

## 基于红外热成像的印刷橡皮布应变测试

贾志慧, 武淑琴, 王仪明, 乔铨, 田贝, 王世辉

(北京印刷学院 数字化印刷装备北京市重点实验室, 北京 102600)

**摘要:** **目的** 采用红外热成像系统对压印接触区域橡皮布的动态应变进行测试。**方法** 建立压印接触区域几何模型, 结合热弹性效应与热辐射理论分析温度与应变之间的函数关系, 并采用红外热像系统测得压印接触区域橡皮布的温度分布情况, 最后通过有限元仿真得到橡皮布压痕处的应变云图。**结果** 沿轴线方向, 压印接触区域橡皮布温度、应变均呈不均匀分布, 轴端温度高于中间区域温度; 轴端应力集中, 节点位移大, 变形量大, 中间区域节点位移小, 变形量小, 中间区域应变变量低于轴端区域应变变量。**结论** 采用红外热成像技术测试印刷过程中橡皮布动态应变的方法是可行的。

**关键词:** 红外热成像; 印刷橡皮布; 有限元; 动态应变

**中图分类号:** TS825 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)01-0067-05

### Strain Test of Printing Blanket Based on the Infrared Thermograph

JIA Zhi-hui, WU Shu-qin, WANG Yi-ming, QIAO Xin, TIAN Bei, WANG Shi-hui

(Beijing Key Laboratory of Digital Printing Equipment,

Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

**ABSTRACT:** The work aims to test the dynamic strain of printing blanket at the impression contact region by the infrared thermal imaging system. The geometric model of the impression contact region was built. Combined with thermos-elastic effect and thermal radiation theory, the function relationship between temperature and strain was analyzed. The temperature distribution of blanket at the impression contact region was obtained with the infrared thermal imaging system. Finally, through the finite element simulation, the strain cloud at the blanket impression region was obtained. Along the axial direction, the blanket temperature and strain at the impression contact region were unevenly distributed. The temperature at axis end was higher than that in the middle region. The strain at axis end was intensive. If the nodal displacement was large, the deformation would be large; for the middle region, such case would be just the opposite. The dependent variables of the middle region were lower than those at axis end. The infrared thermal imaging technology used to test the blanket dynamic strain in the printing process is feasible.

**KEY WORDS:** infrared thermograph; printing blanket; finite element; dynamic strain

胶印是印刷行业常见的印刷方式, 在印刷压力的作用下, 将来自印版图文部分的油墨经橡皮滚筒转移到纸张的表面来完成印刷。目前国内外学者对印刷橡皮布进行了研究。Jurkiewicz<sup>[1]</sup>建立了数学模型, 得出滚筒接触区域宽度公式; Ragulskis<sup>[2]</sup>运用时间平均几

何莫尔法分析了平版橡皮滚筒动态位移; Kim<sup>[3]</sup>分析了凹版胶印橡皮滚筒变形情况; Kumar<sup>[4]</sup>定量分析了橡皮布材料的一致性; Sorvari<sup>[5]</sup>研究了橡皮布对滚筒间纸张传递特性的影响; Kariniemi<sup>[6]</sup>分析了印刷张力受橡皮布类型、纸张等因素的影响; 吴锦之<sup>[7]</sup>研究了

收稿日期: 2016-07-12

基金项目: 北京市教委科技计划重点项目暨北京市自然科学基金重点项目 B 类 (KZ201510015016); 绿色印刷与出版技术协同创新中心项目; 北京印刷学院科技类项目校级重点研究项目 (Ea201504)

作者简介: 贾志慧 (1990—), 女, 北京印刷学院硕士生, 主攻印刷机械检测与故障诊断技术。

通讯作者: 武淑琴 (1973—), 女, 北京印刷学院副教授, 主要研究方向为印刷机械检测与故障诊断技术。

压印接触区两滚筒表面的速差与滑移量问题；Wu<sup>[8]</sup>研究了压印接触区域橡皮布弹性变形及压力分布特征；刘澎<sup>[9]</sup>研究了印刷橡皮布的粘弹性蠕变行为对胶印油墨传递机理的影响；贾振昌<sup>[10]</sup>分析了拉紧橡皮布引起滚筒弯曲是导致印刷压力不均匀的主要因素之一。传统电阻式应变片来测试印刷橡皮布应变时，受结构、运转速度等限制，而红外热成像测应变则具有非接触式、测量方便的优点。Peyroux<sup>[11]</sup>于1985年提出了完整的热-力耦合理论，论证了红外热成像和应力间的映射关系；李永胜<sup>[12]</sup>采用红外对2种典型的船用玻璃钢复合材料连接接头内的应力分布进行了测量；李旭东<sup>[13]</sup>运用红外分析了航空构件应力分布，得出红外测应力优于传统应变片；Choi<sup>[14]</sup>采用红外分析了试件动态应力分布与试件振动情况的关系。

文中通过分析压印接触区域橡皮布表面的温度变化，来研究橡皮布应变的分布情况，提出一种非接触式测印刷橡皮布动态应变的方法。

### 1 印刷过程橡皮布变形分析

普通橡皮布主要由表面胶层、粘合剂、底布组成，橡胶是制造橡皮布的主要材料，橡皮布具有弹性、耐油性、耐溶剂性、油墨传递性等，通过橡皮布卷轴固定在滚筒上<sup>[15]</sup>。橡皮布在胶印过程中作为图文印迹的中间转印体，是控制和影响印刷品质量的重要因素。胶印机的印刷单元一般由印版滚筒、橡皮滚筒、压印滚筒组成，见图1。印版滚筒和压印滚筒是硬性表面，施加压力后不易变形，橡皮滚筒表面的橡皮布包衬受压变形产生弹性力，因此，印刷过程中橡皮滚筒与压印滚筒、橡皮滚筒与印版滚筒接触会产生压力，即印刷压力。以压印滚筒与橡皮滚筒的接触为例，建立压印接触区域几何模型，见图2。橡皮滚筒表面包覆有橡皮布和衬垫，研究过程中将衬垫与橡皮布统称为橡皮布。

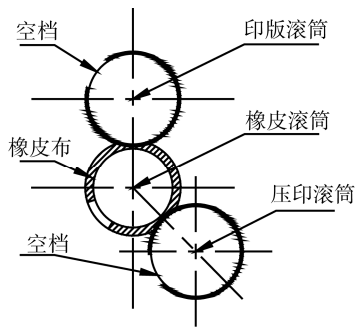


图1 典型印刷单元组成  
Fig.1 Typical printing units

图2中 $2b$ 为压痕区域宽度， $2b \ll R_1(R_2)$ ，压痕区域接近一小平面， $c_1$ 点为进入压印区域的点， $c_2$ 点为离开压印区域点，可得出进入压印区域后橡皮布压

缩变形量逐渐增大，远离压印区域橡皮布变形量减小，滚筒中心线 $O_1O_2$ 处橡皮布压缩变形量最大为 $\delta$ 。图中 $d$ 为橡皮布的厚度，将橡皮布分为 $N$ 层， $d_i$ 表示 $i$ 层橡皮布的厚度。以压印接触区域中心处为坐标原点建立 $xz$ 坐标系，橡皮布中心处建立局部坐标系 $x_i z_i$ ，定义函数 $F(i)=\{u(i), v(i), \sigma_z(i), \tau_{xz}(i)\}$ 为 $i$ 层橡皮布状态方程，式中 $u(i)$ 、 $v(i)$ 分别为 $x$ 和 $z$ 方向的位移， $\sigma_z(i)$ 为 $z$ 方向法向应力， $\tau_{xz}(i)$ 为 $xz$ 面的剪切应力，其中靠近滚筒第1层橡皮布形变量应为0，则可得出： $u(1)|_{z_1=0}=0$ ， $v(1)|_{z_1=0}=0$ 。压印区域在 $z$ 方向位移量为 $v(n)|_{z_N=d_N}=-[\delta^2-f_1(x)-f_2(x)]$ ，其中 $|x| \leq a$ ， $f_1(x)=x^2/2R_1$ ， $f_2(x)=x^2/2R_2$ ，为2个滚筒压印前的位移量。橡皮布为弹性材料，压印接触区域橡皮布表面产生压力 $p(x)$ 与摩擦力 $q(x)$ ，可得： $\sigma_z(N)|_{z_N=d_N}=-p(x)$ ， $|x| \leq a$ ， $\tau_{xz}(N)|_{z_N=d_N}=q(x)$ ， $|x| \leq a$ ，压印接触区域总压力 $p=\int_{-a}^a p(x)dx$ 。

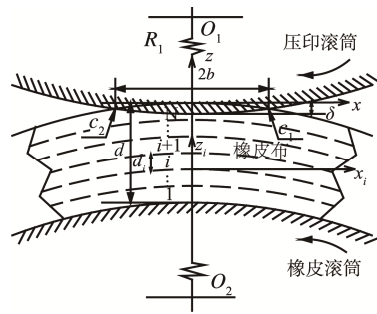


图2 压印接触区域几何模型  
Fig.2 Geometry of the impression contact region

### 2 印刷橡皮布应变与温度关系

#### 2.1 温度与红外辐射

据热辐射原理，温度处于绝对零度以上的物体，都有红外辐射。当物体受力发生形变时，总伴随温度变化，同时红外辐射也发生改变，因而物体的应变变化和红外辐射的变化有着内在的联系。可知，压印接触区域橡皮布受力发生形变，据热辐射原理，压印接触区域橡皮布应变变化的同时，橡皮布表面红外辐射也应发生变化。

斯忒藩和玻尔兹曼指出，黑体的辐射率与绝对温度 $T$ 的4次方成正比：

$$M_0(T)=\sigma T^4 \tag{1}$$

式中： $\sigma$ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数， $\sigma=5.6697 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

式(1)即为斯忒藩-玻尔兹曼定律的数学表达式，该定律也同样适用于任何物体，则有：

$$M_0(T)=\varepsilon(T)\delta T^4 \tag{2}$$

式中： $\varepsilon(T)$ 为物体发射率， $0 < \varepsilon(T) < 1$ 。可得出印

刷橡皮布表面温度与红外辐射之间的关系。

## 2.2 印刷橡皮布热弹性效应

根据压印接触区域几何模型, 印刷过程中印刷橡皮布受力产生绝热变形, 由热力学第一定律得知, 功可以转换为温度的变化, 即物体的应变状态发生变化时, 产生微小温度变化现象即热弹性效应, 那么对于各向同性材料, 如果变形是可逆过程(等熵过程), 则由热力学定律和弹性体的本构方程可推导出:

$$\Delta T = -\frac{T\alpha}{c_p\rho} \sum_{i=1,2,3} \Delta\sigma_i = -K_m T (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3) \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为线胀系数;  $c_p$  为定压比热;  $\rho$  为材料密度;  $T$  为瞬时绝对温度;  $K_m = \alpha/c_p\rho$ ;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  为物体上任一点的主应力;  $\Delta\sigma$  为主应力的变化。

由式(3)可以看出温度变化与主应力变化之和成线性关系。测出了温度变化, 就可以得到结构的应力变化, 即可采用红外热成像系统测压印接触区域橡皮布动态应变。

## 3 印刷橡皮布温度-应变分析

### 3.1 红外热成像法测试印刷橡皮布温度

以某国产双色印刷机为测试对象, 测试条件为正常工作运转速度下, 环境温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , 以橡皮滚筒与压印滚筒的压印接触区域为测试对象, 压印滚筒与橡皮滚筒、橡皮滚筒与印版滚筒排列空间存在安全杠。采用 VarioCAM Head 红外热成像系统进行测试, 用三脚架固定好红外热像主机, 镜头对准橡皮滚筒、压印滚筒压印接触区域, 从操作侧方向进行测试。连接 IRBIS 热图分析软件, 观察软件, 调整镜头使得画面捕捉整个接触区域, 根据测试对象结构特征, 将测试范围定为滚筒轴向约  $1/2$  的长度。

从测试结果可以看出, 印刷滚筒间的安全杠温度最为明显, 安全杠的存在使得观察者无法直接观测两者的接触区域, 因此选取接近区域作为压印接触区域的替代, 选取原则为从两者接触到离开的最短时间内温度变化不明显。测试结果表明压印接触区域中间部分颜色浅, 温度较低, 靠近操作侧轴端的压印接触区域颜色深, 温度比较高。压印接触域温度变化曲线见图 3, 纵坐标为温度变化  $\Delta t, \Delta t = t - t_0$ ,  $t$  为各点瞬时温度( $^\circ\text{C}$ ),  $t_0$  为橡皮布初始温度( $^\circ\text{C}$ ), 横坐标为距离(mm), 表示方向从轴端压印接触区域开始。

从图 3 看出, 随着距离的增加, 温度逐渐增加, 滚筒轴端温度高于滚筒中间区域点, 由于结构对称, 另一侧温度分布也为滚筒轴端温度高于中间区域温度, 据此可得出整个压印接触区域温度呈不均匀分布, 两轴端温度高于中间区域温度。结合式(3)可得

$\Delta\sigma = -\Delta T/(K_m T)$ , 其中  $K_m$  为标定因子,  $T = 273\text{ }^\circ\text{C} + t$ , 则  $\Delta\sigma$  与橡皮布温度变化  $\Delta T$  及瞬时温度  $T$  相关, 即  $\Delta\sigma \propto \Delta T/T$ , 则可通过观察  $\Delta T/T$  变化得出压印区域应力变化, 见图 4, 横坐标为测点位置, 纵坐标为  $\Delta T/T$ , 观察图 4 中曲线变化趋势, 则得出压印区域橡皮布表面应力变化也呈不均匀分布, 轴端应变变量应高于中间区域应变变量。

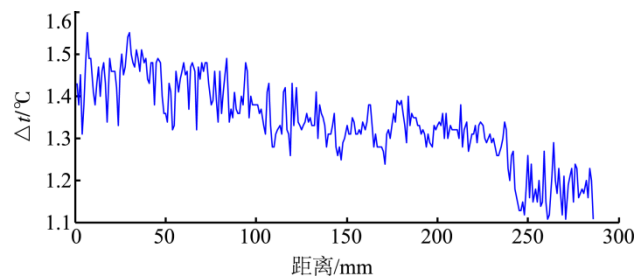


图 3 压印接触区域温度变化曲线

Fig.3 Temperature curve of impression contact area

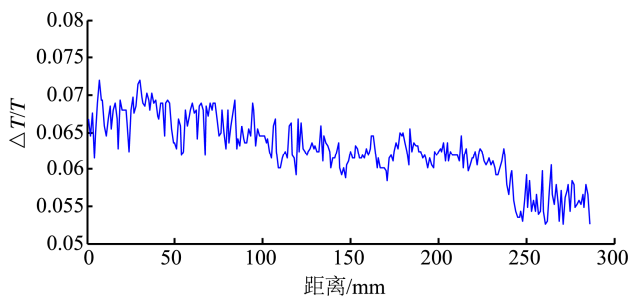


图 4 压印接触区域  $\Delta T/T$  曲线变化

Fig.4  $\Delta T/T$  curve of impression contact area

### 3.2 合压状态橡皮滚筒有限元仿真

为进一步分析接触区域应变情况, 采用 Ansys 仿真软件, 模拟橡皮滚筒与压印滚筒接触时橡皮布的应变情况。

#### 3.2.1 几何模型的建立

研究合压状态下压印接触区域橡皮布表面动态应变, 建立橡皮滚筒几何模型。为了便于模拟, 在橡皮布表面切出一小平面的压痕作为接触区域, 压痕宽度为  $7\text{ mm}$ 。由于是静力分析, 料阻尼基本不起作用, 故无需定义橡皮布材料的阻尼特性, 橡胶定义为超弹性体。

研究合压状态下压印接触区域橡皮布表面动态应变, 建立橡皮滚筒几何模型, 见图 5。橡皮滚筒长度为  $670\text{ mm}$ , 直径为  $150\text{ mm}$ , 空档角为  $104^\circ$ , 材料为 HT25-47, 材料密度为  $7800\text{ kg/m}^3$ , 弹性模量为  $1.373 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$ , 泊松比为  $0.27$ 。橡皮布为弹性材料, 其厚度为  $3\text{ mm}$ , 材料密度为  $1500\text{ kg/m}^3$ 。为了便于模拟, 在橡皮布表面切出一小平面的压痕作为接触区域, 压痕宽度为  $7\text{ mm}$ 。由于是静力分析, 料阻尼基本不起作用, 故无需定义橡皮布材料的阻尼特性, 橡

胶定义为超弹性体，选择 Polynomial 二阶，其中  $C_{10}=169\ 900\ \text{Pa}$ ， $C_{01}=362\ 900\ \text{Pa}$ ， $C_{20}=11\ 970\ \text{Pa}$ ， $C_{02}=-0.049\ 18\ \text{Pa}$ ， $D_1=250\ \text{Pa}$ ， $D_2=300\ \text{Pa}$ 。

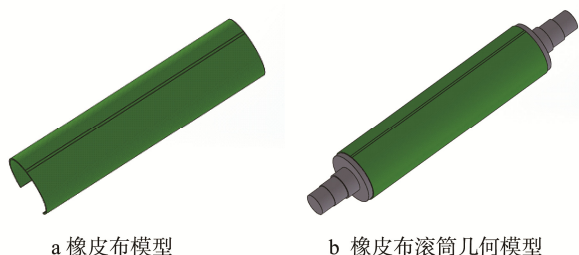


图5 橡皮布与橡皮滚筒几何模型  
Fig.5 Blanket and blanket cylinder model

### 3.2.2 仿真分析

将橡皮滚筒几何模型导入 Ansys 软件，定义单元类型，输入材料参数，划分网格，给定印刷压力数值。实际生产中，压印滚筒与橡皮滚筒间的压力常在  $40 \sim 120\ \text{N/cm}^2$  之间变化，个别情况下压力可达  $150\ \text{N/cm}^2$ 。分析时施加的印刷压力为  $150\ \text{N/cm}^2$ ，假设压力均匀分布，橡胶属于非线性材料，为非线性静态分析，求解前应该设置求解控制项，如分析类型、分析选项、载荷步、接触刚度等，观察残差曲线，得出橡皮布表面节点位移和应变云图。

橡皮布表面节点总位移云图见图 6a，反映了橡皮布的变形情况。沿滚筒轴线方向，两端变形大，中间变形小。橡皮布表面节点应变云图见图 6b，可知沿滚筒轴线方向应力分布不均匀，轴端应力分布比较集中。轴端应变变量高于中间区域应变变量，与图 4 变化趋势吻合，故可知此时压印接触区域橡皮布温度分布

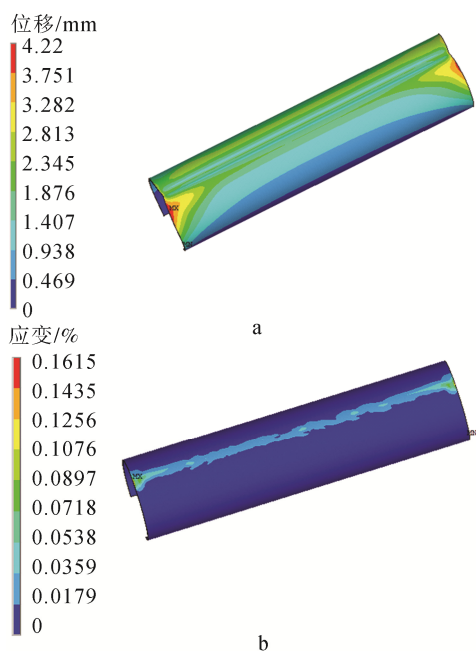


图6 橡皮布表面节点总位移和应变云图  
Fig.6 Nodes total displacement and strain contours of blanket

应为轴端温度高于中间区域，与实验测得结果相符，因此可采用红外热成像的方法测压印接触区域橡皮布应变情况。

## 4 结语

通过建立印刷过程压印滚筒与橡皮布滚筒接触区域的几何模型，得到印刷过程橡皮布压缩变形的情况；结合热弹性效应及热辐射理论建立了温度与应变函数的关系，得出压印接触区域橡皮布产生应变时温度也随之发生变化；采用红外热成像系统，现场测试得出整个压印区域温度分布不均匀，两轴端温度高于中间区域温度；结合有限元软件仿真得出，压印接触区域橡皮布形变量与应变变量均呈不均匀分布，沿滚筒轴线方向，两端变形大，中间变形小；轴端应力比较集中，轴端应变变量高于中间区域应变变量，应变趋势与温度变化趋势一致，故得出可通过橡皮布表面温度分布情况分析压印接触区域橡皮布表面应变分布，提出可采用红外热成像方法测量印刷过程橡皮布的动态应变。该方法的优点在于全场是非接触式的，可实时监测，测量方便，避免了采用传统式电阻应变片布点受测试对象结构限制等问题，也为进一步研究印刷过程橡皮布性能提供一定依据。

### 参考文献：

- [1] JURKIEWICZ A, PYRYEV Y. Compression of Two Rollers in Sheet-Fed Offset Printing Machine[J]. Acta Mechanica et Automatica, 2011, 127(7): 178—179.
- [2] RAGULSKIS M, MASKELIUNAS R, RAGULSKIS L, et al. Investigation of Dynamic Displacements of Lithographic Press Blanket Roller by Time Average Geometric Moiré[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2005, 43(4): 951—962.
- [3] KIM K, KIM C H, KIM H Y, et al. Effects of Blanket Roller Deformation on Printing Qualities in Gravure-Offset Printing Method[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2010, 49(4): 4—9.
- [4] KUMAR B, JAYARAMAN L, BALAJI K, et al. Analysis of Consistency of Printing Blankets using Correlation Technique[J]. Acta Graphica Journal for Printing Science & Graphic Communications, 2010, 21(1): 43—49.
- [5] SORVARI J, PAROLA M. Feeding in Rolling Contact of Layered Printing Cylinders[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 88(1): 82—92.
- [6] KARINIEMI M, PAROLA M, KULACHENKO A, et al. Effect of Blanket Properties on Web Tension in Offset

- Printing[C]// Montreal: 37th International Research Conference of Iarigai, 2010.
- [7] 吴锦之, 龚宗智. 胶印机滚筒包衬的优化分析[J]. 西安理工大学学报, 1985(1): 74—86.  
WU Jin-zhi, GONG Zong-zhi. Optimization of Offset Cylinder Packing[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1985(1): 74—86.
- [8] WU J G, NAKAZAWA M, KAWAMURA T, et al. Study on the Elastic Deformation Properties of the Blanket in Offset Printing[J]. Jsme International Journal, 1999, 42(3): 388—395.
- [9] 刘澎, 赵宁, 张海燕. 胶版印刷机橡皮布蠕变行为及其对印刷的影响[J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(4): 431—436.  
LIU Peng, ZHAO ning, ZHANG Hai-yan, The Creep Behavior of Offset Blanket and Its Effect on Printing[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 30(4): 431—436.
- [10] 贾振昌. 基于有限元分析的橡皮滚筒优化设计[J]. 制造业自动化, 2015(6): 57—60.  
JIA Zhen-chang. Optimization Design of Blanket Cylinder Based on Result of Finite Element Analysis[J]. Manufacturing Automation, 2015(6): 57—60.
- [11] PEYROUX R, CHRYSOCHOOS A, LICHT C, et al. Thermomechanical Couplings and Pseudoelasticity of Shape Memory Alloys[J]. International Journal of Engineering Science, 1998, 36(4): 489—509.
- [12] 李永胜, 吴健, 王纬波. 锁相红外热成像技术应用于复合材料连接接头全场应力测量研究[J]. 船舶力学, 2015(9): 1097—1115.  
LI Yong-sheng, WU Jian, WANG Wei-bo. Measuring Structure Stress Distribution Using Lock-in Infrared Thermography Technique[J]. Journal of Ship Mechanics, 2015(9): 1097—1115.
- [13] 李旭东, 刘勋, 马渊, 等. 锁相红外热成像技术测量结构的应力分布[J]. 工程力学, 2011, 28(11): 218—224.  
LI Xu-dong, LIU Xun, MA Yuan, et al. Measuring Structure Stress Distribution Using Lock-in Infrared Thermography Technique[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(11): 218—224.
- [14] CHOI M Y, PARK J H, KANG K S. Application of Thermography to Analysis of Thermal Stress in the NDT for Compact Tensile Specimen[C]// Auckland: 12th A-PCNDT, 2006.
- [15] 陈虹. 印刷设备概论[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010.  
CHEN Hong. Jndamentals of Printing Equipment[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2010.