

普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

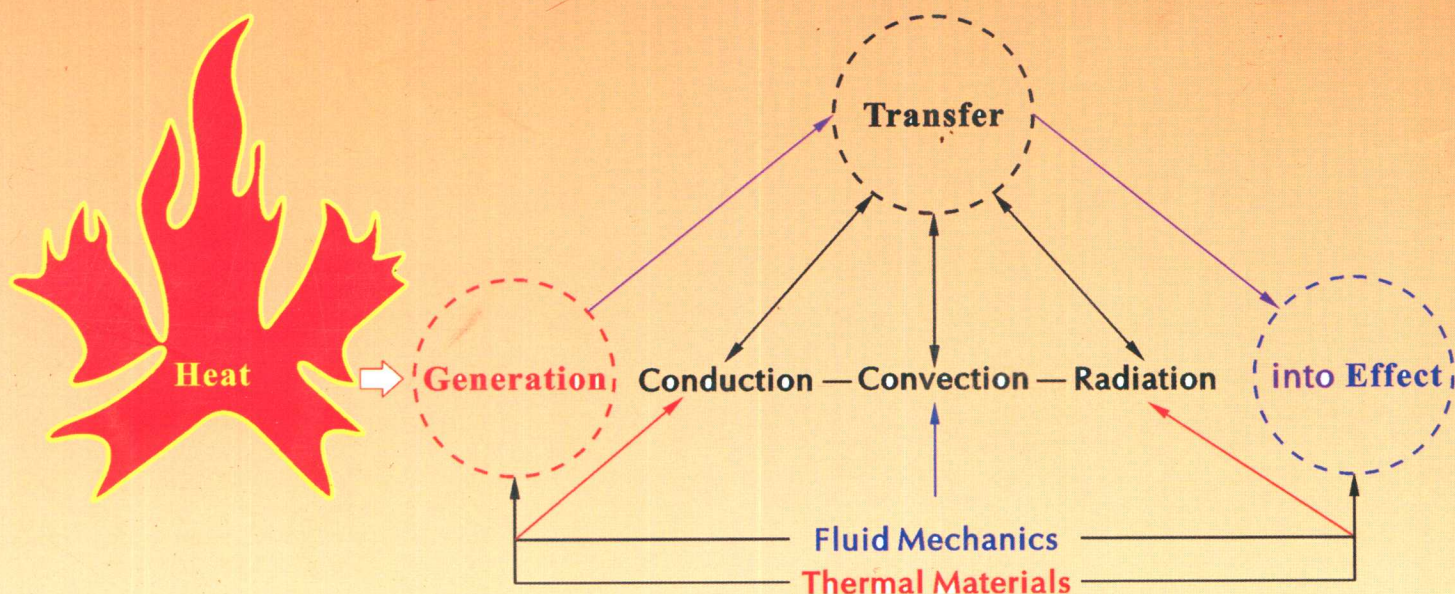
Thermal Fundamentals in Ceramics

无机非金属材料热工基础

(第2版)

主 编 姜洪舟 田道全

主 审 王志峰 傅正义 林发森



普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

Thermal Fundamentals in Ceramics

无机非金属材料热工基础

(第 2 版)

主 编 姜洪舟 田道全

副主编 周竹发 邱树恒 李娟娟

赵蔚琳 裴新美 刘怀艺

主 审 王志峰 傅正义 林发森

武汉理工大学出版社

Wuhan University of Technology Press

内 容 提 要

本教材是“从广泛与新颖的视角、以科学与逻辑的次序、用实用与丰富的内容”来论述无机非金属材料热工基础各方面的知识。重点是强调:基本概念、相关理论、计算方法;新知识、新视野、新思路,尤其是将目前关于“节能减排”与“环境保护”的理念与知识融入其中,以扩展读者的视野,更新人们的观念。

若无特别说明,本教材所给出的物理量单位和量纲均为国际单位制(SI制)下的单位和量纲。对于热工领域内的一些概念或术语,放弃了传统热工基础教材中直接从前苏联翻译而来的称谓,而采用与我国现行国家标准相一致的称谓。当然,为了避免引起不必要的误解,在出现这些多称谓概念的地方也尽量注解了这些概念的其他称谓。例如,理论空气量(或称:化学计量空气量);热导率(或称:导热系数,也称:导热率);热扩散率(或称:热扩散系数,曾称:导温系数);湍流(曾称:紊流);发射率(或称:辐射率,曾称:黑度)等。而且,按照国家新闻出版行业的最新标准以及规范,对于本教材中有关物理量与单位的符号也进行了广泛的修订。

本教材是普通高等学校无机非金属材料工程专业(或材料科学与工程专业无机非金属材料专业方向)本科生的教学用书,也可以作为该专业相关热工设备课程设计的教学参考书,还可以作为有关专业研究生教育的教学用书。当然,也希望成为有关科技人员在热工计算方面的良师益友。

本教材也配备有教材网站 <http://rg.wutp.com.cn/rgjc>,欢迎读者上网浏览。另外,也欢迎浏览与之相关教材《无机非金属材料热工设备》的网站 <http://rg.wutp.com.cn/rgsb>。

图书在版编目(CIP)数据

无机非金属材料热工基础/姜洪舟,田道全主编. —2版. —武汉:武汉理工大学出版社,2017.5
ISBN 978-7-5629-5534-4

I. ① 无… II. ① 姜… ② 田… III. ① 无机非金属材料-热工学 IV. ① TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 086214 号

项目负责人:田道全

责任编辑:彭佳佳

责任校对:徐 环

封面设计:翰之林

出版发行:武汉理工大学出版社

社 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编:430070

网 址:<http://www.wutp.com.cn> 本教材网站 <http://rg.wutp.com.cn/rgjc>

经 销:各地新华书店

印 刷:崇阳文昌印务股份有限公司

开 本:880×1230 1/16

印 张:32

彩 插:6

字 数:943 千字

版 次:2017 年 5 月第 2 版

印 次:2017 年 5 月第 1 次印刷

印 数:3501—6500 册

定 价:58.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有 盗版必究 ·

普通高等学校材料科学与工程类专业 新编系列教材编审委员会

顾问：郭景坤 袁润章 范令惠 杨南如

胡道和 王民权 岳文海 曹文聪

主任委员：张联盟

副主任委员：徐德龙 郑治祥

委员：（以姓氏笔画为序）

万发荣 马保国 王国梅 王培铭 文梓芸

叶卫平 叶枝荣 叶菁 田道全 曲祖源

刘亚云 刘军 孙成林 吴建青 吴建锋

陈文 宋晓岚 林宗寿 杨长辉 姜洪舟

钱觉时 钱春香 高建明 徐秋林 陶珍东

黄佳木 黄学辉 蒋阳 程晓敏 程新

谢峻林 曾令可 葛勇 潘伟 薛理辉

秘书长：田道全

总责任编辑：徐秋林

出版说明

材料是社会文明和科技进步的物质基础和先导,材料科学与能源科学、信息科学一并被列为现代科学技术的三大支柱,其发展水平已成为一个国家综合国力的主要标志之一。教育部颁布《普通高等学校本科专业目录》(修订版)以后,为促进我国高等工程教育改革,培养适应 21 世纪需要的未来卓越人才,相继组织实施了面向 21 世纪高等工程教育教学内容和课程体系改革计划、世界银行贷款 21 世纪初高等理工科教育教学改革项目,以及高等工程教育卓越工程师教育培养计划,部分高等学校承担了其中材料科学与工程专业教学改革项目的研究与实践。已经拓宽了专业面的材料科学与工程专业,相应的业务培养目标、业务培养要求、主干学科、主要课程、主要实践性教学环节等都有了不同程度的新变化。原有的教材已经不能适应新专业的人才培养目标和教学要求,组织编写出版新的材料科学与工程专业系列教材已成为众多院校的翘首之盼。武汉理工大学出版社在教育部高等学校材料科学与工程专业教学指导委员会的指导和帮助下,经过大量的调研,组织了国内几十所大学材料科学与工程学科的知名教授组成“普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材编审委员会”,共同编写了这套系列教材。

本套教材的主、参编人员及编委会顾问,遵照教育部材料科学与工程专业教学指导委员会的有关会议及文件精神,经过充分研讨,决定首先编写出版本专业的“专业主干课程”教材,以尽快满足全国众多院校的教学需要,然后再根据不同专业方向的培养目标和教学需要,逐步编写出版“专业方向课程”教材,并将研制与专业教学和课程教材相配套的“数字化教学资源”。本套新编系列教材的编写具有以下特色:

教材体系体现人才培养目标——本套系列教材的编写体现了高等学校材料科学与工程专业的人才培养目标和教学要求,从整体上考虑材料科学与工程专业课程设置的课程安排,按照教学改革方向要求的学时统一协调与整合,组成了一套完整的、各门课程有机联系的系列化教材。本套教材的编写除正文以外,还增加了本章内容提要、本章小结、思考题与习题等内容,以使教材既适合于教学需要,又便于学生自学。

教材内容反映教改成果——本套系列教材的编写坚持“少而精”的原则,紧跟教学内容和课程体系改革的步伐,教材内容注重更新,反映教学改革的阶段性成果,以适应 21 世纪材料科学与工程专业人才的培养要求。本套系列教材的编写中,凡涉及材料科学与工程学科的技术规范与标准,全部采用国家最新颁布实施的技术规范和标准。

教材出版实现立体化——本套教材努力应用和推广现代化教育技术和教学手段,实现出版方式的立体化。本套系列教材的编写出版,都将根据人才培养目标和课程教学需要,相继研制和建设相配套的“数字化教学资源”,以适应新时期高等工程教育人才培养和知识传播方式的变革。

本套教材是在教育部颁布实施《普通高等学校本科专业目录》(修订版)以后,组织全国多所高等学校材料科学与工程学科的具有丰富教学经验的教授们共同编写的一套面向新世纪、适应新专业的全新的系列教材。能够为新世纪我国材料科学与工程专业的教材建设贡献微薄之力,自是我们应尽的责任和义务,我们感到十分欣慰。然而,因其为一套开创性的系列教材,所以尽管我们的编审者、编辑出版者夙兴夜寐、尽心竭力,不敢稍有懈怠,但它仍然还会存在着缺点和不足。嚶其鸣矣,求其友声,我们诚恳希望选用本套教材的广大师生在使用过程中给我们多提宝贵的意见和建议,以便使我们不断地修改、完善全套教材,共同为我国高等教育事业的发展作出贡献。

武汉理工大学出版社

《无机非金属材料热工基础》

编写人员名单

主 编:姜洪舟^{1a} 田道全^{1b}

副主编:周竹发² 邱树恒³ 李娟娟^{1c}

赵蔚琳⁴ 裴新美^{1a} 刘怀艺⁵

1——武汉理工大学

(a-材料科学与工程学院;b-出版社;c-国家实验教学示范中心)

2——苏州大学材料与化学化工学部

3——广西大学材料科学与工程学院

4——济南大学材料科学与工程学院

5——武汉长利玻璃有限责任公司

参 编:

唐山学院环境与化学工程系:刘进强 郝斌

长沙理工大学材料科学与工程学院:叶昌

济南大学材料科学与工程学院:刘晓杰

西南科技大学材料科学与工程学院:吕淑珍 陈雅斓 任雪潭

广西大学材料科学与工程学院:张波

武汉理工大学

材料科学与工程学院:何峰 李应开 李洪斌 陈潇 文进 吉晓莉

硅酸盐建筑材料国家重点实验室:李相国 李福洲 王征平

材料复合新技术国家重点实验室:周建 刘桂珍

《无机非金属材料热工基础》

主审专家

主 审:王志峰 中国科学院研究员、博士生导师,入选中国科学院百人计划,
中国科学院太阳能热利用与光伏系统重点实验室主任

傅正义 武汉理工大学材料科学与工程学科首席教授、博士生导师,
教育部“长江学者奖励计划”特聘教授

林发森 武汉理工大学能源与动力学院教授

前 言

Dedicated to diligent scientists and technicians in the field of ceramics!

将此书奉献给无机非金属材料领域内那些默默奉献的人们!

本教材的编写宗旨就是将无机非金属材料领域内热工基础方面崭新而丰富的知识奉献给读者,强调科学性、逻辑性、先进性、实用性。它的编写是在华南理工大学余其俊教授(教育部材料科学与工程专业教学指导委员会委员、无机非金属材料工程分委员会副主任委员)、济南大学程新教授(教育部材料科学与工程专业教学指导委员会无机非金属材料工程分委员会副主任委员)以及济南大学芦令超、陶珍东、王志、张学旭等教授们的热情关心下完成的。在编写工作中也得到了武汉理工大学国家级名师谢峻林教授、材料科学与工程学院董丽洁、赵春霞、赵青林等领导、武汉理工大学出版社杨学忠总编的有力支持。所以,它的编写凝聚了许多人的心血,也是我们全体编者共同努力的结果。

具体来说,本教材的“绪论”由姜洪舟、李应开编写;第1.1.1~第1.1.3由吕淑珍编写;第1.1.4由何峰编写;第1.1.5由姜洪舟、田道全编写;第1.1.6、第1.1.7由李洪斌编写;第1.1.8由姜洪舟编写。第1.2节与第1.3.1~第1.3.3由周竹发编写;第1.3.4由周建、刘桂珍编写;第1.4节与1.5节由姜洪舟、田道全编写。第2.1.1~第2.1.4由赵蔚琳、刘晓杰、叶昌、田道全编写;第2.1.5由李相国、姜洪舟编写;第2.2节由邱树恒、姜洪舟、田道全、张波编写;第2.3节由姜洪舟、陈潇、田道全编写;第2.4节由李娟娟编写。第3.1节由刘进强、郝斌、田道全编写;第3.2节由姜洪舟、王征平编写;第3.3节由刘怀艺、陈雅斓、李娟娟编写;第3.4由裴新美、任雪谭、田道全编写。第4.1.1~第4.3.1与第4.3.3~第4.3.11由姜洪舟、田道全编写,第4.3.2由文进编写,第4.4由吉晓莉编写。第5章与附录由姜洪舟、田道全、李福洲编写。另外,本教材内容的整体编排以及全文统稿由姜洪舟负责。本教材封面的基调设计,由田道全、姜洪舟提供。

本教材按照54~66学时编写,建议各章的授课学时数如下:第1章,10~12学时;第2章,20~24学时;第3章,8~10学时;第4章,10~12学时;第5章,6~8学时。当然,关于第4章、第5章,有的院校在本课程之前就开设有关课程(例如,“流体力学、风机及泵”课程,或“工程流体力学”课程),也有一些院校在本课程之后又开设了相关课程(例如,“耐火材料”课程)。因此,请任课教师自行决定这两章内容的取舍。

为了便于读者理解本教材在自然科学中的“坐标”,这里有必要简单地回顾一下“无机非金属材料热工基础”的发展史:热工基础也被称为:热工学,尽管早期的物理学家对于热工学中的问题做过大量的理论研究和实验探索,但是,真正将热工学应用于无机非金属材料领域中,并且建立起一套较为完整的热工理论体系,还是在化工行业(Chemical Engineering)充分发展以后,人们才从中得到了借鉴与启迪。

早期的化工行业是按照产品种类的差异来各自发展的。后来,有关的科技工作者发现:化工产品尽管是种类繁多,但是,它们的生产工艺过程却也都是由燃料燃烧、流体流动、传热、蒸馏、吸收、萃取、相变、结晶、过滤等最基本的操作单元(Operation Unit)按照不同的方式组合而成。这样,人们便具体研究每一个“单元操作”(Unit Operation)。于是,就形成了一门新学科,被称为“化工原理”或者称为“化学工程”。

与化工行业有所区别的是:无机非金属材料产品生产过程的几个主要操作单元却都与“热”有关,所以人们专门将其从化工领域单元操作的概念中分离出来,形成该行业内具有特色的“热工学”,或者

称为:热工基础。当然,在对于该学科的具体研究过程中也大量借鉴了相邻领域(例如,化工、动力、金属冶炼等)在热工方面的研究成果和成功经验,从而形成了较为完备的热工基础理论体系。该理论体系主要包括:有关的“热工理论”与“热工计算”。如果从更广泛的分类学上来看,该理论体系则主要隶属于物理学的范畴(尽管在该体系中也会涉及到某些化学反应及其过程、规律);在现代工程学上,人们将该理论体系归纳为:动量传递(主要指工程流体力学)、热量传递(简称:传热)、质量传递(简称:传质)和反应工程(包括燃烧反应以及原料被制备为产品过程中的各种化学反应),简称“三传一反”。因此,本教材的核心内容也是围绕着“三传一反”而展开的,只是关于传质理论的介绍已经包括在其他课程(例如,“材料科学基础”课程)之中,因此本教材就不再重述。但是,也要注意:现代的“三传一反”工程领域中所涉及的范围比热工基础更广,而无机非金属材料热工基础中涉及的一些问题也超出了“三传一反”的范畴。

至于本教材在无机非金属材料领域内的“坐标”,可以进行这样的比拟:如果将目前的无机非金属材料领域比拟成一棵根深叶茂、树枝繁多、硕果累累的“参天大树”,那么“热工基础”就是这棵大树的一个重要根系。对于将要迈向或者已经迈向该领域的科技工作者——未来的科学家、未来的工程师或未来的企业家而言,只有通过这个根系汲取足够的营养,将来才能够会结出丰硕的果实。这也正是从事无机非金属材料专业方向学习的学生以及有关的科技人员需要学习“无机非金属材料热工基础”这部分知识的重要意义所在。

为了保证本教材的质量,使其内容具备“新、广、深”的特点,在编撰过程中,我们查阅了大量的相关资料,并进行了有关调研工作。本教材主编之一在日本研修期间的主讲教师锅田恒之、佐藤哲等专家的讲课资料也给予了很大的启迪。对于所有前辈们所做的开拓性工作,我们表示由衷的钦佩和敬意。在本教材脱稿即将完成之际,我们也衷心地感谢武汉理工大学出版社的领导、编辑们以及所有为本教材的出版提供过帮助的人们。

另外,也感谢武汉理工大学王怀德以及济南大学刘明亮、周宗辉等老师曾经给予的帮助,也还要感谢武汉理工大学材料科学与工程学院的陈平方和帕丽娜等同学们在校稿方面所做的细致工作。

作为材料学科无机非金属材料专业方向完备教学体系中的一个重要环节,本教材的编者们特别注意与本专业其他课程教材的衔接,也就是:尽可能减少有关的交叉点,也尽可能避免有关的空白点。当然,虽然我们这些编者们都是长期在无机非金属材料领域内从事教学、科研、工程技术工作的人员,但是由于编写经验不足,虽加倍努力,但是个别错误在所难免。如果读者在阅读本教材时发现有什么问题,或者有什么更好的建议,欢迎和我们联系,我们将会不胜感激。

《无机非金属材料热工基础》全体编者

电子邮箱:tiandaoquan@126.com

目 录

绪论	(1)
1 热量产生	(3)
1.1 燃料燃烧产热	(5)
1.1.1 燃料的种类与组成	(5)
1.1.2 燃料的热工性质	(10)
1.1.3 燃料的选用原则	(17)
1.1.4 燃烧计算	(17)
1.1.5 燃料燃烧理论简介	(36)
1.1.6 燃烧过程中所产生污染物的防治	(50)
1.1.7 燃料的燃烧方法简介	(53)
1.1.8 煤气发生炉	(56)
1.2 电能产热	(62)
1.2.1 电阻加热	(62)
1.2.2 电磁感应加热	(63)
1.2.3 电弧加热与弧像加热	(64)
1.2.4 等离子体加热	(64)
1.2.5 电子束加热	(65)
1.3 电磁波产热	(65)
1.3.1 太阳能加热	(65)
1.3.2 激光加热	(67)
1.3.3 红外加热	(68)
1.3.4 微波加热	(69)
1.4 核能产热	(70)
1.5 地下产热	(74)
本章小结	(74)
思考题	(75)
习题	(76)
参考文献	(79)
2 热量传递	(81)
2.1 传导传热	(82)
2.1.1 传导传热的基本概念	(82)
2.1.2 传导传热的基本定律及有关参数	(84)
2.1.3 导热微分方程	(87)
2.1.4 几种典型导热问题的简化与计算方法	(89)
2.1.5 传热问题的数学模型建立与数值求解法简介	(110)
2.2 对流换热	(119)
2.2.1 关于流体力学的基础知识	(119)
2.2.2 对流换热	(125)

2.3 辐射换热	(164)
2.3.1 辐射的本质	(164)
2.3.2 辐射的性质	(165)
2.3.3 有关辐射的几个基本概念	(167)
2.3.4 辐射的五大基本定律	(169)
2.3.5 辐射换热过程	(178)
2.3.6 气体辐射	(195)
2.3.7 火焰辐射	(207)
2.4 综合传热	(210)
2.4.1 无限大平壁的综合传热计算	(210)
2.4.2 圆筒壁的综合传热计算	(213)
2.4.3 流化床内的传热计算	(217)
2.4.4 悬浮态内的传热特点	(219)
本章小结	(220)
思考题	(220)
习题	(222)
参考文献	(227)
3 热量应用	(229)
3.1 物料干燥过程中热量的应用	(231)
3.1.1 湿空气的性质	(232)
3.1.2 湿空气的 $I-x$ 图	(237)
3.1.3 干燥过程的物料平衡计算与热量平衡计算	(242)
3.1.4 干燥的物理过程	(251)
3.1.5 干燥设备简介	(254)
3.2 水泥生产过程中热量的应用	(259)
3.2.1 “水泥熟料形成热”的计算	(259)
3.2.2 水泥熟料烧成系统的热平衡计算	(268)
3.2.3 水泥熟料烧成系统的热效率计算	(276)
3.3 玻璃生产过程中热量的应用	(277)
3.3.1 “玻璃形成热”的计算	(278)
3.3.2 玻璃池窑的热平衡计算	(284)
3.3.3 玻璃池窑的热效率计算	(294)
3.3.4 玻璃池窑内的传热分析与节能措施	(294)
3.4 陶瓷生产过程中热量的应用	(301)
3.4.1 隧道窑的热平衡计算	(301)
3.4.2 辊道窑的热平衡计算	(312)
3.4.3 隧道窑或辊道窑的热效率计算	(321)
3.5 高技术加热方法在新材料制备方面的应用概要	(322)
3.6 其他一些无机非金属材料生产过程中的热量应用概要	(322)
本章小结	(322)
思考题	(322)
习题	(323)
参考文献	(323)

4 工程流体力学简介	(325)
4.1 概论	(325)
4.1.1 流体的连续介质模型	(325)
4.1.2 流体动力学研究方法	(326)
4.1.3 工程流体力学中的一些简化处理	(327)
4.2 流体静力学简介	(328)
4.2.1 流体静力学的两个基本特性	(328)
4.2.2 流体静力学基本方程式的推导	(329)
4.2.3 流体静力学基本方程式的应用及其讨论	(331)
4.3 流体动力学简介	(338)
4.3.1 流体动力学中的连续性方程	(339)
4.3.2 理想流体动力学微分方程式的推导	(340)
4.3.3 理想流体的元流伯努利方程之推导	(342)
4.3.4 实际流体流动的伯努利方程及其推广	(344)
4.3.5 关于伯努利方程的讨论	(345)
4.3.6 伯努利方程的应用	(356)
4.3.7 动量方程及其应用	(377)
4.3.8 风机、泵的简介	(380)
4.3.9 喷射器的设计计算方法	(385)
4.3.10 气体射流的概念简介	(390)
4.3.11 可压缩气体流动的特点以及拉伐尔管简介	(391)
4.4 工程流体力学测试装置简介	(392)
4.4.1 测量压强的仪器	(392)
4.4.2 测量流速的仪器	(394)
4.4.3 测量流量的仪器	(396)
本章小结	(398)
参考文献	(398)
5 热工材料基本知识	(399)
5.1 耐火材料简介	(399)
5.1.1 耐火材料概述	(399)
5.1.2 耐火材料的分类	(401)
5.1.3 耐火材料的性能	(403)
5.1.4 常用材质的耐火制品	(411)
5.1.5 不定形耐火材料	(418)
5.1.6 保温耐火材料	(420)
5.1.7 特种耐火材料简介	(423)
5.2 保温材料简介	(423)
5.3 筑炉材料中的建筑材料简介	(426)
5.3.1 建筑砖材	(426)
5.3.2 金属材料	(427)
本章小结	(428)
参考文献	(428)

附录	(429)
附录 1 关于煤、重油以及其他燃料的资料	(431)
附录 2 常用固体材料的物性参数	(440)
附录 3 常用流体(气体与液体)的物性参数	(447)
附录 4 水与水蒸气的物性参数	(457)
附录 5 某些物质的若干辐射参数	(461)
附录 6 某些典型情况下辐射角系数与核算面积的计算公式及其简图	(469)
附录 7 湿空气的相对湿度 $\varphi(\%)$	(477)
附录 9 湿空气的 $I-x$ 图($p=99.3 \text{ kPa}, t=0\sim 1450 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	(479)
附录 10 有关玻璃熔化的资料	(480)
附录 11 有关工程流体力学的技术资料	(485)
附录 12 关于耐火材料的部分标准列举	(496)

绪 论

材料由“材”与“料”两字所组成。顾名思义,这里“材”乃“有用之物”或“精制之物”;“料”则指“可塑之物”,即“可制造与可加工之物”。因此材料可以被理解为:(合理配比的)原料通过人为控制的制备与加工而获得的那些具有专门用途的有用物质。这也就是说,材料需要由原料经过制备与加工而成。材料产品通常是以制品、元件、器件的形式来呈现,它们构成了人类赖以生存生活与发展进步的重要物质基础。

无机非金属材料(Ceramics^①)是三大基础材料体系之一,另外的两大基础材料体系是(无机)金属材料与有机(高分子)材料。当然,基于上述三大基础材料体系的复合材料也构成了材料领域的重要分支。在无机材料中,由于金属材料往往单独作为一个材料体系,因此也有人将无机非金属材料简称为:无机材料,它们对于国民经济建设至关重要。在国内,该类材料的名称曾经从窑业材料、陶业材料、陶瓷材料、矽酸盐材料^②、硅酸盐材料逐渐演变为无机非金属材料。这类材料中的分子主要是通过共价键、离子键、共价/离子混合键结合而成。这些化合键具有很高的键能、键强度,尽管该特点是赋予了这类材料某些优良的性能,但是在制备这类材料时,破坏原料中原有的化合键而形成材料中新的化合键就需要很大的能量。这个能量往往是由热量来提供,通常需要高温才能够来完成。因此,无机非金属材料的特点之一就是该材料体系中几乎所有的产品都需要经过高温制备而成。

既然无机非金属材料的制备过程需要高温与热量,因此就需要弄清楚热量的来源、热量的传递、热量的应用这些关于“热量”的基本问题,然后才能够真正地掌握它们、优化地控制它们、高效地利用它们。这也正是无机非金属材料专业方向的本科教学需要设置与“热工”相关的课程之重要意义所在。基于上述理由,本教材从逻辑的角度将其内容按照以下的次序进行排布。

第1章的核心内容为热量的产生(简称:热源)。它的主要内容包括:① 燃料燃烧型热源;② 电能生热型热源;③ 介质吸收电磁波型热源。对于这三种热源,第一种热源(即燃料燃烧热)的来源丰富、价格低廉,这是工业规模生产的主要热源,但是常用的化石燃料属于不可再生的资源,而且燃烧产物对于环境污染程度较大;第二种热源(即电能产热)的利用率高、易实现严格和精确的自动控制、操作条件好、环保程度高,更重要的是有利于提高产品质量,但是其成本较高,而且无法满足烧成工艺上的还原气氛要求;第三种热源(即吸收电磁波产热)在材料领域中目前主要用于材料的实验研究过程。

第2章的核心内容为热量的传递(简称:传热),这是因为热源所产生的热量只有按照工艺的要求,有效且高效地传给被加热物料才能够最终加热制备出合格的产品。本章的教学目的是:让读者掌握热量传递的规律,从而为将来合理设计与正确操作传热系统打下牢固的理论基础。具体的传热方式包括:传导、对流和辐射。因此本章主要讲述这三种传热方式的规律。这里,需要特别指出:对流换热与流体流动密切相关,因此,本章在“对流换热”这一节中还设置了有关流体力学基础知识的附加内容。另外,第1章中涉及的液态燃料、气体燃料 助燃空气(或氧气)、燃烧生成的烟气均属于流体,关于它们的规律可以参考阅读材料1(第4章)。阅读材料2(第5章)则是关于热工材料的简介。

第3章的核心内容为热量在无机非金属材料领域内的应用(简称:热利用),这是由于热源产生的热量经过有效与高效的传递,最终还要得到有效的应用才能够发挥其应有的作用。本章的主体内容

① Ceramics 这个词来源于古希腊的单词 Keramos,原指用火烧制而成的器物(陶器、陶制品),可以理解为“火之物”。

② 我国曾经将元素 Silicon 翻译为“矽”(现在,我国的台湾地区仍称之为:矽),后来改译为“硅”。

包括:① 热量在物料干燥方面的应用;② 热量在水泥熟料烧成过程中的应用;③ 热量在玻璃液熔制过程中的应用;④ 热量在陶瓷制品烧制过程中的应用。

清楚了本教材的主要内容以后,在具体学习时还必须注意以下两点:第一,作为热工过程的讲述,肯定与热力学的规律有关(尤其是热力学第一定律、热力学第二定律);热力学第一定律是关于热量、内能、功之间的关系,该定律将在本教材第1章中用到;热力学第二定律则是有几种表述方式,其中,“高温体会自发地向低温体传热”这一表述将是本教材第2章的基础。另外,由热力学第二定律引申而来的“熵”这一概念将在本教材第3章中被提到。第二,关于本教材中所涉及问题的研究方法,不能不提到数学,这是因为数学乃是一切科学的工具,一门科学只有通过数学的“装饰”才能够算是完美的。作为一门学科,热工基础当然也需要数学这一个强有力的工具作其后盾。在热工基础领域,对于每一个现象、每一个规律的定量描述最终都要归结到一个或一组方程。这里所说的方程可能是常规公式,也可能是只有一个自变量的常微分方程,更有可能是自变量较多的偏微分方程。这一点是初次接触该课程的读者所必需认识的。不过,微分方程(尤其是偏微分方程)有时很难甚至无法求解出来,但是这种研究方法的方向并没有错,因为数学本身也在不断地进步与发展之中。根据具体的问题来求解这些微分方程就是寻找热工基础领域内有关规律的过程。至于具体求解过程,人们当然会首选解析方法(数学推导方法),这是因为解析方法在数学上较为严格。但是,解析方法的缺点是:所能够解决的问题有限,一般只能够解决一些较为规范、较为简单的问题。随着计算机普及和发展,计算机的运算速度和容量已经大幅度提高,这就使得较为复杂的问题也可以利用数值计算方法由计算机来完成相关的数值求解计算。现在,市面上也有一些专门用于计算机数值求解的软件供选用,有些计算软件完全可以用于流动与传热方面实际问题的数值模拟计算。然而,在传统上人们是利用相似模拟的方法来研究流体力学与传热学中相关规律。利用相似模拟方法得到的是一些经验数据或者经验公式。由此可以看出:数学理论、数值计算方法、计算机编程技术、有关计算机软件的使用、相似模拟及其工程测试都与热工基础息息相关。尽管本教材在对于有关内容叙述上会采取深入浅出的方式、也使用较为通俗的语言,以便于初学者的学习与掌握,但是,读者若能够事先学习并掌握上述知识,然后,再来学习本教材的话,那将会取得事半功倍的效果。

希望读者在阅读完本绪论以后,能够对本教材的设置有一个整体的了解。然后,可以有意识、有目的、有重点地学习各章节,真正地做到举一反三和相互融通,从而为以后的学习和工作打下牢固的基础。

1 热量产生

本章的内容是关于怎样有效地产生热量。在工业生产过程中,燃料燃烧产热因其价格低、气氛控制方便而获得广泛的应用,所以它构成了本章的主要内容。在无机非金属材料领域内,其他一些产热方法也有一定的应用,这些产热方法包括:电能产热(通过电阻通电、电磁感应、电弧、等离子体、电子束等方法来产生热量)、电磁波产热(利用太阳能、红外线、激光、微波等电磁波来产生热量)、核能产热(利用核裂变能、核聚变能产生热量)、地热(利用地球内部产生的热量)等。

本章中用楷体字印刷的内容为更深层次的内容,教学上可不作要求,仅供读者需要时阅读参考。

热量是能量的一种,要想弄清楚热量的来源,首先有必要知道能量产生的根源。为此,读者可以按照以下的思路进行思考:

首先来思考这样一个实例:你站在一条铁路的交叉路口旁等待一辆疾驰的火车通过该路口。当火车朝向你而来时,你会听到“嘟……嘟……”的尖叫声;当火车经过你面前然后背离你而去时,你则会听到“昂轰……咔叱……”的低沉声。现在需要弄清楚的是:同一个你、同一辆火车、同一个声源,然而,为什么你会听到两种不同的声音呢?这是因为火车朝向你而来时,你所听到的声音频率比火车所发出的声音频率要高;反之,当火车背离你而去时,你听到的声音频率比火车实际发出的声音频率要低。这就是物理学上的多普勒效应(Doppler^① Effect)之基本原理。

按照多普勒效应的原理,如果有一个波源发射体与一个波源接收体,当前者朝向后者移动时,后者接收的真实频率比前者实际发出的频率要高,即增加一个频率差 Δf ;而当前者背离后者而去时,后者接收到的真实频率比前者发出的实际频率要低,即要减去一个频率差 Δf 。 Δf 的大小与所发射的频率以及发射体与接收体之间的相对速度有关。

在人类探索宇宙奥秘的过程中,美国天文学家哈勃^②经过长期的观测、思考、研究后发现:人类在地球上接收到的星体辐射光谱比星体实际发出的辐射光谱要向长波方向偏移,在可见光中,红光的波长最长(即频率最低),所以该现象被称为光谱红移。该结果用多普勒效应解释就是:人类所观测的星体在离我们而去,这也就是所谓的宇宙“膨胀”现象。假如我们用逆向思维来考虑这个问题,那便是宇宙起源于某一处,这也就是已经被大多数科学家所公认的宇宙起源的“大爆炸”理论(Big Bang)。在爆炸瞬间,是非常非常小的微观粒子,后来微观粒子组成了中子、质子、电子这样的基本粒子,中子与质子等组成了原子核,原子核与电子又组成了原子,原子再按照一定的规则排列就组成了分子,而分子就是构成物质的基本单元。于是,大约30万年以后产生了氢分子,它代表了通常意义上的物质

① 克里斯琴·安德斯·多普勒[Christian Andreas Doppler(曾长期被误写为:Christian Johann Doppler),1803—1853]为奥地利历史上知名的物理学家及数学家。

② 爱德温·鲍威尔·哈勃(Edwin Powell Hubble,1889—1953)为美国历史上伟大的天文学家之一,重点研究星云、超新星,并首次发现银河系以外的星系以及宇宙膨胀,美国航空航天局(NASA)后来发射的一个环绕地球旋转的天文望远镜就以他的姓氏来命名——哈勃太空望远镜(Hubble Space Telescope,简称:HST)。

时代到来,后来的超新星爆炸等因素导致了自然界中其他物质产生^①,有了物质就有了能量,这就是历史上最伟大的科学家之一阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein)提出的质能公式: $E=mc^2$,其中, E 为能量(单位:J); m 为质量(单位:kg), c 为真空中的光速, $c\approx 3\times 10^8$ m/s。

能量转换遵循两个最基本的原则:一是质能守恒原则;二是最低能量原则。质能守恒取决于上述质能公式 $E=mc^2$ 。但是,因为 c^2 数值巨大(约 9×10^{16} m²/s²),所以质量“缺损”将会导致巨大的能量释放,例如,核爆炸(包括核裂变、核聚变);反过来,在能量转变导致热损失时,按照该质能公式,质量也会发生“缺损”,但是因为 $1/c^2$ 的值极小(约 1.1×10^{-17} s²/m²),所以在核能以外的领域,能量转换所导致的质量变化非常小(小到将其忽略也不会造成明显的误差),于是质能守恒就简化为能量守恒与质量守恒。最低能量原理则是指任何能量状态总是具有自发地向着比它更低能量状态进行转变的趋势,即低能态比高能态能够更稳定地存在。

由以上叙述,则可以引申出以下两个推论:第一,在地球上,除了核能与地质能以外,所有的能量均来自太阳能(实质上,太阳能就是核聚变能的释放);第二,地球上的能量在通常的转换过程中,都会遵循以下两个基本原理——能量守恒原理与能量最低原理。

热量属于能量(热量实质上是较低品位的能量,参见第2章首页的页末注释),所以热量也会遵循这两个基本原理。在热学领域内,能量守恒原理(Energy Conservation Principle)可以用热力学第一定律^②来描述;而能量最低原理(Minimum Energy Principle)则存在于热力学第二定律之中。

按照热力学第一定律,在热力过程中,系统从系统以外(环境)所吸收的热量 Q (该定律规定:系统吸热为正,系统放热为负)等于系统对外所做的功 W (该定律规定:系统对外做功为正,对内做功为负)加上系统内能增量 ΔU (该定律规定:内能增加为正,内能减少为负),即 $Q=W+\Delta U$ 。该定律如果再拓展一些,即这里的 W 是更广泛意义上的功,它不仅包括所做的功,也包括能(例如,电能、电磁能、势能、变形能、动能等)。于是,按照这三个物理量之间的相互转换关系,可以分为以下六种基本情况:

(1) $Q\rightarrow W$:这就是热机工作的基本原理与目的,这种转换在动力驱动、热力发电、余热发电等领域最为常见。当然,根据热力学第二定律,这种转换的效率一定是小于100%(最大转换效率就是卡诺循环效率 η_c)。

(2) $Q\rightarrow\Delta U$:这就是很多储热系统的工作原理与目的,这种转换最常见的实例有:物质的受热升温过程、物质的相变吸热过程、晶体的某些晶格转变中之吸热过程、化学分解反应的吸热过程等。

(3) $W\rightarrow\Delta U$:这就是动力贮存的原理与目的。这种转换最常见的实例有:蓄电池的充电过程、等离子体的产生过程、物质吸收电磁波能量以后的内能增加过程、气体被压缩过程、水泵向上提水的过程、弹簧变形的储存能量过程等。

(4) $\Delta U\rightarrow W$:这就是工作介质对外做功的过程,该转换最常见的实例是:蓄电池的放电做功过程、燃料电池的对外发电做功、被压缩气体的膨胀做功过程、水流向下的流动过程、弹簧恢复形状时的释放能量过程等。

(5) $\Delta U\rightarrow Q$:这就是系统内能转换为热量的过程,也是热量产生的最重要来源之一。该转换最常见的实例包括:核能产热过程、地热能释放过程、燃料燃烧过程[燃烧就是一种急剧的氧化反应过程,氧化反应是属于化合反应(放热反应),该实例所涉及的内容也正是本章中最主要的内容]、介质吸收电磁波能量后的放热升温过程(该实例涉及的内容也是本章中的部分内容)、物质的冷却过程、物质的相变放热过程、晶体的某些晶格转变中之放热过程等。

(6) $W\rightarrow Q$,这就是做功(或能量)转换为热量的过程,这是热量产生的另一个重要来源。该转换最常见的实例有:摩擦生热、电流经过电阻时的发热过程(该热量也称为:焦耳热,该实例也是本章中

① 从核能的角度来说,自然界中能量最低的元素是铁(Fe),地球上自然存在的最重元素是铀(U),包括²³⁵U和²³⁸U。

② 在无机非金属材料专业方向的教学体系中,热力学的内容包括在“物理化学”这门课程之中。