

载重汽车行星齿轮冷挤压成形工艺

宋应德¹, 冯文杰^{1,2}, 陈莹莹^{2,3}, 王江平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: 载重汽车行星齿轮是汽车传动的重要零件, 目前主要通过热锻制空心坯-冷挤压成形外齿的方式制造, 该方式存在工艺路线长、成本高、耗能高的问题, 严重制约了行星齿轮的发展与应用。针对该问题提出实心坯料一次冷挤压成形工艺方案, 减少热锻相关工序, 降低生产成本; 建立行星齿轮一次冷挤压成形工艺方案有限元模型, 通过 DEFORM-3D 有限元软件进行数值模拟分析, 研究了凹模入模口半角、凹模定径带长度、下凸模锥顶角对成形质量、成形载荷的影响规律。研究结果表明: 在凹模入模口半角为 60°、凹模定径带长度为 12 mm、下凸模锥顶角为 12°时的成形质量较好。根据冷挤压一次成形工艺方案进行工艺试验, 试验结果良好, 满足预期要求, 证实了该方案的可行性。

关键词: 载重汽车; 行星齿轮; 冷挤压; 成形质量; 成形载荷

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.07.017

中图分类号: TG376 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 07-0123-08

Cold extrusion forming process for truck planetary gear

Song Yingde¹, Feng Wenjie^{1,2}, Chen Yingying^{2,3}, Wang Jiangping¹, 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. Vehicle Engineering Institute, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Truck planetary gear is an important part of automobile transmission. At present, it is mainly manufactured by the method of hot forging hollow blank and cold extrusion forming external gear, and this method has the problems of long process route, high cost and high energy consumption, which seriously restricts the development and application of planetary gear. Therefore, to solve this problem, a one-time cold extrusion forming process for solid billet was proposed to reduce the processes related with hot forging and production costs, and the finite element model of the one-time cold extrusion forming process scheme of planetary gear was established. Then, the numerical simulation analysis was carried out by finite element software DEFORM-3D, and the influence laws of half angle of die entrance, length of sizing belt for die and cone angle of lower punch on the forming quality and forming load were studied. The results show that the forming quality is better when the half angle of die entrance is 60°, the length of sizing band for die is 12 mm and the cone angle of lower punch is 12°. According to the one-time cold extrusion forming process scheme, the process test is carried out, and the test results are good and meet the expected requirements, which confirms the feasibility of the scheme.

Key words: truck; planetary gear; cold extrusion; forming quality; forming load

目前, 冷挤压技术在齿轮加工中的应用较为成熟, 已经逐步替代传统的切削加工方式。冷挤压技术较传统的切削加工具有高效、节能、省材的特点, 是一种精密成形方法^[1-3], 因其成形后力学性能好、

表面精度高等优点被广泛应用在载重汽车行星齿轮制造上。但是, 由于行星齿轮具有外齿和内孔, 冷挤压技术成形工艺下的金属流动复杂, 故对各工艺参数的选定要求较高。

国内外很多学者对冷挤压成形零件进行了诸多研究。余林峰等^[4]研究了旋压时齿顶圆角填充不饱满的问题, 采用数值模拟与成形试验相结合的方法研究了齿形件旋压成形时的应力与应变分布、材料变形特点以及材料流动情况, 最终揭示了其成形机理; 孙克锐等^[5]针对双杯壳类零件成形, 对比分析拉深工艺与冷

收稿日期: 2022-09-08; 修订日期: 2022-12-12

基金项目: 重庆市科委资助项目 (cstc2014yykfA60001)

作者简介: 宋应德 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1510717795@qq.com

通信作者: 冯文杰 (1964-), 男, 硕士, 教授

E-mail: wjfeng@cqut.edu.cn

挤压工艺的优劣,制定了合理的冷挤压成形方案并计算成形载荷,最后通过试验得到验证;重庆工商大学梁强等^[6]针对直齿轮研究了通过式冷挤压成形后顶端塌角问题,并利用灰色关联分析进行参数优化,最终通过试验验证了得到的参数组合能减小塌角和减轻下端面外凸现象;Hu C L 等^[7]以 45 钢为材料,以正反挤压的灵敏度为优化目标,最终得到适合的参数;Chen X 等^[8]将试验和数值模拟结合,研究了内螺纹在冷挤压过程中的成形规律,得出其在挤压时的三向载荷变化。华北水利水电大学王士灿^[9]对直齿圆柱齿轮成形时精度低、载荷大的问题进行分析,提出温-冷复合的工艺,通过建立模型,分析得出了理想的参数组合;陈熠道等^[10]以万向节滑套为研究对象,设计了 3 种不同形式的反挤压凸模,通过响应面法进行参数优化,最后通过实验得到满足要求的万向节滑套;骆静等^[11]针对内花键双联齿轮的特殊结构提出了 4 种成形方案,并对方案进行分析,得出了最佳成形方案,最后通过试验得以验证。现有的冷挤压成形行星齿轮的工艺方案普遍采用空心坯料,通过空心坯料成形外齿,再对齿廓进行精加工,但是这种方式的工艺路线长、成本高、耗能高。因此,本文采用实心坯料一次冷挤压成形行星齿轮,省去热锻制空心坯相关工序,后续只需简单整形即可,设计合理的工艺方案,通过 UG 软件建立了有限元模型,利用 DEFORM-3D 软件进行有限元数值模拟分析,研究各工艺参数对成形质量和成形载荷的影响规律,最后通过工艺试验进行验证。

1 工艺方案的确定

1.1 零件结构特点分析

图 1 为某载重汽车行星齿轮的零件图,该齿轮具有内孔和外齿两部分,其齿形参数如表 1 所示。

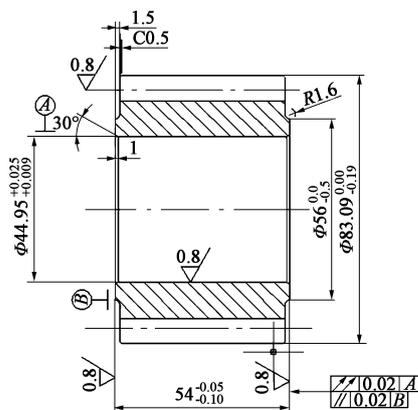


图 1 某载重汽车行星齿轮的零件图

Fig. 1 Part drawing of a truck planetary gear

表 1 某载重汽车行星齿轮外齿参数

Table 1 Parameters of external tooth for a truck planetary gear

参数	齿数 z	模数 m	压力角 $\alpha_n / (^\circ)$	变位系数 x
数值	18	4.1	22.5	+0.366

1.2 冷挤压成形工艺方案分析

目前,贯通式正挤压行星齿轮是一种比较常用的冷挤压方式,所需成形载荷约为 3500 kN,所需空心坯料常用热锻的方式获取。图 2a 为贯通式正挤压的成形过程,坯料内孔受到约束,凸模在压力机的作用下迫使空心坯料向下运动,在凹模成形区成形外齿,但是由于整个工艺路线长,热锻时耗能高,且热锻后空心坯料需要再加工,导致材料耗费大,成本增加。因此,本文提出通过实心坯料一次冷挤压成形的工艺方案,以解决材料利用率低、成本高的问题,如图 2b 所示,在挤压时上凸模向下运动,迫使实心坯料通过凹模和下凸模具型腔,在定径带的作用下同时成形出内孔和外齿。传统的空心坯料成形行星齿轮的工艺方案的材料利用率约为 70%,该方案较传统贯通式方案节约了热锻空心坯相关工序,明显减少了能耗、降低了生产成本。

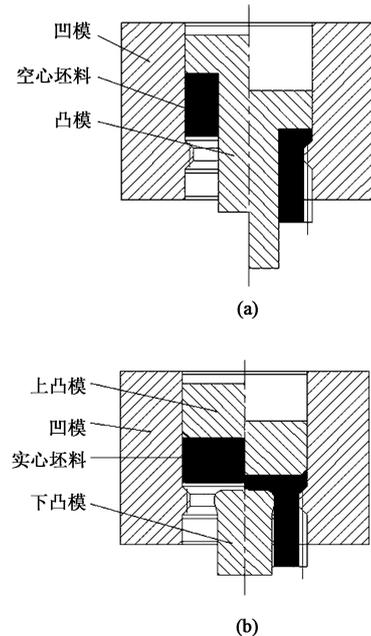


图 2 冷挤压工艺方案对比图

(a) 贯通式工艺方案 (b) 一次成形工艺方案

Fig. 2 Comparison diagrams of cold extrusion process schemes

(a) Through-type process scheme (b) One-time forming process scheme

2 有限元模拟及分析

2.1 有限元建模

本文根据行星齿轮冷挤压工艺方案利用 UG 软件

建立三维模型，借助 DEFORM-3D 有限元软件进行模拟分析，设凹模入模口半角为 α ，凹模定径带长度为 H ，下凸模锥顶角为 γ 。将建立好的三维模型存为 STL 格式导入 DEFORM-3D 软件中进行参数化设置，由于该行星齿轮具有对称性，为了节约模拟时间，选取齿轮的 1/18 进行模拟，设置摩擦因数为 0.12，摩擦类型为剪切摩擦，上凸模的运动速度为 $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，毛坯材料为 20CrMnTi 钢，其材料的力学性能如表 2 所示，网格数量设为 20000 个，图 3 为建立完成的有限元几何模型。在 DEFORM-3D 软件中，可以进行刚塑性有限元模拟运算和弹塑性有限元模拟运算，由于弹塑性有限元模型对计算机要求较高，运算速率较慢，一般用于模具应力分析和失效分析，而本文各工艺参数组合的模拟算例较多，对运算速度要求较高，故选用刚塑性有限元模拟较为合适。这里模具均设为刚性体，坯料设为塑性体^[12]。

表 2 20CrMnTi 钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 20CrMnTi steel

参数	数值
泊松比	0.25
屈服强度/MPa	835
抗拉强度/MPa	1080
弹性模量/GPa	207
伸长率/%	10

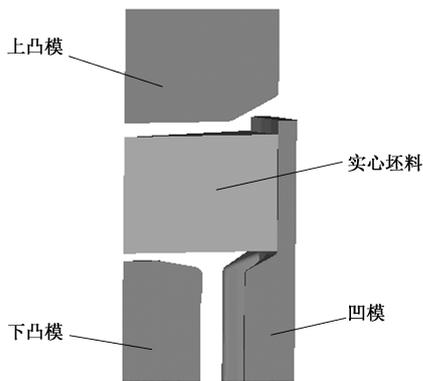


图 3 有限元几何模型

Fig. 3 Finite element geometric model

2.2 数值模拟结果分析

根据实际经验可知，在冷挤压成形过程中，凹模入模口半角、凹模定径带长度、下凸模锥顶角对成形质量和成形载荷的影响较大，为了研究一次冷挤压成形行星齿轮的金属流动规律，找寻合适的工艺参数组合，对其分别进行了有限元模拟分析与研究。

2.2.1 凹模入模口半角 α 对金属流动规律的影响

在冷挤压成形时，在压力机作用下，凹模入模

口对坯料起着引导的作用，为了探究凹模入模口半角对行星轮成形的金属流动规律，选取 $\alpha = 20^\circ$ 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 和 80° 进行数值模拟，为了保证参数的一致性，设置 $H = 12 \text{ mm}$ ， $\gamma = 12^\circ$ 。图 4 为凹模入模口半角为 20° 、 40° 和 60° 时的外齿塌角情况，从图 4 可以看到，不同凹模入模口半角下的外齿下端塌角状况不同。

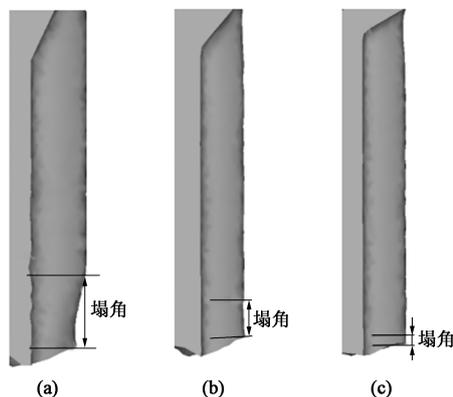


图 4 α 取不同值时外齿下端的塌角长度

(a) $\alpha = 20^\circ$ (b) $\alpha = 40^\circ$ (c) $\alpha = 60^\circ$

Fig. 4 Angle collapse lengths at lower end of external tooth with different values of α

图 5 为不同凹模入模口半角下外齿下端塌角的变化趋势。从图 5 可以看出，当凹模入模口半角小于 50° 时，塌角的减小速度较大，这是由于凹模入模口半角较小时，外层金属更易发生轴向流动，导致内外层金属流速差过大，此时对塌角的影响较大，塌角现象显著；当凹模入模口半角大于 50° 时，塌角减小速度不明显，这是由于在大凹模入模口半角时金属易发生径向流动，导致内外速度差不大，对塌角的影响较小，从而不易出现塌角现象。

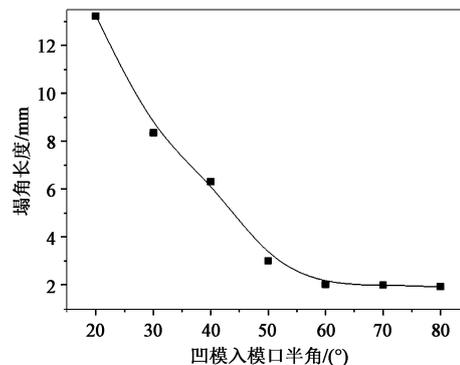


图 5 塌角长度随 α 值的变化趋势图

Fig. 5 Changing trend diagram of angle collapse length with α values

塌角长度作为衡量外齿齿形饱满的重要标准，是判断行星齿轮成形质量的重要因素，图 6 为入模口半角为 20° 、 40° 、 60° 时挤压件的运动矢量图，黑

色线为等速线,可以看到在挤压过程中金属在下凸模和凹模成形区作用下向轴向和径向流动。根据体积不变原则和在挤压过程中坯料向最小阻力方向运动原则可知,在不同凹模入模口半角下坯料的流动状态也不同。当凹模入模口半角为 20° 时,外部金属流动速度较快,内部金属流动速度较慢,导致内

外速率不一致,出现明显的塌角现象,如图 6a 所示;当凹模入模口半角为 40° 时,凹模入模口半角增加,外层金属流动更趋向于径向,故内外速度差减小,塌角缺陷得到改善,如图 6b 所示;当凹模入模口半角为 60° 时,等速线趋近水平,表示内外速度差接近 0,这时无明显塌角现象,如图 6c 所示。

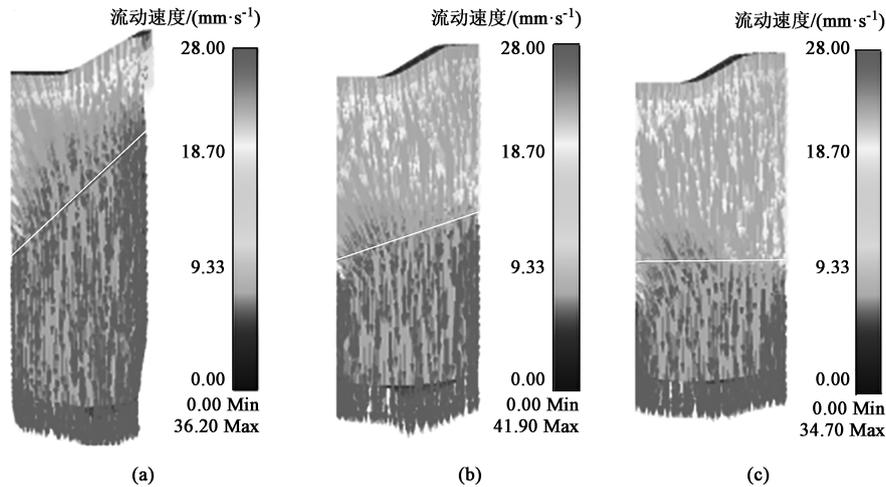


图 6 α 取不同值时挤压件的速度矢量图

(a) $\alpha=20^\circ$ (b) $\alpha=40^\circ$ (c) $\alpha=60^\circ$

Fig. 6 Velocity vector diagrams of extrusion part with different values of α

图 7 为凹模入模口半角为 20° 、 40° 、 60° 和 80° 时,停止条件为 3 mm 定值时的外齿上端缩孔情况(停止条件指上凸模顶端与下凸模顶端的轴向距离),可以看到凹模入模口半角对缩孔有影响作用,其总体趋势为随着凹模入模口半角的增加而减小。当凹模入模口半角为 $20^\circ \sim 40^\circ$ 时,上端缩孔缺陷显著,当凹模入模口半角在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 时,缩孔缺陷得到改善,当凹模入模口半角在 $60^\circ \sim 80^\circ$ 时,缩孔缺陷不明显。

图 8 为不同凹模入模口半角下的成形载荷趋势,从图 8 可以看到,随着凹模入模口半角的增加,其所需成形载荷也随之增加,这是因为当凹模入模口半角过大时,金属不易发生轴向流动,这时为了克

服入模口分流的轴向阻力,需要更多的成形力参与作用,故不应选取过大的凹模入模口半角。

综上所述,凹模入模口半角过小时会产生上端缩孔和下端塌角,凹模入模口半角过大时,会产生较大的成形载荷,故综合考虑选取 α 为 60° 。

2.2.2 凹模定径带长度 H 对金属流动规律的影响

在冷挤压成形过程中,凹模定径带对坯料塑性变形区起着限制作用,合适的凹模定径带长度将会大大减少成形缺陷,为了探究凹模定径带长度对行星齿轮成形质量的影响规律,为选取合适的工艺参数奠定基础,选取 $H=3$ 、 6 、 9 、 12 和 15 mm 进行数值模拟分析,为了保证参数的一致性,设置 $\alpha=60^\circ$, $\gamma=12^\circ$ 。

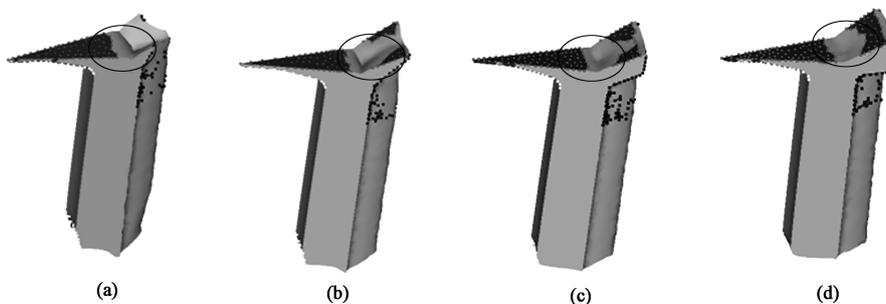


图 7 α 取不同值时的外齿上端缩孔

(a) $\alpha=20^\circ$ (b) $\alpha=40^\circ$ (c) $\alpha=60^\circ$ (d) $\alpha=80^\circ$

Fig. 7 Upper shrinkage of external gear with different values of α

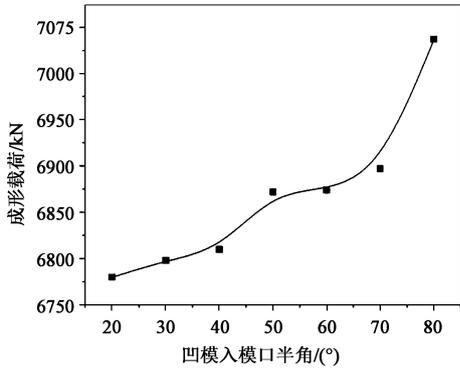


图 8 α 取不同值时的成形载荷曲线

Fig. 8 Forming load curve with different values of α

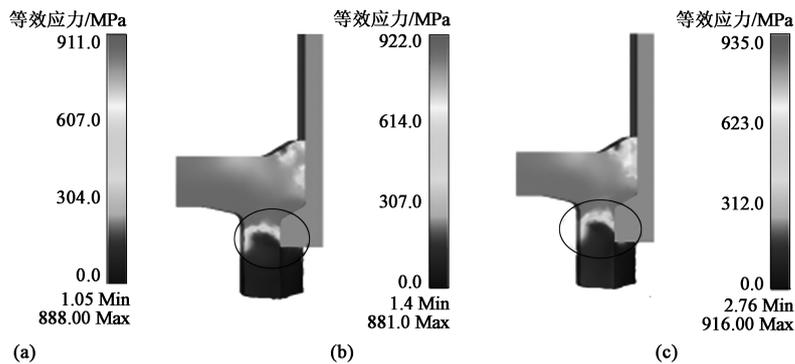


图 9 H 取不同值时的等效应力云图

(a) $H=6$ mm (b) $H=9$ mm (c) $H=12$ mm

Fig. 9 Equivalent stress nephograms with different values of H

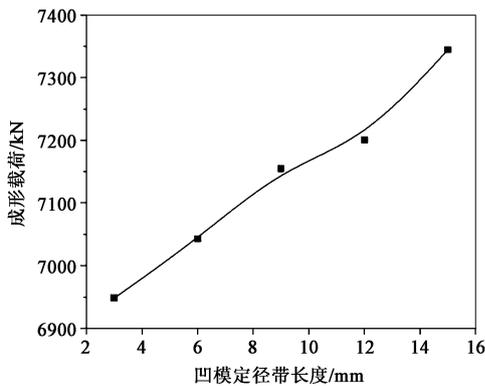


图 10 H 取不同值时最大成形载荷曲线

Fig. 10 Maximum forming load curve with different values of H

凹模定径带长度过长，除了会增大成形载荷外，也会对挤压件表面产生拉应力，如图 11 所示。拉应力的产生是挤压件表面产生开裂的主要原因，故应尽量避免，凹模定径带长度越长，拉应力的作用范围也就越大，越易产生拉应力。对于模具来说，会破坏磷化皂化层，导致模具粘模，从而影响模具寿命；对于挤压件来说，会使齿面产生裂纹，影响成形齿廓的质量。

图 9 为凹模定径带长度为 6、9 和 12 mm 时的等效应力云图，可以看出在凹模定径带长度小于 9 mm 时，不能完全限制住塑性变形区，这时出模后坯料还会发生不规则变形，将会极大地影响成形质量；当凹模定径带长度大于 9 mm 时已经可以限制塑性变形区，这时不会发生大的不规则变形。故为了保证行星齿轮的成形质量，凹模定径带长度应该大于塑性变形区长度。

图 10 为凹模定径带长度对成形载荷的影响曲线，从中可以看出，在定径带长度从 3~15 mm 的增长过程中，其成形载荷呈缓慢增长的趋势，这是由于凹模定径带长度越长摩擦越大，故所需成形力也随之越大。

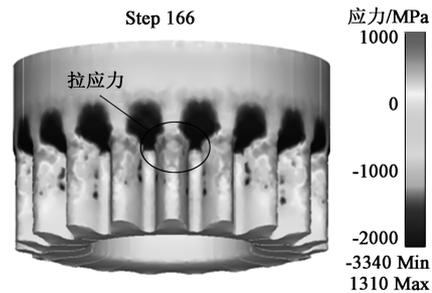


图 11 凹模定径带长度过大时表面拉应力

Fig. 11 Surface tensile stress with too large sizing belt length for die

综上所述，在选取凹模定径带长度时既要完全限制住塑性变形区，又要避免过大拉应力和过大的成形载荷，综合考虑选取凹模定径带长度为 12 mm 较为合适。

2.2.3 下凸模锥顶角 γ 对金属流动规律的影响

在冷挤压过程中，下凸模对一次成形行星齿轮内孔起到分流成形的作用，下凸模锥顶角作为下凸模的重要参数，合适的锥顶角将会减少成形缺陷。为了研究其对行星齿轮成形的影响规律，分别选取 $\gamma=4^\circ$ 、 8° 、 12° 、 16° 和 20° 进行数值模拟分析，为

了保证参数的一致性，设置 $\alpha=60^\circ$ ， $H=12\text{ mm}$ 。

图 12 为停止条件为 3 mm 时，不同下凸模锥顶角下的缩孔情况，从图 12 中可以看出，随着下凸模锥顶角的增加，其缩孔缺陷逐渐得到改善。

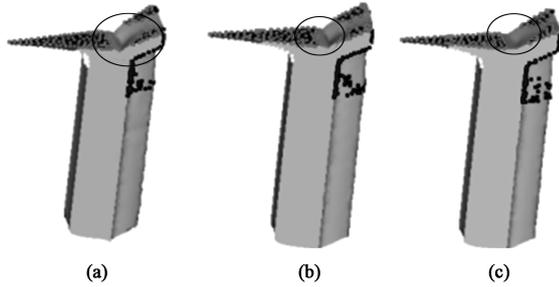


图 12 γ 取不同值时的外齿上端缩孔
(a) $\gamma=4^\circ$ (b) $\gamma=8^\circ$ (c) $\gamma=12^\circ$

Fig. 12 Upper shrinkage of external gear with different values of γ

根据经验可知，缩孔的出现也与挤压件上端挤压厚度有关，上端挤压越薄，越易出现缩孔现象，为了研究不同下凸模锥顶角条件下在出现缩孔缺陷时挤压件上端厚度，分别进行数值模拟，得到如图 13 所示变化趋势。

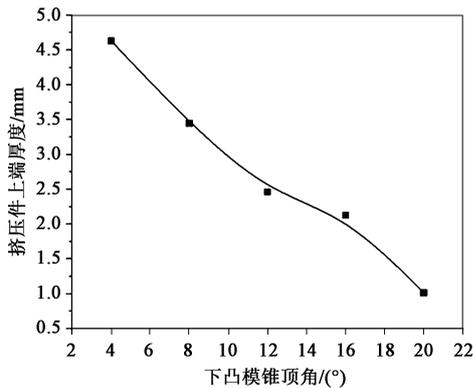


图 13 挤压件上端厚度随 γ 的变化趋势图
Fig. 13 Changing trend diagram of thickness at upper end of extrusion part with γ

根据数值模拟结果可以看到，随着下凸模锥顶角的增加，其挤压件上端厚度随之减小，而挤压厚度越薄，对材料的利用率也越高，故下凸模锥顶角不应该太小。

图 14 为下凸模锥顶角对成形载荷的影响曲线，可以看出成形载荷随下凸模锥顶角的增加而减小，下凸模锥顶角为 $4^\circ \sim 8^\circ$ 时，成形载荷减小迅速，下凸模锥顶角为 $8^\circ \sim 20^\circ$ 时，成形载荷减小缓慢。

综上所述，下凸模锥顶角的选取应充分考虑缩孔和成形载荷的影响，在本文中选取 12° 较为合适。

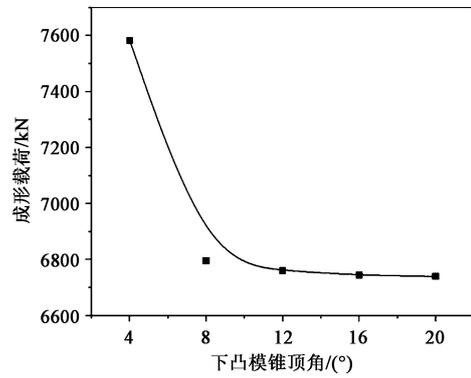


图 14 成形载荷随 γ 的变化曲线
Fig. 14 Changing curve of forming load with γ

3 工艺试验

根据数值模拟结果进行工艺试验，工艺试验参数如表 3 所示，根据参数制造模具，上、下凸模材料选用 Cr12MoV 钢，凹模模芯选用 YG20 硬质合金，模具实物如图 15 所示。试验设备为 YJK61-800B 框式液压机，其设备基本参数如表 4 所示。

表 3 工艺试验参数
Table 3 Process test parameters

参数	凹模定径带长度 H/mm	凹模入模半角 $\alpha/^\circ$	下凸模锥顶角 $\gamma/^\circ$
数值	12	60	12

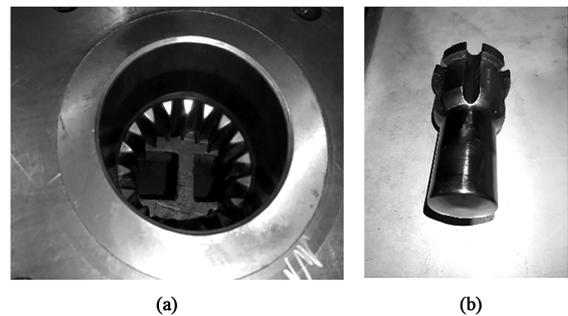


图 15 模具实物图
(a) 凹模 (b) 下凸模
Fig. 15 Physical drawings of dies
(a) Die (b) Lower punch

表 4 设备参数
Table 4 Equipment parameters

参数	数值
顶出力/kN	1500
公称力/kN	8000
滑块行程/mm	710



图 16 实心坯料
Fig. 16 Solid blank

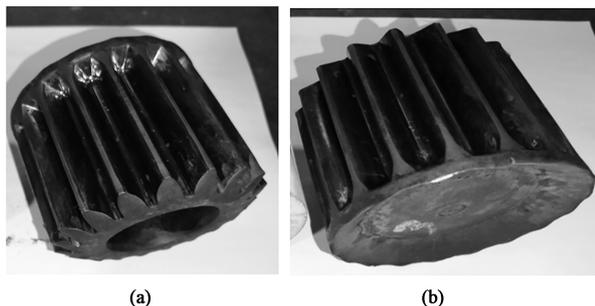


图 17 冷挤压实物图
(a) 挤压件下端 (b) 挤压件上端

Fig. 17 Physical drawings of cold extrusion

(a) Lower end of extrusion part (b) Upper end of extrusion part

图 16 为工艺试验的实心毛坯，挤压前需对其进行退火处理和磷化皂化处理，图 17 为通过一次冷挤压工艺方案成形后的挤压件。从图 16 和图 17 中可以看到成形后齿形饱满，整体无明显缺陷，表面质量良好，经过设备显示该方案的最大成形力为 6202 kN，数值模拟结果为 6840 kN，实际值与模拟值在误差范围内，满足成形要求，证实了该方案的可行性。

4 结论

(1) 根据现有的空心坯料成形行星齿轮方案，提出了通过实心坯料一次冷挤压成形工艺方案，通过工艺试验证明了该方案的可行性。

(2) 凹模入模口半角较小时，挤压件内外形成速度差，塌角现象越明显，上端缩孔现象越显著，而凹模入模口半角过大时会导致成形载荷增大。故 α 取 60° 较为合适。

(3) 当凹模定径带长度过长时会增大成形载荷，同时也会因摩擦面积增多对坯料表面产生过大拉应力，从而出现拉伤、粘模等现象。故 H 取 12 mm 较为合适。

(4) 当停止条件为 3 mm 时，随着下凸模锥顶角的增加，缩孔缺陷逐渐得到改善；随着下凸模锥顶角的增加，挤压件上端厚度随之减小；当下凸模锥顶角过小时又会产生较大成形载荷。故 γ 取 12° 较为合适。

(5) 一次冷挤压成形工艺方案的成形载荷较贯通式冷挤压成形方案的成形载荷更大，对模具要求更高。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 宏慎章. 冷挤压实用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
Hong S Z. Cold Extrusion Practical Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [3] 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.
- [4] 余林峰, 徐晓, 夏琴香, 等. 薄壁内外齿形件旋压成形机理 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 86-93.
Yu L F, Xu X, Xia Q X, et al. Spinning mechanism of thin-walled internal and external toothed parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 86-93.
- [5] 孙克锐, 徐海利. 双杯壳类零件冷挤压成形工艺及模具设计 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (7): 154-161.
Sun K R, Xu H L. Cold extrusion process and die design of double cup shell parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (7): 154-161.
- [6] 梁强, 张贤明, 贾艳艳. 基于灰色关联分析的直齿轮冷挤压成形工艺参数优化 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (1): 69-76.
Liang Q, Zhang X M, Jia Y Y. Optimization of cold extrusion process parameters for spur gears based on grey correlation analysis [J]. Journal of Plastic Engineering, 2021, 28 (1): 69-76.
- [7] Hu C L, Osaki Shogo, Cai B X, et al. Optimization of the steady combined forward and backward extrusion test for higher sensitivity to friction in cold forging [J]. Defect and Diffusion Forum, 2022, 6100: 147-153.
- [8] Chen X, Hou H L, Wu L, et al. Research on metal flow law and strengthening mechanism of cold extrusion internal thread [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022, 44 (3): 1-13.
- [9] 王士灿. 直齿轮精锻复合成形关键技术研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
Wang S C. Research on Key Technology of Spur Gear Precision Forging Compound Forming [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Hydropower, 2020.