

彭金辉 刘秉国 著
Peng Jinhui, Liu Bingguo

微波煅烧技术 及其应用

Microwave Calcination
Technology and Application



科学出版社

.. 013032946

微波煅烧技术及其应用

Microwave Calcination Technology
and Application

彭金辉 刘秉国 著

Peng Jinhui, Liu Bingguo



科学出版社

北京



北航

C1640716

TF046
01

内 容 简 介

本书系统介绍微波煅烧技术及其应用方面的知识,主要包括微波加热基础、微波吸波特性及升温性能、强吸波物料的煅烧、弱吸波物料的煅烧和常用微波煅烧设备等。同时,本书还详细探讨了微波煅烧方面的最新研究成果,包括弱吸波物料的微波吸波性能增强机制、异质材料三维准静电模型和微波专用承载体制备技术、增韧原理及微波煅烧设备主要技术参数等,并通过实例对煅烧技术的应用作简明介绍,对微波技术的拓展应用具有指导和参考意义。

本书可供材料、冶金、物理、化学、化工、电子工程等专业的教学、科研和工程技术人员阅读参考,也可作为相应领域本科生和研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

微波煅烧技术及其应用= Microwave Calcination Technology and Application/
彭金辉,刘秉国著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-037159-1

I. ①微… II. ①彭… ②刘… III. ①微波技术-应用-煅烧-基本知识
IV. ①TF046.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 050442 号

责任编辑:耿建业 / 责任校对:包志虹
责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2013 年 3 月第一次印刷 印张: 14 3/4

字数: 272 000

定价: 75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

微波应用是 20 世纪 30 年代发展起来的一门技术,首先应用于通信。随着微波电子技术的不断发展和人们对微波能的应用及其加热优越性的认识不断深入,近年来微波能应用技术正在向纵深发展,微波能应用范围不断拓宽,并不断出现新的应用领域。目前,经过 70 多年的发展,微波加热技术已经在冶金、化工、石油、食品加工、医药等行业得到广泛应用。

煅烧作为冶金过程的典型反应单元之一,它是通过加热方式使化合物热离解为一种组分更简单的化合物或发生晶形转变的过程,是为了产物满足后续要求或产品标准而设置的一道关键工序。煅烧工艺的好坏不仅影响产品的质量,也决定了企业的经济效益。微波作为一种绿色加热方式,它通过微波在物料内部的能量耗散直接加热物料,具有选择性加热物料、升温速率快、加热效率高等优点,而且还具有降低反应温度、缩短反应时间、节能降耗明显等优点。因此,开展微波煅烧理论研究,开发先进、高效的微波煅烧新工艺具有重要的意义。

然而,尽管有许多研究人员在微波煅烧方面做了大量的工作,但其研究多集中于对某一具体物料的煅烧,侧重于考察微波加热参数对产品性能的影响规律,缺少对微波煅烧的系统研究,更没有在微波煅烧方面形成系统的理论体系,至今还没有一本系统介绍微波煅烧理论的专著。目前,微波煅烧作为微波冶金的一个典型单元,对其研究不仅具有学术价值,还对其工业应用具有指导意义。

近 20 年来,笔者与课题组成员一同对微波煅烧这一典型的冶金单元进行了系统、深入的研究,建立了异质材料三维 RC 网络模型,构建了弱吸波物料微波吸波性能增强机制,解决了弱吸波物料的微波煅烧这一难题,拓宽了微波冶金的应用领域;研制了材料微波吸收特性测试装置,测定了多种物料的微波吸波性能;建立了物料在微波场中的升温速率方程,系统研究了强吸波物料和弱吸波物料的微波煅烧。同时,课题组还选用介电损耗小的 Al_2O_3 、 SiO_2 工业陶瓷原料为基体,发明了新型微波专用陶瓷材料制备新技术,采用原位合成莫来石晶须的方式对微波专用陶瓷材料进行初化处理,获得了微波冶金用专用承载体材料增韧原理,研制出两种力学和热学性能优良、抗热震性好、热膨胀率低的微波专用陶瓷材料。本书是以上成果的系统总结,也是昆明理工大学非常规冶金教育部重点实验室同仁多年研究工作的结晶。

本书分 7 章,第 1 章论述开展微波煅烧研究的意义;第 2 章主要介绍微波加热

原理和微波加热设备结构;第3章介绍微波吸波性能测试原理、异质材料微波吸波特性理论和异质材料三维准静电模型,测定多种物料的微波吸波特性;第4章讨论物料升温速率方程,测定多种物料的升温曲线;第5章研究强吸波物料的微波煅烧;第6章阐述弱吸波物料的辅助加热方法,研究多种弱吸波物料的微波煅烧;第7章侧重于微波煅烧装备和微波专用陶瓷材料的介绍。本书内容丰富、图文并茂,各章节撰写次序符合人们认识事物的规律,并作了适当的评述,便于读者阅读使用。

本书框架结构及全书提纲由彭金辉教授设计拟订,并由其撰写第1、4、5章,同时负责全书的审稿和定稿;刘秉国博士撰写第3、6章;张利波教授撰写第2章;郭胜惠教授结合自行研制开发的煅烧设备和国内外设备的新特点撰写第7章。

本研究得以成书与国家自然科学基金重点项目“新型微波冶金高温反应器关键共性问题及应用基础研究”(项目编号:50734007)及云南省科技计划项目“新型微波冶金高温反应器关键共性问题及应用基础研究”(项目编号:2007GA002)的资助,以及昆明理工大学的支持是密不可分的,在此一并予以感谢,也感谢科学出版社在本书出版过程中的全力支持与帮助。

对于微波煅烧技术及应用领域的认识、拓展及创新仅是微波能应用新领域之一,书中疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

彭金辉

2012年11月于昆明

常用基本符号说明

英文符号	量的含义
D_p	穿透深度
$f_{\text{微波}}$	微波频率
c	光速
P	功率密度
E	电场强度
H	磁场强度
a	波导宽边内壁尺寸
b	波导窄边内壁尺寸
P_a	吸收功率
P_r	反射功率
P_t	透过功率
$P_{\text{辐射}}$	微波辐射功率
f_s	谐振腔有载时谐振腔频率
f_0	谐振腔无载时谐振腔频率
Q_s	谐振腔有载时品质因子
Q_0	谐振腔无载时品质因子
d	板状介质样品材料的厚度
S_{21} 、 S_{11}	散射参数
W	谐振传感器存储的能量
D_1 、 B_1	微扰后电位移和磁感应强度的增加值
D_0 、 B_0	微扰前电位移和磁感应强度的复共轭
V_e	谐振传感器内样品的体积
V	谐振传感器的体积
E_0^* 、 H_0^*	微扰前电场强度和磁场强度的复共轭
S	极板面积
L	上下极板间的距离
k	化学反应速率
v	平行板电容器的体积

W_F	电磁场理论电能
q	热流密度
$\text{grad}T$	温度梯度
Q	内热源密度
T	温度
t	时间
C_p	热容
e	样品的热辐射系数
A	填充比
$V_{\text{样}}$	样品体积
n_i	单位体积样品中组元 i 的物质的量
$\Delta H_{T,t}^0$	反应 i 的热效应
F_i	反应 i 的转化率
M	物料的质量
T_0	物料的初始温度
N	径向抗压
y	分解率
x_1	煅烧温度
x_2	煅烧时间
x_3	物料量
a_1, a_2, a_3	线性系数
a_{12}, a_{13}, a_{23}	交互系数
a_{11}, a_{22}, a_{33}	二次项系数
$\sum U$	总铀含量
U^{4+}	四价铀含量
r_{adj}^2	校正决定系数
r^2	决定系数
D_b	体积密度
P_a	材料显气孔率
$P_{\text{载荷}}$	断裂载荷
$L_{\text{跨距}}$	下支点间跨距
B	样品宽度
$A_{\text{深度}}$	切口深度
L_t	试样在室温下的长度

ΔL	室温至所测温度试样的伸长量
ΔT	室温至所测温度试样的温度差
$A_{\text{校正}}$	仪器校正量
W	样品厚度
A_M	窑内物料层所占弓形面积
G_M	单位时间窑内物料流量
$\bar{D}^2$	窑平均有效内径
n	回转窑转速
G	窑的生产能力
$\bar{u}$	物料平均轴向移动速度
R	回转窑内半径
T_m	平均停留时间
$L_{\text{窑}}$	回转窑长度
V_M	物料轴向移动速度
$V_{\text{容积}}$	窑有效容积

希腊字母

量的含义

ϵ	介电常数
ϵ'	介电常数实部
ϵ''	介电常数虚部
ϵ_0	真空介电常数
ϵ_r	相对复介电常数
ϵ'_r	相对复介电常数的实部
ϵ''_r	相对复介电常数的虚部
ϵ_{eff}	有效介电损耗因子
μ_0	真空磁导率
μ'_r	相对磁导率实部
μ_r	复相对磁导率
μ_{eff}	有效磁损耗因子
η	微波吸收系数
$\tan \delta_e$	电损耗角正切
$\tan \delta_\mu$	磁损耗角正切
$\tan \delta$	损耗正切
λ	工作波长
λ_c	临界波长

λ_{R}	波导波长
φ_1	上极板电位
φ_2	下极板电位
$\varphi_1 - \varphi_2$	沿 y 方向电位差
ω	角频率
$\Delta\omega$	角频率偏移
ω_0	未加样品时谐振传感器的谐振角频率
Φ_{r}	物料在 x 轴方向位移所对应的角度
Φ_{f}	物料充满角
$\rho_{\text{驻}}$	驻波比
ρ_{M}	窑内物料体积密度
$\rho_{\text{水}}$	水的密度
$\varphi_{\text{填充}}$	窑内物料填充系数
$\theta_{\text{入射}}$	入射角
$\gamma_{\text{h}}(\theta)$	平行反射系数
$\lambda_{\text{热导率}}$	物料的热导率
σ	电导率
β	相位常数
$\theta_{\text{休止}}$	物料运动休止角
ν_{p}	与 ω 有关,称为色散系数
$f_{\text{填充比}}$	填充相所占的体积比
$\alpha_{\text{膨胀系数}}$	平均线性热膨胀系数
α	窑内物料的自然堆角
$\alpha_{\text{衰减系数}}$	衰减常数
$\alpha_{\text{窑体}}$	回转窑窑体倾角
量纲为一的参数	
a	Stefan-Boltzmann 常数

目 录

前言

常用基本符号说明

第 1 章 绪论	1
参考文献	2
第 2 章 微波加热基础	3
2.1 概述	3
2.2 微波与物质的作用原理	4
2.3 微波与物质相互作用	7
2.4 微波加热的特点	8
2.5 微波加热设备结构	9
2.5.1 微波发生器	9
2.5.2 波导	13
2.5.3 微波能应用器	17
参考文献	18
第 3 章 微波吸波特性	20
3.1 微波测试原理及方法	21
3.1.1 微波传输法	21
3.1.2 微波反射法	22
3.1.3 微波谐振腔法	23
3.1.4 微波空间波法	24
3.2 微波谐振腔微扰法测试原理和方法	26
3.3 纯物质微波吸波特性	26
3.3.1 碱式碳酸钴及其煅烧产物的微波吸波特性	27
3.3.2 偏钒酸铵及其煅烧产物的微波吸波特性	27
3.3.3 仲钨酸铵及其煅烧产物的微波吸波特性	28
3.3.4 乙二酸钴及其煅烧产物的微波吸波特性	29
3.4 异质材料微波吸波特性理论	29
3.4.1 二维准静电模型	32

3.4.2	异质材料等效复介电常数仿真	33
3.5	三维准静电模型	42
3.5.1	物理模型与仿真方法	43
3.5.2	仿真结果与讨论	45
3.6	异质材料微波吸收特性	47
3.6.1	碱式碳酸钴异质材料微波吸波特性	47
3.6.2	偏钒酸铵异质材料微波吸波特性	48
3.6.3	椰壳炭和钛精矿异质材料微波吸波特性	50
3.6.4	焦炭和钛精矿异质材料微波吸波特性	52
3.6.5	无烟煤和钛精矿异质材料微波吸波特性	53
3.6.6	椰壳炭和氧化钛精矿异质材料微波吸波特性	55
3.6.7	焦炭和氧化钛精矿异质材料微波吸波特性	56
3.6.8	石墨和氧化钛精矿异质材料微波吸波特性	58
	参考文献	59
第4章	微波升温性能	64
4.1	物料在微波场中的升温速率方程	64
4.2	纯物料在微波场中的升温性能	65
4.2.1	强吸波物料的升温性能	65
4.2.2	弱吸波物料的升温性能	70
4.3	异质材料在微波场中的升温性能	72
4.3.1	碱式碳酸钴异质材料升温性能	72
4.3.2	偏钒酸铵异质材料升温性能	75
4.3.3	三碳酸铈酰胺异质材料升温性能	77
4.3.4	重铈酸铵异质材料升温性能	78
4.3.5	转炉钢渣升温性能	79
	参考文献	81
第5章	强吸波物料的煅烧	82
5.1	微波煅烧材料制备	83
5.1.1	微波煅烧制备氧化镁	83
5.1.2	微波煅烧制备氧化锌	86
5.1.3	微波煅烧制备氧化钼	88
5.1.4	微波煅烧制备氧化钨	90
5.1.5	微波煅烧制备超细氧化铁	92
5.1.6	微波煅烧制备碳/碳复合材料	93

5.1.7 微波煅烧制备硫酸工业用钒催化剂	97
5.2 微波煅烧处理废弃物	98
5.3 微波煅烧其他物料	100
5.4 微波煅烧的优点及存在的主要问题	102
参考文献	102
第 6 章 弱吸波物料的煅烧	106
6.1 弱吸波物质的微波辅助加热方法	106
6.1.1 添加强吸波物质	106
6.1.2 Picket fence 法	107
6.1.3 内衬碳化硅的微波吸收器	108
6.1.4 Patterson 法	109
6.1.5 对单模腔体采用可调微波耦合窗	110
6.2 碱式碳酸钴的煅烧	111
6.2.1 热分解特性	111
6.2.2 常规煅烧	113
6.2.3 微波煅烧	120
6.3 偏钒酸铵的煅烧	125
6.3.1 热分解特性	125
6.3.2 常规煅烧	127
6.3.3 微波煅烧	133
6.4 乙二酸钴的煅烧	138
6.4.1 热分解特性	138
6.4.2 常规煅烧	139
6.4.3 微波煅烧	144
6.5 三碳酸铈酰铵的煅烧	149
6.5.1 热分解特性	149
6.5.2 常规煅烧	151
6.5.3 微波煅烧	159
6.6 重铈酸铵的煅烧	166
6.6.1 热分解特性	166
6.6.2 常规煅烧	167
6.6.3 微波煅烧	174
6.7 碱式碳酸镍的微波煅烧	181
6.8 氢氧化铝的微波煅烧	184

6.9 微波煅烧与常规煅烧比较	188
参考文献	189
第7章 微波煅烧设备	192
7.1 微波透波材料概述	192
7.1.1 低温及中温微波透波材料	192
7.1.2 高温微波透波材料	193
7.2 微波高温冶金专用承载体材料	193
7.2.1 材料性能表征	193
7.2.2 微波高温冶金专用承载体材料制备	195
7.2.3 微波高温冶金专用承载体材料增韧研究	197
7.3 微波回转窑	209
7.3.1 微波回转窑机构及参数	209
7.3.2 微波回转窑的运转参数及生产能力	211
7.4 微波推板窑	213
7.4.1 微波推板窑机构及参数	213
7.4.2 应用范围	214
7.5 微波竖式窑	214
参考文献	216

Contents

Preface

Basic Symbol Table

Chapter One Introduction	1
References	2
Chapter Two Fundamentals of Microwave Heating	3
2.1 Overview of Microwave	3
2.2 Interaction Principles between Microwave and Matters	4
2.3 Interaction of Microwave and Matters	7
2.4 Characteristics of Microwave Heating	8
2.5 Structure of Microwave Heating Equipment	9
2.5.1 Microwave Generator	9
2.5.2 Waveguide	13
2.5.3 Microwave Power Applicator	17
References	18
Chapter Three Microwave Absorbing Characteristics	20
3.1 Microwave Measuring Principle and Method	21
3.1.1 Microwave Transmission Method	21
3.1.2 Microwave Reflection Method	22
3.1.3 Microwave Resonance Method	23
3.1.4 Microwave Space Wave Method	24
3.2 Principle and Method of Microwave Resonant Cavity Perturbation	26
3.3 Microwave Absorbing Characteristics of Pure Materials	26
3.3.1 Microwave Absorbing Characteristics of Cobalt Carbonate and its Calcined Product	27
3.3.2 Microwave Absorbing Characteristics of Ammonium Metavanadate and its Calcined Product	27
3.3.3 Microwave Absorbing Characteristics of Ammonium Paratungstate and its Calcined Product	28
3.3.4 Microwave Absorbing Characteristics of Cobalt Oxalate and its Calcined Product	29

3.4	Theory of Microwave Absorbing Characteristics of Heterogeneous Materials	29
3.4.1	Two Dimensional Quasi Static Model	32
3.4.2	Simulation of Equivalent Complex Permittivity of Heterogeneous Materials	33
3.5	Three-Dimensional Quasi Static Model	42
3.5.1	Physical Modeling and Simulation Method	43
3.5.2	Results of Simulation and Discussion	45
3.6	Microwave Absorbing Characteristics of Heterogeneous Materials	47
3.6.1	Microwave Absorbing Characteristics of Heterogeneous Materials of Basic Cobalt Carbonate	47
3.6.2	Microwave Absorbing Characteristics of Heterogeneous Materials of Ammonium Metavanadate	48
3.6.3	Microwave Absorbing Characteristics of Heterogeneous Materials of Coconut Shell-based Carbon and Ilmenite Concentrate	50
3.6.4	Microwave Absorbing Characteristics of Heterogeneous Materials of Coke and Ilmenite Concentrate	52
3.6.5	Microwave Absorbing Characteristics of Heterogeneous Materials of Anthracite and Ilmenite Concentrate	53
3.6.6	Microwave Absorbing Characteristics of Heterogeneous Materials of Coconut Shell-based Activated Carbon and Oxidized Ilmenite Concentrate	55
3.6.7	Microwave Absorbing Characteristics of Heterogeneous Materials of Coke and Oxidized Ilmenite Concentrate	56
3.6.8	Microwave Absorbing Characteristics of Heterogeneous Materials of Graphite and Oxidized Ilmenite Concentrate	58
	References	59
Chapter Four Temperature Rising Performance of Microwave Heating		64
4.1	Rate Equation of Temperature Rising of Materials in Microwave Field	64
4.2	Temperature Rising Characteristics of Pure Materials in Microwave Field	65
4.2.1	Temperature Rising Characteristics of Strong Microwave Absorbing Materials	65
4.2.2	Temperature Rising Characteristics of Weak Microwave Absorbing Materials	70

4.3	Temperature Rising Characteristics of Heterogeneous Materials in Microwave Field	72
4.3.1	Temperature Rising Characteristics of Heterogeneous Materials of Basic Cobalt Carbonate	72
4.3.2	Temperature Rising Characteristics of Heterogeneous Materials of Ammonium Metavanadate	75
4.3.3	Temperature Rising Characteristics of Heterogeneous Materials of Three Ammonium Uranyl Carbonate	77
4.3.4	Temperature Rising Characteristics of Heterogeneous Materials of Ammonium Uranate	78
4.3.5	Temperature Rising Characteristics of Converter steel slag	79
	References	81
Chapter Five	Calcination of Strong Microwave Absorbing Materials	82
5.1	Preparations of Materials of Microwave Calcination	83
5.1.1	Preparation of Magnesium Oxide by Microwave Calcination	83
5.1.2	Preparation of Zinc Oxide by Microwave Calcination	86
5.1.3	Preparation of Molybdenum Oxide by Microwave Calcination	88
5.1.4	Preparation of Tungsten Oxide by Microwave Calcination	90
5.1.5	Preparation of Superfine Iron Oxide by Microwave Calcination	92
5.1.6	Preparation of Carbon/Carbon Composite by Microwave Calcination ...	93
5.1.7	Preparation of Vanadium Catalyst of Sulfuric Acid Industry by Microwave Calcination	97
5.2	Wastes Disposal by Microwave Calcination	98
5.3	Other Materials Treatments by Microwave Calcination	100
5.4	Advantages of Microwave Calcination and Existing Problems	102
	References	102
Chapter Six	Calcination of Weak Microwave Absorbing Materials	106
6.1	Microwave Assisted Heating Method of Weak Microwave Absorbing Materials	106
6.1.1	Method One: Adding Strong Microwave Absorbing Materials	106
6.1.2	Method Two: Picket Fence Method	107
6.1.3	Method Three: Lining Silicon Carbide Microwave Absorber	108
6.1.4	Method Four: M. C. Patterson Method	109

6.1.5	Method Five: Using Adjustable Microwave Coupling Window for Single Mode Cavity	110
6.2	Calcination of Basic Cobalt Carbonate	111
6.2.1	Characteristics of Thermal Decomposition	111
6.2.2	Conventional Calcination	113
6.2.3	Microwave Calcination	120
6.3	Calcination of Ammonium Metavanadate	125
6.3.1	Characteristics of Thermal Decomposition	125
6.3.2	Conventional Calcination	127
6.3.3	Microwave Calcination	133
6.4	Calcination of Cobalt Oxalate	138
6.4.1	Characteristics of Thermal Decomposition	138
6.4.2	Conventional Calcination	139
6.4.3	Microwave Calcination	144
6.5	Calcination of Ammonium Uranyl Carbonate	149
6.5.1	Characteristics of Thermal Decomposition	149
6.5.2	Conventional Calcination	151
6.5.3	Microwave Calcination	159
6.6	Calcination of Ammonium Duranate	166
6.6.1	Characteristics of Thermal Decomposition	166
6.6.2	Conventional Calcination	167
6.6.3	Microwave Calcination	174
6.7	Basic Nickel Carbonate by Microwave Calcination	181
6.8	Calcination of Aluminium Hydroxide by Microwave Irradiation	184
6.9	Comparison of Conventional Calcination and Microwave Calcination	188
	References	189
Chapter Seven	Equipments of Microwave Calcination	192
7.1	Overview of Microwave Transparent Materials	192
7.1.1	Low, Medium Temperature Microwave Transparent Materials	192
7.1.2	High Temperature Microwave Transparent Materials	193
7.2	Special Bearing Materials for Microwave High Temperature Metallurgy	193