# 渐开线内花键冷挤压成形工艺研究

**刘光辉**<sup>1</sup>, **刘华**<sup>1</sup>, **王涛**<sup>1</sup>, **孙**红星<sup>1</sup>, **刘**百宣<sup>2</sup>, **许午**阳<sup>1</sup> (1. 郑州机械研究所, 郑州 450001; 2. 郑州大学 机械工程学院, 郑州 450001)

摘要:目的研究渐开线内花键冷挤压成形工艺。方法 根据渐开线内花键的结构特点,提出了两种渐开线内花键冷挤压成形工艺方案。采用Deform-3D有限元分析软件对提出的工艺方案进行数值模拟,分析了两种方案的载荷位移曲线、方案二中不同坯料孔径和摩擦因子对渐开线内花键成形质量的影响等。结果 提出的两种工艺方案均可在模具许用应力范围内成形渐开线内花键, 通过数值模拟,获得了成形过程中的工艺参数,揭示了渐开线内花键冷挤压成形过程的变形机 理。结论 提出的渐开线内花键冷挤压成形工艺,对实际生产及其他相似零件具有指导意义。 关键词:渐开线内花键;冷挤压;数值模拟

**DOI**: 10.3969/j.issn.1674–6457.2016.01.013

中图分类号: TG376.3 文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2016)01-0067-06

#### **Research on Cold Extrusion Forming Process of Involute Inner Spline**

LIU Guang-hui<sup>1</sup>, LIU Hua<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, SUN Hong-xing<sup>1</sup>, LIU Bai-xuan<sup>2</sup>, XU Wu-yang<sup>1</sup>
(1. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450001, China;
2. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**ABSTRACT**: The aim of this study was to research cold extrusion forming process of the involute inner spline. Based on the structural characteristics of the involute inner splines, came up with two cold extrusion forming technology schemes of involute inner spline. The processes were numerically simulated through Deform–3D, different process of different stages were analyzed. The load–displacement curve of the two schemes, different blank inside diameter and friction coefficient of involute spline forming quality of scheme two and so on. The involute inner spline can be shaped within the allowable range of stress of the die by the two schemes proposed. The process parameters of the process of forming were obtained and the results revealed the deformation mechanism of the involute inner spline during cold extrusion forming process through numerical simulation. The proposed cold extrusion forming process of the involute inner spline has significance for the actual production and other similar parts.

KEY WORDS: involute inner spline; cold extrusion forging; numerical simulation

渐开线内花键广泛应用于汽车制造领域,目前渐 开线内花键的成形方法主要有拉齿和插齿加工,其生 产效率和材料利用率都很低,不能满足大批量的生产 需求。冷挤压成形是一种无屑成形的先进制造技术 之一,它具有优质、高效、低耗等优点,生产效率比拉 齿、插齿加工要高几倍到十几倍,材料利用率可达到

**收稿日期:** 2015-11-19

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)

作者简介:刘光辉(1989—),男,河南信阳人,硕士生,主要研究方向为精密塑性成形及控制。

**通讯作者:**刘华(1962—),男,河南项城人,研究员,博士生导师,主要研究方向为精密塑性成形及控制、多方位数控联动成形技术及成套 装备、复合材料装备等。

70%~80%<sup>[1-5]</sup>。随着渐开线内花键需求量的增加,如 何进一步改进渐开线内花键的成形工艺,提高其材料 利用率和生产率,降低能耗和生产成本,是目前世界各 国加工业追求的目标<sup>[6-9]</sup>。有研究表明,采用冷挤压成 形的内花键具有连续的金属纤维流线,其内部可形成 致密而均匀的材料组织,避免了拉削加工的缺陷<sup>[10-12]</sup>。

本文以某汽车同步器齿套为研究对象,对这种零件的渐开线内花键制定了两种冷挤压成形工艺方案, 然后对制定的成形工艺进行数值模拟研究,根据模拟 结果,进一步优化工艺,为今后渐开线内花键的成形 提供了参考。

# 1 零件工艺分析

锻压工艺合理与否直接影响材料的利用率、模具 结构、锻件的质量和生产率,甚至决定模具开发的成 败,因此,在成形工艺制定前需要对零件进行工艺分 析,找出成形的难点所在,以便在工艺安排上重点考 虑<sup>[13-14]</sup>。本文研究对象为某汽车3/4档同步器齿套, 材料为20CrMnTi,其内圈渐开线花键参数:齿数为 45,模数为1.62,压力角为20°,分度圆直径为Φ 72.9 mm,齿廓总偏差为0.014,螺旋线偏差为0.013。 实体造型如图1所示,成形的难点是如何在模具许用 应力允许范围内保证内花键齿形的充填饱满。



图 1 产品实体造型 Fig.1 Solid modeling drawing

# 2 成形工艺方案的制定

#### 2.1 方案1工艺方案制定

方案1模具结构如图2所示。在这种成形模具的基础上,主要考虑采用单向挤压还是双向挤压。单向挤压时,摩擦力全部向上,而且随着挤压的进行,充填到模腔的材料越来越多,摩擦力越来越大,这会导



Fig.2 Structure of dies for scheme 1

致内花键上部充满时下部仍未充满,而要使得内花键 下部充满,必须施加更大的力以克服模具的摩擦力。 双向挤压时,上下齿形冲头同时同速运动,摩擦力在 坯料高度方向上呈对称分布,这有利于坯料上下端的 充填,降低成形力,这时的摩擦就转化为有效摩擦。 综合以上分析,制定方案1的成形工艺为双向挤压工 艺。根据模腔尺寸和体积相等原则,确定坯料的尺寸 为Φ90 mm × Φ75 mm × 30 mm。

#### 2.2 方案2工艺方案制定

方案2模具结构如图3所示。在这种渐开线内 花键的成形模具中,齿形冲头是最重要的工作零件, 为了方便坯料的定位,在齿形冲头的下端设置一段 不带齿形的导向结构。模具导向部分的直径要比坯 料的内孔径稍小,这样能够保证导向部分与坯料内 孔之间为间隙配合,使其顺利进入坯料内孔。齿形 冲头下端有一个30°入口角,这样既能保护齿形冲 头,增加模具寿命,又可以避免成形开始阶段成形力 陡增的现象。在齿形冲头上端有一个凸台,此凸台 的作用是在成形最后阶段镦整锻件上端面,以保证 齿形充填饱满和减少后续的机加工,图4为齿形冲 头三维造型。在挤压程中,坯料受到来自齿形冲头 的力,一方面使坯料沿冲头斜面沿轴向流动,完成齿 腔的充填;另一方面使材料一直处于压应力状态,整 个变形材料始终受到三向压应力作用,使金属流线 较均匀。其中凹模有两部分,上部是为了放置坯料, 内径稍微大于或等于坏料的外径,下部是为了方便 凸模导向端顺利进出,其内径应和导向端直径相等 或略大于导向端直径。

对于方案2,环形坯料内孔直径的尺寸对渐开 线内花键冷挤压成形质量至关重要,它直接影响成 形件的充填质量。如果坯料内孔直径过小,在成形 过程中会造成过多的金属堆积在下部,导致变形死



图 3 方案 2 模具结构简图 图 4 齿形冲头 Fig.3 Structure of dies for scheme 2 Fig.4 The tooth-shape punch

区过大,不利于金属流动;而如果坯料内孔直径过 大,虽然会减小变形死区,在一定程度上降低成形 力,但会造成齿形充填不满,影响成形质量。为了保 证充填质量和良好的金属流动,坯料的内孔直径应 在齿形冲头齿根圆直径和分度圆直径之间(*Φ*70.2 mm~*Φ*72.9 mm)<sup>[15]</sup>。为了研究不同坯料内孔直径对 成形质量的影响,分别取内孔直径为*Φ*70.2 mm,*Φ* 71 mm,*Φ*72 mm,外径为*Φ*90 mm的坯料。

# 3 成形工艺方案数值模拟

#### 3.1 模拟条件的设定

将模具几何模型导入到Deform-3D有限元模拟 软件中,设置模拟工艺参数对工艺方案进行数值模 拟,模具材料定义为刚性。为保证模拟结果的准确 性,网格划分要细,采用四面体网格划分,网格数取为 20万个,并对内花键部分进行局部网格细化。坯料在 冷挤压成形过程中与模具的接触应力很高,在这种情 况下,采用剪切摩擦模型能够很好地反映挤压过程中 的实际情况,因此模拟时选用剪切摩擦模型。由于是 冷挤压成形,温度设定为室温(20℃)。

### 3.2 方案1数值模拟结果分析

#### 3.2.1 成形载荷分析

图5为方案1模拟成形过程中的载荷-行程曲线, 从图5中可以看出,上下齿形冲头载荷-位移曲线基本 重合,说明挤压过程中受力均匀,上下摩擦力对称分 布。挤压过程中最大成形载荷约为4300 kN,模具最大 单位压力约为1940 MPa,在冷锻模具许用应力范围之 内(冷锻模具最高许用应力一般小于2500 MPa)。在 最后阶段坯料与模具的接触情况如图6所示。

#### 3.2.2 等效应力分析

图7为方案1挤压过程中的内部截面的等效应力 分布云图,从图7中可以看出,挤压过程中应力分布



图 6 坯料与模具的接触情况 Fig.6 Contact situation of blank and die

均匀,没有出现应力集中现象。随着变形量的增加, 应力逐渐增大达到材料的屈服强度,产生塑性变形, 使得内花键齿形充填饱满。

#### 3.3 方案2数值模拟结果分析

#### 3.3.1 成形载荷分析

图8为孔径为Φ70.2 mm的坯料模拟过程中模具 的行程-载荷曲线,从图8可以看出,成形过程大致分 为3个阶段:第1阶段齿形冲头与环形坯料逐渐接触, 被挤压出的金属向下流动,此阶段载荷逐渐增大;第2 阶段下端被挤出的金属被逐渐切断,成形载荷逐渐降 低;第3阶段为镦整锻件上端面的过程,在此阶段形成 形载荷急剧增大。总的来说,成形载荷是先逐渐增加 而后降低,最后又急剧增加,这与实际情况相吻合。因 为齿形冲头在运动过程中,被挤压出的金属逐渐向下 流动,齿形冲头阻力逐渐增加,因此载荷逐渐增大;而 当这些金属被逐渐切断后,齿形冲头阻力减小,载荷又 逐渐降低;而最后的镦整上端面过程金属逐渐充满模 具模腔形成封闭挤压,导致成形载荷急剧增加。前2 个阶段齿形成形过程中最大成形载荷约为716 kN,第 3阶段镦整锻件上端面过程中最大成形载荷为2310





Fig.8 Load-stroke curve

kN。在最后阶段坯料与模具的接触情况如图9所示。 3.3.2 等效应力分析

Φ70.2 mm的环形坯料成形过程中内部截面等效 应力分布如图 10 所示。从图 10 中可以看出,第120 步时最大应力集中在坯料下端,最大值为 841 MPa。 随着冲头的运动,被挤出的金属被逐渐切断,从 164 步和 205 步可以看出坯料下端被挤出金属在逐渐减 少,随着冲头向下运动,成形最后阶段最大应力为 850 MPa。而 20CrMnTi 材料的屈服强度 σ 。≥835 MPa,所以材料在强大的作用力下发生不可恢复的塑 性变形。

#### 3.3.3 摩擦因子的影响

在金属成形过程中,摩擦往往会伴随着金属的塑 性流动,大多数情况下,摩擦都会产生消极的作用。



图 10 挤压过程中的等效应力分布 Fig.10 Equivalent stress distributed during extrusion

坯料与模具的接触面上的摩擦不仅影响金属的变形 和挤压件的质量,而且也直接影响挤压单位力的大 小、模具强度与寿命,因此挤压时的润滑十分重要。 摩擦因子对渐开线内花键冷挤压成形过程中齿形冲 头所受挤压力的影响如图11所示。从图11中可以看 出,随着摩擦因子的增大,挤压载荷逐渐增大,这将会 引起变形力和变形功的增大,加剧模具的磨损,降低 使用寿命。为了降低挤压过程中的挤压载荷,减少模 具磨损,提高锻件质量,挤压前必须对坯料进行良好 的润滑处理,一般使用高分子润滑剂。

表1给出了3种不同坯料孔径数值模拟的参数 值。通过不同坯料孔径数值模拟结果可以看出,其对 渐开线内花键冷挤压成形有一定的影响,由于Ⅰ和Ⅱ 阶段同为齿套内花键齿形的充填过程,Ⅲ阶段为镦整





表1 不同坯料孔径数值模拟参数值 Table 1 Simulated results of different blank

孔径/mm	成形阶段	载荷峰值/MN	最大应力/MPa	最大应变
70.2	Ι	0.716	841	5.43
	Ш	2.310	850	6.17
71	Ι	0.610	844	11.9
	Ш	2.050	847	14.4
72	Ι	0.479	842	12.8
	Ш	1.810	845	14.7

锻件上端面过程,因此相互比较时只考虑出现最大成 形载荷的Ⅰ阶段和Ⅲ阶段。随着坯料内孔直径的增加,挤压过程中的最大成形载荷逐渐减小,这是因为 内孔径越大,在挤压过程沿齿形冲头向上流动的金属 和被齿形冲头向下挤出的金属越少,最后的成形力也 越小。

# 3.4 方案1和方案2对比分析

从以上模拟结果分析可以看出,方案1渐开线 内花键齿形充填饱满时的载荷达到430t,方案2 中,虽然不同坯料孔径对成形载荷有一定影响,但 是内花键齿形充填饱满时载荷最大为70.6t,镦整 上端面的最大载荷为231t,都明显小于方案1中的 成形载荷,这将显著提高模具寿命,因此方案2更 具参考意义。

# 4 工艺试验及结果

以模拟分析结果为指导,结合生产实际条件,设 计制作相应模具并进行成形试验,选用坯料的材料为 20CrMnTi。由于20CrMnTi材料在常温下硬度较高, 塑性较差,退火处理可降低硬度,提高塑形,减小成形力,因此试验前对坯料进行退火处理。除此之外,利用高分子润滑剂对坯料进行润滑处理,以减小摩擦因数,增加模具寿命。试验采用与Deform-3D数值模拟相同的条件,试验设备采用315 t四柱油压机。图12上方为试验得到的锻件,下方为对应的齿形局部放大图。从图12中可以看出,坯料内径对渐开线内花键成形影响很大,内径越大,齿形充填越不饱满。



图 12 坯料内径对内花键成形的影响 Fig.12 The influence of different diameter of blank on internal spline forming

# 5 结论

1) 在满足渐开线内花键成形质量的前提下,方 案2的成形力远小于方案1,有利于提高模具寿命。

2)随着摩擦因子的增加,成形载荷也随之增大,因此实际生产中必须对坯料和模具进行润滑处理,以减小摩擦对成形载荷和锻件成形质量的影响。

 新开线内花键在成形过程中坯料孔径对成形 性能有显著影响,采用方案2成形渐开线内花键,最 佳坯料孔径为Φ70.2 mm。

4)提出的渐开线内花键冷挤压成形工艺对实际 生产及其他相似零件具有指导意义。

#### 参考文献:

 孟令先,宋学进,李冠权,等. 浙开线内花键冷挤压成形工 艺与模具[J]. 金属成形工艺,1996,14(6):3—4.
 MENG Ling-xian, SONG Xue-jin, LI Guang-quan, et al. Cold Extrusion Forming Process and Die of Involute Inner Spline[J]. Metal Forming Technology, 1993, 14(6):3—4.

- [2] 王平,陈华,蔡永辉. 螺旋内花键旋转挤压成型工艺与模 具设计[J]. 模具工业,2011,37(3):53—55.
  WANG Ping, CHEN Hua, CAI Yong-hui. Rotational Extrusion Forming Process and Design of Die for Internal Spiral Spline[J]. Mould Industry,2011,37(3):53—55.
- [3] 康关军,李高峰,乔博,等. 铝合金内花键精密冷挤压工艺 研究[J]. 金属铸锻焊技术,2009,38(7):145—146.
  KANG Guan-jun, LI Gao-feng, QIAO Bo, et al. Research on Precision Cold Extruding Technology for Aluminum Alloy Internal Spline[J]. Casting·Forging·Welding, 2009, 38(7): 145—146.
- [4] PARVIZIAN F, KA YSER T. Thermo-machanical Modeling and Simulation of Aluminum Alloy Behavior During Extrusion and Cooling[J]. Journal of Materials Process Technology, 2009,209:876-883.
- [5] LI Luo-xing, ZHOU Jie, DUSZCZYK J. Prediction of Temperature Evolution During the Extrusion of 7075 Aluminum Alloy at Various Ram Speed by Means of 3D FEM Simulation
   [J]. Materials Processing Technology, 2004, 145(3): 360–370.
- [6] 李建国,汤文成,刘德仿,等.内齿轮冷挤压精锻成形数值 模拟与工艺研究[J].锻压技术,2008,33(3):75—79.
  LI Jian-guo, TANG Wen-cheng, LIU De-fang, et al. Numerical Simulation and Technology Research on the Cold Precision Forging of Inner Gear[J]. Forging & Stamping Technology,2008,33(3):75—79.
- [7] 陈强. 合金进攻流变学及其应用[M]. 北京:冶金工业出版 社,2012.
  CHEN Qiang. Alloy Processing Theology and Its Applications
  [M]. Beijing: Press of Metallurgy Industry, 2012.
- [8] LEE C M. A Three-Dimensional Steady-State Finite Element Analysis of Square Die Extrusion by Using Automatic Mesh Generation[J]. Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(3):33-47.
- [9] BILL A J, BRYANT W, BILL DIXON, et al. Isothermal Extrusion[J]. Light Metal Age, 1999, 57(3):8—36.

- [10] 袁永壮,姜海,许泽银,等. 离合器内齿轮包挤压成形工艺及实验研究[J]. 机械传动,2007,31(3):87—90.
  YUANG Yong-zhuang, JIANG Hai, XU Ze-yin, et al. Forming Technology and Experimental Research on Internal Gear
  [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2007, 31(3):87—90.
- [11] 孟令先,宋学进,张元国,等. 汽车启动齿轮的高效成形方法[J]. 锻压技术,2005,30(1):13—22.
  MENG Ling-xian, SONG Xue-jin, ZHANG Yuan-guo, et al. High Efficiency Forming Method of Automobile Starter Gear [J]. Forging&Stamping Technology,2005,30(1):13—22.
- [12] 李建平,夏祥生,万元元,等.大尺寸内齿轮冷挤压成形工. 艺研究[J]. 锻压技术,2013,38(3):7—11.
  LI Jian-ping, XIA Xiang-sheng, WAN Yuan-yuan, et al. Technical Research on Cold Extrusion of Large Size Internal Gear[J]. Forging&Stamping Technology,2013,38(3):7—11.
- [13] 杜勇,闻瑶,马俊林,等. 隔热板冲压成形工艺参数优化
  [J]. 精密成形工程,2014,6(5):108—112.
  DU Yong, WEN Yao, MA Jun-lin, et al. Optimization of the Process Parameters for Thermal Baffle Stamping Forming[J].
  Journal of Netshape Forming Enginenring, 2014, 6 (5): 108—112.
- [14] 汪金保,刘华,孙红星,等.大直径带毂直齿轮冷精密成形数值模拟及工艺分析[J].精密成形工程,2014,6(6): 104—110.

WANG Jin-bao, LIU Hua, SUN Hong-xing, et al. Numerical Simulation and Process Analysis of Cold Precision Forging for Large-diameter Spur Gears with Hub[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(6):104-110.

[15] 孙世保,韩豫,刘全坤,等. 贯通内齿轮冷挤压成形工艺仿 真与试验[J]. 浙江科技学院学报,2009,21(3):169—172.
SUN Shi-bao, HAN Yu, LIU Quan-kun, et al. Simulation and Experimental Study on Cold Extrusion Forming Technology of Hole-through Internal Gear[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2009, 21(3):169— 172.