

超双疏涂层在静电油烟机中的研究进展^{*}

王 闯¹ 刘嘉琪² 顾梁雪¹ 王锦标³ 文 峰^{1,3}

(1. 海南大学材料科学与工程学院 海口 570228;

2. 筑波大学纯科学与应用科学研究生院 筑波 305-8573 日本;

3. 重庆文理学院材料表界面科学重庆市重点实验室 重庆 402160)

摘要: 超双疏涂层在材料表面工程的研究中占据着一席之地, 其对水与油表现出极大的双疏性, 常用于防污、防腐蚀及自清洁等领域, 在传统油烟机行业中得到广泛的应用。然而对于新型静电油烟机中的特殊部位, 还少有相关的表面防护研究与综述总结。简述超双疏涂层的研究近况, 对超双疏涂层的起源以及润湿理论的发展进行系统性的梳理, 指出在 Young's 方程的理论基础上进行延伸与修正是普遍使用的研究方法, 在所得到的 Cassie-Baxter 理论模型基础上进行更细化的修正是目前理论研究的主流方向。介绍在不同金属基底制备超双疏涂层的方法, 发现涂层材料与基底之间的相互作用机理的研究相对较少, 多数研究人员停留在实用这一要求上, 没有做机理性的分析与研究。概述超双疏涂层在油烟机中不同部位的应用状况, 并对超双疏涂层在静电油烟机中静电模块的应用提出展望, 研究其在电场的作用下是否仍可保持超双疏性, 借此来探究其能否满足静电油烟机的清理要求。指出涂层与基底之间机理研究缺乏的现象, 提出在静电油烟机领域中将表面防护与结构优化相结合的方案, 为油烟机行业以及环境保护提供了新思路。

关键词: 超双疏涂层; 微纳结构; 低表面能; 金属基底; 油烟机

中图分类号: TG174; TG178

Research Progress of Superamphiphobic Coating in Electrostatic Lampblack Machine

WANG Chuang¹ LIU Jiaqi² GU Liangxue¹ WANG Jinbiao³ WEN Feng^{1,3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China;

2. Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8573, Ibaraki, Japan

3. Chongqing Key Laboratory of Materials Surface & Interface Science,

Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

Abstract: The super-amphiphobic coating occupies a place in the research of material surface engineering. It is often used in antifouling, anticorrosive and self-cleaning, etc and also has been widely used in the traditional industry lampblack machine because it shows great repellency to water and oil. However, there are few related research and summary of the surface of the protection for new type of special parts in electrostatic lampblack machine. This paper summarizes systematically the research status of superamphiphobic coating and the origin of superamphiphobic coating, and the development of the theory of wetting. It is pointed out that the extension and modification of Young's equation is a popular research method, and the more detailed modification of Cassie-Baxter model is the mainstream direction of current theoretical research. The prepared methods of superamphiphobic coating on different metal substrates are also introduced. It is found that the research on the interaction mechanism between coating materials and substrates is relatively few, and most researchers still stay on the requirement of practical without developing the mechanical analysis and research. The application status of superamphiphobic coating in different parts of the range hood is summarized, and the

^{*} 海南省重点研发(ZDYF2019206)、海南省自然科学基金(420RC525)和材料表界面科学重庆市重点实验室开放基金(KFJJ2006)资助项目。

Fund: Supported by Hainan Provincial Key Research and Development Project (ZDYF2019206), Hainan Provincial Natural Science Foundation of China (420RC525), and Chongqing Key Laboratory of Materials Surface & Interface Science(KFJJ2006).

20211009 收到初稿, 20211124 收到修改稿

application of superamphiphobic coating is prospected in the static electricity module of the range hood, and further studying whether it can still maintain the superphobic property under the action of electric field so as to explore whether it can meet the cleaning requirements of the range hood. It is indicated that there is lack of mechanism research between coating and substrate, and a scheme combining surface protection and structure optimization is proposed in the field of electrostatic range hood, which provides a new idea for the range hood industry and environmental protection.

Keywords: super-amphiphobic coating; micro-nano structure; low surface energy; metal substrate; range hood

0 前言

进入 21 世纪,人们对环境保护与身体健康的意识不断增强,对厨房的卫生要求渐渐提高,油烟中大量的有害物质让人闻之色变。为了能够有效地减少人们在厨房中受到的油烟危害,油烟机应运而生。随着科技的进步与人们对环境保护要求的提高,对油烟机进行不断的升级换代,成为热点话题。普通的油烟机通过在进烟口附近形成负压区,使油烟经前端风路、风机吸入,从后端止回阀排出。由于这是将油烟直接排入大气,将会造成大气污染,因此通过机械汇聚、吸附过滤、静电收集、洗涤沉淀等方法对油烟机升级换代以净化油烟,从而减少排放

至大气所造成的污染。

静电油烟机在传统油烟机的风机前端或者后端引入静电净化模块,通过高压尖端放电对大气进行电离,带电离子与油烟中的固液颗粒结合形成带电颗粒,在外加电场的作用下,带电颗粒向收集极移动并吸附在极板上,从而达到净化油烟的效果^[1],静电油烟机的结构与静电吸附原理如图 1 所示。但油烟固液颗粒物在极板表面容易发生黏结作用,需要定期的拆洗,这无疑在增加成本的同时也降低了效率。因此在静电净化模块的表面构筑超双疏涂层使其具备疏水疏油的特性可以进一步优化油烟机,降低油烟颗粒的黏结倾向,延长拆洗周期。文中即介绍超双疏涂层的相关理论及其在静电油烟机的研究进展。

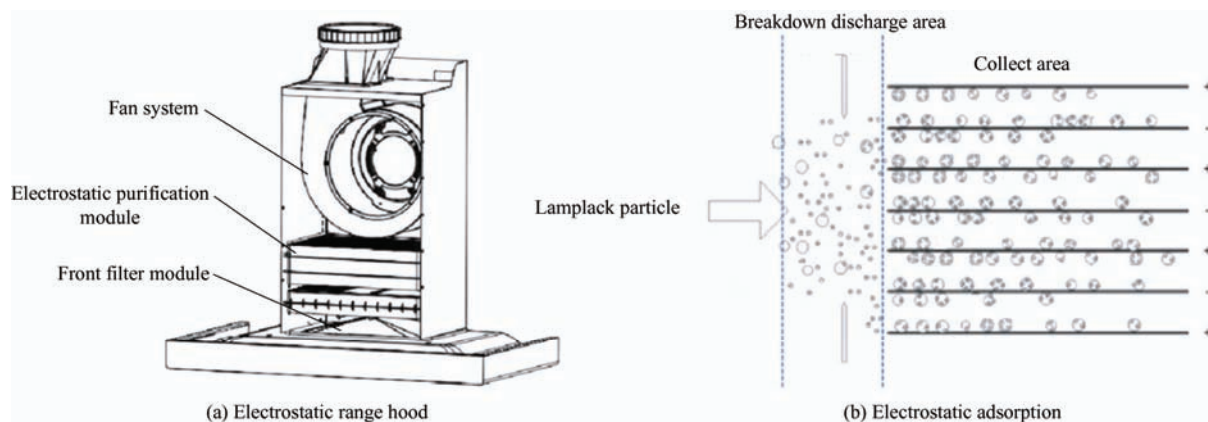


图 1 静电油烟机工作原理图^[1]

Fig. 1 Working principle diagram of electrostatic range hood^[1]

1 超双疏理论介绍

双疏是指同时对水与油表现出双疏性的一种现象,超双疏涂层即为对水与油的双疏性更加明显的一种特殊涂层。

1.1 超双疏涂层的起源

超双疏涂层的研究起源于仿生学,在自然界中,人们在荷叶、水稻叶、水黾腿部、蝉翼^[2]、部分鸟类及家禽的羽毛等表面^[3]发现了疏水现象,在枯草芽孢杆菌的细菌生物膜^[4]、叶蝉外皮^[5]以及鱼皮的

表面^[6]发现了疏油现象,甚至在跳虫的表皮发现了超双疏现象^[7]。随着现代分析测试技术的不断精进,研究人员通过对上述生物的表皮等部位进行表征,发现出现这类特殊润湿性的部位拥有独特的微纳双尺度复合的表面微观结构与低表面能的化学成分,这为超双疏涂层的研究提供了现实根据与理论基础。随着研究不断深入,逐渐发展出了一套较为完整的用来解释超双疏现象的润湿性理论。

1.2 超双疏涂层的理论发展

润湿性,又称为浸润性,是研究固体表面学中

的一个重要指标, 发展至今已有 200 多年的历史。其基础理论的研究历经从静态到动态、从光滑表面到粗糙表面的过程。这两个过程并不独立, 而是彼此交融在一起。

1.2.1 接触角、前进角、后退角、滚动角

在润湿性理论中, 接触角为最基本的表面液体铺展状态表征的指标。在此基础上, 延伸出前进角、后退角及滚动角等概念, 用来进一步描述液体在材料表面的状态, 量化其润湿性能。

人们在自然界中发现不同的液滴在相同物体表面上会呈现不同的铺展状态, 并且同一种液滴在不同的物体表面上也会呈现出铺展差异, 因此科学家定义了接触角, 即液滴在表面张力作用下达到稳定时, 在固、液、气三相交界处, 自固液界面经过液体内部到达气液界面之间的夹角。当水和油在固体

表面的接触角小于 90° 时, 称为双亲表面; 当接触角大于 90° 时, 称为双疏表面; 当接触角大于 150° 时, 即为前文所说的超双疏表面。

在表面光滑的平面上, 接触角不随少量液体的增加或减少而发生改变, 只会发生边界的扩张。在表面粗糙的平面上, 当向已稳定的液滴中滴加少量液体时, 液滴在平面上的边界不发生改变, 液面升高, 接触角会有所变大, 此时的接触角称为前进角 θ_{Adv} ; 反之, 当从已稳定的液滴中取出少量液体时, 液滴在平面上的边界不发生改变, 液面降低, 接触角会有所变小, 此时的接触角称为后退角 θ_{Rec} 。此外, 当粗糙平面倾斜一定角度时, 液滴有可能发生黏附, 此现象称为接触角滞后, 接触角滞后可以用前进角与后退角的差值进行表示, 若液滴在此斜面刚好滚落, 则斜面的倾斜角也叫做滚动角 θ_s , 如图 2 所示。

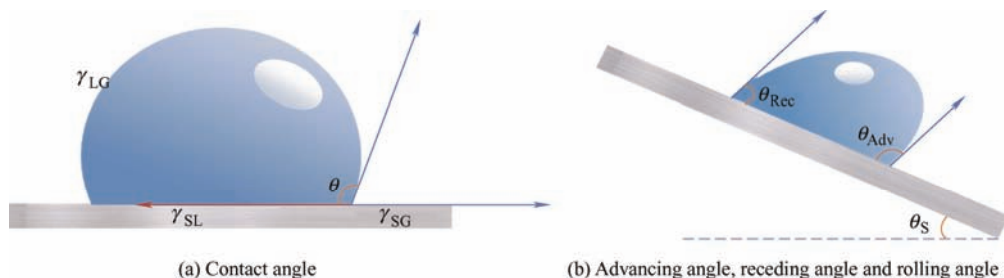


图 2 基本润湿角

Fig. 2 Basic wetting angle

1.2.2 理论模型

纵观科学的发展, 在研究某一理论时, 科学家们最初都会从理想状态条件开始, 然后联系实际, 对理想的理论进行修正。这一规律同样符合表面润湿性的研究历程。在这静态到动态、光滑到粗糙的过程中, 科学家提出了许多的相关理论及模型。

1.2.2.1 Young's 理论模型

首先是 Young's 模型, 如图 3 所示。这是由润湿性理论的先驱者 Thomas Young 在 1805 年提出的^[8]。在该理论模型中, 材料表面完全光滑、结构平整、成分均匀统一、热力学稳定, 液滴与材料表面完全接触, 其理论方程为:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta$$

式中, θ 为材料的本征接触角, γ_{SG} 为固-气之间的界面张力, γ_{SL} 为固-液之间的界面张力, γ_{LG} 为液-气之间的界面张力。当测得三相之间的界面张力时, 可以通过上式计算得出液滴在理想表面的接触角, 由于该 Young's 方程为研究材料表面润湿性的基础, 因此也称为润湿方程。

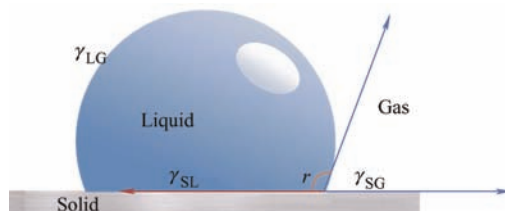


图 3 Young's 模型

Fig. 3 Young's model

1.2.2.2 Wenzel 理论模型

在自然界中, 完全光滑的材料表面并不存在, 真实的材料表面都是粗糙、不均匀的, 因此 Young's 方程并不能适用于现实。1936 年, Wenzel 通过研究材料表面粗糙度与接触角之间的关系, 以表面粗糙度这一参数对 Young's 方程进行了修正, 提出了 Wenzel 模型^[9], 如图 4 所示, 其理论方程为:

$$\cos \theta_r = r(\gamma_{SG} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LG} = r \cos \theta$$

式中, θ_r 为 Wenzel's 接触角, 又称为表观接触角, 代表着液体在粗糙材料表面的接触角, r 为材料表面粗糙度, 其值为粗糙材料表面的实际固液接触界面的面积与其投影表观面积的比值, 由于实际接触面

积一般要比表观面积大,因此 $r \geq 1$ 。由上式可知,当液体在光滑表面的本征接触角低于 90° 时,表面粗糙化会使表观接触角变小;当液体在光滑表面的本征接触角高于 90° 时,表面粗糙化会使表观接触角变大。总的来说,表面粗糙化会使亲液表面更加亲液,疏液表面更加疏液。在 Wenzel 模型中,液体浸入粗糙表面的孔洞中,液滴底部与粗糙材料表面完全接触,因此适用于表面完全润湿、组成成分单一的情况。

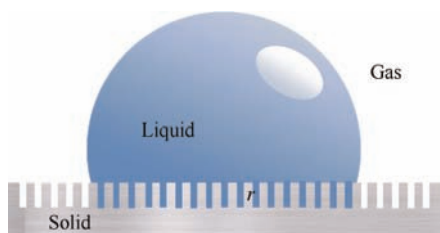


图4 Wenz 模型

Fig. 4 Wenzel model

1.2.2.3 Cassie-Baxter 理论模型

然而现实生活中的材料表面可能由不同成分的物质组成,液体在材料表面会形成非均一界面,导致 Wenzel 方程无法适用。在此背景中, Cassie 与 Baxter 对 Wenzel 模型进行了进一步的研究,于 1944 年提出了 Cassie-Baxter 理论模型^[10],如图 5 所示。该理论假设材料的粗糙表面并没有完全被液体浸润,即固液之间存在第三种物质,如空气,液体与粗糙表面的尖端接触,在凹槽处空气被捕获,形成气垫。此时将会形成固-气、固-液、气-液复合界面,在微观尺度下,液体在材料表面的两种物质上的本征接触角为 θ_1 与 θ_2 ,接触面积分别占比为 f_1 与 f_2 ,并且 $f_1 + f_2 = 1$,因此在稳定条件下有如下 Cassie-Baxter 方程:

$$\cos \theta_{CB} = f_1 (\gamma_{SG} - \gamma_{SL})_1 / \gamma_{LG} + f_2 (\gamma_{SG} - \gamma_{SL})_2 / \gamma_{LG} = f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2$$

式中, θ_{CB} 为 Cassie-Baxter 接触角,若体系为水与材料固相和空气相接触,由于水与空气的本征接触角为 180° ,即 $\theta_2 = 180^\circ$,因此体系平衡时满足:

$$\cos \theta_{CB} = f_1 \cos \theta_1 - f_2$$

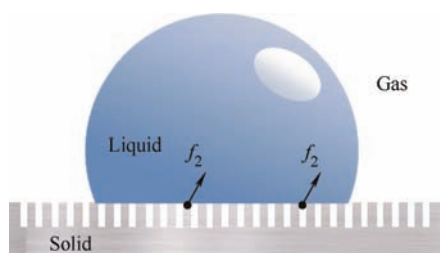


图5 Cassie-Baxter 模型

Fig. 5 Cassie-Baxter model

相较于 Wenzel 理论模型, Cassie-Baxter 理论模型可以更加贴切地描述液体与材料表面的实际接触状态。特别的,由于 Wenzel 理论模型中的液体与材料表面为完全润湿,增加了材料与液体之间的黏附力,而 Cassie-Baxter 理论模型中的液体与材料和空气同时接触,极大地降低了黏附力,使得液体在表面具有很好的动态润湿性。

1.2.2.4 Wenzel-Cassie-Baxter 润湿模型过渡状态

通过模拟材料表面的手段, JOHNSON 等^[11]对 Wenzel 理论模型和 Cassie-Baxter 理论模型进行总结,发现当材料表面的粗糙度的大小发生改变,达到某一临界值时, Wenzel 理论模型和 Cassie-Baxter 理论模型之间将会发生转变。Wenzel 理论模型中的液体充满材料表面的微观凹槽中,凹槽使得液体与材料表面的接触面积增大,从几何上放大疏液效应,导致接触角变大。当粗糙度变大时,液体将会从 Wenzel 模型转变为 Cassie-Baxter 模型,此时液体无法填满微观凹槽,会有一些空气残留在液体与材料之间,实现复合接触,如图 6 所示。此状态为亚稳态,若此亚稳态形成一定的规模,会使得 Cassie-Baxter 模型难以转变回 Wenzel 模型, Cassie-Baxter 模型会趋于稳定,通过调节表面微观形貌来减小固液接触面积所占比例,可以更容易地实现材料表面的超疏性能。

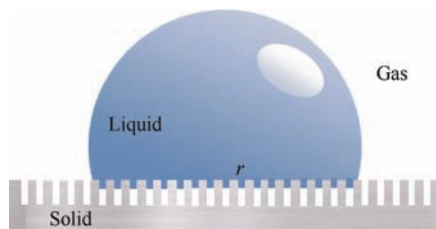


图6 复合接触状态模型

Fig. 6 Compound contact state model

1.2.2.5 特殊模型

随着制备工艺的精细化及思维的发散,一些特殊的模型也得到研究,比如“花瓣”模型^[12]、“壁虎”模型^[13]与亚稳态 Cassie 模型^[14],如图 7 所示。前两种模型中的液体为部分浸入粗糙表面的结构中,花瓣模型中的液体可以轻易脱落,壁虎模型的液体则可以很好得黏附在表面。亚稳态 Cassie 模型则是由于材料表面的结构曲率而表现出超疏性,但此模型极易被外部因素干扰,从而转变为 Wenzel 模型,导致液体容易黏附在材料表面。上述模型以 Cassie-Baxter 理论为基础,结合重入表面曲率、化学成分、粗糙纹理等理论与因素进行了解释,但没有给出具体的数学模型。这也给了人们启示,那就是在分析机理时应当完善理论推导,使其与试验现象更好地契合。

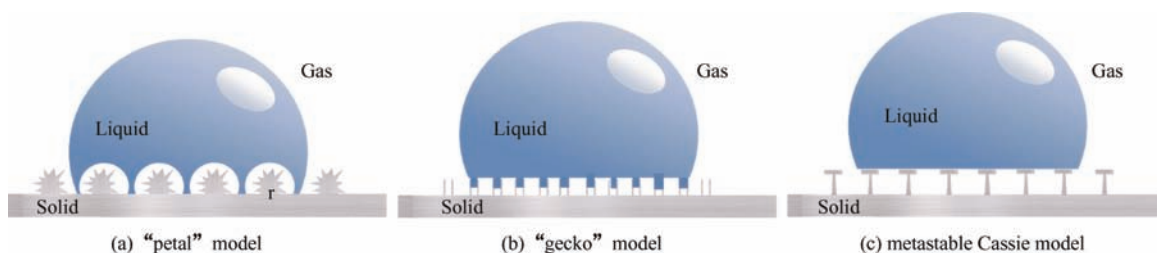


图7 特殊模型

Fig. 7 Special model

此外,还有不少研究人员针对自己的研究对象,提出更为具体的模型。

FENG 等^[15]将荷叶的层次结构与分形几何中的 Koch 曲线相结合,采用分形公式来计算粗糙度因子,并通过改变粗糙度因子,建立了一个可以适用于各种类型的疏水表面的数学模型,即:

$$\cos \theta_t = f_s (L/l)^{D-2} \cos \theta - f_v$$

WANG 等^[16]在 Cassie-Baxter 理论模型的基础上将液滴的尺寸及位置关系引入,得到了一个更为具体的数学模型,即:

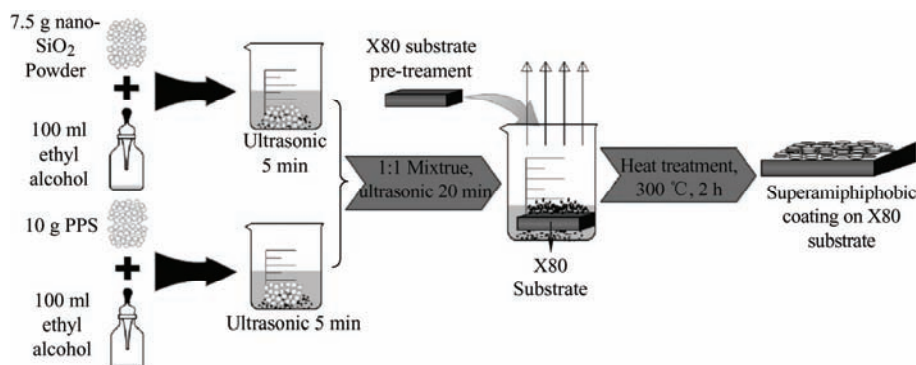
$$\cos \theta_t = \frac{\pi R^2 (\cos \theta + 1)^2}{4(R+d)^2} - 1$$

JIANG 等^[17]探讨了在 Wenzel 理论模型引入分形理论,再引申出 Cassie-Baxter 理论模型与分形理论的结合,在这些理论基础上,提出新的参数—— ϕ_s (固体的面积分数)与 ϕ_v (蒸汽的面积分数),来代替 f_s 与 f_v ,得到下式:

$$\cos \theta_t = \phi_s (L/l)^{D-2} \cos \theta - \phi_v$$

对模型进行进一步的修正,使得试验结果与理论模型更加契合。

石文等^[18]则是将粗糙的表面假设为规整的几何微凸体,以微凸尺寸与微凸间距来计算表面粗糙度与面积分数,再分别代入 Wenzel 理论模型与 Cassie-Baxter 理论模型中,探讨了微凸尺寸与微凸间距对模型的影响。

图8 SiO₂/PPS 涂层制备流程图^[21]Fig. 8 Flow chart of SiO₂/PPS coating preparation^[21]

2 不同基底的超双疏涂层制备

静电油烟机中的大部分部件由金属材料制成,部分部件由一些玻璃、塑料等非金属材料制成,因此在金属与非金属材料表面制备超双疏涂层是必须得到关注的。目前表面超双疏涂层的制备方法有很多种,主要有溶胶-凝胶法、自组合法、相分离法、聚合反应法、电纺丝法、电化学法、刻蚀法、纳米压印法、化学气相沉积法、喷涂法、浸泡提拉法等^[19-20]。这些方法广泛应用于各种金属与非金属基底的制备过程中。

2.1 金属基底

在以金属为基底的研究中,各种金属的应用广度不同,因此研究对象也有所偏重,大致可以分为钢系、铜系、铝系及其他金属。

2.1.1 钢系基底

钢铁作为目前应用最多的金属材料,在超双疏领域也得到了广泛的研究。尤其是钢铁防腐蚀的方向,已然成为研究热点。钢铁的腐蚀损耗量是巨大的,在其表面引入超双疏涂层,可以提高其抗腐蚀性能且超双疏涂层具有良好的力学稳定性^[20-24]。

郝友菡等^[21]以 X80 管道钢为基材,先将表面进行打磨,再将基材置于聚苯硫醚与二氧化硅的无水乙醇溶液中,静置、烘干后得到了具有超双疏涂层的样品,制备流程如图 8 所示,其与水 and 乙二醇的接触角分别

为 154.4° 、 156° 。经电化学测试可知,此样品在 3.5% 的 NaCl 溶液中的自腐蚀电位由 0.647 V 下降为 0.540 V , 腐蚀电流密度由 0.236 mA/cm^2 下降到 $40.2\text{ }\mu\text{A/cm}^2$, 耐电化学腐蚀性能得到了提升。

TUO 等^[22]通过激光对 304 不锈钢进行纹理处理,其表面的刻蚀痕迹由水平和垂直线组成,清洗后,将配置好的含有表面活性剂 CAPSTONE FS-61 的聚四氟乙烯的乙醇悬浮液喷涂在不锈钢基体表面,经热处理后得到超双疏涂层,如图 9 所示。对于表面张力大于 30 mN/m 的液体(如水,乙二醇,丙二醇,菜籽油,50 wt.%乙醇溶液^[23]),接触角高于 151° ,滑动角低于 18° 。由于液滴在该表面上的附着力低,样品表现出良好的防污和减阻性能。在相同速度下,超疏液性样品对水的减阻效果要好于 50 wt.%乙醇溶液。此外,随着速度增加,减阻率趋于减小。对于 50 wt.%的乙醇溶液流量,当速度为 3.9 m/s 时,减阻比为 23.6%,且具有优良的机械和化学稳定性。

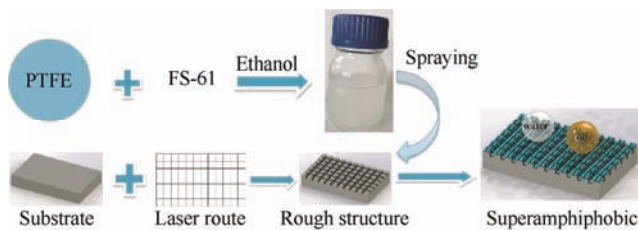


图 9 涂层制备流程图^[22]

Fig.9 Flow chart of coating preparation^[22]

2.1.2 铜系基底

铜作为一种工业有色金属,具有良好的延展性、导电性、导热性与抗磁性,广泛应用于各种家用电器、电子器件、工业机器设备中。对铜系基底表面进行处理,可以使其更好地适应工作环境,还可以使其具有抗腐蚀、耐高温等性能。

张万强等^[24]采用电化学沉积法,使用硫酸与硫酸铜的混合液为电解液,先在铜片表面构筑微纳结构,如图 10 所示,再引入全氟癸硫醇的乙醇溶液进

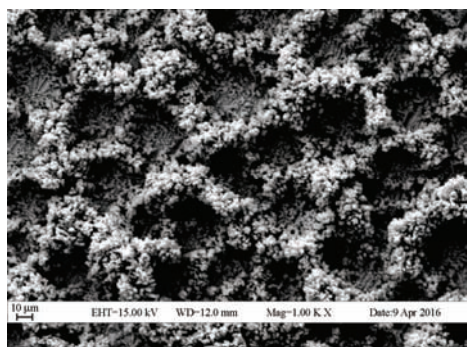


图 10 铜表面电沉积层的扫描电镜图^[24]

Fig. 10 SEM of electrodeposition layer on copper surface^[24]

行表面修饰,由于全氟癸硫醇具有很低的表面能,因此获得了超双疏涂层,当沉积时间为 60 s 时,涂层表面具有最好的超疏水性,接触角达到了 167° ,当时间为 80 s 时,涂层表面具有最好的超疏油性,接触角达到 165° 。

LUO 等^[25]先通过碱辅助氧化法在铜网表面构筑 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 线结构 (OM),之后将 OM 置于季戊四醇四(3-巯基丙酸酯)/二氯甲烷溶液中,得到含有稳定络合物 $\text{Cu}(\text{II})\text{-SH}$ 的铜网 (SH-OM),最后将 SH-OM 置于含有季戊四醇四、八乙烯基多面体低聚倍半硅氧烷、甲基丙烯酸 2-(全氟辛基)乙酯、光引发剂 1173 的四氢呋喃溶液中,经荧光照射之后得到了基于纳米级 F-POSS 聚合物的超双疏型铜网 (F-POSS-OM),如图 11 所示。此样品表面具有“凹角”结构,表面张力低至 25.5 mN/m 的液体在其表面的滚动角小于 15° ,具有优异的自清洁性。此外,该样品的抗磨损性能与抗冲击性能优异,涂层与铜网之间的结合力也达到了很高的程度,具有优异的耐腐蚀与耐高温性,展现出稳定的超双疏性能。

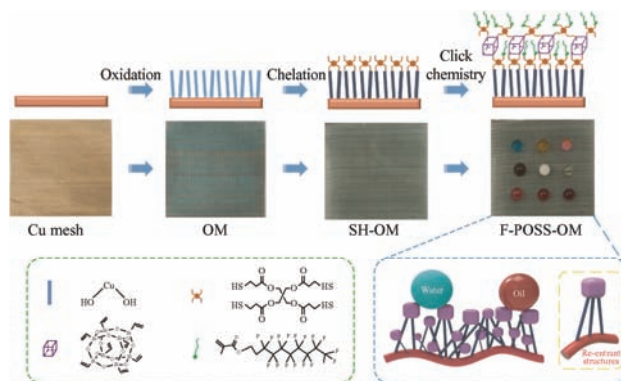


图 11 F-POSS-OM 制备工艺示意图^[25]

Fig. 11 Schematic illustration of the fabrication process of F-POSS-OM^[25]

2.1.3 铝系基底

金属铝具有光亮的银白色,质轻易加工,同样具有良好的导热导电性能,是地壳含量最丰富的金属,经常用于各种家用电器^[26]与装饰中。由于其价格成本不高,在研究人员的研究对象中占据着极大的比重。

宋金龙等^[27]先使用电化学阳极腐蚀法在铝板表面构筑微米结构,接着置于沸水中,使之在微米结构的表面生长出纳米结构,最后浸泡在全氟辛酸水溶液中以降低表面能,获得了超双疏表面。氟化前的粗糙表面具有双亲性能,经氟化后,润湿性能发生极大的转变,水、甘油、花生油、十六烷在其

表面的接触角均大于 150° , 滚动角则都小于 4° 。

孟旻^[2]使用喷涂法, 将聚苯硫醚与纳米二氧化硅的混合物喷涂在铝基材表面作为底层, 经烧结之后, 将聚苯硫醚、聚醚醚酮、含氟聚合物以及表面活性剂的乙醇混合溶液喷涂于底层上, 经高温烧结得到超双疏涂层, 其表面对水、乙二醇、原油、甘油及油水混合物的接触角基本上大于 150° , 展现出了优异的超双疏性能, 在进行了摩擦磨损测试之后, 其表面仍保持双疏的特点, 说明此涂层具有一定的抗摩擦性能。之后, 又使用 NH_4HCO_3 作为造孔剂, 制备了具有空洞结构的复合涂层, 空洞与所使用的碳管一起构成了纳微结构, 起到截留空气的作用, 从而利于超双疏状态的形成, 见图 12。涂层与水的接触角可达 162° , 与甘油和乙二醇之间的接触角也分别达到 158° 和 152° , 此涂层同样具备优异的耐磨损性能。

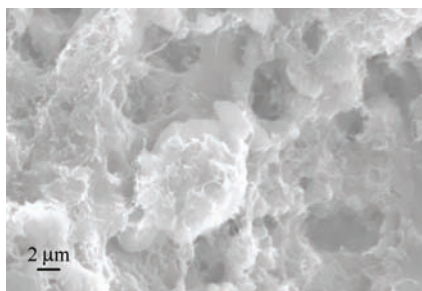


图 12 含 NH_4HCO_3 的 PPS 基复合涂层表面形貌^[2]

Fig. 12 Surface morphology of PPS matrix composite coating containing NH_4HCO_3 ^[2]

TUO 等^[22]也在铝合金的表面采用与 304 不锈钢相同的表面处理方式, 同样得到性能优异的超双疏涂层。对于表面张力大于 30 mN/m 的液体, 静态接触角高于 159° , 滑动角低于 6° 。

2.1.4 其他金属基底

除上述油烟机内常用的金属基底以外, 在其他金属基底上制备超双疏涂层的研究也从来没有停止过, 如镁合金、锌片、钛箔等。

ZHAO 等^[28]先在在镁合金的表面制备了一层致密的自修复环氧树脂(SHEP)涂层, 再以二氧化硅、四乙氧基硅烷与 1H、1H、2H、2H-全氟癸基三乙氧基硅烷为主要原料在 SHEP 涂层表面制备了多孔超双疏涂层, SHEP 涂层充当黏合剂层以增强超双疏涂层的稳定性, 并且还赋予超双疏涂层自修复能力, 同时不影响超双疏涂层的原有性能。另一方面, 超双疏涂层将 SHEP 涂层与腐蚀性介质分开。双层设计具有 SHEP 涂层和超双疏涂层的优点。因此, 这种自修复的超双疏涂层为镁合金在水性、油性介质

和大气条件下提供了有效的腐蚀防护。ZHANG 等^[29]同样在镁合金表面制备了可以自修复的基于 SMP-BTA/fluoroATP 的双层涂层, 这种涂层在双层材料的协同作用下展现出优异的自修复能力, 并且在循环过程中也表现出了优异的防腐性能。此外, LIU 等^[30]更是通过一步喷涂法在镁合金表面制备超双疏涂层, 该涂层材料由 PFOTS 乙醇溶液与磷酸铝水溶液混合而成, 磷酸铝可与镁合金极板发生反应, 形成分级结构与强结合, PFOTS 则可以引入低表面能官能团, 进一步降低涂层材料的表面能。

XU 等^[31]采用电化学置换反应, 在锌片的表面构建出微纳结构, 再通过自组装疏醇单分子层的方法构筑了超双疏表面, 其与甘油、乙二醇的接触角均超过 150° 。

SUMIT 等^[32]通过两步阳极法在钛箔表面构筑管径约为 100 nm 的纳米管状结构, 当电压为 50 V 、阳极处理时间为 2 h 时, 经表面处理后可具备超双疏特性。

总的来说, 对金属基底的研究, 主要是为了应用于工业、家用电器、航海工程与输油管道等领域。然而, 针对金属基底与超双疏涂层之间的作用机理研究较少, 有的方案是通过物理作用机械地使涂层黏附在基底上, 有的则是通过基底与涂层材料中的某种成分发生化学反应来提高结合强度。部分研究人员采用不同的金属基底进行试验, 但没有深究某种金属引入超双疏涂层以后性能更好的原因是什么, 因此, 针对这方面的研究还需要更加深入的探索。

2.2 非金属基底

非金属基材表面的研究也得到研究人员的广泛关注。如 ZHANG 等^[33]通过化学计量硅烷化, 使用十八烷基三氯硅烷为主要试剂, 在胶合板、滤纸、铝、棉布和塑料表面制备了超疏水层, 接触角达到 $169 \pm 2^\circ$ 。虽然此涂层的疏水效果很好, 并在制备过程中没有氟的成分, 减少了潜在的环境和健康危害, 但没有对此涂层进一步修饰, 研究其疏油的性能。LIU 等^[34]制备一种仅含 SiO_2 纳米粒子和 FS-61 氟碳表面活性剂的水性涂料, 将此涂料喷涂于玻璃片表面, 此涂层表现出超亲水性与超疏油性, 但将此涂层在大气下与硅烷一起 80°C 加热 15 min 之后, 此涂层表现出超双疏性。试验证明, 硅烷在纳米颗粒上的化学键合不仅触发了氟基团向外翻转, 而且通过阻断翻转, 赋予了稳定的超双疏状态。ZHANG 等^[35]使用多壁碳纳米管 MWCNTs、十六烷基三甲氧基硅烷 HDTMS 与正硅酸乙酯 TEOS 为主要原料制

备了悬浮液,通过喷涂的方法在载玻片表面上形成 MWCNTs@POS 涂层,经煅烧处理得到 SNTs 表面,再经等离子体处理后,引入全氟癸基三氯硅烷 PFDTCS,经 CVD 处理之后得到透明的 SNTs@PFDTCS 涂层,此涂层具有极低的滚动角和极高的光学透明性,在保证超双疏性的同时又可以维持基底的本征花纹或者色彩。

3 超双疏涂层在油烟机中的应用

家庭厨房的油烟处理需求越发重要,油烟机的升级换代也在如火如荼地进行。从最初的油烟引流排放,再到油烟吸附处理,油烟机始终面临着清理的问题。在复杂的厨房环境下,对油烟机的各个部件进行表面处理,使其具备疏水疏油的性能成为了研究热点之一。

3.1 油烟机表面

油烟机作为家用电器的一种,人们普遍会考虑其外观是否符合自己的装修风格,这就要求油烟机的表面要整洁美观,易擦拭。因此对油烟机的表面进行处理是必不可少的环节。

吕立丰等^[36]使用氨基树脂、正丁醇以及水对水溶性丙烯酸树脂进行改性,引入含硅纳米物质,得到水性不粘涂料,将其应用于不锈钢吸油烟机的表面,使其在保持原本颜色和花纹的同时,具备易清洁、耐污染、耐擦拭及不易变色的性能。涂层的表面张力很低,油污在其表面难以附着,见图 13,涂层同时具有较好的柔韧度与硬度,使得其在使用过程中可以承受更多的碰撞,保持耐久性与完整性。

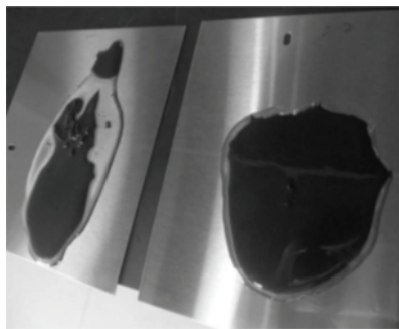


图 13 液滴在具有水性不粘材料的不锈钢表面试验图^[36]

Fig. 13 Test diagram of droplets on the surface of stainless steel with water-based non-stick materials^[36]

张玉^[37]同样对不锈钢的油烟机表面进行处理,清洗后用强留脉冲离子束进行表面辐照处理,再进行预热与磁场处理,最后在表面涂刷一层由水性丙烯酸树脂、二氧化硅 / 石墨烯混合胶体、三聚磷酸

二氢铝、异丙醇等成分构成的涂料。此方案的辐照处理可以降低不锈钢表面杂质含量,表面层得以细化,并产生金属羟基,提高涂层与基底之间的结合力;磁场处理也会使不锈钢带有弱磁性,同样可以提高结合力。此涂层拥有较低的表面能,经反复擦拭不易破损,但是测试液体在表面没有达到超疏的效果,最高只达到了 120° ,需要进一步改进。

这两种方案只考虑了表面材料为不锈钢的油烟机,在如今的油烟机设计中,为了美观,油烟机的表面大都会喷漆,部分区域比如操控面板区域还会使用钢化玻璃,因此应当进一步对油烟机的其余种类的外壳表面进行防油污处理。

3.2 油烟机油网 / 滤网

当油烟进入油烟机内时,首先会与油网 / 滤网进行接触并在这里对油烟进行第一次的过滤处理,去除较大的油烟颗粒,因此油网的污染比较严重,对其进行防污染处理是研究人员普遍关注的热点。

张丽等^[38]通过纳米涂层技术,对油烟机的油网进行表面处理,经过烟油浸没 18 h 后,将其取出静置 18 h,其表面的油液发生凝聚,在重力下滚落,达到自清洁的效果,如图 14 所示。使用由纳米氧化钛、纳米氧化铝、纳米氧化锆等构成的纳米涂层材料 UGT 展现出优异的耐候、耐腐蚀与耐污染性。这种材料通过纳米粒子间的结合,可以弥补传统涂层包含有害物质的缺点,但 UGT 与水的接触角为 $80^\circ \sim 100^\circ$,并没有达到超双疏的效果,应当对此涂层进行进一步的低表面能修饰,增强其超双疏的效果。

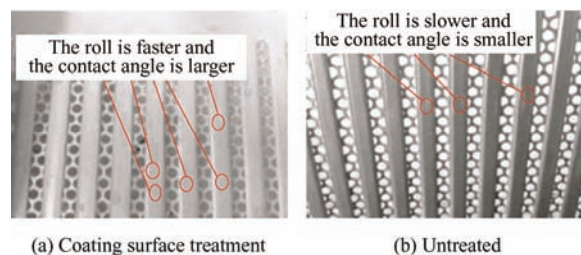


图 14 油网静置 18 h 后对比^[38]

Fig. 14 Comparison of the oil net after 18 h of standing^[38]

于海平^[3]使用三氯化铁对不锈钢滤网进行刻蚀并采用高温对其煅烧,再利用十七氟癸基三甲氧基硅烷对滤网进行化学气相沉积表面改性,经接触角测试可知,其与水、二甘醇、丙三醇及大豆油的接触角都大于 140° ,具有优异的自清洁能力,如图 15 所示。通过电化学测试,双疏滤网拥有较大的阻抗半径与自腐蚀电压以及较低的自腐蚀电流密度,在酸性、碱性的溶液中的最大缓蚀率为 83.9% 与 99.8%,具有较好的耐腐蚀性能。同样还对铝材质的

滤网做了类似的处理, 只是将高温煅烧处理改成了沸水封闭处理, 其与水、二甘醇、丙三醇及大豆油的接触角也大于 140° , 具备一定的稳定性与耐腐蚀性能。由于此方案采用化学溶剂对金属基材进行刻蚀, 溶剂中的离子会在金属的晶体缺陷处优先反应, 造成刻蚀不均匀, 这将会对后续的处理以及表面润湿性造成影响, 因此可以采用其他方法进行刻蚀, 并对涂层与基材之间的结合界面进行进一步的探索。

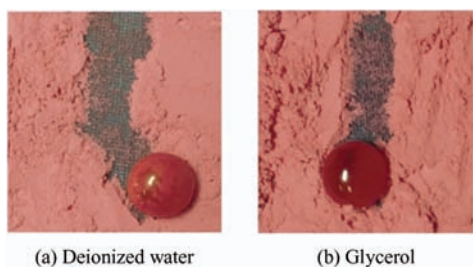


图 15 双疏不锈钢滤网的自清洁图像^[3]

Fig. 15 Self-cleaning image of the double phobic stainless steel filter^[3]

麦伟添等^[39]将包含一个或多个氟化集团的硅烷化合物经交联处理, 得到密度较高的氟聚物, 通过喷涂的工艺将材料喷于油网表面, 此涂层对水与玉米油的接触角分别为 $108 \pm 5^\circ$ 、 $76 \pm 5^\circ$, 涂层表面能可以使表面张力为 24 mN/m 的液体迅速收缩为线状或珠状。此外, 通过对油网的组合设计, 提高了油网的油污导流与收集的效率, 进一步实现了油烟的净化处理。但此方案的缺点也显而易见,

即所用双疏涂层材料的接触角较低, 使用新发展的超双疏材料将会拥有更好的效果。

3.3 油烟机叶轮 / 涡轮

油烟机的叶轮 / 涡轮通过转动产生风力, 为油烟的运动提供动力, 油烟接触到叶轮后会在其表面凝结, 同样也是污染的重灾区, 目前市场上主要采用的清理手段是加装喷水装置与加热装置, 通过加热使油烟污染物软化, 之后通过水洗与旋转, 将油烟污染物甩掉。与此同时, 表面处理的研究也在如火如荼地进行。

JIAO 等^[40]通过将氟乙烯乙烯基醚 (FEVE) 树脂、丙烯酸 (AA) 树脂、二氧化硅纳米颗粒和固化剂溶解在乙酸正丁酯中来获得底漆。将硅溶胶在氢氧化铵的碱性水溶液中稀释碱化, 经超声分散后将混合物加入到无水乙醇中, 再引入 1H、1H、2H、2H-全氟癸基三氯硅烷 (FDTS), 获得超双疏性的纳米颗粒悬浮液。先将底漆喷在器件表面, 再将纳米颗粒悬浮液喷涂在底漆表面, 形成双层结构。制备流程如图 16 所示。在较高 FDTS 浓度下, 超双疏涂层更加致密化, 拥有更好的耐油浸性。这是由于 SiO_2 纳米颗粒以亚纳米级 (接枝密度) 和纳米级 (颗粒堆积) 密度紧密堆积。这些涂料对低表面张力液体显示出优异的拒液性, 静态接触角大于 150° 。即使在环境温度 (25°C) 和较高温 (80°C) 下浸入植物油中超过 50 d, 它们仍能抵抗油的渗透。使用具有涂层的叶轮进行测试, 在苛刻的动态流动条件下进行加速测试, 此涂层也具有出色的耐油浸性。

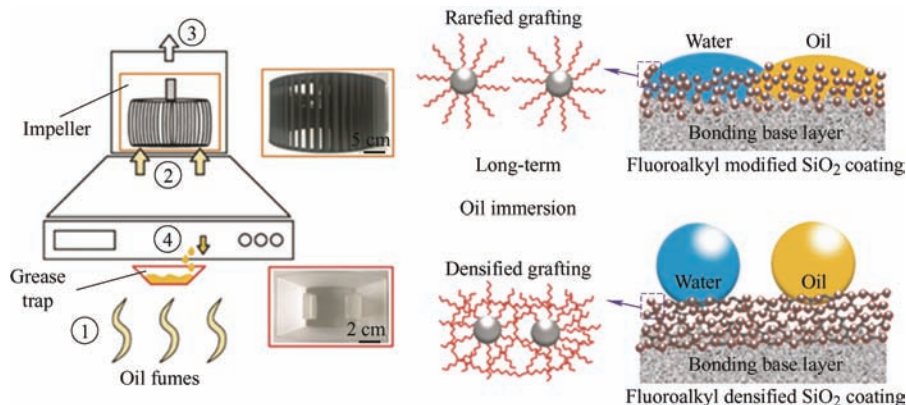


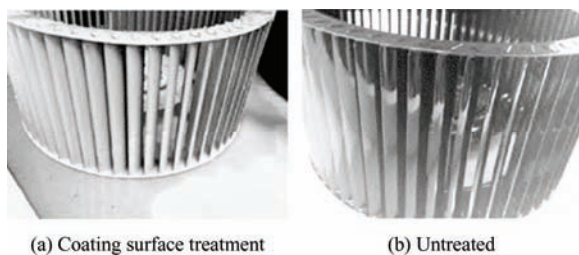
图 16 二氧化硅纳米超双疏涂层制备流程^[40]

Fig. 16 Preparation process of silica nano-superbiphobic coatings^[40]

张丽等^[38]对叶轮采用了与油网同样的表面处理方式, 经过 18 h 后, 叶片的表面基本没有油污的存在, 这说明在此涂层表面的油污在重力作用下可以自行脱落, 效果与油网相同。如图 17 所示。

对比这两种方案, JIAO 等^[40]采用的双层薄膜处

理, 张丽等^[38]采用的则是单层薄膜直接包覆, 两者都可对自清洁起到明显的效果, 但无疑前者的方案效果更好, 并且比较耐用, 但这种方案的缺点也是显而易见的, 那就是过程比较繁琐, 没有后者一步法简单、实用。

图 17 叶轮静置 18 h 后对比^[38]Fig. 17 Comparison of impeller after 18 h^[38]

除了以上部分通过直接覆膜的手段, 还有通过修饰改性与刻蚀等处理手段。王丽丽等^[41]将叶轮在体积分数为 1% 的十七氟癸基三乙氧基硅烷 (HFTTMS) 乙醇溶液中进行修饰改性, 干燥处理后, 得到超疏水、疏油表面。再置于全氟硅烷溶液中进行化学沉积表面修饰, 降低表面能, 从而使其具有超疏油的性能。

刘勇等^[42]先将叶轮置于氢氧化铵水溶液中进行刻蚀, 再将预处理的叶轮浸泡于 HFTTMS 乙醇溶液中进行表面修饰, 从而得到具有超双疏性的叶轮。由于氢氧化铵水溶液呈弱碱性, 腐蚀坑较浅, 可以减少后续表面修饰的时间, 避免了强酸、强碱刻蚀时的剧烈反应与微观尺度不易控制的现象。

相较于王丽丽等^[41]先构建超疏水再构建超疏油的方法, 刘勇等^[42]则是先刻蚀再进行表面成膜, 若将两种方案进行结合, 可能会得到结合强度更高、超疏效果更好的涂层。

3.4 油路

除了单独对某一部件进行处理, 还有部分研究人员对油烟运动经过的路径所对应的部件做了表面处理, 如任富佳等^[43]设计了一种免洗吸油烟机, 对油路进行表面喷涂不粘油或纳米涂料, 包括风道、叶轮、集油槽、滤网、网罩、油杯、连接板与降噪冷凝板。对整个油路进行表面处理会大幅提高成本, 且油烟在不同部件附近的运动状态有所差别, 因此对涂层的要求也会有所侧重, 单纯地为整个系统进行表面处理, 可能无法达到协同工作的效果。因此, 当对油烟机部件进行表面处理时, 可以选择一些主要部件, 以此达到兼顾成本与效果的目的。

除对上述主要的大型部件进行超疏处理外, 一些针对虽小但也很重要的部件的研究也没有落下, 比如油杯, 又叫做集油器。这是油烟经收集液化最后流入的部件, 其长期与油液接触, 对其进行防污处理是很有必要的, 如 JIAO 等^[40]在对叶轮进行表面处理的同时, 也对油杯进行了表面涂层处理与研究。

4 结论与展望

超双疏涂层在静电油烟机中的应用是极具现实意义的, 随着油烟机不断地升级换代, 对超双疏涂层性能的要求也逐渐提高。经过分析与总结, 得出以下结论:

(1) 与超双疏涂层相关的理论研究逐渐由理想化向贴合实际的方向转变, 大多数研究人员会在 Young's 方程的理论基础上进行延伸与修正, 根据自己的研究成果建立物理与数学模型, 将试验数据与理论模型进行匹配, 并取得了较好的效果。

(2) 针对不同材质的基体, 如在钢系、铜系、铝系等金属基体表面以及玻璃、塑料、棉布上制备超双疏涂层的工艺大同小异, 基本采用改变表面粗糙度与降低表面能两个步骤来进行, 超双疏材料更多的是通过物理连接在基底上, 但由于使用的材料有所差异, 还有部分材料会与基底发生化学反应, 基底与涂层之间存在化学键。

(3) 超双疏涂层在油烟机部件表面的应用得到了广泛研究, 如油烟机外壳、油网、叶轮、集油杯等部件, 但对于新型油烟机, 如在静电油烟机的静电吸附组块表面的超双疏涂层还有其他特殊要求, 目前还没有得到较好的制备工艺。

通过目前超双疏涂层在油烟机中的研究进展, 不难发现, 超双疏涂层在油烟机内的作用是巨大的, 但仍然存在一些需要解决的问题, 待以更深入地研究:

(1) 超双疏涂层的理论研究还缺乏更加系统、深入的整理, 涂层材料与基底之间的相互作用机理的研究相对较少, 多数研究人员停留在实用这一要求上, 没有做机理的分析与研究, 这方面可以进行进一步的探索。

(2) 对于如今出现的部分新型油烟机, 如静电净化油烟机, 主要通过静电模块对油烟进行吸附与净化, 因此其对超双疏涂层的性能要求是很高的。由于其工作环境为电场, 其中会发生电离、静电吸附、洛伦兹运动等过程, 因此对涂层要求也具有特殊性, 比如介电性、导电性、耐电磁辐射性、耐电压强度性等等。然而目前针对在电场中对超双疏涂层材料性能的研究还很少, 这可以作为超双疏涂层材料的发展方向之一。

(3) 静电油烟机内部的部件还有进一步结构优化设计的空间, 可以通过仿真模拟油烟在静电油烟机内部的运动进行针对性的分析, 精准地得出油烟

净化运动的最优路径, 从而设计出匹配的油烟机部件装配结构等, 如带电油烟在风力与电场力的共同作用下将会以何种速度和角度与各个部件接触, 有无阻碍油烟运动的部位, 通过设计能否使得以较低的功率达到较高的效率。同时还可以找到油烟机内污染较为严重的区域, 从而可以对其进行精确的表面处理。

(4) 针对静电净化油烟机这类设备的研究可以双管齐下, 一方面对超双疏涂层进行研究, 针对不同的部件结构, 寻求合适的表面微纳处理工艺与新材料, 比如板状结构等可以采用离子束预处理或者喷涂等工艺, 而针对一些圆筒或者其他在内部引入涂层的部件可以采用擦涂或者浸涂的工艺; 另一方面可以对设备装置进行设计优化。设计与材料相结合, 相互协同工作, 可能会得到意想不到的优异效果。

参 考 文 献

- [1] 胡永. 吸油烟机中静电油烟净化模块的设计开发[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
HU Yong. Design and development of electrostatic fume purification module in range hood[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [2] 孟旻. 含氟双疏涂层的制备及其润湿性研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014.
MENG Yang. Fabrication and wettability of the fluorine-containing hydrophobic and oleophobic coatings[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014. (in Chinese)
- [3] 于海平. 高疏油抽油烟机滤网的制备及其耐油烟腐蚀性能的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
YU Haiping. Fabrication of high oleophobic range hood sieve and its resistance to fumes corrosion[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [4] 斯芳芳, 张靓, 赵宁, 等. 超亲水表面制备方法及其应用[J]. 化学进展, 2011, 23(9): 1831-1840.
SI Fangfang, ZHANG Liang, ZHAO Ning, et al. Superhydrophilic surfaces: Preparation method and application[J]. Progress in Chemistry, 2011, 23(9), 1831-1840. (in Chinese)
- [5] ROMAN R, STANISLAV N G. Brochosomes protect leafhoppers (Insecta, Hemiptera, Cicadellidae) from sticky exudates[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2013, 10(87): 20130445-20130445.
- [6] CHEN L, LIUM J, MA J, et al. Bio-inspired hierarchical macromolecule-nanoclay hydrogels for robust underwater superoleophobicity[J]. Advanced Materials, 2010, 22(43): 4826-4830.
- [7] 罗贯洲. 功能化 POSS 基超双疏表面涂层的制备及其应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
LUO Guanzhou. Preparation and application of functionalized POSS-based superamphiphobic surface coating[D]. Guangzhou: South China University of Technology China, 2020. (in Chinese)
- [8] YOUNG T. An essay on the cohesion of fluids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society, 1805, 95: 65-87.
- [9] ROBERT N W. Resistance of solid surfaces to wetting by water[J]. American Chemical Society, 2002, 28(8): 988-994.
- [10] CASSIE A B D, BAXTER S. Wettability of porous surfaces[J]. Transactions of the Faraday Society, 1944, 40: 546-551.
- [11] JOHNSON R E, DETTRE R H. Contact angle wettability and adhesion[J]. Advances in Chemistry Series, 1964, 43: 112-135.
- [12] FENG L, ZHANG Y N, XI J M, et al. Petal effect: A superhydrophobic state with high adhesive force[J]. Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2008, 24(8): 4114-4119.
- [13] JIN M H, FENG X J, FENG L, et al. Superhydrophobic aligned polystyrene nanotube films with high adhesive force[J]. Advanced Materials, 2005, 17(16): 1977-1981.
- [14] ANISH T, WONJAE C, MA M L, et al. Designing superoleophobic surfaces[J]. Science, 2007, 318(5856): 1618-1622.
- [15] FENG L, LI S H, LI Y S, et al. Super-hydrophobic surfaces: From natural to artificial[J]. Advanced Materials, 2002, 14(24): 1857-1860.
- [16] WANG K L, LIU X R, TAN Y, et al. Highly fluorinated and hierarchical HNTs/SiO₂ hybrid particles for substrate-independent superamphiphobic coatings[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 359: 626-640.
- [17] JIANG G, HU J H, CHEN L. Preparation of a flexible superhydrophobic surface and its wetting mechanism based on fractal theory[J]. Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2020, 36(29): 8435-8443.
- [18] 石文, 管国虎, 蒋磊. 超疏材料在吸油烟机中的应用[C]//中国家用电器协会, 电器杂志社. 2017年中国家用电器技术大会论文集, 安徽, 2017-11-01. 北京: 中

- 国轻工业出版社, 2017.
- SHI Wen, GUAN Guohu, JIANG Lei. Application of superhydrophobic materials on range hood[C]//China Household Electrical Appliances Association, Electrical Appliances Magazine. 2017 China Household Electrical Appliances Technology Conference Proceedings, Anhui, 2017-11-01. Beijing: China Light Industry Press, 2017. (in Chinese)
- [19] 辛忠, 张雯斐. 超双疏表面的构筑及研究进展[J]. 化工进展, 2015, 34(2): 447-455, 478.
- XIN Zhong, ZHANG Wenfei. Research progress of fabrication and application of superamphiphobic surface[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(2): 447-455, 478. (in Chinese)
- [20] 刘栋, 张希, 刘凤东, 等. 基于溶胶-凝胶法制备 PFTMS-SiO₂ 有机-无机杂化超双疏涂层[J]. 中国表面工程, 2019, 32(3): 99-108.
- LIU Dong, ZHANG Xi, LIU Fengdong, et al. PFTMS-SiO₂ organic-inorganic hybrid super-amphiphobic coatings synthesized by sol-gel method[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(3): 99-108. (in Chinese)
- [21] 郝友菖, 黄颖为, 曾群锋, 等. X80 钢表面聚苯硫醚/二氧化硅耐蚀超双疏涂层制备研究[J]. 山东化工, 2019, 48(11): 20-23.
- HAO Youchang, HUANG Yingwei, ZENG Qunfeng, et al. Study on preparation of polyphenylene sulfide/silica corrosion resistant super biphobic coating on X80 steel surface[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(11), 20-23. (in Chinese)
- [22] TUO Y J, ZHANG H F, CHEN Liang, et al. Fabrication of superamphiphobic surface with hierarchical structures on metal substrate[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 612: 125983-125992.
- [23] KIM H, HAN H, LEE S, et al. Nonfluorinated superomniphobic surfaces through shape-tunable mushroom-like polymeric micropillar arrays[J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2019, 11(5): 5484-5491.
- [24] 张万强, 李圆圆, 陈全入, 等. 电化学沉积法制备超双疏铜表面[J]. 许昌学院学报, 2017, 36(2): 64-67.
- ZHANG Wanqiang, LI Yuanyuan, CHEN Quanyu, et al. Preparation of superamphiphobic copper surfaces by electrochemical deposition process[J]. Journal of Xuchang University, 2017, 36(2), 64-67. (in Chinese)
- [25] LUO G Z, WANG L, LI X Y, et al. Facile fabrication of an F-POSS polymer-based liquid-repellent Cu mesh with excellent durability and self-cleaning performance[J]. Soft Matter, 2019, 15(47): 9727-9732.
- [26] 杨晓红, 叶霞, 徐伟, 等. 超疏水铝合金表面的复合制备与性能[J]. 中国表面工程, 2020, 33(3): 78-87.
- YANG Xianhong, YE Xia, XU Wei, et al. Composite preparation and properties of superhydrophobic aluminum alloy surface[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(3): 78-87.
- [27] 宋金龙, 徐文骥, 陆遥, 等. 电化学和化学加工法制备铝基体超双疏表面[J]. 机械工程学报, 2013, 49(5): 182-190.
- SONG Jinlong, XU Wenji, CHEN Yao, et al. Research on electrochemical and chemical machining technology of superamphiphobic surfaces on Al substrates[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(5): 182-190. (in Chinese)
- [28] ZHAO X, WEI J F, LI B C, et al. A self-healing superamphiphobic coating for efficient corrosion protection of magnesium alloy[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2020, 575: 140-149.
- [29] ZHANG J J, Wei J F, LI B C, et al. Long-term corrosion protection for magnesium alloy by two-layer self-healing superamphiphobic coatings based on shape memory polymers and attapulgite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 594: 836-847.
- [30] LIU L, LI X, LEI J L, et al. Superamphiphobic magnesium alloys with extraordinary environmental adaptability[J]. Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2021, 37(14): 4267-4275.
- [31] XU X H, ZHANG Z Z, GUO F, et al. Superamphiphobic self-assembled monolayer of thiol on the structured Zn surface[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2012, 396: 90-95.
- [32] SUMIT B, YOUNG S K, LIM S H. Fabrication of amphiphobic surface by using titanium anodization for large-area three-dimensional substrates[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 400: 123-129.
- [33] ZHANG L S, ZHOU A G, SUN B R, et al. Functional and versatile superhydrophobic coatings via stoichiometric silanization[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 982-989.
- [34] LIU P, LIU S Q, YU X Q, et al. Silane-triggered fabrication of stable waterborne superamphiphobic coatings[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 406: 127153-127161.
- [35] ZHANG J P, YU B, WEI Q Y, et al. Highly transparent

- superamphiphobic surfaces by elaborate microstructure regulation[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 554: 250-259.
- [36] 吕立丰, 李士棕, 陈飞. 水性不粘涂料在不锈钢吸油烟机上的应用[C]// 中国家用电器协会, 电器杂志社. 2016年中国家用电器技术大会论文集, 宁波, 2016-11-08. 北京: 中国轻工业出版社, 2015.
- Lü Lifeng, LI Tuzong, CHEN Fei. Application of water non stick coatings on stainless steel hood[C]//China Household Electrical Appliances Association, Electrical Appliances Magazine. 2016 China Household Electrical Appliances Technology Conference Proceedings, Ningbo, 2016-11-08. Beijing: China Light Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [37] 张玉. 一种不锈钢油烟机表面处理方法: 201711410734. 7[P]. 2017-12-23.
- ZHANG Yu. A surface treatment method of stainless steel range hood: 201711410734. 7[P]. 2017-12-23. (in Chinese)
- [38] 张丽, 蔡玉标, 郑佳亮. 自清洁材料在厨电产品中的应用[C]// 中国家用电器协会, 电器杂志社. 2015年中国家用电器技术大会论文集, 合肥, 2015-10-29. 北京: 中国轻工业出版社, 2015.
- ZHANG Li, CAI Yubiao, ZHENG Jialiang. Application of self-cleaning materials in kitchen electrical products[C]// China Household Electrical Appliances Association, Electrical Appliances Magazine. 2015 China Household Electrical Appliances Technology Conference Proceedings, Hefei, 2015-10-29. Beijing: China Light Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [39] 麦伟添, 张武, 易洪斌, 等. 不粘油易清洁吸油烟机的油网、组合型油网及其吸油烟机: 201620437976X[P]. 2017-02-08.
- MAI Weitian, ZHANG Wu, YI Hongbin, et al. Non-stick oil, easy to clean the oil net of range hood machine and combined oil mesh as well as its range hood: 201620437976X[P]. 2017-02-08. (in Chinese)
- [40] JIAO X, LI M T, YU X Q, et al. Oil-immersion stable superamphiphobic coatings for long-term super liquid-repellency[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 420(Part 2): 127606.
- [41] 王丽丽, 孟永哲, 管国虎. 疏水疏油新材料特性分析及其在吸油烟机上的应用[C]//陈粒. 2020年中国家用电器技术大会论文集, 宁波, 2020-10-29. 北京: 电器杂志社, 2020.
- WANG LiLi, MENG Yongzhe, GUAN Guohu. Characteristics and application of superhydrophobic materials in range hood[C]// Chen Li. 2020 China Household Electrical Appliances Technology Conference Proceedings. Ningbo, Zhejiang, China, 2020-10-29. Beijing: Electrical Appliances Magazine, 2020. (in Chinese)
- [42] 刘勇, 孟永哲, 陈文海, 等. 一种超双疏叶轮及其制备方法和应用: 201810251529. 9[P]. 2019-10-22.
- LIU Yong, MENG Yongzhe, CHEN Wenhai, et al. A super ramphiphobic impeller and its preparation and application: 201810251529.9[P]. 2019-10-22. (in Chinese)
- [43] 任富佳, 余国成. 一种免拆洗不粘油环保节能吸油烟机: 200920125087. X[P]. 2010-05-12.
- REN Fujia, YU Guocheng. A environment-friendly and energy-saving range hood without disassembly, washing and non-stick oil: 200920125087. X[P]. 2010-05-12. (in Chinese)

作者简介: 王闯, 男, 1997 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为材料表面工程。

E-mail: wangchuangyt@163.com

文峰(通信作者), 男, 1976 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为功能薄膜 / 涂层(腐蚀、耐磨)、光催化抗菌涂层、材料表面改性等功能化。

E-mail: fwen323@163.com