

中空组合式凸轮轴滚花连接强度研究

寇淑清¹, 乔健², 杨慎华¹, 张弛¹

(1. 吉林大学 锻锻研究所, 长春 130022; 2. 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130016)

摘要: 凸轮与轴体的连接强度是评价中空组合式凸轮轴的重要技术指标. 本文介绍了中空组合式凸轮轴的技术优势和滚花连接的特点, 通过有限元数值模拟并结合试验对滚花装配压装力和连接强度的影响因素进行了分析. 结果表明, 材料、过盈量、滚花连接区长度、滚花齿形和齿间距都是影响滚花压装力和连接强度的主要因素; 凸轮与轴体材料的优化匹配、滚花齿形的合理选取以及装配过盈量和连接区长度的增大, 都可提高滚花连接中空组合式凸轮轴的连接强度.

关键词: 中空组合式凸轮轴; 滚花连接; 连接强度; 有限元; 数值模拟

中图分类号: U464.134+.1; TH131.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0299(2009)04-0551-05

Research on the knurling connection strength of hollow assembled camshaft

KOU Shu-qing¹, QIAO Jian², YANG Shen-hua¹, ZHANG Chi¹

(1. Roll - Forging Institute, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130016, China)

Abstract: The key qualification of hollow assembled camshaft is connection strength between cam lobes and shaft. The connection mechanism and technical advantages of hollow assembled camshaft on knurling connection are introduced. The influencing factors of knurling connection strength and press-fit load are analyzed by FEM numerical simulation, press-fit experiments, static torque strength experiments and fatigue strength experiments. Results show some that the cam lobes, tube materials, interference, knurling width, knurling form and teeth space influence the press fit load and connection strength of knurling connection. In addition, the connection strength between cam lobes and shaft is increased by the optimized choice of cam lobes and tube material and proper manufacture of knurling form or augment of interference and knurling width.

Key words: hollow assembled camshaft; knurling connection; connection strength; FEM; numerical simulation

凸轮轴是发动机关键零部件. 随着对发动机功率、油耗、排放、轻量化等性能要求的提高, 凸轮轴作为配气机构中不断加速和减速的旋转质量, 所承受的冲击载荷和传递的动态扭矩也越来越大^[1]. 仅由单一金属加工而成的整体式凸轮轴, 在运动平稳性、耐磨性能、抗扭强度方面均不能同时达到要求^[2]. 中空组合式凸轮轴是一种新型组合式设计, 其构思新颖, 在减轻产品重量、简化工艺流程、提高生产效率、降低生产成本、

材料优化组合、灵活设计、柔性生产方面具有明显的技术优势, 可提高发动机性能, 改善燃油经济性, 降低排放, 因此极具市场竞争力^[3].

中空组合式凸轮轴关键技术为凸轮与轴体的连接, 目前主要连接方式有热套、轴管内高压胀形、⁴轴管机械胀形、粉末烧结、焊接、定位销、定位键等连接方法^[4~7]. 而随着发动机功率及转速的不断提高, 凸轮与轴体的连接强度已成为评价中空组合式凸轮轴的重要技术指标. 滚花过盈装配连接是一种新型连接方法, 本文基于有限元数值模拟并结合试验, 对滚花装配过程和静扭强度进行研究, 对影响中空组合式凸轮轴滚花连接强度的工艺参数进行分析.

收稿日期: 2006-11-15.

基金项目: 国家“十五”攻关项目(2003BA213C, 2004BA907A19)

吉林大学“985”工程资助项目.

作者简介: 寇淑清(1962—)女, 博士, 教授, 博士生导师;

杨慎华(1949—)男, 教授, 博士生导师.

1 滚花连接特点

滚花连接是利用机械滚花后过盈装配过程中产生的塑性流动充填与弹性压配而实现两部件连接的一种方法,整个连接过程在常温下进行,不需要第三种介质的参与。

如图 1 所示,首先利用滚花刀具在轴体外表面上滚挤成三角齿形或渐开线齿形等连续均匀的轮廓曲面,然后在常温下将凸轮以一定的过盈量顺次压入轴体中。在压装过程中,由于轴体滚花齿形和凸轮内孔表面产生的塑性流动充填,使连接耦合面形成凹凸镶嵌,同时,由于弹性变形与回弹量不同,凸轮和轴体产生压配连接,在压配和嵌入的复合作用下完成连接^[8]。

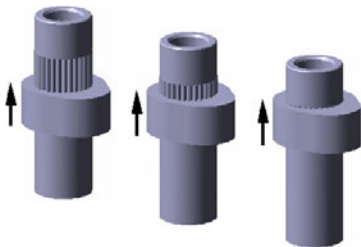


图 1 凸轮轴滚花连接简图

2 装配及连接强度试验

2.1 试验样件制备

参考 488 发动机凸轮轴等产品尺寸,轴体材料 45 钢,凸轮材料分别为 45 钢和 Q235A 钢。采用齿间距 $L=0.8\text{ mm}$ 、 1.0 mm 和 1.2 mm 的三角形滚花刀分别在公称直径为 $d=33\text{ mm}$ 、 24 mm 的 45 钢轴体表面进行滚挤加工。采用精锻或线切割加工凸轮,如图 2 所示,凸轮宽度取 $B=17\text{ mm}$ 、 23 mm 两种。

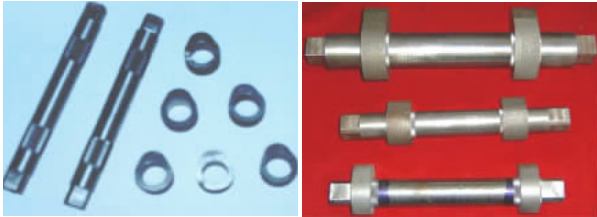


图 2 轴体和凸轮样件制备

2.2 装配试验

在 CSS-44100 电子万能试验机上分别将不同材料、尺寸的凸轮以 10 mm/min 的速度压入不同直径的轴体中,表 1 给出实测轴体直径、滚挤齿形后齿顶圆直径以及装配压装力。

表 1 不同参数的装配压装力

轴体公称直径 $d(\text{ mm})$	滚花刀齿间距 $L(\text{ mm})$	轴体实测值 $d(\text{ mm})$	滚花后齿顶直径 $D(\text{ mm})$	装配过盈量 $\delta(\text{ mm})$	装配压装力 (KN)	凸轮材料	凸轮宽度 $B(\text{ mm})$
24	0.8	24.01	24.24	0.115	24.10	45	23
		24.01	24.30	0.145	33.42	Q235A	23
24	1.0	24.0	24.40	0.2	34.88	Q235A	23
		24.0	24.36	0.18	29.69	45	23
24	1.2	24.0	24.36	0.18	35.52	Q235A	23
		24.0	24.36	0.18	31.80	45	23
33	0.8	33.01	33.27	0.13	52.32	Q235A	23
		33.0	33.29	0.145	36.73	45	23
33	1.0	33.0	33.36	0.18	36.47	Q235A	23
		33.0	33.32	0.16	43.38	45	23
33	1.2	33.01	33.41	0.20	48.52	45	23
		33.01	33.45	0.22	61.03	Q235A	23
24	0.8	24.34	24.58	0.12	15.2	45	17
	1.0	24.36	24.62	0.13	15.7	45	17
	1.2	24.36	24.65	0.1456	17.2	45	17

2.3 静扭强度试验

实验所用设备为 QD-B1 扭转试验台、HY-DROPVLS SYSTEM 计算机控制电液伺服系统,实验时将凸轮分别夹紧,在轴端施加扭矩进行测试,当凸轮与轴体间出现角位移时记录其最大扭矩。如图 3 所示。

2.4 疲劳强度试验

凸轮材料 Q235A 钢,轴体材料 45 钢,轴体外径 33 mm 和 24 mm ,三角形滚花刀具齿间距

1.2 mm 和 1.0 mm 。实验所用设备为疲劳试验台、计算机控制电液伺服系统,滚花连接组合式凸轮轴扭转疲劳寿命实验的实验条件为:载荷上峰值 $300\text{ N}\cdot\text{m}$,载荷下峰值 $100\text{ N}\cdot\text{m}$,频率: 2.0 Hz 。

通过实验测试,当凸轮轴扭转疲劳寿命达到 33.4×10^4 次时,两个样品均未损坏,而凸轮轴实际工作中扭矩约为 $30\text{ N}\cdot\text{m}\sim 50\text{ N}\cdot\text{m}$ 。由此可见,滚花连接组合式凸轮轴具有较高的扭转疲劳寿命,满足实际工作要求。



(a)静扭强度试验



(b)疲劳强度试验

图3 连接强度试验

3 有限元模型

为了分析诸因素对装配压装力以及连接强度的影响规律,对压装过程和静力扭转进行了数值模拟分析.通过对装配后保留的力学量场进行传递作为扭转分析的初始场,从而将滚花装配与凸轮轴静力扭转过程联系起来,以分析各种工艺参数对滚花连接中空组合式凸轮轴静扭强度的影响.

3.1 几何模型建立

凸轮外轮廓呈现桃形面,其形状曲线比较复杂.滚花连接的受力和变形面主要在凸轮与轴体的配合表面,凸轮的外部轮廓对连接过程影响不大,因此可将凸轮简化为一个厚壁圆筒,其壁厚按凸轮最薄处的厚度处理.

由于凸轮按顺序依次装配,每个凸轮和轴管的连接过程相同,彼此之间相互影响及其微小,因此只对外轮廓形状已简化为圆形的单个凸轮装配过程进行模拟和分析.

根据实际加工情况,轴体外表面滚花后形成大小相等分布均匀的齿形,利用对称性,只需对单个齿形所对应的轴体和凸轮进行建模.

3.2 网格划分

轴体滚花区齿形形状不规则,因此采用四节点四面体单元对变形体进行有限元网格离散.在过盈装配过程中,明显存在接触区和非接触区.由于轴体齿形和凸轮内孔接触区变形剧烈,因此网格划分细密,由接触区向轴体内部和凸轮外部的非接触区,网格逐渐稀疏,形成疏密过渡的合理网格,以提高分析精度及计算速度.

3.3 位移边界条件

1) 压装位移边界条件

边界界面约束如图4(a)所示,在轴体和凸轮的两个对称面上,位移边界条件为各点沿对称面的法线方向位移为0.根据实际装配过程,设定轴体在Z轴方向上为固定约束,位移 $U_z=0$,凸轮沿Z轴方向运动完成装配过程.

2) 扭转位移边界条件

在进行静扭分析时,要确定凸轮与轴体之间发生相对角位移永久变形之前的最大载荷.在模拟过程中,凸轮与轴体不能绕Z轴同时发生旋转,因此轴体两侧对称面上施加的对称约束,即沿对称面法线方向位移为0.同时轴体在Z轴方向固定约束 $U_z=0$.

固定轴体,给凸轮的外表面施加切线方向位移,使凸轮能够产生绕Z旋转的趋势,如图4(b)所示,以分析二者产生相对角位移时的载荷极值.

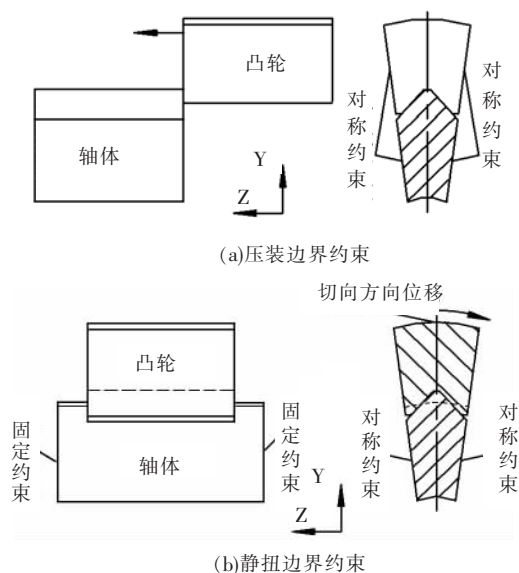


图4 压装和扭转过程边界位移约束

3.4 边界接触摩擦

根据装配试验过程中滚花齿形和凸轮内表面发生挤压塑性变形的特点,采用库仑摩擦模型进行接触摩擦分析.

$$f_s = \mu p$$

式中, f_s 为摩擦力; p 为接触正压力; μ 为摩擦系数.在无润滑的条件下,针对不同材料(试验中选取凸轮材料45钢和Q235A),取 $\mu=0.12 \sim 0.15$ [9].

3.5 材料及工艺参数

根据实际产品要求和试验条件,在计算模型中选取相关参数如下:轴体外径24 mm,轴体壁厚5 mm,凸轮宽度17~23 mm,刀具齿间距0.8~1.2 mm,过盈量0.1~0.2 mm.

材料性能参数为:弹性模量 2×10^5 MPa,剪切模量 8×10^4 MPa,泊松比 0.3; Q235A 钢屈服强度 295 MPa, 45 钢屈服强度 355 MPa.

4 连接强度影响因素分析

图 5 给出压装过程及静力扭转阶段等效应力分布,其中轴体外径 24 mm、凸轮宽度 23 mm、齿间距 1.0 mm、轴体壁厚 5 mm,过盈量 0.1 mm,凸轮材料为 Q235A、轴体材料为 45 钢. 所对应静扭强度数值模拟和试验结果如表 2 所示.

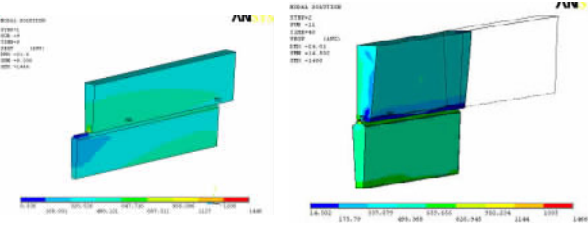


图 5 压装过程及静力扭转数值分析
表 2 静扭强度对比表

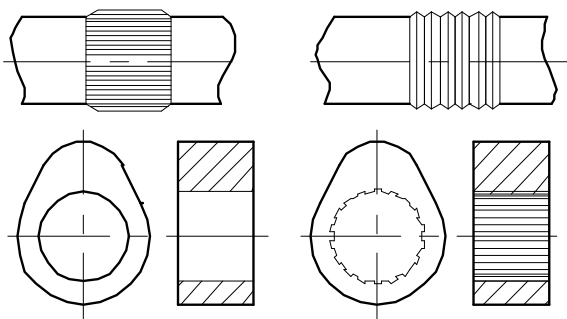
凸轮材料	轴体材料	静扭强度 (N · m)	
		实验值	模拟值
Q235A	45	1307	1217
45	45	1403.8	1334.6

数值模拟及试验结果表明:材料、过盈量、滚花连接区长度、滚花齿形等对装配过程的压装力及连接强度都有不同程度的影响.

4.1 材料的影响

从表 2 静扭强度数值模拟结果和试验结果看出,二者误差小于 10.%,表明静扭过程数值模拟结果与实验结果吻合较好. 由于试验过程中所用凸轮和轴体的尺寸规格都有一定加工误差,滚挤的三角齿形也由于进刀量等原因导致非标准齿形,最终使得数值分析结果与实验结果之间存在一定的误差.

表 2 数据显示,在其他参数不变的条件下,材料相对较软的 Q235A 凸轮与 45 钢轴体连接强度较大. 对连接样件进行横截面剖分显示,由于轴体齿形硬度较大,相对延展性较好的 Q235A 凸轮内壁有较大的塑性变形,并向轴体齿槽流动充填,与轴体齿形形成互相包容凹凸紧密配合. 当采用同种材料 45 钢时,虽然滚挤齿形时产生加工硬化效应,但二者延展性相当,都发生一定的塑性变形,轴体齿形的变形流动造成齿顶“磨平”现象,连接强度有所降低. 当产品要求凸轮硬度较大时,可考虑在凸轮内壁拉削花键,轴体上滚挤横向(与轴线近似垂直)齿槽的方法,也能够产生相同的滚花连接效果. 如图 6 所示.



(a)凸轮硬度小 (b)凸轮硬度大

图 6 不同硬度凸轮的滚花方式

4.2 过盈量的影响

图 7(a) 给出不同装配过盈量的扭矩曲线,可以看出,过盈量对连接强度的影响很大. 当单边过盈量增大到 $\delta = 0.2$ mm 时,承受的静扭强度为 2232.9 N · m. 可见,过盈量越大,材料弹塑性变形越大,卸载回弹后压配越紧,轴体齿形嵌入凸轮孔内壁越深,形成的互相包容越紧密,且接触面积也越大,因此所能承受的扭力越大,连接强度明显提高,当然装配所需压装力也增大. 为此,在要求凸轮轴传递的扭矩较高或其它条件不利的情况下,可适当增大装配过盈量.

4.3 滚花连接区长度的影响

连接区的长度一般由凸轮厚度决定,即与凸轮厚度相等. 取 $B = 23$ mm 和 $B = 17$ mm,在其它参数不变的情况下所对应得扭矩曲线如图 7(b). 随着滚花连接区长度的增加,接触面积越大,所需的压装力及承受的扭力也越大,连接强度明显提高.

4.4 齿形的影响

根据滚花刀具的形状不同,在轴体表面滚挤出三角齿形和渐开线齿形. 图 7(c) 给出两种齿形的扭力曲线. 可以看出,在材料、齿间距(齿根厚度)、连接区长度、压装过盈量等相关参数不变的条件下,三角齿形比渐开线齿形所能够承受的扭力和大,且装配所需要的压装力小. 样件横截面剖分显示,三角齿的齿尖较渐开线齿尖更好地嵌入凸轮孔内壁,形成典型的挤压塑性变形,因此采用三角齿形的滚花连接强度更好.

4.5 齿间距的影响

三角形滚花刀具的齿间距决定了轴体齿形的疏密和齿根厚度. 在轴体外径不变的情况下,刀具齿间距越大,齿根厚度越大,轴体齿形越稀疏,所需的压装力及承受的扭力增大,连接强度提高. 因此,对于传递扭矩较高的凸轮轴,可适当增大齿厚. 图 7(d) 给出三角齿齿厚对连接强度的影响.

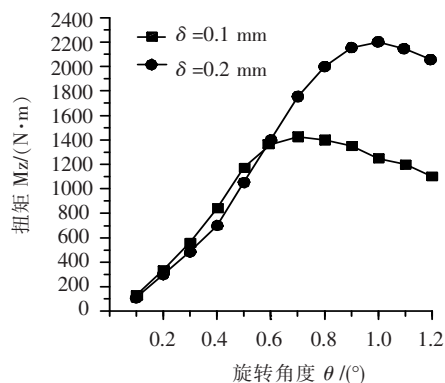
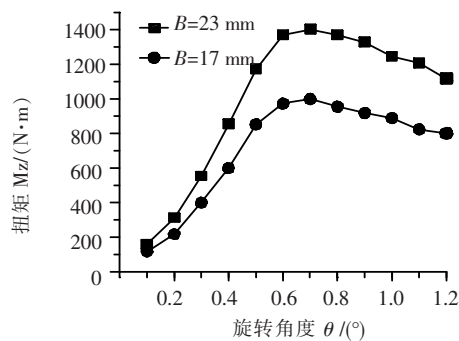
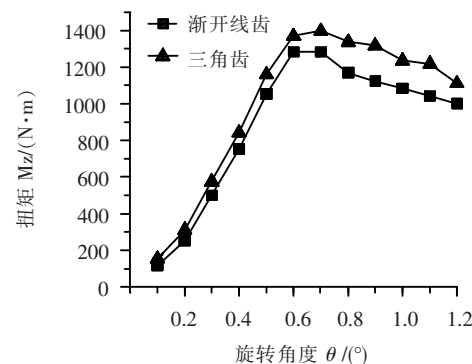
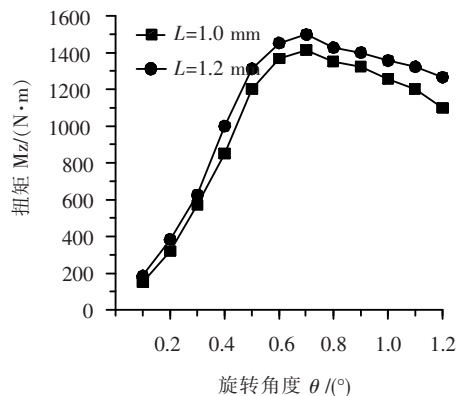
(a) 过盈量影响 (三角齿, $B=23$ mm, $L=1.0$ mm)(b) 连接区长度影响 (三角齿, $\delta=0.1$ mm, $L=1.0$ mm)(c) 齿形影响 ($B=23$ mm, $\delta=0.1$ mm, $L=1.0$ mm)(d) 齿间距影响 (三角齿以 $B=23$ mm, $\delta=0.1$ mm)

图7 扭矩影响曲线(凸轮 Q235A)

表明:

1) 凸轮和轴体材料、过盈量、连接区长度、滚花齿形及齿间距对连接强度及压装力有影响,其中装配过盈量、连接区长度对滚花连接强度的影响最大。

2) 在满足产品性能要求的条件下,可对凸轮和轴体材料进行软-硬优化匹配,即优先选择相对较软的凸轮材料,二者挤压塑性变形形成凹凸镶嵌,连接强度较好。当产品要求凸轮硬度较大时,在凸轮内壁拉削花键,也可产生相同的滚花连接效果。

3) 在凸轮与轴体材料一定的条件下,增大装配过盈量和连接区长度,都能显著提高连接强度。但所需压装力亦随之增大,对装配机床的设备吨位提出更高要求。

4) 轴体齿形形状对装配及连接强度有一定的影响。三角齿形较渐开线齿形连接强度更高、装配压装力更低,是优选的滚花形状。适当增大齿形厚度有助于提高连接强度。

参考文献:

- [1] K. C. Ramesh, R. A. Sagar. Fabrication of metal matrix composite automotive parts [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999: 114-118.
- [2] 杨慎华, 张弛, 寇淑清, 等. 装配式凸轮轴制造技术现状及发展趋势 [J]. 内燃机工程, 2004, 25(2): 32-34.
- [3] 寇淑清, 杨慎华, 赵勇, 等. 发动机装配式凸轮轴——极具竞争力的新技术 [J]. 中国机械工程, 2004, 15(6): 474-477.
- [4] Harald Muller, Andreas Kaiser. Thermal shrink fit process for composite camshafts [J]. Automotive Engineering, 1997, 105(9): 1-5.
- [5] Meusburger, Techn Peter. The camshaft as an example of lightweight design in engine construction [R]. ThyssenKrupp techforum 2004: 50-55.
- [6] M. Hagedorn, K. Weinert. Manufacturing of composite workpieces with rolling tools [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153-154: 323-329.
- [7] 钱人一. 凸轮轴制造工艺综述 [J]. 上海汽车, 2005(3): 26-30.
- [8] 张弛, 李月英, 杨慎华, 等. 装配式中空凸轮轴凸轮材料及装配技术研究 [J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(1): 8-11.
- [9] 王启义. 中国机械设计大典(第二卷12篇) [M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2002: 21-22.

(编辑 张积宾)

5 结论

对中空组合式凸轮轴滚花装配过程和连接强度进行了有限元数值模拟分析和实验研究,结果