

变速器花键主轴贯通式冷挤压成形

王江平¹, 冯文杰^{1,2}, 陈帆¹, 陈莹莹^{2,3}, 宋应德¹, 钱楷¹

(1. 重庆理工大学 机械工程学院, 重庆 400054; 2. 重庆理工大学 汽车零部件制造及检测技术教育部重点实验室, 重庆 400054;
3. 重庆理工大学 车辆工程学院, 重庆 400054)

摘要: 针对载重汽车变速器花键主轴在传统切削加工时生产效率低的问题, 考虑开式冷挤压的缺点, 提出了贯通式冷挤压成形工艺方案。借助 DEFORM-3D 有限元仿真分析软件, 研究了坯料定位精度、凹模定径带、凹模入模半角和模具间隙对金属流动的影响规律, 模拟结果表明: 当凹模定径带长度为 26 mm、凹模入模半角为 28°、凸模直径为 $\Phi 46$ mm 时, 花键主轴在成形过程中的弯曲变形量较小, 成形质量良好。最后采用贯通式冷挤压成形方案进行工艺试验, 得到的挤压件的成形质量和尺寸精度均可满足设计要求, 试验证明该工艺方案切实可行, 数值模拟结果对工艺试验具有一定的参考价值。

关键词: 变速器花键主轴; 贯通式冷挤压; 弯曲变形; DEFORM-3D; 金属流动

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.017

中图分类号: TG376

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 12-0115-07

Through-type cold extrusion forming for transmission spline spindle

Wang Jiangping¹, Feng Wenjie^{1,2}, Chen Fan¹, Chen Yingying^{2,3}, Song Yingde¹, Qian Kai¹

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. Key Laboratory of Manufacture and Test Techniques for Automobile Part Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 3. School of Vehicle Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: For the low production efficiency of traditional cutting process for spline spindle of truck transmission, the shortcomings of open-type cold extrusion were considered, and a through-type cold extrusion forming process scheme was proposed. Then, with the help of finite element simulation software DEFORM-3D, the influence laws of blank positioning accuracy, die sizing zone, half angle of die entry and die clearance on metal flow were studied. The simulation results show that when the length of die sizing zone is 26 mm, the half angle of die entry is 28°, and the punch diameter is $\Phi 46$ mm, the spline spindle has less bending deformation amount during the forming process, and the forming quality is good. Finally, the process test was conducted by the through-type cold extrusion forming scheme, and the forming quality and dimensional accuracy of the extruded parts met the design requirements. Thus, the test proves that the process scheme is feasible, and the numerical simulation results have certain reference value for process test.

Key words: transmission spline spindle; through-type cold extrusion; bending deformation; DEFORM-3D; metal flow

冷挤压工艺具有生产效率高、材料损耗率低、产品成形质量高等一系列优势^[1], 其在汽车花键轴加工上的应用已经比较成熟^[2]。但由于载重汽车变速器花键主轴属于长径比较大的长轴类花键

轴, 在冷挤压成形过程中所需的成形力大, 且易出现局部镢粗及弯曲变形等成形缺陷, 所以, 目前国内长花键轴加工还是以切削加工为主。

为了提高长轴类零件冷挤压的制造精度, 许多学者对长花键轴成形的成形应力、工艺方式、影响花键轴成形极限的因素、弯曲变形等进行了大量的研究。Yuan A F^[3]采用数值模拟的方法对矩形和梯形长花键成形过程中所受的应力及应变进行了研究。重庆长融机械有限责任公司何孟林等^[4]探究了渐开线花键轴冷挤压过程中, 坯料直径、入模半角及花键齿形尺寸对挤压成形力的影

收稿日期: 2022-01-07; 修订日期: 2022-04-10

基金项目: 重庆市科委资助项目 (cstc2014yykfA60001); 重庆市教委科学技术研究资助项目 (KJ1400944)

作者简介: 王江平 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 2545882436@qq.com

通信作者: 冯文杰 (1964-), 男, 硕士, 教授

E-mail: wjfeng@cqut.edu.cn

响规律。南京工程学院贾俐俐等^[5-6]建立了长花键轴金属流动模型函数,运用上限法对其进行分析,探究了花键齿形和摩擦因数等因素在无约束正挤压时对成形挤压力及成形极限的影响规律,为制定该类产品的冷挤压工艺提供了理论依据。重庆大学夏玉峰等^[7]对矩形内花键冷挤压成形工艺进行了研究,论证了预成形工序对冷挤压工艺生产效率提升的必要性。湖南职业学院罗永新等^[8]利用有限元分析软件对渐开线花键轴的等温挤压过程进行了模拟,得到了成形过程中的温度和速度规律,简化了花键轴等温挤压的生产控制。上海工程技术大学邹琼琼等^[9]采用通用尺寸棒料,通过正挤得到杆部形状,通过镦挤得到头部外形尺寸,通过反挤获得预成形件,通过挤齿与机加工获得最终件,并进行了实际生产验证,得到质量合格的制件,为花键类汽车件冷挤压成形工艺的制定提供了参考。薛倩倩^[10]研究了成形过程中各工艺参数对挤压件成形力的影响规律,探究了影响挤压件成形极限的主要因素及其对最大变形程度和成形过程中金属流动特性的影响规律。东南大学高锦张等^[6]分析了长轴类花键轴零件塑性失稳的原因,结合生产实践得出结论:变形程度、凹模半锥角、摩擦因数等是影响花键轴塑性失稳最大成形极限的关键因素,并结合相关线图给出了各因子理想的取值范围。

本文根据变速器花键主轴的结构特点,针对其长径比较大、变形程度大、容易出现局部镦粗及弯曲变形等问题,提出了贯通式冷挤压成形方案,利用有限元软件 DEFORM-3D 对花键的成形过程进行模拟,研究了各工艺参数对金属流动特性的影响规律,最后在模拟的基础上进行工艺试验研究,对模拟结果进行了验证。

1 工艺方案确定

1.1 零件结构特点分析

图 1 为某载重汽车变速器花键主轴零件图,主轴全长为 366 mm,花键参数如表 1 所示,齿顶圆

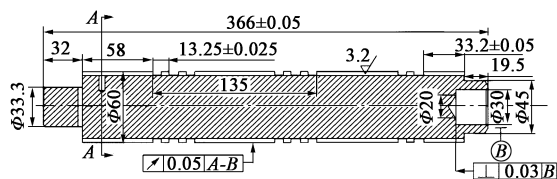


图 1 某载重汽车变速器花键主轴零件图

Fig. 1 Part diagram of spline spindle for a truck transmission

直径为 $\Phi 60$ mm,长径比为 6 : 1,属于长径比较大的长轴类花键轴,且花键部分较长,冷挤压过程中容易在凹模进料口附近产生局部镦粗和坯料失稳现象。

表 1 某载重汽车变速器花键主轴参数表

Table 1 Parameters of spline spindle for a truck transmission

参数	齿数 z	法向模数 m_n	法向压力角 $\alpha_n / (^\circ)$
数值	19	3	30

1.2 冷挤压成形工艺方案分析

目前,花键轴成形常采用开式正挤压的加工方式,如图 2a 所示,凸模的下压迫使坯料通过凹模成形挤压件,挤压结束后挤压件被顶出杆顶出凹模型腔,但由于该变速器主轴的花键比较长,加工设备的开口空间(上模升至最高位置时与下模降至最低位置时之间的距离)所需长度达 2000 mm,目前大部分设备的开口空间达不到该要求。因此,本文提出采用贯通式冷挤压成形工艺方案,如图 2b 所示,挤压件借助凸模压力向下直接将坯料从凹模型腔中挤出,形成贯穿全轴的花键,目前常用的 4000 kN 油压机的开口高度(1300 mm)即能够满足要求。该成形方案减少了顶出杆的结构设计,节省了挤压件由顶出杆顶出的时间,降低了凹模的磨损程度,提高了模具寿命,降低了生产成本。

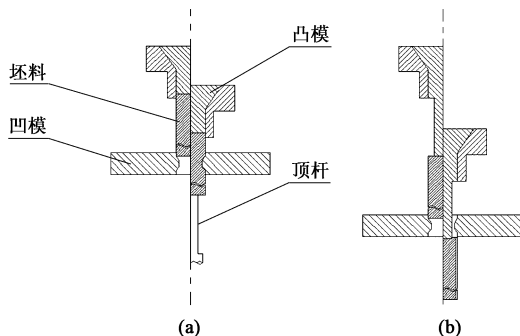


图 2 冷挤压工艺方案对比

(a) 开式冷挤压 (b) 贯通式冷挤压

Fig. 2 Comparison of cold extrusion process schemes

(a) Open-type cold extrusion (b) Through-type cold extrusion

2 数值模拟及分析

2.1 有限元建模

根据零件设计图和花键主轴参数表,建立三维

模型，利用 DEFORM-3D 有限元软件进行数值模拟，网格数量为 1.1×10^5 个，摩擦类型为剪切摩擦，温度设为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。坯料材料为 20CrMo 钢，其力学性能如表 2 所示。

表 2 20CrMo 钢力学性能
Table 2 Mechanical properties of 20CrMo steel

参数	数值
泊松比	0.278
屈服强度/MPa	685
抗拉强度/MPa	885
弹性模量/GPa	210
伸长率/%	12

模具均为刚体^[11]，凸模的下行速度为 $20\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ；凹模由于加工制造过程较复杂，加工误差会导致各齿定径带长度存在差异，为还原成形过程中凹模定径带的误差对金属流动的影响，结合相关生产经验，在基本模型的基础上又建立了定径带误差模型，如图 3 所示。其中，0 处的定径带长度为 h ，从 0~9 处定径带长度依次递减 n 。本文中， $n=0.01\text{ mm}$ ， $h=30\text{ mm}$ ，则 1 处的定径带长度为 29.99 mm 、2 处的定径带长度为 29.98 mm ，……，9 处的定径带长度为 29.91 mm ，以此类推。两种模型的基本参数如表 3 所示。

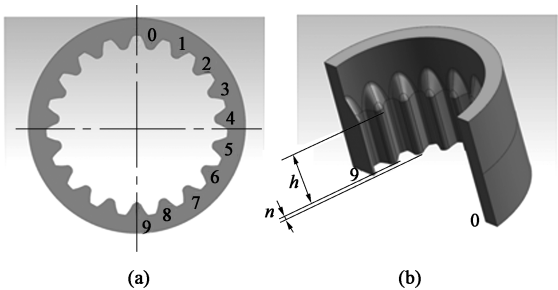


图 3 凹模误差模型（中心部分）示意图
Fig. 3 Schematic diagram of die error model (Central part)
(a) Two-dimensional diagram (b) Three-dimensional diagram

2.2 数值模拟结果分析

在 DEFORM-3D 软件的后处理分析模块中，因表示花键主轴的弯曲变形量无法直接测量，因此，在后处理模块中选取坯料头部的端面中心点 P 为追踪点， m 为坯料头部中心点 P 相对于凹模中心的偏移量，如图 4 所示。在模拟过程中，点 P 始终固定

表 3 两种凹模模型的基本参数
Table 3 Basic parameters of two die models

参数	基本模型	误差模型
大径 D/mm	$\Phi 59.6$	$\Phi 59.6$
小径 d/mm	$\Phi 51.1$	$\Phi 51.1$
齿槽宽 B/mm	5.59	5.59
入模半角 $\alpha/(^{\circ})$	20	20
定径带长度 h/mm	30.00	30.00~29.91
齿数 z	19	19

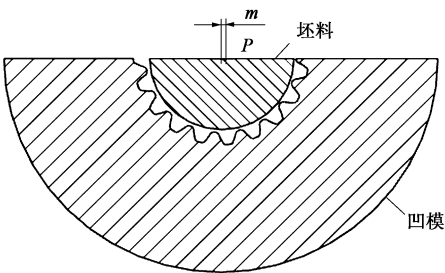


图 4 坯料头部中心点 P 及偏移量 m 示意图
Fig. 4 Schematic diagram of central point P and offset m in blank head

在坯料头部端面中心上，若花键主轴在冷挤压过程中发生弯曲变形，点 P 将会同步发生径向偏移，故本文采用点 P 的径向偏移量来表示挤压件的弯曲变形程度。

2.2.1 坯料定位精度对金属流动特性的影响规律

模具装配误差会导致坯料与凹模定位不准，使两者出现不同心现象，导致冷挤压过程中各定径带与坯料之间产生不同的阻力，使金属在各定径带处的流速存在差异，使挤压件发生弯曲变形。当 m 取不同值时，弯曲变形引起的点 P 的径向偏移量与凸模行程的关系曲线如图 5 所示，对相同的 m ，凸模下压量越大，点 P 的径向偏移量越大，即坯料的弯曲变形程度越大。取不同 m 值下点 P 的最大径向偏移量，得到其随坯料的偏移量 m 的变化趋势图，如图 6 所示， m 越大，坯料的偏心程度越大，花键轴弯曲的变形量也越大。

由图 7 可知， m 值越大，挤压件左右两侧贴模程度的差异越大，两侧金属的流动速度差越大，花键主轴的弯曲变形程度越大。所以，减小装配时的误差能够改善花键主轴的弯曲变形情况。

2.2.2 凹模定径带对金属流动特性的影响规律

在挤压过程中，定径带对金属起着约束塑性变形的作用，当塑性变形区超出模具的约束范围时，挤压件在成形过程中不稳定，会出现弯曲变形等成形缺陷^[12]。结合实际生产，本文采用误差模型研究

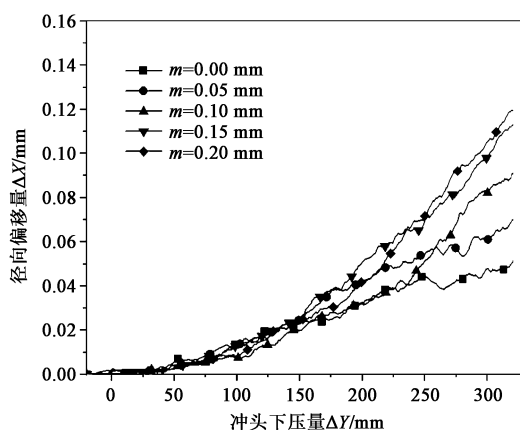
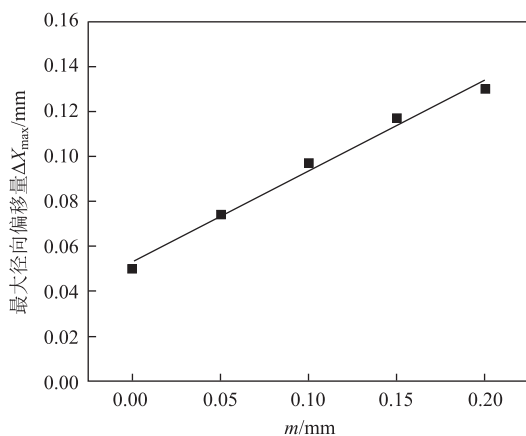


图 5 不同偏移量下的径向偏移曲线

Fig. 5 Radial offset curves under different offsets

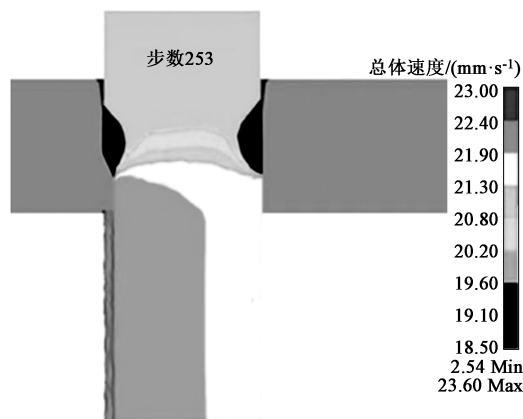
图 6 最大径向偏移量随 m 值的变化趋势图Fig. 6 Variation trend diagram of maximum radial offset with m value

凹模定径带对弯曲变形的影响,保持凹模其他工艺参数不变,定径带的长度 h 依次取 20、22、…、28 mm,进行数值模拟。图 8 为点 P 的最大径向偏移量随凹模定径带长度的变化趋势图,由图 8 可知,随着凹模定径带长度增大,最大径向偏移量减小,当定径带长度大于 26 mm 后,曲线变化趋于稳态。即当各定径带长度存在误差时,定径带长度大于 26 mm 后,凹模定径带长度对挤压件弯曲变形的影响较弱。

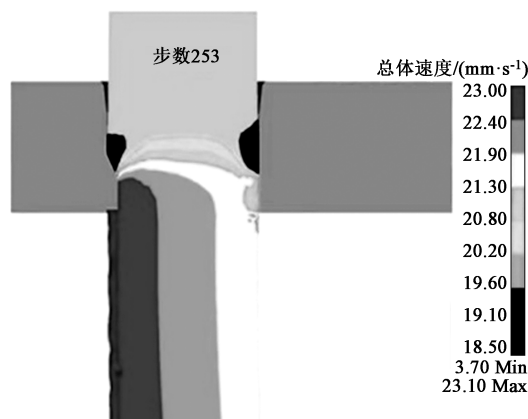
由此可见,增加定径带长度,可以改善弯曲变形量,但定径带长度过大,坯料与模具之间的摩擦会增大,易刮伤坯料表面,产生粘模,造成零件出现拉伤、粘模等成形质量问题。综上所述,定径带长度 h 取 26 mm 较为合适。

2.2.3 凹模入模半角 α 对金属成形的影响规律

挤压过程中,凹模入模半角的大小对金属的流动速度有影响,同时凹模入模半角对金属成形过程



(a)



(b)

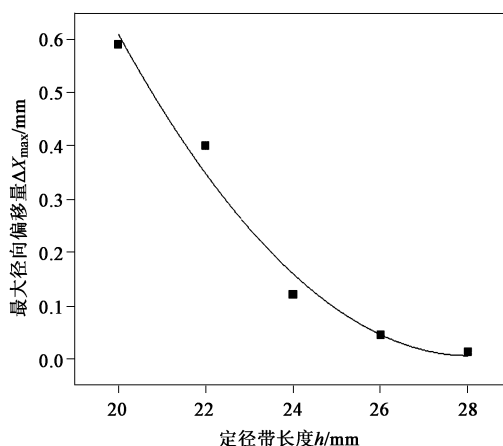
图 7 不同 m 取值时的速度场云图(a) $m=0.05$ mm (b) $m=0.20$ mmFig. 7 Cloud diagrams of velocity field under different m values

图 8 最大径向偏移量随凹模定径带长度的变化趋势图

Fig. 8 Variation trend diagram of maximum radial offset with die sizing zone length

中的成形载荷也有很大的影响。结合实际生产经验,最佳凹模入模半角的取值范围为 $22^\circ \sim 28^\circ$ [12]。为了研究不同凹模入模半角对金属成形的影响规律,在

保持其他参数不变的情况下, 选用误差模型对凹模入模半角 α 分别为 22° 、 24° 、 26° 、 28° 和 30° 的情况进行模拟。图 9 为点 P 的最大径向偏移量随凹模入模半角的变化趋势图, 图 10 为稳态平均成形载荷随凹模入模半角的变化趋势图, 由图 9 和图 10 可知, 随凹模入模半角增加, 成形载荷也随之增大, 金属流动速度减慢, 最大径向偏移量随之减小, 说明增大凹模入模半角有利于减少弯曲变形。但凹模入模半角过大, 成形载荷就会增大, 对设备的要求更高, 在增加成本的同时, 还会导致金属流动性变差, 在凹模入模口形成金属堆积, 造成刮料等成形缺陷。综合考虑凹模入模半角对金属成形及成形载荷的影响规律, 凹模入模半角 α 取 28° 较为合适。

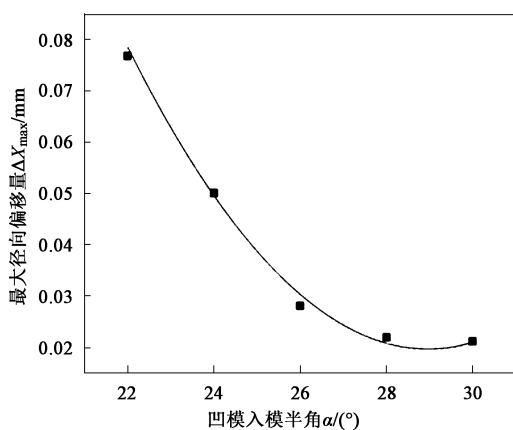


图 9 最大径向偏移量随凹模入模半角的变化趋势图

Fig. 9 Variation trend diagram of maximum radial offset with half angle for die entry

2.2.4 模具间隙对金属流动特性的影响规律

花键主轴的贯通式冷挤压方法是利用凸模穿过凹模后直接将挤压件挤出。因此, 凸凹模的模具间隙大小 (图 11 中 Δs) 会对金属的流动产生影响, 取模具间隙 Δs 分别为 0.00、0.45、0.95、1.95 和 4.95 mm 进行模拟。

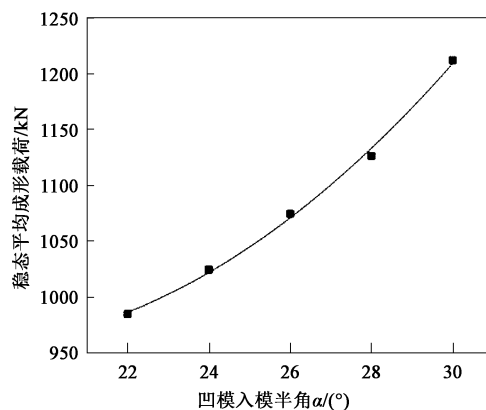


图 10 稳定平均成形载荷随凹模入模半角的变化趋势图

Fig. 10 Variation trend diagram of stable average forming load with half angle of die entry

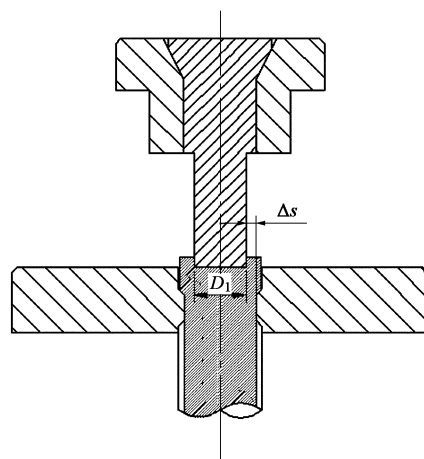


图 11 模具间隙示意图

Fig. 11 Schematic diagram of die clearance

图 12 为不同模具间隙时挤压件的末端缺陷图, 由图 12 可知, 凹模花键齿形槽的形状尺寸一定时, 随着凸模直径 D_1 的减小, 模具间隙增大, 挤压件末端由于金属发生剪切而产生的缺陷正在被逐渐改善, 当模具间隙 $\Delta s = 1.95 \text{ mm}$, 即凸模直径 D_1 为 $\Phi 47.2 \text{ mm}$ 时, 挤压件末端已无明显的成形缺陷。在冷挤压过程中, 凸模直径 D_1 过小会造成凸模在坯料

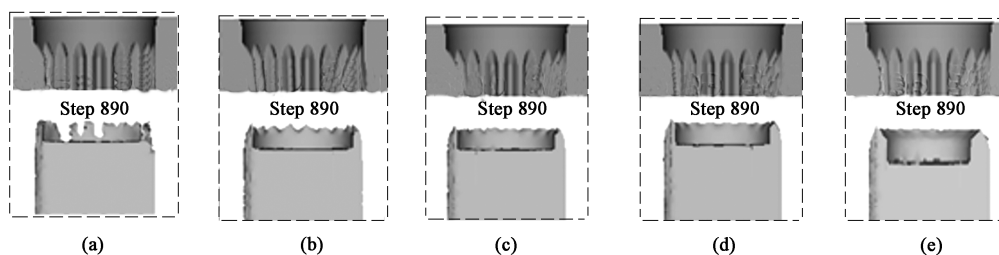


图 12 不同模具间隙时挤压件末端缺陷图

(a) $\Delta s = 0.00 \text{ mm}$ (b) $\Delta s = 0.45 \text{ mm}$ (c) $\Delta s = 0.95 \text{ mm}$ (d) $\Delta s = 1.95 \text{ mm}$ (e) $\Delta s = 4.95 \text{ mm}$

Fig. 12 End defect diagrams of extruded parts with different die clearances

末端挤出凹陷,直径越小,挤压产生的凹陷越深,需要加工的部分越多,影响产品的成形质量。结合生产实际及以上分析结果,凸模直径 D_1 取 $\Phi 46$ mm 较为合适。

3 工艺试验

根据数值模拟分析结果,对变速器花键主轴进行工艺试验,试验参数如表 4 所示。试验设备为 YJK61-400J2 框式液压机,如图 13 所示。图 14 为采用贯通式冷挤压成形方案后的挤压件及机加工后的零件实物图,零件表面光滑,无镦粗弯曲变形,成形质量良好。

表 4 工艺试验参数

Table 4 Process test parameters

参数	定径带长度 h/mm	凹模入模半角 $\alpha/(\circ)$	模具间隙 $\Delta s/\text{mm}$
数值	26	28	46



图 13 YJK61-400J2 框式液压机

Fig. 13 YJK61-400J2 frame hydraulic press

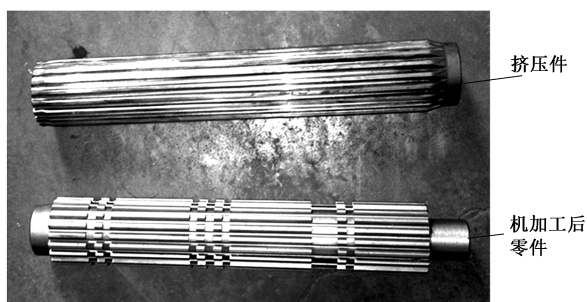


图 14 挤压件实物与机加工后的零件

Fig. 14 Extruded part entity and machined parts

4 结论

(1) 结合变速器花键主轴长径比较大的结构特点和原挤压方式存在开口空间不足的问题,提出贯通式轴冷挤压成形工艺方案。

(2) 挤压件的弯曲变形程度随着坯料与模具之间偏差的增大而增大,装配凸凹模和定位坯料时,要尽量提高坯料与凸凹模之间的定位精度。

(3) 定径带越长,挤压件的弯曲变形量越小,但定径带长度过大,坯料受到的摩擦力会增大,从而引起表面拉伤等成形缺陷,结合实际生产,定径带长度取 26 mm 较为合适。

(4) 随凹模入模半角增大,成形载荷增大,金属流速变慢,可以减缓花键主轴挤压过程中的弯曲变形,但凹模入模半角过大,成形载荷也会变大,易造成坯料镦粗和刮料等成形缺陷。在确保挤压件成形质量的前提下,凹模入模半角 α 取 28° 较为合适。

(5) 凹模型腔保持不变,凸凹模间距越大,越有利于改善坯料末端在挤压过程中的金属剪切现象,当模具间隙 $\Delta s = 1.95$ mm,即凸模直径 D_1 为 $\Phi 47.2$ mm 时,挤压件的剪切缺陷基本消失。结合实际生产经验,凸模直径 D_1 取 $\Phi 46$ mm 较为合适。

参考文献:

- [1] 康权,邓强,李志远,等. 内外花键轴向冷挤压成形工艺[J]. 模具制造, 2015, 15 (7): 62-65.
Kang Q, Deng Q, Li Z Y, et al. Axial cold extrusion process of internal and external splines [J]. Die & Mould Manufacture, 2015, 15 (7): 62-65.
- [2] 贾俐俐. 挤压工艺及模具 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
Jia L L. Extrusion Process and Die [M] Beijing: China Machine Press, 2004.
- [3] Yuan A F. Cold extrusion of a long trapezium spline and its forming analysis [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41 (5-6): 461-467.
- [4] 何孟林,李光兵. 基于数值模拟的花键轴冷挤压参数优化[J]. 时代汽车, 2017, (8): 103-104.
He M L, Li G B. Optimization of cold extrusion parameters of spline shaft based on numerical simulation [J]. Auto Time, 2017, (8): 103-104.
- [5] 贾俐俐,高锦张. 长轴类花键挤压成形极限研究 [J]. 中国机械工程, 2002, 13 (22): 1974-1976.

- Jia L L, Gao J Z. Study on extrusion forming limit of long shaft spline [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13 (22): 1974-1976.
- [6] 贾俐俐, 高锦张, 刘伟, 等. 长轴类零件开式挤压工艺应用及成形极限研究 [J]. 塑性工程学报, 2007, 14 (1): 53-57.
- Jia L L, Gao J Z, Liu W, et al. Application of open extrusion process and study on forming limit of long shaft parts [J]. Journal of Plastic Engineering, 2007, 14 (1): 53-57.
- [7] 夏玉峰, 郑晓凯, 张辉, 等. 内花键齿形冷挤压成形工艺方案的研究 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (5): 120-121.
- Xia Y F, Zheng X K, Zhang H, et al. Study on cold extrusion process scheme of internal spline tooth profile [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (5): 120-121.
- [8] Luo Y X, Li L X. Study on isothermal extrusion using the Deform [J]. Journal of Hunan Industry Polytechnic, 2006, 6 (3): 13-15.
- [9] 邹琼琼, 黄继龙, 龚红英, 等. 基于 DEFORM-3D 的汽车花键轴零件冷挤压工艺参数优化设计 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (5): 8-13.
- Zou Q Q, Huang J L, Gong H Y, et al. Optimization design of cold extrusion process parameters of automobile spline shaft parts based on DEFORM-3D [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (5): 8-13.
- [10] 薛倩倩. 载重汽车变速器输入轴冷挤压成形技术研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2013.
- Xue Q Q. Research on Cold Extrusion Forming Technology of Input Shaft of Truck Transmission [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2013.
- [11] 张莉, 李升军, 董鹏, 等. Deform 在塑性变形中的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- Zhang L, Li S J, Dong P, et al. Application of Deform in Plastic Deformation [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [12] 辜志勇, 冯文杰, 陈莹莹. 定径带长度对花键轴冷挤压弯曲变形的影响 [J]. 现代制造工程, 2011, (10): 97-99, 60.
- Gu Z Y, Feng W J, Chen Y Y. Effect of sizing belt length on cold extrusion bending deformation of spline shaft [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2011, (10): 97-99, 60.
-
- (上接第114页)
- [6] 王彤. 钢结构焊接残余应力及变形控制分析 [J]. 内燃机与配件, 2018, (3): 117-118.
- Wang T. Analysis of welding residual stress and deformation control of steel structure [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018, (3): 117-118.
- [7] 唐景富. 堆焊技术及实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- Tang J F. Surfacing Welding Technology and Example [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [8] 高占远, 郭彦林. 大型或复杂钢结构焊接残余应力与变形研究进展 [J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33 (5): 108-119.
- Gao Z Y, Guo Y L. Research progress on welding residual stress and deformation in large or complex steel structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33 (5): 108-119.
- [9] Branco C M, Infante V, Baptista R. Fatigue behaviour of welded joints with cracks, repaired by hammer peening [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 27 (9): 785-798.
- [10] 权国政, 赵江, 施瑞菊, 等. 多层熔丝增材数值模拟及残余应力控制研究 [J]. 机械科学与技术, 2020, 39 (4): 623-628.
- Quan G Z, Zhao J, Shi R J, et al. Study on contact impact method and parameter control of residual stress elimination in fuse products [J]. Mechanical Science & Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39 (4): 623-628.
- [11] 田锡唐, 刘雪松. 随焊锤击对 LY12CZ 焊接接头显微组织的影响 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, (4): 442-446.
- Tian X T, Liu X S. Influence of welding trailing with peening on microstructure of LY12CZ joints [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, (4): 442-446.
- [12] 冯麟涵, 汪玉, 张磊. 舰船设备抗冲击能力的可靠性分析 [J]. 振动与冲击, 2013, 32 (1): 140-144.
- Feng L H, Wang Y, Zhang L. Reliability analysis for shock resistance ability of shipboard equipments [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32 (1): 140-144.
- [13] 王华杰. 基于非线性瞬态动力学的曲柄滑块机构冲击强度仿真分析 [J]. 机械传动, 2015, (1): 139-141.
- Wang H J. Impact strength simulation analysis of the slider-crank mechanism based on the transient dynamics involved nonlinearity [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, (1): 139-141.
- [14] 秦斌, 周浩, 杜康, 等. 基于 RBF 网络的风电机组变桨距滑模控制 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (5): 37-41.
- Qin B, Zhou H, Du K, et al. Sliding mode control of pitch angle based on RBF neural-network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28 (5): 37-41.