

活性炭-微波 处理典型有机废水

HUOXINGTAN-WEIBO CHULI DIANXING YOUJI FEISHUI

■ 宁平 冯权莉 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

活性炭-微波处理典型有机废水

宁 平 冯叔莉 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2015

内 容 提 要

本书采用活性炭-微波协同处理法对阿莫西林制药废水、淡酒液废水及亚麻沤制废水三种典型有机废水进行了实验研究,介绍了典型有机废水的处理与回收。

本书可供从事环境科学、环境工程、化学与化工、制药工程、冶金工程、食品工程、农业工程及生物工程等领域的工程技术人员、科研人员、教师以及研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

活性炭-微波处理典型有机废水/宁平,冯权莉著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 5

ISBN 978-7-5024-6928-3

I. ①活… II. ①宁… ②冯… III. ①有机废水—活性炭过滤法
IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 100253 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 [www. cnmp. com. cn](http://www.cnmp. com. cn) 电子信箱 yjcbbs@cnmp. com. cn

责任编辑 杨盈园 陈慰萍 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6928-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2015 年 5 月第 1 版, 2015 年 5 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 10 印张; 201 千字; 147 页

38.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言



有机污染物主要来自塑料、合成纤维、化工、造纸、皮革、制药、酒精生产等，不仅在水中存在时间较长，而且危害较大。

自从1928年青霉素被英国细菌学家弗莱明发现以来，抗生素就被作为药物广泛使用。近年来，随着科学技术的快速进步和生活水平的不断提高，人们对抗生素的需求量越来越大。目前，我国既是抗生素的使用大国，也是抗生素生产大国，年产抗生素原料大约21万吨，占世界产量的20%~30%，已经成为世界上主要的抗生素制剂生产国之一。据统计，2000年我国阿莫西林原料药产量为1962t，约占世界总产量25%；2006年达到11095t，占全球产量的近60%；2009~2011年，年产量达到14000余吨，占全球产量的60%以上。

大量抗生素的生产，必然会产生大量的有机废水。这类废水由于残留有部分营养物质而具有高COD、高SS、pH值波动大、温度高、色度和气味重，其间歇生产的特点导致排放水质、水量波动大，如果直接排放这类废水，其内的残留抗生素不仅能诱导病原菌产生耐药性，可能导致产生生存能力极强的能杀死环境中某些微生物或抑制某些微生物生长和繁衍的细菌，而且还会破坏环境中原有的生态平衡，对生态造成极大的威胁。因此，对该类有机废水的治理尤为重要。早在20世纪40年代，欧美日等发达国家和地区就开始着手处理这类有机废水了，但由于受技术条件的限制，一直到目前为止仍主要采用活性污泥

法、生物滤池、厌氧-好氧联用等技术进行处理。这些处理技术不仅构筑物体积庞大、基建费用高、处理成本高，而且处理后的水质还难以达标（《化学合成类制药工业水污染物排放标准》（GB 21904—2008））。因此利用一些新兴的反应设备如微波装置、膜反应器等，研究建设投资少、占地面积小、处理成本低、效果好、管理方便的抗生素制药废水的处理技术，维持水资源可持续利用，实现水资源的良性循环，具有极其重要的社会和经济意义。

酒精作为重要的溶剂和化工原料而广泛应用于化学工业和医药卫生事业，它既是饮料酒工业的基础性原料，也是一种方便且较干净的液体（或固体）燃料。其生产方法，有以植物系物质为原料的发酵法和以石油系物质为原料的化学合成法，目前仍以发酵法为主。

我国发酵法酒精的年产量（商品酒精）在300多万吨左右，另有酿酒厂自产自用的酒精约200多万吨。液态法白酒的发展，大大地促进了我国酒精工业的发展，这是我国酒精工业发展的一大特色。现在，我国是世界上发酵法酒精产量占第三位的酒精生产大国，也是饮用酒产量最大的国家。

酒精工业生产过程中，从密封的发酵罐出来的二氧化碳气体，首先要除去其中夹带的泡沫，然后通过一个内填焦炭的气体洗涤器，从洗涤器顶部的喷淋水中捕集到的淡酒液与在杂醇油分离器产生的淡酒液主要含有乙醇（4%~8%）、少量脂类和酸类物质。

目前对这类淡酒液主要采用直接排放的方法。由于淡酒液中的乙醇含量很低，且水和乙醇可形成共沸物，故传统的加热分馏方法很难将之分离，而用一般的废水处理技术又很难达到预期效果。

活性炭是一种黑色多孔性固体吸附材料，广泛应用在环境保护中，用于消除大气污染的脱硫脱氮、各种工业废水的处理等。活性炭对水

中的有机物具有很强的吸附能力。若采用活性炭吸附法进行处理,对于阿莫西林废水,可以使废水达标排放;对于淡酒液,既可回收其中的乙醇,又可节约用水量及解决环境污染问题。

活性炭吸附法经济可行的决定因素除了吸附过程的理论研究基础外,活性炭再生方式的选择及其理论研究也同样重要,否则势必会带来治理成本高、造成二次污染、治理不彻底等问题。

自 20 世纪 70 年代初以来,采用粒状活性炭处理工业废水,不论是在技术上还是在应用范围和处理规模上都发展很快,如在印染废水、化工废水、造纸废水、电镀废水、炼油废水和炸药废水处理等方面都已有了较大规模的应用,并取得了满意的效果。目前,活性炭吸附法已成为城市污水、工业废水深度处理和污染水源净化的一种有效手段。

随着活性炭吸附法的应用范围日趋广泛,活性炭的回收开始得到了人们的重视。如果用过的活性炭无法回收,除了处理费用会增加外,还会对环境造成二次污染。活性炭吸附法的经济性主要取决于再生方式。目前,活性炭再生方法主要有加热再生法、药剂再生法、生物再生法、化学再生法、湿式氧化再生法等几大类。其中加热再生法是各种再生方法中应用、研究最多也是最成熟的一种方法。传统变温解吸可通过间接加热吸附剂或直接与热气体接触来实现。对活性炭,常利用水蒸气来解吸,由于活性炭热传导系数较低,要使整个固定床加热到吸附质被解吸的温度,需加热的时间很长。变温解吸的另一缺点是能量消耗大,再生不仅需要将吸附质提升到解吸所需温度,而且为使吸附剂进一步活化,还需将温度进一步升到吸附剂的活化温度,且经多次加热冷却后,烧损严重。如果利用过热蒸汽再生,固定床在重新吸附前还要再干燥。如果解吸的有机物含水,还须设置水和有机物的分离设备。

与传统的热再生方法相比,微波加热解吸再生有以下优点:

(1) 微波对反应物起深层加热作用;

(2) 微波加热温度均匀;

(3) 解吸速度快;

(4) 在微波辐照下,各种被蒸发的吸附质的电子损失不同,因此能实现对吸附质的选择加热。

用活性炭-微波联用技术处理阿莫西林生产废水和水中低浓度的乙醇,可以实现阿莫西林废水达标排放、乙醇的回收和活性炭的再生。这项作为典型有机废水处理技术开发研究的成功可推广至其他有机废水的处理,这在发展我国制药工业、酒精工业和对含有机物的废水处理有着重要的意义,特别是对含量低、用一般精馏不易分离的有机共沸物和提高资源利用率等方面有广阔的应用前景。

本书是作者十几年研究成果的总结,先后有三位研究生和博士生参与研究。这些研究包括:

(1) 将活性炭微波联用技术应用到阿莫西林废水的处理中,取得了很好的处理效果,COD 排放浓度远远优于目前国家排放标准。微波加热-溶剂萃取法常常被用于提取食品中成分的实验研究,本书尝试将这种方法应用于活性炭的再生中,即将活性炭所吸附的有机污染物比拟为活性炭中的固有成分,以微波作为热源,乙醇作为萃取剂进行萃取实验,最终达到活性炭的再生。

(2) 对载乙醇活性炭而言,将真空技术与微波解吸技术相结合,实现了微波解吸技术的高效分离提纯效果。相关实验证明:在以微波为加热源的情况下,减压蒸馏的分离效果被微波的选择性加强。在真空条件下进行解吸操作,微波解吸的分离效果更好,且比起在氮气氛围中解吸,载乙醇活性炭的真空解吸速度更快。据此,提出了微波共

沸精馏理论。

(3) 提出的 IAS 理论需要大量数值模拟, 包括数值积分。当以 D-R 方程作纯组分吸附等温线时, 该理论对数值积分的精度要求严格。AHEL 模型的合理应用与纯组分 Unilan 吸附等温线的参数有关。

在本书即将付梓之际, 我要感谢我的导师宁平教授, 感谢他多年来对我的培养和指导。宁老师谦虚朴实、平易近人, 他渊博的知识和严谨求实的治学态度以及忘我敬业的工作态度深深地影响着我。在学习上, 宁老师教给了我大量的专业知识和实验技能, 让我受益匪浅。在生活中, 宁老师也给予了我无微不至的关怀, 令我十分感动。另外, 非常感谢分析实验中心和环工学院实验室的老师, 感谢他们给予的耐心指导和鼎力相助, 祝愿他们在以后的工作和生活中身体健康、一帆风顺。感谢我的师兄师弟师姐师妹: 王学谦、陈玉宝、高鸿、郜华萍、马林转、张爱敏、张德华、黄小凤、邓春玲等, 感谢我的学生连明磊、史春梅、樊晓丽、孙创、刘红兵等。感谢研究生院、环工学院对我的培养, 感谢化工学院对我学习和工作的支持, 感谢在我求学路上所有帮助和支持我的老师、同学和朋友。特别感谢我的家人多年来对我学习、工作、生活上的理解、关心、支持和帮助。

本书第 1、2 章由宁平撰写, 其余章由冯权莉撰写。

限于著者水平, 书中未能尽善之处, 还期盼读者多加指正。

冯权莉

2015 年 3 月

目 录



1 活性炭吸附与微波加热基础理论	1
1.1 活性炭吸附基础理论	1
1.2 微波加热基础理论	1
1.2.1 微波与材料的相互作用	2
1.2.2 微波加热原理	3
1.2.3 微波加热与常规加热的区别及其特点	5
1.3 微波再生活性炭的原理和特点	6
1.3.1 微波再生原理	6
1.3.2 微波再生特点	6
2 废水处理	8
2.1 生产废水处理技术	8
2.1.1 水资源的污染与重复利用	8
2.1.2 水中有机污染物	8
2.1.3 常见废水处理工艺	9
2.2 活性炭水处理	11
2.2.1 活性炭的选择	11
2.2.2 活性炭水处理的特点	12
2.2.3 活性炭在水处理中的应用	12
2.3 制药废水处理	13
2.3.1 常规处理方法	13
2.3.2 新型处理方法	16
2.4 酒精废水处理	18
2.4.1 酒精生产废水的主要来源	18
2.4.2 酒精生产废水的处理技术	18

3 活性炭-微波处理阿莫西林废水和酒精废水实验准备	22
3.1 实验仪器与药品	22
3.1.1 实验仪器	22
3.1.2 实验药品	23
3.2 实验方法	24
3.3 实验装置与流程	25
3.3.1 载乙醇活性炭真空和氮气氛围微波解吸装置与流程	26
3.3.2 活性炭吸附-微波解吸载 COD 活性炭实验装置与流程	27
3.4 主要分析测定方法	27
3.5 活性炭活化	29
3.6 微波泄漏的防护方法	29
3.6.1 常用的微波防护方法	29
3.6.2 本实验采取的微波防护措施	29
3.7 活性炭床层在微波场中的升温行为	30
3.7.1 本实验采用的微波场测温方法	30
3.7.2 活性炭床层升温过程的影响因素	32
3.7.3 GAC 床层在微波场中升温行为的定量描述	33
4 阿莫西林废水处理	36
4.1 阿莫西林生产废水水质分析	36
4.2 阿莫西林废水处理方法	37
4.2.1 活性炭单独吸附	37
4.2.2 微波单独辐照法	45
4.2.3 活性炭-微波联用法	46
4.3 活性炭-微波处理阿莫西林废水分析	53
4.3.1 处理效果	53
4.3.2 机理分析	53
4.4 微波再生实验	55
4.4.1 溶剂的选取	55
4.4.2 实验方法	56
4.4.3 再生效果的考查指标	57
4.4.4 实验结果分析	57

4.4.5 活性炭再生次数对再生率的影响	62
4.5 本章小结	63

5 酒精废水处理 65

5.1 活性炭对水中低浓度乙醇的吸附等温线	65
5.1.1 饱和乙醇活性炭的制备	65
5.1.2 不同活性炭对水中低浓度乙醇的吸附等温线	67
5.1.3 活性炭对水中低浓度乙醇的吸附等温线模型	67
5.2 载乙醇活性炭在氮气氛围中微波解吸	69
5.2.1 载气的选择	69
5.2.2 载乙醇活性炭在氮气氛围中微波解吸工艺	70
5.2.3 实验结果分析	71
5.3 载乙醇活性炭真空微波解吸	83
5.3.1 系统压力对气液平衡的影响	84
5.3.2 真空解吸的特点	84
5.3.3 载乙醇活性炭真空微波解吸的工艺流程	85
5.3.4 实验结果分析	86
5.4 微波共沸精馏理论	92
5.4.1 微波共沸精馏解吸的定义	93
5.4.2 微波共沸精馏解吸分离效果的评价指标	93
5.5 本章小结	93

6 沭麻废水处理 96

6.1 实验准备	96
6.1.1 实验试剂及设备	96
6.1.2 温水沭制亚麻及亚麻废水 COD 测定	98
6.1.3 防止微波泄漏的措施	101
6.1.4 实验考查因素	101
6.1.5 活性炭-微波协同处理沭麻废水的工艺流程与检验指标	103
6.2 三种沭麻废水处理实验	103
6.2.1 活性炭对沭麻废水的吸附	103
6.2.2 微波单独辐照处理沭麻废水	105

6.2.3 活性炭-微波协同处理沭麻废水	106
6.3 实验机理与动力学	114
6.3.1 活性炭-微波协同处理沭麻废水的作用机理	114
6.3.2 活性炭-微波协同处理沭麻废水的反应动力学	115
6.4 再生活性炭	118
6.4.1 操作条件对活性炭再生效果的影响	118
6.4.2 正交实验	121
6.4.3 微波加热-溶剂萃取法再生活性炭的动力学	122
6.5 本章小结	123
7 吸附模型及模拟	126
7.1 非均相扩展 Langmuir 模型	126
7.1.1 解析非均相扩展 Langmuir 模型	126
7.1.2 结果分析	128
7.2 理想吸附溶液理论中的数值模拟	132
7.2.1 理想吸附溶液理论	132
7.2.2 结果和讨论	133
7.3 本章小结	134
8 结束语	136
8.1 研究成果和结论	136
8.2 创新点	138
8.3 建议	139
参考文献	140



活性炭吸附与微波加热基础理论

1.1 活性炭吸附基础理论

固体表面由于存在着未平衡的分子引力或化学键力而使所接触的气体或溶质被吸引并保持在固体表面上, 这种表面现象称为吸附^[1]。固体都有一定的吸附作用, 但具有实用价值的吸附剂是比表面积较大的多孔性固体。

依据吸附剂再生方式的不同, 吸附法可分为变温吸附 (Temperature Swing Adsorption, TSA) 和变压吸附 (Pressure Swing Adsorption, PSA)。

TSA 主要是根据各吸附等温线的斜率不同, 在低温下吸附剂的吸附容量增大而吸附, 当压力不变而温度升高时, 吸附剂的吸附容量减小而解吸, 同时吸附剂再生。可以采用过热水蒸气、烟道气和电感加热来加热吸附剂床层, 以提高吸附剂的温度, 但加热后的终温需控制, 以免吸附剂失活或晶体结构破坏。

PSA 指的是气体组分或溶液经气化后的气体, 由于其吸附等温线斜率的变化和弯曲度的大小, 在系统压力变化的情况下, 被吸附剂吸附分离。在 PSA 循环过程中, 系统不断地加压、减压或抽真空, 消耗了大量的能量, 因此, 在操作时必须控制加压和抽真空后系统的压力, 以取得最佳的操作条件, 减少能量的消耗。

1.2 微波加热基础理论

微波是频率在 300MHz ~ 300GHz 的电磁波, 从大约 100 亿年前宇宙诞生以来它就已经存在了。1965 年 AT&T 贝尔实验室的 Arno Penzias 和 Robert Wilson 发现了几乎各向同性和等温的宇宙背景辐射, 此辐射场即由低能微波组成^[2]。

微波加热是一种内加热, 具有加热速度快、加热均匀、对加热物质有选择性、无滞后效应等优点, 在有机合成、无机材料制备、物料干燥、食品工业和医药行业中有着十分广泛的应用。甚至在环境工程领域, 微波在气体污染物处理、固体废弃物的处理、土壤修复、油水分离等方面也显示出独特的效果^[3]。

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是不同的。目前最常用的两个频率是 915MHz 和 2450MHz。电能转化为 2450MHz 微波能的效率约为 50%, 转化为 915MHz 微波能的效率约为 85%。

家用微波炉选用的频率一般为 2450MHz；在工业上，由于所需要的微波谐振腔体积较大，一般选用 915MHz。微波辐射技术已经显示出其无与伦比的优越性，可以预见在未来的工业应用中具有广阔的应用前景。

1.2.1 微波与材料的相互作用

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。这些现象及其程度、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。

1.2.1.1 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，常利用导体能反射微波的性质来传播微波能量。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。微波和绝缘体相互间的影响，就像光线和玻璃的关系一样，玻璃使光线小部分地反射，大部分则透过，只有很小部分被吸收。在微波系统中，根据不同情况使用玻璃、陶瓷、聚四氟乙烯、聚丙烯塑料之类的绝缘体，它们常作为反应器的材料。由于这种“透明”特性，绝缘体常在微波工程中用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，它们能不同程度地吸收微波的能量，这类物料也称为有耗介质。特别是含水和含脂肪的食品，它们能不同程度地吸收微波能并将其转变为热量。

(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，也宜作微波加工材料。

1.2.1.2 微波对介质的穿透性质

微波进入物料后，其微波能被物料吸收并转变为热能，其场强和功率不断地被衰减，即微波透入物料后就进入衰减状态。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。

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，一般它有两种定义：

(1) 渗透深度为微波功率从物料表面减至表面值的 $1/e$ (36.8%， e 为自然对数底值) 时的距离，用 D_E 表示。

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

式中 λ_0 ——自由空间波长；

ε_y ——相对介电常数；

$\tan \delta$ ——介质损耗。

(2) 微波功率从物料表面衰减到表面值的 $1/2$ 时的距离，即半功率渗透深度 $D_{1/2}$ ，其表示式为：

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

渗透深度随波长的增大而变化，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 2450MHz 时，微波对水的渗透深度为 2.3cm，在 915MHz 时增加到 20cm；在 2450MHz 时，微波在空气中的渗透深度为 12.2cm，在 915MHz 时为 33.0cm。

由于一般物体的 $\pi \sqrt{\varepsilon_y} \tan \delta \approx 1$ ，微波渗透深度与所使用的波长是同一数量级的。这个结论也揭示了一个电磁场穿透能力的物理特性。由此可知，目前远红外线加热常用的波长仅为十几个纳米，因此，与红外、远红外线加热相比，微波对介质材料的穿透能力要强得多。

穿透能力差的加热方式，对物料只能进行表层加热，从整个物料的加热情况来看，属常规加热范畴。而微波依靠其穿透能力较强的特点，能深入物料内部加热，使物料表里几乎同时吸热升温，形成体热状态加热，其加热方式显然有别于热传导加热。由此，微波加工工艺带来一系列不同的加热效果。

1.2.2 微波加热原理

一般来说，介质在微波场中的加热有两种机理，即离子传导和偶极子转动。在微波加热的实际应用中，两种机理的微波能耗散同时存在^[4~8]。

1.2.2.1 离子传导机理

离子传导是电磁场中可离解离子的导电移动，离子移动形成电流，由于介质

对离子的阻碍而产生热效应。溶液中所有的离子起导电作用,但作用大小与介质中离子的浓度和迁移率有关。因此,离子迁移产生的微波能量损失依赖于离子的大小、电荷量和导电性,并受离子与溶液分子之间的相互作用的影响。

1.2.2.2 偶极子转动机理

介质是由许多一端带正电、一端带负电的分子(或偶极子)组成。如果将介质放在两块金属板之间,介质内的偶极子做杂乱运动。当直流电压加到金属板上,两极之间存在一直流电场,介质内部的偶极子重排,形成有一定取向的、有规则排列的极化分子。若将直流电换成一定频率的交流电,两极之间的电场会以同样频率交替改变,介质中的偶极子也相应快速摆动。在 2450MHz 的电场中,偶极子以 4.9×10^9 次/s 的速度快速摆动。由于分子的热运动和相邻分子的相互作用,偶极子随外加电场方向的改变而做规则摆动时会受到干扰和阻碍,产生了类似于摩擦的作用,使杂乱无章运动的分子获得能量,并以热的形式表现出来,介质的温度也随之升高。

偶极子加热的效率与介质的弛豫时间、温度和黏度有关。而温度和介质离子的迁移率、浓度和介质的弛豫时间决定两种能量转换机理对加热的贡献。

根据德拜理论,极性分子在极化弛豫过程中的弛豫时间 τ ,与外加交变电磁场极性改变的圆频率 ω 有关,在微波频段时有 $\omega\tau \approx 1$ 的结果。以我国工业微波加热设备常用的两种微波工作频率 915MHz 和 2450MHz 计算,得到 τ 为 $10^{-11} \sim 10^{-10}$ s 数量级。因此,微波能在物料内转化为热能的过程具有即时特征,对物料加热无惰性,即只要有微波辐射,物料即刻得到加热;反之,物料得不到微波能量就停止加热。这种使物料瞬时得到或失去加热动力(能量)来源的性能,符合工业连续自动化生产加热要求。加热过程中无需对热介质、设备等做预加热处理^[9],从而避免了预加热额外能耗。

1.2.2.3 物料吸收微波能量的数学描述

物料从电场吸收的能量可描述^[10]为:

$$P = 2\pi f E^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r \tan\delta \quad (1-3)$$

式中, P 是单位体积吸收的能量, W/m; f 是频率; E 是物料内的电场强度, V/m; ε_0 是自由空间的介电常数, $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m; ε_r 是相对介电常数; $\tan\delta$ 是损耗角正切。

加热物料所需的能量可描述为:

$$J = m \times s \times \theta_r \quad (1-4)$$

式中, m 是物体的质量, kg; s 是比热, J/(kg·C); θ_r 是升高的温度,℃。

功率为能量的变化速率:

$$\frac{dJ}{dt} = m \times s \times \frac{d\theta_\gamma}{dt} \quad (1-5)$$

将此式与式(1-3)结合得:

$$m \times s \times \frac{d\theta_\gamma}{dt} = P \times V = 2\pi f E^2 \varepsilon_0 \varepsilon_\gamma \tan\delta \times V \quad (1-6)$$

将 $V = \frac{m}{\rho}$ 代入得:

$$\frac{d\theta_\gamma}{dt} = \frac{2\pi f E^2 \varepsilon_0 \varepsilon_\gamma \tan\delta}{\rho \times s} \quad (1-7)$$

可见当微波频率一定时, 物料在微波场中温度的上升速率主要取决于三个参数: E 、 ε_γ 、 $\tan\delta$ 。相对介电常数 ε_γ 和损耗角 $\tan\delta$ 随温度和频率的变化波动很大。

1.2.3 微波加热与常规加热的区别及其特点^[11,12]

微波加热与常规的物料加热方法相比, 有本质差别。常规加热依赖一个或多个传热机制, 如传导、对流或辐射, 将热能传递给物料。在这三种机制中, 能量都积聚在物料表面, 导致在物料中形成温度梯度, 促使热由表面向中心传递, 因此温度梯度总是指向物料内部, 在表面处温度最高。在微波加热中, 微波可与表面的物料相作用, 但也穿过表面, 与物料的中心部分相作用。在微波辐射穿过物料的过程中, 电磁能被转变成遍布于物料各处的热能。由于微波加热速率不受通过表面层的传导的限制, 物料可被更快速地加热。

微波加热的另外一个重要方面是, 它形成与常规加热方向相反的温度梯度。也就是说, 最高的温度在物体的中心, 热由中心向外传递。对于物料干燥这样的操作, 这种作用是非常有益的。除了温度梯度的方向相反之外, 与常规加热相比, 这个梯度较小, 因为热在接受辐射的物料的所有部分生成。这种作用减小了物料内部的压力, 有助于消除内部压力过大时发生的破裂等问题。

可见, 微波加热具有如下特点:

(1) 加热速度快。常规加热如火焰、热风、电热、蒸汽等(称之为外部加热), 要使中心部位达到所需的温度, 需要一定的时间, 导热性较差的物体所需的时间更长。微波加热是使被加热物本身成为发热体(称之为内部加热), 不需要热传导的过程, 内外同时加热, 因此能在短时间内达到加热效果。

(2) 加热均匀。常规加热时, 为提高加热速度, 需要升高加热温度, 容易产生外焦内生现象。微波加热时, 物体各部位通常都能均匀渗透电磁波, 产生热量, 因此均匀性大大改善。