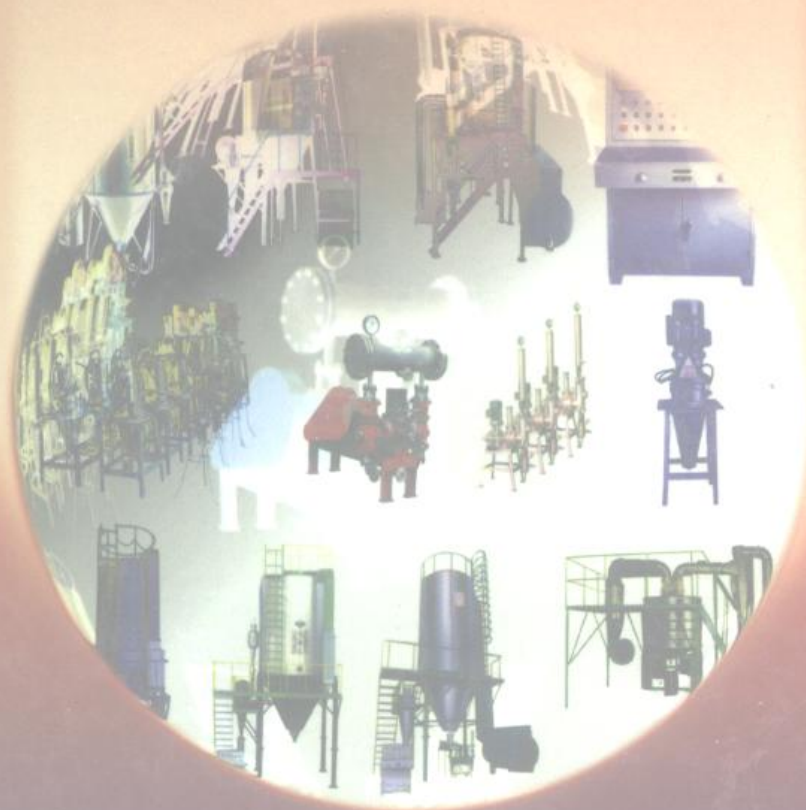


MODERN DRYING TECHNOLOGY

99

# 现代干燥技术

潘永康 主编 王喜忠 副主编



化学工业出版社

# 现代干燥技术

## Modern Drying Technology

潘永康 主编 (Editor - in - Chief)

王喜忠 副主编 (Vice Editor - in - Chief)

化学工业出版社

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

现代干燥技术/潘永康主编. -北京:化学工业出版社,

1998.2

ISBN 7-5025-2046-5

I. 现… II. 潘… III. 干燥-技术 IV. TQ028.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 19211 号

---

现代干燥技术

潘永康 主编

王喜忠 副主编

责任编辑:施承薇 戴燕红

封面设计:郑小红

\*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京市密云云浩印制厂印刷

三河市东柳装订厂装订

\*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 82 字数 1924 千字

1998 年 9 月第 1 版 1998 年 9 月北京第 1 次印刷

印 数 1—4000

ISBN 7-5025-2046-5/TQ·1011

定 价:128.00 元

京工商广临字 98164 号

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

# 现代干燥技术

(Modern Drying Technology)

## 名誉主编(Honorary Editors)

**A. S. Mujumdar**

加拿大 麦吉尔大学 教授  
国际干燥会议常任主席

**萧成基**

北京化工研究院 教授  
中国化工学会化学工程专业委员会主任委员

## 荣誉顾问(Honorary Advisories)

**余国琮**

天津大学 教授  
中国科学院院士

**C. Strumillo**

波兰 罗兹技术大学 教授  
波兰科学院院士  
国际干燥会议顾问团成员

## 企业界名誉顾问(Honorary Consultants of Enterprise)

**迟庆余**

铁岭精工(集团)股份有限公司 总经理

**周才君**

林洲干燥设备有限公司

无锡县喷雾干燥机厂

总经理

**金裕生**

上海华元化工技术工程公司 总经理

中国化工学会化学工程专业委员会干燥专业组副组长

## 编委会(Editorial Advisory Board)

**李 楨**

上海医药工业研究院 研究员

中国化工学会化学工程专业委员会干燥专业组组长

**曹崇文**

中国农业大学 教授

中国化工学会化学工程专业委员会干燥专业组组员

国际干燥会议顾问团成员

**夏诚意**

上海交通大学 教授

中国化工学会化学工程专业委员会干燥专业组组员

**王宗濂**

中国林业科学研究院林产化工研究所 研究员

中国化工学会化学工程专业委员会干燥专业组组员

**顾芳珍**

天津大学 教授

中国化工学会化学工程专业委员会干燥专业组组员

**翁颐庆**

上海化工研究院 高工

中国化工学会化学工程专业委员会干燥专业组组员

**T. Kudra**

加拿大多种能源研究所 高级研究员 博士

国际干燥会议顾问团成员

**Z. Pakowski** 波兰罗兹技术大学 教授  
国际干燥会议顾问团成员

**王喜忠** 大连理工大学 教授  
中国化工学会化学工程专业委员会干燥专业组副组长

**潘永康** 天津轻工业学院 教授  
中国化工学会化学工程专业委员会干燥专业组组员  
国际干燥会议顾问团成员

主 编(Editor - in - Chief) **潘永康**  
副主编(Vice Editor - in - Chief) **王喜忠**

参编人员(Contributors)

<b>曹崇文</b>	<b>朱文学</b>	<b>刘相东</b>	中国农业大学
<b>童景山</b>			清华大学
<b>刘登瀛</b>			中国科学院工程热物理研究所
<b>夏诚意</b>			上海交通大学
<b>李 桢</b>			上海医药工业研究院
<b>金裕生</b>	<b>李庆永</b>	<b>徐卫荣</b>	上海华元化工技术工程公司
<b>翁颐庆</b>	<b>蒋年禧</b>		上海化工研究院
<b>胡景川</b>			杭州茶叶机械科学研究所
<b>陈国华</b>			香港科技大学化工系
<b>王宗濂</b>			中国林业科学研究院林产化工所
<b>何士安</b>			南京化工大学
<b>顾炼百</b>			南京林业大学
<b>屠之龙</b>			化工部化工机械研究所
<b>淡 冲</b>			化工部第三设计院
<b>岳铭五</b>			苏州海林新型窑炉干燥成套公司
<b>徐圣言</b>			江苏理工大学
<b>王喜忠</b>	<b>王宝和</b>	<b>于才渊</b>	大连理工大学
<b>杨大成</b>			铁岭精工机器厂
<b>徐成海</b>			东北大学
<b>董伟志</b>			河北工业大学
<b>褚治德</b>	<b>钱树德</b>	<b>顾芳珍</b>	天津大学
<b>邓文仰</b>	<b>李友森</b>	<b>李占勇</b>	天津轻工业学院
<b>庞金钊</b>	<b>潘永康</b>		
<b>T. Kudra</b>			加拿大多种能源研究所
<b>A. S. Mujumdar</b>			加拿大麦吉尔大学
<b>D. Strumillo</b>			波兰罗兹技术大学

2768/30  
05

## 前 言

干燥是许多工业生产中的重要工艺过程之一,它直接影响到产品的性能、形态、质量以及过程的能耗等。干燥技术的覆盖面较广,既涉及复杂的热、质传递机理,又与物系的特性、处理规模等密切相关,最后体现在各种不同的设备结构及工艺上。

我国的干燥技术,可以追溯到 6000 年前原始陶器制造及沿海晒盐等的干燥过程中;建国以来,一些现代的干燥技术(如喷雾干燥、气流干燥及流化床干燥等),在国内有关的工业生产中得到应用;但迄今尚有在运行的干燥装置有待于技术更新。自 70 年代以来,国内干燥技术的研究开发、设备制造及生产应用有了很大进展。随着科学技术迅猛发展以及学科和技术领域之间的交叉、渗透和生长,干燥技术亦出现了日新月异的不断进展,广大的科技工作者热切希望有一本能较全面反映现代干燥技术的专著,作为工作中的参考和启发。

经过多年的酝酿和组织,终于编撰出版了这本《现代干燥技术》的宏著。本书的内容覆盖了干燥过程的基本原理;各种不同的干燥方法及相应的设备装置;对一些有前景的新型干燥技术作了较全面的介绍;在各个主要行业中的专用干燥过程;干燥装置及系统中有关的一些工程设计问题等等。内容丰富全面,既有具体的实际内容,又反映了干燥技术的新进展。对于广大的科技人员及高等院校的师生无疑是一本十分有益的专著。

本书是在潘永康教授和王喜忠教授的热心牵头下,花费了极大的精力,耗时数年,组织了全国 30 多位资深的干燥专家,还约请了几位国际上著名的专家,共同编撰而成,此外还得到国内各有关方面的大力支持,始克于成。本书的出版,是我国干燥领域中的一件大事,相信这将有助于进一步推动我国干燥技术及其工业生产的发展提高,立足于世界之林,并准备迎接第 13 届干燥大会(IDS'2002 年)在中国的举行。

萧成基

1996 年 11 月于北京

## 序

干燥是一种古老而通用的操作。从农业、食品、化工、陶瓷、医药、矿产加工到制浆造纸、木材加工,几乎所有的产业都有干燥。干燥是一种高能耗的操作,在各种工业部门总能耗中,干燥耗能从4%(化学工业)到35%(造纸工业)。发达国家,如法国、英国、瑞典等,据资料记载高达12%的工业能耗用于干燥方面。发展中国家目前的干燥耗能较低,但今后势必迅猛增长。我认为用于干燥的能量与一个国家的生活水平存在一定的关系。

最近,对产品质量方面的要求促使人们对于干燥技术产生兴趣。由于许多产品的质量取决于干燥,而获得优质产品常需要采用昂贵的干燥工艺。此外,还需考虑高产率、新工艺、安全操作、环境影响等。新“碳税”(根据矿物燃料燃烧释放到大气中的CO<sub>2</sub>量而定)将进一步促进干燥能效的提高。

国际上开始关注并认识到干燥的重要性,大概始于1978年在加拿大麦吉尔大学召开的每两年一次的国际干燥会议(IDS)。在这以前,除前苏联以外,几乎没有哪一个国家试图将干燥发展成为一门真正的多学科领域。直到开始召开国际干燥会议(IDS),人们才知道跨越工业界限的构想与技术的相互交融。实际上,目前已成功地运用纸干燥的知识解决了食品生产中的一些主要干燥问题。同样可以认为,产品及工艺的根本界限消失了,或者说至少是变得模糊了。因此,一个领域的知识和经验可以运用于另一个领域。这样,人们就避免了“重新发明”。

我很荣幸能成为这项宏大、有价值的工程的名誉编辑。通过国内的研究和发展及国际上的有益交往的途径发展干燥技术,对于像中国这样一个经济迅速发展的国家来说是一条正确的道路。这种研究和发展的投资回报必定是显著的。遗憾的是,西方国家认为干燥技术已发展“成熟”,他们已开始逐步地缩减研究和发展的开支,这在今后10年无疑具有消极影响。随着全球经济的竞争愈加激烈,各国有必要增加而不是缩减研究和发展的投资。革新、降低成本、提高能效以及保护环

境的技术均需开发,这不仅仅对干燥作业而言,而且对其他工业过程也如此。

作为编辑和《工业干燥手册》(Handbook of Industrial Drying)的主要撰稿人,我深知成功编撰《现代干燥技术》这样一流出版物,需要努力、时间、奉献、热情、牺牲和责任心。我恭贺编者和撰稿人,因为他们做了一项出色的工作。我很高兴地看到此书包括了极为广泛的文献资料,而且作者主要是中国人,从而又恰当地着重于本国所关心的方面。本书不仅包括了今后几十年仍将应用的传统干燥方法,而且为未来新技术的发展指出了方向。新技术的发展必然是以适应性设计和逐步改进现今的主要设计方法为基础。这不是一件容易的工作,它是以对当代干燥技术的全面了解为基础的。我希望在将来我们也能看到一些“革命性”的干燥技术——不是基于传统的干燥方法,而是基于与干燥几乎不相干的技术,如脉冲燃烧干燥器、运用超临界流体使气溶胶脱湿。此书为读者洞悉当今干燥技术状况和今后需要做的工作提供了有益的帮助。

我热切希望这本书将促进中国干燥技术的进一步发展。此书对工科学生、研究人员、教授、干燥器设计者和工业干燥设备的使用者等均适用。它有助于评价国际干燥技术及帮助革新者构思新工艺。

我向所有参与此项工作的人员,包括书籍出版者表示祝贺,因为它是中国同类书籍中的第一次重大的尝试。我本人确实为能参与此项工作而万分喜悦。

Arun S. Mujumdar

1996年10月

(李占勇译)



# 本书各章编者与审稿人

	编者	审稿人
绪论		
1 中国干燥技术发展概况	李 楨	王喜忠
2 干燥技术的革新和未来趋势	A.S.Mujumdar(李占勇译)	潘永康
3 干燥原理,干燥方法和干燥器的选择	潘永康	顾芳珍

## 第一篇 干燥过程的基本原理

第1章 湿气体和湿物料的性质	潘永康	顾芳珍
第2章 干燥中的试验技术及测量方法	潘永康	顾芳珍
第3章 基本干燥过程的计算	潘永康	顾芳珍
第4章 干燥过程的数学模型及模拟基础	曹崇文	顾芳珍

## 第二篇 干燥方法和干燥器

第5章 隧道干燥器和厢式干燥器	翁颐庆	王宗濂
第6章 转筒干燥器	于才渊 岳铭五	王 喜
第7章 转鼓干燥器	庞金钊	王宗濂
第8章 带式干燥机	淡 冲	王宗濂
第9章 盘式连续干燥器	董伟志	翁颐庆
第10章 卧式桨叶式干燥器	屠之龙	翁颐庆
第11章 流化床干燥	童景山	王喜忠
第12章 改型流化床干燥机	杨大成	潘永康
第13章 喷动床干燥	徐圣言	潘永康
第14章 喷雾干燥	王喜忠 王宗濂	翁颐庆
第15章 气流干燥	钱树德	夏诚意
第16章 太阳能干燥	朱文学 曹崇文	王宗濂
第17章 真空冷冻干燥	徐成海	曹崇文
第18章 微波和高温干燥	李占勇 何士安	潘永康
第19章 红外热辐射干燥	褚治德	曹崇文
第20章 冲击干燥、穿透干燥和 冲击穿透干燥	陈国华	潘永康
第21章 对撞流干燥	刘登瀛	潘永康
第22章 过热蒸汽干燥	曹崇文 A.S.Mujumdar	潘永康
第23章 声波场干燥	童景山 T.Kudra	李 楨

第 24 章 接触吸附干燥	童景山 T. Kudra	李 楨
第 25 章 超临界流体干燥	童景山 T. Kudra	王宗濂
第 26 章 其他新型干燥技术	李占勇 王宝和 王喜忠 T. Kudra	潘永康
第 27 章 干燥和造粒	顾芳珍	潘永康

### 第三篇 生产部门的干燥过程

第 28 章 食品干燥	潘永康	曹崇文
第 29 章 谷物干燥	曹崇文	王喜忠
第 30 章 水果和蔬菜干燥	潘永康	曹崇文
第 31 章 茶叶干燥	胡景川	潘永康
第 32 章 中药饮片和药物干燥	褚治德 李 楨	潘永康
第 33 章 乳品干燥	王宗濂 王喜忠	潘永康
第 34 章 生物制品干燥	刘相东 C. Strumillo	潘永康
第 35 章 染料干燥	金裕生	夏诚意
第 36 章 纤维状物料干燥	王宝和 王喜忠	潘永康
第 37 章 纸张和纸浆的干燥	李友森 A. S. Mujumdar	潘永康
第 38 章 木材和木制品的干燥	顾炼百 褚治德	王喜忠
第 39 章 聚合物干燥	李占勇 金裕生 A. S. Mujumdar	潘永康
第 40 章 煤及矿物干燥	邓文仰	王喜忠
第 41 章 涂膜干燥	褚治德	夏诚意

### 第四篇 干燥过程的辅助系统

第 42 章 干燥器的加料及排料装置	蒋年禧	王喜忠
第 43 章 热风干燥器的热风系统及收尘系统	翁颐庆	王喜忠
第 44 章 干燥系统的控制	李庆永 徐卫荣	潘永康
第 45 章 工业干燥器的安全问题	王宝和 王喜忠	翁颐庆
第 46 章 干燥过程中的能源问题	王喜忠	翁颐庆
第 47 章 干燥器的价格估算方法	杨大成	翁颐庆

附录 A 干燥过程物理量的单位制及换算	潘永康
附录 B 参考资料目录(西文:T. Kudra; 俄文:曹崇文; 中、日文:王喜忠)	
附录 C 主题词索引	潘永康

# 绪 论

## 1 中国干燥技术发展概况

干燥是将物料去除水分或其他挥发成分的操作，涉及面很广。随着生产的发展，对干燥技术、干燥装备的需求有了更高的要求。由于原有工业基础较薄弱，产量小，大多数用电烘箱、蒸汽烘箱等干燥物料。为适应工农业生产的需要，开展了对喷雾、气流、流化等干燥装置的开发以及对农产品、食品、药品、生物制品等的干燥过程及装置的研究开发工作。

基于对干燥理论、技术、装置关心，在干燥领域迄今已举行了不少有关学术会议。早在1965年6月上海市化学化工学会就组织了华东六省一市干燥-过滤技术会议。1975年5月在南京原化学工业部组织并召开了全国第一届干燥技术会议；1986年10月，中国化学学会组织了全国第二届干燥技术会议，迄今已5届。1994年10月辽宁省干燥技术学会于沈阳组织了“94’全国干燥技术研讨会”。1996年4月国家自然科学基金委员会材料与工程科学部于北京召开了“96’干燥技术研讨会”。还有“全国冷冻干燥会”、“全国农副产品干燥学术会”、“木材干燥技术交流会”以及中国农机学会收获加工机械专业委员会和全国农产品干燥情报网也组织过几次干燥技术学术讨论会等等。这些会议都集中交流研讨了有关干燥问题。另外，化学工程、化工机械、工程热力学、红外线加热技术等专业会议，也都有不少干燥方面的论文发表。我国学者除了在国内会议刊物上发表论文以外，在国际干燥会议上也有不少论文。

在我国从事干燥理论研究、开发新型干燥设备和相关装置的大专院校、科研院所也有很多，不少单位都有比较稳定的队伍和明确的发展方向，是发展干燥理论及技术的力量所在。

其中大专院校有：大连理工大学、浙江大学、天津大学、清华大学、北京农业大学、天津轻工业学院、四川联合大学、北京化工大学、东北大学、东北农业大学、南京化工大学、同济大学、华东理工大学、上海华东工业大学、沈阳农学院、华南农业大学、哈尔滨建筑大学、福州大学、北京林业大学、贵州农学院、华中理工大学、山东工程学院、江苏理工大学、浙江工业大学、重庆大学、西安公路交通大学、河北工学院、内蒙古大学、黄石高等专科学校、华东石油学院等等。

科研院所：中国科学院工程热物理研究所、上海化工研究院、上海医药工业研究院、中国林业科学研究院南京林产化工研究所、中国农机研究院、中国农业工程研究设计院、沈阳化工研究院、北京化工研究院、广东省农机研究所、哈尔滨市农机研究所、浙江造纸研究所、重庆市化工研究院、冶金部热能研究所、上海市能源研究所、沈阳粮油食品科学研究所、原化工部干燥技术设备开发中心、山东省干燥技术中心等。

有关企业从事干燥装置开发研究的也很多。如铁岭精工(集团)股份有限公司、华元化工技术工程公司、沈阳市中田干燥设备公司、江苏星轮高速机电设备制造公司等等。

所开发研究的内容陆续有气流干燥、沸腾干燥、喷雾干燥及雾化装置、分离装置、振动流化床、惰性粒子流化床、强化干燥(国内开发的带搅拌流化干燥)、旋转闪蒸干燥 (Spin - flash), 制药用的无菌喷干及迴转真空干燥、混流干燥、粉碎干燥联合机、胶塞灭菌 - 干燥联合机、热泵干燥、冷冻干燥、多层流化床、多层振动流化床、多室流化床、离心流化床、螺旋板干燥、流化床喷雾造粒干燥、木材真空干燥、搅拌干燥、红外干燥、远红外干燥、静电干燥、微波干燥、LiCl 转轮除湿干燥、对撞流干燥、多段换向穿流干燥、北大荒横流式谷物干燥机、立式及卧式盘式干燥机、桨叶或螺旋叶干燥机等。

在应用基础方面也结合或联系物料的干燥过程, 开展了上述各类干燥方式中不同物料的关键参数的研究, 如流化速度、雾化程度、干燥强度与各项操作指标的关系、能量的节约等; 也对若干种干燥进行了数学模拟、离散理论、优化方法、专家系统、计算机调控、物料(如粮食、蔬菜水果等)在干燥过程中有关指标的变化, 以及固体干燥过程中多孔介质的传热传质研究等。

所研究干燥的物料有: 化工、医药产品、中药材、大米、玉米、种子、牧草、石化、林化产品、渔产品、食用菌、人参、木材、羊毛、皮革、禽肉、菌丝体、菱镁球矿、白炭黑、粘土制品、特陶、豆粉、山楂、速溶茶、植物蛋白、酒糟等等, 不胜枚举。

辅助设备的研究开发, 有各种热风炉、高温热管、旋风分离器等等。二种不同干燥方法的联用如气流 - 沸腾、喷雾 - 流化等也都有报道。

干燥技术随着有关产业的发展有着比较大的进展, 因为干燥涉及不同品类产品的品质、性状、干燥前后的不同物态。而干燥的能耗在工业发达国家要超过能耗总量的 10%, 因此干燥过程的节能是涉及面广的长远课题。同时大量的干燥需求也必然促使干燥装置制造业的发展。其中机电一体化、加工制造标准化、调控水平等也都是体现干燥装置水平的内涵。由此认为我国目前干燥技术的发展方兴未艾。随着干燥有关产品的发展, 对其品质的提高、能量单耗的降低、操作的可靠程度, 都会对干燥技术及装置提出更高的要求。对于干燥装置制造业来说, 满足上述要求, 乃至逐步形成具有当代世界水平或领先水平的产品及企业也是必要的。若干干燥工作开展不多的产品, 如造纸、食品、矿冶等方面的加强以及干燥基础理论研究, 已有机种及新机种的开发, 机电一体化程度的提高、制造标准的接轨等都将是今后的工作内容。

## 2 干燥技术的革新和未来趋势

### 2.1 前言

干燥是最古老的单元操作之一，然而它也是最复杂、人们了解最浅的技术，在干燥技术的许多方面存在着“知其然而不知其所以然”的状况，因此大多数干燥器的设计仍然依赖于小规模试验及实际操作经验。有些干燥工艺已趋成熟，也就是说进一步的研究和发展已不能在投资上获得满意的回报。近 10 多年来，有许多新型干燥器投入市场(虽然它们主要是在原有的结构基础上作了某些改进)；另外，一些新的构想正处于实验研究阶段。随着全球经济、技术的竞争日趋激烈，人们对有效利用能源、实现对环境良好的操作以及提高产品质量的意识在逐步增强。干燥技术的发展，必须通过革新的方式，进一步地进行开拓性研究，以迎接时代的挑战。

作为一种史前的原始操作，干燥通常不与革新相联系，现在需要干燥的产品都在使用现有的干燥技术(某些技术实际上已有几百年的历史)，所以对一般使用者而言，通常不认为有必要对干燥和脱水进行革新以及进一步研究和发展。这反映干燥所能吸引的研究和发展资金还处于相对低的水平，正好与生物分离过程的状况相反——虽然在经济上，生物分离过程的规模要比干燥低一个数量级。

本节将首先介绍革新的定义、革新的类型、干燥革新的必要性以及一些新型干燥技术的共同特点。最后，简要评述某些新型技术在最近一二十年的发展情况，并对干燥技术未来的发展趋势谈谈自己的看法。这里应明白“新颖性”本身并不足以表明“新技术”；新技术与现代技术相比必须技术可行、成本合算，这是很重要的。

### 2.2 革新的定义及类型

Howard 和 Guile (1992)将“革新”(innovation)定义为“一种始于发明而先于发明形成的过程，并导致新产品、新工艺或新的服务进入市场”。

为了打入市场，革新必须有经济效益。什么是刺激革新的因素呢？对干燥技术而言，我提出下面几项；其中的一项或几项将导致对现有产品、操作过程进行革新，最终将取而代之。

- 至今尚未生产或发明的新产品或过程。
- 较现代技术有更高的产量。
- 在质量与质量控制方面比现有的更好。
- 减少对环境的污染。
- 操作更安全。
- 效率更高(导致成本降低)。
- 成本降低(总体上)。

对于产品/过程在短期内可见效的行业，革新是至关重要的，例如：半衰期短的产品/过程(少于一年，如电子和计算机产品)。对于半衰期长的产品/过程(例如 10~20 年，最为典型的例子为干燥技术)，革新来得慢且不易被接受。而且，成熟的技术(如干燥及许多单元操作)一般有很长的生存期。

革新的运用依赖于它所处的阶段，即

- 最初，价值来源于迅速商品化。
- 随后，价值来源于改进产品、过程和服务。
- 最终达到成熟期，价值来源于终止和着手更新技术。

应注意，如果技术已达到其使用期限，为了将来的利益而中止目前仍具有存在价值的工艺是合理的。这个原则适用于所有的技术。

关于革新过程基础方面的研究已经有了许多报道。革新过程的模式可假定为线性发展过程，即 (1) 发现自然规律；(2) 发明；(3) 开发可投放于市场的产品或过程。但是，众所周知，一些真正非凡的技术革命在其相应的基础物理或化学推演论证之前就已经出台了。我相信真正的革新过程是非线性的，甚至是无章可循的尝试或“偶获至宝”式的过程。因此，虽然一个人可以试图鼓励创造或努力排除创造过程中的障碍，但从逻辑意义上讲，教诲别人如何进行革新是困难的。

那些被归为革新的事物可以表现为不同的特性。下面一般性地列出“革新”所具有的特征(Howard 和 Guile, 1992)。

- (1) 革新建立一个全新的产品种类。
- (2) 革新是某种已存在的产品种类在市场上的第一种型式。
- (3) 革新反应了现存技术的显著进步。
- (4) 革新是现存产品/过程的一次适度的发展。

革新可以激发技术的变革或改进。从我们的经验可知后者更为常见，它往往建立在可行的设计基础上、有较短的孕育期、在短时间内可为市场所接受，是典型的“市场牵引”式产物——市场需要的结果，即存在对这些产品或过程的需要。这些通常是由革新过程的线性模型所得出(对主体结构的一个巧妙的修改就是一例)；另一方面，彻底变革比较少见，它需较长的孕育期，可能会有较大的市场阻力，通常是“技术推动”的结果，即某项新技术的开发促进新产品或过程的设计，为此必须开拓市场。这极具风险，往往还需要大量研究和发展资金，并且需要不懈努力和拓展市场。

自然有人会问，是否有可能预言甚至估计市场需求新技术的最佳时机。Foster 著名的“S”曲线(Foster, 1986; 图 1)描述了产品或过程的性能指标与所投入技术发展的资源之间的关系，它对于准确完成上述预测是一个有用的工具。当某种技术成熟了(或在某种意义上是“饱和”了)，进一步投入研究与发展资源也不会提高此项技术的完美程度。于是，便需要新的替代技术——一种真正全新的技术，而不是对主体设计进一步改进。一旦挖掘出其全部潜能，将产生高于目前状况的一个新水平。正如 Foster 用世界上的真实例子所证明的那样，当一种技术为另一种技术所取代时，性能与投入资源曲线成对出现。他指出 S 型曲线总是成对的；当某一种技术被取代且在工业生产上从一个 S 型曲线跳到另一个时，它们表

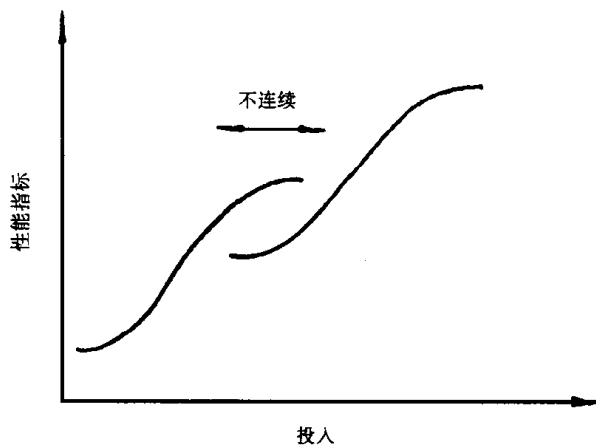


图 1 Foster 的“S”型曲线

系，它对于准确完成上述预测是一个有用的工具。当某种技术成熟了(或在某种意义上是“饱和”了)，进一步投入研究与发展资源也不会提高此项技术的完美程度。于是，便需要新的替代技术——一种真正全新的技术，而不是对主体设计进一步改进。一旦挖掘出其全部潜能，将产生高于目前状况的一个新水平。正如 Foster 用世界上的真实例子所证明的那样，当一种技术为另一种技术所取代时，性能与投入资源曲线成对出现。他指出 S 型曲线总是成对的；当某一种技术被取代且在工业生产上从一个 S 型曲线跳到另一个时，它们表

现出不连续性。

表1列出了一些经过“技术推动”与“市场牵引”而发展的新的干燥技术的例子。某些情况下，对于此两种方式进行明确的划分是不可能的，因为“市场牵引”所引起的发展需要“技术推动”方能成功。

表1 通过“技术推动”和“市场牵引”而发展起来的新干燥技术实例

技术推动*	市场牵引**
○ 微波/高频/感应/超声波干燥	○ 过热蒸汽干燥器——提高能效、提高产品质量、减少环境影响、更安全等
○ 脉冲燃烧干燥——脉冲燃烧首先用于推进装置,随后应用于燃烧	○ 脉冲干燥/纸的冷凝带式干燥(同样需要技术推动)
○ 振动床干燥器——起初用于颗粒物料的输送	○ 喷雾-流化床组合干燥——可提高喷雾干燥的经济性
○ 对撞流(喷嘴相对设置)——最早应用于混合、燃烧	○ 卡文-格林费尔德过程(干燥污泥)
	○ 间断干燥(提高效率)

\* 该技术的发展是为了其他方面的应用,但后来运用于干燥。

\*\* 该技术的发展是为了迎合目前和未来的市场要求。

在指出特殊的新型干燥技术之前，通过与传统的(甚至是老的)干燥器进行比较可以了解新型干燥器的某些共性。

应指出这种分类是以时间来划分的，不免有人为的偏见。“流态化”在50年前是一种革新，而它现在已是常规技术了。另一方面对基本定则(主体结构)进行不断的更改使它能更有效地完成特定的任务或消除其内在的局限性。表2列出了区分革新的(或新的)干燥器与传统的干燥器的关键特征。

表2 传统干燥器与新型干燥器的一些特性比较

传统干燥器	新型干燥器
○ 稳定的热能输入	○ 能量间歇输入
○ 恒定的气流	○ 变化的气流
○ 热单一输入模式	○ 热组合式输入模式
○ 单一类型的干燥器——单级	○ 多级(每级可以是不同干燥器类型)
○ 空气/燃气作为干燥介质	○ 过热蒸汽作为干燥介质
○ 常压操作	○ 低压或高压操作

为了进一步说明这个问题，表3列出了革新后的喷动床干燥器与1956年第一次报道的传统轴对称喷动床干燥器在干燥小麦时的不同特征。

表3 传统的与革新的喷动床干燥器的比较

传统喷动床	新型喷动床
○ 气体喷动	○ 机械喷动(开式螺旋输送机)
○ 干燥颗粒物料	○ 干燥浆料(使用惰性载体)
○ 轴对称	○ 二维
○ 整个床连续喷动	○ 间歇喷动
○ 固定喷动	○ 移动喷动

### 2.3 干燥技术的革新概况

在这样短短的一篇文章中不可能包括所有的内容,必须有所选择,这里的选择是任意的,其目的只是为了说明问题。因为必须以干燥系统来考虑(包括干燥前处理,如脱水)。我们将把一些脱水新技术也包括在文中。

由于篇幅所限,本文不能给出所有干燥器的示意图,详细的内容可查阅本文所附参考文献及本书的相关章节。这里着重于评论革新而不在于描述干燥器本身。

**2.3.1 机械脱水** 为了减少干燥器的热负荷,减少湿物料中的水分含量是很重要的。通常都是利用真空或压力过滤器、渗析器、离心机等。对于胶体状物料,例如,来自各种加工过程的废液、食品加工的废物、煤矿或油砂的残渣,因为其中含有小颗粒( $<5\mu\text{m}$ ),所以对其进行脱水处理很困难。近年来,下列新过程的发展很成功,是“技术推动”和“市场牵引”的结果。

- 电渗析脱水(EOD)——直流电场运用于胶体悬浮液的脱水。
- 间断式电渗析脱水——通过使电极短路以实现周期性断电。这个过程理论上较连续式操作有效。
- 真空过滤与电渗析脱水的联合使用——可连续或间断性操作。
- 组合场能脱水——电渗析脱水与超声场组合。
- 辅以振动的微滤——优于错流过滤。

虽然上面的一些新想法已成功地付诸于商业化应用,但它们仍有进一步改进和开拓的潜力。其中一些过程可与间歇干燥操作相结合,类似于传统的 Nutsch 过滤器或组合过滤-干燥器。过滤-干燥器是一个间歇操作单元,它避免了物料从一个单元传送到另一个单元,因此避免了可能造成的污染,对于医药工业,尤其具有引力。新型脱水技术可与干燥结合,使之产生总体效益。

**2.3.2 流化床干燥器(FBD)** 流化床干燥器因其对可流化的颗粒的干燥具有许多优良特性而在近30年中十分流行。表4概括了流化床干燥器的许多型式,目前它们被用于干燥大量不同物料,不仅仅是颗粒(最初的想法),而且有浆料、膏糊状物料、连续网状和片状物料。不能自身达到流化的大块物料可以在惰性小颗粒流化床中进行干燥。表4显示了流化床干燥器设计、操作型式和流化床技术应用的多样性。表中展示的多种流化床干燥器型式已不同程度地应用于工业干燥中。

一次只让床层的某些部分流化(如所谓的脉冲流化床),可以节约能耗。在间歇式流化床干燥器中可通过调节热量输入来保持床层颗粒物料温度恒定;此控制方法不但节能,而且还可提高热敏性产品的质量。建立在模糊逻辑控制基础上的此类干燥器已经进入市场。

**2.3.3 喷动床干燥器(SBD)** 这种干燥器实质上是流化床的改型,适宜于干燥属于 Geldart



分类“D”组的大颗粒物料(如谷粒、豆类等),它们的特点是具有内部循环运动和在顶层自由表面的喷动(或称喷泉)。颗粒的运动较在流化床中的混乱(或随机)运动更有规律。表4给出了各种类型的喷动床干燥器,它们不仅可以干燥大颗粒物料,而且可以干燥浆状和糊状物料。利用内部通气管、二维设计或一种机械喷动作用,有可能消除或降低传统的轴对称喷动床干燥器的一些弱点。这些很简单的装置目前尚未被完全开发利用。值得注意的是,对于主要由内部热质传递控制的颗粒(如谷粒)采用间歇喷动或对喷动的热空气进行间歇加热的方法可以显著节省能量,并提高产品质量。这一结果已在旋转喷管(移动)式喷动床中得以实现(Jumah, Mujumdar 和 Raghavan, 1996)。

2.3.4 冲击流干燥器(IJ) 冲击流干燥器是对流热质传递到表面的最好结构。为达到最优设计,选择正确的喷嘴几何尺寸和操作条件是很重要的。冲击流干燥器可以用于纸、胶片、纺织品、涂层、薄板等广泛的工业领域——有时可在冲击喷嘴组件之间联结红外热源。在某些情况下(如干燥纺织品、双面铜版纸、纸板等),织物由射流支持,织物的两表面受到热气流撞击以达到无接触干燥。通过对输送带上料层的假液化,冲击流也可以用于干燥颗粒或碎片物料。

为了进一步提高干燥速度,寻找可提高传统冲击流热传递速度的方法是很重要的。一种方法是在管状喷嘴上附一个套环,使喷射出的气流产生振荡和旋流,即所谓的SOJIN(自振荡式喷嘴,由得克萨斯农业和机械大学干燥研究中心P.H. Page教授研制),它能显著提高传热速率。虽然这是“技术推动”导致的真正革新成果,但迄今为止在干燥方面的应用还未见报道。

2.3.5 纸的干燥 普通的造纸过程需要大量的脱水。多级烘缸的干燥速度一般为 $10 \sim 25 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ ,现代杨克式干燥器可高至 $150 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ 。象新闻纸机,需要直径为1.6m的60个蒸汽加热烘缸,且蒸发1kg水需要1.5kg的蒸汽,因此其占用空间及投资费用相当大。这就需要开发新型高强度干燥系统。但在需要一种改进的纸干燥技术以取代有一个世纪之久的多级烘缸干燥器时,却没有发现适当的替代干燥器。

表4 流化床干燥器分类

分类原则	干燥器类型(应用型)
操作压力	低压(如干燥热敏性物料);近常压(大多数情况如此);高压(0.5MPa,蒸汽干燥)
颗粒流化状态	良好混合;活塞流;混合型(活塞流之后发生良好混合)
操作方式	间歇式或连续式
气流供给形式	连续或脉冲式
气体温度	恒定或是时间的函数
供热方式	对流或对流/传导;连续式或脉冲
流化作用形式	只通过气流(气动力);向下喷射的流体(射流区);辅以机械力(如:振动或搅拌,用于干燥粘性或多组分固体颗粒)
被干燥物料的类型	颗粒 } 膏糊状物料 } (喷洒到惰性粒子上);连续网状物;大小颗粒混合物 浆料,悬浮液 }
流化介质	空气/烟道气/燃烧的直接产物;过热蒸汽(或二次蒸汽)
其他类型	喷动床;离心流化床;振动床(有几种型式);搅拌流化床;内部输送带(Yamato, 1996)
级数	单级;多级
操作过程	干燥;循环;冷却;附聚;涂层;分级;混合