

结合齿圈冷挤压工艺优化

施卫兵¹, 殷强², 袁海兵¹, 李明明¹, 龚爱军¹, 胡成亮²

(1.江苏森威精锻有限公司, 江苏 大丰 224100;

2.上海交通大学 塑性成形技术与装备研究院, 上海 200030)

摘要: **目的** 分析不同工艺参数对结合齿圈挤压成形的影响, 并进行优化设计。**方法** 对结合齿圈挤压过程进行有限元仿真, 采用正交试验方法分析各关键参数对凸模正压力、填充程度与材料利用率的影响规律, 并以三者为优化指标, 结合多岛遗传算法进行优化。**结果** 初始坯料倒角角度 α 、倒角高度 h 以及芯轴半径 r_1 、凹模内圈半径 r_2 和凹模圆角半径 r_3 对挤压结果有不同影响, 其中对挤压过程中正压力的影响最为显著; 随着凹模内圈半径 r_2 的增加, 正压力单调下降, 其余 4 个参数对正压力的影响随参数变化有所波动。**结论** 优化方案的各参数数值为 $\alpha=30^\circ$, $h=5.0$ mm, $r_1=23.0$ mm, $r_2=30.8$ mm, $r_3=0.5$ mm, 优化方案的齿部填充饱满, 毛刺明显减少, 材料利用率与初始方案相比几乎相等, 但凸模正压力降低为初始方案的 54.1%, 有利于提高模具寿命。

关键词: 结合齿圈; 冷挤压; 正交试验; 多岛遗传算法; 正压力

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.03.008

中图分类号: TG306 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)03-0040-05

Process Optimization for Cold Extrusion of Connection Gear Ring

SHI Wei-bing¹, YIN Qiang², YUAN Hai-bing¹, LI Ming-ming¹, GONG Ai-jun¹, HU Cheng-liang²

(1.Jiangsu Sunway Precision Forging Co., Ltd., Dafeng 224100, China;

2.Institute of Forming Technology and Equipment, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

ABSTRACT: The paper aims to analyze influences of different parameters on extrusion forming of connection gear ring. The finite element method was used to simulate the extrusion process of connection gear ring. Influences of key parameters on the extrusion pressure of punch, filling degree and material utilization rate of the punch were analyzed by orthogonal test and three indexes were defined as object to be optimized in combination with the multi-island genetic algorithm. The initial chamfer angle α and chamfer height h of hot workpiece, the mandrel radius r_1 , the inner radius of die r_2 and the fillet radius of die r_3 had different effects on extrusion results. And the normal pressure of punch was significantly affected and it monotonously decreased with the increase of the inner radius of die r_2 and the pressure fluctuated with the change of other four parameters. The parameters of the optimization scheme are $\alpha=30^\circ$, $h=5.0$ mm, $r_1=23.0$ mm, $r_2=30.8$ mm, $r_3=0.5$ mm. The filling of the teeth is well and the burr is significantly reduced. The material utilization is the same as the initial scheme, but the extrusion pressure decreases to 54.1%, which is helpful to extend the service life of die.

KEY WORDS: connection gear ring; cold extrusion; orthogonal test; multi-island genetic algorithm; extrusion pressure

同步器主要用于汽车变速器中,作用是降低汽车的操控难度,使汽车换挡更迅速、高效,同时也能提

高汽车驾驶的安全性^[1]。结合齿圈是同步器上的关键零件,主要起到传递扭矩的任务。结合齿圈在工作时

收稿日期: 2017-04-19

作者简介: 施卫兵(1969—),男,高级工程师,主要研究方向为精锻成形技术。

承受的载荷很高,因此在实际加工生产过程中要求其具有较高的性能^[2]。结合齿圈包含齿部和轮毂2部分,由于需要与基本连接形成配件使用,结合齿圈的焊接工艺研究得到关注^[3-4],同时关于此类带毂直齿轮的冷锻工艺研究也受到了重视^[5-7]。结合齿圈零件的结构特点决定了其锻造工艺与模具设计的复杂度,实际中结合齿圈很容易出现齿部充填不饱满或凸模寿命较低的问题。实际采用冷挤压工艺进行生产,所得挤压件齿部还有毛刺过高的问题,增大后续切削的难度与余量。针对上述问题,文中根据结合齿圈冷挤压工艺的特点,对初始坯料尺寸和模具结构进行优化,在保证齿部填充饱满、材料利用率较高的前提下,降低凸模正压力,以改善成形质量与模具寿命。

1 数值模拟分析

数值模拟方法已在齿轮精锻成形工艺分析中得到了较为广泛的应用^[8-9]。根据实际结合齿圈冷挤压工艺,采用商业化软件建立了相应的数值模拟模型,并对其挤压成形过程进行了仿真。结合齿圈冷挤压的实物与对应模拟所得的挤压件见图1,可以看出,从外形上观察,两者匹配较好;通过模拟时对齿部网格进行局部细化,较好地反映了齿部毛刺,与实际结果一致。

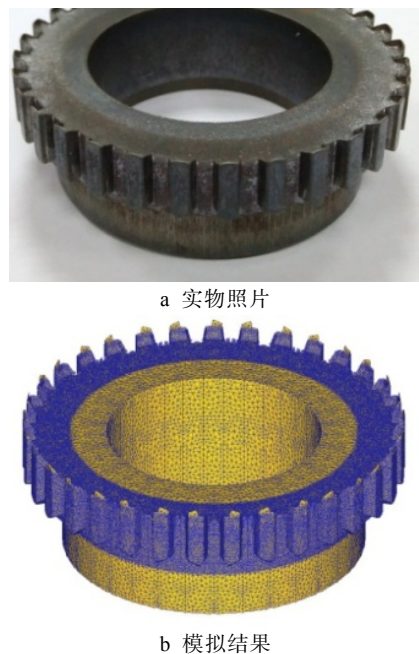


图1 结合齿圈挤压件的实物与模拟结果

Fig.1 The real part and simulation result of conjunction gear ring

为直观分析结合齿圈冷挤压过程的金属流动规律,采用坐标网格法获得的截面变形网格见图2a,说明金属发生了显著的径向与轴向流动;数值模拟的截面变形网格见图2b,与实际对比,发现变形后的

坐标网格较为吻合,从而说明模拟结果是可靠的。

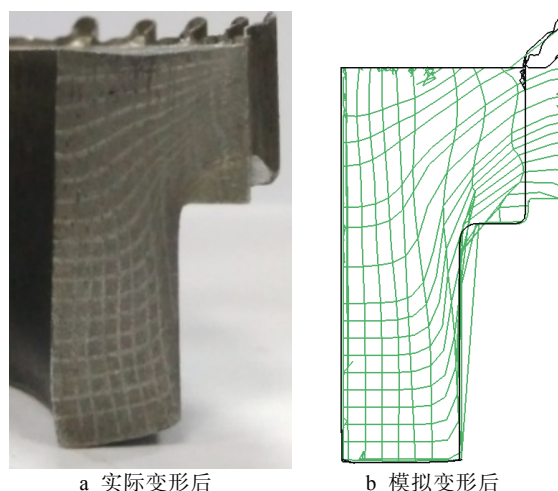


图2 坐标网格的变形情况

Fig.2 Deformation condition by using coordinate grid

2 工艺参数确定

结合齿圈冷挤压工艺见图3,初始坯料为带倒角圆环形毛坯,迫使材料挤压过程中尽可能地沿径向往齿部流动。分析该工艺,可以看出,倒角角度 α 、倒角高度 h 、芯轴半径 r_1 、凹模内圈半径 r_2 以及凹模圆角 r_3 等5个参数对挤压过程有影响。其中 r_2 与 r_1 的差值为轮毂的厚度,该值越大,材料沿轴向流动的阻力越小;但是坯料过多流向轮毂方后,轮齿部分则不易填充饱满。初始工艺中各参数设计值分别为: $\alpha=45^\circ$, $h=5\text{ mm}$, $r_1=22.5\text{ mm}$, $r_2=29.5\text{ mm}$, $r_3=0.5\text{ mm}$,实际中出现齿部毛刺较大与模具寿命较低的问题。

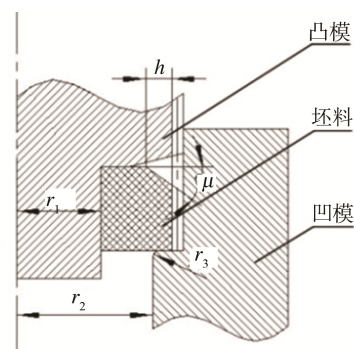


图3 结合齿圈冷挤压工艺

Fig.3 Schematic diagram of cold extrusion process for conjunction gear ring

3 试验设计和分析

正交试验方法是一种实用的试验设计与优化方法^[10]。根据上述5个关键工艺参数,选用五因素四水平正交表,得到了16组具有不同工艺参数的工艺方案,见表1。对16个方案分别进行数值模拟,并根

据提取的模拟结果分别计算每个方案的齿部填充程度、凸模正压力与材料利用率。其中，齿部填充程度是以初始方案的填充程度为基准，提取模拟结果中齿部局部体积，将其与初始方案的比值 ϕ 作为填充程度评价指标；凸模正压力是提取凸模在挤压过程中的载荷峰值，并除以凸模的截面积，即单位面积上的载荷峰值；材料利用率的计算中，先假定初始方案的材

料利用率为 100%，各个方案毛坯体积与初始方案毛坯体积之比即为材料利用率。如表 1 所示，当齿部充填程度小于 0.9 时，说明该方案的齿部并未充满；凸模正压力处于 422.73~1782.34 MPa，未充满方案的正压力很小，过充满方案正压力较大；大部分方案的材料利用率都在 90%~100%，鉴于后续挤压件端面与内孔需要切削加工，因此材料利用率允许小于 100%。

表 1 不同试验方案的参数与模拟结果
Tab.1 The parameters and simulation results of different schemes

序号	h/mm	$\theta/(\text{^\circ})$	r_1/mm	r_2/mm	r_3/mm	齿部填充程度 ϕ	凸模正压力 σ_n/MPa	材料利用率 $v/\%$
1	3	15	20	28.2	0.2	1.044	1324.11	96.1
2	3	30	21	29.5	0.5	1.155	1259.81	96.1
3	3	45	22	30.8	0.8	1.038	1173.86	96.1
4	3	60	23	32.1	1.1	0.692	548.28	96.2
5	4	15	21	30.8	1.1	1.036	1112.97	93.7
6	4	30	20	32.1	0.8	0.848	601.30	89.3
7	4	45	23	28.2	0.5	1.044	1782.34	104.1
8	4	60	22	29.5	0.2	1.041	1372.47	98.6
9	5	15	22	32.1	0.5	1.198	1168.62	93.7
10	5	30	23	30.8	0.2	1.038	896.34	98.8
11	5	45	20	29.5	1.1	1.144	1131.36	93.8
12	5	60	21	28.2	0.8	0.970	1421.63	98.5
13	6	15	23	29.5	0.8	1.046	1517.92	101.4
14	6	30	22	28.2	1.1	1.044	1646.84	101.2
15	6	45	21	32.1	0.2	0.624	422.73	91.4
16	6	60	20	30.8	0.5	0.718	507.35	91.6
初始方案	5	45	22.5	29.5	0.5	1.000	1576.94	100.0

可以看出，不同工艺方案所得凸模正压力有明显的差异。根据正交试验分析规则，通过计算可以获得各个工艺参数对凸模正压力影响的直观分析图，见图 4。正压力随 r_2 的变化而单调变化， r_2 的值越大，正压力就越小。原因在于，凹模内圈半径 r_2 越大，分流孔直径就越大，材料越容易进行轴向分流，所需凸模

正压力就越小。相比较而言，倒角角度 α 、倒角高度 h 、芯轴半径 r_1 与凹模圆角 r_3 等其他参数对凸模正压力的影响较小，且不是单调变化。

4 优化方法选择

遗传算法常用于优化搜索，最早由 HOLLAND^[11] 于 1975 年提出，其步骤包括编码、产生初始群体、评估适应度函数、选择算子以及交叉、变异和迭代^[12]。CHUNG 和 HWANG^[13]以 H 形锻件为例，采用遗传算法优化锻模形状以获得温度均匀分布的锻件。POURSINA 等^[14]利用遗传算法对预锻毛坯形状进行优化，以避免锻造中的折叠缺陷。ALIMIRZALOO^[15]以叶片锻造为研究对象，通过遗传算法优化预成形形状及终锻分模线的位置，实现了减少飞边、应变均匀以及降低错模力等目标。可以看出，遗传算法已广泛用于锻造工艺过程优化，并取得了有益效果。与普通遗传算法相比，多岛遗传算法的计算精度更高，更容易获取全局最优解^[13]。

因此，文中优化采用了多岛遗传算法，对应算法

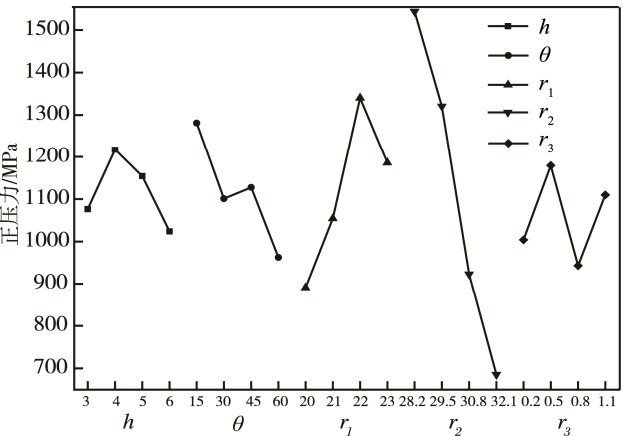


图 4 各因素对凸模正压力的影响
Fig.4 Influence of parameters to extrusion pressure of punch

具体实现过程包括：首先，将目标函数 $\text{Max}[\varphi, v]$, $\text{Min}[\sigma_n]$ 映射为适应度函数，用二进制码串联的方式描述各个方案；在设计变量 $(\alpha, h, r_1, r_2, r_3)$ 定义的范围随机生成一个初始解，随后进行交叉和变异，适应度较好的方案会遗传至下一代；然后，再进行迭代操作，经过不断地迭代累积优良的遗传因子，提高适应度函数，获得最优解。

5 结果与讨论

经过优化后得到一个最佳方案，优化方案对应具体工艺参数为： $\alpha=30^\circ$, $h=5$ mm, $r_1=23$ mm, $r_2=30.8$ mm, $r_3=0.5$ mm。按照优化方案模拟所得的挤压件见图 5a，经评价计算，齿部填充程度为 1.038，凸模正压力为 853.23 MPa，材料利用率为 0.988。与初始方案相比，齿部填充饱满且毛刺减少，材料利用率几乎不变，凸模正压力则有大幅度降低，仅为初始方案的 54.1%。

不同模拟步数下初始与优化方案中的挤压变形状态见图 6。可以看出，与初始方案相比，优化方案的轮毂厚度更大，即轴向分流孔更大，金属更容易沿轴向流至轮毂部分；在 Step100 时，轮毂挤出部分优化方案要比初始方案长 0.58 mm。凸模继续下压，在 Step 150 时，轮毂挤出部分 2 个方案的长度差减小至 0.33 mm，说明此时发生了大量金属径向流动，向齿

部填充。当挤压进行至 Step200 时，2 个方案的轮毂长度差异不大，优化方案的齿部尚未填充饱满，而初始方案的齿部已提前充满且在齿部上端产生了毛刺。继续挤压，优化方案的齿部充满并形成小毛刺，而初始方案的毛刺继续增大。

对比初始与优化方案工艺参数可知，除轮毂厚度外，初始坯料的倒角角度分别为 45° 和 30° ，两者差异较大，小倒角角度加大坯料端部与齿腔的相对距离，从而一定程度上延缓上角隅的齿形充填，从挤压结果来看，齿部上端不会过早填充饱满，从而有利于减小毛刺，也可使凸模正压力有所降低。

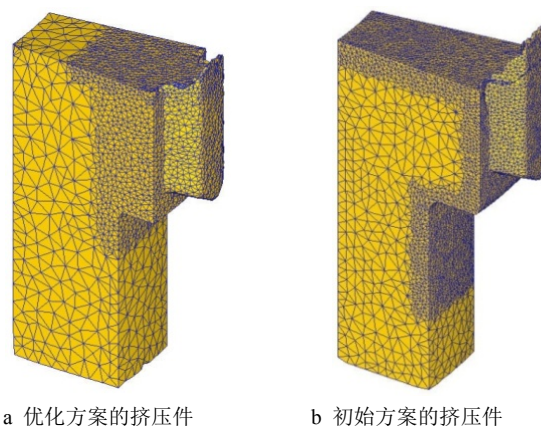


图 5 初始与优化方案模拟结果
Fig.5 Simulation results of initial and optimized schemes

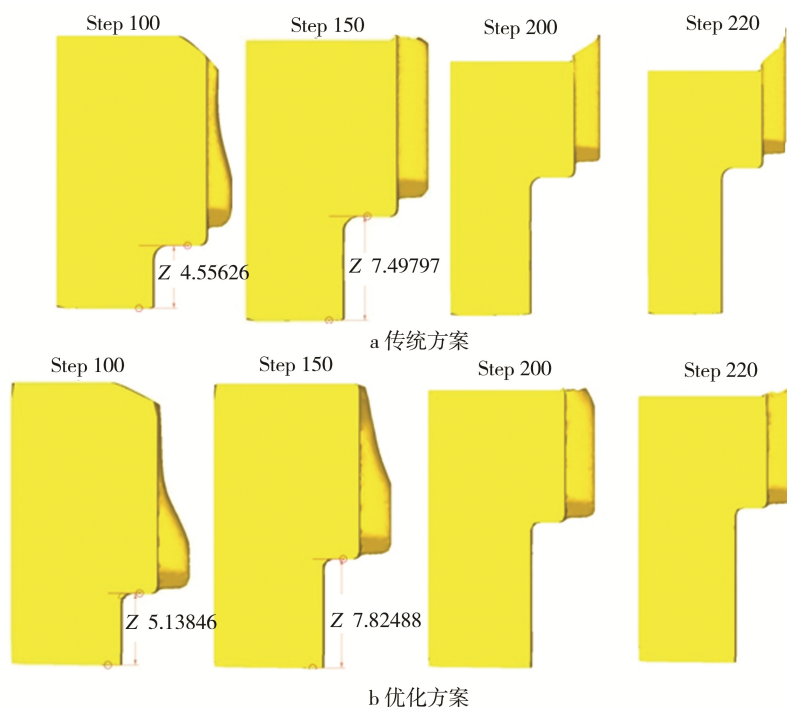


图 6 初始与优化方案的挤压变形情况
Fig.6 Deformation status of extrusion process of initial and optimized scheme

6 结论

1) 借助数值模拟对结合齿圈冷挤压工艺进行分析,探讨了初始坯料倒角角度 α 、倒角高度 h 以及芯轴半径 r_1 、凹模内圈半径 r_2 和凹模圆角 r_3 对凸模正压力、填充程度与材料利用率的影响规律,发现挤压过程的凸模正压力随着凹模内圈半径 r_2 的增加而单调下降。

2) 结合正交试验设计与多岛遗传算法,实现了结合齿圈冷挤压工艺参数的优化,优化后坯料倒角角度 $\alpha=30^\circ$ 、倒角高度 $h=5\text{ mm}$ 、芯轴半径 $r_1=23\text{ mm}$ 、凹模内圈半径 $r_2=30.8\text{ mm}$ 和凹模圆角 $r_3=0.5\text{ mm}$ 。与初始方案相比,齿部填充饱满且毛刺减少,材料利用率几乎不变;凸模正压力则有大幅度降低,仅为初始方案的54.1%,有助于提高模具寿命。

参考文献:

- [1] 任小鸿. 汽车同步器齿环精密锻造模具的改进与应用[J]. 锻压技术, 2011, 36(2): 87—90.
REN Xiao-hong. Improvement and Application of Auto Synchronizer Ring Precision Forging Die[J]. Forging and Stamping Technology, 2011, 36(2): 87—90.
- [2] 周冬海, 王良模, 董义, 等. 某汽车变速器结合齿圈的改进设计与疲劳分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2014(8): 18—21.
ZHOU Dong-hai, WANG Liang-mo, DONG Yi, et al. Improved Design and Fatigue Analysis of the Combined Ring Gear in a Car Transmission[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2014(8): 18—21.
- [3] 吕兵. 变速器结合齿圈激光焊接技术的应用[J]. 新技术新工艺, 2009, 30(6): 87—91.
LYU Bing. Application of Laser Welding on Transmission Connection Gear[J]. New Technology & New Process, 2009, 30(6): 87—91.
- [4] 刘芳, 辛志杰, 曹敏曼. 球磨机齿圈裂纹补焊工艺及裂纹控制方法研究[J]. 现代制造工程, 2013(10): 120—123.
LIU Fang, XIN Zhi-jie, CAO Min-man. The Research of Welding Process and Control Methods for Crack of Gear Ring of Ball Grinder[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2013(10): 120—123.
- [5] 胡成亮, 刘全坤, 王强, 等. 直齿轮刚性平移两步成形工艺仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 161—164.
HU Cheng-liang, LIU Quan-kun, WANG Qiang, et al. Simulation and Experimental Study on Two Steps Forming Technology of Spur Gear Based on Rigid Parallel Motion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 161—164.
- [6] 谭险峰, 林治平. 带轮毂直齿圆柱齿轮精锻的变形分析[J]. 金属成形工艺, 1998(1): 31—32.
TAN Xian-feng, LIN Zhi-ping. Deformation Analysis of Precision Forging of Spur Gear with Wheel Hub[J]. Metal Forming Technology, 1998(1): 31—32.
- [7] HOLLAND J H. Adaptation in Natural and Artificial System[J]. The University of Michigan Press, 1975.
- [8] 赵春雨, 孟宪举, 李军. 齿轮坯模锻成形过程的数值模拟及优化[J]. 精密成形工程, 2010, 2(6): 24—28.
ZHAO Chun-yu, MENG Xian-jv, LI Jun. Gear Blank Forming Process Simulation and Optimization[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2(6): 24—28.
- [9] 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.
- [10] 郑明玉, 谢晋市, 陈文琳, 等. 直齿圆柱齿轮温锻成形工艺参数优化[J]. 精密成形工程, 2012, 4(3): 14—18.
ZHENG Ming-yu, XIE Jin-shi, CHEN Wen-lin, et al. Process Parameters Optimization for Spur Gear Warm Forging[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(3): 14—18.
- [11] BOOKER L B, GOLDBERG D E, HOLLAND J H. Classifier Systems and Genetic Algorithms[J]. Artificial Intelligence, 1989, 40(1/2/3): 235—282.
- [12] CHUNG J S, HWANG S M. Process Optimal Design in Forging by Genetic Algorithm[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2002, 124(2): 397—408.
- [13] POURSIANA M, ANTÓNIO C A C, CASTRO C F, et al. Preform Optimal Design in Metal Forging Using Genetic Algorithms[J]. Engineering Computations, 2004, 21(6): 631—650.
- [14] ALIMIRZALOO V, SADEGHI M H, BIGLARI F R. Optimization of the Forging of Aerofoil Blade Using the Finite Element Method and Fuzzy-Pareto Based Genetic Algorithm[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(6): 1801—1810.
- [15] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code[J]. Technometrics, 1979, 21(2): 239—245.