

微波助磨 与 微波助浸 技术

刘全军 陈景河 编著

冶金工业出版社

微波助磨与微波助浸技术

刘全军 陈景河 编著

北 京

冶金工业出版社

2005

内 容 简 介

本书是将微波技术与磨矿技术和氰化浸金技术相结合,涉及微波加热技术在矿物加工领域的应用与发展。本书在介绍了微波的基本概念和微波加热的基本理论的基础上,利用微波的快速加热和选择性加热作用,系统研究了微波预处理对微波场中矿石的加热特性、矿石结构、矿石强度、磨矿特性及难处理金矿浸金过程的影响。

本书共分5章,包括微波及微波元件,微波加热与微波加热设备,微波对矿物的选择性加热作用,微波助磨技术,难处理金矿的微波助浸技术。

本书对微波高新技术的应用开发具有一定的指导作用,可供从事矿物加工及稀贵金属提取等专业的科研、设计人员,企业的工程技术人员和高等院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波助磨与微波助浸技术/刘全军,陈景河编著.

北京:冶金工业出版社,2005.1

ISBN 7-5024-3645-6

I. 微… II. ①刘…②陈… III. 微波技术—应用—选金 IV. TD92

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第113340号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

责任编辑 郭庚辰(13693126653) 美术编辑 王耀忠

责任校对 卿文春 李文彦 责任印制 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷:冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2005年1月第1版,2005年1月第1次印刷

850mm×1168mm 1/32;4.375印张;115千字;127页;1-2500册

16.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序

中国是一个矿业大国，许多矿种储量在世界位列前茅。在矿物加工工程与金属提取方面，具有较强的科学研究实力，取得了许多重要的、在国际国内都非常有影响的研究成果，撰写出版了许多优秀的学术专著。呈现在我们面前的由刘全军、陈景河两位同志编著的《微波助磨与微波助浸技术》一书，是一本有特色的高水平的学术专著。

粉磨过程的节能降耗和高砷高硫微细粒浸染状包裹金难处理矿石的提金技术，是矿物加工和金属提取领域的两大技术难题。这本专著抓住了解决这两个问题的共同核心：那就是如何增多、扩大矿石体系的裂纹。既可以改变矿石的机械力学性能，提高粉磨效率；又可以使包裹体打开，便于浸金药剂的渗透与扩展，改善浸金效果。而实现的手段就是微波的快速加热和选择性加热技术。将微波这一高新技术应用到矿物加工与金属提取领域，研究非常具有前瞻性。

本书的特点主要表现在以下几个方面：（1）突出一个“新”字。将微波这一高新技术应用于矿物加工工程领域，研究思路新，应用范围新，获得成果新。（2）较系统地研究了微波助磨与微波助浸的理论。研究了微波辐射与矿石的硬度、微裂纹、选择性磨矿、磨矿规律、磨矿效果以及浸金效果的关系。（3）较系统地测试了微波场中各种纯矿物的升温特性。（4）介绍了前人关于微波加热的技术与设备，使专著更具系统性。

刘全军同志是一位年富力强、朝气蓬勃的青年学术骨干，在矿物加工工程领域的研究中，具有较高的学术造诣。

陈景河同志既是一个大集团公司的董事长，又是一名学者，担任多所著名大学的教授。他不仅承担着一些重要的科研任务，而且还领导着一支学术队伍，培养年轻的科技工作者多出成果、快出成果。相信他们在今后还会继续努力，取得更多的学术成就，为矿物加工与金属提取学科的发展，做出新的贡献。

中国工程院院士

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of several bold, sweeping strokes that form the characters '陈景河'.

2004年10月16日

前言

粉体工程自 20 世纪 80 年代以来，已成为一门独立的学科，它广泛应用于矿业、建材、化工、医药、食品等许多工业领域，并成为这些领域中不可缺少的重要组成部分。但同时，粉体工程投资大，能耗极高。据报道，用于粉磨作业的能耗占世界总能耗的 5%，用于矿石加工中碎矿与磨矿作业的能耗又占这一总能耗的 60%。在这巨大的能量消耗中，真正用于矿石生成新生表面积的能量仅占 1%，其他大部分均以发声、发热和摩擦等形式损失了。因此，基于价值和能源等共同的问题，人们便十分注意研究如何提高碎磨效率，增加产量，降低能耗。

影响碎磨作业的因素主要有两大类：一是原矿性质，主要是原矿的物理力学性能；二是工艺操作条件。原矿性质是本质的，矿石硬度的大小，微裂纹等缺陷的多少，将直接决定磨矿的好坏。工艺条件则是实现磨矿作业的手段。因而，只要我们从碎磨的本质入手，通过一定的手段，预先改变矿石的物理力学性能，为后续的粉磨作业创造有利条件，从而实现提高粉磨效率。

微波助磨是这一观点的具体体现。微波是一种高频电磁波，它能渗透到物体内部，使物质分子产生取向极化和变形极化，极化方向随频率不断变化，而出现物体的自加热效应，温度随之升高。但是，组成矿石中的各矿物性质不同，吸波特性各异，从而导致矿石中有温度梯度；加之各矿物的热膨胀性不同，势必产生热裂等现象，使矿石体系中原有的微裂纹扩展并产生更多的微裂纹，降低了矿石的硬度，从而为后续的粉磨作业创造了有利条件。

同样，难处理金矿浸金困难的原因虽然很多，但主要原因还

是金被其他矿物包裹无法与氰化药剂接触，影响了金的溶解速度；或溶液中耗氰、劫金物质太多，使浸出无法正常进行。通过微波对矿石的预处理，可以使包裹金暴露，便于浸金药剂与金反应；或钝化、进一步消除有害物质的影响，提高氰化浸金效果。

微波作为一种能源来进行加热和干燥及在通讯、医药和食品等工业应用了近30年。但在磨矿领域的研究却是一门新型学科。它将微波这一高新技术与矿物加工工程相结合，开辟了一条提高磨矿效果、提高难处理金矿的氰化浸金能力的新途径，并推动高科技在选矿中的应用及发展。

本书可供矿物加工工程专业及稀贵金属提取专业及相关专业的教师、研究生，科研部门和生产厂矿的科研人员使用，同时也希望在推动微波技术在矿物加工领域的应用中起到抛砖引玉的作用。

由于作者水平有限，书中的不妥之处，敬请批评指正，并欢迎共同探讨。

本书是以作者的博士论文为基础进一步编写而成的，书中还引用了有关研究者所发表的文献。研究中，得到云南省自然科学基金的资助，得到钱鑫教授、王文潜教授、唐荣教授的鼓励与指导，在此，表示感谢。对本书所引用文献的原作者表示衷心的感谢。在成书过程中，得到福建紫金矿业有限责任公司、博士后科研工作站的大力支持，表示衷心的感谢。

作 者

2004年9月10日

目 录

1 微波及微波元件	(1)
1.1 微波的基本概念	(1)
1.2 微波的产生	(3)
1.2.1 磁控管的结构	(4)
1.2.2 磁控管工作原理	(5)
1.2.3 速调管的结构	(8)
1.2.4 多腔速调管工作原理	(9)
1.3 微波的传输	(10)
1.3.1 场的分布及波型	(11)
1.3.2 波的传输条件	(12)
1.4 常用微波元件	(14)
1.4.1 测量线	(15)
1.4.2 环流器	(15)
1.4.3 衰减器	(16)
1.4.4 全匹配负载	(16)
1.4.5 定向耦合器	(17)
1.4.6 阻抗变换器	(18)
1.4.7 天线辐射器	(19)
2 微波加热和微波加热设备	(20)
2.1 微波加热原理	(20)
2.2 微波加热设备	(23)
2.2.1 驻波场谐振腔加热器	(24)
2.2.2 行波场波导加热器	(26)
2.2.3 辐射型微波加热器	(31)

2.2.4	慢波型微波加热器	(33)
2.3	加热器的选择	(37)
2.3.1	频率的选定	(37)
2.3.2	加热器形式的选定	(38)
3	微波对矿物的选择性加热作用	(39)
3.1	物料吸收和反射微波能量	(39)
3.2	纯矿物的升温特性研究	(41)
3.3	升温速率方程的推导	(45)
3.4	微波加热时矿石体系中温度梯度及温度分布	(51)
3.5	微波升温过程中的粒度效应	(55)
4	微波助磨技术	(58)
4.1	微波加热改变矿石的强度	(58)
4.2	微波场中矿石热应力的理论分析	(65)
4.3	微波辐射对矿石可磨度的影响	(73)
4.4	微波辐射强化选择性磨矿	(76)
4.4.1	微波辐射下的单矿物磨矿行为	(77)
4.4.2	微波辐射下混合物料的磨矿行为	(81)
4.5	微波对实际矿石的助磨作用	(83)
4.6	微波辐射后的磨矿规律研究	(87)
5	难处理金矿的微波助浸技术	(91)
5.1	难浸金矿石的地质成因	(91)
5.2	金及金矿物难浸原因分析	(96)
5.2.1	金矿化组合的复杂性与难选冶金矿石形成的 地质原因	(96)
5.2.2	难浸金矿石的矿物学原因	(97)
5.3	难浸金矿石的预处理方法	(101)
5.3.1	氧化焙烧	(102)
5.3.2	热压氧化法	(103)
5.3.3	生物氧化法	(104)
5.3.4	化学氧化法	(107)

5.3.5	微波预处理法	(108)
5.3.6	其他预处理方法	(109)
5.3.7	几种常见预处理方法的选择	(109)
5.4	微波助浸	(111)
5.4.1	含碳微细粒金矿石微波助浸技术	(111)
5.4.2	难处理浮选金精矿的微波助浸技术	(114)
5.4.3	难处理混合型金矿石微波助浸技术	(122)
参考文献		(125)

1 微波及微波元件

1.1 微波的基本概念

当带电系统的电荷或电流不断随时间变化，则系统产生的电场和磁场也随时间变化。由于变化的电场在其周围激起磁场，变化的磁场也在其周围激起电场，这种变化的电场和磁场就向系统的周围空间传播出去。这种运动着的电磁场称为电磁波。任何电磁振荡系统都是辐射电磁波的波源。

电磁场是一种能量形式，所以电磁波的传播必然伴随着能量的传播。

微波就是一种电磁波。图 1-1 是电磁波谱，可以看到，随着

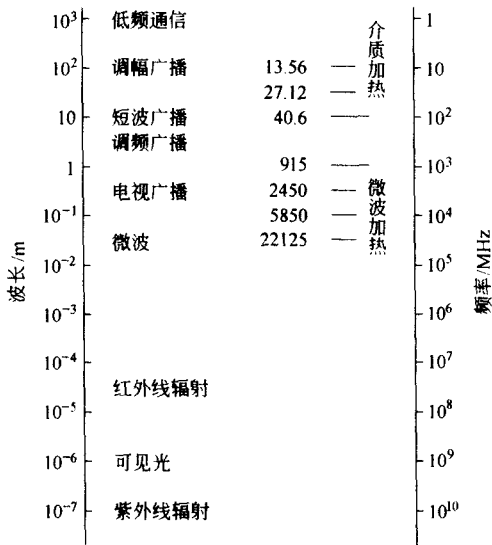


图 1-1 电磁波谱

无线电技术的不断发展和通信容量的增加，在无线电通信中使用波长越来越短的电磁波，逐步由长波、中波、短波、超短波向微波以至光波发展。当然，通常微波包括的波长范围并没有明显的界限，一般是指分米波、厘米波和毫米波3个波段。也就是波长从1mm左右到1m左右的电磁波，可见，微波波段的低频端与普通无线电波中超短波的高频端（波长为1m，频率为300GHz）相毗邻，而高频端则与红外线的低频端（波长为1mm，频率为300GHz；或波长为0.1mm，频率为300GHz）相衔接。由于微波频率很高，所以有时也称微波叫超高频电磁波，表1-1给出了微波各波段的名称、波长和频率范围，以及它们的频段名称。

表 1-1 微波波段的划分

波段名称	波长范围	频率范围/GHz	频段名称
分米波	1m ~ 10cm	0.3 ~ 3	特高频 (UHF)
厘米波	10cm ~ 1cm	3 ~ 30	超高频 (SHF)
毫米波	1cm ~ 1mm	30 ~ 300	极高频 (EHF)
亚毫米波	1 ~ 0.1mm	300 ~ 3000	超极高频

在实际应用中，还常把微波波段划分为更细的波段，并用拉丁字母作为各分段的代号和称谓；表1-2列出了两种表示法以及两者之间的对应关系，但由于各文献所用代号和它所表示的频率范围并不完全相同，所以该表仅供参考。

表 1-2 微波中的常用波段

波段	频率范围/GHz	波段	频率范围/GHz	波段	频率范围/GHz
UHF	0.3 ~ 1.12	X	8.2 ~ 12.4	M	50.0 ~ 75.0
L	1.12 ~ 1.7	K _U	12.4 ~ 18.0	E	60.0 ~ 90.0
L ₅	1.7 ~ 2.6	K	18.0 ~ 26.5	F	90.0 ~ 140.0
S	2.6 ~ 3.95	K _s	26.5 ~ 40.0	G	140.0 ~ 220.0
C	3.96 ~ 5.85	Q	33.0 ~ 50.0	R	220.0 ~ 325.0
X _C	5.85 ~ 8.2	U	40.0 ~ 60.0		

由于微波的波长和频率范围均较宽，导致它在不同的范围内具有很多独到的性质，利用这些性质，使微波在不同领域中均得到了极好的应用。其中微波加热就是利用某一波段的特殊性质来实现的。表 1-3 是供工业、科学和医学使用的微波加热的微波频率。

表 1-3 供工业、科学和医学使用的微波加热的微波频率

频率/MHz	波段	中心波长/m	频率/MHz	波段	中心波长/m
890 ~ 940	L	0.330	5725 ~ 5875	C	0.052
2400 ~ 2500	S	0.122	22000 ~ 22250	K	0.008

据了解，目前已被广泛使用的仅有 915MHz 和 2450MHz 两个微波频率。在较高的两个频段尚无大功率的工业设备。

微波不同于普通的无线电技术，在微波系统中，元件的电性质不能认为是集总的，电容和电感的概念已不再适用，甚至“电流”、“电压”的概念亦失去其确切的含义。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。

1.2 微波的产生

微波能通常由直流电或 50Hz 交流电通过某一特殊的器件来获得。虽然产生微波能量的器件有很多种，但主要是电子管和半导体器件。在电子管器件中能产生大功率微波能量的主要有磁控管，速调管，微波三、四极管等等。相比之下，由于微波三、四极管本身结构较为复杂，使用时还要外加谐振腔，而且频率在 900MHz 以上要获得千瓦以上的功率比较困难，因此限制了它在微波加热上的应用；半导体器件在获得微波大功率方面与电子管相比至少相差三个数量级，无法获得几十千瓦的微波功率。因此，在目前和将来的一段时间内，微波加热领域特别是工业运用中，主要使用的是磁控管和速调管。

1.2.1 磁控管的结构

磁控管通常具有一个以高导电率无氧铜做成的阳极，一个发射电子的直热式或间热式阴极，如图 1-2 所示。

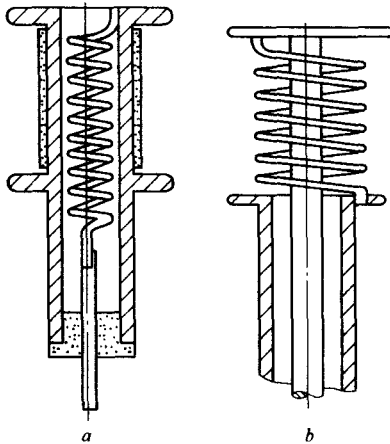


图 1-2 阴极

a—直热式；*b*—间热式

阳极同时又是产生高频振荡的谐振回路，类似于高频发射机中槽路的职能。在阴极与阳极之间是电子作用空间。在这一空间上，要加有均匀的、与阴极轴线相平行的强磁场。磁场通常由两种方式来产生。在小功率磁控管里往往采用永久磁铁，大功率磁控管则更普遍地使用电磁铁。微波能量的输出一般有 3 种形式，如图 1-3 所示：(1) 同轴输出（图 1-3*a*）；(2) 波导输出（图 1-3*b*）；(3) 天线辐射器—转换到波导（图 1-3*c*）。

为了保证作用空间的磁场均匀及减少磁漏，在磁控管的两端带有软铁制成的磁极并构成电子管外壳的一部分。磁控管阴极根据不同的设计通常有以下几种形式：

- (1) 氧化物阴极；
- (2) 以钨为基体渗有活性物质的阴极；

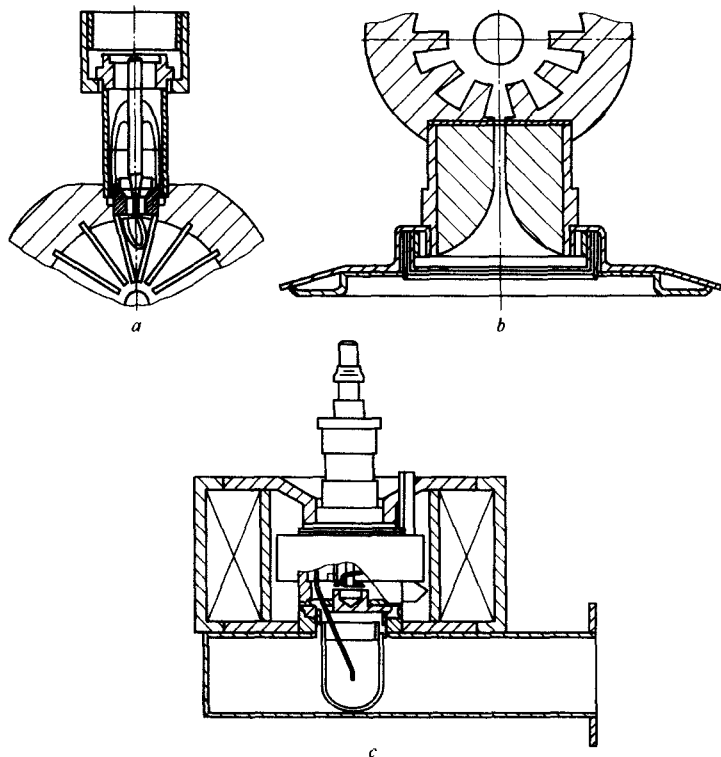


图 1-3 磁控管典型输出的几种形式
a—同轴输出；*b*—波导输出；*c*—天线辐射器-转换到波导

- (3) 钍钨阴极；
- (4) 纯钨阴极。

其中，(1)、(2)种阴极常做成间热式。(3)、(4)种常做成直热式。

1.2.2 磁控管工作原理

当磁控管阴极与阳极间存在着一定的直流电场时，从阴极发射的电子受阳极上正电位加速而向阳极移动，移动速度正比

于电压的二分之一次方。由于空间存在着磁场，磁场方向正好与电场方向垂直，同时也与电子运动方向垂直。众所周知，当带电体在垂直磁场中运动时，将受到磁力的作用，该作用力与磁场及电子的运动方向垂直。因此，当电子离开阴极向阳极移动时受到磁力的作用，结果使电子偏离原来的方向而呈圆周状运动。不同的磁场及电场比值使电子具有不同的圆周运动半径。显然，过低的电场或过高的磁场，使电子飞离阴极绕圆弧运动后仍然回到阴极。在某一特定的电压及磁场值，正好电子能绕阴极旋转（可以大致认为运动的圆周半径大于阴极的半径而小于阳极的半径）。在这两种情况下，虽然在阴极和阳极间加有直流电压，但是在外电路里将不出现阳极电流。只有当阳极电压超过某一电压值时，在外电路里才会出现电流。这一状态称之为临界状态。如果阳极电压继续升高，那么电子运动的半径超过了阳极半径，电子在作用空间又不能绕圆周运动而是直接打到阳极上去。我们需要的也就是能进行能量交换的只是电子能绕圆周运动的状态。谐振腔类似于高频发射机中电感线圈与电容器所组成的谐振回路或称“槽路”。在磁控管工作时，相邻谐振腔高频磁场方向相反，其翼片上的高频电场方向也相反。即在二相邻谐振腔间有 180° 的相位差。因此，可以认为，在阴极面上发射的电子，如果是处于正电场的翼片为负的位置，电子就比没有高频场时慢。当电子受磁场作用力而绕反时针方向旋转时，正高频场附近出发的电子将会追赶负高频场附近出发的电子。相反，负高频场附近出发的电子则由于减速，而好似在等待追上来的电子。其结果便是在作用场空间出现运动的电子“云集”现象，这种密集的电子云，沿着阴极轴心而旋转着。

要维持高频振荡，还必须使电子云的旋转有一定的速度，使电子从这一翼片飞到下一翼片时，翼片上的高频场正好改变一次方向，即所需时间为振荡周期的二分之一。为使电子获得这一速度所要加的阳极电压称为同步电压。

现在再看一看阳极板上谐振腔的作用，在如图 1-4 中，磁控管有 10 个谐振腔，每一个当电子旋转到谐振腔翼片附近时，如果正好翼片处于负高频场，那么将对电子呈排斥作用而使电子速度降低，由于电子降低速度而丧失的能量实际上激励了高频场，从而将能量交给了高频场，即运动的动能转化为磁场的势能。电子向阳极飞去。当然，在磁控管中，电子并没撞到阳极上，而是由于受磁场作用力重新返回到阴极附近，它的动能又变成了势能，这样一来重又受阳极电压的加速而飞回阳极进行第二次能量交换。但必须注意到，每次进行能量交换，都有一个能量损失，直到最后，电子的位能越来越少而飞不动，落到阳极上而将剩余的能量变成热能耗散在阳极上。但也有这样一些电子，从阴极出发不是把能量交给高频场，而是从高频场得

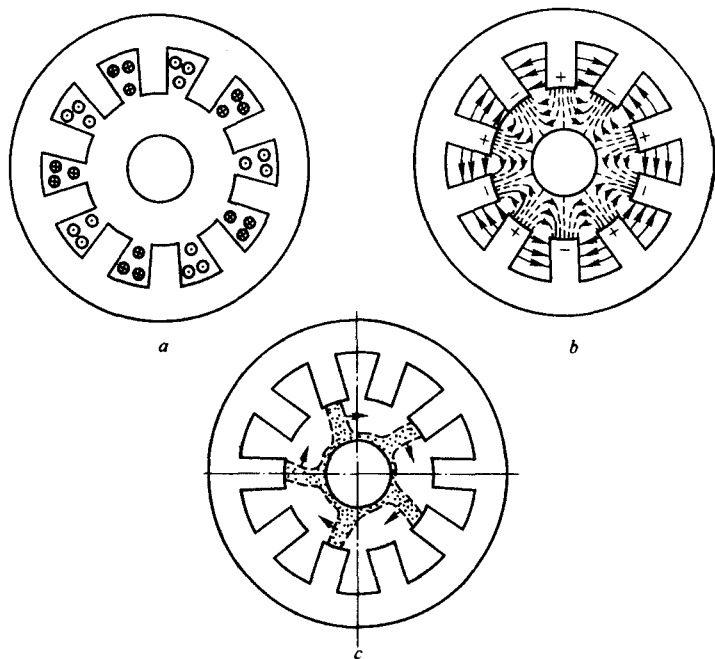


图 1-4 谐振腔 π 模的电磁场分布