

渐开线齿形零件精冲尺寸精度分析及工艺参数优化

李华建, 赵彦启, 肖振沿, 刘金菊

(中机精冲科技(福建)有限公司, 福建 三明 365500)

摘要: 采用 Deform-3D 软件对某汽车变速箱零件渐开线花键孔的精冲成形进行模拟, 分析花键孔精冲有限元模型的结构特点, 以点的位移量作为花键孔精冲模拟尺寸精度的评价标准。采用全面试验设计法研究凸凹模间隙、凸模圆角半径和压边力 3 个工艺参数对精冲成形结果的影响, 获得最优工艺参数组合为: 凸凹模间隙为 0.04 mm、凸模圆角半径为 0.4 mm 和压边力为 724 kN, 利用极差分析方法得出各因素对花键孔精冲尺寸精度的影响程度大小依次为凸凹模间隙>凸模圆角半径>压边力。采用插值法对最优工艺参数组合模拟试验中的凸模进行应力分析, 并预测凸模的使用寿命为 4825 次, 符合设计预期。最后, 采用优化后的工艺参数组合进行了实际花键孔精冲试验, 花键孔的成形尺寸精度得到了明显提升。

关键词: 渐开线花键孔; 极差分析; 插值法; 凸模使用寿命; 尺寸精度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.08.013

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 08-0083-06

Dimensional precision analysis and process parameter optimization on fine blanking for involute toothed parts

Li Huajian, Zhao Yanqi, Xiao Zhenyan, Liu Jinju

(China Machinery Fine Blanking Technology (Fujian) Co., Ltd., Sanming 365500, China)

Abstract: Deform-3D software was used to simulate the fine blanking for involute spline hole of an automobile gearbox part, and the structural characteristics of finite element model for the spline hole fine blanking were analyzed, the displacement amount of point was taken as the evaluation standard of the dimensional precision for spline hole fine blanking simulation. The influences of three process parameters, such as clearance between punch and die, fillet radius of punch and blank holder force, on the fine blanking results were studied by comprehensive experimental design method, and the optimal combination of process parameters was obtained as follows: the clearance between punch and die was 0.04 mm, the fillet radius of punch was 0.4 mm and the blank holder force was 724 kN. By using range analysis method, the influence degree of each factor on the dimensional precision of fine blanking spline hole was in the order of clearance between punch and die > fillet radius of punch > blank holder force. The stress analysis of punch in the optimal process parameters combination simulation experiment was carried out by interpolation method, and the punch service life was predicted to be 4825 times, which was in line with the design expectation. Finally, the actual spline hole fine blanking experiment was carried out with the optimized parameters combination, and the dimensional precision of spline hole forming was obviously improved.

Key words: involute spline hole; range analysis; interpolation method; service life of punch; dimensional precision

精冲属于无切削加工技术, 是在普通冲压技术基础上发展起来的一种精密冲裁方法, 能在一次冲压行程中获得较普通冲裁零件尺寸精度高、冲裁面光洁、翘曲小且互换性好的优质精冲零件^[1]。通过精冲得到的零件通常仅需要去除毛刺等极少的后续

加工即可以直接使用^[2]。齿圈结构被广泛应用于机械传动中, 如汽车、航空航天等。大尺寸渐开线齿形零件的齿形部分一般采用线切割或插齿法加工, 其加工获得的齿形零件存在质量、效率等方面的问题, 无法满足生产的需要, 因此, 研究大尺寸渐开线齿形零件的精冲工艺十分必要。杨泽亚等^[3]利用数值模拟研究大尺寸渐开线齿圈的精冲成形过程, 并结合实验验证了精冲加工大尺寸渐开线齿圈零件的可行性和优越性。目前, 关于渐开线齿形零件精冲的研究主要集中在小尺寸齿形件精冲质量方面, 如胡建华等^[4]基于冲裁间隙、压边圈尺寸、压边

收稿日期: 2022-06-30; 修订日期: 2022-08-14

作者简介: 李华建 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: 826070084@qq.com

通信作者: 赵彦启 (1962-), 男, 硕士, 硕士生导师, 研究员

E-mail: yanqi.zhao@cmfb.com.cn

力、反压力、凹模圆角半径等精冲主要工艺参数,利用数值模拟对齿形精冲的影响规律进行分析,得出了工艺参数和剪切面光亮带的关系;毛秀等^[5]对厚板齿形零件精冲过程进行数值模拟,探究了齿根齿顶处易撕裂的原因。

本文基于影响精冲件尺寸精度的关键工艺参数对具有渐开线花键孔结构的大型精冲件进行了数值模拟实验,利用模拟实验结果分析了工艺参数对花键孔尺寸精度的影响,并将优选出的工艺参数应用到实际的模具设计中,进而提升了大型精冲件花键孔的尺寸精度。

1 成形工艺分析

图 1 为某汽车变速箱上的一个零件,其厚度为 8 mm,长度为 427 mm,宽度为 296 mm,零件材料为 C45E 钢板,属于超大型精冲件^[6]。零件内部有 1 个渐开线花键孔,齿顶圆的直径为 $\Phi 185$ mm,齿根圆的直径为 $\Phi 194$ mm,模数为 3,齿数为 63,跨棒距为 181.91~182.26 mm。精冲加工该零件工艺步骤为:(1)精冲外形及两孔,即落料;(2)利用步骤 1 得到的两孔定位精冲花键孔;(3)利用花键孔定位精冲其余孔。本文主要研究对象为步骤 2,即零件的花键孔精冲。

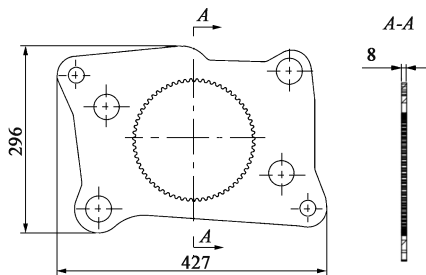


图 1 零件图

Fig. 1 Part drawing

2 数值模拟成形分析

对于零件花键孔精冲,利用 Deform-3D 软件对零件花键孔精冲成形工艺进行模拟仿真,为减少计算量、提高计算效率,选取模具与板料的 3 个齿进行数值模拟,在 SOLIDWORKS 软件中完成三维建模并导入 Deform-3D 前处理中,建立的有限元模型如图 2 所示。板料设置为塑性体,材料设置为 AISI-1045 钢,其余部分设置为刚体,网格数量设定为

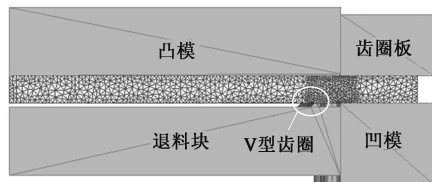


图 2 精冲有限元模型

Fig. 2 Finite element model of fine blanking

50000 个,并对剪切区的网格进一步局部细化,细化倍率为 0.01,成形温度为常温 20 ℃,摩擦因数为 0.12,建立各部分间的接触关系。选取 Normalized C & L 断裂准则进行模拟,其表达式如式 (1) 所示^[7]:

$$C = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

式中: C 为韧性断裂阈值,对于 AISI-1045 钢材料而言, $C=0.6232$ ^[8]; $\bar{\epsilon}_f$ 为材料断裂时的等效塑性应变; σ^* 为材料断裂时的最大拉应力; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; $d\bar{\epsilon}$ 为等效塑性应变增量。

该零件的花键孔精冲属于冲孔工艺,且该零件为超大型精冲件,故需要设置 V 型齿圈以减少材料的横向流动,提升精冲质量。为避免 V 型齿圈在成型后零件的表面产生压痕,故将 V 型齿圈设置在退料块上,齿圈板上未设置 V 型齿圈。数值模拟成形过程如图 3 所示,分两步进行:(1)凸模和齿圈板一起向下运动,将板料压向退料块和凹模,退料块上的 V 型齿圈压入板料,如图 3a 所示;(2)在压边力、反压力的作用下,凸模以一定速度向下运动完成该零件的花键孔精冲,如图 3b 所示。

花键孔精冲成形质量要求除了成形表面质量要求还有尺寸精度要求,该零件花键孔的成形尺寸精度主要反映在齿顶圆、齿根圆和跨棒距上。在数值模拟后处理中难以直接测量成形后的齿顶圆、齿根圆和跨棒距的准确值,而且受限于数值模拟精度,直接测量花键孔的尺寸数据的准确度也不理想。因此,为评估花键精冲成形模拟的尺寸精度,采用软件自带的点追踪分析模块,取齿顶和齿根上共 7 个点,如图 4 所示,统计记录各点从精冲开始至精冲完成全过程中的水平位移,其平均位移量的大小反映了花键孔精冲过程中材料水平方向的流动程度,即花键孔精冲的尺寸精度。

3 全面试验设计与分析

查阅精冲相关资料可知,对精冲成形尺寸精度

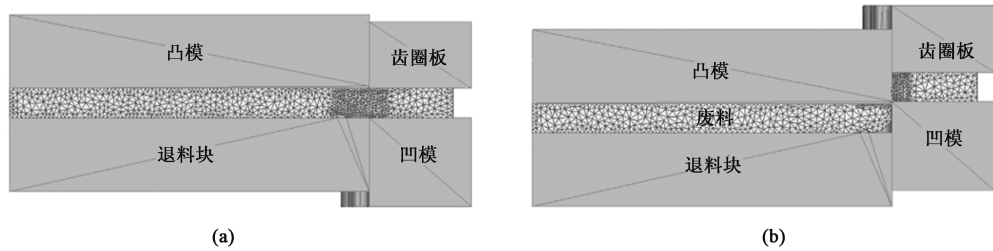


图 3 数值模拟精冲成形过程
(a) 第 1 步 (b) 第 2 步
Fig. 3 Forming process of fine blanking by numerical simulation
(a) The first step (b) The second step



图 4 轮廓上 7 个点位置
Fig. 4 Positions of seven points on outline

影响较大的因素分别为压边力、凸模圆角半径和凸凹模间隙，由于主要因素相对较少，故采用全面试验设计法进行数值模拟试验。结合全面试验设计与点追踪数据分析处理，优化花键孔精冲成形工艺参数，以达到提升花键孔精冲尺寸精度的目的，满足设计和生产要求。

3.1 全面试验设计

全面试验设计所获得的信息量较大，可以准确地反映试验因素的主效应的大小。在条件合适的情况下，采用全面试验设计优于正交试验设计，通过极差分析方法可以找出对花键孔精冲尺寸精度具有显著影响的工艺参数。

3.1.1 工艺参数分析

(1) 凸凹模间隙

凸凹模间隙的选取与板料厚度、凸模尺寸以及材料性质等有关。若凸凹模间隙选取不合理，精冲过程中刃口处材料的受力会更加复杂，除拉、压应力外，还有弯曲应力的存在，在这些应力的综合作用下，精冲成形产品的尺寸会发生变化，因此应合理地选取凸凹模间隙以提升花键孔精冲的尺寸精度^[9]。

(2) 凸模圆角半径

花键孔精冲属于冲孔工艺，因此需要在凸模上设置圆角^[1]。凸模圆角半径的存在改善了精冲过程中变形区静水压的分布，使精冲过程中变形区处在三向压应力状态，提高了板料的塑性。凸模圆角半径的选取与板料厚度及材料强度等有关。

(3) 压边力

压边力是影响精冲成形产品质量的关键因素之一^[10]。压边力的存在，使齿圈压板将板料紧紧压在精冲模具的凹模上，减小板料在剪切区的撕裂和横向流动。压边力的选取十分重要，压边力 P_R 的大小可以按以下经验公式 (2) 进行估算^[2]：

$$P_R = f_2 L_0 h R_m \tag{2}$$

式中： f_2 为系数，此处取 1.9； L_0 为工件外轮廓长度，mm； h 为 V 型齿齿高，mm； R_m 为材料的抗拉强度，MPa。

表 1 为全面试验因素水平表。

表 1 全面试验因素水平			
Table 1 Factors and levels of comprehensive experiment			
水平	凸凹模间隙 d/mm	凸模圆角半径 r/mm	压边力 P_R/kN
1	0.03	0.4	30
2	0.04	0.5	35
3	0.05	0.6	40

3.1.2 全面试验结果

通过不同的试验因素和试验水平组合得到相应的试验方案，各试验方案的工艺参数设置和结果 (点的平均位移量) 如表 2 所示。

表 3 为尺寸精度分析结果，其中 K_i ($i=1, 2, 3$) 为各因素在 i 水平下的平均位移量之和； k_i ($i=1, 2, 3$) 为各因素在 i 水平下的平均位移量的平均值；极差 R 为各因素下平均位移量的平均值中的最大值与最小值之差，极差值的大小表示各因素对尺寸精度影响的显著程度， R 值越大，影响程度越大。因此，由表 3 中的 R 值可知，各因素对花键孔精冲尺寸精度影响程度大小依次为：凸凹模间隙 $d>$ 凸模圆角半径 $r>$ 压边力 P_R 。根据表 2 全面试验结果，确定工艺参数优化后最佳组合为试验号

表 2 全面试验结果
Table 2 Comprehensive experiment results

试验号	因素			平均位移量/ mm
	凸凹模间隙 d/mm	凸模圆角 半径 r/mm	压边力 P_R/kN	
1	0.03	0.4	30	0.4255
2	0.03	0.4	35	0.5457
3	0.03	0.4	40	0.5567
4	0.03	0.5	30	0.4197
5	0.03	0.5	35	0.4509
6	0.03	0.5	40	0.3670
7	0.03	0.6	30	0.4025
8	0.03	0.6	35	0.3754
9	0.03	0.6	40	0.3818
10	0.04	0.4	30	0.3830
11	0.04	0.4	35	0.3592
12	0.04	0.4	40	0.3708
13	0.04	0.5	30	0.3836
14	0.04	0.5	35	0.4148
15	0.04	0.5	40	0.3981
16	0.04	0.6	30	0.4058
17	0.04	0.6	35	0.3754
18	0.04	0.6	40	0.3718
19	0.05	0.4	30	0.3911
20	0.05	0.4	35	0.3863
21	0.05	0.4	40	0.3621
22	0.05	0.5	30	0.3809
23	0.05	0.5	35	0.3863
24	0.05	0.5	40	0.3763
25	0.05	0.6	30	0.4251
26	0.05	0.6	35	0.3937
27	0.05	0.6	40	0.3906

表 3 尺寸精度分析结果 (mm)
Table 3 Analysis results of dimensional precision (mm)

指标因素	凸凹模间隙 d	凸模圆角半径 r	压边力 P_R
K_1	3.9252	3.7804	3.6173
K_2	3.4624	3.5777	3.6876
K_3	3.4925	3.5220	3.5752
k_1	0.4361	0.4200	0.4019
k_2	0.3847	0.3975	0.4097
k_3	0.3881	0.3913	0.3972
R	0.0514	0.0287	0.0125

11, 即凸凹模间隙为 0.04 mm、凸模圆角半径为 0.4 mm 和压边力为 35 kN。

3.2 工艺参数优化后凸模使用寿命估算

模具使用寿命是衡量模具质量的重要指标之一, 模具的使用寿命严重影响着工业生产的发展, 因为其不仅影响产品质量, 而且影响生产效率和成本。而在实际精冲生产中, 由于精冲凸模受到较大载荷, 因此凸模的使用寿命应格外重视。采用插值法通过有限元模拟对凸模进行应力分析, 可获得在精冲模拟过程中任一工步的凸模应力分布, 根据局部应力-应变法建立应力-应变寿命估算模型, 可近似估算凸模的使用寿命。

3.2.1 凸模应力分析

在试验号 11 的后处理中, 利用 Deform-3D 后处理导出凸模载荷-工步曲线, 如图 5 所示。由图 5 可知, 凸模所受最大载荷出现在第 50 工步。

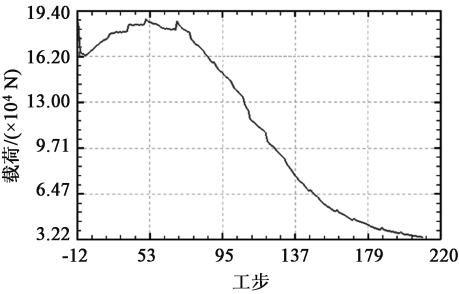


图 5 凸模载荷-工步曲线
Fig. 5 Load-step curve of punch

利用试验号 11 的模拟计算结果进行模具应力分析, 读取模拟完成后的数据文件, 将凸模设置为弹性体, 材料为 AISI-D2 钢, 划分网格并对凸模齿处进行局部细化, 通过插值法将板料上的成形力映射至凸模上从而模拟计算凸模应力。凸模等效应力云图如图 6 所示。

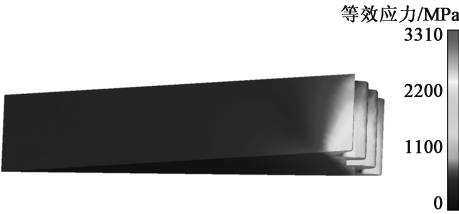


图 6 凸模等效应力云图
Fig. 6 Equivalent stress cloud map of punch

为了提高凸模使用寿命的计算精度, 在凸模最大等效应力选取时, 尽可能地选取分布范围相对较大的区域, 忽略因精冲模拟精度而产生的异常点,

减少因客观因素而产生较大的误差，因此试验号 11 的工艺参数组合下凸模在精冲过程中受到的最大等效应力为 1800 MPa。

3.2.2 凸模使用寿命估算

精冲模具中凸模材料一般为高强度淬火合金模具钢，硬度、强度大但韧性差，在精冲时承受较大的压力，当凸模内部出现裂纹时会迅速扩展，因此可将裂纹出现时的寿命作为凸模的使用寿命。精冲时凸模受力较为复杂，可取多轴应力下的等效应力值进行局部疲劳寿命估计^[11]。根据 Dowling 理论^[12]，当弹性应变范围 $\Delta\varepsilon_e >$ 塑性应变范围 $\Delta\varepsilon_p$ 时，弹性应变占主导，塑性应变可忽略，以弹性应变分量为损伤参量，弹性应变对精冲凸模疲劳寿命的影响很大，凸模预测寿命可按式（3）进行计算：

$$\frac{1}{N_e} = 2 \left[\frac{\Delta\varepsilon_e E}{2(\sigma_f - \sigma_m)} \right]^{1/b^*} \tag{3}$$

式中： N_e 为预测寿命； E 为弹性模量； $\Delta\varepsilon_e E = \Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ； $\Delta\sigma$ 为凸模最大应力 σ_{\max} 与最小应力 σ_{\min} 的差值； σ_f 为疲劳强度系数，MPa； σ_m 为平均应力，MPa；对于常用凸模材料， $\sigma_m = \Delta\sigma/2$ 且 $\sigma_f = \sigma_s$ ； σ_s 为材料的屈服极限； b^* 为板料疲劳强度指数，经计算 $b^* = 0.08$ ^[13]。

试验号 11 的工艺参数组合下的凸模预测寿命计算情况如表 4 所示。

表 4 试验号 11 的工艺参数组合下的凸模预测寿命
Table 4 Predict life of punch under process parameter combination for experiment No. 11

参数	$\sigma_f /$ MPa	$\sigma_{\max} /$ MPa	$\sigma_{\min} /$ MPa	$\Delta\sigma /$ MPa	$\sigma_m /$ MPa	预测寿命 $N_e /$ 次
数值	2775	1800	0	1800	900	4825

由表 2 全面试验结果可知，在试验号 11 的工艺参数组合下，板料水平方向的位移量最小，能获得更高的尺寸精度，且由表 4 试验号 11 的工艺参数组合下的凸模预测寿命计算分析，凸模预测寿命为 4825 次，符合期望寿命。

3.3 花键孔精冲工艺验证

基于模拟分析，将工艺参数换算为完整结构，选取凸凹模间隙为 0.04 mm、凸模圆角半径为 0.4 mm 和压边力为 724 kN 进行零件花键孔精冲，实际精冲成形结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出，实际产品的精冲成形结果较好，齿部未出现撕裂、翘曲等明显缺陷。

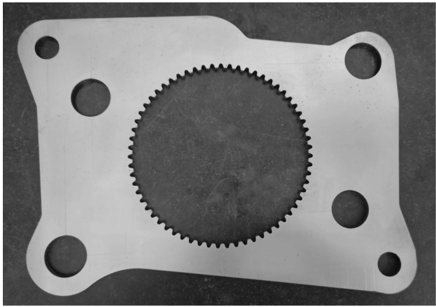


图 7 实际精冲成形结果
Fig. 7 Result of actual fine blanking

经大批量生产测试，零件的花键孔尺寸符合技术要求且公差带较工艺参数优化前小，凸模实际修模和预测修模频率如图 8 所示，凸模预测寿命基本符合实际使用寿命。

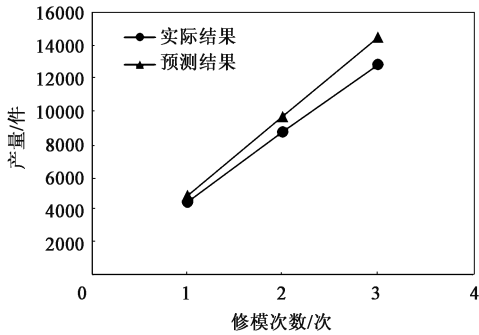


图 8 凸模修模频率图
Fig. 8 Mold-repair frequency diagram of punch

4 结论

- (1) 基于 Deform-3D 软件，依据精冲工艺，构建了渐开线零件花键孔的精冲仿真模型，为提高结果的准确性，用点的位移量来代替花键孔的直接尺寸测量，间接反映花键孔精冲成形的尺寸精度。
 - (2) 采用全面试验设计法研究了凸凹模间隙、凸模圆角半径和压边力 3 个工艺参数对花键孔精冲尺寸精度的影响，获得的优化工艺参数组合为：凸凹模间隙为 0.04 mm、凸模圆角半径为 0.4 mm 和压边力为 724 kN，并得出工艺参数对花键精冲尺寸精度的影响顺序为：凸凹模间隙>凸模圆角半径>压边力。优化参数后采用插值法模拟得出凸模最大等效应力，并依据预测寿命模型计算得到凸模预测寿命为 4825 次，符合设计和生产期望。
 - (3) 选取最优的工艺参数组合，对零件进行实际的花键孔精冲试验，精冲后花键孔齿顶圆、齿根
- (下转第 117 页)