

# 凸轮轴横向滚花连接的压装扭转数值模拟分析

张 驰<sup>1</sup>, 徐沛娟<sup>2</sup>, 何东野<sup>1</sup>, 聂 璇<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 锻锻工艺研究所, 长春 130022; 2. 吉林大学 计算机科学与技术学院, 长春 130012)

**摘 要:** 阐述了滚花装配式凸轮轴横向滚花连接原理, 进行了横向滚花压装、扭转实验, 分析了扭转强度的影响因素, 并通过数值模拟加以研究。结果表明, 过盈量是影响扭转强度的最显著因素。

**关键词:** 材料合成与加工工艺; 装配式凸轮轴; 横向滚花连接; 连接机理; 压装力; 扭转强度  
**中图分类号:** TG413.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1671-5497(2012)Sup. 1-0216-05

## Research on the transverse knurling connection mechanism of assembled camshaft and numerical simulation analysis on the press mounting and torsion process

ZHANG Chi<sup>1</sup>, XU Pei-juan<sup>2</sup>, He Dong-ye<sup>1</sup>, NIE Xuan<sup>1</sup>

(1. Roll Forging Institute, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** The transverse knurling connection mechanism was discussed. The press mounting and static torsional experiments on the transverse knurling connection were performed. The factors which affect the torsional strength were analyzed. Furthermore the research was also done by numerical simulation. The results show that, the magnitude of interference was the most significant factor which affected the torsional strength.

**Key words:** materials synthesis and processing technology ; assembled camshaft; transverse knurling connection; connection mechanism; press mounting force; torsional strength

滚花装配式凸轮轴是凸轮轴制造的先进技术<sup>[1-4]</sup>, 滚花连接装配有轴向和横向连接两种方式, 当凸轮材料硬度明显大于芯轴材料硬度时应采用横向滚花连接<sup>[5]</sup>。横向滚花连接就是用滚花刀在芯轴表面滚挤成的三角形齿尖条沟与芯轴轴线相垂直, 然后在常温下将内孔加工出多边形浅槽的凸轮以一定的过盈量压入到芯轴中。在压装过程中芯轴外表面的横向滚花花纹在凸轮内孔加

工出的轴向多边形浅槽作用下产生塑性流动充填和切削冲裁变形, 使连接耦合面形成凹凸镶嵌, 由于凸轮的硬度明显高于芯轴的硬度, 凸轮在压入芯轴时其多边形内壁基本保持不变, 而芯轴表面的横向滚花会被凸轮切削成横断面为多边形的形状, 相当于凸轮内壁镶嵌到了芯轴中, 在弹塑性变形和嵌入式连接的复合作用下, 凸轮轴可以承受较大扭矩, 实现凸轮和芯轴的牢固连接。

收稿日期: 2012-02-04.

基金项目: 国家“十五”科技攻关计划振兴东北老工业基地专项项目(2004BA907A19-2).

作者简介: 张驰(1958-), 男, 教授. 研究方向: 塑性加工与自动化. E-mail: chizhang0321@163.com

通信作者: 徐沛娟(1959-), 女, 副教授. 研究方向: 数据库与信息处理. E-mail: xpj1021@163.com

在凸轮和芯轴的连接过程中,压装和扭转强度是关键的两个要素,应用数值模拟分析法研究压装和扭转强度对于滚花装配式的生产工艺及装配设备的制造有着重要意义。

## 1 压装及扭转实验

### 1.1 压装实验

分别选取一种尺寸规格的凸轮和两种尺寸规格的芯轴。芯轴采用 16Mn 钢、直径为  $\varnothing 26.74$  mm 和  $\varnothing 26.84$  mm;凸轮采用 GCr15 轴承钢,凸轮宽度为  $B=10$  mm。凸轮内孔有 36 等分矩形槽,槽底部尺寸为  $\varnothing 27.2_{-0.03}^{+0.03}$ ,凸轮内孔尺寸为:  $\varnothing 27_{+0.025}^{+0.05}$ 。

芯轴表面做横向滚花处理时,首先选用齿间距  $L$  分别为 0.6 mm、0.8 mm、1.0 mm 三种不同尺寸的滚刀,在芯轴表面横向滚花形成环状的三角形齿。然后将三个凸轮在压装机上均以 10 mm/min 的速度压入芯轴中,并通过同步显示仪器记录实验数据。

图 1 是通过压装机同步显示仪器自动绘制的试件 A 的压装力  $F$  的曲线图。横向滚花装配式凸轮轴的压装力和轴向滚花装配式凸轮轴的压装

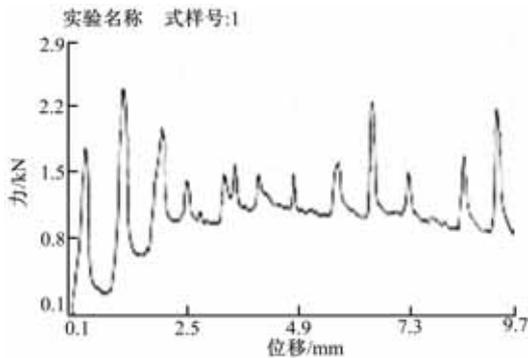


图 1 试件 A 滚花点 1 的凸轮压装力曲线

Fig. 1 The cam press curves of the knurling

point one on the sample A

力是不同的,这点可从各试件压装后的压装力曲线图可以看出,轴向滚花装配式凸轮轴压装力曲线的变化趋势是递增的<sup>[6]</sup>,而横向滚花装配式凸轮轴的压装力曲线的变化趋势是间断跳跃的。主要原因是轴向滚花连接装配式凸轮轴在压装过程中,芯轴上的滚齿咬入凸轮内壁的过程是渐入式的,整个压装的过程是一个连续的挤入的过程;而横向滚花连接装配式凸轮轴的压装过程则是凸轮切削冲裁芯轴横向齿的过程,由于芯轴上的环形齿是间断分布的,所以压装力变化也呈间断跳跃

趋势。

### 1.2 扭转实验

静态扭转实验采用的是在完成压装实验后形成的滚花连接试件。静态扭转实验设备为 QD-B1 静扭试验台,通过自制装卡卡具将凸轮和芯轴分别夹紧。在轴端施加扭矩,分别对两个试件进行破坏性扭转实验。当凸轮与芯轴之间出现相对角位移(亦称失稳现象)时记录其对应的扭矩。该扭矩则为横向滚花连接装配式凸轮轴在保证不失稳的前提下能够承受的最大静扭强度。两个试件的破坏扭矩为 274 N·m 和 372 N·m。

## 2 压装过程数值模拟

### 2.1 基本假定

(1)采用刚体材料模拟凸轮,这样可以减少执行一个显式分析所使用的 CPU 时间<sup>[7]</sup>;

(2)凸轮和芯轴为一个对称结构,为了减少计算量,选取 1/36 进行模拟研究;

(3)将凸轮的外轮廓曲线简化为圆形,针对一个凸轮进行数值模拟。

### 2.2 有限元模型建立及网格生成

选用实验实例作为有限元模拟的对象,将模型划分成六面体的单元。采用 CATIA 建立有限元模型,简化后的 CATIA 三维模型如图 2 所示。

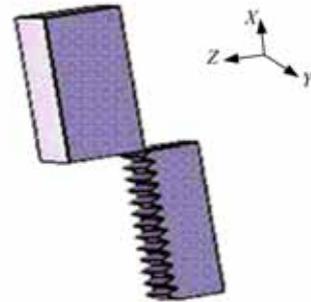


图 2 简化后的滚花连接凸轮轴 1/36 三维模型

Fig. 2 Simplified one of thirty-six three-dimensional model of knurling connecting assembled camshaft

由于横向滚花连接装配式凸轮轴在连接原理上主要是通过芯轴外部的尖齿和凸轮内壁过盈配合发生塑性变形或切削冲裁变形,达到连接的目的。其主要受力变形和接触部分发生在芯轴在压装过程中被凸轮切去的部分,因此将该部分定义为接触区。划分网格时,为提高分析精度和结果的准确度,对接触区采用致密的六面体单元,并对

齿尖附近的网格相对划分得更致密一些。规定网格单元的大小为 0.1 mm,对芯轴接触区进行六面体网格划分,如图 3 所示。芯轴非接触区是指芯轴中除去被凸轮切去部分后面的区域,由于该区受接触区的影响随着远离接触区的距离的增加而逐步减小,故网格的尺寸、疏密变化也应符合这一规律。利用网格划分工具栏规定单元的大小为 0.2 mm,对芯轴接触区进行六面体网格划分。

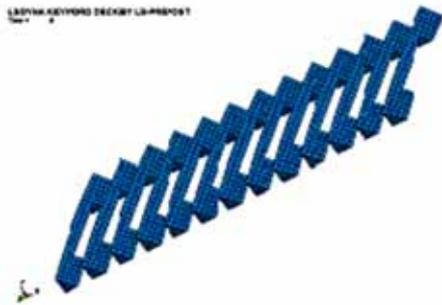


图 3 芯轴接触区域网格划分

Fig. 3 Mesh partition of the contact zone on the shaft

凸轮网格分类类似于芯轴网格划分,接触区域网格较密,尺寸为 0.1 mm;非接触区域网格较粗糙,尺寸为 0.4 mm,两个区域之间网格自动过渡。

### 2.3 边界条件

压装过程属于弹塑性非线性分析,根据滚花齿形和凸轮内表面发生挤压塑性变形的特点,在摩擦类型的选取上采用库仑摩擦模型进行接触分析。由于利用塑性变形和压配进行连接,在装配过程中不能进行任何润滑处理,摩擦因数  $\mu = 0.125$ 。

在进行压装过程数值模拟时,由于所建的模型是用凸轮和芯轴的 1/36 所对应的实体来替代模拟整个凸轮轴压装力的受力变形情况,所以在芯轴和凸轮的两个侧截面分别施加对称边界条件。根据压装过程的实际情况,令芯轴底面的 X 方向位移  $U_x = 0$ 。为了使凸轮完全压入芯轴上,令凸轮的 X 方向位移  $U_x = -10$ 。实现上述约束后,即能模拟压装过程的真实情况<sup>[8]</sup>。

### 2.4 压装模拟结果分析

用 LS-DYNA 软件进行压装过程的模拟。在凸轮压装过程中,0.01 mm、3.4 mm、6.8 mm 这三个位置凸轮均在切削芯轴,此时最大的等效应力为 375 MPa,为 16Mn 的抗拉强度。最后时刻切削完成后,最大等效应力降到抗拉强度以下。图 4 是数值模拟压装过程不同时刻凸轮和芯轴之

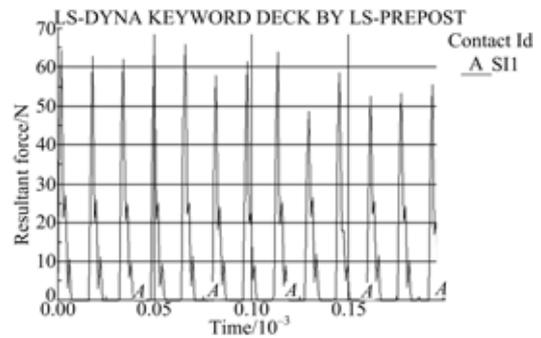


图 4 数值模拟压装过程不同时刻凸轮和芯轴之间的接触力

Fig. 4 The contact force between cam and shaft at variable time in the numerical simulation process of press mounting

间的接触力。根据作用力与反作用力定理,凸轮的压装力应该是等于凸轮和芯轴的接触力。可以看出,接触力逐渐增大,然后变为零,这是由于在模拟计算过程中,采用单元失效近似模拟带有切削的压装过程,当接触力增加到最大的时刻,单元开始失效,当所在区域单元全部失效后,接触力变为零。这与实际压装过程有所区别;在实际的压装过程,凸轮切削芯轴横向齿,产生的切屑也可能与芯轴和凸轮进一步接触,填充两者之间的缝隙。在切削完一个横向齿切屑形成的时刻,压装力会突然减小,但不会减小的到零。由于填充的切削材料越来越多,压装力一般而言会逐步增加(见图 1)。从图 4 可以得到 1/36 模型的接触力,取每个接触力峰值的平均值作为最大接触力。最大接触力为 60 N,整个模型的压装力为:  $60 \times 36 = 2160$  N,这与试验得到的最大压装力值 2283 N 相近,误差为 5.38%。

## 3 静态扭转过程数值模拟

### 3.1 边界条件

在进行静扭强度数值分析时,仍采用压装模拟采用的有限元模型,在完成压装力求解后,以压装最终结果作为有限元模型的初始应力,对模型进行约束边界条件的修改,再继续施加新的载荷(图 5)求解静态扭转过程的数值分析。

根据静扭实验的实际工作状态,要求凸轮与芯轴只能绕 X 轴发生旋转。因此在数值分析过程中,需对压装模拟的边界约束条件进行更改:仅保留芯轴两个侧截面上的对称约束,使芯轴不能绕 X 轴发生旋转;取消凸轮两个侧截面上的对称约

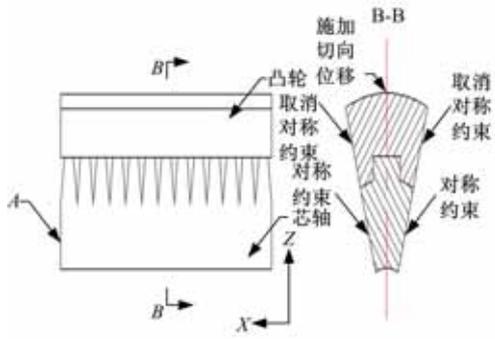


图 5 边界约束示意图

Fig. 5 Boundary restricting pattern

束,同时在凸轮的外表面上施加切线方向位移,使凸轮能够产生绕 X 轴旋转的趋势;由于 1/36 凸轮实体的圆周角度为  $10^\circ$ ,假设凸轮旋转角度为  $2^\circ$ ,仍保留芯轴底面 A 在 X 方向位移  $U_x = 0$ ,使芯轴不能在 X 方向发生位移。修改边界约束条件后可使凸轮与芯轴产生方向相反的扭矩,施加的约束与实际工作状态相似,可以真实反映静扭实验,得到静扭强度数值。

### 3.2 静态扭转模拟结果分析

将压装模拟完成得到的 Dynain 文件读入 ANSYS/LS-DYNA 的 Lsprepost 前处理模块,施加了边界条件和载荷条件及定义了接触与求解控制后即可模拟静态扭转过程。

图 6 是静态扭转过程各个时刻凸轮和芯轴之间的接触力,也即扭转力。可以看出,接触力逐渐增大,然后逐渐变小。这是由于在模拟计算过程中,采用单元失效近似模拟扭转过程,当接触力增加到最大的时刻,单元开始失效,当所在区域单元全部失效后,接触力变为零。ANSYS/LS-DYNA

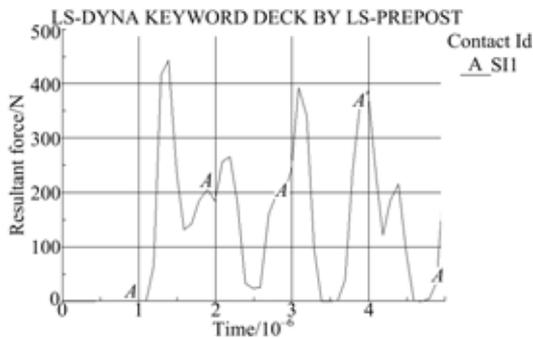


图 6 数值模拟静态扭转过程不同时刻凸轮和芯轴之间的接触力

Fig. 6 The contact force between cam and shaft at variable time in the numerical simulation process of static torsion

只能采用单元失效的形式近似的模拟扭转过程。从图 2 可以得到 1/36 模型的接触力。取每个接触力峰值的平均值作为最大接触力,最大接触力为 410 N,整个模型的扭转力矩为:  $410 \times 36 \times 0.018 = 265.12 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,这与试验得到的最大静态扭矩值  $274.997 \text{ N} \cdot \text{m}$  相近,误差为 3.59%。

### 3.3 影响横向滚花连接强度的因素

横向滚花连接是在常温下无需第三介质加入就能简单牢固连接的方法。它与芯轴和凸轮的材料特性、滚花特性、连接过盈量等连接条件相关,实验及模拟研究表明,影响连接强度有如下因素。

#### (1) 材料的影响

在相同直径及厚度的情况下,凸轮的材质越硬,芯轴表面的与轴线垂直的三角形齿越容易被凸轮切削,凸轮的多边形内壁就能毫无塌陷的镶嵌到芯轴中,对凸轮和芯轴的连接有利。

#### (2) 芯轴直径的影响

芯轴直径越大,齿与凸轮内壁镶嵌面积越大,越有利于连接。但凸轮轴的芯轴直径一般都有一定的要求,用增加直径来增加连接强度的可行性不大。另外,随着芯轴直径的增大,凸轮轴重量亦增加,这与凸轮轴轻量化的思想相悖。

#### (3) 凸轮厚度的影响

对于同种凸轮材料,凸轮厚度越宽,滚花连接越宽,齿与凸轮内壁的镶嵌面积越大,连接强度也越高。但在增加凸轮厚度的同时,也同样面临着凸轮轴重量的增加,所以通过增加凸轮厚度来增加连接强度的空间也不大。

#### (4) 过盈量的影响

在上述前三种影响因素中,材料及几何尺寸因工艺要求,无法作出大的改变,因而对连接强度影响不大,而改变过盈量,就意味着改变凸轮内壁镶嵌入芯轴滚花齿量的大小,连接强度就会明显变化,所以在滚花装配式凸轮轴装配过程中过盈量的影响因素最大。对于同种材料、同种尺寸的凸轮轴,滚花刀齿间距越大,滚花齿越高,连接时过盈量就越大,凸轮内壁镶嵌入芯轴的三角形齿中的量也越大,连接强度越好。但过盈量过大,压装残余应力值就高,压装力也随之增加。所以,在保证连接强度的同时一定要合理选择过盈量,亦即合理选择滚花刀的齿间距。

## 4 结 论

(1) 对材料为 Gr15 的多种尺寸规格的凸轮

和材料为 16Mn 芯轴进行了压装及静态扭转实验研究。并采用模拟软件对凸轮的压装及静态扭转过程进行了数值模拟,数值模拟结果与实验结果有较好的吻合,为滚花机构及装配机的设计与制造提供了重要的理论指导。

(2)对影响横向滚花连接装配式凸轮轴连接强度的因素进行了分析,总结出了各种因素对横向滚花连接装配式凸轮轴的连接强度的影响规律:过盈量是影响扭转强度的最显著因素。连接时过盈量越大,连接强度越好,但过盈量过大,压装力和残余应力也随之增加。在保证连接强度的同时一定要合理选择过盈量,使得横向滚花连接达到低残余应力高强度的效果。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 张驰,杨慎华,寇淑清. 装配式凸轮轴生产工艺及应用[J]. 汽车技术,2004(1):32-34.  
Zhang Chi, Yang Seng-hua, Kou Shu-qing. Production process and application of packaged type camshaft[J]. Automobile Technology, 2004(1):32-34.
- [ 2 ] 杨慎华,张驰,寇淑清,等. 装配式凸轮轴制造技术现状与发展趋势[J]. 内燃机工程,2004, 25(2):32-34.  
Yang Seng-hua. Zhang Chi, Kou Shu-qing, et al. Present status and trends of assembled camshaft technology[J]. Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(2):32-34.
- [ 3 ] Muller H, et al. Thermal shrink fit process for composite camshafts[J]. Auto Engineering, 1997, 105(9):76-78.
- [ 4 ] Yoshikatsu Nakamura, Yasuyoshi Egami, Koichi Shimizu. Development of an assembled camshaft by mechanical bonding[J]. SAE, 1996, 960302:109-116.
- [ 5 ] 张驰,何东野,邓春萍,等. 滚花连接装配式凸轮轴连接机理及生产新工艺[J]. 汽车技术,2008(9):53-55.  
Zhang Chi, He Dong-ye, Deng Chun-ping, et al. The jointing mechanism and new production process of knurling jointing assembled camshaft[J]. Automobile Technology, 2008(9):53-55.
- [ 6 ] 张驰,杨慎华,徐沛娟,等. 滚花装配式凸轮轴压装力实验研究及计算机分析[J]. 吉林大学学报:工学版,2003(增刊):176-178.  
Zhang Chi, Yang Shen-hua, Xu Pei-juan, et al. A assembled force experiment research and computer analysis for the shaving joining assembled camshaft [J]. Journal of Jilin University, 2003 (Sup. ): 176-178.
- [ 7 ] 朱立光,路文刚. GCr15 轴承钢高温力学性能的研究[J]. 特殊钢,2007,28(4):7-9.  
Zhu Li-guang, Lu Wen-gang. A study on high temperature mechanical properties of GCr15 bearing steel[J]. Special Steel, 2007, 28(4):7-9.
- [ 8 ] Facchinei F, Jiang H, Qi L. A smoothing method for mathematical programs with equilibrium constraints[J]. Mathematical Programming, 1999, 85(1):107-134.