

TaoCiYaoLuShiYongJiShu

陶 瓷 窑 炉
实用技术

曾令可 李 萍 刘艳春◎编著

中国建材工业出版社

陶瓷窑炉实用技术

曾令可 李萍 刘艳春 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

陶瓷窑炉实用技术/曾令可, 李萍, 刘艳春编著.
—北京: 中国建材工业出版社, 2010. 4
ISBN 978-7-80227-547-8

I. ①陶… II. ①曾… ②李… ③刘… III. ①陶瓷—
工业窑炉—生产工艺 IV. ①TQ174. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 020387 号

内 容 简 介

本书是著者近四十多年来完成及参与完成有关科研项目进行陶瓷窑炉实用技术研究所做工作的总结。本专著针对目前国内外陶瓷行业应用最多的比较先进而典型的隧道窑、辊道窑及梭式窑, 从结构、工艺特点、耐火材料的应用、操作的优化到控制系统研究等进行阐述。结合计算机仿真技术、红外热成像动态温度场测试技术, 人工神经网络技术、模糊控制技术、节能减排技术等新技术的应用, 极大地丰富并促进了陶瓷窑炉热工理论的研究, 为陶瓷窑炉结构的优化、操作条件的最优化以及陶瓷窑炉研究技术的提高、节能减排提供了必要的理论和应用基础, 不少成果已在生产实践中得到应用, 并在陶瓷窑炉工程中发挥了很大作用, 促进了陶瓷工业的发展。

本书可供无机非金属材料工程、硅酸盐工程及特种陶瓷工程领域中从事窑炉热工理论研究、工程研究、设计、生产的工程技术人员、一般的操作工人及高等院校教师、研究生、本科生、大专生阅读或作为参考书。

陶瓷窑炉实用技术

曾令可 李萍 刘艳春 编著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京中科印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 40.5

字 数: 1034 千字

版 次: 2010 年 4 月第 1 版

印 次: 2010 年 4 月第 1 次

书 号: ISBN 978-7-80227-547-8

定 价: 98.00 元

本社网址: www.jcbs.com.cn

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

我国是生产陶瓷最早的国家，秦砖汉瓦，汉唐以后的瓷器早已饮誉世界。改革开放以后，我国的陶瓷产量突飞猛进，建筑卫生陶瓷、日用陶瓷的产量均跃居世界第一，成为全世界陶瓷生产的强国。

陶瓷窑炉是陶瓷生产的关键设备之一。我国早在两千多年前的战国时期就创造了馒头窑炉和龙窑，烧制出优质的陶瓷。改革开放以后，我国引进了一大批先进窑炉，如辊道窑、隧道窑及梭式窑等。在引进、消化、创新精神的指导下，我国的窑炉科研工作者及有关的工程技术人员对引进的窑炉进行了大量研究工作，从窑炉的结构、耐火材料、控制系统到相关的配套设备等，从单窑、单线到配套整线，从进口到整线出口，创造了今天陶瓷行业的辉煌。

我们在老一辈窑炉专家刘振群教授的带领下，和国内其他知名的窑炉、热工理论研究者一起，为了探索窑炉奥秘，在窑炉热工理论研究及其在陶瓷窑炉中的应用等方面展开了广泛而深入的研究，取得了令国际、国内瞩目的成果。正如陕西科技大学著名教授、中国硅酸盐学会陶瓷分会理事、陶瓷窑炉专业委员会主任高力明教授所说：“这些成果在国际上是处于前沿水平的。”

本书是著者四十多年来在完成及参与完成国家自然科学基金、高等学校博士点专项基金、国家“七五”攻关项目、国家“九五”攻关项目中指导研究生及协助指导研究生进行陶瓷窑炉实用技术基础性研究所做工作的总结。本专著针对目前国内外应用最多的比较先进而且典型的隧道窑、辊道窑及梭式窑，从结构、工艺特点、操作的优化到控制系统研究等，包括研究的方法、实验模型的制作、实验数据的测试、数学模型的建立、数据的处理方法及在陶瓷窑炉工业中的实际应用等，对陶瓷窑炉热工理论及实用技术作系统而科学的总结。结合计算机仿真技术、红外热成像动态温度场测试技术、人工神经网络技术等新技术的应用，极大地丰富并促进了陶瓷窑炉热工理论的研究，为陶瓷窑炉结构的优化、操作条件的最优化，以及陶瓷窑炉研究技术的提高提供了必要的理论基础。不少成果已在生产实践中得到应用，并在陶瓷窑炉工程中发挥了很大作用，促进了陶瓷工业的发展。

本书可供无机非金属材料工程、硅酸盐工程领域特种陶瓷领域中从事窑炉热工理论研究、工程研究、设计、生产的工程技术人员、一般的操作工人及高等院校教师、研究生、本科生、大专生阅读或作为参考书。

参与本书编写工作的还有王慧、刘平安、程小苏、朱园园、税安泽、邓伟强、盛文彦、任雪潭、方海鑫、许爱民、曹建新、章义来、孙宇彤、刘涛、李得家、刘世明、夏海斌、龚晖、戴武斌、付英等。

感谢原华南理工大学无机非金属材料系热工教研组的各位老师在做长期的研究中所做的努力，感谢高力明教授、宋崑教授、孙承绪教授、蒋欣之教授、奚同庚教授、胡国林教授等老一辈陶瓷窑炉专家的支持和帮助。

感谢刘振群教授、文壁璇教授对本书内容的指导，以及他们所培养的研究生对本书的贡

献。感谢我所培养的博士生、硕士生对本书的贡献。感谢佛山科宝艺陶瓷窑炉技术服务有限公司李汝湘经理，佛山市中窑窑业发展有限公司董事长柳丹、张永农副总，华窑中洲窑炉有限公司余阳春总经理等的帮助。书中也引用了一些国内外学者的著作、论文的观点、论述及成果，在此谨对他们的工作致以深深的谢意。

感谢国家自然科学基金的长期资助，资助项目及编号如下：

- ①超多孔陶瓷储能材料及其在陶瓷窑炉中的动态热物理测试，50676033
- ②高温陶瓷窑炉内 NO_x 的生成机理及综合防治的基础研究，50276017
- ③陶瓷纤维在陶瓷窑炉中高温粉化机理及寿命预测研究，59772011
- ④用红外及计算机技术研究陶瓷制品烧成对变形与温度场关系，51972088
- ⑤高温结构陶瓷与功能陶瓷热物理研究与数据库建立，59172081
- ⑥中国主要无机材料硅酸盐原材料热物性研究，化 85085

在编写时，虽然在取材上力图尽善尽美，内容上尽量满足各层次人员并符合工程上的实际需要，但由于作者水平所限，书中一定有不少缺点和不足之处，诚挚地希望读者批评指正。

编者
2010.1

目 录

第 1 章 陶瓷材料热物性研究及物性数据库的建立	1
1.1 陶瓷材料热物性学及研究内容	1
1.2 陶瓷材料热物性测试方法	1
1.2.1 热常数仪测试原理	4
1.2.2 仪器结构	6
1.2.3 样品制备	6
1.2.4 标准试样的测试	7
1.3 陶瓷材料导热系数与气孔率关系	8
1.3.1 陶瓷材料导热系数与气孔率之间的理论推导	9
1.3.2 陶瓷材料导热系数与气孔率的研究进展	12
1.3.3 陶瓷材料导热系数与气孔率的实验分析	14
1.3.4 小结	16
1.4 陶瓷材料微观结构及焙烧程度对导热系数的影响	16
1.4.1 陶瓷材料微观结构与导热系数的机理分析	17
1.4.2 焙烧程度与导热系数的机理分析	20
1.4.3 陶瓷材料微观结构及焙烧程度对导热系数的实验分析	22
1.4.4 小结	24
1.5 陶瓷材料导热系数随温度变化关系的实例研究	25
1.5.1 国内外概况	25
1.5.2 六个理论方程分析	26
1.5.3 影响陶瓷材料导热系数的主要影响因素分析	27
1.5.4 陶瓷材料导热系数与温度的关系	28
1.5.5 小结	33
1.6 成形工艺条件对坯体导热系数的影响	33
1.6.1 成形压力对坯体导热系数的影响	33
1.6.2 含湿率对坯体导热系数的影响	33
1.7 无机材料热物性数据库管理系统的设计	34
1.7.1 主控制模块	35
1.7.2 子控制模块	36
1.7.3 通用管理系统模块	37
1.7.4 功能模块	37
1.7.5 管理系统设计的特点	41

1.7.6 小结	45
参考文献	45
第2章 管道保温	47
2.1 保温材料的种类	47
2.1.1 蛭石制品	48
2.1.2 珍珠岩制品	48
2.1.3 硅藻土制品	48
2.1.4 石棉	48
2.1.5 玻璃纤维	49
2.1.6 硅酸钙	49
2.1.7 矿渣棉	49
2.1.8 岩棉	50
2.1.9 硅酸铝纤维	50
2.1.10 莫来石纤维	51
2.2 保温材料热物性的研究	52
2.2.1 导热机理	52
2.2.2 导热系数的测试方法	53
2.3 表面温度的测试方法	55
2.3.1 热电偶法	55
2.3.2 表面热电偶和热电阻方法	59
2.3.3 红外辐射温度计法	59
2.3.4 红外热成像法	59
2.4 表面散热损失的测定	59
2.4.1 热流计法	59
2.4.2 热平衡法(焓差法)	60
2.4.3 表面温度计法、温差法	61
2.5 管道保温研究	62
2.5.1 建立管道保温数学模型	62
2.5.2 管道保温实体模拟方案	64
2.5.3 计算机模拟实验	65
参考文献	67
第3章 陶瓷窑炉的水力模型研究	69
3.1 隧道窑烧成带的水力模型研究	69
3.1.1 实验模型的建立	69
3.1.2 实验结果与分析	73
3.1.3 结论	80
3.2 烧重油辊道窑燃烧室结构的水力模型研究	81
3.2.1 实验模型的建立	81
3.2.2 实验方法	85

3.2.3 实验结果及讨论	85
3.2.4 结论	87
3.3 新型间歇式梭式窑的水力模型研究	87
3.3.1 实验模型与方法	88
3.3.2 实验方法的设定及选择原则	90
3.3.3 结果分析	90
3.3.4 结论	93
参考文献	93
第4章 陶瓷窑炉的空气动力模型研究	94
4.1 隧道窑的预热带和冷却带的对流传热模拟	94
4.1.1 前言	94
4.1.2 实验装置与方法	96
4.1.3 数据处理方法	100
4.1.4 实验结果与分析	102
4.1.5 结论	114
4.2 隧道窑烧成带的对流传热模型研究	115
4.2.1 概述	115
4.2.2 实验模型、测试装置和方法	115
4.2.3 实验数据处理与分析	121
4.3 梭式窑中料垛码法空气动力模型研究	127
4.3.1 前言	127
4.3.2 实验原理与实验装置	127
4.3.3 实验方法	131
4.3.4 数据处理	135
4.3.5 结果与分析	136
4.3.6 结论	154
参考文献	155
第5章 陶瓷窑炉的火焰模型模拟	156
5.1 陶瓷窑炉火焰模型研究的现状	156
5.2 火焰模型的建立原则	156
5.2.1 陶瓷窑炉火焰模型的模化比	156
5.2.2 陶瓷窑炉火焰模型的简化	156
5.2.3 陶瓷窑炉火焰模型尺寸的确定	157
5.3 陶瓷窑炉火焰模型的研究方法	157
5.3.1 温度和温度场的测定	157
5.3.2 火焰边界的确定	157
5.3.3 流型显示方法	158
5.3.4 陶瓷窑炉的燃烧情况的测量	158
5.4 陶瓷辊道窑预热带火焰模型研究	158

5.4.1	模拟对象	158
5.4.2	模型的简化及建立	158
5.4.3	实验装置	160
5.4.4	实验方法	160
5.4.5	结论	162
5.5	辊道窑烧成带火焰模型研究	163
5.5.1	模化条件	163
5.5.2	模型尺寸与结构	164
5.6	实验设备及测试装置	167
5.7	实验结果及讨论	168
5.7.1	代表性温度点的确定	168
5.7.2	油烧辊道窑烧成带温度特性	169
5.7.3	结论	173
	参考文献	174
第6章	实体模型模拟	175
6.1	火焰温度场的红外热成像测试	175
6.1.1	红外热成像仪的工作原理	176
6.1.2	实体模型的建立	178
6.1.3	火焰的红外热图像测试	179
6.1.4	红外热图像处理方法的优点	180
6.2	利用人工神经网络技术进行动态温度场预测	181
6.2.1	人工神经网络的结构及原理	182
6.2.2	温度场分析的模拟仿真	184
6.3	辊道窑内动态温差的测试	187
6.3.1	原型动态实测法	188
6.3.2	喷枪燃油火焰温度场的测试	189
6.3.3	辊道窑内动态温差的测试	191
6.4	辊道窑内闸板及挡火墙设置对窑内温差影响	192
6.4.1	引进辊道窑挡火板的设置	192
6.4.2	挡火板设置对辊道窑内温度的影响	195
6.4.3	辊道窑中设置挡火板的效果比较	197
6.5	窑炉外壁温度场的红外热成像测试	197
6.6	宽断面辊道干燥窑动态温度场的测量与分析	198
	参考文献	201
第7章	陶瓷窑炉的计算机模拟	203
7.1	宽断面隧道窑的计算机模拟及结构优化	203
7.1.1	宽断面隧道窑预热带计算机模拟	203
7.1.2	宽断面隧道窑冷却带的计算机模拟	208
7.1.3	宽断面隧道窑结构的优化	214

7.1.4	影响宽断面隧道窑热耗的因素分析	217
7.1.5	宽断面隧道窑计算机模拟及优化系统软件结构	222
7.2	辊道窑的计算机模拟及最佳烧成曲线的研究	226
7.2.1	烧墙地砖辊道窑的计算机模拟	226
7.2.2	模拟结果分析与讨论	228
7.2.3	最佳烧成曲线的确定	230
7.3	利用 FLUENT 软件进行陶瓷窑炉的模拟研究	231
7.3.1	利用 GAMBIT 建立辊道窑的计算模型	233
7.3.2	利用 FLUENT3D 求解器进行求解	235
7.3.3	结果与分析	239
7.4	电热隧道窑素烧面砖的计算机模拟	241
7.4.1	研究对象及其数学模型的建立	241
7.4.2	有限元方程的推导	243
7.4.3	程序简单框图	247
7.4.4	计算结果与分析	247
7.5	辊道窑干燥器的数字模拟	250
7.5.1	研究对象及干燥原理	250
7.5.2	辊道窑预干燥带质量平衡数学模型	251
7.5.3	窑内传热过程及临界水分分析	251
7.5.4	制品在干燥过程中温度场的分布及湿含量计算的数学模型	253
7.5.5	热工测定及热平衡计算和分析	256
7.5.6	数字模拟方案及模拟结果分析	257
7.6	间歇窑窑墙温度场的图形仿真研究	259
7.6.1	图形仿真的数学模型	260
7.6.2	窑体温度场图形仿真系统的设计	264
7.6.3	窑墙的蓄热与散热分析	264
7.6.4	窑墙的温度场分析	266
7.6.5	结论	267
7.7	辊道窑烧成面砖传热过程模拟	267
7.7.1	研究对象及参数	268
7.7.2	数学模型	268
7.7.3	计算方法	274
7.7.4	模型的验证	277
7.8	半隔焰辊道窑窑内传热的模拟	278
7.8.1	研究对象及传热过程的理论分析	278
7.8.2	数学模型的建立	279
7.8.3	辊道窑的热工测定	286
7.8.4	数字模拟方案及结果分析	286
7.9	窑墙非稳态导热的数值模拟	289

7.9.1	非稳态导热在陶瓷窑炉中的研究现状	289
7.9.2	周期性非稳态导热过程的特点	289
7.9.3	数值计算	290
7.9.4	计算结果与讨论	291
7.9.5	结论	294
7.10	陶瓷辊道窑辊棒两端散热过程的数值模拟	294
7.10.1	研究辊棒两端散热损失的必要性	294
7.10.2	数学模型	294
7.10.3	数值计算	296
7.10.4	计算结果与讨论	296
7.10.5	结论	298
7.11	预混燃烧器的数值模拟	298
7.11.1	模型及网格划分	298
7.11.2	计算结果及讨论	300
7.11.3	结构改进	302
7.11.4	结论	304
	参考文献	304
第8章	陶瓷烧成过程的研究	306
8.1	陶瓷烧成过程动态温度场的红外热成像测试	306
8.1.1	动态温度场测试现状	307
8.1.2	红外热成像和红外热成像仪	307
8.1.3	陶瓷烧成过程动态温度场的测试	311
8.2	陶瓷烧成过程中红外热图像库管理系统	315
8.2.1	热图像库管理系统	315
8.2.2	热图像库的形成	316
8.2.3	热图像库管理系统功能的应用	317
8.3	温度场的三维有限元数学模型	319
8.3.1	温度场的三维有限元分析	320
8.3.2	结构分析与有限元处理	322
8.4	热应力场的三维有限元数学模型	324
8.4.1	热应力的基本理论和研究方法	325
8.4.2	热应力场的三维有限元分析	327
8.4.3	单元的划分与结构分析	329
8.4.4	程序的设计与框图	330
8.4.5	模型中所涉及的物性参数	331
8.4.6	计算结果与分析	333
8.5	陶瓷还原气氛烧成的研究	336
8.5.1	还原烧成气氛	336
8.5.2	由燃料燃烧计算气氛组成	338

8.5.3	由化学平衡计算气氛组成	340
8.5.4	实验结果与讨论	343
8.5.5	结论	360
8.6	劈离砖的还原气氛烧成研究	361
8.6.1	还原烧成机理	361
8.6.2	还原烧成的实验设备及测试方法	362
8.6.3	实验数据及结果分析	362
8.6.4	优化劈离砖配方	363
8.6.5	烧成制度要求	364
8.6.6	烧成隧道窑的改造	364
8.7	陶瓷窑炉的还原烧成技术	366
8.7.1	陶瓷在窑炉烧成中还原变色	366
8.7.2	陶瓷窑炉还原烧成的实施	366
8.7.3	还原烧成的特点	367
8.7.4	还原烧成技术存在的问题	368
8.8	陶瓷窑炉的富氧燃烧技术研究	368
8.8.1	富氧燃烧技术在陶瓷窑炉中的应用分析	368
8.8.2	富氧燃烧技术在梭式窑中的应用	373
	参考文献	378
第9章	陶瓷窑炉控制系统的研究	381
9.1	两级微机控制系统的研究	381
9.1.1	研究对象	381
9.1.2	系统的总体结构及硬件配置	381
9.1.3	过程控制级	382
9.1.4	生产管理级	384
9.1.5	油烧辊道窑控制特性及 FUZZY 控制器的设计	385
9.2	陶瓷窑炉系统辨识系统的研究	401
9.2.1	模糊辨识法对隧道窑工况识别的研究	401
9.2.2	BP 神经网络对快烧瓷质砖烧成工况辨识的研究	408
9.3	应用 MATLAB 进行模糊控制系统的仿真研究	412
9.3.1	模糊控制器的建立	413
9.3.2	模糊控制系统的设计	416
9.3.3	系统的仿真研究	417
9.4	多功能梭式窑控制系统的设计	419
9.4.1	设计思路	419
9.4.2	操作流程	421
9.4.3	软件特点	421
9.5	亚控软件在梭式窑控制系统中的应用	423
9.5.1	亚控软件简介	423

9.5.2 组态王在梭式窑控制系统中的应用	424
9.6 陶瓷烧成过程中的气氛模糊控制模型	429
9.6.1 被控对象的特点及控制任务	429
9.6.2 气氛模糊控制模型的建立	429
9.6.3 模糊控制模型的计算机模拟	437
参考文献	438
第10章 陶瓷纤维在陶瓷窑炉中的粉化及抗粉化研究	440
10.1 全纤维窑墙的应用	440
10.2 陶瓷纤维在高温陶瓷窑炉中各带的粉化	442
10.2.1 预干燥带	442
10.2.2 预热带	443
10.2.3 烧成带	444
10.2.4 冷却带	446
10.2.5 硅酸铝纤维在梭式窑中受腐蚀粉化情况	446
10.3 影响陶瓷纤维粉化的因素分析	448
10.3.1 热应力	448
10.3.2 温度场对陶瓷纤维粉化的影响	449
10.3.3 气氛场对陶瓷纤维粉化的影响	452
10.3.4 速度场对陶瓷纤维性能的影响	456
10.4 应用人工神经网络进行陶瓷纤维使用寿命预测	456
10.4.1 人工神经网络模型	457
10.4.2 普通硅酸铝纤维使用寿命的预测	458
10.5 陶瓷纤维的抗粉化研究	461
参考文献	462
第11章 陶瓷窑用耐火材料的研究	463
11.1 陶瓷窑具现状	463
11.2 莫来石-堇青石窑具的特性	464
11.3 我国发展莫来石-堇青石窑具的优势	464
11.4 影响窑具使用寿命的因素分析	465
11.4.1 强度	465
11.4.2 抗热震性	467
11.4.3 最高使用温度和高温可塑变形	468
11.4.4 窑具所受的化学污染情况	468
11.5 提高窑具抗热震性的途径	469
11.5.1 减小热膨胀引起的热应力	469
11.5.2 形成微裂纹网络	469
11.5.3 引入颗粒间的界面断裂时的耗能机制	470
11.6 窑具配方的优化	471
11.6.1 骨料与结合剂的含量对窑具性能的影响	471

11.6.2	骨料的粒度对窑具性能的影响	472
11.6.3	结论	478
11.7	堇青石-莫来石窑具的掺杂改性	478
11.7.1	钛酸铝掺杂改性	478
11.7.2	红柱石掺杂改性	480
11.7.3	SiC 掺杂改性	484
11.8	纳米孔超级绝热材料的制备与绝热原理分析	488
11.8.1	纳米孔超级绝热材料	488
11.8.2	SiO ₂ 气凝胶的制备	490
11.8.3	超轻硬硅钙石型硅酸钙的制备	492
11.8.4	原材料及合成硬硅钙石的测试分析	493
11.8.5	气凝胶-硅酸钙复合纳米孔超级绝热材料的制备	497
11.8.6	掺莫来石纤维的 SiO ₂ 气凝胶-硅酸钙复合纳米孔超级绝热材料	503
11.8.7	SiO ₂ 气凝胶-硅酸钙复合纳米孔超级绝热材料的热传输特性	506
11.9	陶瓷窑炉内耐火材料耐化学腐蚀涂层的制备及性能表征	512
11.9.1	耐火材料的化学腐蚀	512
11.9.2	涂层性能表征	524
11.10	钛酸铝-莫来石复相陶瓷质空心球的制备及空心球砖隔热性能的模拟	538
11.10.1	钛酸铝-莫来石陶瓷的制备	539
11.10.2	莫来石加入量对 ATM 材料导热系数的影响	539
11.10.3	莫来石加入量对钛酸铝材料抗压强度的影响	540
11.10.4	莫来石对钛酸铝材料热稳定性的影响	542
11.10.5	ATM 空心球的制备	543
11.10.6	空心球砖空腔内传热数值模拟研究	552
	参考文献	557
第 12 章	陶瓷窑炉的废气污染及抑制废气污染的研究	562
12.1	陶瓷窑炉废气污染的现状	562
12.2	陶瓷烧成过程中 NO _x 的生成机理研究	562
12.2.1	燃烧过程中 NO _x 的生成机理	562
12.2.2	燃烧过程中影响 NO _x 生成的因素	564
12.2.3	陶瓷烧成过程中 NO _x 生成的数值模拟分析	565
12.2.4	prePDF 数学模型的选取	567
12.2.5	FLUENT 湍流模型与传热模型的选取	572
12.2.6	NO _x 生成模型的选取	575
12.2.7	边界条件的确定和物性参数的选取	580
12.2.8	数值计算方法	584
12.2.9	模拟结果与分析	586
12.3	降低 NO _x 生成的方法及多功能涂层材料吸收 NO _x 的研究	591
12.3.1	抑制燃烧过程中有害废气产生的方法	591

12.3.2 其他方法	596
12.4 复合涂层的制备及催化净化 NO_x 的研究	598
12.4.1 光催化涂膜的制备及掺杂改性	598
12.4.2 光催化涂膜的制备及性能表征	599
12.4.3 涂膜催化净化 NO_x 的研究	600
12.4.4 光催化红外复合涂膜制备及性能研究	604
12.5 陶瓷窑炉废气的脱硫除尘技术	609
12.5.1 脱硫除尘的工艺流程	609
12.5.2 脱硫除臭工艺流程	612
12.5.3 富氧燃烧技术减排	615
12.5.4 陶瓷工业烟气治理及回收工程	616
12.6 陶瓷窑炉的节能降耗	620
12.6.1 节能降耗是形势发展的要求	620
12.6.2 陶瓷窑炉的节能技术	621
12.7 绿色陶瓷窑炉——新世纪的重任	631
参考文献	632

第1章 陶瓷材料热物性研究及物性数据库的建立

1.1 陶瓷材料热物性学及研究内容

陶瓷材料研究主要包括材料的制备工艺、材料的结构和材料的各类性质，以及三者之间相互关系的理论分析和实验研究。在陶瓷材料的各类性质中，热物理性质（包括导热、导温、比热容和热膨胀等）不仅是评价、衡量陶瓷材料能否适用于具体热过程的技术依据，而且是揭示和研究材料的相变、缺陷、微裂纹和晶化等微观结构变化的重要手段。由于其具有明显的基础性和应用性，与组分结构又有十分敏感的相关性，故人们的研究兴趣与日俱增。特别是陶瓷行业的热设备（如烧成窑炉、干燥窑炉炉壁内层高温耐火材料）在使用过程中都会碰到热和温度问题，都要对其热过程进行热分析和热设计。而热物性数据则是研制、评价和优选所用高温隔热材料和防热材料及其热设计的关键参数。系统而深入地对这些材料开展热物性学即热物性和材料结构、组成及其他物理性能之间关系的规律性研究，可为调控材料的热物理性质和优化材料的热设计提供科学思想、技术途径和理论基础。

热过程是物质世界普遍存在的一个物理过程，陶瓷材料热物理性能是指与能量、动量传递过程有密切相关的导温系数、导热系数、比热容、热膨胀系数以及热发射率、热吸收率、热反射率等。这些热物理性能数据不仅是衡量陶瓷材料能否适应具体热过程需要，进行基础研究、分析计算、热设计和工程应用的关键参数，也是认识、了解和评价材料的最基本的科学依据。

1.2 陶瓷材料热物性测试方法

导热系数的测试方法很多，如果按热流的状态，一般可分为稳态法和非稳态法两种；也有人把它分为稳态法、准稳态法和非稳态法三种。在稳态法测试中，试样内温度分布是不随时间而变化的稳态温度场。当试样达到热平衡后，测定通过试样单位面积上的热流速率和试样热流方向上的温度梯度以及试样的几何尺寸等，根据傅立叶定律直接测定导热系数。

(1) 稳态法

傅立叶定律以及由该定律推演出的各种典型几何形状（平板、圆柱体和球体等）物体的稳定导热计算公式，是测定导热系数的稳态法的物理基础。傅立叶定律数学式如式(1-1)：

$$\lambda = \frac{-q}{t_{\text{grad}}} \quad (1-1)$$

式中 λ ——导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；

q ——热通量，即单位面积上的传热速率，负号表示热流方向和温度梯度的方向相

反, W/m^2 ;

t_{grad} ——温度梯度, $^{\circ}C/m$ 。

一般来说, 在测定导热系数时, 要得到一个与建立物理模型时所做的假设相符合的热流图像。通常采用下面三种途径: ①设计一种装置, 把热流约束在规定的方向; ②设计各种形状的试样, 以得到便于作数学描述的热流图像; ③推导出相应的数学公式以描述便于制备的试样中的热流图像。

采用上述的不同途径, 又可把稳态法分成两大类: 纵向热流法和径向热流法。

①在纵向热流法中, 通常使用隔热套使热流约束在一定方向上。隔热套和待测试样的温度梯度相同, 能防止或大大减少试样的径向或侧向热损, 从而能够测出试样内仅仅由于单向热流所产生的温度梯度。

②在径向热流法中, 通常使用一个能完全包围住热源的试样。如果试样和热源设计得当, 热流将以匀称的图像自中心向外流出。这个体系通常是由一个无限圆柱体(长度比直径大得多的圆柱体)试样, 将一个无限圆柱体热源包围而构成的; 或者由一个中空球体或回转椭圆体试样, 将一个同样形状的热源包围构成。这种方法的特点是便于对热流图像作数学描述。

用稳态法测定待测样品导热系数的热流速率问题时, 解决的途径通常有四种:

①测定流过试样的热量;

②测定用来加热试样的热量;

③同时测定全部的或部分的输入热量和试样损失的热量;

④使热量等通过待测样品以及与之串接的已知导热系数的标准样品(参考试样), 这时标准样品实际上起着卡计的作用, 这就是常用的比较法。

在稳态法中无论采用哪种方法, 都必须使主发热器产生的热量全部流过试样, 热流线应垂直于试样的横截面, 整个系统应达到稳定的热平衡状态, 在二次仪表允许的条件下, 应使试样上待测的温差尽可能小些。

与非稳态法相比, 导热系数的稳态测试方法的主要缺点是测试周期长。因此, 近几十年来很多研究者都为克服或改善这个不足而进行了很多有关的研究工作。

考虑到无机非金属材料中有一部分材料的导热系数比较大, 已接近于金属, 如石墨、氮化硅和碳化硅等, 有的材料如石墨等又是电导体, 因此对这类材料导热系数的测试大都用金属材料导热系数的测试方法和装置。

在非稳态法测试中, 试样的温度分布随时间而变化。测试时, 通常是使试样的某一部分温度作突然的或周期的变化, 而在试样的另一部分测量温度随时间的变化速率, 进而直接测出试样的导温系数或热扩散率 α , 再通过式(1-2)求出导热系数 λ , 即:

$$\lambda = \alpha c_p \rho \quad (1-2)$$

式中 c_p ——比热, $kJ/(kg \cdot K)$;

ρ ——密度, kg/m^3 。

(2) 非稳态法

非稳态测试在原理上与稳态法的根本差别在于, 前者在测试过程中试样的温度分布是随时间而变化的。实际测试时, 通常使试样的某一部分温度作周期的或者突然的变化, 而在试样的另一部分测量温度随时间的变化速率, 再根据由特定的边界条件所推导出的不稳定导热