

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.042

压下量对梯形内齿轮旋压成形质量的影响*

孙凌燕¹ 夏琴香¹ 叶邦彦¹ 程秀全²

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510640; 2. 广东民航职业技术学院机务系, 广州 510403)

【摘要】 旋压成形技术是杯形薄壁内齿轮加工的新方法,其中压下量对内齿轮成形质量的影响最大。采用有限元数值模拟和试验相结合的方式,以相对齿高和齿顶不均匀度为质量评价参数,研究了压下量对梯形内齿轮旋压成形质量的影响。结果表明,对于一定齿高轮齿的成形,对应一定壁厚毛坯,存在着一个最佳压下量,采用该压下量成形,轮齿充填质量最好;小于该值时,充填材料不够;大于该值时,材料整体变形量过大将导致成形缺陷。

关键词: 梯形内齿轮 旋压 压下量 成形质量 数值模拟

中图分类号: TG386.43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0206-05

Effect of Reduction on Quality of Trapezoidal Inner Gear Formed by Spinning

Sun Lingyan¹ Xia Qinxiang¹ Ye Bangyan¹ Cheng Xiuquan²

(1. School of Mechanical and Automobile Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

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

Abstract

Inner gear spinning technology with three rollers was analyzed. According to the material flowing characteristics during spin-forming, two forming quality evaluation factors were put forward and then filling status of gear tooth under different reductions was analyzed. The results indicated that there was an optimum reduction for blank with certain thickness during inner gear spinning. When the reduction was below, the filling status in gear tooth was unsatisfied due to lack of filling material; when the radial reduction was above, the increasing forming force induced by higher reduction would likely decrease the service life of forming tool, and excess relative reduction would result in the status of underfills in the gear tooth.

Key words Trapezoidal inner gear, Metal spinning, Reduction, Forming quality, Computer simulation

引言

杯形薄壁内齿轮一般采用切削制齿技术与焊接工艺结合的方法进行生产。随着精密塑性成形技术的发展,旋压技术逐渐成为齿轮制造领域新的加工手段^[1]。与传统方法相比,采用旋压技术成形出的杯形薄壁内啮合齿轮金属流线分布合理,且具有承载能力高、可靠性强和使用寿命长的特点。对内筋零件旋压技术的研究主要围绕变形机理和成形缺

陷^[2-3]以及工艺参数对内筋成形的影响^[4]展开;对内齿轮旋压成形技术的研究,也是围绕成形过程的材料流动^[5]和工艺参数对内齿轮成形的影响^[6]等内容进行。研究表明:在压下量、进给比和旋轮圆角半径等工艺参数中,压下量对内齿轮轮齿成形的影响最大,其它工艺参数对齿高的影响相对较小^[4-6]。

内啮合齿轮旋压属于体积成形,成形的目的不是整体的减薄,而是局部增厚^[6],故轮齿部分的充填才是内齿轮成形的关键。为成形出饱满的轮齿,

收稿日期:2009-07-24 修回日期:2009-08-31

* 国家自然科学基金资助项目(50475097)、广东省自然科学基金面上重点资助项目(04105943)和广东省科技计划资助项目(2006B11901001)

作者简介:孙凌燕,博士生,主要从事模具计算机与塑性加工技术研究,E-mail:linnsun@163.com

通讯作者:夏琴香,教授,博士生导师,主要从事模具计算机与塑性加工技术研究,E-mail:meqxxia@scut.edu.cn

必须保证足够的坯料体积,以防止部分区域由于材料不足而出现充填不满的问题。本文以保证内齿轮成形质量为目标,从内齿轮旋压成形金属流动的特点入手,在合理选择成形质量评价指标基础上,对影响内齿轮成形质量的主要工艺参数——压下量进行定量分析,为生产实践提供切实可行的依据。

1 研究方法

选择有限元分析对成形过程压下量的变化进行分析,并运用工艺试验进行验证。

1.1 成形工艺

在内齿轮的旋压成形过程中,毛坯的底部由尾顶固定,以保证毛坯随芯模同步旋转,三旋轮在沿径向进给一定的压下量 Δ 后,沿主轴轴线方向作纵向直线进给,在旋轮与芯模的共同作用下,毛坯内侧成形出轮齿,成形装置如图 1a 所示。

1.2 有限元模型

内齿轮旋压成形属大变形问题,故所构建有限元模型(图 1b)采用八节点六面体单元来离散毛坯,将其它工装视为刚体;旋轮与毛坯之间的接触采用剪切摩擦模型,摩擦因数为 0.1。由于杯形薄壁内齿轮属于中心对称回转体零件,为减少模拟的运算量,提高分析效率,在建立模型的时候利用循环对称技术,仅取毛坯的 1/6 圆周进行模拟分析。

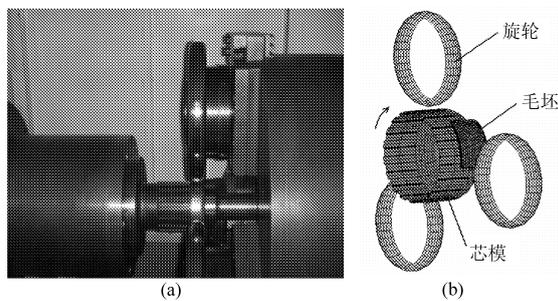


图 1 内齿轮成形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of inner gear spinning

(a) 内齿轮成形装置 (b) 有限元模型

1.3 工艺参数

试验用材料为 Q235,通过拉伸试验(GB/T 228—2002)获得的真实应力-应变曲线为 $\sigma = 764.6\epsilon^{0.215}$ 。毛坯、旋轮及工艺参数如下:芯模外径为 76 mm,芯模齿高 2 mm;旋轮直径为 200 mm;主轴转速为 200 r/min,进给比为 1 mm/r。成形中存在的加工硬化将导致前一道次的成形齿高对后一道次的轮齿成形产生阻碍,因此在数值模拟和工艺试验中均采用单道次成形。

2 成形质量评价

杯形薄壁内齿轮成形过程中,金属在旋轮和芯

模的相互挤压作用下逐渐嵌入芯模凹槽,在杯形毛坯内壁上单面成形出复杂的齿形,毛坯一部分金属(轮齿部分)增厚、另一部分金属(齿槽部分)减薄,这使得材料的流动更为复杂。为此,对成形过程中材料的变形情况进行分析,以便选择合理的质量评价指标。

2.1 内齿轮材料流动分析

2.1.1 应力应变分析

在成形过程中,旋轮与工件接触区的材料均处于三向受压的应力状态,但轮齿与齿槽处的应变状态并不相同,其应力-应变状况如图 2 所示。图中 σ_r 、 σ_t 和 σ_a 分别表示毛坯所受的径向、切向和轴向应力; ϵ_r 、 ϵ_t 和 ϵ_a 分别表示毛坯所承受的径向、切向和轴向应变。齿槽处材料径向压缩,导致该处材料在轴向和切向伸长;轮齿处材料径向伸长,导致该处材料在轴向的伸长和切向的压缩。

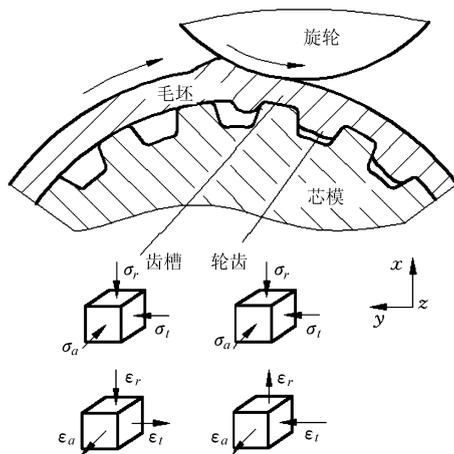


图 2 旋轮与工件接触区应力应变简图

Fig. 2 Schematic diagram of stress and strain in contact area between rollers and workpiece

比较齿槽与轮齿处的变形可以发现,二者在轴向的变形趋于一致,均为伸长变形;而在切向,齿槽处为伸长变形,轮齿处则产生压缩变形,材料在切向表现出的局部伸长与局部压缩正是轮齿得以形成的关键。

2.1.2 轮齿成形特点分析

图 3 为成形完成时材料径向位移的等高线云图。由图中可以看出,齿槽处材料变形均匀,而轮齿处材料的流动并不均匀,从工件的底部到口部,轮齿的充填高度沿轴线方向逐步下降;而在切向,轮齿的充填高度表现为轮齿中间要比两侧高。

旋压属局部循环加载成形^[7],成形时接触区材料主动变形;而接触区周围材料在被动变形的同时,对接触区材料变形产生约束;成形时旋轮以螺旋运动方式对工件连续加载,因此材料充填芯模凹槽从接触区开始,逐步随旋轮轨迹向前扩展;接触区内材

料在轴向和切向所受的约束情况也随之变化,这将直接影响材料在径向的充填状况。

由于杯形薄壁内齿轮采用正旋方式成形,成形时旋轮从杯底向口部进给,故此材料充填入芯模凹槽从杯底开始,随旋轮进给逐步向口部延伸,口部的轮齿最后充满。底部附近的轮齿成形时,未变形区域材料对变形区材料的约束作用导致轮齿处材料的轴向变形减小,因而轮齿处的径向变形增大,轮齿处材料的充填更充分;而到了口部附近,未变形材料的减少使得材料轴向流动更容易,故轴向应变增大,径向应变减小,轮齿充填高度下降。

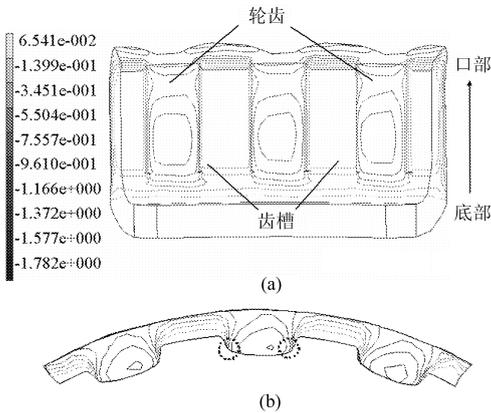


图3 径向位移等高线云图

Fig. 3 Contour diagram of radial displacement

(a) 整体 (b) 横截面

导致轮齿充填高度在切向发生变化的原因是齿廓外侧材料与芯模凹槽侧壁接触而存在的接触摩擦阻力,而轮齿中部材料不与芯模凹槽接触,这使得外侧材料的流动滞后于轮齿中部,最终导致轮齿中部的充填高度要大于齿廓外侧,轮齿呈凸起状。正因为如此,轮齿中部也要比两侧先接触芯模凹槽的底部,芯模凹槽的角隅是最后充填的部位(如图3b圆圈处所示)。

2.2 评价参数

基于上述结论,在分析内齿轮成形质量时,将成形齿高状况作为主要考察对象,采用相对齿高 λ ^[8]来评价轮齿处材料的充填高度,以表征成形过程中轮齿部分金属径向流动的状况。为了表征轮齿部分材料切向流动的状况,引入齿顶不均匀度 ξ 来评价轮齿充填质量,即

$$\xi = (h_{\max} - h_{\min}) / h_0 \times 100\%$$

式中 h_0 ——成形的目标齿高

h_{\max} ——轮齿部分的最大成形齿高

h_{\min} ——轮齿部分的最小成形齿高

模拟和分析所用评价指标的测量方法与文献[5]相同。

3 结果分析

3.1 压下量对轮齿成形的影响

为了探索压下量与轮齿成形质量间的关系,对壁厚为4.5 mm的毛坯,就压下量对内齿轮成形的影响进行有限元模拟,结果如表1所示。

表1 压下量对轮齿充填的影响

Tab.1 Influence of reduction on filling status of gear tooth

压下量 Δ/mm	1.1	1.5	1.9	2.3
相对齿高 $\lambda/\%$	69.45	86.27	94.76	99.87
齿顶不均匀度 $\xi/\%$	11.21	15.72	6.48	1.13

3.1.1 对轮齿充填高度的影响

在内齿轮成形过程中,毛坯材料被重新分配,具体表现为横截面面积逐渐减小而毛坯的轴向高度逐渐增加。压下量是主导轮齿充填高度的最重要因素;随压下量的增加,材料的变形抗力增大;相应地,材料所承受的变形力也跟着有所增加。随着压下量的增加,材料径向流动趋势增大,对芯模凹槽的充填更加充分。

当压下量较小时,横截面面积变化也较小,这意味着参与变形金属量较少,在轮齿处分配到轴向和切向均较少,由于没有足够的金属充填芯模凹槽,因此成形轮齿的相对齿高较小。随着压下量的增大,不仅参与变形的金属量有所增加,旋压力也随之增大,在有利于轮齿充填的径向力作用下,成形齿高有所增加。因此当压下量由1.1 mm增加至2.3 mm时,变形材料的增加导致轮齿增高明显,故成形轮齿的高度呈上升趋势。

3.1.2 对轮齿充填均匀性的影响

压下量的增加不仅会影响材料在轴向和径向的填充,还会影响材料在切向的流动。随着压下量的增加,齿顶不均匀度逐渐减小。

轮齿充填不均匀与旋轮的局部连续加载有关^[5];压下量的增加,一方面导致参与变形的材料数量增多,使变形的不均匀性增大,导致轮齿切向充填不均匀程度有所增加;另一方面使得旋轮与材料在切向与轴向的接触长度比呈现出下降趋势^[9],当压下量为1.1、1.5、1.9、2.3 mm时,切向与轴向接触长度比分别为4.38、3.74、3.26和2.89。切向与轴向接触比的减小,导致材料的切向流动得以增强,轮齿的径向充填趋于均匀,故齿顶不均匀度减小。在压下量增加的初期(从1.1到1.9 mm),参与变形金属的增长占优势,因此齿顶不均匀度增加;随着压下量的进一步增加,轮齿部分金属径向充填均匀占优势,因此齿顶不均匀度下降。

3.1.3 对轮齿充填的影响

数值模拟结果表明,压下量为 2.3 mm 时,可以获得满意的成形质量,因此在工艺试验中采用 2.3 mm 作为压下量,获得的内齿轮工件如图 4a 所示。由图可知,所成形轮齿不仅轮齿径向充填充分,齿形饱满,且齿顶圆角充满,无塌角缺陷。工艺试验结果与数值模拟结果一致,说明数值模拟结果可靠。

对厚度 4.5 mm 的毛坯而言,成形 2 mm 的齿高需要 2.3 mm 的压下量,才能获得质量合格的内齿轮。当压下量小于 2.3 mm 时,尽管随着压下量的增加,材料充填高度和角隅材料的充填性均有所提高,但因为充填材料不够,不仅轮齿充填高度不够,而且轮齿切向充填的质量也有下降。

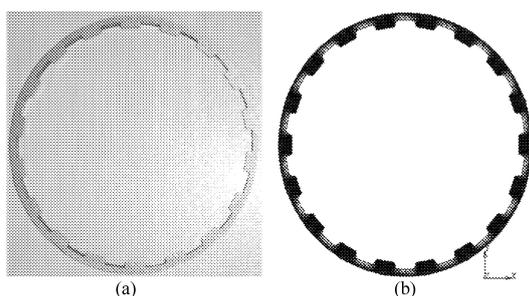


图 4 压下量为 2.3 mm 时内齿轮横截面

Fig. 4 Cross-section of inner gear at 2.3 mm reduction

(a) 工艺试验结果 (b) 数值模拟结果

3.2 材料变形程度对轮齿成形的影响

上述分析表明,对应一定齿高的轮齿成形,必须保证一定的压下量,才能有足够材料充填入芯模凹槽;而参与变形材料体积占毛坯总体积的多少,即材料变形程度,同样会对轮齿的成形产生影响。对内齿轮而言,可用压下量与毛坯壁厚的比值,即相对压下量 ψ 来衡量材料的变形程度,因此分别采用增加压下量和增加毛坯厚度方法,来探讨材料变形程度对轮齿成形的影响。

3.2.1 增加压下量

采用壁厚为 4.5 mm 毛坯,将压下量由 2.3 mm 增至 2.9 mm,其他工艺参数不变的情况下,进行数值模拟和工艺试验。结果表明:尽管充填芯模齿槽的材料体积有所增加,轮齿成形质量却有所下降,具体表现为轮齿圆角部分充填不满(如图 5a 圆圈处所示)。

对轮齿成形的分析表明,芯模凹槽侧壁的摩擦力抵消了一部分变形力的作用,致使齿廓外侧的材料流动滞后于轮齿中部,随压下量的增加,这一特征更加明显(图 5b)。当压下量达到 2.9 mm 时,轮齿中部材料的流动速度继续增加,过快的材料流动导致轮齿中部出现材料空缺。当压下量由 2.3 mm 增至 2.9 mm 时,相对压下量已达 64.4%,齿槽处已无足够材料补充该处空缺,致使成形轮齿的外侧面出

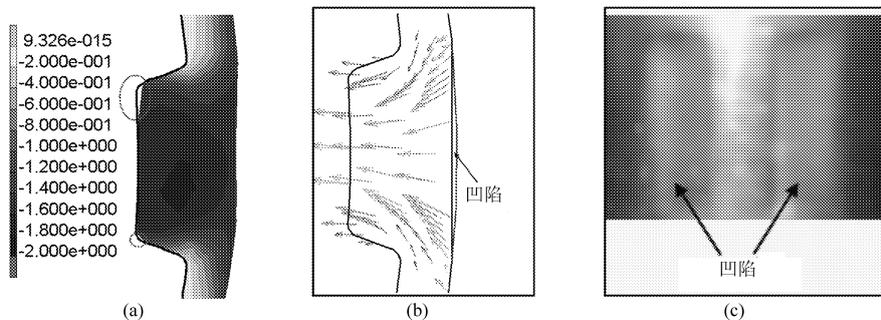


图 5 压下量为 2.9 mm 时成形状况

Fig. 5 Forming status at 2.9 mm reduction

(a) 角隅充填困难 (b) 材料流动状况 (c) 工件外侧

现凹陷(图 5c)。凹陷的存在使得轮齿处的实际压下量要小于理论压下量,因此尽管此时理论压下量达到了 2.9 mm,但轮齿处的实际压下量却要比 2.3 mm 小,因此轮齿的成形高度有所下降。此外,压下量的增大还将导致材料变形程度增加,变形抗力的增大,还会影响成形工装的使用寿命。

3.2.2 增加毛坯厚度

采用 2.3 mm 的压下量,将毛坯的壁厚由 4.5 mm 增至 5 mm,进行了数值模拟。模拟结果表明:尽管参与变形的材料体积未变,但材料总体积的增加,导致成形轮齿的高度未达到所需要求(图 6)。

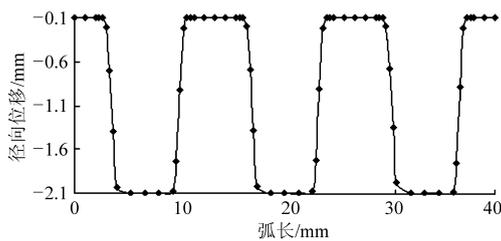


图 6 壁厚为 5 mm 时齿轮径向位移曲线

Fig. 6 Radial displacement curve of gear tooth at five mm thickness

毛坯厚度的增加导致成形齿高下降,是因为旋压属局部塑性成形工艺,当旋轮加载时,沿加载方向

受力面积的增大导致应力绝对值逐渐减小。壁厚的增加使毛坯变形区内外侧的应力差增大,毛坯内侧变形区三向应力绝对值下降导致内侧面成形出轮齿的难度增加;此外壁厚的增加也导致材料厚向流动的阻力增加,故此毛坯内侧变形难度增加,成形轮齿高度下降。模拟结果表明,当毛坯壁厚增加至 5 mm 时,需将压下量增大至 2.6 mm,方能获得合格的轮齿。

4 结 论

(1) 轮齿旋压成形时,压下量的增大不仅有利

于轮齿充填高度的增加,而且有利于提高轮齿充填的均匀性。

(2) 对于一定齿高的轮齿成形,只有保证一定的压下量方能有足够的材料充填入芯模凹槽,成形出合格的内齿轮工件,且压下量的值随着毛坯壁厚的增加有所增加。

(3) 在增大压下量的同时,还须考虑材料变形程度,因为相对压下量过大,一方面会影响轮齿内外侧的充填质量,另一方面还会影响到成形工装的使用寿命。

参 考 文 献

- Grochea P, Fritschea D, Tekkayab E A, et al. Incremental bulk metal forming[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(2): 635 ~ 656.
- 许春停, 薛克敏, 李萍. 带纵向内筋筒形件滚珠反旋工艺模拟和缺陷分析[J]. 河南科技大学学报, 2006, 27(4): 9 ~ 11, 21.
Xu Chunting, Xue Kemin, Li Ping. Process simulation and deflection analysis of tube with longitudinal inner rib in ball backward spinning[J]. Journal of Henan University of Science and Technology, 2006, 27(4): 9 ~ 11, 21. (in Chinese)
- 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.
Xue Kemin, Jiang Shuyong, Kang Dachang. Power spinning deformation of thin-walled cylinders with longitudinal inner ribs [J]. Materials Science & Technology, 2002, 10(3): 287 ~ 290. (in Chinese)
- 张涛, 刘智冲, 马世成. 旋压成形带内筋筒形件的工艺研究及数值模拟[J]. 机械工程学报, 2007, 43(4): 109 ~ 112, 118.
Zhang Tao, Liu Zhichong, Ma Shicheng. Technologic research and numerical analysis of spinning of cylinders with inner ribs [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(4): 109 ~ 112, 118. (in Chinese)
- 夏琴香, 杨明辉, 胡昱, 等. 杯形薄壁矩形内齿旋压成形数值模拟与试验研究[J]. 机械工程学报, 2006, 42(12): 192 ~ 196.
Xia Qinxiang, Yang Minghui, Hu Yu, et al. Numerical and experimentation cup-shaped thin-walled inner rectangular gear formed by spinning[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12): 192 ~ 196. (in Chinese)
- 夏琴香, 杨明辉, 陈家华, 等. 工艺参数对杯形内齿啮合齿轮旋压成形影响的数值模拟研究[J]. 塑性工程学报, 2006, 13(4): 1 ~ 5.
Xia Qinxiang, Yang Minghui, Chen Jiahua, et al. Numerical simulation of the influence of the processing parameters on the spin-forming of the inner meshing gear of cups[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13(4): 1 ~ 5. (in Chinese)
- 胡志清, 李明哲, 隋振, 等. 基于连续多点成形原理的旋压成形技术[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 247 ~ 250.
Hu Zhiqing, Li Mingzhe, Sui Zhen, et al. Spinning technology based on principle of continuous multipoint forming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 247 ~ 250. (in Chinese)
- 夏琴香, 李小曼, 李小龙, 等. 梯形内齿旋压成形过程数值模拟及试验研究[J]. 锻压技术, 2008, 33(6): 54 ~ 59.
Xia Qinxiang, Li Xiaoman, Li Xiaolong, et al. Experimental research and numerical simulation on cup-shaped thin-walled trapezoidal inner gear formed by spinning[J]. Forging & Stamping Technology, 2008, 33(6): 54 ~ 59. (in Chinese)
- Jahazi M, Ebrahimi G. The influence of flow-forming parameters and microstructure on the quality of a D6AC steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 103(3): 362 ~ 366.