameter $d = 50.13 \text{ mm}$

图 7. 毛坯直径取 $d = 50.13 \text{ mm}$ 得到的填充效果

5. 结语

通过分析渐开线花键轴滚轧成形过程,找出齿形加工误差的产生原因,即在径向进给方式下齿距 p 需按比例随节圆半径的减小而不断减小,而实际滚轧时毛坯的转动靠其外圆表面摩擦带动,使得得到的齿距 p 保持不变,引起滚轮和工件之间的传动比不再保持恒定。提出解决齿形加工误差的三种办法:改变模具齿距 p 、保持定传动比传动、改变进给方式,并分析了三种方法的可行性,最后采用在轴向进给方

式下加工的方法来消除齿形加工误差。同时结合体积不变准则和实际加工参数, 确定最小坯料直径为 50.13 mm。

基金项目

中国航发哈尔滨东安发动机有限公司《深孔内花键磨削加工技术研究》资助, 项目编号: 202504170872-003-001。

参考文献

- [1] 周永丹, 徐永福, 杜鹏远, 等. 基于 DEFORM 的花键冷滚轧成形动态仿真研究[J]. 矿山机械, 2021, 49(2): 56-60.
- [2] 王海涛, 张晨. 通孔薄壁花键轴类零件的制造工艺改进[J]. 拖拉机与农用运输车, 2022, 49(6): 79-82.
- [3] 刘进德, 米佩. 外花键轴感应淬火工艺探讨[J]. 金属加工: 热加工, 2021(2): 94-95.
- [4] Li, H.W., Liang, Z.Q., Pei, J.J., Jiao, L., Xie, L. and Wang, X. (2018) New Measurement Method for Spline Shaft Rolling Performance Evaluation Using Laser Displacement Sensor. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **31**, Article No. 69. <https://doi.org/10.1186/s10033-018-0265-y>
- [5] Liu, S., Li, H., Wang, C., Lian, F., Miao, J. and Hu, Z. (2024) Noncontact Measurement of Rectangular Splines Shaft Based on Line-Structured Light. *Measurement Science and Technology*, **35**, Article ID: 115008. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad66fd>
- [6] Chen, L., Zhao, Y., Chen, X., Yu, T. and Xu, P. (2021) Repair of Spline Shaft by Laser-Cladding Coarse TiC Reinforced Ni-Based Coating: Process, Microstructure and Properties. *Ceramics International*, **47**, 30113-30128. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.189>
- [7] Xiao, L., Xu, Y., Sun, X., Xu, H. and Zhang, L. (2022) Experimental Investigation on the Effect of Misalignment on the Wear Failure for Spline Couplings. *Engineering Failure Analysis*, **131**, Article ID: 105755. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105755>
- [8] 刘梅. 孔位置度测具的设计[J]. 金属加工: 冷加工, 2020(3): 44-46.
- [9] 张德意, 潘高进, 王霆. 三坐标测量机在机械传动零部件矩形花键轴质量检测中的应用及研究[J]. 时代汽车, 2020(23): 148-150.
- [10] 王勇, 段家琦, 刘尧, 等. 冷搓成形工艺参数对花键晶粒度影响的研究[J]. 机床与液压, 2021(22): 49.
- [11] 宋励, 黄美发, 唐哲敏, 等. 基于公差原则的位置度误差的评定[J]. 机械设计与制造, 2020(1): 149-152.