

第16届全国包装工程学术会议专栏

聚苯乙烯包装材料中苯乙烯检测及迁移的研究进展

宋雪超^{1,2}, 林勤保^{1,2}, 方红³

(1.暨南大学包装工程研究所, 珠海 519070;

2.广东普通高校产品包装与物流重点实验室, 珠海 519070; 3.深圳出入境检验检疫局, 深圳 518000)

摘要: **目的** 介绍聚苯乙烯包装材料中苯乙烯单体检测及迁移的研究进展。**方法** 总结国内外聚苯乙烯中苯乙烯检测及迁移的文献, 并将国际上苯乙烯最新的检测方法和迁移研究和我国的进行对比, 指出我国在该方面的不足和发展方向。**结果** 溶解-沉淀可以有效地提取聚苯乙烯中的苯乙烯, 其回收率达到86%以上。苯乙烯不易向蒸馏水中发生迁移, 只有在较高温度和较长时间下才有少量迁移。不同迁移方式对苯乙烯的迁移影响较大, 由于切口的存在使得全浸泡的迁移量高于单面迁移。**结论** 溶解-沉淀是提取苯乙烯的有效方法, 不同食品模拟物、温度、时间以及迁移方式都会对苯乙烯的迁移产生影响, 应避免聚苯乙烯在较高温度、较长时间的情况下接触食品, 且不使用表面已损坏的聚苯乙烯包装材料, 以减少其对人体的危害。

关键词: 聚苯乙烯; 苯乙烯; 检测; 迁移

中图分类号: TB484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)01-0001-06

Research Progress on Detection and Migration of Styrene in Polystyrene Packaging Materials

SONG Xue-chao^{1,2}, LIN Qin-bao^{1,2}, FANG Hong³

(1.Packaging Engineering Institute of Jinan University, Zhuhai 519070, China;

2.Key Laboratory of Product Packaging and Logistics of Guangdong Higher Education Institutes, Zhuhai 519070, China;

3.Shenzhen Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Shenzhen 518000, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce the research progress on detection and migration of styrene in polystyrene packaging materials. Domestic and overseas literatures related to the detection and migration of styrene in polystyrene were summarized; meanwhile, the newest international detection method and migration researches on styrene were compared with those in China, which showed the shortage and development direction of the researches concerned. In the method of dissolution-precipitation, the styrene could be extracted from polystyrene efficiently, and the recovery of this method was more than 86%. It was not easy for styrene to migrate into distilled water. Only a small amount of styrene could migrate at higher temperature and in a longer period. Various migration ways could affect the migration of styrene greatly, and the fully immersed migration amount was higher than the single-sided migration due to the existence of cuts. Dissolution-precipitation is an effective method to extract styrene. Different food simulants, temperatures, time and migration ways can affect the migration of styrene. The polystyrene should not contact the food at high temperatures and in a longer period; in addition, the polystyrene packaging materials with damaged surface should not be used, so that the harm to human body can be reduced.

KEY WORDS: polystyrene; styrene; detection; migration

收稿日期: 2016-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(21277085); 国家质量监督检验检疫总局科技计划(2015IK259)

作者简介: 宋雪超(1993—), 男, 暨南大学硕士生, 主攻食品与药品包装。

通讯作者: 林勤保(1968—), 男, 暨南大学教授, 主要研究方向为食品与药品包装。

2013年,国家发展与改革委员会在《产业结构调整指导目录(2011年本)》的“淘汰产品目录”中删除一次性发泡餐具,一次性发泡餐具在被禁14年后得到解禁^[1]。一次性发泡餐具以聚苯乙烯树脂为原料,在高温条件下加入丁烷或庚烷作为发泡剂,挤压成型^[2]。聚苯乙烯有质轻、耐水、耐油、高阻隔性的优良性能,因此被广泛用作鲜肉托盘、一次性餐具等食品包装^[3-4]。随着人们生活节奏的加快,发泡餐具越来越多地应用于快餐店、街摊小贩等快餐行业。聚苯乙烯本是无毒无害的,但在加热过程中会分解出包括苯乙烯在内的多种有害物质^[5-10],在与食品接触过程中,内部残留的未被聚合的苯乙烯会向食品发生迁移,对人类健康造成一定程度上的危害。苯乙烯会刺激人的眼、鼻、喉、皮肤等,对肝脏有一定毒性,同时也会抑制中枢神经系统^[11-13]。Ska^[14]的研究发现,健康志愿者接触高质量浓度的苯乙烯(370~591 mg/m³)1 h后,志愿者均出现视觉抑制、眼球扫描速度显著提高、反应时间延长等症状,该研究进一步证明了苯乙烯的神经毒性。

美国食品与药品管理局(FDA)规定与非油脂食品接触的食品级聚苯乙烯中苯乙烯的质量分数不得超过1%(每千克聚苯乙烯中不得超过10 g的苯乙烯),与油脂食品接触的不得超过0.5%(每千克聚苯乙烯中不得超过5 g苯乙烯);用橡胶改性的聚苯乙烯中苯乙烯质量分数不超过0.5%^[15]。美国卫生和公共服务部(DHHS)把苯乙烯列为“reasonably anticipated to be a human carcinogen”,即合理预期致癌物^[16]。在此之前,国际癌症研究机构(IARC)把苯乙烯列为2B类致癌物,即“possibly carcinogenic to humans”^[17]。我国GB 9692—1988规定用于制作食品包装材料、容器和食品工业的聚苯乙烯树脂中苯乙烯和乙苯的质量分数分别不超过0.5%和0.3%^[18]。提取效率不高的方法会低估聚苯乙烯材料中苯乙烯的含量,因此建立残留苯乙烯的有效检测方法十分必要。

了解聚苯乙烯食品包装中苯乙烯的毒性、分析检测技术以及迁移研究,对于全面认识聚苯乙烯包装材料、规范行业生产、完善法规建立具有重要意义。文中综述聚苯乙烯材料中苯乙烯的检测方法和迁移这两方面的研究,对比我国和发达国家之间的差距,并指出我国聚苯乙烯的研究方向。

1 苯乙烯的检测方法

1.1 溶解-沉淀法

国际上对于聚苯乙烯材料中苯乙烯含量测定的研究有很多,溶解-沉淀是较为常见的一种方法^[19-25]。在采用溶解-沉淀法来测定聚苯乙烯材料中的苯乙烯时,不同的研究使用的溶剂不同。采用二氯甲烷溶解

样品,甲醇沉淀高聚物是目前较为常见的选择^[19-20],也有采用异辛烷^[21,23,24]、正己烷^[22]来沉淀高聚物的。Genualdi^[25]使用乙酸乙酯来溶解聚苯乙烯,利用甲醇沉淀来萃取不同聚苯乙烯样品中的苯乙烯,结果测得每千克甲醇沉淀中苯乙烯的质量为9.3~3100 mg。Gennari^[19]对比了甲醇、丙酮、N,N-二甲基乙酰胺、二氯甲烷这4种有机溶剂对聚苯乙烯的溶解效果,得到的溶液都用甲醇来沉淀,结果发现二氯甲烷-甲醇的组合提取的效果最好。在Garrigos的研究^[20]中,对比了超临界流体萃取(SFE)、微波辅助萃取(MAE)、索氏提取、顶空法、溶解-沉淀这5种方法对聚苯乙烯树脂485和678 E中苯乙烯的萃取效果,研究发现,溶解-沉淀法的萃取效果最好,测得每千克树脂(485和678 E)中苯乙烯的质量分别为4550和6304 mg。

值得注意的是,尽管使用同样的溶解-沉淀法,但其使用的溶液体积也各不相同。在Genualdi的研究^[25]中,采用15-1.5 mL(乙酸乙酯-甲醇)溶液来萃取,而在Garrigos的研究^[20]中,则采用10-5 mL(二氯甲烷-甲醇)的溶液萃取。另外,袁丽凤^[26]在测定丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)树脂中的挥发物质时,采用二甲基甲酰胺/甲醇溶解树脂,发现2种溶剂体积比为4:6时萃取效果最好。对于萃取液体积和成分比的研究尚无明确结论,因此寻找合适的溶剂体积比使目标物质能够完全萃取出来,同时尽量节省溶剂是溶解-沉淀法需进一步完善的地方。

对于苯乙烯的检测,较为重要的一点是确保苯乙烯从聚苯乙烯材料中完全萃取出来。尽管有研究证明在不同的方法中,溶解-沉淀法的提取效率最高,但并不能说明该方法能完全提取出聚苯乙烯材料中的苯乙烯。为了验证方法的可行性,回收率实验必不可少。在Garrigos的研究^[20]中,采用二氯甲烷把聚苯乙烯树脂溶解后,加入已知量的苯乙烯,震荡摇匀,50℃下加热烘干得到固体,得到每千克固体中苯乙烯质量为125, 500, 750 mg的样品。然后以没有加入苯乙烯的样品为对照,同时测两者中苯乙烯的含量,相减得到的差值与加入的苯乙烯含量之比即回收率。结果表明,3组样品的回收率分别为98.2%, 98.9%, 99.1%。该法把苯乙烯真正加入树脂内,使回收率数据更可信。为了实现把已知量的苯乙烯加入树脂内,Genualdi^[25]则是用溶解-沉淀的方法反复提取聚苯乙烯中的苯乙烯,直到检测不出苯乙烯为止,然后用乙酸乙酯溶解空白树脂,加入已知量的苯乙烯烘干得到新的聚苯乙烯树脂(每千克树脂中苯乙烯质量为600 mg),再用该树脂开展回收率实验,得到回收率为86%以上。这2项研究证明溶解-沉淀的方法能较好地提取聚苯乙烯材料中的苯乙烯。

1.2 溶解-顶空法

用N,N-二甲基甲酰胺(DMF)溶解,顶空-气相色谱

法定量分析, 来确定样品中苯乙烯含量的方法也取得了较好的效果^[27-29]。许德珍^[27]用该法测定了以聚苯乙烯为材料的日用品中苯乙烯单体的总量, 并和美国 FDA 177.164 方法进行对比, 发现 2 种方法取得的结果基本一致。顶空进样减少了样品的前处理过程, 而且避免了高聚物和不易挥发物质对色谱柱的污染^[28], 但顶空提取过程是一个气-液平衡过程, 加热温度、平衡时间、压力等实验条件都会影响 DMF 对苯乙烯的提取过程。不同参考文献中利用顶空法时的实验条件见表 1, 样品质量、DMF 体积、加热温度以及平衡时间、平衡温度都有较大的差异, 其中 DMF 体积差异尤为明显, 在 3 ~ 10 mL 之间。尽管该法存在一定优势, 但目前还需进一步完善, 在提取效率最高的前提下, 确定一组合适的实验参数可以作为新的研究方向。

表 1 不同文献中的实验参数
Tab.1 Experiment parameters in different researches

测试条件	样品质量/g	N,N-二甲基甲酰胺体积/mL	加热温度/°C	平衡时间/min	压力/kPa
文献[27]	1.0	10	80	30	—
文献[28]	1.0	3	120	40	110.32
文献[29]	0.5	5	120	50	110

1.3 国标中苯乙烯检测方法

我国 GB/T 5009.59—2003《食品包装用聚苯乙烯树脂卫生标准的分析方法》中的检测方法是采用二硫化碳溶解聚苯乙烯样品, 溶液直接填充色谱柱进行分离, 利用 FID 检测器进行检测分析^[30]。陈文林等^[31]用该法来检测发泡聚苯乙烯(EPS)中的残留苯乙烯质量浓度, 结果为 0.302 mg/dm²。该法的缺点是样品中的高聚物溶解后溶液很浑浊, 若不经净化直接进入色谱柱会污染进样口。高聚物很难气化, 容易残留在色谱柱内, 长期分析后会降低柱效^[32]。鉴于目前各种新技术、新方法的不断出现, 国标中的方法也需要不断优化, 以适应现代生产的需要。

2 苯乙烯的迁移研究进展

2.1 向食品模拟物中的迁移

国际上有很多关于苯乙烯向食品模拟物中迁移规律的研究。Paraskevopoulou^[22]研究了发泡聚苯乙烯向食品模拟物(蒸馏水、体积分数为 75%的乙醇、异辛烷)的迁移规律, 当以蒸馏水、乙醇(75%)为模拟物时, 迁移温度为 25, 40, 60 °C, 异辛烷的迁移温度为 4, 25, 40 °C, 迁移时间长达 30 d。研究表明, 当蒸馏水作为食品模拟物时, 只有在 60 °C 下浸泡 1 d 才有苯乙烯迁出, 苯乙烯向乙醇(75%)的迁移量要多于异辛烷。Choi^[33]研究了聚苯乙烯中苯乙烯向蒸馏水(40, 60, 90 °C), 庚烷(10, 24, 40 °C)的迁移, 取样

时间为 30 min ~ 14 d, 结果显示, 在水中没有检测出苯乙烯, 而在庚烷中迁移 72 h 后, 聚苯乙烯中苯乙烯完全迁出, 表明用庚烷作为食品模拟物会高估苯乙烯的迁移。陈文林等^[31]采用单面浸泡的方式, 以蒸馏水和体积分数为 95%的乙醇溶液为食品模拟物, 研究了发泡聚苯乙烯中苯乙烯在不同温度(25, 45, 65 °C)和不同浸泡时间(1 ~ 240 h)下的迁移情况。研究发现, 当以蒸馏水为模拟物时, 在 45 °C 条件下浸泡 7 d 或 65 °C 下浸泡 2 d 才有苯乙烯检出, 而且苯乙烯的迁移量很少。体积分数为 95%的乙醇中苯乙烯的迁移量远远高于蒸馏水。值得注意的是, 发泡聚苯乙烯在乙醇(95%)中浸泡 10 d 后, 苯乙烯迁移还未达到平衡, 因此用非线性拟合方程来模拟迁移时间无限长时苯乙烯的迁移量。俞晔等^[34]建立了用顶空-色谱质谱法(HS-GC/MS)来测定蒸馏水和大豆油中苯乙烯含量的方法, 该法与上述 DMF 溶解聚苯乙烯测定残留苯乙烯含量的方法原理相同, 直接把迁移一段时间的食品模拟物进行顶空进样分析, 回收率在 87.5% ~ 99.6%。在陈文林等^[31]的研究中, 则是用正己烷来萃取水性模拟物(蒸馏水、乙醇(95%))中的苯乙烯。

在苯乙烯向食品模拟物的迁移研究中, 除了探讨食品模拟物、温度、时间对迁移的影响外, 研究迁移方式对苯乙烯迁移的影响也有着重要意义。Linssen^[21]使用全浸泡双面迁移、蒸汽迁移和单面迁移 3 种方式, 同时测定了高抗冲聚苯乙烯(HIPS)、通用聚苯乙烯(GPPS)、HIPS 与 GPPS 的质量比为 1:1 在 40 °C 条件下向玉米油的迁移规律。研究表明, HIPS 和 HIPS 与 GPPS 的质量比为 1:1 时这 2 种材料在使用全浸泡的迁移方式时, 苯乙烯迁移量要远远大于单面迁移。该现象的解释是 HIPS 中存在很多橡胶颗粒, 切片的过程中会损坏其结构, 全浸泡迁移时苯乙烯通过切口更容易迁移到玉米油中。聚苯乙烯材料在使用的过程中, 切口基本不会与食品接触, 因此采用单面迁移的方式得到的迁移量更有现实意义。

2.2 向食品中的迁移

美国、日本等发达国家对苯乙烯向食品中的迁移研究包括其在真实食品(酸奶)和饮料(纯净水, 咖啡)中的迁移, 研究已经相当成熟。Gennari^[19]开展了 PS 水杯向蒸馏水(40 °C, 10 d 和 100 °C, 0.5 h)和体积分数为 20%的乙醇(100 °C, 0.5 h)的迁移实验, 未检出苯乙烯, 归因于苯乙烯在水杯中较低的残留量和斥水性。Sanagi^[35]使用顶空-固相微萃取富集迁移到水中的苯乙烯, 采用 GC-FID 检测分析, 实验把聚苯乙烯水杯或碗盛装 80, 60, 24 °C 的水, 然后再放到 80 和 24 °C 的环境中保持 30 min, 设计符合样品的实际使用条件。当水温达到 80 °C 时, 放到 2 种温度环境下时都有苯乙烯迁出。Khaksar^[36]用高效液相色谱

检测了市场上 162 个样品, 包括 GPPS 和 HIPS 中苯乙烯向热茶、牛奶、可可牛奶中的迁移量。研究表明, 食品中脂肪含量的提高会促进苯乙烯的迁移, 这也与 Gennari 的研究结论相一致, 同时开展了苯乙烯向食品模拟物乙酸(体积分数为 3%)、乙醇(体积分数为 15%)、橄榄油在 100 °C, 1 h 和 40 °C, 24 h 条件下的迁移实验, 结果表明苯乙烯向单一食品模拟物的迁移量要低于真实食品。Ahmad^[37]和 Nerin^[38]用吹扫捕集的方法分别检测了苯乙烯向水和酸奶的迁移。Ahmad 研究了 PS 包装瓶饮用水中的苯乙烯迁移量, 并在发泡聚苯乙烯中加入不同温度的水, 60 min 后检测其中的苯乙烯量。结果发现苯乙烯质量浓度达到 29.5 μg/L, 瓶装水储存 1 年后, 苯乙烯质量浓度达到 69.53 μg/L。Nerin 检测了用 PS 包装的酸奶中的苯乙烯, 结果表明每千克酸奶中的苯乙烯质量最大仅为 8.5 μg, 说明苯乙烯不容易迁移到酸奶中。Verzara^[39]用顶空-固相微萃取结合快速气相色谱的方法检测了酸奶从生产到保存 38 d 的过程中苯乙烯的含量, 研究表明, 酸奶刚生产出时苯乙烯的含量极少, 再用 PS 包装 23 d 后, 酸奶中苯乙烯的含量很低, 每千克酸奶中苯乙烯的质量最大仅为 15.9 μg, 再一次验证了苯乙烯向酸奶中很难迁移的结论。

3 结语

溶解-沉淀法是目前国际上使用最多, 也是被证实最为高效便捷的方法。国外对于苯乙烯向食品模拟物和真实食品的研究已比较深入, 结果表明, 食品模拟物、温度、时间、迁移方式和食品种类都对苯乙烯的迁移有很大影响。不过国外对于苯乙烯向真实食品的迁移多集中在酸奶、茶等饮料上, 这与我国聚苯乙烯发泡餐具接触的食品还是有较大差别, 我国的科研工作者应该根据这一实际情况开展针对性的研究。

我国在“一次性发泡塑料餐具”领域的生产和研究相对落后^[40], 完善法规建设是目前的当务之急。我国现有法规中用二硫化碳溶解聚苯乙烯来测定残留苯乙烯的方法存在缺陷, 已经不能满足现在的要求, 需要借鉴国外已有研究成果对其进行完善和修订。另外, 应该根据我国实际国情, 加强对于苯乙烯向真实食品中的迁移研究。

参考文献:

[1] 国家发展与改革委员会 2013 年第 21 号令. 关于修改《产业结构调整指导目录(2011 年本)》有关条款的决定[Z]. 2013-02-16.
Decree No.21 of the National Development and Reform Commission. The Decision about Modifying Guidance Catalogue for Industrial Structure Adjust-

ment (2010)[Z]. 2013-02-16.
[2] SHIN C. A New Recycling Method for Expanded Polystyrene[J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18(6): 331—335.
[3] 梅允福. 废旧聚苯乙烯和发泡聚苯乙烯的回收利用[J]. 中国资源综合利用, 2003(3): 16—20.
MEI Yun-fu. Recycling of Polystyrene and Foamed Polystyrene Wastes for Controlling "White Pollution"[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2003(3): 16—20.
[4] 刘建卫, 贾润礼, 刘志伟, 等. 废弃聚苯乙烯泡沫塑料的回收及再利用[J]. 塑料科技, 2014(2): 122—126.
LIU Jian-wei, JIA Run-li, LIU Zhi-wei, et al. Recycling and Reuse of Waste Polystyrene Foam[J]. Plastics Science and Technology, 2014(2): 122—126.
[5] 林华影, 张伟, 张琼, 等. 气相色谱-质谱法分析聚苯乙烯加热分解产物[J]. 中国卫生检验杂志, 2009(9): 1964—1966.
LIN Hua-ying, ZHANG Wei, ZHANG Qiong, et al. Analysis of Pyrolysis Products of Polystyrene by GC-MS[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2009(9): 1964—1966.
[6] 郑建珍, 吴小琼, 刘文涵. 气相色谱-质谱联用法研究泡沫塑料中易挥发组分在环境温度下的释放行为[J]. 理化检验, 2008(8): 768—769.
ZHENG Jian-zhen, WU Xiao-qiong, LIU Wen-han. GC-MS Study on Release Behavior of Volatile Compounds in Foamed Plastics at Environmental Temperatures[J]. Physical Testing and Chemical Analysis, 2008(8): 768—769.
[7] HATHCOCK S L, BERTSCH W. Analysis of Volatiles Associated with Industrial Scale Processing of Expanded Polystyrene Part I: Methods Development[J]. Journal of High Resolution Chromatography, 1993, 16(11): 609—614.
[8] ABRANTES S. GC-MS Identification of Styrene and Oligomers in Polystyrene Plastic for Milk Packaging [J]. Journal of Separation Science, 1993, 16(2): 113—115.
[9] KUSCH P, KNUPP G. Headspace-SPME-GC-MS Identification of Volatile Organic Compounds Released from Expanded Polystyrene[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2004, 12(2): 83—87.
[10] 宋雪超, 林勤保, 方红, 等. GC-MS 结合保留指数分析聚苯乙烯发泡餐盒中化学成分[J]. 食品科学, 2016(10): 198—202.
SONG Xue-chao, LIN Qin-bao, FANG Hong, et al. Application of GC-MS Coupled with Retention Indices to Identify the Chemical Compounds of Polystyrene Food Container[J]. Food Science, 2016(10): 198—202.
[11] RABOVSKY J, FOWLES J, HILL M D, et al. A Health Risk Benchmark for the Neurologic Effects of Styrene: Comparison with Noael/Loael Approach[J]. Risk Analysis, 2001, 21(1): 117—126.
[12] ARVANITOYANNIS I S, BOSNEA L. Migration of

- Substance from Food Packaging Materials to Foods[J]. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 2004, 44(2): 63—76.
- [13] COHEN J T, CARLSON G, CHARNLEY G, et al. A Comprehensive Evaluation of the Potential Health Risks Associated with Occupational and Environmental Exposure to Styrene[J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part B: Critical Reviews*, 2002, 5(1): 1—6.
- [14] SKA B, VYSKOCIL A, TARDIF R, et al. Effects of Peak Concentrations on the Neurotoxicity of Styrene in Volunteers[J]. *Human & Experimental Toxicology*, 2003, 22(8): 407—415.
- [15] 21 CFR CH 1 177.1640, Polystyrene and Rubber-modified Polystyrene[S].
- [16] The US Department of Health and Human Services. 12th Report on Carcinogens. (2011-10-09)[2016-03-03]. <http://ntp.niehs.nih.gov/ntp/roc/twelfth/roc12.pdf>.
- [17] International Agency for Research on Cancer. IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans: Some Traditional Herbal Medicines, Some Mycotoxins, Naphthalene, and Styrene. (2002-05-19)[2016-03-03]. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol82/mono81-1.pdf>.
- [18] GB 9692—1988, 食品包装用聚苯乙烯树脂卫生标准[S].
GB 9692—1988, Hygienic Standard for Polystyrene Resin Used as Food Packaging Material[S].
- [19] GENNARI O, ALBRIZIO S, MONTEIRO M. A GC-FID Method to Determine Styrene in Polystyrene Glasses[J]. *Food Analytical Methods*, 2012, 5(6): 1411—1418.
- [20] GARRIGOS M C, MARÍN M L, CANTO A, et al. Determination of Residual Styrene Monomer in Polystyrene Granules by Gas Chromatography-Mass Spectrometry[J]. *Journal of Chromatography A*, 2004 (2): 211—216.
- [21] LINSSEN J, REITSMA J, ROOZEN J P. Effect of Sampling Method on the Level of Styrene Monomer Migrated from Polystyrene Packaging Material[J]. *Packaging Technology and Science*, 1991, 4(3): 171—175.
- [22] PARASKEVOPOULOU D, ACHILIAS D S. Migration of Styrene from Plastic Packaging Based on Polystyrene into Food Simulants[J]. *Polymer International*, 2012, 61(1): 141—148.
- [23] TAWFIK M S, HUYGHEBAERT A. Polystyrene Cups and Containers: Styrene Migration[J]. *Food Additives & Contaminants*, 1998, 15(5): 592—599.
- [24] LINSSEN J, REITSMA J, ROOZEN J P. Polystyrene Sheet Composition and Temperature as Parameters for Migration of Styrene Monomer into Corn Oil[J]. *Packaging Technology and Science*, 1992, 5(4): 217—222.
- [25] GENUALDI S, NYMAN P, BEGLEY T. Updated Evaluation of the Migration of Styrene Monomer and Oligomers from Polystyrene Food Contact Materials to Foods and Food Simulants[J]. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2014, 31(4): 723—733.
- [26] 袁丽凤, 邬蓓蕾, 崔家玲, 等. 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)塑料中残留单体的溶解沉淀-气相色谱法测定[J]. *分析测试学报*, 2008(10): 1095—1098.
YUAN Li-feng, WU Bei-lei, CUI Jia-ling, et al. Determination of Residual Monomers in Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Plastic by Dissolution Precipitation Technique and Gas Chromatography[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2008(10): 1095—1098.
- [27] 许德珍, 王宏菊, 陈旭辉. 顶空气相色谱法测定聚苯乙烯日用品中苯乙烯单体的可溶出量和总量[J]. *光谱实验室*, 2004(1): 94—98.
XU De-zhen, WANG Hong-ju, CHEN Xu-hui. Determination of Released and Total of Styrene Monomer in Polystyrene Commodity by Headspace Gas Chromatography[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2004(1): 94—98.
- [28] 周相娟, 赵玉琪, 李伟, 等. 顶空气相色谱法同时测定食品包装中残留乙苯和苯乙烯单体[J]. *食品研究与开发*, 2010(10): 144—147.
ZHOU Xiang-juan, ZHAO Yu-qi, LI Wei, et al. Simultaneous Determination of Ethylbenzene and Styrene in Food Package by Headspace-Gas Chromatography[J]. *Food Research and Development*, 2010(10): 144—147.
- [29] 朱生慧. 气相色谱法测定聚苯乙烯中残留单体苯乙烯[J]. *现代科学仪器*, 2008(2): 83—85.
ZHU Sheng-hui. Determination of Styrene in Polystyrene by Gas Chromatography[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2008(2): 83—85.
- [30] GB/T 5009.59—2003, 食品包装用聚苯乙烯树脂卫生标准的分析方法[S].
GB/T 5009.59—2003, Method for Analysis of Hygienic Standard of Polystyrene Resin for Food Packaging[S].
- [31] 陈文林, 刘晔, 王家俊. 发泡聚苯乙烯中苯乙烯的迁移研究[J]. *包装学报*, 2015(3): 1—5.
CHEN Wen-lin, LIU Ye, WANG Jia-jun. Study on Migration of Styrene from Expanded Polystyrene[J]. *Packaging Journal*, 2015(3): 1—5.
- [32] 王红松, 商贵芹, 刘君峰, 等. 顶空气相色谱法测定聚苯乙烯制品中的挥发性组分[J]. *检验检疫学报*, 2010(3): 12—14.
WANG Hong-song, SHANG Gui-qin, LIU Jun-feng, et al. Determination of Volatile Compound in Polystyrene Articles by Headspace Gas Chromatography[J]. *Journal of Inspection and Quarantine*, 2010(3): 12—14.
- [33] CHOI J O, JITSUNARI F, ASAKAWA F, et al. Migration of Styrene Monomer, Dimers and Trimers from Polystyrene to Food Simulants[J]. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2005, 22(7): 693—699.
- [34] 俞晔, 陈朝方, 刘海珍, 等. 顶空-气相色谱/质谱法测定与食品接触的聚苯乙烯塑料成型品中苯乙烯迁

- 移量[J]. 食品安全质量检测学报, 2012, 3(2): 112—115.
- YU Ye, CHEN Chao-fang, LIU Hai-zhen, et al. Determination of Migration of Styrene of Polystyrene Plastic Moldings in Directly Contact with Food Stuffs by HS-GC/MS[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2012, 3(2): 112—115.
- [35] SANAGI M M, LING S L, NASIR Z, et al. Determination of Residual Volatile Organic Compounds Migrated from Polystyrene Food Packaging into Food Simulant by Headspace Solid Phase Microextraction-Gas Chromatography[J]. Tohoku Psychologica Folia, 2008, 12(3): 511—542.
- [36] KHAKSAR M, GHAZI-KHANSARI M. Determination of Migration Monomer Styrene from GPPS (General Purpose Polystyrene) and HIPS (High Impact Polystyrene) Cups to Hot Drinks[J]. Toxicology Mechanisms and Methods, 2009, 19(3): 257—261.
- [37] AHMAD M, BAJAHLAN A S. Leaching of Styrene and Other Aromatic Compounds in Drinking Water from PS Bottles[J]. Journal of Environmental Science, 2007, 19(4): 421—426.
- [38] NERIN C, RUBIO C, CACHO J, et al. Parts-Per-Trillion Determination of Styrene in Yoghurt by Purge-and-Trap Gas Chromatography with Mass Spectrometry Detection[J]. Food Additives & Contaminants, 1998, 15(3): 346—354.
- [39] VERZERA A, CONDURSO C, ROMEO V, et al. Solid-Phase Microextraction Coupled to Fast Gas Chromatography for the Determination of Migrants from Polystyrene-Packaging Materials into Yoghurt[J]. Food Analytical Methods, 2010, 3(2): 80—84.
- [40] 陈超越, 王华甫, 张晓梅, 等. 一次性聚苯乙烯发泡塑料餐具解禁事件及其对化学教学的启示[J]. 化学教育, 2013(7): 84—89.
- CHEN Chao-yue, WANG Hua-fu, ZHANG Xiao-mei, et al. Lifting Ban on Disposable Dinnerware Made of Plastic Foam and Its Suggestions for Chemistry Teaching[J]. Chinese Journal of Chemical Education, 2013(7): 84—89.