

新型滚动轴承结构参数对印刷压力的影响

杨文¹, 颜伟², 余江鸿³, 姚齐水³, 黄剑锋¹, 邝允新¹

(1. 湖南铁道职业技术学院 智能制造学院, 湖南 株洲 412001;

2. 驻贵阳地区第三军代表室, 贵阳 550081; 3. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: **目的** 为优化印刷滚筒的挠曲变形, 有效提升其支承性能, 改善印刷滚筒的压力分布。**方法** 选择预负荷弹性复合圆柱滚子轴承作为变刚度印刷滚筒传动支承部件, 基于等效刚度模型计算不同填充度预负荷弹性复合圆柱滚子轴承的刚度, 分析预负荷弹性复合圆柱滚子轴承结构参数变化对刚度的影响, 构建变刚度印刷滚筒支承系统力学模型, 通过有限元仿真分析预负荷弹性复合圆柱滚子轴承刚度对变刚度印刷滚筒印刷压力的影响。**结果** 结果表明, 随着滚动体填充度的增加, 预负荷弹性复合圆柱滚子轴承的径向刚度减小, 变刚度印刷滚筒挠曲变形不同程度增大, 结合疲劳寿命角度综合考虑, 选择填充度在 45%~50% 的预负荷弹性复合圆柱滚子轴承作为印刷滚筒的弹性支承, 其最大挠曲变形量较普通圆柱滚子轴承平均下降了 9.5%。**结论** 在保证疲劳寿命的前提下, 有效改善了印刷滚筒压力分布的均匀性, 提升了印刷质量。

关键词: 变刚度印刷滚筒; 预负荷弹性复合圆柱滚子轴承; 刚度; 挠曲变形; 印刷压力

中图分类号: TH133.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)17-0123-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.17.016

Effect of Structural Parameters of New Rolling Bearing on Printing Pressure

YANG Wen¹, YAN Wei², YU Jiang-hong³, YAO Qi-shui³, HUANG Jian-feng¹, KUANG Yun-xin¹

(1. School of Intelligent Manufacturing, Hunan Railway Professional Technology College, Hunan Zhuzhou 412001, China;

2. The Third Representative Office in Guiyang, Guiyang 550081, China; 3. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Hunan Zhuzhou 412007, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the deflection deformation of printing cylinder to effectively enhance the support performance and improve the pressure distribution of printing cylinder. The preloaded elastic composite cylindrical roller bearing (PECCRB) was selected as the transmission support component for variable stiffness printing cylinder. Based on the equivalent stiffness model, the stiffness of PECCRB with different filling degree was calculated, and the effect of structural parameters of PECCRB on stiffness was analyzed. Besides, the mechanical model of variable stiffness printing cylinder support system was constructed, and the effect of PECCRB stiffness on the printing pressure of variable stiffness printing cylinder was analyzed by finite element simulation. The results showed that with the increase of the filling degree of the rolling element, the radial stiffness of the PECCRB decreased and the deflection deformation of the variable stiffness printing cylinder increased in varying degree. Considering the fatigue life, the PECCRB with the filling degree of 45% ~ 50% was selected as the elastic support of the printing cylinder. In addition, compared with ordinary cylindrical roller bearings, the maximum deflection of printing cylinder with PECCRB was reduced by 9.5%. On the premise of ensuring the fatigue life, the uniformity of pressure distribution of printing cylinder is effectively

收稿日期: 2021-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(51175168); 湖南省自然科学基金(2021JJ60069); 湖南省教育厅优秀青年项目(21B0897)

作者简介: 杨文(1987—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为机械结构与系统动力学。

通信作者: 邝允新(1982—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为机械设计。

improved and the printing quality is enhanced.

KEY WORDS: variable stiffness printing cylinder; preloaded elastic composite cylindrical roller bearing; stiffness; deflection deformation; printing pressure

高质量的印刷过程是图文完整地转印到承印物上, 并达到印刷品色彩均匀和饱满的要求^[1]。印刷滚筒是印刷设备的核心部件, 图文信息需要多个印刷滚筒相互接触压印, 并借助合适的印刷压力进行转移^[2]。由于印刷滚筒承受多种载荷作用, 不可避免会产生挠曲变形, 在印刷过程中因局部接触区域印刷压力不足, 极易导致印刷品图文印制不完整和印制标准色彩有较大差距等问题^[3]。

为了改善印刷滚筒的挠曲变形对印刷质量的影响, 海德堡印刷机械公司^[4]提出通过优化滚筒结构尺寸、空间布局以及加强筋的数量, 以提高滚筒的刚度; 高占习等^[5]基于有限元方法, 结合现有生产工艺, 提出滚筒优化方案, 为许用最大挠度下高精度的滚筒设计提供参考; 刘琳琳等^[6]通过对滚筒挠曲变形的有限元分析, 研究滚筒挠曲变形特性, 对滚筒结构进行优化, 得出一种非均匀分布翘形加强筋印刷滚筒结构。以上研究通过优化滚筒结构, 对防止印刷滚筒的周向挠曲变形具有一定效果, 然而印刷滚筒在材料选择和生产工艺上受到限制, 其滚筒的轴向的挠曲变形并未从根本上进行改善。为此, 李超等^[7]从另一视角提出了变刚度印刷滚筒结构设计方法, 与常规滚筒相比, 变刚度印刷滚筒抵抗轴向挠曲变形更具优势。

通过优化印刷滚筒结构, 在一定程度上降低了滚筒的挠曲变形, 印刷质量得到了一定改善, 但受到支承方式的制约, 印刷压力分布不均的问题还有待进一步解决。在印刷过程中, 支承轴承的刚度是影响滚筒轴向挠曲变形的关键因素, 对印刷压力分布情况产生直接的影响。在印刷滚筒的支承轴承研究方面, 陈瑞燕等^[8]研究了静态轴承游隙对印刷压力的影响, 表明了随着轴承的游隙增大会导致印刷压力下降; 钱进^[9]着重分析了胶印机滚筒支承方式的改进, 得出滚动轴承游隙取负值时有利于改善滚筒支承的刚性。

目前, 印刷滚筒支承系统的研究主要集中在普通圆柱滚子轴承方面, 随着印刷机高速发展, 普通圆柱滚子轴承由于其结构固有的局限性, 承载能力较差、旋转精度不高、高速重载易损等问题突显, 难以满足印刷滚筒实现高质量印刷的需求。预负荷弹性复合圆柱滚子轴承^[10]是一种新型滚动轴承, 其特点是在空心圆柱滚动体内孔两端设计有深穴(倒角), 在内孔中嵌入高分子材料——聚四氟乙烯(PTFE)^[11], 形成弹性复合圆柱滚动体。滚动体新的结构型式及内嵌高分子材料优良的物理特性, 使滚动体的受力状况得到明显的改善, 增强了轴承的承载能力^[12-14]。前期研究^[15-17]表明, 与普通圆柱滚子轴承相比, 预负荷弹性复合圆柱滚子轴承作为印刷滚筒

支承能部件为印刷滚筒提供过压保护和改善印刷滚筒的支承性能。

文中在前期研究^[7,15]基础上, 为了改善变刚度印刷滚筒支承系统的承载性能, 选取预负荷弹性复合圆柱滚子轴承作为变刚度印刷滚筒传动支承部件, 研究预负荷弹性复合圆柱滚子轴承的结构参数对其刚度的影响, 建立等效刚度数学模型, 分析预负荷弹性复合圆柱滚子轴承刚度变化对印刷滚筒印刷压力的影响规律, 提出有效改善印刷滚筒压力均匀分布的设计方案。

1 轴承的载荷分布

预负荷弹性复合圆柱滚子轴承是将滚动体通过过盈装配在轴承的内外圈之间, 使轴承产生内部应力, 每个滚动体都受到预载荷的作用, 有利于提高轴承刚度, 预负荷弹性复合圆柱滚子滚动体静态受力见图1。载荷是通过滚动体由一个圈套传递到另一个圈套, 因此, 对轴承承载能力起决定作用的是滚动体承受载荷的能力^[18]。在实际工况中, 滚动体受力复杂, 为便于分析计算, 作如下假设: 各滚动体所受的预载荷相同; 轴承的内外圈作为刚性体不发生弹性形变, 固定轴承外圈; 假定某个滚动体的中截面一直处于径向载荷作用线上, 记0号滚动体位于径向载荷作用线正下方, 其径向载荷为 Q_0 , 产生的理论变形量为 δ_0 , 以0号滚动体为中心对左右两侧对称的其余滚动体依次进行编号, 第 i 个滚子承受载荷为 Q_i , 弹性变形为 δ_i 。

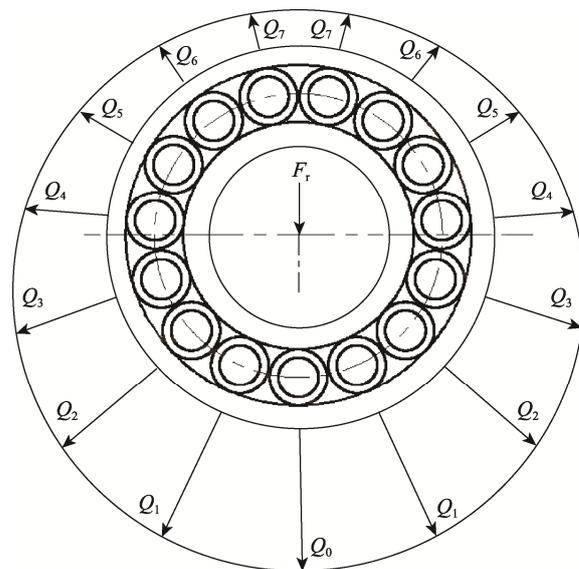


图1 静态承载受力图
Fig.1 Static bearing diagram

根据静态情况下弹性复合圆柱滚子轴整体受力平衡条件, 建立平衡方程, 见式 (1)。

$$F_r = Q_0 + 2 \sum_{i=1}^n Q_i \cos \varphi_i \quad (1)$$

式中: φ_i 为第 i 个滚动体承受载荷 Q_i 与径向载荷正方向的夹角; n 为复合弹性圆柱滚子轴承单边滚动体数。

径向载荷的作用线上滚动体与其余各滚动体变形量的关系式为:

$$\frac{\delta_i}{\delta_0} = \cos \varphi_i \quad (2)$$

滚动体变形量与载荷之间关系为:

$$\delta_i = K_t Q_i^t \quad (3)$$

式中: K_t 为线性弹性变形系数, 线性接触时 $t=0.9$ 。

通过式 (1) — (3) 建立径向载荷 F_r 与 Q_0 之间的关系:

$$Q_0 = \frac{F_r}{1 + 2 \sum_{i=1}^n \cos^{1/t+1} \varphi_i} \quad (4)$$

对于圆柱滚子轴承来说存在:

$$J_r = \frac{1 + 2 \sum \cos^{1/t+1} \varphi}{Z} \quad (5)$$

式中: Z 为滚子的数目; 一般取 $J_r=1/4.08$ 。

将式 (5) 代入式 (4) 可得:

$$Q_0 = \frac{4.08 F_r}{Z} \quad (6)$$

2 轴承刚度对印刷压力的影响分析

刚度是滚动轴承重要性能参数之一, 反应轴承受载荷时抵抗变形一种性能^[19]。滚动轴承的刚度定义为外载荷与轴承内、外圈形成相对位移之间的关系。根据预负荷下弹性复合圆柱滚子轴承静态承载受力情况, 可得其径向刚度为:

$$K = \frac{F_r}{\delta_0} \quad (7)$$

虽然印刷滚筒具有较大刚性, 但是在自身重力和印刷压力下, 印刷滚筒不可避免地会产生挠曲变形, 而支承印刷滚筒的轴承刚度直接影响印刷滚筒整体挠曲变形。若将轴承等效为弹簧, 印刷滚筒视为圆柱型弹性筒支梁, 根据印刷滚筒两端轴承刚度与印刷滚筒的挠曲变形关系建立理论模型, 见图 2。

图 2 中, K 为轴承等效刚度, X 为印刷滚筒振动位移量, F_d 为印刷压力集中等效力。

印刷滚筒振动位移量直接表现为滚筒衬垫压缩变化量。静态条件下, 印刷滚筒接触区域宽度与衬垫材料变形量的关系有^[3]:

$$F_d = \sqrt[n]{E \times \frac{\lambda}{\delta}} \quad (8)$$

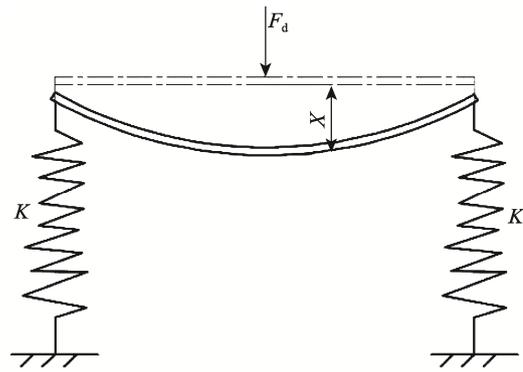


图 2 印刷滚筒弹簧支承简图
Fig.2 Diagram of spring support of printing cylinder

式中: E 、 δ 、 n 为与衬垫材料相关的参数; λ 为衬垫的压缩量。

对式 (8) 两端同时微分得:

$$n F_d^{n-1} dF_d = \frac{E}{\delta} \times d\lambda \quad (9)$$

令 $d\lambda = X$ 得:

$$\left| \frac{\Delta F_d}{F_d} \right| = \frac{E}{n\delta} \times X \times p_d^{-n} = \frac{X}{n\lambda} \quad (10)$$

通过式 (10) 可知, 压力变化率 $\left| \frac{\Delta F_d}{F_d} \right|$ 与振动量 X 成正比, 振动量 X 越小, 印刷压力的变化率也就越小, 印刷压力也易于保持稳定。

3 预负荷弹性复合圆柱滚子轴承径向刚度计算

有限元方法对复杂工程应用问题处理和解决起着重要作用, ABAQUS 在非线形仿真分析具有明显优势。文中选取 ABAQUS 软件作为轴承和印刷滚筒有限元分析的技术手段。

3.1 相关参数的设定

预负荷弹性复合圆柱滚子轴承的基本参数见表 1。填充度^[20]大小直接影响轴承的刚度, 填充度过小则无法体现预负荷弹性复合圆柱滚动体性能优势; 填充度过大则轴承承载能力过低, 因此选择填充度为 40%~70% (跨度为 5%) 的弹性复合圆柱滚子轴承作为分析对象。弹性复合圆柱滚子轴承内、外圈以及滚动体材料选取轴承钢 GCr15, 其弹性模量为 2.07×10^5 MPa、泊松比为 0.3; 假设内、外圈不发生变形, 取内、外圈弹性模量为 2.06×10^8 MPa, 泊松比仍为 0.3; 填充材料 PTFE 弹性模量为 280 MPa、泊松比为 0.4。

表 1 预负荷弹性复合圆柱滚子轴承的基本尺寸
Tab.1 Basic dimensions of preloaded elastic composite cylindrical roller bearing

内圈直径 D_1 /mm	外圈直径 D_2 /mm	宽度 b /mm	滚动体直径 D /mm	滚动体长度 L /mm	滚动体数目 Z /个
100	215	47	32	32	15

3.2 建模与网格划分

根据 3.1 节相关参数, 取预负荷弹性复合圆柱滚子轴承部分内、外圈, 以及径向载荷的作用线上的 1/4 滚动体建立三维接触模型。图 3 为三维模型的网格划分, 在采用有限元分析时, 对连续实体模型进行离散化是进行有限元求解的必要条件, 模型离散化程度直接影响着非线性接触问题的误差, 对轴承进行有限元建模, 局部的网格密化能提高计算精度, 但会增加计算成本; 同时有限元模型中网格的质量同样决定了分析的准确性。六面体网格具备求解精度高、收敛速度快、变形特性好、单元数量少、计算成本低等优点^[21], 为了保证模型计算精度, 在滚动体与内、外圈接触区域适当密化网格。由于模型形状比较规则, 因此控制各部件网格类型为六面体。

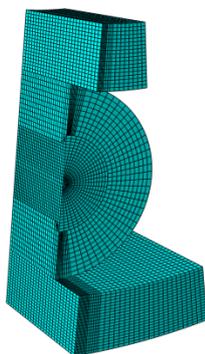


图 3 弹性复合圆柱滚子轴承分析模型网格划分
Fig.3 Mesh generation of analytical model of elastic composite cylindrical roller bearing

3.3 定义边界条件和加载

边界条件的设置将直接影响计算结果的正确性^[22]。轴承外圈一般安装在轴承座上, 轴承内圈通过轴肩定位过盈安装在旋转轴上, 轴承外圈与轴承座不会发生相对转动, 因此约束外圈外表面全部自由度, 同时约束内圈、滚动体和填充材料端面轴向自由度, 以及在剖分出施加对称约束。考虑到轴承还有 $\Delta=0.03$ mm 的过盈量, 在已创建的分析步中对轴承内圈在径向施加 0.03 mm 的位移来模拟过盈, 模型边界条件见图 4。

在印刷时, 印刷区域长度为 1.85 mm; 工作时的印刷压力控制在 0.8~1.2 MPa, 取印刷压力为 1.2 MPa; 印刷滚筒以及附件的重力 $G=5\ 700$ N; 印刷时的印痕宽度取 0.007 m, 计算出施加在轴承上的径向载荷

$F_r=10\ 570$ N, 结合式 (6), 求得 $Q_0=2\ 888.64$ N, 在轴承内圈上面创建一个 RP1 点, 将该点与轴承内圈上表面进行耦合, 在第 2 个分析步对参考点 RP1 施加径向载荷 $Q_0/4$, 设置其他相应求解选项后, 对该模型求解。

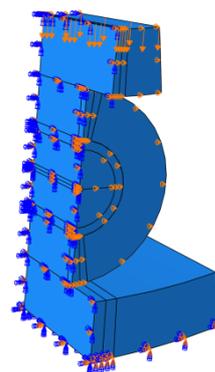


图 4 预负荷弹性复合圆柱滚子轴承的边界条件
Fig.4 Boundary conditions of preloaded elastic composite cylindrical roller bearing

3.4 分析结果与讨论

工作服役状态下, 弹性复合圆柱滚动体与内外圈的位移变化云图见图 5。因假设内外圈不发生形变, 所以内圈径向位移大小就是滚动体所产生的径向变量, 通过提取在第 2 个分析步下内圈内径表面所有节点的位移值, 取其均值得到滚动体径向变形量, 表 2 为不同填充度的滚动体径向变形量 δ_0 , 以及根据式 (7) 计算出相应填充度的弹性复合圆柱滚子轴承的径向刚度值。从表 2 中可以看出, 随着弹性复合圆柱滚动体填充度的增大, 径向变形量 δ_0 有不同程度的增大, 轴承径向刚度 K 也有不同程度减小。

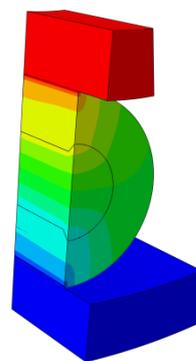


图 5 预负荷弹性复合圆柱滚子轴承位移云图
Fig.5 Cloud map for displacement of preloaded elastic composite cylindrical roller bearing

表 2 不同填充度弹性复合圆柱滚子轴承径向变形量以及轴承径向刚度 K

Tab.2 Radial deformation and radial stiffness K of elastic composite cylindrical roller bearing with different filling degree

填充度/%	变形量/ (10^{-3} mm)	径向刚度 K / ($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)
40	3.625	2 916.18
45	4.243	2 491.2
50	5.178	2 041.53
55	6.616	1 597.6
60	8.918	1 185.31
65	12.848	822.72
70	16.103	528.95

4 变刚度印刷滚筒挠曲变形有限元分析

4.1 相关参数的设定

变刚度印刷滚筒改善了常规印刷滚筒在铸造过程中形成的渣眼、缩松和黏砂等缺陷, 其内部结构特征见图 6。筒体与芯轴在轴向通过 4 个圆幅型加强筋进行连接, 中间位置的加强筋与内撑板相连, 在筒体和芯轴之间形成中空部分以达到轻量化设计的目的^[6]。在材料属性方面, 其中筒体和芯轴材料均采用 45 钢, 弹性模量为 2.1×10^5 MPa, 泊松比为 0.31, 密度为 $7\ 850\ \text{kg}/\text{m}^3$; 加强筋和内撑板的材料均采用 Q235, 弹性模量为 2.045×10^5 MPa, 泊松比为 0.25, 密度为 $7\ 850\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

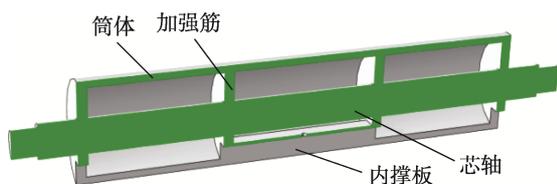


图 6 变刚度印刷滚筒结构示意图
Fig.6 Structural diagram of variable stiffness printing cylinder

4.2 定义边界条件及加载

参照图 2 在 ABAQUS 中建立变刚度印刷滚筒弹簧支承模型, 可根据表 2 对弹簧劲度系数进行取值。在添加边界条件时, 约束两端轴承外圈外表面全部自由度。因为只考虑滚筒径向挠曲变形, 所以对变刚度印刷滚筒轴颈端面除径向位移自由度外的其余自由度进行约束。在印刷时, 变刚度印刷滚筒的印痕宽度为 $0.007\ \text{m}$, 该区域的均布压力为 $1.2\ \text{MPa}$ 。由于重力不可忽略, 所以对变刚度印刷滚筒施加重力载荷, 模型边界条件及加载见图 7。

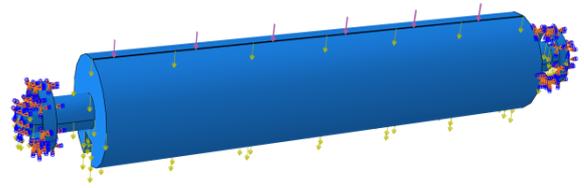


图 7 边界条件及加载
Fig.7 Boundary conditions and loading

4.3 分析结果与讨论

图 8 所示为变刚度印刷滚筒位移云图, 取压力作用区域相应的节点变形值进行插值, 得到如图 9 所示在不同填充度弹性支承下滚筒挠曲变形。图 9 中横坐标轴向距离原点处为印刷滚筒印刷区域端部, 随着轴向距离的增大, 即越接近印刷滚筒印刷区域另一端面处。从图 9 中看出, 不同弹性支承的印刷滚筒挠曲变形规律基本相同; 随着填充度增加, 印刷滚筒相同位置的变形量也增大; 曲线不是规则的“抛物曲线”, 印刷滚筒由于加强筋的作用其附近的挠曲变形有小幅下降, 改善了其印刷压力分布的均匀性。

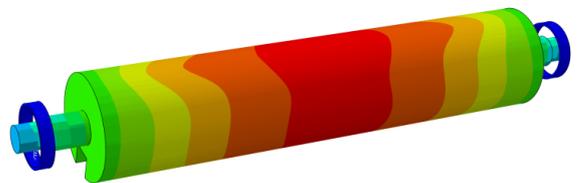


图 8 变刚度印刷滚筒位移变化云图
Fig.8 Cloud map of displacement change of variable stiffness printing cylinder

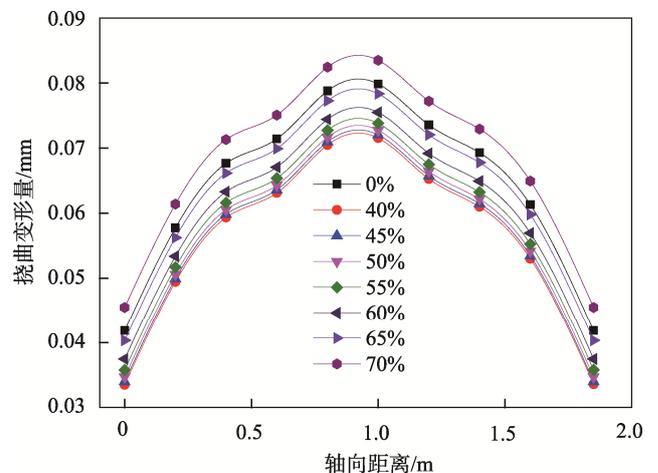


图 9 不同弹性支承的变刚度印刷滚筒的挠曲变形对比
Fig.9 Comparison of deflection of variable stiffness printing cylinder with different elastic supports

最大挠曲变形发生在滚筒中部位置,不同弹性支承的变刚度印刷滚筒挠曲的最大变形量见图 10。由于填充度低于 40%的预负荷弹性复合圆柱滚子轴承受到制造和安装等因素限制,且较小填充度的弹性复合圆柱滚子轴承内嵌的高分子材料的物理性能作用有限,一般情况下不考虑填充度低于 40%的预负荷弹性复合圆柱滚子轴承。当填充度为 40%~70% (跨度为 5%) 的预负荷弹性复合圆柱滚子轴承作为弹性支承时,变刚度印刷滚筒的最大变形量依次为 0.072 1、0.072 5、0.073 2、0.074 3、0.076 0、0.078 9、0.084 0 mm,同时也对比分析了当普通圆柱滚子轴承(填充度为 0%)作为支承时,变刚度印刷滚筒的最大变形量(0.080 5 mm)。由此可见,印刷滚筒的最大挠曲变形量随着预负荷弹性复合圆柱滚子轴承填充度增大其增幅也有不同程度增大。当填充度为 40%~55%的预负荷弹性复合圆柱滚子轴承作为弹性支承时,印刷滚筒的最大挠曲变形量差距不大,且相较于填充度为 60%~70%和 40%~55%的预负荷弹性复合圆柱滚子轴承作为弹性支承时,印刷滚筒的最大挠曲变形量较小,印刷压力相对较稳定,印品质量相对较高。根据大量研究表明^[15],填充度为 40%~70%的预负荷弹性复合圆柱滚子轴承,随着填充度增大,其最大等效应力先逐渐降低后显著增大,且在填充度为 65%时达到最低值。最大等效应力是影响轴承疲劳寿命的关键指标,从疲劳寿命角度考虑,预负荷弹性复合圆柱滚子轴承的最佳填充度为 45%~65%。综合考虑,选择填充度为 45%~50%的预负荷弹性复合圆柱滚子轴承作为印刷滚筒的弹性支承,既提升了印品印刷质量,同时也有效保证了轴承疲劳寿命。对比分析填充度为 45%~50%的预负荷弹性复合圆柱滚子轴承和普通圆柱滚子轴承作为印刷滚筒支承的性能,前者较后者的最大挠曲变形量平均下降了 9.5%,有效改善了印刷滚筒压力分布的均匀性,提升了印刷质量。

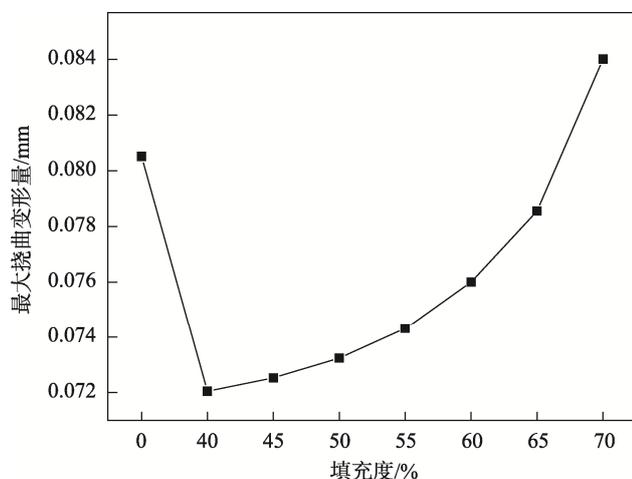


图 10 不同弹性支承的变刚度印刷滚筒最大挠曲变形量
Fig.10 Maximum deflection of variable stiffness printing cylinder with different elastic supports

5 结语

填充度是影响轴承刚度的重要因素,随着填充度增大,预负荷弹性复合圆柱滚子轴承刚度有不同程度地减小。

印刷滚筒由于加强筋的作用,其附近的挠曲变形有小幅下降,其印刷压力分布的均匀性局部有了有效改善,提高了整体印刷质量。

不同填充度的预负荷弹性支承对变刚度印刷滚筒挠曲变形影响不同,填充度为 40%~55%的弹性复合圆柱滚子轴承作为变刚度印刷滚筒支承部件时,印刷滚筒整体挠曲变形量差距不大,结合疲劳寿命角度综合考虑,选择填充度为 45%~50%的预负荷弹性复合圆柱滚子轴承作为印刷滚筒的弹性支承,其最大挠曲变形量较普通圆柱滚子轴承平均下降了 9.5%,在保证印刷滚筒疲劳寿命的前提下,有效改善了其压力分布的均匀性,提升了印刷质量。

参考文献:

- [1] 李子焄. 印刷压力变化对印刷质量的影响及补偿措施的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015: 8-12.
LI Zi-tao. The Research of Influence and Improvement of Printing by Printing Pressure[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015: 8-12.
- [2] 冯载荣. 胶印机印刷滚筒性能分析与结构优化研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009: 3-5.
FENG Zai-rong. A Study of the Performance Analysis and Structural Optimization of the Printing Cylinder of the Offset Press[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009: 3-5.
- [3] 张海燕. 印刷机设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2006: 13-18.
ZHANG Hai-yan. Printing Machine Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2006: 13-18.
- [4] 海德堡印刷机械公司. 机械媒体技术手册[M]. 广州: 世界图书出版公司, 2004: 35.
Heidelberg Printing Machinery Company. Technical Manual of Mechanical Media[M]. Guangzhou: World Book Publishing Company, 2004: 35.
- [5] 高占习, 武吉梅, 陈艳丽, 等. 基于有限元方法的滚筒结构分析及设计[J]. 北京印刷学院学报, 2010, 18(6): 38-40.
GAO Zhan-xi, WU Ji-mei, CHEN Yan-li, et al. Cylinder Structure Analysis and Designs Based on Finite Element Method[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2010, 18(6): 38-40.
- [6] 刘琳琳, 冯载荣, 王常兴. 基于有限元接触分析的印刷滚筒压力仿真与结构优化[J]. 中国印刷与包装研究, 2010, 2(S1): 308-310.

- LIU Lin-lin, FENG Zai-rong, WANG Chang-xing. Performance Research and Structure Optimize on Printing Cylinder Based on Finite Element Contact Analysis[J]. China Printing and Packaging Study, 2010, 2(S1): 308-310.
- [7] 李超. 变刚度印刷滚筒结构设计与支承性能研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2016: 8-10.
- LI Chao. Research on Structure Design and Supporting Performance of Adjustable Stiffness Printing Cylinder[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2016: 8-10.
- [8] 陈瑞燕, 张海燕. 基于接触力学的圆柱滚子轴承刚度对印刷压力的影响分析[J]. 中国印刷与包装研究, 2010, 2(1): 42-46.
- CHEN Rui-yan, ZHANG Hai-yan. Analysis of the Influence of the Rigidity of Cylindrical Roller Bearing on Printing Pressure Based on Contact Mechanics[J]. China Printing and Packaging Study, 2010, 2(1): 42-46.
- [9] 钱进. 胶印机滚筒支承方式的改进[J]. 印刷世界, 2008(2): 40-41.
- QIAN Jin. Improvement of Support Mode of Offset Press Cylinder[J]. Print World, 2008(2): 40-41.
- [10] 姚齐水. 一种弹性复合圆柱滚子轴承: 中国, 202048098U[P]. 2011-11-23.
- YAO Qi-shui. Adjustable Positioning Rolling-Sliding Radial Composite Bearing: China, 202048098U[P]. 2011-11-23.
- [11] 杨文, 姚齐水, 余江鸿, 等. 弹性复合圆柱滚子轴承承载性能的理论研究[J]. 机械传动, 2013, 37(5): 6-9.
- YANG Wen, YAO Qi-shui, YU Jiang-hong, et al. Research of Carrying Capacity of Elastic Composite Cylindrical Roller Bearing[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2013, 37(5): 6-9.
- [12] YAO Qi-shui, YANG Wen, YU De-jie, et al. Bending Stress of Rolling Element in Elastic Composite Cylindrical Roller Bearing[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(12): 3437-3444.
- [13] YU J, ZHANG R, YANG W, et al. Dynamic Contact Characteristics of Elastic Composite Cylindrical Roller Bearing[J]. The Open Mechanical Engineering Journal, 2015, 9: 703-708.
- [14] 余江鸿, 杨文, 李超, 等. 弹性复合圆柱滚动体的加工工艺[J]. 中国机械工程, 2015, 26(12): 1616-1621.
- YU Jiang-hong, YANG Wen, LI Chao, et al. Machining Technology for Elastic Composite Cylindrical Rollers[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(12): 1616-1621.
- [15] 姚齐水, 李超, 王勇, 等. 基于预负荷弹性支承的印刷滚筒承载性能研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(23): 3214-3220.
- YAO Qi-shui, LI Chao, WANG Yong, et al. Research on Bearing Behaviors of Printing Cylinder Based on Pre-load Elastic Supporting[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(23): 3214-3220.
- [16] 向磊, 姚齐水, 李超, 等. 基于正交试验的新型印刷滚筒结构优化[J]. 包装工程, 2019, 40(7): 210-216.
- XIANG Lei, YAO Qi-shui, LI Chao, et al. Structure Optimization of New Type Printing Cylinder Based on Orthogonal Test[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(7): 210-216.
- [17] 李超, 姚齐水, 向磊, 等. 新型印刷滚筒结构设计与挠曲变形分析[J]. 包装工程, 2018, 39(21): 144-149.
- LI Chao, YAO Qi-shui, XIANG Lei, et al. Structure Design and Flexural Deflection of New Type Printing Cylinder[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(21): 144-149.
- [18] 王进堂. 基于印刷机滚筒轴承接触问题的有限元分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2009: 4-6.
- WANG Jin-tang. The Finite Element Analysis Basing on the Contact Problem for Cylinder Roller Bearing of Printing Machine[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009:4-6.
- [19] HONG S W, TONG V C. Rolling-Element Bearing Modeling: A Review[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 17(12): 1729-1749.
- [20] 姚齐水, 张然, 明兴祖, 等. 弹性复合圆柱滚子轴承静态径向刚度分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(22): 3085-3089.
- YAO Qi-shui, ZHANG Ran, MING Xing-zu, et al. Static Radial Stiffness Analysis of Elastic Composite Cylindrical Roller Bearings[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(22): 3085-3089.
- [21] MAEDA T, NOGUCHI S, YAMASHITA H, et al. An Automatic Hexahedral Mesh Generation Method for Hexahedral Elements towards Rotating Machine[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 161(1/2): 101-106.
- [22] 李涛, 左正兴, 廖日东. 结构仿真高精度有限元网格划分方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 304-308.
- LI Tao, ZUO Zheng-xing, LIAO Ri-dong. Meshing Method of High Precision FEM in Structural Simulations[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 304-308.