

# 微波消解-ICP-MS法测定化妆品塑料包材中9种重金属

周约如, 王晨蕾, 汪淼峰, 李丽佳, 杨 铭

浙江方圆检测集团股份有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2026年1月28日; 录用日期: 2026年2月19日; 发布日期: 2026年2月28日

## 摘 要

通过微波消解法对化妆品塑料包材的前处理方法进行分析研究, 比较了四种不同消解体系下对塑料包材消解效果的影响, 结果发现硝酸-盐酸混合体系消解效果最佳, 采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定塑料包材中的铬、钴、镍、硒、锶、铅、镉、钡、铊9种金属元素, 各元素的检出限为0.005~0.2 mg/kg, 线性良好, 相关系数均大于0.999。同时对方法进行精密度试验与加标回收实验, 各金属元素的加标回收率在94.0%~106.5%之间, 相对标准偏差(RSD) 0.93%~5.9%。该方法有较好的准确度和精密度, 适用于化妆品塑料包材中9种重金属元素的测定。

## 关键词

化妆品包材, 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS), 重金属

## Determination of Nine Heavy Metals in Cosmetic Plastic Packaging Materials by Microwave Digestion-ICP-MS

Yueru Zhou, Chenlei Wang, Miaofeng Wang, Lijia Li, Ming Yang

Zhejiang Fangyuan Testing Group Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: January 28, 2026; accepted: February 19, 2026; published: February 28, 2026

## Abstract

This study analyzes and investigates the pretreatment method of cosmetic plastic packaging materials through microwave digestion. The effects of four different digestion systems on the digestion

文章引用: 周约如, 王晨蕾, 汪淼峰, 李丽佳, 杨铭. 微波消解-ICP-MS 法测定化妆品塑料包材中 9 种重金属[J]. 分析化学进展, 2026, 16(1): 36-43. DOI: 10.12677/aac.2026.161005

efficiency of plastic packaging materials were compared, and it was found that the nitric acid-hydrochloric acid mixed system provided the best digestion results. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) was used to determine nine metal elements—chromium, cobalt, nickel, selenium, strontium, zirconium, antimony, barium, and thallium—in the plastic packaging materials. The detection limits for these elements ranged from 0.005 to 0.2 mg/kg, with good linearity and correlation coefficients all greater than 0.999. Precision tests and spike recovery experiments were conducted on the plastic packaging materials, with recovery rates of the metal elements ranging between 94.0% and 106.5%, and relative standard deviations (RSD) between 0.93% and 5.9%. This method demonstrates good accuracy and precision and is suitable for the determination of the nine heavy metal elements in cosmetic plastic packaging materials.

## Keywords

Cosmetic Packaging Materials, Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), Heavy Metals

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

化妆品作为现代人的生活必需品，其卫生质量一直以来都备受消费者关注。化妆品包装材料是化妆品的重要组成部分，若其含有有毒有害物质，在与化妆品接触的过程中不断向化妆品中迁移，将会成为化妆品的直接污染源，进而对消费者造成伤害。

化妆品包材可主要分为塑料类、玻璃类、金属类、橡胶类等。塑料包材有可塑性强、耐摔、色彩丰富且价格低廉、便于大规模生产等优点。其在化妆品包装中的应用范围占据着大部分的市场份额[1]。塑料包材在生产过程中会添加催化剂、阻燃剂、增塑剂等添加剂来提高产品特性。铬、镍常用于塑料着色剂和某些催化剂；铈常用作聚酯生产中的催化剂(三氧化二铈)以及阻燃剂；钡、镉可作为塑料稳定剂或填料；铅可能来源于某些催化剂或杂质[2][3]。六价铬、镍、钴是已知的致敏原；硒、铊具有较高毒性；铈化合物被认为具有潜在的致癌性[4]-[6]。化妆品包材中的重金属元素在与化妆品长期接触后可能会迁移被人体吸收，进而影响人体健康。

国家强制性标准 GB 31604.49-2023 [7]是对食品接触材料中的四种重金属含量及 7 种重金属元素的迁移量做出规定。但对化妆品包装材料的要求仅有《化妆品安全技术规范》(2015 年版)中提及的“直接接触化妆品的包装材料应当安全，不得与化妆品发生化学反应，不得迁移或释放对人体产生危害的有毒有害物质”[8]并未提及针对哪些有毒有害物质应进行检测、如何检测。为保障消费者身体健康化妆品注册人、备案人应依据《化妆品安全评估导则(2021 版)》的规定提交完整版安全评估材料[9]，包材相容性测试报告是完整版安全评估材料中必不可少的组成部分，而重金属测试属于重要评估部分。因此对化妆品包材的中金属元素展开研究，确定相应的试验对化妆品包材质量监督有一定的意义。

目前国内关于化妆品塑料材料中的重金属含量的检测方法主要有原子吸收光谱法[10]、原子荧光光谱[11]、电感耦合等离子体光谱法[12]等。ICP-MS 是一种具备同时检测多元素分析能力、且有抗干扰能力强、仪器灵敏度高优点[13]可用于痕量元素的分析测试。

目前国内对化妆品包材金属元素含量的报道较少，基于以上的背景，以市场占有率较高的塑料包材为研究对象，本文将建立微波消解-ICP-MS 法同时测定样品中 9 种重金属元素的含量，并应用于实际样

品的测试分析。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 仪器与设备

安捷伦 7900 型电感耦合等离子体质谱仪, 安捷伦科技股份有限公司; Multiwave 5000 型多功能高压微波消解仪, 安东帕(上海)商贸有限公司; Milli-Q 型超纯水仪, 美国密理博公司; MS204TS 型电子分析天平, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

### 2.2. 试剂与材料

7 批次化妆品塑料包材购自超市; 调谐溶液安捷伦, 10  $\mu\text{g/mL}$ , part#: 5188-6564; 锆、钷、铈、铕元素单标溶液, 1000  $\mu\text{g/mL}$ , 国家金属材料测试中心; ICP Consumable 26 Multi-Element Std. Pure Plus 标准品, 100  $\mu\text{g/mL}$ , 上海安谱瑾世标准技术服务有限公司; 锆标准溶液, 1000  $\mu\text{g/mL}$ , 上海安谱瑾世标准技术服务有限公司; 硝酸(质量分数 65%), 优级纯, 国药集团化学试剂有限公司; 盐酸(质量分数 36%), 优级纯, 浙江汉诺化工科技有限公司; 过氧化氢(质量分数 30%), 优级纯, 永华化学股份有限公司。

### 2.3. 方法

#### 2.3.1. 仪器工作参数

用调谐液调整仪器各项指标, 使仪器灵敏度、氧化物、双电荷、分辨率等指标达到要求。

射频功率: 1550 w

等离子体氩气流速: 14 L/min

雾化器氩气流速: 5 mL/min

采样深度: 5 mm

雾化室温度: 4 $^{\circ}\text{C}$

采样锥与截取锥类型: 镍锥

模式: 碰撞反应模式

#### 2.3.2. 样品前处理

将测试样品用超纯水洗净并烘干, 剪成约 0.5 cm 宽的碎片准确称取 0.25 g (精确到 0.0001 g) 试样于聚四氟乙烯微波罐中, 并加入 6 mL 硝酸, 2 mL 盐酸, 随后拧上消解罐盖置于微波消解仪中进行微波消解, 消解程序见表 1。

**Table 1.** Microwave digestion steps

**表 1.** 微波消解步骤

| 步骤 | 温度( $^{\circ}\text{C}$ ) | 升温时间(min) | 保持时间(min) |
|----|--------------------------|-----------|-----------|
| 1  | 120                      | 5         | 5         |
| 2  | 160                      | 8         | 5         |
| 3  | 200                      | 10        | 30        |

消解程序结束后, 冷却至室温将消解液转移至 25 mL 比色管中, 用超纯水冲洗消解管数次, 合并洗涤液, 用超纯水定容至刻度, 备用。同时做空白实验用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤待测液, 上机测试。

### 2.3.3. 标准溶液配制

混合标准溶液的配制准确移取 ICP Consumable 26 Multi-Element Std. Pure Plus 标准品(100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )1mL 至 10 mL 容量瓶中用 5%硝酸溶液稀释定容至刻度线, 配制成铬、钴、镍、锑、铈、硒、钡、锶 10.0 $\mu\text{g}/\text{mL}$  的标准储备液。再将标准储备液逐级稀释成 5, 10, 20, 50, 100  $\mu\text{g}/\text{L}$  的标准系列工作溶液。

准确移取锆标准溶液(1000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) 1 mL 至 100 mL 容量瓶中, 用 5%硝酸溶液稀释定容至刻度线, 配制成 10.0  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的标准储备液。再将标准储备液逐级稀释成 10, 50, 100, 200, 500  $\mu\text{g}/\text{L}$  的标准系列工作溶液。

移取锆、钐、铈、镱单元素标溶液(1000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )各 1.0 至 100 mL 容量瓶中, 定容配制成 10.0  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的内标储备液, 再将内标储备液稀释至 50  $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

内标元素选择依据如下: 选择质量数与待测元素接近、电离能相当、且在样品中含量极低或几乎不存在的元素作为内标, 以校正仪器信号漂移和基体效应。具体配对为:  $^{72}\text{Ge}$  用于校正  $^{52}\text{Cr}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ;  $^{45}\text{Sc}$  用于校正  $^{78}\text{Se}$ ,  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ;  $^{103}\text{Rh}$  用于校正  $^{121}\text{Sb}$ ,  $^{137}\text{Ba}$ ;  $^{185}\text{Re}$  用于校正  $^{205}\text{Tl}$ 。所选内标元素的物理化学性质与对应分析物匹配良好, 能有效补偿分析过程中的信号波动。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 消解条件的确定

#### 消解体系的选择

通过微波消解制备样品常用硝酸、过氧化氢、盐酸、氢氟酸等作为溶剂, 消解溶剂的类型和用量会直接影响到样品消解的效果。塑料包材作为一种高分子聚合物, 具有良好的稳定性, 采用单一的硝酸消解体系难以将其消解完全。本文通过比较 6 mL 硝酸、7 mL 硝酸、6 mL 硝酸 + 2 mL 双氧水、6 mL 硝酸 + 2 mL 盐酸 4 种消解体系对化妆品塑料包材的消解效果进行研究, 最终确定了 6 mL 硝酸 + 2 mL 盐酸的消解体系最佳, 可作为塑料包材的前处理体系。结果见表 2。

Table 2. Effects of digestion system

表 2. 消解体系的影响

| 消解体系               | 消解效果          |
|--------------------|---------------|
| 6 mL 硝酸            | 消解不彻底, 有颗粒物残留 |
| 7 mL 硝酸            | 消解不彻底, 溶液浑浊   |
| 6 mL 硝酸 + 2 mL 双氧水 | 消解不彻底, 溶液浑浊   |
| 6 mL 硝酸 + 2 mL 盐酸  | 消解彻底, 溶液澄清    |

### 3.2. 干扰与消除

ICP-MS 测定的干扰主要分为质谱干扰和基体效应两大类。一般通过优化仪器参数、干扰校正方程等方法可以消除大部分的质谱干扰。对于基体效应产生的影响, 通常会采取内标法或外标法进行校正。本实验选取锆、钐、铈、镱作为内标元素减少基体效应的干扰。

### 3.3. 方法检出限与标准曲线

按照 2.3.3 方法配制系列标准工作溶液, 按照设定好的仪器条件进行测定。以各元素浓度( $\mu\text{g}/\text{L}$ )和强度(CPS)为横纵坐标绘制标准曲线。同时对各元素对应的空白溶液重复测定 11 次, 以三倍标准偏差值作

为检出限, 由表 3 可知, 本方法对铬、钴、镍、硒、锶、锆、铈、钡、铊 9 种元素均有良好的线性关系, 各元素相关系数均大于 0.999, 检出限在 0.005~0.2 mg/kg 之间, 能够满足日常分析。

**Table 3.** Linear equations, correlation coefficients, and detection limits for 9 metal elements

**表 3.** 9 种金属元素的线性方程、相关系数和检出限

| 元素 | 质量数 | 线性方程   | 相关系数   | 检出限/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|----|-----|--|--------|----------------------------|
| 铬  | 52  | $Y = 2.617 \times 10^{-1}X + 1.181 \times 10^{-1}$ | 0.9994 | 0.05                       |
| 钴  | 59  | $Y = 5.186 \times 10^{-1}X + 1.904 \times 10^{-2}$ | 0.9994 | 0.05                       |
| 镍  | 60  | $Y = 1.507 \times 10^{-1}X + 1.526 \times 10^{-1}$ | 0.9995 | 0.05                       |
| 硒  | 78  | $Y = 8.179 \times 10^{-4}X + 1.248 \times 10^{-4}$ | 0.9997 | 0.05                       |
| 锶  | 88  | $Y = 6.817 \times 10^{-2}X + 3.002 \times 10^{-3}$ | 0.9996 | 0.05                       |
| 锆  | 90  | $Y = 1.885 \times 10^{-1}X + 1.381 \times 10^{-2}$ | 1.0000 | 0.20                       |
| 铈  | 121 | $Y = 1.070 \times 10^3X + 6.889$                   | 0.9999 | 0.05                       |
| 钡  | 137 | $Y = 9.351 \times 10^{-4}X + 2.415 \times 10^{-4}$ | 0.9998 | 0.15                       |
| 铊  | 205 | $Y = 6.531 \times 10^{-2}X + 3.276 \times 10^{-4}$ | 0.9998 | 0.005                      |

### 3.4. 方法精密度、回收率

为了验证方法的准确性和精密度, 试验对已知样品为本底做加标回收实验。按 2.3.2 条件对样品进行处理, 进行六次平行测定。计算相对标准偏差(RSD), 实验结果见表 4。各金属元素的加标回收率在 94.0%~106.5%之间, 相对标准偏差(RSD) 0.93%~5.9%之间。说明该方法对化妆品塑料包材中 9 种元素的含量测量准确性好, 精密度高。

**Table 4.** Method recovery and precision (n = 6)

**表 4.** 方法回收率和精密度(n = 6)

| 元素    | 测定值/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 加标量/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 回收率/% | RSD/(%, n = 6) |
|-------|----------------------------|----------------------------|-------|----------------|
| 铬(Cr) | 0.20                       | 0.5                        | 97.1  | 1.3            |
|       |                            | 2                          | 101.8 | 1.2            |
|       |                            | 5                          | 100.4 | 1.4            |
| 钴(Co) | —                          | 0.5                        | 94.0  | 2.7            |
|       |                            | 2                          | 105   | 1.2            |
|       |                            | 5                          | 100.8 | 0.94           |
| 镍(Ni) | 0.25                       | 0.5                        | 104.0 | 3.4            |
|       |                            | 2                          | 103.1 | 2.8            |
|       |                            | 5                          | 102.3 | 1.6            |

续表

|       |      |     |       |      |
|-------|------|-----|-------|------|
| 硒(Se) | —    | 0.5 | 104   | 2.6  |
|       |      | 2   | 101.5 | 1.9  |
|       |      | 5   | 101.8 | 1.6  |
| 锶(Sr) | 0.16 | 0.5 | 104.5 | 4.9  |
|       |      | 2   | 103.2 | 2.6  |
|       |      | 5   | 100.6 | 2.7  |
| 锆(Zr) | —    | 2   | 106.5 | 4.7  |
|       |      | 5   | 103.4 | 3.7  |
|       |      | 10  | 100.3 | 1.4  |
| 锑(Sb) | 1.31 | 0.5 | 95.0  | 3.9  |
|       |      | 2   | 104.5 | 2.5  |
|       |      | 5   | 103.5 | 1.0  |
| 钡(Ba) | 1.02 | 0.5 | 105.3 | 5.9  |
|       |      | 2   | 101.7 | 4.4  |
|       |      | 5   | 102.0 | 2.8  |
| 铊(Tl) | —    | 0.5 | 102.0 | 2.6  |
|       |      | 2   | 101.5 | 1.2  |
|       |      | 5   | 101.4 | 0.93 |

注：“—”表示未检出。

### 3.5. 实际样品测定

应用上述方法对7批化妆品塑料包材中9种元素含量进行试验分析,实验结果见表5。7批次样品信息如下:1#白色塑料罐;2#透明塑料瓶;3#蓝色塑料罐;4#白色塑料瓶;5#黑色塑料盖;6#红色塑料瓶;7#乳白色塑料罐

**Table 5.** Sample analysis results  
**表 5.** 样品分析结果

| 元素    | 样品编号              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|       | 样品 1#/<br>(mg/kg) | 样品 2#/<br>(mg/kg) | 样品 3#/<br>(mg/kg) | 样品 4#/<br>(mg/kg) | 样品 5#/<br>(mg/kg) | 样品 6#/<br>(mg/kg) | 样品 7#/<br>(mg/kg) |
| 铬(Cr) | 0.20              | 0.11              | 0.40              | 0.21              | 0.20              | 0.31              | 0.64              |
| 钴(Co) | —                 | 0.23              | —                 | —                 | —                 | —                 | —                 |
| 镍(Ni) | 0.25              | 6.95              | 2.37              | 3.76              | 4.24              | 1.85              | 0.93              |

续表

|       |      |      |      |      |       |       |      |
|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| 硒(Se) | —    | —    | —    | —    | —     | —     | —    |
| 锶(Sr) | 0.16 | 0.28 | —    | —    | 0.25  | 2.39  | 2.14 |
| 锆(Zr) | —    | —    | —    | —    | 2.16  | 3.77  | 1.59 |
| 锑(Sb) | 1.31 | —    | 8.37 | 9.65 | 46.38 | 55.29 | 3.51 |
| 钡(Ba) | 1.02 | —    | 0.36 | 1.57 | 4.04  | 1.34  | 0.73 |
| 铊(Tl) | —    | —    | —    | —    | —     | —     | —    |

注：“—”表示未检出。

结果 7 批次样品的检测结果显示, 7 批塑料包装材料中均未检出硒、铊元素; 钴元素仅在 2#样品中有检出, 测定结果为 0.23 mg/kg; 铬、锶的含量较低, 除 6#、7#样品锶元素含量分别为 2.39 mg/kg、2.14 mg/kg, 其余样品测定结果均为 0.11~0.64 mg/kg 之间; 锆元素测定, 1#~4#样品未检出锆元素, 其余样品均在 1.59~2.77 mg/kg 之间; 锑元素测定, 除 2#样品未检出, 其余样品测定结果均有检出, 5#、6#样品结果分别为 46.38 mg/kg、55.29 mg/kg; 其余样品测定结果在 1.31~9.65 mg/kg 之间; 钡元素测定, 除 2#样品未检出, 3#、7#样品结果分别为 0.36 mg/kg、0.73 mg/kg, 其余样品测定结果均有检出, 测定结果在 1.02~4.04 mg/kg 之间; 镍元素测定, 除样品 1#、7#样品结果分别为 0.25 mg/kg、0.93 mg/kg 外, 其余样品测定结果为 1.85 mg/kg~6.95 mg/kg 之间。

#### 4. 结论

实际样品测试发现, 不同样品重金属含量差异显著, 其中锑、镍等元素在部分样品中含量较高可能源于催化剂、阻燃剂、着色剂等添加剂的使用。尽管本研究测定的是塑料包材中的各元素总含量, 而非迁移量, 但高含量的重金属提示了样品所存在的潜在风险。参考欧盟食品接触材料法规(EU) No10/2011 [14], 锑的特定迁移限值为 0.04 mg/kg, 镍的特定迁移限值为 0.02 mg/kg。虽然化妆品包材中暂无统一的特定重金属含量限值, 但考虑到其与内容物长期接触接触的可能, 建议化妆品生产企业加强对包材的筛选, 优先选用低重金属含量的塑料材料。

综上所述, 本实验通过对化妆品塑料包材的分析研究, 通过优化条件确定了以硝酸-盐酸混酸体系为消解试剂, 建立了微波消解-ICP-MS 法同时测定塑料包装材料中铬、钴、镍、硒、锶、锆、锑、钡、铊等 9 种重金属元素。通过对样品进行重复性和加标回收试验, 结果表明该方法操作简单、精密度高、准确性好, 能够满足塑料包材的定量分析要求, 可以为相关检测提供参考依据。

#### 基金项目

浙江方圆检测集团股份有限公司自立科技项目(RD2504)。

#### 参考文献

- [1] 刘扬眉, 操恺, 王凤玲, 等. 浅析化妆品用包装塑料中可能迁移的有毒有害物质[J]. 中国包装, 2011, 31(9): 61-63.
- [2] 李建文, 匡林鹤, 单瑞峰, 等. 电感耦合等离子体质谱法在酸性条件下同时测定食品包装材料中 7 种金属元素迁移量[J]. 食品安全导刊, 2015(15): 144-146.
- [3] 陈新拓, 钟科, 何鑫, 等. 食品包装制品中的重金属迁移量测定[J]. 食品安全导刊, 2019(3): 166-168.
- [4] 王而今, 曾明. 六价铬化合物的肝脏毒性及其作用机制研究进展[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(2): 63-70.

- 
- [5] 戈兆凤, 韦朝阳. 镉环境健康效应的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2011, 28(7): 649-653.
- [6] 刘东巍, 孙家新, 王伟挺, 等. 铊毒性危害及其治疗策略的研究进展[J]. 毒理学杂志, 2025, 39(3): 215-218.
- [7] 国家市场监督管理总局, 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 食品安全国家标准食品接触材料及制品多元素的测定和多元素迁移量的测定: GB 31604. 49-2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [8] 国家食品药品监督管理总局. 化妆品安全技术规范(2015年版) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [9] 国家药品监督管理局. 关于发布《化妆品安全评估技术导则(2021版)》的公告[EB/OL]. 2021年第51号. <https://www.nmpa.gov.cn/xxgk/ggtg/hzhpqgtg/hzhpqgtg/20210409154716112.html>, 2025-1-25.
- [10] 杨茜. 原子吸收光谱法测定塑料食品包装材料中有害重金属[J]. 现代盐化工, 2023, 50(3): 20-22.
- [11] 王彪, 李钊. 食品模拟物对 PET 塑料材料及制品中镉迁移量检测的影响[J]. 中国标准化, 2018(S1): 144-148.
- [12] 罗洁, 刘园园, 颜敏, 等. 微波消解-ICP-OES 法测定塑料输液容器中 13 种元素杂质[J]. 分析仪器, 2025(1): 20-25.
- [13] 刘易焯, 吴序锋, 张海峰, 等. 超级微波消解-电感耦合等离子体质谱/发射光谱法测定再生聚对苯二甲酸乙二醇酯瓶片中 31 种元素含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 196-203.
- [14] European Commission (2011) Commission Regulation (EU) No 10/2011 of 14 January 2011 on Plastic Materials and Articles Intended to Come into Contact with Food. *Official Journal of the European Union*, 1-89.