



单液滴撞击球形表面的涂覆效果

徐 庆, 李占勇, 王瑞芳, 朱曙光
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘 要: 液滴与球形表面的碰撞为喷雾包衣等工程应用的基础. 以单液滴与球形光滑表面为研究对象, 采用高速相机, 分析了在液滴不同撞击速度 (0.88 ~ 4.43 m/s) 和不同直径的球面 (5 ~ 15 mm) 实验条件下涂覆率的变化. 研究了液滴与球面发生碰撞时发生的铺展震荡、涂覆球面、破碎飞溅现象. 最后, 建立了 K 值、球面直径与碰撞现象之间的关系图, 为理论分析和数值模拟提供依据.

关键词: 单液滴; 撞击速度; 球形表面; 涂覆

中图分类号: TQ051 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2013)01-0050-05

Coating and the Impact of Single Droplet on the Spherical Surface

XU Qing, LI Zhanyong, WANG Ruifang, ZHU Shuguang

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: Droplet-spherical surface collision is a fundamental issue in the application of spray coating. Under the experimental conditions of different impact velocity (0.88-4.43 m/s) and different outer diameters of the spherical surface (5-15 mm), the impact of a single droplet on a spherical surface at room temperature was investigated by analyzing the changes of coating with the help of a high-speed camera. When contacting the spherical surface, the droplet spreads, retracts, relaxes or splashes on the surface. Consequently, the relationship between the K value, sphere diameter and impacting phenomena was established for theoretic analysis and numerical simulation.

Key words: single droplet; impacting velocity; spherical surface; coating

从 1876 年 Worthington 研究牛奶液滴撞击用硬脂酸蜡烛火焰熏烤的玻璃盘开始^[1], 液滴与表面的撞击过程引起了学者们广泛的研究兴趣, 在生产和生活中很多过程均涉及液滴撞击表面^[2], 研究大多集中于液滴撞击常温平面或过热平面的过程^[3]. 液滴与球形表面的碰撞在科学研究和工程应用等方面均具有重要意义. 比如, 在制药行业中, 药品多为曲面或球形颗粒, 为了掩盖其苦涩味道, 或使活性剂得到缓释, 或将厂商的商标印于药品上^[4], 就需要用到喷雾包衣或涂层技术^[5], 该过程涉及液滴与药品表面复杂的碰撞过程. 在食品行业中, Werner 等^[6]采用空气悬浮法得到高质量的食品涂层粉粒, 研究了加入糊精的水液滴碰撞无水乳脂的过程, 发现乳脂块添加卵磷脂后可以使液滴铺展直径变大、铺展特性更好, 一定程度上

解决了铺展的均匀性问题.

此外, Gunjal 等^[7]研究了滴流床反应器中液滴与球形表面催化剂的碰撞, 以及液滴在球形表面的动力学, 用高速 CCD 相机捕捉液滴的微尺度运动, 通过分析图像来获得液滴的动力学参数, 如铺展速度、收缩速度, 并用 VOF 建立了 CFD 模型以模拟此过程, 更好地研究催化剂的润湿问题. Lunkad 等^[8]为了解决液滴在填料塔中球形填料的铺展及吸附问题, 模拟了液滴在多孔球形表面孔结构对铺展的影响, 试图得到不同液滴在多孔球形表面的铺展行为. 李彦鹏等^[9]对低冲击能量液滴撞击球形表面的过程进行了三维数值模拟, 重点研究了液滴的撞击速度与球面曲率半径对液滴沉积行为的影响. 液滴的铺展速率与铺展面积随着撞击速度的增大而增大, 液滴的铺展面积随

收稿日期: 2012-08-13; 修回日期: 2012-09-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2012AA021303)

作者简介: 徐 庆 (1983—), 男, 山东人, 博士研究生; 通信作者: 李占勇, 教授, zyli@tust.edu.cn.

着球面曲率半径的增大而减小。

这些研究中,常常用雾化的液滴群撞击球形的颗粒群表面,这是一个非常复杂的过程,液滴与液滴、颗粒与颗粒往往会发生干扰作用,液滴与球形表面的撞击难以观测,因此,研究单个液滴与球形表面的撞击是非常必要的^[10],可以更好地理解润湿和涂覆的过程。另外,液滴与球形表面碰撞与平面碰撞不同,相关文献研究较少。本文以单个液滴为研究对象,借助高速相机研究了液滴对不同直径的球形表面撞击时的现象。

1 实验装置与方法

由于液滴与球形表面撞击所持续的时间非常短,通常是几毫秒到几十毫秒,本实验借助高速相机把液滴在球面上铺展和变形过程拍摄下来进行研究,实验装置如图1所示,包括单液滴发生器(TOP5300注射泵),高速相机(StreamView LR Portable),光源(1500 W新闻灯),数据采集与图像处理系统(Dell)。

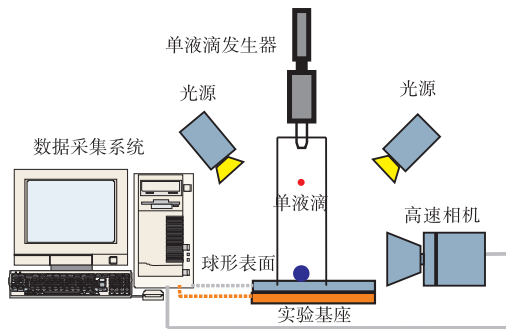


图1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

实验用涂覆液体为 20 °C 的蒸馏水,生成液滴的尺寸为 $D_0 = 3.2$ mm. 液滴下落高度设置为 $h = 0.04, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ m, 共 6 个高度,以形成不同的撞击速度,撞击速度近似按自由落体速度 $v_0 = \sqrt{2gh}$ 计算。下落液滴正下方的不锈钢球表面光滑,粗糙度 $R_a = 3.2 \mu\text{m}$,直径分别为 $D_s = 5, 6, \dots, 15$ mm. 每次实验开始之前,用无水乙醇清洗钢球表面,干燥后冷却至室温(20 °C),以保证表面不受任何污染。高速相机拍摄速度为 200 帧/秒,相机镜头中心置于与钢球中心同一水平面,镜头采用 24 ~ 85 mm, f/2.8 ~ 4(Nikon),用 StreamView LR 软件进行图像处理,可以得到不同时刻的液滴铺展直径、涂覆率等。

通常采用 Re, We, K 这 3 个无量纲数对液滴与固体表面的碰撞过程进行描述和研究。本实验条件

下,其数值见表 1。

表 1 单液滴撞击实验中的无量纲数

Tab. 1 Dimensionless number in single droplet impacting

h/m	0.04	0.10	0.25	0.50	0.75	1.00
$v_0/(m \cdot s^{-1})$	0.88	1.40	2.21	3.13	3.83	4.43
We	34	86	215	430	646	861
Re	2 816	4 452	7 039	9 955	12 192	14 078
K	43	76	134	207	267	320

表 1 中,韦伯数 $We = \rho v_0 D_0^2 / \sigma$,表示液滴的惯性力与表面张力的比值,当 $We > 1$ 时表示碰撞过程中液滴具有的动能相比表面能占优势;雷诺数 $Re = \rho v_0 D_0 / \mu$,表示惯性力与黏性力的比值,当 $Re > 1$ 时表示撞击过程中惯性力起主导作用;这两个准数的结合由一个无量纲的准数 $K = We^{0.5} Re^{0.25}$ 定义, K 值反映了动能、黏度、表面张力对液滴撞击的影响^[11]。液滴与球面的包覆程度定义为涂覆率:

$$\eta = \frac{S_{\text{球冠}}}{S_{\text{球}}} \times 100\% = \frac{2\pi RH}{4\pi R^2} \times 100\% = \frac{H}{2R} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为球体半径; H 为球冠高度。

2 结果与讨论

2.1 撞击过程中的能量转换

从能量角度考虑,碰撞过程是一个能量不断转换的过程^[5,12],撞击过程中,根据能量守恒有:

$$E_k + E_p + E_s = E'_k + E'_p + E'_s + E'_d \quad (2)$$

式中: E_k 为碰撞前的动能; E_p 为碰撞前的势能; E_s 为碰撞前的表面能; E'_k 为碰撞后的动能; E'_p 为碰撞后的势能; E'_s 为碰撞后的表面能; E'_d 为碰撞后的损耗能。

图 2 是 3.2 mm 液滴以速度 0.88 m/s ($K = 43$) 与直径为 7 mm 钢球的碰撞过程。

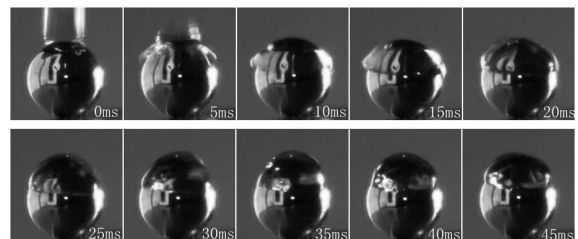


图 2 单液滴与球面碰撞过程 ($D_s = 7$ mm; $K = 43$; $\theta = 20$ °C)

Fig. 2 Impact of single droplet on spherical surface ($D_s = 7$ mm; $K = 43$; $\theta = 20$ °C)

从图中可以看出,碰撞经历了 4 个阶段:运动阶段、铺展阶段、收缩阶段和震荡平衡阶段。液滴在撞

击球面后形成了一个球冠状薄膜,在惯性力和重力的共同作用下沿着球面在球面上铺展,液滴的动能完全转换为液滴铺展的变形势能耗散掉,直到液滴在球面上的铺展面积达到最大.此后,由于表面张力的作用液滴开始回缩,与球面的接触面积逐渐减小,根据初始能量的高低,决定回缩的液滴是否出现反弹,液滴在球面上出现铺展—收缩—铺展—收缩,直到能量完全消耗.

2.2 撞击速度对球面涂覆率的影响

液滴的撞击速度直接关系到液滴撞击时的动能,撞击速度越大,撞击动能越大,引入系统的能量也越多.图3是3.2 mm液滴分别以速度0.88 m/s ($K = 43$)、1.40 m/s ($K = 76$)、2.21 m/s ($K = 134$)与直径7 mm钢球的碰撞过程.由图中可以直观地看出,在低速度下(0.88 m/s),液滴撞击球面后由于惯性力和表面张力的共同作用,液滴在球面铺展、收缩、震荡、最后静止在球面上;随着液滴撞击速度的增大(1.40 m/s),液滴撞击球面后可将钢球完整的包裹,这时液滴恰好在球面形成一层完整的液膜,随后由于表面张力的作用,形成的液膜收缩,但无法再将钢球包裹,最后只有部分液滴停留在球面上;若速度继续增大(2.21 m/s),液滴包裹球面后由于惯性力太大,产生飞溅现象,导致液滴破碎.

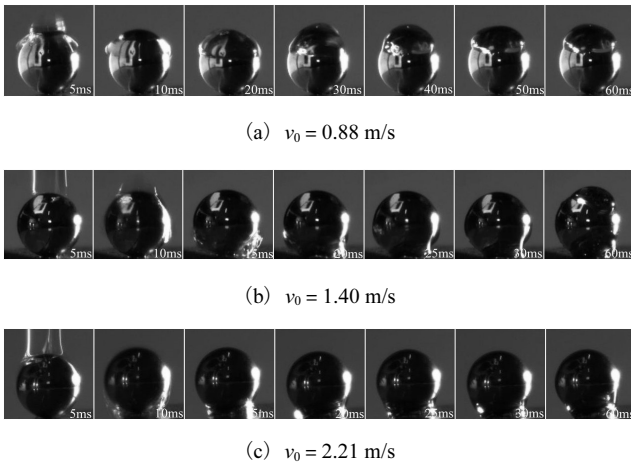


图3 不同速度液滴与球面碰撞过程($D_s = 7 \text{ mm}$; $\theta = 20^\circ \text{ C}$)
Fig. 3 Impact of single droplet at different impacting velocity on spherical surface ($D_s = 7 \text{ mm}$; $\theta = 20^\circ \text{ C}$)

图4是3.2 mm液滴在不同速度下对球面的涂覆率,曲线的峰值表示液滴对球面的最大涂覆率,由图4可知,当速度较低时($\leq 2.21 \text{ m/s}$),液滴在接触到球面后形成球冠状液膜对球面进行包覆,初始动能转换为液滴的变形势能和耗散能,液滴在球面上的铺展面积达到最大,随后液滴在表面张力的作用下开始

回缩,对球面的包覆面积逐渐变小,可以清楚地看到液滴的震荡行为,曲线呈现震荡特征,随着时间的延长,震荡的幅度也越来越小,能量耗散殆尽,最终沉积于球面.随着撞击速度的提高($> 2.21 \text{ m/s}$),即初始动能的增加,液滴与球面接触后对球面迅速进行包覆,液滴达到最大铺展所需要的时间减少,达到其最大包覆程度,剩余能量不足以维持液滴回缩,包覆液滴出现破碎甚至飞溅,没有震荡现象发生.

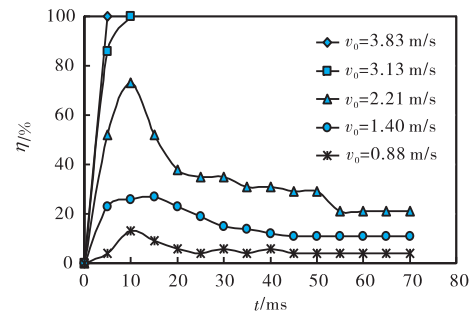


图4 碰撞速度对球面涂覆率的影响($D_s = 10 \text{ mm}$; $\theta = 20^\circ \text{ C}$)
Fig. 4 Coating degree and different impacting velocity ($D_s = 10 \text{ mm}$; $\theta = 20^\circ \text{ C}$)

2.3 球面直径对球面涂覆率的影响

球面直径对涂覆率影响明显,由于初始液滴的尺寸一定,液滴与不同直径的球面撞击时,液滴在球面的涂覆厚度会产生很大不同,对于小直径的球面会涂覆完全,而对于大直径的球面可能会出现部分涂覆.图5(a)为3.2 mm液滴以速度0.88 m/s撞击直径为5 mm的球面,液滴将球面涂覆包裹完整;图5(b)为球面直径7 mm的球面,只有部分涂覆.

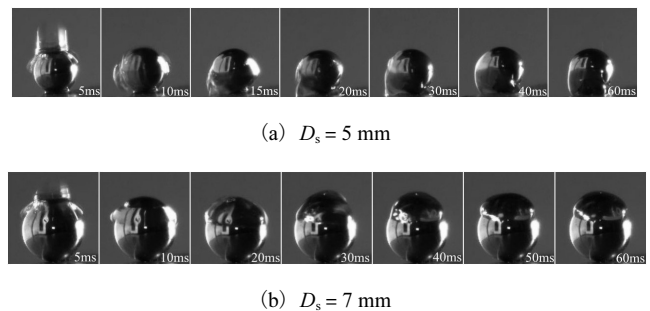


图5 液滴在不同直径球面的碰撞过程($v_0 = 0.88 \text{ m/s}$)
Fig. 5 Impact of single droplet on spherical surfaces of different diameters ($v_0 = 0.88 \text{ m/s}$)

如图6所示,直径3.2 mm的液滴以速度2.21 m/s ($K = 134$)撞击球面直径 $D_s = 6 \sim 12 \text{ mm}$ 的不锈钢球,下落液滴均在15 ms内达到其最大涂覆率,随后出现几种情况.当球面直径较小时($D_s = 6, 8 \text{ mm}$),下落的液滴10 ms内完全将球面包裹,液滴无法在球面沉

积. 球面直径增大到 $D_s = 9, 10$ mm, 液滴将球面包裹后在表面张力的作用下有明显的回缩, 由于碰撞过程中液滴破碎, 涂覆率降低, 最终沉积于球面的液滴质量小于初始液滴质量, 将球面不完全包覆. 球面直径继续增大时 ($D_s = 11, 12$ mm), 液滴在球面部分包覆, 出现震荡一回缩现象. 总之, 随着球面直径的增大, 涂覆率减小, 若球面直径 (> 30 mm) 远大于液滴直径时, 接近于平板的碰撞^[13].

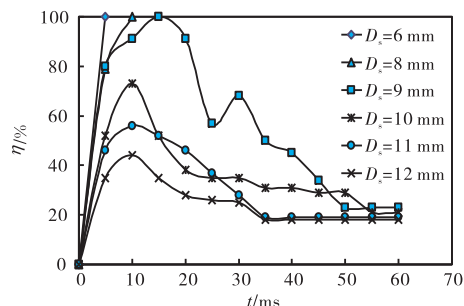


图 6 球面直径对涂覆率的影响 ($v_0 = 2.21$ m/s; $K = 134$; $\theta = 20$ °C)

Fig. 6 Coating degree and spherical surfaces of different diameters ($v_0 = 2.21$ m/s; $K = 134$; $\theta = 20$ °C)

2.4 球面直径、 K 值与碰撞现象的关系

图 7 为实验得到的在不同球面直径和 K 值条件下的碰撞现象.

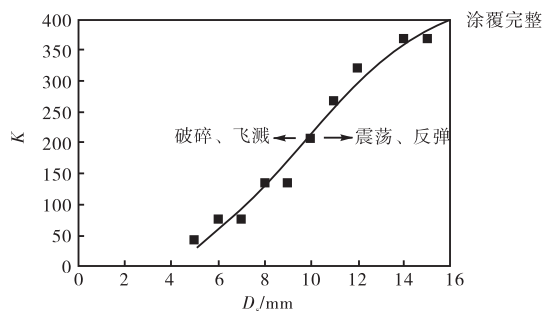


图 7 球面直径、 K 值与碰撞现象的关系

Fig. 7 Relationship between the K value, sphere diameters and impacting phenomena

当液滴撞击球面时, 部分能量损失, 大部分的动能转化成用于铺展的能量, 根据能量的多少可以出现以下 3 种情况:

(1) 如果铺展较弱, 剩余的能量会使铺展的液滴收缩, 在表面张力的作用下, 停留在球面上, 震荡反弹, 如图 7 曲线的“震荡、反弹”部分;

(2) 如果铺展较强, 剩余的能量不足以使液滴收缩, 液滴就会恰好包裹整个球面, 如图 7 曲线部分;

(3) 如果初始能量很大, 液滴的表面张力不能够

保持液滴的凝聚, 液滴会破碎成小液滴离开球面, 出现飞溅现象, 如图 7 曲线的“破碎、飞溅”部分.

3 结 论

(1) 液滴对球形表面的涂覆受液滴初始动能的影响, 出现 3 种情况: 铺展震荡、涂覆球面、破碎飞溅.

(2) 撞击速度对球面的涂覆影响很大, 随着撞击速度的增加, 涂覆率也增加. 球面直径对涂覆率的影响明显, 随着球面直径的增大, 涂覆率减小, 但每个直径均对应一个临界 K 值.

参考文献:

- [1] Worthington A M. On the forms assumed by drops of liquids falling vertically on a horizontal plate[J]. Proceedings of the Royal Society of London: Series A, 1876, 25: 261–271.
- [2] Escure C, Vardelle M, Fauchais P. Experimental and theoretical study of the impact of alumina droplets on cold and hot substrates [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23 (2): 185–221.
- [3] 潘永康, 刘相东, Mujumdar A S, 等. 液滴撞击热板面时的 leidenfrost 现象和转变温度的试验研究[J]. 化工学报, 1991 (6): 719–725.
- [4] Aliseda A, Hopfinger E J, Lasheras J C, et al. Atomization of viscous and non-Newtonian liquids by a coaxial, high-speed gas jet. Experiments and droplet size modeling [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2008, 34 (2): 161–75.
- [5] Bolleddula D A, Berchielli A, Aliseda A. Impact of a heterogeneous liquid droplet on a dry surface: Application to the pharmaceutical industry[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2010, 159 (2): 144–159.
- [6] Werner S R L, Jones J R, Paterson A H J, et al. Droplet impact and spreading on lecithinated anhydrous milkfat surfaces[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90 (4): 525–530.
- [7] Gunjal P R, Ranade V V, Chaudhari R V. Experimental and computational study of liquid drop over flat and spherical surfaces[J]. Catalysis Today, 2003, 79: 267–273.
- [8] Lunkad S F, Maiti R N, Buwa V V, et al. Numerical study of drop spreading over saturated pores[J]. The Ca-

nadian Journal of Chemical Engineering, 2010, 88(4): 661–670.

- [9] 李彦鹏,王焕然. 低冲击能量液滴与球面碰撞沉积特性的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 21–24.
- [10] Moreira A L N, Moita A S, Pano M R. Advances and challenges in explaining fuel spray impingement: How much of single droplet impact research is useful?[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2010, 36(5): 554–580.
- [11] Mundo C, Sommerfeld M, Tropea C. Droplet-wall collisions: Experimental studies of the deformation and breakup process[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1995, 21(2): 151–173.

- [12] Attane P, Girard F, Morin V. An energy balance approach of the dynamics of the drop impact on a solid surface[J]. Physics of Fluids, 2007, 19(1): 23–29.
- [13] Xu Q, Geng X R, Li Z Y, et al. Experimental study on a single droplet impact on cold plate surface[C/CD]// Proceedings of the 7th Asia-Pacific Drying Conference, Tianjin, China, 2011: 18–20.

责任编辑: 常涛

(上接第33页)

- [21] Blanco A, Negro C, Monte C, et al. Overview of two major deposit problems in recycling: Slime and stickies. Part II: Stickies problems in recycling [J]. Progress in Paper Recycling, 2002, 11(2): 26–37.

- [22] Doshi M R, Blanco A, Negro C, et al. Comparison of microstickies measurement methods. Part I: Sample preparation and measurement methods [J]. Progress in Paper Recycling, 2003, 12(4): 35–42.

责任编辑: 周建军

(上接第49页)

2.5 甲胺磷的富集分析

在室温下, 配制 21.6 mg/L 的甲胺磷水溶液, 用碳纳米管对甲胺磷的水溶液进行富集, 改变富集时间, 用气相色谱仪测试富集后的水溶液中甲胺磷的含量. 其结果如图 8 所示.

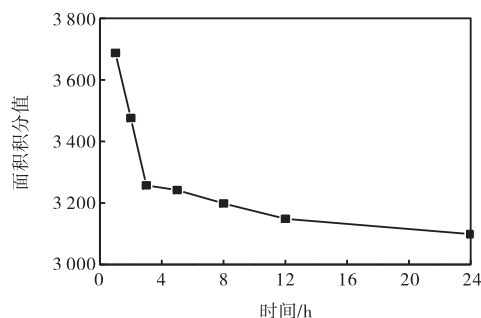


图 8 峰面积积分值与富集时间的关系曲线

Fig. 8 Relationship diagram of the area integral value to enrichment time

由图 8 知, 随着富集时间的延长, 水溶液中甲胺磷的含量逐渐减小, 但经 24 h 富集后, 水样中仍有 81% 的甲胺磷未被碳纳米管吸附, 这可能是由于甲胺磷在水中溶解度太大, 不利于碳纳米管对其富集与吸附.

3 结论

对敌敌畏在水环境下富集结果表明, 室温下富集 3 h, 敌敌畏的富集率达到了 100%. 洗脱剂对洗脱效果有较大的影响, 乙酸乙酯是合适的洗脱剂. 敌敌畏的最佳洗脱时间为 3 h, 最佳洗脱温度为 60 °C. 利用碳纳米管对敌敌畏富集的回收率高达 75.9%, 故碳纳米管可以用于实际水样中敌敌畏的萃取分析. 实验结果表明, 碳纳米管不适用于甲胺磷的富集.

参考文献:

- [1] 陆继伟, 夏晶, 苗水, 等. GC 测定灵芝中 24 种有机磷农药残留量[J]. 中国药学杂志, 2007, 42(3): 227–231.
- [2] 杜宗绪. 关于农药残留快速检测技术的研究进展等问题[J]. 潍坊高等职业教育, 2010, 6(4): 57–58.
- [3] 宋春艳, 张宝真. 甲胺磷的毒性、毒理研究进展[J]. 卫生毒理学杂志, 1994, 8(2): 123–125.
- [4] 武春霞, 王春, 王志. 碳纳米管在分离科学中的应用研究进展[J]. 色谱, 2011, 29(1): 6–14.
- [5] 李权龙, 袁东星. 多壁碳纳米管用于富集水样中有机磷农药残留的研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2004, 43(4): 531–536.

责任编辑: 周建军