聚 (3– 羟基丁酸酯 – 共 –3– 羟基己酸酯) 涂布纸基包装材料的制备与性能表征

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2026.3014

刘伟丽　郝发义　余文龙

上海理工大学
出版学院
上海　200093

摘　要：聚 (3– 羟基丁酸酯 – 共 –3– 羟基己酸酯)（PHBH）是一种可生物降解的脂肪族聚酯，被广泛认为是替代传统石油基高分子材料的潜在候选。以未漂白全木浆牛皮纸为基材，采用 PHBH 为涂层材料，通过 Mayer 棒涂布法制备环保型纸基包装材料。研究聚焦于不同 PHBH 固含量水性分散液对纸张包装性能的影响，并探讨了表面活性剂亲水亲油平衡值（HLB）对分散液分散性的作用。通过纸张微观结构、吸水率、水蒸气透过率、防油性、力学性能及热封性能测试，全面表征了涂布纸的性能。结果表明，PHBH 能够在纸张表面形成致密连续的屏障层，显著提升纸张的综合性能。随着涂布液 PHBH 固含量的增加，纸张的吸水性和水蒸气透过率显著降低，其中吸水率值由 25.81 g/m^2 下降至 0.05 g/m^2，水蒸气透过率由 686.35 g/(m^2·d) 降低至 47.26 g/(m^2·d)，且防油等级达 12 级，有效阻止了油脂的渗透，热封强度达 10.9~14.9 N/15 mm。因此，PHBH 涂层不仅改善了纸基包装材料的防水、防油、阻隔及热封性能，还具备良好的环境友好性和应用前景。

关键词：聚 (3– 羟基丁酸酯 – 共 –3– 羟基己酸酯)；纸基包装材料；阻隔性能；热封性能

中图分类号：TB484.6；TS206.4　　**文献标志码：**A

文章编号：1674-7100(2026)03-0132-10

引文格式：刘伟丽，郝发义，余文龙 . 聚 (3– 羟基丁酸酯 – 共 –3– 羟基己酸酯) 涂布纸基包装材料的制备与性能表征 [J]. 包装学报，2026，18(3)：132-141.

1　研究背景

纸基材料由天然植物纤维制成，具有良好的可再生性和生物可降解性 [1]。然而，由于纤维素的吸湿性和纤维网络的多孔结构，纸基包装材料在高湿度环境下的储存或运输过程中，力学性能会因环境湿度影响而下降 [2-3]。此外，空气中的水蒸气和氧气可通过纸基材料的多孔纤维网络渗入包装内部，加速食品的物理、化学和生物反应，从而缩短保质期 [4]。为提升纸基材料的阻隔性能和力学性能，通常将其与石油基聚合物（如聚乙烯、聚丙烯或聚氯乙烯）复合，但这些聚合物难以自然降解和回收，限制了其在绿色包装领域的应用 [5-6]。因此，采用可降解高分子材料涂覆纸基材料，以兼顾阻隔性能、力学性能和环境友好性，已成为绿色包装发展的趋势 [7-9]。

近年来，研究者探索了多种可降解高分子材料用于纸基材料的涂覆，以替代不可降解的石油基聚合物。其中，淀粉、纤维素衍生物、聚乳酸（polylactic

收稿日期：2025-10-29

作者简介：刘伟丽，女，硕士生，主要研究方向为包装材料，E-mail：2285612546@qq.com

通信作者：郝发义，男，讲师，博士，主要从事绿色包装材料、冷链包装研究，E-mail：haofayi@usst.edu.com

acid，PLA）和聚羟基脂肪酸酯（polyhydroxyalkanoate，PHA）等天然或生物基聚合物受到广泛关注[10-12]。例如，淀粉基涂层因其低成本和良好的成膜性被用于改善纸张的阻水性，但其机械强度和耐湿性有限[13-15]，且涂布纸不具备热封能力。PLA 涂层在阻隔性能方面表现出色，但在高湿度环境下易发生水解，导致阻隔性能下降[16-18]。PHA 是由多种革兰氏阳性和阴性细菌通过代谢合成的聚酯，可通过可再生资源（如糖类或植物油）发酵制备[19-20]，且 PHA 是完全可降解、可堆肥的生物塑料，在自然环境中分解为无害物质，有助于缓解塑料污染[21-22]。聚 (3- 羟基丁酸酯)（poly(3-hydroxybutyrate)，PHB）由 3- 羟基丁酸（3-hydroxybutyric，3-HB）单体组成，具有高结晶度、热塑性和明显脆性[23]。已有研究表明，PHB 涂层可显著提高纸张的阻水性和防油性，但其高结晶度和脆性限制了涂层的柔韧性和加工性能[24-25]。

聚 (-3- 羟基丁酸酯 - 共 -3- 羟基己酸酯)（poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate)，PHBH）由 3-HB 和 3- 羟基己酸（3-hydroxyhexanoic，3-HHx）单体共聚而成，属中度分支聚合物[26]。3-HHx 单元因其侧链空间位阻较大，无法与 3-HB 单元共结晶，导致 PHBH 结晶度低于 PHB，延展性显著提升[27]。PHBH 水性涂层无需使用挥发性有机溶剂或石油基产品，且 PHBH 涂层基材使用后可回收或生物降解，相较传统涂层更符合绿色经济和循环经济要求[28-29]。然而，PHBH 具有高度疏水性和低表面能，难以被水等极性溶剂润湿[30]。疏水性 PHBH 颗粒与水之间的高界面张力使水无法轻易渗透颗粒表面，阻碍了 PHBH 的有效分散。为实现 PHBH 颗粒的稳定分散，通常选用非离子表面活性剂（如司班 80、吐温 20）来改善润湿性和分散稳定性。相较于离子表面活性剂，非离子表面活性剂对 pH 值和离子强度的敏感性较低，并能提供优异的空间稳定性[31]。

基于此，本研究以未漂白全木浆牛皮纸为基材，采用 Mayer 棒涂布法制备 PHBH 涂布纸，系统研究了 PHBH 不同固含量水性分散液对纸张包装性能的影响，并探讨了表面活性剂亲水亲油平衡值（hydrophilic-lipophilic balance，HLB）对分散液分散性的作用。通过扫描电子显微镜（scanning electron microscopy，SEM）、水蒸气透过率（water vapor transmission rate，WVTR）、Cobb 吸水率、防油性（KIT 值）、力学性能和热封性能测试，全面表征了涂布纸的包装性能。

2 实验部分

2.1 主要材料与仪器

1）主要材料

未漂白的全木浆牛皮纸（80 g/m^2），购于合肥市华宸办公用品有限公司；800 目 PHBH 粉末，购于东莞市亿通新材料有限公司；曲拉通，PH0352，购于福建领江生物科技有限公司；司班 80，PH9294，购于福州飞净生物科技有限公司；吐温 20，T818927，购于佛山迈氢化工有限公司；黄原胶，USP 级，购于龙港市麦阿密生物技术有限公司。

2）主要仪器

85-2 磁力搅拌器，东莞市三量量具有限公司；LS-1200B 超声破碎仪，无锡市源笙特智能科技有限公司；DHG-9040AS 电热恒温鼓风干燥箱，嘉兴市中新医疗仪器有限公司；JSM-IT500HR 扫描电子显微镜，日本电子株式会社；MLD-225B 恒温恒湿试验箱，密朗德仪器科技（江苏）有限公司；J-CBY100 吸水率测试仪，四川长江造纸仪器有限公司；Z0T-1021 拉力试验机，广东中天仪器股份有限公司；TP-SLD1000 撕裂度测试仪，北京今印联图像设备有限公司；HST-H3 热封试验仪，济南兰光机电技术有限公司；OSP 挤压式涂布线棒，上海雷祈仪器设备有限公司。

2.2 样品的制备与处理

2.2.1 表面活性剂的确定

非离子表面活性剂通过降低 PHBH 颗粒与水之间的界面张力，促进水润湿颗粒表面，实现初步分散。吸附于颗粒表面的表面活性剂，其亲水部分（如 PEG 链）向水相延伸，形成保护层。当颗粒靠近时，表面活性剂层的空间位阻效应可阻止范德华力引起的聚集，抵消吸引力及重力沉降，从而维持分散体系的稳定性[32]。

HLB 是非离子表面活性剂性能的关键指标，反映亲水基团与疏水基团的比例[33-34]。HLB 值范围为 0~20，较低值适合水包油乳液，较高值适用于油包水体系或分散亲水颗粒。对于 PHBH，适宜的 HLB 值能形成稳定的界面层，降低界面张力，防止颗粒聚集，提升分散体系稳定性。然而，PHBH 的分子结构和表面特性对 HLB 值要求较高，过高或过低的 HLB 值可能导致分散效果不佳或体系不稳定。在实际应用

中，单一表面活性剂难以满足复杂分散需求[35]，常需复配多种表面活性剂，其综合 HLB 值（H_{Total}）通过式（1）加权平均法计算。

$$H_{Total}=\frac{m_1\times H_1+m_2\times H_2}{m_1+m_2}, \quad (1)$$

式中：m_1，m_2 分别为第一种和第二种表面活性剂的质量；H_1、H_2 分别为其 HLB 值。

为确定适合 PHBH 水性分散液的 HLB 值范围，选用司班 80（HLB = 4.3）、吐温 20（HLB = 16.7），调整二者质量比，配制不同 HLB 值的表面活性剂混合物（见表 1）。采用磁力搅拌的方式，将质量分数（下同）为 1% 的表面活性剂混合物分别加入水中，混合均匀后再加入 PHBH 粉末，超声处理 3 min，制备 15%PHBH 水性分散液，在室温 (25 ± 1) ℃下静置 24 h 后，通过目视观察评估稳定性。具体标准为：若样品出现明显分层（即上下层界面清晰可见）或颗粒析出（出现明显颗粒聚集），则判定为不稳定；若样品保持均匀、无明显分层或析出，则判定为稳定。为定量表征稳定性，进一步计算沉降率（S）[36−37]。

$$S=\frac{H_0}{H}\times 100\%, \quad (2)$$

式中：H_0 为 24 h 后分离层高度；H 为分散液总高度。

表 1　不同比例表面活性剂混合物的 HLB 值

Table 1　HLB values of surfactant mixtures with different proportions

样品编号	质量比	司班 80/%	吐温 20/%	HLB
1.1	1:0	100.0	0	4.3
1.2	5:1	83.3	16.7	6.4
1.3	2:1	66.7	33.3	8.4
1.4	1:1	50.0	50.0	10.5
1.5	1:2	33.3	66.7	12.6
1.6	1:5	16.7	83.3	14.6
1.7	0:1	0	100.0	16.7

此外，使用司班 80、吐温 20 和曲拉通（HLB = 13.5）3 种表面活性剂进行第二次分散性试验，探索高浓度 PHBH（最高目标为 50%）水性分散液的可行性和稳定性。按表 2 比例配制 HLB 值介于 13~16 的表面活性剂混合物，称取 0.1 g 混合物，加入 8.9 g 去离子水，磁力搅拌 20 min 后加入 1.0 g PHBH，超声处理 10 s。样品冷却 5 min 后，检查团聚体和目视黏度。若 PHBH 已分散，则继续添加 1.0 g PHBH，重复超声和静置操作，直至 PHBH 无法分散，记录 PHBH 分散量。

表 2　3 种表面活性剂两两混合的 HLB 值

Table 2　HLB values of pairwise mixtures of three surfactants

样品编号	质量比	司班 80/%	吐温 20/%	曲拉通/%	HLB
2.1	3:7	30.0	70.0		13
2.2	1:4	20.0	80.0		14
2.3	1:6	14.3	85.7		15
2.4	1:17	5.6	94.4		16
2.5	1:16	5.9		94.1	13

2.2.2　PHBH 水性分散液的制备

将质量分数为 1% 的表面活性剂（曲拉通和司班 80 质量比为 16:1）加入蒸馏水中，充分混合后，分别加入 15%, 20%, 25%, 30%, 35% 的 PHBH 粉末，并命名为 15P、20P、25P、30P 和 35P。使用磁力搅拌器以恒定速度搅拌 90 min，形成初步分散体。随后，将混合物置于超声波处理器中处理 5 min，进一步分散 PHBH 颗粒，得到均匀的白色乳液。接着，向乳液中加入 0.25% 黄原胶作为增稠剂和稳定剂，用于调节分散体的静态稳定性与涂布黏度，从而减少沉降、改善涂布均匀性，以 400 r/min 转速剪切搅拌 30 min，确保黄原胶均匀分散，制备最终分散体。

2.2.3　PHBH 涂布纸的制备

采用涂膜厚度为 6 μm 的 Mayer 棒涂布，将涂布液均匀转移至基纸表面，完成第一次涂布。随后，将纸张置于 175 ℃烘箱中干燥 1 min。干燥后的纸张以同样的方式进行第二次涂布及干燥。最终干燥后的纸张在温度 (23 ± 1) ℃、相对湿度 (50 ± 2)% 的恒温恒湿箱中平衡 24 h，制得纸基材料（制备过程如图 1 所示）。制备出不同 PHBH 含量的涂布纸张样品分别命名为 15P-P、20P-P、25P-P、30P-P 和 35P-P。表 3 列出了各纸张样品的配方及涂布量。

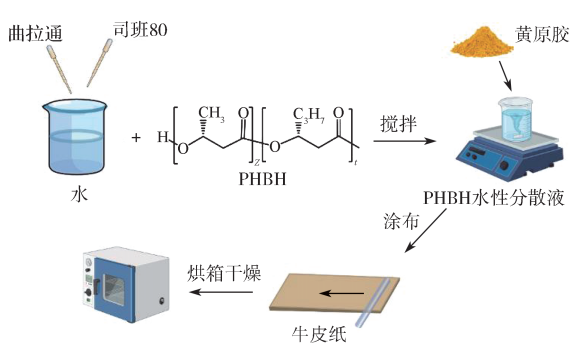


图 1　阻隔热封纸的制备方法

Fig. 1　Preparation method of barrier heat-sealable paper

表 3　PHBH 涂布纸各原料质量分数及涂布量

Table 3　PHBH coated paper formulation and coating amount

样品	PHBH/%	水 /%	曲拉通 /%	司班 80/%	黄原胶 /%	涂布量 /($g·m^{-2}$)
15P-P	15	83.75	0.941	0.059	0.25	16.97
20P-P	20	78.75	0.941	0.059	0.25	23.12
25P-P	25	73.75	0.941	0.059	0.25	36.17
30P-P	30	68.75	0.941	0.059	0.25	38.61
35P-P	35	63.75	0.941	0.059	0.25	61.22

2.3　测试与表征

2.3.1　表面形貌

使用扫描电子显微镜，研究 PHBH 水性分散液对涂布纸表面形貌的影响。测试前，使用溅射镀膜机在样品上溅射一层薄薄的金层。

2.3.2　水蒸气阻隔性能

根据 GB/T 1037—2021《塑料薄膜与薄片水蒸气透过性能测定 杯式增重与减重法》，采用增量法（恒温恒湿箱法）[38] 测定纸张的 WVTR。首先，将干燥剂于 80 ℃烘箱中干燥至恒重；将纸张裁切至透湿杯尺寸后，于 50 ℃烘箱中干燥至恒重。随后，将干燥剂装入透湿杯，盖上裁切好的纸张，密封后称量总质量，记录为 m_0。将透湿杯打开盖子，置于温度 25 ℃、相对湿度 90% 的恒温恒湿箱中测试 24 h。测试完成后，取出透湿杯，轻轻擦拭杯体以去除外部水分，确保无干扰。用精密天平称量纸张和干燥剂的总质量，记录为 m_1。W_{VTR}（$g/(m^2·d)$）按式（3）进行计算。

$$W_{VTR}=\frac{m_1-m_0}{A\times t}, \quad (3)$$

式中：m_1-m_0 是 24 h 内的质量增加量，g；A 是纸样的表面积，m^2；t 是测试时间，h。

2.3.3　涂布纸吸水率

吸水率（Cobb）是指纸张在规定时间内（本研究为 60 s）单位面积吸收的水量。根据 GB/T 1540—2002《纸和纸板吸水性的测定 可勃法》，采用四位数字天平称量样品，吸水率测试仪进行测试。吸水率（g/m^2）表示吸收水的质量与湿润面积的比率。涂布纸的 Cobb 按式（4）进行计算。

$$C_{obb}=(G_2-G_1)\times 100, \quad (4)$$

式中：G_1 表示未处理样品的质量；G_2 表示吸水后样品的质量。

2.3.4　防油性能

根据 GB/T 22805.2—2008《纸和纸板 耐脂度的测定 第 2 部分：表面排斥法》制备了 12 种不同比例的甲苯、蓖麻油和正庚烷组成的标准油脂溶液，测试纸张的防油性（KIT 值）。测试时，选用中间编号的测试溶液，从距试样测试面约 10 mm 的高度滴一滴溶液至试样表面，15 s 后用吸收纸或棉织品迅速擦除多余溶液，目视检查试样表面是否存在染色或表面变化。测试结果以最后一个未引起染色的溶液编号表示。

2.3.5　力学性能

使用拉力试验机和撕裂度测试仪，按照 GB/T 12914—2018《纸和纸板 抗张强度的测定 恒速拉伸法》和 GB/T 455—2002《纸和纸板撕裂度的测定》，分别测试样品的抗张强度、断裂伸长率和撕裂度。

2.3.6　热封性能

根据 QB/T 2358—1998《塑料薄膜包装袋热合强度试验方法》采用热封试验仪对涂布纸进行热封处理，并使用拉力试验机测试热封强度，结果以 N/15 mm 为单位。

3　结果与讨论

3.1　表面活性剂的选择

为确定 PHBH 水性悬浮液的最佳表面活性剂 HLB 值，通过调整司班 80 与吐温 20 的比例，制备了 7 个样品（1.1~1.7），HLB 值分别为 4.3, 6.4, 8.4, 10.5, 12.6, 14.6 和 16.7，采用磁力搅拌将各个表面活性剂与 PHBH 混合后，发现样品 1.1~1.4（HLB ≤ 10.5）在 30 min 内出现分层，而样品 1.5~1.7（HLB ≥ 12.6）保持稳定，表明较高 HLB 值更有利于 PHBH 分散。这与表面活性剂的亲水 - 亲油平衡理论一致，高 HLB 值表面活性剂倾向于形成稳定的油包水（O/W）乳液，增强疏水颗粒在水性体系中的分散性 [39-40]。

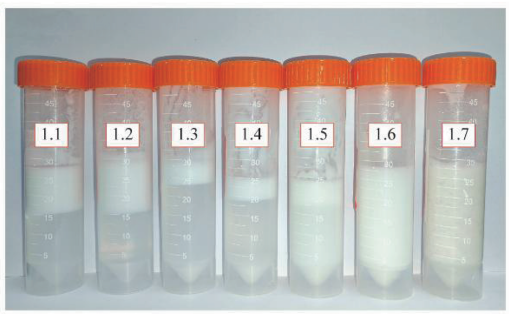
为进一步验证较低 HLB 值的适用性，对各样品进行 3 min 超声处理以增强剪切力，促进表面活性剂与 PHBH 的混合并打散疏水颗粒团聚体。超声后，所有样品分散性均改善，但黏度差异显著（如图 2a 所示）。样品 1.1（HLB 值为 4.3）呈浓稠状，黏度较高，其余样品流动性较好。静置 24 h 后，样品 1.1~1.4 分层明显，沉降率分别为 50%, 45.5%, 25.0% 和 24.0%，伴随大量 PHBH 颗粒析出，这可能由范德华力引发的团聚导致。样品 1.5~1.7 无明显分层，沉降率分别为 22.0%、9.1% 和 12.7%，析出量随 HLB 值增加而减少。样品 1.7（HLB 值为 16.7）的沉降率大于样品 1.6（HLB 值为 14.6），表明其颗粒析出速

度更快。

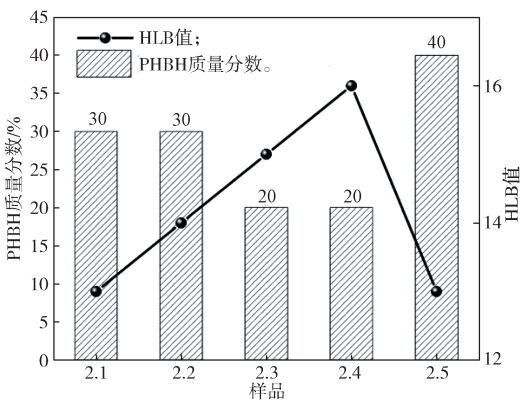
尽管样品 1.7（仅含高极性吐温 20，HLB 值为 16.7）理论上更适合油包水（O/W）体系，但 PHBH 的强疏水性使吐温 20 的亲油尾部难以有效吸附于颗粒表面，导致界面层不稳定，颗粒易团聚，分散性较差。在复合体系中，吐温 20 的亲水头基（聚氧乙烯链）提供较强的空间位阻，而司班 80 的疏水尾基增强与颗粒表面的锚定作用。二者协同作用提升了界面吸附效率和分散稳定性，使样品 1.6（HLB 值为 14.6）在分散 PHBH 时表现出优异的性能。这种复配表面活性剂的协同效应，可通过优化亲水和疏水组分的界面排列来增强乳液的稳定性 [41]。因此，分散 PHBH 的最佳 HLB 值应为 12.6 以上，且复配表面活性剂的效果优于单一表面活性剂。

为进一步探究高浓度 PHBH 分散能力，选用 3 种符合食品接触标准的非离子表面活性剂（司班 80、吐温 20 和曲拉通），配制成 HLB 值在 13~16 的表面活性剂混合物，并以 10% 为增量逐渐提高 PHBH 质量分数，直至超声处理无法分散，结果如图 2b 所示。由图可知，司班 80 与吐温 20 混合物可分散 20%~30% 的 PHBH，但随 HLB 值从 14 增至 16，分散性下降，仅能分散 20% 的 PHBH。而样品 2.5（曲拉通 + 司班 80，HLB 值与样品 2.1 相近）可分散高达 40% 的 PHBH。

曲拉通与吐温 20 分散疏水性 PHBH 的能力差异可能与其化学结构有关。曲拉通的疏水尾部（辛基苯酚）与 PHBH 表面亲和力较强，其亲水头基（聚氧乙烯链，约 9~10 个 EO 单元）提供适度空间位阻，适合高浓度体系的稳定 [42]。相比之下，吐温 20 的亲油尾部与 PHBH 表面相互作用较弱，其较长亲水链（约 20 个 EO 单元）在高浓度体系中易发生分子缠结，降低界面吸附效率。曲拉通的较短聚氧乙烯链使界面排列更紧凑，与司班 80 协同形成坚韧的界面膜，有效降低固－液界面张力，提供充足的空间位阻和稳定性，防止高浓度 PHBH 颗粒团聚 [33, 43]。由于 PHBH 为脂肪族聚合物，高极性表面活性剂的稳定效果有限，略偏非极性的表面活性剂更适合。这种现象与疏水性聚合物表面需要较强疏水尾部锚定的理论一致 [44]。因此，曲拉通与司班 80 的混合物被选为分散高浓度 PHBH 的最佳表面活性剂，其优异性能得益于疏水尾部与 PHBH 表面的强相互作用及适度亲水链提供的空间位阻。



a）样品储存 24 h 后的视觉稳定性



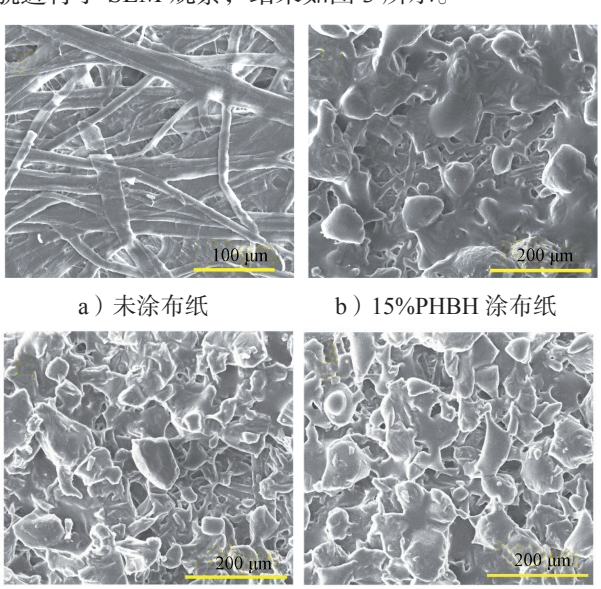
b）不同表面活性剂混合物分散 PHBH 的能力

图 2　样品储存 24 h 后的视觉稳定性与不同表面活性剂混合物分散 PHBH 的能力

Fig. 2　Visual stability of samples after 24 hours of storage and dispersion ability of different surfactant mixtures for PHBH

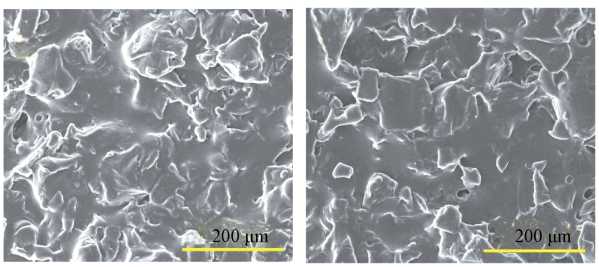
3.2　PHBH 涂布纸的表面形貌

对未涂布纸及不同 PHBH 含量涂布纸的表面形貌进行了 SEM 观察，结果如图 3 所示。



a）未涂布纸　b）15%PHBH 涂布纸

c）20%PHBH 涂布纸　d）25%PHBH 涂布纸



e）30%PHBH 涂布纸　　f）35%PHBH 涂布纸

图 3　未涂布纸及不同 PHBH 含量涂布纸的 SEM 图像

Fig. 3　SEM images of uncoated paper and coated paper with different PHBH contents

由图 3a 可知，未涂布纸表面呈开放结构，粗糙度较高，有利于纤维间物理互锁并增强涂层与原纸的附着力。由图 3b~f 可知，PHBH 质量分数分别为 15%, 20%, 25%, 30%, 35% 的涂布纸表面的凹坑被填满，表面平整度提高，且随 PHBH 添加量增加，涂层表面均匀性逐渐增强。

3.3　PHBH 涂布纸的水蒸气阻隔性和防水性能

Cobb 值用于测量特定区域和时间的吸水率。本研究对不同固含量的 PHBH 水性分散液涂布纸的 Cobb 和 WVTR 进行评估，分析纸张的防水性能与水蒸气阻隔性，结果如图 4 所示，其中 U-P 表示未涂布纸。

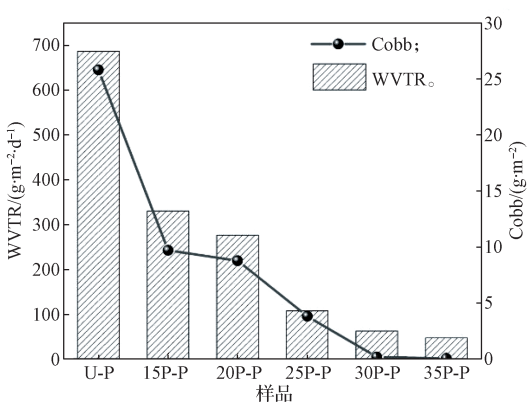


图 4　纸张的水蒸气阻隔性及防水性

Fig. 4　Water vapor barrier, waterproof properties of paper

由图 4 可知，Cobb 值从未涂布纸的 25.81 g/m^2 降低到 35P-P 时的 0.05 g/m^2。这表明涂布纸张的防水性显著提高，这归因于涂布纸张逐渐形成更致密和更均匀的聚合物层。随着 PHBH 固含量的增加，涂层填充了纸张的多孔结构，减少了可供水渗透的表面积，从而形成一道有效防水的疏水屏障。从 U-P 到 15P-P 的 Cobb 值急剧下降（从 25.81 g/m^2 降至 9.71 g/m^2）表明初始密封效果显著，而随着 PHBH 固含量的继续增加，Cobb 值持续下降（25P-P 时为 3.83 g/m^2，35P-P 时为 0.05 g/m^2），反映了涂层厚度和均匀性的进一步优化，从而最大限度地减少了吸水量。

同样，WVTR（用于量化水蒸气透过纸张的速率）从未涂布纸的 686.35 g/(m^2·d) 下降到 35P-P 时的 47.26 g/(m^2·d)，表明水蒸气阻隔性能显著提高。这一趋势与 PHBH 固含量的增加密切相关，PHBH 固含量的增加提高了涂层作为不透水层的能力。在 15P-P 时，WVTR 从 686.35 g/(m^2·d) 降至 329.94 g/(m^2·d)，表明随着聚合物开始覆盖纸张表面，阻隔效应开始显现，而 35P-P 时继续下降至 47.26 g/(m^2·d)，这表明存在累积效应，即 PHBH 固含量越高，涂层越厚越致密，从而减少水蒸气的扩散途径。这可能与 PHBH 的晶体结构和增强的成膜性能，以及聚合物基质内的分子间相互作用有关。

3.4　PHBH 涂布纸的防油性

KIT 值是衡量材料防油性的指标，范围从 0 级（无防油性）到 12 级（极佳防油性）。未涂布纸及不同 PHBH 固含量涂布纸的 KIT 值如图 5 所示。

由图 5 可知，随着 PHBH 固含量的增加，纸张的 KIT 等级逐渐提高，这是因为 PHBH 涂层可覆盖纸张纤维，从而有效阻隔油类渗透。U-P 的 KIT 等级为 0 级，因无保护层，油易渗透纤维素结构。随着固含量的增加，涂层的覆盖能力与致密性增强，纸张防油性显著提升。当 PHBH 质量分数达到 30%（30P-P）和 35%（35P-P）时，涂层形成致密的 PHBH 薄膜，KIT 值达到最大值 12 级，显示出优异的防油性。超过 30% 后，KIT 值稳定在 12 级，表明涂层防油性已达到饱和，进一步增加固含量已无改善效果。

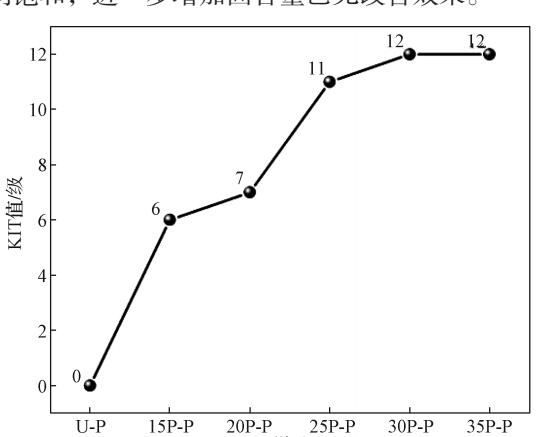
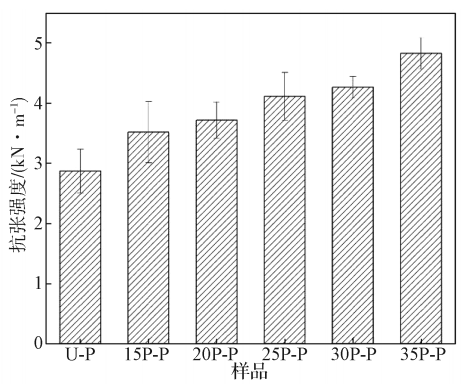


图 5　纸张的防油性

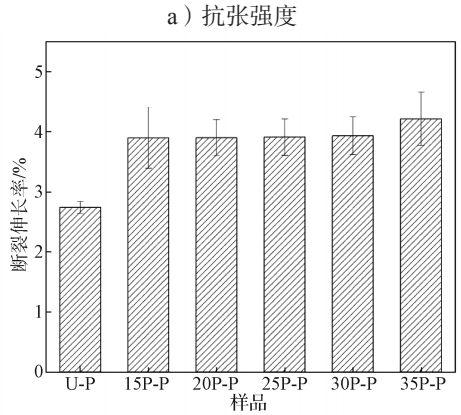
Fig. 5　The oil resistance of paper

3.5 PHBH 涂布纸的力学性能

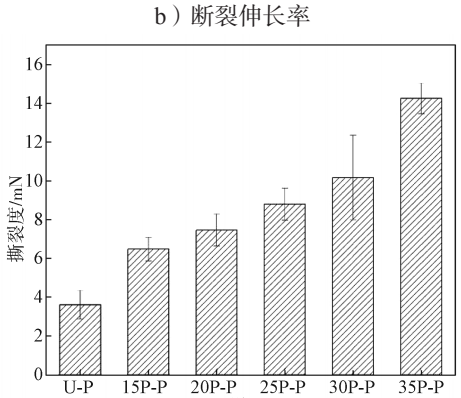
抗张强度、断裂伸长率和撕裂度是评价纸张力学性能的重要指标，其中抗张强度指纸幅在拉伸至断裂前单位宽度所能承受的最大拉力，反映纤维间结合强度及纸张致密度；断裂伸长率为试样拉伸至断裂时的延伸率，用于表征材料的延展性与柔韧性；撕裂度则表示撕裂纸张所需力的大小，与纤维长度、结合强度及裂纹扩展行为密切相关。图 6 展示了未涂布纸及不同固含量 PHBH 涂布纸的抗张强度、断裂伸长率和撕裂度变化规律。



a）抗张强度



b）断裂伸长率



c）撕裂度

图 6 纸张的力学性能

Fig. 6 Mechanical properties of paper

由图 6a 可知，纸张的抗张强度随 PHBH 固含量的提高呈显著上升趋势，从 U-P 样品的 2.87 kN/m 提高至 35P-P 样品的 4.83 kN/m，提升了约 68%。这一结果表明，PHBH 涂层在干燥固化过程中填充纤维间孔隙并增强纤维间氢键结合，从而改善纤维之间的应力传递效率，有效增强纸张的承载能力。由图 6b 可知，断裂伸长率随 PHBH 固含量增加而略有上升，由 U-P 样品的 2.74% 增加至 35P-P 样品的 4.22%，提升幅度相对较小。这表明 PHBH 涂层对纸张的柔韧性具有一定改善作用，但并非主要影响因素。造成此现象的原因在于，PHBH 为结晶度较低、柔性较好的聚羟基脂肪酸酯共聚物，其 3-HHx 单元的引入可有效降低聚合物链的规整度，赋予涂层较高的延展性。当 PHBH 涂布于纸张表面后，其柔性膜层在外力作用下可吸收部分应变能，延缓纤维断裂过程，从而导致整体伸长率略有提高。然而，由于纸基本体的力学行为仍由纤维素网络主导，PHBH 涂层的延展作用有限，因此提升幅度不如抗张强度显著。由图 6c 可知，随 PHBH 固含量增加，纸张的抗撕裂能力显著增强，从 U-P 的 3.62 mN 提高至 35P-P 的 14.25 mN，提升近 4 倍。PHBH 涂层的存在能减少纤维束在撕裂过程中被轻易分离的情况，增强了纤维间的黏结与界面摩擦力，使得裂纹扩展更加困难。高固含量样品（30P-P 与 35P-P）撕裂度误差较大，可能与涂层厚度不均或局部聚集造成的力学性能分布不均有关，这与涂层均匀性及分散稳定性密切相关。

3.6 PHBH 涂布纸的热封强度

热封强度是指在特定热封条件下，两层材料通过热塑性组分的熔融、流动、扩散与再固化于封口处形成结合后所呈现的断裂强度，是评价涂层或复合材料封口性能与可靠性的关键指标。未涂布纸及不同 PHBH 含量涂布纸的热封强度如图 7 所示。

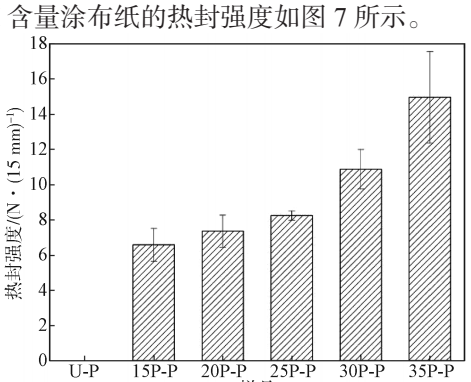


图 7 纸张的热封强度

Fig. 7 Heat seal strength of paper

由图 7 可知，U-P 样品不具备热封强度，而涂布 PHBH 分散液后，样品的热封性能随固含量增加持续提升。在 PHBH 质量分数为 15% 时，热封强度约为 6.6 N/15 mm，较低固含量下 PHBH 仍可通过熔融形成一定结合层；PHBH 质量分数提高至 20% 和 25% 时，热封强度分别升至约 7.4 N/15 mm 和 8.3 N/15 mm，随着涂层增厚和连续性改善，熔融聚合物可提供更大的接合面积与更高黏结力；在 PHBH 质量分数为 30% 时，热封强度进一步提高至 10.9 N/15 mm，35% 时达到 14.9 N/15 mm，增幅最为显著。这表明较高固含量下 PHBH 涂层可充分熔融流动并填充纤维孔隙，从而在封口界面形成连续、致密的焊接层，大幅增强热封强度。但需注意，35P-P 样品虽热封强度最高，其误差范围较大，可能源于涂层局部厚度不均、干燥收缩差异或结晶行为不一致，导致封口性能存在波动。总体而言，提高 PHBH 固含量可显著改善纸张热封性能，质量分数为 30%~35% 的 PHBH 不仅赋予最高的封口强度，也印证了致密均匀的聚合物膜层对提升热封可靠性的重要作用。

4 结论

本研究以 PHBH 为涂层材料，系统研究了其对纸张防水性、防油性、水蒸气阻隔性、力学性能及热封性能的影响。研究结果表明，PHBH 涂层能够在纸张表面形成连续致密的阻隔层，显著提升纸张的综合性能。随着涂布液固含量的增加，纸张的吸水性和水蒸气透过率均显著下降，其中 Cobb 值由 25.81 g/m^2 降至 0.05 g/m^2，WVTR 由 686.35 $g/(m^2·d)$ 降低至 47.26 $g/(m^2·d)$，表现出优异的防水和阻隔效果。同时，纸张的防油等级由原始状态显著提升，最高可达到 12 级，说明 PHBH 涂层能够有效阻止油脂渗透，满足食品包装的基本要求。在力学性能方面，PHBH 涂层对纸张拉伸强度影响较小，但一定程度上增强了纸张的耐破度和抗张强度，保证了包装纸在实际使用中的稳定性。此外，PHBH 涂层赋予纸张良好的热封性能，使其在适宜温度和压力条件下能够获得稳定且可控的热封强度。综上所述，PHBH 涂层在改善纸张防水、防油和阻隔性能的同时，还兼具机械稳定性与热封功能，表现出良好的环境友好性与应用潜力。

参考文献：

[1] MAŁACHOWSKA E，PAWCENIS D，DAŃCZAK J，et al. Paper Ageing: The Effect of Paper Chemical Composition on Hydrolysis and Oxidation[J]. Polymers，2021，13(7)：1029.

[2] RAJEEV A，KOUL S，GUAN Q，et al. Nanochitin as a Strength-Enhancing Agent for Paper-Based Packaging Material[J]. ACS Omega，2025，10(25)：26618−26626.

[3] HOSSEN M N，RAHMAN M M，FERDOUS T，et al. Biobased Nanocomposite Coating of Paper for Packaging[J]. Nordic Pulp & Paper Research Journal，2024，39(4)：655−665.

[4] LI P Y，ZHOU X Y，JIAN B X，et al. Plastic-Free，Oil- and Water-Resistant Paper for Food Packing[J]. Nordic Pulp & Paper Research Journal，2024，39(3)：403−412.

[5] 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.

[6] MORGADO F，CONCEIÇÃO R，BARROSO S，et al. Advances in Biocoatings for Paper and Cardboard Food Packaging[J]. Progress in Organic Coatings，2025，208：109491.

[7] VRABIČ-BRODNJAK U，YAVOROV N，LASHEVA V，et al. Chitosan-Coated Packaging Papers: Strength and Thermal Stability[J]. Coatings，2023，13(5)：828.

[8] NECHITA P，IANA-ROMAN M. Review on Polysaccharides Used in Coatings for Food Packaging Papers[J]. Coatings，2020，10(6)：566.

[9] WANG Y Y，ZHANG X Q，KAN L J，et al. All-Biomass-Based Eco-Friendly Waterproof Coating for Paper-Based Green Packaging[J]. Green Chemistry，2022，24(18)：7039−7048.

[10] GUPTA V，BISWAS D，ROY S. A Comprehensive Review of Biodegradable Polymer-Based Films and Coatings and Their Food Packaging Applications[J]. Materials，2022，15(17)：5899.

[11] JAHANGIRI F，MOHANTY A K，MISRA M. Sustainable Biodegradable Coatings for Food Packaging: Challenges and Opportunities[J]. Green Chemistry，2024，26(9)：4934−4974.

[12] ABDUL KHALIL H P S，DAVOUDPOUR Y，SAURABH C K，et al. A Review on Nanocellulosic Fibres as New Material for Sustainable Packaging: Process and Applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2016，64：823−836.

[13] SULTANA A. Starch-Based Biocomposite Films and Coatings in Paper-Based Food Packaging: A Review[J]. Environmental Chemistry Letters，2025，23(6)：1689−

1712.

[14] CHI K，WANG H，CATCHMARK J M. Sustainable Starch-Based Barrier Coatings for Packaging Applications[J]. Food Hydrocolloids，2020，103：105696.

[15] NI S Z，ZHANG H，DAI H Q，et al. Starch-Based Flexible Coating for Food Packaging Paper with Exceptional Hydrophobicity and Antimicrobial Activity[J]. Polymers，2018，10(11)：1260.

[16] PENG Y Y，GUO J X，GAO Y F，et al. Facile Preparation of Pickering Emulsion-Based Coatings for Hydrophobic, Oil-Resistant, Biodegradable Green Paper-Based Packaging[J]. Food Hydrocolloids，2024，149：109624.

[17] JIANG X F，LI Q，LI X T，et al. Preparation and Characterization of Degradable Cellulose-Based Paper with Superhydrophobic, Antibacterial, and Barrier Properties for Food Packaging[J]. International Journal of Molecular Sciences，2022，23(19)：11158.

[18] ZHANG H，HORTAL M，JORDÁ-BENEYTO M，et al. ZnO-PLA Nanocomposite Coated Paper for Antimicrobial Packaging Application[J]. LWT，2017，78：250−257.

[19] PARK H，HE H T，YAN X，et al. PHA Is Not Just a Bioplastic![J]. Biotechnology Advances，2024，71：108320.

[20] SHARMA V，SEHGAL R，GUPTA R. Polyhydroxyalkanoate (PHA): Properties and Modifications[J]. Polymer，2021，212：123161.

[21] ZHANG Z X，WANG Y F，WANG X M，et al. Towards Scaling-Up Implementation of Polyhydroxyalkanoate (PHA) Production from Activated Sludge: Progress and Challenges[J]. Journal of Cleaner Production，2024，447：141542.

[22] DE DONNO NOVELLI L，MORENO SAYAVEDRA S，RENE E R. Polyhydroxyalkanoate (PHA) Production via Resource Recovery from Industrial Waste Streams: A Review of Techniques and Perspectives[J]. Bioresource Technology，2021，331：124985.

[23] WANG J F，HUANG J Q，LIU S J. The Production, Recovery, and Valorization of Polyhydroxybutyrate (PHB) Based on Circular Bioeconomy[J]. Biotechnology Advances，2024，72：108340.

[24] VAITHANOMSAT P，KONGSIN K，TRAKUNJAE C，et al. Biosynthesized Poly(3-Hydroxybutyrate) on Coated Pineapple Leaf Fiber Papers for Biodegradable Packaging Application[J]. Polymers，2021，13(11)：1733.

[25] POULOSE S，JÖNKKÄRI I，HEDENQVIST M S，et al. Potato Fruit Juice - Poly(3-Hydroxybutyrate) Multi-Layer Coated Paperboards for Bio-Based Packaging[J]. Progress in Organic Coatings，2024，194：108594.

[26] MAI J J，KOCKLER K，PARISI E，et al. Synthesis and Physical Properties of Polyhydroxyalkanoate (PHA)-Based Block Copolymers: A Review[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024，263：130204.

[27] YEO J C C，MUIRURI J K，FEI X C，et al. Innovative Biomaterials for Food Packaging: Unlocking the Potential of Polyhydroxyalkanoate (PHA) Biopolymers[J]. Biomaterials Advances，2024，163：213929.

[28] ACHARJEE S A，BHARALI P，GOGOI B，et al. PHA-Based Bioplastic: A Potential Alternative to Address Microplastic Pollution[J]. Water, Air, & Soil Pollution，2022，234(1)：21.

[29] MONDAL S，SYED U T，GIL C，et al. A Novel Sustainable PHA Downstream Method[J]. Green Chemistry，2023，25(3)：1137−1149.

[30] ERASLAN K，AVERSA C，NOFAR M，et al. Poly(3-Hydroxybutyrate-co-3-Hydroxyhexanoate) (PHBH): Synthesis, Properties, and Applications: A Review[J]. European Polymer Journal，2022，167：111044.

[31] ROMERO VEGA G，GALLO STAMPINO P. Bio-Based Surfactants and Biosurfactants: An Overview and Main Characteristics[J]. Molecules，2025，30(4)：863.

[32] ZDZIENNICKA A，KRAWCZYK J，SZYMCZYK K，et al. Macroscopic and Microscopic Properties of Some Surfactants and Biosurfactants[J]. International Journal of Molecular Sciences，2018，19(7)：1934.

[33] WANG Q X，ZHANG H W，HAN Y G，et al. Study on the Relationships Between the Oil HLB Value and Emulsion Stabilization[J]. RSC Advances，2023，13(35)：24692−24698.

[34] PARK Y H，KIM H J. Formulation and Stability of Horse Oil-in-Water Emulsion by HLB System[J]. Food Science and Biotechnology，2021，30(7)：931−938.

[35] TUCKER I M，BURLEY A，PETKOVA R E，et al. Surfactant/Biosurfactant Mixing: Adsorption of Saponin/Nonionic Surfactant Mixtures at the Air-Water Interface[J]. Journal of Colloid and Interface Science，2020，574：385−392.

[36] XU N，LIN Y，LUO Y X，et al. Effect of Surfactants with Different Ionizing Properties on Dispersion Stability and PCMP Properties of CeO_2 Nanoparticle Polishing Slurry[J]. Ceramics International，2025，51(1)：856−864.

[37] SARGAM Y，WANG K J，TSYRENOVA A，

et al. Effects of Anionic and Nonionic Surfactants on the Dispersion and Stability of nanoSiO_2 in Aqueous and Cement Pore Solutions[J]. Cement and Concrete Research，2021，144：106417.

[38] DAI L，LONG Z，CHEN J，et al. Robust Guar Gum/Cellulose Nanofibrils Multilayer Films with Good Barrier Properties[J]. ACS Applied Materials & Interfaces，2017，9(6)：5477−5485.

[39] ZHANG L，QUE G H. Influence of the HLB Parameter of Surfactants on the Dispersion Properties of Brine in Residue[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects，2008，320(1/2/3)：111−114.

[40] GRETH G G，WILSON J E. Use of the HLB System in Selecting Emulsifiers for Emulsion Polymerization[J]. Journal of Applied Polymer Science，1961，5(14)：135−148.

[41] KUMAR SHAH S，CHAKRABORTY G，BHATTARAI A，et al. Synergistic and Antagonistic Effects in Micellization of Mixed Surfactants[J]. Journal of Molecular Liquids，2022，368：120678.

[42] GIORGIO G，COLAFEMMINA G，MAVELLI F，et al. The Impact of Alkanes on the Structure of Triton X100 Micelles[J]. RSC Advances，2016，6(1)：825−836.

[43] ZHANG J W，ZENG H B. Intermolecular and Surface Interactions in Engineering Processes[J]. Engineering，2021，7(1)：63−83.

[44] SCHRAMM L L. Emulsions, Foams, and Suspensions: Fundamentals and Applications[M]. Weinheim：Wiley-VCH，2005.

（责任编辑：李玉华）

Preparation and Performance Characterization of Poly(3-Hydroxybutyrate-co-3-Hydroxyhexanoate) Coated Paper-Based Packaging Materials

LIU Weili，HAO Fayi，YU Wenlong

（College of Publishing，University of Shanghai for Science and Technology，Shanghai 200093，China）

Abstract：Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate) (PHBH), a biodegradable aliphatic polyester, is widely regarded as a promising candidate for replacing traditional petroleum-based polymeric materials. Using unbleached full-wood pulp kraft paper as the substrate and PHBH as the coating material, eco-friendly paper-based packaging materials were fabricated via the Mayer rod coating method. The study focused on the effects of PHBH aqueous dispersions with varying solid contents on the performance of paper packaging, and also investigated the influence of surfactant hydrophilic-lipophilic balance (HLB) values on the dispersibility of the coating dispersions. The coated paper was comprehensively characterized through tests of paper microstructure, water absorption, water vapor transmission rate (WVTR), oil resistance, mechanical properties, and heat-sealing performance. The results demonstrated that PHBH could form a dense and continuous barrier layer on the paper surface, significantly enhancing the overall performance of the paper. As the solid content of PHBH in the coating dispersion increased, the paper's water absorption and WVTR decreased markedly, with the Cobb value dropping from 25.81 g/m^2 to 0.05 g/m² and the WVTR reducing from 686.35 g/(m^2·d) to 47.26 g/(m^2·d). Furthermore, the oil resistance achieved a Kit rating of 12, effectively preventing oil penetration, and the heat-sealing strength ranged from 10.9 to 14.9 N/15 mm. Consequently, PHBH coatings not only improve the water resistance, oil resistance, barrier properties, and heat-sealing performance of paper-based packaging materials, but also exhibit excellent environmental friendliness and promising application prospects.

Keywords：poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate)；paper-based packaging material；barrier property；heat seal property