

# 球体扩径连接装配式凸轮轴装配过程分析

乔 健<sup>1</sup>, 寇淑清<sup>2</sup>, 孔巧玲<sup>2</sup>, 乔建毅<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 吉林大学 锻锻工艺研究所, 长春 130022;  
3. 长春工业大学 材料科学与工程学院, 长春 130022)

**摘要:**介绍了装配式凸轮轴钢球扩径连接的连接机理,采用数值模拟方法对钢球扩胀过程中凸轮与空心轴体的等效应力、残余接触压力的分布进行了研究。分析了装配后轴体壁厚的减薄量和凸轮内表面的径向变形情况。结果表明:扩径过程中最大等效应力出现在轴体内表面,且经扩径后凸轮与轴体的最大残余应力出现在临界连接处,相应凸轮该位置的径向位移最大,而轴体与凸轮的扩胀部位对应的径向位移最小,壁厚减薄量却最大。经球体扩径连接试验显示,数值模拟预测结果合理、准确、可靠,可为装配机的设计和装配式凸轮轴的生产提供依据。

**关键词:**机械设计;装配式凸轮轴;球体扩径连接;装配过程;数值模拟

**中图分类号:**U464.134, TH131.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2011)Sup. 1-0115-06

## Analysis of hollow camshaft assembled process on expanding tube connection by pushing through a ball

QIAO Jian<sup>1</sup>, KOU Shu-qing<sup>2</sup>, KONG Qiao-ling<sup>2</sup>, QIAO Jian-yi<sup>3</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Roll Forging Research Institute, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. College of Materials and Engineering Sciences, Changchun University of Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The connection mechanism and advantage of hollow assembled camshaft on expanding tube connection by pushing through a ball was introduced. The numerical simulation was used to analyze the equivalent von Mises stress distribution and residual contact pressure of the shaft and the cam lobes in process of expanding tube connection. The radial displacement and hollow shaft reduction of assembled camshaft on expanding tube connection by pushing through a ball were achieved. The results show the maximum equivalent von Mises stress is located internal surface of shaft. The maximum residual contact pressure between the shaft and the cam lobes appears around both ends of cam hole, and it is the maximum radial displacement. The connection part of hollow shaft is the minimum radial displacement, and also it is the maximum wall thickness reduction. According to the expanding tube connection experiments by pushing through a ball, the experimental results are in agreement with the numerical simulation results. It illustrates that the numerical simulation results can

收稿日期: 2010-08-28.

基金项目: “十五”国家科技攻关项目(2003BA213C, 2004BA907A19); 吉林大学“985 工程”项目.

作者简介: 乔健(1980-), 男, 副研究员, 博士. 研究方向: 装配式凸轮轴连接技术及自动化装备, 光电仪器总体设计.

E-mail: qiaojj99065@163.com

通信作者: 寇淑清(1962-), 女, 教授, 博士生导师. 研究方向: 精密高效加工技术与自动化装备, CAD/CAE/CAM 一

体化模具工程. E-mail: kousq@jlu.edu.com

guide perfectly the manufacture of assembled camshaft and design of assembled equipments on expanding tube connection by pushing through a ball.

**Key words:** mechanical design; hollow assembled camshaft; expanding tube connection by pushing through a ball; assembled process; numerical simulation

凸轮轴作为发动机配气机构的关键零部件,其结构设计和加工质量的好坏直接影响到发动机的性能。传统由单一金属加工成的一体式凸轮轴,在运动的平稳性、动平衡性、耐磨性及抗扭强度方面均不能适应发动机高功率、低油耗、低排放、轻量化和高耐久性的需求<sup>[1-2]</sup>。装配式凸轮轴是将桃形凸轮、轴颈等零部件分别进行材料优化匹配、分体精密加工,然后再装配到空心轴体上连接成完整凸轮轴,其在减轻产品重量、提高生产效率、降低生产成本等方面具有明显的技术优势<sup>[3]</sup>。

装配式凸轮轴的技术关键之一为凸轮与轴体的连接,目前主要的连接方式有焊接、粉末烧结、轴体内高压胀形、轴体机械胀形、机械滚花连接等连接方式<sup>[4-6]</sup>。轴体机械胀形通常采用钢球或橄榄头挤压轴体来实现与凸轮的连接,其加工工艺简单,尺寸精度高、易于实现自动化等特点,近年来得到极大关注。本文以某汽车发动机凸轮轴为典型件,借助于弹塑性有限元数值模拟技术,对球体扩径连接装配式凸轮轴的装配过程进行了分析,以期开发装配式凸轮轴生产技术、研制装配设备提供基础数据和有益的参考。

### 1 球体扩径连接机理

球体扩径连接机理如图 1 所示。要将凸轮和轴体连接在一起,凸轮孔与轴体外径之间需预先留有一定的间隙  $\delta$ ,将凸轮套在轴体上用专门夹具将其固定,然后迫使带有一定过盈量的钢球通过轴体<sup>[7]</sup>。

在钢球扩径连接的过程中,轴体受钢球的挤压开始发生弹性变形,接着进入塑性变形区,轴体外径也随之增大,在抵消了凸轮和轴体的间隙( $\delta=0$ )后,紧靠凸轮孔内壁使其内壁产生弹性变形,直到凸轮孔变形量达到  $\delta_1$ (钢球正好通过);由于钢球的继续进给而卸载,使得凸轮孔内壁保留一定的弹性变形量  $\delta_2$ ,利用凸轮孔内壁与轴体外壁弹性回复量的不同形成过盈配合,在接触部分产生压应力,实现压配连接。

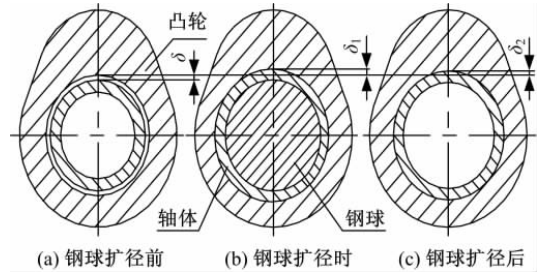


图 1 装配式凸轮轴钢球扩径连接示意图

Fig. 1 Sketch map of expanding tube connection by pushing through a ball

### 2 有限元模型

装配式凸轮轴的凸轮外轮廓形状曲线比较复杂,经钢球扩径后凸轮壁厚最薄处的变形最大且与轴体的连接强度最小,因此可将凸轮简化为一个厚壁圆筒,其筒壁厚按凸轮最薄处的厚度处理。随着轴体在钢球进给挤压下,凸轮按顺序依次与之装配,每个凸轮和轴体的连接过程相同,彼此之间相互影响极其微小,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。

根据钢球扩径的实际工作情况,在对连接过程进行模拟和分析的过程中把钢球作为刚体处理。

以某发动机凸轮轴为典型件,该产品原为铸造制坯机械加工完成。根据原工件尺寸和实际要求,在进行数值分析时,选取如下相关参数:空心轴体外径 24 mm,壁厚 2.5 mm,长度 60 mm;凸轮厚度 17 mm,内径 24.1 mm,外径 35.5 mm。凸轮和轴体材料选择及力学性能见表 1。钢球直径为 19.4 mm。

根据简化后结构的轴对称性,将钢球扩径过程作为轴对称问题处理。采用四节点四边形环单元对轴体和凸轮进行有限元网格离散。为准确描述出钢球扩径过程中凸轮内壁与轴体外壁的接触状态和凸轮与轴体的变形,须将轴体网格划分细

表 1 材料性能参数

Table 1 Material performance parameters

材料	屈服强度 $\sigma_s$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa	延伸率 $\delta$	泊松比 $\gamma$
20# 钢	245	245	0.22	0.3
45# 钢	353	353	0.16	0.3

密均匀,而凸轮网格内壁划分细密,且由内向外网格逐渐稀疏,从而提高分析精度和计算速度。

钢球扩径过程中钢球对轴体施加一个很大的径向接触应力才能够使轴体发生塑性变形,因此需采用剪切摩擦模型进行接触摩擦分析。根据实际加工情况,凸轮与轴体之间摩擦因数为 0.2,钢球与轴体之间摩擦因子数 0.1<sup>[8]</sup>。

### 3 钢球扩径过程的应力分析

#### 3.1 等效应力分布

图 2 给出了钢球扩径过程中不同进给位置的轴体与凸轮等效应力分布云图。从图 2(a)可以

看出,最大等效应力发生在轴体内壁,其值为 535.9 MPa,超过了轴体材料的屈服强度(20# 钢屈服强度为 245 MPa),轴体发生塑性变形。由图 2(b)可以看出,经钢球挤压后轴体部分的等效应力减小,表明扩胀后轴体由于卸载产生回弹。图 2(c)(d)(e)表明:轴体在钢球挤压下出现弹塑性变形,在变形量超过凸轮与轴体的间隙后,轴体外壁与凸轮内壁接触使凸轮发生弹性变形,此时轴体沿径向的等效应力大幅增大,并且沿着凸轮的壁厚向外延伸。由图 2(f)可以看出,轴体和凸轮均有卸载回弹出现,但由于凸轮和轴体弹性回弹量的不同,在凸轮和轴体之间产生残余压应力。

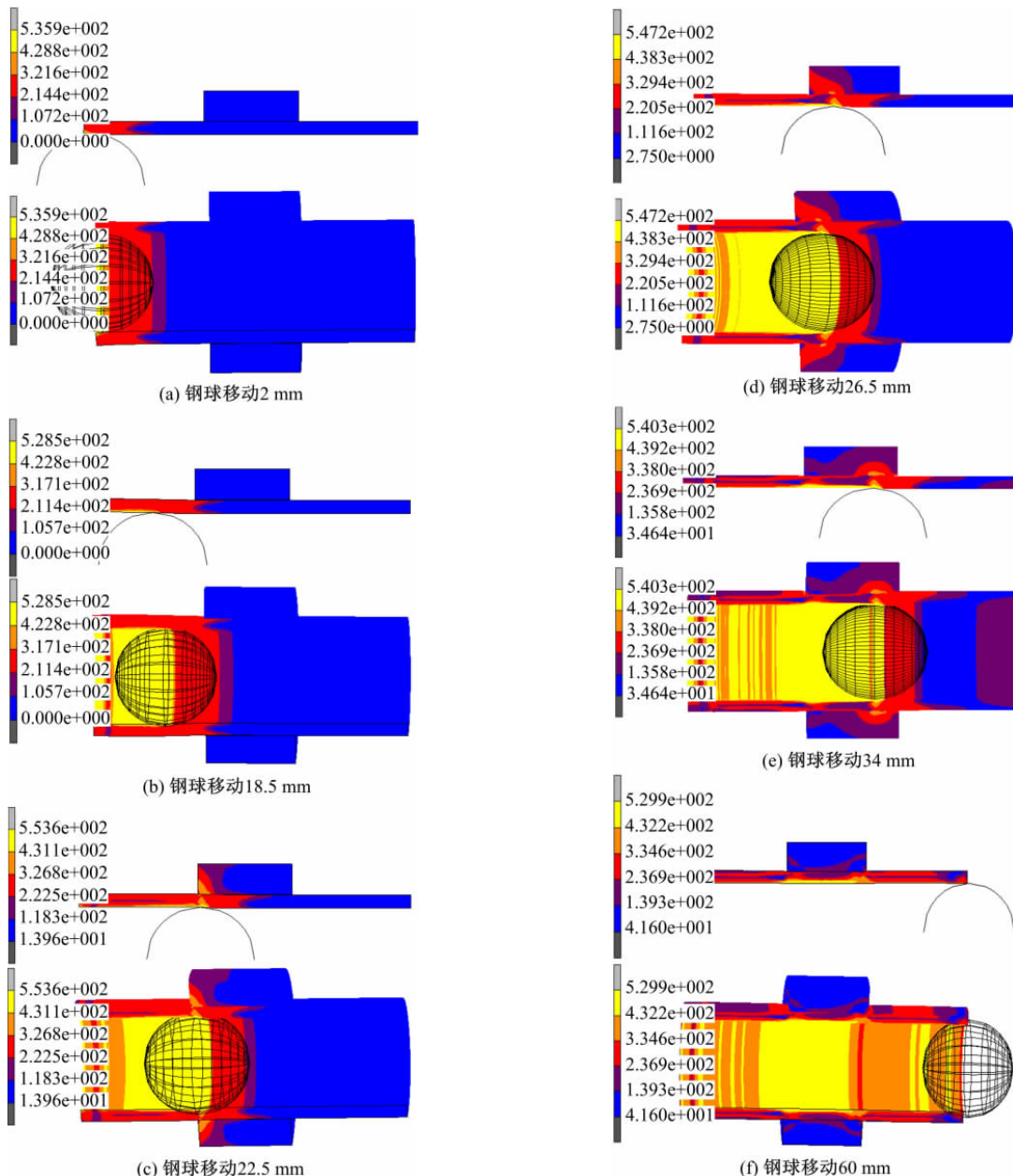


图 2 钢球扩径连接过程的等效应力分布  
Fig. 2 Equivalent von Mises stress distribution of connection process by pushing through a ball

对扩径过程的分析可知,最大等效应力出现在轴体内壁,所以轴体内壁易先发生破裂。由于 20# 钢的塑性流动性较好,而结果显示最大等效应力也没有超过其破裂极限,因此保证了轴体的可靠扩胀。

针对钢球扩径连接过程中凸轮与轴体连接面上等效应力变化大的特点,图 3 给出钢球扩径过程中凸轮内表面一点的等效应力变化曲线。可以看出当钢球移动到此点时,等效应力迅速增加,一直增大到 350 MPa,此点对应的径向变形量也达到最大,由于钢球的继续移动,此点会发生卸载回弹,等效应力开始逐渐减小。

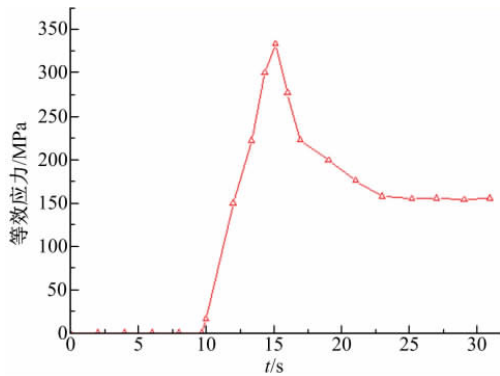


图 3 凸轮内表面一点的等效应力

Fig. 3 Equivalent stress on inside surface point of cam

### 3.2 残余接触应力分布

钢球扩径连接是依靠轴体和凸轮弹性回复量的不同,且凸轮的弹性回复量大于轴体的弹性回复量,使得轴体和凸轮之间存在有残余应力。图 4 给出沿连接方向凸轮内表面的残余接触压力分布。可以看出,凸轮与轴体装配连接的中间区域内平均残余接触压力约为 49.6 MPa,而最大残余接触压力出现在凸轮两端边缘,其值达到 200 MPa,但在靠近凸轮边缘处,残余接触压力最小,仅为 38.27 MPa。由于钢球挤压轴体实现扩胀的

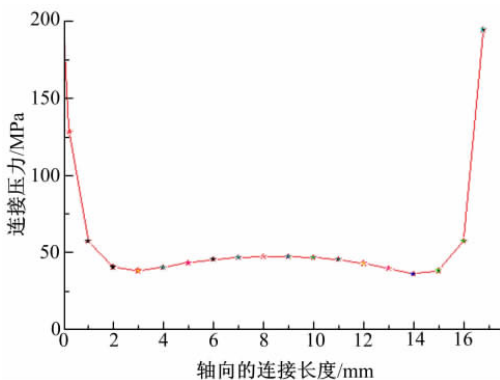


图 4 残余接触压力

Fig. 4 Residual contact pressure

连接过程中,胀大轴体在凸轮端面部位存在有过渡区,在过渡区内曲率变化陡变,卸载时该处受到较大的凸轮回弹力,导致在该区域出现较高的接触压力,但在凸轮端面与轴体连接处出现有不同的应力集中,导致残余接触压力的不同。

## 4 球体扩径过程的变形分析

### 4.1 轴体的位移分布

由于钢球与轴体之间存在一定过盈量,因此在钢球扩径过程中,轴体被胀大,但轴体内部与外部受力状态的不同,使得轴体内外表面的位移变化也各不相同。图 5 为钢球扩径后轴体内外表面的径向位移分布,可以看出轴体内表面的径向位移比外表面的径向位移大,二者的差值即为轴体壁厚减薄量。

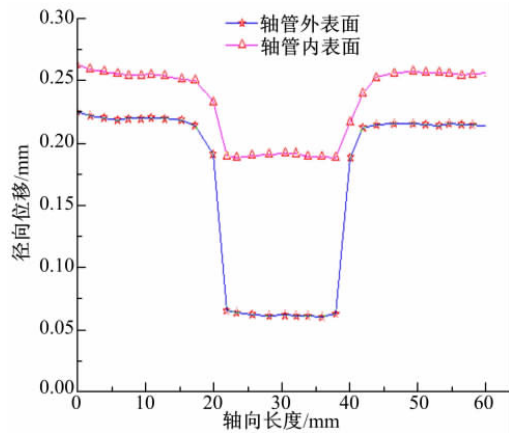


图 5 轴体径向位移

Fig. 5 Radial displacement of hollow shaft

扩径过程中轴体的壁厚会减薄。由图 5 可知轴体与凸轮连接处轴体壁厚减薄量为 0.123 mm,非连接装配区域轴体减薄量只有 0.038 mm,由于钢球在推动下首先挤压轴体,使其发生弹塑性变形,轴体胀大,在受到凸轮内壁的抵制时,迫使受挤压部位沿轴向流动,从而增大了轴体壁厚减薄量。凸轮连接处轴体壁厚减薄最大处其减薄率仅为 3%,故轴体减薄量相对于轴体壁厚十分微小,从而不会影响到凸轮轴的使用性能。

### 4.2 凸轮位移分布

钢球扩径连接是靠凸轮内壁与轴体外表面在钢球挤压完成后卸载回复量的不同形成压配连接。图 6 给出经钢球挤压后凸轮内表面的径向位移曲线。可以看出,在凸轮与轴体连接区域的边缘位置,凸轮内表面的径向位移量最大,其值为 0.0185 mm,而中间位置的径向位移量为 0.0089

mm。由于钢球挤压轴体实现扩径连接过程中凸轮两端分别出现应力集中,引起凸轮内表面径向位移量的不同,然而在一定范围内,凸轮内表面的径向位移越大,在接触面上的压应力就越大,压配便越紧密,凸轮和轴体的连接强度也越大。

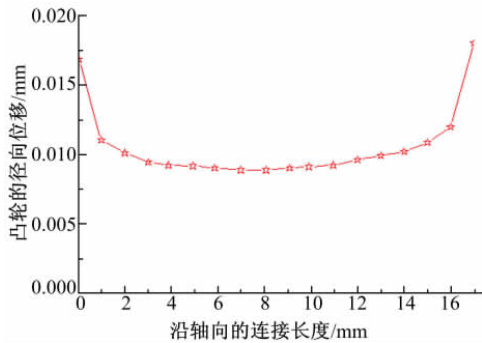


图 6 凸轮内表面的径向位移

Fig. 6 Radial displacement on inside surface of cam

## 5 扩径连接试验

### 5.1 试验样件制备

参考某发动机凸轮轴产品的尺寸及要求,轴体和凸轮材料分别选取 20# 钢和 45# 钢,钢球材

料采用硬度为 58~62HRC 的 GCr15。通过铰刀对公称直径为 19.0 mm 的 20# 钢轴体内壁进行精加工,以进一步降低表面粗糙度。钢球直径  $D_0 = 19.06$  mm,与轴体之间的过盈量为 0.20 mm;凸轮采用精锻或线切割加工,宽度取  $B = 17$  mm、10 mm 两种,与轴体单边间隙公称尺寸为 0.05 mm。

### 5.2 装配试验

在 CSS-44100 电子万能试验机上将钢球以 10 mm/min 的速度穿过轴体,使空心轴体与凸轮实现扩胀连接,如图 7 所示。表 2 给出实测轴体尺寸、凸轮环内径、凸轮宽度、扩径载荷及扩径后轴体壁厚的变化量。

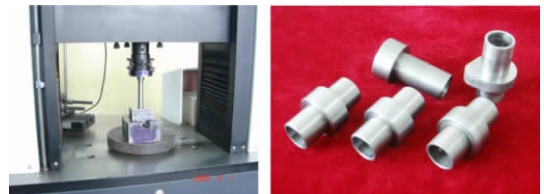


图 7 扩径连接样件

Fig. 7 Samples by expanding tube

表 2 不同条件的扩径载荷

Table 2 Loading of expanding tube by pushing through a ball

试样编号	凸轮宽度/mm	凸轮环内径/mm	轴体外径/mm	轴体内径/mm	扩径载荷/kN	扩径后轴体壁厚/mm	轴体壁厚减薄量/mm
1	17	23.88	23.78	18.78	6.21	2.46	0.04
2	17	23.70	23.66	18.78	7.74	2.40	0.04
3	17	23.76	23.70	18.74	8.95	2.44	0.04
4	17	23.74	23.70	18.74	9.76	2.44	0.04
5	17	23.70	23.68	18.72	10.90	2.42	0.06
6	17	23.70	23.66	18.76	8.75	2.41	0.04
7	10	23.72	23.68	18.76	8.70	2.42	0.04
8	10	23.72	23.68	18.72	10.53	2.42	0.06

从表 2 可以看出,扩径后轴体壁厚减薄量基本为 0.04 mm,而前面数值模拟的结果为 0.038 mm,二者之间的误差仅为 5% 左右,表明钢球扩径连接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,轴体内径的光洁度也并未达到绝对的光滑,在推动钢球扩胀轴体时钢球与轴体内径存在摩擦力,最终使得数值分析结果与实验结果之间存在一定的误差。

## 6 结论

(1) 在球体扩径的过程中,轴体内壁的等效应力最大;随着钢球扩胀的进行,凸轮内壁的等效应力先增大后减小,最后基本保持恒定。

(2) 经钢球扩径连接后,凸轮与轴体接触面上

的残余接触压力沿轴向分布不均匀,并且在凸轮与轴体连接端面的残余接触压力最大。

(3) 轴体与凸轮装配连接部位相应轴体的径向位移最小,减薄量却最大;凸轮内壁越靠近孔边缘处的径向位移越大,端部达到最大。

(4) 实验表明,数值模拟给出的数据较为合理、可靠、准确,能够为装配机的设计和装配式凸轮轴的生产提供依据。

### 参考文献:

- [1] Qiao Jian, Kou Shu-qing, He Dong-ye. Torque strength and influencing factors analysis for assembled camshaft by knurling joining[J]. Material Science Forum, 2008, 575-578: 216-221.
- [2] Treutler Christoph P O. Industrial use of plasma-de-

- posited coatings for components of automotive fuel injection systems[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 200: 1969-1975.
- [3] 寇淑清, 乔健, 杨慎华, 等. 中空装配式凸轮轴滚花连接数值模拟分析[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2007, 37(5): 1106-1111.
- Kou Shu-qing, Qiao Jian, Yang Shen-hua, et al. Analysis of numerical simulation of hollow assembled camshaft on knurling connection[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2007, 37(5): 1106-1111.
- [4] 寇淑清, 乔健, 皮文皓, 等. 滚花连接的中空凸轮轴装配过程影响因素分析[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2008, 38(2): 323-328.
- Kou Shu-qing, Qiao Jian, Pi Wen-hao, et al. Analysis of influencing factors on knurling connection hollow camshaft assembled process[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2008, 38(2): 323-328.
- [5] Blanchard Pierre, Nigarura Salvator, Trasorras Juan R L, et al. Assembled camshaft with sintered cam lobes; torsional fatigue strength and wear performance[C]//SAE Paper, 2000-01-0397.
- [6] 乔健, 寇淑清, 杨慎华, 等. 中空装配式凸轮轴连接技术及应用[J]. *车用发动机*, 2007(1): 1-4.
- Qiao Jian, Kou Shu-qing, Yang Shen-hua, et al. Joint technology for hollow assembled camshaft and its application[J]. *Vehicle Engine*, 2007(1): 1-4.
- [7] Hagedorn M, Weinert K. Manufacturing of composite workpieces with rolling tools[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 153-154: 323-329.
- [8] 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.