

微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定生物材料类器械中15种元素含量

高海荣¹, 刘亿婕², 张聪², 陈亮^{2*}

(1. 福建省药品审核查验中心, 福建 福州 350000;

2. 福建省食品药品质量检验研究院, 福建 福州 350000)

摘要:微波消解法消解生物材料类器械样品,采用ICP-MS测其铝、铜、锰、镍、砷、镉、铬、钼、铅、铋、锡、铊、汞、钴、钒15种元素含量。通过仪器调谐优化参数、甄选干扰小的待测同位素、在线加入内标法定量,采用KED碰撞模式测定。15种元素的线性关系良好,方法的检出限为0.001~0.435 mg/kg,方法定量限为0.003~1.450 mg/kg,低、中、高三种水平样品的平均加标回收率在81.3%~101%之间,相对标准偏差在1.27%~5.97%之间。结果表明该方法简便、准确,满足生物材料类器械中15种元素含量的日常检测要求。

关键词:生物材料类器械;15种元素;电感耦合等离子体质谱法

中图分类号:O657.63 文献标识码:A 文章编号:1009-8143(2026)02-0025-06

Doi:10.3969/j.issn.1009-8143.2026.02.05

Determination of 15 Elements in Biomedical Medical Devices by Microwave Digestion-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

Gao Hai-rong¹, Liu Yi-jie², Zhang Cong², Chen Liang^{2*}

(1. Fujian Provincial Center for Drug Inspection, Fuzhou, Fujian 350000, China;

2. Fujian Institute for Food and Drug Quality Control, Fuzhou, Fujian 350000, China)

Abstract: Microwave digestion was used to process samples of biomaterial-based medical devices, and the contents of 15 elements (Al, Cu, Mn, Ni, As, Cd, Cr, Mo, Pb, Sb, Sn, Tl, Hg, Co, V) were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The method involved optimizing instrument parameters through tuning, selecting isotopes with minimal interference, performing quantification by online internal standard addition, and adopting kinetic energy discrimination (KED) mode for measurement. All 15 elements exhibited good linearity, the method detection limits ranged from 0.001 to 0.435 mg/kg, and the quantification limits ranged from 0.003 to 1.450 mg/kg, the average spiked recoveries at low, medium, and high concentration levels were between 81.3% and 101%, with relative standard deviations (RSD) is 1.27%~5.97%. The results demonstrate that the method is simple, accurate, and suitable for routine determination of the 15 elements in biomaterial-based medical devices.

Key words: biomaterial-based medical devices; 15 elements; ICP-MS

引言

生物材料是指用于与生命系统接触和相互作

用,以诊断、治疗、修复或替代生物体组织、器官或功能的一类天然或人工合成的材料。生物材料广泛应用于医学植入、组织工程、药物载体及环境修

收稿日期:2025-12-19

基金项目:福建省药品监督管理局科技项目(2024008)

第一作者简介:高海荣(1983—),女,硕士/高级工程师,从事医疗器械药品质量体系检查工作。Email:270246042@qq.com

通讯作者简介:陈亮(1990—),男,工程师,从事食品药品质量检测与研究工作。Email:670493321@qq.com

复等领域,其与生物机体或环境的直接接触特性,对纯度与安全性提出极高要求。生物材料类器械尤其是植入性或长期使用的医疗器械^[1],若含有高浓度重金属,可能通过血液、组织等途径进入人体,可能对患者造成慢性中毒或器官损伤,重金属杂质如铅、镉、砷、汞、钴、镍和铬等元素,因具有蓄积性、毒性持久性及生物链迁移性,成为生物材料安全评估的重点指标。这些重金属元素并非有意添加,而是在原材料生产、器械加工(如机械加工、电镀、焊接、热处理)、灭菌(如EO灭菌的催化剂残留)乃至包装迁移等环节中无意引入的。在临床使用过程中,它们可能通过腐蚀、磨损、离子溶出等方式释放到人体组织中^[2],引发从局部过敏到全身性毒性等一系列不良反应,包括神经毒性、肾毒性、致畸性和致癌性。因此,对生物材料类医疗器械中的重金属含量进行检测,对保障患者安全和产品合规性、推动生物材料产业规范化发展及维护生态环境安全具有重要现实意义。

当前重金属检测采用的前处理方法主要为微波消解法^[3]、干法消解法^[4]和湿法消解法^[5]这三种,其中干法与湿法消解法存在操作周期长、易引入污染、目标元素易挥发损失等固有缺陷,此外,由于操作过程中人为因素的差异,不同人员操作下的样品测量结果重复性存在明显差异;相较于传统方法,微波消解法展现出显著优势,其消解更为彻底,能有效降低空白值,减少待测元素的损失,同时具备高度的自动化与良好的结果重复性。目前元素测定的方法中,原子吸收光谱法^[6]、原子荧光光谱法^[7]这两种方法均属顺序测定型,分析通量较低,多元素批量检测的效率偏低、耗时较长,且可检测的元素种类也相对有限;电感耦合等离子体发射光谱法^[8]测定复杂样品基体(如医疗器械中富含的铁、铬、镍、铝、钙等)会产生大量复杂的光谱线,可能导致与目标元素的分析线发生重叠,虽然可以通过选择替代分析线或软件校正来克服,但这需要实验人员具备丰富的经验;电感耦合等离子体质谱法^[9]凭借其卓越的分析性能,在元素检测领域展现出显著优势,该方法不仅具备极高的检测灵敏度与良好的结果重复性,还拥有宽广的线性动态范围,能够实现多种元素的快速同步测定,并对复杂基质具有较强的抗干扰能力^[10-11]。因此本文采用微波消解法消解样品,电感耦合等离子体质谱法测定生物材料类

器械中Al、Cu、Mn、Ni、As、Cd、Cr、Mo、Pb、Sb、Sn、Tl、Hg、Co、V 15种金属元素含量,以期为质量监管提供技术参考。

1 实验部分

1.1 主要仪器与试剂

电感耦合等离子体质谱仪:Thermo ICAP-Q型,美国赛默飞世尔公司。

微波消解仪:TOPEX型,PreeKem公司。

超纯水机:Milli-Q型,美国密理博公司。

汞标准溶液:GBW08617,1 000 $\mu\text{g}/\text{mL}\pm 1\%$,中国计量科学研究院。

钴标准溶液:GBW(E)083781,1 000 $\mu\text{g}/\text{mL}\pm 1\%$,北方伟计量集团有限公司。

钒标准溶液:BWB2157-2016,1 000 $\mu\text{g}/\text{mL}\pm 2\%$,北方伟计量集团有限公司。

金标准溶液:GSB04-1715-2004,100 $\mu\text{g}/\text{mL}\pm 0.7\%$,国家有色金属及电子材料分析测试中心。

4种元素(钐、铈、铟、铋)的混合内标溶液:BWB2673-2016,100 $\mu\text{g}/\text{mL}\pm 3\%$,北方伟计量集团有限公司。

4种元素(铝、铜、锰、镍)的混合标准溶液:GNM-M071054-2013,1 000 $\mu\text{g}/\text{mL}\pm 2\%$,国家有色金属及电子材料分析测试中心。

8种元素(砷、镉、铬、钼、铋、铊、铅、锡)的混合标准溶液:GNM-M10222-2013,100 $\mu\text{g}/\text{mL}\pm 2\%$,国家有色金属及电子材料分析测试中心。

硝酸:优级纯,德国默克。

本研究收集到口腔骨填充材料和可吸收生物膜2批样品,分别编号为S1、S2。

1.2 实验方法

1.2.1 ICP-MS工作条件

射频功率:1 550 W;载气、辅助气、等离子气均为氩气,流速分别为1.3 L/min、0.9 L/min、14.2 L/min;采集模式为质谱图;重复次数:5;蠕动泵转速40 r/min;选择KED碰撞模式进行测定。

1.2.2 标准溶液配制

分别精密量取1 000 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的汞标准溶液、钴标准溶液及4种元素(铝、铜、锰、镍)的混合标准溶液与100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的金标准溶液、钒标准溶液及8种元素(砷、镉、铬、钼、铋、铊、铅、锡)的混合标准溶液

适量,用5%硝酸稀释配制成8个系列的15种元素混合标准溶液,各元素的具体浓度见表1,其中金的质量浓度均为4 ng/mL。

1.2.3 内标溶液制备

精密量取钐、铈、铟、铋混合标准溶液适量,用5%硝酸稀释配制成20 ng/mL的混合内标溶液。

1.2.4 供试品溶液制备

取样品适量,粉碎,称取0.5 g,加入硝酸5 mL,混匀,置于加热器中,以80°C加热1 h,冷却至室温。

以10°C/min从室温升至120°C,保持5 min,以20°C/min升至185°C,保持40 min进行微波消解。消解反应完全结束后,静置冷却至室温,置于100°C加热器上加热,将消化液蒸发(赶酸)浓缩至近干(残余体积约1~2 mL),用5%硝酸溶液将其完全转移至50 mL容量瓶中。准确加入200 μ L浓度为1 μ g/mL的金标准溶液,然后用5%硝酸溶液定容至刻度,充分混匀,作为供试品溶液。试剂空白溶液按相同方法同步制备。

表1 15种元素混合系列标准浓度表

元素	质量浓度(ng/mL)						
	STD1	STD2	STD3	STD4	STD5	STD6	STD7
Hg	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
As、Cd、Cr、Mo、Sb、Tl、Pb、Sn、Co、V	0.2	1	2	5	10	20	50
Al、Cu、Mn、Ni	10	50	80	100	200	500	1 000

2 结果与讨论

2.1 干扰消除

在利用ICP-MS开展多元素分析过程中,所遇到的干扰通常可分为质谱型和非质谱型两大类。针对同量异位素干扰可由同位素甄别手段消除的,在实际操作中常优先采用该方法以降低其影响,本

研究选取干扰较少或无明显干扰的同位素进行测定,基于此,本研究选择的15种元素的同位素具体见表2;通过仪器调谐可以降低氧化物、双电荷的干扰;多原子离子干扰如 $^{38}\text{Ar}^{37}\text{Cl}$ 对 ^{75}As 、 $^{95}\text{Mo}^{16}\text{O}$ 对 ^{111}Cd 等^[12],采用动能歧视KED碰撞模式,通过引入高纯氦气,将多原子离子解离,可以有效降低多原子离子干扰。就非质谱干扰而言,其主要成因来

表2 15种元素的同位素、线性范围、标准曲线和方法定量限

元素	内标	线性范围(ng/mL)	校准曲线	相关系数 r	方法检出限(mg/kg)	方法定量限(mg/kg)
^{27}Al	Sc	10~1 000	$y=1\ 171.432x+11\ 111.116$	0.999 3	0.435	1.450
^{51}V	Sc	0.2~100	$y=9\ 113.745x+964.763$	0.999 7	0.006	0.020
^{52}Cr	Sc	0.2~100	$y=13\ 635.428x+5\ 167.468$	0.999 6	0.019	0.063
^{55}Mn	Sc	10~1 000	$y=8\ 651.717x+2\ 460.081$	0.999 7	0.012	0.040
^{59}Co	Ge	0.2~100	$y=30\ 253.574x+605.157$	0.999 6	0.008	0.027
^{60}Ni	Ge	10~1 000	$y=6\ 535.380x+3\ 142.674$	0.999 9	0.022	0.073
^{63}Cu	Ge	10~1 000	$y=17\ 190.645x+5\ 930.408$	0.999 9	0.022	0.073
^{75}As	Ge	0.2~100	$y=1\ 279.753x+63.466$	0.999 9	0.025	0.083
^{95}Mo	In	0.2~100	$y=5\ 375.559x+199.738$	0.999 9	0.003	0.011
^{111}Cd	In	0.2~100	$y=7\ 182.103x+41.655$	0.999 8	0.008	0.027
^{118}Sn	In	0.2~100	$y=15\ 055.487x+3\ 255.538$	0.999 8	0.016	0.053
^{121}Sb	In	0.2~100	$y=15\ 254.669x+435.331$	0.999 9	0.007	0.023
^{202}Hg	Bi	0.1~10	$y=18\ 988.393x+175.981$	0.999 9	0.006	0.020
^{205}Tl	Bi	0.2~100	$y=20\ 108.877x+141.090$	0.999 9	0.001	0.003
^{208}Pb	Bi	0.2~100	$y=144\ 586.183x+37\ 150.096$	0.999 4	0.012	0.040

源于样品基体消解后残留的基质组分所引起的基质效应,可以选择与分析物性质(如电离能、质量数)相近且样品中不存在的元素作为内标,通过在线引入内标,在样品和标准曲线中同等浓度加入,监测内标信号的变化来实时校正分析物信号的漂移、抑制和增强。因此为有效校正基质效应,本研究采用Sc、Ge、In、Bi多元素混合内标法进行测定,提升分析准确性,15种元素选择的内标元素具体见表2。

2.2 线性关系和定量限考察

取表1中的7个系列浓度的15种系列混合标准溶液,按照1.2.项下条件依次测定,绘制标准曲线。回归分析结果表明,各元素在测定范围内均表现出良好的线性响应,其相关系数 r 均高于0.999,结果见表2。按照“1.2.4”项下方法制备11份样品空白溶液依次测定,分别以各元素响应值标准偏差的3倍^[13]除以校准曲线的斜率、10倍除以校准曲线的斜率作为检出限和定量限,在此基础上,结合实验过程中的实际称样量与最终定容体积,得到本实验方法检出限和方法定量限,各元素的方法检出限和方法定量限分别为0.001~0.435 mg/kg、0.003~1.450 mg/kg,可以满足各元素的日常分析要求,具体结果见表2。

2.3 精密度、重复性实验

取15种混合标准溶液(As、Cd、Cr、Mo、Pb、Sn、Sb、Tl、V、Co为1 ng/mL, Hg为0.2 ng/mL、Al、Cu、Mn、Ni为50 ng/mL)连续测定6次,测得15种金属元素信号响应值的RSD为0.84%~2.07%,实验结果表

明仪器的精密度好。精密称取口腔骨填充材料S1样品0.5 g 6份,按“1.2.4”项下方法制备供试品溶液,测定15种金属元素含量,因Al、V、Cr、Cu、As、Cd、Sn、Hg、Tl、Pb含量均为未检出,不计RSD,其余Mn、Co、Ni、Mo、Sb 5种金属含量的RSD为2.13%~5.98%,实验表明方法重复性良好。

2.4 回收率实验

精密称定口腔骨填充材料S1样品0.5 g,分别准确加入100 ng/mL的As、Cd、Cr、Mo、Pb、Sn、Sb、Tl、V、Co标准混合溶液0.5 mL、10 μg/mL的Al、Cu、Mn、Ni标准混合溶液0.5 mL、100 ng/mL的Hg标准溶液0.5 mL,作为低水平加标样品;分别准确加入100 ng/mL的As、Cd、Cr、Mo、Pb、Sn、Sb、Tl、V、Co标准混合溶液1 mL、10 μg/mL的Al、Cu、Mn、Ni标准混合溶液1 mL、100 ng/mL的Hg标准溶液1 mL,作为中水平加标样品;分别准确加入100 ng/mL的As、Cd、Cr、Mo、Pb、Sn、Sb、Tl、V、Co标准混合溶液2 mL、10 μg/mL的Al、Cu、Mn、Ni标准混合溶液2 mL、100 ng/mL的Hg标准溶液2 mL,作为高水平加标样品。低、中、高三个浓度水平的加标样品平行制备3份,参照本文“1.2.4”项下方法制备供试品溶液,对所有样品依次进样测定后计算加标回收率。结果显示,15种金属元素的平均回收率为81.3%~101%,相对标准偏差(RSD)为1.27%~5.97%,具体结果见表3。测定结果符合《中国药典》2020四部9101分析方法验证指导原则中要求,结果表明本方法具备较高的

表3 平均回收率实验测定结果($n=3$)

元素	样品含量 (mg/kg)	加标量 (mg/kg)	测定总量 (mg/kg)	平均回收率 (%)	RSD (%)	元素	样品含量 (mg/kg)	加标量 (mg/kg)	测定总量 (mg/kg)	平均回收率 (%)	RSD (%)
Al	未检出	10	9.32	93.2	4.14	Mo	0.150	0.1	0.238	88.0	5.54
		20	18.8	94.0	3.15			0.2	0.336	93.0	4.26
		40	38.2	95.5	3.33			0.4	0.519	92.2	4.08
V	未检出	0.1	0.089 3	89.3	5.68	Cd	未检出	0.1	0.091 2	91.2	4.53
		0.2	0.185	92.5	4.19			0.2	0.194	97.0	3.31
		0.4	0.389	97.2	2.11			0.4	0.392	98.0	2.68
Cr	未检出	0.1	0.083 1	83.1	5.97	Sn	未检出	0.1	0.081 3	81.3	5.79
		0.2	0.179	89.5	3.95			0.2	0.173	86.5	4.13
		0.4	0.378	94.5	3.66			0.4	0.358	89.5	4.28
Mn	0.281	10	9.87	95.9	2.32	Sb	0.128	0.1	0.213	85.0	5.76
		20	19.7	97.1	1.64			0.2	0.307	89.5	3.57
		40	39.2	97.3	1.27			0.4	0.493	91.2	2.59

(续表3)

元素	样品含量 (mg/kg)	加标量 (mg/kg)	测定总量 (mg/kg)	平均回收率 (%)	RSD (%)	元素	样品含量 (mg/kg)	加标量 (mg/kg)	测定总量 (mg/kg)	平均回收率 (%)	RSD (%)
Co	0.103	0.1	0.187	84.0	5.34	Hg	未检出	0.1	0.091 8	91.8	3.31
		0.2	0.284	90.5	4.76			0.2	0.193	96.5	3.22
		0.4	0.489	96.5	3.32			0.4	0.388	97.0	2.58
Ni	0.102	10	9.87	97.7	3.22	Tl	未检出	0.1	0.084 6	84.6	5.38
		20	19.2	95.5	2.93			0.2	0.181	90.5	4.38
		40	38.8	96.7	2.48			0.4	0.372	93.0	3.66
Cu	未检出	10	10.1	101	2.53	Pb	未检出	0.1	0.081 6	81.6	5.96
		20	19.2	96.0	2.23			0.2	0.173	86.5	4.58
		40	38.9	97.2	1.66			0.4	0.372	93.0	3.51
As	未检出	0.1	0.090 3	90.3	3.15						
		0.2	0.192	96.0	2.43						
		0.4	0.393	98.2	2.76						

准确性,能够满足对生物材料类器械中15种元素的定量分析要求。

2.5 样品测定

将口腔骨填充材料S1和可吸收生物膜S2按照“1.2.4”项下方法制备,依次测定,测定结果见表4。结果表明口腔骨填充材料样品和可吸收生物膜样品中铅、镉、砷、汞分别满足DB61/T 1206-2018《外科植入物 无机骨通用技术要求》、YY/T 1794-2021《口腔胶原膜通用技术要求》限量要求,其余11种元素均未做限量值要求,但含量也均较低。

表4 实际样品测定结果

元素	S1(mg/kg)	S2(mg/kg)	元素	S1(mg/kg)	S2(mg/kg)
Al	未检出	未检出	Mo	0.150	0.165
V	未检出	未检出	Cd	未检出	未检出
Cr	未检出	0.210	Sn	未检出	未检出
Mn	0.281	0.414	Sb	0.128	0.106
Co	0.103	未检出	Hg	未检出	未检出
Ni	0.102	0.273	Tl	未检出	未检出
Cu	未检出	0.597	Pb	未检出	未检出
As	未检出	未检出			

3 结论

本试验采用微波消解法消解样品,电感耦合等离子体质谱法测定生物材料类器械中Al、Cu、Mn、

Ni、As、Cd、Cr、Mo、Pb、Sb、Sn、Tl、Hg、Co、V 15种金属元素含量,采用动能歧视KED碰撞模式并结合在线加入内标,可有效消除质谱和非质谱双重干扰,各元素的样品加标平均回收率为81.3%~101%,RSD为1.27%~5.97%。经方法学验证,该方法切实可行,操作简单、高效、重复性好、灵敏度和准确度高,适用于生物材料类器械样品中15种元素含量测定。

参考文献

- [1] 王勇,陈永康,张笑旻,等. ICP-MS测定辅助生殖培养用油中的16种金属元素[J]. 上海计量测试, 2024, 51(02): 33-36.
- [2] 夏玉,廖莉,杨顺洪,等. 正畸用金属材料有害元素含量的检测方法分析[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(12): 61-63.
- [3] 陈春桃,张春华,陈亮,等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定硅凝胶乳房植入体中铂元素[J]. 广州化工, 2025, 53(20): 96-98.
- [4] 李正,张挺,吕佳利,等. 干法和微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定抹茶蛋糕和抹茶粉中的铝[J]. 中国卫生检验杂志, 2023, 33(15): 1821-1823.
- [5] 邹勇,马莉,郑海芳,等. 不同消解剂湿法消解测定大米中砷含量的研究[J]. 山东化工, 2025, 54(14): 142-144.
- [6] 李伟,潘小云,申健,等. 原子荧光光谱法测定工业废水中铈总量的研究[J]. 山西化工, 2025, 45(09): 84-86.
- [7] 刘沁荣,杜紫薇,李佳珍,等. 不同产地丹参及根际土壤无机元素分析与评价[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(11):

3618-3624.

- [8] 戴嘉垚,陶怀,肖作为,等. 电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定化妆品中8种重金属含量[J]. 日用化学工业(中英文),2025,55(09):1215-1220.
- [9] 彭韦楠,李丽敏,曹帅,等. ICP-MS/ICP-AES测定矿物药龙骨中55种元素的含量及龙骨来源的鉴别[J]. 理化检验-化学分册,2025,61(07):761-768.
- [10] 刘畅,张春华,黄芳,等. 基于电感耦合等离子体质谱法的化橘红产地鉴别方法研究[J]. 分析测试学报,2025,44(09):1964-1970.

- [11] 陈亮,张聪,严璐佳,等. 电感耦合等离子体质谱法测定巴戟天中22种元素的含量及溶出特性[J]. 理化检验-化学分册,2025,61(06):650-658.
- [12] 顾强,乙小娟,夏拥军,等. 多内标校正-电感耦合等离子体质谱法测定大豆中25种元素的含量[J]. 食品安全质量检测学报,2021,12(06):2080-2086.
- [13] 丁芳芳,何燕华,顾霄,等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定酒石酸托特罗定片中1类和2A类元素杂质的含量[J]. 理化检验-化学分册,2025,61(05):603-606.

(上接第17页)

3 结论

通过升温区间100℃~320℃、升温速率10℃/min下对龙涎酮对照品进行动态DSC扫描发现,该条件可在保证分析效率的前提下,准确捕捉龙涎酮的热行为特征。样品质量对DSC测量的准确性与灵敏度具有重要影响。通过5针龙涎酮对照品测试验证(进样量6.24~8.20 mg,升温范围100℃~320℃,速率10℃/min),其峰值温度与热焓的RSD均低于2.0%,说明在该进样范围内DSC测量结果准确可靠。因此,最终确定5~10 mg为适宜进样范围。

差示扫描量热法与气相色谱法的分析结果可见,两种方法对三批龙涎酮样品的含量测定结果一致,吻合良好,未见显著差异。在分析时长方面,气相色谱法需约50分钟,而DSC法仅需约25分钟。DSC法具有操作简便、分析快速、样品用量少、无需复杂前处理等优点,从DSC曲线上可清晰区分三批龙涎酮样品的差异,直观反映样品的热行为特征,为快速识别异常样品提供了可视化依据,适用于龙涎酮生产过程中的实时质量控制。

综上所述,差示扫描量热法有快速、高效、操作简便及重现性良好等优点,可作为龙涎酮及其相关香料中间体品质控制的一种可靠、高效的分析手段,具有较好的推广应用价值。未来可进一步探讨该方法在其他合成香料品质评价中的应用潜力。

参考文献

- [1] 危景波. 合成龙涎酮生产中环化反应技术改造及其应用

效果[J]. 化学工程与装备,2020,第4期:27-28.

- [2] 刘圣金,杨欢,徐春祥,等. TG-DSC分析法在矿物药禹余粮质量控制中的应用[J]. 中药材,2016,39(1):121-123.
- [3] 池海涛,刘伟丽,高峡,等. 差示扫描量热法及其发展趋势[J]. 食品安全质量检测学报,2016,7(11):4374-4377.
- [4] 李红华,曹睿,孙明明,等. DSC分析在聚酯生产中的应用[J]. 聚酯工业,2020,33(3):1-4.
- [5] 刘毅,吴建敏,鲁涓,等. 差示扫描量热法在化学药品对照品纯度分析中的应用[J]. 中国新药杂志,2017,26(10):1115-1118.
- [6] 芮胜波,王克立,张钊. 差示扫描量热法(DSC)在高分子材料分析中的应用[J]. 上海塑料,2017,第1期(总第177期):37-39.
- [7] 张春华,惠菊,王翔宇,等. 差示扫描量热法和热重法评估植物油氧化稳定性的研究进展[J]. 粮食与油脂,2021,34(10):8-11.
- [8] 宋跃文,贺雨欣,任鹏飞,等. 基于DSC分析的Al-7Si-1.5Cu-0.5Mg合金热处理工艺研究[J]. 热加工工艺,2022,51(8):139-145.
- [9] 薄雅萍,邹明轩,包海鹰. 应用热分析方法和红外分光光度法分析鉴别人参不同炮制品[J]. 人参研究,2022(04):2-7.
- [10] 张改红,石栋栋,庞登红,等. 愈创木酚-B-D-葡萄糖苷的合成及其加香应用[J]. 精细化工,2022,39(10):2099-2103.
- [11] 王芷若,王海仙,闫朋,等. 基于热分析法快速鉴别纺织品纤维的含量[J]. 中国口岸科学技术,2022,4(6):35-42.
- [12] 贺雨欣,任鹏飞,刘祎晗,等. 基于数学模型研究差示扫描量热法测量甘氨酸纯度[J]. 分析测试,2025,(4):101-107.