

微纳加工技术在包装防伪中的应用研究进展

季建军¹, 倪志林², 薛银春¹, 高克鑫^{1,2*}

(1. 江阴中达软塑新材料股份有限公司, 江苏 江阴 214400;

2. 智能制造学院, 南京理工大学, 江苏 南京 210094)

摘要: **目的** 对国内外微纳加工技术在包装防伪中的应用研究进行梳理, 帮助相关行业从业者更清晰、全面地了解当前微纳加工技术包装防伪领域的发展和应用现状, 推动微纳加工技术在该领域的推广应用。**方法** 本文将相关研究大致分为微纳加工技术在新型防伪标签的制备、新型防伪材料制备和数字防伪领域的应用研究等3个方面, 并对相关研究概况、关键科学技术实现方法以及核心防伪机理进行梳理, 分析微纳加工技术应用于包装防伪中的优缺点和发展趋势, 聚焦复合防伪技术的挑战和未来发展方向。**结论** 国内外研究综述表明, 微纳加工技术的快速发展为防伪技术提供了一种全新的技术和方法, 微纳加工技术与信息技术等构成的复合防伪技术更是表现出了巨大的商业化应用潜力。但目前微纳加工技术在包装防伪中的应用还处于初级阶段, 大部分实验室成果在面临产业化落地时仍受到成本、可靠性等因素的限制。未来在如何满足精度要求的同时, 进一步降低设备和材料成本, 优化工艺流程, 还需要进行更深入的探索研究。

关键词: 微纳加工技术; 防伪技术; 防伪标签; 防伪材料; 数字防伪

中图分类号: TB485.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)19-0149-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.19.019

Application and Development Progress of Micro-nano Processing Technologies in Packaging Anti-counterfeiting

Ji Jian-jun¹, Ni Zhi-lin², Xue Yin-chun¹, Gao Ke-xin^{1,2*}

(1. Jiangyin Zhongda Flexible Plastic New Material Co., Ltd., Jiangsu Jiangyin 214400, China;

2. College of Intelligent Manufacturing, Nanjing University of Science and Technology, Jiangsu Nanjing 210094, China)

ABSTRACT: The work aims to provide an overview of the research on the application of micro-nano processing technologies in packaging anti-counterfeiting to help practitioners in related industries to understand more clearly and comprehensively the current development and application status of micro-nano processing technologies in packaging anti-counterfeiting, and promote their promotion and application in this field. In this work, relevant research was divided into three aspects, namely, the application research of micro-nano processing technology in the preparation of new anti-counterfeit labels, the preparation of new anti-counterfeit materials and digital anti-counterfeiting field. Relevant research profiles, key scientific and technological implementation methods and core anti-counterfeiting mechanisms were sorted out. Advantages, disadvantages and the development trend of micro-nano processing technologies in packaging anti-counterfeiting were analyzed. Challenges and future development directions of composite anti-counterfeiting technologies were highlighted. This research shows that the rapid development of micro-nano processing technologies provides a new tool and technology for anti-counterfeiting technology. The composite anti-counterfeiting technology composed of micro-nano processing technology

and information technology, etc. has shown great potential for commercial application. However, the application of micro-nano processing technologies in packaging anti-counterfeiting is still in the initial stage, and most of the laboratory results are still limited by cost and reliability when facing industrialization. How to further reduce the cost of equipment and materials and optimize the process flow while meeting the accuracy requirements in the future requires more in-depth exploration and research.

KEY WORDS: micro-nano processing technology; anti-counterfeiting technology; anti-counterfeiting label; anti-counterfeiting material; digital anti-counterfeiting

传统的包装防伪技术主要依靠包装上的独创性设计作为其防伪特征,如在包装材料中添加特殊标签^[1]、特殊材料^[2]或直接采用特殊材料作为包装基材^[3],具体应用形式包括一次性防揭标签^[4]、激光全息标识^[5]、RFID 标识^[6]、二维码标签^[7]等。这些防伪技术有效的前提是品牌企业面对造假者能够始终保持自己的技术优势。如何保持防伪技术的持续有效性和能够便捷高效地验证防伪,对企业和消费者都是一个不小的难题,也促进着防伪技术的快速发展。目前,防伪技术已逐渐发展为一门包括光学^[8]、材料学^[9]、化学^[10]、物理学^[11]、电子信息技术^[12]乃至生物技术^[13]等诸多学科的交叉学科。

据 Markets and Markets 预估^[14],全球包装防伪市场规模将在 2021 年到 2026 年间由 1 172 亿美元提升到 2 113 亿美元,年复合增长率为 12.5%。日益增长的市场需求和市场规模,促使越来越多的新兴技术开始尝试应用于防伪包装领域,不断提出新的防伪技术以维持防伪有效性。

微纳加工技术从广义上讲是能够可控地制备出在三维空间中至少有一维处于微米或更小尺度,或由它们作为基本单元构成的结构所使用的加工技术。传统的微纳加工技术源自微机电技术(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS),其核心是以光刻、刻蚀、薄膜淀积为主的微电子加工技术,可以实现至少微米级尺度下微结构的可控加工。除此之外,随着相关学科的快速发展,近些年还出现了诸如自组装^[15]、微纳米压印^[16]、激光直写^[17]、微机械加工^[18]等新兴微纳加工技术。

基于微纳加工技术制备的防伪特征,具有高精度、高技术门槛、高一致性的优势,复杂工艺参数和纳米材料相较传统方法具有更高的技术壁垒,更容易对造假者产生技术优势。从技术上讲,微纳加工技术的防伪形式还未形成定式,有望通过与数字技术、互联网技术、传统防伪油墨技术等防伪方式进行技术结合,构建具备动态、持续化管理,技术要求高,仿制难度大的新型复合防伪技术。

近些年,微纳加工技术在包装防伪中的应用已经逐渐成熟和完善,现有研究成果可以大致划分为以下方面:探索使用各类微加工方法进行防伪结构或防伪标签的微纳制备,以替代传统印刷技术制备的防伪标

志物;基于微纳加工技术开展新型包装防伪材料制备,主要集中于新型荧光防伪材料的制备和应用研究;结合近些年发展迅速的数字化技术,结合微纳加工技术制备的微特征或微结构,提出新的复合数字化防伪技术。

本文针对近年来微纳加工技术应用于包装防伪中的应用研究进展进行综述和讨论,探讨近年来微纳加工技术在新型防伪标签的制备、新型防伪材料制备以及数字防伪等领域的应用和研究进展,分析其在包装防伪应用中的优势和不足,展望该技术未来面向批量产业化的发展方向。

1 微纳加工技术在新型防伪标签制备中的应用

标签防伪是目前主流的包装防伪技术。它的逻辑非常简单,通过制作高技术含量的防伪标签,验证商品是否具有标签或标签的真伪,来实现产品的防伪验证。这个防伪逻辑有效的基本前提是防伪标签不能被破解。因此,当微纳加工技术应用于包装防伪时,新型防伪标签制备技术成为了一个重要的研究方向。

本文按照防伪标签的验证方式,将相关研究分为以下 3 类。

1.1 显微镜或自然光验伪标签

与传统的大尺寸标签不同,微纳结构自身的微小结构特征同样可以作为防伪验证的要素,但此时通常需要额外借助光学显微镜才能对结构进行验证,在一定程度上提升了防伪门槛和成本。因此,该类技术采用的微加工技术通常具有高通量、低成本的特点或潜力,以适当平衡因验伪方式造成的成本提升。

以光刻技术为核心的微电子技术是目前主流的微纳加工技术之一,但其单次加工成本较高。Tomescu 等^[19]提出了一种基于光刻和刻蚀的低成本金属微标签制作方法,可在单个 4 英寸硅片上制备近万个尺寸在微米级的具有不同视觉效果的全息背景和微文本,如图 1 所示。通过将其与油漆、墨水、纸张进行结合,或简单地附着在产品表面,起到防伪标签的效果。Diaz 等^[20]提出了一种基于电子纳米压印技术的纳米晶体防伪码(Nanocrystals Quick Response, NC-QR)

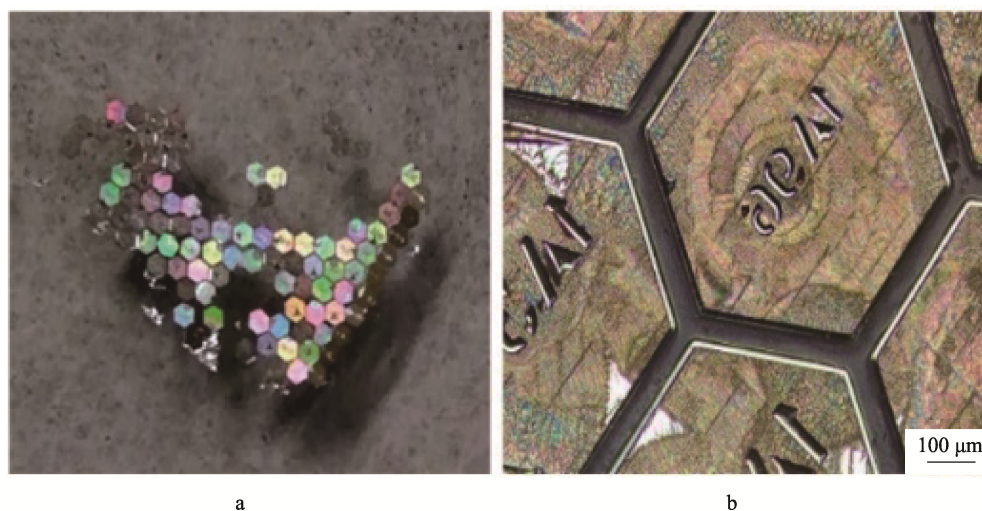


图 1 微米级金属微标签
Fig.1 Micron-sized metal microlabel

高通量制备方法,可在 15 min 内在一个 4 英寸标准硅片上制备超过 30 万个纳米晶体二维码。这些肉眼不可见二维码可以通过柔性薄膜转移到所需要的产品上。

激光直写技术是一种无掩膜数控减材加工技术,可以直接在加工基材表面制备微图案结构,相比传统微图案技术具有无须掩模、可编程、经济性好等优势。Lapidas 等^[21]提出了一种基于飞秒打印的物理不可克隆的防伪标签,可以实现高分辨率、大编码容量等。该结构具有独特的光散射行为,在逐点打印过程中,纳米结构几何形状的不可控随机变化导致打印的每个像素散射颜色都具有随机变化,从而大幅提升结构随机度,以提升防伪效果。Fei 等^[7]提出了一种可生物降解的药品防伪标签。通过二氧化碳激光在聚甲基丙烯酸甲酯 (Polymethyl Methacrylate, PMMA) 基板上雕刻出所需结构并作为模具,采用模塑工艺获得防伪标签,该标签可以直接添加到药品或胶囊底部,直接通过肉眼观测防伪。

近年来,也诞生了一些新的光学的防伪标识制备技术,但相关研究大多还处于实验室验证阶段。如 Babu 等^[22]提出了一种基于随机分布的反射微粒的光学防伪标签。标签尺寸为 1 cm^2 ,其中包含 $2\sim 3$ 个/ mm^2 的防伪粒子,这些肉眼不可见的微粒被嵌入产品表面,搭配特定光学器件,可以直接使用手机进行反射成像验证。

自组装指分子、纳米材料等基本结构单元,在特定工艺条件下自发形成有序结构的一种技术。目前已逐步应用于功能性微纳米材料的合成和制备^[23]中。Chang 等^[24]采用蒸发诱导自组装法制备的纤维素纳米晶体手性光子薄膜,在微细尺寸上具有彩虹结构色和独特的指纹纹理,并通过超声波微粉碎处理,使其与聚合物基体混合,制备了具有使用防伪和识别功能的柔性薄膜和涂层,可以通过肉眼和偏光显微镜进行防伪验证。Yuan 等^[25]提出了一种新的震动辅助切削

方法,用于在金属自由曲面上加工微灰度图案,从而在塑料制品及药品的生产模具中直接赋予了防伪标记,而无须额外加工,极大地提高了防伪标记的复制难度。

1.2 荧光防伪标签

传统的荧光防伪标签又称紫外线光防伪,基于特殊的荧光油墨制备防伪标签,使自然光下无法观察到防伪标记,而只有在荧光光源的照射下才能观测到,具有不易发觉、不易模仿的优势,但防伪油墨技术进步依赖于印刷工艺的提升和油墨配方的改进。

基于微纳加工技术,Yao 等^[26]开发了一系列基于多色上转换微粒 (Multicolor upconversion Micro-Particles, UCMPs) 油墨的防伪标签,通过旋涂、冲压、丝网印刷等简单工艺,在 PET 基材上获得了在自然环境下光学透明,但在 980 nm 激光的诱发下可以展示出多色光的防伪标签。该技术具有成本低、工艺简单、应用前景广阔等优势。Yang^[27]提出了一种基于掺杂技术的柔性双模防伪设计。作者采用了一系列基于深红/近红外双发射的荧光材料,通过调整掺杂剂的浓度,在荧光模式下通过不同波长的滤镜,可以实现双模防伪标签的独立设计和检测,双模检测不受顺序限制,具有简单、灵活的特点,在多层信息加密方面具有显著优势。

除了对防伪油墨的改进利用外,基于微纳加工技术,还有效实现了在不使用荧光油墨的前提下制备荧光防伪标签,进一步提高了防破解能力。Jaiswal 等^[28]设计了一种亚微米尺度的荧光防伪标签。该标签基于嵌入在不发光聚合物层中的发光层,采用双光子光刻技术逐步写入发光层和非发光层,实现了仅紫外光可见的嵌入结构的制作。这种方法可以拓展为多层模式,将不同编码的信息沿结构高度进行空间定位,从而实现分层防伪。

钙钛矿是一类陶瓷氧化物,具有良好的结构和化

学稳定性,且具有很强的掺杂能力。通过对钙钛矿掺杂不同价态和半径的阳离子,可使其具有多种物理化学性能,这种掺杂了不同阳离子的钙钛矿物质目前主要应用于燃料电池和太阳能电池领域。近年来,逐渐有研究者开始探索钙钛矿材料在防伪标签制备中的应用。Sun 等^[29]提出了一种超薄、稳定、图案化的多色荧光标签制备方法,由钙钛矿/聚偏氟乙烯(Polyvinylidene Fluoride, PVDF)复合薄膜制成。该标签的厚度和质量分别为 $1.2\ \mu\text{m}$ 和 $1.2\ \text{mg}$,不易察觉,可粘贴在任意弯曲的基材表面作为防伪标签,如图 2 所示。该技术制备的防伪标签具有超薄、稳定、可调等特点,在物联网防伪应用中具有一定的应用潜力。Sheng 等^[30]利用激光直写技术,基于可逆离子迁移和不可逆非辐射中心效应,采用 $405\ \text{nm}$ 连续激光器,在钙钛矿微米片上实现了荧光猝灭,基于荧光差形成永久性的微图案结构。该技术制备的钙钛矿微米片可作为荧光标签应用于微加密领域,在包装防伪领域也有一定的应用潜力。



图 2 带有柔性图案的钙钛矿/
PVDF 复合薄膜

Fig.2 Perovskite/PVDF composite
films with flexible patterns

3) 微纳光学防伪标签。微纳光学防伪在一定程度上也属于防伪标签的一种,其特点是通过构建微米

乃至纳米级微阵列结构,使得材料可以在自然光条件下,发出肉眼可见的光学防伪图案,而无须使用红外、激光等外界因素进行激发。这类相关研究的重点和难点在于如何有效设计和制备以微透镜、微结构阵列为代表的的光学元件,并研究光学元件的成像机理。早在 2002 年,Leech 等^[31]就开始基于灰度光刻法制备像素化的微阵列结构,如图 3 所示。该工艺可以基于微米级微浮雕结构实现,如肖像、字母、符号等特征的光学显示,起到光学防伪验证的效果。但由于结构主体为 AZ P4000 系列光刻胶,材料成本过高,难以实现产业化批量制备。

Minh 等^[32]提出了一种制备二维光子晶体结构的模具和柔性标签的方法。通过聚苯乙烯颗粒自组装、氧反应离子刻蚀、物理气相沉积(铬层 Cr)和聚二甲基硅氧烷(PDMS)复制的方式,制备出了具有纳米凹/凸点的可重复使用印模。基于该印模复制出的柔性标签在不同观测角度下会展现出独特的结构色。该工艺制造方法简单,成本效益高,印模可重复使用,在防伪标签制备领域具有产业化应用潜力。

基于衍射光栅的全息和光学可变图像也可以直接用肉眼进行观测,在防伪上已经广泛应用。周荣勇^[33]结合反应离子刻蚀技术在镍片上加工出了尺寸为 $60\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$ 的微像素阵列,并通过纳米压印技术将结构复制到聚丙烯薄膜上,产生光变色防伪效果。基于纳米压印技术制备的光栅可达亚微米级,具有特殊的衍射特性和独特的防伪效果。与传统光刻方法相比,该方法还具有速度快、环节少、成本低等优势。Bai 等^[34]通过微压印技术,制作了一种通过反射光识别的层级无序光子结构(Hierarchical Disordered Photonic Superstructures, HDPS)防伪标签,在自然光下标签各区域几乎无色差,但在反射光下标记区域因双重光学效应显示混合颜色,其结构的复杂性使得较难被伪造,大幅提高了防伪安全性。

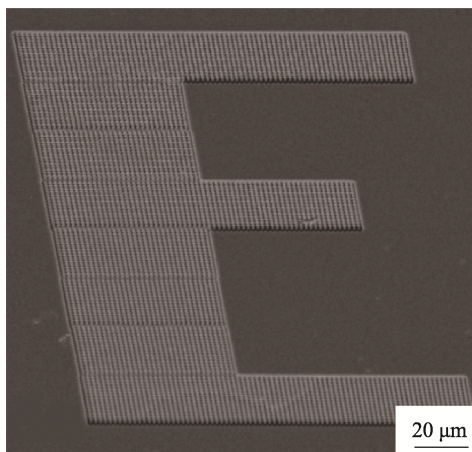
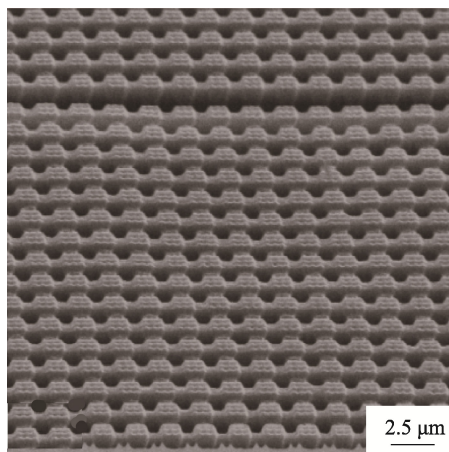


图 3 相互连接的柱状微结构及共同组成的字母 E

Fig.3 Interconnected columnar microstructures and the letter E

2 微纳加工技术在新型防伪材料制备中的应用

本文所指的防伪材料可以简单地理解为以防伪油墨为主要形式的, 在特殊条件刺激下表现出特定防伪性能的材料。其中, 防伪油墨根据激发方式的不同, 又可分为光学变色、红外激发、紫外激发、温敏、压敏等类型。近些年, 开始涌现出越来越多基于微纳技术的新型防伪材料制备工艺。

2.1 防伪发光材料

防伪发光材料具有可视性好、验伪便捷等优势, 被普遍认为是理想的信息加密和防伪材料之一。其中, 防伪荧光材料的配方和工艺是有效防伪的核心技术。

在配方方面, 莫燕等^[35]采用高折射率 ZnS 纳米材料, 在防水高光相纸上, 以盖印和喷墨打印的方式形成具有特殊结构色性能的防伪印章印文。该印章印文直视时几乎不可见, 但仅通过改变一定的观察角度, 即可看到清晰的结构色印章印文。周乘风^[36]在传统的玻璃材质中添加稀土元素形成独有的荧光特色材料, 通过高温将稀土元素和传统玻璃混合后获得的新型荧光玻璃, 可以根据特定频率的激光展现出不同颜色的荧光效果, 起到防伪作用。碳量子点^[37] (Carbon Quantum Dots, CQDs) 作为一种新兴的碳基荧光纳米材料, 具有成本低、易制备、荧光稳定性良好和毒性低等优点, 可被用于制作荧光油墨和具有特定图案的防伪标签, 如图 4 所示。因碳量子点在发光机理上有荧光、上转换发光和磷光等形式^[29], 通过不同发光形式的组合可以形成双模、三模防伪, 提高防伪效果。Fukuoka 等^[38]将具有拉曼活性分子的自组装纳米金粒子应用于隐身纳米标签, 形成了新型的防伪技术。通过自组装技术, 将 10 ng 的纳米金颗粒组装沉积在商用片剂上, 来构建肉眼不可见的纳米标签。随后采用波长为 785 nm 的激光照射 1 s 后, 即可采集到明显的表面增强拉曼散射 (Surface Enhancement of Raman Scattering, SERS) 信号, 从而实现了通过便携式拉曼光谱仪对商用片剂的高通量防伪认证。

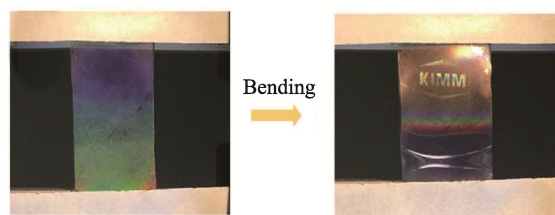


图 4 柔性二维光子晶体结构标签在折弯前后的显示效果

Fig.4 Display effect of flexible two-dimensional photonic crystal structure label before and after bending

工艺方面, 谢少文^[39]通过微波法和热分解法制得的纳米级复合水凝胶可以在特定波长的红外照射下发出特定荧光。基于水凝胶的特质, 防伪部分具有高强度性和出色的自修复性能, 可以保障材料在恶劣环境下的防伪效果。同时, 纳米级荧光也使包装防伪具有了隐蔽性。Marappa 等^[40]通过超声波、水热法和溶液燃烧法制备了一种强烈的红色 $Y_2O_3:Eu^{3+}$ 纳米颗粒, 该种粒子在潜在指纹识别应用中具有极高的灵敏度、再现性和可靠性, 在防伪发光材料领域具有广阔的应用潜力。

微接触印刷是一种利用高分子弹性印章, 在材料表面印刷微米甚至纳米级图案的印刷技术, 其原理与传统凸版印刷的原理相近, 但是图案精度可以达到微米级尺度。基于微接触印刷工艺, 可以实现线型立体条码和行列式立体条码的有效制备^[41], 在应用于贵重商品包装印刷防伪领域具有广阔的应用前景, 但目前尚未应用于批量生产。

2.2 复合防伪材料

材料复合防伪系统的组合需要统筹考量技术兼容性以及成本, 从简单、易理解的出发点上形成对商品的有效保护。本文提到的材料复合特指将多种基于材料特性或者经过特殊工艺处理过的新型材料组合在一起应用于产品包装^[42], 例如将激光全息薄膜和水印纸^[43]结合, 其特点是能够形成 1+1 大于 2 的防伪效果。Wang 等^[44]在研究中提出将镧系金属有机骨架 (Eu-MOF) 和 $CH_3NH_3PbBr_3$ (MAPbBr₃) 钙钛矿引入纸浆纤维 (Pulpfibers, PFs) 中, 制备荧光防伪和加密纸。这种加密纸本身具备用特定频率的激光核验真伪的能力, 可以在此基础上运用物理复合的概念, 搭配前文提到的上转换油墨或者其他具有一种或多种防伪特性的印刷材料, 从而形成完整的物理复合防伪系统。Yao 等^[45]将量子点聚合物基体 (Quantum Dot Polymer Matrix, QDs) 和胆甾体液晶薄膜 (Cholesteric Liquid Crystal Film, CLC) 进行叠加整合, 制备了具备多重防伪特性的复合薄膜。利用二者在不同温度下的相对位置不同导致的荧光光谱变化, 实现三重图案复合光学防伪, 大幅提高了防伪破解难度。

3 微纳加工技术在数字防伪中的应用

数字防伪技术又称数码防伪技术, 是基于计算机、信息编码、网络通信等技术形成的综合防伪技术的统称。微纳加工技术在制备微尺寸复杂结构时具有显著优势, 这使得其应用于数字防伪时可以制备信息含量更大的载体结构, 同时结构本身更难被破解和复制。

3.1 二维码防伪

二维码是近年来迅速推广应用的一种数字编码方式, 相比传统的条形码能存储更多的信息, 也能表

示更多的数据类型。二维码防伪是通过生成与产品一一对应的加密信息,用户通过特定扫码系统或直接使用手机软件进行解码检验。相比传统的印刷二维码,基于微纳加工技术制备的微尺度二维码具有信息含量更高的优势。Jaiswal 等^[28]提出了一种双光子聚合辅助制备用于防伪标记的荧光微二维码。通过使用双光子光刻将二维码图案逐步写入发射层和非发射层,将二维码嵌入非发射聚合物层中的发射层,从而使二维码在自然光下不可见,受荧光激发后发射层中的结构才可被观测。该工艺最大的优势在于可以实现多层结构的制备,从而实现信息沿结构高度上的堆叠,大幅提升二维码的信息含量。You 等^[46]开发了一种基于智能手机识别的上转换荧光(Upconversion Fluorescent)3D 二维码。将带有 RGB 荧光的纳米颗粒与三色油墨进行混合,借助一种改进打印机,可以实现多层打印和拆分,从而直接在药物表面打印出 3D 二维码。二维码由 3 层不同颜色的二维码组成,每层都编码了药物不同方面的信息,如图 5 所示。通过特定 APP 对三色二维码进行解码,可以有效提高伪造难度。Xu 等^[47]提出了一种基于自组装和全息光刻光子架构的光学复用防伪膜的制备工艺,该工艺运用全息光刻一维/二维表面光子晶体编码技术,实现三维光子蓝相液晶的自组装。所提出的双层结构可以在三维空间中展示不同角度的多幅图像,结合二维码技术,可以实现多重加密防伪的效果。Li 等^[48]提出了一种聚合物表面动态微纳米褶皱图案,可以受外界刺激进行动态调整,实现对材料表面性能的动态调整。通过将表面图案设置成二维码,依靠外界刺激就能够形成动态化的二维码保护机制,提升防伪图案的随机性和不固定性。

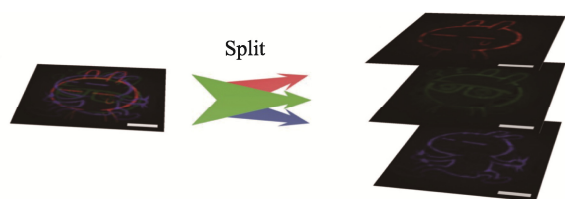


图 5 多层打印图案分层分析图
Fig.5 Hierarchical analysis diagram of multilayer print patterns

3.2 新型数字编码防伪

除了在常规二维码防伪中应用外,越来越多的研究者开始基于微纳加工技术制备的微型结构特点,研发对应的新型数字编码技术和识别算法,进一步发挥微纳结构在信息储存方面的优势。Lin 等^[49]制备了具有多种图案的钙钛矿纳米晶体薄膜防伪标签,可实现单价为 2.1×10^{-4} 美元的低成本、高通量的防伪标签的制备。每个标签都具有独特的形状和纹理,结合一套匹配识别算法,可以在约 12.17 s 内实现防伪验证,其编码容量高达 2.1×10^{623} 。Cheng 等^[50]采用自组装辅助真空过滤法,制备了银纳米立方体和纤维素纳米纤维组成的高柔性稳定等离子体纳米纸,具有高荧光、高拉曼增强和优异的力学性能,拉曼强度在整个纳米纸表面随机分布。通过表面等离子体共振、荧光信息和 SERS 多路光信号编码进行多重防伪。其中表面等离子体共振和荧光信息是第 1 层防伪,可被肉眼观测;具有随机拉曼强度分布的 SERS 作为第 2 层防伪,基于机器视觉技术可以通过拉曼光谱数据库进行验证。该技术因其优异的机械稳定性和力学性能,在低成本防伪标签的开发方面具有巨大的商业化潜力。Park 等^[51]提出了一种利用高能脉冲激光,直接在产品表面刻印多个反射式光栅的方法,并从其衍射条纹的旋转角度分析其序列号的复合防伪技术,结合高精度激光探测器后其具有较高的防伪复杂性。对于低水平防伪,则可以直接采用智能手机进行防伪验证。Tang 等^[52]根据光学微透镜的光学特性和减色法理论,通过分析反射亮度和结构稳定性之间的关系,建立了一种新的微镜像素防伪模型,利用可变编码角度将字符或人像编码到微镜阵列中,作为新型防伪标记。Ruffato 等^[53]首次尝试用带有特定强度和相位分布的结构光束来设计和制作用于照明的全息图编码信息,并采用迭代傅里叶变换算法对选定的输入图像和入射场进行优化相位模式的计算。对给定输入光束的全息图模式进行计算,产生的全息图与螺旋相位板之间形成一一对应关系,如图 6 所示,即没有正确的照明密钥,就无法有效处理编码信息,这极大地提高了防伪效果。

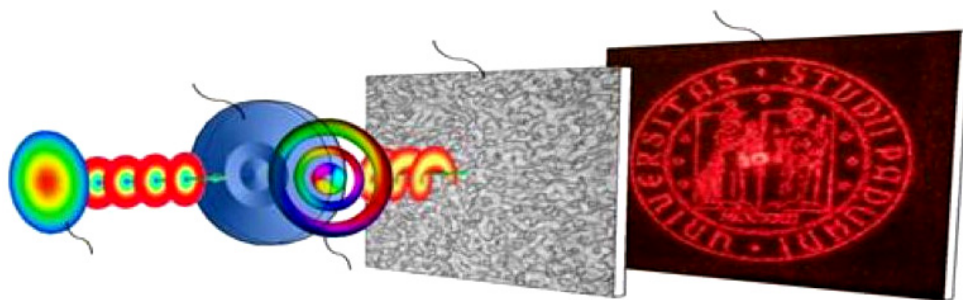


图 6 全息图像和螺旋相位板的对应关系原理
Fig.6 Principle of correspondence between holographic image and spiral phase plate

4 结语

从目前行业的发展来看,主流的防伪包装技术正逐渐向更加精细和精密的加工方向发展。微纳米技术微型化、批量化、成本低的鲜明特点恰好能够满足未来防伪技术发展的需要,两者的结合具有天然的优势。随着微纳加工技术的发展,以及近年来各种新微纳米材料的广泛使用,基于微纳加工技术的新型防伪技术不断出现,并在新型防伪标签制备、新型防伪材料制备以及数字化防伪领域得到了初步应用。不仅进一步提高了防伪特征的复杂性和破解门槛,还在其基础上诞生了一系列数字编码技术。

目前,微纳加工技术在包装防伪领域的应用还处于初级阶段,未来还可以尝试从防伪标签的低成本批量制备、微纳光学结构的耐用性研究、微尺寸防伪标签低成本验证方案等产业化相关方面开展深入研究,推动微纳加工技术尽早在包装防伪领域实现产业化应用。

一方面,主流微纳加工技术所采用的精密仪器和尖端技术的成本较高;另一方面,目前大部分微结构相对脆弱,难以在复杂的日常运输过程中维持其强度和结构完整性,使得成本和可靠性成为阻碍微纳米技术在包装防伪中进一步应用的主要因素。如何在满足精度要求的同时,进一步降低设备和材料成本,优化工艺流程,还需要进行更深入的探索研究。

参考文献:

- [1] LARIN A O, DVORETCKAIA L N, MOZHAROV A M, et al. Luminescent Erbium-Doped Silicon Thin Films for Advanced Anti-Counterfeit Labels[J]. *Advanced Materials* (Deerfield Beach, Fla), 2021, 33(16): 2005886.
- [2] BHAGYA R, SUNIL D, MUTHAMMA K, et al. Water-Based Invisible Green Flexographic Ink for Anti-Counterfeit Applications[J]. *Progress in Organic Coatings*. 2022, 173: 107212.
- [3] 胡爱军. 环保型防伪包装印刷新材料新技术研发及产业化 [DB/OL]. 浙江美浓世纪集团有限公司, 2020-09-15. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=kxaUMs6x7-4p_H5157itHVzbzj735XtTfF_z5peEpU-qurQdDmPu6PkmhSgzYC12KHEO6irIxyyp8YjnzGWO795S0FSwpT](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=kxaUMs6x7-4p_H5157itHVzbzj735XtTfF_z5peEpU-qurQdDmPu6PkmhSgzYC12KHEO6irIxyyp8YjnzGWO795S0FSwpT2P&uniplatform=NZKPT)
- [4] MIAO Jia-hao, DING Xing-huo, ZHOU Sheng-jun, et al. Fabrication of Dynamic Holograms on Polymer Surface by Direct Laser Writing for High-Security Anti-Counterfeit Applications[J]. *IEEE Access*, 2019, PP(99): 1.
- [5] TUYLS P, BATINA L. RFID-tags for Anti-Counterfeiting[C]// proceedings of the Topics in Cryptology-CT-RSA 2006: The Cryptographers' Track at the RSA Conference 2006, San Jose, 2006: 115-131.
- [6] FEI Jie, LIU Ran. Drug-Laden 3D Biodegradable Label Using QR Code for Anti-Counterfeiting of Drugs[J]. *Materials Science & Engineering C, Materials for Biological Applications*, 2016, 63: 657-662.
- [7] 王聪聪. 光学变色防伪油墨的应用与发展[J]. *网印工业*, 2015(6): 51-53.
WANG Cong-cong. Application and Development of Optical Color-Changing Anti-Counterfeiting Ink[J]. *Screen Printing Industry*, 2015(6): 51-53.
- [8] 高存津, 任杰, 王纪刚, 等. 稀土发光材料的制备及其在印刷包装防伪中的应用[J]. *包装工程*, 2022, 43(3): 32-41.
GAO Cun-jin, REN Jie, WANG Ji-gang, et al. Synthesis of Rare-Earth Luminescent Materials and Its Application in Anti-Counterfeiting of Printing and Packaging[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(3): 32-41.
- [9] 李素暖. 化学防伪油墨的防伪原理[J]. *出国与就业(就业版)*, 2011(24): 87.
LI Su-nuan. Anti-Counterfeiting Principle of Chemical Anti-Counterfeiting Ink[J]. *Work & Study Abroad*, 2011, (24): 87
- [10] 正义. 物理学防伪技术[J]. *中国防伪*, 2002(2): 61-62.
ZHENG Yi. Physics Anti-Counterfeiting Technology[J]. *China Anti-Counterfeiting*, 2002(2): 61-62.
- [11] 陈雄. 药品包装防伪解决方案趋于多元化[J]. *印刷技术*, 2010(22): 18-20.
CHEN Xiong. Anti-Counterfeiting Technology of Pharmaceutical Packaging Goes Diversification[J]. *Printing Technology*, 2010(22): 18-20.
- [12] 王芳. 生物防伪技术及其应用[J]. *中国防伪报道*, 2011(7): 14-17.
WANG Fang. Biological Anti-Counterfeiting Technology and Its Application[J]. *China Anti-Counterfeiting Report*, 2011(7): 14-17.
- [13] Markets and Markets. Anti-counterfeit Packaging Market (Mass Encoding, RFID, Tamper Evidence, Hologram, Forensic Markers), End-use Industry (Food & Beverage, Pharmaceuticals, Electrical & Electronics, Automotive, Luxury Goods), and Region-Global Forecast to 2026[EB/OL]. (2023-4-29)[2023-5-20]. <https://>

- www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/anti-counterfeit-packaging-advanced-technologies-and-global-market-129.html
- [14] VAN DOMMELEN R, FANZIO P, SASSO L. Surface Self-Assembly of Colloidal Crystals for Micro- and Nano-Patterning[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2018, 251: 97-114.
- [15] LAN H J M N-A H A O T E T. Large-Area Nanoimprint Lithography and Applications[M]. *Thamjavur: Intechopen*, 2018: 43-68.
- [16] ISIKSACAN Z, GULER M T, AYDOGDU B, et al. Rapid Fabrication of Microfluidic PDMS Devices from Reusable PDMS Molds Using Laser Ablation[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016, 26(3): 035008.
- [17] ZHANG Xue-wei, YU Tian-biao, XU Peng-fei, et al. In-Process Stochastic Tool Wear Identification and Its Application to the Improved Cutting Force Modeling of Micro Milling[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 164(8): 108233.
- [18] TOMESCU R, PARVULESCU C, CRISTEA D, et al. Low Cost Technology for the Fabrication of Anticounterfeiting Microtaggants[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2021, 31(3): 05008.
- [19] DIAZ R, PALLEAU E, POIROT D, et al. High-Throughput Fabrication of Anti-Counterfeiting Colloid-Based Photoluminescent Microtags Using Electrical Nanoimprint Lithography[J]. *Nanotechnology*, 2014, 25(34): 345302.
- [20] LAPIDAS V, ZHIZHCENKO A, PUSTOVALOV E, et al. Direct laser printing of high-resolution physically unclonable function anti-counterfeit labels[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(26): 261104.
- [21] BABU H U, STORK W, RAUHE H. Anti-Counterfeiting Using Reflective Micro Structures-Based on Random Positioning of Microstructures[C]// *Advances in Optoelectronics and Micro/Nano-Optics*, 2010.
- [22] 王克青, 薛慧敏, 秦晨晨, 等. 二苯丙氨酸二肽微纳米结构的可控组装及应用[J]. *化学进展*, 2022, 34(9): 1882-1895.
- WANG Ke-qing, XUE Hui-min, QIN Chen-chen, et al. Controllable Assembly of Diphenylalanine Dipeptide Micro/Nano Structure Assemblies and Their Applications[J]. *Progress in Chemistry*, 2022, 34(9): 1882-1895.
- [23] CHANG T, WANG B, YUAN D, et al. Cellulose Nanocrystal Chiral Photonic Micro-Flakes for Multilevel Anti-Counterfeiting and Identification[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 446(1): 136630.
- [24] YUAN Yan-jie, ZHANG Dai, ZHU Han-yu, et al. Machining of Micro Grayscale Images on Freeform Surfaces by Vibration-Assisted Cutting[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 58: 660-667.
- [25] YAO Wei-jing, TIAN Qing-yong, LIU Jun, et al. Preparation and RGB Upconversion Optic Properties of Transparent Anti-Counterfeiting Films[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(41): 15982-15989.
- [26] YANG Huan-xin, ZHAO Wei-ren, SONG En-hai, et al. Highly Flexible Dual-Mode Anti-Counterfeiting Designs Based on Tunable Multi-Band Emissions and Afterglow from Chromium-Doped Aluminates[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(46): 16533-16541.
- [27] JAISWAL A, RANI S, SINGH G, et al. Two Photon Lithography of Fluorescence Encoded Quick Read Micro-Code for Anti-Counterfeiting Applications[J]. *JPhys Photonics*, 2021, 3(3): 034021.
- [28] SUN J, HUA Q, ZHAO M, et al. Stable Ultrathin Perovskite/Polyvinylidene Fluoride Composite Films for Imperceptible Multi-Color Fluorescent Anti-Counterfeiting Labels[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(10): 2100229.
- [29] SHENG Yu-hang, LIU Ci-hui, YU Li-yan, et al. Microsteganography on all Inorganic Perovskite Micro-Platelets by Direct Laser Writing[J]. *Nanoscale*, 2021, 13(34): 14450-14459.
- [30] LEECH P W, ZEIDLER H. Fabrication of Micro-Relief Structures in Thick Resist for Anti-Counterfeiting Applications[J]. *Materials Research Society Symposia Proceedings Materials Research Society*, 2002, 741: 73-78.
- [31] MINH N H, KIM K, KANG D H, et al. Fabrication of Robust and Reusable Mold with Nanostructures and Its Application to Anti-Counterfeiting Surfaces Based on Structural Colors[J]. *Nanotechnology*, 2021, 32(49): 495302.
- [32] 周荣勇. 微结构防伪技术[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 5-22
- ZHOU Rong-yong. Microstructure Anti-Counterfeiting Technology[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012: 5-22
- [33] BAI Ling, LIM Y, HE Yu-heng, et al. Hierarchical Disordered Colloidal Thin Films with Duplex Optical Elements for Advanced Anti-Counterfeiting Coding[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(24): 2001378.
- [34] 莫燕, 毛瑞曦, 郭煜, 等. 基于 ZnS 纳米材料结构色的印章印文防伪方法研究[J]. *化学研究与应用*, 2022, 34(9): 2053-2058.
- MO Yan, MAO Rui-xi, GUO Yu, et al. Research on Anti-Counterfeiting Method of Seal Based on Structural Color of ZnS Nanomaterials[J]. *Chemical Research and Application*, 2022, 34(9): 2053-2058.
- [35] 周乘风. 激发频率可调控的变色防伪玻璃的设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021:15-18.

- ZHOU Cheng-feng. Design of Color-Changing Security Glass with Adjustable Excitation Frequency[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2021: 15-18.
- [36] 张文博, 石建丽, 马建中, 等. 荧光碳量子点及其在防伪中的应用[J]. 材料导报, 2022, 36(7): 139-149.
- ZHANG Wen-bo, SHI Jian-li, MA Jian-zhong, et al. Fluorescent Carbon Quantum Dots and Their Applications in Anti-Counterfeiting[J]. Materials Review, 2022, 36(7): 139-149.
- [37] FUKUOKA T, YAMAGUCHI A, HARA R, et al. Application of Gold Nanoparticle Self-Assemblies to Unclonable Anti-Counterfeiting Technology[C]// proceedings of the 2015 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC), Changsha, 2015: 432-433.
- [38] 谢少文, 高强韧. 自修复刺激变色水凝胶的制备及包装防伪中的应用[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2020.
- XIE Shao-wen, GAO Qiang-ren. Preparation of High Strength and Toughness Self-Healing Stimulating Discoloration Hydrogel and its Application in Packaging Anti-Counterfeiting[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2020: 1-20.
- [39] MARAPPA B, RUDRESHA M, BASAVARAJ R, et al. EGCG Assisted $\text{Y}_2\text{O}_3: \text{Eu}^{3+}$ Nanopowders with 3D Micro-Architecture Assemblies Useful for Latent Finger Print Recognition and Anti-Counterfeiting Applications[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2018, 264: 426-439.
- [40] 吴光远, 钱军浩, 朱卫娟. 防伪又隐形 条码新特性——基于微接触印刷的立体条码制作工艺探索[J]. 印刷技术, 2011(23): 22-24.
- WU Guang-yuan, QIAN Jun-hao, ZHU Wei-juan. New Features of Anti-Counterfeiting and Invisible Barcode—Exploration of 3D Barcode Manufacturing Technology Based on Micro-Contact Printing[J]. Printing Technology of Publishing and Commercial Printing, 2011(23): 22-24.
- [41] 刘扬, 唐芬南. 包装防伪技术的现状与发展趋势——综合防伪包装[J]. 中国包装工业, 2002(4): 2.
- LIU Yang, TANG Fen-nan. Current Situation and Development Trend of Anti-Counterfeit Packaging Technology- Comprehensive Anti-Counterfeit Packaging[J]. China Packaging Industry, 2002(4): 15-16.
- [42] 佚名. 银河纸业新防伪水印纸面世[J]. 绿色包装, 2021(8): 14.
- Anon. MCC Paper Yinhe Co., Ltd.,s New Anti-Counterfeit Waterprinting Paper Comes Out[J]. Green Packaging, 2021(8): 14.
- [43] WANG H, QIAN X, AN X J C. Introducing Lanthanide Metal-Organic Framework and Perovskite onto Pulp Fibers for Fluorescent Anti-Counterfeiting and Encryption[J]. Cellulose, 2022: 1-13.
- [44] YAO Wen-huan, LAN Ruo-chen, LI Ke-xuan, et al. Multiple Anti-Counterfeiting Composite Film Based on Cholesteric Liquid Crystal and QD Materials[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(1): 1424-1430.
- [45] YOU Min-li, LIN Min, WANG Shu-rui, et al. Three-Dimensional Quick Response Code Based on Inkjet Printing of Upconversion Fluorescent Nanoparticles for Drug Anti-Counterfeiting[J]. Nanoscale, 2016, 8(19): 10096-10104.
- [46] XU X, LIU Y, LUO D. Optical Multiplexing Anti-Counterfeiting Film Based on Self-Assembled and Holography Lithographic Photonic Architectures[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(3): 1-5.
- [47] LI Tian-tian, HU Kai-ming, MA Xiao-dong, et al. Hierarchical 3D Patterns with Dynamic Wrinkles Produced by a Photocontrolled Diels-Alder Reaction on the Surface[J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla), 2020, 32(7): 1906712.
- [48] LIN Yu-hong, ZHANG Hong-kun, FENG Jing-yun, et al. Unclonable Micro-Texture with Clonable Micro-Shape towards Rapid, Convenient, and Low-Cost Fluorescent Anti-Counterfeiting Labels[J]. Small, 2021, 17(30): 2100244.
- [49] CHENG Hong-rui, LU Yong-feng, ZHU Dong-yan, et al. Plasmonic Nanopapers: Flexible, Stable and Sensitive Multiplex PUF Tags for Unclonable Anti-Counterfeiting Applications[J]. Nanoscale, 2020, 12(17): 9471-9480.
- [50] PARK I Y, AHN S, KIM Y, et al. Serial Number Coding and Decoding by Laser Interference Direct Patterning on the Original Product Surface for Anti-Counterfeiting[J]. Opt Express, 2017, 25(13): 14644-14653.
- [51] TANG Mei, MIAO Quan-long, WU Zhi-cong, et al. Angle Coder of Anti-Counterfeiting Color in Optical Micro-Mirror Arrays[J]. Optik, 2013, 124(23): 6146-6148.
- [52] RUFFATO G, ROSSI R, MASSARI M, et al. Design, Fabrication and Characterization of Computer Generated Holograms for Anti-Counterfeiting Applications Using OAM Beams as Light Decoders[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 18011.