

淋膜纸杯中 Al、Mg 向酸性食品模拟物的 迁移及数学模拟

Migration and mathematical simulation of Aluminum and Magnesium from coated paper cup into acid food simulants

丁从阳¹ 林勤保¹ 罗九天¹ 李忠² 廖佳²

DING Cong-yang¹ LIN Qin-bao¹ LUO Jiu-tian¹ LI Zhong² LIAO jia²

(1. 暨南大学包装工程研究所产品包装与物流广东普通高校重点实验室, 广东 珠海 519070;

2. 珠海出入境检验检疫局技术中心, 广东 珠海 519015)

(1. Key Laboratory of Product Packaging and Logistics, Institute of Packaging Engineering, Jinan University, Zhuhai, Guangdong 519070, China; 2. Zhuhai Border Inspection and Quarantine Bureau, Zhuhai, Guangdong 519015, China)

摘要:为了研究淋膜纸杯中 Al 和 Mg 向酸性食品中的迁移规律以及数学模拟软件模拟迁移的有效性,对 8 种淋膜纸杯样品采用湿法消解的方法消解,之后利用电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-OES)检测 8 种淋膜纸杯中 Al 和 Mg 的初始含量及其向酸性食品模拟物(3%乙酸溶液)中迁移的量。淋膜纸杯中 Al 和 Mg 的初始含量分别为 841.6~3 482.0, 179.1~19 720.1 mg/kg。在迁移条件为 40 °C/12 h, 8 种样品中 Al 和 Mg 向 3%乙酸溶液中迁移量分别为 0.077~0.212, 0.065~0.862 mg/kg,而在 70 °C/8 h 下 8 种样品中 Al 和 Mg 向 3%乙酸溶液中迁移量分别为 0.074~0.180, 0.064~2.209 mg/kg,淋膜层低密度聚乙烯(LDPE)的厚度、迁移温度和时间以及纸的厚度和密度都能影响 2 种金属元素的迁移。使用迁移模拟软件 AKTS-SML 对 8 种淋膜纸杯样品进行迁移模拟,扩散系数采用 Piringer 模型,纸与 LDPE 之间的分配系数设置为 1 000, LDPE 与食品模拟物(3%乙酸)之间的分配系数设置为 1, Al 和 Mg 在 40 °C/12 h 下迁移模拟结果分别为 0.760~3.075, 0.162~17.750 mg/kg; 70 °C/8 h 下迁移模拟结果分别为 0.757~3.059, 0.161~17.660 mg/kg, 软件模拟的迁移结果比试验所得到的都要高, 迁移模拟结果在一定程度上能取代 Al 和 Mg 的迁移试验, 确保消费者安全。
关键词:淋膜纸杯; Al; Mg; 酸性食品; 迁移; AKTS-SML 软件

Abstract: In order to study the migration of metal elements Al and Mg into acidic foods in coated paper cups and the effectiveness of mathematical simulation software to simulate migration, eight kinds of coated paper cup samples were digested by wet digestion, and then inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-OES) was used to detect the initial contents of aluminum (Al) and magnesium (Mg) in eight kinds of coated paper cups and their migration into acidic food simulants (3% acetic acid solution). The initial contents of Al and Mg in 8 paper cups were 841.6~3 482.0 and 179.1~19 720.1 mg/kg, respectively. Under the migration conditions of 40 °C/12 h, the migration of metal elements Al and Mg into 3% acetic acid solution in the 8 samples was 0.077~0.212 and 0.065~0.862 mg/kg, and at 70 °C/8 h, the migration of metal elements Al and Mg into 3% acetic acid solution was 0.074~0.180 and 0.064~2.209 mg/kg, respectively. The thickness of the LDPE layer, the migration temperature and time, and the thickness and density of the paper can also affect the migration of the two metal elements. Using the migration simulation software AKTS-SML, simulation of Al and Mg migration were carried out. Piringer model was used to calculate the diffusion coefficients. The partition coefficient between paper and low density polyethylene (LDPE) was set to 1 000, The partition coefficient between LDPE and food simulants (3% acetic acid) was set to 1, the migration of metal elements Al and Mg simulated at 40 °C/12 h were 0.760~3.075 and 0.162~17.750 mg/kg respectively; the migration simulation results at 70 °C/8 h were 0.757~3.059 and 0.161~17.660 mg/kg, the migration results simulated by the software are higher than those obtained by the experiment, migration simulation software can simulate the migration of metal elements Al and Mg to some extent.

Keywords: coated paper cup; Al; Mg; acidic food; migration; AKTS-SML software

基金项目:珠海进出口公共技术服务平台产学研协同创新计划(编号: IETP201701003); 珠海出入境检验检疫局科技计划项目(编号: ZH2017-33)

作者简介:丁从阳,男,暨南大学在读硕士研究生。

通信作者:林勤保(1968—),男,暨南大学研究员,博士。

E-mail: 7899966@qq.com

收稿日期:2018-05-30

纸作为一种可降解的环保材料,具备质轻、原料来源广、表面印刷性能优异和加工性能好等特点,使其在食品包装行业中应用的比重不断升高,但纸阻隔性能较差,易受环境湿度影响制约了其作为食品包装材料的适用范围。淋膜纸复合包装材料是在纸表面淋膜一层聚合物,通常为低密度聚乙烯(LDPE)或聚乳酸(PLA)^[1],提高了纸的阻隔性能,拓展了其作为食品包装材料的适用范围。而纸塑包装材料表面通常会印刷各种精美的图案,印刷油墨中含有较多重金属元素^[2],以及在纸张制造过程中会添加各种金属类的盐作为无机的杀菌剂或乳化剂^[3],当这些纸塑包装材料与食品直接接触后,这些金属元素可能透过阻隔层迁移到食品中^[4-6],从而对消费者的健康造成隐患。

由于传统的迁移试验操作复杂耗费大量的人力和物力,且大部分的迁移过程都是基于 Fick 第二定律^[7],因此可以利用数学模型来模拟迁移过程^[8-9]。近几十年来,在迁移模拟方面,大部分的研究都集中于聚合物中有机污染物迁移^[10-13],因此所建立的数学模型也都是依据聚合物的相关性质来进行推导建模的,其中最终影响迁移模拟结果的 2 个参数是包装材料内迁移物质的扩散系数和包装材料与食品模拟物之间的分配系数。一些经验公式预测模型的成功应用,为开发高效的预测模型提供了可借鉴经验,如 Banger-Piringer 模型、Limm-Hollifield 模型、Piringer 模型^[8]、Helm-morth 模型^[14]等。关于分配系数的研究相对于扩散系数要少,目前对于分配系数的估算主要有正规溶液理论和基团贡献法^[15],但是这 2 种方法需要大量的计算,使得其应用范围较窄;另一方面,许多欧美学者希望建立一种简单有效的方法来估算分配系数,如 Tehrany 等^[16]通过聚合物和迁移物质的相关理化性质建立一种计算分配系数的方法,Gillet 等^[17]基于聚合物溶液的热力学理论建立一种预测分配系数的方法。欧盟以及 FDA 都已经将迁移模拟软件作为一种可靠的工具引入到法规中^[18-19],但在中国还没有相应法规引入迁移模拟软件。AKTS-SML 软件在聚合物中有机物质的迁移模拟方面已经被验证是一种可靠的工具^[20]。由于在纸浆造纸的生产过程中会添加大量 Al 和 Mg 的无机金属盐的添加剂,这类金属元素最后会在淋膜纸中残留,同时根据预试验中对 3 种无印刷淋膜纸中多种金属元素的初始含量测定,发现 Al 和 Mg 的含量非常高。

目前对于像纸这类的非聚合物包装材料以及金属元素的迁移模拟研究的非常少,有限的研究中也以纸类包装材料中有机助剂的迁移模拟为主^[21-22]。为了更好地研究金属元素从淋膜纸向食品模拟物中的迁移规律,所以本研究拟尝试利用 AKTS-SML 软件对 8 种淋膜纸包装材料中的 Al 和 Mg 2 种金属元素进行迁移模拟,并与试验的迁移结果进行对比,以此考察 AKTS-SML 迁移模拟软件的有效性,为中国法规未来引入迁移模拟软件提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

8 种淋膜纸杯(不同品牌):购于广东珠海市沃尔玛超市

和得一超市;

硝酸、高氯酸:分析纯,广州化学试剂有限公司;

24 种金属元素混合标液:100 mg/L,金属元素分别为铝、砷、硼、钡、铍、镉、钴、铬、铜、铁、镓、铈、镁、锰、镍、铅、锑、锡、锇、钛、铊、钒、锌,国家有色金属及电子材料分析测试中心;

冰乙酸:分析纯,纯度 $\geq 99.5\%$,天津市大茂化学试剂厂。

1.1.2 主要仪器设备

微控数显电热板:XMTD-701 型,盐城轩源加热设备科技有限公司;

电感耦合等离子体原子发射光谱:5100 ICP-OES 型,美国安捷伦公司;

电热鼓风干燥箱:GZX-9420MBE 型,上海博讯实业有限公司;

AKTS-SML 迁移模拟软件:版本为 Advanced Version 5.231,法国凯璞公司;

薄膜测厚仪:DRK203B 型,济南德瑞克仪器有限公司;

超纯水器:EPED-10TS 型,南京易普达科技发展有限公司。

1.2 试验方法

本试验的相关仪器方法参数设定均参照美国安捷伦公司提供的参数。

1.2.1 标准溶液配制 取 24 种金属元素混合标准溶液(浓度为 100 mg/L)10 mL,转移到 100 mL 容量瓶中,用超纯水定容,配置成浓度为 10 mg/L 的混合标液母液。将混合标液的母液用超纯水分别稀释为 0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 mg/L 作为标准溶液,于 4℃下保存,待测。

1.2.2 ICP-OES 工作条件 重复次数 2,泵速 12 r/min,提升延时 25 s(快速泵),读取时间 5 s,雾化器流量 0.70 L/min,RF 功率 1.20 kW,等离子体气流量 11.0 L/min,稳定时间 15 s,辅助器流量 1 L/min,观察方式轴向,补偿气流量 0 L/min,观察高度 8 mm。

1.2.3 样品前处理 采用湿法消解,将 8 种淋膜纸杯样品剪成 5 mm $\times$ 5 mm 的碎片,准确称取 1 g(精确至 0.02 g)样品至广口瓶中,然后在微控数显电热板上将淋膜纸碳化,加入 14 mL 混酸溶液后加热,淋膜纸消解后广口瓶冒酸烟且剩余液体变至澄清,放置冷却至室温并加入超纯水,用 0.45 μ m 滤膜过滤后用超纯水定容至 100 mL 待测。

1.2.4 迁移试验 纸塑包装材料中的金属元素向酸性食品模拟物中的迁移量最多^[23],根据欧盟标准,本研究采用 3% 乙酸溶液作为食品模拟物进行迁移试验。参考生活中一次性纸杯的使用习惯,用 3% 乙酸分别在 40℃(1,2,4,8,12 h)和 70℃(1,2,4,8 h)下浸泡不同时长(迁移试验达到 40℃/12 h 和 70℃/8 h 时已有部分纸杯破损漏液,因此不再进行更长时间的迁移试验),不同温度的每一个时间点做 2 组平行,取浸泡液稀释适宜倍数后上机检测。样品相关信息及迁移试验的相关参数见表 1。

表 1 8 种淋膜纸杯的相关参数以及食品模拟物体积

Table 1 Related parameters of 8 kinds of coated paper cups and food simulant volume

样品编号	纸厚度/ μm	LDPE 厚度/ μm	纸密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	食品模拟液 体积/mL
1	244	20	0.870	180
2	227	6	0.884	160
3	282	10	0.868	180
4	265	12	0.942	180
5	286	19	0.950	180
6	256	16	0.950	150
7	181	10	0.949	120
8	268	10	0.881	180

1.3 数学模拟条件设置

1.3.1 扩散系数 由于试验测定扩散系数复杂,使经验公式的估算扩散系数理论预测模型成为研究的热点和重点。由于 AK-TS-SML 软件内置了 Piringier 模型,且该模型被广泛运用在迁移模拟的应用上,具有一定的普适性。所以本研究关于 Al 和 Mg 在淋膜纸中扩散系数的估算采用 Piringier 模型。

1.3.2 分配系数 迁移中的分配系数 $K_{P/F}$ 是聚合物中物质向食品或食品模拟物迁移达到平衡时,聚合物中该物质的浓度与食品或食品模拟液中该物质浓度的比值。一般来说,如果迁移的化学物质易溶于食品模拟液中,则可认为分配系数 $K_{P/F}$ 为 1。如果迁移的化学物质难溶于食品模拟液中,则可

设定分配系数 $K_{P/F}$ 为 1 000。

2 结果与分析

2.1 试验测试结果

2.1.1 标准曲线的建立及方法学验证

(1) 标准曲线的建立:分别用 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mg/L 的标准溶液上机测定浓度,得到标准曲线和相关系数:Al (396.152 nm) 的校准曲线为 $Y = 24\,216.8X + 136.6$,相关系数(R)为 0.999 8,Mg(280.270 nm)的校准曲线为 $Y = 92\,717.2X + 168.7$,相关系数(R)为 0.999 8。

(2) 检出限与定量限:进空白样品 11 次,所得标准偏差的 3 倍即为检出限,10 倍即为定量限。通过测定,得到 Al (396.152 nm)的检出限为 2.4 $\mu\text{g/L}$,定量限为 8.0 $\mu\text{g/L}$;Mg (280.270 nm)的检出限为 0.3 $\mu\text{g/L}$,定量限为 1.0 $\mu\text{g/L}$ 。

(3) 方法验证:对空白样品加标,加标浓度 0.2 mg/kg,每个样品做 2 个平行,按 1.2.3 的前处理方法对空白样品进行处理后上机检测,得到 Al 的加标回收率为 82.45%,相对标准偏差为 0.76%;Mg 的加标回收率为 82.65%,相对标准偏差为 2.00%。

2.1.2 样品中 Al 和 Mg 的初始含量 选取 Al 和 Mg 的检测波长分别为 396.152,280.270 nm,每个样品做 3 组平行试验,上机检测得到每种样品中的 Al 和 Mg 的初始含量见表 2。

2.1.3 8 种样品中 Al 和 Mg 的迁移结果 将 3% 乙酸溶液分别装入 8 种淋膜纸杯中,在迁移试验的每个时间点取样上机测出 2 种金属元素的迁移量。每种样品在不同温度下的不同时间点做 2 组平行试验,结果见表 3、4。

表 2 8 种淋膜纸杯样品中 Al 和 Mg 的初始含量[†]

Table 2 Initial content of metal aluminum and magnesium in 8 kinds of coated paper cup samples ($n=3$)
mg/kg

金属元素	样品编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Al	1 053.2 (6.3%)	1 430.9 (3.7%)	1 726.8 (8.6%)	894.9 (3.2%)	841.6 (0.8%)	892.6 (1.7%)	3 482.0 (3.5%)	1 071.8 (1.5%)
Mg	1 813.0 (11.3%)	3 351.6 (3.3%)	2 951.9 (12.9%)	12 720.6 (1.4%)	179.1 (17.7%)	19 720.1 (3.8%)	10 281.7 (3.0%)	6 845.7 (4.9%)

[†] 括号内为 RSD 值。

表 3 40 ℃ 下 8 种样品中 Al 和 Mg 向 3% 乙酸中的迁移量

Table 3 Migration of aluminum and magnesium into 3% acetic acid in 8 samples at 40 ℃ ($n=2$)
mg/kg

样品编号	1 h		2 h		4 h		8 h		12 h	
	Al	Mg	Al	Mg	Al	Mg	Al	Mg	Al	Mg
1	0.022	0.056	0.036	0.092	0.056	0.144	0.080	0.212	0.100	0.246
2	0.016	0.078	0.026	0.116	0.040	0.213	0.060	0.324	0.153	0.578
3	0.018	0.075	0.035	0.129	0.042	0.266	0.081	0.313	0.118	0.862
4	0.025	0.085	0.038	0.144	0.046	0.219	0.070	0.412	0.077	0.527
5	0.029	0.019	0.049	0.035	0.071	0.036	0.103	0.047	0.134	0.065
6	0.016	0.072	0.030	0.156	0.047	0.315	0.074	0.611	0.080	0.774
7	0.045	0.150	0.077	0.230	0.100	0.307	0.157	0.462	0.212	0.572
8	0.018	0.048	0.026	0.079	0.048	0.161	0.077	0.274	0.108	0.453

表 4 70 ℃下 8 种样品中 Al 和 Mg 向 3%乙酸中的迁移量

Table 4 Migration of aluminum and magnesium into 3% acetic acid in 8 samples at 70 ℃ (n=2)

样品编号	mg/kg							
	1 h		2 h		4 h		8 h	
	Al	Mg	Al	Mg	Al	Mg	Al	Mg
1	0.042	0.095	0.056	0.157	0.061	0.160	0.144	0.304
2	0.028	0.100	0.035	0.208	0.065	0.261	0.180	0.353
3	0.040	0.104	0.046	0.205	0.058	0.250	0.108	0.411
4	0.037	0.126	0.048	0.344	0.056	0.549	0.114	1.356
5	0.017	0.022	0.049	0.025	0.069	0.040	0.116	0.064
6	0.027	0.131	0.041	0.438	0.042	0.802	0.181	2.209
7	0.062	0.184	0.069	0.294	0.128	0.414	0.157	0.462
8	0.028	0.083	0.061	0.295	0.092	0.412	0.177	0.897

根据迁移试验结果可以看出,迁移时间相同时温度越高,2 种金属元素的迁移量越多,符合一般的迁移规律,温度升高加快迁移过程。同时淋膜纸的淋膜层厚度也对 2 种金属元素的迁移有较大影响,如 2 号和 8 号样品的迁移试验中,在 Al 的初始含量相差不大且纸的密度基本一样时,淋膜层越厚,Al 的迁移量越小,以及在 6 号和 8 号样品的迁移试验中,6 号样品 Mg 的初始含量要高于 8 号样品的,但由于 6 号样品的淋膜更厚所以 Mg 的迁移量要小于 8 号样品的。由于部分纸杯样品的淋膜层较薄,所以当迁移试验时间比较长时,纸杯壁与纸杯底粘合的接口处易被浸泡液侵蚀,和浸泡液直接接触,导致 2 种金属离子的迁移试验数据偏大。另外纸张的厚度和纸的密度也都会影响 2 种金属元素的迁移结果^[24]。

2.2 迁移模拟结果

将各个样品的相关信息如纸的厚度、淋膜厚度、纸的密度、淋膜纸与食品模拟物的接触面积和食品模拟物的体积以及迁移试验条件输入到 AKTS-SML 软件中,2 种金属元素的扩散系数根据 Piringer 模型进行估算,分配系数根据迁移物易溶于扩散介质就设置为 $K_{P/F}=1$,反之分配系数就设置为 $K_{P/F}=1\ 000$,所以纸与 LDPE 膜的分配系数则设置为 1 000,LDPE 膜与水的分配系数则设置为 1。迁移模拟及部分参数见表 5、6。

从模拟的结果来看,2 种金属元素的模拟迁移值要大于试验所测的,这一方面是由于采用最严苛的情况来估计迁移值,另一方面软件在模拟 2 种金属元素迁移时,非常快就趋近迁移平衡。而纸塑包装材料中的金属元素迁移达到平衡时间非常长^[11],如表 5、6 所示,温度对于迁移的快慢有很大的影响,而由于迁移试验的时间较短,试验中的样品所含的 2 种金属元素还未达到迁移平衡。金属元素的迁移不同于有机物的迁移,其在包装材料中迁移达到平衡的时间久,而本次试验中考虑纸杯的实际使用情景,迁移试验在纸杯发生漏液破损后就停止,所以金属元素的迁移还没有达到平衡,而在软件模拟过程中,因为尚无关于金属元素在包装材料中扩散系数的计算模型,所以本次迁移模拟所采用的是 Piringer

表 5 40 ℃、12 h 的条件下淋膜纸杯中 Al 和 Mg 迁移模拟数据

Table 5 Aluminum and magnesium migration simulation data in coated paper cups(40 ℃,12 h) mg/kg

样品编号	Al		Mg	
	试验值	模拟值	试验值	模拟值
1	0.100	0.874	0.246	1.505
2	0.153	1.193	0.578	2.795
3	0.118	1.427	0.862	2.440
4	0.077	0.802	0.527	11.400
5	0.134	0.760	0.065	0.162
6	0.080	0.803	0.774	17.750
7	0.212	3.075	0.572	9.082
8	0.108	0.901	0.453	5.753

表 6 70 ℃、8 h 的条件下淋膜纸杯中 Al 和 Mg 迁移模拟数据

Table 6 Aluminum and magnesium migration simulation data in coated paper cups(70 ℃,8 h) mg/kg

样品编号	Al		Mg	
	试验值	模拟值	试验值	模拟值
1	0.144	0.874	0.304	1.504
2	0.180	1.186	0.353	2.778
3	0.108	1.419	0.411	2.425
4	0.114	0.799	0.412	11.350
5	0.116	0.757	0.064	0.161
6	0.074	0.799	1.356	17.660
7	0.157	3.059	0.462	9.032
8	0.177	0.898	2.209	5.733

模型进行估算。另一方面,淋膜纸这种纸塑包装材料的特性,软件数据库中关于纸只有三大类,而淋膜纸中纸这一部分的种类很多,具有不同的克重、密度、紧度等,所以导致了软件模拟迁移结果要高于试验的。迁移模拟是想省去大量的人力物力,同时迁移的数值得比试验真实的数值要高,这

样才能保证消费者安全,因此该迁移模拟软件能在一定程度上预测出该 2 种金属元素的迁移。

3 结论

本研究利用湿法消解结合 ICP-OES 检测了 8 种淋膜纸杯中 Al 和 Mg 的含量以及其向 3% 乙酸溶液中的迁移量,8 种淋膜纸杯 Al 的初始含量为 841.6~3 482.0 mg/kg, Mg 含量为 179.1~19 720.1 mg/kg,在迁移条件为 40 °C/12 h,8 种淋膜纸杯中 Al 和 Mg 向 3% 乙酸溶液中迁移量分别为 0.077~0.212,0.065~0.862 mg/kg,而在 70 °C/8 h 下 8 种样品中 Al 和 Mg 向 3% 乙酸溶液中迁移量分别为 0.074~0.180,0.064~2.209 mg/kg。使用 AKTS-SML 迁移模拟软件对 8 种淋膜纸杯中 2 种金属元素向 3% 乙酸溶液中的迁移模拟,迁移条件为 40 °C/12 h, Al 和 Mg 的迁移模拟结果分别为 0.760~3.075,0.162~17.75 mg/kg;70 °C/8 h 下迁移模拟结果分别为 0.757~3.059,0.161~17.660 mg/kg,模拟结果均大于试验的。这符合迁移模拟值要高于实际迁移值的要求,能够在一定程度上替代繁琐的迁移试验,另外也为迁移模拟软件引入到中国的相关法规提供了一些理论依据。尽快开发适用于金属元素在包装材料中扩散系数和分配系数的计算模型以及扩增不同种类包装材料的数据库,使软件模拟迁移数据与真实迁移数据更加接近,是下一步研究课题。

参考文献

- [1] 郎贤忠,潘宏伟,杨慧丽,等.完全生物降解聚乳酸流延纸塑复合材料的制备及性能研究[J].塑料工业,2016(4):124-128.
- [2] 彭湘莲,付红军.食品纸塑复合包装材料中汞含量测定条件的优化[J].食品与机械,2015,31(5):62-65.
- [3] 袁玮,侯庆喜,赵江鹏,等.镁在制浆造纸工业中的应用[J].纸和造纸,2009(8):45-49.
- [4] 彭湘莲,李忠海,王利兵,等.4 种纸塑包装容器中重金属镉的迁移规律研究[J].中国食品学报,2012(9):73-77.
- [5] 赵付文,孙卓军,高国庆,等.食品接触塑料材料中有害重金属迁移量测定方法综述[J].化学分析计量,2015(1):101-105.
- [6] SANTOS É J D, OLIVEIRA F M P, HERRMANN A B, et al. ICP OES determination of contaminant elements leached from food packaging films[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2017, 60: e17160465.
- [7] GRANK J. The mathematics of diffusion[M]. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 1975.
- [8] BRANDSCH J, MERCEA P, RÜTER M, et al. Migration modelling as a tool for quality assurance of food packaging[J]. Food Additives & Contaminants, 2002, 19(s1): 29.
- [9] BEGLEY T, CASTLE L, FEIGENBAUM A, et al. Evaluation of migration models that might be used in support of regulations for food-contact plastics[J]. Food Additives & Contaminants, 2005, 22(1): 73-90.
- [10] STOFFERS N H, BRANDSCH R, BRADLEY E L, et al. Feasibility study for the development of certified reference materials for specific migration testing Part 2: estimation of diffusion parameters and comparison of experimental and predicted data[J]. Food Additives & Contaminants, 2005, 22(2): 173-184.
- [11] WELLE F, FRANZ R. Migration of antimony from PET bottles into beverages: determination of the activation energy of diffusion and migration modelling compared with literature data[J]. Food Additives & Contaminants, 2011, 28(1): 115-126.
- [12] TORRES A, RAMIREZ C, ROMERO J, et al. Experimental and theoretical study of bisphenol A migration from polycarbonate into regulated EU food simulant[J]. European Food Research & Technology, 2015, 240(2): 335-343.
- [13] BRANDSCH R. Probabilistic migration modelling focused on functional barrier efficiency and low migration concepts in support of risk assessment[J]. Food Additives & Contaminants Part A, 2017, 34(10): 1-24.
- [14] HELMROTH E, RIJK R, DEKKER M, et al. Predictive modelling of migration from packaging materials into food products for regulatory purposes[J]. Trends in Food Science & Technology, 2002, 13(3): 102-109.
- [15] 巴恩斯,辛克莱,沃森,等.食品接触材料及其化学迁移[M].宋欢,林勤保,译.北京:中国轻工业出版社,2011:125-141.
- [16] TEHRANY E A, FOURNIER F, DESOBRY S. Simple method to calculate partition coefficient of migrant in food simulant/polymer system[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(1): 135-319.
- [17] GILLET G, VITRAC O, DESOBRY S. Prediction of partition coefficients of plastic additives between packaging materials and food simulants[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49(16): 7 263-7 280.
- [18] European Commission. Commission Directive 2002/72/EC of 6 August 2002 on Plastic materials and articles intended to come into contact with foodstuffs[S]. Brussels: Official Journal of the European Communities, 2002: L220/18.
- [19] European Commission. Commission Regulation (EU) No.10/2011 of 14 January 2011 on Plastic materials and articles intended to come into contact with food[S]. Brussels: Official Journal of the European Union, 2011: L12/82-85.
- [20] 丁从阳,林勤保,钟怀宁,等. AKTS-SML 软件预测 5 种塑料薄膜中有机助剂向脂肪食品模拟液的迁移[J].食品科学,2018(8):256-261.
- [21] 黄秀玲.纸塑复合包装材料 UV 墨光引发剂迁移试验与理论研究[D].无锡:江南大学,2009:70-112.
- [22] POCAS M D F, OLIVIRA J C, PEREIRA J R, et al. Modelling migration from paper into a food simulant[J]. Food Control, 2011, 22(2): 303-312.
- [23] 彭湘莲.食品纸塑复合包装材料中重金属的检测及迁移规律研究[D].长沙:中南林业科技大学,2015:111-140.
- [24] HUANG Xiu-lin, WANG Zhi-wei, HU Chang-ying, et al. Factors affecting migration of contaminants from paper through polymer coating into food simulants[J]. Packaging Technology and Science, 2013, 26: 23-31.