

“国家技术发明奖”获奖技术系列介绍之一

新型膜分离技术——渗透汽化技术及应用

○ 学生记者 毕秋艳

在能源紧张、资源短缺、生态环境日益恶化的今天，新兴的高科技环保技术日益被人们所重视。而这其中，膜分离技术由于其所具有的环境友好型、节能环保型和清洁生产型三大特性，被产业界和科技界视为21世纪工业技术改造中最有发展前途的高新技术之一。

或许对于超滤、微滤、电渗析、反渗透等主要用于水处理的膜过程，大家并不陌生，对于精馏、萃取和吸附等过程大家更是耳熟能详。但是说起渗透汽化，相信很多人会感到陌生。近年来，渗透汽化作为一种新型膜分离技术，由于其在有机溶剂分离方面的优势，得到了世界各国的高度重视。2009年11月，中国渗透汽化技术产业化领军人、清华大学化学工程系陈翠仙、李继定、蒋维钧、张立平、秦培勇等老师及其研究团队多年来的成果“渗透汽化透水膜、膜组件及其应用技术”获得了2009年度国家技术发明二等奖。为了更详细地了解这项技术及其应用，记者走访了李继定教授。

据李教授介绍，渗透汽化(pervaporation，简称PV)是一种新型膜分离技术。该技术用于液体混合物的分离，其突出的优点是能够以较低的能耗实现蒸馏、萃取、吸收等传统方法难以完成的分离任务。它特别适用于蒸馏法难以分离或不能分离的近沸点、恒沸点混合物以及同分异构体的分离；对有机溶剂及混合溶剂中微量水的脱除及废水中少量有机污染物的分离具有明显的技术上和经济上的优势；另外该技术还可以与化学反应耦合，将反应生成物不断脱除，使反应转化率明显提高。所以，渗透汽化技术在石油化工、医药、食品、环保等工业领域中具有广阔的应用前景及市场。

对于这项从世界范围而言依然处于开发期和发展期的新技术，清华大学又是如何走在世界先进行列的呢？李教授向记者娓娓道来这历经近30年的故事。

立项：渗透汽化——时代的选择

20世纪80年代初，在美国的渗透汽化技术已经接近工业应用之时，中国国内尚不知道有此项技术。1982年，汪家鼎院士受美国麻省理工大校友的邀请访美，在全面了解了渗透汽化技术的优势之后，主要研究萃取技术的汪院士敏锐地意识到该技术对于化学分离而言的重要意义。回国之后他立即在化工系组织人力，由蒋维钧教授负责，陈翠仙、张立平等老师具体实施，开始进行此项技术的研究。然而，仅凭一个概念与信念支撑并不足以继续此项技术研究，当时的清华并没有人懂这一技术，国内也仅有少量科研单位对此有所初步研究，蒋维钧、陈翠仙、张立平等老师多次到这些科研院所调研，并组织研究团队进行了大量文献调研，清华大学对渗透汽化技术的研究才从此起步。

研究之初，经费的筹集非常困难，是汪院士从科研经费里拿了2万元出来，该项目才得以启动，后来蒋维钧教授从其他项目里筹措了部分资金来扶持该项目。尽管开始之初筚路蓝缕，但经过项目组成员长期不懈的共同努力，渗透汽化技术先后被列为国家自然科学基金“七五”重点项目、“八五”重大项目、“九五”国家重点科技攻关项目及“十五”国家863项目，取得了国家科研经费的支持。此后清华大学，特别是陈翠仙教授负责的“九五”国家重点科技攻关项目和李继定教授负责的“十五”国家863项目在渗透汽化膜技术领域取得了一系列创新成果，获得了十余项国家授权专利，发表了近300篇学术论文，拥有膜制备、膜组件设计制造、膜过程工业应用的完全自主知识产权。

产业化应用：独领风骚前景无限

渗透汽化透水膜技术的创新点主要在于膜材料和膜的制备，而产业化应用的难点和突破性进展也正在于此。谈及渗透汽化技术产业化的历

程，李教授说，“这个过程相当不容易！难度非常大！瓶颈和障碍相当多！走了许多弯路。不仅要找到合适的膜材料，还要克服膜制备过程中无纺布与基膜、基膜与分离层之间的附着问题及膜组件密封材料与原料本身的相溶问题。仅就寻找合适的密封材料就失败过很多很多次。”

无数次失败的尝试之后，项目组成员终于品尝到了胜利的果实。

1999年，清华大学与北京燕山石化集团公司联合进行渗透汽化苯脱水中试试验取得成功，该中试装置用自行开发成功的改性PVA/PAN复合膜及膜组件，将原料苯的含水量从500ppm以上脱除到小于30ppm，处理量达到1300吨/年以上，膜的使用寿命超过1年。这是世界上第一套用渗透汽化技术脱除苯中微量水的装置，就在这一年李教授加入了这支队伍。

2000年，清华大学再次和燕山石化合作，完成了渗透汽化技术脱除C6溶剂油中微量水的中试试验，将C6溶剂油中的微量水从300ppm脱除到10ppm。燕山石化中试的成功，让渗透汽化技术的研发者坚定了产业化的信念。

2001年，该项目进入产业化实施阶段，依托研发团队数十年的基础研究技术成果，蓝景膜技术工程有限公司成立。

2003年，国内第一家应用渗透汽化技术的异

丙醇脱水装置在广州天赐建成。与德国GFT公司早在1984年就将这项技术正式工业化相比，我们整整晚了19年。

尽管如此，2009年，在与国际竞争对手德国GFT公司的同台竞争中，清华大学成功击败对手而中标东北制药厂年产量32000吨的异丙醇脱水项目。

据统计数据表明：2003年6月至今，在陈翠仙、李继定等老师的带领下，项目组先后在广东、山东、四川、辽宁、黑龙江等地建立了多套渗透汽化工业生产装置，用于无水异丙醇、无水乙醇、无水叔丁醇生产和溶媒回收。据不完全统计，截至目前，渗透汽化乙醇脱水工业工程，年处理能力73000多吨；渗透汽化异丙醇脱水工业工程，年处理能力44000多吨；渗透汽化叔丁醇脱水工业工程，年处理能力15000多吨，涉及40多家企业。与

李继定

教授，博士生导师，膜技术与工程中心副主任，研究方向为膜科学与技术、化工热力学。



常州高博能源材料公司18000吨/年正丙醇脱水渗透汽化工业装置

传统的恒沸精馏脱水技术相比，节能50%以上，为国家节能和传统工业技术改造做出了贡献。

该技术的产业化推广，为恒沸液的分离找到了高效、低能耗的新方法，燃料乙醇生产将发生革命性变革，含有少量水的有机溶剂脱水也将被此项技术路线所代替。该技术在石油化工、医药、食品、环保等工业领域中具有广阔的应用前景。

“更加让人欣慰的是，我们现在已经拥有了完全自主知识产权的渗透汽化成套技术，膜组件完全国产化，加上在价格和售后服务方面所具有的优势，目前该技术及应用在国内市场上一枝独秀。国内现有的40多套渗透汽化装置中，采用德国GFT公司生产的渗透汽化膜装置只有2套，其余都是我们自主研发的。”李教授的兴奋之情溢于言表。

对于技术的应用范围，李教授介绍说，渗透汽化是一项环境友好型、节能环保型和清洁生产型的技术，有以下几个显著特点：一是高效。渗透汽化过程的分离系数可以达到几百甚至上千，远远高于传统精馏法所能达到的分离系数。因而装置体积仅为具有同样处理能力的精馏系统的几十分之一。二是能耗低，一般比恒沸精馏法节能50%。三是产品质量好、收率高、溶剂回用避免了污染。四是处理过程中不引入其他试剂，产品和环境不会受到污染。因此，渗透汽化技术特别适用于不能引入可能成为杂质的第三组分的医药行业，而且大约1.5年即可将成本收回。

而据了解，目前国内每年有4500万吨的分离体系，如果采用渗透汽化技术进行分离将每年节省100多万吨煤，而当前全国用渗透汽化技术进行分离的企业加起来年产量不足20万吨，仅是这4500万吨中及其微小的一部分。我们期待并相信在渗透汽化技术不断发展的前提下，在政府政策及产业界有识之士的共同推动下，渗透汽化技术能够得到更广泛的应用，从而为我国节能减排及低碳目标的实现贡献力量。

研究团队：筚路蓝缕，开创膜界新时代

从1984年清华大学开始立项研究渗透汽化技术到现在，已经有超过200名老师和学生参与研究。据介绍，立项之后最初的几年，几位老师不仅自己教学任务繁重，而且当时研究生很少，很多科研工作主要是靠教师带领本科毕业生来进行的。



为了推进项目的研究，几位主要负责老师都是夜以继日地刻苦钻研，蒋维钧教授作为当时的总负责人，在总体方向掌控、实验方案确定、理论指导方面做了大量工作；陈翠仙老师常常和学生一起在实验室里工作到凌晨；李继定老师为了工业应用成功，曾连续半年在工厂第一线进行实验。

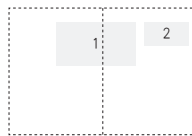
研究过程在取得一系列创新成果的同时，也培养了大批博士和硕士生。从2006年陈翠仙教授退休以后，李教授就成为该项目的带头人，目前仅在李教授实验室学习和工作的人员就有20多人。

“长风破浪会有时，直挂云帆济沧海”。

尽管渗透汽化技术本身是年轻的，但由于其所具有的环境友好型、节能环保型和清洁生产型特性，符合国家节能减排和循环经济的产业政策，因而相信中国的渗透汽化技术一定会不断做强做精，在产业界得到更广泛的应用，为企业带来更加显著的经济效益、社会效益和环境效益。■

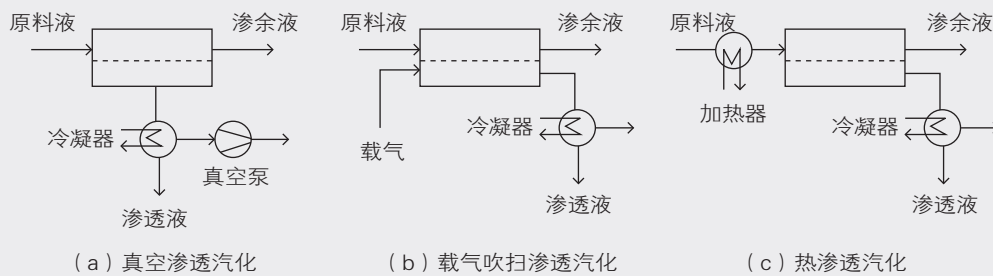


2



1: 东药集团东瑞公司5000吨/年渗透汽化乙醇脱水溶剂回收装置
2: 淄博诺奥化工公司2000吨/年正丙醇脱水渗透汽化工业装置

渗透汽化分离过程示意图



依据造成膜两侧蒸汽压差方法不同，渗透汽化分为以下三种形式：

(a) 真空渗透汽化：在膜透过侧用真空泵抽真空，以造成膜两侧组分的蒸汽压差。该法简单，传质推动力大，适合实验室操作。

(b) 载气吹扫渗透汽化：用载气吹扫膜的透过侧，以带走透过组分。吹扫气冷凝回收透过组分，载气循环使用；若不需回收透过组分，载气可直接放空。

(c) 热渗透汽化：通过料液加热和透过侧冷凝的方法，形成膜两侧组分的蒸汽压差。该方法传质推动力比真空渗透汽化小，工业上常与真空渗透汽化联合使用。