

取样方向对含单边裂纹牛卡纸拉伸断裂行为的影响

杨佳¹, 王勇¹, 李蕊¹, 郭宁², 赵晓辉³

(1.天津商业大学 机械工程学院, 天津 300134; 2.国麒光电(天津)科技有限公司, 天津 300000; 3.天津房鉴院建筑工程质量检验检测有限公司, 天津 300070)

摘要: **目的** 探究取样方向对含单边裂纹牛卡纸拉伸断裂行为的影响, 以期提高牛卡纸为原料制作的包装盒等成品的强度。**方法** 首先在不同取样方向上制备含单边裂纹的牛卡纸试样, 然后基于数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法, 结合显微张力测试台测得不同取样方向与拉伸断裂载荷的关系图, 分析不同取样方向下裂纹尖端微观应变场, 最后结合电镜扫描测试进行对比分析。**结果** 结果表明, 通常情况下, 含单边裂纹的牛卡纸依然符合纸张纵向拉伸载荷大于横向拉伸载荷的规律, 取样方向越靠近横向, 裂尖区域应变值越大, 发生断裂时的拉伸载荷越小。**结论** 牛卡纸取样方向和纤维与纤维的结合强度是影响牛卡纸拉伸断裂行为的重要因素。

关键词: 取样方向; 单边裂纹; 拉伸断裂; 牛卡纸

中图分类号: TB484.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)15-0203-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.15.023

Effect of Sampling Direction on Tensile Fracture Behavior of Kraft Paper with Unilateral Crack

YANG Jia¹, WANG Yong¹, LI Rui¹, GUO Ning², ZHAO Xiao-hui³

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China; 2. Guoqi Optoelectronic Technology (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300000, China; 3. Tianjin Fangjian Construction Engineering Quality Inspection and Testing Co., Ltd., Tianjin 300070, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the effect of sampling direction on tensile fracture behavior of kraft paper with unilateral crack, in order to improve the strength of finished products such as packaging boxes made of kraft paper. First of all, the kraft paper specimens with unilateral cracks in different sampling directions were prepared, and then the relationship graph between different sampling directions and tensile fracture load was measured based on the digital image correlation (DIC) method combined with the micro tension test bed. Next, the micro strain field at the crack tip in different sampling directions was analyzed. Finally, comparative analysis was carried out in combination with the scanning electron microscope test. The results showed that, in general, the kraft paper with unilateral crack still conformed to the law that the longitudinal tensile load of the paper was greater than the transverse tensile load, and the closer the sampling direction to the transverse direction, the greater the strain value in the crack tip area and the smaller the tensile load when fracture occurred. The sampling direction and fiber to fiber bonding strength are two important factors that affect the tensile fracture behavior of kraft paper.

KEY WORDS: sampling direction; unilateral cracks; tensile fracture; kraft paper

收稿日期: 2021-10-15

基金项目: 天津市科技计划(20YDTPJC00120); 天津商业大学大学生创新创业训练计划(202110069295, 202210069184)

作者简介: 杨佳(1985—), 女, 硕士, 试验师, 主要研究方向为包装材料、光测力学。

近年来,电商业务的不断发展刺激了配送业务与快递业务的发展,这在很大程度上促进了纸包装行业的发展^[1]。在纸包装行业中,牛卡纸因其耐破度、环压强度和撕裂度都较高,多被用于纸箱包装^[2],是包装纸的主要原材料。随着人民生活水平的提高,对精品包装和轻包装的需求和消费不断增加,对包装纸的需求也随之增加,对包装纸原料的制备及其使用过程中相关性能的研究也越发重要。

近年来,对包装纸性能的研究主要集中在以下几个方面。首先,原材料基本性能测试分析是一个研究热点,基本性能主要包括耐折强度、撕裂强度、抗油、抗水强度等^[3-4];其次,包装纸微结构对基本性能的影响也逐渐成为学者们关注的研究内容^[5-7],如纤维的长度、粗度以及自身强度等对纸张强度的影响^[8],纤维组织的排列顺序与结构等对纸张强度的影响^[9]。同时,纸张性能、纤维材料对印刷效果的影响,以及印刷过后纸张的强度等性能^[10-11]也是该领域的重要研究内容;最后,包装纸在使用过程中承受一定载荷,其抗张强度、耐压强度等参数也是包装纸性能的重要指标^[12-13]。在对包装纸进行力学性能测试时,往往采用国标等规定的常规试验方法,该方法虽然可以得到弹性模量、抗拉强度等力学性能指标^[14],但是包装纸的微观结构与宏观力学性能的关系难以明确。另外,牛卡纸作为包装纸原材料,在制备过程中,纤维沿纸机方向具有较大的取向性,且纸张的物理性能随着纸张与纸机方向夹角的变化而改变^[15]。每张牛卡纸都存在由纤维排列、缠绕而成的空间结构形态,在受到外力作用时,这种空间结构也会发生一定的形态改变^[16]。在用牛卡纸原料制作包装盒等成品时,一方面牛卡纸取样位置随机性大,致使牛卡纸成品存在着强度差异,另一方面牛卡纸受到外力作用,如拉伸力,纤维空间结构变化不同也会造成牛卡纸强

度差异。然而,目前鲜有工作关注于牛卡纸试样取向及小裂纹对牛卡纸拉伸断裂行为的影响。在造纸过程中存在的纸面缺陷造成印刷网点不实,以及在包装使用过程中可能产生微小裂纹,这也将对牛卡纸的力学性能产生很大影响。虽然已有文献表明纸张的纵向拉伸强度大于横向拉伸强度,但当裂纹存在时,牛卡纸在拉伸过程中的断裂行为和裂纹尖端微观应变场与牛卡纸试样取样方向的关系仍需进一步研究,评估裂纹对牛卡纸拉伸行为的影响。

数字图像相关(Digital image correlation, DIC)方法具有无损、非接触、多尺度等优势,已广泛应用于材料的宏、微观变形测试^[17-20],与显微张力测试装置结合可以实时测量试样的全场变形。文中制备在不同取样方向上含单边裂纹的牛卡纸试样,搭建基于DIC方法的非接触光学显微测试平台,进而通过试验研究取样方向对含单边裂纹牛卡纸拉伸断裂行为的影响。

1 试验

1.1 试样制备

试验所用材料为牛卡纸厚度为0.6 mm,定量为450 g/m²。将牛卡纸的横向设定为90°(270°)方向,即牛卡纸纸卷的宽度方向;将牛卡纸的纵向设定为0°(180°)方向,即牛卡纸纸卷的周向,且该纸卷在抄造时多数纤维排列与造纸机运行方向平行。每隔30°设定一个取样方向,见图1a。由于虚线交汇点对称的试样取样方向基本相同,因此只对30°、60°、90°、120°、150°、180°方向的试样进行拉伸试验,见图1b。

含单边裂纹的牛卡纸试样尺寸见图2,单边裂纹深度C为1 mm。

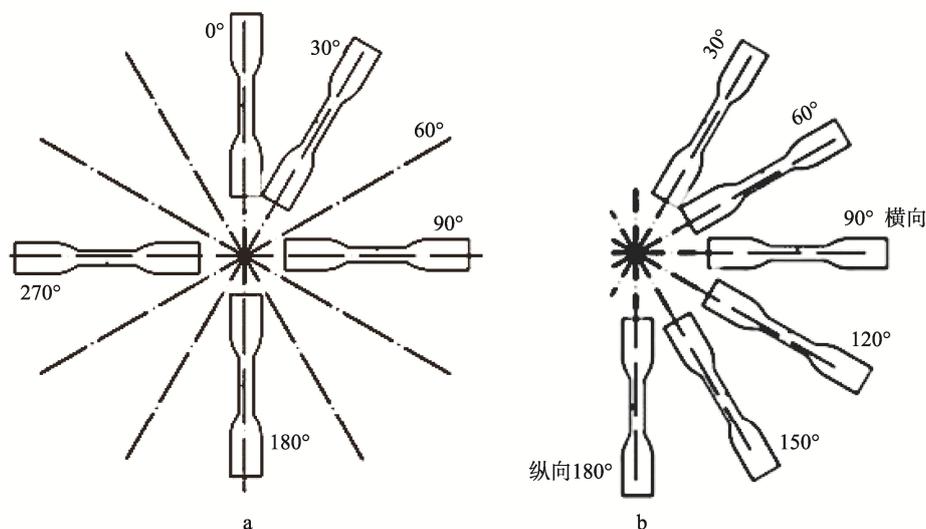


图1 牛卡纸试样取样方向

Fig.1 Sampling direction of kraft paper specimens

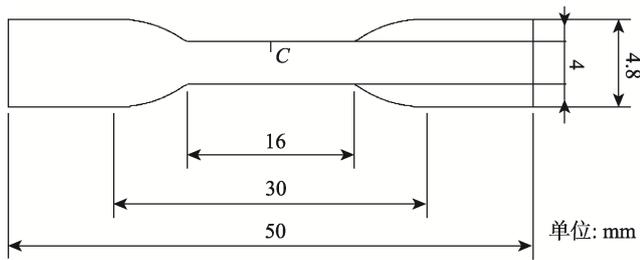


图 2 含单边裂纹牛卡纸试样尺寸
Fig.2 Dimensions of kraft paper specimens with unilateral cracks

1.2 试验装置

拉伸变形测试试验装置见图 3, 包括 TST350 显微张力测试台, 英国 Linkan 公司; STM6 测量显微镜, 日本奥林巴斯公司; DIC 测试系统的图像采集设备采用美国 UNIQ 公司的 UP-1830 型 CCD 相机, 分辨率为 1 024 像素×1 024 像素, DIC 计算软件采用 VIC-2D (Correlated Solutions, Inc.) 执行。显微张力测试台对牛卡纸试样进行原位拉伸, 装有 CCD 的测量显微镜采集试样在拉伸过程中裂纹尖端图像, VIC-2D 软件对采集图像进行计算, 获得裂纹尖端微区应变场。

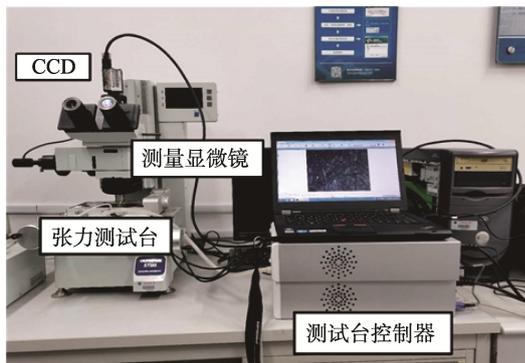


图 3 试验装置
Fig.3 Experimental set-up

1.3 拉伸试验

将不同取样方向 (30°、60°、90°、120°、150°、180°) 的牛卡纸试样分别进行原位拉伸试验, 拉伸速率为 10 μm/s。以牛卡纸纤维结构形貌作为变形信息的载体, 采用奥林巴斯显微镜进行图像采集, 物镜放大倍数为 4, 采集频率为 4 Hz。采用 DIC 算法计算试样感兴趣区域 (Region of Interest, ROI) 各个时刻的变形场。该试验中 DIC 计算 ROI 的子区尺寸为 41 像素×41 像素, 计算步长为 3 像素, 应变计算窗口尺寸为 11 像素×11 像素。每个取样方向制作 10 个试样进行试验, 取其均值作为真实值。

为了研究取样方向对含有单边裂纹牛卡纸拉伸断裂行为的影响, 文中对不同取样方向的拉伸试样进行了对比试验, 获得了含单边裂纹牛卡纸试样不同取

样方向-拉伸断裂载荷曲线图, 分析了牛卡纸裂纹尖端微观应变场, 并在扫描电子显微镜 (SEM) 下观察了不同取样方向的牛卡纸试样断口处纤维组织微观图。

2 结果与分析

2.1 取样方向-拉伸断裂载荷曲线分析

图 4 为含有单边裂纹牛卡纸试样取样方向与拉伸断裂载荷的曲线图。可以看出, 当牛卡纸试样取样方向为 180° (即取样方向与拉伸载荷平行) 时, 断裂载荷最大, 大于 80 N; 当取样方向为 30° 和 150° 时, 断裂载荷为 60~70 N; 当取样方向为 60° 和 120° 时, 断裂载荷大于 40 N; 当取样方向为 90° (即取样方向与拉伸载荷垂直) 时, 断裂载荷最小, 不大于 40 N。取样方向-拉伸断裂载荷曲线表明, 含有单边裂纹牛卡纸取样方向越偏向 90°, 其断裂载荷越小。这主要是由于牛卡纸内的纤维组织排列存在方向性, 在取样方向为 180° 的试样内, 纤维排列多表现为与拉伸方向平行同向, 在纤维与纤维间结合强度和纤维自身强度共同作用下, 试样的断裂载荷最大。在取样方向偏向 90° 的试样内, 纤维排列与拉伸方向不平行, 多数纤维不承受拉伸断裂载荷, 试样强度明显降低, 断裂载荷减小, 取样方向为 90° 时, 断裂载荷最小。已有文献表明, 不含裂纹的纸张取样方向受拉伸断裂载荷的影响较为明显^[21]; 文中试验表明, 即使牛卡纸含有裂纹, 但取样方向与拉伸断裂载荷仍有明显关系, 且符合纸张纵向拉伸断裂载荷大于横向拉伸断裂载荷的规律。综上, 为保证牛卡纸在制备或者包装使用过程中的强度要求, 尽量使其承受与纤维排列方向平行的载荷, 能够减少牛卡纸断裂发生的概率。

2.2 应变场分析

为了进一步验证含有单边裂纹牛卡纸试样的取样方向与拉伸断裂载荷的关系, 选取取样方向为 90°、150°、180° 的试样, 在 ROI 子区尺寸为 41 像素×41 像素区域内进行了应变场分析。图 5a、b、c 为 90°、150°、180° 方向上拉伸载荷为 0 的试样图像, 将它们作为参考图像。采用 DIC 方法计算在拉伸载荷为 38 N 时, 裂纹尖端区域沿 x 方向, 即拉伸方向裂纹尖端的应变场 ϵ_{xx} , 见图 5d、e、f。从图 5 中可以看出, 90° 方向上牛卡纸试样相较于 150°、180° 方向上的试样在裂纹尖端存在明显的应变集中现象。90° 方向上试样裂尖区域应变值最大, 为 0.08; 150° 方向上裂尖区域应变值次之, 为 0.064; 180° 方向上的裂尖区域应变值最小, 约为 0.019。再次验证了含有单边裂纹的牛卡纸试样取样方向越偏向 90°, 即取样方向越靠近横向, 裂尖区域应变值越大, 在发生断裂时的拉伸载荷越小。可以发现, 除了裂纹尖端附近有明显的应变集

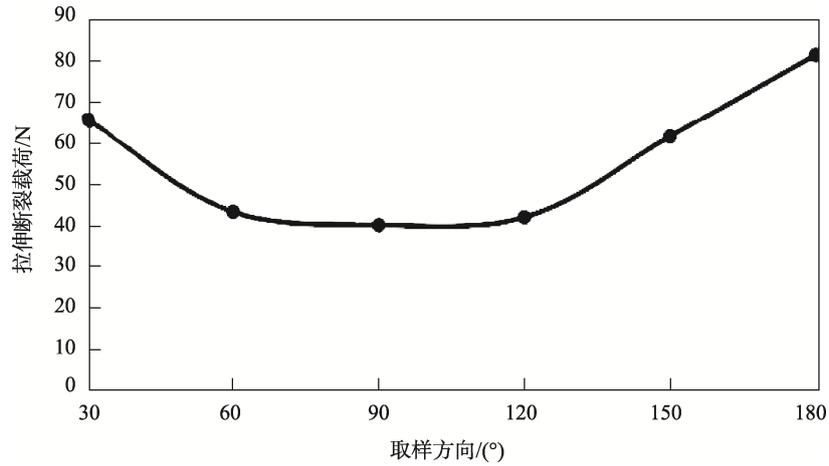


图4 取样方向-拉伸断裂载荷曲线
Fig.4 Sampling direction-tensile fracture load curve

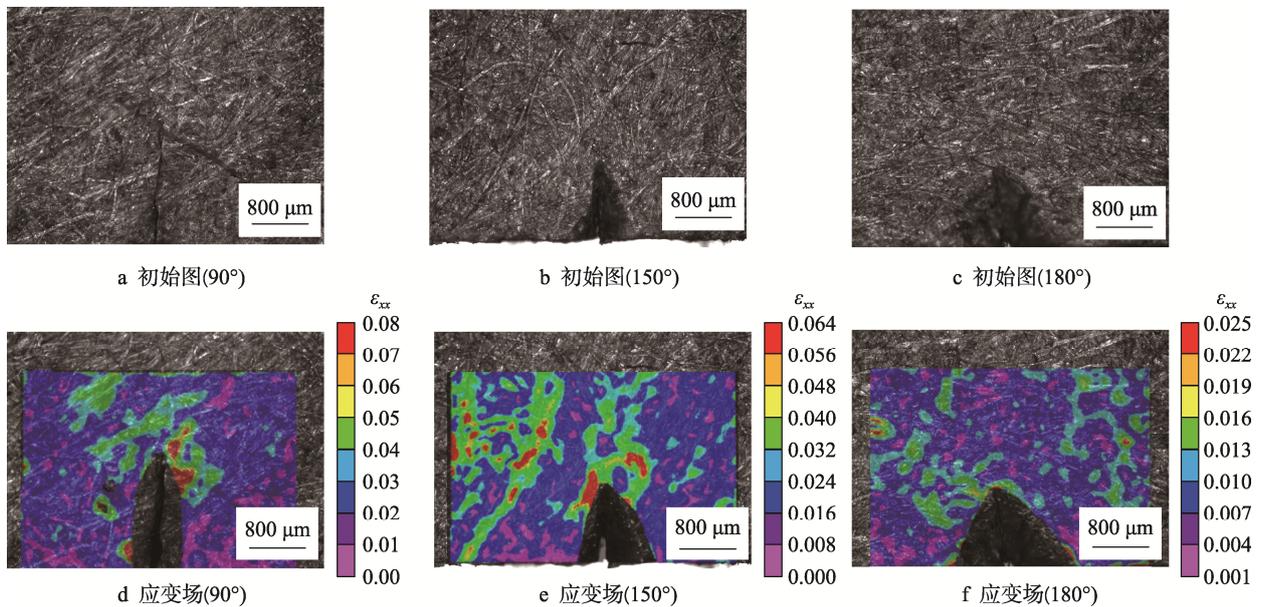


图5 试样裂纹尖端初始参考图与裂纹尖端拉伸应变场
Fig.5 Reference diagram of initial crack tip of specimens and tensile strain field at crack tip

中外,在牛卡纸试样其他区域也有应变集中现象,这主要是由于牛卡纸内纤维团聚或夹杂引起的。虽然有多处产生了应变集中,但是随着拉伸载荷增大,受预制裂纹影响,裂纹尖端的应变集中最为明显,应变值也最大。文中分析所使用的3种牛卡纸试样与其他试样现象规律基本相同,所以其他试样的结果就不再赘述。

2.3 断口图像分析

为了进一步研究取样方向与牛卡纸拉伸断裂间的关系,选取取样方向为30°、60°、90°、120°、150°和180°的牛卡纸试样断口,在SEM下观察断口处纤维组织的微观图,见图6。从图6中可以看出,在牛卡纸拉伸断口处,纤维“帚化”,且多数纤维自身

形貌完整,没有发生断裂。这表明牛卡纸纸张拉伸强度的主要影响因素为纤维与纤维间的结合强度,这与其他文献报告的内容相一致^[22-23]。在拉伸过程中,当试样取样方向为90°时,牛卡纸内多数纤维排列与拉伸载荷方向垂直,仅有少数纤维起承载作用,纤维与纤维间的结合强度是试样发生断裂的主要阻力;当试样取样方向为180°时,牛卡纸内多数纤维排列与拉伸载荷同向,虽然纤维自身强度起承载作用,且纤维自身强度远大于纤维与纤维间结合强度,但是随着拉伸载荷逐渐增大,纤维与纤维间率先分离,导致试样断裂,纤维自身未发生断裂。因此,除了使牛卡纸纸张纵向与拉伸方向平行外,还应加强牛卡纸纸浆中纤维与纤维间的结合强度,从而提高牛卡纸的拉伸强度。

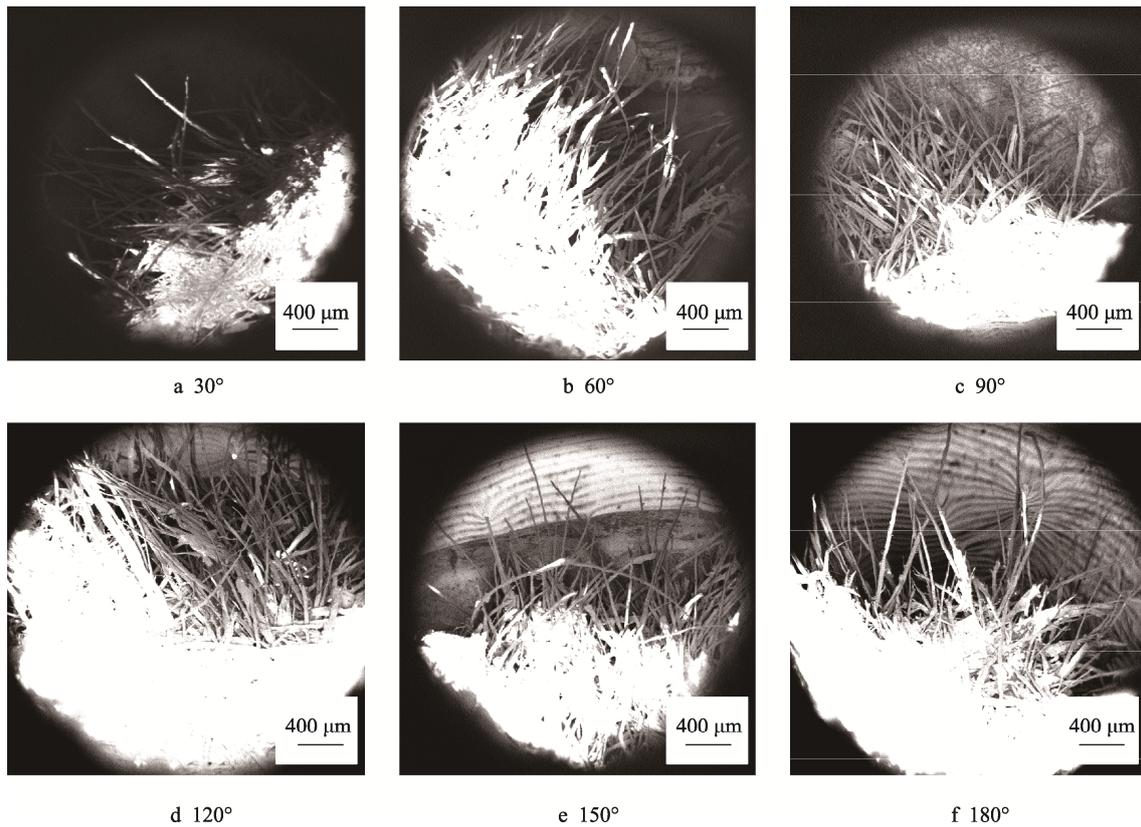


图 6 牛卡纸断口纤维组织
Fig.6 Fracture fiber microstructure of kraft paper

3 结语

文中通过数字图像相关方法研究了取样方向对含单边裂纹牛卡纸拉伸断裂行为的影响。研究表明,含单边裂纹的牛卡纸依然符合纸张纵向拉伸载荷大于横向拉伸载荷的规律,取样方向越靠近横向,裂尖区域应变值越大,在发生断裂时的拉伸载荷越小。在 SEM 下观察牛卡纸拉伸断口处发现,多数纤维自身形貌完整,没有发生断裂,表明牛卡纸纸张拉伸强度的主要影响因素为纤维与纤维间结合强度。牛卡纸取样方向、纤维与纤维间的结合强度均是影响牛卡纸拉伸断裂行为的重要因素。文中研究对提高以牛卡纸为原料制作的包装盒等成品的强度具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王岩. 2018 年我国浆纸市场分析——(I)纸张市场[J]. 造纸信息, 2020(1): 69-77.
WANG Yan. Analysis of China's Pulp and Paper Market in 2018[J]. China Paper Newsletters, 2020(1): 69-77.
- [2] 纸业联讯. 中国浆纸市场 2020 年上半年价格行情[J]. 造纸信息, 2020(9): 25-30.
Paper Industry News. Price of China's Pulp and Paper Market in the First Half of 2020[J]. China Paper News-
- letters, 2020(9): 25-30.
- [3] 杨玮炜, 李志健. 包装卡纸性能指标分析与控制[J]. 黑龙江造纸, 2013, 41(3): 19-20.
YANG Wei-wei, LI Zhi-jian. Analysis and Control of Performance Indicators Based on Packaging Paperboard[J]. Heilongjiang Pulp & Paper, 2013, 41(3): 19-20.
- [4] 彭鹏杰, 周小凡, 欧阳开桐, 等. 硅酸钠表面施胶改善纸张防水性能的机理探讨[J]. 中国造纸学报, 2020, 35(2): 36-40.
PENG Peng-jie, ZHOU Xiao-fan, OUYANG Kai-tong, et al. Discussion on the Mechanism of Improving Waterproof Property of Paper by Surface Sizing of Sodium Silicate[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2020, 35(2): 36-40.
- [5] KANG H, WON J, CHO B. Composite Filler by Pre-Flocculation of Fiber Fines and PCC and Its Effect on Paper Properties[J]. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 2020, 35(2): 251-260.
- [6] 陶劲松, 刘焕彬, 闫东波, 等. 纤维间剪切结合强度的一种测量方法[J]. 中国造纸学报, 2006, 21(4): 74-80.
TAO Jin-song, LIU Huan-bin, YAN Dong-bo, et al. A New Method for Determining Fiber-Fiber Shear Bond Strength[J]. Transactions of China Pulp and Paper,

- 2006, 21(4): 74-80.
- [7] 王宝玉. 木浆纤维表面化学特性与纸页强度关系的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 13-116.
WANG Bao-yu. Study on the Relationship between the Chemical Characteristics of Wood Fiber and Paper Sheet Strength[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011: 13-116.
- [8] 杨婷婷. 纤维特征对纸张结构和性能的影响[J]. 广西轻工业, 2007, 23(10): 15-18.
YANG Ting-ting. Influence of Fiber Characteristics on Paper Structure and Properties[J]. Guangxi Journal of Light Industry, 2007, 23(10): 15-18.
- [9] 李远华, 刘焕彬, 陶劲松, 等. 纸张抗张强度模型的研究进展[J]. 中国造纸, 2014, 33(1): 65-69.
LI Yuan-hua, LIU Huan-bin, TAO Jin-song, et al. Research Progress of Paper Tensile Strength Models[J]. China Pulp & Paper, 2014, 33(1): 65-69.
- [10] 李茜, 张振虎, 高艾京, 等. 纸张性能对印刷质量的影响研究[J]. 北京印刷学院学报, 2018, 26(9): 83-86.
LI Xi, ZHANG Zhen-hu, GAO Ai-jing, et al. Research on the Influence of Paper Performance on Printing Quality[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2018, 26(9): 83-86.
- [11] 芮洁, 赵晨飞, 王军, 等. 纸张性能对喷墨印刷色域的影响[J]. 数字印刷, 2020(2): 63-68.
RUI Jie, ZHAO Chen-fei, WANG Jun, et al. Effect of Paper Properties on the Color Gamut in Inkjet Printing[J]. Digital Printing, 2020(2): 63-68.
- [12] 李洁, 刘海棠, 袁晓娇, 等. 白水处理的混合沉淀物对纸张性能影响的探究[J]. 天津造纸, 2019, 41(3): 10-15.
LI Jie, LIU Hai-tang, YUAN Xiao-jiao, et al. Study on the Effect of White Water Treated Mixed Sediment on Paper Performance[J]. Tianjin Paper Making, 2019, 41(3): 10-15.
- [13] JOELSSON T, PETTERSSON G, NORGRÉN S. High Strength Paper from High Yield Pulps by Means of Hot-Pressing[J]. Nordic Pulp & Paper, 2020, 35(2): 195-204.
- [14] SOTA O, TOMONAGA O. Analytical Model for Determining Effective Stiffness and Mechanical Behavior of Polymer Matrix Composite Laminates Using Continuum Damage Mechanics[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2020, 29(10): 1512-1542.
- [15] 刘云飞, 彭毓秀, 顾锡爵, 等. 纸张纤维取向的微波测试分析[J]. 中国造纸, 1995, 14(6): 28-31.
LIU Yun-fei, PENG Yu-xiu, GU Xi-jue, et al. Analysis of the Fiber Orientation of Paper Microwave Testing[J]. China Pulp & Paper, 1995, 14(6): 28-31.
- [16] 沈臻懿, 林思飞. 纸张纤维空间结构在擦刮文书检验中的运用[J]. 武汉公安干部学院学报, 2011, 25(2): 10-12.
SHEN Zhen-yi, LIN Si-fei. Application of Paper Fiber Space Structure in Scratch Document Inspection[J]. Journal of Wuhan Public Security Cadre's College, 2011, 25(2): 10-12.
- [17] 贾佩星, 崔春丽, 宋展宏, 等. 散斑打印技术及其在纸弹性模量测试中的应用[J]. 包装工程, 2018, 39(9): 199-203.
JIA Pei-xing, CUI Chun-li, SONG Zhan-hong, et al. Speckle Printing Technology and Its Application in Elastic Modulus Measurement of Paper[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(9): 199-203.
- [18] ZHANG Xiao-chuan. Effect of Bubbles on Measurement Accuracy of Digital Image Correlation for a Stress Corrosion Test[J]. Applied Optics, 2019, 58(25): 6873-6881.
- [19] ZHANG Xiao-chuan, WANG Yan, GUO Ning, et al. Effect of Ferrite/Pearlite Banded Structure on the Local Deformation and Crack Initiation at Notches in Pipeline Steel[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 237: 107244.
- [20] 胡正兴, 崔春丽, 王琰, 等. 带状组织形貌对管线钢拉伸性能的影响[J]. 试验力学, 2020, 35(3): 417-424.
HU Zheng-xing, CUI Chun-li, WANG Yan, et al. Effect of Morphology of Banded Structure on Tensile Properties of Pipeline Steel[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(3): 417-424.
- [21] 王冬梅. 原纸弹性模量测定方法[J]. 纸和造纸, 2008, 27(2): 82-84.
WANG Dong-mei. Method to Measure Elastic Modulus of Raw Paper[J]. Paper and Paper Making, 2008, 27(2): 82-84.
- [22] 周小凡, 谢来苏, 隆言泉. 纸张抗张断裂机理的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2001, 25(5): 29-32.
ZHOU Xiao-fan, XIE Lai-su, LONG Yan-quan. A Study on the Mechanism of Paper Fracture[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2001, 25(5): 29-32.
- [23] 王彪. PVA 纤维对纸页结构与性能的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2015: 37-39.
WANG Biao. Effect of PVA Fiber on the Structure and Properties of Sheet[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2015: 37-39.