

消光材料研究进展

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2024.02.011

赖登旺¹ 刘丽¹
吴昊¹ 操吴言¹
成浩¹ 李玉华¹
熊玉兵² 杨军³

- 湖南工业大学
包装与材料工程学院
湖南 株洲 412007
- 浙江理工大学
龙港研究院有限公司
浙江 龙港 325802
- 株洲时代新材料科技股份有限公司
湖南 株洲 412007

摘要: 消光材料是一种具有削弱光线作用的材料。由于消光材料具有优异的消光性能,因此广泛应用于需要表面呈现哑光效果的场景中。通过对消光材料的种类进行分类介绍,详细地对无机消光材料、有机消光材料和生物消光材料进行综述。对于生物消光材料侧重于考察可见光消光和红外消光两个方面的性能。生物消光材料因其环保无污染的特性,并且在可见光和红外消光方面具有优势,将会主导绿色消光材料的发展趋势。

关键词: 消光材料; 二氧化硅; 二氧化钛; 自消光水性聚合树脂; 生物消光材料

中图分类号: TQ63; TB34

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2024)02-0087-12

引文格式: 赖登旺, 刘丽, 吴昊, 等. 消光材料研究进展 [J]. 包装学报, 2024, 16(2): 87-98.

1 研究背景

消光材料是指能够消除所应用物质表面的光泽,使应用物质表面呈现哑光或消光效果的一类助剂。目前消光材料主要应用于涂料、皮革、化纤等领域。消光表面不同于镜面的高光效果,给人以高级低调的美学感受。同时,消光材料还可以减少物质表面对光线的反射,减轻光线对人眼的刺激,掩蔽一些表面缺陷,达到表面平整的视觉效果^[1-2]。消光材料主要分为无机消光材料、有机消光材料和生物消光材料。

无机消光材料多数采用二氧化硅、二氧化钛以及其他无机填料作为消光材料^[3]。二氧化硅是使用最广泛的一种无机消光材料,具有透明度好、消光效率高等优点。但二氧化硅表面含有大量的羟基基团、表面能高,在使用的过程中容易发生团聚,从而难以在涂料中分散,影响了涂料的流动性^[4]。市面上使用的二氧化硅大部分是通过气相法制备的具有较好分散性

的超细二氧化硅,其在制备的过程中会产生温室气体二氧化碳^[5],不利于环境保护。目前,气相法制备超细二氧化硅的方法主要有:四氯化硅、四氯化硅与甲基三氯硅烷混合生产气相二氧化硅两种。二氧化钛常用于消除涤纶、锦纶、氨纶等产品的极光,是化纤行业常用的消光材料。目前市场急需消光性能好、产量高、成本低廉的二氧化钛消光材料。一些无机填料,如:蒙脱土、硅藻土、滑石粉、氢氧化铝等,容易与其他材料进行复合、有一定的阻燃能力,可以制备出拥有复合性能的消光材料。无机填料在自然界中储量大、获取便利,但大多数存在难分散、易沉淀等问题,因此大大限制了其应用。

有机消光材料是采用有机高分子材料制得的消光材料,主要包括金属皂、合成高分子蜡、自消光聚合树脂。金属皂虽然应用时间早,但消光效果差、消光物体表面状态差,主要应用在低端市场。因此有必要研究金属皂其他方面的优势,以弥补目前金属皂

收稿日期: 2023-12-11

基金项目: 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(20C0585)

作者简介: 赖登旺(1984-),浙江苍南人,湖南工业大学讲师,博士,硕士生导师,主要研究方向为聚合物基纳米复合材料, E-mail: laidengwang@hut.edu.cn

的一些缺点。

合成高分子蜡具备抗刮伤、耐磨和触感良好等特点，然而高成本和干燥速度较慢等缺点，导致其实际应用并不广泛。

传统的聚合树脂消光通常需要外部添加消光材料，这不仅增加了成本，还容易造成分散不均、使涂料性能变差等问题。近年来，自消光聚合树脂因其无需额外添加消光材料，对涂料影响较小，以及对环境友好等特点，吸引了大量研究者的关注^[6]。

除了前述提及的问题外，无机消光材料和有机消光材料还面临另一个挑战，即它们在发挥消光作用时需要涂料发生明显的体积收缩。因此，它们主要适用于溶剂型涂料。但在使用的过程中，溶剂型涂料会产生很高的挥发性有机化合物（volatile organic compounds, VOCs）^[7-8]。长期处于VOCs的环境中会对人体造成严重危害。

生物消光材料具有密度低、粒径分布广、形态可控、环保等特点，而且其在可见光消光和红外消光方面均表现了优异的效果。因此，生物消光材料是今后研发的重点^[9-10]。

本文先归纳无机消光材料和有机消光材料的种类，并综述改善其应用中不足的相关研究；再着重从可见光消光和红外消光两个角度综述新型生物消光材料。

2 无机消光材料

无机消光材料具有良好的化学性质和稳定的光学性能，易于添加和使用且价格低廉，因而应用较为广泛^[11-13]。无机消光材料的消光机理是当光线入射到光滑表面时会由于光线的反射，产生镜面的效果，此时入射角等于反射角^[14]。而当光线入射到粗糙表面时，光线不能被直接反射，而是发生漫反射，使得表面光泽度下降，如图1^[15]所示。

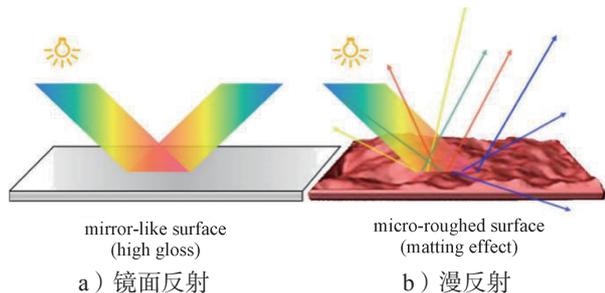


图1 表面粗糙度对光线的影响

Fig. 1 Influence of surface roughness on light

2.1 二氧化硅

二氧化硅消光材料是目前市场上使用最广泛的无机消光材料，其制备方法有气相法和液相法。二氧化硅的消光机理是，在涂料中添加二氧化硅，使其均匀分散在涂料内部，随着溶剂挥发和涂膜收缩，涂料表面由原来的光滑表面变成肉眼不可见的粗糙表面（见图2）。当光线入射到涂料表面时无法直接反射，而是发生漫反射，从而达到消光的效果^[16]。

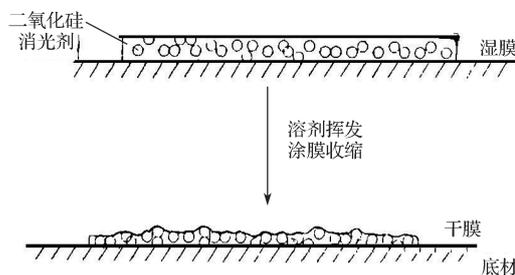


图2 二氧化硅消光材料消光机理

Fig. 2 Matting mechanism of silica matting materials

影响二氧化硅消光特性的因素主要是二氧化硅的孔隙率、平均粒径、粒径分布和表面处理。在相同的粒径分布下，高孔隙率二氧化硅的消光效率高于低孔隙率二氧化硅的。这是由于高孔隙率的二氧化硅密度更低，单位质量所含的二氧化硅颗粒数目更多，因此消光效果更好。在合适的粒径尺度下，粒径分布越窄，二氧化硅的消光效率越高。粒径过细，容易造成涂料黏度过高；粒径过大，会使涂料过度粗糙，影响视觉效果。此外，经过表面处理的二氧化硅往往表现出更加优异的消光性能。原因在于未经处理的二氧化硅表面含有大量的羟基。当与聚合物混合时，羟基往往形成较大的团簇，使得二氧化硅难以在涂料中均匀分散，进而影响二氧化硅的消光效果。因此，制备二氧化硅消光材料时通常会对二氧化硅进行表面改性。

常见二氧化硅表面改性的方法有醇酯法、硅烷偶联剂法、表面接枝聚合法、有机蜡乳液法、包覆法^[2]。醇酯法是利用醇类的羟基与二氧化硅的羟基进行反应消除团聚影响；硅烷偶联剂法的原理是硅烷偶联剂水解后可以与硅羟基进行反应；表面接枝聚合法是利用其余物质接枝并替换二氧化硅羟基的位置；有机蜡乳液法根据混合方法分为机械混合法和乳化蜡法；包覆法的原理是将聚合物包覆在粒子表面从而改变粒子的表面性能。

Xu Q. N.^[17]、Yang Z. Y.^[18] 等利用原位表面修饰

法分别制备了表面覆盖六甲基二硅氮烷(1, 1, 1, 3, 3, 3-hexamethyldisilazane, HMDS)的二氧化硅和接枝异氰酸酯的二氧化硅。改性二氧化硅的机理是利用HMDS或者异氰酸酯与二氧化硅表面的活性羟基反应,从而达到消除二氧化硅表面活性羟基的目的。I. Calvez等^[19]通过将丙烯酸酯单体引入二氧化硅表面来消除羟基的影响,增加与丙烯酸酯基涂料的相容性。Ma H.等^[14]制备了一种哑光环保水性聚氨酯涂料。通过接枝N-(β -氨基乙基)- γ -氨基丙基三乙氧基硅烷到二氧化硅表面改性二氧化硅,再与异氰酸酯反应,减弱了二氧化硅消光材料的团聚效应。同时,制备的聚氨酯涂料在黏度、VOCs排放、保存时间方面均有较好的表现。

皮革产品在使用时,会有各种微生物繁殖,并对皮革产生侵蚀^[20]。因此,当消光材料应用在皮革上时,除了要研究其消光效果外,还需要结合皮革的使用场景,注重抑菌性能的研究。牛润林^[21]制备了纳米二氧化硅吸附银离子抗菌剂,并利用大肠杆菌和金黄色葡萄球菌作为测试菌种,研究了其抗菌性能。结果表明,纳米二氧化硅载银抗菌剂具有良好的抗菌效果。

2.2 二氧化钛

二氧化钛消光材料的消光原理是基于二氧化钛与基体本身的折射率之差。当二氧化钛的折射率大于基体的折射率时,便可消除极光现象,使得基体呈现哑光、不透明的外观^[22]。影响二氧化钛消光性能的因素有粒径分布、分散性、杂质含量和晶体类型。粒径分布越窄、分散性能越好的二氧化钛消光材料,通常表现出最佳的消光性能。市场上通常出售的主要成分为二氧化钛的钛白粉,其消光性能易受铁、铬、铜等杂质的影响。杂质越多,二氧化钛含量越低,消光效果越差。此外,不同晶型的二氧化钛消光材料的消光性能同样存在差异。

涤纶由于其良好的物理和化学性能而被广泛应用^[23]。然而,当光线照射到涤纶表面时会形成极光,降低了涤纶的美观程度。因此,在化纤行业制备涤纶时,主要是采用二氧化钛对其进行消光处理^[24]。

路广等^[24]将金红石型二氧化钛和锐钛矿型二氧化钛粉末应用于聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)。在温度相同时,添加金红石型二氧化钛的PET熔体的表观黏度对剪切力的变化,比添加锐钛矿型二氧化钛的更加灵敏,且在使用过程中需要更加严格的工艺条件。Kang M.等^[25]研究发现,

随着二氧化钛晶型从未定形转化为金红石型,其消光系数明显增强。A. Chanda等^[26]采用溶液-凝胶旋涂法制备了二氧化钛薄膜,研究了多层二氧化钛薄膜不掺杂和掺杂钴后的光学性能变化。在一层、三层、七层二氧化钛薄膜中掺杂质量分数为5%的钴后,在可见光范围内均表现出较好的消光效果。未掺杂钴的单层二氧化钛薄膜,在可见光范围内消光系数几乎为0。A. Rastar等^[27]研究了将粒径为40 nm的二氧化钛与尼龙6复合后形成的复合材料的光学性能。结果表明,复合材料对短波光的散射能力比对长波光的更强。

2.3 其他无机填料

用于消光的其他无机填料主要有蒙脱土、硅藻土、滑石粉和氢氧化铝等。其消光的机理是利用填料在被涂膜物体的表面产生粗糙的界面,然后对光线进行散射,从而达到消光的目的。影响无机填料消光性能的因素主要是无机填料的种类、用量以及粒径大小。无机填料用量越大,消光效果越显著,但是增加无机填料的使用量可能导致涂料脆性增大、相容性变差等问题。无机填料的粒径越大,目数越小,越能够形成凹凸不平的表面,进而增强对光线的散射能力,提高消光效率。

M. I. Binay等^[28]以高岭土为原料制备了高结晶度的沸石,再将 Ag^+ 和 Zn^{2+} 与沸石进行二元阳离子交换制备涂料。结果表明,通过二元阳离子交换制备涂料,耗费的银较少,降低了原料成本,而且涂料有较好的抗菌效果。Ding Z. M.等^[29]通过添加有机蒙脱土纳米片(organic montmorillonite, OMMT),制备出低光泽度水性聚氨酯涂料。该涂料不仅具有哑光效果,还有一定的阻燃能力。随着OMMT含量的增加,涂料对皮革的消光效果越好。其消光机理是OMMT使皮革表面呈现出更多的突起,造成表面不平整,光线在皮革表面发生较为明显的漫反射。W. Mertens^[30]研究了重晶石和氢氧化铝(aluminum trihydroxide, ATH)的粒径分布对涂料消光作用的影响。结果表明,重晶石和ATH的粒径越大,其消光效果越好。Li W. H.等^[31]以氢氧化铝作为填料应用在粉末涂料中,研究涂料的流动性、力学性能以及消光性能等。结果表明,随着ATH用量的增加,粉末涂料的铅笔划痕硬度提高,光泽度明显降低。其消光机理是,ATH具有亲水性,与涂料体系不相容,很容易悬浮到涂料表面;同时ATH

具有高吸油量,其粒子会大量聚集在涂料表面,进而达到涂料表面消光的效果。

3 有机消光材料

3.1 金属皂

金属皂的消光机理是利用金属皂与涂料的不相容性。随着漆膜逐渐收缩,金属皂以极细悬浮物形态存在并分布在漆膜表面。这样形成的粗糙表面大大减少了漆膜表面的镜面反射,从而产生哑光效果^[32]。影响金属皂消光效率的因素有吸油量和粒径分布。粒径分布越窄,金属皂的分布越均匀,形成的消光表面光泽度一致,消光效果更加优良。此外,在相同的粒径大小下,吸油量越大,消光效果越理想。

目前常用的金属皂有硬脂酸铝、硬脂酸锌和硬脂酸钙。然而,使用金属皂进行消光时,金属皂易浮在涂料表面,影响漆膜的质量;此外,金属皂在涂料中分布不均匀,可能会导致漆膜光泽不一致,影响消光效果^[33]。尽管如此,硬脂酸金属皂还可以在涂料中起到干燥剂的作用^[34-35]。因此,如果能在保留金属皂干燥性能的基础上,进一步提高金属皂的消光性能,将有希望获得性能优越的金属皂消光材料。

E. A. Essien等^[36],以甜瓜籽油为原料,制备了锌、铜、镍三种金属皂,将其作为干燥剂应用于光泽涂料中。性能测试表明,金属皂在涂料基体中具有催化剂的作用,缩短了干燥时间。但是,并非所有金属皂在涂料中的应用都是有益的。例如金属皂的形成对于油画的保护反而不利^[37]。

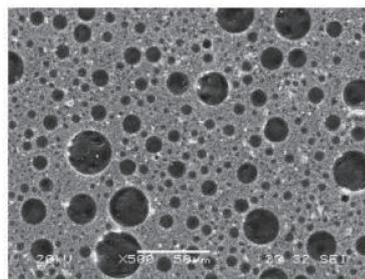
3.2 合成高分子蜡

合成高分子蜡是指通过人工合成的相对分子质量为1800~8000的聚烯烃合成蜡^[32]。合成高分子蜡的消光机理是,通过将微小的蜡粒子排在漆膜表面,随着溶剂挥发蜡粒子发生悬浮。当光线照射漆膜表面时发生漫反射,从而起到消光的作用^[38]。合成高分子蜡的粒径是影响其消光性能的主要因素。一般情况下,在合适的粒径分布范围内,粒径越大,消光效果越好。目前,应用较广泛的是超细蜡,包括聚乙烯蜡、聚丙烯蜡和聚四氟乙烯蜡^[39]。

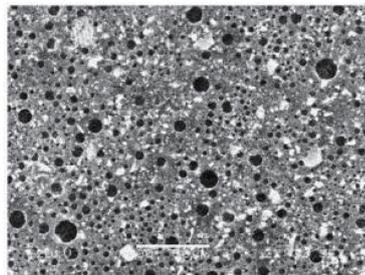
使用蜡进行消光也存在一些问题,例如,蜡会影响涂料溶剂的挥发以及氧气的进入;会影响涂膜的干燥时间和复涂效果^[40];会使涂料过度爽滑、与密封胶的附着力降低,从而影响用户使用^[30]等。

李瑞容等^[41]对国内外制备聚乙烯蜡微粉的工艺

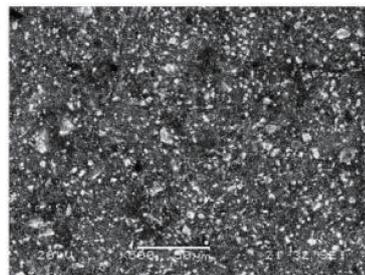
进行了比较,提出了一种可制备粒径小而分布均匀,可调控粒径大小和操作流程简单的超临界快速膨胀技术,解决了传统制备方法成本高、流程复杂以及粒径大等问题。M. Gunde等^[42]研究了不同种类的蜡、填料和不相容树脂(消光硬化剂)作为消光材料应用于粉末涂料的效果,如图3所示。使用较大粒径的蜡时,涂料的镜面光泽度最低。这是由于蜡与涂料不相容,蜡在涂料表面形成边缘突出的微观结构,使得涂料表面平滑度下降,从而起到消光的作用。Wang W. X.等^[43]研究了聚乙烯蜡在粉末涂料中的应用效果。结果表明,随着聚乙烯蜡含量的增加,涂料的光泽度下降;但过量的聚乙烯蜡会对涂料体系的稳定性产生影响。Yong Q. W.等^[15]对哑光涂料技术进行了研究,指出合成高分子蜡具有较好的触感、防水、防黏、稳定性好等特性,可广泛用于现代涂料体系。



a) 蜡消光



b) 蜡和填料消光



c) 不相容树脂消光

图3 不同消光材料的哑光涂层表面扫描电镜图

Fig. 3 SEM micrographs of matte coating surfaces with different matte materials

3.3 自消光聚合树脂

涂料的消光主要有外添加消光材料消光和自消光两种方式。外添加消光材料的消光机理是, 将消光材料添加到涂料体系中, 溶剂蒸发成膜后, 消光材料暴露在涂层表面, 涂料表面出现凹凸不平的现象, 从而达到消光的目的。自消光聚合树脂的消光机理是, 利用聚合树脂本身的结构与化学性质, 例如相容性、固化温度等的差异, 或者引入对特定光线具有吸收作用的官能团, 最终达到消光的目的。

外添加消光材料的方式, 存在消光材料与涂料相容性差的缺陷, 即容易引起涂料黏度增加、脆性增强, 外添加消光材料分散不均等问题^[44-46]。因此, 目前学者们主要致力于自消光聚合树脂(如: 水性聚氨酯(waterborne polyurethane, WPU)、水性丙烯酸酯聚合物等)的研究, 并应用于涂料中。

影响自消光聚合树脂消光性能的因素有乳液粒径、官能团的种类、软硬链段含量。乳液粒径越小, 形成的表面越光滑, 达不到消光的效果; 但过大的乳液粒径会使涂料表面过度粗糙。高折射率的官能团, 例如酯基、芳基等基团, 会降低消光效率。此外, 硬链段含量越高, 消光效果越差。

Li J. J. 等^[47]制备了不需额外添加消光材料, 具有自消光能力的WPU, 探究了2-[(2-氨基乙基)氨基]乙基磺酸钠盐(A95)和水合肼的含量对WPU薄膜的影响。随着A95含量的增加, WPU薄膜的光泽度

普遍增高, 而随着水合肼含量的增加, 光泽度普遍下降。这是因为强亲水性的A95大量存在时, 会促使乳胶粒子相互交联, 有助于WPU成膜, 从而增加薄膜的光泽度; 水合肼含量增加会使乳胶粒子逐渐成球形形成粗糙表面。Yong Q. W. 等^[46]利用磺酸和羧酸制备了一种新型羧酸盐/磺酸盐型水性自消光聚氨酯, 有别于传统合成水性聚氨酯的方法, 合成的过程中不需要加入任何有机溶剂来降低预聚物黏度, 因此具有很好的环境友好性。Meng Y. Y. 等^[48]提出了一种制备自消光交联丙烯酸酯树脂涂料的绿色合成方法。研究表明, 增加交联剂的含量会导致聚酯薄膜的光泽度降低, 这是因为交联剂形成的交联结构可以限制聚酯乳液的移动, 从而使得乳液颗粒聚集, 形成粗糙表面。

除此以外, 越来越多的研究人员开始探索具有核壳结构的自消光聚合树脂。Xie T. L. 等^[49]合成了一种具有核壳结构的水性自消光丙烯酸酯聚合物。其消光机理是利用 γ -甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷作为交联剂与丙烯酸酯进行聚合反应, 硅烷氧基进一步水解形成硅羟基, 并通过聚合作用形成一种三维网状结构^[50]; 同时丙烯酸酯聚合物和硅氧烷链段发生微相分离, 二者共同作用使丙烯酸酯聚合物产生自消光的效果。烷氧基硅烷的交联过程如图4所示。Liu Q. 等^[51]采用溶液聚合和相转化法, 制备了一种不添加乳化剂的自消光水性聚氨酯-聚丙烯酸酯核壳结构共聚物杂化分散体。其消光机理是利用聚丙烯酸酯

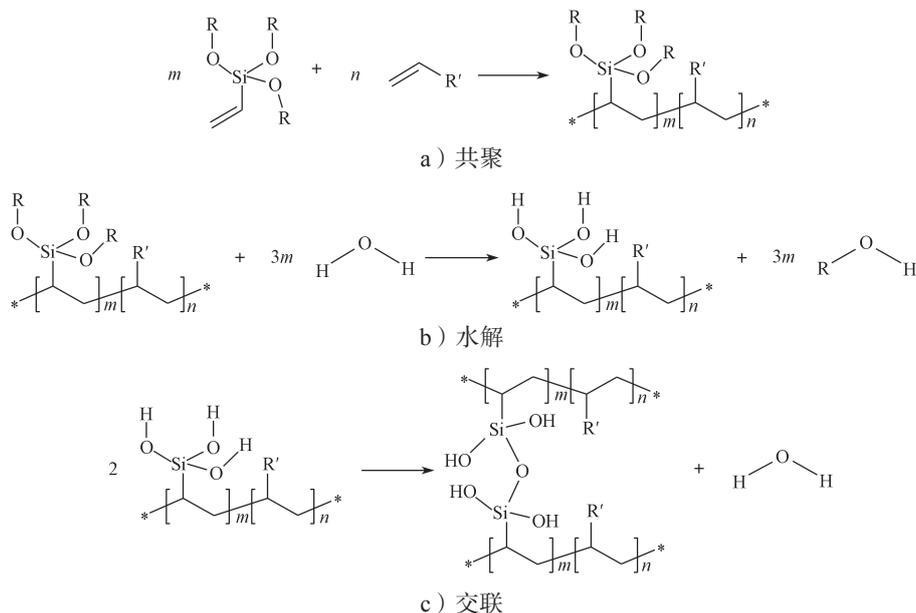


图4 烷氧基硅烷的交联过程

Fig. 4 Crosslinking process of alkoxy silane

的亲水性和聚氨酯的疏水性。A. B. Lopez 等^[52]采用乳液聚合法，合成了一种具有成膜黏合和自消光特性双重功能的水性含氟聚合物，然后将其引入涂料配方中。研究发现，随着氟化树脂含量的增加，涂料的光泽度下降。Xie T. L. 等^[39]研究了自消光聚合树脂表面粗糙度的构造和膜成分的设计方法。结果表明，调整组分中不同聚合物的表面张力差异，引入不相容单体促进微相分离，合成粒径较大的聚合物乳液颗粒，是获得粗糙表面的基本策略。

4 生物消光材料

生物消光材料是指具有一定消光功能的生物材料和生物气溶胶，例如黑曲霉孢子、絮状生物颗粒、雾化枯草芽孢杆菌等。生物消光材料具有环保无污染、易降解的优点，将是消光材料的重要发展方向^[53-59]。

4.1 可见光消光

生物消光材料对可见光的消光机理仍然是光的散射原理。生物消光材料使物体表面形成肉眼不可见的粗糙颗粒，增强表面的散射作用，从而达到消光的目的。影响生物消光材料消光效果的主要因素有：材料的种类，气溶胶粒子的形状、大小、聚集形态等。

Ma C. Y. 等^[56]采用离散偶极子近似法^[60]对原核多细胞蓝藻辐射特性进行了理论分析，建立了球链状、囊链状、螺旋状三种形态的蓝藻细胞模型，如图5所示。研究发现，三种蓝藻细胞的消光截面随380~750 nm范围内波长的增大均呈现整体下降趋势。R. Krijns 等^[61]发现了一种由细菌发酵产生的天然多羟基羧酸聚合物，如图6所示。该生物聚合物不仅消光效果优于聚乙烯（polyethylene, PE）蜡、PE/聚四氟乙烯（polytetrafluoroethylene, PTFE）组合消光蜡，而且对环境友好，完全可生物降解。P. Hochmańska-Kaniewska 等^[62]研究发现，纳米微晶纤维（nanocrystalline cellulose, CNC）生物聚合物可降低水性丙烯酸涂料光泽度。其原因可能是由于CNC的分散性较差，随着CNC含量的增加发生聚集，从而产生消光现象。Meng Y. Y. 等^[63]采用环氧大豆油制备的聚氨酯/丙烯酸酯薄膜具有较好的消光效果。采用环氧大豆油制备多元醇，进而合成聚氨酯，替代使用石油衍生多元醇制备聚氨酯，减少了化石资源使用，保护了环境。

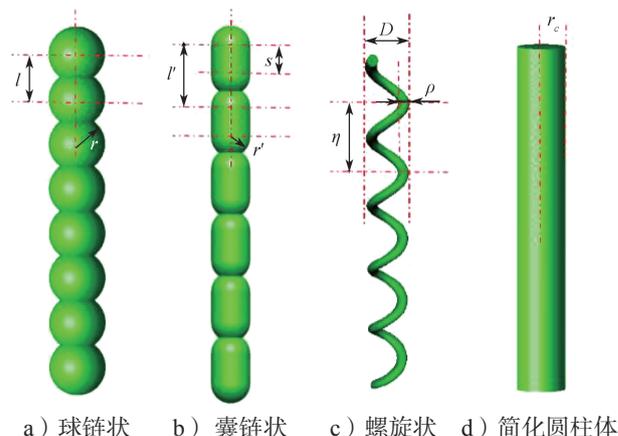


图5 三种细胞模型和简化的圆柱体模型

Fig. 5 Three cell models and simplified cylindrical model

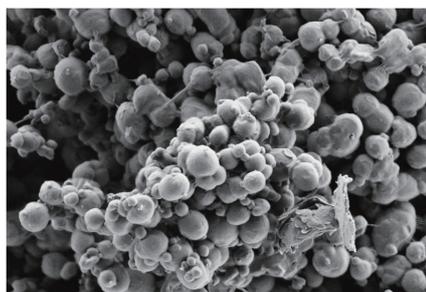


图6 生物聚合消光材料扫描电镜图

Fig. 6 Scanning electron microscopy image of biopolymer-based light-extinguishing agent

4.2 红外消光

在军事领域，红外消光技术被广泛应用在对抗红外侦查、可见光侦查方面，比较典型的是抗红外烟幕技术。抗红外烟幕技术的原理是利用气溶胶粒子形成的烟幕，对光进行吸收和散射，从而降低被侦测到的可能性^[64-65]。影响气溶胶粒子消光性能的主要因素是气溶胶粒子的形状和粒子的粒径。粒子的形状越偏离球形，对近红外段辐射的透过率越低。因此，针状、片状以及表面粗糙的气溶胶粒子在红外波段的消光性能更好。此外，气溶胶粒子的团聚会导致粒径增大，从而降低其在红外波段的消光能力。目前，传统的红外消光材料主要是金属粉、红磷、有机卤化物以及碳粒源物质等。时家明^[66]和Wang X. Y.^[67]等均比较了石墨与其他消光材料的消光性能。结果表明，在测试的波段内，石墨的消光效果优于其他消光材料。另外，Wang H. X. 等^[68]的研究结果表明，添加碳纳米管的烟雾材料能够有效地掩盖物体，具备出色的红外消光能力。

传统的抗红外材料, 如红磷、金属或合金粉等的燃烧产物对人体和环境有较大的危害。因此, 无污染、无毒害的环保型抗红外烟幕材料是今后主要的研究方向^[69-70]。气溶胶是由悬浮在气态介质中的固态或液态粒子所形成的一种分散体系。生物气溶胶是指含有生物粒子的气溶胶^[71-74]。

Zhao X. Y. 等^[75]对生物气溶胶和传统红外消光材料的消光性能进行了比较。如图 7 所示的 6 种生物气溶胶中, AN、AO、BB 孢子生物气溶胶, 在 3~5 μm 和 8~14 μm 红外波段内的质量消光系数虽然低于石墨和铝粉, 但是高于二氧化硅、铜、铁以及红磷。Wang X. Y.^[76]、Zhao X. Y.^[77] 等利用团簇-团簇模型和离散偶极子近似法, 研究了凝聚的生物气溶胶粒子的消光能力。结果表明, 提高生物气溶胶的消光能力可以通过增大原始粒子半径或者减小凝聚粒子的孔隙率来实现; 聚集的生物气溶胶会降低质量消光系数; 聚集粒子数目与孔隙率呈正相关, 而聚集粒子的孔隙率与气溶胶的消光能力呈负相关。陈曦等^[78]对

生物凝聚粒子远红外波段消光特性进行了研究。结果表明, 该生物粒子呈现球状、中空的结构, 表面有不平滑的褶皱。这种结构可以削弱光的反射, 光以吸收或漫反射的形式呈现, 从而达到消光的效果。Gu Y. L. 等^[79]提出了一种静态与动态相结合的分析方法, 并结合光谱仪和烟箱测试, 研究了 6 种生物材料的消光系数。结果表明, 生物材料的孢子在中红外波段的消光能力均强于生物材料的菌丝体。李乐等^[80]测量了黑曲霉孢子在 2.5~15 μm 波段的反射光谱。结果表明, 随着孢子粒径增大, 平均质量消光系数减小, 呈现单调递减的趋势; 而随着波长增加平均质量消光系数呈现波动性下降。K. P. Gurton 等^[53]测量了悬浮枯草杆菌黑色变种内孢子在 3~13 μm 波段的红外光谱消光特性。结果表明, 当波长在 6 μm 以上时, 主要是由于光的吸收作用而达到消光的效果。Wang P. 等^[81]研究了 7 种微生物材料对电磁信号的消光能力。结果表明, 虫生真菌 Bb3088 孢子和虫生真菌 Ma2677 孢子均有较好的消光效果。

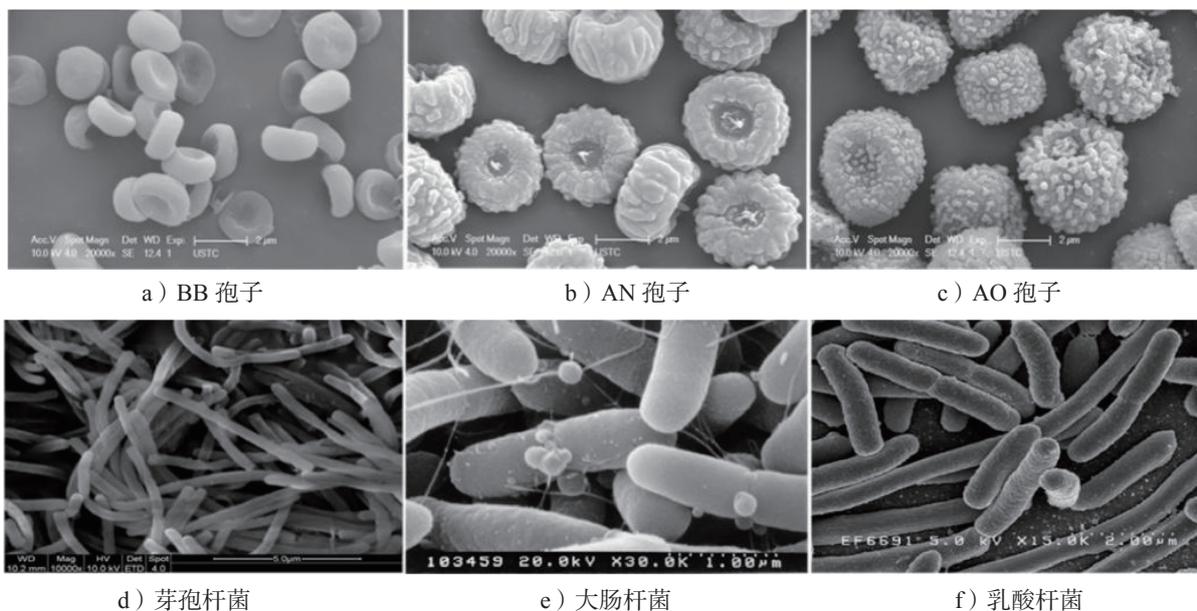


图 7 6 种微生物电镜图

Fig. 7 Electron microscope images of 6 kinds of microorganisms

5 消光材料的发展趋势

5.1 技术完善化

二氧化硅是一种应用广泛的消光材料。目前, 我国对二氧化硅表面改性的技术不够完善, 制备的二氧化硅消光产品粒径分布较宽、质量不够稳定。因此, 改善二氧化硅消光材料的分散性能、提高二氧化硅在

使用中的透明度、增加二氧化硅的孔隙率是主要的发展方向。

采用传统合成高分子蜡的方法所制备的微粉, 存在成本高、流程复杂以及粒径过大等问题, 需要完善当前的技术, 简化生产流程并开发新的合成技术。传统消光聚酯的制备过程中, 通常是直接加入二氧化钛消光材料, 但由于技术的缺陷, 制备的消光聚酯存

在质量不稳定、消光效率低、成本高等问题。因此，必须改进聚合工艺和技术，提升产品质量。

5.2 功能多样化

无机填料，例如高岭土、硅藻土、滑石粉等具有自身的结构特点，容易与其他材料进行复合和表面改性，具备发展多功能消光材料的潜质，可以制备出具有抗菌、阻燃、抗划伤等功能的消光材料。然而，使用这些无机填料消光时需要较大的用量，易造成涂料的物理性能变差，例如脆性增强、相容性变差、附着力降低等。

金属皂是使用较早的一种消光材料，但存在分布不均、光泽度不一致的问题，因此主要应用于低端消光产品。金属皂在塑料工业中可以用作热稳定剂，在涂料工业中可以用作干燥剂，在纺织工业中可以用作防水剂等。因此，可将金属皂的消光功能与其它功能有机结合，制备出适用于不同场景的复合消光材料。

5.3 环境友好化

随着全球环保意识的不断提高，我国也相继出台了各项环境保护政策。在这一背景下，环境友好型消光材料将成为未来的发展方向。

自消光聚合树脂不仅能解决外添加消光材料产生的相容性问题，而且能够节约成本、简化使用工序，是一种性能优良的消光材料。目前，使用石油衍生多元醇来制备自消光聚合树脂的方法，存在依赖石油资源和环境污染问题。因此，用植物基材料制备自消光聚合树脂，以及水性自消光聚合树脂的研发，有利于环境保护。

生物消光材料是一种天然的生物材料，无需复杂的合成工艺，不仅可节约能源，还不会污染环境。因此，生物消光材料具有良好的发展前景。

6 结语

消光材料已广泛应用于社会各个领域，但在不同的场景下应用效果不同，需要调整和改善材料的性能。例如，在涂料领域需要解决消光效果和涂料的分散性问题；在皮革方面则是要关注消光后皮革的拉伸强度和使用寿命问题；在化纤方面则是要关注消光后化纤的拉伸性能。

二氧化硅消光材料需要通过表面改性来克服羟基团聚现象，改善其分散性。二氧化钛消光材料作为化纤行业的重要辅助材料，需要进一步提高消光效果，降低材料成本。对于其他无机填料，要根据其各

自的物理化学性能，研制出具有特定功能的消光材料。用传统外添加消光材料制备的涂料，存在制造成本高、消光效率低、应用范围窄等问题，一定程度上制约了其长远发展。因此，应重点研究极具发展潜力自消光聚合树脂。传统红外消光材料的燃烧产物会对人体和环境产生较大的危害，因此迫切需要研发具有毒性低、环境友好的消光材料。生物消光材料具有环保安全、消光范围广、粒径小等优点，是一种新型消光材料。生物消光材料在红外波段具有优越的消光性效果，但对可见光的消光效果有待进一步提高。

参考文献:

- [1] MASKERY S E. Development and Applications for Matting Agents[J]. Pigment & Resin Technology, 1973, 2(4): 11-19.
- [2] 杨波. 硅胶改性制备二氧化硅消光剂的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
YANG Bo. Study on Preparation of Silica Matting Agents by Silica Gel Modification[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [3] CALVEZ I, DAVOUDI S, SZCZEPANSKI C R, et al. Low-Gloss UV-Curable Coatings: Light Mechanisms, Formulations and Processes a Review[J]. Progress in Organic Coatings, 2022, 171: 107039.
- [4] HUAJAIKAEW E, PIROONPAN T, BOONCHAROEN K, et al. Comb-Like Poly(Dodecyl Methacrylate) Modified SiO₂ Nanoparticles as Nanohybrid Coatings: Electron Beam Grafting and Tuning Superhydrophobic/Water-Repellent Surface Studies[J]. Progress in Organic Coatings, 2022, 163: 106658.
- [5] 杜海晶, 吴春蕾, 段先健, 等. 超细二氧化硅消光剂[J]. 广东化工, 2014, 41(12): 243-244, 246.
DU Haijing, WU Chunlei, DUAN Xianjian, et al. Ultrafine Silica Matting Agent[J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(12): 243-244, 246.
- [6] ZHANG J X, CHEN J, LONG Z Z, et al. The Functionalization of Film Materials for Grafting WPU with Polystyrene Hollow Microspheres[J]. Progress in Organic Coatings, 2023, 182: 107685.
- [7] 林晓峰, 曾春龙. 环保型涂料的消光技术[J]. 涂料工业, 2003, 33(10): 47-49.
LIN Xiaofeng, ZENG Chunlong. Extinction Technology of Environmental Protection Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2003, 33(10): 47-49.
- [8] JIMÉNEZ-LÓPEZ A M, HINCAPIÉ-LLANOS G A.

- Identification of Factors Affecting the Reduction of VOC Emissions in the Paint Industry: Systematic Literature Review-SLR[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 170: 106945.
- [9] 李乐, 胡以华, 王泉, 等. 生物消光材料的扩散特性[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(6): 0621001.
LI Le, HU Yihua, WANG Xiao, et al. Diffusion Characteristics of Biological Extinction Material[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0621001.
- [10] 陆卫, 顾有林, 方佳节, 等. 多分散生物凝聚粒子 10.6 μm 激光消光性能研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(4): 0401019.
LU Wei, GU Youlin, FANG Jiajie, et al. 10.6 μm Laser Extinction Performance of Polydisperse Biological Aggregate Particles[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401019.
- [11] 杜玉成, 史树丽, 丁杰, 等. 煅烧硅藻土消光剂对涂层表面光散射的影响[J]. *中国粉体技术*, 2010, 16(2): 31-33, 44.
DU Yucheng, SHI Shuli, DING Jie, et al. Research on Light Scattering Effect of Calcined Diatomite Matting Agent in Coating Surface[J]. *China Powder Science and Technology*, 2010, 16(2): 31-33, 44.
- [12] 杜玉成, 史树丽, 郭振广, 等. 煅烧硅藻土消光助剂制备与应用研究[J]. *非金属矿*, 2009, 32(6): 20-22, 29.
DU Yucheng, SHI Shuli, GUO Zhenguang, et al. Synthesis and Application Research on Extinction Effect of Calcined Diatomite[J]. *Non-Metallic Mines*, 2009, 32(6): 20-22, 29.
- [13] 贺丽丽, 高翔, 盛超, 等. 低光泽度聚丙烯材料的研究[J]. *汽车工艺与材料*, 2019(10): 68-72.
HE Lili, GAO Xiang, SHENG Chao, et al. Research on Low Gloss Polypropylene[J]. *Automobile Technology & Material*, 2019(10): 68-72.
- [14] MA H, LIU Y C, GUO J H, et al. Synthesis of a Novel Silica Modified Environmentally Friendly Waterborne Polyurethane Matting Coating[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 139: 105441.
- [15] YONG Q W, XU D, LIU Q, et al. Advances in Polymer-Based Matte Coatings: A Review[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2022, 33(1): 5-19.
- [16] 林晓峰. 谈谈消光剂的选择[J]. *涂料工业*, 1998, 28(3): 38-40.
LIN Xiaofeng. On the Selection of Matting Agent[J]. *Paint & Coatings Industry*, 1998, 28(3): 38-40.
- [17] XU Q N, JI T C, TIAN Q F, et al. Structural Adjustment of In-Situ Surface-Modified Silica Matting Agent and Its Effect on Coating Performance[J]. *Nano*, 2018, 13(12): 1850137.
- [18] YANG Z Y, WU J B, MA G Z, et al. Effect of the Particle Sizes of Silica on the Properties of UV-Curing Matting Coatings[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2021, 18(1): 183-192.
- [19] CALVEZ I, SZCZEPANSKI C R, LANDRY V. Preparation and Characterization of Low Gloss UV-Curable Coatings Based on Silica Surface Modification Using an Acrylate Monomer[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2021, 158: 106369.
- [20] FALKIEWICZ-DULÍK M. Leather and Leather Products[M]//FALKIEWICZ-DULÍK M, JANDA K, WYPYCH G. *Handbook of Material Biodegradation, Biodeterioration, and Biostabilization*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2015: 133-256.
- [21] 牛润林. 抗菌消光皮革涂饰剂的制备[J]. *山西化工*, 2017, 37(6): 15-17.
NIU Runlin. Preparation of Leather Finishing Agent with Antibacterial and Extinction[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2017, 37(6): 15-17.
- [22] 唐振宁. 化纤用二氧化钛的制备[J]. *涂料工业*, 1999, 29(6): 19-22.
TANG Zhenning. Preparation of Titanium Dioxide for Chemical Fiber[J]. *Paint & Coatings Industry*, 1999, 29(6): 19-22.
- [23] 张师民. 聚酯的生产及应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 1997: 1-4.
ZHANG Shimin. *Production and Application of Polyester*[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 1997: 1-4.
- [24] 路广, 李映, 闻秀银, 等. 不同晶型 TiO_2 消光 PET 的流变性能研究[J]. *合成纤维工业*, 2021, 44(2): 27-31.
LU Guang, LI Ying, WEN Xiuyin, et al. Study on Rheological Properties of Dull PET with TiO_2 in Different Crystal Forms[J]. *China Synthetic Fiber Industry*, 2021, 44(2): 27-31.
- [25] KANG M, KIM S W, PARK H Y. Optical Properties of TiO_2 Thin Films with Crystal Structure[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2018, 123: 266-270.
- [26] CHANDA A, JOSHI S R, AKSHAY V R, et al. Structural and Optical Properties of Multilayered Undoped and Cobalt Doped TiO_2 Thin Films[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 536: 147830.
- [27] RASTAR A, YAZDANSHENAS M E, RASHIDI A, et al. Estimation and Prediction of Optical Properties of PA6/ TiO_2 Nanocomposites[J]. *Arabian Journal of*

- Chemistry, 2017, 10: S219-S224.
- [28] BINAY M I, KIRDECILER S K, AKATA B. Development of Antibacterial Powder Coatings Using Single and Binary Ion-Exchanged Zeolite a Prepared from Local Kaolin[J]. Applied Clay Science, 2019, 182: 105251.
- [29] DING Z M, LI J, XIN W, et al. Low Gloss Waterborne Polyurethane Coatings with Anti-Dripping and Flame Retardancy via Montmorillonite Nanosheets[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 136: 105273.
- [30] MERTENS W. Gloss Control of Powder Coatings by Engineered Mineral Fillers[J]. Pitture E Vernici, 2019, 95(3): 10-13.
- [31] LI W H, FRANCO D, YANG M, et al. Investigation of the Performance of ATH Powders in Organic Powder Coatings[J]. Coatings, 2019, 9(2): 110.
- [32] 张晓镭, 张哲. 皮革消光涂饰原理及消光剂的合成方法[J]. 中国皮革, 2007, 36(1): 18-21.
ZHANG Xiaolei, ZHANG Zhe. Principle and Synthesis of Leather Matting Finishing Agent[J]. China Leather, 2007, 36(1): 18-21.
- [33] 怀旭, 杭祖圣, 王章忠, 等. 基于亚光涂料的消光技术研究进展[J]. 高分子通报, 2016(11): 39-44.
HUAI Xu, HANG Zusheng, WANG Zhangzhong, et al. Research Progress in Fabrication of Matt Paints[J]. Polymer Bulletin, 2016(11): 39-44.
- [34] 张锦德. 金属皂的制备及其应用[J]. 日用化学工业, 1991, 21(6): 33-35.
ZHANG Jinde. Preparation and Application of Metal Soap[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 1991, 21(6): 33-35.
- [35] GARRAPPA S, KOČÍ E, ŠVARCOVÁ S, et al. Initial Stages of Metal Soaps' Formation in Model Paints: The Role of Humidity[J]. Microchemical Journal, 2020, 156: 104842.
- [36] ESSIEN E A, UMOREN S A, ESSIEN E E, et al. Preparation and Evaluation of Cucumeropsis Mannii Naud. Seed Oil Metallic Soaps as Driers in Gloss Paint[J]. Journal of Materials and Environmental Science, 2012, 3(3): 477-484.
- [37] HERMANS J, ZUIDGEEST L, IEDEMA P, et al. The Kinetics of Metal Soap Crystallization in Oil Polymers[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2021, 23(39): 22589-22600.
- [38] 聂振芝, 张军, 肖宏卫. 高分子蜡在亚光漆中的消光作用[J]. 中国涂料, 1996, 11(6): 45.
NIE Zhenzhi, ZHANG Jun, XIAO Hongwei. The Delustering Effect of High Molecular Wax in Sheen-Gloss Coatings[J]. China Paint, 1996, 11(6): 45.
- [39] XIE T L, KAO W Y, SUN L Y, et al. Preparation and Characterization of Self-Matting Waterborne Polymer: An Overview[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 142: 105569.
- [40] 青岛赛诺化工有限公司. 聚乙烯蜡厂家分享涂料消光原理及其应用[EB/OL]. [2023-11-12]. https://www.qdsainuo.com/Article/tlxgyljqyy_1.html.
Qingdao Sino Chemical Co., Ltd.. Polyethylene Wax Manufacturer Shares the Principle and Application of Coating Matting[EB/OL]. [2023-11-12]. https://www.qdsainuo.com/Article/tlxgyljqyy_1.html.
- [41] 李瑞容, 廖传华. 聚乙烯蜡微粉的制备工艺的比较和选择[J]. 塑料工业, 2009, 37(4): 6-9.
LI Ruirong, LIAO Chuanhua. The Comparison and Choice of Preparation of Polyethylene Wax Micropowder[J]. China Plastics Industry, 2009, 37(4): 6-9.
- [42] GUNDE M, KUNAVAR M, CEKADA M. Surface Analysis of Matt Powder Coatings[J]. Dyes and Pigments, 2007, 74(1): 202-207.
- [43] WANG W X, WANG Y J, LIU Z L, et al. Study on Application Performance of Oxidized Polyethylene Wax in Powder Coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 136: 105294.
- [44] LEE S S, KOO J H, LEE S S, et al. Gloss Reduction in Low Temperature Curable Hybrid Powder Coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2003, 46(4): 266-272.
- [45] YONG Q W, LIAO B, YING G, et al. Structure and Surface Properties of a Novel Bulk-Matte Waterborne Polyurethane Coating Composite[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2018, 15(5): 993-1002.
- [46] YONG Q W, NIAN F W, LIAO B, et al. Synthesis and Characterization of Solvent-Free Waterborne Polyurethane Dispersion with both Sulfonic and Carboxylic Hydrophilic Chain-Extending Agents for Matt Coating Applications[J]. RSC Advances, 2015, 5(130): 107413-107420.
- [47] LI J J, ZHENG W, ZENG W B, et al. Structure, Properties and Application of a Novel Low-Glossed Waterborne Polyurethane[J]. Applied Surface Science, 2014, 307: 255-262.
- [48] MENG Y Y, YONG Q W, LIAO B, et al. Synthesis, Characterization and Formation Mechanism of Acrylate Emulsion-Based Self-Matting Coatings[J]. New Journal of Chemistry, 2020, 44(33): 13971-13978.
- [49] XIE T L, KAO W Y, ZHANG Z T, et al. Synthesis and Characterization of Organosilicon Modified Self-Matting Acrylate Polymer: Insight into Surface Roughness and Microphase Separation Behavior[J]. Progress in Organic

- Coatings, 2021, 157: 106300.
- [50] MARCU I, DANIELS E S, DIMONIE V L, et al. Incorporation of Alkoxysilanes into Model Latex Systems: Vinyl Copolymerization of Vinyltriethoxysilane and *n*-Butyl Acrylate[J]. *Macromolecules*, 2003, 36(2): 328–332.
- [51] LIU Q, LIAO B, PANG H, et al. Preparation and Characterization of a Self-Matting Coating Based on Waterborne Polyurethane-Polyacrylate Hybrid Dispersions[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 143: 105551.
- [52] LOPEZ A B, BOHÓRQUEZ S J, MEEUWISSE M, et al. Self-Matting Waterborne Fluoropolymers[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2018, 116: 57–69.
- [53] GURTON K P, LIGON D, KVAVILASHVILI R. Measured Infrared Spectral Extinction for Aerosolized *Bacillus Subtilis* Var. Niger Endospores from 3 to 13 μm [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(25): 4443–4448.
- [54] ZHAO X Y, HU Y H, GU Y L, et al. Transmittance of Laser in the Microorganism Aggregated Particle Swarm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0616001.
- [55] 黄宝锟, 胡以华, 顾有林, 等. 人工制备生物消光材料空气动力学特性 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(2): 0204005.
HUANG Baokun, HU Yihua, GU Youlin, et al. Aerodynamic Property of Artificial Biological Extinction Material[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0204005.
- [56] MA C Y, ZHAO J M, LIU L H. Theoretical Analysis of Radiative Properties of Pronucleus Multicellular Cyanobacteria[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 224: 91–102.
- [57] 顾有林, 曹光华, 胡以华, 等. 生物材料紫外红外复合消光性能测试 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(3): 0321003.
GU Youlin, CAO Guanghua, HU Yihua, et al. Measurement of Ultraviolet and Infrared Composite Extinction Performance of Biological Materials[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0321003.
- [58] ROSS K F, BILLING E. The Water and Solid Content of Living Bacterial Spores and Vegetative Cells as Indicated by Refractive Index Measurements[J]. *Journal of General Microbiology*, 1957, 16(2): 418–425.
- [59] 顾有林, 陆卫, 方佳节, 等. 人工制备红外消光材料及其消光性能研究进展(特约)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(7): 20201018.
GU Youlin, LU Wei, FANG Jiajie, et al. Research Progress on Artificially Prepared Infrared Extinction Materials and Their Extinction Properties(Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20201018.
- [60] KONOKHOVA A I, GELASH A A, YURKIN M A, et al. High-Precision Characterization of Individual *E. Coli* Cell Morphology by Scanning Flow Cytometry[J]. *Cytometry Part A*, 2013, 83A(6): 568–575.
- [61] KRIJNS R, BODI M, LENZ P, et al. A Biopolymer Matting Agent for Coatings[J]. *Farby I Lakiery*, 2014(1): 3–9.
- [62] HOCHMAŃSKA-KANIEWSKA P, JANISZEWSKA D, OLESZEK T. Enhancement of the Properties of Acrylic Wood Coatings with the Use of Biopolymers[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 162: 106522.
- [63] MENG Y Y, LÜ P, LIU Q, et al. Preparation and Characterization of Soybean Oil-Based Waterborne Polyurethane/Acrylate Hybrid Emulsions for Self-Matting Coatings[J]. *New Journal of Chemistry*, 2019, 43(48): 19193–19199.
- [64] 周金琴. 抗红外烟幕技术的发展趋势分析 [J]. *弹箭与制导学报*, 1993, 13(4): 71–75.
ZHOU Jinqin. Development Trend Analysis of Anti-Infrared Smoke Screen Technology[J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 1993, 13(4): 71–75.
- [65] 冯长根, 乔小晶, 李旺昌. 烟幕弹药研究进展 [J]. *科技导报*, 2014, 32(增刊 1): 110–115.
FENG Changgen, QIAO Xiaojing, LI Wangchang. Research Progress of Smoke Ammunition[J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(S1): 110–115.
- [66] 时家明, 李志刚, 陈宗胜, 等. 典型气溶胶粉体红外消光性能研究(特约)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(7): 20201021.
- [67] SHI Jiaming, LI Zhigang, CHEN Zongsheng, et al. Infrared Extinction Properties of Typical Aerosol Particles (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20201021.
- [67] WANG X Y, DONG W J, PANG M H, et al. Granular Characteristics and Infrared Extinction Coefficients of Graphite Aerosol[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 102: 1238–1244.
- [68] WANG H X, WANG L F, XU B, et al. Experimental Study on Extinction Performance of Carbon Nanotubes Smoke to Infrared Radiation[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 167: 012033.
- [69] 霸书红, 陈永进, 沙育林, 等. 抗红外烟幕中固体消光材料的研究进展 [J]. *含能材料*, 2018, 26(4): 364–372.
BA Shuhong, CHEN Yongjin, SHA Yulin, et al. Research Progress of Solid Extinction Materials in Anti-

- Infrared Smokescreen[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(4): 364–372.
- [70] 王玄玉. 抗红外烟幕材料及消光性能研究进展(特约)[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(7): 20201019.
WANG Xuanyu. Development of Anti-Infrared Smoke Material and Its Extinction Performance (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(7): 20201019.
- [71] KULKARNI P, BARON P A, WILLEKE K. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications[M]. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2011: 1–13.
- [72] GRIFFIN D W. Atmospheric Movement of Microorganisms in Clouds of Desert Dust and Implications for Human Health[J]. Clinical Microbiology Reviews, 2007, 20(3): 459–477.
- [73] GILBERT Y, DUCHAINE C. Bioaerosols in Industrial Environments: A Review[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2009, 36(12): 1873–1886.
- [74] FRÖHLICH-NOWOISKY J, KAMPF C J, WEBER B, et al. Bioaerosols in the Earth System: Climate, Health, and Ecosystem Interactions[J]. Atmospheric Research, 2016, 182: 346–376.
- [75] ZHAO X Y, HU Y H, GU Y L, et al. A Comparison of Infrared Extinction Performances of Bioaerosols and Traditional Smoke Materials[J]. Optik, 2019, 181: 293–300.
- [76] WANG X Y, HU Y H, GU Y L, et al. Analysis of Factors Affecting the Broadband Extinction Performance of Bioaerosol[J]. Optik, 2020, 201: 163527.
- [77] ZHAO X Y, HU Y H, GU Y L, et al. Aggregation-Driven Reductions in the Mass Extinction Coefficient of Bioaerosols[J]. Optik, 2019, 184: 115–120.
- [78] 陈曦, 胡以华, 顾有林, 等. 生物凝聚粒子远红外波段消光特性[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 0704002.
CHEN Xi, HU Yihua, GU Youlin, et al. Extinction Characteristics of Biological Aggregated Particles in the far Infrared Band[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(7): 0704002.
- [79] GU Y L, HU Y H, ZHAO X Y, et al. Combined Analysis of Static and Dynamic Extinction Characteristics of Microbial Spores and Mycelia as a Mid-Infrared Extinction Material[J]. Optik, 2019, 176: 535–541.
- [80] 李乐, 胡以华, 顾有林, 等. 黑曲霉孢子红外波段消光性能研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2175–2179.
LI Le, HU Yihua, GU Youlin, et al. Infrared Extinction Performance of Aspergillus Niger Spores[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2175–2179.
- [81] WANG P, LIU H X, ZHAO Y Z, et al. Electromagnetic Attenuation Characteristics of Microbial Materials in the Infrared Band[J]. Applied Spectroscopy, 2016, 70(9): 1456–1463.

(责任编辑: 邓光辉)

Research Progress of Matting Materials

LAI Dengwang¹, LIU Li¹, WU Hao¹, CAO Wuyan¹, CHENG Hao¹,

LI Yuhua¹, XIONG Yubing², YANG Jun³

(1. College of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Longgang Research Institute Co., Ltd., Zhejiang Sci-Tech University, Longgang Zhejiang 325802, China;

3. Zhuzhou Times New Materials Technology Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Matting material is a material that weakens light. Because of the excellent matting properties, matting materials are widely used in scenes that require a matte effect on the surface. By classifying and introducing the types of matting materials, inorganic matting materials, organic matting materials and biological matting materials were reviewed in detail. For biological extinction materials, the performance of visible light extinction and infrared light extinction was focused. Biological matting materials will dominate the development trend of green matting materials because of their environmentally friendly and pollution-free properties with their advantages in visible and infrared light matting.

Keywords: matting material; silica; titanium dioxide; self-dulling water-based polymer resin; biological matting material