

基于正交试验的新型印刷滚筒结构优化

向磊¹, 姚齐水¹, 李超¹, 杨文², 余江鸿¹

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 株洲 412007;

2. 湖南铁道职业技术学院 轨道交通装备智能制造学院, 株洲 412001)

摘要: **目的** 为了优化变刚度印刷滚筒结构, 有效提升其抗轴向挠曲变形能力, 改善印刷压力分布不均匀的状况。**方法** 根据轴承径向载荷分布理论, 建立变刚度印刷滚筒的等效支撑模型, 利用有限元分析变刚度印刷滚筒轴向挠曲的变形情况, 选出对其挠曲变形影响较大的因素, 通过正交试验法建立变刚度印刷滚筒结构分布及结构尺寸的试验组, 采用极差分析法, 以变刚度印刷滚筒最大挠曲变形量为评判指标, 分析各因素对轴向挠曲变形的影响主次程度及影响规律, 得出较优的结构分布和结构尺寸。**结果** 筒体壁厚、加强筋数量对变刚度印刷滚筒最大挠曲变形的影响程度较大, 加强筋厚和芯轴直径的影响程度次之; 优化后, 变刚度印刷滚筒中部挠曲变形得到了改善, 轴向最大挠曲变形量降低 10.2%。**结论** 合理改进变刚度印刷滚筒结构可减小其轴向挠曲变形, 有效地提升了印品质量。

关键词: 变刚度印刷滚筒; 挠曲变形; 正交试验法; 有限元; 极差分析法

中图分类号: TH133.3; TS803.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)07-0210-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.07.032

Structure Optimization of New Type Printing Cylinder Based on Orthogonal Test

XIANG Lei¹, YAO Qi-shui¹, LI Chao¹, YANG Wen², YU Jiang-hong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;

2. School of Rail Transportation Equipment Intelligent Manufacturing, Hunan Railway Professional Technology College, Zhuzhou 412001, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the structure of the variable-stiffness printing cylinder to effectively improve its resistance to axial deflection deformation and improve the uneven distribution of printing pressure. According to the radial load distribution theory of bearing, the equivalent support model of variable-stiffness printing cylinder was established. The finite element analysis of the axial deflection deformation of the variable-stiffness printing cylinder was used to select the factors that have great influence on the deflection deformation. The experimental group of variable-stiffness printing cylinder structural distribution and structural size was established by the orthogonal test method. Extremum difference analysis was carried out to judge the maximum deflection deformation of the variable-stiffness printing cylinder as the evaluation index, and analyze influences of various factors on the axial deflection deformation. The degree of primary and secondary and the law of influence were analyzed to obtain a better structural distribution and structural size. The results showed that the thickness of the cylinder and the number of ribs had greater influences on the maximum deflection deformation of the variable-stiffness printing cylinder, and the reinforcement rib thickness and the mandrel diameter were

收稿日期: 2018-11-21

基金项目: 湖南省自然科学基金(2017JJ4025); 湖南省教育厅科研项目(16C0487); 湖南省教育厅优秀青年资助项目(17B178)

作者简介: 向磊(1994—), 男, 湖南工业大学硕士生, 主攻机构学和机械动力学。

通信作者: 姚齐水(1967—), 男, 博士, 湖南工业大学教授, 主要研究方向为机构学与机械动力学、机械零部件安全服役科学。

the second; after optimization, the deflection deformation of the variable-stiffness printing cylinder was improved, and the axial maximum deflection deformation was reduced by 10.2%. Reasonable improvement of the variable-stiffness printing cylinder structure can reduce its axial deflection deformation and effectively improve the quality of the printed matters.

KEY WORDS: variable-stiffness printing cylinder; deflection deformation; orthogonal test; finite element; extremum difference analysis

理想的印刷过程是将印版上的图文完整地转印到承印物上,同时达到印品墨色饱满、均匀的要求^[1]。随着印刷业的迅速发展,印刷设备不断更新,高品质印品生产已成为印刷业的发展趋势^[2]。印刷滚筒是印刷设备中图文信息转移的关键部件,印刷过程中滚筒在印刷压力和自身重力的作用下,不可避免地发生挠曲变形,易造成中间接触区域处印刷压力不足,导致印品出现图文转移不完整、与标准色调相差较大等问题^[3],因此,如何有效地改善印刷滚筒的挠曲变形对提升印品质量具有重要的意义。

近年来,有限元技术应用于印刷设备的设计,克服了印刷滚筒传统设计方法的弊端,为滚筒的优化设计提供了科学依据。高占习等^[4]利用有限元法分析了带有纵横交错加强筋印刷滚筒的结构参数对其挠曲变形的影响,并提出了优化方案。刘琳琳等^[5]基于有限元接触理论,研究了印刷滚筒轴向、周向的变形规律,并提出一种翅型加强筋,较好地改善了滚筒印刷压力分布不均状况。沈斌等^[6]通过拓扑优化和尺寸优化相结合的设计方法确定滚筒最佳材料分布方案以及加强筋厚度、筋板弧度等具体尺寸,提高了滚筒的抗弯刚度。张庆山等^[7]应用 Ansys Workbench 优化了模切机印刷滚筒加强筋分布间距、外筒直径和内轴半径尺寸参数,改善了滚筒抗挠度变形的能力。端木兵帅^[8]根据印刷滚筒挠曲变形特征与印刷压力分布规律,建立了滚筒结构优化数学模型,通过 Ansys Workbench 采用多目标遗传算法改进滚筒的结构尺寸,减小滚筒的挠曲变形。这些研究从一定程度上改善了滚筒的挠曲变形,提高了印刷设备的精度,印品质量在一定程度上得到了提升,但由于受到印刷滚筒材料选择和工艺方法的制约,改善印刷滚筒轴向挠曲变形并没有找到理想的解决方案。为此,李超^[9]提出了变刚度印刷滚筒结构设计方法,通过结构优化有效地克服了传统印刷滚筒筒体铸造缺陷。与常规印刷滚筒相比,变刚度印刷滚筒在抵抗轴向挠曲变形方面更具优势。

变刚度印刷滚筒是一种新型印刷滚筒,其最优的结构特征还值得进一步研究,使其在满足工作可靠性以及制造的经济性的角度上更加完善,适应高品质印刷发展需求。在以往印刷滚筒的优化中,一般将滚筒轴承视为刚性支承,忽略了轴承的刚度对印刷滚筒挠曲的影响,因此,文中以变刚度印刷滚筒为研究对象,从其支承层面出发,根据轴承载荷分布情况,建立等

效刚度模型,通过有限元法分析变刚度印刷滚筒挠曲变形规律,采用正交实验法对其结构分布及结构尺寸进行优化,使其抗挠曲变形能力进一步提升,为变刚度印刷滚筒的加工制造及工程应用提供理论指导。

1 变刚度印刷滚筒结构特征

变刚度印刷滚筒实物图见图 1,沿其空挡部分全剖结构见图 2。在结构设计方面,变刚度印刷滚筒主要由筒体、加强筋、芯轴以及内撑板组成,筒体与芯轴间焊接有 4 个均布的环形加强筋,中间 2 个加强筋通过内撑板焊接连接,变刚度印刷滚筒具体结构尺寸见表 1。在材料选择方面,筒体和芯轴采用刚性以及切削加工性较好的 45 钢,加强筋和内撑板采用优良焊接性能的 Q235 材料,筒体和芯轴材料的选择从根本上改善了常规印刷滚筒铸造时存在的缺陷,如金属在液体凝固期间产生收缩容易造成缩孔和缩松、铁水纯净度不高和浇注挡渣不当引起的渣眼等缺陷,延长了滚筒工作寿命^[10]。

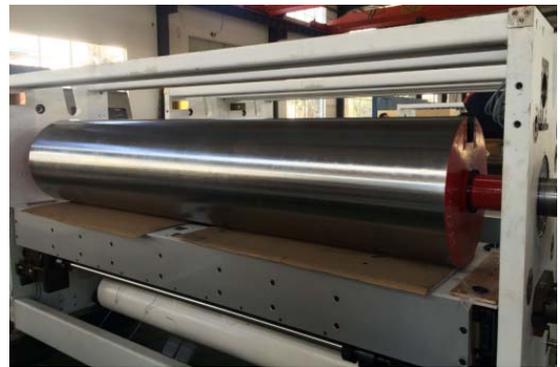


图 1 变刚度印刷滚筒实物

Fig.1 Physical diagram of variable-stiffness printing cylinder

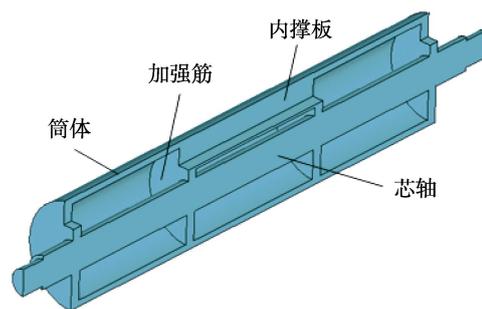


图 2 变刚度印刷滚筒结构

Fig.2 Structure diagram of variable-stiffness printing cylinder

表 1 变刚度印刷滚筒结构尺寸
Tab.1 Structure size of variable-stiffness printing cylinder

滚筒长度 L	筒体外径 D	芯轴直径 D_1	滚筒壁厚 B	筋板厚度 J	轴颈直径 D_2
1850	394	120	24	40	100

2 建立等效支撑模型

圆柱滚子轴承是印刷滚筒重要的支承部件,在印刷过程中,承受印刷滚筒本身的重力、印刷压力。作用在圆柱滚子轴承上的支反力通过滚动体由轴承内圈传递到外圈,在径向力 F_r 作用下圆柱滚子轴承载荷分布情况见图 3。为了简化分析,假定轴承内外圈在承受滚筒的重力和印刷压力下不发生变形,径向游隙为 0,考虑滚动体是“奇压”状态,记径向载荷作用线正下方的滚动体序号为 0,承受的径向载荷为 Q_0 ,产生的理论变形量为 δ_0 ;由 0 号滚动体向左右两侧对称的其余滚动体依次编号,第 i 个滚子承受载荷为 Q_i ,产生的弹性变形量为 $\delta_i^{[11-12]}$ 。

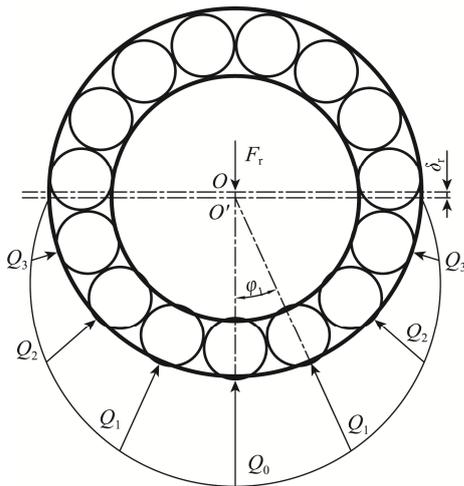


图 3 圆柱滚子轴承径向载荷分布
Fig.3 Radial load distribution of cylindrical roller bearing

根据弹性 Hertz 理论,圆柱滚子轴承滚动体与内、外圈接触总弹性变形量 δ_i 与滚动体所承受载荷 Q_i 之间的关系为:

$$\delta_i = 3.84 \times 10^{-5} \left(\frac{1}{L_{wei}^{0.8}} + \frac{1}{L_{wee}^{0.8}} \right) Q_i^{0.9} \quad (1)$$

式中: L_{wei} , L_{wee} 分别为滚动体与内圈、外圈接触长度。

各滚动体与受载 0 号滚动体之间变形量的关系式为:

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

式中: φ_i 为各滚动体中心与 0 号滚动体中心的夹角。

由式 (1) 和式 (2) 可得:

$$\frac{Q_i}{Q_0} = \left(\frac{\delta_i}{\delta_0} \right)^t = \cos^t \varphi_i \quad (3)$$

线性接触时, t 取 1.1。

由图 2 可知,滚动轴承所受到的径向载荷 F_r 与各滚动体所受的载荷 Q_i 受力平衡,可知:

$$F_r = Q_0 + 2 \sum Q_i \cos \varphi_i \quad (4)$$

0 号滚动体所承受载荷 Q_0 与径向载荷 F_r 之间的关系为:

$$Q_0 = \frac{F_r}{Z J_r} \quad (5)$$

其中对于圆柱滚子轴承,存在:

$$J_r = \frac{1 + 2 \sum (\cos \varphi)^{(1+1/t)}}{Z} = \frac{1}{4.08}$$

滚动轴承径向刚度为:

$$K_r = \frac{F_r}{\delta_r} \quad (6)$$

综上所述,根据式 (1), (5), (6) 可计算出圆柱滚子轴承受载时的径向刚度。由于一般印刷滚筒自身质量较大,对其结构分布及结构尺寸进行优化会导致滚筒质量的改变,使两端滚筒轴承的支承刚度发生变化,影响印刷滚筒整体挠曲变形^[13-15],因此,精确分析变刚度印刷滚筒结构尺寸以及结构分布对其挠曲变形的影响,需考虑两端滚筒轴承的支承刚度。为简化分析,根据滚筒两端圆柱滚子轴承承载情况进行简化处理,将其等效为弹簧支撑,建立如图 4 所示的支撑模型。图 4 中 K_r 为滚筒轴承径向等效刚度, q 为印刷压力, G 为滚筒重力。

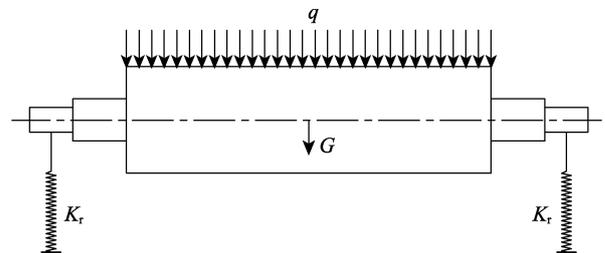


图 4 变刚度印刷滚筒等效支撑模型
Fig.4 Equivalent support model of variable-stiffness printing cylinder

3 变刚度印刷滚筒挠曲变形分析

3.1 建立有限元模型

依照表 1 变刚度印刷滚筒的尺寸参数,在

ABAQUS 中建立有限元模型,并赋予各部件相应的材料属性,有限元模型见图 5。变刚度印刷滚筒两端支撑弹簧通过连接器设置,并定义其 y 方向刚度。已知变刚度印刷滚筒工作时,印刷区域长度为 1850 mm,印刷压力在 0.8~1.2 MPa 之间变化,取印刷压力为 1.2 MPa,变刚度印刷滚筒自身重力 $G=6990$ N,假定印刷时的印痕平均宽度为 7 mm,计算出施加在轴承上的径向载荷 $F_r=11\ 265$ N;选择 NU320E 型圆柱滚子轴承作为支承部件,其滚动体长 $l=32$ mm,滚动体个数为 15 个,根据式 (1), (5), (6) 计算出最大滚动体载荷 $Q_0=3064.08$ N,两端支撑弹簧的刚度 $K_r=1709.31$ kN/mm。



图 5 变刚度印刷滚筒有限元模型
Fig.5 Finite element model of variable-stiffness printing cylinder

对实体模型离散化是有限元分析的必要条件,根据变刚度印刷滚筒的结构特点和分析精度的需要,采用八节点六面体单元对其网格划分,控制各部件网格密化程度^[16],整个模型共划分 241 611 个单元,286 710 个节点。在施加载荷时,印痕处施加 1.2 MPa 压力,同时重力是不可忽略的因素,对整个模型设置重力场。

3.2 结果分析

变刚度印刷滚筒各节点位移云图见图 6,取压力作用区域轴向上同一直线上的所有节点位移数据,得到如图 7 所示的轴向挠曲变形曲线,其中轴向距离坐标原点为滚筒印刷区域端面处,轴向距离越大即越接近滚筒印刷区域另一端面处。由图 7 可知,在变刚度印刷滚筒自身的重力和印刷压力的作用下,其挠曲变形相对滚筒中部对称。挠曲变形曲线并不是规则的“抛物曲线”,在变刚度印刷滚筒加强筋附近挠曲变形

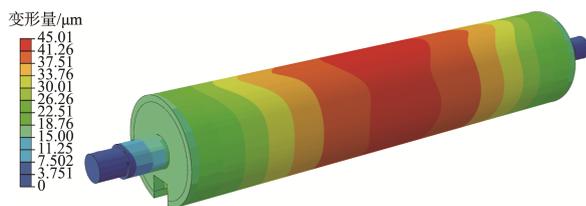


图 6 变刚度印刷滚筒挠曲变形云图
Fig.6 Cloud picture of variable-stiffness printing cylinder deflection deformation

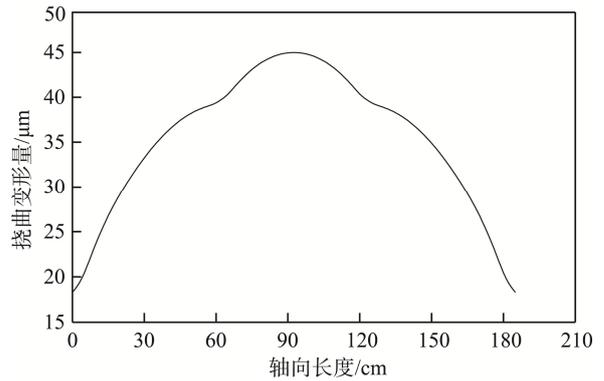


图 7 变刚度印刷滚筒轴向挠曲变形曲线
Fig.7 Axial deflection deformation curve of variable-stiffness printing cylinder

趋于平缓。最大挠曲变形发生在滚筒的中部,最大挠曲变形量为 45.01 μm ,在此区域滚筒接触印痕最窄,所受印刷压力较小。在滚筒印刷区域两端挠曲变形量最小,在该区域滚筒接触印痕最宽,所受印刷压力较大。此分析结果可为变刚度印刷滚筒的结构优化提供参考。

4 变刚度印刷滚筒优化设计

4.1 正交试验设计

由于影响变刚度印刷滚筒挠曲变形的因素较多,如滚筒各部件尺寸参数、加强筋的分布等,为合理地安排分析次数,保证分析结果的可靠性,确定各个因素影响变刚度印刷滚筒抗挠曲变形的程度,同时寻求滚筒各部件的一个较佳的结构分布以及结构尺寸,因此,选择正交试验法通过正交表规划试验^[17],对其进行结构优化设计。选出对变刚度印刷滚筒挠曲变形较大的 4 个因素:筒体壁厚、芯轴直径、加强筋的数量及加强筋厚度。在筒体外径、筒体轴向长度和轴颈处直径不变的条件下,同时保证滚筒满足承载强度的要求,每个因素取 5 个尺寸,正交试验各因素水平见表 2。

表 2 正交试验的因素水平
Tab.2 Level of factors for orthogonal test

水平	筒体壁厚	加强筋厚	芯轴直径	加强筋数
	B/mm	J/mm	D_1/mm	
A	B	C	D	
1	16	20	115	4
2	20	30	120	5
3	24	40	125	6
4	28	50	130	7
5	32	60	135	8

根据表 2 变刚度印刷滚筒的试验因子和试验水平的个数, 选择 $L_{25}(5^4)$ 正交表拟定实验方案。运用 ABAQUS 分析各水平的变刚度印刷滚筒挠曲变形情况, 以变刚度印刷滚筒的最大挠曲变形量作为正交试验的评价指标, 判断各个参数对滚筒挠曲变形的影响, 正交试验方案及结果见表 3。

表 3 正交试验方案及结果
Tab.3 Plan and results of orthogonal test

试验号	A	B	C	D	挠曲变形量/ μm
1	16	20	115	4	57.81
2	16	30	120	5	51.28
3	16	40	125	6	51.16
4	16	50	130	7	48.05
5	16	60	135	8	48.81
6	20	20	120	6	48.34
7	20	30	125	7	45.92
8	20	40	130	8	45.37
9	20	50	135	4	47.56
10	20	60	115	5	46.14
11	24	20	125	8	44.08
12	24	30	130	4	44.93
13	24	40	135	5	42.07
14	24	50	115	6	43.86
15	24	60	120	7	42.65
16	28	20	130	5	41.47
17	28	30	135	6	40.91
18	28	40	115	7	41.53
19	28	50	120	8	41.21
20	28	60	125	4	41.36
21	32	20	135	7	40.36
22	32	30	115	8	41.16
23	32	40	120	4	41.08
24	32	50	125	5	40.26
25	32	60	130	6	41.03

4.2 正交试验结果分析

不同的结构分布及结构尺寸对变刚度印刷滚筒

的最大挠曲变形影响不一样, 通过极差分析能够直观地了解各因素对滚筒的最大挠曲变形影响程度^[18]。滚筒筒体壁厚、加强筋厚、芯轴直径以及加强筋数对挠曲变形极差分析见表 4。表 4 中, K_i 表示任意一列水平号为 i 所对应的综合指标均值, R 表示极差, $R=K_{\max}-K_{\min}$, K_{\max} 表示该水平对应指标的最大值, K_{\min} 表示该水平对应指标的最小值。极差 R 反应随因素水平变动的情况, 极差越大, 表示对滚筒挠曲变形影响越大, 则为主要因素, 反之为次要因素。根据表 4, 由极差 R 判断四因素对滚筒挠曲变形的影响程度由主到次依次为: 筒体壁厚, 加强筋数, 加强筋厚及芯轴直径。

表 4 极差分析
Tab.4 Extremum difference analysis

因素水平	A	B	C	D
K_1	51.42	46.41	46.10	46.55
K_2	46.67	44.84	44.91	44.24
K_3	43.52	44.24	44.56	45.06
K_4	41.30	44.19	44.17	43.70
K_5	40.78	44.00	43.94	44.13
R	10.64	2.41	2.16	2.85

最大挠曲变形量效应曲线见图 8。由图 8 可知, 随着滚筒的壁厚增加, 变刚度印刷滚筒的最大挠曲变形量减小幅度较大。当筒体壁厚为 28 mm 后, 减小幅度逐渐减缓, 这是由于滚筒壁厚的增加, 提升了变刚度印刷滚筒的抗挠曲变形能力, 但这会增加其重量, 在一定程度上影响整体的挠曲变形, 同时增加加工制造的难度。加强筋厚及芯轴直径尺寸的增加, 最大挠曲变形量的减小幅度较为缓慢。加强筋的数对最大挠曲变形量的影响图形呈“锯齿状”, 分析认为, 当加强筋分布数量为 5 个或 7 个时, 变刚度印刷滚筒中间分布有一加强筋, 滚筒中部加强筋的设置提升了该区域抗挠曲变形能力。

4.3 结构优化

根据正交试验分析结果, 在滚筒质量的允许下, 综合变刚度印刷滚筒工作可靠性以及加工经济因素, 提出一组数据供实际研究参考, 初步选取较优参数组合: 筒体壁厚为 28 mm, 加强筋厚为 40 mm, 芯轴直径为 125 mm, 加强筋个数为 5。优化后变刚度印刷滚筒仿真挠曲变形结果见图 9, 最大挠曲变形量为 40.41 μm , 较优化前降低了 10.2%。印刷区域轴向挠曲变形曲线见图 10, 与图 7 相比, 优化后的变刚度印刷滚筒中部挠曲变形得到较大的改善, 有利于提升印品质量。

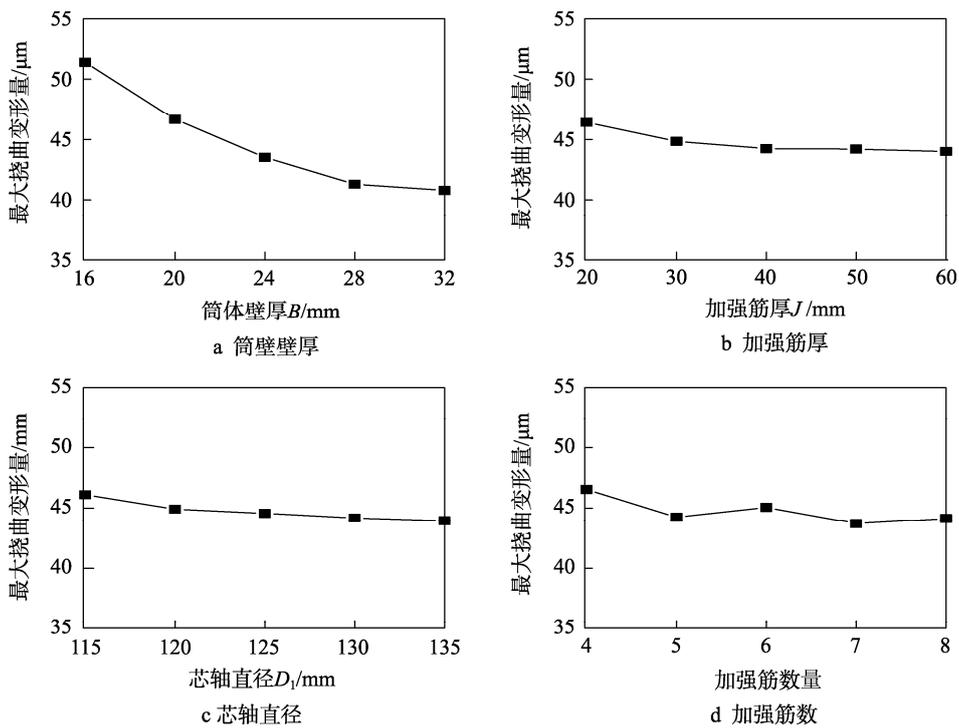


图 8 最大挠曲变形正交效应
Fig.8 Orthogonal test effect diagram of maximum deflection deformation

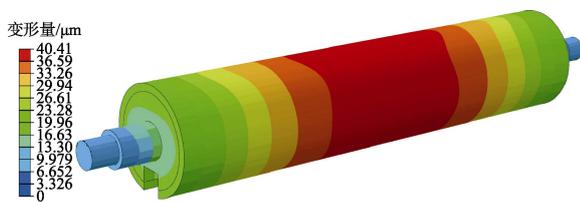


图 9 优化后变刚度印刷滚筒挠曲变形云图
Fig.9 Cloud picture of deflection deformation of variable-stiffness printing cylinder after optimization

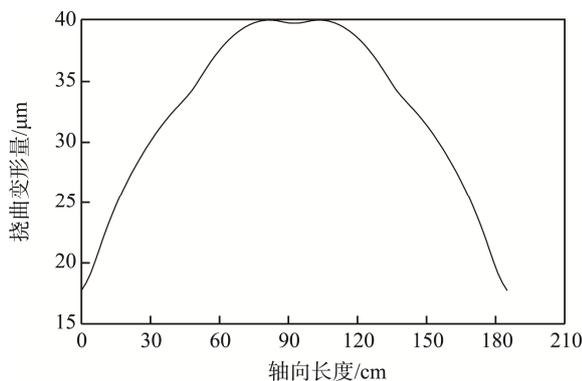


图 10 优化后变刚度印刷滚筒挠曲变形曲线
Fig.10 Deflection deformation curve of variable-stiffness printing cylinder after optimization

5 结语

提出了有限元法与正交试验法相结合的优化设

计方法，在考虑变刚度印刷滚筒支承轴承径向刚度对其挠曲变形的影响的情况下，对变刚度印刷滚筒结构分布及结构尺寸进行了优化设计，提升了其抗挠曲变形能力，为印刷滚筒的优化设计提供了可行的方法。

变刚度印刷滚筒筒壁厚度、加强筋分布数量对其挠曲变形影响较大，在滚筒质量允许范围内，适当增加壁厚、加强筋厚度、芯轴直径以及合理安排加强筋数量可以有效地降低滚筒挠曲变形，有利于提升印刷质量。

参考文献：

- [1] HWANG E S, KWON S, KIM D, et al. Positional Accuracy of Micropatterns in the Roll-to-Roll Imprinting Process Using a Wrapped Roll Mold[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(4): 1697—1702.
- [2] LEE T M, NOH J H, KIM I, et al. Reliability of Gravure Offset Printing Under Various Printing Conditions[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(10): 102802—102806.
- [3] 周枫林, 李光, 孙晓, 等. 基于边界单元法的印刷机滚筒结构刚度分析[J]. 包装学报, 2017, 9(4): 87—92. ZHOU Feng-lin, LI Guang, SUN Xiao, et al. Structural Rigidity Analysis of Printing Cylinder Based upon Boundary Element Method[J]. Packaging Journal, 2017, 9(4): 87—92.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 沈斌, 傅燕鸣, 吴宵, 等. 胶印机滚筒结构的拓扑及尺寸优化设计[J]. 包装工程, 2012, 33(21): 24—26.
- SHEN Bin, FU Yan-ming, WU Xiao, et al. Topology and Sizing Optimization for Structure Design of Printing Cylinder[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(21): 24—26.
- [7] 张庆山, 刘其洪. 基于 Workbench 的模切机印刷滚筒的模态分析及优化设计[J]. 包装工程, 2011, 32(3): 60—62.
- ZHANG Qing-shan, LIU Qi-hong. Modal Analysis and Optimum Design of Die Cutting Machine Printing Cylinder Based on Workbench[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3): 60—62.
- [8] 端木兵帅. 胶印机压印滚筒的力学性能分析及优化设计研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- DUANMU Bing-shuai. Study on Mechanical Performance Analysis and Optimization Design of Offset Impression Cylinder[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.
- [9] 李超. 变刚度印刷滚筒结构设计及支承性能研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2016.
- LI Chao. Research on Structure Design and Supporting Performance of Adjustable Stiffness Printing Cylinder[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2016.
- [10] 李超, 姚齐水, 向磊, 等. 变刚度印刷滚筒的新型支承方法设计和支承性能研究[J]. 机械设计, 2018, 35(S1): 70—74.
- LI Chao, YAO Qi-shui, XIANG Lei, et al. New Supporting Method Design and Supporting Performance Research on Variable Stiffness Printing Cylinder[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(S1): 70—74.
- [11] 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]. 机械传动, 2014, 24(5): 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, 2014, 24(5): 3085—3089.
- [12] 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.
- 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.
- [13] 许泉. 机床主轴静动态性能研究及优化设计[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- XU Xiao. The Static and Dynamic Research of the Machine Tool Spindle System and Its Optimization[D]. Nanning: Guangxi University, 2012.
- [14] 罗继伟, 罗天宇. 滚动轴承分析计算与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- LUO Ji-wei, LUO Tian-yu. Analysis Calculation and Application of Roller Bearings[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [15] 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.
- [16] SINGH C, SAINI J S. Algorithms for Accurate and Fast Plotting of Contour Surfaces in 3D Using Hexahedral Elements[J]. Journal of the Institution of Engineers, 2016, 97(3): 1—17.
- [17] 胥芳, 张立彬, 蒋建东, 等. 农机扶手有限元正交优化方法及应用[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 245—249.
- XU Fang, ZHANG Li-bin, JIANG Jian-dong, et al. Optimization Method of Agricultural Machinery Handle Based on FEA and Orthogonal Experimental Design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10): 245—249.
- [18] 江伟, 王丽凤. 三维封装铜柱应力及结构优化分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(3): 112—116.
- JIANG Wei, WANG Li-feng. Stress Analysis and Structure Optimization of Copper Cylinders in 3D Packaging[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(3): 112—116.