

增材制造（3D 打印）玩具的材料安全性与检测方法探索

严仁杰

中鼎检测技术有限公司 广东东莞

【摘要】随着增材制造（3D 打印）技术在玩具生产中的应用日益广泛，材料安全性成为关注焦点。3D 打印玩具直接接触儿童，其材料中可能存在的有害物质及其迁移风险引发了社会与监管机构的高度重视。本文围绕 3D 打印玩具材料的安全性展开探讨，分析常用聚乳酸（PLA）、聚酰胺（PA）、光敏树脂等材料的特性及潜在危害，结合国家及国际标准，梳理现有检测方法，包括理化分析、毒理学检测及迁移试验等。通过对比不同方法的适用性与局限性，提出针对 3D 打印玩具的综合检测思路，为企业生产、质量控制及标准制定提供参考。

【关键词】增材制造；3D 打印；玩具材料；安全检测；有害物质

【收稿日期】2025 年 5 月 10 日

【出刊日期】2025 年 6 月 18 日

【DOI】10.12208/j.ijme.20250057

Exploration of material safety and detection methods for additive manufacturing (3D printing) toys

Renjie Yan

Consumer Testing Technology Co., Ltd, Dongguan, Guangdong

【Abstract】 With the increasing adoption of additive manufacturing (3D printing) in toy production, material safety has become a critical concern. As 3D-printed toys come into direct contact with children, the potential presence of hazardous substances and migration risks in these materials have drawn significant attention from both society and regulatory authorities. This paper investigates the safety of 3D-printed toy materials, analyzing the characteristics and potential hazards of commonly used polymers such as polylactic acid (PLA), polyamide (PA), and photosensitive resins. In accordance with national and international standards, existing testing methods—including physicochemical analysis, toxicological testing, and migration studies—are systematically reviewed. By evaluating the applicability and limitations of different methodologies, this research proposes a comprehensive testing framework for 3D-printed toys, providing valuable references for manufacturers, quality control systems, and standardization efforts.

【Keywords】 Additive manufacturing; 3D printing; Toy materials; Safety testing; Hazardous substances

引言

增材制造技术的快速发展正推动玩具产业进入个性化与高精度制造的新阶段。3D 打印玩具因设计自由度高、生产周期短而备受市场青睐，但其材料的安全性却成为潜在隐忧。不同打印技术所使用的聚合物、复合材料及添加剂种类繁多，若含有重金属、增塑剂或挥发性有机物，可能对儿童健康构成风险。面对日益严格的产品安全标准，如何准确评估和有效检测 3D 打印玩具材料中的有害物质，成为学术界与产业界共同关注的问题。这一研究从材料特性与检测技术两个层面切入，旨在为 3D 打印玩具的安全保障提供科学依据。

1 增材制造玩具材料的应用现状与安全隐患

增材制造技术在玩具产业中的应用正在不断扩大，依托三维建模和逐层叠加成型的工艺特点，3D 打印玩具在结构设计、功能创新和个性化定制方面展现出显著优势。聚乳酸（PLA）、聚酰胺（PA）、热塑性聚氨酯（TPU）以及光敏树脂等高分子材料被广泛应用于玩具制造中，为产品提供了良好的可塑性、轻量化和表面精细度^[1]。随着市场需求的快速增长，生产企业在材料选择和工艺优化上更关注外观效果与成本控制，而忽视了材料本身的化学安全性。3D 打印过程中，高温熔融、紫外固化等工艺会引发分子结构变化，导致部分低分子化合物、挥发性有机

物(VOCs)或残留单体的释放,这为玩具材料的安全性带来潜在隐患。

在儿童玩具应用场景中,3D 打印材料的安全问题尤为突出。儿童在接触玩具的过程中可能通过口腔接触、皮肤接触及吸入途径暴露于潜在的有害物质中。部分低质量 PLA 原料可能含有重金属元素,某些光敏树脂在固化不足的情况下会残留未反应的丙烯酸酯单体,长时间使用可能引发皮肤过敏或呼吸道刺激反应。增材制造设备在打印过程中产生的超细颗粒物(UFPs)和有害气体会吸附在玩具表面,增加迁移风险。由于玩具材料的组成复杂且来源多样,单一的外观检测或力学性能评估难以准确反映其化学安全水平,这对材料选择和质量管控提出了更高要求。

随着国内外相关法规的日趋严格,增材制造玩具材料的安全隐患逐渐成为行业关注的焦点。欧盟 EN71、美国 ASTM F963 及我国 GB6675 等玩具安全标准对重金属迁移、增塑剂、邻苯二甲酸酯及其他有害物质的限量提出了明确要求,而 3D 打印玩具的材料体系复杂度与传统注塑玩具存在显著差异,现行标准在适用性方面存在一定不足^[2]。企业在追求创新和快速生产的同时,往往忽视材料原料、工艺控制和后处理环节的安全管控,导致风险被放大。系统分析增材制造玩具材料的应用现状与安全隐患,既有助于优化材料选用策略,也为后续安全检测方法的建立提供了必要的研究基础。

2 增材制造玩具材料中有害物质的风险分析

增材制造玩具材料在加工与使用过程中存在多种潜在有害物质,风险来源与材料化学组成及工艺条件密切相关。常见 PLA、PA 及 TPU 虽具有较好生物相容性和成型性能,但高温熔融或长期使用环境下,可能释放小分子降解产物和 VOCs;光敏树脂紫外固化不完全时,会残留未反应丙烯酸酯或光引发剂,与皮肤长期接触可能引发炎症反应或致敏效应;材料中助剂如增塑剂、阻燃剂和颜料可能含邻苯二甲酸酯、重金属盐等成分,具有累积毒性或内分泌干扰效应^[3]。

有害物质风险还与迁移和释放途径相关。儿童玩耍时的咀嚼、舔咬习惯,使重金属元素、增塑剂等易通过唾液溶出进入体内;表面未充分清洁的打印玩具可能携带残留粉尘和超细颗粒物,进入呼吸系统后可引发炎症反应或加重呼吸道疾病;热环境和

紫外照射会加速材料中低分子化合物迁移速率,增加暴露剂量。儿童代谢系统和免疫防御功能尚未完全发育,对这些物质敏感性远高于成年人,风险控制要求更为严苛。

从物理性能角度分析,3D 打印玩具存在多方面风险。在力学性能上,3D 打印工艺的层间结合强度是关键指标。若层间结合不牢固,玩具在受到拉伸、弯曲等外力作用时,易发生层间剥离,产生较大碎片。例如 PLA 材料打印的玩具,层间结合强度较低,儿童玩耍时若用力拉扯,可能出现分层现象^[4]。在尺寸精度与表面质量方面,3D 打印过程中受打印参数、材料收缩率等因素影响,玩具尺寸可能出现偏差,若关键部位尺寸不符合安全标准,如小零件尺寸过小,易被低龄儿童误吞;同时,打印玩具表面可能存在毛刺、凸起等缺陷,儿童皮肤接触时可能造成划伤。

此外,3D 打印玩具的耐热性和耐老化性也不容忽视。部分材料如 PLA 耐热性较差,在高温环境下如夏季车内、靠近暖气等位置,易发生软化、变形,不仅影响玩具外观和使用性能,还可能导致内部有害物质更易释放;材料长期暴露在光照、氧气等环境下会发生老化,性能逐渐下降,如 TPU 材料老化后弹性丧失,玩具结构稳定性降低,增加损坏和安全风险。

目前,全球关于增材制造玩具材料风险研究逐渐增多,但整体仍处于探索阶段。部分研究指出 PLA 降解过程可能释放乳酸小分子,虽单体本身毒性较低,但与其他化学残留共存时会产生叠加效应;光敏树脂和热塑性材料中添加剂问题突出,且缺乏统一限量标准^[5]。在物理风险研究方面,针对 3D 打印玩具层间结合强度、长期使用性能变化等方面的系统研究较少,现有法规对 3D 打印玩具物理性能的特殊要求不足,为风险评估带来不确定性。

3 增材制造玩具材料安全检测技术与标准研究

在增材制造玩具材料安全管控体系中,检测技术的精准性与标准的适用性是核心支撑,需从化学有害物质识别与物理性能评估双维度构建技术体系,同时结合行业特性完善标准框架。

化学有害物质检测针对不同材料体系形成差异化技术路径。对 PLA、PA 等热塑性材料中的重金属,电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)可实现铅、镉等痕量检测,检出限达 $\mu\text{g/kg}$ 级,满足 EN71-3 对 19 种可迁移重金属的限量要求;原子吸收光谱(AAS)

则适用于单一重金属定量,成本可控,便于企业日常筛查。针对增塑剂与邻苯二甲酸酯,气相色谱-质谱联用(GC-MS)通过超声萃取预处理,可精准定量DBP、DEHP等物质,检测精度达mg/kg级。光敏树脂中残留的丙烯酸酯单体及光引发剂,需高效液相色谱(HPLC)与傅里叶变换红外光谱(FTIR)协同检测,HPLC检出限低至0.1mg/L,FTIR则通过特征官能团快速识别未固化单体^[6]。对于打印过程中释放的VOCs与超细颗粒物(UFPs),热脱附-气相色谱-质谱联用(TD-GC-MS)可捕获苯乙烯、甲醛等有机物,激光散射粒子计数器实时监测UFPs浓度与粒径分布,为呼吸道风险评估提供数据。

物理性能检测需聚焦3D打印工艺特性设计方法。层间结合强度测试采用三点弯曲或拉伸剪切试验,通过定制夹具施加垂直于打印层的载荷,记录断裂最大应力,如PLA玩具通常要求层间拉伸强度不低于15MPa,防止层间剥离。尺寸精度检测依赖三坐标测量机(CMM)与激光扫描轮廓仪,CMM精确测量小零件直径、高度等关键尺寸,符合GB6675.2防误吞要求;激光扫描轮廓仪则识别表面毛刺、凸起,保障皮肤接触安全^[7]。耐热性检测中,热重分析(TGA)确定材料热分解温度(如PLA要求 $\geq 200^{\circ}\text{C}$),避免高温软化;差示扫描量热法(DSC)分析玻璃化转变温度,评估使用稳定性。耐老化性通过人工加速老化试验实现,紫外或氙灯老化箱模拟自然环境,TPU玩具经1000h老化后,拉伸强度保留率需 $\geq 80\%$ 。

在标准体系建设方面,现行玩具安全标准需针对增材制造特性进行补充完善。欧盟EN71、美国ASTMF963及我国GB6675系列标准虽对有害物质限量与物理安全指标作出规定,但在3D打印材料特殊风险管控上存在空白,例如未明确光敏树脂残留单体的限量要求、未针对层间结合强度制定测试方法^[8]。当前行业正推动标准修订,拟新增增材制造玩具材料专项技术要求,包括明确VOCs释放限值(如甲醛释放量 $\leq 0.1\text{mg}/\text{m}^3$)、规范层间结合强度测试流程、建立光敏树脂固化度检测方法(要求固化度 $\geq 95\%$)。同时,国际标准化组织(ISO)已启动《增材制造玩具材料安全要求》立项研究,旨在统一全球检测方法与限量标准,推动行业规范化发展^[8]。企业层面需建立“原料-工艺-成品”全链条检测体系,将3D打印参数(如打印温度、层厚、固化时间)与检

测结果关联分析,通过工艺优化降低有害物质释放与物理风险,实现创新与安全的协同发展。

4 结语

增材制造技术在玩具产业的应用推动了产品设计与制造模式的革新,但材料安全性问题依然是影响行业发展的核心因素。3D打印玩具在创新性与个性化方面具备显著优势,同时也带来了有害物质释放、迁移风险及检测标准适配等多重挑战。建立完善材料选择机制、优化生产工艺、提升检测技术水平,并与国内外安全标准接轨,已成为保障产品质量和儿童健康的关键路径。只有在科学管控与综合检测的双重支持下,才能为增材制造玩具的安全生产和可持续发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 李昊,胡晓文. 园林景观小品设计制作中的3D打印技术应用[J].中国科技信息,2025,(17):35-37.
- [2] 巩江涛,吴正涛,肖翔,等. 激光-电弧复合增材制造技术研究进展[J/OL].中国表面工程,1-21[2025-08-30].
- [3] 宫晨. 3D打印技术在动画鞋服设计中的应用探索[J/OL].中国皮革,1-5[2025-08-30].
- [4] 韦莉,张梦瑶,刘蕾. 聚乳酸3D打印线材松弛时间谱分析[J/OL].塑料科技,2025,(08):39-42[2025-08-30].
- [5] 水宇豪,张莹莹,何修全,等. 3D打印个性化钛网应用于复杂牙槽骨缺损的临床疗效分析[J].上海口腔医学,2025,34(04):392-397.
- [6] 裴帅文,郭一鸣,肖铭堃,等. 基于数字孪生的电弧增材制造机器人虚拟仿真监控[J].航天制造技术,2025,(04):73-78.
- [7] 秦泽辉,杨东青,李攀,等. 热处理对超声冲击辅助电弧增材制造铝合金组织性能的影响[J].航空科学技术,2025,36(08):63-70.
- [8] 杨云辉. 高精度增材制造控制算法的研究进展[J/OL].电子科技,1-6[2025-08-30].

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS