

环保与安全

空气除尘设备及技术的发展

高 坚¹ 张卫东¹ 郝新敏² 张泽廷¹

(1. 北京化工大学化学工程学院, 北京 100029; 2. 东华大学纺织学院, 上海 200051)

摘要:介绍了目前主要的空气除尘设备的工作原理、除尘性能和适应场合。重点评述了改进的电除尘器 and 袋式除尘器的技术特点及在我国的应用情况和前景。指出以碳纤维膜作吸尘极的膜电除尘器可以提高除尘效率和操作性能,可同时实现除尘、脱硫、脱硝、除重金属,有望大量应用于我国的燃煤电厂;袋式除尘器的表面过滤技术已从预涂层发展到覆膜,由此发展的覆膜滤料以其低阻、高效及寿命长的特点成为袋式除尘器的发展方向。

关键词:空气净化;除尘设备;高效除尘

中图分类号:TQ028

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2003)10-0049-05

Development of air cleaning equipment and technologies

GAO Jian¹, ZHANG Wei-dong¹, HAO Xin-min², ZHANG Ze-ting¹

(1. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: The development of air cleaning technologies and equipment for industrial dust controlling was reviewed. According to dust removal mechanism, for different technology, the operation performance, such as effective particle diameter of being collected; removal efficiency and pressure drop, were discussed. New technologies including membrane electrostatic precipitator and surface-filtration were introduced, and the application status and developmental foreground of those technologies in China were discussed. It was pointed out that the new type of membrane electrostatic precipitator (MESP) with carbon fiber membrane as dust absorption electrode not only could improve removal efficiency and operation performance of ESP, but also had many advantages such as sulphur removal, denitration and heavy metal removal; surface filtration used in bag filters acted as the initial layer filter media at first, now membrane filter media had become one of main developmental direction and would be hopeful to application in coal-fired power plants in China because of its excellent performance of low resistance, high efficiency, long useful life, etc.

Key words: air cleaning; dust removal equipment; high efficiency dust removal

环境保护已成为世人关注的热点,经济全球化的大潮和解决全球环境问题的呼声使环境与贸易的关系日益密切,国际组织制定了一系列旨在保护环境的技术标准。如何防治大气污染、洁净空气环境也是人们不断研究的课题^[1-2]。特别是我国的主要能源是煤炭,燃煤过程中会产生大量的煤粉尘,严重污染了大气环境。这些空气中细微煤粉尘,尤其是直径为 2.5~6 μm 的飘尘对人体健康有极大危害。它不仅在肺部沉积,还可以直接进入血液到达人体各部位。粉尘粒子表面还会附着各种有毒物质,

它一旦进入人体,就会引发各种呼吸系统疾病,危害将更大。因此,控制粉尘尤其是直径为 2.5~6 μm 的细微粉尘的排放,是我国治理大气污染、洁净空气环境的重要举措。此外,电子、精密仪器加工等行业对空气中含尘量的要求更高,一般都要求对亚微米级粉尘的除尘效率达 99.97% 以上^[3],这对高效除尘及超高效除尘技术的发展提出了更高的要求。

1 空气除尘设备的研究现状

按捕集粉尘的作用力及原理,除尘设备可分为

收稿日期:2003-06-24;修回日期:2003-07-21

基金项目:国家高技术研究发展计划(2002AA64)及北京科技新星计划项目(H013610250112)

作者简介:高坚(1978-),男,博士生;张卫东(1969-),男,博士,副教授,主要从事膜分离方面研究,通讯联系人,010-64434788, zhangwd@mail.buct.edu.cn。

4 类:机械式除尘、电除尘、过滤式除尘和湿式洗涤除尘设备。按除尘效率可分为:高效除尘设备,包括电除尘、袋式除尘、高效文丘里除尘等;中效除尘设

备,包括旋风除尘及其他湿式除尘等;低效除尘设备,包括重力沉降、惯性除尘等。表 1 列出了各种除尘设备的性能及其适应场合。

表 1 各种除尘设备的性能及其适应场合

	作用力	有效捕集 粒径/ μm	处理 m^3 气速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	除尘效率/ %	阻力/ kPa	适用场合	备注
机械式除尘器							
沉降室	重力	> 50	0.5 ~ 1.0	50 ~ 60	1	一级粗除尘	低效
惯性除尘器	惯性力	> 20	12 ~ 15	60 ~ 65	0.2 ~ 1	一级粗除尘	低效
旋风分离器	离心力	> 5	10 ~ 30	75 ~ 90	0.4 ~ 2	二级除尘	中效
过滤式除尘器							
袋式除尘器	重力、惯性力、粘 附力、电场力等	> 0.1	0.5 ~ 2.0 (过滤 m^3 气速)	> 99.99	0.8 ~ 2	高效、超高效过滤 除尘	高效
颗粒层除尘器	重力、惯性力、粘 附力、电场力等	> 0.5	0.4 ~ 0.8 (过滤 m^3 气速)	> 99	0.8 ~ 2	高效过滤除尘	高效
电除尘器	电场力	> 0.5	7 ~ 30	> 99	0.1 ~ 0.2	高效、高温除尘	高效
湿式除尘器							
重力喷雾洗涤器	重力、惯性力	> 50	0.5 ~ 1.5	60 ~ 80	8	二级除尘	中效
冲击水浴除尘器	重力、惯性力	> 5	8 ~ 15	85	9	二级除尘	较高效
文丘里管除尘器	重力、惯性力	> 0.5	4 ~ 5	95	8 ~ 10	高效除尘	高效,但阻力大,费水

1.1 沉降室

沉降室也叫重力除尘器,是一种借助重力作用使含尘气体中粉尘自然沉降以达到净化气体目的的装置。当含尘气体水平通过沉降室时,尘粒受沉降力的作用向下运动,经过一定时间后尘粒沉降到沉降室的底部而分离,净化后的气体通过出口排出。沉降室的沉降速度太小,一般只用于分离 50 μm 以上的尘粒。因此沉降室通常用于粗尘粒的预除尘。

1.2 惯性除尘器

惯性除尘器是利用粉尘在运动中惯性力大于气体惯性力的作用,将粉尘从含尘气体中分离出来的设备。其利用一系列的挡板,惯性大的颗粒被阻挡下落,小的颗粒绕板而过。粉尘粒径越大、气流速度越大、挡板数越多和距离越小,则除尘效率越高,但压力损失也越大。这种除尘器结构简单,分离临界粒径为 20 ~ 30 μm ,压力损失为 100 ~ 1 000 Pa。

1.3 旋风分离器

旋风分离器是利用旋转的含尘气体所产生的离心力,将粉尘从气流中分离出来的一种干式气-固分离装置。当含尘气体进入旋风分离器时,气流将由直线运动变为圆周运动。含尘气体在旋转过程中产生离心力,将密度大于气体的尘粒甩向器壁,进入排灰管。旋风分离器用于工业生产已有 100 余年历史^[5]。对于捕集、分离 5 ~ 10 μm 粉尘的效率较高,一般能达 85%,但对于 5 μm 以下的颗粒效率只有

50%。同时,旋风分离器的理论与实验研究十分困难,其应用也因此受到限制。旋风分离器有如下特点:结构简单,不需特殊的附属设备;操作、维护简单,压力损失中等,动力消耗不大;操作弹性大,性能稳定,不受含尘气体的浓度和温度等影响。旋风分离器对粉尘的物理性质无特殊要求,作为一种重要的二级除尘设备被广泛应用于化工、石油、冶金、建筑、矿山、机械、轻纺等工业部门。

1.4 湿式除尘器

湿式除尘器是使含尘气体与水或其他液体接触,利用水滴和尘粒的惯性碰撞等作用把尘粒从气流中分离出来的设备。其除尘机理是:当含有悬浮尘粒的气体与水相遇接触且气体冲击到湿润的器壁时,尘粒被器壁所粘附,或者当气体与喷洒的液滴相遇时,液体在尘粒质点上凝集,增大了质点的质量,而使之降落。在湿式除尘器中,气体与液体的接触方法有 2 种,一种是气体与水膜和已被雾化了的水滴接触,如文丘里管除尘器、水膜除尘器等;另一种是气体冲击水层时鼓泡,以形成细小的水滴和水膜,如冲击式除尘器、自激式除尘器等。总的来说,湿式除尘器主要靠惯性碰撞、粘附、扩散 3 种作用将粉尘除去。

湿式除尘器类型较多,而最具代表性的是文丘里管除尘器和水膜除尘器^[3]。文丘里管除尘器能除去 1 ~ 5 μm 的尘粒,效率较高,而且不会产生二次飞

扬,特别适宜具有粘附和潮解性的粒径 $1\ \mu\text{m}$ 以下的粉尘。其缺点在于:首先压降大,当去除 $1\ \mu\text{m}$ 以上的尘粒时压降约 $2\ 000\ \text{Pa}$,效率约 90% ,当粉尘粒径小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 时,压降高达 $10\ 000\ \text{Pa}$,效率也较低;其次是含尘污水的处理问题,文丘里管除尘器的用水量较大,在设计与使用时必须充分考虑。水膜除尘器效率不如文丘里管除尘器,一般为 $85\% \sim 90\%$,但因其用水量较少,阻力相对较低(一般仅为 $100 \sim 150\ \text{Pa}$),也得到较广泛的应用。

1.5 电除尘器

自 1906 年 F.G.Cottrell 在工业上应用静电除尘器(ESP)以来,ESP 已发展成一种公认的高效除尘装置^[6]。其工作原理为:将直流高压施加于放电极和收尘极之间形成电场,使气体电离,让悬浮微粒荷电收集电场中荷电微粒并将其排除到外部。在合适条件下使用 ESP,其效率可达 99% 甚至更高。电除尘器性能的提高,不仅取决于除尘器本身的结构,而且还取决于高低供电装置的供电质量、控制性能和供电方式的改进。目前 ESP 在化工、发电、水泥、冶金、造纸等工业部门被广泛应用。尤其在我国燃煤电厂,除尘设备基本都使用 ESP。

但是 ESP 对直径 $0.1 \sim 2\ \mu\text{m}$ 尘粒的除尘效率较差,且 ESP 的除尘性能受粉尘电阻率的支配。一般来说,粉尘的电阻率为 $10^4 \sim 5 \times 10^{10}\ \Omega \cdot \text{cm}$ 属正常范围,如低于此范围则易导致再飞扬,而高于此范围则易发生反电晕现象,并使除尘性能下降。由于粉尘电阻率与粉尘化学成分直接相关,所以 ESP 在某些场合不能适用。例如:粉煤灰的主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 TiO_2 、 P_2O_3 、 Li_2O 等,其中 SiO_2 和 Al_2O_3 占 70% 以上。若 SiO_2 和 Al_2O_3 两项占粉煤灰的质量分数大于 90% ,则静电除尘器

难于收尘。由于燃煤电厂煤种变化较大,因此粉尘的化学成分波动也较大,给电除尘的运行带来一定的困难。

1.6 袋式除尘器

自 1881 年德国 Betch 工厂的机械振动清灰袋式除尘器获德国专利并开始袋式除尘器的商业化生产以来,袋式除尘器的清灰技术及袋滤技术得以迅速发展和提高^[7]。目前袋式除尘器对工业废气中微粒粉尘的控制,尤其是对高温冶炼和燃料燃烧生成的高活性微粒粉尘的控制,技术上已日趋成熟。其对微粒粉尘的除尘效率在 99.99% 以上,排放气的质量浓度小于 $50\ \text{mg}/\text{m}^3$,甚至可低达 $10\ \text{mg}/\text{m}^3$,且规格齐全,适用范围广,不受粉尘电阻率的影响,不存在水污染问题。在采取其他技术措施的前提下,可同时清洁工业废气中的固、液、气 3 类污染物。

袋式除尘器的工作原理为:当含尘气体进入除尘器时,粗粉尘因受导流板的碰撞作用和气体速度的降低而落入灰斗中;其余细小颗粒粉尘随气体进入滤袋室;受滤料纤维及织物的惯性、扩散、阻隔、钩挂、静电等作用,粉尘被阻留在滤袋内,净化后的气体逸出袋外,经排气管排出。滤袋上的积灰用气体逆洗法或喷吹脉冲气流的方法去除,清除下来的粉尘由排灰装置排走。

袋式除尘器的发展概况见表 2。袋式除尘器的清灰方式已日趋成熟,目前的研究主要集中在滤料上。滤料性能和质量的好坏,直接关系到袋式除尘器的性能和使用寿命。滤料已从天然纤维发展到现在的人工合成纤维,从而使袋式除尘器的除尘性能及应用范围有了大幅提高。目前滤料的研究主要集中在表面覆膜滤料的开发上,表面覆膜技术给滤料的除尘性能带来了革命性的变化。

表 2 袋式除尘器技术发展概况

	清灰技术	滤料	说明
1881 年	机械振动	天然纤维如棉布、毛呢等	德国 Betch 工厂的机械振动清灰袋式除尘器获德国专利并开始袋式除尘器的商业化生产 ^[7]
1921 年	反吹风 ^[8]		清灰技术改进为反吹风和机械振动二者结合
1954 年	逆喷型吹气环		H.J.Herse 发明了逆喷型吹气环清灰技术,使得袋式除尘器实现连续操作,处理量提高数倍,滤袋压力较稳定 ^[8-9]
1957 年	脉冲喷气	合成纤维如 208 绒布、729 织布、玻璃纤维、针刺毡式滤布以及 20 世纪 90 年代后出现的覆膜滤料	T.V.Reinauer 的发明被认为是袋式除尘技术的重大改进 ^[9]
1962 年	回转反吹		日本首先开发成功,同期美国也推出 RJ、RF、PN 等型号的系列产品,适用于中、小风量的废气处理
1970 年及以后	大型反吹风大型脉冲		美国、日本、澳大利亚及欧洲等国家或地区相继开发了大型袋式除尘器,应用于燃煤电站、干法水泥回转窑窑尾和电炉除尘,单台过滤面积超过 $1\ \text{万}\ \text{m}^2$ 的不在少数 ^[10]

2 空气除尘技术的新发展

2.1 膜电除尘器技术

近 100 年来静电除尘器(ESP)有了较大的变化和发展,如在清灰方式上对声波清灰的探索,在供电方式上对脉冲供电技术的研究等。这些改进从一定程度上改善了 ESP 的性能,但均未取得重大突破,其原因在于没有脱离传统钢质收尘极的模式。

1998 年美国俄亥俄州立大学的 Pasic 等^[11]首次提出膜电除尘器(MESP)概念,即采用碳纤维材料编织成的膜作为 ESP 的收尘极,从而打破了多年来对 ESP 研究徘徊不前的局面,有望使 ESP 产生根本性的变革。相比钢质极板,膜收尘极具有许多优异的性能,主要体现在:质轻;能捕捉空气动力学当量直径 $< 2.5 \mu\text{m}$ (以 PM 2.5 表示)的细粉尘,除尘效率高;膜阳极板没有加强筋,对流场的干扰较小,减少了二次飞扬的产生;两极的间距可以缩小,使干式 ESP 的体积减小;耐腐蚀;清灰方式灵活多样;积灰层容易以较大的块状脱落,减小了二次飞扬;也可用来改造原来钢质阳极板的 ESP。其中耐腐蚀的优点,对湿式 ESP 更具有吸引力,使得在 ESP 中同时实现除尘、脱硫、脱硝一体化将成为可能。

纵观 MESP 的发展趋势,干式电场结合湿式电场的混合式 MESP 将是该领域研究与开发的纵深方向。混合式 MESP 具有很高的除尘效率,同时还能有效去除二氧化硫、氮氧化物、重金属等有害物质,为除尘、脱硫、脱硝的一体化技术开辟道路。

我国是一个燃煤大国,全国燃煤电厂烟气收尘装置大多为 ESP。随着排放指标的提高,今后必须对传统的 ESP 进行改造,并需增设昂贵的脱硫装置,从而增强 MESP 的市场竞争力。另一方面,因膜收尘极既可应用于干式 ESP,又可用于湿式 ESP;既可应用于新建 ESP,又可用于传统 ESP 的改造,使得 MESP 技术的推广应用工作比较顺利。因此,MESP 在我国的市场前景将是十分光明的。

2.2 表面过滤技术

目前国内的袋式除尘器大多采用针刺毡材料等传统滤料,属于深层过滤,依靠截留在过滤材料上的微尘颗粒层进行过滤,因而存在过滤阻力大、反冲洗频率高等问题,导致袋式除尘器的寿命较短、操作相对困难。此外,袋式除尘器的价格较高,操作过程中及反冲洗后的压力波动比较大等,这些因素都极大地限制了袋式除尘器在工业生产中的应用。表面过滤技术可以很好地解决上述问题^[12]。表面过滤技

术是指粉尘不透入滤料内,而全部沉积在滤料表面的过滤技术。

表面过滤主要利用薄膜过滤粉尘,依靠薄膜的筛滤,同时也借助于膜表面上的粉尘薄层。薄膜的孔径很小,能把绝大部分尘粒阻留在膜的表面,完成气固分离过程。不同于一般滤料的分离过程,粉尘不深入到纤维内部。其好处是:在滤袋开始工作时就能在膜表面形成透气性好的粉尘薄层,既能保证较高的除尘效率,又能保证较低的运行阻力。

2.2.1 利用预涂层技术实现表面过滤

该技术是将配制好的粉剂,用特殊工艺溶进已缝制滤袋的滤料内部,再用粘结剂固定,达到滤袋未使用前的高效收尘能力^[13]。经预涂层处理后的滤袋在使用前形成了稳定的粉尘初层,克服了新滤料前期除尘效率不高的弊病;同时粉尘初层经粘结剂固定,稳定性好。这样可以降低压力波动对稳定生产的不利影响。但其缺点在于:随反冲洗的次数增加,预涂层可能会从滤料表面冲脱,影响滤料的使用寿命。

2.2.2 利用膜分离技术实现表面过滤

该技术是将某种分离膜覆在普通滤料上,利用膜分离技术过滤含尘气体。目前,所用的薄膜一般是聚四氟乙烯(PTFE)薄膜,它具有优异的性能:表面过滤,过滤阻力小,粉尘层易剥落,解决了深层过滤不能解决的问题;孔径为 $0.2 \sim 3 \mu\text{m}$,能够迅速有效地截留微米级超细粉尘;清灰后不改变孔隙率,除尘效率一直很高,几乎可达到零排放;表面光滑,不结露,易清灰,清灰后不改变空隙率,因此投入运行后,压力损失低且不随使用时间的延长而增大;滤袋使用寿命长。美国 Gore 公司生产的膨体 PTFE 膜已应用于该领域,并收到了很好的效果^[14]。

例如,某水泥厂水泥成品磨,原先用 729 织物滤料,改用非织造涤纶针刺毡与 PTFE 薄膜复合的覆膜滤料后,应用情况对比见表 3。

表 3 非织造涤纶针刺毡与 PTFE 薄膜复合的覆膜滤料的应用情况对比表

滤料	过滤风速/ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	处理量/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	压力 损失/Pa	滤袋 寿命/月
729 织物滤料	0.45	225	125	1500 ~ 2000	4
PTFE 覆膜滤料	0.8	452	125	500	12

又如某水泥厂石灰窑尾气的处理,将玻纤滤料改为膨体纱玻璃纤维与 PTFE 覆膜滤料,其应用情况对比见表 4。

表4 玻璃纤维与PTFE覆膜滤料的应用情况对比

滤料	过滤风速/ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	处理量/ $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	压力损失/Pa	滤袋寿命/月	清洗周期/min	产量/ $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$
玻璃纤维滤料	0.58	2773	275	2500~3000	12	20	480
PTFE覆膜滤料	0.95	4386	275	1000	24	72	580

通过上述实例可以看出,PTFE覆膜滤料在过滤风速、处理风量、压力损失、滤袋寿命及产量、节约能源等方面都优于其他普通非织造滤料。PTFE覆膜滤料以其卓越的特性,对袋式除尘器滤料的发展是一个质的飞跃,但美国Gore公司对我国只提供产品不转让技术。而我国在这方面的研究正处于起步阶段,因此表面过滤技术及覆膜滤料的开发和应用是我国研究者的机遇和挑战。

3 结语

从粗除尘到高效除尘的一系列除尘技术及设备,在各自除尘场合起着重要作用,而高效除尘技术及设备的发展有如下特征:电除尘器、袋式除尘器在高效除尘领域应用非常广泛,但还存在一些缺点有待改进;膜电除尘器利用了先进的碳纤维膜作吸尘极,使电除尘器的除尘效率和操作性能大大提高,且集除尘、脱硫、脱硝、除重金属于一体,预计将在我国燃煤电厂中得到广泛应用;表面过滤技术已从预涂层技术发展发展到覆膜技术,特别是因覆膜技术而发展

的覆膜滤料以其低阻、高效及寿命长的特点使它成为袋式除尘器的主要发展方向之一。

参考文献

- [1] Craw Ford M. Air pollution control theory[M]. New York: McGraw-Hill, 1976. 64-105.
- [2] Sandboch F. Principles of pollution control[M]. New York: Longman, 1982. 16-31.
- [3] 姚群,陈降枢.[J]. 中国安全科学学报,1999,5(9):13-17.
- [4] 刘金红.[J]. 化工装备技术,1998,19(5):49-50.
- [5] 化工设备设计全书编辑委员会. 除尘设备设计[M]. 上海:上海科学技术出版社,1983. 384-386.
- [6] Bapat J D.[J]. J of Hazardous Materials, 2001, B81:285-308.
- [7] Mellvaine R W.[J]. Filtra Separ, 1980, 1(3):112-122.
- [8] 肖宝恒.[J]. 电力环境保护, 2001, 17(3):44-48.
- [9] Kraus M N.[J]. Chemical Engineering, 1979, 8:87-99.
- [10] Wilman D, Adesogan A.[J]. Animal Feed Sci & Tech, 2000, 84:33-37.
- [11] Pasic H.[J]. Filtr Separ, 2001, 38(9):28-31.
- [12] Ravensworth Lab.[J]. Filtr Separ, 1998, 35(3):134-136.
- [13] 陆茂成,葛非池.[J]. 粉体技术, 1996, 2(4):29-36.
- [14] 薛刚,郑淑琴,董洪君.[J]. 产业用纺织品, 2001, 19(140):26-30. ■
- [15] 中国人民解放军北京医学高等专科学校. 高纯度蛋黄卵磷脂的精制工艺[P]. CN 96120080.2, 1998-04-22.
- [16] Krupp Uhde GmbH. Production process, used in particular for obtaining lecithin from dehydrated egg[P]. NZ 500824, 2001-09-28.
- [17] 赖炳森,毛中兴,沈晓京,等.[J]. 生物化学与生物物理进展, 1995, 22(4):366-370.
- [18] Sueddeutsche Kalkstickstoff(DF). Production of food or animal feed, especially cereal, cocoa or egg yolk product, involves extracting and separating lipids and mixing lipophilic constituents with extracted matrix using supercritical and compressed carbon dioxide[P]. DE 10018606, 2001-10-25.
- [19] 武练增. 超临界CO₂抽提高纯度蛋黄卵磷脂的方法[P]. CN 94102372.9, 1995-09-13.
- [20] 武练增,朱玖玖,崔欣欣,等.[J]. 山西食品工业, 1995(3):18-22.
- [21] 董桂燕,刘黎,张睿. 引进意大利 Fedegari 公司超临界萃取装置简介[A]. 第二届全国超临界流体技术学术及应用研讨会, 广州, 1998, 289-293.
- [22] 原华山,银建中,丁信伟.[J]. 化学工业与工程技术, 2003, 23(1):3-5. ■

(上接第48页)

粉进行原料预处理,将蛋黄粉造粒成型后萃取(合适的粒径为0.5~3mm),该工艺不但可以提高萃取速率,还可以防止蛋黄粉在萃取后期结糊结块。

(4)另外在第一、二种工艺中,用超临界CO₂萃取蛋黄粉时,要防止蛋黄粉堵塞管路的现象,可在萃取器进出口加滤网,在内件上下部安装多功能过滤装置。不仅能有效防止物料带入管道造成堵塞,而且还能改善萃取剂进出萃取器的状况,避免沟流现象的发生。

参考文献

- [1] 单英杰. 中国短缺食品添加剂需加大开发力度[N]. 中国化工报, 2002-02-28(B2).
- [2] 马海乐. 生物资源的超临界流体萃取[M]. 合肥:安徽科学技术出版社, 2002. 172-178.
- [3] 李亚琴,吴守一.[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2):144-147.
- [4] 李小兵. 高纯度蛋黄卵磷脂的制备研究[D]. 广州:华南理工大