

# 介 质 和 半 导 体 高 頻 加 热

[苏联]A. B. 涅图什尔 Б. Я. 茹霍維茨基

B. H. 庫金 E. П. 帕林 著

蕭 人 譯

## 內 容 簡 介

本书討論与高频电场中加热各种工业材料有关的一些問題。

在一般地介紹介质加热的应用范围之后，对在电容器电场內加热材料的装置，还叙述了奠定其計算和設計基础的基本物理規律。

书中十分重视各种材料在高频电场下参量測定的特点，同时为了降低工业高频装置的干扰影响，提出了关于屏蔽的一些建議。

本书适用于从事电热工作的工程技術人員和科研人員，也可作为高等院校高年級学生的参考书。

## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ НАГРЕВ ДИЭЛЕКТРИКОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

〔苏联〕А. В. Негушиц Б. Я. Жуховицкий

В. Н. Кулин Е. П. Парини

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1959 第二版

\*

### 介质和半导体高频加热

蕭 人 譯

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168  $\frac{1}{32}$  印張 12  $\frac{13}{16}$  328 千字

1965年11月第一版 1965年11月第一次印刷 印数：0,001—2,288册

統一书号：15034·1026 定价：（科七）2.10 元

# 目 录

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 前言 .....                       | 7   |
| 第一章 介质和半导体高频加热工业应用的范围 .....    | 9   |
| 1-1 问题的历史 .....                | 9   |
| 1-2 加速烘干 .....                 | 13  |
| 1-3 加速熔化和热反应 .....             | 19  |
| 1-4 生物学作用和热机械作用 .....          | 24  |
| 第二章 电容器电场中的电流和极化 .....         | 29  |
| 2-1 自由电荷和束缚电荷 .....            | 29  |
| 2-2 传导电流 .....                 | 30  |
| 2-3 极化现象 .....                 | 32  |
| 2-4 材料中的传导电流和位移电流 .....        | 43  |
| 2-5 层状半导体材料的极化 .....           | 47  |
| 2-6 电场中的内部热源 .....             | 52  |
| 第三章 交变电场内的材料的参量 .....          | 56  |
| 3-1 均匀半导体材料中的正弦电流 .....        | 56  |
| 3-2 高频电场中的有功和无功功率密度 .....      | 61  |
| 3-3 材料参量的频率特性 .....            | 64  |
| 3-4 材料参量的温度特性 .....            | 77  |
| 3-5 多相材料的参量 .....              | 80  |
| 第四章 交变电场内材料参量的测量 .....         | 100 |
| 4-1 电桥法 .....                  | 100 |
| 4-2 谐振法 $Q$ 表 .....            | 104 |
| 4-3 电路寄生元件对测量结果的影响 .....       | 114 |
| 4-4 利用 $Q$ 表测量时样品最佳电容的选定 ..... | 119 |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 4-5 測量綫 .....                           | 122 |
| 第五章 材料中功率密度的分布 .....                    | 128 |
| 5-1 材料中热源分布不均匀的原因 .....                 | 128 |
| 5-2 研究材料中的場的方法 .....                    | 131 |
| 5-3 平行板电容器电場中的不均匀材料內的功率分布 .....         | 132 |
| 5-4 紧貼材料表面的电极系統的电場中均匀<br>材料內的功率分布 ..... | 140 |
| 5-5 离开材料表面的电极系統的电場中均匀<br>材料內的功率分布 ..... | 151 |
| 5-6 局部不均匀性所引起的电場畸变 .....                | 163 |
| 5-7 材料的各向异性对电場分布的影响 .....               | 170 |
| 5-8 波动过程造成的功率密度分布的不均匀性 .....            | 177 |
| 第六章 材料中的溫度分布 .....                      | 194 |
| 6-1 热傳导方程 .....                         | 194 |
| 6-2 平板的加热 .....                         | 197 |
| 6-3 层状結構的加热 .....                       | 203 |
| 6-4 某些有代表性的不均匀加热状态 .....                | 211 |
| 6-5 圓柱形不均匀性附近的溫度上升 .....                | 215 |
| 6-6 球形不均匀性的溫度場的計算 .....                 | 220 |
| 6-7 旋轉橢圓体的加热 .....                      | 225 |
| 6-8 具有非綫性参量的材料的加热 .....                 | 227 |
| 第七章 以被加热材料作为振蕩器負載 .....                 | 229 |
| 7-1 被加热材料中的能量平衡 .....                   | 229 |
| 7-2 紧貼材料表面的电极系統的負載阻抗 .....              | 236 |
| 7-3 离开材料表面的电极系統的負載阻抗 .....              | 243 |
| 7-4 电場分布有波动特性时的負載阻抗 .....               | 252 |
| 第八章 高频电子管振蕩器的部件及其工作状态 .....             | 254 |
| 8-1 用于介质加热的高频振蕩器的特点 .....               | 254 |
| 8-2 三极管的静态和动态特性曲綫 .....                 | 256 |
| 8-3 三极管工作状态的計算 .....                    | 263 |
| 8-4 电子管的并联和推挽連接 .....                   | 269 |
| 8-5 振蕩迴路 .....                          | 271 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第九章 自激振蕩器 .....             | 275 |
| 9-1 自激振蕩器的自激条件 .....        | 275 |
| 9-2 单調諧迴路自激振蕩器 .....        | 281 |
| 9-3 阳极供电电路和栅极偏压电路 .....     | 285 |
| 9-4 双調諧迴路自激振蕩器 .....        | 289 |
| 9-5 自激振蕩器的頻率特性曲綫 .....      | 291 |
| 第十章 工业振蕩器的負載匹配 .....        | 306 |
| 10-1 单調諧迴路振蕩器的負載匹配 .....    | 306 |
| 10-2 双調諧迴路振蕩器的負載匹配 .....    | 311 |
| 10-3 工业装置 .....             | 319 |
| 10-4 振蕩器工作状态的自动微調 .....     | 332 |
| 第十一章 无綫电干扰的抑制 .....         | 339 |
| 11-1 問題的提出 .....            | 339 |
| 11-2 屏蔽 .....               | 341 |
| 11-3 屏蔽罩的接地 .....           | 348 |
| 11-4 电力网的滤波 .....           | 349 |
| 11-5 高频装置所产生的无綫电干扰的抑制 ..... | 351 |
| 11-6 綜合抑制无綫电干扰的概念 .....     | 352 |
| 11-7 屏蔽的一般指示和屏蔽罩的结构元件 ..... | 354 |
| 第十二章 工业用电子管振蕩器的調整和使用 .....  | 366 |
| 12-1 工业用振蕩器的試用和調整 .....     | 366 |
| 12-2 寄生振蕩及其消除方法 .....       | 373 |
| 12-3 調整和使用高频振蕩器时的測量 .....   | 375 |
| 12-4 电子管振蕩器的維護和安全技术 .....   | 382 |
| 附录 自激振蕩器的計算 .....           | 385 |
| 参考文献 .....                  | 398 |

# 介质和半导体高频加热

[苏联]A. B. 涅图什尔 Б. Я. 茹霍維茨基

В. Н. 庫金 Е. П. 帕林 著

蕭 人 譯

## 內 容 簡 介

本书討論与高频电場中加热各种工业材料有关的一些問題。

在一般地介紹介质加热的应用范围之后，对在电容器电場內加热材料的装置，还叙述了奠定其計算和設計基础的基本物理規律。

书中十分重视各种材料在高频电場下参量測定的特点，同时为了降低工业高频装置的干扰影响，提出了关于屏蔽的一些建議。

本书适用于从事电热工作的工程技術人員和科研人員，也可作为高等院校高年級学生的参考书。

## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ НАГРЕВ ДИЭЛЕКТРИКОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

[苏联] А. В. Негушил Б. Я. Жуховицкий

В. Н. Кулин Е. П. Парини

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1959 第二版

\*

### 介质和半导体高频加热

蕭 人 譯

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可証出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168  $1/32$  印張 12  $13/16$  328 千字

1965年11月第一版 1965年11月第一次印刷 印数：0,001—2,288册

統一书号：15034·1026 定价：(科七) 2.10 元

# 目 录

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 前言 .....                       | 7   |
| 第一章 介质和半导体高频加热工业应用的范围 .....    | 9   |
| 1-1 问题的历史 .....                | 9   |
| 1-2 加速烘干 .....                 | 13  |
| 1-3 加速熔化和热反应 .....             | 19  |
| 1-4 生物学作用和热机械作用 .....          | 24  |
| 第二章 电容器电场中的电流和极化 .....         | 29  |
| 2-1 自由电荷和束缚电荷 .....            | 29  |
| 2-2 传导电流 .....                 | 30  |
| 2-3 极化现象 .....                 | 32  |
| 2-4 材料中的传导电流和位移电流 .....        | 43  |
| 2-5 层状半导体材料的极化 .....           | 47  |
| 2-6 电场中的内部热源 .....             | 52  |
| 第三章 交变电场内的材料的参量 .....          | 56  |
| 3-1 均匀半导体材料中的正弦电流 .....        | 56  |
| 3-2 高频电场中的有功和无功功率密度 .....      | 61  |
| 3-3 材料参量的频率特性 .....            | 64  |
| 3-4 材料参量的温度特性 .....            | 77  |
| 3-5 多相材料的参量 .....              | 80  |
| 第四章 交变电场内材料参量的测量 .....         | 100 |
| 4-1 电桥法 .....                  | 100 |
| 4-2 谐振法 $Q$ 表 .....            | 104 |
| 4-3 电路寄生元件对测量结果的影响 .....       | 114 |
| 4-4 利用 $Q$ 表测量时样品最佳电容的选定 ..... | 119 |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 4-5 測量綫 .....                           | 122 |
| 第五章 材料中功率密度的分布 .....                    | 128 |
| 5-1 材料中热源分布不均匀的原因 .....                 | 128 |
| 5-2 研究材料中的場的方法 .....                    | 131 |
| 5-3 平行板电容器电場中的不均匀材料內的功率分布 .....         | 132 |
| 5-4 紧贴材料表面的电极系統的电場中均匀<br>材料內的功率分布 ..... | 140 |
| 5-5 离开材料表面的电极系統的电場中均匀<br>材料內的功率分布 ..... | 151 |
| 5-6 局部不均匀性所引起的电場畸变 .....                | 163 |
| 5-7 材料的各向异性对电場分布的影响 .....               | 170 |
| 5-8 波动过程造成的功率密度分布的不均匀性 .....            | 177 |
| 第六章 材料中的溫度分布 .....                      | 194 |
| 6-1 热傳导方程 .....                         | 194 |
| 6-2 平板的加热 .....                         | 197 |
| 6-3 层状結構的加热 .....                       | 203 |
| 6-4 某些有代表性的不均匀加热状态 .....                | 211 |
| 6-5 圆柱形不均匀性附近的溫度上升 .....                | 215 |
| 6-6 球形不均匀性的溫度場的計算 .....                 | 220 |
| 6-7 旋轉橢圓体的加热 .....                      | 225 |
| 6-8 具有非綫性参量的材料的加热 .....                 | 227 |
| 第七章 以被加热材料作为振蕩器負載 .....                 | 229 |
| 7-1 被加热材料中的能量平衡 .....                   | 229 |
| 7-2 紧贴材料表面的电极系統的負載阻抗 .....              | 236 |
| 7-3 离开材料表面的电极系統的負載阻抗 .....              | 243 |
| 7-4 电場分布有波动特性时的負載阻抗 .....               | 252 |
| 第八章 高频电子管振蕩器的部件及其工作状态 .....             | 254 |
| 8-1 用于介质加热的高频振蕩器的特点 .....               | 254 |
| 8-2 三极管的靜态和动态特性曲綫 .....                 | 256 |
| 8-3 三极管工作状态的計算 .....                    | 263 |
| 8-4 电子管的并联和推挽連接 .....                   | 269 |
| 8-5 振蕩迴路 .....                          | 271 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第九章 自激振蕩器 .....             | 275 |
| 9-1 自激振蕩器的自激条件 .....        | 275 |
| 9-2 单調諧迴路自激振蕩器 .....        | 281 |
| 9-3 阳极供电电路和栅极偏压电路 .....     | 285 |
| 9-4 双調諧迴路自激振蕩器 .....        | 289 |
| 9-5 自激振蕩器的頻率特性曲綫 .....      | 291 |
| 第十章 工业振蕩器的負載匹配 .....        | 306 |
| 10-1 单調諧迴路振蕩器的負載匹配 .....    | 306 |
| 10-2 双調諧迴路振蕩器的負載匹配 .....    | 311 |
| 10-3 工业装置 .....             | 319 |
| 10-4 振蕩器工作状态的自动微調 .....     | 332 |
| 第十一章 无綫电干扰的抑制 .....         | 339 |
| 11-1 問題的提出 .....            | 339 |
| 11-2 屏蔽 .....               | 341 |
| 11-3 屏蔽罩的接地 .....           | 348 |
| 11-4 电力网的滤波 .....           | 349 |
| 11-5 高频装置所产生的无綫电干扰的抑制 ..... | 351 |
| 11-6 綜合抑制无綫电干扰的概念 .....     | 352 |
| 11-7 屏蔽的一般指示和屏蔽罩的结构元件 ..... | 354 |
| 第十二章 工业用电子管振蕩器的調整和使用 .....  | 366 |
| 12-1 工业用振蕩器的試用和調整 .....     | 366 |
| 12-2 寄生振蕩及其消除方法 .....       | 373 |
| 12-3 調整和使用高频振蕩器时的測量 .....   | 375 |
| 12-4 电子管振蕩器的維護和安全技术 .....   | 382 |
| 附录 自激振蕩器的計算 .....           | 385 |
| 参考文献 .....                  | 398 |



## 前 言

本书的第二版是在第一版出版以后，经过八年才出版的。

在这段时间内，高频加热技术发生了较大的变化。在苏联，大力扩大了供介质加热用的工业高频振荡器的生产。在塑料工业中应用介质加热获得了广泛的发展。现已制成许多性能良好的装置，用于橡胶的结晶热熔和硫化，各种制件的烘干，木材的粘合，塑料制品的焊接，以及绝缘材料的热处理等。

在建筑、化学、机械制造、煤炭、食品等工业部门，以及在日用品工业和农业中，有关介质加热的科研工作获得了进一步的发展。

介质加热领域内的理论研究已普遍开展，现已得到一些新的资料，并为更充分应用这种新技术做出了必要的总结。

所有这些都使得编写本书第一版时所采取的原则要作某些修改，以便在本书的新版中加入理论和实验研究材料，并充分说明为分析电热装置的运行和计算电热装置时所需的资料。

本书新版的对象不是中等技术人员，而是工作在电热部门内的工程师，科学工作者和高等技术院校的高年级学生。因此，在新版中，要深入讨论作为介质加热基础的物理问题，测量材料电气参数的方法，以及计算被加热材料中的电场和温度场分布等问题。

由于缩减了电子技术方面的基础知识，大大地扩充了对苏联和国外出产的高频振荡器的说明，并叙述为屏蔽高频电热装置防止辐射无线电干扰方面的实际资料。

为了叙述简练起见，在给出大多数计算公式时，未加充分的

数学証明, 只在文中指出推导这些公式的方法和适当的参考文献。这时假定讀者已具有高等技术院校課程範圍內的电工理論基础知识。

对于电工学方面的基础知识較欠缺的讀者來說, 本书也是有用的。在这种情况下, 当閱讀时, 可将某些計算部分省略, 而把注意力放到尽可能用基础知识来叙述的一般物理概念上和一些可用来証实每一种計算, 并用相应图綫表明了的实际結論上。

和第一版一样, 本书不涉及技术經濟核算和不同生产形式的工艺特点等問題, 也未談到用相似理論将實驗室实验数据轉用到所設計的生产装置上的問題, 以及在各种干燥过程中的热交换和物质交换問題。这些問題的闡明是很重要的独立題目, 已超出本书的範圍。

# 第 一 章

## 介质和半导体高频加热工业应用的范围

### 1-1 问题的历史

还在上世紀，就已經清楚地知道，交变电場和磁場会在材料中放出热量。

鉄心中的交变磁通量可导致鉄心发热，而电工設備絕緣体内的电場也可引起絕緣体发热。

科学家和工程师力图防止这种发热，而将轉变为热的能量称为損耗（鉄損耗或介质損耗）。

1886年，И. И. 鮑尔格曼[2-1]研究了电容器玻璃在相继快速充电和放电情况下的发热，他指出，这种发热取决于反复充电的頻率，并近似地与充电电容器极板上的电位差的平方成比例。

但是，在当时的技术水平下，还不能想到这种发热形式的工业应用。

在許多工艺过程中，要求按照与工艺条件有关的一定状态将材料快速加热。在某些情况下，只需要将加工材料中的一部分加热，例如，将材料的表面加热；而在另一些情况下，正相反，要将整个巨形物体均匀加热。

应用瓦斯火焰、热空气或蒸汽进行工艺加热，往往不能滿足这些要求。

依靠热傳导方法对巨形物体全面加热，需要很长的加热時間，并且溫度的分布常常出現不应有的不均匀性。

曾有过許多人企图应用工频电流进行内部工艺加热。例如，H. C. 謝柳金[1-66]記述过，1914年在法国曾試圖用电气加热木材，将木材烘干。在装于电极之間的木材中，通以頻率為20~30

赫的电流，在最初时刻，可将木材加热。可是，这时的热源分布是不均匀的。在电极和木材接触的地方，木材被强烈加热。在与电极接触的地方，木材过热和过分干燥，很快地导致电极与木材絕緣，从而使电流停止。

应用工頻电流进行烘干加热不能得到良好的結果。

只有在电极与被加热材料接触的地方不发生温度过高从而妨碍所需加热状态的情况下，这种形式的加热才可能給出良好的結果。在周圍温度很低的冬季里，为了保证混凝土的施工，对混凝土的电气加热，就是这种例子。苏联工程师在1929~1930年間曾經提出，并在冬季里进行建筑施工时应用了对混凝土和鋼筋混凝土结构的电气加热。在电极中应用很小的电流密度，再将混凝土电气加热的电状态和热状态适当配合，就可以保证混凝土的均匀加热，并給出在戶外任何环境温度下灌澆混凝土的可能性。混凝土的电气加热在建筑施工中获得了广泛的应用[1-11 和 1-34]。

混凝土的电气加热就是成功地应用工頻电流对半导体进行接触电气加热的絕少数实例中的一个。

为了快速和均匀地将材料加热，要求拟定新的加热方法。在这种新加热方法中，要将供电装置和加热零件之间的电接触的影响消除，并且可能在加热零件中获得大量集中的功率。

应用高频电流，便可解决这一问题。

对各种材料的高频加热的研究是在許多實驗室中同时开始的，并很快地得到实际的成果。高频电流在金属材料（导体）和非金属材料（介质和半导体）的加热上得到了应用。

对金属加热时，被加热零件要放在通过高频电流的感应器內。金属中产生的渦流和铁磁体中的磁損耗就引起材料发热。这种形式的加热称为感应加热。

对非金属加热时，被加热材料要放在加有高频电压的电容器极板之間。放在高频电场内的材料中所产生的传导电流和位移电流，就在材料中放出热量，并将材料加热。这种形式的加热称为

介质加热。

感应加热曾經用于表面淬火和回火，金屬的熔炼和焊接，鍛造和冲压时的毛坯加热，无坩埚熔炼悬浮状态下的金屬，以及从金屬中清除杂质等。討論金屬加热不是本书的任务。

用高频电流烘干木材就是在高频的电容器电場內对材料进行工业加热的最初应用領域之一。

目前，应用高频电流与其他加热形式相配合的烘干装置，已經用于烘干木材，在建筑工业中可大大縮短建筑工期。

食品工业是应用电容器电場高频加热的第二个領域。应用高频消毒，由于加热速度提高和加热均匀，可显著改进水果罐头的质量，并有使生产过程自动化的可能性。

目前，正在研究应用高频电流来烘干谷粒，并除去谷粒中的害虫。

有些国家曾用高频加热使橡胶硫化〔1-94 和 1-97〕，預热压制前的塑料，以及粘合木制零件和粘合胶木板等〔1-89〕。

最近十年，介质加热的研究已在各种不同的工业部門內进行。

可以把应用高频电流来获得重要工艺效果的主要过程，分为下列五大类：

1. 烘干（使液体蒸发和加速移动）；
2. 熔化；
3. 热反应；
4. 生物学作用；
5. 热机械作用。

能用介质加热的領域的分类，可用图 1-1 中的图表說明。

在所有这些过程中，应用高频加热可以保证重要的工艺效果，显著提高过程速度，并易于使过程自动化和机械化，但是，应用高频方法往往会产生在經濟上是否合算的疑問。

在电磁波波譜內，从 0.5 到几百兆赫的頻率范围（见图 1-2）被用作介质加热。在某些情况下，要用工頻电流、紅外線、蒸汽

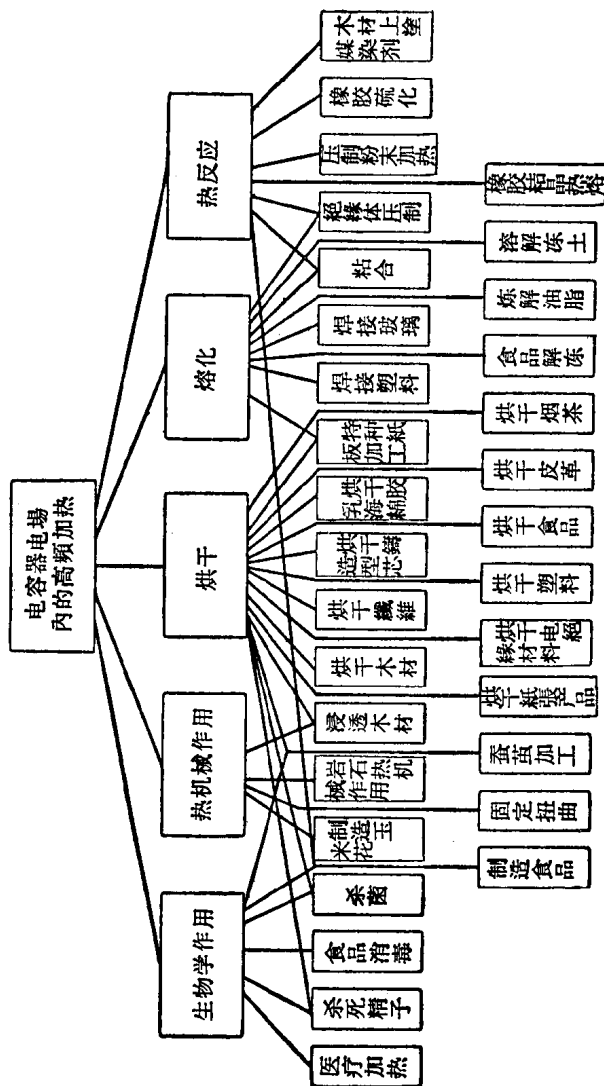


图1-1 能用介质和半导体高频加热的范围