

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2022.03.009

## 虫胶清理技术国内外研究进展及在直升机上的应用

张昕宇<sup>1\*</sup>, 徐璐<sup>1</sup>, 姜国杰<sup>2</sup>, 于晴<sup>1</sup>, 冯晨旭<sup>1</sup>, 宋健<sup>1</sup>

(1. 中国直升机设计研究所标准材料部, 江西 景德镇 333001;

2. 中国航发北京航空材料研究院表面工程研究所, 北京 100095)

**摘要:** 虫胶在人类生活中无处不在, 易附着在直升机、汽车等表面, 难以清除, 并带来腐蚀等问题, 为此研究者开展了相关研究工作, 并得到了诸多行之有效的虫胶清理方法, 例如有机溶剂法、水基清洗法、激光脉冲法、机械法、生物酶解法以及主动防护与快速清洁相结合等多种方式。针对这些方法的适用范围、清理效果、优缺点等研究现状进行了分析和总结。直升机在飞行中经常面临飞越丛林的服役或作战环境, 易遭遇飞虫撞击, 为尽量降低直升机在此类环境中虫胶黏附对视线和机体结构的影响, 提高虫胶清理能力, 针对直升机的特殊需求和难点进行分析, 给出了当前方法在虫胶清理领域以及在直升机应用的趋势、可行性以及建议。

**关键词:** 虫胶; 清理技术; 表面防护; 研究现状; 直升机

中图分类号: TQ413.2 文献标识码: A

## Research Progress of Shellac Cleaning Technology and Its Application on Helicopters

ZHANG Xinyu<sup>1\*</sup>, XU Lu<sup>1</sup>, JIANG Guojie<sup>2</sup>, YU Qing<sup>1</sup>, FENG Chenxu<sup>1</sup>, SONG Jian<sup>1</sup>

(1. China Helicopter Research and Development Institute, Standard Materials Department, Jingdezhen 333001, China; 2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Surface Engineering Institute, Beijing, 100095, China)

**Abstract:** Shellac is ubiquitous in human life. It's easy to adhere to the surfaces of helicopters, cars, etc. and difficult to remove, which will cause corrosion and other problems. Therefore, the researchers have carried out related research work and obtained many effective shellac cleanings methods, such as organic solvent method, water-based cleaning method, laser pulse method, mechanical method, biological enzymatic hydrolysis, and the combination of active protection and fast cleaning. The current research status of these methods, such as the scope of application, clean-up effects, advantages and disadvantages of these methods are analyzed and summarized. Helicopters often face the service or combat environment of flying over the jungle during flight, and are vulnerable to flying insects. In order to minimize the impact of the adhesion of shellac on the line of sight and body structure of the helicopter in this environment, and improve the shellac cleaning ability. Aiming at the special needs and difficulties of helicopters, the trend, feasibility, and suggestions for the current method are given in the field of insect cleaning and helicopter applications.

**Keywords:** shellac; cleaning technology; surface protection; research status; helicopter

收稿日期: 2022-01-06

修回日期: 2022-01-12

作者简介: 张昕宇(1996—), 女, 研究生(硕士), 助理工程师, E-mail: zxyhhg@163.com

\*通信作者: 张昕宇, E-mail: zxyhhg@163.com

大自然的其他生物有着它们特定的活跃时节,而人类的生产生活无时无刻不在进行,如何与其他生物和平共处或者消除它们带来的负面影响是我们永恒的课题。昆虫在春夏时节活动旺盛,且会分泌大量由桐油酸和虫胶酸等组成的聚酯混合物—虫胶,这种混合物不溶于水,易溶于有机溶剂<sup>[1]</sup>。昆虫的活动范围很广,汽车、列车行驶以及直升机飞行穿越松林时,都易遭遇昆虫并在外表面及玻璃上留下虫胶,长时间的残留会使虫胶老化变硬<sup>[2]</sup>,难以清除,且对基体造成一定破坏。在夏季,树木的分泌也很旺盛,容易产生树黏液,树黏液包括树脂和树胶,与虫胶组成成分类似的,作为一种无定形高分子混合物,树脂同样不溶于水,黏性大<sup>[3]</sup>,易溶于有机溶剂,主要由固态的树脂酸和液态的萜烯类两部分组成<sup>[4]</sup>。树胶的主要成分是多糖类无定形物质,属于高分子复杂化合物,与水结合会形成胶体溶液<sup>[5]</sup>。

直升机在台海沿岸林地贴地飞行时,会有很多昆虫撞到直升机迎风面及前挡风窗玻璃上,形成难以清洗掉的虫胶。虫胶在直升机机体表面的长时间附着,会残留难以清除的遗迹。由于这些有机物质呈酸性<sup>[6]</sup>,因此长时间的黏附会造成直升机机体的漆层、玻璃和金属等材料的腐蚀,影响直升机的使用。虫胶与盐类物质的结合会使其更加稳定<sup>[7]</sup>,难以分解去除,而直升机在户外停放时大气中的盐类物质极易与虫胶发生反应,当其在海洋盐雾大气环境下使用时,面临的盐沉积环境将更加严酷。因此,虫胶的长时间黏附会给直升机带来严重的腐蚀问题。此外,残留在直升机前挡风窗玻璃上的遗迹在阳光的直射下还会产生彩色的条纹,造成眩光现象,严重时还会阻挡飞行员的飞行视线,进而影响直升机飞行的安全<sup>[8]</sup>。

目前,国内外已开展了基于不同背景不同基体的虫胶清理技术的相关研究,但目前相关的综述较少,本文对各类方法进行了整理汇总,以期对直升机的虫胶清理技术研究和应用有一定的启发。

## 1 国外研究进展

去除虫胶传统常见的方法就是使用有机溶剂,如醇类、醚类、苯类、石油烃类和脂肪酸类等利用“相似相溶”的原理进行清洗。然而,这类去虫胶清洗液中挥发性有机化合物会对人的身体造成伤害,也会污染周围的环境。同时,有些有机溶剂的溶解性很

强,在去除虫胶、树黏液的同时,还会对汽车、直升机的外表面,尤其是对漆层造成损伤。针对以上不足,研究者们提出了通过水基型溶剂以及一些新型技术去除虫胶的方式。

通过碱性溶液水解的方式可以改变虫胶特性,使虫胶易于溶解<sup>[9]</sup>,但当虫胶已成为铵盐则由于在结合位点的反应而受到保护,不易被破坏<sup>[10]</sup>。当虫胶吸收到陶瓷织物的多孔基材中,会在陶瓷中通过复杂的化学反应形成含有金属杂质的有机金属络合物,造成不可逆转的紫粉色色斑。国外的研究者探究了使用碱性水溶液将分子水解成水溶性单体、二聚体和游离羧基酸的方式去除多孔基材上的虫胶<sup>[11]</sup>。清洗剂的组成为少量乙醇和琼脂凝胶的混合物,添加NaOH溶液缓冲pH至13.5。该清洗剂组成简单且环保,可以广泛应用于不同基材。这种方式的特点在于不再从传统角度出发使虫胶的聚酯骨架溶胀变形进入溶液被去除,因为溶解方法容易导致化学键结合的金属阳离子进而产生粉紫色污渍<sup>[11]</sup>。

除使用溶剂去除虫胶外,国外研究者提出了激光去除木制品上的虫胶的方法<sup>[12]</sup>。虫胶在木材中具有良好的渗透性,浸渍木材后,虫胶会在木材的内在层上堵塞凹坑并硬化<sup>[13-15]</sup>。运用不同的脉冲激光体系进行不同持续时间的脉冲烧蚀(如表1),研究确定最佳激光参数。激光蚀刻深度和激光能量密度的函数曲线如图1所示,可以看出虫胶和木材的消融阈值有着显著差异,虫胶都是在比木材更低的通量下烧蚀,通量能量的最佳窗口值可以在不伤害木质的情况下使用去除虫胶。研究表明,使用1064 nm的Nd:YAG激光进行持续10 ns的脉冲烧蚀可以去除虫胶而不损害木质基材,激光去除的技术可以很好的应用于木质工艺品的虫胶清洗,避免了费力的机械方法或者带来其他风险的溶剂去除虫胶的方法。

此外,研究表明虫胶的成分结构比一般的脂肪

表1 研究中应用的激光体系<sup>[12]</sup>

Tab.1 Laser system used in research<sup>[12]</sup>

激光	波长/nm	脉冲宽度/ps	重复频率/Hz
Nd:YAG	1064	$1 \times 10^4$	10
Nd:YAG	1064	150	2
Excimer KrF	248	$3 \times 10^4$	20
Excimer Dye	248	0.5	1

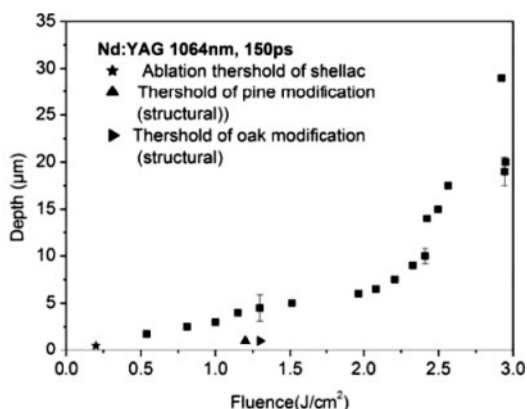


图 1 用 1064 nm 波长的 Nd:YAG 激光脉冲(脉冲持续时间 10 ns)照射时的虫胶消融率<sup>[12]</sup>

Fig.1 Nd:YAG laser pulse (pulse duration 10 ns) is irradiated with a 1064 nm wavelength<sup>[12]</sup>

酸、碳水化合物等物质更易水解,因此研究者提出通过酶水解的方式去除虫胶,这一思路可以作为未来研究的方向<sup>[11]</sup>。

## 2 国内研究进展

国内也开展了相关的研究,去虫胶清洗剂主要应用于汽车、列车。以往在使用清洁剂清理虫胶时经常会带来各种问题,例如在寒冷气候条件下使用时,清洗剂易冻结影响视野;干燥条件下使用有可能出现静电现象;潮湿环境下使用则会刮干慢,残留多,容易导致腐蚀。采用传统的机械研磨法去除虫胶时,研磨剂易出现颗粒分散不均,划伤玻璃表面的问题。此外,目前大部分研究中清洗剂的配方仍是由普通表面活性剂、醇、醚类溶剂、缓蚀剂和水组成,同样会带来损害人体健康、污染环境、腐蚀基体等问题,抑或酸碱性较强,对玻璃造成侵蚀作用,对此研究者在研制中对以上问题提出了各种解决方案。

列车在高速运行中其端头的挡风玻璃也会刮蹭到树枝、遭遇飞虫碰撞,表面黏附的树胶、昆虫尸体等会演变成黄斑、锈渍等虫胶污渍。针对此类问题,李丽等<sup>[16]</sup>人研制了一种性能稳定、清洗力强的水性清洗剂,在其性能验证中,原本由于虫胶油污的附着透光率下降到仅 71% 的挡风玻璃,在使用该清洗剂后透光率提升至 78%,并在刷洗后达到了 81%,说明其去污能力优良。将该清洗剂在 H62 黄铜、LY12 硬铝、45#钢表面使用后金属均无明显变色,说明其腐

蚀性弱。此外,清洗剂无刺激性气味,降解性达 99.9%,且对漆膜硬度无影响。

研究人员还制备了一款可以在低温下使用的汽车玻璃清洗剂<sup>[17]</sup>,主要用于去除玻璃表面的污物,其阴离子表面活性剂的配合使用可以增强去污能力,添加的缓蚀剂成分用以减弱对玻璃的腐蚀和划伤,加入稳定剂和消泡剂以稳定配方,抑制过多的泡沫产生,通过醇类物质的适当复配可以形成保护层,防止雾滴产生,同时还能降低冰点,实现在低温环境下完成对虫胶的清洗。通过对汽车强挡风玻璃的实际清洗操作发现,在清洗前玻璃表面有大量灰尘、鸟粪、油污,清洗后表面无杂点,连续使用洗涤 150 次后玻璃表面无腐蚀。由此可见,清洗剂去除表面污物的效果很明显,且对玻璃表面无腐蚀作用。

熊竹君等<sup>[18]</sup>人通过无机增稠剂与表面活性剂的协同作用提高研磨剂的分散稳定性,降低了研磨颗粒的团聚性和对玻璃的伤害性,研磨剂本身的滚动可以有效去除玻璃表面的沉积物、树胶、虫胶、鸟粪等顽固污垢,这种清洗剂无挥发性,安全无害。

侯悖等<sup>[19]</sup>人另辟蹊径,采用弱碱性活性酶分解技术高效去除虫胶,研制出一款生产工艺简单的水基玻璃清洗剂。这种清洗剂添加了生物酶成分,生物降解性高,环境友好。另外在性能上活性物质含量少,通过采用亲水渗透技术来降低虫胶等残留物的附着特性,使其更容易被剥离。与传统玻璃清洗剂相比,该清洗剂还具有拨水特性,当汽车、列车等在大雨中行驶时,该清洗剂可以使落在玻璃面上的雨柱形成负压式雨帘飞离玻璃,而不是平铺在玻璃上遮挡视线,从而保证更高的雨天行驶的视野清晰度和安全性。

直升机在飞行中也会遭遇昆虫撞击、穿越丛林等环境,虫胶残留带来的影响视线、腐蚀机体的问题同样不可忽视,亟待解决。低表面能材料由于表面能低、污物不易附着的特点被广泛应用于疏水/超疏水自清洁涂料<sup>[20-23]</sup>。本团队受此启发,通过采取主动防护和快速清洁两种方式相配合达到直升机表面的防虫胶及清洁设计的目的。具体研究思路如下。

在直升机外表面防蚊虫设计方面,通过低表面能防黏附涂料的涂覆,减少液滴与机体表面的接触



面积及接触时间,利于从源头减少虫胶的附着。尽管疏水/超疏水表面在防黏附方面效果显著,但存在用于疏水改性的低表面能物质与基材的附着力或黏结力差<sup>[24]</sup>,表面粗糙结构的稳定性、耐久性不好等问题。本团队考虑先构造低表面能表面,然后对其进行粗糙化处理的方式构建超疏水表面<sup>[25-27]</sup>。以端羟基聚烯烃、端羟基聚硅氧烷、氟化胺类固化剂为弹性低表面能基体树脂材料,通过低表面能偶联剂修饰纳米粒子,以具有优异的锚固作用的反应性表面修饰剂作为涂层的锚固材料,构筑疏水/超疏水功能表面,即利用弹性低表面能聚氨酯化合物耗散外界机械损伤<sup>[28-32]</sup>,在基材表面构建微相分离的疏水表面,并借助纳米粒子构筑粗糙结构,构建具有多层次微纳结构的超疏水涂层;通过对成分组成、形貌结构、浸润性、自清洁/易清洁性、稳定性、耐久性的分析,探索其构效关系。在此基础上,探索和优化构建疏水/超疏水表面的途径,以提高性能的稳定性和耐久性,为构建性能优异的防黏附表面奠定基础。超疏水防黏附涂层示意图如图2。

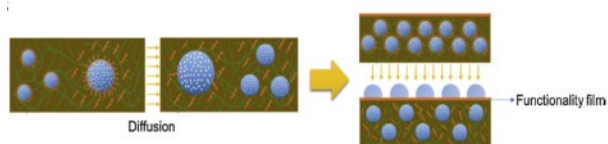


图2 超疏水防黏附涂层示意图

Fig.2 Schematic diagram of super-hydrophobic anti-adhesion coating

在直升机外表面虫胶清洁设计方面,在清洁剂需同样避免使用有机溶剂型清洗剂的方法,本团队研制了一种水基型虫胶的清洗液,并对不同配比用量多元有机胺类物质、表面活性剂、防锈剂以及助剂的清洗液配方进行筛选研究,防锈剂的添加可以减少对其他材料的腐蚀,从而实现低腐蚀性碱性溶液对虫胶的去除,同时保证环境友好和高效清洁。

### 3 现状总结对比及直升机应用难点分析

通过对虫胶清理技术国内外研究现状的分析发现,有机溶剂法由于其强挥发性和破坏性已逐步被淘汰,传统的机械法也被改进以减小对基体的损伤,碱性溶液也易带来基体损伤的问题,水基清洗剂由

于其清洁效果优、对基体腐蚀作用小、环境友好、适用范围广等特点成为当前去除虫胶的主要方法,有的清洗剂还具有可在低温条件下使用的优异性能。此外也有研究人员提出激光烧蚀、酶分解、机械研磨等方式去除虫胶,这些方法各有优势,但使用时会受基底材料、形状等特殊情况的限制。此外,疏水超疏水表面的研究也给予研究者一定的启发,构建这样的表面可以减少虫胶的黏附,从源头避免问题的产生,结合水基清洗法进行清洗,可以大幅优化虫胶的去除效果,且疏水表面还可以防止其他物质的附着提升玻璃及其他表面的清洁度。表2中具体列出了各种虫胶清洗技术的优缺点及适用范围。

从表2看来,对于直升机表面的虫胶清理,采取低表面能材料主动防护和水基清洗液快速清洁配合的方式是改善虫胶在直升机表面黏附问题的最佳解决途径,低表面能材料可以从主动防护的角度尽量减少虫胶的附着,尽量保证直升机飞行中风挡玻璃及腐蚀敏感部位的洁净,也减轻后续维护清理的工作量。水基清洗液可以在仍有少量虫胶黏附时以喷淋和刷洗的方式快速去除污物,保证表面清洁干净。

然而,在实际应用中还有很多难点亟待解决。相比其他虫胶黏附,直升机的虫胶黏附需要注意:第一,直升机在其整个生命周期中面临环境的复杂性。当直升机在经历高温高湿、盐雾、砂尘、雨水等腐蚀诱因环境时,这些环境因素可能会引起所黏附虫胶理化性质的变化,加剧腐蚀现象的发生。此外,还可能导致低表面能材料性能变化、清洗液失效等问题,甚至在环境作用下带来新的腐蚀现象。当直升机面临高温/高寒环境时,低表面能材料的结构稳定性以及与基底的结合强度等将面临考验,清洗剂中有机物的化学键可能会发生断裂。此外,高寒环境下清洗剂较难彻底去除,有可能残留在机体表面,也会导致机体的腐蚀。第二,直升机机体结构复杂,涉及的材料种类繁多。在低空飞行时直升机机身蒙皮、风挡玻璃、雷达/天线罩、桨毂等处都容易有虫胶附着,而机头、雷达罩等曲面结构的高曲率特征以及桨毂结构的复杂性,会增加低表面能材料涂覆的工艺难度以及清洗工作的困难。此外这些部位选用了多种材料和漆层,包括碳纤维复合材料、玻璃纤维复

表 2 各种虫胶清洗技术的优缺点及适用范围

Tab.2 Advantages and disadvantages and scope of washing technology

清洗技术	类型	优点	缺点	适用范围
传统有机溶剂型	化学方法	清洁效果好	具有强挥发性,污染环境损害健康,会对部件造成腐蚀	基材形状无限制,对基底材料有明显无腐蚀
碱性溶液水解	化学方法	组成简单且环保,清洁彻底	强碱性,易对基底造成损害	基材形状无限制,对基底材料有一定的无腐蚀
激光去除	物理方法	通过对参数的调控可以去除虫胶而不损害基材,避免机械或溶剂方法的其他风险,无溶液残留,不需后续处理	需要掌握脉冲强度及持续时间,以防止损伤基体,成本高,使用受限于基底形状	可用于形状简单的表面
水基清洗剂	化学方法	性能稳定,清洗力强,腐蚀性弱,对漆膜硬度无影响,无刺激性气味,降解性高。通过醇类物质复配可形成保护层,实现低温环境下使用	暂无	基材形状无限制,对常用金属、玻璃无腐蚀
机械法	物理方法	通过研磨方法去除,对基底无腐蚀,溶剂无挥发性,安全无害	受环境影响,研磨剂分散性会有变化,从而团聚对基底造成损伤	不适用于硬度较低的基底
活性酶分解	生物方法	采用亲水渗透技术降低虫胶附着特性,使其容易被剥离,生物降解性高,环境友好	弱碱性活性酶分解技术主要针对虫胶等分泌物作用	不适用于生物性材料制成的基底
低表面能防护材料	化学方法	表面能低、污物不易附着,预防为主,从根本上减少虫胶附着,通过粗糙结构构筑和锚固作用提高附着力和稳定性	附着力及稳定性有待进一步提高,技术尚不成熟	构建微相分离的疏水表面,可广泛适用于不同基材

合材料、玻璃表面的有机聚合物保护涂层、橡胶件等,低表面能材料的涂覆以及清洗剂的研制需考虑不同材料的适用性。以上情况为直升机的虫胶清理技术研究带来了难点,在研究工作中需要重点考虑。

4 总结和展望

综上,传统去除虫胶的有机溶剂法、机械法已逐步被淘汰,在众多新兴方法中,水基清洗液以其性能温和稳定、安全无害、可设计性强的优势成为首选方法。同时,纳米材料的发展和疏水/超疏水表面的兴起,也给防止虫胶黏附提供了新的思路,目前在海洋防污涂料、建筑自清洁表面等领域已开展了相关研究,利用主动防护和清洗液清洁两相配合的思路将是今后虫胶防护清理技术的发展趋势。目前水基清洗剂很大程度上减少了原先的挥发性和有害性有机物成分,也尽量降低了清洗对基底的损伤,但尚未充分考虑对贮存和使用环境的适应性,对基材的腐蚀影响验证方面,目前仅对部分材料进行了试验验证,不够全面,验证方式也较为简单,仅在常温大气环境

下进行。对于低表面能材料,需改善其与基材的附着力、结构的稳定性等,以获得更加优异耐久的涂层,进行微观结构设计与调控、工艺改进来提高其对各类使用环境的适应能力以及在不同材料、形状基底的适用性。例如需考虑投入到直升机使用后面临直升机停放、起飞、飞行、维护等状态的特殊复杂环境,在多种气候环境和易腐蚀环境的综合效应下低表面能材料、清洗剂会否失效、是否会导致新的腐蚀反应发生,能否在各种材料、各类形状表面正常使用,稳定性和耐久性如何等问题。

参考文献

[1] 赵世民, 祝艳, 唐辉. 虫胶的基本特性及应用[J]. 云南化工, 2005, 32(3): 50-53.

[2] 董勤, 邱坚, 和润喜, 等. 紫胶的改性研究[J]. 云南大学学报, 2004, 26(增刊): 157-159.

[3] Raymond G M, Robert D H. Shellac coatings for grape-fruits that favor biological control of penicillium digitatumby candida oleophila[J]. Biological Control, 1996, 7 (1): 100-106.

- [4] 李凯, 罗清明, 徐涓, 等. 绿色可降解紫胶树脂/明胶复合功能泡沫材料的构建[J]. 化工新型材料, 2021, 49(6): 88-92.
- [5] 贺近恪, 李启基. 林产化学与工业(第三卷)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [6] Farag Y, Leopold C S. Physicochemical properties of various shellac types[J]. Dissolution Technology, 2007, 16: 33-39.
- [7] Luangtana A M, Limmatvapirat S, Nunthanid J, et al. Effect of salts and plasticizers on stability of shellac film [J]. Journal of Agricultural Food Chemistry, 2007, 55(3): 687-692.
- [8] Hagenmaier R D, Shaw P E. Permeability of shellac coatings to gases and water-vapor[J]. Journal of Agricultural Food Chemistry, 1991, 39(5): 825-829.
- [9] Sontaya L, Chutima L, Manee L, et al. Modification of physicochemical and mechanical properties of shellac by partial hydrolysis[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2004, 278(1): 41-49.
- [10] Limmatvapirat S, Nunthanid J, Puttipatkhachorn S, et al. Effect of alkali treatment on properties of native shellac and stability of hydrolyzed shellac[J]. Pharmaceutical Development Technology, 2005, 10(1): 41-46.
- [11] Scott C L. An investigation into the chemistry and removal of unrefined shellac from ceramic substrates via hydrolysis[D]. California: University of California, Los Angeles, Conservation of Archaeological and Ethnographic Materials, 2012.
- [12] Eleni M A, Kristalia M, Anastasia P. The use of lasers for the removal of shellac from wood[J]. Preservation Science, 2008, 5: 36-40.
- [13] Liu M, Xu G, Wang J, et al. Effects of shellac treatment on wood hygroscopicity, dimensional stability and thermostability[J]. Coatings, 2020, 10(9): 881.
- [14] He Z B, Qian J, Qu L J, et al. Effects of tung oil treatment on wood hygroscopicity, dimensional stability and thermostability[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 140: 111647.
- [15] Li T, Cheng D L, Avramidis S, et al. Response of hygroscopicity to heat treatment and its relation to durability of thermally modified wood[J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 671-676.
- [16] 李丽, 夏海渤, 王浩, 等. 动车用环保水性清洗剂的研制及其性能[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37(5): 223-227.
- [17] 单来. 一种汽车玻璃清洁剂及其制备方法[P]. 中国, 201711419246.2, 2018.
- [18] 熊竹君, 廖畅生, 胡运华. 一种汽车玻璃清洁剂及其制备方法和应用[P]. 中国, 202110267709.8, 2021.
- [19] 侯悖, 王双田, 张静, 等. 去虫胶玻璃清洗剂[Z]. 北京: 2019.
- [20] 黄启舒, 许里杰. 超疏水自清洁涂料的研究与应用现状[J]. 化工新型材料, 2020, 48(5): 219-228.
- [21] 张云, 杨松, 艾迎春, 等. 船舶低表面能防污涂料现状及展望[J]. 全面腐蚀控制, 2020, 34(7): 42-45.
- [22] 高志强, 江社明, 张启富, 等. 含氟低表面能海洋防污涂料的研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(6): 273-279.
- [23] 叶向东, 蔡东宝, 侯俊文, 等. 超疏水、自清洁涂层对建筑墙体的防护[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12): 3271-3279.
- [24] 翁斌, 商丹, 金鹿江, 等. 含氟/PEG的有机硅基双亲防污涂层的制备及性能[J]. 高分子学报, 2017, 6: 990-998.
- [25] Meuler A J, Smith J D, Varanasi K K, et al. Relationships between water wettability and ice adhesion[J]. ACS Applied Materials & Interface, 2010, 2(11): 3100-3110.
- [26] 侯丽, 蒋欢, 王辉, 等. 超疏水防腐蚀涂层的研究进展[J]. 材料工程, 2020, 48(6): 73-81.
- [27] 李为民, 彭超义, 邢素丽, 等. PTFE/Epoxy全有机超疏水涂层制备[J]. 材料工程, 2020, 48(7): 162-169.
- [28] 余明明, 张映, 梁璐, 等. 基于有机硅改性聚氨酯弹性体的机翼前缘抗砂蚀防冰涂料[J]. 航空材料学报, 2021, 41(5): 28-34.
- [29] Ricco T, Passera S, Ramorino G, et al. Fracture resistance of rubbers with MWCNT, organoclay, silica and carbon black fillers as assessed by the J-Integral: effects of rubber type and filler concentration[J]. Express Polymer Letters, 2012, 6(7): 581-587.
- [30] Ramorino G, Agnelli S, Santis R D, et al. Investigation of fracture resistance of natural rubber/clay nanocomposites by J-Testing[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77(10): 1527-1536.
- [31] Preeyanuch J, Pattana K, Supa W, et al. Cut growth and abrasion behaviour, and morphology of natural rubber filled with MWCNT and MWCNT/carbon black[J]. Polymer Testing, 2015, 41: 172-183.
- [32] 汪怀远, 王恩群, 孟旸, 等. 超双疏耐磨 PPS 基涂层的制备与性能[J]. 材料工程, 2017, 45(1): 38-42.