

杯形薄壁矩形内齿旋压成形数值模拟与试验*

夏琴香¹ 杨明辉¹ 胡 昱¹ 程秀全²

(1. 华南理工大学机械工程学院 广州 510640;

2. 广州民航职业技术学院机务工程系 广州 510403)

摘要: 为研究主要工艺参数对齿轮成形状况的影响规律,并为参数优化和工艺设计提供依据,基于 MSC.MARC 有限元分析软件,对杯形薄壁矩形内齿旋压成形工艺过程和工艺特点进行分析,从而获得旋压成形时变形金属沿轴向、径向和切向的流动规律。结合工艺试验,定量地研究了主要工艺参数对齿高成形的影响规律,并对试验中出现的各种典型缺陷进行分析,提出有效的预防和改进方法。提出将包括轮齿的切向和轴向尺寸均匀程度等作为旋压成形内齿零件的主要质量评价指标。模拟和工艺试验结果表明,矩形内齿旋压成形时,压下量在一定范围内对齿高的成形影响显著,进给比对齿高成形影响不大。当工艺参数选择不当时,可能出现表面隆起或破裂、轮齿周向错移、周向高度不均和齿槽撕裂等缺陷。

关键词: 旋压 内齿轮 数值模拟 工艺参数

中图分类号: TG305

0 前言

汽车行业前沿技术的日新月异和齿轮制造业的迅速发展,对齿轮制造提出了更高的要求,与现代旋压技术相结合的车用零部件中的内筋旋压、内啮合齿轮旋压技术正在成为一个新兴的研究课题^[1-5]。在国外,齿轮旋压技术只是一些先进机床公司或齿轮制造厂家作为技术创新直接进行生产应用,例如,德国的 WF Maschinenbau und Blechformtechnik 公司所生产的 VSTR 400/3 型强力旋压成形机床,可以加工外径为 50 mm~400 mm 的内齿轮零件^[1],但由于追求巨额利润的缘故,很少见到相关专利和研究成果的报道。文献[2]从综述的角度介绍了用旋压成形工艺方法来生产带内齿零件如汽车离合器壳体、行星齿轮内齿等,可以节省材料,提高精度、强度、硬度,提高生产效率,降低生产成本。文献[3]依据有限元理论,采用 ANSYS 软件对旋压过程进行了数值模拟试验,初步得出了不同减薄率下旋压变形区应力、应变分布规律。文献[4]通过选取不同的壁厚减薄率和旋轮进给比作为工艺参数,利用双旋轮强力旋压机对带内筋筒形件进行了旋压加工试验,根据试验结果分析了各种生产缺陷产生的原因。文献[5]采用滚珠反向旋压法对带有纵向内筋的薄壁筒形件强力旋压成形工艺进行了初步试验研究,分析了主要缺陷产生的原因,通过合理调整各工艺参数,旋成了内筋质量合格的试件。上述理论及试验研究均是针

对带内筋筒形件的强力旋压成形工艺进行的。

由于杯形薄壁内齿零件带底且齿的数量较多,其旋压成形时金属流动规律以及成形机理相比带内筋筒形件而言更为复杂,故此本文通过采用有限元数值模拟及试验研究相结合的方法,对杯形薄壁矩形内齿旋压成形工艺过程和工艺特点进行了理论分析和试验研究,以建立用于指导生产实践的相关理论及工艺参数。

1 成形工艺与有限元数值模拟

杯形薄壁矩形内齿旋压成形工艺与带芯模强力旋压非常相似,杯形毛坯套在带有矩形外齿廓的芯模上,呈 120° 均匀分布的三个旋轮沿径向进给一定的压下量 Δ ,并沿着平行于机床主轴的方向作纵向运动。材料在旋轮和芯模的挤压作用下,内壁形成矩形齿。

有限元模型及试验材料为退火后的铝合金 6061,其性能参数通过单向拉伸试验获得,如表 1 所示。6061 铝合金为 Cu-Mg-Si-Mn 系铝基合金,其质量分数为: $w_{Cu}=0.15\% \sim 0.40\%$, $w_{Mg}=0.45\% \sim 0.90\%$, $w_{Si}=0.4\% \sim 0.8\%$, $w_{Mn}=0.15\%$ 。应用大型非线性三维有限元模拟软件 MSC.MARC 建立杯形薄壁矩形内齿旋压变形的力学模型。为了提高运算效率和简化模型,只取杯形工件的 1/6 圆周建立模型(总齿数为 18,模型中工件简化为 3 个齿),设置循环对称法进行运算,工件模型共有三维八节点六面体单元 5 400 个,节点数为 7 293 个。旋轮和芯模都简化为刚体,旋轮在轴线方向上由毛坯底部向口部

* 国家自然科学基金(50475097)和广东省自然科学基金重点(04105943)资助项目。20060328 收到初稿,20060718 收到修改稿

进给, 杯形薄壁矩形内齿旋压变形的有限元模型如图1所示。

表1 退火后的铝合金6061材料性能参数

弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	屈服点 σ_s/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	硬化系数 N
67.308 47	0.326	51.59	146.123	0.26

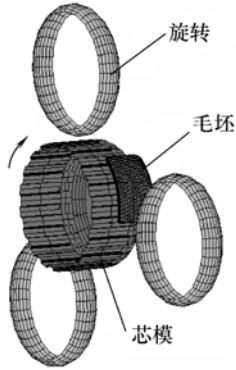
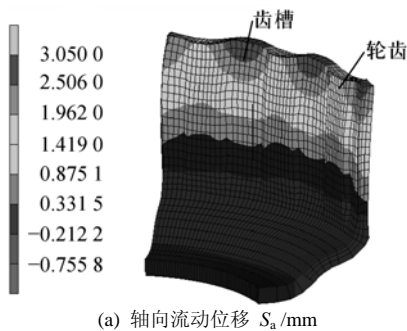


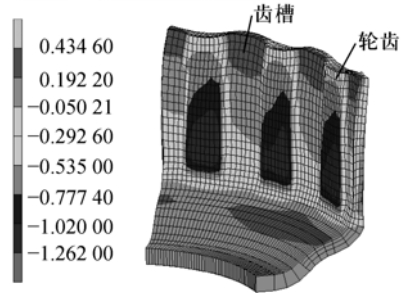
图1 杯形薄壁矩形内齿旋压变形的有限元模型示意图

为防止材料的加工硬化, 提高生产效率, 当毛坯壁厚较小时, 数值模拟和工艺试验尽可能使用单道次旋压^[5]。当设定压下量 $\Delta=1\text{ mm}$, 进给比 $f=1.5\text{ mm/r}$, 芯模转速 $n=600\text{ r/min}$, 旋轮圆角半径 $R_\rho=30\text{ mm}$, 旋轮直径 $D_r=200\text{ mm}$ 时, 数值模拟得到的材料沿轴向、径向和切向流动位移变化云图如图2所示。

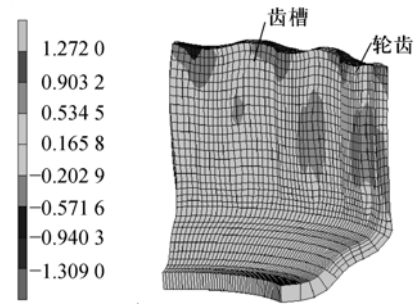
从图2可以明显看出, 金属材料流动规律为: 材料在轴向由杯底至杯口流动, 齿槽部分由于径向约束较大比轮齿部分轴向流动更为显著, 最终导致齿槽及轮齿的变形程度不相同, 杯口形成高低不平的波浪状, 如图2a所示。径向流动状况比较复杂, 尤其是工件内壁, 大致来看, 轮齿部分材料受挤压向内流动陷入芯模凹槽(径向位移为负值), 齿槽部分材料向内流动不多; 但随着杯底至杯口的轴向约束逐渐变小, 材料径向向内流动幅度也逐渐变小, 甚至杯口位置材料内壁有扩径现象; 同时先接触旋轮的轮齿部分径向流动最大, 形成齿形周向高度不均的现象, 如图2b所示。在切向, 由于旋轮直接接触工件外壁, 材料周向流动幅度由外壁向内逐渐减小, 先接触到旋轮的轮齿部分切向约束最小, 流动最为显著, 如图2c所示。



(a) 轴向流动位移 S_z/mm



(b) 径向流动位移 S_r/mm



(c) 切向流动位移 S_t/mm

图2 材料沿轴向、径向和切向流动位移变化云图

2 试验条件

工艺试验在型号为 HGPX-WSM 的多功能卧式数控旋压机(图3)上进行。本旋压机能够进行多种锥形件和筒形件普旋、非轴对称异形件普旋、薄壁内齿轮旋压以及复合型零件旋压, 具有功能强大、性能可靠、重载且柔性化等特点^[6]。试验用管坯外径为81 mm, 厚度为2.5 mm, 长度分别为15 mm、20 mm、25 mm、30 mm、35 mm、40 mm。首先通过普通旋压工艺由管坯制成如图4所示的杯形带底旋压毛坯, 为齿轮旋压做准备。



图3 HGPX-WSM 型多功能卧式数控旋压机



图4 杯形带底旋压毛坯

3 试验结果及分析

为验证数值模拟得到的杯形薄壁矩形内齿旋压

成形的金属流动规律, 分析不同厚度减薄率和不同进给比对齿高成形的影响, 按照如表 2 所列工艺参数组合进行单道次旋压成形工艺试验。

试验中的减薄率为^[7]

$$\varepsilon = 1 - \frac{\delta_f}{\delta_0} \quad (1)$$

表 2 试验所采用的成形工艺参数

工艺参数	数值					
压下量 Δ/mm	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
减薄率 $\varepsilon/\%$	20	30	40	50	60	70
进给比 $f/(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5					

由于 $\delta_f = \delta_0 + \delta_s - \Delta$, 且 $\delta_0 = 2.5$, $\delta_s = 0.25$, 则

$$\varepsilon = \frac{4\Delta - 1}{10} \quad (2)$$

式中 δ_f ——最终厚度

δ_0 ——初始厚度

δ_s ——旋压前芯模与工件之间的间隙

3.1 试验结果的分析及测量方法

作为一种特殊的塑性制齿方法, 目前还没有完备的精度和质量评价标准。这里使用定性和定量两种途径分析杯形薄壁矩形内齿旋压工艺的试验结果。其中定性分析主要通过数值模拟和工艺试验结果的观察比较, 定量分析建立在选用适当的测量工具对齿形进行测量的基础上。本试验使用型号为 JGX-2 的大型工具显微镜测量试验样件, 并通过数据比较分析产品几何尺寸及工艺参数对齿高成形的影响。

对每组零件的齿廓形状分别进行测量时, 由于不同的高度断面上齿形尺寸具有一定的差别, 所以从杯底至杯口每隔 5 mm 取一断面, 并通过比较选合适的断面评定其成形质量。图 5 所示为 30 mm 高度的杯形坯料在进给比为 2 mm/r, 压下量分别为 1.25 mm、1.50 mm、1.75 mm 时内齿零件的平均齿高随轴向高度变化的曲线。很明显, 从杯底至杯口的 25 mm 高度范围内, 形成的齿高基本不变, 但是 25 mm 高度以上, 齿高逐渐减小。因此对 30 mm 高度的杯形坯料形成的杯形薄壁内齿合齿轮零件, 取 25 mm 高度断面为参考平面评定齿轮轮廓成形质量。

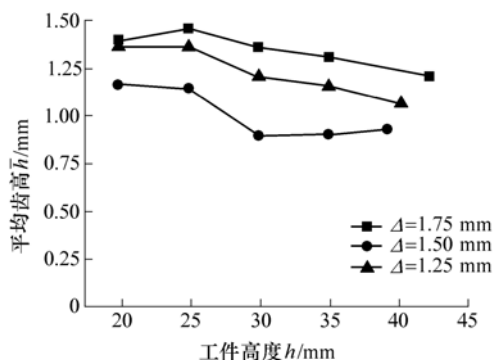


图 5 平均齿高随轴向高度变化的曲线

3.2 成形结果分析与工件质量评价

图 6、7 显示了按照前述试验参数获得的典型工艺试验结果。可以看出, 工艺试验所得到的杯形薄壁矩形内齿旋压件在外观上与图 2 所示数值模拟结果具有基本一致的特点。



图 6 杯形薄壁矩形内齿工件的口部波浪形状

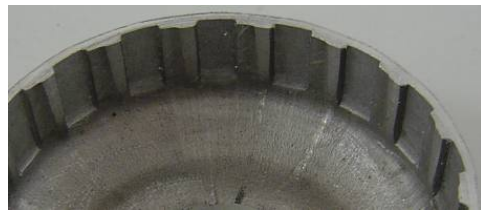


图 7 杯形薄壁矩形内齿工件的不平齿顶形貌

(1) 金属材料在齿槽部分及轮齿部分的轴向流动程度不同, 杯形薄壁矩形内齿工件的口部形成高低不平的波浪状(图 6)。这是由于齿槽部分材料受芯模齿顶的约束较大, 径向流动困难, 所以轴向流动较多; 而轮齿部分恰好与之相反, 从而形成了波浪式的口部形状。

(2) 当压下量较小时, 每个轮齿形成明显的周向高度不均的现象(图 7)。先接触旋轮的一侧已经填充饱满, 另一侧未完全填充, 形成不平的齿顶。这是因为按图 8 所示的芯模旋转方向(与图 7 一致), 在旋轮与芯模齿顶之间挤压力的作用下, 材料沿切向流动, 实际上增加了区域 A 的工件壁厚。当芯模继续旋转时, 旋轮脱离芯模齿顶, 旋转到 A 区。上述挤压作用减小, 所以区域 B 的壁厚增加效果也减小。而区域 C 的材料又不可能反向流动至区域 B, 因此在压下量偏小的情况下, 最终导致区域 B 不能使轮齿成形饱满, 形成不平的齿顶(如图 8 右边已成形的轮齿所示)。要得到填充完整的轮齿, 就必须适当增加变形的压下量。

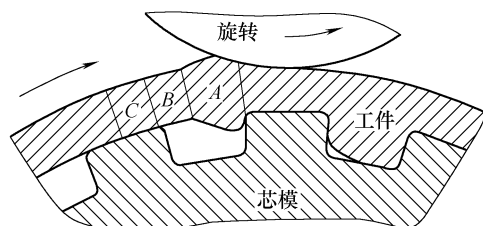


图 8 不平齿顶的形成过程示意图

(3) 每个轮齿的齿高由杯底至杯口逐渐减小。这是因为越接近杯口,材料轴向流动约束力越小,轴向流动量增加导致径向流动量减小。

旋压成形内齿零件的最主要质量评价参数正是轮齿的成形质量,包括轮齿的切向和轴向尺寸均匀程度等重要指标。上述结果不仅反应了轮齿成形过程的内在规律,也从试验的角度证明了文中所建立的有限元模型是可靠的。合理的有限元数值模拟能够直观、真实地反映具体的工艺过程和工艺结果,能够从理论上对生产实践进行指导,并对成形零件质量评测、预防缺陷和工艺优化具有十分重要的作用。

3.3 主要工艺参数对齿高成形的影响

影响杯形薄壁内齿轮旋压成形的工艺参数有压下量、进给比、旋轮半径和旋轮圆角半径等,以下分析压下量和进给比对齿高成形的影响。

图9为高度30 mm的杯形坯料在进给比为2 mm/r时,压下量与齿高成形的关系曲线图。由图9可见,随着压下量的增加,工件的减薄率增加,金属径向流动趋势增大,材料更加充分地填充芯模凹槽而形成齿高^[4]。但由于旋轮对工件施压时金属同时发生轴向、径向和切向三向流动,压下量对齿高的影响并不呈线性变化,当压下量小于1.5 mm时,即减薄率小于50%时,曲线陡峭,说明这个范围内压下量对齿高的影响十分明显;当压下量大于1.5 mm时,曲线平缓,说明这个范围内压下量对齿高影响不大。

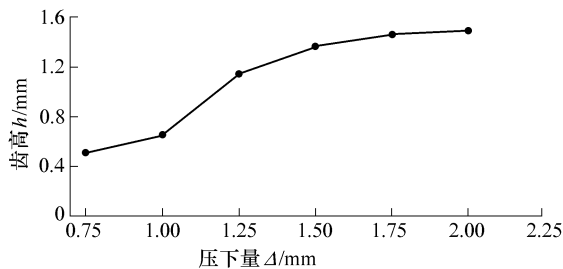


图9 高度为30 mm的杯形坯料在进给比为2 mm/r时,压下量与齿高成形的关系曲线

图10为高度30 mm的杯形坯料在压下量为1.75 mm时,进给比与齿高成形的关系曲线图。由图10可见,进给比对齿高的影响不大。这是因为旋轮的圆角半径较大,进给比的变化对旋轮痕迹重叠程序的影响不大。但是进给比的变化直接影响到加工效率、金属流动的均匀性和零件表面质量,因此进给比的选择应在保证齿轮旋压各变形区应变分布较均匀、工件表面质量较好的基础上选择最大值^[7]。

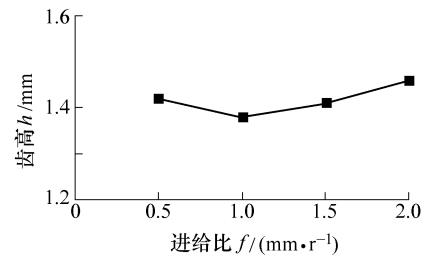


图10 进给比与齿高成形的关系曲线

3.4 试样缺陷分析

如图11所示,当毛坯高度过短或毛坯底部未贴紧芯模时,引起表面隆起或破裂的现象。当旋轮施压于靠近杯底时,材料受径向压力较大,过短或与芯模底部贴合不紧的毛坯口部受到较大张力,产生扩径现象并与芯模分离。当旋轮向工件口部逐渐进给时,杯底的材料受到较大张力鼓起甚至拉裂,并加剧整个杯身材料向下流动,导致整个工件脱落。



图11 零件表面隆起或破裂

当旋压前毛坯内表面添加润滑剂时,旋轮旋转过程中,材料切向流动较多,并在旋轮转动方向产生明显的扭转,出现如图12所示的内齿周向错移的不规则斜纹缺陷。因此旋压成形时工件内部不应该使用润滑剂。

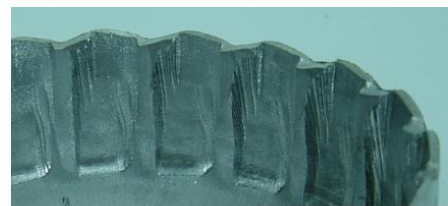


图12 内齿周向错移

当单道次压下量较小而不能使芯模凹槽填充饱满的时候,三个旋轮的单方向转动导致金属径向和切向流动不均匀,出现如图7所示的每个轮齿周向高度不均的现象。正如数值模拟结果,先接触旋轮的轮齿部分径向流动最大,齿高最高。

3.5 样件的试制

综合上述分析和试验结果,选择杯形坯料高度为30 mm,工艺参数为:压下量 $\Delta=1.75$ mm、减薄率 $\varepsilon=60\%$,进给比 $f=1.5$ mm/r,得到了成形较好的内齿样件,如图14所示。由图14可见,轮齿填充饱满,齿廓形状规则、均匀,内啮合齿轮内表面光滑、平整、质量良好。



图 13 工件在齿槽处被撕裂

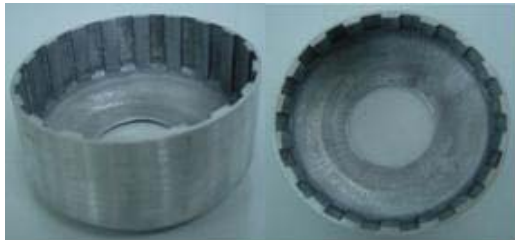


图 14 轮齿填充饱满的齿轮轮廓

4 结论

利用有限元软件 Marc 对杯形薄壁矩形内齿旋压工艺进行数值模拟, 并进行了成形工艺试验验证。成形过程中, 金属材料受旋轮和芯模的挤压分别在轴向、径向和切向有规律地流动, 压下量在一定范围内对齿高的成形影响显著, 进给比对齿高成形影响不大。由于工艺参数选择不当, 旋压加工中可能出现表面隆起或破裂、轮齿周向错移、周向高度不均和齿槽撕裂等缺陷, 因此应该通过调整工艺参数来改进工艺。本研究为杯形薄壁内啮合矩形齿轮旋压工艺的实际生产提供了良好的工艺指导。

参 考 文 献

- [1] Maschinenbau und Blechformtechnik GmbH & Co. KG. Innovation in Chipless Forming Technology[R]. Germany: Maschinenbau und Blechformtechnik GmbH & Co. KG. 2002.
- [2] 李继贞, 祝昕. 带内齿工件的旋压成形. 锻压技术[J]. 1997(2): 36-37.
- [3] 马世成, 唐志红, 王东坡. 带纵向加强筋零件旋压成形数值模拟分析[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(增刊): 172-174.
- [4] 张利鹏, 刘智冲, 周宏宇. 带内筋筒形件强力旋压成形试验研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2005(4): 86-88.
- [5] 薛克敏, 江树勇, 康达昌. 带纵向内筋薄壁筒形件强旋成形[J]. 材料科学与工艺, 2002, 10(3): 287-290.
- [6] 夏琴香. 三维非轴对称零件旋压成形工艺及设备[J]. 新技术新工艺, 2003, (12): 33-35.

- [7] 王成和, 刘克璋. 旋压技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [8] 卫原平, 王轶为. 工艺参数对筒形件强力旋压过程的影响[J]. 模具技术, 2000, 10(4): 12-16.

NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTATION CUP-SHAPED THIN-WALLED INNER RECTANGULAR GEAR FORMED BY SPINNING

XIA Qinxiang¹ YANG Minghui¹

HU Yu¹ CHENG Xiuquan²

(1. College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640;

2. Department of Airplane Maintenance Engineering, Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou 510403)

Abstract: In order to investigate the effects of the main processing parameters on the forming situation of the tooth depth, and provide foundation of the corresponding parameter optimization and process design, the forming process and the process characteristics of the cup-shaped thin-walled inner rectangular gear formed by spinning are analyzed based on the MSC.MARC finite element analysis (FEA) software. Combining with the processing experiment, the deformation mechanism of the deformed metal flow along the axial, radial and tangential directions are obtained; the effects of the processing parameters on the forming situation of the tooth depth are studied quantitatively; the typical defects occurred during spinning are analyzed and the effective prevention methods are put forward. The main indexes to evaluate quality of the inner gear formed by spinning are presented, including the rear tooth dimension uniformity in the tangent and axial directions. Both the simulation and experiment results show that: During the spinning of the cup-shaped thin-walled inner rectangular gear, the effect of the blank radius reduction on the tooth depth is significant; The effect of the roller feed rate is slight. When adopting unreasonable processing parameters, the forming defects, such as the piling, fracture, stagger and uneven depth of the gear teeth along the circumferential direction, tearing of the gullet, may occur.

Key words: Spinning Inner gear Numerical simulation Processing parameter

作者简介: 夏琴香, 女, 1964 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为塑性成形与模具计算机技术。

E-mail: meqxia@scut.edu.cn