



“十二五”国家重点图书出版规划项目

THE THIRD FUNCTION OF ROTATIONAL ELECTRIC MACHINES—
ELECTRIC-MECHANICAL-THERMAL TRANSDUCER BASED ON
ROTATIONAL ELECTROMAGNETIC EFFECTS

旋转电机第三功能 ——基于旋转电磁效应的机电热换能器

● 程树康 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



“十二五”国家重点图书出版规划项目

THE THIRD FUNCTION OF ROTATIONAL ELECTRIC MACHINES—
ELECTRIC-MECHANICAL-THERMAL TRANSDUCER BASED ON
ROTATIONAL ELECTROMAGNETIC EFFECTS

旋转电机第三功能 ——基于旋转电磁效应的机电热换能器

● 程树康 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书首先回顾了传统电加热的各种方式,在旋转电磁感应加热技术基础上阐述了机电热换能器的基本结构和工作原理;然后基于机电热换能器的电磁热学理论建立了换能器的数学模型,提出了机电热换能器电磁场数值分析、电磁设计及热系统分析方法,介绍了机电热换能器中旋转电磁效应对水煤质的作用、抑垢机理,并对金属电化学腐蚀过程的影响进行了分析;最后介绍了机电热换能器的测试技术及主要工程应用。本书所述机电热换能器,是完全具有我国自主知识产权的原始创新型电磁装置,对其原理的阐述及功能的推广将有助于加速我国环保节能型社会的建设步伐。

本书可供科研院所、高等学校从事旋转电机第三功能研究的工程设计人员、教师、研究生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

旋转电机第三功能:基于旋转电磁效应的机电热换能器/程树康著.

—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2014.12

ISBN 978-7-5603-5073-8

I. ①旋… II. ①程… III. ①机电换能器

IV. ①TN712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 286260 号

策划编辑 王桂芝

责任编辑 李长波 王桂芝

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 14.25 字数 330 千字

版 次 2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-5073-8

定 价 58.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

随着经济社会的迅速发展,能源危机与环境污染已经成为人类所面临的严峻问题。世界各国在努力寻找高效、清洁能源的同时,也在积极改进现有的能耗装置,争取使能量在各个流动环节中都得到最高效率的利用。

旋转电机是一种机电能量转换的电磁机械装置。按照在机电能量转换中所起的作用,旋转电机具有电动和发电两种功能。在能量转换的过程中,旋转电机内部主要存在着电能、机械能、磁场储能和热能四种形态的能量,而热能是旋转电机在能量转换过程中产生的损耗,包括电阻损耗、铁芯损耗、附加损耗和机械损耗等。对旋转电机来说,损耗消耗了输入能量,引起电机发热,使电机效率降低。从旋转电机损耗与温升正问题的研究角度出发,为了提高电机的性能和可靠性,一方面要尽量减少电机的损耗,另一方面要不断改善电机的冷却条件。因此,损耗、温升和散热的计算问题是电机研究和设计人员所要面临的主要和共同问题之一。通过多年的研究,作者团队在这方面已形成一整套有效的计算方法和工程技术对策。

本书从电机损耗与温升的逆问题出发,提供了研究与开发新型旋转机电热换能器的思路和方法:即使旋转电机不输出机械能或电能,而是将输入能量(电能、风能、水能等)完全转化为有效热能输出,并充分利用内部旋转磁场对水媒质的磁化作用,改变水和电解质溶液的物化特性,收到抑垢、阻垢和缓蚀等效果。在此基础上,基于旋转电磁效应探求同时具有电场、磁场、热场、旋转离心力场等的方法和措施,从而满足在传统的膜法海水淡化技术中,温度、压力以及膜等必须具备的物理条件要求,为形成新型海水淡化集成技术提供理论和技术支持。

本书可进一步将电气工程与环境科学有机融合,利用电气工程的理论和方法解决环境科学中的废气、废水、噪声和振动等问题,通过细致深入的研究,形成生态环境电工学理论框架。对旋转电机温升与损耗逆问题进行研究,利用旋转电磁效应拓宽了传统旋转电机的应用范围,实现了旋转电机除发电和电动外的第三功能,无疑在电机领域具有重要的理论价值和实际工程应用意义。

本书是作者结合多年机电热换能器的理论研究和工程实践撰写而成的,主要包括机电热换能器的基本结构和工作原理、设计和计算方法、旋转电磁效应、测试方法和应用实例等内容。全书共分9章:第1章介绍传统的电加热方式、机电热换能器的基本结构和工作原理;第2章介绍电磁学、传热学及常用的计算方法等换能器计算和分析的数学基础;第3章建立机电热换能器的数学模型,介绍换能器的等效磁路模型、稳态运行相量图、电磁场方程等;第4章阐述基于有限元法的换能器热功率算法;第5章提出换能器的电磁设计方法,阐述换能器结构参数和定子结构的选择依据,给出了具体的算例;第6章对换能器的热系统进行分析,包括热网络法和有限元法的建模与计算,换热设计的依据等;第7

章介绍机电热换能器中旋转电磁效应对水媒质的作用、抑垢实验与机理研究,以及对金属电化学腐蚀过程的影响及其分析;第8章介绍换能器转矩、热功率和换热性能的测试平台、测试方法和测试结果;第9章介绍机电热换能器系统的具体应用和样机研制等。

本书是在国家自然科学基金面上项目“基于旋转电机理论的新型机电热换能器及其对水媒质物理处理功能的研究”(50877011)、国家自然科学基金面上项目“基于旋转电磁效应机理的海水淡化集成技术及其实验研究”(51177022)、科技部国际科技合作项目“基于旋转电磁效应海水淡化技术研究”(2008DFR60340)、黑龙江省科技攻关项目“基于风能、水利能及电能等清洁能源综合利用的节能环保型机电热一体化换能器”(2005G0191-00)、黑龙江省装备制造科技创新平台(二期)“旋转电磁热机与海水淡化技术”等项目的支持下完成的,在此表示感谢。

本书由程树康、柴凤、裴宇龙、陈磊、张鹏和于艳君共同撰写,由程树康统稿。限于作者时间和知识的局限性,书中难免会有疏漏或不妥之处,敬请广大同仁和读者指正。

作 者

2014年8月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 电加热方式概述	1
1.2.1 电阻加热方式及其应用	1
1.2.2 电弧加热方式及其应用	4
1.2.3 介质加热方式及其应用	5
1.2.4 红外线加热方式及其应用	6
1.2.5 电子射线加热方式及其应用	7
1.2.6 电磁感应加热方式及其应用	8
1.3 旋转电机第三功能	11
1.3.1 能量守恒原理	11
1.3.2 机电热换能器的结构	12
1.3.3 机电热换能器的工作原理	15
1.4 本章小结	16
第2章 机电热换能器的电磁热学基础	17
2.1 引 言	17
2.2 电磁理论基础	17
2.2.1 麦克斯韦方程组	17
2.2.2 磁场的基本性质与磁路定律	18
2.2.3 铁磁物质的磁化特性	19
2.2.4 旋转磁场	24
2.2.5 损耗	26
2.3 传热学基础	32
2.3.1 相关物理量介绍	32
2.3.2 热交换的形式	32
2.4 常用的计算方法	36
2.4.1 路算法	36
2.4.2 场路结合法	37
2.4.3 场算法	38
2.5 本章小结	40

第3章 机电热换能器的数学模型	41
3.1 引 言	41
3.2 换能器的等效磁路	41
3.3 换能器磁路计算中的主要参数	43
3.4 换能器稳态运行相量图	47
3.5 换能器电磁场方程	49
3.5.1 二维电磁场方程	49
3.5.2 三维电磁场方程	54
3.6 本章小结	61
第4章 机电热换能器电磁场的数值分析	62
4.1 引 言	62
4.2 基于有限元法的换能器热功率计算	62
4.2.1 磁滞热功率	62
4.2.2 涡流热功率	63
4.2.3 电流热功率	63
4.2.4 总热功率	63
4.3 基于有限元法的换能器热功率算例	64
4.3.1 磁滞热功率	65
4.3.2 涡流热功率	66
4.3.3 电流热功率	67
4.3.4 总热功率	67
4.4 换能器的电磁场特性分析	68
4.4.1 闭口槽换能器的电磁场分析	68
4.4.2 开口槽换能器的电磁场分析	72
4.4.3 温度对换能器热功率的影响	75
4.5 本章小结	76
第5章 机电热换能器的电磁设计	77
5.1 引 言	77
5.2 换能器定子热功率透入深度	77
5.2.1 透入深度的定义	77
5.2.2 透入深度对热功率设计的影响	80
5.3 换能器结构参数的选取	80
5.3.1 定子热功率的解析表达式	80
5.3.2 结构参数与热功率的关系	81
5.3.3 不同结构参数样机的热功率比较	85
5.4 换能器定子结构的选取	86
5.4.1 无槽和闭口槽结构的热功率分析	86

5.4.2	开槽结构的热功率分析	88
5.4.3	铜套结构的热功率分析	91
5.4.4	不同定子结构样机的热功率比较	92
5.5	换能器热功率分布规律	93
5.5.1	定子侧铜和铁中热功率的比例	93
5.5.2	定子铁芯中热功率的分布	94
5.5.3	转子和永磁体中的热功率	95
5.6	无槽机电热换能器电磁计算程序和算例	97
5.7	本章小结	101
第6章	机电热换能器的热系统分析	102
6.1	引 言	102
6.2	空气隙机电热换能器的热系统分析	102
6.2.1	集中参数热网络模型	102
6.2.2	稳态热分析	108
6.3	水隙机电热换能器的热系统分析	115
6.3.1	热功率-换热耦合算法	116
6.3.2	功率调整率	120
6.3.3	相关参数对功率调整率的影响	124
6.4	本章小结	129
第7章	机电热换能器的旋转电磁效应	130
7.1	引 言	130
7.2	磁场对纯水和氯化钠溶液特性的影响	130
7.2.1	磁场对纯水作用的分子动力学模拟	130
7.2.2	磁场对氯化钠溶液电导率影响的实验研究	133
7.3	磁场对氯化钠溶液电导率的影响机理	137
7.3.1	电解质溶液的电导率	137
7.3.2	“离子氛”理论	137
7.3.3	离子水化理论	138
7.3.4	外磁场对磁矩的作用	139
7.3.5	影响机理	140
7.4	旋转电磁效应抑垢实验及机理分析	142
7.4.1	实验条件及方案	142
7.4.2	水质变化	144
7.4.3	水垢样厚度变化	145
7.4.4	水垢样成分比较	146
7.4.5	旋转电磁效应抑垢机理	148
7.5	旋转电磁效应对金属流动腐蚀的影响	152
7.5.1	腐蚀试样及腐蚀介质	152

7.5.2	实验方法	153
7.5.3	旋转电磁效应对流动腐蚀的影响	154
7.5.4	流动腐蚀过程	162
7.6	旋转电磁效应对金属电化学腐蚀的影响	164
7.6.1	腐蚀试样及腐蚀介质	164
7.6.2	实验方法	164
7.6.3	旋转电磁效应对电化学腐蚀的影响	164
7.6.4	电化学腐蚀机理	170
7.7	本章小结	173
第8章	机电热换能器的测试技术	174
8.1	引言	174
8.2	换能器转矩及热功率特性的测试技术	174
8.2.1	转矩及热功率特性	174
8.2.2	转矩及热功率的测试	174
8.3	换能器换热性能的测试技术	179
8.3.1	测试系统的构成及原理	179
8.3.2	测试结果及分析	180
8.4	本章小结	185
第9章	机电热换能器系统	186
9.1	引言	186
9.2	机电热换能器系统构成	186
9.3	电磁自热器	187
9.3.1	应用背景	187
9.3.2	基本结构和工作原理	187
9.3.3	能耗评价	189
9.3.4	阻垢、抑垢效果评价	193
9.4	风热转换器	196
9.4.1	应用背景	196
9.4.2	基本结构和工作原理	197
9.5	无焰加热器	201
9.5.1	应用背景	201
9.5.2	基本结构和工作原理	201
9.6	海水淡化器	204
9.6.1	应用背景	204
9.6.2	基本结构和工作原理	205
9.7	本章小结	209
参考文献		210
名词索引		217

第1章 绪 论

1.1 引 言

能源是可以直接或经转换提供给人类所需的光、热、电、动力等任一形式能量的载能体资源。热能是国民经济和人类生活必需的能源之一,以水为热传输媒质的热源是重要的热源类型,从燃煤、燃油和燃气获得热能是传统的热能来源。传统热源在环境保护和能耗等方面均存在不同程度的局限性,在进一步改善和提高传统热源能耗和环境适应性的同时,开发新型热源也是必要和必需的。20 世纪末以来,电能、太阳能、风能以及水利能等清洁能源被现代社会广为接受并加以推广。

电加热是将电能转换为热能的过程。自从发现电源通过导线可以发生热效应之后,世界上就有许多发明家从事于各种电热电器的研究与制造。1910~1925 年是电热电器历史上的大发展阶段,在家庭和工业方面,电热电器各种品种的出现和普及应用都得到了急速的发展,而尤以家庭电器为甚。20 世纪 20 年代以后,电热电器在新的应用发展方面没有前一时多,但是几乎所有的电热电器都被进行了重新设计和不断改良,成为电热电器历史上的提高阶段。

与一般燃料加热相比,电加热可获得较高温度(如电弧加热的温度可达 3 000 °C 以上),易于实现温度的自动控制和远距离控制,可按需要使被加热物体保持一定的温度分布。电加热能在被加热物体内部直接生热,因而热效率高,升温速度快,并可根据加热的工艺要求,实现整体均匀加热或局部加热(包括表面加热),容易实现真空加热和控制气氛加热。在电加热过程中,产生的废气、残余物和烟尘少,可保持被加热物体的洁净,不污染环境。因此,电加热广泛应用于生产、科研和试验等领域,电加热方式已经成为传统热能的最有效的辅助热源。

根据电能转换方式的不同,电加热通常分为电阻加热、感应加热、电弧加热、电子束加热、红外线加热和介质加热等。本章首先回顾传统的电加热方式,继而提出一种新型的电加热装置——基于旋转电磁效应的机电热换能器。

1.2 电加热方式概述

1.2.1 电阻加热方式及其应用

电阻式电热转换技术是以电能作为能源,利用电加热管、电加热棒等金属电阻,碳纤维膜电热板条、陶瓷发热棒等非金属电阻及电极式水介质电阻等作为电热转换元件,将电能转换为热能。其产品以电热锅炉为代表,可分为电阻式电热锅炉和电极式电热锅炉。

1. 电阻式电热锅炉

电阻式电热锅炉主要分为电热管电热锅炉、电热棒电热锅炉和电热板电热锅炉三种形式,其电功率按欧姆定律计算

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1.1)$$

式中 P ——功率;

R ——电阻;

I ——电流;

U ——电压。

(1) 电热管电热锅炉

电热管是一种金属电阻发热元件,一般采用高阻管形、U形及蛇形管状电热元件,它是将 Ni, Cr 合金电阻丝或 Fe, Cr, Al 合金电阻丝放置于碳钢或紫铜、镍基合金钢管中(金属管材的选用取决于其允许的最高温度及在介质中允许的最高表面负荷),并填充 MgO 粉用以绝缘、定位和传热。因此,电热元件的使用寿命、电热锅炉的热效率与 MgO 的质量、制造时的充实程度密切相关。该锅炉的优点是水中不带电,使用较为安全。电热管是电热锅炉的心脏,其质量高低直接影响和决定着电热锅炉的运行状况和寿命。管状电加热元件的功率是固定的。锅炉容量的增大必须依靠增加管形电热元件的数量来实现,并按实际投运数量来调节锅炉的负荷。过多数量的管形电热元件使电加热锅炉本体结构变得复杂,控制系统也比较复杂,影响了电加热锅炉容量的提高。

世界上第一台电热锅炉为美国精工(Precision)公司于1947年设计生产的精工牌电热管电热锅炉,是其代表性产品。其后的半个世纪以来,该公司一直致力于发展电热锅炉系列产品。此外,美国“白浪”牌(Bradford White)电热管电热锅炉,电功率为1.5~54 kW,适于20~700 m²独立单元采暖。澳大利亚“恒热”电热管电热锅炉是一种容积式电热锅炉,电功率为7.2~36 kW,可多台并联使用(最多6台),最高出水温度为70℃,由于出水量大,特别适于洗浴使用。俄罗斯比斯克锅炉厂生产的7.5~240 kW的蒸汽、热水电热锅炉,电热元件为圆环形电热管,结构简单,使用可靠。

(2) 电热棒电热锅炉

电热棒电热锅炉是在锅炉管内插入磁套管,磁套管内绕有8~12根金属电阻丝,中间有一电极,在端部与电源连接。磁套管外径可与锅炉钢管内径配合,每节套管长为80~100 mm。锅炉管既是受热面,又是电热元件外壳,插入拔出十分方便,维修十分简单,这是其最大的优点。但电阻丝裸露在空气中,容易产生高温氧化现象。目前最新研制的陶瓷棒式红外加热元件可以克服这一缺点,该元件是用氧化物粉末高温焙烧而成,具有非常高的抗氧化能力。

(3) 电热板电热锅炉

电热板是一种非金属电阻式电热元件。电热板由两层绝缘板中包一层“碳纤维纸”热压成一体,“碳纤维纸”的两侧边压有铜箔条作为电极。由于板两面均与水接触,散热面积远远大于电热管的圆柱面积,所以传热效率较高。与电热管相比,电热板的最大优势是同等功率下总体积小,使锅炉很紧凑。同时,由于单位面积热负荷低,在电热板表面不

易结水垢,这是电热管无可比拟的(电热管一般使用 150 h 后,在其金属管表面即开始结成水垢,传热效率显著降低)。但绝缘板由于长期浸泡在水中,其热稳定性尚待验证、改进。

2. 电极式电热锅炉

电极式电热锅炉的工作原理是以水作为介质,采用独特的发热原理,利用水介质自身的高热阻,直接将电能转换成热能,不需要发热元件发热再将热传导给水。在这一转换过程中能量几乎没有损失,热效率比较高。其优点是体积小、功率大、启动快、安全性高、不易结垢,由于良好的绝热(如外包聚氨酯发泡材料等),可达到每 24 h 所蓄热水只降低 1℃。

电极式电热锅炉,按电极形状可分为电极板式与电极棒式;按电压高低可分为低电压式(220 V 和 660 V)与高电压式(4 ~ 15 kV);按电极相对位置可分为固定电极式与可调位置电极式(相应电热锅炉功率也可调)。

电极式电热锅炉的发热功率计算比较复杂,一般的,设锅炉内水中任一点的电场强度为

$$E=f(x,y,z) \quad (1.2)$$

该点的电功率可以表示为

$$p=\sigma E \cdot E=\sigma E^2 \quad (1.3)$$

式中 E ——电场强度;

σ ——电导率。

因此,整个电热锅炉所消耗的功率为在整个平面内的积分,再乘以插入深度,即

$$P=h \cdot \sigma \cdot \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_0^L E^2 dx dy dz \quad (1.4)$$

式中 h ——插入深度。

图 1.1 为低电压电极插入式电热锅炉原理图。锅筒内部被分为内外两个空间,目的

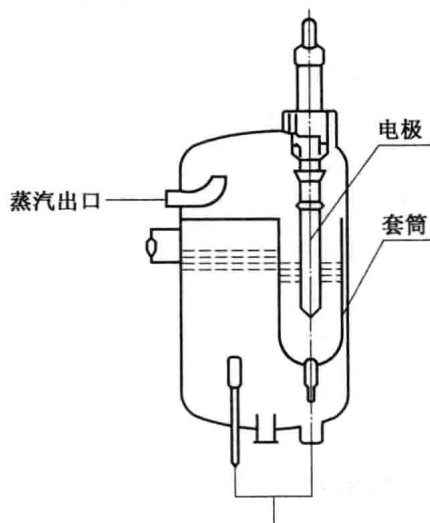


图 1.1 电极插入式电热锅炉原理图

有两个:其一,在电极加热水时会产生微量的电解氧,设置套筒可以防止氧气对外壳筒壁的腐蚀;其二,可以起到负荷的自调节作用。当用汽量少时,套筒内蒸汽量增大,水位降低,电极插入深度变浅,电通量减小;反之则增加。当然,如果没有附加热源,它只能生产热水和饱和蒸汽,而不可能生产过热蒸汽。如果需要焓值更高的过热蒸汽,需在锅炉内部采取一些加热措施。

电极式电热锅炉结构简单,制造成本低;控制方式简单,无须昂贵的自控装置;电极直接加热水使得加热效率提高,维护比电热锅炉容易;安全性很高,锅炉不会发生干烧现象。一旦锅炉断水,电极间的通路被切断,电功率为零,锅炉即会自动停止运行。该技术在大容量电热锅炉领域具有巨大的市场潜力,极有可能成为电热管电热锅炉的更新换代产品。在中国,秦山核电站和岭澳核电站均采用该类型锅炉作为启动时所需的核电站辅助蒸汽锅炉。

美国在该领域的研究一直处于领先地位。美国“精工”高电压电极型蒸汽锅炉额定电压从 4.16 kV, 6.9 kV, 10 kV 至 13.2 kV 不等,容量的可选范围为 0.7 ~ 50 MW。在美国的大多数核电站被用作核电站系统启动所需的辅助蒸汽锅炉,同时也被广泛应用于其他工业和大楼空调等。此外,美国的 A. O. 史密斯(A. O. Smith)、富尔顿(Fulton)、白浪及赫斯特(Hurst)等著名的锅炉公司都纷纷开发了相应的电热锅炉系列产品。

俄罗斯近年来也致力于发展电热锅炉,其已投产的电极式电热锅炉电压为 0.4 ~ 6 kV,功率为 10 kW ~ 10 MW;热水锅炉出水温度为 90 °C 或 130 °C,压力为 0.6 ~ 1.6 MPa;俄罗斯比斯克锅炉厂三相电极板式电热锅炉的三相电极(额定电压为 380 V)由三块钢板制成,通过高性能绝缘块与锅炉底的封头连接。锅筒内充水,接通电流后,水瞬间即被加热、汽化。锅炉结构十分简单,运行安全可靠。俄罗斯境内已经有大量用户长期运行。俄罗斯可调式电极电热锅炉有手动调节功率(40 ~ 250 kW)与电动调节功率(大于 400 kW)两种方式,可采用改变电极接通数量的方法实现分级调节功率(针对 10 kW, 16 kW 和 25 kW 电极锅炉),也可通过改变电极有效面积或改变水位的方法来实现功率的调节。

日本近年来也在发展大容量的电热锅炉,川崎重工的电热蒸汽锅炉单台蒸汽量已达 28 t/h。此外,韩国、英国和加拿大等国也在发展电热锅炉。

由于我国长期处于电力供应短缺的状况,电热锅炉从 20 世纪 90 年代后期才有所发展和应用。由于当前高可靠性、大功率电热元件的产生及计算机技术、自动控制技术的发展,降低了电热锅炉的制造和使用成本,使其更加方便和实用。我国最早生产电热锅炉的企业有广西梧州和柳州锅炉厂、广东恩平机电厂等,单台蒸汽量不超过 0.2 t/h,电功率也在 200 kW 以下。目前国内生产电热锅炉的厂家有几十个,比较有名的有苏州新波能(其最高功率可达 3 000 kW)、张家口宝热尔、北京力正锅炉厂、河北星光集团和北方电联等厂家。

1.2.2 电弧加热方式及其应用

电弧加热利用电弧放电产生的热能对物料进行电加热。电弧放电是气体自持放电的一种形式,在由低(负)压到高压的不同压力气氛中都能发生。电弧放电时,电流大而电

压降低,产生强烈的弧光和热。在电路中电弧可以看作是一个电阻,其值等于电弧电压与电弧电流的商,但不是常数。由于电弧的电流密度大,温度可以很高,不像金属导体受到熔点的限制,因此它主要用于电弧炉、电弧焊接和火箭推进器等。

电弧加热一般具有以下特点:①热量集中,温度高达 $300 \sim 7\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$;②用不太复杂的设备能集中提供几万千瓦甚至十几万千瓦的巨大加热功率;③功率控制较方便;④能用于空气、真空或其他气体中。因此,在众多的电加热方法中,电弧加热是应用最广的方法之一。

按加热方式,电弧加热可分为间接电弧加热、直接电弧加热和埋弧加热三类。①间接电弧加热时,电弧发生在两根相同的电极棒之间,物料受到电弧热的辐射加热。这种加热方法热效率低,现已很少采用。②直接电弧加热时,电弧发生在电极和被加热物料之间,电弧电流流经物料,大部分电弧热可被物料吸收,热效率高。③埋弧加热时,电极端头埋在颗粒或粉末状物料内,物料除受到电弧的直接加热外,还受到电弧电流流经物料所产生的电阻热,包括物料粒子间的接触电阻热的加热。这种加热方法的热效率最高,但只适用于特定的物料。

按电源性质,电弧加热分为交流电弧加热和直流电弧加热两种。①交流电弧加热由供电网通过变压器供电,其优点是设备简单、价格低、使用方便,缺点是电弧稳定性差、用电功率因数低、线路损耗大、噪声大及对电力系统干扰严重等。②直流电弧加热在这些方面优于交流电弧加热,但需要通过整流器供电,设备价格高。20世纪90年代以来,电力电子器件的迅速发展促进了直流电弧加热的推广应用。20世纪末,直流电弧加热在冶金领域的应用已取得进展。

电弧加热主要用于冶金、化工和机械、环境保护和航空航天等工业领域。如冶金、化学工业中的交、直流炼钢电弧炉,交、直流钢包炉,铁合金炉,电石炉和熔炼钨、钼、铌、锆等难熔金属与活泼金属用的真空电弧炉等。现代化的超大功率电弧炉在炼钢生产中起了很大的作用,到2010年为止,世界钢产量已突破10亿吨,其中电弧炉产量超过5亿吨。在机械工业和环境保护领域,主要用于焊接、碳弧气刨、电弧切割和垃圾焚烧灰熔融固化处理等。随着航空工程的飞速发展,对火箭推进器发动机的功率要求更高,电弧加热发动机(简称 Arcjet)是电火箭发动机中属于电热发动机的一种,电弧中心温度可达 $20\,000\text{ K}$ 以上,大大高于化学火箭发动机内部工作温度,因而发动机可以得到较大的比冲。

1.2.3 介质加热方式及其应用

介质加热是利用高频电场对绝缘材料进行加热,主要加热对象是电介质。电介质置于交变电场中,会被反复极化(电介质在电场作用下,其表面或内部出现等量而极性相反的电荷现象),从而将电场中的电能转变成热能。

介质加热使用的电场频率很高。在中、短波和超短波波段内,频率为几百千赫到 300 MHz ,称为高频介质加热;若高于 300 MHz ,达到微波波段,则称为微波介质加热。通常高频介质加热是在两极板间的电场中进行,而微波介质加热则是在波导、谐振腔或者微波天线的辐射场照射下进行。图1.2为常规加热与微波加热机理对比示意图。

电介质在高频电场中加热时,其单位体积内吸取的电功率为

$$p/(W/cm^3) = 0.566fE^2\varepsilon_r\tan\delta \times 10^{-12} \quad (1.5)$$

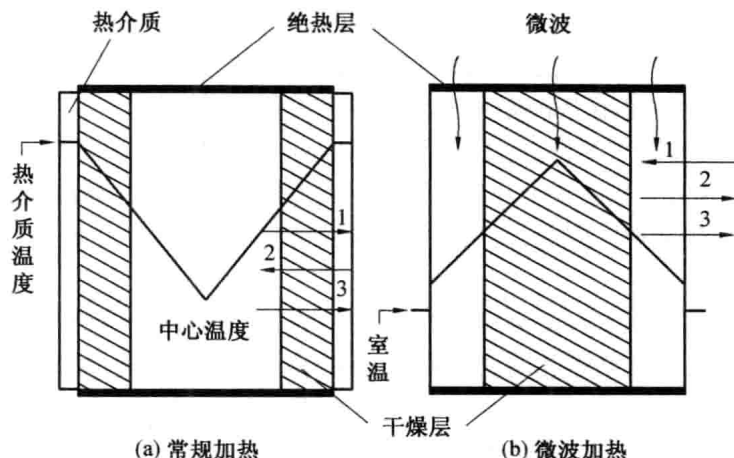


图 1.2 常规加热与微波加热机理对比示意图

1—温度梯度方向;2—热量传导方向;3—蒸汽迁移方向

式中 f ——高频电场的频率;

ϵ_r ——电介质的相对介电常数;

E ——电场强度;

δ ——电介质损耗角。

如果用热量表示,则为

$$H/(\text{K/s} \cdot \text{cm}^3) = 1.33fE^2\epsilon_r \tan \delta \times 10^{-13} \quad (1.6)$$

由式(1.6)可知,电介质从高频电场中吸取的电功率与电场强度 E 的平方、电场的频率 f 及电介质损耗角 δ 成正比。 E 和 f 由外加电场决定,而 ϵ_r 则取决于电介质本身的性质,所以介质加热的对象主要是介质损耗较大的物质。

介质加热由于热量产生在电介质(被加热物体)内部,因此与其他外部加热相比,加热速度快,热效率高,而且加热均匀。

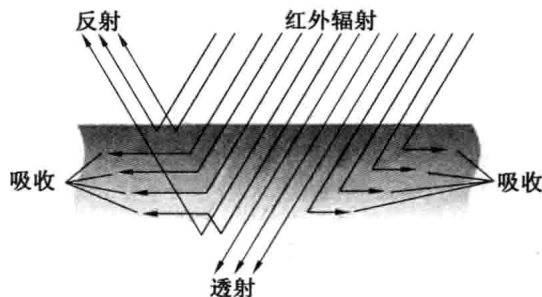
介质加热在工业上可以加热凝胶,烘干谷物、纸张、木材,以及其他纤维质材料;还可以对模制前塑料进行预热,以及橡胶硫化和木材、塑料等的黏合。选择适当的电场频率和装置,可以在加热胶合板时只加热黏合胶,而不影响胶合板本身。对于均质材料,可以进行整体加热。

1.2.4 红外线加热方式及其应用

红外线是太阳光线中众多不可见光线中的一种,太阳光谱上红外线的波长大于可见光线,波长为 $0.75 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 。红外线可分为三部分,即近红外线,波长为 $0.75 \sim 1.50\ \mu\text{m}$;中红外线,波长为 $1.50 \sim 6.0\ \mu\text{m}$;远红外线,波长为 $6.0 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 。不同物体对红外线吸收的能力不同,即使同一物体,对不同波长的红外线吸收的能力也不一样。因此应用红外线加热,需根据被加热物体的种类,选择合适的红外线辐射源,使其辐射能量集中在被加热物体的吸收波长范围内,以得到良好的加热效果。一般红外线加热使用的是远红外加热。

红外线加热原理如图 1.3 所示。当红外线照射到被加热的物体时,一小部分射线被

反射回来,绝大部分渗透到被加热的物体之中。由于红外线本身是一种能量,当发射的远红外线波长和被加热物体的吸收波长一致时,被加热的物体内分子或原子吸收远红外线能量,产生强烈的振动并促使物体内部分子和原子发生“共振”,物体分子或原子之间的高速摩擦产生热量而使其温度升高,从而达到了加热的目的。

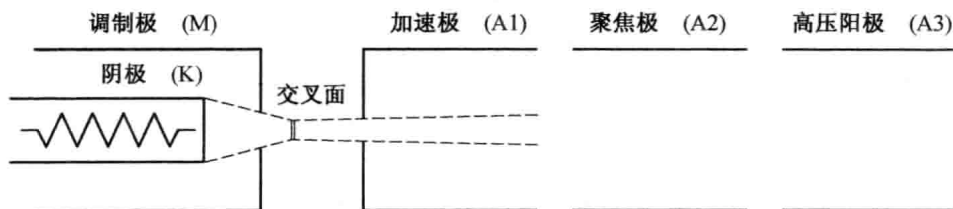


利用红外线加热可避免热传媒质导致的能量损失,有益于节约能源,同时红外线因具有产生容易、可控性良好等特点,从而具有加热迅速、干燥时间短、热效率高、设备简单、易于温度调节、时间滞后极小等优点。近几年来,红外线加热方式以惊人的发展速度被接受,并被成功应用于红外测温系统、红外成像系统、红外分析系统等方面,尤其在红外线加热与干燥领域,如油漆涂饰、塑料加工、纺织印染、造纸印刷、医药卫生等领域,都有很多红外线加热应用的实例。

1.2.5 电子射线加热方式及其应用

电子射线加热是利用在电场作用下高速运动的电子轰击物体表面,使之被加热。进行电子射线加热的主要部件是电子束发生器,又称电子枪。电子枪主要由阴极、聚焦极、阳极、电磁透镜和偏转线圈等部分组成。阳极接地,阴极接负高位,聚焦束通常和阴极同电位,阴极和阳极之间形成加速电场。由阴极发射的电子,在加速电场作用下加速到很高速度,通过电磁透镜聚焦,再经偏转线圈控制,使电子束按一定的方向射向被加热物体。

图 1.4 所示为阴极电子射线产生装置,电子射线加热原理是在真空中直接加热灯丝或旁热氧化物,使金属阴极达到一定温度后,大量电子获得逸出功从阴极发射而出,由阴极(K)、调制极(M)和加速极(A1)控制电子流的发射,再通过聚焦极(A2)和高压阳极(A3)对电子流进行聚焦,获得高速高能电子束,通过改变各极上电压来控制电子束的能量强度。



电子束加热的优点是:①控制电子束的电流值 I_e , 可以方便而迅速地改变加热功率; ②利用电磁透镜可以自由地变更被加热部分或可以自由地调整电子束轰击部分的面积; ③可增加功率密度, 以使被轰击点的物质在瞬间蒸发掉。

在实际应用中, 由于高能密度电子束为点热源, 相比于其他热源具有更好的微控技术和局部控制技术, 可应用于各种金属切削、微孔加工、微小工件钎焊等高精度领域; 由于高能电子束的穿透力强, 可应用于快速高效杀菌等医学领域。电子射线加热方式具有清洁的真空环境, 而且能够节省能源、提高加工效率。利用电子束进行钎焊能够有效减少热循环时间和降低能量损耗, 另外由于钎焊接头的高温停留时间短, 能减少钎料中合金元素的蒸发, 使接头成分稳定, 获得良好的机械性能。

1.2.6 电磁感应加热方式及其应用

电磁式电热转换技术是利用感应线圈等电磁转换设备, 使电能转换为磁能, 再转换为热能。感应加热是一种传统的电热技术, 在热处理、冶金、铸造、弯管等领域已得到广泛应用。

感应加热是导体通过交变电流时, 其周围产生变化磁场, 处于交变磁场的工件产生感应电动势和感应电流, 感应电流做功, 工件发热。随交变电流的频率不同, 感应加热分为工频加热和超音频加热。感应加热避免了电热管容易发生的击穿损坏现象, 由于不存在过期部件, 近于零维护。其结构紧凑、易于安装, 但其制造工艺复杂, 电源必须配备变频器, 一旦发生损坏时维修比较困难。

感应电流有集肤效应, 即电流芯棒中的分布是从表面向内越来越小, 对于圆形芯棒其感生的电流可以表示为

$$I_r = I_0 \cdot e^{-(r/d)} \quad (1.7)$$

式中 I_r ——距中心 r 处的电流;

I_0 ——表面电流;

d ——电流渗入深度。

产生的功率为

$$P_e = R \left(\int_0^r I_0 \cdot e^{-(r/d)} dr \right)^2 \quad (1.8)$$

电磁感应式加热技术根据感应方式可分为变压器感应加热技术和旋转电磁感应加热技术两大类。

1. 变压器感应加热技术

通常所说的感应式加热技术指的就是变压器式电磁感应加热。由于电磁感应加热器的电流不直接和流体相接触, 故电磁感应加热器是一种几乎适合所有流体加热的技术。以前电磁感应技术没有应用于流体加热领域, 主要因为其转换效率没有期望的那么高。近年来, 随着国外研究者的重新关注, 该技术瓶颈得到突破, 已达到接近 100% 的流体加热效率。其商业化产品主要分为低流率流体加热器、高流率流体加热器和瞬时流体加热器等, 是一种很有发展前途的电加热产品。

近年来, 俄罗斯和日本在该方面的研究比较活跃。俄罗斯的西伯利亚公司 (Siberian Technological Engineering Plant) 生产的 EDISON 电磁感应热水锅炉最大功率为 500 kW, 最高出水温度为 115 °C。根据特殊设计, 该电磁感应热水锅炉与变压器类似, 使用金属热量