

国外现代食品科技系列

食品微波加工技术

【德国】 Helmar Schubert Marc Regier 著
徐树来 郑先哲 译

THE MICROWAVE PROCESSING OF FOODS

back

home

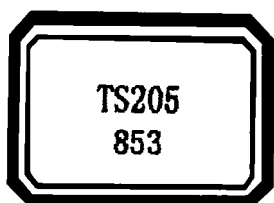
next

mail



中国轻工业出版社

CHINA LIGHT INDUSTRY PRESS



国外现代食品科技系列

食品微波加工技术

[德国] Helmar Schubert Marc Regier 著
徐树来 郑先哲 译

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

食品微波加工技术/ (德) 舒伯特 (Schubert, H.),
(德) 雷吉尔 (Regier, M.) 著; 徐树来, 郑先哲译.

北京: 中国轻工业出版社, 2008. 8

(国外现代食品科技系列)

ISBN 978-7-5019-6488-8

I. 食… II. ①舒…②雷…③徐…④郑… III. 微波技术 -
应用 - 食品加工 IV. TS205

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 082231 号

Original English language edition published by Woodhead Publishing Ltd.

Copyright © 2005 Woodhead Publishing Limited

All Rights Reserved Woodhead Publishing Ltd.

The first print run shall be a minimum of 3000 copies.

责任编辑: 李亦兵 责任终审: 唐是雯 封面设计: 锋尚设计
版式设计: 王超男 责任校对: 杨琳 责任监印: 胡兵 张可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印刷: 三河市世纪兴源印刷有限公司

经销: 各地新华书店

版次: 2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 16.75

字数: 386 千字

书号: ISBN 978-7-5019-6488-8/ TS · 3786 定价: 36.00 元

著作权合同登记图字: 01 - 2007 - 0367

读者服务部邮购热线电话: 010-65241695 85111729 传真: 85111730

发行电话: 010-85119845 65128898 传真: 85113293

网址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换

61145K1X101ZYW

译者的话

本书对食品微波加工原理、应用、测试及控制等进行了全面、系统地阐述，并介绍了食品微波加工建模理论、方法，以及相应的仿真模型和大量的工业化应用实例。

全书共分3篇、16章。

第1篇为原理篇，共分5章。全篇系统介绍了微波加工原理及食品的介电性等相关理论，同时还阐述了微波加热与食品介电性以及食品微波加工与营养及感官质量的关系，为微波食品的工业化生产及大规模食品微波加工设备的研制提供了重要的理论依据。

第2篇为应用篇，共分6章。全篇结合了大量的工业生产实例，介绍了微波加工技术在食品烘焙、干燥、漂烫、解冻等食品工业领域的广泛应用，同时还介绍了微波食品包装等方面的内容。

第3篇为测试与过程控制篇，共分5章。全篇阐述了食品微波加工过程控制与微波食品品质的关系及影响因素，介绍了微波加工过程控制体系及测试方法，并将现代计算机数据处理及测试技术融合于微波加工过程测试及控制中，同时结合实例介绍了食品微波工业化加工过程的相关测试及控制。

本书具有较高的理论深度和较强的实用性，参考文献之多、之新，信息量之大都是不多见的。全书着墨于工业化生产体系和生产实例，而且，各章具有很大的独立性和灵活的选择性。可作为高等院校本科及研究生教材，也可作为科研院所、生产企业工程技术人员的工具书和参考书。

本书第1篇及第12、13章由东北农业大学郑先哲教授翻译；第2篇及第14至16章由哈尔滨商业大学徐树来博士翻译，全书由徐树来博士统稿。在本书翻译过程中，得到了原著作者 University of Bristol 食品工程研究中心副主任 Swain Mark 和 Alan Foster 研究员的热心指导和帮助，得到了原著出版社 WP 主任编辑 Francis Dodds 以及中国轻工业出版社的大力支持。东北农业大学研究生刘成海、时玉强、王新、李聪、贾署花和周贺参与了第1篇的初译和文字录入工作。在此表示衷心的感谢！

由于译者水平有限，且本书所涉及的学科知识领域比较广泛，难免存在不切意及错误之处，恳请广大读者批评指正。

译者

二〇〇七年五月

Food Refrigeration and Processing Engineering Research Centre (FRPERC)

University of Bristol, UK

原著作者及通讯地址

第 1 章和第 3 章

Dr M. Regier* and Professor H. Schubert
Institute of Food Process Engineering
University of Karlsruhe
Kaiserstr. 12
76131 Karlsruhe
Germany

第 2 章

Professor Juming Tang
Department of Biological Systems Engineering
Washington State University
Pullman, WA
USA 99164 – 6120

第 4 章和第 6 章

Dr V. Meda (Chapter 4)*
Department of Agriculture and Bioresource Engineering
University of Saskatchewan
57 Campus Drive
Saskatoon
SK S7N 5A1
Canada

Dr V. Orsat and Professor V. Raghavan (Chapter 6)*
Bioresource Engineering
McGill University
21111 Lakeshore Drive
Ste – Anne de Bellevue
QC H9X 3V9
Canada

第 5 章

Professor M. S. Brewer
Department of Food Science and
Human Nutrition
University of Illinois
Urbana
IL 61201
USA

第 7 章

Dr G. Sumnu * and Dr S. Sahin
Middle East Technical University
Food Engineering Department
06531 Ankara
Turkey

第 8 章

Dr U. Erle
Nestlé Product Technology Centre
Lange Str. 21
78244 Singen
Germany

第 9 章

Dr L. Dorantes – Alvarez *
Ingenieria Bioquímica Department
Escuela Nacional de Ciencias
Biológicas
Instituto Politécnico Nacional
Carpio y Plan de Ayala AP 42 – 186
CP 11340
Mexico

Dr L. Parada – Dorantes
Gastronomy Department
Universidad del Caribe
L1 M1 R78 Fraccionamiento Tabachines
Cancún
Quintana Roo
CP 77528
Mexico

第 10 章和第 12 章

Mr M. J. Swain * and Mr S. J. James
Food Refrigeration and Process Engineering Research Centre (FRPERC)
University of Bristol
Churchill Building
Langford
Bristol BS40 5DU
UK

第 11 章

R. F. Schiffmann

R. F. Schiffmann Associates, Inc.
149 West 88 Street
New York 10024 - 2401
USA

第 13 章和第 16 章

Dipl - Ing. K. Knoerzer* , Dr M. Regier and Professor H. Schubert
Institute of Food Process Engineering
University of Karlsruhe
Kaiserstr. 12
76131 Karlsruhe
Germany

第 14 章

Mr P. Püschner
Püschner GmbH and Co. KG
Microwave Power Systems
PO Box 1151
Industrial Estate Neuenkirchen
Steller Heide 14
28790 Schwanewede
Bremen
Germany

第 15 章

B. Wäppling - Raaholt and T. Ohlsson
SIK (The Swedish Institute for Food and Biotechnology)
Box 5401
SE - 402 29 Göteborg
Sweden

目 录

第1篇 原 理 篇

1 食品微波加工介绍：原理和技术	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 定义和规则	(1)
1.3 电磁理论	(2)
1.4 微波技术	(9)
1.5 本章总结	(13)
1.6 参考文献	(14)
1.7 附录：符号	(14)
2 食品的介电性	(16)
2.1 引言	(16)
2.2 食品的介电性：一般特性	(16)
2.3 影响食品介电性的因素	(17)
2.4 部分食品的介电性	(25)
2.5 介电性研究的相关资料及未来发展趋势	(28)
2.6 参考文献	(28)
3 食品介电性的测试	(31)
3.1 引言	(31)
3.2 测试技术：封闭式结构	(31)
3.3 测试技术：开放式结构	(37)
3.4 食品介电性的深入分析	(40)
3.5 本章总结	(43)
3.6 参考文献	(43)
3.7 附录：符号	(45)
4 微波加热与食品介电性	(47)
4.1 引言	(47)
4.2 微波加热与食品的介电性	(47)
4.3 微波与介电性的相互作用	(48)
4.4 微波加热的测量	(49)
4.5 影响微波加热的变量	(50)
4.6 优化利用微波加热的产品配方设计	(52)

4.7	未来发展趋势	(55)
4.8	参考文献	(56)
5	微波加工与食品营养及感官质量	(58)
5.1	引言	(58)
5.2	微波与食品成分的交互作用	(59)
5.3	水果、蔬菜和药草微波干燥与其营养及感官质量	(60)
5.4	水果、蔬菜和药草微波漂烫、冷却与其营养及感官质量	(62)
5.5	面团系统	(65)
5.6	肉类	(68)
5.7	风味与褐变	(70)
5.8	参考文献	(71)

第2篇 应用篇

6	食品微波加工技术：总论	(79)
6.1	引言	(79)
6.2	工业微波辐射器	(79)
6.3	食品微波加工技术的应用	(82)
6.4	未来发展趋势	(86)
6.5	参考文献	(87)
7	微波烘焙	(91)
7.1	引言	(91)
7.2	微波烘焙原理	(91)
7.3	微波烘焙工艺与设备	(92)
7.4	微波烘焙的优缺点	(93)
7.5	微波与烘焙食品主要成分的交互作用	(94)
7.6	微波在食品烘焙中的应用	(97)
7.7	未来发展趋势	(103)
7.8	相关资料	(104)
7.9	参考文献	(104)
8	微波干燥	(109)
8.1	引言	(109)
8.2	微波干燥产品的品质	(112)
8.3	微波干燥与其他干燥方法相结合	(113)
8.4	微波干燥在食品工业中的应用	(114)
8.5	微波干燥建模	(115)
8.6	参考文献	(115)

9 微波漂烫	(117)
9.1 引言	(117)
9.2 漂烫与酶失活	(117)
9.3 微波漂烫与传统方法的比较	(120)
9.4 微波漂烫在食品工业中的应用	(122)
9.5 微波漂烫的优点	(125)
9.6 微波漂烫的缺点	(127)
9.7 未来发展趋势	(127)
9.8 相关资料	(129)
9.9 参考文献	(129)
10 微波解冻和回温	(133)
10.1 引言	(133)
10.2 传统解冻和回温系统	(134)
10.3 电方法	(136)
10.4 微波解冻建模	(141)
10.5 商业微波解冻系统	(142)
10.6 结论及未来发展趋势	(143)
10.7 参考文献	(144)
11 微波食品包装	(146)
11.1 引言	(146)
11.2 微波食品中影响温度分布的因素	(146)
11.3 惰性包装容器	(147)
11.4 包装材料	(152)
11.5 活性包装容器	(156)
11.6 未来发展趋势	(162)
11.7 参考文献	(163)

第3篇 测试与过程控制篇

12 微波炉的加热性能测试	(165)
12.1 引言	(165)
12.2 影响食品加热的因素：输出功率	(166)
12.3 影响食品加热的因素：再热性	(168)
12.4 烹调与再热程序的确定方法	(175)
12.5 微波炉加热特性的确定	(176)
12.6 结论与未来发展趋势	(180)
12.7 参考文献	(180)

13 微波加工中温度分布的测定	(183)
13.1 引言	(183)
13.2 测定温度分布的方法	(183)
13.3 不同温度图绘制方法的物理学原理	(185)
13.4 测定实例:微波加热模型的 MRI 分析	(194)
13.5 结论	(197)
13.6 参考文献	(197)
14 提高微波过程控制	(199)
14.1 引言	(199)
14.2 工业化微波设备的一般设计问题	(199)
14.3 微波加工过程控制系统	(207)
14.4 食品微波加工过程控制系统实例	(213)
14.5 未来发展趋势	(219)
14.6 相关书籍	(219)
14.7 参考文献	(219)
15 微波加工热分布均匀性的改善	(221)
15.1 引言	(221)
15.2 微波加工过程中的热分布及其均匀性	(221)
15.3 与均匀性相关的加热效果	(225)
15.4 有关加热均匀性的应用实例	(226)
15.5 改善加热均匀性的手段——微波加工建模	(228)
15.6 提高微波加热均匀性的技术和方法	(229)
15.7 在特定食品及其加工中的应用	(233)
15.8 未来发展趋势	(234)
15.9 相关资料	(235)
15.10 参考文献	(235)
16 微波加热过程仿真	(240)
16.1 引言	(240)
16.2 建模技术及智能软件包	(242)
16.3 微波加热仿真实例	(244)
16.4 未来发展趋势	(250)
16.5 参考文献	(250)
16.6 附录:符号	(252)
16.7 注释	(253)

第1篇 原 理 篇

1 食品微波加工介绍：原理和技术

M. Regier and H. Schubert, University of Karlsruhe, Germany

1.1 引 言

本章论述了微波的物理学原理和相关理论，并且对微波设备进行了大体的评述。在介绍基本方程（麦克斯韦方程以及其他关于电磁和物质之间关系的基本方程）之前，首先从频率的定义、相应的波长范围和有关法则开始。在上述基本方程的基础上，推导出波动方程和一些相关问题的解，进而介绍了微波穿透深度和能量吸收概念，这两个概念对于微波和材料之间产生的热效应的评价是十分有用的。并对微波应用的一般装置，包括微波源，波导，辐射器进行简单的介绍。本章是作为全书内容的总线而撰写的。

1.2 定义和规则

微波是一种频率在 300MHz 到 300GHz 的电磁波。在电磁波谱图中（图 1.1），它们介于低频的无线电波和高频的红外线及可见光之间，因而微波属于非电离辐射。

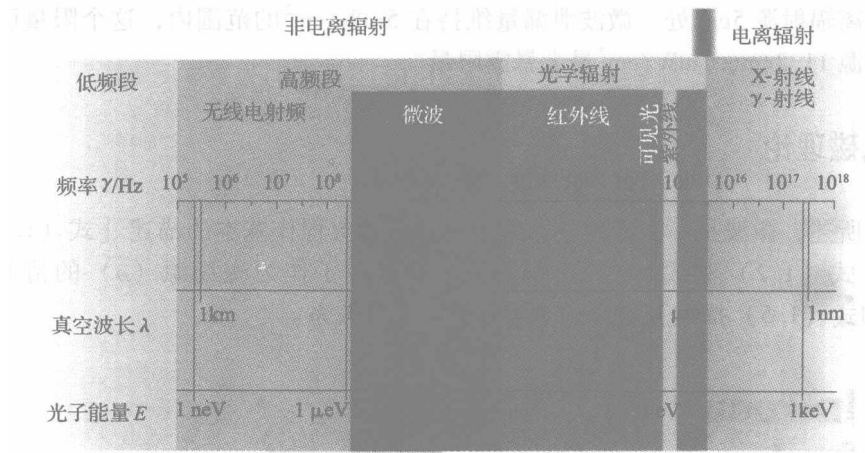


图 1.1 电磁光谱，附两种最常用的微波频率（915MHz 和 2450MHz）

频率 f 与光速 c 和相应的波长有关, 由式 (1.1) 表述。在这种情况下, 光的传播速度及光波在物质中的波长取决于材料。在真空状态下, 因为光速为 $c_0 \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, 与之相应的微波波长在 1m 到 1mm 之间, 因此称之为“微波”有些误导, “微波”名称是指其在物质内的波长在微米范围内的电磁波。

$$c = \lambda \cdot f \quad (1.1)$$

1.2.1 规则

如图 1.1 所示, 微波范围的频率与用作广播的无线电频率相连。但是微波频率范围内的电磁波也可用于电讯, 例如移动电话和雷达。为避免出现干扰问题, 在工业, 医学和科研应用上都有特定的频率范围 (称为 ISM), 还有某些特定辐射频率仅用于通讯领域。ISM 波段位于 433MHz, 915MHz 和 2450MHz。对于 433MHz 和 915MHz 的电磁波来说, 前者不常用, 而后者在欧洲大陆基本上不允许使用。除了许用频率范围之外, 要严格禁止产生微波泄漏。915MHz 在工业应用方面有很大的优势, 而家用微波炉惟一可用的频率是 2450MHz。

除了考虑微波交互作用规律外, 还有两项安全规则需要注意:

- (a) 在微波工作环境中, 人体可暴露的最大面积或微波最大吸收量的规则;
- (b) 关于微波设备辐射或泄漏最大量的规则。

依据微波对人体产生热效应估算人体暴露于微波中的限量。特别要考虑到一些敏感器官, 如眼睛, 会有降低热平衡的可能性和视觉集中效应。因此, 在大多数国家, 一般认为人体暴露安全限量为体表 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 。考虑到离子辐射, 用术语“比吸收率”来表示人体暴露或吸收微波的量 (SAR), 该值是入射微波能与体重的商。国际非离子辐射保护委员会 (ICNIRP, 1998; IRPA, 1988) 推荐, SAR 的最高值设定为 $0.4\text{W}/\text{kg}$ 。

微波设备产生最大辐射量控制在 $5\text{mW}/\text{cm}^2$, 该值是在距离辐射源 5cm 处测出的, 而此处是微波泄漏量最大的地方。这样, 允许泄漏量可以高于暴露的最大限量。但是对于正常泄漏情况下, 某处的非集中能量密度与到波源距离的平方的倒数呈比例关系。因此, 在距离辐射源 5cm 处, 微波泄漏量维持在 $5\text{mW}/\text{cm}^2$ 的范围内, 这个限量已经低于距离辐射源 11.2cm, $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 最大暴露限量。

1.3 电磁理论

如上所述, 微波是一种电磁波, 可用麦克斯韦方程作基本的描述 [式 (1.2) ~ 式 (1.5)]: 式 (1.2) 和式 (1.4) 表述了非磁单极子作为磁场源 (ρ) 的情形。而式 (1.3) 和式 (1.5) 描述了电场和磁场之间的耦合关系。

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.5)$$

电磁场与物质的相互关系可由物质方程或本构关系式 (1.6) ~ 式 (1.8) 表达, 其中电容率或介电常数 ε (是非导电物质与电场 $\vec{E}$ 之间的交互作用), 电导率 σ , 磁导率 μ (与磁场 $\vec{H}$ 的交互关系) 的作用表现在模型中 (参见第 2 章)。式中, 0 - 脚标表示真空状态时的数值, 因此, ε 和 μ 都是相对值。

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (1.6)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \cdot \vec{H} \quad (1.7)$$

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (1.8)$$

总体而言, 所有的物质参数都是复杂的张量 (与方向相关)。但对于食品类物质而言, 实际应用中可以进行适当的简化, 这是由于食品是非磁性的, 其相对磁导率 μ 可以设为 1, 电容率张量简化为一复合常数, 有实部 ε' 和虚部 ε'' , 其中包含了电容率 σ (见第 2 章)。

1.3.1 波动方程和边界条件

麦克斯韦方程适用于所有的电磁波。为了更加详细而准确地描述电磁波, 以麦克斯韦方程为基础, 在无电荷 ($\rho=0$) 和无电流密度 ($\vec{j}=0$) 的简化条件下, 则容易导出相应的波动方程 (电场或者磁场)。这里的推导过程只是在电场中进行, 也可以经简单地转化应用于磁场。应用旋度算子 ($\nabla \times$), 由式 (1.3) 可以推导出式 (1.9):

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\nabla \times \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{B}) \quad (1.9)$$

若假设磁导率是常量, 代入到公式 (1.5), 应用磁场本构方程 (1.7) 可转化为式 (1.10):

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu_0 \mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (1.10)$$

利用电场的物质方程 (1.6), 麦克斯韦方程 (1.2) 的第一部分和矢量恒等式 $\nabla \times (\nabla \times \vec{X}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{X}) - \Delta \vec{X}$, 就可以得到著名的波动方程:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.11)$$

对于含有磁场部分 $\vec{B}$ 的相应波动方程可以用同样方法导出, 把 $\vec{E}$ 用 $\vec{B}$ 代替。与波动方程 (1.11) 的标准形式比较, 可以推出这种情况下的波速方程, 定义为式 (1.12):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \mu \varepsilon}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu \varepsilon}} \quad (1.12)$$

方程 (1.11) 可能解的特性可考虑用所谓的线性极化平面波来解释。线性极化指的情况是, 例如, 只有 1 个组成部分的电场, 如只有坐标 z 向的电场 E_z , 如果这个方向只与一个局部坐标有关, 如 x 轴 (和时间), 这样的波称为平面波。而且, 如果材料参数与频率无关, 可由方程 (1.11) 得到:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} = 0 \quad (1.13)$$

求解该方程的所有函数形式 $f(kx \pm \omega t)$ 可以列出来。对于较为复杂的情况，通常用时谐函数作为方程的解式 (1.14)：

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \\ \vec{E} &= \vec{E}_0 \sin(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \\ \vec{E} &= \Re[\vec{E}_0 \exp\{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)\}] \end{aligned} \quad (1.14)$$

这里 $\vec{k}$ 是波矢量，表明了它的传播方向，其绝对值可定义为：

$$\vec{k}^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (1.15)$$

式中， $\omega = 2\pi f$ 是波的角频率。

应该注意的是，电场和磁场的独立波动方程，不能完全代替麦克斯韦方程。相反，在进一步条件下，电场和磁场之间具有一定的相关性（表 1.1）。在这一理论中涉及到波的弥散性（材料中光速与频率 ω 的相关性）。考虑到材料内的吸收性，我们不得不引入更复杂的电容率和波矢量，如果允许在公式 (1.10) 中添加一个有限的电导率 σ ，此时电流为 $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ ，这一公式代替了简单的波动方程 (1.11)，将其扩展为式 (1.11a)

$$\Delta \vec{E} - \mu_0 \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu_0 \mu \epsilon_0 \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.11a)$$

用时谐函数作为上述方程的解，方程 (1.11a) 可以简化为：

$$\Delta \vec{E} + \omega^2 \mu_0 \mu \epsilon_0 \left(\epsilon - i \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right) \vec{E} = 0 \quad (1.11b)$$

该方程表明限定的电导率 σ 与电容率的虚部 ϵ 是等价的。

表 1.1 电场和磁场的相关性

交 互 性	电场和磁场的相互关系
$\vec{k} \cdot \vec{E}_0 = 0$	$\vec{k} \times \vec{E}_0 = \omega \cdot \vec{B}_0$
$\vec{k} \cdot \vec{B}_0 = 0$	$\vec{k} \times \vec{B}_0 = -\omega \cdot \mu_0 \mu \cdot \epsilon_0 \epsilon \cdot \vec{E}_0$

1.3.2 解例：指数阻尼平面波

我们以一个具体的实例来说明材料吸收过程，在这里电容率 ϵ 含有虚部 $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''_{\text{总}}$ ，有：

$$\epsilon''_{\text{总}} = \epsilon'' + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (1.16)$$

那么，时谐平面波一定是方程 (1.11c) 的解：

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \omega^2 \mu_0 \mu \epsilon_0 (\epsilon' - i\epsilon''_{\text{总}}) E_z = 0 \quad (1.11c)$$

可以推导出平面波 H_y （与电场 E_z 正交）的磁场部分的类似方程，得到带有常数 g , h , m 和 n ，且满足边界条件（见表 1.2）的通解。

$$\begin{aligned} E_z &= g \cdot \exp \{ (ik + \kappa)x \} + h \cdot \exp \{ - (ik + \kappa)x \} \\ H_y &= m \cdot \exp \{ (ik + \kappa)x \} + n \cdot \exp \{ - (ik + \kappa)x \} \end{aligned} \tag{1.17}$$

应该强调电场 E_z 的连续性（表 1.2 中的边界条件之一），它可以解释常见的边角及中心处出现的过热效应。我们将在后面表述微波在样本内的功率耗散与电场强度的平方成正比 [式 (1.43)]。在材料的边缘，尤其在中心处，微波不仅从 2~3 个方向介入，而且从体电场的 2~3 个极性平面，在无任何振幅损失的情况下连续介入。因此，此处产生很大的热量。

式 (1.17) 的解描述了指数的阻尼波，其中的波数 k 和阻尼常数 κ 都与介电常数 ε 有关，二者都决定于介电常数 ε 。通过系数比较，得出式 (1.18)

$$\omega^2 \mu_0 \mu \varepsilon_0 (\varepsilon' - i\varepsilon'') = (\kappa + ik)^2 \tag{1.18}$$

导出：

$$k = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon'}{2}} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{\varepsilon''^2}{\varepsilon'^2}} + 1 \right) \tag{1.19}$$

和

$$\kappa = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon'}{2}} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{\varepsilon''^2}{\varepsilon'^2}} - 1 \right) \tag{1.20}$$

相应的电场穿透深度（如图 1.1 所示），在电场内的穿透深度降为 $1/e$ 时，由式 (1.21) 定义为：

$$\delta_E = \frac{1}{\kappa} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon' \left(\sqrt{1 + \frac{\varepsilon''^2}{\varepsilon'^2}} - 1 \right)}} \tag{1.21}$$

表 1.2 不同情况下边界条件

先决条件	边界条件
无表面电荷	$D_{\perp}$ 连续性
——	$B_{\perp}$ 连续性
无表面容量	$H_{\parallel}$ 连续性
——	$E_{\parallel}$ 连续性
理想导体壁（金属）	$E_{\parallel} = 0$
理想导体壁（金属）	$B_{\perp} = 0$

频率与阻尼常数 κ 相关的重要结果是：假定在介电性相似情况下，频率为 915MHz 的穿透深度大约是频率 2450MHz 的 2.5 倍。在工业生产中，微波在材料内部的穿透深度越大，越有助于更均匀加热大块片状材料。

假设平面波的激发和传播满足边界条件，可初步估算场的结构。当物体的尺寸远大于波长时，微波传播符合几何光学定律。

1.3.3 几何光学：反射和折射

角度

如图 1.2 所示, 考虑平面波从半无限非吸收介质 I ($n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$) 传播到一种半无限可吸收介质 II ($n_2 = \sqrt{\epsilon_2} = n_{2r} + in_{2i}$) 中的情况。二者磁导率均为 1, 两种介质的边界平面应该为 $x-y$ 平面 (在 $z=0$ 时), 平面波电场 (忽略实部) 可写作:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp [i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)] \quad (1.22a)$$

根据表 1.1, 相应的磁场可定义为:

$$\vec{B} = \frac{1}{\omega} \cdot \vec{k} \times \vec{E} \quad (1.22b)$$

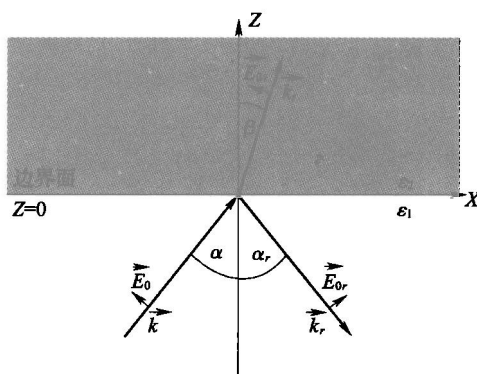


图 1.2 平面波入射作用在有介电边界平面上的反射和折射

该波在波矢量 $\vec{k}$ 的方向传递了能量, 该波用图 1.2 的一条射线描述。并且在这一情况下, 表 1.2 中的边界条件 (无表面电荷和电流) 是适用的, 因此, 反射波 [式 (1.23)] 和折射波 [式 (1.24)] 与时间的关系可以表述为:

$$\left. \begin{aligned} \vec{E}_r &= \vec{E}_{0r} \exp [i(\vec{k}_r \cdot \vec{x} - \omega t)] \\ \vec{B}_r &= \frac{1}{\omega} \cdot \vec{k}_r \times \vec{E}_r \end{aligned} \right\} (z < 0) \quad (1.23)$$

$$\left. \begin{aligned} \vec{E}_t &= \vec{E}_{0t} \exp [i(\vec{k}_t \cdot \vec{x} - \omega t)] \\ \vec{B}_t &= \frac{1}{\omega} \cdot \vec{k}_t \times \vec{E}_t \end{aligned} \right\} (z > 0) \quad (1.24)$$

波矢量遵循式 (1.25), 因而 $\vec{k}$ 和 $\vec{k}_r$ 是实数, 但 $\vec{k}_t$ 一般是复杂的:

$$\frac{\vec{k}^2}{n_1^2} = \frac{\vec{k}_r^2}{n_1^2} = \frac{\vec{k}_t^2}{n_2^2} = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (1.25)$$

扼要说明的是: 当 $z > 0$ 时, 有解 $\vec{E}_t$; 而当 $z < 0$ 时, 解是 $\vec{E} + \vec{E}_r$ 。取入射波的 $\vec{E}$ 和 $\vec{k}$ 为起点, 其余的变量 $\vec{E}_r$, $\vec{E}_t$, $\vec{k}_r$, $\vec{k}_t$ 可由表 1.2 中边界条件决定。

在 $z=0$ 平面, 所有波的局部变量 $\vec{E}$, $\vec{E}_r$, $\vec{E}_t$ 是一致的, 因此有:

$$k_x x + k_y y = k_{r,x} x + k_{r,y} y = k_{t,x} x + k_{t,y} y \quad (1.26)$$