

# 使用温度对特氟龙食品接触用不粘涂层 摩擦学性能的影响

吕显成<sup>1</sup>, 孙航<sup>2</sup>, 曹磊<sup>1</sup>, 秦浩峰<sup>1</sup>, 万勇<sup>1</sup>, 高建国<sup>3</sup>

(1.青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520; 2.青岛市第九人民医院, 山东 青岛 266001; 3.山东出入境检验检疫局检验检疫技术中心, 山东 青岛 266001)

**摘要:** **目的** 模拟日常使用情况, 考察使用温度对食品接触用特氟龙不粘涂层表面特性及摩擦学性能的影响。**方法** 利用马弗炉, 在大气环境下, 对特氟龙不粘涂层在不同温度下加热处理 30 min。采用扫描电子显微镜、Raman 光谱仪、接触角测量仪、摩擦磨损试验机对热处理前后涂层的结构及摩擦学性能进行测试。**结果** 当热处理温度低于 500 °C 时, 不粘涂层的表面润湿性、硬度及摩擦学性能变化不大。当热处理温度达到 550 °C 时, 涂层的表面结构发生明显的变化, 部分涂层从底材剥落, 同时观察到涂层中含氟树脂已完全分解。此时涂层的表面对去离子水和橄榄油的接触角分别为 10° 和 12°, 表现为明显的亲水和亲油性能, 硬度仅为未处理涂层的 1/5。涂层在干摩擦条件下及去离子水介质中, 摩擦系数和磨损体积均急剧增大。**结论** 使用温度对食品接触用特氟龙不粘涂层的表面结构及摩擦学行为影响较大。

**关键词:** 特氟龙; 不粘涂层; 热处理; 润湿性; 摩擦学性能; 磨损机制

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)03-0155-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.020

## Effects of Treatment Temperature on Tribological Performance of Teflon Food Contacting Non-sticking Coating

LYU Xian-cheng<sup>1</sup>, SUN Hang<sup>2</sup>, CAO Lei<sup>1</sup>, QIN Hao-feng<sup>1</sup>, WAN Yong<sup>1</sup>, GAO Jian-guo<sup>3</sup>

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;  
2.The Ninth People's Hospital of Qingdao, Qingdao 266001, China; 3.Inspection and Quarantine Center, Shandong Exit &  
Entry Inspection and Quarantine Bureau, Qingdao 266001, China)

**ABSTRACT:** The work aims to simulate daily application to investigate the effects of temperature on the surface and tribological properties of food contacting Teflon non-sticking coating. Teflon non-sticking coatings were heated in a muffle furnace for 30 mins and their surface morphology and tribological properties before and after thermal treatment were investigated with scanning electron microscope, Raman spectrometer, contact angle measuring instrument, friction and wear

收稿日期: 2019-05-20; 修订日期: 2019-07-02

Received: 2019-05-20; Revised: 2019-07-02

基金项目: 国家自然科学基金 (51975304); 山东省重点研发计划资助项目 (2017GSF220012); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2017PEE013)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51975304), the Key Research & Development Plan of Shandong Province (2017GSF220012) and Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2017PEE013)

作者简介: 吕显成 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: LYU Xian-cheng (1993—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 万勇 (1968—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为润滑材料。邮箱: ywan2007@163.com

Corresponding author: WAN Yong (1968—), Male, Doctor, Professor, Research focus: lubricating materials. E-mail: ywan2007@163.com

引文格式: 吕显成, 孙航, 曹磊, 等. 使用温度对特氟龙食品接触用不粘涂层摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 155-161.

LYU Xian-cheng, SUN Hang, CAO Lei, et al. Effects of treatment temperature on the tribological performance of teflon food contacting non-sticking coating[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 155-161.

tester. When the thermal treatment temperature was lower than 500 °C, the surface wettability, hardness and tribological performance of the treated coatings remained unchanged. However, when the temperature was raised to 550 °C, the structure of the coating changed significantly. Parts of coatings were peeled off from the substrate. Moreover, the fluorine-containing polymer was totally decomposed. In this case, the contact angle of the treated coating for deionized water and olive oil reduced to 10° and 12° respectively, showing apparent hydrophilicity and lipophilicity. The hardness of the treated coating was only 1/5 of the untreated sample. At the same time, the friction coefficient and wear volume increased sharply under dry friction and in presence of deionized water. Thus, the application temperature is found to have a great influence on the surface structure and tribological behavior of the Teflon coating.

**KEY WORDS:** Teflon; non-sticking coatings; thermal treatment; wettability; tribological properties; wear mechanism

“民以食为天，食以安为先”，食品安全问题是最基本的民生问题，食品接触材料与食品安全休戚相关<sup>[1-3]</sup>。目前人们经常使用的食品接触材料已从不锈钢、铝合金等单一材料逐步向涂层型材料过渡，特别是不粘家用炊具的应用改变了传统食品接触材料的色泽和质感，给消费者的生活带来了巨大的方便，满足了消费者对于这类产品的多样需求<sup>[4-5]</sup>。不粘炊具与普通炊具最重要的区别在于表面涂了一层不粘涂料，目前市场上常用的特氟龙不粘炊具就是将聚四氟乙烯等含氟树脂为主要原料的涂料涂覆于铝、铜或铁等金属表面，并经过烧结得到。然而，特氟龙不粘涂层的使用也可能给消费者带来一定的安全威胁<sup>[6]</sup>。研究表明，使用温度的高低直接决定特氟龙不粘涂层的寿命及安全性。根据我国 GB 11678—89《食品容器内壁聚四氟乙烯涂料卫生标准》的规定，聚四氟乙烯涂料可作为接触非酸性食品容器的防粘涂料，但使用温度应限制在 250 °C 以下。Bradley 等人<sup>[7]</sup>的研究结果也证明了特氟龙涂层在 250 °C 下使用是安全的。也有研究发现，当使用温度超过 202 °C 时，特氟龙不粘涂层就会释放出包括全氟辛酸在内的 6 种有毒气体<sup>[8]</sup>，特别是当不粘涂层表面出现划伤时，这一过程在较低的温度下就可能发生。然而，在人们最常用煎、炒、炸、煮四种烹饪方式中，除煮菜的温度一般在 100~200 °C 之间外，煎、炒和炸制菜肴时，所需要的温度大多超过了 260 °C。特别在不当使用（如干烧）情况下，不粘涂层的破坏程度更加严重。然而，目前的研究大多仅关注特氟龙不粘涂层在高温下的分解过程及毒害物质的迁移行为<sup>[9-12]</sup>，很少涉及使用温度对涂层本身表面结构及力学性能的研究。基于此，本文模拟日常使用情况，研究了使用温度对食品接触用特氟龙不粘涂层表面结构、润湿性及摩擦学性能的影响，希望对于人们日常生活中安全使用不粘炊具提供一定的借鉴。

## 1 实验

### 1.1 涂层的制备及热处理

使用的特氟龙涂层样品由国内某品牌不粘锅生

产商直接提供，样品直径为 5.25 cm，基底材料为铸铁，表面涂覆特氟龙不粘涂层<sup>[13]</sup>。模拟日常使用情况，参照文献[8]的方法对特氟龙涂层进行加热处理。具体实验条件如下：分别使用去离子水和乙醇对特氟龙涂层各超声清洗 10 min，放入石英舟，置于马弗炉中，升温速度为 5 °C/min，到指定温度后，保温 30 min，随炉冷却至室温后，取出，密封备用。选用的处理温度分别为 200、300、400、500、550 °C，在不同温度下加热处理后，特氟龙涂层的照片如图 1 所示。

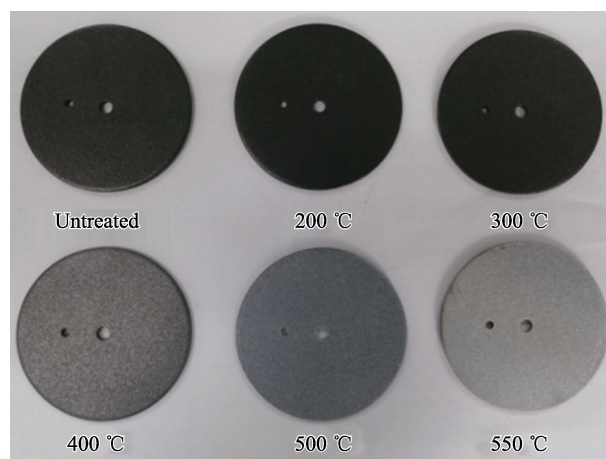


图 1 不同温度热处理后特氟龙涂层的图像  
Fig.1 Optical images of Teflon coatings after thermal treatment at different temperature

### 1.2 性能测试及组织观察

采用扫描电子显微镜（SEM，Hitachi S-3500N）对加热前后的涂层进行形貌分析。采用共聚焦拉曼光谱仪（Raman，SENTERRA）分析热处理前后涂层的微结构，测试参数：激光波长为 532 nm，扫描范围为 100~1500  $\text{cm}^{-1}$ 。采用接触角测量仪（CAM101，KSV Instruments LTD）表征涂层的润湿性能，用于测试的去离子水液滴大小为 5  $\mu\text{L}$ ，橄榄油液滴大小为 10  $\mu\text{L}$ ，在样品表面随机选取 10 个点作为每个样品的测试点，取平均值。使用便携式粗糙度仪测量涂层的粗糙度，每批次样品中选用 3 个试样，随机选取 5 个点作为测试点，取平均值。采用维氏硬度计（FUTURE-TECH，FM-700）表征涂层的硬度，加载载荷为 490 N，

保压时间为 15 s, 在样品表面随机选取 10 个点作为测试点, 取平均值。使用摩擦磨损试验机 (CETR, UMT-3) 表征涂层的摩擦磨损性能, 采用球-盘接触形式, 对偶件为直径 9.525 mm 的氮化硅陶瓷球。试验条件: 室温 (20 °C 左右), 相对湿度保持在 40%~50%, 球旋转半径为 16 mm, 旋转速度为 300 r/min, 所施加载荷为 60 N, 实验时间为 1 h。每组样品的摩擦磨损试验均重复 3 次。实验过程中, 摩擦系数值由计算机自动实时记录。使用表面轮廓仪 (Form Talysurf PGI 800) 表征磨痕一维形貌, 磨损体积由磨痕横截面积乘以磨痕长度获得。每组试验重复 3 次, 取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层的表面结构及润湿性能

在不同温度下加热处理后, 特氟龙涂层的 Raman 光谱如图 2 所示。不难看出, 对于未处理的涂层, 在 290、384、733、1370  $\text{cm}^{-1}$  处出现的拉曼峰与  $\text{CF}_2$  的不同振动模式有关<sup>[14-15]</sup>, 而 546  $\text{cm}^{-1}$  处的拉曼峰归因于含氟树脂的结构缺陷<sup>[16]</sup>。当涂层分别在 200、300、400、500 °C 加热处理 30 min 后, 涂层 Raman 光谱峰的位置没有发生明显的变化。这表明特氟龙涂层中含氟树脂分子的结构未发生明显的变化。然而, 当处理温度升至 550 °C 后, 原有含氟树脂的特征峰完全消失, 说明含氟树脂的结构受到严重破坏。

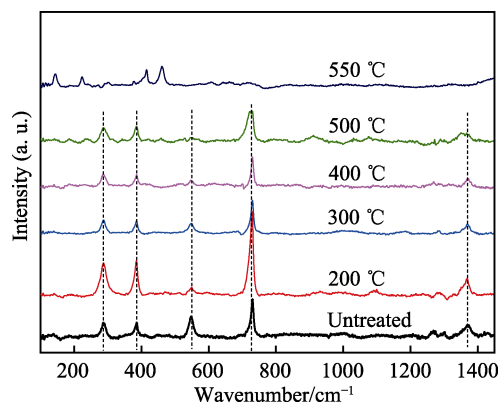


图 2 不同温度下加热处理后特氟龙涂层的 Raman 光谱  
Fig.2 Raman spectra of Teflon coatings after thermal treatment at different temperature

不同温度加热处理后, 特氟龙涂层表面的 SEM 形貌如图 3 所示。可以看出, 未处理的涂层表面致密平整 (见图 3a)。在 300 °C 下加热处理后, 涂层表面出现了少量的微裂纹 (见图 3b)。当热处理温度达到 500 °C 后, 涂层表面不再连续致密, 并出现了很多凹坑 (见图 3c)。进一步提高热处理温度到 550 °C 后, 涂层表面变得凹凸不平, 呈粉末化, 并伴有大面积的脱落 (见图 3d)。SEM 观测的现象与 Raman 光谱的结果相一致。

加热处理后, 特氟龙涂层表面结构及形貌的改变可能造成表面润湿性能的变化。本文考察了不同温度

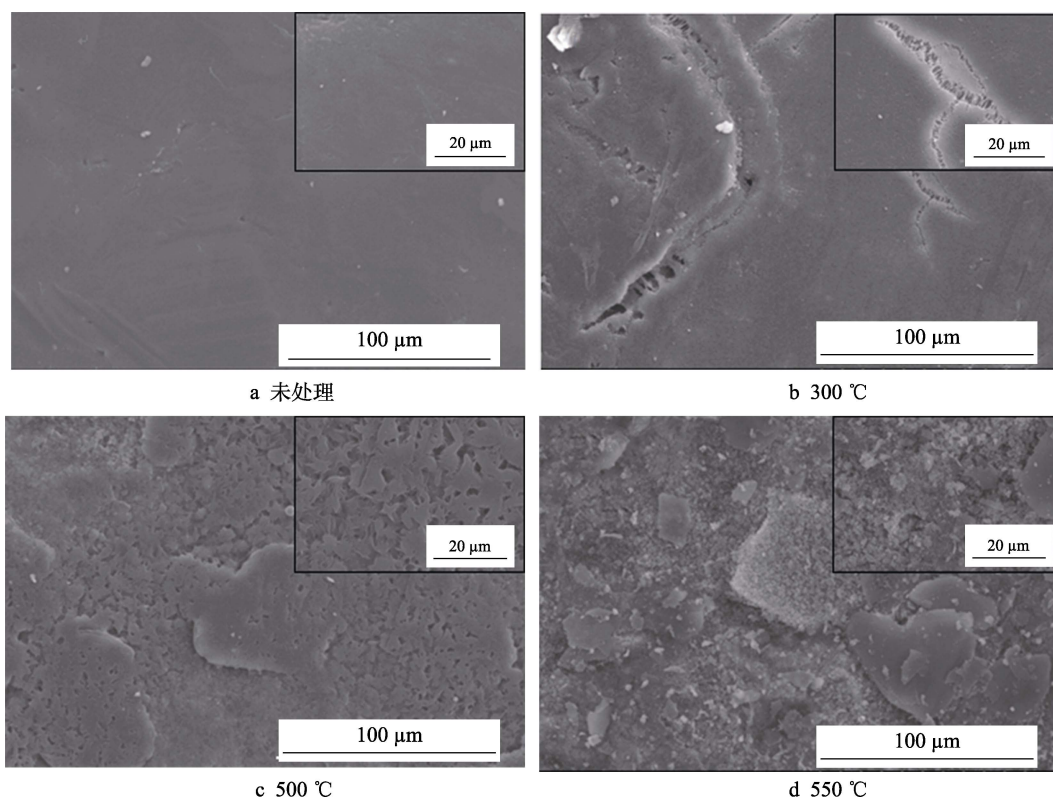


图 3 不同温度热处理后特氟龙涂层表面的 SEM 形貌

Fig.3 SEM images for Teflon coatings after thermal treatment at different temperature: a) untreated; b) 300 °C; c) 500 °C; d) 550 °C

处理后,特氟龙涂层在去离子水及橄榄油中的静态接触角,如图4所示。未处理的涂层表面对去离子水的接触角是 $115^{\circ}$ ,具有良好的疏水性能<sup>[17-18]</sup>。经过热处理后,表面静态接触角有所上升,保持在 $120^{\circ}$ 左右。当热处理温度达到 $550^{\circ}\text{C}$ 后,涂层表面对去离子水的接触角小于 $10^{\circ}$ ,水滴完全铺展在涂层表面,也就是说涂层表现为明显的超亲水性,这主要是因为在此温度下含氟树脂发生了完全分解。对于橄榄油在涂层表面润湿性能的特征也观察到同样的现象。

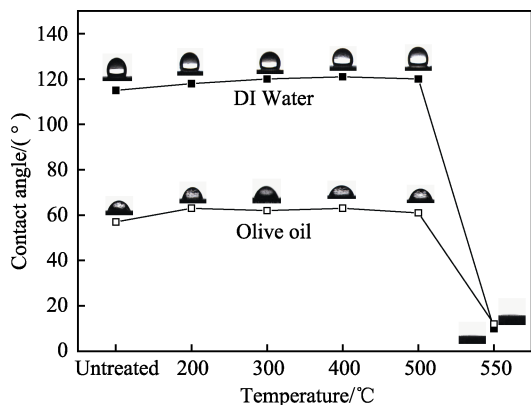


图4 不同温度下加热处理后特氟龙涂层的静态接触角  
Fig.4 Static contact angle of Teflon coatings after thermal treatment at different temperature

涂层表面粗糙度随温度的变化曲线如图5所示,可以看出,未处理涂层的表面相对光滑,涂层表面粗糙度 $R_a$ 约为 $1.2\mu\text{m}$ 。加热处理后,涂层的表面粗糙度随处理温度的升高,略有上升。当加热温度达到 $500^{\circ}\text{C}$ 时,涂层的 $R_a$ 升高到 $1.7\mu\text{m}$ 。当热处理温度进一步升高到 $550^{\circ}\text{C}$ 时,涂层的表面粗糙度 $R_a$ 跃升到 $2.5\mu\text{m}$ ,是未处理涂层表面 $R_a$ 的2倍以上。采用维氏硬度计对涂层的硬度进行了测试,如图5所示。可以看出,随加热温度的升高,涂层硬度略有下降,但与未处理的涂层相差不大。然而,当热处理温度达到 $550^{\circ}\text{C}$ 时,涂层的硬度迅速下降,仅为未处理涂层硬度的 $1/5$ 。

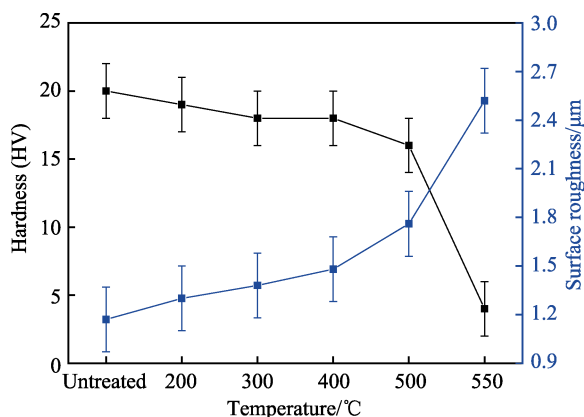
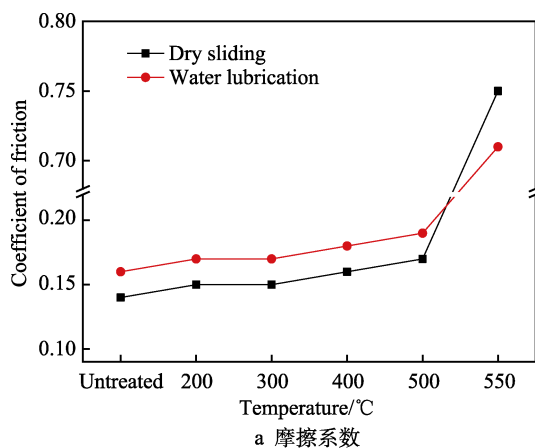


图5 不同温度下加热处理后特氟龙涂层的硬度及表面粗糙度

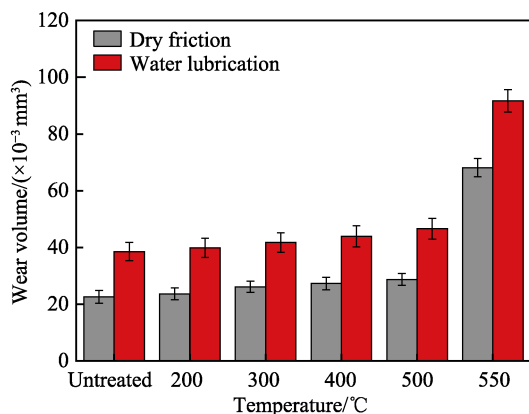
Fig.5 Hardness and surface roughness of Teflon coatings after thermal treatment at different temperature

## 2.2 摩擦学性能

利用摩擦磨损试验机,分别考察了在干摩擦条件下及在去离子水存在下特氟龙涂层的摩擦学性能,结果如图6所示。不难看出,在干摩擦条件下,未处理涂层的摩擦系数稳定在0.14。这主要是由于特氟龙涂层中,聚四氟乙烯分子本身具有自润滑性能<sup>[19-21]</sup>。对于加热处理后的涂层,随着处理温度的升高,摩擦系数略有升高,保持在0.15左右。当热处理温度达到 $550^{\circ}\text{C}$ 时,摩擦系数在摩擦开始阶段就急剧上升到0.75以上。这说明在此温度下,涂层已被完全磨穿。对摩擦结束后涂层磨痕深度和磨损体积的测量也得到了同样的结果,如图6b所示。当加热温度小于 $500^{\circ}\text{C}$ 时,与未处理的涂层相比,随热处理温度升高,涂层的磨痕深度和磨损体积略有上升。加热温度达到 $550^{\circ}\text{C}$ 时,涂层的磨损体积急剧增大,是未处理涂层的3倍以上。



a 摩擦系数



b 磨损体积

图6 在不同温度下加热处理后特氟龙涂层的摩擦学性能  
Fig.6 Tribological performance of Teflon coatings after heat treatment at different temperature: a) friction coefficient; b) wear volume

经不同温度加热处理后,涂层磨痕内部的SEM图像如图7所示。对于未处理的涂层,磨痕较轻。局部放大图显示,由于摩擦热的作用,涂层发生部分熔融和流变,磨痕表面分布着涂层在流变过程中受剪切作用而撕裂产生的裂痕和磨屑<sup>[22]</sup>。经过 $300^{\circ}\text{C}$ 热处



理后,相比未处理的涂层,磨痕的表面形貌没有较大的变化,但局部放大图表明涂层发生脆性断裂。经过 500 °C 热处理后,涂层部分区域在摩擦过程中被拉断和撕裂。当温度达到 550 °C 时,磨痕较深,且出现了明显的犁沟,说明涂层完全被磨穿。

进一步研究特氟龙涂层在去离子水介质中的摩擦学性能。从图 6a 可以看出,未处理涂层的摩擦系

数稳定在 0.16 左右,磨损体积达到  $3.85 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ 。随着热处理温度的升高,处理后涂层的摩擦系数及磨损体积略有上升。热处理温度达到 550 °C 时,摩擦系数在摩擦开始阶段就急剧上升而达到 0.70 左右,磨损体积也显著增大,约是未处理样品的 2.5 倍。在去离子水存在下,特氟龙涂层磨痕表面的 SEM 图像如图 8 所示。对于未处理的特氟龙涂层(见图 8a),

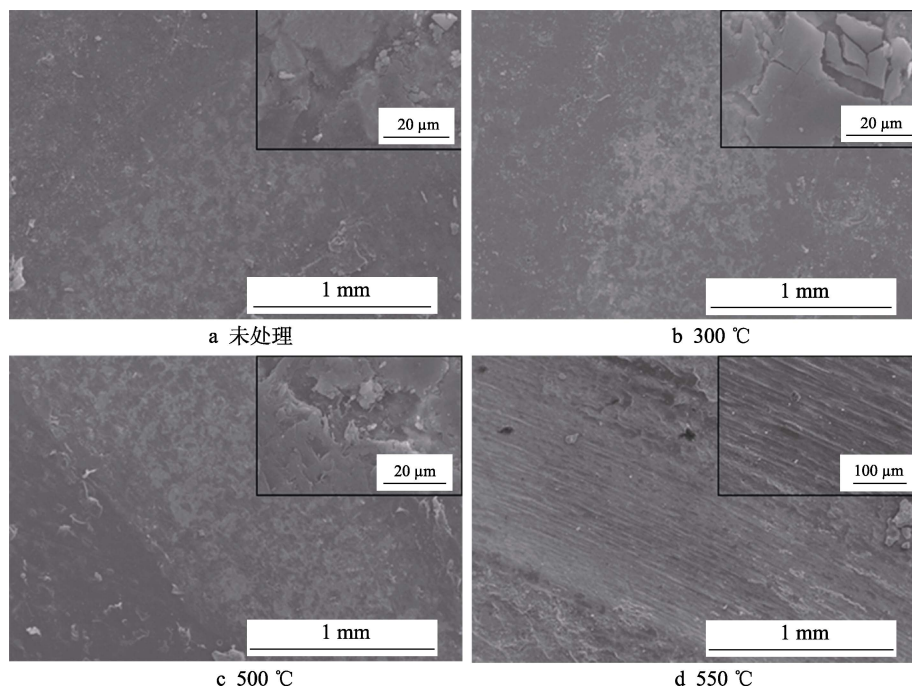


图 7 干摩擦条件下不同温度加热处理的特氟龙涂层的磨痕形貌

Fig.7 Wear scar morphologies of Teflon coatings after thermal treatment at different temperature in condition of dry friction: a) untreated; b) 300 °C; c) 500 °C; d) 550 °C

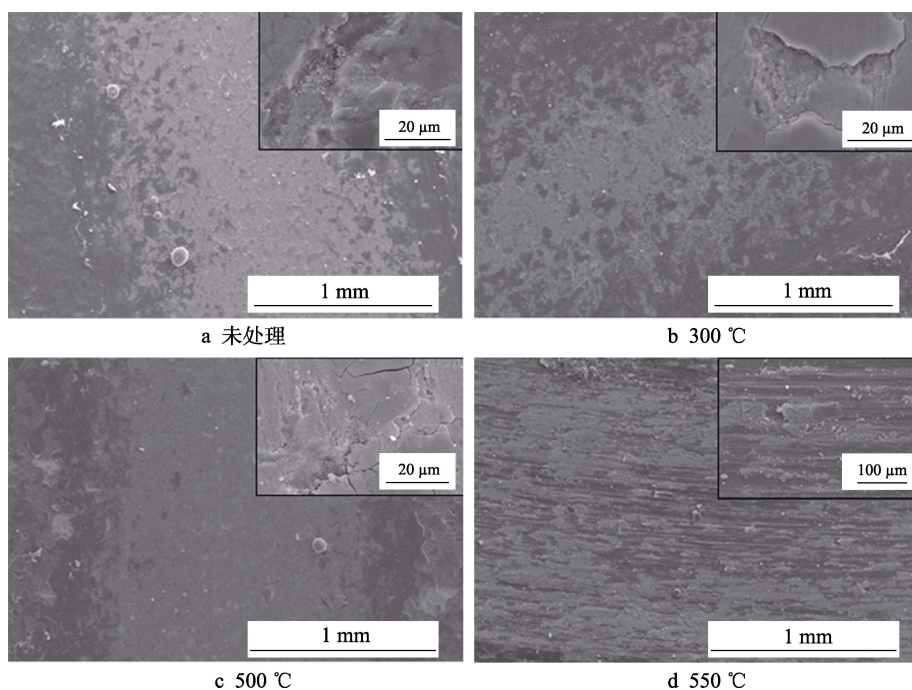


图 8 去离子水存在下不同温度热处理的特氟龙涂层的磨痕形貌

Fig.8 Wear scar morphologies of Teflon coatings after thermal treatment at different temperature in presence of DI water: a) untreated; b) 300 °C; c) 500 °C; d) 550 °C

相比于干摩擦条件下(见图7a),磨痕的宽度略有增大,磨痕表面出现了明显的疲劳磨损和脆性断裂。经过500℃热处理后,疲劳磨损加剧,并且产生很大的裂纹和裂口。热处理温度达到550℃时,特氟龙涂层经过12min摩擦实验后,表面磨痕的SEM图像如图8d所示,可以看到明显的犁沟和粘着磨损迹象,说明涂层被彻底磨穿。

值得指出的是,与干摩擦条件下相比,特氟龙涂层在去离子水介质中的摩擦学性能明显变差。这主要是因为由于水的存在,阻止了聚四氟乙烯分子在摩擦过程中向对偶球表面的转移,同时水可能通过凹坑和微裂纹进入涂层内部,加速涂层的脱落,进而增大了涂层的磨损<sup>[23-24]</sup>。

综合以上分析不难看出,在文中实验条件下,如果仅仅考虑涂层的润湿性、力学及摩擦学性能,特氟龙涂层的临界使用温度可达到500℃。然而,在实验中也发现,特氟龙涂层即使在300℃热处理30min,表面即出现少量裂纹,这可能导致涂层中的含氟化合物在使用过程中迁移到加工的食品中,危害消费者的健康<sup>[9-12]</sup>。因此在日常烹饪过程中,建议特氟龙不沾涂层的使用温度不应超过300℃。

### 3 结论

使用温度直接影响食品用特氟龙涂层的表面结构、润湿性能、力学及摩擦学性能。在加热温度小于500℃时,涂层的润湿性、硬度及摩擦学性能并没有发生明显的改变,磨损机理主要表现为磨粒磨损、疲劳磨损、脆性断裂。当热处理温度达到550℃,涂层中含氟树脂完全分解,表面结构受到严重的破坏,涂层出现大面积剥落现象。同时表面失去疏水性能,涂层硬度明显降低,无论在干摩擦条件下,还是在水介质中,摩擦系数均急剧上升,磨损加剧,磨损机制主要表现为犁沟和粘着磨损。

#### 参考文献:

- [1] SEVERIN I, DAHBI L, BERGES C, et al. Food contact materials: Strategy for quality and food safety of packaging systems[J]. *Toxicology Letters*, 2011, 205: S213.
- [2] SHANG G Q, CHEN S H, LIU J F. Comparison of food contact materials regulations at home and abroad and the reference to our country[J]. *Journal of food safety and quality*, 2016, 7(3): 1197-1202.
- [3] NOWACKA M, RYBAK K, WIKTOR A, et al. The quality and safety of food contact materials-paper and cardboard coated with paraffin emulsion[J]. *Food control*, 2018, 93: 183-190.
- [4] ROSSI S, GAI G, DE BENEDETTO R. Functional and perceptive aspects of non-stick coatings for cookware[J]. *Materials & design*, 2014, 53: 782-790.
- [5] SARANYA A, JENS A. Evaluating non-stick properties of different surface materials for contact frying[J]. *Journal of food engineering*, 2011, 105(3): 537-544.
- [6] SAJID M, ILYAS M. PTFE-coated non-stick cookware and toxicity concerns: A perspective[J]. *Environmental science and pollution research*, 2017, 24(30): 1-5.
- [7] BRADLEY E L, READ W A, CASTLE L. Investigation into the migration potential of coating materials from cookware products[J]. *Food additives and contaminants*, 2007, 24(3): 326-335.
- [8] BOUCHER M, EHMLER T J, BERMUDEZ A J. Polytetrafluoroethylene gas intoxication in broiler chickens[J]. *Avian diseases*, 2000, 44: 449-53.
- [9] 寇海娟, 茅辰, 商贵芹, 等. 聚四氟乙烯不粘炊具中毒害物质迁移行为分析[J]. *食品安全导刊*, 2017(36): 148-150.
- [10] KOU Hai-juan, MAO Chen, SHANG Gui-qin, et al. Analysis of migration behavior of toxic substances in teflon non-stick cookware[J]. *Food safety guide*, 2017(36): 148-150.
- [11] 陈会明, 郝楠, 陈伟, 等. 液相色谱-质谱法测定不粘锅特富龙涂层中全氟辛酸铵残留[J]. *分析化学*, 2006, 34(8): 1106-1108.
- [12] CHEN Hui-ming, HAO Nan, CHEN Wei, et al. Determination of ammonium perfluorooctanoate in non-stick Teflon coating by liquid chromatography-mass spectrometry[J]. *Analytical chemistry*, 2006, 34(8): 1106-1108.
- [13] 蒋海宁, 孙明星, 陈宗宏, 等. Teflon 材料及不粘锅涂层中的微量全氟辛酸(PFOA)的 GC-MS 测定研究[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2007, 46(3): 291-296.
- [14] JIANG Hai-ning, SUN Ming-xing, CHEN Zong-hong, et al. GC-MS determination of trace perfluorooctanoic acid (PFOA) in teflon materials and non-stick coatings[J]. *Journal of Fudan University (natural science)*, 2007, 46(3): 291-296.
- [15] SINCLAIR E, KIM S K, AKINLEYE H B, et al. Quantitation of gas-phase perfluoroalkyl surfactants and fluorotelomer alcohols released from nonstick cookware and microwave popcorn bags[J]. *Environmental science & technology*, 2007, 41(4): 1180-1185.
- [16] 秦浩峰, 曹磊, 高建国, 等. 基于响应面法的铁表面特氟龙涂层的使用寿命研究[J]. *表面技术*, 2017, 46(2): 133-137.
- [17] QIN Hao-feng, CAO Lei, GAO Jian-guo, et al. Service life of Teflon coating on iron surface based on response surface methodology[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(2): 133-137.
- [18] HUMMEL D O, BAUM A. *Atlas of Polymer and Plastics Analysis*[M]. Munich: Hanser Publishers, 1991.
- [19] LEGEAY G, COUDREUSE A, LEGEAIS J M, et al. AF fluoropolymer for optical use: Spectroscopic and surface energy studies; comparison with other fluoropolymers[J]. *European polymer journal*, 1998, 34(10): 1457-1465.
- [20] MIHALY J, STERKEL S, ORTNER H M, et al. FTIR and

- FT-Raman spectroscopic study on polymer based high pressure digestion vessels[J]. *Croatica chemica acta*, 2006, 79: 497-501.
- [17] WANG Y, LIU X W, ZHANG H F, et al. Fabrication of super-hydrophobic surfaces on aluminum alloy substrates by RF-sputtered polytetrafluoroethylene coatings[J]. *AIP advances*, 2014, 4(3): 3636.
- [18] JAFARI R, MENINI R, FARZANEH M. Superhydrophobic and icephobic surfaces prepared by RF-sputtered polytetrafluoroethylene coatings[J]. *Applied surface science*, 2010, 257(5): 1540-1543.
- [19] UNAL H, MIMAROGLU A, KADIGLU U, et al. Sliding friction and wear behaviour of polytetrafluoroethylene and its composites under dry conditions[J]. *Materials & design*, 2004, 25(3): 239-245.
- [20] BURRIS D L, SAWYER W G. Improved wear resistance in alumina-teflon nanocomposites with regular shaped nanoparticles[J]. *Wear*, 2006, 260(7): 915-918.
- [21] BECKFORD S, ZOU M. Wear resistant PTFE thin film enabled by a polydopamine adhesive layer[J]. *Applied surface science*, 2014, 292: 350-356.
- [22] 贾晓梅, 王黎钦, 应丽霞, 等. 特氟龙基复合材料在干摩擦和液氮介质中的摩擦磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2007, 27(2): 181-186.
- JIO Xiao-mei, WANG Li-qin, YING Li-xia, et al. Friction and wear properties of teflon matrix composites in dry friction and liquid nitrogen media[J]. *Journal of tribology*, 2007, 27(2): 181-186.
- [23] ZHOU Z R, ZHOU J. Friction and wear performance of CF/PTFE composites in water lubrication[J]. *Applied mechanics & materials*, 2013, 392: 62-67.
- [24] 汪怀远, 冯新, 史以俊, 等. 不同介质中聚四氟乙烯复合材料的摩擦磨损性能[J]. *化工学报*, 2007(4): 1053-1058.
- WANG Huai-yuan, FENG Xin, SHI Yi-jun, et al. Friction and wear properties of polytetrafluoroethylene composites in different media[J]. *Journal of chemical industry and engineering (China)*, 2007(4): 1053-1058.
- 
- (上接第 147 页)
- [7] NIE C, ZHENG D, GU L, et al. Comparison of interface mechanics characteristics of DLC coating deposited on bearing steel and ceramics[J]. *Applied surface science*, 2014, 317(30): 188-197.
- [8] MASRIPIAN N A B, OHARA K, UMEHARA N, et al. Hardness effect of DLC on tribological properties for sliding bearing under boundary lubrication condition in additive-free mineral base oil[J]. *Tribology international*, 2013, 65(3): 265-269.
- [9] GOTZMANN G, BECKMANN J, WETZEL C, et al. Electron-beam modification of DLC coatings for biomedical applications[J]. *Surface & coatings technology*, 2017, 311(15): 248-256.
- [10] GASAB M T I, UCHIYAMA M, NAKATANI T, et al. Advanced DLC coating technique on silicone-based tubular medical devices[J]. *Surface & coatings technology*, 2016, 307(15): 1084-1087.
- [11] STOCK F, ANTONI F, DIEBOLD L, et al. UV laser annealing of diamond-like carbon layers obtained by pulsed laser deposition for optical and photovoltaic applications[J]. *Applied surface science*, 2018, 464(15): 562-566.
- [12] WANG Z, WANG C, WANG Q, et al. Electrochemical corrosion behaviors of a-C:H and a-C:Nx:H control-insistent pang[J]. *Applied surface science*, 2008, 254(10): 3021-3025.
- [13] AISENBERG S, CHABOT R. Ion beam deposition of thin films of diamond-like carbon[J]. *Journal of vacuum science & technology*, 1971, 42(7): 2953-2958.
- [14] WINDOW B. Unbalanced dc magnetrons as sources of high ion fluxes[J]. *Journal of vacuum science & technology A (vacuum, surfaces, and, films)*, 1986, 4(3): 453-456.
- [15] 薛群基, 王立平. 类金刚石碳基薄膜材料[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- XUE Qun-ji, WANG Li-ping. Diamond-like carbon-based film materials[J]. Beijing: State Key Laboratory of Solid Lubrication, 2012.
- [16] AN X K, WU Z Z, LIU L I, et al. High-ion-energy and low-temperature deposition of diamond-like carbon (DLC) coatings with pulsed kV bias[J]. *Surface and coatings technology*, 2019, 365(15): 152-157.
- [17] LIU J Q, LI L J, WEI B, et al. Effect of sputtering pressure on the surface topography, structure, wettability and tribological performance of DLC films coated on rubber by magnetron sputtering[J]. *Surface and coatings technology*, 2019, 365(15): 33-40.
- [18] RÜBIG B, HEIMA D, FORSICH C, et al. Tribological behavior of thick DLC coatings under lubricated conditions[J]. *Surface and coatings technology*, 2019, 314(25): 13-17.
- [19] LI H, XU T, WANG C, et al. Tribochemical effects on the friction and wear behaviors of a-C:H and a-C films in different environment[J]. *Tribology international*, 2007, 40(1): 132-138.
- [20] DAVIS C A. A simple model for the formation of compressive stress in thin films by ion bombardment[J]. *Thin solid films*, 1993, 226(1): 30-34.
- [21] ANDERSSON J, ERCK R A, ERDEMIR A. Friction of diamond-like carbon films in different atmospheres[J]. *Wear*, 2003, 254(11): 1070-1075.