

不锈钢表面复合微结构的冰摩擦性能

弯艳玲, 王博, 奚传文, 于化东

(长春理工大学 跨尺度微纳制造教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要: **目的** 探究不锈钢表面复合微结构的冰摩擦性能。**方法** 采用纳秒光纤激光器在不锈钢表面构建类莲藕型沟槽复合结构, 并对不同润湿性、粘附性和摩擦速度下的冰摩擦性能进行了观测与分析。**结果** 微米-亚微米级复合结构是不锈钢表面超疏水高粘附的主要原因, 热处理消除了样件表面的时效性, 化学修饰实现了超疏水由高粘附性到低粘附性的转换。温度的变化改变了水滴在样件表面的接触状态。在滑动速度为 0~1 mm/s、载荷为 2 N 的条件下, 随着滑动速度的增加, 疏水性越好、粘附性越低的表面具有较小的摩擦系数, 因为摩擦热产生的水膜形成了润滑层, 使冰摩擦处于混合摩擦阶段, 降低了摩擦阻力。但过多的水膜会形成大量毛细管桥, 增大阻力。**结论** 超疏水表面由于其独特的类莲藕复合结构, 减小了材料的接触面积, 降低了毛细管桥的积聚, 从而降低了冰摩擦表面的平均摩擦系数。同时, 低粘附性降低了表面与水的粘滞性, 阻止了更多毛细管桥的形成, 是影响冰摩擦系数的另一重要因素。

关键词: 冰摩擦; 超疏水表面; 粘附性; 毛细管桥; 不锈钢

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)04-0198-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.04.022

Ice Friction Properties of Composite Microstructures on Stainless Steel Surface

WAN Yan-ling, WANG Bo, XI Chuan-wen, YU Hua-dong

(Key Laboratory of Cross-Scale Micro-Nano Manufacturing of Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

ABSTRACT: In order to explore the ice frictional properties of superhydrophobic composite structure surfaces, a nano-second laser system was used to construct a lotus-like groove composite structure on the surface of stainless steel. The properties of ice friction under different wettability, adhesion and friction speed were observed. It can be shown from the results that the micro-submicron composite structure is the main reason for super-hydrophobic high adhesion of the stainless steel surface. Heat treatment eliminates the timeliness of the sample surface, and the chemical modification realizes super-hydrophobic low adhesion. The temperature changes the contact state of the water droplets on the surface of samples. Under the condition of

收稿日期: 2019-06-14; 修订日期: 2019-08-23

Received: 2019-06-14; Revised: 2019-08-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1107403); 吉林省科技发展计划资助项目(20180101324JC); 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20190542KJ)

Fund: National Key R&D Program (2018YFB1107403), Jilin Province Science and Technology Development Plan Project (20180101324JC), Science and Technology Project of Jilin Provincial Education Department during the 13th Five-Year Plan Period of China (JJKH20190542KJ)

作者简介: 弯艳玲(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为仿生功能表面及微纳制备。邮箱: wanly@cust.edu.cn

Biography: WAN Yan-ling (1979—), Female, Ph. D., Associate professor, Research focus: biomimetic functional surface and micro-nano fabrication. E-mail: wanly@cust.edu.cn

引文格式: 弯艳玲, 王博, 奚传文, 等. 不锈钢表面复合微结构的冰摩擦性能[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 198-204.

WAN Yan-ling, WANG Bo, XI Chuan-wen, et al. Ice friction properties of composite microstructures on stainless steel surface[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 198-204.

0~1 mm/s sliding speed and 2 N load, the surface with larger sliding speed, better hydrophobicity and lower adhesion has smaller friction coefficient. This is because the water film produced by friction heat forms a lubricating layer, which makes the ice friction in the mixed friction, thus reducing the friction resistance. However, too much water film will form a lot of capillary bridge, and increase the resistance. Because of the unique lotus-like micro-structure on the surface of superhydrophobic surface, both the wetting area of the material and the accumulation of capillary bridges are reduced, thus the average friction coefficient of the ice friction surface is reduced. At the same time, the low adhesion reduces the viscosity between the surface and water and prevents the formation of more capillary bridges, which is another important factor affecting the ice friction coefficient.

KEY WORDS: ice friction; superhydrophobic surfaces; adhesion; capillary bridge; stainless steel

冰摩擦是北方冬季最常见的现象之一,作为摩擦学的一个分支,冰摩擦不仅影响人们的日常生活,而且与车辆交通、冰川运动、冬季海域的货物运输和海上破冰机的设计息息相关。此外,减少冰刀与冰面的摩擦对于速度滑冰等冰上运动也很重要^[1-2]。基于冰摩擦在各个领域中的广泛应用,许多学者对此做出了大量的研究,比如 Brett A. Marmo 等人^[3]运用低温扫描电子显微镜研究了冰摩擦后冰的形貌和磨损, Sangmyeong Kim 等人^[4]在一定滑动速度和温度下研究了表面结构以及滑动方向对冰摩擦系数的影响, Jane R. Blackford 等人^[5]研究了冰上静摩擦和动摩擦行为的规律等,这些成果为冰摩擦的研究提供了参考。在摩擦材料上,冰摩擦的研究主要集中在冰-聚合物^[6-7]、冰-混凝土^[8]、冰-橡胶^[9-10],而对金属表面的研究相对较少。金属是一种具有光泽、延展性、导电、导热等性质的物质,在冰摩擦领域具有广泛的应用,例如不锈钢被广泛应用于北极越冬的破冰船船头及船身吃水线部位和海上结构物等。铝及其合金被广泛应用于对盐敏感海岸结构物以及研究海冰的实验设备。此外,在影响冰摩擦性能的因素上,如温度、滑动速度^[4-5,7,9]、表面结构^[11]和导热性^[12]等,已经得到相对详细的研究,然而固体表面疏水性和粘附性对冰摩擦的影响研究鲜见报道。

采用纳秒激光加工技术,在不锈钢表面加工类莲藕型沟槽复合微结构,通过改变材料表面的疏水性和粘附性,进行不同疏水性、粘附性、摩擦速度下的冰摩擦试验,探索复合微结构对冰摩擦系数的影响规律,通过观测微结构冰摩擦的行为,探讨复合微结构的冰摩擦机理,对于提高极端环境下冰上作业的工作效率和安全性具有积极的作用。

1 实验

1.1 材料及表征

试验材料为 316 不锈钢,尺寸为 20 mm×20 mm×10 mm,依次使用 800#、1600#、2000#的砂纸打磨抛光,依次采用无水乙醇和去离子水超声清洗 5 min,室温下自然风干。采用纳秒光纤激光器(YLP-ST20E)进行不锈钢表面复合结构的制备,纳秒光纤激光器的

加工参数为扫描速度 200 mm/s、激光加工功率 10 W、重复脉冲次数 15 次、扫描间距 0.05 mm,加工后的样件依次采用丙酮、无水乙醇和去离子水各超声清洗 5 min,室温下风干。为改变样件表面的粘附性,采用体积比为 1:100 的三乙氧基-1H,1H,2H,2H-十三氟代正辛基硅烷与乙醇的混合溶液对样件表面进行低表面能修饰,修饰时间 2 h,然后放在温度为 100~130 ℃的烘干箱中烘烤 2 h,取出后待用。采用扫描电子显微镜(EVO MA25)对样件表面微观形貌进行观测。采用 OCA20 视频光学接触角测量仪对不锈钢表面的接触角进行测量。采用 RETC 微纳米摩擦磨损试验机进行冰摩擦试验,施力模式为恒力模式。为模拟外界环境温度,在工作台处增加制冷模块,该模块主要由数显温控器、制冷系统和半密封箱组成。制冷方式采用液氮进行环境制冷。数显温控器显示和调控试验温度。采用型号为 JJ124BC 电子精密天平测量摩擦过程中水分的质量变化,电子精密天平的分辨率为 0.1 mg。采用滤纸蘸取冰面产生的水,以蘸取前后滤纸的质量变化作为衡量指标。

1.2 方法

取适量的自来水,室温静置 30 min,倒入冰匙,放入冰箱中冷冻。冷冻后的冰块在低温环境下分别利用 1800#、2000#砂纸抛光,并将冰块表面的冰屑吹掉。在制冷环境下将冰块固定到工作台上。将待测样件装夹、紧固,通过控制手柄调整样件和冰面之间的距离。控制软件,设置相关参数,进行试验。试验温度控制在-5~0 ℃范围内。

2 结果与分析

2.1 表面形貌及润湿性

图 1 为构建后的类莲藕沟槽复合结构的扫描电子显微镜(SEM)照片。从图 1 中可以看出,加工的微结构表面排列较为规整,相邻结构间距不一,最小尺寸为 0 μm,最大尺寸为 40 μm,类莲藕沟槽复合微结构表面分布着凹坑、凸起、褶皱三种不同的微米级结构,在微米级结构的凸起上还分布着大小不等的亚微米级的凸起、颗粒,形成了超疏水结构所需的复

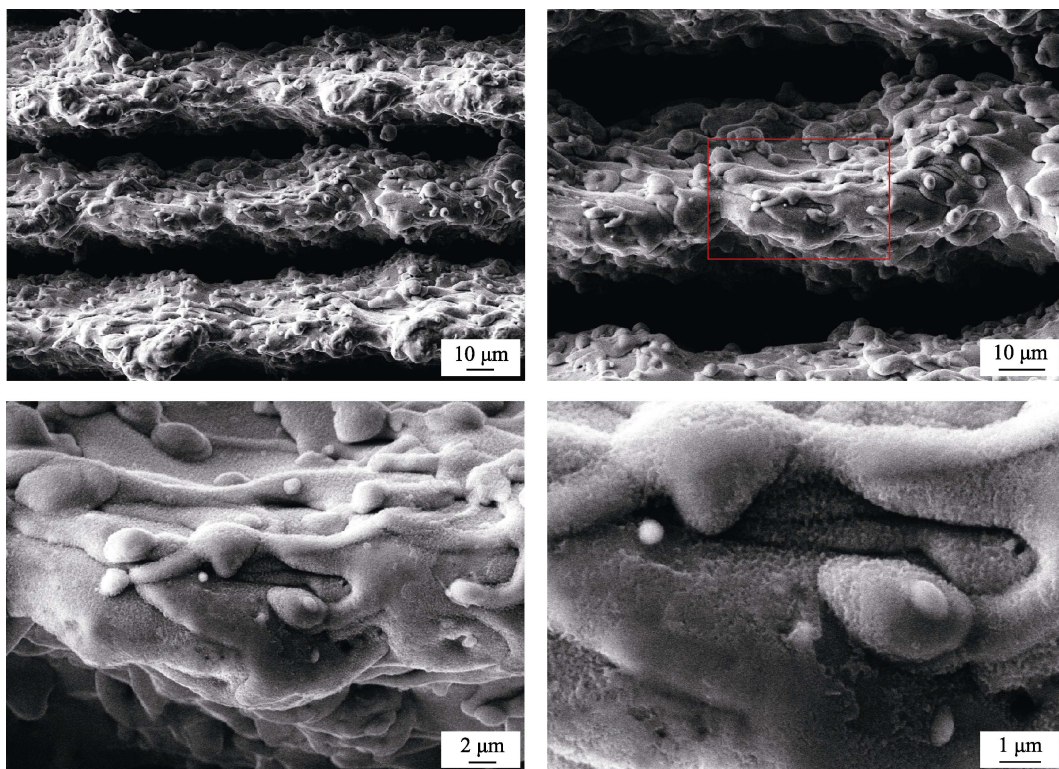


图 1 样件表面微观形貌

Fig.1 Micro-morphology on the surface of the sample

合结构。而水滴在其表面的接触角呈现时效性，加工后水滴在表面会瞬间“消失”，但样件表面接触角随着时间的增加会缓慢增大，其增加强度由大到小，15 d 内，接触角的变化幅度较大，30 d 后样件基本达到了超疏水性，如图 2 所示。为了消除样件的时间效应，加工后的样件放入 150 °C 烘干箱处理 24 h，结果显示，不锈钢表面的静态接触角由原来的 $(62\pm 2)^{\circ}$ （图 3a）提高到 $152\pm 1.3^{\circ}$ （图 3b），即刻实现了超疏水性能，消除了样件表面接触角的时效性。

冰摩擦试验的测试环境为零下，而温度的改变会直接影响液滴在材料表面的接触状态，因此，测试了液滴在不同温度下样件表面上的接触角，如图 4 所示。试验发现，液滴在金属超疏水表面的接触角随着样件

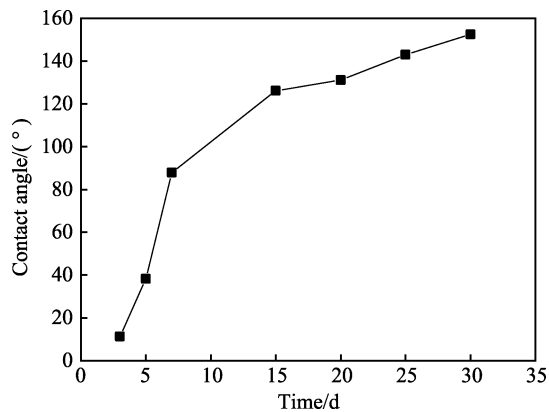


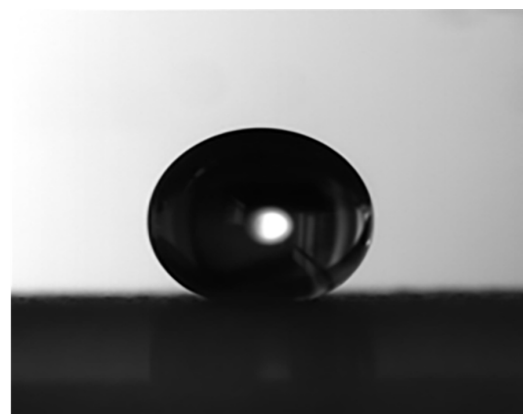
图 2 样件表面接触角变化

Fig.2 Variation of contact angle on sample surface

温度的降低而降低，但在所测温度范围内，超疏水样件表面一直保持疏水性，而光滑表面样件的接触角变化不大，基本保持在 62° 左右。由此可知，温度的变化改变了液滴在样件表面的接触状态，当温度降低



a 光滑不锈钢表面



b 热处理后不锈钢表面

图 3 液滴在不锈钢样件表面的接触角状态

Fig.3 Contact state of droplets on the surface of stainless steel samples: a) smooth stainless steel surface, b) stainless steel surface after heat treatment

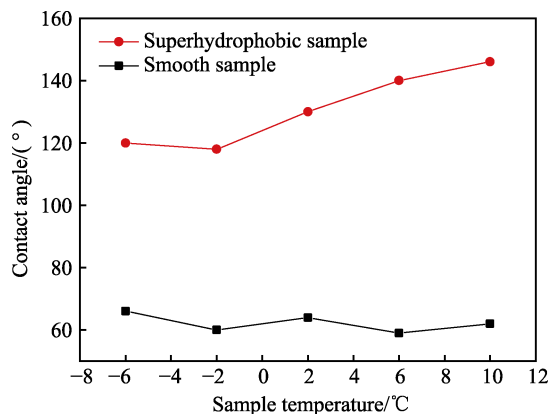
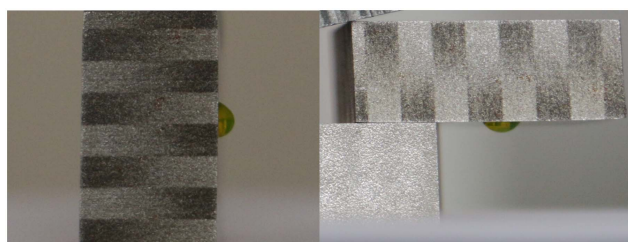


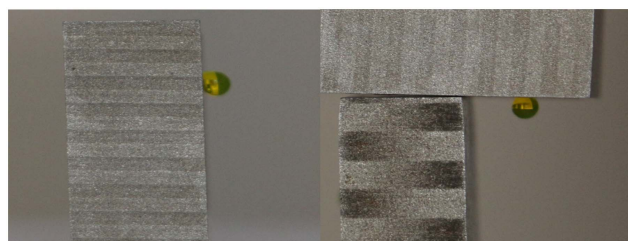
图 4 温度对液滴在样件表面的接触状态的影响
Fig.4 Effect of temperature on contact state of droplets on the surface of samples

时，部分液体浸入到微结构内部。

激光刻蚀后的表面与光滑样件一样，均表现出高粘附性，即使翻转 90° 或 180° ，液滴在其表面也不会掉落，牢牢地粘在不锈钢表面，如图 5 所示。为了研究粘附性对材料表面冰摩擦的影响，对样件进行低表面能处理，发现经化学修饰后，样件表面的接触角增加到 $(156 \pm 2)^\circ$ ，基本保持不变，而粘附性变化比较明显，滚动角减小为 6.4° 。由此可知，低表面能物质的修饰改变了样件表面的粘附性，对水滴在其表面静态接触角的影响较小，但对动态接触角的影响较大。相对于修饰的低表面能物质，微结构对不锈钢表面静态接触角起主要作用。



a 光滑表面



b 超疏水表面

图 5 高粘附性表征图

Fig.5 Chart of high adhesion: a) smooth surfaces, b) super-hydrophobic surfaces

2.2 冰摩擦性能

对光滑样件和超疏水样件进行冰摩擦性能测试，

发现光滑样件表面的摩擦系数随着时间的增加而逐渐变大，如图 6 所示，其中，载荷为 2 N，滑动速度为 0.6 mm/s，横坐标为摩擦时间 t ，单位是 s，纵坐标为摩擦系数 COF (coefficient)。而超疏水表面的摩擦系数在 50 s 内呈快速增长趋势，随着时间的增加，超疏水表面的摩擦系数变化趋于平缓，此时测得的平均摩擦系数 COF 为 0.539，而光滑样件的平均摩擦系数 COF 为 0.853，由此可知，在相同的滑动速度下，超疏水表面比光滑表面呈现出较小的摩擦系数。

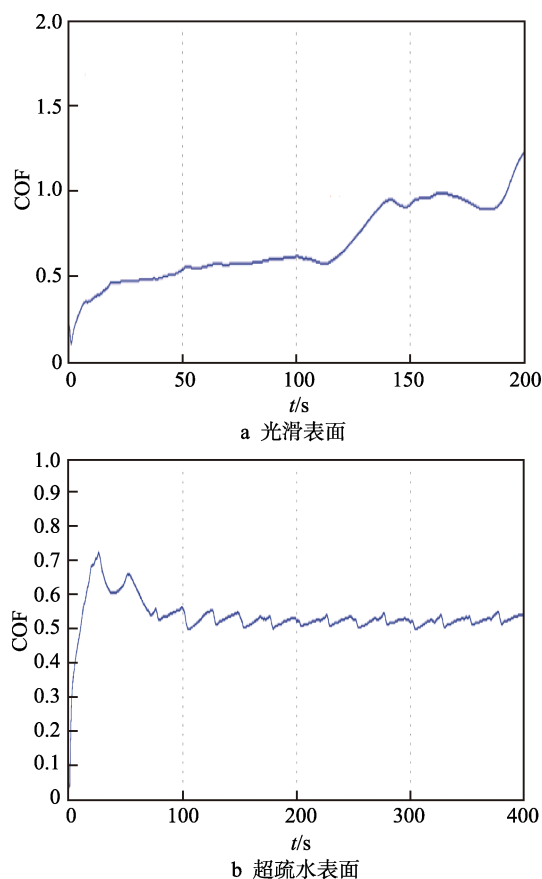


图 6 冰摩擦系数的变化曲线

Fig.6 Curve of ice friction coefficient: a) smooth surfaces, b) super-hydrophobic surfaces

图 7 为高粘附超疏水样件表面在不同滑动速度下的冰摩擦系数变化曲线，从图 7 可以看出，在滑动速度较低 ($0.2 \sim 0.4$ mm/s) 时，摩擦系数 COF 随着滑动速度的增加而减小，当滑动速度为 $0.4 \sim 0.6$ mm/s 时，冰摩擦系数变化缓慢，基本处于 0.5~0.6 的范围内，但呈增大趋势；当滑动速度逐渐增加时，冰摩擦系数逐渐降低，降低速率与低速时相近，此时，超疏水金属表面与冰摩擦的平均摩擦系数为 0.437。由此可知，当滑动速度在 $0 \sim 1$ mm/s 范围内时，较大的滑动速度能很好地降低超疏水金属表面冰摩擦系数，滑动速度在 $0.4 \sim 0.6$ mm/s 时，平均摩擦系数稍微上升，这与 A. Kietzig^[13]的研究相吻合。

图8是低粘附和高粘附超疏水样件表面在同一摩擦参数下的摩擦曲线,载荷为2 N,滑动速度为0.6 mm/s。随着摩擦时间的增加,超疏水样件表面的摩擦系数均趋于平缓,低粘附样件表面的摩擦系数要小于高粘附超疏水表面,试验测得低粘附和高粘附超疏水样件表面的平均摩擦系数分别为0.204和0.539,且 $COF_{低}=0.378COF_{高}$ 。

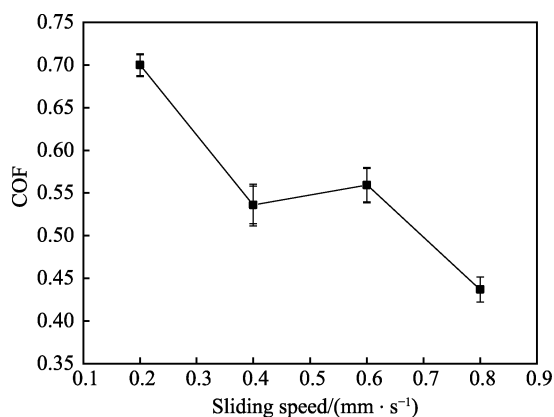


图7 不同滑动速度下超疏水表面的冰摩擦系数变化曲线
Fig.7 Line diagram of ice friction coefficient of superhydrophobic surface at different sliding speeds

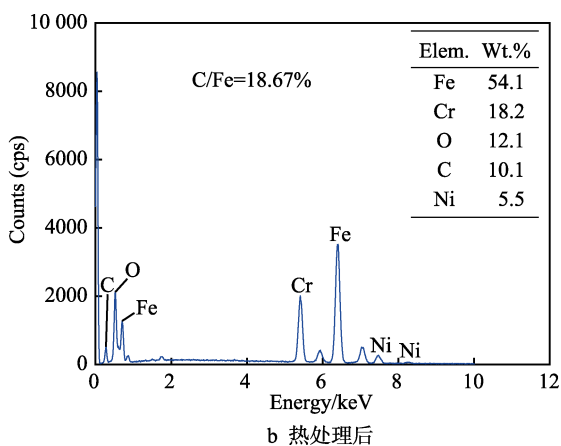
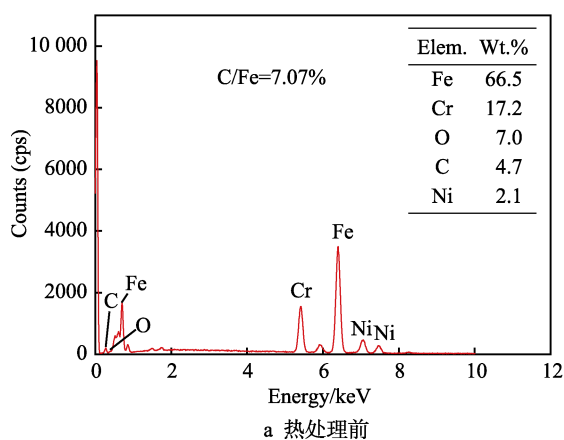


图9 热处理前后表面EDS能谱图

Fig.9 EDS energy spectrum of surface before and after heat treatment: a) before heat treatment, b) after heat treatment

但在实际应用过程中,金属表面的润湿性会受外界环境温度的影响,因为温度的改变会影响液滴在固体表面的张力,液体表面张力与温度关系的经验公式^[15]是:

$$\gamma = \gamma_0(1 - bT) \quad (1)$$

式中: T 为热力学温度; γ_0 为绝对零度时的表面张力,是一与体系有关的经验常数; b 也是一个随体系而变的经验常数。由于在临界温度 T_c 时,界面消失,表面张力为零,因此有:

$$b = \frac{1}{T_c} (\gamma_0 \neq 0) \quad (2)$$

将式(2)代入(1)可得:

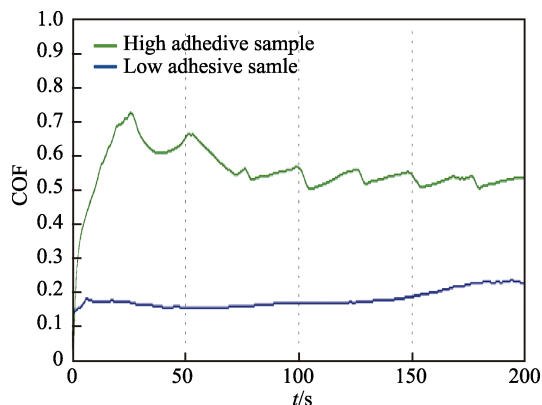


图8 超疏水样件表面的摩擦曲线
Fig.8 Comparison of friction curves on the surfaces of superhydrophobic samples

2.3 机理分析

2.3.1 表面湿润性分析

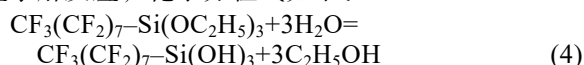
纳秒激光在不锈钢表面形成的复合结构所表现的超疏水性,一是由于表面具有微米-亚微米级复合结构,二是由于表面化学成分的改变,热处理加快了物质成分变化的进程, C 和 Fe 比率的升高是超疏水表面快速变化的主要原因^[14],热处理前后表面化学成分的变化如图9所示。

$$\gamma = \gamma_0 \left(1 - \frac{T}{T_c} \right) \quad (3)$$

由式(3)可知,随着温度的降低,液体表面张力升高,进而影响了液滴在表面的静态接触角。当改变样件温度时,由于样件放置在制冷片上进行制冷,随着温度的降低,微结构中储藏的空气在低温条件下冷凝成水滴,降低了疏水表面的静态接触角,样件温度越低,疏水效果越差,但低温样件仍然保持疏水性。而低温光滑表面由于表面无微结构,液滴在其表面的静态接触角变化不大。

经化学修饰后,微结构未变,其静态接触角未发生大的变化,但滚动角由高粘附变为 6.4° ,这是由于

本文采用了体积比为 1 : 100 的三乙氧基-1H,1H,2H,2H-十三氟代正辛基硅烷、乙醇混合溶液对样件表面进行了低表面能修饰, 氟硅烷在遇到水分子后, 会快速的发生水解反应, 化学方程式如下:



水解产物与金属材料表面的一OH 接触发生脱水缩聚反应^[16]。因此, 材料表面化学成分的改变是样件表面粘附性由高粘附性向低粘附性转变的原因。

2.3.2 冰摩擦性能分析

Pekka Oksanen^[17]认为摩擦系数的降低来源于水膜润滑作用, 为验证在冰摩擦过程中润滑水膜的产生, 在摩擦进行到 80~100 s 时, 采用滤纸吸附该层水膜, 并对其质量进行了测量, 发现产生的水膜质量约为(0.0759±0.0029) g。假设冰摩擦接触总面积由许多小的接触面积组成, 如果小面积的数量为 n , a 和 b 分别为各小接触面积的长和宽, 总面积可以假设为 $A=nab$, 则冰和材料在低温摩擦时的摩擦系数 μ 和速度 v 的关系如下:

$$\mu = n^{\frac{1}{4}} H_1^{-\frac{3}{4}} F_N^{-\frac{1}{4}} \left(\frac{1}{2v} \right)^{\frac{1}{2}} [\Delta T_1 (\lambda_1 C_1 \rho_1)^{\frac{1}{2}} + \Delta T_2 (\lambda_2 C_2 \rho_2)^{\frac{1}{2}}] \quad (5)$$

其中, 小面积的数量为 n , H_1 定义为压痕硬度, F_N 为正压力, v 为滑块速度, ΔT_1 为冰面的温差, λ_1 为冰的导热系数, C_1 为冰的比热容, ρ_1 为冰的密度, ΔT_2 为材料的温差, λ_2 为材料导热系数, C_2 为材料比热容, ρ_2 为材料密度。从式(6)中可以看出: 随着滑动速度的增大, 摩擦系数减小。

$$\mu \propto \frac{1}{\sqrt{v}} \quad (6)$$

由于光滑样件表面比较光滑, 在摩擦初期的摩擦系数较小, 随着时间的增加, 摩擦产生的热量融化冰层并产生水膜, 随着摩擦过程的持续, 水膜不断增加并产生粘附阻力, 且水膜越厚、越连续, 摩擦阻力越大(如图 6 所示), 摩擦系数逐渐增加。而超疏水表面由于表面微结构和疏水性的存在, 会使水膜处于不连续状态, 表面会形成较少的毛细管桥, 同时疏水性会阻断部分毛细管桥, 进一步减慢毛细管桥的积聚速度, 减小润湿面积。温度的降低也会影响液体在其表面的接触状态, 产生的部分水层可能浸入微结构, 减小界面的毛细力, 有效地降低了滑动摩擦系数。随着滑动速度的增加, 表面摩擦生热融化冰层形成水膜, 降低了摩擦系数, 并逐渐达到最小值, 但是随着滑动速度和滑动时间的增加, 水膜变厚, 毛细管桥的数量增多, 毛细管阻力增大, 摩擦系数会随着滑动速度的增加, 初始轻微增大, 当滑动速度继续增加时, 摩擦产生的水分有可能浸入样件表面的微结构内部, 在一定程度上又减小了毛细管桥的数量, 毛细管阻力减小, 摩擦系数又呈降低趋势(如图 7 所示)。低粘附样件表面比高粘附样件表面具有更低的平均摩擦系

数, 这可能是由于含氟材料在金属表面固化以后, 增加了表面的憎水性, 降低了表面与水的粘滞性, 阻断了更多的毛细管桥, 进一步降低了表面间的摩擦系数。

3 结论

1) 超疏水不锈钢表面由于复合微结构具有更小的平均滑动摩擦系数。

2) 滑动速度影响不锈钢表面的冰摩擦性能, 随着滑动速度的增加, 冰摩擦系数呈现先减小后缓慢增加再减小的趋势。

3) 水膜对不锈钢表面冰摩擦系数具有一定的影响, 在摩擦初期, 水膜的产生降低了滑动摩擦系数, 但随着滑动速度的增加, 摩擦系数稳定增加。当水膜达到一定厚度时, 在一定程度上又降低了滑动摩擦系数。此外, 低粘附性超疏水不锈钢表面由于含氟材料降低表面与水的粘滞性, 减少了毛细管桥的数量, 致使滑动摩擦系数降低。

参考文献:

- [1] 刘贵宝. 速滑运动冰面摩擦作用的力学机理探析[J]. 冰雪运动, 2017, 39(6): 6-9.
LIU Gui-bao. Overview of the friction mechanical effect on the ice surface in speed skating[J]. China winter sport, 2017, 39(6): 6-9.
- [2] 周骥. 速滑冰刀的参数化设计及摩擦特性分析[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
ZHOU Ji. Parametric design and friction characteristics analysis of speed skating ice skate[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [3] MARMO B A, BLACKFORD J R, JEFFREE C E. Ice friction, wear features and their dependence on sliding velocity and temperature[J]. Journal of glaciology, 2005, 51(174): 391-398.
- [4] KIM S, KANG H, KIM D, et al. Measurement of sliding friction coefficient of micro-line patterned surfaces on ice[J]. Applied physics letters, 2017, 111(21): 211601.
- [5] BLACKFORD J R, SKOUVAKLIS G, PURSER M, et al. Friction on ice: Stick and slip[J]. The Royal Society of Chemistry, 2012, 156(1): 243-254.
- [6] CHRISTOS S, PETER E, SAVVAS G H. The ice friction of polymeric substrates[J]. Tribology International, 2012, 55: 59-67.
- [7] LIELONEN K, JIANG Y, VOYER J, et al. Sliding friction of friction of hierarchically microtextured polymer surfaces on ice[J]. Cold regions science and technology, 2019, 163: 8-18.
- [8] 秦绪祥. 淡水冰与多种材料间摩擦因数的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
QIN Xu-xiang. Experimental study on friction coefficients between fresh water ice and various materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

- [9] KLAPPROTH C K, KESSEL T M, WIESE K, et al. An advanced viscous model for rubber-ice-friction[J]. *Tribology international*, 2016, 99: 169-181.
- [10] EMILIO J, CORINA S. Towards a real-time pneumatic tire performance prediction using an advanced tire-ice interface model[J]. *Journal of terra mechanics*, 2019, 81: 43-56.
- [11] BHARATHIDASAN T, KUMAR S V, BOBJI M S, et al. Effect of wettability and surface roughness on ice-adhesion strength of hydrophilic, hydrophobic and superhydrophobic surfaces[J]. *Applied surface science*, 2014, 314: 241-250.
- [12] KIETZIG A M, HATZIKIRIAKOS S G, ENGLEZOS P. Ice friction: The effect of thermal conductivity[J]. *Journal of glaciology*, 2010, 56(197): 473-479.
- [13] KIETZIG A M, MIRVAKILIA M N, KAMALB S, et al. Nanopatterned metallic surfaces: Their wettability and impact on ice friction[J]. *Journal of adhesion science and technology*, 2011, 25(12): 1293-1303.
- [14] WAN Y L, XI C W, YU H D. Fabrication of self-cleaning superhydrophobic surface on stainless steel by nanosecond laser[J]. *Materials research express*, 2018, 5(11): 115002.
- [15] 曾兆华, 杨建文. 材料化学[M]. 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [16] ZENG Zhao-hua, YANG Jian-wen. *Material chemistry*[M]. Second edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [17] 廉中旭. 金属基超双疏表面的制备及其耐用性能研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2015.
- [18] LIAN Zhong-xu. Fabrication of super amphiphobic metal surface and its study on durability properties[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2015.
- [19] OKSANEN P, KEINONEN J. The mechanism of friction of ice[J]. *Wear*, 1982, 78(3): 315-324.

(上接第 197 页)

- [7] 郝负洪, 邢永明, 杨诗婷, 等. 风沙环境下钢结构涂层的冲蚀磨损力学性能研究[J]. *应用力学学报*, 2013, 30(3): 350-355.
- HAO Yun-hong, XING Yong-ming, YANG Shi-ting, et al. The erosion-wear mechanical properties of the coating of steel structure subject to sandstorm[J]. *Chinese journal of applied mechanics*, 2013, 30(3): 350-355.
- [8] 李巾杰, 吴凤芳, 吴冰. 钛合金基体上 AlCrN 涂层的冲蚀磨损行为研究[J]. *表面技术*, 2019, 48(2): 152-158.
- LI Jin-jie, WU Feng-fang, WU Bing. Erosion wear performance of AlCrN coating on titanium alloy substrate[J]. *Surface technology*, 2019, 48(2): 152-158.
- [9] 王彦平, 龚卓, 王起才. 环氧树脂及其复合材料的固体颗粒冲蚀磨损[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(4): 652-657.
- WANG Yan-ping, GONG Zhuo, WANG Qi-cai. Solid particle erosive wear of epoxy and its composites[J]. *Journal of building materials*, 2015, 18(4): 652-657.
- [10] HARSHA A P, JHA S K. Erosive wear studies of epoxy based composites at normal incidence[J]. *Wear*, 2008, 265 (7/8): 1129-1135.
- [11] 郝负洪, 雅茹罕, 李慧, 等. 田口方法下钢化玻璃的冲蚀性能及损伤形貌[J]. *材料导报*, 2018, 32(8): 1380-1384.
- HAO Yun-hong, YA Ru-han, LI Hui, et al. Erosion performance and damage morphology of tempered glass using Taguchi orthogonal method[J]. *Materials review*, 2018, 32 (8): 1380-1384.
- [12] ISMAIL J, FAHMI Z, NAIT-ABDELAZIZ M, et al. Experimental and numerical investigations on erosion damage in glass by impact of small-sized particles[J]. *Wear*, 2011, 271(5): 817-826.
- [13] KARIM M, NAAMANE S, DELORD C, et al. Study of the surface damage of glass reflectors used in concentrated solar power plants[J]. *Energy procedia*, 2015, 69: 106-115.
- [14] 刘阳, 刘荣华, 李曙, 等. 新型 SiC 复合陶瓷的耐冲蚀性能[J]. *材料研究学报*, 2006(6): 657-665.
- LIU Yang, LIU Ron-hua, LI Shu, et al. Erosion resistant behavior of new SiC reinforced ceramic[J]. *Chinese journal of materials research*, 2006(6): 657-665.
- [15] HIDALLANA-GAMAGE H D, THAMBIRATNAM D P, PERERA N J. Failure analysis of laminated glass panels subjected to blast loads[J]. *Engineering failure analysis*, 2014, 36(1): 14-29.
- [16] 郝负洪, 李慧, 雅茹罕, 等. 气固两相流作用下工程玻璃的冲蚀性能及损伤机理研究[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(11): 3721-3727.
- HAO Yun-hong, LI Hui, YA Ru-han, et al. Erosion performance and damage mechanism of engineering glass under the action of gas-solid two-phase flow[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(11): 3721-3727.
- [17] 董刚, 张九渊. 固体粒子冲蚀磨损研究进展[J]. *材料科学与工程学报*, 2003(2): 307-312.
- DONG Gang, ZHANG Jiu-yuan. Developments of research on the solid particle erosion of materials[J]. *Journal of materials science and engineering*, 2003(2): 307-312.
- [18] 李慧. 温湿交变和紫外淋雨作用下钢化玻璃受风沙侵蚀试验研究及有限元模拟[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2018.
- LI Hui. Experimental study and finite element simulation on sand erosion of tempered glass under temperature and humidity fluctuations and ultraviolet rain[D]. Huhhot: Inner Mongolia University of Technology, 2018.
- [19] BRIAN Lawn. 脆性固体断裂力学[M]. 龚江宏译. 北京: 高等教育出版社, 2010: 208-247.
- Brian Lawn. Fracture of brittle solid[M]. GONG Jiang-hong translated. Beijing: Higher Education Press, 2010: 208-247.
- [20] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 290-291.
- WEN Shi-zhu, HUANG Ping. *Tribological principle*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 290-291.