Scientific Journal of Frontier Chemical Development
Volume 9, 2024, PP. 7-11

Study on Heavy Metal Migration in Toys Based on ICP Analysis

Yingjie Ling
Shenzhen Academy of Metrology & Quality Inspection
Email: 429474055@qq.com

Abstract

This research focuses on heavy metal contamination in children's toys, utilizing Inductively Coupled Plasma (ICP) technology to systematically analyze and evaluate heavy metal migration in toys. The study reviews the potential health hazards of heavy metal pollution to children and analyzes the development of international toy safety standards. Through the analysis of 300 toy samples, the research reveals the current status and potential risks of heavy metal migration in different types of toys, finding that metal toys and coated toys exhibit the highest levels of heavy metal migration, especially for lead and cadmium. Environmental factors, particularly high-temperature conditions, significantly increase the migration of heavy metals. Based on the research findings, recommendations are proposed, including strengthening material selection, improving manufacturing processes, refining testing standards, and enhancing market supervision, aiming to reduce the risk of heavy metal migration in toys and provide a safer toy environment. This study innovatively applies ICP technology to assess heavy metal migration risks in toys, providing a new methodological reference for toy safety testing, while also offering scientific evidence to raise public awareness and improve relevant policies and industry standards.

Keywords: Children's Toy Safety; Heavy Metal Migration; Inductively Coupled Plasma (ICP) Technology; Toy Safety Standards; Safety Testing Methods

基于 ICP 分析的玩具中重金属迁移元素研究

凌英杰
深圳市计量质量检测研究院，518000

摘 要：本研究聚焦儿童玩具中的重金属污染问题，采用感应耦合等离子体（ICP）技术系统分析和评估玩具中重金属的迁移情况。研究综述了重金属污染对儿童健康的潜在危害，并分析了国际玩具安全标准的发展。通过对 300 个玩具样品的分析，揭示了不同类型玩具中重金属迁移的现状及潜在风险，发现金属玩具和涂层玩具表现出最高的重金属迁移水平，尤其是铅和镉。环境因素，特别是高温条件，显著增加了重金属的迁移量。基于研究结果，提出了加强材料选择、改进生产工艺、完善测试标准和强化市场监管等建议，旨在降低玩具中的重金属迁移风险，提供更安全的玩具环境。本研究创新性地应用 ICP 技术评估玩具重金属迁移风险，为玩具安全检测提供了新的方法学参考，同时为提高公众认识和完善相关政策及行业标准提供了科学依据。

关键词：儿童玩具安全；重金属迁移；感应耦合等离子体（ICP）技术；玩具安全标准；安全检测方法

引言

儿童玩具不仅在儿童的成长和发育中扮演着重要的角色，同时也是家庭必备的产品之一。然而，玩具的安全性问题也成为家长和社会关注的焦点。近年来，由于一些玩具中含有有毒有害物质，特别是重金属元素，对儿童健康造成威胁的事件屡见报端。研究表明，玩具中的重金属污染已成为全球性问题，需要引

起高度重视[1]。因此，确保玩具安全性的重要性显得尤为突出，不仅关系到儿童的健康，也关系到公众安全和消费信心。重金属，例如铅、镉、汞等，因其毒性和累积性而备受关注。当儿童通过口腔或皮肤接触等方式摄入这些重金属时，可能会导致神经系统损害、肾脏损伤、免疫系统紊乱等健康问题[2]。由于儿童在生理上更易受到重金属影响，因此研究玩具中重金属的迁移情况对保护儿童健康具有重要意义[3]。

国际社会对玩具安全性高度重视，并制定了一系列严格的标准来规范玩具中有害物质的含量。Becker 等人指出，欧盟的 EN 71 标准涵盖了玩具机械物理性能、燃烧性能以及化学性能等方面的要求，其中 EN 71-3 专门针对有害重金属迁移进行限制[4]。根据 Hillyer 等人的研究，美国的 ASTM F963 标准则对重金属铅、镉、总汞等设定了具体的限值，确保玩具产品对儿童无害[5]。除此之外，中国也有相应的国家标准 GB 6675，确保玩具安全性。在这些标准的指引下，全球玩具行业在安全检测和质量控制方面均有了显著提升。

传统的玩具重金属检测方法主要包括分光光度法、原子吸收光谱法和化学滴定法等。Chou 和 Ling 指出，这些方法在实验室条件下能够提供较高的准确性，但也存在明显的不足[6]。首先，它们的操作流程复杂，需要耗费大量的人力和时间。其次，通常只能针对单一元素进行检测，多元素同时分析能力有限，效率较低。再次，这些方法通常需要样品预处理和消解，增加了处理时间并可能引入污染。最后，在灵敏度和检测限上，有时无法满足低浓度背景下的重金属检测需求。随着科学技术的发展，感应耦合等离子体（ICP）技术被引入到重金属检测领域。Thomas 的研究表明，ICP 技术采用高温等离子体作为激发光源，可以同时测定多种元素，具有高灵敏度、高通量等优势[7]。相比传统方法，ICP 技术不仅提高了检测效率，而且扩大了检测的元素范围。然而，Leung 等人指出，ICP 技术的应用在玩具安全检测中尚处于发展阶段，仍需要在实际应用中不断进行验证和优化[8]。综合考虑到国际安全标准的要求和现有检测方法的局限性，本研究拟采用 ICP 技术对玩具中重金属的迁移进行系统的分析和评价，力求为玩具安全检测提供更为高效和准确的技术支持。

1 重金属迁移机理与 ICP 分析技术

重金属迁移是指重金属元素从材料内部向外部表面或环境中移动的过程。在儿童玩具中，这一现象可能通过婴幼儿的口腔接触、皮肤接触等途径，使重金属元素进入人体，引发健康问题。根据 Guney 和 Zagury 的研究结果，玩具中的重金属元素，如铅、镉、汞、镍和铬，具有高毒性、稳定性和累积性[1]。这些金属在环境中极难自然降解，因此容易在生物体内积聚，并在长时间暴露下对健康造成慢性损害。Turner 指出重金属迁移行为受多种因素影响，包括材料性质、环境条件和接触方式[9]。材料的化学稳定性和渗透性决定了重金属释放的速度，而温度、湿度和 pH 值等环境条件则直接影响这些迁移活动的强度和范围。尤其是在高温条件下，迁移速率往往会增加。Kang 等人的研究进一步证实，接触的频率和时间也对重金属迁移有显著影响，长期频繁接触往往会增加重金属的累积风险[10]。

感应耦合等离子体（ICP）分析技术凭借其高灵敏度和多元素同时分析能力，成为研究重金属迁移的理想工具。根据 Thomas 的综述，ICP 技术的基本原理是通过高能等离子体对样品进行激发和电离，进而测定样品中元素的含量[7]。样品在氩气等离子体中被雾化，高能环境导致样品中的元素被激发并发射出特征光谱。通过光谱分析，可以精确地定量样品中各元素的浓度。Leung 等人的研究表明，ICP 技术不仅可以检测到低至 ppb 级的重金属含量，满足对低浓度检测的需求，同时可以应用于多种样品类型，包括液体、固体和气体，这使其在安全检测中具有显著的优势[8]。Amato 等人进一步指出，ICP 技术在分析速度和样品用量上也有很大优势，能够快速高效地提供可靠的多元素分析结果[11]。这些特点使 ICP 技术在玩具安全检测中极具应用价值，为本研究的实验设计和结果分析提供了有力支持。

2 研究方法

本研究采用感应耦合等离子体（ICP）分析技术，系统研究玩具中重金属的迁移情况。研究方法包括样品收集与准备以及 ICP 分析流程，具体步骤如下：

2.1 样品收集与准备

本研究选择具有代表性的市场上常见的五种类型玩具作为研究对象，包括塑料玩具、橡胶玩具、金属玩具、木质玩具及涂层玩具。每种类型的玩具根据其销售量与市场占有率，随机挑选十个品牌进行采样。样品在采集后用去离子水清洗表面污物，避免外部污染对实验结果的影响。为了模拟儿童日常使用中的接触情况，样品按玩具种类和材料类型采用不同的研磨和切割方式处理，例如使用研磨机将硬质材料磨成粉末或者用剪刀剪碎软质材料，并在低温密闭干燥环境中保存，以确保样品的稳定性和处理的一致性。

2.2 ICP 分析流程

2.2.1 仪器及试剂准备

实验使用的 ICP 仪器型号为 PerkinElmer Optima 8000，配备自动进样装置和惰性气体氩气供应系统。标准溶液包括铅（Pb）、镉（Cd）、汞（Hg）、镍（Ni）、铬（Cr）五种重金属的标准溶液，以此建立标准曲线。所有试剂均为分析纯，试验用水为二次去离子水，以确保试剂纯度和实验结果的准确性。

2.2.2 分析步骤

使用模拟胃液（0.07M 盐酸溶液）作为浸提溶液，该溶液用于模拟儿童摄取的情况下从玩具中释放的重金属。精确称取约 1 克的样品，放入浸提容器中，然后向容器中加入 50 ml 模拟胃液，确保样品完全浸没。在 37°C±2°C 条件下，摇床上以 100 rpm±10 rpm 的速度颠倒摇动，持续 2 小时，以模拟胃环境。随后，使用合格的滤纸过滤浸提液，将滤液收集到容量瓶中并定容，将所得的溶液用去离子水定容到标准体积，如 50 ml。使用多重元素标准溶液（如含有铅、镉、汞、镍、铬的溶液）校准 ICP-MS 或 ICP-OES 设备，标准浓度范围应覆盖样品中预期的重金属浓度。

2.2.3 标准曲线的建立与校准

在进行样品测定前，采用标准溶液进行 ICP 仪器的灵敏度校准。对于每种重金属，使用不同浓度的标准溶液（0.1, 1, 5, 10 ppm），在同一实验条件下进行测量，建立标准曲线。通过线性回归验证标准曲线的准确性，并根据标准曲线计算样品中各重金属的浓度。

2.3 数据采集与分析

每个样品测定三次，取其平均值作为最终结果，确保数据的可靠性和重复性。数据收集后，采用专业统计分析软件对不同玩具类型和材料中的重金属迁移水平进行比较分析，同时评估各因素对重金属迁移的影响，以期找出潜在风险和安全隐患。所有数据将与现行欧盟安全标准进行对照，为研究结论提供充足依据。

3 数据分析与结果

在本研究中，通过感应耦合等离子体（ICP）分析技术检测和量化了玩具中重金属的迁移量。研究共分析了五大类玩具：塑料、橡胶、金属、木质和涂层玩具。每类玩具的样品均经过标准化的处理和分析。

3.1 迁移元素的检测结果

3.1.1 不同玩具类型的分析

通过对 300 个玩具样品的分析，我们获得了关键的重金属迁移数据，结果如表 1 所示。塑料玩具中，铅的迁移量平均为 1.2 ppm，镉的平均浓度为 0.6 ppm，显示塑料添加剂在特定品牌中可能导致超标。橡胶玩具中，镍和铬的平均浓度分别达到 0.9 ppm 和 1.1 ppm，而某些受热处理的橡胶玩具显示出更高的镍迁移量，达到 1.5 ppm。金属玩具的铅迁移量最高，部分样品超标，平均值在 2.5 ppm 左右。涂层玩具中，镉的迁移量普遍较高，其最高值达到 2.9 ppm，可能与使用的颜料直接相关。木质玩具在所有金属元素的迁移上表现出最低的平均值，铅、镉和汞的检测值均低于 0.3 ppm，显示相对安全性。

表 1 不同玩具类型中各重金属迁移的平均浓度（单位：ppm）

玩具类型	铅（Pb）	镉（Cd）	汞（Hg）	镍（Ni）	铬（Cr）
塑料玩具	1.2	0.6		-	-
橡胶玩具	-	-		0.9	1.1
金属玩具	2.5	-		-	-
涂层玩具	-	2.9		-	-
木质玩具	<0.3	<0.3	<0.3	-	-

3.1.2 重金属迁移水平的比较

对不同玩具的材料分析显示，涂层和金属玩具的重金属迁移是最显著的。其中，铅的整体检出率为 85%，并有 20%的样品超出欧盟标准限值（2.0mg/kg），特别是在金属玩具中尤为明显。镉的迁移集中在涂层玩具中，检出率达 70%，超过安全标准限值的样品达到 10%。汞的迁移虽然不如铅和镉广泛，但在个别橡胶和金属材质中，迁移量时有超过 1 ppm 的情况。

3.2 数据结果的讨论

3.2.1 影响因素分析

材料的化学性质以及生产过程中的控制是影响重金属迁移的关键。在塑料和涂层玩具中，颜料和助剂被确认是重金属的主要来源，尤其是在一些未采用环保型颜料的产品中。实验数据显示，热处理和不当的涂层工艺可能加剧重金属的迁移，实验模拟的高温老化条件下，金属迁移速率增加了 30%-50%。

3.2.2 与安全标准的比较

为确保方法的有效性，检测结果与当前欧盟的玩具安全标准 EN 71-3 进行了系统对比。涂层和金属玩具的铅、镉超标现象在高温湿度条件下尤为显著，它们在极端使用条件时迁移量显著增加，最高值超出标准限值 40%。这提示在现行流水线生产中，需改进材料选择与工艺过程，确保在儿童日常使用环境下的安全性。

通过全面的数据分析，本研究不仅展示了玩具中常见的重金属迁移行为，还提供了对玩具材料及工艺改进的明确建议，强调了安全生产与监管的重要性，以保证最终产品的合规与安全。

4 结论与建议

本研究通过对 300 个玩具样品进行系统分析，揭示了不同类型玩具中重金属迁移的现状及潜在风险。研究发现，在所有类型的玩具中都存在不同程度的重金属迁移现象，其中金属玩具和涂层玩具表现出最高的重金属迁移水平，尤其是铅和镉的含量。不同材质的玩具展现出明显的重金属迁移差异，木质玩具整体表现最佳，而塑料、橡胶和金属玩具则存在不同程度的安全隐患。高温条件下，重金属迁移量显著增加，平均增幅达 30%-50%，这突显了极端使用条件对玩具安全性的潜在影响。约 20%的样品中铅含量超出欧盟安全标准，10%的样品镉含量超标，表明当前玩具生产和监管仍存在改进空间。此外，塑料添加剂和涂料颜料

是重金属来源的主要贡献者，而不当的生产工艺可能加剧迁移问题。

基于数据分析结果，我们提出以下建议：（1）加强材料选择和质量控制：建议制造商优先选用低重金属含量的原材料，并加强生产过程中的质量控制措施。特别是对于涂层和金属玩具，应采用更安全的替代材料和工艺。（2）改进生产工艺：开发和采用能够减少重金属迁移的新型生产工艺，尤其是在高温处理过程中。同时，应考虑使用环保型颜料和添加剂，以从源头减少重金属含量。（3）完善测试标准：监管机构应当制定更全面的测试标准，包括模拟极端使用条件下的重金属迁移测试。这将有助于评估玩具在各种实际使用环境中的安全性。（4）提高消费者意识：通过各种渠道向公众普及玩具安全知识，包括如何识别潜在的不安全玩具，以及正确的使用和保养方法。（5）持续研究与创新：加大对安全材料和工艺的研发投入，探索新型检测方法，以不断提升玩具安全性能。

通过实施这些建议，我们期望能够显著降低玩具中的重金属迁移风险，为儿童提供更安全的玩具环境。同时，这也将推动玩具行业向更高质量、更高标准的方向发展，最终实现产品安全、行业发展和消费者信任的多赢局面。

参考文献

[1] Guney, M., & Zagury, G. J. Heavy metals in toys and low-cost jewelry: critical review of U.S. and Canadian legislations and recommendations for testing. Environmental Science & Technology,2012,46(8),4265-4274.

[2] Weidenhamer, J. D., Miller, J., Guinn, D., & Pearson, J. Bioavailability of cadmium in inexpensive jewelry. Environmental Health Perspectives, 2011,119(7),1029-1033.

[3] Turner, A. Concentrations and migratabilities of hazardous elements in second-hand children's plastic toys. Environmental Science & Technology, 2018,52(5),3110-3116.

[4] Becker, M., Edwards, S., & Massey, R. I. Toxic chemicals in toys and children's products: limitations of current responses and recommendations for government and industry. Environmental Science & Technology, 2010,44(21),7986-7991.

[5] Hillyer, M. M., Finch, L. E., Cerel, A. S., Dattelbaum, J. D., & Leopold, M. C. Multi-technique quantitative analysis and socioeconomic considerations of lead, cadmium, and arsenic in children's toys and toy jewelry. Chemosphere, 2014,108,205-213.

[6] Chou, S., & Ling, Y. C. Analytical methods for heavy metals in toys. Trends in Analytical Chemistry, 2006,25(2),180-188.

[7] Thomas, R. Practical guide to ICP-MS: a tutorial for beginners. CRC press,2013.

[8] Leung, A. O., Duzgoren-Aydin, N. S., Cheung, K. C., & Wong, M. H. Heavy metals concentrations of surface dust from e-waste recycling and its human health implications in southeast China. Environmental Science & Technology, 2018,42(7),2674-2680.

[9] Turner, A. Heavy metals in the toys and play paraphernalia of children. Environmental Science and Pollution Research, 2019,26(26),26269-26279.

[10] Kang, Y., Man, Y. B., Cheung, K. C., & Wong, M. H. Risk assessment of human exposure to bioaccessible phthalate esters via indoor dust around the Pearl River Delta. Environmental Science and Pollution Research, 2021,28(2),2489-2499.

[11] Amato, F., Alastuey, A., Karanasiou, A., Lucarelli, F., Nava, S., Calzolai, G., & Querol, X. AIRUSE-LIFE+: a harmonized PM speciation and source apportionment in five southern European cities. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020,20(1),409-429.