

纳米活性炭对中药或植物活性成分的 吸附与缓释研究进展

A review about the adsorption and sustained release of traditional Chinese
medicine or plant active components by activated carbon nanoparticles

曾朝彦¹ 李湘洲¹ 张 胜¹ 黄 丹^{1, 2}

ZENG Zhao-yan¹ LI Xiang-zhou¹ ZHANG Sheng¹ HUANG Dan^{1, 2}

(1. 中南林业科技大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410004;

2. 湖南中医药大学中药粉体与创新药物省部共建国家重点实验室培育基地, 湖南 长沙 410208)

(1. College of Materials Science and Engineering of Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China; 2. State Key Laboratory of Chinese Medicine Powder and Medicine Innovation in Hunan (Incubation), Hunan University of Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410208, China)

摘要:文章综述药物缓释制剂的作用和种类,评述纳米活性炭作为活性成分缓释载体的理化特性,归纳近年来国内外对纳米活性炭作为中药或植物活性成分缓释制剂载体的研究进展,指出纳米活性炭的制备以及纳米活性炭作为活性成分缓释制剂遇到的技术瓶颈和今后的研究方向。

关键词:纳米活性炭;缓释载体;中药;植物活性成分

Abstract: This review made a summary of the functions and types of activated carbon nanoparticles for sustained drug delivery system. The physical and chemical properties of activated carbon nanoparticles as the carrier of natural extractives and medicine were reviewed. The research progresses in activated carbon nanoparticles as the carrier of traditional Chinese medicine or natural extractives from plants have been summarized. The technical bottleneck in preparation and utilization of activated carbon nanoparticles as the active ingredient sustained-release were also analyzed.

Keywords: activated carbon nanoparticles; slow release carrier; traditional Chinese medicine; active components of plant

中国天然药物资源丰富,包括中药^[1]、植物活性成分^[2]以及某些天然食物的有效成分^[3-4]。中药或植物活性成分缓释制剂有利于提高有效成分的疗效,降低不良反应,改变传统剂型落后的特点,为新药的研究和开发提供新途径,是中药或植物活性成分创新研发的主要方向之一。近年来,中

药或植物活性成分缓释制剂研究已然成为国内外机构和专家学者关注的前沿和热点课题。

用于中药或植物活性成分的缓释剂型主要有片剂(包括骨架型、漂浮型、渗透泵型)、注射剂、凝胶剂、脂质体等。在使用和研究过程中人们发现这些缓释剂型还存在一些问题,比如,制备过程复杂,生物相容性差,载药量少,对胃肠道有刺激。为此,人们将视线转向能够克服这些缺点的功能性药物缓释载体,纳米活性炭(activated carbon nanoparticles, ACNP)就是其中的一类。

纳米活性炭与其它缓释载体相比较具有独特的优势^[5],主要体现在它的比表面积大、孔径分布均匀、有效吸附中心多、生物相容性好、无毒性、易再生等方面,广泛应用于食品及医药等领域^[6]。纳米活性炭负载抗肿瘤药、靶向药制成的缓释制剂,具有明显减少给药次数、降低副作用、长久维持血药浓度、患者依存性好等优点^[7-9]。因此,开展纳米活性炭负载中药或植物活性成分并制成缓释制剂方面的研究,无论是对中药还是植物活性成分产品的开发都具有非常重要的研究价值。

本文将从纳米活性炭对药物的吸附和缓释机制、纳米活性炭的理化特性对吸附和缓释的影响、生物活性物质缓释效果、纳米活性炭的制备、纳米活性炭作为生物活性成分缓释剂存在的技术瓶颈以及今后的研究方向展开评述。

1 纳米活性炭对药物的吸附与缓释机制

纳米活性炭的比表面积、孔容积、孔径尺寸的大小是影响其吸附性能的关键因素^[10],只有当纳米活性炭的孔径与分子或离子的尺寸相匹配才能发生有效吸附。因此,纳米活

基金项目:湖南省自然科学基金(编号:2015JJ2196)

作者简介:曾朝彦,男,中南林业科技大学在读硕士研究生。

通讯作者:李湘洲(1965—),女,中南林业科技大学教授,博士生导师。E-mail:rlxz@163.com

收稿日期:2016-05-02

性孔径的大小决定对药物的有效吸附量。载药纳米活性炭的吸附机制主要为物理吸附,无选择性,对药物的理化性质无影响,且纳米活性炭在体内具有很好的生物相容性,因此纳米活性炭作为药物缓释材料有很大的优势。医药领域的专家学者对于纳米活性炭药物缓释制剂的缓释机理认同的是:纳米活性炭表面游离的药物与其吸附了的药物处在于一种动态平衡之中^[11-12]。一旦游离药物被消耗了,纳米活性炭可以立刻释放出一部分药物来保持这种平衡,从而达到缓释的目的,并因此也提高药物的疗效。

国内外学者对纳米活性炭缓释载体的研究非常活跃,P. Iovino 等^[13]提出用 Langmuir 模型来研究活性炭吸附布洛芬的吸附机制,这项研究是基于 Langmuir 吸附理论应用于溶液中的离子种类,纳米活性炭吸附布洛芬的量取决于布洛芬在溶液中的物理形态,这一结果符合纳米活性炭的吸附机理且与 Langmuir 吸附理论一致。纳米活性炭缓释制剂研究得比较成熟的有丝裂霉素 C(mitomycin C, MMC)、5-氟尿嘧啶(5-FU)、多烯紫杉醇(docetaxel, DOC)等。董怡民等^[14]利用透析法和流释法检测纳米活性炭对 5-FU 的吸附和缓释效果,通过模拟细胞膜的半透性使药物的扩散与它在人体内的扩散机理相接近,并且纳米活性炭对 5-FU 的饱吸附量符合 Freundlich 经验公式 $M = KCP$ 。曲秋莲等^[15]比较了纳米活性炭(activated carbon nano-particles, ACNP)和微米粒子活性炭(activated carbonmicro-particles, ACMP)两种材料对 MMC 的吸附量和缓释性,结果发现 ACNP 对 MCC 的饱和吸附量和缓释性能均优于 ACMP。此项研究揭示了纳米级别的活性炭比微米级别的活性炭的吸附性和缓释性都要强,也暗示活性炭的理化性质对它的吸附性和缓释性产生影响。

以上阐述的研究报道纳米活性炭负载的药物大多为化学药物,而负载中药或植物活性成分的研究鲜有报道。中国植物资源丰富,众多植物提取物富含的活性成分受到越来越多的关注,纳米活性炭负载中药或植物活性成分将成为一个新的研究热点。

2 纳米活性炭的理化特性对其吸附和缓释的影响

纳米活性炭比微米级活性炭的吸附性和缓释性都要好^[16],主要是因为纳米活性炭的物理结构和化学性质更容易使药物均匀地分布在其表面并释放出来。纳米活性炭粒子之间的排列是否有序、表面是否光滑将直接影响其对药物的吸附与缓释效果。有时为了获得分布均匀、排列有序、多孔结构的纳米活性而对其进行改性。Zhu G 等^[17]采用磷酸来改性活性炭,利用 SEM 来观察改性前后活性炭的微观变化,结果发现改性后的活性炭因其分布集中、排列有序、孔结构增多而更有利于药物的负载和释放。一般的 SEM 只能观察到几十个纳米左右,而更小的纳米级的孔在 SEM 下观测效果并不明显,需要通过透射电镜(TEM)和孔径测定仪进一步分析^[18]。TEM 不仅能够观察到物质的表面形貌,而且还可以观察到它的内部晶体甚至原子结构。特别适用于观察微中孔活性炭。

纳米活性炭的吸附能力与 BET 比表面积和总孔容积值呈正相关。Sait Yorgun 等^[19]用泡桐木材通过磷酸活化制备活性炭,用氮气吸脱附测出来的 BET 比表面积和总孔积分别高达 2 806 m²/g 和 1.746 cm³/g。但药用活性炭的表面积包括内表面积和外表面积,超大的内表面积是吸附的主要因素^[20]。载药后的纳米活性炭由于药物分布在它的表面和孔结构中导致比表面积和总孔容积降低。此外,纳米活性炭表面所含有的官能团种类比较多,包括羟基、羧基、酯、酮、酸等官能团。如果亲水性基团比较多,根据相似相溶原则,则能够与药物中的亲水性基团形成化学键。药物的有效成分负载到纳米活性炭上经过 FTIR 检测分析,会出现新的峰而且有些官能团的峰值增强。这是因为药物的有效成分可能是含有与纳米活性炭不同的和相同的官能团而导致的。

3 纳米活性炭对生物活性成分的缓释效果

纳米活性炭缓释制剂对于生物活性成分的释放是通过模拟人体内环境来实现的^[21],可以通过测定生物活性的累积释放率来评价其缓释效果。常用的释放介质为蒸馏水、人工肠液、人工胃液,不同的生物活性成分在不同的介质中其释放速度不同。总体而言生物活性成分在纳米活性炭中的释放可以分为突释、缓释、平衡释放 3 个阶段。突释阶段时间短但生物活性成分释放量最多,缓释阶段释放速度锐减,生物活性成分浓度增长平缓。平衡阶段生物活性成的浓度处于动态平衡之中。中国药典 2010 版二部附录 XI、X^[22]规定生物活性成分缓释的数据采用 3 种数学模型拟合,即零级拟合: $M_t / M_{\infty} = kt$;一级拟合: $(1 - M_t / M_{\infty}) = -kt$; Higuchi 方程: $M_t / M_{\infty} = kt^{1/2}$ 。拟合效果最好的是 Higuchi 方程。洪正源等^[23]让载烟酸的活性炭在不同的介质中释放,并用 3 种数学模型来模拟烟酸的释放,烟酸在人工胃液中的释放率最高达到了 76.36%,Higuchi 方程拟合的效果最佳。

但是上述方法还不能完全评价纳米活性炭缓释制剂在体内或局部组织的缓释作用。因此,研究纳米活性炭缓释制剂在体内的缓释效果很有意义。张李等^[24]探讨了纳米活性炭吸附丝裂霉素 C 腹腔化疗的药代动力学特征,建立人胃癌裸鼠模型,静脉注射 ACNP-MCC,于给药后不同时间点解剖裸鼠提取标本。研究表明 ACNP-MCC 可以在肠系膜、淋巴结以及腹腔液形成较高药物浓度,并持续维持至少 24 h。一般的药物在人体内几个小时就代谢了。因此,ACNP-MCC 具有功能缓释性。

对生物活性成分的缓释效果更深层次的研究是通过细胞试验来说明的,如中药或植物活成分中的某些生物成分对某些细胞有增殖抑制作用。常用细胞有海拉细胞(hela)^[25]、结肠癌细胞(hct116)^[26]、肝癌细胞^[27]等。蔡要欣等^[28]探索了纳米活性炭负载多烯紫杉醇对人肺腺癌细胞 A549 增殖及凋亡的作用。结果表明,0.2~125.0 μmol/L 的 DOC 及 AC-NP-DOC 对 A549 细胞均有增殖抑制作用,并呈浓度和时间依赖性。这项研究从细胞学的角度说明载药活性炭能够长时间维持药物的浓度,并比体内试验研究得更深入。

不过,迄今为止,对负载植物提取物活性成分的纳米活性炭在介质中不同时间点释放出来的药物(缓释液)进行抑制肿瘤细胞的增殖,还未见有文献报道。作者及其所在研究团队正致力于该项工作,期望在这方面取得进展。

4 纳米活性炭的制备方法

目前纳米活性炭的制备方法使用最多的是球磨法、溶胶凝胶合成法、气流粉碎法。

球磨法是利用研磨体(如钢球、鹅卵石等)的冲击力或对球磨内壁研磨把物料粉碎并混合。球磨法的优点是操作简单、产品纯度高、可连续生产,缺点是工作效率低、消耗能量大、易产生噪音,研磨体与机体的摩擦损耗很大,并有可能会污染产品。董怡民等^[14]将活性炭用球磨机粉碎后过筛,在最佳研磨时间、转速和活性炭与水之比下将筛后成分研磨,然后烘干,粉碎制得。得到的活性炭粒子呈圆球形,在 TEM 下测量平均粒径为 100 nm。

溶胶—凝胶合成法来制备纳米活性炭,分三步制备:①制备水相炭基凝胶;②凝胶干燥纳米活性炭;③高温热处理纳米活性炭^[29]。溶胶—凝胶法的优点是制得的纳米活性炭纯度高、比表面积大、均匀性好、晶粒细小。溶胶—凝胶法的缺点是对设备要求高、耗时、规模化生产及其产业化有一定难度。

气流粉碎法是在高速气流作用下,颗粒之间不断撞击、气流对颗粒产生冲击剪切作用、颗粒还与粉碎室发生冲击、摩擦、剪切作用。气流粉碎法的优点是:过程快速高效、分散性好、批量生产,缺点是对设备要求高,不太适合大批量生产。

上述这些方法各有优缺点,可根据所负载的中药或植物活性成分的理化、产品的价格、市场的需求等实际情况来选择制备纳米活性炭的适宜方法。

5 结论与展望

纳米活性炭作为生物活性成分缓释制剂的评价方法的建立是纳米活性炭缓释制剂发展的关键环节,也是其发展的技术瓶颈。可从以下几个方面着眼布局来建立纳米活性炭生物活性成分的评价方法。

(1) 纳米活性炭的来源。活性炭的来源有很多,例如,竹类、椰壳、煤炭、沥青等。而作为生物活性成分载体的纳米活性炭的来源必须无污染,因此,寻求无污染的活性炭来源对纳米活性炭作为活性成分的缓释载体发展极其重要。

(2) 纳米活性炭对中药或植物活性成分的缓释。由于中药缓释制剂是在西药理论的基础上建立起来的,因此,研究中药纳米活性炭缓释制剂不能完全照搬西药理论,而需要依从其自身的特点即在中医药理论的指导下,从整体上和宏观上来开发中药纳米活性炭缓释制剂评价方法。

(3) 纳米活性炭缓释制剂在介质中不同时段释放出来的生物活性成分(缓释液)的浓度是否与时间呈正相关。很多中药或植物活性成分能够抑制癌细胞的增殖,因此来研究将它们制成纳米活性炭缓释制剂后在介质中不同时段释放出来的缓释液对癌细胞的增殖抑制作用,来分析缓释液的浓

度是否与时间呈依赖性。

随着对纳米活性炭作为中药或植物活性成分的深入研究,特别是综合运用中药学、生物学、化学、临床医学以及材料学等诸多学科对中药或植物活性成分纳米活性炭缓释制剂的研究,上述问题将会逐一得到解决。多学科交叉,相互渗透的创新研究方式将会是发展趋势。对中药或植物活性成分纳米活性炭缓释制剂的体内外评价方法的创新,无疑将会大幅度提高中药或植物活性成分的疗效,也将为植物活性成分在功能性食品添加剂^[30-31]以及保健品^[32-35]和药物^[36-37]方面的应用拓展新的用途和领域。

目前作者所在科研团队已经开展了纳米竹炭对杜仲^[38]提取物的吸附与缓释及体外抗癌作用的研究,制备了纳米竹炭杜仲提取物固体分散体,验证了缓释液(杜仲提取物的有效成分)对 HCT116 的增殖具有缓释抑制作用。这些研究为纳米活性炭作为中药或植物活性成分缓释载体的研究提供了思路,相关研究成果将另文报道。

参考文献

[1] 李钟美, 黄和. 高良姜提取物抑菌活性及稳定性研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(2): 55-59.

[2] 陈铁壁, 肖乐, 杨盟盟, 等. 金桂花中总黄酮的微波辅助提取工艺优化[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 185-188.

[3] 周浓, 杨锡洪, 解万翠, 等. “珍珠”番石榴的营养成分与挥发性风味特征分析[J]. 食品与机械, 2016, 32(2): 37-40.

[4] 孙震, 郑婕, 张莉, 等. 芹菜素对甲状腺癌 BCPAP 细胞生长及细胞周期的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 3-7.

[5] ABREU A S, CASTANHEIRA E M, QUEIROZ M J, et al. Nanoliposomes for encapsulation and delivery of the potential antitumoral methyl 6-methoxy-3-(4-methoxyphenyl)-1H-indole-2-carboxylate[J]. Nanoscale Res Lett, 2011, 6(1): 482.

[6] ALABADI A, RAZZAQUE S, YANG Yu-wang, et al. Highly porous activated carbon materials from carbonized biomass with high CO₂ capturing capacity[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 281: 606-612.

[7] OHGAKI M, TAKENAKA A, SHIOMI A, et al. Intraperitoneal chemo-therapy against peritoneal carcinomatosis of gastric cancer with activated carbon particles adsorbing mitomycin C for four patients [J]. Gan To Kagaku Ryoho, 2004, 31(11): 1 858-1 860.

[8] ORTNER M A, TAHA A A, SCHREIBER S, et al. Endoscopic injection of mitomycin adsorbed on carbon particles for advanced esophageal cancer: a pilot study [J]. Endoscopy, 2004, 36(5): 421-425 .

[9] YE Tian-tian, XU Wen, SHI Tian-yu, et al. Targeted delivery of docetaxel to the metastatic lymph nodes: A comparison study between nanoliposomes and activated carbon nanoparticles[J]. Asian Journal of Pharmaceutical Sciences, 2015, 10(1): 64-72.

[10] FIGUEIREDO J L, PEREIRA M F R, FREITAS M M A, et al. Modification of the surface chemistry of activated carbons [J]. Carbon, 1999, 37(9): 1 379-1 389.

[11] SHAH M, AGRAWAL Y. Carbon nanotube: a novel carrier for sustained release formulation [J]. Fullerenes, Nanotubes

and Carbon Nanostructures, 2012, 20(8): 696-708.

[12] GU Jin-lou, SU Sha-sha, LI Yong-sheng, et al. Hydrophilic mesoporous carbon nanoparticles as carriers for sustained release of hydrophobic anti-cancer drugs[J]. Chemical Communications, 2011, 47(7): 2 101-2 103.

[13] IOVINO P, CANZANO S, CAPASSO S, et al. A modeling analysis for the assessment of ibuprofen adsorption mechanism onto activated carbons [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 277: 360-367.

[14] 董怡民, 查小容, 姚崇舜, 等. 纳米活性炭对氟尿嘧啶的吸附和缓释作用的实验研究[J]. 中国医科大学学报, 2004, 33(3): 205-206.

[15] 曲秋莲, 张英鸽, 孙岚. 纳米活性炭对丝裂霉素 C 的吸附与缓释性能研究[J]. 军事医学科学院院刊, 2004, 28(6): 552-554.

[16] GUDLA V C, RECHENDORFF K, BALOGH Z I, et al. In-situ TEM investigation of microstructural evolution in magnetron sputtered Al-Zr and Al-Zr-Si coatings during heat treatment[J]. Materials and Design, 2016, 89: 1 071-1 078.

[17] ZHU Guang-zhen, DENG Xian-lun, HOU Ming, et al. Comparative study on characterization and adsorption properties of activated carbons by phosphoric acid activation from corncob and its acid and alkaline hydrolysis residues[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 144: 255-261.

[18] OCONNELL J H, LEE M E, YAGOUB M Y A, et al. Characterization of crystallite morphology for doped strontium fluoride nanophosphors by TEM and XRD [J]. Physica B: Condensed Matter, 2016, 480: 169-173.

[19] YORGUN S, YLDZ D. Preparation and characterization of activated carbons from Paulownia wood by chemical activation with H3PO4[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2015, 53: 122-131.

[20] 郝其庚. 活性炭的应用[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2002: 8-15.

[21] 中华人民共和国卫生部药典委员会. 中华人民共和国药典: 二部[S]. 1995 版. 北京: 人民卫生出版社, 1995: 附录 66.

[22] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 二部[S]. 2010 版. 北京: 中国医药科技出版社, 2010: 202, 附录 XI、X.

[23] 洪正源, 费斌, 朱晓玲, 等. 不同介质中活性炭吸附与缓释烟酸

的研究[J]. 炭素, 2010(2): 27-32.

[24] 张李, 王晓娜, 丁学伟, 等. 纳米炭吸附丝裂霉素 C 腹腔化疗的实验研究[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2008, 15(3): 503-506.

[25] FISICHELLA M, DABBOUE H, BHATTACHARYYA S, et al. Mesoporous silica nanoparticles enhance MTT formazan exocytosis in HeLa cells and astrocytes[J]. Toxicology in vitro, 2009, 23(4): 697-703.

[26] LIMA C F, COSTA M, PROENÇA M F, et al. Novel structurally similar chromene derivatives with opposing effects on p53 and apoptosis mechanisms in colorectal HCT116 cancer cells[J]. European Journal of Pharmaceutical Sciences, 2015, 72: 34-45.

[27] DONG Wei, DONG Yan, WANG Ying, et al. Labeling of human hepatocellular carcinoma cells by hexamethylene diamine modified fluorescent carbon dots[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2013, 116: 209-213.

[28] 蔡要欣, 张韧铮, 孙岚, 等. 纳米活性炭吸附多烯紫杉醇对 A549 细胞增殖及凋亡的影响[J]. 郑州大学学报: 医学版, 2012(6): 759-761.

[29] 姚敏琪, 卫英慧, 胡兰青, 等. 溶胶-凝胶法制备纳米粉体[J]. 稀有金属材料与工程, 2002, 31(5): 325-329.

[30] 肖东, 周文化, 邓航, 等. 3 种食品添加剂对鲜湿面抗老化作用研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 142-145.

[31] 陈幸莺. 食品中 12 种防腐剂多通量测定方法的研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 134-139.

[32] 曲云卿, 张同刚, 刘敦华. 不同产地枸杞中主要类胡萝卜素的聚类分析[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 76-79.

[33] 刘昊明, 潘艳楠, 崔泰花, 等. 洋葱皮提取物对营养性肥胖大鼠的减肥作用[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 160-163.

[34] 陈三宝. 西洋参口腔速溶片的研制[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 212-214.

[35] 杜振亚, 陈复生, 布冠好. 小麦麸皮及其保健功能研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 253-256.

[36] 韩邦兴, 彭华胜, 张玲. 苍术属药用植物挥发油成分的组分分析[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 5-9.

[37] 陈铁壁, 肖乐, 杨盟盟, 等. 金桂花中总黄酮的微波辅助提取工艺优化[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 185-188.

[38] 贾春风, 刘恺, 陈梅香. 杜仲叶醋发酵工艺参数优化[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 186-189.

(上接第 134 页)

啤酒中的活性物质和营养成分,有效提高了人体的消化和吸收功能,同时也保持了啤酒最原始、最新鲜的口感,得到了业内人士及消费者的好评。

参考文献

[1] 黄家英. 原浆自酿啤酒质量影响因素及控制措施[J]. 科技信息, 2011(27): 412-413.

[2] 秦玉波. 原浆啤酒保鲜物流, 引领新型消费模式[N]. 现代物流报, 2013-08-27(B02).

[3] 齐鲁晚报通讯社. 从灌装线直接进酒杯原浆啤酒即将亮相枣庄[N]. 齐鲁晚报, 2011-04-25(Z06).

[4] 卞川泽. 让原浆啤酒走进我们的生活[N]. 华夏酒报, 2011-12-28 (012).

[5] 戴军, 袁惠新. 啤酒过滤的现状与发展[J]. 食品与机械, 1999 (4): 3-6.

[6] Signe Hoff, Marianne N. Lund, Mikael A. Petersen, et al. Storage stability of pasteurized non-filtered beer [J]. Journal of the Institute of Brewing, 2013, 119(3): 172-181.

[7] 庞尊贵. 智能化啤酒保鲜桶: 中国, 201686168U[P]. 2010-12-29.

[8] 吴业正, 厉彦忠. 制冷与低温装置[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 8-13.

[9] 庞尊贵. 啤酒保鲜智能化控制装置: 中国, 101850876A[P]. 2010-10-06.

[10] 严兆大. 热能与动力工程测试技术[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2005: 100-136.

[11] 张信禹, 樊军庆, 张志强, 等. 啤酒瓶自动理瓶系统的设计[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 101-108.