

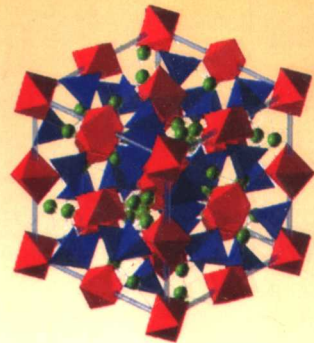
WUTP

普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

*Thermal Equipment in Ceramics*

# 无机非金属材料热工设备

姜洪舟 主编



武汉理工大学出版社

Wuhan University of Technology Press

普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

# Thermal Equipment in Ceramics

# 无机非金属材料热工设备

主 编 姜洪舟  
副主编 黄迪宇 何 峰  
          阎法强 文 进

Wuhan University of Technology Press  
武汉理工大学出版社

## 【内容简介】

本教材的特点是用“深入而浅出的语言,简明而扼要的方式,崭新而实用的技术”来论述有关无机非金属材料热工设备方面的知识和技术。

本教材强调的是无机非金属材料领域内有关热工设备的基本流程、基本结构、基本工作原理以及一些新技术的论述。且其重点放在目前应用较为广泛的、新型高效的以及有发展前途的无机非金属材料热工设备与技术,而对于一些传统的、过时的和被淘汰的热工设备不再收入到本教材中。此外,为了扩展读者的视野和知识面,本教材还特意增设了一些辅助内容,这些辅助内容特意用专门的字体排版,以示区别。

如果不特别加以指明,本教材所给出的物理量单位和量纲(也叫因次)均为国际单位制(SI制)下的单位和量纲。

本教材为高等学校材料科学与工程类学科无机非金属材料专业方向本科生的教学用书,也可供有关的科技工作人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

无机非金属材料热工设备/姜洪舟主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2005.1  
ISBN 7-5629-2205-5

- I. 无…
- II. 姜…
- III. 无机非金属材料-热工设备-高等学校-教材
- IV. TQ12

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市珞狮路122号 邮政编码:430070)

<http://www.techbook.com.cn>

E-mail:tiandq@mail.whut.edu.cn

印 刷:武汉理工大印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:25.75

字 数:660千字

版 次:2005年1月第1版

印 次:2005年1月第1次印刷

印 数:1~3000册

定 价:36.00元

# 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 雷绍锋

委 员：(以姓氏笔画为序)

万发荣	马保国	王国梅	王培铭	文梓芸
水中和	叶卫平	叶枝荣	叶 菁	田道全
曲祖元	刘亚云	刘 军	孙成林	姜洪舟
吴建青	吴建锋	陈 文	杨长辉	钱觉时
钱春香	高建明	徐秋林	黄佳木	黄学辉
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。教育部颁布重新修订的《普通高等学校本科专业目录》后,为适应 21 世纪人才培养需要,及时组织并实施了面向 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,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变化。原有的教材已经不能适应新专业的培养目标和教学要求,组织一套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,决定首批编写出版 14 种主干课程的教材,以尽快满足全国众多院校的教学需要,以后再根据专业方向的需要逐步增补。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培养目标和教学要求,从整体上考虑材料科学与工程专业的课程设置和各门课程的内容安排,按照教学改革方向要求的学时统一协调与整后合,组成一套完整的、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**——本套教材努力使用和推广现代化的教学手段,实现立体化出版,凡具备条件的课程都将根据教学需要,及时组织编写、制作和出版相应的电子课件或教案,以适应教育方式的变革。

本套教材是在教育部颁布实施重新修订的本科专业目录后,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,正因其为一套开创性的系列教材,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,它仍然还会存在缺点和不足。嘤其鸣矣,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,以便我们不断修改、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设备》

## 编审人员名单

**主 编：** 姜洪舟 (武汉理工大学材料科学与工程学院)  
**副主编：** 黄迪宇 (洛阳浮法玻璃集团公司技术中心)  
何 峰 (武汉理工大学材料科学与工程学院)  
阎法强 (山东工业陶瓷研究设计院)  
文 进 (武汉理工大学材料科学与工程学院)

### 参 编：

裴新美 朱 明 (武汉理工大学材料科学与工程学院)  
李娟娟 李应开  
李福洲 (武汉理工大学硅酸盐材料工程教育部重点实验室)  
周 建 王玉成 (武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室)  
王 琳 (武汉理工大学信息工程学院)  
刘教喻 (武汉理工大学电子设备厂)  
刘怀艺 (武汉长利玻璃集团公司)  
张宪岭 王晓红 (洛阳浮法玻璃集团公司技术中心)  
姚 强 (合肥水泥工业设计研究院设计分院)

**主 审：** 林发森 (武汉理工大学动力学院)  
**参 审：** 朱光熹 (南京凯盛水泥技术工程有限公司)  
李兆群 (秦皇岛耀华玻璃集团公司)  
许文华 (咸阳陶瓷研究设计院)  
杨继芳 (咸阳陶瓷研究设计院)

## 前 言

本教材是高等学校材料科学与工程类学科无机非金属材料专业方向的教材。编写本教材的宗旨是将本领域内有关热工设备方面“崭新而丰富的内容,先进而实用的技术”奉献给读者。其特点是强调科学性、先进性、广泛性和实用性。本教材是在武汉理工大学有关领导的亲切关怀和大力支持下,在很多有识之士的热情关心下完成的,并且得到了有关兄弟单位的大力支持,所以,它的编写凝聚了许多人的心血。本教材的具体编写分工如下:第1章由姜洪舟、李应开、李福洲、姚强编写。第2章由黄迪宇、张宪岭、王晓红、刘怀艺、何峰编写。第3章由裴新美、何峰、阎法强编写。第4章第1节由文进编写;第2节由周健、王玉成、王琳编写;第3节由朱明编写;第4节由李娟娟编写。第5章第1节由姚强、李福洲编写;第2节由黄迪宇编写;第3节由阎法强编写。第6章(附录)由刘教喻编写。第1章、第5章、第6章由姜洪舟统稿,第2章由何峰统稿,第3章、第4章由裴新美统稿。全书由姜洪舟担任主编,并对全书内容进行了编排和整理。

本教材按20~40学时编写,各章的建议授课时数为:第1章,6~10学时;第2章,6~10学时;第3章,6~10学时;第4章,1~6学时;第5章,1~4学时。

在本教材脱稿完成之际,编者特别感谢武汉理工大学张联盟等校领导,出版社杨学忠、田道全等领导和编辑,教务处张荣国等领导和教师曾给予的大力支持和帮助。此外还有曲祖源、程金树、谢峻林、吴建锋、韩建军、陈元魁、周立秋、黄晓华和陈学军等专家和同行为本教材提出过宝贵的意见和建议,原武汉工业大学刘玉明、沈大荣、刘顺妮等领导也曾给本教材的编撰给予了支持,在此向他们深表谢意!

本教材由武汉理工大学林发森教授担任主审。本教材的具体审稿人为:南京凯盛水泥技术工程有限公司的朱光熹高工,秦皇岛耀华玻璃集团公司李兆群高工,咸阳陶瓷研究设计院的许文华高工与杨继芳高工。具体分工是:朱光熹负责审核第1章、第4章的第3节及第5章的第1节;李兆群负责审核第2章及第5章的第2节;许文华与杨继芳负责审核第3章、第4章的第1节、第2节、第4节以及第5章的第3节。对于以上各位专家为进一步提高本教材的质量所作的辛勤工作,我们表示由衷地感谢!

另外,作为高等学校材料科学与工程类学科无机非金属材料专业方向一个完备教学体系中的重要一环,本教材的编者特别注意与本专业其他课程教材的衔接。在具体编写过程中尽可能减少有关的交叉点,也尽可能避免有关的空白点。如果读者在阅读本教材时发现什么问题,或者有什么更好的建议,欢迎和我们联系,我们将不胜感激。

尽管我们的编者都是长期在无机非金属材料领域内从事科技工作的人员,但是由于编写经验不足,虽加倍努力,但个别的错误在所难免。因此,全体编者衷心地希望能够得到来自更多读者的批评指正意见。

编 者

2005年1月

# 目 录

0 绪论 .....	(1)
0.1 无机非金属材料工业热工设备的内涵与共性 .....	(3)
0.1.1 工艺过程的特点 .....	(3)
0.1.2 热工过程的特点 .....	(3)
0.1.3 热平衡计算的概念 .....	(5)
0.1.4 筑炉材料、窑炉砌筑和窑炉烘烤简介 .....	(6)
0.1.5 燃烧设备简介 .....	(7)
0.1.6 热工设备自动控制的必要性 .....	(8)
0.2 无机非金属材料热工设备的外延及总体概况 .....	(9)
1 新型干法水泥回转窑系统 .....	(12)
1.1 系统概述 .....	(12)
1.1.1 系统简介 .....	(12)
1.1.2 新型干法水泥回转窑系统的几个重要性能指标 .....	(14)
1.2 悬浮预热器 .....	(18)
1.2.1 旋风预热器的工作原理 .....	(18)
1.2.2 影响旋风预热器换热效率的因素 .....	(20)
1.2.3 旋风预热器的结构参数和技术参数 .....	(23)
1.2.4 各级旋风预热器性能的配合(以5级旋风预热器为例) .....	(28)
1.2.5 旋风预热器串联级数的选择 .....	(29)
1.2.6 旋风预热器(SP)的分类以及几种典型的旋风预热器 .....	(30)
1.3 分解炉 .....	(36)
1.3.1 窑外分解技术的产生 .....	(36)
1.3.2 分解炉的分类 .....	(37)
1.3.3 几种典型分解炉的结构特征简介 .....	(41)
1.4 回转窑与冷却机 .....	(67)
1.4.1 回转窑(Rotary Cement Kiln) .....	(68)
1.4.2 水泥熟料冷却机(Clinker Cooler) .....	(69)
1.5 预分解窑系统的工艺设计计算方法简介 .....	(92)
1.5.1 回转窑 .....	(92)
1.5.2 旋风预热器的设计 .....	(95)
1.5.3 分解炉的设计 .....	(95)
1.5.4 水泥熟料冷却机的选型 .....	(99)
1.5.5 窑外预分解水泥回转窑系统一些附属设备的选型 .....	(99)
1.6 新型干法水泥熟料烧成系统的均衡稳定操作与防止结皮堵塞的措施 .....	(100)



1.6.1	均衡稳定操作 .....	(100)
1.6.2	防止结皮堵塞的事故 .....	(104)
1.7	水泥立窑 .....	(106)
1.7.1	立窑的分类 .....	(106)
1.7.2	立窑水泥熟料煅烧系统的流程和立窑结构 .....	(106)
1.7.3	立窑的工作原理 .....	(110)
1.8	固体燃料煤的燃烧设备 .....	(114)
1.8.1	煤粉燃烧技术 .....	(114)
1.9	水泥窑系统用耐火材料简介 .....	(122)
1.9.1	水泥回转窑系统用的耐火材料 .....	(122)
1.9.2	水泥立窑用的耐火材料 .....	(123)
	思考题 .....	(124)
	习题 .....	(125)
	参考文献 .....	(127)
2	玻璃池窑及有关的热工设备 .....	(131)
2.1	浮法玻璃池窑和锡槽 .....	(135)
2.1.1	玻璃熔制部分 .....	(135)
2.1.2	热源供给部分 .....	(147)
2.1.3	余热回收部分 .....	(149)
2.1.4	排烟供气部分 .....	(154)
2.1.5	锡槽(浮法玻璃池窑的成型部) .....	(156)
2.2	浮法玻璃池窑和锡槽的设计简介 .....	(163)
2.2.1	玻璃熔制部分的设计 .....	(163)
2.2.2	热源供给部分的设计 .....	(178)
2.2.3	余热回收设备——蓄热室的设计 .....	(182)
2.2.4	排烟供气系统的设计 .....	(185)
2.2.5	锡槽的设计 .....	(187)
2.3	日用玻璃池窑 .....	(194)
2.3.1	玻璃熔制部分 .....	(195)
2.3.2	热源供给部分 .....	(198)
2.3.3	余热回收部分 .....	(198)
2.3.4	排烟供气部分 .....	(199)
2.3.5	马蹄焰玻璃池窑的成型部(也被称为工作部) .....	(199)
2.4	日用玻璃池窑的设计简介 .....	(200)
2.4.1	玻璃熔制部分的设计 .....	(200)
2.4.2	热源供给部分的设计 .....	(207)
2.4.3	余热回收部分的设计 .....	(207)
2.4.4	排烟供气部分的设计 .....	(207)
2.4.5	马蹄焰玻璃池窑供料道的设计 .....	(207)

2.5 玻璃池窑操作原理——作业制度简介 .....	(208)
2.5.1 温度制度 .....	(208)
2.5.2 压力(压强)制度的制订 .....	(209)
2.5.3 泡界线制度 .....	(211)
2.5.4 液面制度 .....	(211)
2.5.5 气氛制度 .....	(212)
2.6 退火窑 .....	(212)
2.6.1 玻璃制品的退火原理、退火过程和退火制度 .....	(213)
2.6.2 浮法平板玻璃退火窑(辊道式退火窑)的基本结构 .....	(224)
2.6.3 浮法玻璃(辊道式)退火窑的设计简介 .....	(228)
2.6.4 网带式退火窑的基本结构 .....	(231)
*2.6.5 网带式退火窑的设计概要 .....	(238)
2.7 常用的液体燃料燃烧器以及燃烧器在玻璃池窑上安装位置的选择 .....	(240)
2.7.1 燃油烧嘴 .....	(241)
2.7.2 轻质柴油烧嘴 .....	(243)
2.7.3 液体燃料燃烧常用的一些技术 .....	(245)
2.7.4 烧嘴安装位置的选择 .....	(246)
2.7.5 玻璃池窑燃烧系统设计和操作过程中值得注意的几个问题 .....	(251)
2.8 玻璃池窑及有关热工设备用耐火材料简介 .....	(252)
2.8.1 玻璃池窑选用耐火材料的原则 .....	(252)
2.8.2 玻璃池窑耐火材料的种类 .....	(253)
2.8.3 玻璃退火窑用的耐火材料 .....	(256)
思考题 .....	(256)
习题 .....	(257)
参考文献 .....	(258)
<b>3 隧道窑与辊道窑 .....</b>	<b>(260)</b>
3.1 隧道窑 .....	(261)
3.1.1 隧道窑的分带、流程和结构 .....	(262)
3.1.2 隧道窑的附属设备和窑车自动运行系统操作程序 .....	(272)
3.1.3 非窑车式与隔焰式、半隔焰式以及多通道式隧道窑简介 .....	(273)
*3.1.4 隧道窑的设计计算概要 .....	(276)
3.2 辊道窑 .....	(281)
3.2.1 概述 .....	(281)
3.2.2 工作系统 .....	(282)
3.2.3 辊道窑的结构 .....	(283)
3.2.4 辊道窑的快速烧成与节能效果 .....	(292)
*3.2.5 辊道窑的工艺设计概要 .....	(294)
3.3 隧道窑、辊道窑的操作控制以及辊道窑的自动检测系统、安全保护系统 .....	(297)
3.3.1 各带温度的控制 .....	(297)

3.3.2	烧成带的气氛控制 .....	(299)
3.3.3	各带的压强控制 .....	(299)
3.3.4	隧道窑或辊道窑的自动检测系统以及辊道窑的自动安全保护系统 .....	(300)
3.4	常用的气体燃料燃烧设备 .....	(303)
3.4.1	高速调温烧嘴 .....	(303)
3.4.2	脉冲(高速调温)烧嘴简介 .....	(308)
3.4.3	平焰烧嘴 .....	(308)
3.4.4	浸没式烧嘴 .....	(308)
3.5	隧道窑与辊道窑用耐火材料简介 .....	(309)
3.5.1	隧道窑用耐火材料 .....	(309)
3.5.2	辊道窑用耐火材料 .....	(311)
	思考题 .....	(314)
	习题 .....	(315)
	参考文献 .....	(316)
4	其他几种类型的热工设备与材料热制备技术 .....	(318)
4.1	梭式窑 .....	(318)
4.1.1	梭式窑的结构 .....	(319)
4.1.2	几种典型现代梭式窑简介 .....	(323)
4.2	电热窑炉与一些高科技的材料热制备技术 .....	(326)
4.2.1	电热窑炉的类型 .....	(327)
4.2.2	电阻炉 .....	(327)
4.2.3	电磁感应炉 .....	(338)
4.2.4	电弧炉和弧像炉 .....	(339)
4.2.5	电子束炉 .....	(342)
4.2.6	等离子炉 .....	(343)
4.2.7	微波烧蚀炉 .....	(345)
4.2.8	材料的热等静压制备技术 .....	(346)
4.2.9	材料的自蔓延高温合成技术 .....	(347)
4.2.10	太阳炉 .....	(349)
4.3	混凝土制品热养护设备 .....	(351)
4.3.1	热养护过程 .....	(352)
4.3.2	连续作业热养护设备 .....	(359)
4.3.3	其他热养护方法简介 .....	(365)
4.4	余热锅炉 .....	(369)
4.4.1	锅炉的工作原理 .....	(369)
4.4.2	热管技术与热管余热锅炉 .....	(370)
4.4.3	余热锅炉的主要技术参数 .....	(373)
4.4.4	在无机非金属材料工业领域中利用余热锅炉的一些实例 .....	(374)
	思考题 .....	(377)

---

习题.....	(377)
参考文献.....	(378)
5 无机非金属工业热工设备的最新进展 .....	(380)
5.1 新型干法水泥熟料烧成系统的最新进展及其展望 .....	(380)
5.2 玻璃池窑的最新进展 .....	(382)
5.3 隧道窑和辊道窑的最新进展 .....	(386)
思考题.....	(387)
习题.....	(388)
参考文献.....	(389)
6 热工设备的自动控制技术简介(附录) .....	(390)
6.1 概述 .....	(390)
6.2 传统的 DDZ 系列电动单元组合仪表简介.....	(391)
6.3 窑炉集散型计算机控制简介 .....	(392)
6.4 PC 可编程控制器简介 .....	(393)
6.5 计算机控制系统可靠性设计 .....	(395)
6.5.1 故障来源 .....	(396)
6.5.2 元件级及单元的可靠性设计 .....	(396)
6.5.3 系统级的可靠性的设计 .....	(397)

## 0 绪 论

“无机非金属材料”这个名称是从传统的、所谓的“硅酸盐材料”演变而来的。传统的硅酸盐材料因其含有硅酸盐矿物而得名,而现在这个领域已经大大拓宽,具体地来说,现代的无机非金属材料已经从硅酸盐领域扩展到碳化物、卤化物、氮化物、硼化物、铝酸盐、硅酸盐、磷酸盐、硼酸盐等领域。目前,它与有机材料、金属材料并列为材料工业的三大支柱。

无机非金属材料的特点之一就是几乎所有的无机非金属材料产品都要经过高温制备而成,所以我国最早将这类材料称为“窑业材料”,后因其主要产品含有硅酸盐矿物而将其称为“硅酸盐材料”,再以后,随着其领域的拓宽,远远超出了硅酸盐的范围,人们才把这一大类材料称之为“无机非金属材料”。从“窑业材料”到“硅酸盐材料”,再到“无机非金属材料”,是我国的科技工作者对于此类材料认识的几次飞跃。在国外,由于这类材料最早以陶瓷为代表,因此目前欧、美等国家均用广义的陶瓷(Ceramics)来表示“无机非金属材料”。图 0.1 所表示的就是无机非金属材料的基础学科与其主要产品之间的相互关系。

要产生高温就需要有热量,这正是高等学校材料科学与工程学科无机非金属材料专业方向的本科教学需要设置与“热工”相关课程的重要意义所在。产生热量、利用热量的设备叫做“热工设备”,热工设备的主要代表就是窑炉(Kiln and Furnace)。本教材中所涉及到的热工设备是在无机非金属材料领域内所使用的热工设备。

既然,热工设备主要是指“窑炉”,那么,什么是窑炉呢?窑炉实际上就是指这样一些结构空间,在这些结构空间内,能够用加热的方法,按照工艺要求的烧成制度,使原料(生料)经过一系列的物理化学变化变为产品(熟料)。到目前为止,加热的热量是来自于燃料燃烧产生的热能或用电能所产生的热能。热工设备(窑炉)的先进性主要体现在:在能够保证稳定的产品质量及产量的前提下,要具有最大的热效率,即最低的单位产品热量消耗(简称热耗)和电能消耗(简称电耗)。也就是说,越先进的热工设备(窑炉),其热效率越高,其单位产品的热耗和电耗越低。

由以上的论述可以看出,作为从事无机非金属材料专业方向学习的本科生和在该领域工作的科技人员来说,必须掌握有关热工设备的规律,以达到正确设计、合理操作和制备稳定的优质产品之目的。

各种类型的无机非金属材料热工设备(窑炉),尽管其具体产品种类不同,而且在结构、流程等诸多方面存在着很大的差异,但是由于它们都是热工设备,因此仍然可以找出许多内涵与共性出来。这些内涵与共性包括:烧制过程的工艺过程特点与热工过程特点,热平衡计算,筑炉材料与窑炉的砌筑,窑炉的烘烤,燃烧设备以及热工设备的自动控制等等。

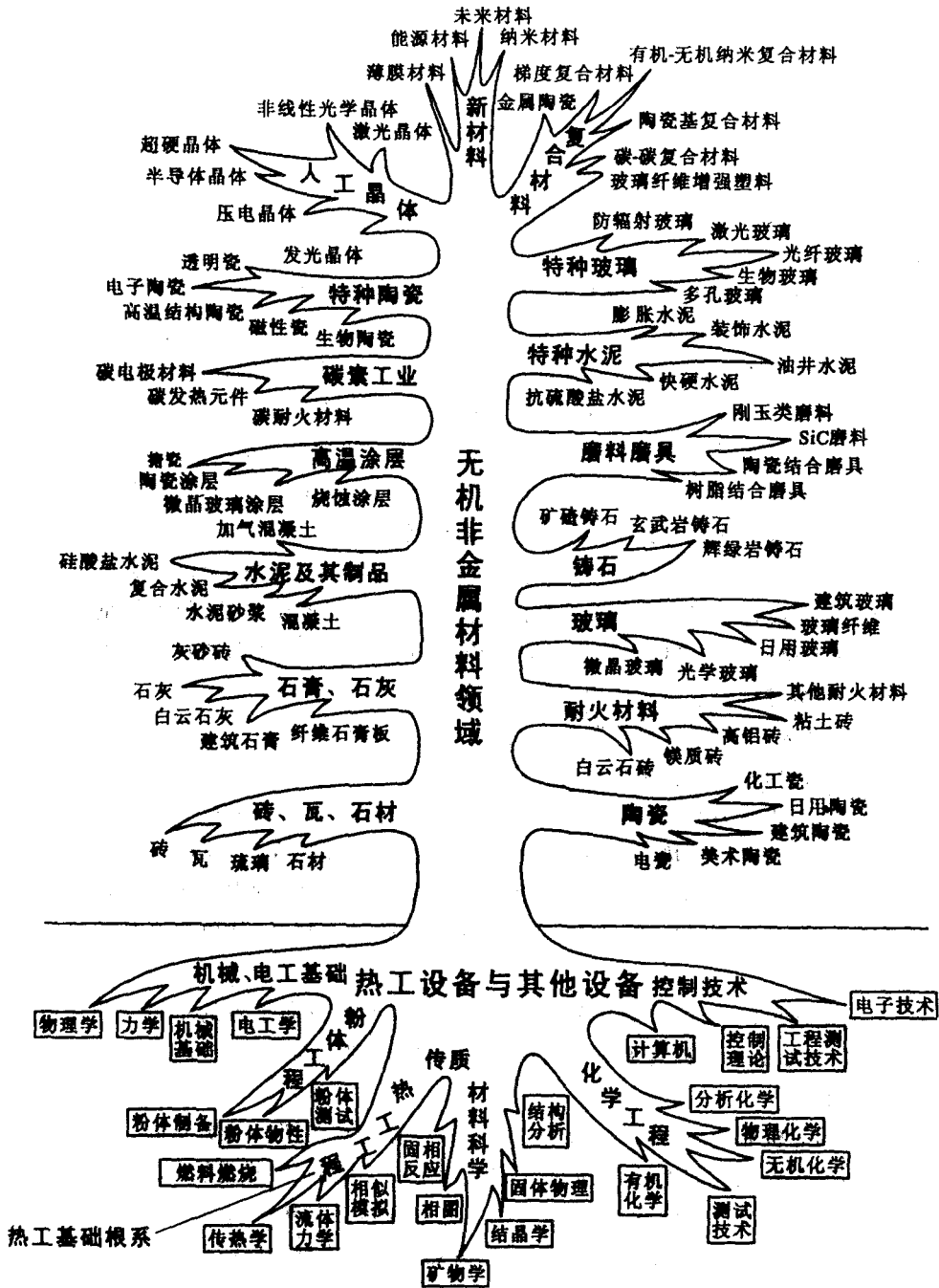


图 0.1 无机非金属材料的基础学科与其主要产品之间的相互关系

## 0.1 无机非金属材料工业热工设备的内涵与共性

### 0.1.1 工艺过程的特点

无机非金属材料的高温制备方法分为两大类：一类是烧制方法；另一类是高技术制备方法。具体地说，前一类，即烧制方法，包括固相烧制(Sintering)、液相烧制(Vitrification)和熔化(Melting)这三种具体的烧制方法。后一类，即高技术制备方法，包括材料的“放电等离子体烧制”技术(简称SPS技术, Spark Plasma Sinter)、材料的“微波烧制”技术(Microwave Sintering)、材料的“热等静压制备”技术(简称HIP技术, Hot Isostatic Pressing)、材料的“自蔓延高温合成”技术(简称SHS技术, Self-propagation High-temperature Synthesis)等一些具体的高技术制备方法。后一类高温制备方法一般是用于小批量、高附加值的高技术陶瓷产品的高温制备。本教材的重点是放在工业规模的热工设备上，因此以下我们将重点介绍前一类高温制备方法，即烧制方法。对于后一类制备方法，即高技术制备方法，只作一般性的简单介绍。

在烧制方法中，固相烧制是指在高温阶段将物料中的气孔排出，物料的体积收缩，气孔率下降，产生致密化，有部分固相反应存在，但是不出现液相，例如，陶器(Pottery)的素烧(Biscuit Firing)、砖瓦(Common Brick and Roof Tile)的素烧便是属于此类。液相烧制则是指在高温阶段除了要排除气孔、物料的体积收缩、气孔率下降、产生致密化和有固相反应存在以外，还会有部分的液相出现，即产品中会有玻璃相存在，例如，水泥熟料的烧成(Clinkering)、瓷器的烧成(Firing)、烧结型耐火材料的烧成(Firing)便属于此类。而熔化是指在高温阶段，物料全部熔化成为液相，例如，玻璃产品的熔制、熔铸型耐火材料的制备便属于此类。

无机非金属材料工艺过程的特点之一就是，不管使用哪一种烧制方法，从原料(生料)变为产品(熟料)，大体上都要经过预热、烧成和冷却这三个阶段(过程)，只是具体的产品在这三个阶段中的具体细节有所不同，图0.2表示的是几种具有代表性的无机非金属材料工业产品的烧制工艺过程(阶段)。

### 0.1.2 热工过程的特点

无机非金属材料热工过程的特点之一就是，热工设备必须在设备结构和烧成制度上满足所烧制产品烧制过程中工艺过程的要求。这样，于是就有了两种类型的热工设备(窑炉)：一类热工设备是在同一设备结构空间内，在不同的时间来满足不同阶段的工艺要求，这种热工设备被称为间歇式(Intermittent或Periodic)热工设备，通俗地说，就是一炉一炉地来烧制产品。另一类热工设备是在设备结构空间内的不同区域来满足不同阶段的工艺要求，简单地来说就是原料(生料)在热工设备内经过“预热区”、“烧成区”和“冷却区”后就成为烧制后的产品(熟料)。这类热工设备具体到设备内的每一点，其热工参数(包括温度、压强、气氛等)基本上是稳定不变的，这类热工设备被称为连续式(Continuous)热工设备。另外，也有的热工设备介于二者之间，所以被称为半连续式(Semi-continuous)热工设备。

间歇式热工设备是来源于传统的热工设备。这类热工设备由于废气的余热得不到有效的利用，因此，其热效率很低，即单位产品的热耗很高。另外，这种类型的热工设备一般还需要有很高的操作技巧，这就包括有许多人为的因素，所以不容易实现机械化和自动化，也需要很大

的劳动力强度,而且产品质量的稳定性较差。目前,在无机非金属材料领域,除了一些实验室规模或小批量产品还有采用间歇式热工设备的情况以外,在大多数情况下,间歇式热工设备已基本被淘汰。

水泥熟料的烧制	<p>预热阶段(室温~900℃):生料中残余水的排除,结构水在500℃左右的排出,生料的预热升温。少量碳酸盐(主要是MgCO<sub>3</sub>)的分解。</p> <p>分解阶段(900~1000℃):大量碳酸钙的分解,吸收大量的热量。</p>	<p>固相反应阶段(1000~1250℃):各种氧化物之间发生固相反应,形成了一些矿物。</p> <p>烧成阶段(1250~1450~1300℃):1250~1280℃时,出现液相。最终产物为玻璃相以及C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF。</p>	<p>冷却阶段(1300~100℃):快速冷却,可以保持一定的玻璃体,还可以防止β-C<sub>2</sub>S→γ-C<sub>2</sub>S,从而提高水泥强度以及其他一些性能指标,而且还有利于水泥熟料中余热的回收,也有利于粉磨和便于水泥熟料的输送及储存。</p>
玻璃产品的烧制	<p>预热阶段(室温~800℃):配合料中残余水、结构水的排除,盐类的分解以及配合料的预热升温。</p>	<p>硅酸盐形成阶段(800~1200℃):有晶体转变和固相反应发生,从而形成由硅酸盐和游离石英所组成的烧结物。</p> <p>玻璃液形成阶段(1200~1300℃):1200℃左右出现熔融体,最终形成含有大量气泡的、且成分和温度很不均匀的玻璃液。</p> <p>玻璃液澄清和均化阶段(1300~1500℃):澄清是靠因高温降低粘度而将气泡排除来获得;均化也是靠高温产生的玻璃液流动来达到。</p>	<p>冷却成形阶段(1500~1200℃):高温的玻璃液不利于成型,需要均匀地冷却到成型温度以后再成型,成型温度一般比澄清温度要低200~300℃。</p> <p>成型产品的冷却阶段(1100℃~室温):成型产品被冷却,而后等待退火。[注:冷却后的玻璃产品还需要经过退火阶段,即再加热到退火温度(400~570℃左右),将内应力消除以后,才能成为正式的产品]</p>
陶瓷的烧制	<p>预热阶段(室温~300℃):坯体中残余水分的排除和坯体的预热升温。</p> <p>氧化、分解和晶型转变阶段(300~950℃):碳和一些有机物的氧化,结构水的排出和碳酸盐的分解,坯体的继续升温且有晶型转变:β-石英<sup>573℃</sup>→α-石英; α-石英<sup>867℃</sup>→α-磷石英。</p>	<p>烧成和高温保温阶段(950~1300℃):有固相反应和液相出现。最终产物为玻璃相、莫来石晶体和未融解的石英颗粒。</p>	<p>急冷阶段(1300~700℃):急冷可以保持玻璃相,防止低价铁被氧化,从而提高产品的光泽度、半透明度和白度。</p> <p>慢冷阶段(700~400℃):进行慢冷以适应α-石英<sup>573℃</sup>→β-石英的晶型转变,从而可以防止因冷却速度过快而导致陶瓷产品的开裂。</p> <p>快冷阶段(400℃~室温):快冷可以提高陶瓷产品的烧制速度,从而缩短其烧制周期。</p>
无机非金属材料的烧制过程	预热阶段	烧成阶段	冷却阶段

注:1. 本图中,各阶段的划分是人为的,这只是为了便于初学者的理解,并不十分严格,请读者阅读时注意。

2. 本图中,各阶段的温度范围也是为了便于读者对于整个工艺过程的理解,因同种材料不同产品之间的相应温度略有不同,因此,该图中的温度范围仅供读者参考。

图 0.2 几种具有代表性的无机非金属材料工业产品的烧制工艺过程(阶段)

与间歇式热工设备不同的是,连续式热工设备内一个区域的余热可以被其他区域所利用[例如,烧成区域(烧成带)和冷却区域(冷却带)的废气余热可以被预热区域(预热带)所利用],而且很容易实现自动化和机械化,从而使其人员成本较低,更重要的是它的产品质量优良而稳定。目前,在无机非金属材料工业领域基本上都是采用连续式热工设备进行生产,所以,本教



材将重点介绍这一类热工设备。至于半连续式热工设备,由于它仍然具有间歇式热工设备一些不可避免的缺点,因此这类热工设备在现代工业规模的生产中也基本上被淘汰。

### 0.1.3 热平衡计算的概念

热工设备的“热平衡”概念来源于“能量守恒”这一普遍规律。如果我们将所研究的对象称之为“系统”,系统以外的叫做“环境”,从环境到系统称为“输入”,从系统到环境称为“输出”,那么根据能量守恒的原理,对于一个稳定的系统,则输入热量之和应等于输出热量之和,即:

$$\sum_{i=1}^m \text{热量输入} = \sum_{j=1}^n \text{热量输出}$$

这个关系式就叫做“热平衡方程”,简称“热平衡”。

生产上的连续式热工设备基本上都可以作为一个稳定的系统。因此,完全可以利用热平衡的原理进行计算。对于热工设备来说,进行热平衡计算,主要有以下三个目的:

(1) 对于一个热工设备的设计来说,利用热平衡这个等式可以计算出一个待确定的量。例如,在进行一个热工设备的设计计算时,可以利用热平衡这个等式(方程),计算出单位产品的热量消耗量或燃料消耗量,从而为进一步进行燃烧设备或加热设备的设计或选型提供必要的的数据,所以说,热平衡计算是热工设备设计计算的一个重要环节。

(2) 对于一个热工设备的测量来说,进行热平衡计算可以验证测试数据的可靠性如何。如果根据测试数据计算出的结果与热平衡相差太远,即输入热量之和与输出热量之和相差太远,超过了允许的测量误差,则说明该测试要么漏项,要么在测试过程或计算过程中有误,这样可以促使测试人员回过头来仔细检查,直到找到错误并且改正到正确为止。

(3) 对于一个热工设备的优化操作、自动控制和科学管理来说,进行热平衡的测试和计算,可以知道在一个热工设备内的热量分配是否合理,如果不合理,如何及时和合理地去调整。

#### \* 附:“焓平衡”概念的简介

热平衡的本质是能量守恒,实质上就是热力学第一定律。但从热力学的角度来看,更为实用的应该是热力学第二定律,该定律也可以用另一种方式来表述,即有用能量——“焓”的平衡。关于“焓”这个名称目前在科学界并不统一,在国内,有人将它叫做“有效能”或“可用能”。在国际上,它的名称也是多种多样,例如,在国际上有人将它叫做 Available Energy,也有人称之为 Exergie,也有人称之为 l'energie Utilisable,还有人把它称为 Availability。目前,国内广泛接受的和我国国家标准局颁布的国标(国家标准)GB4270/T—1999“文件用热工图形符号与文字代号”中关于这个概念的称呼是“焓”。

热力学第二定律指出,尽管能量守恒,但是功能转换有“可逆”与“不可逆”之分,例如“功”可以全部转换为“热”,但是“热”却不能全部转换为“功”。焓平衡法是指热力学过程中输入与输出之间具有相同“质(可用性)”的能量平衡,焓具有统一的尺度,而且当作焓平衡的计算时,已经把不可逆的因素所引起的焓损失考虑在内。因此,从理论上讲,与热平衡相比,使用焓平衡的作法更为合理,由焓平衡计算所求得的体系或设备的“焓效率”更具有科学性,由焓平衡法所指出的节能途径更为合理、准确。

但是,由于焓平衡的计算方法和计算过程较为复杂,迄今为止,尽管人们在热工设备焓平衡计算方面所取得的工作成果有很多,但是所有这些成果还不能说是很完备的。相对来讲,热平衡的方法较为简单、直观和易于掌握,也比较符合人们的传统观点。所以,尽管将来热平衡分