



城市水资源与水环境国家重点实验室优秀成果

环境微波化学技术

王 鹏 郑 彤 张广山 编著



科学出版社

城市水资源与水环境国家重点实验室优秀成果

环境微波化学技术

王 鹏 郑 彤 张广山 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了微波化学的基本原理、技术设备及其在环境科学与工程中的应用。全书分为12章,着重介绍了微波性质、微波技术、微波化学等基本知识和基本概念,微波强化水处理技术的基本原理、工艺技术和应用范例,微波强化消毒和微波-紫外联合消毒技术,微波辅助提取技术和微波促进有机合成技术,微波辐射诱变育种技术等环境微波化学技术;并探讨了微波的生物效应与安全防护等问题。

本书适合从事微波化学与技术研究的学者和相关领域的教师、研究生阅读,也可以用作环境科学与工程、化学、化工等相关专业高等院校师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

环境微波化学技术/王鹏,郑彤,张广山编著. —北京:科学出版社,2014.9
(城市水资源与水环境国家重点实验室优秀成果)

ISBN 978-7-03-041774-9

I. ①环… II. ①王…②郑…③张… III. ①微波技术-应用-环境化学
IV. ①X13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 202822 号

责任编辑:朱 丽 杨新改 / 责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014年9月第一次印刷 印张:21

字数:430 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《城市水资源与水环境国家重点实验室优秀成果》

编 委 会

顾 问：李圭白 张 杰

主 任：任南琪

副主任：马 放 冯玉杰 陈忠林

委 员（按姓氏汉语拼音顺序排列）：

崔福义 韩洪军 李一凡 马 军

南 军 祁佩时 汤 洁 田 禹

王 鹏 尤 宏

上善若水,天道酬勤

——《城市水资源与水环境国家重点实验室优秀成果》丛书序

随着我国城市化进程的加快,尤其是当前我国的社会经济进入快速发展轨道,我国面临着资源需求增加、能耗水平高、水资源缺乏以及水生态环境改善缓慢等问题,城市水环境存在着巨大的、难以预测的风险,严重制约着城市化进程的发展及和谐社会的建设,也严重影响着我国居民用水安全及健康。城市水系统相关理论和保障技术也越来越受到高度重视,是我国经济社会可持续发展的重要方面和保障之一。

哈尔滨工业大学环境科学与工程学科和市政学科的发展最早可以追溯到 20 世纪 50 年代建立的卫生工程专业,在半个多世纪的发展过程中,该方向一直处于学科发展的前沿,为我国在该领域的发展做出了重要贡献,并为国家培养了大批优秀人才。进入新世纪,我国环境与生态问题面临着前所未有的挑战,经济发展和生态环境保护之间的矛盾与冲突也越来越大,全球环境问题以及由此带来的一些经济摩擦也对我国环境生态保护及经济发展提出了新的要求,传统的污染治理模式亟需改革与突破,以适应循环经济、低碳、可持续发展等国际化发展主题。在周定、李圭白、王宝贞、张杰等老一代专家的指导下,在新一代中青年学者共同努力下,近十年来哈尔滨工业大学相关学科发展迅速,科学研究水平取得了重要进展。于 2007 年开始建设的城市水资源与水环境国家重点实验室正是在这一背景下发展起来的一个新的重要的国家级研究平台。

本实验室紧密结合国家战略需求和经济社会发展需要,围绕城市水系统中的关键科学与技术问题,以“格物穷理,知行合一,海纳百川”的实验室文化为基础,在应用基础理论研究方面取得了一批重要研究成果,为我国污染控制与节能减排做出了重要贡献。为总结实验室在过去十几年取得的研究成果,实验室整理出版了这套《城市水资源与水环境国家重点实验室优秀成果》丛书,丛书从多尺度阐述了可持续发展的城市水资源与水环境理论与技术。丛书汇集了城市水资源与水环境国家重点实验室在城市水生态安全、城市水水质保障、城市水健康循环、多元生物质能源化与资源化、城市水环境系统节能及优化理论与技术等方面的研究成果。丛书系统总结了实验室人员在环境化学、环境生物学等理论方面的一些重要研究进展和新的发现,以及实验室研究人员在水与废水处理及保障技术方面的成果、工程实践,还涵盖了实验室近年来在新兴污染物检测与去除、环境风险评价与预警等方面的研究进展与实用技术。

本套丛书在策划和出版过程中,得到了实验室许多前辈的指导和帮助,以及实验室成员的大力支持,也得到了科学出版社等出版机构的大力支持,在此一并表示感谢。

“半世纪风雨兼程,六十载春花秋实”。本套丛书的出版,既是对以往实验室成果的总结,也是对未来实验室发展的鞭策。实验室将秉承“以人为本,自主创新,重点跨越,引领未来”的方针,继续为我国城市水系统可持续发展做出应有的贡献。



2011 年 10 月

前 言

微波民用技术在 20 世纪 80 年代得到迅猛的发展,在化学化工各研究领域中的应用取得了令人鼓舞的成功,研究成果几乎覆盖了化学的各个学科。作为一门新兴的交叉学科——微波化学与技术,在广泛的实际应用中显示出强大的生命力。近年来,微波技术已被引入到环境科学与工程学科领域,在污染物治理工程、环境监测与分析、清洁生产与绿色工艺等研究方向上的新工艺、新方法、新技术开发方面取得了许多成功的范例,并获得了一定程度的技术创新和突破。新兴的环境微波化学技术正在形成,并日臻完善。由于环境微波化学技术是一个新兴的多学科交叉的综合领域,相关的理论基础比较复杂,所用的研究方法比较分散,要深入理解和掌握这些技术具有一定的难度。目前系统介绍这方面的书籍不多,特别是适合大专院校学生学习理解的关于环境微波化学技术的参考书和教科书就更为缺少,希望本书的出版能抛砖引玉,为学科发展起到一些基础性作用。

本书是在国家自然科学基金(50278023、50678045、50778053),教育部高等学校博士点专项科研基金(20040213027),黑龙江省自然科学基金(E0211)和哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金(HITMD2000-28)等项目研究的基础上,结合哈尔滨工业大学“环境化学前沿”、“绿色化学与技术”等课程有关内容及作者近年来从事该领域研究的实践和体会,并参考了大量国内外相关文献编写而成。

本书比较系统地介绍了环境微波化学技术的基本原理、技术设备及其在环境科学与工程中的应用。全书分为 12 章。第 1 章介绍微波性质、微波技术、微波化学等基本知识和基本概念;第 2~5 章分别从微波诱导氧化水处理技术、微波强化氧化还原水处理技术、微波强化 Fenton 水处理技术、微波辅助光催化氧化水处理技术等四个方面阐述了微波技术在环境水处理中应用的基本原理、工艺技术和应用范例;第 6 章介绍了微波强化消毒和微波-紫外联合消毒技术;第 7、8 章分别介绍了微波辅助提取技术和微波促进有机合成技术;第 9、10 章介绍了微波合成水处理药剂技术和微波辅助合成环境友好材料——聚乳酸技术;第 11 章介绍了微波辐射诱变育种技术;第 12 章探讨了微波的生物效应与安全防护等问题。在本书的最后列出了相关参考文献,以供读者深入学习时参考。全书自成体系,力求反映环境微波化学技术研究的前沿水平,突出学科交叉特色,注重技术创新和相关基础理论探讨,并适当介绍了作者及其所指导的研究生在该领域的研究工作。

参与本书撰写工作的有很多是作者的同事和学生。他们参加了本书相关文献的检索、收集和整理工作,并提供了相关研究数据、参与部分章节的撰写,他们是王

楠楠(第4章),潘维倩(第5章),张悦(第6章),张玉玲和吴明松(第9章),曹海雷(第10章),徐伟(第11章),另外,张国宇、张英民、舒静、毕晓依、李楠、廖文超、史书杰、杨禹、王虹、刘青松、龙明策、陈传品、张科、姜思鹏、马慧俊、洪光、姜虹、田艳、石将军、韩宁、雷海芬、张兴、屠思思、袁春燕、米小娟、苗肖君、张洁等也参与了本书的数据提供及大量的研究撰写相关工作,郑彤和张广山参加了本书的统稿、审核和部分章节的撰写。可以说,本书是我们研究小组师生共同努力的结晶。

在撰写此书时作者参考了大量书籍和文献,本书的出版与这些作者的辛勤工作不可分割,在此致谢。科学出版社朱丽编辑对于本书的出版提供了诸多建议和帮助,在此表示衷心感谢。

由于作者水平所限,书中的错误、疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2014年5月于哈尔滨

目 录

丛书序

前言

第 1 章 微波与微波化学技术	1
1.1 微波的性质	1
1.1.1 微波的一般性质	1
1.1.2 微波与材料的相互作用	3
1.1.3 微波的加热作用	5
1.2 微波的产生与设备装置	7
1.2.1 微波磁控管的基本结构与参数	7
1.2.2 磁控管的工作原理	11
1.2.3 微波化学反应器	12
1.2.4 体系温度和压力的测量	15
1.2.5 工业微波设备选型	19
1.3 微波化学与技术	20
1.3.1 微波化学与技术的发展历程	20
1.3.2 影响微波化学反应速率的因素及规律	21
1.3.3 微波合成化学反应作用机制	26
1.3.4 微波等离子体化学与技术	30
1.3.5 微波化学技术目前存在的问题及研发趋势	34
第 2 章 微波诱导氧化水处理技术	38
2.1 微波诱导催化氧化反应原理	38
2.2 微波诱导氧化水处理技术中常用催化剂的制备方法	40
2.2.1 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2/\text{ACF}$ 催化剂的制备	40
2.2.2 $\text{MnO}_2/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 催化剂的制备	40
2.3 微波诱导氧化工艺条件对污染物处理效果的影响	41
2.4 微波诱导氧化在污染治理中的应用	42
2.5 微波诱导氧化处理水中污染物的表观反应动力学和机制	43
2.5.1 微波诱导氧化水处理工艺的表观反应动力学	43
2.5.2 微波诱导氧化水处理工艺反应机制	44
2.5.3 催化剂在微波场中的温升行为	46

第 3 章 微波强化氧化还原水处理技术	55
3.1 微波强化 ClO_2 催化氧化技术研究与应用	55
3.1.1 微波强化 ClO_2 水处理技术原理	55
3.1.2 常用催化剂的制备方法与性能	60
3.1.3 微波强化 ClO_2 氧化在污染治理中的应用	83
3.2 微波强化还原水处理技术	92
3.2.1 微波强化还原亚硝酸盐技术原理	92
3.2.2 微波强化还原亚硝酸盐废水工艺技术研究	93
3.2.3 微波强化还原在污染治理中的应用	96
第 4 章 微波强化 Fenton 水处理技术	100
4.1 微波强化 Fenton 水处理技术	100
4.1.1 微波强化 Fenton 水处理技术基本原理	100
4.1.2 微波强化 Fenton 氧化工艺技术研究	102
4.1.3 微波强化 Fenton 混凝水处理技术	113
4.2 微波强化类 Fenton 水处理技术	127
4.2.1 微波强化类 Fenton 水处理技术原理	127
4.2.2 常用的固态催化剂的制备与性能	130
4.2.3 微波强化类 Fenton 氧化工艺技术研究	134
4.2.4 微波强化类 Fenton 氧化在污染治理中的应用	136
第 5 章 微波辅助光催化氧化水处理技术	137
5.1 微波辅助光催化氧化的基本原理	137
5.1.1 半导体光催化基本原理	137
5.1.2 微波辅助光催化基本原理	139
5.2 微波辅助光催化氧化反应装置	141
5.2.1 微波无极紫外光源	141
5.2.2 微波-紫外联合反应器	142
5.3 微波辅助光催化氧化用催化剂	145
5.3.1 催化剂的制备方法	145
5.3.2 催化剂及其性能	146
5.4 微波辅助光催化氧化技术在水处理中的应用	148
5.4.1 微波辅助光催化反应的影响因素	148
5.4.2 微波辅助光催化氧化技术的应用	150
第 6 章 微波强化消毒技术	153
6.1 微波杀菌与消毒技术原理与特点	153
6.1.1 微波杀菌与消毒技术的特点	153

6.1.2	微波杀菌与消毒技术的机理	154
6.1.3	影响微波杀菌与消毒效果的因素	156
6.2	微波杀菌和消毒设备与工艺	157
6.2.1	间歇式微波杀菌工艺	157
6.2.2	连续式微波杀菌工艺	158
6.2.3	多次快速辐照和冷却微波杀菌工艺	159
6.2.4	脉冲式微波杀菌工艺	160
6.3	微波杀菌与消毒技术应用实例	161
6.3.1	食品中的微波杀菌与消毒	161
6.3.2	医药中的微波杀菌与消毒	164
6.3.3	环境领域的微波杀菌与消毒	165
6.4	微波-紫外联合消毒技术	168
6.4.1	微波-紫外联合消毒技术原理与特点	168
6.4.2	微波-紫外联合消毒技术研究现状	169
第7章	微波辅助提取技术	170
7.1	微波辅助提取的原理和特点	170
7.1.1	微波辅助提取的基本原理	170
7.1.2	微波辅助提取的特点	171
7.2	微波辅助提取工艺参数与技术	173
7.2.1	微波辅助提取工艺及参数选择	173
7.2.2	微波辅助提取装置与设备	173
7.2.3	微波辅助微量提取技术	175
7.3	微波辅助提取技术的应用	177
7.3.1	有机污染物的微波辅助提取技术	177
7.3.2	天然化合物及生物活性成分的微波辅助提取	182
7.4	微波辅助提取制备壳聚糖技术	185
7.4.1	微波辅助提取制备壳聚糖工艺路线	186
7.4.2	微波辅助提取制备壳聚糖的工艺条件	187
7.4.3	微波辅助提取制备壳聚糖的特点	190
第8章	微波促进有机合成技术	191
8.1	微波加速化学反应的原理	191
8.2	微波促进有机合成的装置与技术	193
8.2.1	微波促进有机合成装置与设备	193
8.2.2	微波促进有机合成反应技术	194
8.3	微波促进有机合成技术的应用	203

8.3.1	微波促进有机合成技术在液相反应中的应用	203
8.3.2	微波促进有机合成技术在非溶剂干反应中的应用	206
8.3.3	微波促进有机合成技术在有机化学其他领域中的应用	209
第9章	微波合成水处理药剂技术	211
9.1	微波合成聚羧酸类阻垢缓蚀剂技术	211
9.1.1	微波合成聚天冬氨酸技术	212
9.1.2	微波溶剂法合成天冬氨酸-谷氨酸共聚物技术	230
9.1.3	微波溶剂法合成天冬氨酸-赖氨酸共聚物技术	252
9.2	微波辅助合成天然基絮凝剂	256
9.2.1	微波辅助合成淀粉基絮凝剂	256
9.2.2	微波辅助合成壳聚糖基絮凝剂	258
9.2.3	微波辅助合成其他天然基絮凝剂	262
第10章	微波辅助合成环境友好材料——聚乳酸	264
10.1	聚乳酸的制备方法及其研究现状	264
10.2	微波辅助合成聚乳酸化学反应装置	266
10.3	微波辅助开环聚合法制备聚乳酸	268
10.3.1	微波辅助制备聚乳酸中间体丙交酯	268
10.3.2	微波辅助开环聚合法制备聚乳酸	269
10.4	微波辅助熔融缩聚法制备聚乳酸	273
10.4.1	聚乳酸制备方法及其过程	274
10.4.2	微波化学反应装置与家用微波炉中乳酸熔融缩聚比较	274
10.4.3	微波的作用	275
10.5	微波辅助熔融缩聚反应机理及动力学	277
10.5.1	实验方法	277
10.5.2	乳酸熔融缩聚反应动力学方程的建立	277
10.5.3	辅助加热介质对微波辅助乳酸熔融缩聚反应的影响	279
第11章	微波辐射诱变育种技术	280
11.1	微波辐射诱变育种原理及其研究现状	280
11.1.1	微波辐射的生物学效应	280
11.1.2	微波辐射诱变育种原理	282
11.1.3	微波辐射在农作物育种方面的应用	283
11.1.4	微波辐射在微生物育种方面的应用	285
11.2	微波辐射诱变微生物——乳酸高产菌	286
11.3	微波辐射诱变微生物育种的方法	287
11.3.1	微波辐射诱变微生物育种操作方法	287

11.3.2	平皿中的菌悬液诱变方法	288
11.3.3	试管中的菌悬液诱变方法	288
11.3.4	水循环冷却微波育种装置操作方法	289
11.4	微波辐射诱变育种装置	290
11.5	微波辐射诱变乳酸高产菌的选育	292
11.5.1	突变菌悬液的制备	292
11.5.2	微波辐射条件对突变菌株存活率的影响	292
11.5.3	突变菌的初步筛选	292
11.5.4	高效突变菌的复筛选	293
11.5.5	微波辐射对乳酸菌遗传稳定性的影响	293
11.5.6	微波辐射剂量对乳酸菌的产酸性能的影响	293
11.6	微波诱变乳酸高产菌株的表征	295
11.6.1	诱变高产乳酸菌体形态及生理生化特征	295
11.6.2	诱变乳酸菌遗传物质 DNA 的变化初探	298
第 12 章	微波的生物效应与安全防护	302
12.1	微波的生物效应	303
12.1.1	微波生物效应的作用机制	303
12.1.2	微波的致畸作用	304
12.1.3	微波对人体的影响	304
12.2	微波的安全防护	306
12.2.1	职业辐射防护	306
12.2.2	环境微波防护	307
12.2.3	微波设备泄漏的防护	308
参考文献		311

第 1 章 微波与微波化学技术

当代学科发展出现了空前的分化和综合,在这种分化和综合的过程中,产生了许多新的学科,极大地促进了科学技术的发展和人类社会的进步。微波化学就是电子学与化学交叉和综合的产物,它为微波技术的应用和化学技术的发展开辟了新的广阔空间。

1.1 微波的性质

1.1.1 微波的一般性质

微波是一种频率范围为 0.3~300GHz 的电磁波。微波包括的波长范围没有明确的界限,一般是指分米波、厘米波和毫米波三个波段,也就是波长在1mm~1m左右的电磁波。在电磁波谱中,微波区位于红外线和无线电波频率之间。由于微波的频率很高,所以亦称为超高频电磁波。微波与工业用电和无线电中波广播的频率与波长范围比较如表 1-1 所示。

表 1-1 各系统所用频率与波长范围

项目	频率	波长/m
工业用电	50Hz 或 60Hz	60 000 000 或者 50 000 000
无线电中波广播	300~3000kHz	1000~100
微波	300~300 000MHz	1~0.001

因为微波的应用极为广泛,为了避免相互间的干扰,供工业、科学及医学使用的微波频段(表 1-2)是不同的。目前只有 915MHz 和 2450MHz 被广泛使用,在较高的两个频率段还没有合适的大功率工业设备。

表 1-2 常用的微波频率范围

频率范围/MHz	波段	中心波长/m	常用主频率/MHz	波长/m
890~940	L	0.330	915	0.328
2400~2500	S	0.122	2450	0.122
5725~5875	C	0.052	5800	0.052
22 000~22 250	K	0.014	22 125	0.014

比较表 1-3 中所列举的数据,很明显频率为 2450MHz 的微波光子的能量远不足以断开分子中的共价键,并且也低于布朗运动所需的能量。所以显而易见,微波不能通过电磁波能量的直接吸收来“诱发”化学反应,这与紫外光和可见光的照射形成对比。

表 1-3 辐射类型和键能的比较

辐射类型	频率/MHz	量子能/eV	键类型	量子能/eV
γ 射线	3.0×10^{14}	1.24×10^6	C—C	3.61
X 射线	3.0×10^{13}	1.24×10^5	C=C	6.35
紫外	1.0×10^9	4.1	C—O	3.74
可见光	6.0×10^8	2.5	C=O	7.71
红外光	3.0×10^6	0.012	C—H	4.28
微波	2450	0.0016	O—H	4.80
无线电波	1	4.0×10^{-9}	氢键	0.04~0.44

微波是电磁波,它具有电磁波的诸如反射、透射、干涉、衍射、偏振以及伴随着电磁波进行能量传输等波动特性,这就决定了微波的产生、传输、放大、辐射等问题都不同于普通的无线电、交流电。在微波系统中没有导线式电路,交、直流电的传输特性参数以及电容和电感等概念亦失去了其确切的意义。在微波领域中,通常应用所谓“场”的概念来分析系统内电磁波的结构,并采用功率、频率、阻抗、驻波等作为微波测量的基本量。具体说来有以下几点:①在研究微波问题时,应使用电磁场的概念,许多高频交变电磁场的效应不能忽略。例如,微波的波长和电路的直径尺寸已是同一数量级,位相滞后现象已十分明显,这一点必须加以考虑。②微波传播时是直线传播,遇到金属表面将发生反射,其反射方向符合光的反射规律。③微波的频率很高,因此其辐射效应更为明显,它意味着微波在普通的导线上传输时,伴随着能量不断地向周围空间辐射,波动传输将很快地衰减,所以对传输元器件有特殊要求。④当入射波与反射波相遇叠加时能形成波的干涉现象,其中包括驻波现象。在微波波导或谐振腔中,微波电磁场的驻波分布现象就很常见。在微波设备中,也可利用多种模式的电磁场的分布、叠加来改善总电磁场分布的均匀性。⑤微波能量的空间分布同一般电磁场能量一样,具有空间分布性质。哪里存在电磁场,哪里就存在能量。例如,微波能量传输方向上的空间某点,其电场能量的数值大小与该处空间的电场强度的平方有关,微波电磁场总能量为空间点的电磁场能量的总和。微波电磁波具有两种传送状态:一种是由天线定向向空间传播,与光线一样是直线传播;另一种是由人为设置的导行传输状态,也就是制约电磁波在空心管道中传送,这种空心管道称为波导管,一般是矩形或圆形,由铜或铝等良导体制成。波导管采用的截面尺寸与所用微波的频率有关。在空心波导管中传播的微

波电磁波,是将能量封闭起来传送的。可以远距离传送,能量损失极小。若在波导管中充以非金属物质,造成传输功率损耗,传送的距离就有限。这是由于产生了电磁场和物质的相互作用,已将电磁波的部分能量转变为物质分子的能量,其转换比例与电磁波的频率及该物质的损耗因子有关。从原理上说,可以把引入波导管中封闭传送的电磁波能量全部转变为物质分子的能量。温度的升高是物质分子增加能量的主要标志。电磁波是以光的速度传播的,电磁波透入物质的速度也是与光的传播速度相接近的;而将电磁波的能量转变为物质分子的能量的时间近似是即时的,在微波频段转换时间快于千万分之一秒。这就是微波可构成内外同时快速加热的原理。

1.1.2 微波与材料的相互作用

当微波在传输过程中遇到不同材料时,会产生反射、吸收和穿透现象,见图1-1。这些作用及其程度、效果取决于材料本身的几个主要的固有特性:相对介电常数(ϵ_r)、介质损耗角正切($\tan\delta$,简称介质损耗)、比热容、形状、含水量的大小等。

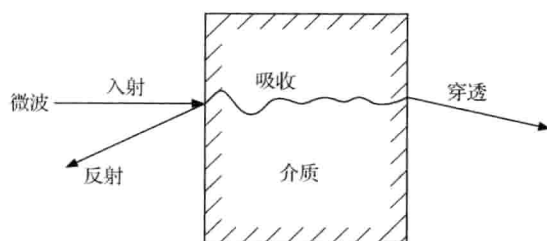


图1-1 微波在介质中的传播

1. 微波与常用材料的相互作用

在微波加工系统中,常用的材料有导体、绝缘体、介质、极性和磁性化合物几类。

1) 导体

一定厚度以上的导体,如铜、银、铝之类的金属,能够反射微波,因此在微波系统中,常利用导体反射微波的这种特殊形式来传播微波能量。例如,微波装置中常用的波导管,就是矩形或圆形的金属管,通常由铝或黄铜制成。它们像光纤传导光线一样,是微波的通路。

2) 绝缘体

在微波系统中,绝缘体有其完全不同于普通电路中的地位。绝缘体可透过微波,并且它吸收的微波功率很小。微波与绝缘体间的相互作用,就像光线和玻璃的

关系一样,玻璃使光线部分地反射,但大部分则透过,只有很少部分被吸收。在微波系统中,根据不同情况使用玻璃、陶瓷、聚四氟乙烯、聚丙烯之类的绝缘体,它们常作为反应器的材料。由于这种“透明”特性,在微波工程中也常用绝缘体材料来防止污物进入某些要害部位,这时的绝缘体就成为有效的屏障。

3) 介质

对微波而言,介质具有吸收、穿透和反射的性能。介质通常就是被加工的物料,它们不同程度地吸收微波的能量,这类物料也称为有耗介质。特别是含污水和含脂肪的物料,它们不同程度地吸收微波能量并将其转变为热量。

4) 极性和磁性化合物

这类材料的一般性能非常像介质材料,也反射、吸收和穿透微波。应当指出,由于微波能量具有能对介质材料和有极性、磁性的材料产生影响的电场和磁场,因此许多极性化合物、磁性材料同介质材料一样,也易于作微波加工材料。

2. 微波对介质的穿透性质

微波进入物料后,物料吸收微波能并将其转变为热能,微波的场强和功率就不断地被衰减,即微波透入物料后将进入衰减状态。不同的物料对微波能的吸收衰减能力是不同的,这随物料的介电特性而定。衰减状态决定着微波对介质的穿透能力。

1) 渗透深度(穿透深度)

当微波进入物料时,物料表面的能量密度是最大的,随着微波向物料内部的渗透,其能量呈指数衰减,同时微波的能量释放给了物料。渗透深度可表示物料对微波能的衰减能力的大小。一般它有以下两种定义。

(1) 渗透深度为微波场强从物料表面衰减至表面值的 $1/e$ (36.8%) 时的距离,用 D 表示, e 为自然对数底值。

$$D = \frac{\lambda_0}{\pi \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta} \quad (1-1)$$

式中, λ_0 ——自由空间波长;

ϵ_r ——相对介电常数;

$\tan \delta$ ——介质损耗角正切。

(2) 微波功率从物料表面衰减到表面值的 $1/2$ 时的距离,即所谓半功率渗透深度 $D_{1/2}$,其数学表达式为

$$D_{1/2} = \frac{3\lambda_0}{8.686\pi \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta} \quad (1-2)$$

渗透深度随波长的增大而深入。换言之,它与频率有关,频率越高波长越短,其穿透力也越弱。在 2415MHz 时,微波对水的渗透深度为 2.3cm,在 915MHz 时