

基于 TRIZ 的凹印机热交换器节能研究

金琳，周淑宝，肖颖，葛惊寰，龚云

(上海出版印刷高等专科学校 新闻出版业科技与标准化重点实验室, 上海 200093)

摘要：目的 对凹版印刷机热交换器结构进行改进设计，以降低能耗。方法 对热交换器进行结构分析、加热管热辐射传热分析、对流传热分析、热损耗分析，借助 TRIZ 理论对热交换器进行节能设计，并在传热数学算法的基础上对改进方案进行验证。结果 采用发射率为 0.05，抛光且未氧化的黄铜作为铜基钎焊翅片管材料，翅片管的产热效率从原来的 88.4% 提高到 96.1%，热风被加热的温度从 80 °C 提高到 84 °C。结论 采用肋化系数和发射率恰当的翅片管，可较明显降低热交换器的热辐射率，提高热交换器的产热效率。

关键词：凹印机；热交换器；传热分析；热损耗

中图分类号：TS803.6；TK172 文献标识码：A 文章编号：1001-3563(2017)19-0194-05

Energy Saving of Gravure Press's Heat Exchanger Based on TRIZ

JIN Lin, ZHOU Shu-bao, XIAO Ying, GE Jing-huan, GONG Yun

(Key Lab of News Publishing Science & Technology and Standardization, Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to reduce the energy consumption by improving the design of the heat exchanger structure of the gravure press. By analyzing the structure of heat exchanger, heat transfer by heat radiation of the heating pipe, convective heat transfer and heat loss, the energy saving of heat exchanger was designed with the help of TRIZ theory. Moreover, the improved scheme was verified based on the mathematical algorithms for heat transfer. With the polished and unoxidized brass (emissivity: 0.05) as the material of copper-based brazed finned tube, the heat-producing efficiency of finned tube was increased from original 88.4% to 96.1%. The hot air was heated from 80 °C to 84 °C. The heat radiation rate of the heat exchanger can be reduced obviously and the heat-producing efficiency of the heat exchanger can be improved by using the finned tubes with appropriate finned coefficient and emissivity.

KEY WORDS: gravure press; heat exchanger; heat transfer analysis; heat loss

为推动我国印刷行业生态文明建设，加快实施绿色印刷战略，促进我国印刷产业发展方式转变，实现“印刷强国”目标，新闻出版总署已与环境保护部在京正式签署《实施绿色印刷战略合作协议》，绿色印刷已成为当代印刷行业发展的主题^[1-2]。在2016年全印展中，中山松德包装机械有限公司展出了我国第1台适用UV油墨的凹版印刷机。该型号凹印机去除了传统的红外加热风干燥的模式，直接采用UV干燥，大大减少了VOCs气体的产生，提高了干燥系统的能源利用率，但在印刷适性方面，还有待进一步提升，例

如白色墨实地印刷等。同时红外加热风的干燥模式还常用于复合等其他印刷工艺，因此短期内传统热风加红外的干燥方式还处于主体地位。

目前热风产生的方式主要有电热丝加热、蒸汽加热、热油加热等。据统计，我国蒸汽加热凹版印机单色实地印刷平均消耗电能和热能约为0.96 g/m²标准煤，其中干燥部分消耗的能源占总能源的60%~90%^[2]，因此研究干燥系统关键部件的传热性能对降低凹版印刷机的能源消耗和提升凹印机运转速度具有非常重要的意义。

收稿日期：2017-03-16

基金项目：上海教育委员会“晨光计划”(15CGB10)；“柔版印刷绿色制版与标准化实验室”招标课题(ZBKT201704)

作者简介：金琳（1989—），男，硕士，助教，主要研究方向为印刷机械创新设计及节能减排。

1 热交换器结构分析

以电热丝加热凹印机热交换器为研究对象, 电热丝加热方式的凹印机热交换器由箱体、进风管道、加热翅片管、排风管道等组成, 见图1。加热翅片管的组成包括电热丝和翅片管2部分, 电热丝主要用于产生热量, 翅片管主要用于传导电热丝产生的热量。电热丝产生的热量传导给翅片管后, 一部分传导给干燥箱中的冷空气, 冷空气吸收热量变成热风, 用于干燥印刷品; 另一部通过向外辐射红外线的方式, 向外界辐射能量, 最后被箱体壁吸收, 转化成箱体壁的内能。热交换器中常见的加热翅片管的排列方式有2种, 分别是顺排和叉排, 见图2。

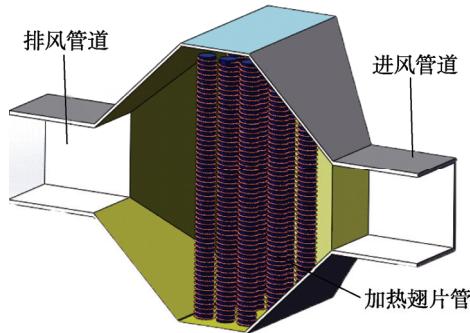


图1 凹版印刷机热交换器结构

Fig.1 Heat exchanger structure of gravure press

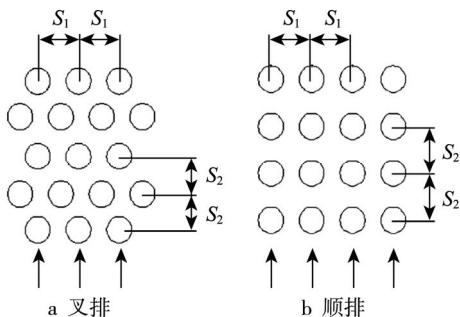


图2 加热翅片管2种常见的排列方式

Fig.2 Two common arrangements of heating finned tube

2 热交换器传热数学算法

2.1 加热翅片管热辐射传热分析

因电热丝套在散热翅片管内部, 假设内部腔体完全密封, 则电热丝产生的热辐射完全由散热翅片管吸收, 由文献[3]可知热交换器中翅片管与箱体内壁之间的热辐射经验公式为:

$$\phi_s = \frac{\beta A_3 C_0 [(\frac{t_s + 273}{100})^4 - (\frac{t_b + 273}{100})^4]}{\frac{1}{\xi_3} + \frac{\beta A_3}{A_2} (\frac{1}{\xi_2} - 1)} \quad (1)$$

式中: ξ_3 为翅片管材料的发射率; ξ_2 为箱体材料

的发射率; A_2 为箱体内壁面积之和; A_3 为整套翅片管无肋一侧面积之和; β 为翅片管的肋化系数; t_s 为翅片管表面平均温度; t_b 为箱体内壁表面的平均温度; C_0 为黑体辐射系数常量。

因空气对红外辐射的吸收能力较弱, 且红外辐射的穿透能力差, 可认为热翅片管产生的红外辐射全部被箱体壁吸收, 箱体内空气吸收的红外辐射忽略不计。故单根加热翅片管产生的有效热值为:

$$\phi_{dr} = P - \phi_s / n \quad (2)$$

式中: ϕ_{dr} 为单根加热翅片管产生的热流量; P 为单根加热丝的额定功率; n 为翅片管的根数。

2.2 热交换器内对流传热分析

由文献[3—4]可知, 凹印机热交换器中热风的流动过程类似于流体横掠管束。因顺排管束和叉排管束传热计算方法类似, 则文中以顺排管束为例, 热风流体横掠顺排管束传热系数经验公式为: 当使用 Re 范围为 $1\sim 10^2$ 时, 关联式为 $Nu_f = 0.9 Re_f^{0.4} Pr_f^{0.36} (Pr_f / Pr_w)^{0.25} \xi_n$; 当使用 Re 范围为 $10^2 \sim 10^3$ 时, 关联式为 $Nu_f = 0.52 Re_f^{0.5} Pr_f^{0.36} (Pr_f / Pr_w)^{0.25} \xi_n$; 当使用 Re 数范围为 $10^2 \sim 2 \times 10^5$, 关联式为 $Nu_f = 0.27 Re_f^{0.63} Pr_f^{0.36} (Pr_f / Pr_w)^{0.25} \xi_n$; 当使用 Re 范围为 $2 \times 10^2 \sim 2 \times 10^6$, 关联式为 $Nu_f = 0.033 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.36} (Pr_f / Pr_w)^{0.25} \xi_n$ 。式中: Re_f 为流体的雷诺数; Pr_f 为根据流体温度来选定的普朗特数; Pr_w 为根据翅片管壁温选定的普朗特数; ξ_n 为顺排管束修正系数。

当 Re 数大于 10^3 时, 由文献[4]可知, ξ_n 的取值与翅片管排数相关; 当排数为 1 时, ξ_n 取 0.7, 排数为 2 时, ξ_n 取 0.8, 排数为 3 时, ξ_n 取 0.865, 排数为 4 时, ξ_n 取 0.910, 排数为 5 时, ξ_n 取 0.928, 排数为 6 时, ξ_n 取 0.942, 排数为 7 时, ξ_n 取 0.954, 排数为 8 时, ξ_n 取 0.965, 排数为 9 时, ξ_n 取 0.972, 排数为 10 时, ξ_n 取 0.978。

由文献[4]可知热风流体的雷诺数计算公式为:

$$Re = ul/v \quad (3)$$

式中: u 为空气流体流向管束的平均流速; l 为热交换器管束的特征长度; v 为热风流体的运动粘度。空气流体与翅片管对流换热传热系数计算公式为:

$$h = Nu \lambda / l \quad (4)$$

式中: λ 为导热系数; Nu 为努塞尓数。空气流体与翅片管对流传热热流量计算公式为:

$$\phi_c = h_c A_c (t_s - t_0) \quad (5)$$

式中: ϕ_c 为空气流体与翅片管对流传热的热流量; h_c 为空气流体与翅片管表面的传热系数; A_c 为热交换中所有翅片管的表面面积之和; t_s 为翅片管表面平均温度; t_0 为进风口冷空气温度^[5]。

2.3 热交换器对流传热热损耗分析

当冷空气经翅片管换热后,热风温度大于热交换器箱体内壁平均温度时,热风对热交换器箱体内壁进行对流传热,因箱体内壁为平壁,箱体内壁的对流传热方程式为:

$$\phi_{x1} = A_{x1} h_{x1} (t_{kl} - t_b) \quad (6)$$

式中: ϕ_{x1} 为热风通过热交换器箱体壁向外界冷空气传递的热量; A_{x1} 为传热面积,因热交换器箱体顶层一般采用隔热层进行隔热,故箱体顶层的传热损耗可忽略不计。

当冷空气经翅片管换热后,热风温度小于热交换器箱体内壁温度时,箱体内壁对热风进行传热,传热公式为:

$$\phi_b = h_{x1} A_b (t_b - t_{kl}) \quad (7)$$

式中: ϕ_b 为箱体内壁对热风进行的传热量; h_{x1} 为热风在箱体内壁上的对流传热系数; A_b 为热风与箱体内壁对流换热的表面积; t_b 为箱体内壁温度; t_{kl} 为热风最后被加热到的温度。

由上述描述可知,当热风温度大于热交换器箱体内壁温度时,热风会通过热交换器箱体向外界冷空气传递热量,该传热过程等同于流体外掠平板传热^[4],则热风流体外掠箱体内平面对流传热的努塞尓数为:

$$Nu_1 = 0.664 Re_1^{1/2} Pr^{1/3} \quad (8)$$

式中: Re_1 为热风流体外掠箱体平壁的雷诺数; Pr 为热风流体的普朗特数; l 为箱体的特征长度。结合式(3), (4), (8)即可求出热风流体在箱体平壁上的对流传热系数 h_{x1} 。因翅片管热辐射能几乎全被热交换器箱体内壁吸收,又热辐射能量穿透能力非常弱,故可等同于在热交换器箱体内壁上装有一层非常薄的厚度可忽略的内热源,根据能量守恒原理,组成计算箱体内壁温度的方程组为^[6-7]:

$$\begin{cases} \phi_s - \phi_b = A_b \lambda_{x1} (t_b - t_{bl}) / \delta & \text{其中 } t_b > t_{kl} \\ \phi_s + \phi_{x1} = A_{x1} \lambda_{x1} (t_b - t_{bl}) / \delta & \text{其中 } t_b < t_{kl} \\ A_{x1} \lambda_{x1} (t_b - t_{bl}) / \delta = A_{x1} h_0 (t_{bl} - t_0) \end{cases} \quad (9)$$

式中: t_{bl} 为箱体外壁的平均温度; λ_{x1} 为箱体材料的导热系数; δ 为箱体的壁厚; h_0 为外界冷空气与箱体外壁的对流传热系数。

因热交换器与干燥箱之间连接较短,热损耗可忽略,组成计算加热翅片管束产生的热流量方程组为^[8]:

$$\begin{cases} \phi_{cz} + \phi_b = c_p \frac{P_0 VM}{R t_0} (t_{kl} - t_0) & \text{其中 } t_b > t_{kl} \\ \phi_{cz} - \phi_{x1} = c_p \frac{P_0 VM}{R t_0} (t_{kl} - t_0) & \text{其中 } t_b < t_{kl} \\ \phi_{cz} = \phi_{dr} \times n \end{cases} \quad (10)$$

式中: ϕ_{cz} 为加热翅片管束产生的热流量; P_0 为

工作环境的压强; V 为单位时间内热风流动的体积; M 为摩尔质量; R 为摩尔气体常数; c_p 为温度在 $(t_{kl} - t_0)/2$ 时空气的比热容; n 为热交换器中翅片管的根数。结合式(5—7), (10)可计算出翅片管表面的平均温度 t_s 。

$$n \cdot p - \phi_s = \phi_c \quad (11)$$

设定热风温度 t_{kl} 的初始值,查找文献[4]得出 t_{kl} 温度下干燥热风的相关物理参数,并结合式(1—2), (5—6), (10—11)进行求解并验证,通过迭代的方法求出上述所列方程的解,迭代流程见图3。

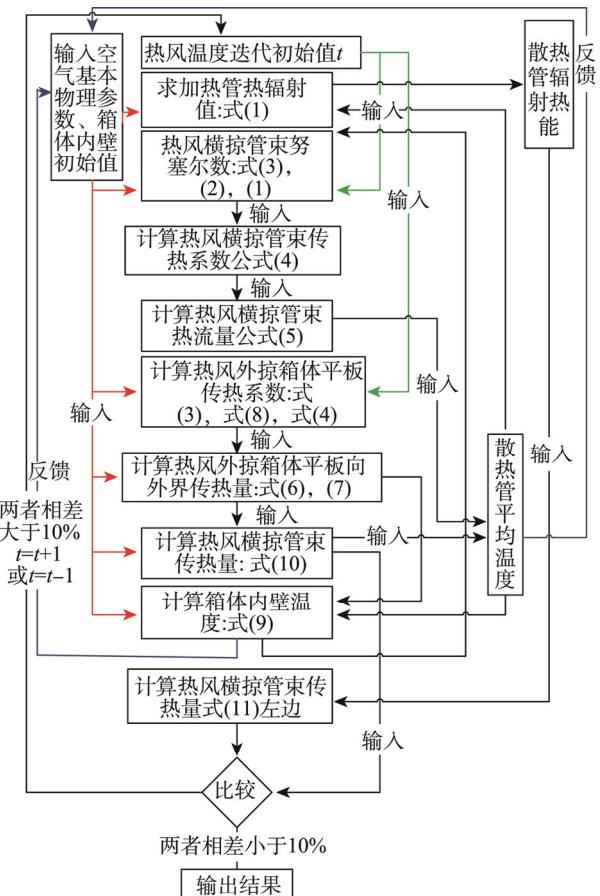


图3 热交换器热风传热迭代流程

Fig.3 Heat transfer iteration flow chart of hot air of heat exchanger

3 热交换器数值计算

3.1 改进前凹印机热交换器数值计算

通过对国产某型号凹版印刷机热交换器相关参数行测量并查找文献,得到该型号凹版印刷机换热器相关参数^[9-10]: 箱体外形尺寸为 600 mm × 250 mm × 500 mm, 铁板厚度 3 mm, 翅片加热管内径为 20 mm, 加热管肋力系数为 6, 翅片管间距 S_1 为 154 mm, 翅片管间距为 61 mm, 加热翅片管分 3 排, 每排 3 根, 电热丝材料为镍铬电热合金, 进口风速为 16 m/s, 进口管截面尺寸为 250 mm × 125 mm, 加热管个数 9 根,

单根电热丝额定功率为4kW; 电热丝直径为2mm, 风机额定风量为 $1800\text{ m}^3/\text{h}$, 加热管发射率为0.76, 热交换器平均风速为1.76m/s, 环境温度为25℃,

将凹印机相关测量参数, 代入图3中热交换器传热迭代数流程, 选择热风初始迭代温度为23℃, 经过多次迭代计算得到最佳结果为: 热风加热后温度为80℃, 加热管表面平均温度为545℃, 箱体壁平均温度为110℃, 加热管产热效率为88.4%, 热交换器热损耗为2855W, 热交换器总效率为62%。

3.2 基于TRIZ的凹印机热交换器设计简介

TRIZ理论即发明问题解决理论, 它的主要目的是研究人类在进行发明创造、解决技术难题过程中所遵循的科学原理和法则。TRIZ的精髓是利用有限的原理和方法, 解决无限的发明问题。相对于传统的创新方法, TRIZ理论具有明显的特点和优势。运用TRIZ理论中的ARIZ算法工具^[12—13], 对凹印机热交换器进行创新设计。将热交换器对冷空气加热工程简化为产生热风工程系统, 见图4。

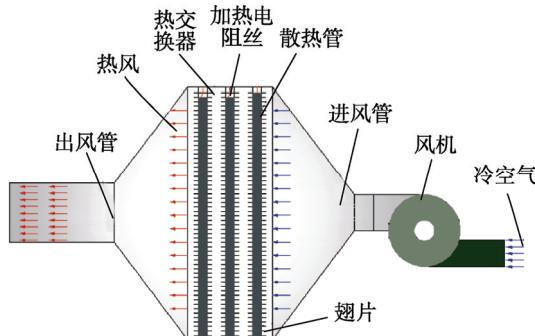


图4 生产热风工程系统

Fig.4 Hot air producing engineering system

1) 产生热风工程系统分析。对产生热风工程系统进行组件分析, 建立组件模型, 并在组件模型的基础上进行功能分析, 建立功能模型, 见图5。图5中实线代表该功能正常, 虚线代表该功能不足, 点化线代表该功能为有害功能。由图5可知该工程系统中功能不足之处主要有: 风机输送风量功能不足, 散热管加热空气功能不足。有害功能有: 散热管与箱体之间的热辐射, 出风管道和箱体向外界传热。

2) 产生热风工程系统因果链分析。在功能模型的基础上进行因果链分析, 得到产生热风工程系统的核心问题有: 散热管产生大量红外线, 导致散热管辐射能变大; 部分空气未能与散热管充分接触, 导致散热管加热空气效率不高。

3) 产生热风工程系统矛盾分析。将因果链分析产生的核心问题进行简化, 得到一个矛盾对, 见图6。从图6中提炼出该工程系统的最小问题为: 不仅要加热空气效果好, 还要辐射能量产生少。

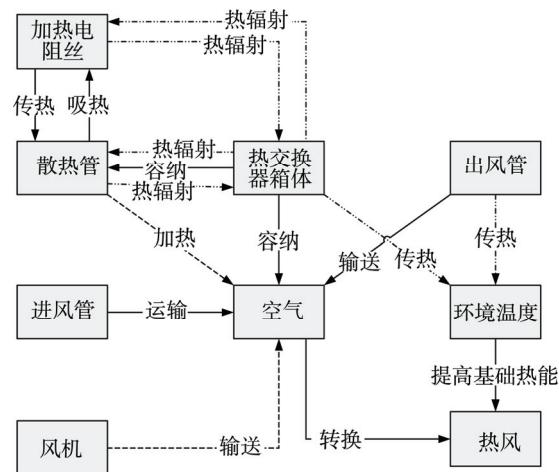


图5 产生热风工程系统功能模型

Fig.5 Function model of hot air producing engineering system

问题1:	问题2:
IF 加热管表面面积大	IF 加热管表面面积小
THEN 加热管给空气加热效果好	THEN 辐射能量小
BUT 辐射能量大	BUT 加热管给空气加热效果差

图6 产生热风工程系统矛盾对
Fig.6 Contradictory pairs of hot air producing engineering system

4) 产生热风工程系统理想解。在最小问题的基础上, 对该系统进行物—场资源分析, 从物质和场的角度找到解决最小问题的理想解。求解得到该工程系统的一组理想解为: 翅片加热管所用材料发射率非常小, 且该材料发射率受高温条件影响较小^[14], 因此可将翅片管翅片面积放大到允许的最大面积; 该最大面积不仅要满足在高温条件下翅片与翅片管焊接处不因受热膨胀而引起松动的条件, 还要满足2根翅片管预留空间的最大允许值, 从而使翅片管加热空气效果最佳。

3.3 改进后凹印机热交换器数学计算

存在一种铜基钎焊翅片管^[15], 符合凹印机热交换器的温度要求, 该翅片管采用抛光且未氧化的黄铜作为翅片材料, 其发射率为0.05, 考虑到翅片管之间的空隙及其他因素, 对热交换器采用保守设计, 即管内径不做调整, 在尽量增大翅片管表面积的情况下, 结合参考文献[4], 取翅片管的肋化系数为10, 其他参数不变。将热交换器改进前和改进后的输入参数代入图3的迭代流程中进行迭代求解, 经过多次迭代, 得到改进后的计算结果: 热风加热后温度为84℃, 加热管表面平均温度为380℃, 箱体壁平均温度为78℃, 加热管产热效率为96%, 热交换器热损耗为1706W, 热交换器总效率为95%。改进前后的数据对比, 见表1。

表1 热交换器改进前后换热相关参数对比
Tab.1 Comparison of related heat transfer parameters before and after heat exchanger improvement

参数	热风被加热后温度/℃	箱体内壁温度/℃	单位时间总辐射能/W	单位时间间向热能量/W	翅片界损耗率/%	翅片管热辐射率/%	翅片管产热效率/%
改进前	80	110	4192	2855	11.6	88.4	
改进后	84	75	1406	1706	4	96.1	

4 结语

通过对凹印机热交换器进行结构分析、传热分析和热损耗分析，得到凹印机热交换器的传热数学算法，并运用ARIZ理论对热交换器进行改进设计。在传热算法的基础上，对节能改进前后的方案进行验算论证，结果表明：改进后方案箱体内壁温度由110 ℃左右降到75 ℃左右，对工作车间环境有很大的改善，热风被加热温度从80 ℃提高到84 ℃。改进后翅片加热管的热辐射率降为4%，和改进前相比降低7.6%，但选用材料成本较高。改进后箱体向外界热损耗由2855 W降到1706 W，数据结果表明，在不考虑材料成本的情况下，改进后的热交换器比改进前节能效果好。在误差允许情况下，该传热数学算法真实可行。

参考文献：

- [1] 陈文革, 蒋文燕, 黄学林, 等. 我国凹版印刷机的现状及发展方向[J]. 包装工程, 2008, 29(4): 169—171.
CHENG Wen-ge, JIANG Wen-yan, HUANG Xue-lin. Present Situation and Development Direction of Gravure Press in Our Country[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(4): 169—171.
- [2] 金琳, 李艳, 王仪明, 等. 基于测试的凹印机能效分析[J]. 包装工程, 2014, 35(19): 119—124.
JIN Lin, LI Yan, WANG Yi-Ming, et al. Energy Efficiency Analysis of Gravure Press Based on Energy Consumption Test[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(19): 119—124.
- [3] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shi-ming. Heat Transfer Theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [4] 茱卡乌卡斯. 热交换器内的对流换热[M]. 马昌文, 居兹泉, 肖宏才, 译. 北京: 科学出版社, 1986.
JUCA Wu-kasi. Convective Heat Transfer in the Heat Exchanger[M]. MA Chang-wen, JU Zi-quan, XIAO Hong-cai, translated. Beijin: Science Press, 1986.
- [5] 刘敏珊, 杨帆, 董其伍, 等. 流体横掠管束模拟中壁面函数影响研究[J]. 热能动力工程, 2010, 25(5): 497—500.
LIU Min-shan, YANG Fan, DONG Qi-Wu, et al. Study of the Influence of Wall Surface Functions in Simulating a Fluid Laterally Sweeping a Tube Bundle[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power,
- [6] 2010 25(5): 497—500.
CHUCHILL S W, BERNSTEIN M. A Correlating Equation for Forced Convection from Gases and Liquids to a Circular Cylinder in Cross Flow[J]. ASME J Heat Transfer, 1997, 99(1): 300—306.
- [7] SATORU I, KATSUHIDE E. Development of High Thermal Efficiency Impinging Jet Nozzle for Hot Air Drying of Gravure Printing[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1998, 6(21): 569—575.
- [8] 金琳. 基于测试评价的凹印刷机烘干系统创新设计方法研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2015.
JIN Lin. Research on Innovative Design Method of Drying System of Gravure Press Based on Test Evaluation[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2012.
- [9] 金琳, 李艳, 王仪明, 等. 基于传热介质的蒸汽加热凹印机能耗测试方法研究[J]. 包装工程, 2015, 36(5): 105—111.
JIN Lin, LI Yan, WANG Yi-Ming, et al. Energy Consumption Test Method for Steam Heating Gravure Based on HeatTransfer Medium[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(5): 105—111.
- [10] 张有为, 李辉, 姜培学. 采用共轭梯度法的管内壁温度导热反问题求解[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(7): 1188—1190.
ZHANG You-wei, LI Hui, JIANG Pei-xue. Inverse Heat Conduction Problem of Deducing Inner Wall Temperature by Using Conjugate Gradient Method[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(7): 1188—1190.
- [11] 任洪娟. 螺旋翅片管自然对流换热实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2002.
REN Hong-Juan. Experiment Study on Natural Convection Heat Transfer of Spiral Finned Tubes[D]. Shangdong: Shangdong University, 2002.
- [12] 张肖. 基于TRIZ的印刷机械创新设计方案评价体系研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2012.
ZHANG Xiao. Research on Innovative Design Evaluation System of Printing Machinery Based on TRIZ[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2012.
- [13] 李艳. 基于TRIZ的印刷机械创新设计理论和方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
LI Yan. Theory and Method of Innovation Design of Printing Machinery Based on TRIZ[M]. Beijin: China Machine Press, 2014.
- [14] 徐共荣. 红外低发射率涂料的研制及其在涤/棉混纺织物热红外伪装的应用[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2013.
XU Gong-rong. Preparation of Low Infrared Emissivity Coating and its Application in Cotton/Polyester Blended Fabrics of Thermal Infrared Camouflage[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2013.
- [15] 杨建武, 黄克坚. Cu/Al复合翅片管生产工艺的研究[J]. 南昌大学学报, 2001, 23(2): 72—77.
YANG Jian-wu, HUANG Ke-jian. The Production Process Study of Cu/Al Multiunit Fin Tube[J]. Journal of Nanchang University, 2001, 23(2): 72—77.