

纸皱结构参数的测量及与成纸柔软度的相关

王玉峰

北京澳普乐科技有限公司, 北京 100027

摘要: 本文通过仪器测量分析一组商业面巾纸的样品的皱纹结构参数和手感柔软度参数, 试图寻找皱纹结构参数, 与手感柔软度之间的相关性。测量数据表明, 纸样的纤维原料对手感柔软度具有显著的影响。在相同纤维材料的前提下, 皱纹结构某些特定的参数, 特别是三维形貌参数, 如起皱度, 皱纹转折曲率半径等, 与成纸的手感柔软度具有明确的相关性。

关键词: 纸浆; 纸张; 中国造纸; 生活用纸

中图分类号: TS7

1 介绍

(1) 生活用纸是一个快速成长的领域。与常规的纸张相比, 生活用纸具有独特的质量需求, 即在保证强度要求的前提下, 提供一定的吸收性和柔软性。而不同的生活用纸的种类, 不同的目标市场和定位, 对强度, 吸性性和柔软度具有不同的要求。通常来讲, 针对居家应用 (At Home, AT) 的纸种, 需要较高的柔软度和吸收性, 而针对离家市场 (Away From Home, AFH) 或商业应用 (Professional), 则需要较高的强度, 而对柔软度和吸收性不做更高的要求。生活用纸的生产企业, 需要根据市场定位、原料、工艺设备等性状, 有针对性地调节这些指标, 以达到质量、市场和生产成本的平衡。而生活用纸生产过程中的一个独特的工艺过程对这些指标具有关键性, 或决定性的影响, 这个工艺过程就是“起皱”。

(2) “起皱”是生活用纸生产中的重要工艺环节。以常用的干法起皱为例, 起皱就是指用刮刀对粘附在烘缸表面的纸页进行纵向机械压缩, 使纸页纤维网络中的部分纤维结合点在外力作用破裂, 纤维在机械作用下发生移位变形, 造成纸页结构的折叠和膨胀, 产生空隙, 从而提高了成纸的松厚度、柔软度和可压缩性。其宏观表现就是产生波纹状, 具有一定深度的周期性皱纹。

(3) 纸张生产过程中的各环节对皱纹的质量均有不同的影响, 包括纤维原料的选择、配比、打浆、烘缸表面状态和化学品、刮刀参数与状态及纸机的运

行状态等。皱纹结构的定量化的检测和表征, 是系统化地评估生产环节各参数对产品质量影响进行和精准调控品质的关键。

(4) 早在 2010 年, Nalco 公司开发出了基于图像的皱纹参数测量装置^[1]。该装置可以快速测量皱纹频率, 皱纹宽度及其分布等平面参数。随后 Kemira 公司^[2]和 UMT Research 公司先后推出了相应的皱纹结构分析仪^[3,4]。后者采了三维图像测量技术, 因此除了皱纹平面参数外, 还可以测量皱纹的三维立体结构, 如皱纹深度, 起皱率等。

(5) 近来, 随着商用柔软度测量仪器的普及, 使柔软度的量化测量成为可能。如 Emtec's 公司的 TSA (Tissue Softness Analyzer)^[5], 通过测量纸页的受激振动声音的频谱结合其它指标, 从而计算出纸页的手感柔软度。迄今为止, 人们并无成熟的理论解释手感柔软度的定义, 测量方法及手感柔软度与纸页结构之间的关联性^[6]。但是研究发现, 纸页的手感柔软度与皱纹结构有某些参数之这间具有一定程度的相关性^[7-9, 12-13]。而皱纹的结构参数是确定性的, 可直接测量的物理参数, 并可在生产过程中进行针对性的调节与控制。随着技术的发展, 皱纹参数的在线实时测量已成为可能^[10-11]。因此, 对皱纹结构参数的精确测量与表征, 理解皱纹结构参数与成纸质量之间的相关关系, 将会为生活用纸生产的优化提供有力的工具。

2 皱纹结构参数的表征

生活用纸的皱纹特征为平面上的三维周期性的结

收稿日期: 2024年05月09日

作者简介: 王玉峰 (1973—), 男, 汉族, 北京人, 本科, 北京澳普乐科技开发有限公司, 从事造纸仪器研发、设计、生产制造。

构，因此需要平面和横切面两个方向对皱纹结构进行测量和表征。

2.1 皱纹横切面

典型的皱纹横切面可以由图 1 所代表。这个周期性的结构可以用两个参数进行表征，即皱纹深度（振幅 d ）和皱纹宽度（波长 λ ），或皱纹频率（波长的倒数）。

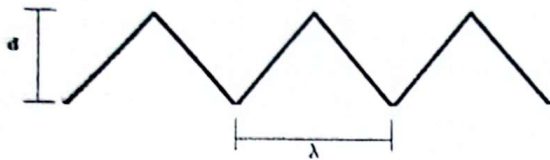


图 1 皱纹横切面示意图

工业界通常用单位长度内纸页折叠的次数来表示皱纹的频率，即每厘米或每英寸的皱纹个数（个/10mm，个/inch）。皱纹的深度即指波峰与波谷之间的距离，通常用微米表示。

对于实际生产的产品，其皱纹的折叠通常不会像图 1 所示的尖锐转折，而是像图 2 所示的圆弧形的平滑过渡。如果两个产品拥有相同的皱纹频率和深度，图 2 所示的皱纹结构会提供较高的表面柔软度（Patterson, 2013）。因此，需要一个新的参数来描述皱纹结构转折，即转折处的曲率半径 R 。曲率半径越大，则表示转折越平缓，在相同皱纹频率和深度下，纸页应具有较高的平滑度。

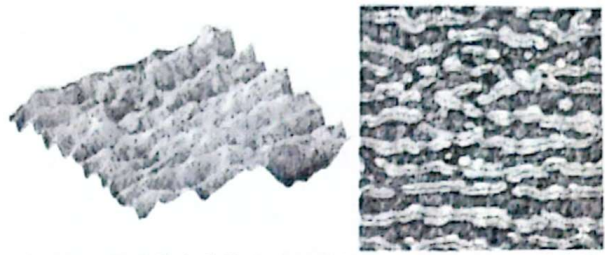


图 2 圆弧形皱纹示意图

2.2 粗糙度

(1) 用皱纹形貌在垂直方向的变化或起伏程度，通常用纸页上各点高度的均方差来表示。

(2) 沿纵向排列的每一条皱纹，不会完整地贯穿横幅方向。通常会断裂为许多断续的独立线段。每一个皱纹线段，高于水平面的凸起部分（浅蓝色），可以认为是一个独立的“岛”，被低于水平面的“凹槽”（红色）所包围。图 3 中的黑色线段表示每一个岛的中脊线。因此，皱纹的平面特性可以由下述几个参数描述。



左图为仪器测量和重构的皱纹结构的三维图像，右图为该区域对应的皱纹峰-谷及中脊线示意图

图 3 皱纹三维形貌及皱纹平面参数示意图

2.3 单位面积内独立皱纹的个数

可以用于表征皱纹的细腻程度或纸页结构被破坏程度。在单位平面内，越多的独立皱纹个数表示较高的纸页结构破坏程度，通常赋予纸页较高的细腻程度，较低的平滑性和高的手感柔软度。

2.4 独立皱纹平均长度及其分布

皱纹的细腻程度亦可以用独立皱纹的平均长度及其分布来表征。即测量面积内的有独立皱纹的平均长度。

2.5 皱纹宽度分级

用于描述皱纹不同纹理宽度组份所占的比率。对所有皱纹的宽度值进行统计，按宽度进行分级。按宽度分为细小皱纹（0-0.15mm），正常皱纹（0.15-0.25mm），中粗皱纹（0.25-0.35mm），及粗大皱纹（>0.35mm）。

2.5 起皱率

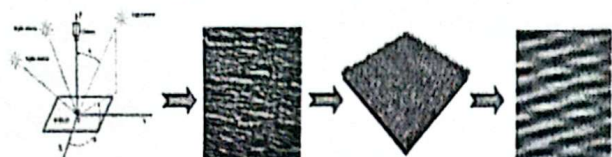
指纸页在起皱时的被压缩程度，或长度的减少量。该参数通常为纸机的运行参数。在成纸中，可以用纸页总面积与纸页的投影面积来近似。

3 皱纹结构参数的测量

(1) 皱纹质量检测的实质是测量皱纹的重复频率和幅度（深度）。传统方法是采用机械探针式表面轮廓仪、激光扫描表面粗糙度仪进行。该类仪器是基于逐点扫描的方式进行的。虽然可以获取纸面的三维形貌，但由于测量面积小，测量周期长，空间分辨率低，所以在实际应用中并不普及。

(2) 三维图像快速重构是以数字相机拍摄同一物体在不同角度照明下的多幅图像，采用光度学立体重构法计算出待测物体表面的三维形貌。图 4 为该方法的原理示意图。图中显示了摄像机与光源的相对位置关系（左 1）。在软件控制下获得一组在不同照明

条件下的图像(左2)。图像处理软件计算出该样品的三维形貌(右2)。通过快速傅里叶变换后提取宏观皱纹图像(右1)。软件自动确定纸页的纵向(MD)与横幅(CD)方向,并沿纵向对皱纹质量进行量化的测量、表征与统计分析。由于该方法所需的测量与分析时间短,不但可以取得高分辨率的平面图像以测量皱纹频率,还可以同时建立真正的三维皱纹形貌,从而准确地测量皱纹幅度(深度)。



(a) 光度法测量原理示意; (b) 在某一特定角度照明条件下摄像机拍摄的原始图像; (c) 光度法软件重构的三维开形貌图示意; (d) 软件识别的皱纹形貌峰-谷图

图4 光度法测量原理

4 手感柔软度及其测量

(1) 柔软度是一个主观指标,受多种因素的影响,包括纸页的表面特性,如平滑度,粗糙度,可压缩性等。迄今为止,尚无标准方法用于生活用纸手感柔软度的评估。通常评估方法包括专家组手感测量、仪器测量等。

(2) Emtec TSA 是工业界常用的柔软度测量方法。它通过测量纸页在机械力刺激下的声音频谱,结合一些纸页结构参数(如纸页挺度 D,厚度等)而计算出纸页的手感柔软度 HF。声音频谱的 TS7 波峰代表纤维和纸页结构对柔软度的贡献,低的 TS7 值对度高的柔软度;TS750 是表面粗糙度的影响。

5 实验方法

5.1 材料

共 20 个面巾纸样品用于本研究。因为本研究的目的是探寻皱纹的结构参数与成纸手感柔软度之间的相关性,因此,所选的样品均为常规干法起皱的产品。并排除了部分添加润滑剂和深度压花的纸样。为了更好地代表中国市场,测试样品中亦包括了部分非木材纸浆。本研究所有测量的样品均来源于中国市场上的商品面巾纸,包括盒装和小包装。产品种类涵盖全木漂白度浆(14 个样品),本色木浆(1),本色竹浆(3),漂白竹浆(1)和本色麦草浆(1)。

5.2 测量方法

5.2.1 皱纹结构测量

所有皱纹的结构参数均采用加拿大 UMT 公司生产的 TCQA 生活用纸皱纹质量分析仪进行。测量面积 7x7mm。正反两面分别测量。软件计算结果的纵向(垂直于纸面)三维空间分辨率为 1 μm 。测量时尽可能避开压花区域。

5.2.2 柔软度测量

采用 Emtec TSA 柔软度仪测量。柔软度的计算算法为面巾纸。

6 结果与讨论

6.1 皱纹结构参数

(1) 皱纹频率是最衡量皱纹质量变化的最直观,最易观察的参数。本组样品的测量结果如图 5 所示,频率范围分布在 40 - 53 个/10mm 之间。非木材纤维和未漂浆的产品通常有较高的皱纹频率。

(2) 本组样品的皱纹平均深度具有较宽的变化,波动范围在 35-75 μm 之间。皱纹深度似乎与浆料种类的关联性较弱。同样可以观察到表面粗糙度(图 7)和起皱率(图 8)之与所用浆料种类之间变无明确的相关性。

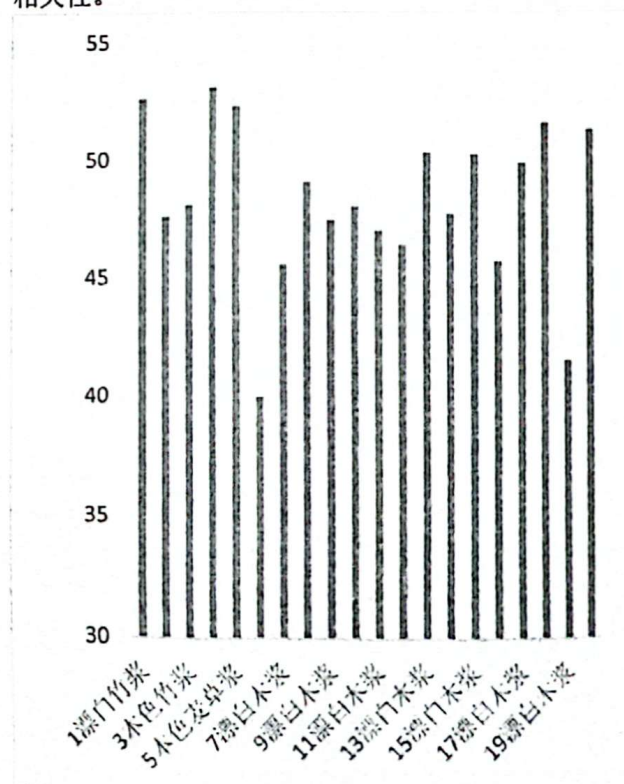


图5 测量结果 - 皱纹频率

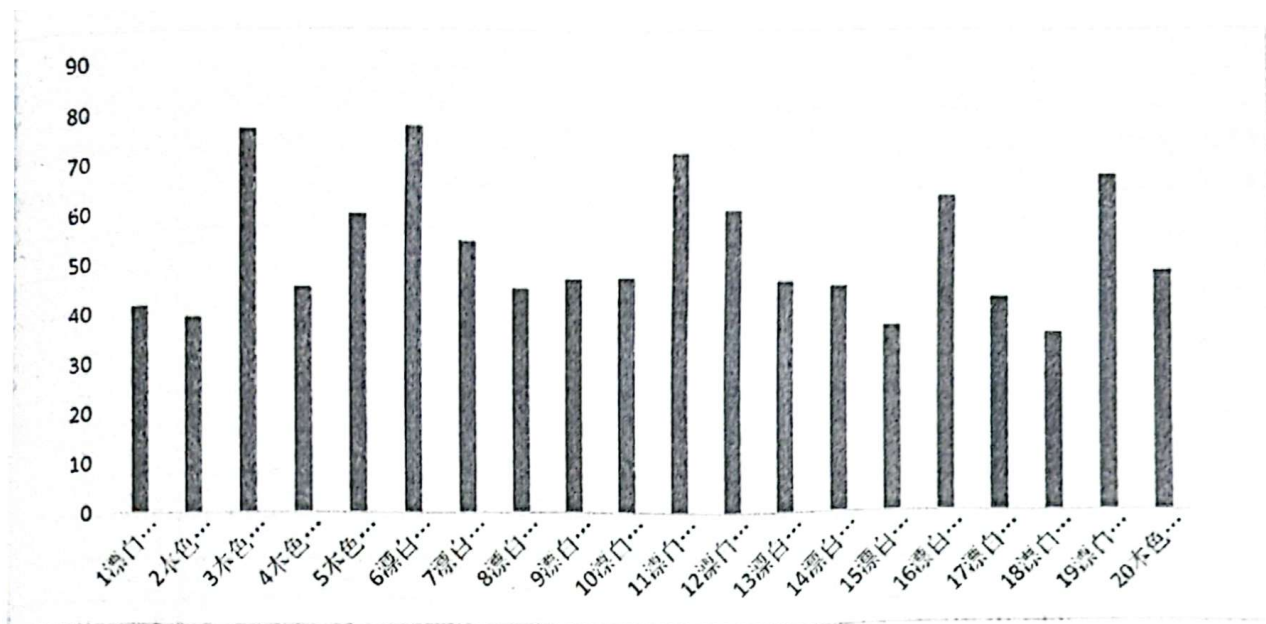


图6 测量结果 - 皱纹平均深度

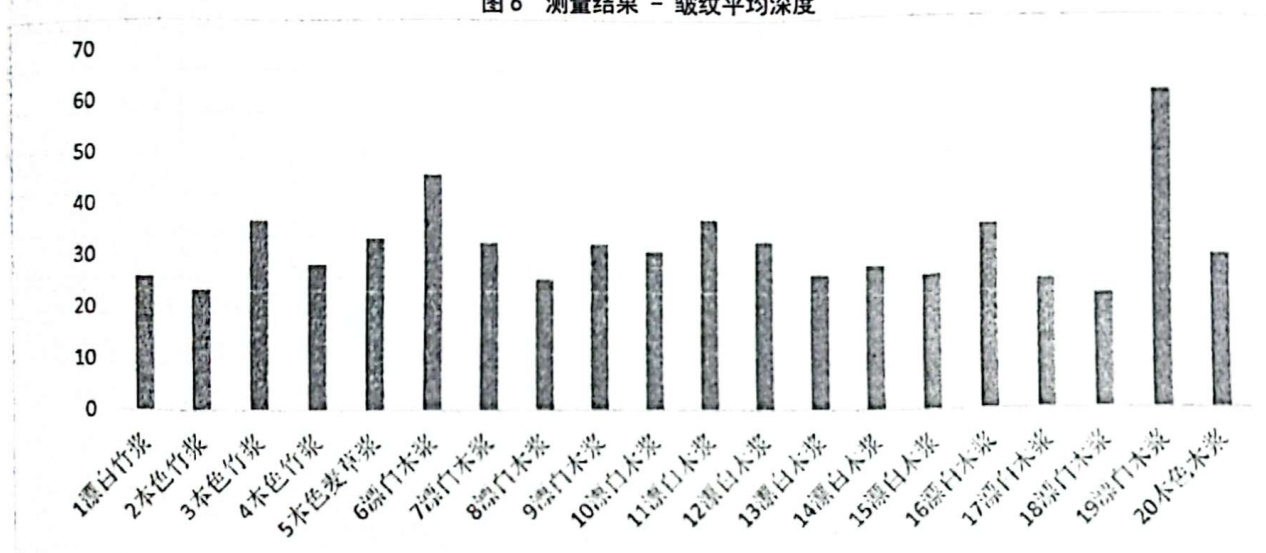


图7 测量结果 - 表面粗糙度

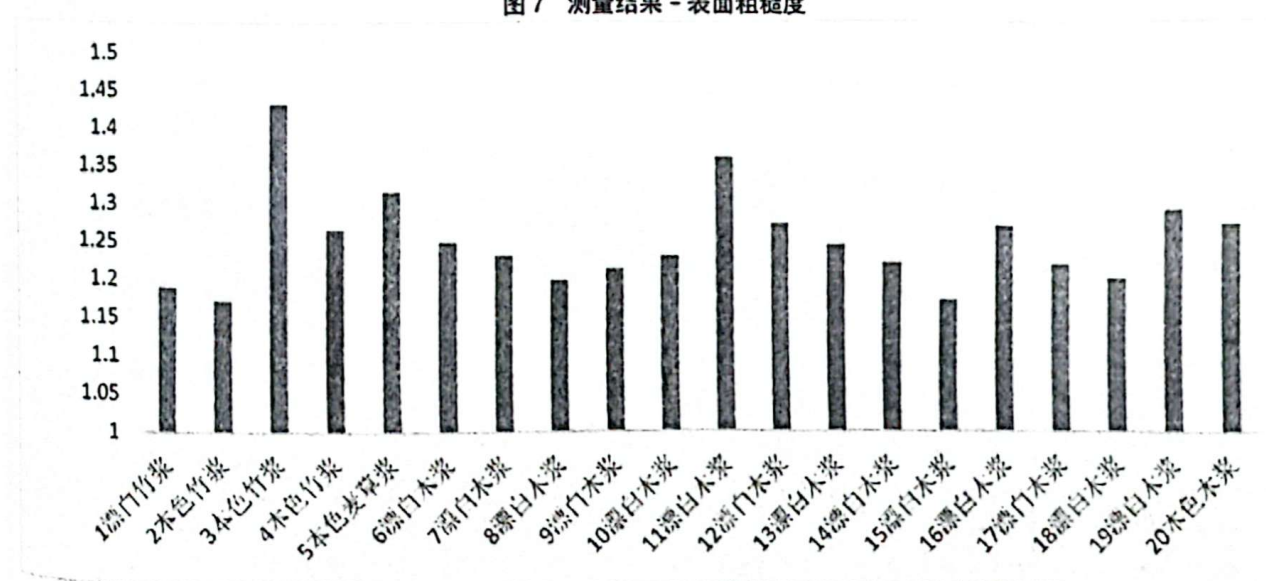


图8 测量结果 - 起皱率

表1 柔软度测量结果

样品编号	手感柔软度 HF	TS7	TS750	E [mm/N]	D [mm/N]
1 漂白竹浆	61.2	17.237	20.967	1.74	1.72
2 本色竹浆	68.4	16.497	11.431	2.43	2.43
3 本色竹浆	47.8	24.748	17.892	2.69	2.89
4 本色竹浆	67.5	15.575	16.354	2.06	2
5 本色麦草浆	35.9	27.207	28.254	1.71	1.72
6 漂白木浆	67.5	16.264	25.187	2.33	2.39
7 漂白木浆	66.2	16.328	24.351	2.36	2.37
8 漂白木浆	65.1	16.32	18.742	1.97	1.94
9 漂白木浆	68.5	14.477	29.164	1.99	1.92
10 漂白木浆	63.9	17.468	12.594	2.28	2.28
11 漂白木浆	53.2	22.036	15.764	2.47	2.61
12 漂白木浆	58	19.413	22.151	2.25	2.24
13 漂白木浆	61.9	17.408	16.74	1.98	2
14 漂白木浆	62.4	17.076	14.89	2.06	2.09
15 漂白木浆	63.4	16.696	18.028	1.85	1.81
16 漂白木浆	67.3	16.568	14.907	2.48	2.51
17 漂白木浆	63.4	16.981	16.406	2.03	2.06
18 漂白木浆	70.3	15.234	9.446	2.37	2.38
19 漂白木浆	60.2	18.161	29.592	2.19	2.2
20 本色木浆	67.7	14.911	17.595	1.84	1.8

6.2 柔软度测量结果

本组样品的柔软度测量结果总结在表格1内。

6.3 皱纹结构与手感柔软度的相关性

6.3.1 皱纹频率

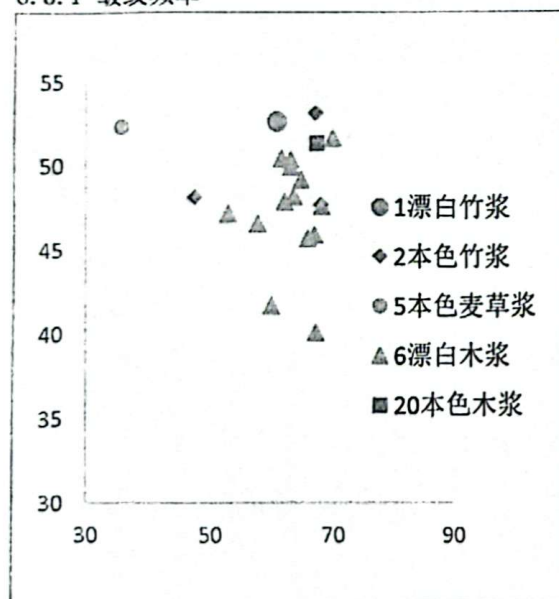


图9 皱纹频率与手感柔软度的相关性

从本组样品的结果(图9)可以看出,皱纹频率与手感柔软度这间没有显著的相关性。因为本研究所

用的样品为商业样品,各样品之间在生产原料、工艺与设备等方面均不相同。因此,皱纹频率与手感柔软度之间的直接关系或被其它因素所掩盖。生产实际表明,皱纹频率很大程度上受刮刀使用时间的影响,因此可以预计在同一机台,在相似的生产条件下生产的样品,会具有更明显的相关关系。

6.3.2 皱纹深度

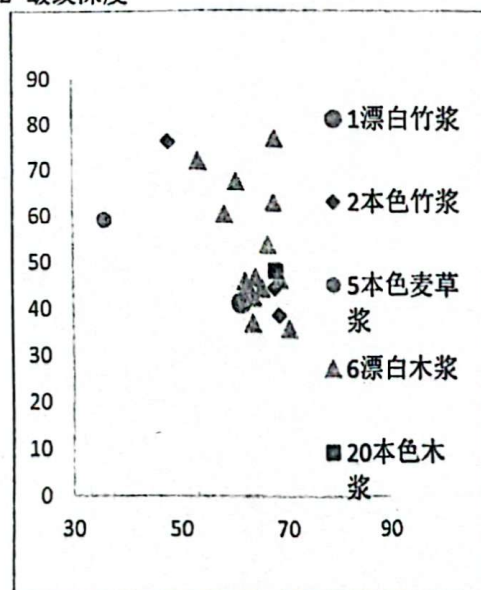


图10 皱纹平均深度与手感柔软度的相关性

从图 10 中可以观察到, 皱纹深度与手感柔软度之间存在负相关关系。可以认为, 皱纹较深的纸样, 在起皱过程中, 以发生宏观折叠为主, 而较少发生纸页结构的挤压和膨胀变形, 纤维网络结构完整性较高, 因此对手感柔软性具有负面的影响。

6.3.3 皱纹其它结构参数

与皱纹深度类似, 粗糙度 (图 11), 起皱率 (图 12) 均与手感柔软度呈负相关。这是因为纸页的粗糙度和测量的起皱率主要由其皱纹的平均深度决定。

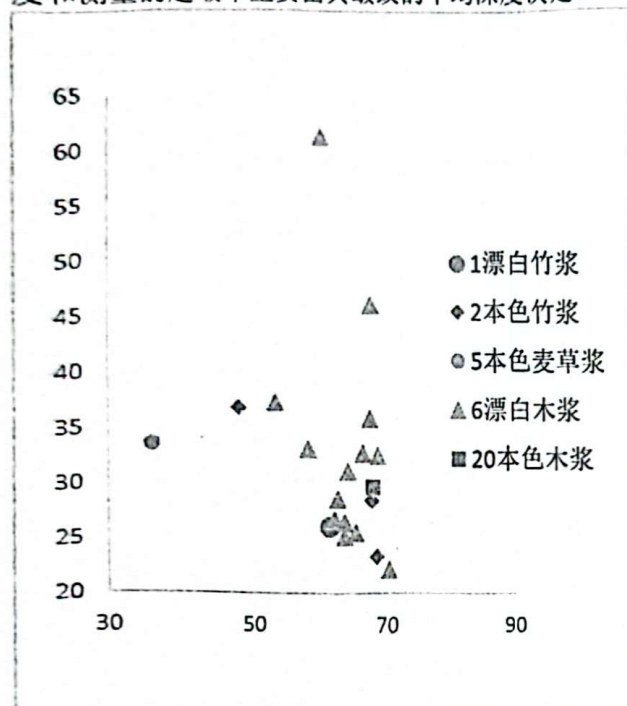


图 11 粗糙度与手感柔软度的相关性

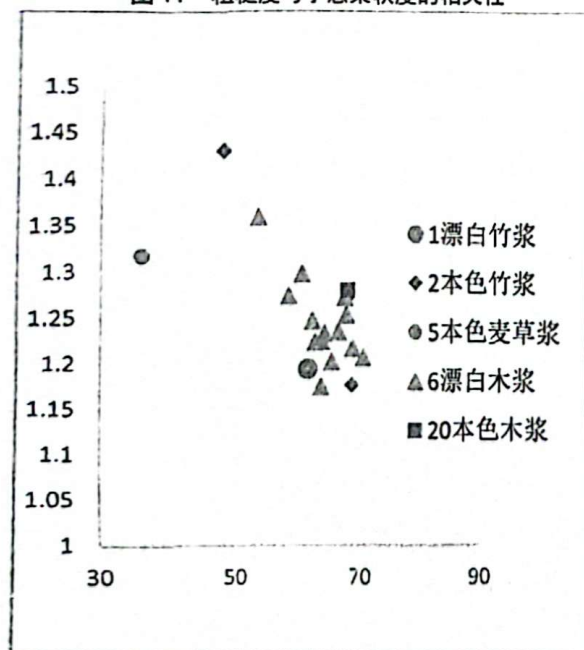


图 12 起皱率与手感柔软度的相关性

6.3.4 皱纹转折曲率半径

图 13 显示出皱纹转折曲率半径与手感柔软度具有非常高的正相关性。高的曲率半径表明皱纹在转折处过渡平滑。比较两个手感柔软度的样品不同的横切面剖线, 如图 14 所示, 可以看到手感柔软度高的样品, 具有较低的皱纹频率和深度, 但转折处更为平缓。

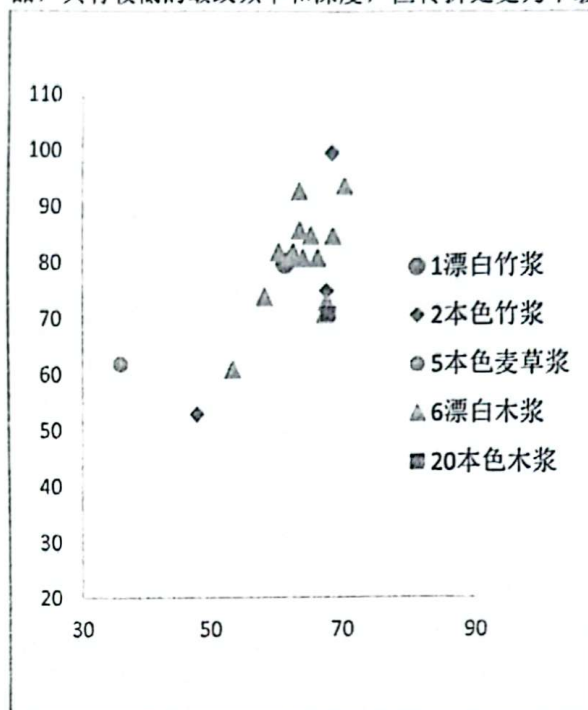


图 13 皱纹转折曲率半径与手感柔软度的相关性

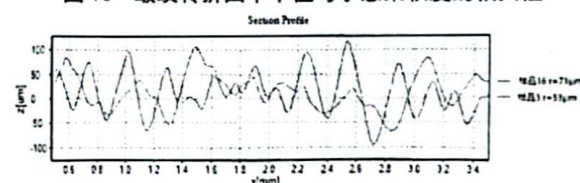


图 14 两个样品横切面剖线比较, 样品 16 曲率半径 $71\mu\text{m}$, 手感柔软度 67.3; 样品 3 曲率半径 $53\mu\text{m}$, 手感柔软度 47.8

6.4 讨论和总结

测量一组商业面巾纸样品的皱纹结构参数及相应的柔软度参数, 可以发现部分皱纹结构参数和纸页的手感柔软度之间具有一定的相关性。该批纸样的测量结果表明, 纸页皱纹的结构参数, 如皱纹深度, 起皱率, 特别是皱纹转折曲率半径, 对纸页的手感柔软度具有一定的相关性。这些皱纹可测量的表面结构参数, 是起皱过程对纸页纤维网络结构破坏形式和程度的表现表现, 而纸页纤维网络结构破坏是影响纸页手感柔软度的主要因素。相对于手感柔软度, 皱纹结构参数的测量直接直观, 更易于在生产过程中进行直接的调

整和控制。

参考文献

- [1] Bonday, L. Image Analysis to Quantify Crepe Structure Introducing Nalco's Crepe Analysis Tool Box [C], Atlanta, USA, TAPPI Conference, 2010.
- [2] Helen Morris, Kemira KemView™ Gen II Sheet Structure Analyser for tissue[EB/OL]. (2019-07-26)
- [3] Tissue Crepe Analyzer[EB/OL]. (2023-01-01) <https://umtresearch.com/#OptiTissue>
- [4] 张冬启, 洪蒙纳, 李继庚, 满奕. 基于梯度提升回归树算法的生活用纸皱纹等级软测量模型[J]. 中国造纸, 2020, ??(6).
- [5] Alexander Grüner, TSA -Tissue Softness Analyzer[C], Atlanta, USA, TAPPI Conference, 2016
- [6] Jessica Carette, Understanding and Measuring Tissue Softness[C], Atlanta, USA, TAPPI Conference, 2016
- [7] Jin Liu and Jeffery Hsieh, Characterization of facial tissue softness[J], TAPPI Journal, 2004, 3(4):3-8
- [8] Ritalla, J.-P. a. Simulation of creping pattern in tissue paper[J]. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 2012, 27(2): 375-381.
- [9] J. Reitbauer, et al. An analytical approach to assess the interrelation of surface properties and softness of tissue paper[J]. TAPPI Journal, 2023, 22(2):87-95
- [10] Kellomäki, M. Imaging-Based On-Line Measurement of Crepe Structure[C], Atlanta, USA, TAPPI Conference, 2015
- [11] Tommi Löyttyniemi, et al. On-line Tissue Softness Measurement - A useful addition to Tissue Automation Concept[C], Atlanta, USA, TAPPI Conference, 2016
- [12] Timothy Patterson, Evaluation and Enhancing Tissue Softness[C], Atlanta, USA, TAPPI Conference, 2013
- [13] 陈汉秋, 杨淑娟, 梁福根, 等. 基于刮刀磨损下的生活用纸纹路研究及质量评估[J]. 中国造纸, 2022, 41(10):110-117.