

凹版印刷机烘干系统的热力学分析

刘澎¹, 向晨², 侯和平¹, 张海燕¹

(1.西安理工大学, 西安 710048; 2.国家知识产权局专利局专利审查协作四川中心, 成都 610213)

摘要: **目的** 研究凹版印刷机热风干燥系统热能流向与品质, 为烘干系统的设计与优化提供理论依据, 提高干燥热效率, 促进国内凹印机能量审计进一步发展。**方法** 对凹印机烘干系统进行热力学分析, 进行能耗计量。**结果** 经计算, 凹印机烘干系统的热效率只有9.21%, 而62.29%高热量气体被直接排出系统, 没有得到有效的利用。干燥介质在经过烘箱时, 产生的不可逆损失为86.96%, 而加热纸张的不可逆损失占到整个烘箱不可逆损失的24.21%。**结论** 回收利用系统废气热量是提高凹印机烘干系统热效率最有效的途径; 此外, 降低热风与纸张的换热过程产生的不可逆能量损失也会直接提高凹印机烘干系统热能的品质。

关键词: 凹版印刷机; 烘干系统; 热力学分析

中图分类号: TS825 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)01-0195-05

Thermodynamic Analysis on Drying System of Gravure Press

LIU Peng¹, XIANG Chen², HOU He-ping¹, ZHANG Hai-yan¹

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Patent Examination Cooperation Center of the Patent Office, SIPO, Sichuan, Chengdu 610213, China)

ABSTRACT: The work aims to study the thermal energy flow direction and quality of the hot air drying system in gravure press to provide theoretical basis for the design and optimization on the drying system, improve the heat efficiency of drier, and promote the further development of press energy audit on domestic gravure. The thermodynamic analysis method was used to measure energy consumption on the drying system of gravure press. It was calculated that the thermal efficiency of the hot air drying system in gravure press was only 9.21%, and 62.29% high heat gas was directly discharged out of the drying system, which was not effectively utilized. The result also showed that the irreversible loss in the drying oven was 86.96%, while the irreversible loss to heat the paper accounted for 24.21% of the total irreversible loss in the drying oven when the drying medium passed through the drying oven. Recycling the waste heat of the drying system is the most effective way to improve the thermal efficiency of the drying system in the gravure press. In addition, reducing the irreversible energy loss in heat transfer process between hot air and paper will directly improve the quality of heat energy.

KEY WORDS: gravure press; drying system; thermodynamic analysis

凹版印刷作为基本的一种印刷方式在印刷包装领域应用十分广泛, 但是凹印机却是几类印刷机中能耗最高的, 这源于它的干燥方式普遍采用的是烘箱干燥的方式^[1]。烘干系统所消耗的能源占到整机能源的50%~60%, 干燥过程的平均热效率仅为6%左右^[2]。

国内凹印机烘干系统的研究一直比较滞后, 一个原因是该问题过于复杂, 导致一些企业知难而退; 另

一个原因是凹印机能耗方面没有明确的国家或行业计量标准, 导致企业没有提升的压力。但是随着我国《印刷业“十三五”发展规划》的推出, 明确要求凹版印刷企业应采取有力措施, 加快推进技术创新, 降低设备能耗, 加大环保技术应用力度, 推动整个印刷产业向绿色印刷转型, 情况开始发生变化^[3]。之后《环境标志产品技术要求 印刷 第三部分: 凹版印刷》的

收稿日期: 2016-03-08

基金项目: 国家科技支撑计划基金(2013BAF04B01); 陕西省科技统筹创新工程资助项目(2013KTB01-03)

作者简介: 刘澎(1974—), 男, 博士, 西安理工大学讲师, 主要研究方向为印刷机理与印刷过程仿真、印刷机控制。

实施,以及相关环境保护法规的逐步落地,整个形势彻底改观了^[4]。企业界对凹印机烘干系统研究的动力越来越大,相关的研究人员与学者也开始关注该课题。目前,对于凹印机烘干系统普遍采用的设计方法主要还是经验设计法,优化一般用流体仿真软件进行效果对比^[5-6]。也出现了新的研究方向,对于凹印机能耗问题进行研究。如金琳、李艳等人开展了凹印机能耗测试方法的研究工作,发现烘干系统耗能最大,相关方法对于制定凹印机能耗标准具有现实意义^[7-8]。由于普遍缺乏设计与优化的理论依据,因此滞后情况没有显著的改观。

在全社会追求节能减排,低碳环保生活生产的形势下,对凹印机烘干系统进行热力学分析,进行能耗计量,为烘干系统的设计与优化提供理论依据与方向,提高干燥热效率,推进国内凹印机能量审计,对于凹印机降低能耗、保护环境具有重要意义^[9]。

1 凹印机烘干系统的结构原理

凹印机的烘干系统是具有特征性的工作单元,完成一色印刷后,纸带就会进入烘干系统对油墨进行干燥。烘干系统以加热的空气为介质,采用热风对流换热的方式实施干燥。空气的加热形式有电加热、蒸汽加热、热油加热等多种。这里研究的是最为普遍的电加热方式烘干系统。

凹印机烘干系统的结构见图1。新鲜空气由新风风管进入,与循环风在混风箱中混合,经过风斗,进

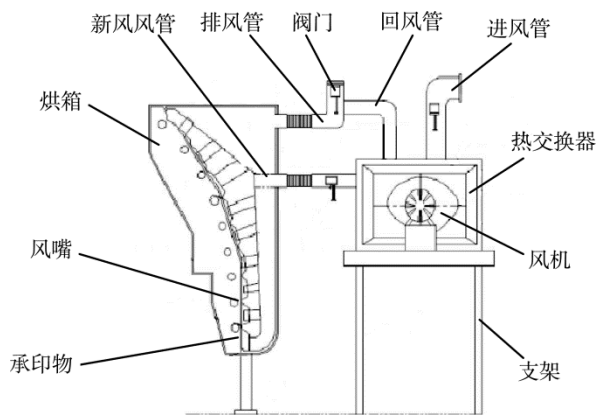


图1 凹印机烘干系统结构

Fig.1 Structure diagram of gravure press drying system

入热交换器,加热到工作温度后被风机加速,由进风管进入烘箱内完成干燥过程,在烘箱内,热风由若干风嘴吹出,干燥承印物,然后气体经过排风管离开烘箱,一部分直接排进大气中,另一部分通过回风管再次回到系统中^[10]。

2 研究对象及其相关参数的确定

选取由进风管、烘箱、回风管、排风管组成的能量系统作为研究对象,研究该系统的热能传递和交换过程。研究的烘干系统具体形状结构见图2,进风管表面积为 1.07 m^2 ,排风管表面积为 1.36 m^2 ,回风管表面积为 0.97 m^2 ,混风箱与风斗的表面积和为 1.86 m^2 ,烘箱保温层表面积为 3.2 m^2 。当该印刷机稳定运行在 300 m/s 时,通过多点温度测试仪读取计算所需烘干系统的温度数据。

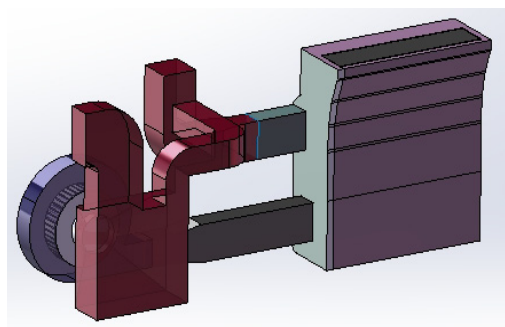


图2 烘干系统的三维模型

Fig.2 3D model of drying system

2.1 相关材料的确定

分析所用承印材料为幅宽 1050 mm ,定量为 250 g/m^2 的白卡纸,保温层材料为硅酸铝纤维板。承印材料厚度为 0.31 mm ,密度为 798.72 kg/m^3 ,比热容为 $2100\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,导热率为 $0.40\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$;保温层的厚度为 25 mm ,密度为 100 kg/m^3 ,比热容为 $1300\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,导热率为 $0.03\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。油墨来自凹印机制造企业调机所用,密度为 777 kg/m^3 ,计算假设满版实地印刷,墨层厚度 $15\text{ }\mu\text{m}$,取样后用热分析仪测得油墨样本 $25\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ 的比热容数据。溶剂的质量分数为70%的乙酸乙酯、20%的异丙醇、10%的乙酸正丙酯,与油墨的配比为 $1:1$ ^[11]。溶剂的成分与各项物理参数见表1^[12]。

表1 溶剂成分与物理参数

Tab.1 Solvent composition and the physical parameters

	相对分子量	液态比热容/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	蒸汽比热容/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	沸点/K	汽化潜热/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	爆炸下限 浓度LEL/%	蒸汽密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比例/%
乙酸乙酯($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$)	88.11	1.92	1.67	350.1	394.37	2	3.52	70
异丙醇($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$)	60.1	2.55	1.49	355.5	700.91	2	2.72	20
乙酸正丙酯($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$)	102.13	1.92	1.67	374.6	365.64	2.2	3.88	10

2.2 回风量的确定

二次回风装置提高了能源利用效率,但回风量必须合适。因为油墨中的挥发性溶剂经循环回风,会导致烘箱内的溶剂浓度不断升高,当达到爆炸下限浓度时就有可能产生爆炸^[13]。回风量的计算方法如下。

烘干气体中的溶剂体积分数为:

$$V_0 = \frac{v \times t \times b \times m \times r \div \rho}{V} \cdot \frac{1}{2} \quad (1)$$

经过 n 次循环后,烘箱内溶剂体积分数为:

$$V_n = \frac{V V_{n-1} p + \frac{v t b m r}{\rho}}{V} \quad (2)$$

式中: V_n 为正常工作状态下烘箱内的溶剂体积分数(n 次循环后, $n \rightarrow \infty$); v 为印刷速度(m/s); t 为承印物在烘箱内停留时间(s); b 为承印物幅宽(m); m 为每平方米承印物上的墨量(kg/m²); r 为油墨中溶剂的比例; ρ 为油墨中溶剂的蒸汽密度(kg/m³); p 为回风比例; V 为供风量(m³/s)。

基于爆炸支链阻尼效应,以爆炸下限浓度最低的气体作为计算标准。参见表 2 以异丙醇与乙酸正丙酯来计算。按照国家安全标准,可燃气体报警浓度为爆炸下限浓度的 25%,即异丙醇与乙酸正丙酯的爆炸下限体积分数为 0.5%。经计算,在以上条件下,最大回风比例可达到 52.7%,并且能够保证安全生产。

3 热力学第一定律分析

热力学第一定律实质是能量转换及守恒原理在热现象上的应用,其本质是能量传递和转换过程中,能量的总量保持不变。对任何系统来讲,能量守恒定理可用如下表达式表示:输入系统的能量-输出系统的能量=系统存储能量的变化^[14]。当凹印机达到稳定工作状态时,烘干系统的能量流见图 3。

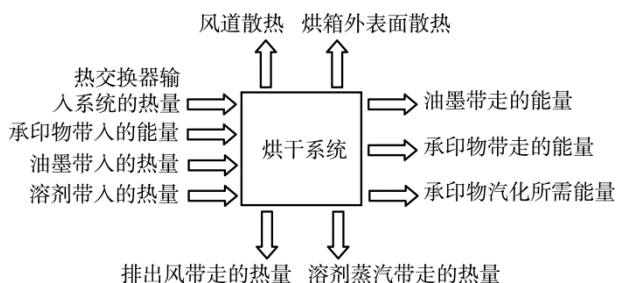


图 3 烘干系统的能量流

Fig.3 Energy flow diagram of the drying system

整个烘干系统的能量平衡式:

$$(Q_1 + Q_2) - (Q_8 + Q_9) = (Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7) k \quad (3)$$

式中: Q_1 为加热新鲜风所需热量; Q_2 为加热循

环风所需热量; Q_3 为风道外表面散失的热量; Q_4 为烘箱外表面散失的热量; Q_5 为加热油墨所需的热量; Q_6 为加热纸张所需的热量; Q_7 为溶剂蒸发所需热量; Q_8 为出风口热空气带出的热量; Q_9 为排放的溶剂蒸汽带走的热量; 以上热量变量的单位均为 kJ/h; k 为其余未计热损耗量的储备系数, k 在 1.1 ~ 1.2。

3.1 系统能量计算

加热新鲜风所需的热量计算方法如下:

$$Q_1 = G_{\text{new}} c_{\text{new}} (T_e - T_{e0}) \quad (4)$$

式中: G_{new} 为每小时需加热的新鲜风量(kg/h); c_{new} 为新鲜风的空气比热(J/(kg·K)); T_{e0} 为热风温度(K); T_e 为车间温度(K)。

加热循环风所需热量计算方法如下:

$$Q_2 = G_{\text{rec}} c_{\text{rec}} (T_e - T_{e1}) \quad (5)$$

式中: G_{rec} 为需加热的循环风量(kg/h); c_{rec} 为循环风的空气比热(J/(kg·K)); T_{e1} 为循环风温度(K)。

出风口热空气带出的热量计算方法如下:

$$Q_8 = G_{\text{out}} H_{\text{out}} \quad (6)$$

式中: G_{out} 为烘箱出风口出风量(kg/h); H_{out} 为热空气焓值(J/kg)。

排放的溶剂蒸汽带走的热量计算方法如下:

$$Q_9 = G'_{\text{sol}} H_{\text{sol}} \quad (7)$$

式中: G'_{sol} 为排放的溶剂蒸汽质量(kg/h); H_{sol} 为排放的溶剂蒸汽焓值(J/kg)。

风道外表面散失的热量计算方法如下:

$$Q_3 = K F_1 (T_e - T_{e0}) \quad (8)$$

式中: K 为风管与烘箱外壳的传热系数(J/(s·m²·K)); F_1 为风管外表面积(m²)。

烘箱外表面散失的热量计算方法如下:

$$Q_4 = K F_2 (T_e - T_{e0}) \quad (9)$$

式中: F_2 为烘箱外表面积(m²)。

加热油墨所需的热量计算方法如下:

$$Q_5 = G_{\text{ink}} c_{\text{ink}} (T_{e2} - T_{e0}) \quad (10)$$

式中: G_{ink} 为每小时进入烘箱的最大油墨消耗量(kg/h); c_{ink} 为油墨的比热容(J/(kg·K)); T_{e2} 为完成烘干后油墨的温度(K)。

加热纸张所需的热量计算方法如下:

$$Q_6 = G_{\text{paper}} c_{\text{paper}} (T_{e3} - T_{e0}) \quad (11)$$

式中: G_{paper} 为每小时生产量(kg/h); c_{paper} 为承印物的比热容(J/(kg·K)); T_{e3} 为承印物在烘箱出口处的温度(K)。

溶剂蒸发所需热量计算方法如下:

$$Q_7 = G_{\text{sol}} [c_{\text{sol}} (T - T_{e0}) + r] \quad (12)$$

式中: G_{sol} 为每小时进入烘箱的溶剂质量(kg/h); c_{sol} 为液态溶剂的比热容(J/(kg·K)); r 为溶剂的汽化潜

热(J/kg); T 为溶剂沸点(K)。

凹印机烘干系统的热力学第一定律分析结果见表 2。

表 2 凹印机烘干系统的热力学第一定律分析结果
Tab.2 The first law of thermodynamics analysis results of gravure press drying system

项目	计算结果/kW	热量比例/%
输入系统的能量(Q_1+Q_2)	199.98	100.00
输出系统的能量(Q_8+Q_9)	124.56	62.29
溶剂蒸发所需热量 Q_7	18.43	9.21
加热油墨所需的热量 Q_5	15.80	7.90
加热纸张所需的热量 Q_6	13.00	6.50
烘箱外表面散失的热量 Q_4	5.31	2.66
风道外表面散失的热量 Q_3	3.42	1.71

考虑到计算时未能计入的热量损耗,诸如风机热损,管道与烘箱外表面连接件的热损等,将上述热量数值代入式(3),计算得到储备系数 k 为 1.108。

烘干系统的热效率 η_t 是指干燥过程中用于溶剂汽化所需的热量与热源提供的热量之比,即:

$$\eta_t = \frac{\text{溶剂汽化所需要热量}}{\text{热源提供热量}} \times 100\% \quad (13)$$

计算得到该烘干系统的热效率 η_t 为 9.21%。

3.2 计算结果分析

计算得到的凹印机烘干系统的热效率为 9.21%, 这样的热效率相较于其他能量系统是最低的。在凹印机制造领域这是普遍现象,凹印机热效率通常只有 6% 左右。我们可以从表 3 中找到造成这种现象的主要原因: 大量的高热量气体(Q_8+Q_9)被直接排出系统,没有得到有效的利用,如文中研究的系统,直接输出的能量占到了 62.29%, 因此,尽可能地回收利用系统废气是提高凹印机烘干系统热效率的首要研究目标。利用系统废气的途径有: 一种是进入溶剂回收装置后再次进入烘干系统回风利用; 另一种是使用它直接做功或者与温度较低的工作介质进行热交换。

除此之外,溶剂汽化、油墨加热与纸张加热这些项目所需热量也比较高。这部分项目中溶剂汽化与油墨加热是烘干系统的核心工作热量,而纸张加热、温度升高是附带产生的效应。纸张温度升高不仅造成纸带张力特性变化,影响印刷质量,而且消耗热量,降低热效率,因此在溶剂汽化,油墨干燥的前提下,尽可能减少纸张的温升也是实践中需要特别关注的措施。

第三部分热量去向是散热损失,尽管散热损失在总热量中占了非常小的一部分,但是相对于系统的热效率很低的事实来讲,这一部分的热量损失也不应忽视。可以通过改变风道结构、材料及保温层材料等角度来减少热量损失。

4 热力学第二定律分析

热力学第一定律的分析虽然可以清晰地表述热量的分布,但却不能反映过程发展的方向、能量的品质,这就需要进行热力学第二定律分析。任何一个实际生活生产中的热力过程或循环都是不可逆的,凹印机的烘干过程也是如此。对烘干系统进行热力学第二定律的分析,就可以知道系统各部分热量损失的大小。尽可能地减少各部分的损失,提高热能的品质也就提高了整个系统的经济性。

由于孤立系统内的能量品质的降低才造成孤立系的熵增加(熵产),因此,熵产是反映能量品质“贬值”的判据^[15]。烘干系统的熵流见图 4,与能量守恒的定律不同,熵具有不守恒关系: 系统熵的增量=流入系统的熵+熵产-流出系统的熵。

不可逆过程的能量损失(有效能转变为无效能的量)为:

$$W = T_0 \Delta S \quad (14)$$

式中: T_0 为环境温度; ΔS 为熵变。

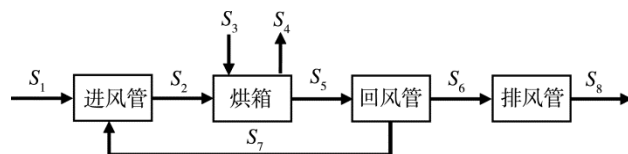


图 4 烘干系统熵流

Fig.4 Drying system entropy flow diagram

4.1 系统不可逆能量计算

进风过程中的不可逆损失:

$$W_{in} = Gt_{e0} s_2 - t_{e0} (G_{new} s_1 + G_{rec} s_7) \quad (15)$$

烘箱内干燥过程的不可逆损失:

$$W_{oven} = Gt_{e0} (s_2 - s_5) + mt_{e0} (s_4 + s_3) \quad (16)$$

回风过程的不可逆损失:

$$W_{rec} = t_{e0} (G_{rec} s_7 + G_{out} s_6 - G s_5) \quad (17)$$

排风过程的不可逆损失:

$$W_{out} = G_{out} t_{e0} (s_8 - s_6) \quad (18)$$

各部分不可逆损之和:

$$\sum W = W_{in} + W_{oven} + W_{rec} + W_{out} \quad (19)$$

利用熵分析得到的凹印机烘干系统各部分的不可逆损失见表 3。

表 3 系统各部分不可逆损失

Tab.3 Irreversible loss from each part of system

项目	不可逆损失/kW	损失率/%
烘箱	20.95	86.96
回风管	1.34	5.54
进风管	1.10	4.56
排风管	0.71	2.94
总损失	24.10	100

4.2 计算结果分析

从表4中可以看出,干燥介质在经过烘箱时,产生的不可逆损失最大,为86.96%。在烘箱内的热量损失中,溶剂汽化的过程不可逆程度最高,而由物料带走能量产生的损失也占了不小的比例。经计算,其中热风加热油墨的不可逆损失为0.576 kW,而加热纸张的不可逆损失为5.072 kW,占到整个烘箱不可逆损失的24.21%,不容忽视。在油墨被干燥的同时,纸张的温度必然会上升,这一过程包括热风直接对纸张的加热,也包括油墨与纸张的换热。烘箱内风嘴出风到达纸张通常为射流换热,这一过程必然存在能量损失,烘箱风嘴结构、分布等都会严重影响能量损失的程度,因此,烘箱部分设计及优化的关键是在强化对流传热传质的同时,需要着力降低热风与纸张的换热过程所产生的不可逆损失,提高热能的品质。其余风道部分(进风管,回风管,排风管等)的不可逆损失密度为13.04%,可以通过从风道结构与保温层材料选择及厚度增加等因素着手改善。

5 结语

通过热力学相关计算与分析表明,凹印机热效率低的主要原因是大量的高热量气体被排出系统未加利用,因此,回收利用系统废气是提高凹印机烘干系统热效率的首要研究目标;烘箱内风嘴出风到达纸张进行射流换热的过程必然存在能量损失,而风嘴结构、分布等都会严重影响能量损失的程度,因此烘箱部分设计及优化在强化对流传热传质的同时,还需要着力降低热风与纸张的换热过程所产生的不可逆能量损失,提高热能的品质。

参考文献:

- [1] 张海燕, 刘建, 路菲. 浅析凹印机发展的制约因素与对策[J]. 印刷杂志, 2011(1): 47—49.
ZHANG Hai-yan, LIU Jian, LU Fei. Restricting Factors and Countermeasures of the Development of Gravure Press[J]. Printing Field, 2011(1): 47—49.
- [2] 白文华, 黄清明, 包能胜, 等. 凹版印刷烘箱干燥过程分析与节能优化设计[J]. 包装工程, 2010, 31(23): 28—31.
BAI Wen-hua, HUANG Qing-ming, BAO Neng-shen, et al. Analysis of Drying Process and Energy-saving Optimization Design of Gravure Oven[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(23): 28—31.
- [3] 贾海亮, 赵军, 李钰甫, 等. 凹版印刷工业的绿色节能技术[J]. 包装学报, 2015, 7(2): 53—58.
JIA Hai-liang, ZHAO Jun, LI Yu-fu, et al. Green Energy-saving Technology in Gravure Press[J]. Packaging Journal, 2015, 7(2): 53—58.
- [4] 段婷婷. 凹版绿色印刷标准吹响行业变革冲锋号[J]. 印刷技术·包装装潢, 2015(3): 7—9.
DUAN Ting-ting. Gravure Green Printing Standard is the Clarion Call to Change Printing Industry[J]. Printing Technology·Package Design, 2015(3): 7—9.
- [5] 葛汝峰, 马秀欠, 包能胜. 印刷涂布设备干燥系统节能减排技术探讨[N]. 中国包装报, 2010-09-06.
GE Ru-feng, MA Xiu-qian, BAO Neng-sheng. Discussion on Energy Saving and Emission Eeduction Technology of Drying System in Printing and Coating Equipment[N]. China Packaging News, 2010-09-06.
- [6] 张海燕, 刘金金, 徐卓飞, 等. 凹印机烘干装置风嘴横风板结构参数研究[J]. 包装工程, 2014, 35(23): 94—99.
ZHANG Hai-yan, LIU Jin-jin, XU Zhuo-fei, et al. Structural Parameters of Cross-wind-board for Drying Nozzle in Gravure Printing Machine[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(23): 94—99.
- [7] 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(23): 94—99.
- [8] 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 Heat Transfer Medium[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(5): 105—111.
- [9] 崔斌箴. 国外低碳绿色出版已初具规模[J]. 出版参考, 2010(28): 10—42.
CUI Bin-zhen. Foreign Low Carbon and Green Publication Has Begun to Take Shape[J]. Information on Publication, 2010(28): 10—42.
- [10] 马海珊. 高速凹版印刷机干燥箱流场特性分析及结构优化[D]. 西安: 西安理工大学, 2014.
MA Hai-shan. Analysis of Flow Characteristics of Drying Box in High Speed Gravure Press and Structure Optimization[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
- [11] 夏春华. 如何在高速凹印机上降低溶剂残留量[J]. 印刷技术·包装装潢, 2010(7): 53—55.
XIA Chun-hua. How to Reduce the Residual Solvent in the High Speed Gravure Press[J]. Printing Technology·Package Design, 2010(7): 53—55.
- [12] 姚允斌, 解涛, 高英敏. 物理化学手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
YAO Yun-bin, XIE Tao, GAO Ying-min. Handbook of Physical Chemistry[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1985.
- [13] 贾春江. 凹印机干燥系统的安全节能设计[J]. 印刷技术, 2009(9): 52—53.
JIA Chun-jiang. Safety Energy-Saving Design on Drying System in Gravure Press[J]. Printing Technology, 2009(9): 52—53.
- [14] 霍尔曼. 传热学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
HOLMAN J P. Heat Transfer[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011.
- [15] 严家騷, 王永青. 工程热力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
YAN Jia-lu, WANG Yong-qing. Engineering Thermodynamics[M]. Beijing: China Power Press, 2014.