

冷链运输包装纸板的研究现状及发展趋势

许欣¹, 郑丰¹, 孔俊¹, 王平军²

(1.安徽中烟工业有限责任公司, 合肥 230088; 2.民丰特种纸股份有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: **目的** 基于冷链物流需求日趋旺盛, 对冷链运输包装纸板的研究现状进行系统分析。**方法** 分析冷链运输包装纸板国内外研究及应用现状, 对冷链运输常用的瓦楞纸板及其结构进行阐述, 同时对冷链运输包装纸板防水层和隔热层的加工工艺进行总结。**结果** 由植物纤维组成的包装纸和纸板, 具有可再生、无毒性、成本低等显著优势, 但存在使用寿命短、保温性能不佳、使用范围受限等问题亟待解决。**结论** 通过开发更高强度纸板原纸、赋予纸板特殊理化性能、应用多层结构纸板等方法, 预期将成为纸和纸板在冷链包装中的主要发展方向。

关键词: 纸和纸板; 冷链包装; 现状分析; 发展趋势

中图分类号: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)21-0133-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.21.019

Research Status and Development Trend of Cold Chain Transport Packaging Paperboard

XU Xin¹, ZHENG Feng¹, KONG Jun¹, WANG Ping-jun²

(1.China Tobacco Anhui Industrial Co., Ltd., Hefei 230088, China; 2.Minfeng Special Paper Co., Ltd., Jiaxing 314000, China)

ABSTRACT: Because of the increasing demand for cold chain transport and the expanding scale of their market with the development of social economy in China, systematic analysis of cold chain transport packaging paperboard is of great significance. In this work, the research and current application of cold chain transport packaging paperboards at home and abroad were analyzed. Corrugated paperboards and their structure commonly used in cold chain transport process were described. Moreover, the processing technology of waterproof layer and heat insulation layer of cold chain transport packaging paperboard was summarized. The packaging paper and paperboard composed of plant fiber had apparent advantages of renewable, non-toxic, and low cost. However, there were some problems to be solved, such as short service life, poor thermal insulation performance and limited use scope. In conclusion, paper and paperboard are expected to become the main development direction of cold chain packaging by developing higher strength paperboard base, endowing paperboard with unique physical and chemical properties, and applying multi-layer structure paperboard.

KEY WORDS: paper and paperboard; cold chain packaging; current situation analysis; development trend

纸和纸板具有折叠性能优异、印刷性能好、成本低等优势, 是应用最广泛的包装材料。在冷链运输的高湿度环境中, 普通纸板制备的包装箱会因吸潮而导

致机械强度变差, 从而失去对内装商品的保护作用。目前, 市面上还缺乏高性能的冷链运输包装纸板。文中梳理冷链运输专用包装纸板的概况, 分析国内外冷

收稿日期: 2020-12-08

作者简介: 许欣(1988—), 女, 安徽中烟工业有限责任公司助理工程师, 主要研究方向为卷烟辅材技术。

通信作者: 郑丰(1980—), 男, 安徽中烟工业有限责任公司工程师, 主要研究方向为卷烟材料。

链运输包装纸板的研究现状,总结冷链运输包装纸板的常见结构和加工工艺,并对未来冷链运输包装纸板的研究方向进行展望。

1 冷链运输包装纸板概况

1.1 研究背景

冷藏链的概念最早由 Albert Barrier 和 J.A. Rud-dich 于 1894 年提出^[1]。通过将整个物流过程控制于适宜的低温环境,能够较大程度减少物流过程损耗、防止产品污染、延长产品保质期。

国务院办公厅于 2017 年发布的《关于加快发展冷链物流保障食品安全促进消费升级的意见》指出,我国经济社会发展和人民群众生活水平不断提高,冷链物流需求日趋旺盛,市场规模不断扩大,冷链物流行业实现了较快发展。由于起步较晚、基础薄弱,冷链物流还存在标准体系不完善、基础设施相对落后、专业化水平不高、有效监管不足等问题^[2]。大力推广现代冷链物流理念,深入推进大众创业、万众创新,鼓励企业利用现代信息手段,创新经营模式,发展供应链等新型组织形态,全面提升冷链物流运行效率和服务水平。

1.2 研究意义

在冷链运输过程中,商品需要经历包装、装卸、运输、搬运、流通加工、配送等物流环节^[3-5]。包装能使商品保持较低温度,从而减少运输过程中的变质腐败,并有效延长产品保质期;还能将商品化零为整,使其便于集运和转运,并大幅降低劳动力的消耗^[6-11]。通过将包装好的商品层叠堆放还可以增加空间的有效利用率,降低运输成本,因此,性能优良的包装材料在冷链运输中发挥了重要的作用^[12-16]。

常见的包装材料主要有木板、塑料板和纸板。木板通常应用于重型货物的包装,很少在冷链运输过程中出现。塑料板具有价格低廉、隔热性能好的优势,是冷链运输过程中最常见的包装材料,但是随着“限塑令”和“禁白令”的相继出台,塑料板的使用将逐步受到限制。纸板可分为硬纸板、瓦楞纸板和蜂窝纸板。瓦楞纸板相较于硬纸板具有更高的强度,而与蜂窝纸板相比,其具有更成熟的制造工艺和更低的生产成本,是目前应用最广泛的纸基包装材料。

1.3 应用现状

国内外冷链运输包装纸板的生产主要有表面施胶和复合 2 种方式。

1) 通过对瓦楞纸板进行两侧表面施胶,使其具备一定的防水、防潮能力,并适用于保温要求不高的冷链运输过程,这类包装箱工艺简单,且加工成本较低,同时还具有制作工艺简单、易于折叠、占用空间

小的优势^[17-18]。

2) 复合式包装纸箱主要分纸板层、隔热层和防水层。其中,纸板层使用经单侧施胶的瓦楞纸板或硬纸板;隔热层使用泡沫垫、珍珠棉等材料;防水层使用疏水聚合物材料涂布于包装箱的内外两侧以及各层之间。复合式包装纸箱使用独立的隔热层,使整体隔热能力大幅提高,具有容易折叠、方便运输、防水防潮且保温时间长的优势,适用于保温要求较高的冷链运输过程,还可以根据用户的实际需求进行定制。

1.4 存在问题

目前,高性能冷链运输包装纸板依然存在工艺复杂、使用寿命短、保温效果差等问题。国内纸板的制作多以草类纤维作为主要原料,由此制作的包装纸板定量高但强度低。在冷链运输的低温高湿度环境中,纸板容易吸潮致使结构强度快速下降,从而导致塌箱、破损等情况的出现。与此同时,冷链商品在转运过程中会出现回温现象,温度差会加速包装纸箱吸潮,从而使包装箱失去对内装商品的保护作用^[19-23]。

虽然表面施胶能使纸板具备一定防水能力,但随着转运次数的增加,防水层将出现不同程度的磨损。在防水层被破坏的局部区域,纸板直接暴露在潮湿环境中使强度下降,纸箱的整体结构强度也随之降低^[24-26]。除此之外,相较于塑料板,单独的纸板隔热性能存在明显不足。复合结构纸板虽具有良好的隔热性能,但是通过增加保温层厚度实现的,且大量使用难降解的聚合物材料。

2 冷链运输包装纸板研究现状

2.1 国外研究现状

国外学者侧重于对冷链运输包装纸板的理论问题进行研究。研究包括冷链运输包装箱理论模型、制备工艺及性能等方面。此外,还将其与冷链物流技术、商品损坏率、纸箱适应性等因素结合起来分析。

1) 理论模型。Thijs 等^[27]研究了冷链运输过程的物理/多尺度模型,并提出冷链运输过程中产品冷却率、产品保质期、箱体通风率、箱体机械强度、能耗等进行同步定量评价的综合方法,为设计更加合理的冷链运输包装纸板提供了基础;冷链运输过程通常要求包装有一定的通风性能,Pankaj 等^[28]研究了纸箱通风性能与结构强度的关系,提出了通过有限元分析(FEA)来设计冷链运输包装纸箱的通风口形状、位置、尺寸等因素,并通过实验验证其结构强度。

2) 制备工艺。制备工艺是影响包装纸箱在冷链环境中结构强度的重要因素,Fadiji 等^[29]认为瓦楞纸板的力学性能直接取决于其形状,通过对瓦楞结构进行调整,可以增加其在高湿度环境下的强度。除此之外,减少瓦楞结构的厚度可以实现更好的折叠性和

印刷适性, 这对于包装行业很有意义; Namasivayam 等^[30]研究了 2 种不同结构的包装纸箱, 并将其置于冷链运输环境中与 EPS 箱进行对比。聚苯乙烯 (EPS) 箱是冷链运输过程中最常见包装箱, 但 EPS 是一种以石油为基础的产品, 不易生物降解或回收, 大量使用会带来严重的环境污染问题, 而使用高性能的包装纸箱替代 EPS 箱能有效解决这一问题; Jung 等^[31]研究了通过在普通瓦楞纸板上涂布化学品来提高瓦楞纸板的防水防潮性能, 以使其适用于冷链运输环境, 实验结果显示, 将防水剂与经过碳酸锆铵 (ACZ) 处理后淀粉混合后涂布在纸板的表面, 可以使纸板获得较好的防水性能; Dong 等^[32]研究了瓦楞纸板的制备过程中, 淀粉胶粘剂的配比对纸板防水防潮性能的影响。结果显示, 随着乙二醛用量的提高, 纸板在潮湿环境中的垂直压缩强度先增后减, 而撕裂度不断增加。

3) 纸板性能。周围环境温、湿度的改变将显著影响瓦楞纸板的物理性能, 为了能准确评估瓦楞纸板在高湿度环境中的结构强度, Allaoui 等^[33]使用拉伸试验机对不同环境中的瓦楞纸板进行了性能测试, 结果显示, 当相对湿度达到 90% 时, 用于测试的单坑瓦楞纸板的强度下降了近 50%, 未经处理的瓦楞纸板不能用于高湿度环境的冷链运输任务; Wonog 等^[34]通过对瓦楞纸板的吸湿特性与压缩强度的研究发现, 温度和相对湿度均会对瓦楞纸板的结构强度造成影响, 瓦楞纸板的吸湿特性受原纸类型的影响较大, 因此, 为改善低温高湿条件下冷链运输瓦楞纸箱的性能, 应优先开发高品质原纸的生产技术, 以及进行改善瓦楞纸箱结构的研究。

2.2 国内研究现状

国内学者关于冷链运输包装纸板进行的研究更侧重于应用方面, 大多通过研究纸板生产工艺、表面施胶、多层复合等方法增加纸板在冷链环境中的适应性。

1) 纸板生产工艺。徐雪萌等^[35]提出了利用经纬线纸制备高强度冷链运输瓦楞纸箱的方法。纸浆在拉伸状态的经纬线上成型, 并在干燥后撤销外加拉力, 使经纬线收缩产生的应力储存于纸幅中。在低温流通环境中, 由此方法制备的纸板相比同样芯纸和里纸的普通瓦楞纸板, 空箱抗压强度提高约 30%。

2) 表面施胶方法。徐艳秋等^[19]研究了冷链运输过程中包装纸箱塌箱、破损的问题, 并提出了通过双面施胶提高纸箱耐水防潮性能的办法。通过将聚苯乙烯-丙烯酸酯乳液改性氧化淀粉胶均匀、稳定地涂覆在成纸表面, 大幅提高了纸张的抗吸水性。使用表面施胶剂后, 其 Cobb 值从使用前的 120 g/m² 下降为 35 g/m²。

3) 多层复合结构。李迈骐^[36]发明了一种冷冻食

品的包装用纸及包装纸箱。该型纸箱结构包括面纸层、瓦纸层和里纸层, 其中里纸层由卡纸和镶铝薄膜组成, 在里纸层卡纸和镶铝薄膜之间还可设置珍珠棉材料以增加包装纸箱的隔热性能, 各层之间则通过能起到防水防潮作用的低密度聚乙烯层进行连接; 李迈骐^[37]发明了一种防水、防结冰海鲜包装瓦楞纸箱, 其中瓦楞纸板的面纸和里纸均为 BOPET 膜和牛皮纸复合而成。BOPET 膜表面涂覆 1 层含氟丙烯酸或者有机硅的疏水疏油的涂层, 在 BOPET 膜和牛皮纸之间设有防水的聚乙烯 PE 膜或聚丙烯 PP 膜粘合层, 从而使包装箱具备一定防水、防结冰的特性。

2.3 标准化现状

冷链运输过程中, 良好的包装材料是保证运输产品质量的关键因素。我国关于冷链运输包装用瓦楞纸板主要有 GB/T 31550—2015 这一标准。该标准规定了冷链运输包装用低温瓦楞纸板的定义、分类、要求、试验方法、检验规则等内容, 同时还对瓦楞纸板的耐破度、边压强度以及抗压强度指标提出了要求。该标准为冷链运输与贮存商品包装用低温单瓦楞纸箱、双瓦楞纸箱的设计、生产及检验提供了依据^[38]。

冷链运输纸基包装材料不仅使用瓦楞纸箱, 还包括蜂窝纸箱和复合式纸板, 不同加工工艺的纸箱性能也有较大差别。随着我国冷链运输流通比例的不断增加, 冷链运输包装材料的标准体系和门类子体系将得到进一步的完善和发展。

3 冷链运输包装纸板结构及加工工艺

3.1 瓦楞纸板结构

瓦楞纸板的性能主要由纸板层数、纸板厚度和瓦楞形状决定。合理的结构设计可增加纸板强度, 并赋予纸箱更好的环境适应性^[39—42]。按照瓦楞结构层数可以分为单坑 3 层瓦楞纸板、双坑 5 层瓦楞纸板和 3 坑 7 层瓦楞纸板, 见图 1, 瓦纸、里纸、面纸和隔纸的堆叠形成多坑瓦楞纸板。瓦楞结构层数越多, 隔热性能越好, 同时纸板的厚度越高。单坑瓦楞纸板的制作工艺相对简单, 多用于包装较轻的货物, 或用于复合式纸板的加工。双坑瓦楞纸板有 2 层瓦楞结构, 多用于包装较重或保温效果要求更高的货物, 是国内使用最多的包装纸板。3 坑瓦楞纸板则可用于包装重型或保温效果要求严格的货物。

瓦楞纸板的厚度包括原纸的厚度与瓦楞的高度。按照楞高由高到低, 常见的楞型有 A, C, B, E, F, N, G, 见表 1。其中, A 楞瓦楞纸板最厚, 缓冲性能最好, 垂直抗压强度最高, 但纸板最软, 容易受到破坏; G 楞瓦楞纸板最薄, 平面抗压强度最高, 纸板较硬, 不容易塌箱, 且印刷效果好, 但垂直抗压强度最低。

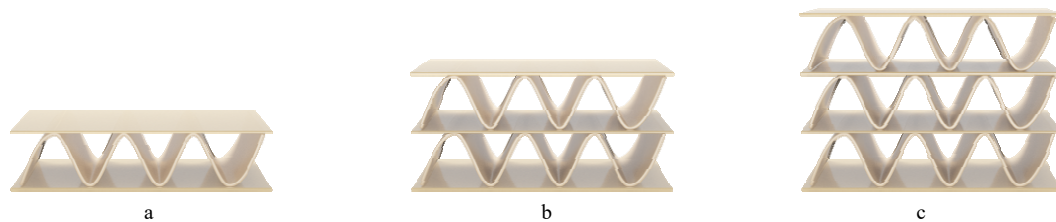


图 1 瓦楞纸板常见结构

Fig.1 Common structure of corrugated paperboard

表 1 瓦楞纸板的楞型
Tab.1 Shapes of corrugated paperboard

楞型	楞高/mm	楞距/mm	楞数
A	4.5~5.0	8~9.5	34±3
C	3.5~4.0	7~7.9	41±3
B	2.5~3.0	6~6.5	50±4
E	1.1~2.0	3~3.5	93±6
F	0.6~0.9	1.9~2.6	136±20
G	0.4~0.55	1.2~1.8	185±22

瓦楞结构一般呈波纹型,见图 2,从左至右依次为 V 型、U 型和 UV 型。V 型瓦楞纸板拥有较高的平面抗压强度,但缓冲性能较差,且受压变形后不易恢复;U 型瓦楞纸板缓冲性能好,受压后恢复性好,但平面抗压强度不高;UV 型瓦楞纸板既有 V 型瓦楞纸板的高抗压强度,又具备 U 型瓦楞纸板恢复性好的优点,是最常见的瓦楞纸板楞型。

3.2 瓦楞纸板加工工艺

瓦楞纸板的主要生产设备包括预热器、成型机、涂胶机、烘干机和分切机等。原纸经预热后送成型机压制成规定的瓦楞形状,再经涂胶机粘合烘干后送分切机制成产品,见图 3。预热机使原纸在进入瓦楞辊前进行预处理,通过升高温度使其有利于后续的成型和粘合过程。瓦楞成型机是瓦楞生产线的核心部件之一,包括单面瓦楞纸机和双面瓦楞纸机。原纸进入瓦楞辊前可通过水雾润湿使原纸水分满足工艺需要,随后由上、下瓦楞辊组合的方式将原纸压制成波形瓦楞

纸。瓦楞辊的质量、进纸方式、精度控制均会对产品质量产生影响。涂胶机通常使用以玉米淀粉为主体的粘合剂原料,通过上胶辊转移粘合剂转移到楞峰及面纸内侧,经烘干机在一定温度和压力下将纸板各层粘合在一起。

在潮湿的冷链运输环境中,普通瓦楞纸板吸水后结构强度会急剧下降。通过在纸板表面涂覆防水涂料,或在面纸和里纸成型过程中加入防潮剂,可使纸板具备一定的防水、防潮性能,从而减轻在冷链运输的高湿度环境中吸潮的程度,并避免塌箱、破损等情况的出现。防水层的特性对冷链运输包装纸板的适用性能具有显著影响,高性能的防水涂层能够增加冷链货物的有效转运次数,延长纸板在冷链运输环境中的使用时间。通过不同加工工艺制备的包装纸板具备不同的防水性能,常见的涂布方式包括辊式涂布、刮刀涂布、幕帘涂布以及浸渍涂布等^[43-48],见图 4。刮刀式涂布和辊式涂布是通过刮刀或携带轮将涂料转印到纸板表面,该类方法能够精准控制涂布量,适用于防水要求一般的冷链瓦楞纸板。幕帘涂布和浸渍涂布则可实现更高的涂布量,能够应对防水要求更严格的冷链运输环境。

冷链运输货物在转运和装卸过程中将不可避免地暴露在常温环境,因此提升包装纸板的保温性能至关重要。通过将瓦楞纸板和保温层分开制备,再通过防水粘合剂组装,能够显著提升瓦楞纸板的保温性能,使其适用于包装保温性能要求极高的货物。纸板作为承载层起保护箱体结构和承受质量的作用,通常位于纸箱的内外 2 侧,见图 5。保温材料起隔热作用,通常位于纸箱的中间,由塑料泡沫、珍珠棉等无机高

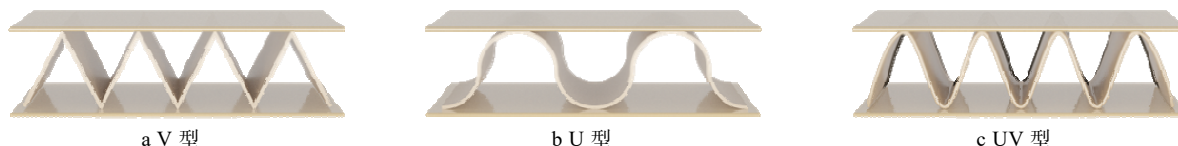


图 2 常见的瓦楞形状

Fig.2 Common corrugated shapes

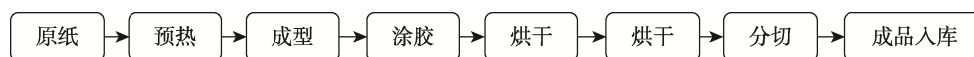


图 3 瓦楞纸板加工工艺

Fig.3 Processing method of corrugated paperboard

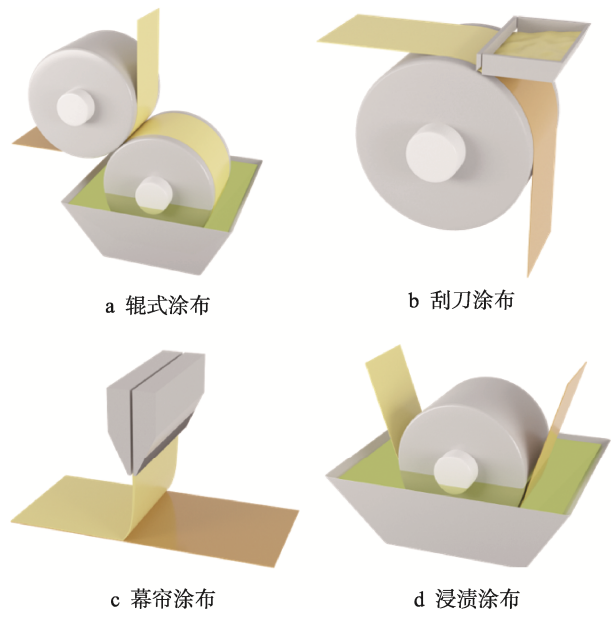


图 4 纸板常见涂布工艺
Fig.4 Common coating process of paperboard

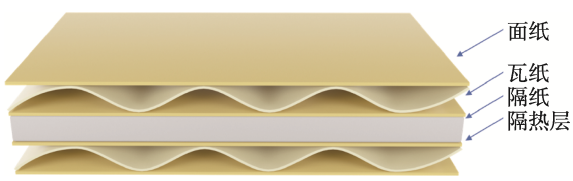


图 5 复合式瓦楞纸板的结构
Fig.5 Structural diagram of composite corrugated paperboard

分子材料组成^[49]。有机/无机材料结构的复合式纸板综合了 2 种材料各自的优点和特性，既有无机隔热材料优良的保温性能，又具备纸板易折叠、印刷性能好的优点。该类结构设计方式更加灵活，加工成本相对较低，是目前市面上使用最普遍的冷链运输包装纸板。

3.3 蜂窝纸板结构

蜂窝结构是覆盖二维平面的最佳拓扑结构，具有优异的力学性能。与瓦楞纸板类似，蜂窝纸板同是一种拥有规范夹层结构的纸基板材。蜂窝纸板的上、下 2 层为面纸，中间为错位粘结的蜂窝形状纸芯，由粘合剂将面纸和纸芯粘起来形成具有正六边形夹层结构的纸板，见图 6。蜂窝的孔径比为蜂窝孔距与其内径的比值，其中 L 为孔格边长， r 为孔格内径， d 为孔格孔距。孔距与内径之比即为蜂窝纸板的孔径比，当孔径比为 1 时，其宽度为展开前宽度的 75%，此时蜂窝芯的形状更接近正六边形，蜂窝结构的力学性能达到最佳^[50]。蜂窝纸板通常为 3 层结构，厚度一般在 5~90 mm 范围内变化，不同厚度的蜂窝纸板具有不同的承重能力，可通过改变蜂窝纸芯厚度的方式对厚度进行调整。纸张定量、面纸和纸芯厚度、芯柱

高度和孔径等均可进行灵活设计，从而生产出强度符合要求的蜂窝纸板。

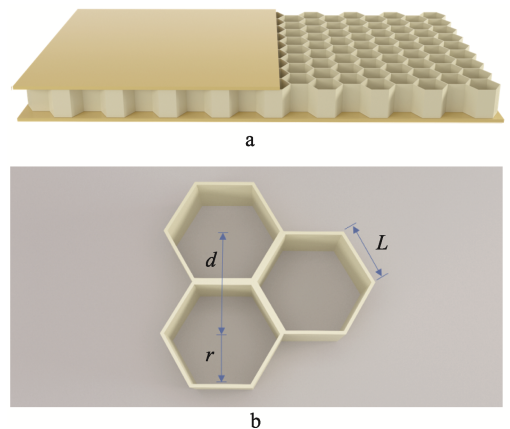


图 6 蜂窝纸板结构
Fig.6 Structural diagram of honeycomb paperboard

3.4 蜂窝纸板加工工艺

蜂窝纸板的加工工艺包括拉伸法和轧制法，2 种方法的主要区别在于蜂窝纸芯的加工方法。拉伸法通过在材料表面位错地涂覆粘合剂，再经裁剪和堆叠，最终拉伸为蜂窝纸芯。其制芯工艺又可分缠绕式和叠层式 2 种，其中层叠式工艺是将原纸分切为一定规格的纸页，使用粘合剂将单层纸页错位粘结，经切条机切成芯条再拼接为连续芯纸，最后经拉伸、复合工艺制成蜂窝纸板，见图 7。轧制法通过片层纸板材料压制成波纹状，再经粘合、烘干的方法制备，该方法的加工工艺流程与瓦楞纸板相似。由于轧制法的涂胶量较高，一般不采用此方法进行生产。2 种方法在实际生产过程中均可分为芯纸制备和多层复合两大工序，优良的芯纸制造工艺及纸板后加工工艺是保证蜂窝纸板产品质量的重要因素。



图 7 拉伸法工艺流程
Fig.7 Drawing process flow diagram

单个蜂窝纸板通常具有固定的孔格孔径，可填充隔热材料以增加其保温性能，从而应用于保温性能要求较高的冷链货物包装^[25]。所填充的隔热材料包括碎纸屑、木屑、稻壳等，实现有机原料的综合利用。使用固化剂对填充物进行固化，以避免面纸、里纸的破损或内部填充物的洒落。蜂窝结构中的填充物，既能提升纸板的隔热性能，又能提高强度，其结构见图 8。由于制备工艺复杂，填充法制备保温蜂窝纸板还很难应用于大规模生产。填充法可以有效利用有机可降解废料，在提升纸箱保温性能的同时，兼顾了绿色环保的发展理念，拥有良好的发展前景。

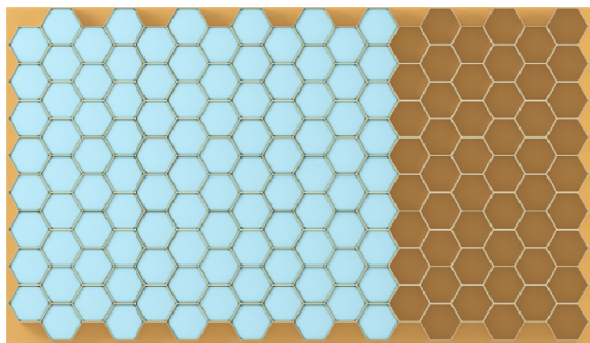


图8 含保温填料的蜂窝纸板结构
Fig.8 Structural diagram of honeycomb paperboard containing insulating filler

4 冷链运输包装纸板发展趋势

4.1 开发强度更高的纸板原纸

原纸是制造纸板的原材料,纸板性质受原纸类型的影响较大,开发高强度原纸对冷链运输包装纸板的发展具有重要意义。对高性能纸板原纸的研究可围绕纤维原料的选择、打浆方式的优化、湿强剂的选择等3个方面展开。

1) 纤维原料的选择。原纸的抗张强度、撕裂度和耐破度等物理性能与纤维原料种类密切相关。木材纤维原料具有制浆得率高、杂质少、成纸强度高等优点,但其成本较高,主要应用于高品书写纸和生活用纸的生产^[51]。草类纤维原料具有木素含量少、易施胶、填料留着率高、来源丰富、成本低等优势,但同时存在纤维细短,杂细胞含量高,且成纸质量较差等缺点,主要通过掺入其他纸浆后制备文化用纸,也用于包装纸板的生产^[52]。废纸浆原料的使用可以有效利用回收纸质资源,但存在纤维长度不一、化学组分复杂和纤维角质化、纤维成纸强度并不稳定等问题,应尽量减少废纸浆原料的比例^[53]。我国是世界上最大的草浆生产国,冷链运输包装纸板主要使用草类纤维和废纸浆原料,造纸工业的国情决定了包装纸板的生产在很长一段时间内都难以脱离草类纤维原料。然而,在冷链运输专用包装纸板纤维原料的选择过程中,不仅要考虑成本问题,还需要尽可能获得更高的纸板强度。一般而言,化学浆强度高于机械浆,木浆强度高于草浆,因此,将不同纤维原料进行混合制备,是研究可以应用于冷链运输的纸板原纸制备方法的有效途径之一。

2) 打浆方式的优化。打浆是指通过物理方法,使悬浮于水中的纸浆纤维受到机械剪切力的作用,从而使其适应纸机生产需求,并使抄造出的纸张达到预期的质量要求^[54]。相比于未经打浆而抄造的纸张,经过打浆处理的纸张匀度更好、强度更高。常见的打浆方式包括长、短纤维游离状和粘状打浆。其中,长纤维游离状打浆要求打浆时间要短,压力要大,刀片少

而薄,以分段下重刀为宜。此种方式在使纤维充分分散的同时,尽可能地保留了纤维的长度,从而能够获得较高的撕裂度和耐破度,因此,原纸的生产过程应尽量以长纤维游离状打浆为主。不同纤维原料的打浆特性不一样。如阔叶木将相比于针叶木浆,取得同样的物理强度,所需的打浆度更高;硫酸盐木浆比亚硫酸盐木浆打浆更困难;草浆比木浆打浆更困难。同时,不同用途、不同纤维的浆料应采用不同的打浆方式、打浆浓度以及打浆时间。现阶段,还缺乏不同打浆方式对冷链运输包装纸板强度的研究,而这对纸板性能的提升有很大帮助。

3) 造纸湿强剂的选择。添加湿强剂能强化纤维之间的结合力;能在纤维上交联聚合物网络;能形成对水不敏感的共价键,并封闭部分氢键,阻止水合作用的发生^[55-57]。湿强剂的添加可以使纸板适应于更严苛的冷链运输环境^[58-60]。常见的湿强剂有聚酰胺聚胺-表氯醇树脂(PAE)、三聚氰胺甲醛树脂(MF)、脲醛树脂(UF)等。其中,MF和UF由于游离甲醛的存在,在一些国家已经被禁用,而在我国会逐渐受到限制,对壳聚糖类湿强剂和戊二醛类湿强剂的研发也正在进行当中。在冷链运输过程中,当纸板暴露在高湿度环境中时,纸板会因吸潮而润湿,纤维之间的氢键遭到破坏,纸板会失去部分强度。已有的研究通常是通过表面施胶的方法使普通纸板的表面附着1层防水薄膜,从而使纸板避免直接暴露在潮湿环境中。虽然表面施胶在一定程度上可以避免纸板吸潮,并提高纸板湿强度,但要取得较高的湿强度仍需要额外添加湿强剂。对湿强剂的种类、配比、添加量的研究将是未来冷链运输包装纸板的研究的主要技术难点。

4.2 赋予纸板特殊理化性能

通过赋予纸板特殊理化性能,使其更适用于冷链物流运输和储存过程,显著提升产品价值。生鲜产品是对冷链物流需求最强的商品,对包装纸板的抗菌性能也有更高的要求。此外,低温高湿环境对包装纸板的防水防潮性能提出了更高的要求。针对冷链运输包装纸板理化性能的研究,将主要围绕以下2个方面展开。

1) 抗菌性能。冷链运输过程中通常需要控制微生物的生长,研发抗菌纸板具有较好的市场前景。近年来,随着科学技术水平的提高,生活用品的安全更加引起消费者的关注,纸和纸板的抗菌性能正逐渐成为造纸工业及技术领域的热点^[61-66]。通过涂布、浸渍、造纸成型等方法将抗菌剂添加到纸和纸板中,制备具有抑菌与杀菌能力的纸板,从而保护纸板材料、内装商品及接触者。对抗菌纸板的研究将主要围绕开发对人体更安全、针对性更强、可控释放的抗菌剂3个方面展开^[67]。通过提高纸板的抗菌性能,预期将大

幅提升商品的货架寿命,极大地减少损失浪费,提升经济效益。

2) 防水防潮性能。冷链商品在运输和储存过程中受潮湿气体的作用,会受潮、发霉、变质,使产品质量受到损坏,随着冷冻食品包装的不断普及,对于包装材料的防水防潮性能将提出更高的要求。常用的防水防潮包装材料包括纸板、金属、塑料等等,其透湿度越小,防潮性能越强^[68]。与金属和石油基塑料材料不同,纸和纸板由大量交织的纤维原料组成,80%以上的成分是植物纤维,具有可再生、无毒性、成本低等显著优势,因为广泛应用于冷链包装当中。但植物纤维本身具有较强的亲水性,这极大限制了其在冷链运输包装纸板中的应用^[69]。通过浆内施胶、表面涂布、纤维改性等方法能提高纤维的疏水性并赋予其防水、防潮、高强度等特点,从而使其适用于高湿度的冷链运输场景,大幅提高冷链包装产品使用寿命。

4.3 瓦楞-蜂窝复合纸板的应用

蜂窝纸板根据自然界蜂巢结构制作,其隔层由许多空心立体六边形组成,是一种强度高、缓冲性能好、可回收的环保材料。相较于瓦楞纸板,蜂窝纸板存在折叠性能差、储运空间大的缺点,所以单独使用蜂窝纸板制作的包装箱有很大的局限性。蜂窝纸板缓冲性能好、平压强度高、隔热性能好的优点对冷链运输过程极为重要^[70—71]。

在制作冷链运输包装箱时,可以将瓦楞纸板作为箱体,使用易降解的蜂窝纸板替代无机隔热材料,见图9。蜂窝纸板具备优异的平压强度,其使用不但能提高纸箱的保温性能,还能增加纸箱堆垛时的抗压能力。当纸箱保温要求高时,还可以在蜂窝结构中填充有机隔热材料。目前,关于瓦楞-蜂窝复合纸板在冷链运输包装材料中的研究并不多,研发人员还需要朝着以下2个方面努力:研发性能优良、易获取、低成本的有机填充物和固化剂;探究不同瓦楞楞型、蜂窝尺寸对瓦楞-蜂窝纸板在冷链运输环境中强度性能的影响。

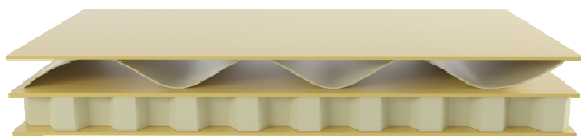


图9 瓦楞-蜂窝复合纸板结构
Fig.9 Structural diagram of corrugated honeycomb composite paperboard

5 结语

随着人们生活水平的提高,我国冷链物流量将持续增加。包装作为冷链物流的重要一环,对延长产品保质期、提高物流效率具有重要意义。易降解、可

回收的包装纸板已经得到了广泛的应用,但其本身易吸潮的特性导致纸板在冷链运输的高湿度环境中表现不佳。同时,纸板使用寿命短、保温性能不佳的问题仍待解决。研发性能优良的冷链运输包装材料任重而道远。

纸板的特性受原纸的影响较大,仅采用表面施胶的方法来提高纸板防水防潮性能存在较大局限。此外,对包装纸板结构的精细设计能显著改善纸箱抗压能力和隔热能力,因此开发能够适应冷链运输环境的高强度纸板原纸、赋予纸板特殊理化性能以及优化包装纸板结构,将成为未来冷链运输包装纸板研究和发展的主要方向。

参考文献:

- [1] 霍红. 冷藏链研究现状及分析[J]. 物流科技, 2008, 31(10): 82—86.
HUO Hong. Research Status and Analysis of Cold Chain[J]. Logistics Technology, 2008, 31(10): 82—86.
- [2] 张筱梅. 《关于加快发展冷链物流保障食品安全促进消费升级的实施意见》出台冷链物流提速发展中[J]. 专用汽车, 2017(9): 43—44.
ZHANG Xiao-mei. Implementation Opinions on Accelerating the Development of Cold Chain Logistics, Ensuring Food Safety and Promoting Consumption Upgrading was Issued. Special Purpose Vehicle, 2017(9): 43—44.
- [3] 张子平. 冷链物流系统[J]. 肉类研究, 2008(8): 7.
ZHANG Zi-ping. Cold chain logistics system [J]. Meat research, 2008(8): 7.
- [4] ZHAO H, LIU S, TIAN C, et al. An Overview of Current Status of Cold Chain in China[J]. International Journal of Refrigeration, 2018(88): 483—495.
- [5] MERCIER S, MONDOR M, VILLENEUVE S, et al. The Canadian Food Cold Chain: A Legislative, Scientific, and Prospective Overview[J]. International Journal of Refrigeration, 2018(88): 637—645.
- [6] 金国斌. 论现代物流包装的作用及推动其发展的因素[J]. 浙江科技学院学报, 2010, 22(6): 501—506.
JIN Guo-bin. The Role of Modern Logistics Packaging and The Factors Promoting Its Development [J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2010, 22(6): 501—506.
- [7] MEJJAOULI S, BABICEANU R F. Cold Supply Chain Logistics: System Optimization for Real-Time Rerouting Transportation Solutions[J]. Computers in Industry, 2018(95): 68—80.
- [8] WANG X, FENG H, CHEN T, et al. Gas Sensor Technologies and Mathematical Modelling for Quality Sensing in Fruit and Vegetable Cold Chains: A Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021(110): 483—492.

- [9] HAN J W, ZUO M, ZHU W Y, et al. A Comprehensive Review of Cold Chain Logistics for Fresh Agricultural Products: Current Status, Challenges, and Future Trends[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021(109): 536—551.
- [10] HU G, MU X, XU M, et al. Potentials of GHG Emission Reductions from Cold Chain Systems: Case Studies of China and the United States[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019(239): 118053.
- [11] DAI J, CHE W, LIM J J, et al. Service Innovation of Cold Chain Logistics Service Providers: A Multiple-Case Study in China[J]. *Industrial Marketing Management*, 2020(89): 143—156.
- [12] KONOVALENKO I, LUDWIG A, LEOPOLD H. Real-Time Temperature Prediction in a Cold Supply Chain Based on Newton's Law of Cooling[J]. *Decision Support Systems*, 2020(141): 113451.
- [13] ZHAO X, XIA M, WEI X, et al. Consolidated Cold and Modified Atmosphere Package System for Fresh Strawberry Supply Chains[J]. *LWT*, 2019(109): 207—215.
- [14] ASHOK A, BRISON M, LETALLEC Y. Improving Cold Chain Systems: Challenges and Solutions[J]. *Vaccine*, 2017, 35(17): 2217—2223.
- [15] JOSHI K, WARBY J, VALVERDE J, et al. Impact of Cold Chain and Product Variability on Quality Attributes of Modified Atmosphere Packed Mushrooms (*Agaricus Bisporus*) Throughout Distribution[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018(232): 44—55.
- [16] RAUT R D, GARDAS B B, NARWANE V S, et al. Improvement in the Food Losses in Fruits and Vegetable Supply Chain-A Perspective of Cold Third-Party Logistics Approach[J]. *Operations Research Perspectives*, 2019(6): 100117.
- [17] JAYAWEERA T M, YU H Z. Water Absorption in Horizontal Corrugated Boards under Water Sprays[J]. *Fire Safety Journal*, 2006, 41(5): 335—342.
- [18] PEREIRA T, NEVES A S L, SILVA F J G, et al. Production Process Analysis and Improvement of Corrugated Cardboard Industry[J]. *Procedia Manufacturing*, 2020(51): 1395—1402.
- [19] 徐艳秋, 丁太春, 冯波, 等. 冷链食品运输包装用低温瓦楞纸箱研究[J]. *包装工程*, 2012, 33(13): 26—29.
XU Yan-qiu, DING Tai-chun, FENG Bo, et al. Study on Low Temperature Corrugated Box for Cold Chain Food Transportation Packaging [J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(13): 26—29.
- [20] NAVARANJAN N, DICKSON A, PALTAKARI J, et al. Kaiilmonenb Humidity Effect on Compressive Deformation and Failure of Recycled and Virgin Layered Corrugated Paperboard Structures[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 45(1): 965—971.
- [21] HAN X, AKHMET G, HU P, et al. Numerical Prediction on the Mechanical Degradation of Adhesively Bonded Corrugated Sandwich Beam after Hygrothermal Ageing[J]. *Composite Structures*, 2020(241): 112131.
- [22] ZAMANIFAR H, SARRAMI-FOROUSHANI S, AZHARI M. A Parametric Study on the Mechanical and Thermal Stability of Corrugated-Core Sandwich Plates[J]. *Structures*, 2020(24): 209—226.
- [23] LI X, WANG J, HUANG C, et al. Mathematical Models for Predicting the Quasi-Static Stress Characteristics of Corrugated Paperboard with Sinusoidal Core Along the Longitudinal Compression[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018(149): 136—149.
- [24] BERRY T M, AMBAW A, DEFRAEYE T, et al. Moisture Adsorption in Palletised Corrugated Fibreboard Cartons under Shipping Conditions: a CFD Modelling Approach[J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2019(114): 43—59.
- [25] ÅSLUND P E, HÄGGLUND R, CARLSSON L A, et al. An Analysis of Strain Localization and Formation of Face Wrinkles in Edge-Wise Loaded Corrugated Sandwich Panels Using a Continuum Damage Model[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2015(56): 248—257.
- [26] WANG Z W, E Y P. Energy Absorption Properties of Multi-Layered Corrugated Paperboard in Various Ambient Humidities[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(6): 3476—3485.
- [27] THIJS D, PAUL C, TARL B, et al. Towards Integrated Performance Evaluation of Future Packaging for Fresh Produce in the Cold Chain[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 44(2): 201—225.
- [28] PANKAJ B, UMEZURUIKE L O. Structural Design of Horticultural Packaging[J]. *Reference Module in Food Science*, 2018(1): 1—6.
- [29] FADIJI T, BERRY T M, COETZEE C J, et al. Mechanical Design and Performance Testing of Corrugated Paperboard Packaging for the Postharvest Handling of Horticultural Produce[J]. *Biosystems Engineering*, 2018(171): 220—244.
- [30] NAVARANJAN N, FLETCHER G C, SUMMERS G, et al. Thermal Insulation Requirements and New Cardboard Packaging for Chilled Seafood Exports[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 119(3): 395—403.
- [31] JUNG Y J, MIN C K, JUN S. Manufacture of Water-Resistant Corrugated Board Boxes for Agricultural Products in the Cold Chain System(Ⅲ)[J]. *Journal of Korea Technical Association of the Pulp & Paper Industry*, 2005, 37(2): 70—77.
- [32] DONG W J, JONG M P. Improvement of Bonding Strength and Water Resistance of Corrugated Board[J]. *Journal of Korea TAPPI*, 2016, 48(1): 61—66.
- [33] ALLAOUI S, ABOURA Z, BENZEGGAGH M L. Effects of the Environmental Conditions on the Mechanical Behaviour of the Corrugated Cardboard[J]. *Com-*

- posites Science and Technology, 2009, 69(1): 104—110.
- [34] WONOG L, HONGSUN Yun, HOON J, et al. Study on Development of a Corrugated Packaging Box for Cold-Chain Distribution (I)-Characteristics of Moisture Absorption to Corrugated Fiberboard[J]. Korean Journal of Food Preservation, 2003, 10(3): 297—301.
- [35] 徐雪萌, 任宁, 唐静静. 高强度冷冻防潮瓦楞纸箱研制[J]. 包装工程, 2015, 36(13): 32—34.
XU Xue-meng, REN Ning, TANG Jing-jing. Development of High Strength Frozen Moisture-Proof Corrugated Box[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(13): 32—34.
- [36] 李迈骐. 冷冻食品的包装用纸及包装纸箱: 中国, 206494316U[P]. 2017-09-15.
LI Mai-qi. Packaging Paper and Cartons for Frozen Food: CN, 206494316U[P]. 2017-09-15.
- [37] 李迈骐. 一种防水、防结冰海鲜包装瓦楞纸箱: 中国, 208647391U[P]. 2019-03-26.
LI Mai-qi. A Waterproof and Anti Icing Corrugated Box for Seafood Packaging: CN, 208647391U[P]. 2019-03-26.
- [38] GB/T 31550—2015, 冷链运输包装用低温瓦楞纸箱[S].
GB/T 31550—2015, Low Temperature Corrugated Box for Cold Chain Transport Packaging [S].
- [39] 王红伟, 刘桂梅. 瓦楞纸箱结构综述[J]. 印刷质量与标准化, 2014(7): 55—60.
WANG Hong-wei, LIU Gui-mei. Overview of Corrugated Box Structure[J]. Printing Quality and Standardization, 2014(7): 55—60.
- [40] 刘光发. 微型瓦楞的特性及其在商品包装中的应用[J]. 印刷技术, 2009(18): 47—48.
LIU Guang-fa. Characteristics of Micro Corrugated and Its Application in Commodity Packaging[J]. Printing Technology, 2009(18): 47—48.
- [41] TIAN Y S, LU T J. Optimal Design of Compression Corrugated Panels[J]. Thin-Walled Structures, 2005, 43(3): 477—498.
- [42] ABOURA Z, TALBI N, ALLAOUI S, et al. Elastic Behavior of Corrugated Cardboard: Experiments and Modeling[J]. Composite Structures, 2004, 43(1): 53—62.
- [43] MOUSAVI S M M, AFRA E, TAJVIDI M, et al. Application of Cellulose Nanofibril (CNF) as Coating on Paperboard at Moderate Solids Content and High Coating Speed Using Blade Coater[J]. Progress in Organic Coatings, 2018(122): 207—218.
- [44] 刘金刚, 王比松, 李洪才. 帘式涂布技术的应用前景及其所面临的挑战[J]. 华东纸业, 2016, 47(2): 28—31.
LIU Jin-gang, WANG Bi-song, LI Hong-cai. Application Prospects and Challenges of Curtain Coating Technology[J]. East China Paper Industry, 2016, 47(2): 28—31.
- [45] 徐红霞. 幕帘式涂布装置[J]. 中华纸业, 2016(14): 79—80.
XU Hong-xia. Curtain Coating Device[J]. Zhonghua Paper, 2016(14): 79—80.
- [46] 赵恺. 帘式涂布技术应用及探讨[J]. 中华纸业, 2017, 38(24): 26—31.
ZHAO Kai. Application and Discussion of Curtain Coating Technology[J]. Zhonghua Paper, 2017, 38(24): 26—31.
- [47] 万朝杰. 油毡原纸生产与浸渍加工的实践[J]. 天津造纸, 1989(1): 21—26.
WAN Chao-jie. Practice of Production and Impregnation of Linoleum Base Paper[J]. Tianjin Paper, 1989(1): 21—26.
- [48] 祝大同. 对日本在浸渍加工技术与设备方面创新的综述(上)[J]. 印制电路信息, 2007(9): 9—12.
ZHU Da-tong. A Review of Japan's Innovation in Impregnation Technology and Equipment (I)[J]. Printed Circuit Information, 2007(9): 9—12.
- [49] 王岭松, 王东爱, 杨贵娜, 等. 论冷链物流及其鲜活产品的绿色包装[J]. 包装学报, 2009, 1(1): 31—33.
WANG Ling-song, WANG Dong-ai, YANG Gui-na, et al. On the Green Packaging of Cold Chain Logistics and Its Fresh Products[J]. Acta Packaging Sinica, 2009, 1(1): 31—33.
- [50] 崔立华, 朱婷婷. 蜂窝纸板生产工艺技术[J]. 中国印刷与包装研究, 2009, 1(3): 8—13.
CUI Li-hua, ZHU Ting-ting. Production Technology of Honeycomb Paperboard[J]. China Printing and Packaging Study, 2009, 1(3): 8—13.
- [51] 李金花, 宋红竹, 薛永常, 等. 我国制浆造纸木材纤维原料的现状与发展对策[J]. 世界林业研究, 2003, 16(6): 32—35.
LI Jin-hua, SONG Hong-zhu, XUE Yong-chang, et al. Current Situation and Development Countermeasures of Wood Fiber Raw Materials for Pulping and Papermaking in China[J]. World Forestry Research, 2003, 16(6): 32—35.
- [52] 孙中华, 董荣业. 论草类纤维原料制浆造纸[J]. 印刷杂志, 2006(12): 53—56.
SUN Zhong-hua, DONG Rong-ye. On the Pulping and Papermaking of Straw Fiber Materials[J]. Journal of Printing, 2006(12): 53—56.
- [53] 季爱坤, 刘文波. 废纸浆存在的问题及提高其质量的方法[J]. 纸和造纸, 2013, 32(11): 1—7.
JI Ai-kun, LIU Wen-bo. Problems Existing in Waste Pulp and Methods to Improve Its Quality[J]. Paper and Paper, 2013, 32(11): 1—7.
- [54] 杜春宇. 打浆的影响因素及对成纸性能的影响[J]. 黑龙江造纸, 2017(3): 20—22.
DU Chun-yu. Influence Factors of Beating and Its Influence on Paper Properties[J]. Heilongjiang Paper, 2017(3): 20—22.

- [55] SEELINGER D, TROSIEN S, NAU M, et al. Tailored Oxidation of Hydroxypropyl Cellulose under Mild Conditions for the Generation of Wet Strength Agents for Paper[J]. Carbohydrate Polymers, 2021(254): 117458.
- [56] LEPORATTI S, SCZECH R, RIEGLER H, et al. Interaction Forces between Cellulose Microspheres and Ultrathin Cellulose Films Monitored by Colloidal Probe Microscopy-Effect of Wet Strength Agents[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 281(1): 101—111.
- [57] ZHOU X, FU Y, CHEN L, et al. Diisocyanate Modifiable Commercial Filter Paper with Tunable Hydrophobicity, Enhanced Wet Tensile Strength and Antibacterial Activity[J]. Carbohydrate Polymers, 2020(248): 116791.
- [58] 张巧珍, 冀玲芳. 造纸湿强剂[J]. 湖北造纸, 2003(1): 29—31.
ZHANG Qiao-zhen, JI Ling-fang. Wet Strength Agent for Papermaking[J]. Hubei Paper, 2003(1): 29—31.
- [59] 周景辉, 吴星娥. 造纸湿强剂的进展[J]. 中国造纸, 2003, 22(9): 49—52.
ZHOU Jing-hui, WU Xing-e. Development of Wet Strength Agents for Papermaking[J]. China Paper, 2003, 22(9): 49—52.
- [60] 白媛媛, 类延豪, 姚春丽, 等. 环保型造纸湿强剂的研究进展[J]. 中国造纸学报, 2016, 31(4): 49—54.
BAI Yuan-yuan, LEI Yan-hao, YAO Chun-li, et al. Research Progress of Environmental Friendly Wet Strength Agent for Papermaking[J]. Acta Sinica Sinica, 2016, 31(4): 49—54.
- [61] 李海峰, 邵明秀. 抗菌纸的制备与应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2020, 49(2): 69—73.
LI Hai-feng, SHAO Ming-xiu. Preparation and Application of Antibacterial Paper[J]. Papermaking Equipment and Materials, 2020, 49(2): 69—73.
- [62] JIANG Q, LUO B, WU Z, et al. Antibacterial Composite Paper with Corn Stalk-Based Carbon Spheres Immobilized AgNPs[J]. Materials Science and Engineering: C, 2020(113): 111012.
- [63] HE Y, LI H, FEI Z, et al. Carboxymethyl Cellulose/Cellulose Nanocrystals Immobilized Silver Nanoparticles as an Effective Coating to Improve Barrier and Antibacterial Properties of Paper for Food Packaging Applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2021(252): 117156.
- [64] ZHU W, HUANG W, ZHOU W, et al. Sustainable and Antibacterial Sandwich-Like Ag-Pulp/CNF Composite Paper for Oil/Water Separation[J]. Carbohydrate Polymers, 2020(245): 116587.
- [65] SHANKAR S, BANG Y J, RHIM J W. Antibacterial LDPE/GSE/Mel/ZnONP Composite Film-Coated Wrapping Paper for Convenience Food Packaging Application[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019(22): 100421.
- [66] TANPICHAI S, WITAYAKRAN S, WOOTHIKAN-OKKHAN J, et al. Mechanical and Antibacterial Properties of the Chitosan Coated Cellulose Paper for Packaging Applications: Effects of Molecular Weight Types and Concentrations of Chitosan[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020(155): 1510—1519.
- [67] 王建华. 抗菌剂及其在包装设计中的应用研究[J]. 上海包装, 2016(8): 49—52.
WANG Jian-hua. Antibacterial Agents and Their Application in Packaging Design[J]. Shanghai Packaging, 2016(8): 49—52.
- [68] 刘国信. 绿色防潮包装纸的开发应用[J]. 湖南包装, 2007(1): 10—11.
LIU Guo-xin. Development and Application of Green Moisture-Proof Packaging Paper[J]. Hunan Packaging, 2007(1): 10—11.
- [69] 王清山, 耿群, 罗凯文. 一种非淋膜防水纸的生产工艺[J]. 黑龙江造纸, 2019, 47(4): 24—26.
WANG Qing-shan, GENG Qun, Luo Kai-wen. The Production Process of a Non Coated Waterproof Paper[J]. Heilongjiang Paper, 2019, 47(4): 24—26.
- [70] 郭丹丹, 孙德强. 蜂窝纸板隔热性能的研究[J]. 大科技, 2017(29): 314—315.
GUO Dan-dan, SUN De-qiang. Study on Thermal Insulation Performance of Honeycomb Paperboard[J]. Big Science and Technology, 2017(29): 314—315.
- [71] 王行宁, 郭彦峰, 付云岗, 等. 纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的静态缓冲性能研究[J]. 实验力学, 2019, 34(5): 853—863.
WANG Xing-ning, GUO Yan-feng, FU Yun-gang, et al. Study on Static Cushioning Performance of Corrugated Honeycomb Sandwich Structure[J]. Experimental Mechanics, 2019, 34(5): 853—863.