

# 特殊浸润性表面构建及其抑制酸奶黏附的研究

刘淑秋<sup>a</sup>, 苏梦琪<sup>a</sup>, 侯聚敏<sup>a,b</sup>, 卢敏<sup>a</sup>

(长春大学 a.食品科学与工程学院 b.吉林省健康状态辨识与机能增强重点实验室, 长春 130022)

**摘要:** **目的** 构建一种能够抑制酸奶黏附现象的特殊浸润性表面, 探索特殊浸润表面的结构、组成及性能。**方法** 以棕榈蜡、二氧化硅和羧甲基纤维素钠为原料, 通过喷涂法在聚苯乙烯片材上构建特殊浸润性表面。**结果** 棕榈蜡添加量为 3 g, 二氧化硅为 0.9 g, 两者共溶于 100 mL 无水乙醇, 将 0.6 g 羧甲基纤维素钠溶于 100 mL 去离子水时, 2 种溶液共混 ( $V_{\text{乙醇溶液}}:V_{\text{水溶液}}=2:1$ ) 在聚苯乙烯片材表面进行喷涂, 并于 75 °C 烘干 30 min, 得到特殊浸润性表面。所构建的特殊浸润性表面具有典型的微纳结构, 酸奶在其表面的接触角为  $(141.32\pm5.43)^{\circ}$ , 滚动角为  $(7.51\pm2.86)^{\circ}$ 。耐碱、耐盐试验表明, 特殊浸润性涂层在浸泡 24 h 后, 酸奶在其表面的接触角分别为  $(132.00\pm5.75)^{\circ}$  和  $(130.18\pm6.09)^{\circ}$ , 与原始特殊浸润性表面相比未发生显著性下降 ( $P>0.05$ )。此外, 甲基蓝和邻苯二酚紫粉末的残留结果表明所构建的表面自清洁性能良好。酸奶在具有特殊浸润性表面的聚苯乙烯片材上的残留量为  $(3.77\pm1.99)\%$ , 显著低于无特殊浸润性表面的聚苯乙烯片材  $(15.12\pm2.77)\%$  ( $P<0.05$ )。**结论** 该特殊浸润性表面具有良好的化学稳定性、自清洁性和不黏性, 可有效减少酸奶资源的浪费, 也为液态黏性流体食品的包装设计提供理论依据。

**关键词:** 特殊浸润性表面; 喷涂法; 化学稳定性; 自清洁性; 酸奶; 残留量

**中图分类号:** TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)09-0300-11

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.09.031

## Fabrication of Special Wettability Surface and Application in Inhibition of Yogurt Adhesion

LIU Shu-qi<sup>a</sup>, SU Meng-qi<sup>a</sup>, HOU Ju-min<sup>a,b</sup>, LU Min<sup>a</sup>

(a. College of Food Science and Engineering, b. Jilin Province Key Laboratory of Human Health State Identification and Function Enhancement, Changchun University, Changchun 130022, China)

**ABSTRACT:** Plenty of residual yogurt is always adhere to the inner face of the package after daily drink, causing severe waste

收稿日期: 2021-08-17; 修订日期: 2022-01-05

**Received:** 2021-08-17; **Revised:** 2022-01-05

**基金项目:** 长春大学攀登计划项目 (zpk202029/2020JBD26L45); 长春大学科研培育项目春蕾基金项目 (zkc201909/2019JBC26L35); 中国博士后科学基金第 65 批面上资助项目 (2019M651212); 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目 (JJKH20191208KJ)

**Fund:** The Climbing Plan Project of Changchun University (zpk202029/2020JBD26L45); the Chunlei Fund Project of Changchun University (zkc201909/2019JBC26L35); the 65th China Postdoctoral Science Funded Projects (2019M651212); the 13th Five-Year Plan Scientific and Technological Research Project of Jilin Provincial Department of Education (JJKH20191208KJ)

**作者简介:** 刘淑秋 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方为特殊浸润性表面的构建。

**Biography:** LIU Shu-qi (1997-), Female, Postgraduate, Research focus: fabrication of special wettability surface.

**通讯作者:** 侯聚敏 (1985—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为仿生表面构建与应用、小浆果贮藏与加工。

**Corresponding author:** HOU Ju-min (1985-), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: fabrication and application of bionic surface, storage and production of small berry.

**通讯作者:** 卢敏 (1963—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为谷物贮藏与加工。

**Corresponding author:** LU Min (1963-), Female, Doctor, Professor, Research focus: storage and production of cereal.

**引文格式:** 刘淑秋, 苏梦琪, 侯聚敏, 等. 特殊浸润性表面构建及其抑制酸奶黏附的研究[J]. 表面技术, 2022, 51(9): 300-310.

LIU Shu-qi, SU Meng-qi, HOU Ju-min, et al. Fabrication of Special Wettability Surface and Application in Inhibition of Yogurt Adhesion[J]. Surface Technology, 2022, 51(9): 300-310.

of food resource. Thus, a special wetted surface was fabricated to inhibit the adhesion phenomenon of yogurt, which was used to reduce the residual amount of yogurt.

In this study, the carnauba wax, silica and sodium carboxymethyl cellulose were used as the original materials which could be developed a hydrophobic surface. 3 g carnauba wax and 0.9 g silica were dissolved in 100 mL absolute ethyl alcohol and was taken a water bath at 80 °C for 30 min in a magnetic stirring equipment. While 0.6 g sodium carboxymethyl cellulose was dissolved in 100 mL deionized water at 75 °C for 30 min. Afterwards, the ethyl alcohol solution and the water solution were mixed together with a volume ratio of 2:1 and sprayed on the polystyrene sheets to form a special wettable surface in 75 °C for 30 min. Then, the special wettability surface was characterized comprehensively. A scanning electron microscope and a Fourier infrared spectrometer were utilized to analyze the morphology and the constitute of the special wetting surface. At the same time, the chemical stability test, self-cleaning property test, anti-pollution test, and adhesion test were all performed to verify the applicability of the special wetted surface. Lastly, the residual amount of yogurt was detected to verify the applicability of the special wettability surface.

The typical micro-nano structure could be observed on the special wettability surface. Meanwhile, carnauba wax, silica and sodium carboxymethyl cellulose could be integrally fused to constitute the special wetted surfaces, which could be concluded from the Fourier infrared spectroscopy curves. The contact Angle of water on the special wetted surface was  $(131.34 \pm 3.61)^\circ$ , but water could not be rolled freely probably due to the existence of hydrogen bonds between the sodium carboxymethyl cellulose and water. Besides, The contact Angle, rolling Angle of yogurt on the wettability surface were  $(141.32 \pm 5.43)^\circ$  and  $(7.51 \pm 2.86)^\circ$ , respectively, indicating great inhibition adherence of the yogurt on the special wetted surface. Alkali resistance and salt resistance tests showed that the contact angles of yogurt on the special wettability surfaces were  $(132.00 \pm 5.75)^\circ$  and  $(130.18 \pm 6.09)^\circ$  after soaking for 24 h, respectively, without significant decrease compared to the original wettability surface  $(141.32 \pm 5.43)^\circ$  ( $P < 0.05$ ). However, after acid resistance test, the contact angle of yogurt on the special wettability surface decreased dramatically to  $(112.39 \pm 8.84)^\circ$  ( $P < 0.05$ ). It could be inferred that the acid solution contained a lot of  $H^+$  which could easily bind to the sodium carboxymethyl cellulose, damaging the integrity of the special wettability surface. In addition, the residual results of methyl blue powder and solution showed that the fabricated surface had good self-cleaning performance. And the residual amount of yogurt was significantly decreased from  $(15.12 \pm 2.77)\%$  to  $(3.77 \pm 1.99)\%$  compared the pristine polystyrene sheets with the coated sheets ( $P < 0.05$ ). Although yogurt is a complicated liquid system which contained nutrient substances such as lactose, lipid, protein and lactic acid, the special wettability surface could be served as an efficient package material to reduce the adhesion of yogurt significantly.

Totally, the special wettable surface has good chemical stability, self-cleaning and non-viscosity, which can effectively reduce the waste of yogurt resources, and also provides a theoretical basis for the packaging design of liquid viscous fluid food.

**KEY WORDS:** special wettable surface; spray method; chemical stability; self-cleaning property; yogurt; residual quantity

食品黏附对于食品制造和最终产品都有很大影响, 食品加工和包装系统中, 必须仔细研究液体-固体和固体-固体的界面。因此, 有必要对食品成分、材料表面能等影响黏附的因素进行研究, 以便更好地了解 and 减少这种现象<sup>[1]</sup>。酸奶是一种日常饮用的发酵型乳制品<sup>[2]</sup>。然而, 在饮用后常常会有大量酸奶黏附在杯壁, 造成大约 15% 的残留, 产生大量的食品资源浪费。因此, 减少酸奶残留量是乳制品行业中亟待解决的问题<sup>[3]</sup>。自然界中的“荷叶效应”, 具有典型的自清洁功能, 这为基于特殊浸润性表面, 改善酸奶包装的表面结构, 从而抑制酸奶黏附现象提供了思路<sup>[4]</sup>。

用于食品相关应用的食用超疏水表面已在各种基质上实现。然而, 可独立食用的超疏水材料尚未实现<sup>[5]</sup>。而食用蜡作为一种典型的低表面能材料, 在特殊浸润性表面构建中具有广泛的应用。巴西棕榈蜡和

蜂蜡具有不同的熔化温度, 是混合蜡涂层的适宜材料, 可制备出具有良好透明性和机械耐久性的棕榈蜡和蜂蜡混合涂层<sup>[5]</sup>。Wang 等<sup>[6]</sup>将棕榈蜡和蜂蜡分别溶解到丙酮中, 利用喷涂法制备得到的超疏液表面具有良好的稳定性和实用性。但蜂蜡表面容易遭到手指按压而被破坏。朱蓓薇课题组将蜂蜡溶解于丙酮中, 利用喷涂法制备出仿生超疏水表面, 实现了对利普顿茶、可口可乐、桔子汁、牛奶、咖啡、蜂蜜的超疏液性<sup>[7]</sup>。但该方法在中间弹性层制备过程中耗时长, 且引入了丙酮, 需要考虑涂层的毒理性。后期, 朱蓓薇课题组为了克服涂层的不耐高温性, 在涂层中引入了咖啡木质素, 使涂层的超疏液性在温度为 120 °C 时依然可以良好的保持<sup>[8]</sup>, 但此方法依然引入了丙酮作为溶剂。乙醇是一种比丙酮更绿色环保的溶剂<sup>[9]</sup>, 已有研究转向采用乙醇作为涂层原料的溶剂。例如,

将小烛树蜡 (Candelilla Wax) 和米糖蜡 (Rice Bran Wax) 溶解于乙醇, 经过喷涂干燥后, 可在酸奶盒或玻璃上生成具有良好疏液性的涂层, 同时也具有良好的稳定性和应用性<sup>[10]</sup>。另外, 也有研究将石蜡 (Paraffin Wax)、蜂蜡 (Bee Wax)、微晶蜡 (Microcrystalline Wax) 和棕榈蜡 (Carnauba Wax) 直接溶解于乙醇, 加热溶解后在基底上喷涂形成超疏液涂层, 具有抗生物黏附、果品保藏等方面的应用<sup>[11]</sup>。目前看来, 棕榈蜡和蜂蜡在超疏液涂层制备过程中应用最为广泛, 其他蜡质则处于被逐渐开发利用的状态, 且蜡质中也在逐步加入其他原料, 来赋予蜡质涂层的多功能性 (疏液性、耐磨性) 需要得到进一步研究。

非金属氧化物可有效提升可食性涂层的疏液性能。其中, 超疏水性纳米二氧化硅应用最为广泛。例如, 已有研究将纳米二氧化硅分散于乙醇<sup>[12]</sup>或异丙醇<sup>[13]</sup>中, 再添加固定剂或氟化物来形成乳液, 采用喷涂法在硬质基底或软质基底上制备超疏液涂层, 均取得了良好的效果。然而, 氟化物具有难以分解、大量摄入对人体有害的缺陷, 这限制了二氧化硅和氟化物共同应用于超疏液涂层制备中的应用。也有研究将二氧化钛分散到聚乙烯-辛烷共聚物 (黏性体, 60%) 和聚乙烯-庚酸共聚物 (稳定剂, 40%) 中, 通过喷涂法, 制备超疏液涂层, 取得了较好的效果<sup>[14]</sup>。此外, 氧化铝<sup>[15]</sup>、氧化锌<sup>[16]</sup>等氧化物, 也逐步应用于制备超疏液涂层。总体来看, 二氧化硅及其改性产品是目前应用于可食性超疏液涂层中最为广泛的非金属氧化物。另外, GB 2760—2011《食品添加剂使用卫生标准》规定: 二氧化硅可用于蛋粉、糖粉、奶粉、可可粉、可可脂、植物性粉末、速溶咖啡、汤料粉等。可见, 二氧化硅是赋予蜡质涂层疏液性能的理想材料。

虽然已有很多技术和方法应用于制备超疏水表面<sup>[17-19]</sup>, 但较差的化学稳定性仍然是抑制特殊浸润性表面广泛应用的重要问题<sup>[20-21]</sup>。许多具有特殊浸润性功能的微结构表面, 在强酸碱溶液中, 或在高温和低温环境中, 无法良好地保持结构的完整性, 也是特殊浸润性表面应用过程中存在的主要问题。因此, 构建具有优异化学稳定性的超疏水表面<sup>[22]</sup>, 可有效解决复杂液态食品体系 (如酸奶) 的黏附问题。羧甲基纤维素钠 (CMC-Na) 水溶液透明, 具有增稠、成膜、黏结、水分保持、胶体保护、乳化及悬浮等作用, 具有较强的黏性和良好的稳定性<sup>[23]</sup>, 这为增加特殊浸润性表面的稳定性提供了思路。

因此, 本研究以减少酸奶残留量为目标, 以棕榈蜡 (CW)、疏水性二氧化硅 ( $\text{SiO}_2$ ) 和羧甲基纤维素钠 (CMC-Na) 为主要原料, 在酸奶常用包装材料聚苯乙烯 (PS) 表面构建一种相对安全, 且稳定性良好的特殊浸润性表面, 用于解决酸奶残留而产生的浪费现象。本研究的开展, 有利于酸奶包装材料的创新, 也为减少液态黏性食品资源的浪费提供了理论依据。

## 1 试验

### 1.1 材料与设备

材料包括: 棕榈蜡, 1#, 阿拉丁; 聚苯乙烯, 深圳市宏兴源塑胶制品有限公司; 疏水性二氧化硅, 广东新如荣生物科技有限公司; 无水乙醇, 天津化学试剂有限公司; 羧甲基纤维素钠 (CMC-Na), 上海市申光食用化学品有限公司; 以上试剂均为食品级。HCl 溶液, 郑州永坤环保科技有限公司; NaOH, 郑州永坤环保科技有限公司; NaCl, 天津市大茂化学试剂厂; 甲基蓝, 天津市光复精细化工研究所; 邻苯二酚紫, 国药集团化学试剂有限公司。

设备包括: 集热式恒温加热磁力搅拌器 (DF-101S), 巩义市予华仪器有限责任公司; 接触角测量仪 (SL200KS), 上海梭伦信息科技有限公司; 电热恒温鼓风干燥箱 (DZF-6050), 上海琅环实验设备有限公司; 空气压缩机 (2 极 1600), 台州市奥突斯工贸有限公司; 电子天平 (PX224ZH/E), 奥豪斯仪器有限公司; 扫描电子电镜 (JSM-IT500A), JEOL 公司 (日本); 傅里叶变换红外光谱分析 (Nicolet iS5), 美国赛默飞世尔科技有限公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 特殊浸润性表面的构建

分别采用 CMC-Na、 $\text{SiO}_2$  或 CW 中的 1 种物质、2 种物质或 3 种物质, 采用喷涂法构建特殊浸润性表面, 以是否能构成特殊浸润性表面, 以及接触角和滚动角为判断依据, 来确定涂层配方。

3 种物质构建特殊浸润性表面的方法具体如下。

A 液: 将一定量的 CW 和  $\text{SiO}_2$  放入 100 mL 乙醇溶液中, 在恒温加热磁力搅拌器中水浴搅拌 30 min ( $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。

B 液: 将一定浓度 CMC-Na 与 100 mL 水混合放入磁力搅拌器中 ( $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 加热溶解 30 min。

以  $V_{\text{A 液}}:V_{\text{B 液}}=2:1$ , 进行混合, 采用喷枪进行一次喷涂构建包含 3 种物质的特殊浸润性表面。枪嘴距离 PS 片材 (长×宽=60 mm×25 mm) 约 12 cm, 压强选择 60 psi, 进行喷涂。喷涂完后, 将带有表面的 PS 片材放于  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  鼓风干燥箱内干燥 30 min, 去除乙醇并固定表面。装置流程图见图 1。

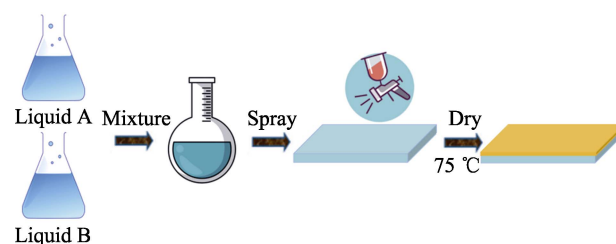


图 1 构建特殊浸润性表面的装置流程图  
Fig.1 Fabrication of a device flow chart for a special wettability surface

1.2.2 CW、SiO<sub>2</sub>、CMC-Na 添加量对表面浸润性的影响试验

以 CW、CMC-Na 和 SiO<sub>2</sub> 添加量为考察因素, 判断 CW、CMC-Na 和 SiO<sub>2</sub> 添加量对 3 种物质所构建的特殊浸润性表面对水和酸奶浸润性的影响, 进而确定特殊浸润性表面的最佳配方。CW、CMC-Na 和 SiO<sub>2</sub> 添加量对特殊浸润性表面对水和酸奶的浸润性影响试验设计如表 1 所示。

表 1 CW、CMC-Na 和 SiO<sub>2</sub> 添加量对表面浸润性的影响试验设计  
Tab.1 Experimental design table of the effect of the addition amount of CW, CMC-Na and SiO<sub>2</sub> on the hydrophobicity of the surfaces

CW-addition	SiO <sub>2</sub> -addition	CMC-Na -addition
A	0.9	1.0
3.0	B	1.0
3.0	0.9	C

Notes: A is CW quality, that is, A is 1, 2, 3, 4, 5; B is SiO<sub>2</sub> quality, that is, B is 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5; C is the CMC-Na mass, that is, C is 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, and 1.4.

1.2.3 接触角和滚动角的测定

选取表面平整光滑的特殊浸润性表面, 将样品表面进行接触角和滚动角测量, 滴加 5 μL 的去离子水和酸奶在样品表面, 再采用接触角仪器, 在样品表面不同地方测试 5 次, 取平均值。利用接触测量仪自带的滚动角测试方法, 记录酸奶液滴滚落试样表面时的滚动角, 在样品表面不同地方测试 5 次, 取平均值。同时测定特殊浸润性表面对水和酸奶的润湿性, 是为了优化涂层配方, 实现特殊浸润性涂层对酸奶低黏附、自清洁的目的。

1.2.4 扫描电子显微镜的测试 (SEM)

采用导电胶将样品黏贴到载物台上, 放入离子溅射仪内以 6 mA 电流、5 mmHg 真空度进行喷金。之后用扫描电子显微镜, 设定加速电压为 10.0 kV, 观察表面的微观结构。

1.2.5 傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 分析

采用傅里叶变换红外光谱分析及验证特殊浸润性表面的成分。对样品进行溴化钾压片处理<sup>[24]</sup>, 参考 Chen<sup>[25]</sup>的方法, 将特殊浸润性表面放置在载样台上, 波长范围设置在 500~4 000 cm<sup>-1</sup>。

1.2.6 稳定性试验

为了检测所构建的特殊浸润性表面是否能够长期使用, 将其进行稳定性试验的测试。分别配制 1 mol/L HCl、1 mol/L NaOH 和 3.5%NaCl 的溶液, 将构建好的特殊浸润性表面分别浸入其中, 24 h 后将其取出烘干, 每个样品选取 5 个测试点, 在接触角测量仪上测量其接触角和滚动角。

1.2.7 自清洁性测试

将样品固定在长 8 cm 的玻璃片放置在培养皿中<sup>[26]</sup>, 使玻璃片顶部到底部距离为 2 cm, 倾斜角度为 10°<sup>[27]</sup>。在其样品表面洒上甲基蓝粉末和邻苯二酚紫粉末模拟污染物的污染, 观察样品表面甲基蓝和邻苯二酚紫粉末随水滴的冲刷情况。自清洁测试装置如图 2 所示<sup>[28]</sup>。

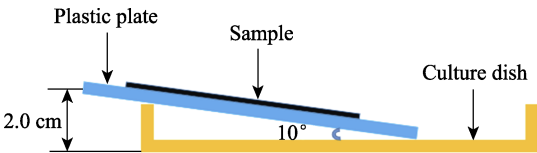


图 2 自清洁测试简易装置  
Fig.2 Self-cleaning test simple device

1.2.8 抗污性能测试

配制甲基蓝溶液 250 mL, 将特殊浸润性表面样品完全浸入到甲基蓝溶液中, 取出后观察涂层表面的颜色变化。

1.2.9 残留量的测定

参考隋越等<sup>[29]</sup>的方法, 按照式 (1) 计算酸奶在特殊浸润性表面的残留量。每个样品测试 3 次, 结果取平均值。

$$a=\frac{b}{A}$$
 (1)

式中:  $a$  为残留量, %;  $b$  为经过倾斜之后残留的酸奶量, g;  $A$  为原始的酸奶质量, g。

2 结果与讨论

2.1 不同处理表面的浸润性结果分析

2.1.1 单种物质构建特殊浸润性表面的结果

分别采用 CMC、SiO<sub>2</sub> 或 CW 采用喷涂法构建特殊浸润性表面, 成膜结果见表 2。

表 2 单种物质构建特殊浸润性表面的结果  
Tab.2 Results of fabricating special wettability surfaces with single substances

Type	Addition/g	Special wettable surface (Yes or No)	Water-CA/(°)	Yogurt-CA/(°)	SA/(°)
CMC-Na	1.0	No	—	—	—
SiO <sub>2</sub>	0.9	No	—	—	—
CW	3.0	Yes	128.69±6.05	125.07±5.22	—

Notes: - represents a water droplet that does not roll on a particular wettability surface, same below.



由表2可知,单独使用CMC-Na和SiO<sub>2</sub>无法构成表面。单独使用CW可以构建表面,水的接触角达到(128.69±6.05)°,酸奶的接触角为(125.07±5.22)°,但水和酸奶液滴无法滚动。可见,采用一种物质构建的表面不仅稳定性差且液滴滚动性差,无法构成理想的特殊浸润性表面。

### 2.1.2 两种物质构建特殊浸润性表面的试验

分别采用CMC-Na、SiO<sub>2</sub>或CW中的2种物质采用喷涂法构建特殊浸润性表面,结果见表3。

由表3可见,当CMC-Na和CW混合使用时可以构成表面,水接触角为(134.16±4.77)°,酸奶接触角为(138.24±4.16)°,但是无滚动角,水滴不易从表面滚落;而SiO<sub>2</sub>和CW混合使用时可构成表面,且水接触角达到(127.49±6.38)°,酸奶接触角为(136.14±4.86)°,滚动角为(19.05±4.95)°,但是稳定性很差,容易破碎。因此,两种物质复合也无法构成理想的特殊浸润性表面。

因此,采用CMC-Na、SiO<sub>2</sub>和CW3种物质进行复合使用,尝试构建自清洁性能和稳定性较好的特殊浸润性表面。

## 2.2 CW、SiO<sub>2</sub>、CMC-Na添加量对特殊浸润性表面润湿性的影响

### 2.2.1 CW添加量对特殊浸润性表面润湿性的影响

CW添加量对特殊浸润性表面的接触角大小影响见图3。由图3a和图3b可以看出,随着CW添加量的增加,特殊浸润性表面对水和酸奶的接触角均呈现出显著上升并趋于平缓的趋势,当CW添加量为4g时,特殊浸润性涂层对水的接触角达到(136.25±1.60)°;当CW添加量为3g时,接触角达到(146.04±2.29)°。CW添加量对特殊浸润性表面的滚动角大小的影响见表4。由表4可知,随着CW添加量的增加,水无法在特殊浸润性表面滚动,但酸奶在特殊浸润性表面上的滚动角呈现由无到有、由大到小再到大的趋势,当CW添加量为3、4g时,滚动角分别为(9.79±4.44)°和(7.61±4.95)°,导致特殊浸润性涂层对水和酸奶呈现出不同的滚动性。这可能与水、蛋白质、脂肪等分子的半径大小有关。另外,若CW浓度过低,则无法构建粗糙表面;若CW浓度过高,所构建的表面不易成膜。因此,综合考虑,选取CW质量为3g。

表3 2种物质构建特殊浸润性表面的结果

Tab.3 Results of the fabrication of special wettability surfaces by two substances

Type	Addition/g	Special wettable surface (Yes or No)	Water-CA/(°)	Yogurt-CA/(°)	SA/(°)
CMC-Na+SiO <sub>2</sub>	1.0+0.9	No	—	—	—
CMC-Na+CW	1.0+3.0	Yes	134.16±4.77	138.24±4.16	—
SiO <sub>2</sub> +CW	0.9+3.0	Yes	127.49±6.38	136.14±4.86	19.05±4.95

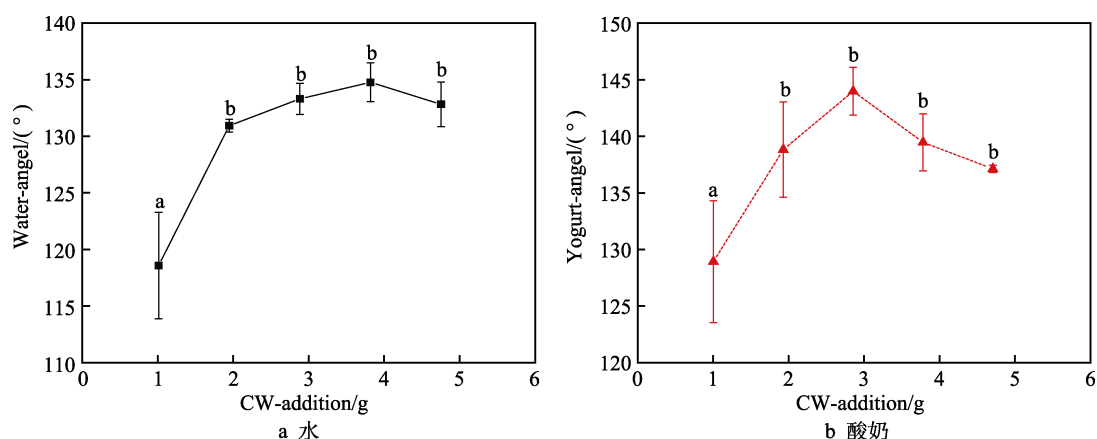


图3 CW添加量对特殊浸润性表面水(a)和酸奶(b)接触角大小的影响(相同的小写字母代表CW添加量对特殊浸润性表面无显著性影响)

Fig.3 Effect of CW addition on the contact angle of special wettability surface for water (a) and yogurt (b) (The same lowercase letters indicate that the amount of CW added has no significant effect on special wettability surfaces)

表4 CW添加量对特殊浸润性表面酸奶滚动角大小的影响

Tab.4 Effect of CW addition on yogurt roll angle of special wettability surface

(°)

SA	1 g	2 g	3 g	4 g	5 g
Water	—	—	—	—	—
Yogurt	—	(20.09±7.99) <sup>ab</sup>	(9.79±4.44) <sup>ab</sup>	(7.61±4.95) <sup>a</sup>	(23.05±10.35) <sup>b</sup>

2.2.2 SiO<sub>2</sub>添加量对特殊浸润性表面润湿性的影响

SiO<sub>2</sub> 添加量对特殊浸润性表面的接触角大小的影响见图 4。由图 4 可知, SiO<sub>2</sub> 添加量对特殊浸润性表面对水的接触角无显著影响 ( $P>0.05$ )。由图 4a 可知, 当特殊浸润性表面内不添加 SiO<sub>2</sub> 时, 水接触角达到 $(131.32\pm1.85)^{\circ}$ , 当 SiO<sub>2</sub> 的质量为 0.3 g 时, 水接触角为 $(135.65\pm2.64)^{\circ}$ 。由图 4b 可以看出, 特殊浸润性涂层对酸奶的接触角总体呈现出先上升后下降的趋势。当没有添加 SiO<sub>2</sub> 时, 酸奶接触角为 $(133.25\pm2.37)^{\circ}$ , 而当 SiO<sub>2</sub> 的质量为 0.3 g 时, 酸奶接触角达到 $(138.92\pm3.32)^{\circ}$ , 但酸奶在特殊浸润性表面无法滚动 (表 5)。与添加量为 0.3 g 时相比, 显著下降 ( $P<0.05$ )。由表 5 可知, 水无法在特殊浸润性表面上滚动, 而当 SiO<sub>2</sub> 质量为 0.6 g 和 0.9 g 时, 酸奶在特殊浸润性表面有滚动角, 分别为 $(23.12\pm2.22)^{\circ}$ 和 $(13.93\pm1.92)^{\circ}$ , 且在 SiO<sub>2</sub> 为 0.9 g 时, 流动性最好。这可能与水、蛋白质、脂肪等分子的半径大小有关。因此, 综合考虑, SiO<sub>2</sub> 质量选取 0.9 g。

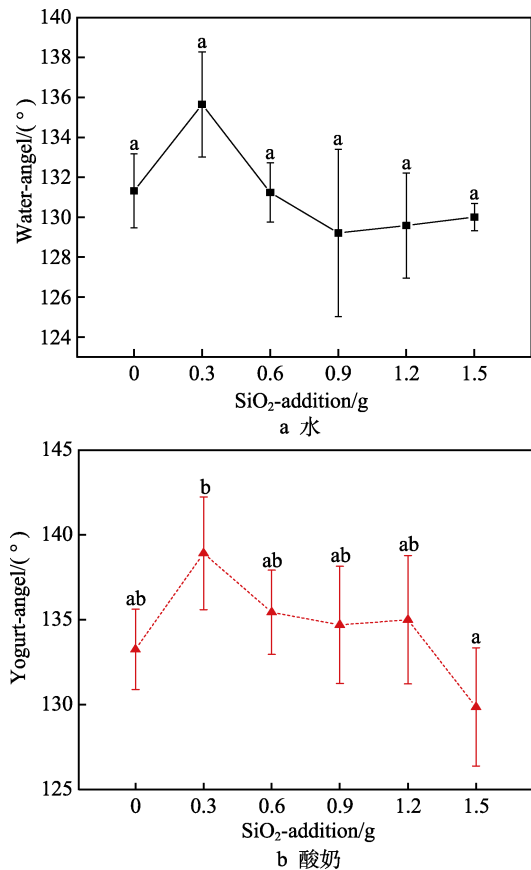


图 4 SiO<sub>2</sub> 的添加量对特殊浸润性表面水和酸奶的接触角大小的影响 (相同的小写字母代表 SiO<sub>2</sub> 添加量对特殊浸润性表面无显著性影响)  
Fig.4 Effect of SiO<sub>2</sub> addition on the contact angle of special wettability surface for water (a) and yogurt (b) (Same lowercase letters indicate that SiO<sub>2</sub> addition has no significant effect on special wettability surfaces)

表 5 SiO<sub>2</sub> 添加量对特殊浸润性表面酸奶的滚动角大小的影响  
Tab.5 Effect of SiO<sub>2</sub> addition on the yogurt roll angle of special wettability surface (°)

SA	0.3 g	0.6 g	0.9 g	1.2 g	1.5 g
Water	—	—	—	—	—
Yogurt	—	(23.12±2.22) <sup>a</sup>	(13.93±1.92) <sup>b</sup>	—	—

2.2.3 CMC-Na 添加量对特殊浸润性表面润湿性的影响

CMC-Na 添加量对特殊浸润性表面对水和酸奶接触角大小的影响规律见图 5。由图 5 可知, CMC-Na 添加量对特殊浸润性表面的接触角 (水和酸奶) 无显著性影响 ( $P>0.05$ )。但由表 6 可见, 水无法在特殊浸润性表面实现滚动, 但随着 CMC-Na 添加量的增加, CMC-Na 在 0.6、0.8、1.0 g 时, 特殊浸润性表面的滚动角逐渐增大, 分别为 $(7.51\pm2.86)^{\circ}$ 、 $(8.77\pm3.66)^{\circ}$ 、 $(11.15\pm4.68)^{\circ}$ , 当 CMC-Na 添加量为 0.6 g 时, 滚动角最好, 达到了 $(7.51\pm2.86)^{\circ}$ , 而当 CMC-Na 添加量超过

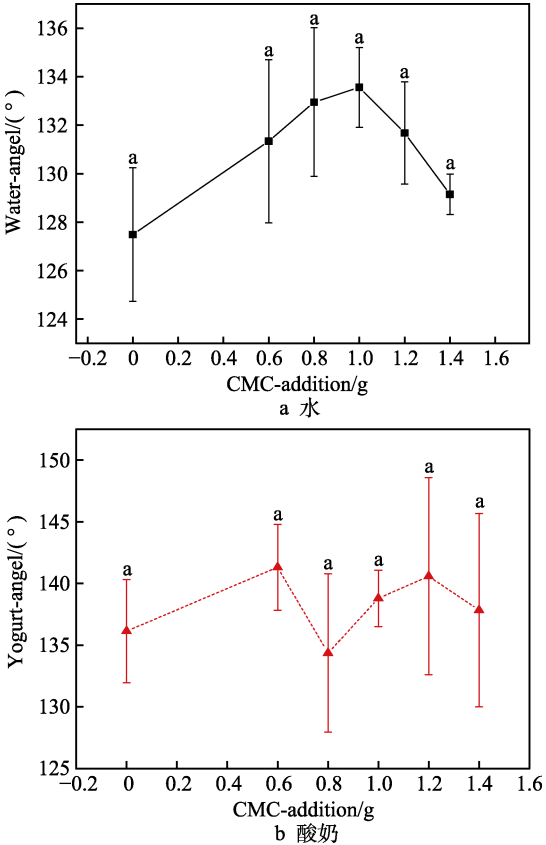


图 5 CMC-Na 添加量对特殊浸润性表面水和酸奶的接触角大小的影响 (相同的小写字母代表 CMC-Na 添加量对特殊浸润性表面无显著性影响)  
Fig.5 Effect of CMC-Na addition on the contact angle of special wettability surface for water (a) and yogurt (b) (The same lowercase letters indicate that the amount of CMC-Na has no significant effect on the special wettability surface)

表 6 CMC-Na 添加量对特殊浸润性表面的滚动角大小的影响

SA	0.6 g	0.8 g	1.0 g	1.2 g	1.4 g
Water	—	—	—	—	—
Yogurt	(7.51±2.86) <sup>a</sup>	(8.77±3.66) <sup>a</sup>	(11.15±4.68) <sup>a</sup>	—	—

1.0 g 时, 酸奶无法在特殊浸润性表面流动。这可能是由于酸奶属于复杂体系, 其内部的蛋白质、脂肪分子半径较大, 与涂层中的 CMC-Na 具有一定的斥力, 而纯水分子半径相对较小, 与 CMC-Na 分子之间具有较大引力。CMC-Na 是亲水性的, 不利于表面的自清洁性能。但是添加 CMC-Na 能够增强特殊浸润性表面的稳定性, 因此综合考虑, CMC-Na 用量选取 0.6 g。

### 2.3 特殊浸润性表面的微观结构与分析

特殊浸润性表面的扫描电镜图见图 6。由图 6a、图 6b 可以看出, PS 表面光滑, 无杂质。从图 6c 可以看出, 特殊浸润性表面粗糙, 被微米级二氧化硅颗粒紧密覆盖, 表面的纳米级粒子呈球形, 但大小不均。特殊浸润性表面具备微纳米粗糙结构, 表面有一些小褶皱, 这些亚微米结构的大小取决于蜡混合乳胶, 一般从几百纳米到几微米<sup>[30]</sup>。其表面良好的疏水性是由于表面二氧化硅和棕榈蜡结构在同一表面的不同位

置的排列所致, 接触面积增加了表面与基体之间范德华力的界面相互作用。从图 6d 可以看出, 特殊浸润性表面的粗糙结构分布均匀, 表面的粗糙结构使表面与空气接触的面积较大, 当液体接触到表面时, 液体与表面之间有气体隔挡, 增大了液体的接触角, 这也解释了特殊浸润性表面的浸润特性。

### 2.4 特殊浸润性表面的红外光谱图分析

特殊浸润性表面及其构成组分的红外光谱图见图 7。由图 7 中曲线 a 中的  $2\,917.48\text{ cm}^{-1}$  附近有甲基—CH<sub>3</sub>—吸收峰,  $2\,855.41\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰由亚甲基—CH<sub>2</sub>—的 C—H 键的不对称的伸缩振动形成, 相应的酯基使蜡颗粒具有疏水的化学性质。 $1\,746.04\text{ cm}^{-1}$  为羰基 C=O 的特征吸收峰, 且比较尖锐,  $1\,169.57\text{ cm}^{-1}$  处为 C—O 键的伸缩振动吸收峰<sup>[31]</sup>, 属于典型的棕榈蜡 FTIR 谱图。由图 7 中曲线 b 可以看到,  $1\,228.64\text{ cm}^{-1}$  和  $1\,044.84\text{ cm}^{-1}$  处有很宽的吸收峰, 为对应的 Si—O—Si 的对称收缩振动峰, 该键同时在  $949.36\text{ cm}^{-1}$  处表现出对称收缩振动峰和  $780.48\text{ cm}^{-1}$  的弯曲振动峰, 此处的峰为 SiO<sub>2</sub> 中 Si 的特征峰,  $3\,435.46\text{ cm}^{-1}$  为 Si—O 键与表面吸附氢键缔合的振动峰, 属于典型的二氧化硅 FTIR 谱图。由图 7 中曲线 c 可知,  $3\,600.77\text{ cm}^{-1}$  处有羟基—OH 键特征峰, 且在  $1\,573.57\text{ cm}^{-1}$  处出现羧基 C=O 吸收峰<sup>[32]</sup>, 属于典型的羧甲基纤维素

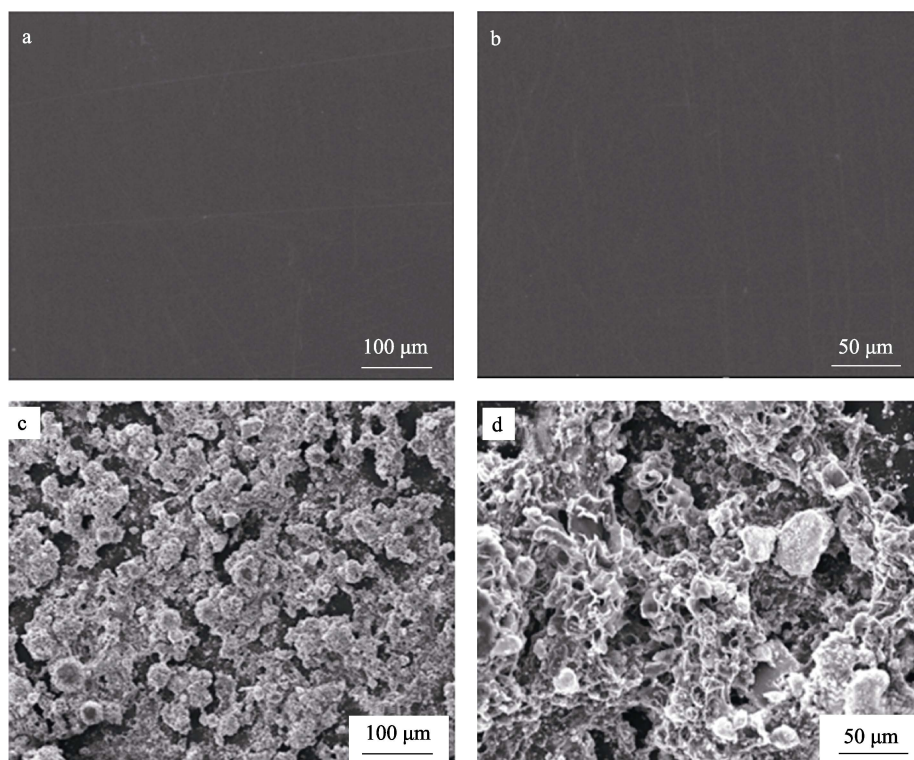


图 6 PS 基材放大 100 倍 (a) 和 50 倍 (b) 以及特殊浸润性表面放大 100 倍 (c) 和 50 倍 (d) 的电镜扫描图

Fig.6 SEM images of PS substrate magnified by 100× (a) and 50× (b), and special wetted surfaces magnified by 100× (c) and 50× (d)



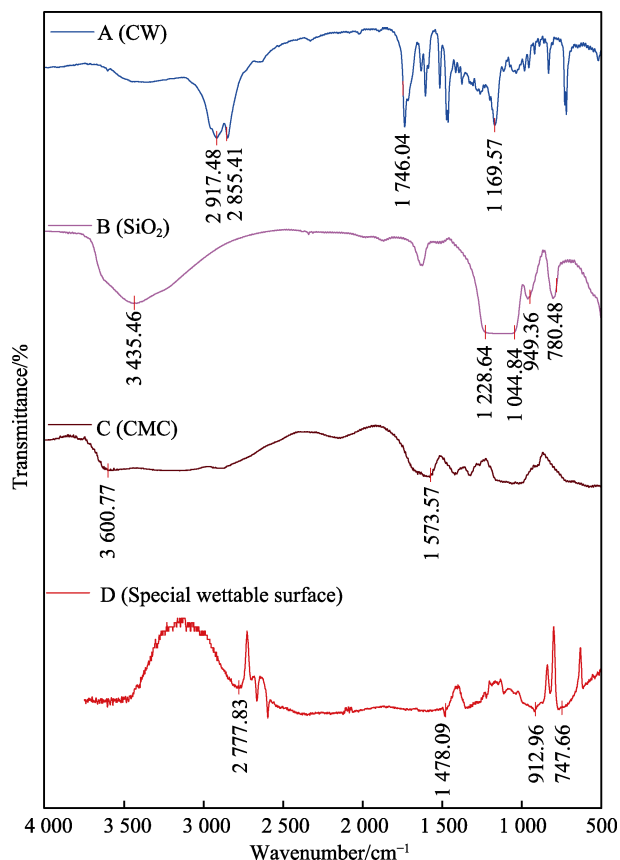


图 7 特殊浸润性表面的红外光谱图

Fig. 7 FTIR spectra of a surface with special wettability  
Notes: Curve A, B, C and D represents the IR spectrum of CW, SiO<sub>2</sub>, CMC-Na, and the special wetting surfaces, respectively.

FTIR 谱图。最后由图 7 中曲线 d 可知, 1 478.09 cm<sup>-1</sup> 处出现羧基 C=O 吸收峰, 证明此处有 CMC-Na 和 CW。在 912.96~747.66 cm<sup>-1</sup> 有 SiO<sub>2</sub> 中 Si 的特征峰, 证明此处有 SiO<sub>2</sub> 出现。总体来看, CMC-Na、SiO<sub>2</sub> 和 CW 很好地相容在一起。

## 2.5 耐碱耐盐性试验

强碱强盐对特殊浸润性表面的影响见图 8。由图 8 可知, 经过 HCl 溶液、NaOH 溶液和 NaCl 溶液浸泡 24 h 后, 特殊浸润性表面的接触角都有所下降。在酸性条件下, 特殊浸润性表面对水的接触角下降至 (120.07±2.80)°, 对酸奶的接触角下降至 (112.39±8.84)°。在碱性条件下, 特殊浸润性表面对水的接触角下降至 (126.09±2.67)°, 对酸奶的接触角下降至 (132.00±0.54)°。在中性条件下, 特殊浸润性表面对水的接触角下降至 (119.48±14.14)°, 对酸奶的接触角下降至 (130.18±3.26)°。与原始最优涂层对酸奶的接触角 (141.32±5.43)° 比较, 只有在酸性条件下的特殊浸润性表面对酸奶的接触角发生显著下降 ( $P < 0.05$ ), 在碱性和高盐条件下的特殊浸润性表面对酸奶的接触角没有显著影响 ( $P > 0.05$ )。这是由于 CMC-Na 中有亲水基团, 更容易与 H<sup>+</sup> 结合, 从而破坏了特殊浸润性表面的黏附性, 导致接触角下降。另外, 可以看出接

触角在酸性溶液中比在碱性和中性溶液中下降更快, 说明疏水结构在酸性溶液中破坏更易遭到破坏, 这可能是由于 H<sup>+</sup> 比 OH<sup>-</sup> 更容易吸附在特殊浸润性表面结构上<sup>[33]</sup>。总体来看, 特殊浸润性表面具有耐碱耐盐性。

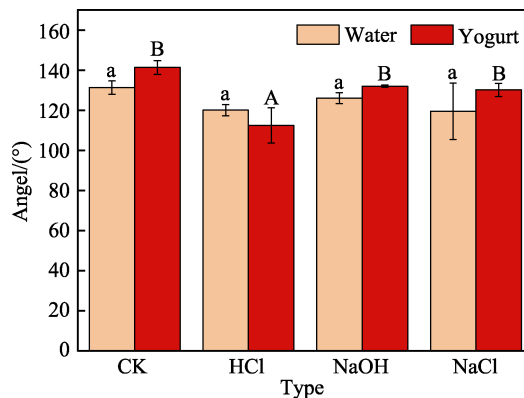


图 8 酸碱盐对特殊浸润性表面接触角的影响结果 (相同的小写字母代表特殊浸润性表面经过酸碱盐试验后, 对水接触角无显著性影响 ( $P > 0.05$ ); 相同的大写字母代表特殊浸润性表面经过酸碱盐试验后, 对酸奶接触角无显著性影响 ( $P > 0.05$ ))

Fig. 8 Effects of acid, alkali and salt on special wettability surfaces (The same lowercase letter represents that the special wettability surface after acid, alkali and salt test, has no significant effect on the contact angle of water ( $P > 0.05$ ); the same capital letter represents that the special wettability surface after acid, alkali and salt test has no significant effect on the contact angle of yogurt ( $P > 0.05$ ))

## 2.6 自清洁性能测试

特殊浸润性表面的自清洁测试结果见图 9。由图 9 可以看出, 当将甲基蓝粉和邻苯二酚紫粉末模拟污垢放置在黏有特殊浸润性表面的倾斜载玻片上时, 经过 2 次水滴冲洗会迅速从表面滚落并将甲基蓝粉末和邻苯二酚紫粉末带走直至冲洗到载玻片底部, 留下干净的特殊浸润性表面, 说明特殊浸润性表面有着良好的自清洁性能。

## 2.7 抗污性能测试

特殊浸润性表面的抗污性能测试结果见图 10。由图 10 可知, 将特殊浸润性表面完全浸润甲基蓝溶液中, 浸润 30 s 后, 抽出特殊浸润性表面时, 可以观察到表面不带有蓝色溶液, 同样将样品浸泡 2、5、10 min 后表面仍保持干净并未被润湿污染 (与浸润 30 s 结果相同, 因此未标示相关图片), 证明特殊浸润性表面有良好的抗污性能。

## 2.8 酸奶残留量

特殊浸润性表面对酸奶残留量的影响如图 11 所示。由图 11 可知, 酸奶在特殊浸润性表面的残留量



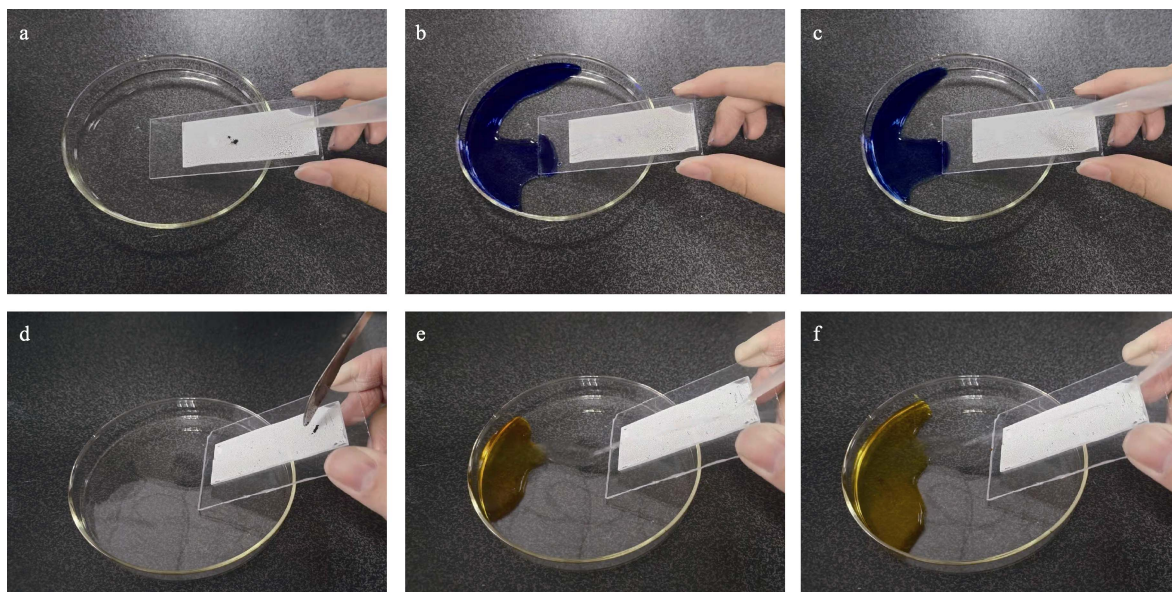
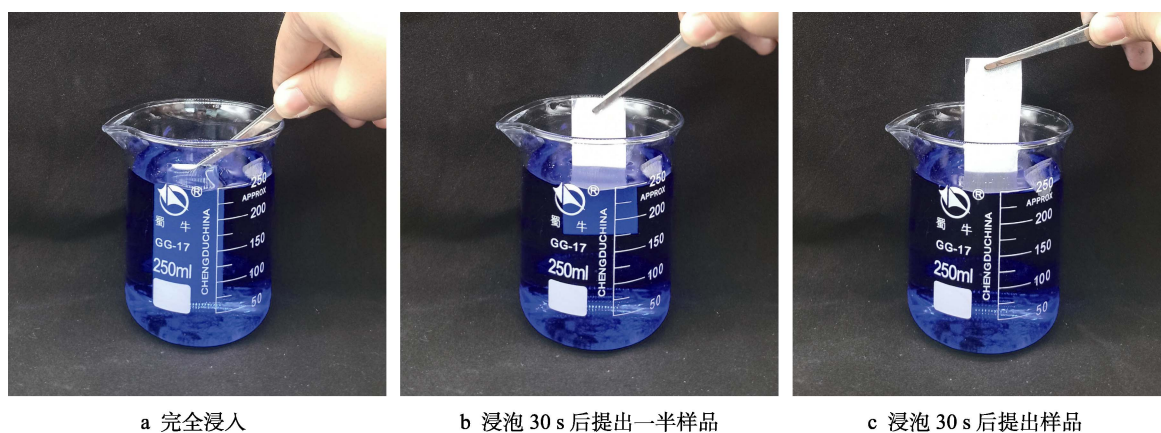


图9 特殊浸润性表面的自清洁测试  
Fig.9 Self-cleaning test of a specially wettability surface



a 完全浸入

b 浸泡 30 s 后提出一半样品

c 浸泡 30 s 后提出样品

图10 特殊浸润性表面浸泡 30 s 的抗污性能结果

Fig.10 Dirt resistance of a specially wettability surface after dipping 30 s: a) dipping completely; b) pull up half of the sample after dipping 30 s; c) pull up the sample after dipping 30 s

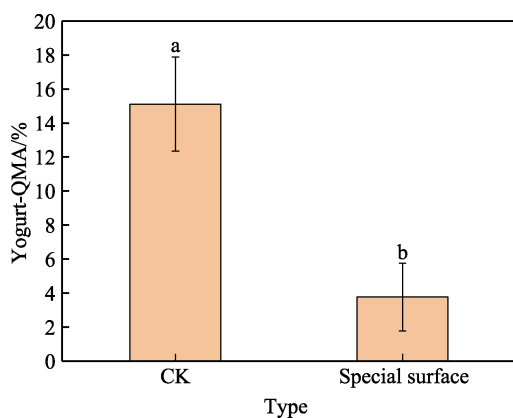


图11 特殊浸润性表面对酸奶残留量的影响  
(相同的小写字母代表特殊浸润性表面对酸奶残留量有显著性影响)

Fig. 11 Effect of special wettability surface on yogurt residue (The same lowercase letters indicate that special wettability surfaces have a significant effect on yogurt residue)

为 $(3.77 \pm 1.99)\%$ , 原始 PS 基材的残留量 $(15.12 \pm 2.77)\%$ , 相比之下, 特殊浸润性表面的残留量显著低于原始 PS 基材的残留量 ( $P < 0.05$ )。这说明酸奶在特殊浸润性表面上的附着力变小, 能有效地减少酸奶与表面间的黏附性, 表明表面的防黏性能较好。

### 3 结论

本研究分别考察了棕榈蜡、二氧化硅和羧甲基纤维素钠的添加量对表面液体浸润性的影响, 构建了一种特殊浸润性表面。结果显示, 当 CW 添加量为 3 g、 $\text{SiO}_2$  添加量为 0.9 g、CMC-Na 添加量 0.6 g 时, 涂层表面对酸奶的接触角为 $(141.32 \pm 5.43)^\circ$ , 滚动角为 $(7.51 \pm 2.86)^\circ$ , 酸奶残留量为 $(3.77 \pm 1.99)\%$ 。另外, 酸奶成分对特殊浸润性表面润湿性的影响, 也是提高酸奶在特殊浸润性表面上滚动性需要探索的一个方向。总的来说, 该特殊浸润性表面的防黏附性能好, 可以

用于酸奶的包装, 抑制酸奶的黏附, 并为液体黏性流体的包装改善提供理论依据。

# 参考文献:

- [1] FRABETTI A C C, MORAES J O, JURY V, et al. Adhesion of Food on Surfaces: Theory, Measurements, and Main Trends to Reduce it Prior to Industrial Drying[J]. Food Engineering Reviews, 2021, 13(4): 884-901.
- [2] 侯彩云, 郭秀兰, 彭家宣, 等. 芦丁对低脂酸奶品质和抗氧化能力的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 37-41. HOU Cai-yun, GUO Xiu-lan, PENG Jia-xuan, et al. Effect of Supplementing Rutin on Quality and Antioxidant Capacity of Low-Fat Yoghurt[J]. Food & Machinery, 2019, 35(4): 37-41.
- [3] AGGARWAL A, SCHMID M, PATEL M K, et al. Function-Driven Investigation of Non-Renewable Energy Use and Greenhouse Gas Emissions for Material Selection in Food Packaging Applications: Case Study of Yoghurt Packaging[J]. Procedia CIRP, 2018, 69: 728-733.
- [4] 何庆迪, 蔡青青, 史立平, 等. 自清洁涂料的技术发展[J]. 涂料技术与文摘, 2012, 33(7): 30-34. HE Qing-di, CAI Qing-qing, SHI Li-ping, et al. Progress in Self-Cleaning Coatings[J]. Coatings Technology & Abstracts, 2012, 33(7): 30-34.
- [5] WANG Da-heng, HUANG Jin-xia, GUO Zhi-guang, et al. Durable Mixed Edible Wax Coating with Stretching Superhydrophobicity[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(3): 1495-1499.
- [6] WANG Wei, LOCKWOOD K, BOYD L M, et al. Superhydrophobic Coatings with Edible Materials[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(29): 18664-18668.
- [7] LI Yao, BI Jing-ran, WANG Si-qi, et al. Bio-Inspired Edible Superhydrophobic Interface for Reducing Residual Liquid Food[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(9): 2143-2150.
- [8] ZHANG Yi-wen, BI Jing-ran, WANG Si-qi, et al. Functional Food Packaging for Reducing Residual Liquid Food: Thermo-Resistant Edible Super-Hydrophobic Coating from Coffee and Beeswax[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 533: 742-749.
- [9] WANG Peng, QIAN Xue-ren, SHEN Jing. Superhydrophobic Coatings with Edible Biowaxes for Reducing or Eliminating Liquid Residues of Foods and Drinks in Containers[J]. BioResources, 2017, 13(1): 1-2.
- [10] LIU Bing-ying, XUE Chao-hua, AN Qiu-feng, et al. Fabrication of Superhydrophobic Coatings with Edible Materials for Super-Repelling Non-Newtonian Liquid Foods[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 371: 833-841.
- [11] ZHAO Xia, HU Tao, ZHANG Jun-ping. Superhydrophobic Coatings with High Repellency to Daily Consumed Liquid Foods Based on Food Grade Waxes[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, 515: 255-263.
- [12] ZHANG Chuan, KALULU M, SUN Si, et al. Environmentally Safe, Durable and Transparent Superhydrophobic Coating Prepared by One-Step Spraying[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 570: 147-155.
- [13] WEI Cun-qian, TANG Yong-qiang, ZHANG Guang-fa, et al. Facile Fabrication of Highly Omniphobic and Self-Cleaning Surfaces Based on Water Mediated Fluorinated Nanosilica Aggregation[J]. RSC Advances, 2016, 6(78): 74340-74348.
- [14] MATES J E, IBRAHIM R, VERA A, et al. Environmentally-Safe and Transparent Superhydrophobic Coatings[J]. Green Chemistry, 2016, 18(7): 2185-2192.
- [15] OGIHARA H, XIE Jing, SAJI T. Factors Determining Wettability of Superhydrophobic Paper Prepared by Spraying Nanoparticle Suspensions[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2013, 434: 35-41.
- [16] WANG Cheng-yu, PIAO Cheng, LUCAS C. Synthesis and Characterization of Superhydrophobic Wood Surfaces[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 119(3): 1667-1672.
- [17] QIAN Bai-tai, SHEN Zi-qiu. Fabrication of Superhydrophobic Surfaces by Dislocation-Selective Chemical Etching on Aluminum, Copper, and Zinc Substrates[J]. Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2005, 21(20): 9007-9009.
- [18] TAVANA H, AMIRFAZLI A, NEUMANN A W. Fabrication of Superhydrophobic Surfaces of N-Hexatriacontane[J]. Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2006, 22(13): 5556-5559.
- [19] PARK S H, LEE Song min, LIM H S, et al. Robust Superhydrophobic Mats Based on Electrospun Crystalline Nanofibers Combined with a Silane Precursor[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2010, 2(3): 658-662.
- [20] BOINOVICH L B, DOMANTOVSKIY A G, EMELYANENKO A M, et al. Femtosecond Laser Treatment for the Design of Electro-Insulating Superhydrophobic Coatings with Enhanced Wear Resistance on Glass[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(3): 2080-2085.
- [21] 邢敏, 雷西萍, 关晓琳, 等. 铝合金超疏水表面的构建及其稳定性与自清洁性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 152-161. XING Min, LEI Xi-ping, GUAN Xiao-lin, et al. Construction of Superhydrophobic Surface of Aluminum Alloy and Its Stability and Self-Cleaning Performance[J]. Surface Technology, 2021, 50(9): 152-161.
- [22] 袁明娟. 多功能超浸润材料的制备及性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019. YUAN Ming-juan. Study on Fabrication and Performances of the Functional Superwetting Materials[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [23] 王超楠, 罗胜耘, 程维维, 等. 柔性 ZnO/PI/PET 复合薄膜的制备工艺及其阻隔性能研究[J]. 包装工程, 2020, 41(19): 90-98. WANG Chao-nan, LUO Sheng-yun, CHENG Wei-wei, et

- al. Preparation of Flexibility ZnO/PI Composite Film and Its Barrier Performance[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(19): 90-98.
- [24] 曹镇君. 丙烯酸树脂超疏水涂层的制备及其抗生物黏附性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
- CAO Zhen-jun. Preparation and Anti-Bioadhesion Properties of Acrylic Resin Superhydrophobic Coating[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019.
- [25] CHEN Chen-wei, CHEN You-ji, XIE Jing, et al. Effects of Montmorillonite on the Properties of Cross-Linked Poly(vinyl alcohol)/Boric Acid Films[J]. Progress in Organic Coatings, 2017, 112: 66-74.
- [26] XUE Chao-hua, ZHAO Ling-ling, GUO Xiao-jing, et al. Mechanically Durable Superhydrophobic Surfaces by Binding Polystyrene Nanoparticles on Fibers with Aluminum Phosphate Followed by Hydrophobization[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 396: 125231.
- [27] WANG Guang-fei, LI An-ling, LI Kang-shuai, et al. A Fluorine-Free Superhydrophobic Silicone Rubber Surface Has Excellent Self-Cleaning and Bouncing Properties[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 588: 175-183.
- [28] 韦任轩, 薛朝华. 多孔结构耐磨超疏水薄膜的制备及性能[J]. 精细化工, 2021, 38(5): 914-919.
- WEI Ren-xuan, XUE Chao-hua. Preparation and Properties of Wear-Resistant Superhydrophobic Films with Porous Structure[J]. Fine Chemicals, 2021, 38(5): 914-919.
- [29] 隋越, 杨福馨, 程龙, 等. 聚四氟乙烯/硅油改性聚丙烯防黏包装材料的制备以及性能分析[J]. 功能材料, 2019, 50(9): 9186-9191, 9196.
- SUI Yue, YANG Fu-xin, CHENG Long, et al. Preparation and Performance Study of Polytetrafluoroethylene/Silicone Oil Modified Polypropylene Anti-Adhesive Packaging Materials[J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(9): 9186-9191, 9196.
- [30] ZHANG W, LU Peng, QIAN Li-ying, et al. Fabrication of Superhydrophobic Paper Surface via Wax Mixture Coating[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 250: 431-436.
- [31] 余光华, 赵启航, 黄婵娟, 等. 硼酸改性棕榈蜡乳液微球在纤维素膜上的自组装[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(3): 141-147.
- YU Guang-hua, ZHAO Qi-hang, HUANG Chan-juan, et al. Self-Assembly of Carnauba Wax Latex Microspheres Modified by Boric Acid on Cellulose Membrane[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(3): 141-147.
- [32] 张恒, 宋雪, 李鹏飞, 等. 羧甲基纤维素钠为稳定剂的无皂 Pickering 丙烯酸酯乳液表面施胶剂的合成[J]. 造纸科学与技术, 2016, 35(5): 28-33.
- ZHANG Heng, SONG Xue, LI Peng-fei, et al. Synthesis of Soap Free Pickering Acrylate Emulsion with Sodium Carboxymethyl Cellulose as Stabilizing Agent[J]. Paper Science & Technology, 2016, 35(5): 28-33.
- [33] FAN Hai-feng, GUO Zhi-guang. Robust Multi-Functional Slippery Surface with Hollow ZnO Nanotube Structures[J]. News of Science, 2020, 109: 3409.

责任编辑: 万长清

(上接第 287 页)

- [20] 袁俊杰, 郭无极, 王锦涛. 基于流固耦合的复杂血管内血液动力学数值模拟及血管支架有限元分析[J]. 装备制造技术, 2018(9): 12-20.
- YUAN Jun-jie, GUO Wu-ji, WANG Jin-tao. Kinetic Numerical Simulation of Complex Blood Vessel and Finite Element Analysis of Blood Vessel Stent Based on Fluid-Solid Coupling[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(9): 12-20.
- [21] 朱诗文. 血管支架表面织构设计及其血流动力学仿真分析[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019: 1-65.
- ZHU Shi-wen. Surface Texture Design and Hemodynamic Simulation Analysis of Vascular Stent[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2019: 1-65.
- [22] 胡坤, 胡婷婷, 马海峰. ANSYS Fluent 实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019: 314.
- HU Kun, HU Ting-ting, MA Hai-feng. ANSYS Fluent Example Detailed Explanation[M]. Beijing: China Machine Press, 2019: 314.
- [23] 余亚杰, 王妍, 许松林. 血管中血液和血栓两相流动的 CFD 模拟[J]. 高校化学工程学报, 2015, 29(4): 992-996.
- YU Ya-jie, WANG Yan, XU Song-lin. CFD Simulation of the Two-Phase Flow of Blood and Thrombus Flow in Blood Vessels[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2015, 29(4): 992-996.
- [24] 陈佳, 王得水, 谷凯云, 等. 人工心脏泵辅助对左心室血流动力学影响的数值研究[J]. 北京生物医学工程, 2015, 34(4): 331-339.
- CHEN Jia, WANG De-shui, GU Kai-yun, et al. Numerical Research of the Artificial Heart Blood Pump's Effect on Left Ventricular Hemodynamics[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2015, 34(4): 331-339.
- [25] 刘芮. 血液流动状态下动脉粥样硬化血管的流固耦合分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2016: 1-77.
- LIU Rui. Fluid Solid Coupling Analysis of Atherosclerotic Vessels under the Blood Flow State[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016: 1-77.
- [26] 汪志远, 马建敏. 鲨鱼皮微沟槽结构减阻计算分析[J]. 力学季刊, 2017, 38(1): 160-168.
- WANG Zhi-yuan, MA Jian-min. Calculation and Analysis on Drag Reduction of Shark's Skin Tiny Groove Structure[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2017, 38(1): 160-168.
- [27] 常青林. 平行板间边界层流体速度计算及差异分析[J]. 中国海上油气, 2014, 26(1): 109-113.
- CHANG Qing-lin. Fluid Velocity Calculation in Boundary Layer and Difference Analysis between Two Parallel Plates[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(1): 109-113.

责任编辑: 彭颖