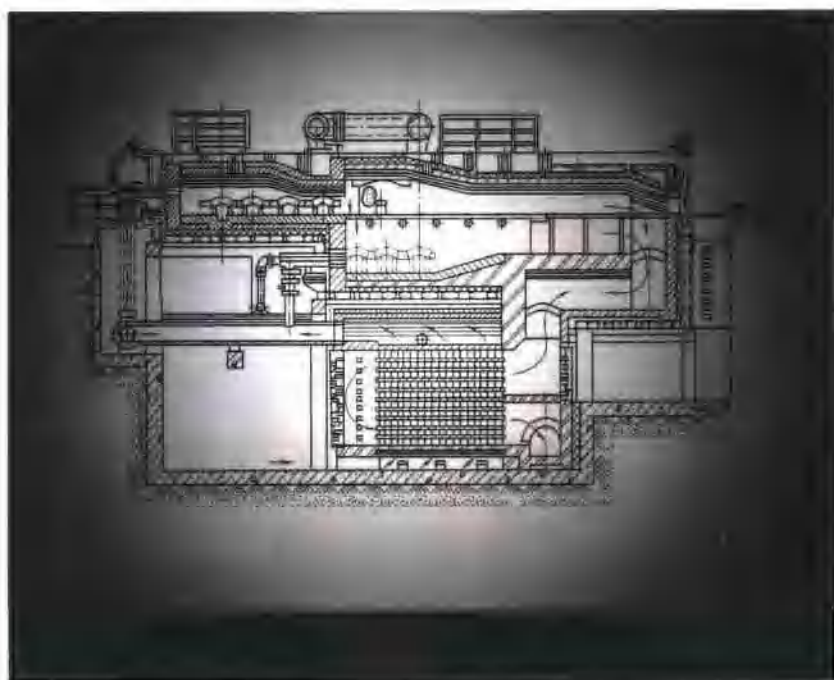


朱文学 著

热风炉原理与技术



Chemical Industry Press



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

热风炉原理与技术

朱文学 著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

热风炉原理与技术/朱文学著. —北京:化学工业出版社, 2005. 1

ISBN 7-5025-6427-6

I. 热… II. 朱… III. 热风炉 IV. TF578

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 130914 号

热风炉原理与技术

朱文学 著

责任编辑:戴燕红

文字编辑:康 静

责任校对:陶燕华

封面设计:于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行

工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

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

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 27 字数 706 千字

2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6427 6/TK·18

定 价:55.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

序 言

热风炉是干燥设备中的重要组成部分，是热力干燥系统中不可缺少的热源，它的结构设计、钢材选择、热风流程和参数选择是否合理将严重影响干燥系统的能耗、效率和制造成本。

我国目前广泛使用的间接加热式燃煤热风炉还存在热效率低、钢材耗量大、使用寿命短和热风风阻大等缺点。虽然有很多单位对热风炉都在进行研究，但迄今为止还没有一本有关热风炉的专著。一些先进的国家都采用燃油作为干燥机的热源，在燃煤热风炉方面很少有国外经验可以借鉴。

《热风炉原理与技术》一书详细地阐述了固体、液体、粉体和气体燃料的燃烧特点、换热方式和传热计算，系统地介绍了包括列管式、热管式和无管式热风炉在内的各种形式热风炉的工作原理、结构特点、性能和设计计算。所以该书是一本内容丰富、结构严谨和理论结合实际的工程技术专著。它的出版将对推动我国热风炉的开发设计和热源领域的技术进步提供重要的学术价值和应用参考价值。

本书作者朱文学教授理论基础扎实，学风严谨，多年从事干燥技术的研究工作。出版过多本干燥技术方面的专著，曾获我国第一批百篇优秀博士学位论文奖。

本书对工科学生、研究人员及热风炉设计者均适用。希望此书对我国干燥热源的发展起到促进作用。

曹崇文

2004. 9. 16

前 言

热风作为湿热交换介质，除用于各类物料的干燥外，还广泛地用于各类房间的供热，如温室的加温、室内冬季的供暖等。干燥技术是一门跨行业的加工技术，涉及农产品加工、食品加工、轻工、木材、化工、制药、冶金、纺织等部门，处理对象包括生物材料、粮食、经济作物、食品、木材、矿物、聚合物、织物等。热风炉是干燥设备最重要的辅助设备，也同样涉及这么多领域，满足这些物料对热风的不同要求。同时热风炉也需要随着这些行业的发展不断改进，以适应这些领域的技术发展对热风的需求。

热风炉能源来源广泛，有块煤、煤粉、生物质燃料、燃油、燃气及电能、太阳能和蒸汽等；热能利用有直接加热和间接加热之分；换热形式多样，有无管式换热、列管式换热、热管式换热和导热油换热等。因此热风炉的原理涉及燃烧学、传热学、流体力学、工程热力学、电学、电磁学、气象学、机械设计等多种学科，设计计算过程涉及到的原理多而且分散，十分复杂。一直以来，从事热风炉设计和使用的科技工作者热切希望有一本能系统全面反映热风炉技术的专著，作为工作和学习中的参考书。

干燥作业是一个耗能巨大的操作，干燥成本很大一部分来源于能耗，耗能指标一直是评价干燥设备的一项重要指标，因此寻求低耗能的干燥方法是干燥设备设计人员奋斗的目标之一。降低能耗的最基本的方法就是选择一套高效的热风炉，因此广泛地分析热风炉的技术原理有助于技术人员能够广泛地了解涉及各个不同学科分支的技术原理，便于优化选型和设计计算。

在编写本书的过程中，广泛地咨询和请教了干燥界知名专家，对热风炉的技术原理进行了归纳整理，将重要的理论及应用较普遍的热风炉形式编撰成独立的章节，它们是湿空气及烟道气的性质、燃烧机理及燃烧过程计算、燃烧器及直接加热热风炉、无管式热风炉、列管式热风炉、热管式热风炉、热媒加热式热风炉、电加热式热风装置、余热利用。

在编写本书的过程中，曹崇文教授提供了大量的第一手资料，同时也提出了大量中肯的建议，在百忙中为本书写了序言，在这里表示衷心的感谢。

本书由河南科技大学组织撰写，参加撰写的人员为：第1章、第2章、第3章、第4章由朱文学、刘云宏、段续撰写，第5章、第6章、第8章由张仲欣、董铁有撰写，第7章、第9章、第10章由刘建学撰写。

由于作者水平有限，书中不妥之处，恳请同行专家提出宝贵意见。

编者

2004.9

内 容 提 要

本书共分 10 章, 包括绪论、湿空气及烟道气的性质、燃烧机理及燃烧过程计算、燃烧器及直接加热热风炉、无管式热风炉、列管式热风炉、热管式热风炉、热媒加热式热风炉、电加热式热风装置和余热利用等, 比较系统全面地介绍了热风炉的燃料特性、燃料燃烧过程及装置、换热装置、热风炉系统等。

本书可供在农业工程、农产品加工、食品加工、化工、轻工、制药及木材加工等专业从事干燥设备设计和热源设计的人员、研究生和教师阅读和参考。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 热风炉的分类	1
1.2 热风炉的技术参数及评价指标	1
1.2.1 温度参数	1
1.2.2 热风炉的风量和供热量	2
1.2.3 热风炉的热工指标	2
1.3 热风炉的特性	4
1.3.1 直接加热热风炉的特性	4
1.3.2 间接加热热风炉的特性	6
1.4 热风炉设计和应用中存在的问题及对策	9
1.4.1 热风炉设计和应用中存在的主要问题	9
1.4.2 主要的对策	10
1.4.3 几种热风炉的结构分析	11
第2章 湿空气及烟道气的性质	13
2.1 湿空气的性质	13
2.1.1 混合气体的基本概念	14
2.1.2 湿空气的状态参数	16
2.1.3 湿空气的性质图	23
2.2 烟道气的状态参数	30
2.3 湿空气及烟道气的物理性质	31
2.3.1 湿空气的物理性质	31
2.3.2 烟道气的物理性质	34
2.4 湿空气的基本状态变化过程	36
2.4.1 间壁式加热和冷却以及冷却减湿过程	36
2.4.2 绝热冷却增湿过程	37
2.4.3 等焓减湿过程	37
2.4.4 等温加湿过程	38
2.4.5 不同状态空气的混合过程	38
2.4.6 热风炉中湿空气和烟道气的状态变化过程	38
第3章 燃烧机理及燃烧过程计算	40
3.1 燃料成分及性质	40
3.1.1 固体燃料的成分及特性	40
3.1.2 液体燃料的成分及特性	48

3.1.3 气体燃料的成分及特性	50
3.2 燃烧机理	56
3.2.1 燃烧的基本过程	56
3.2.2 固体燃料燃烧过程	61
3.2.3 液体燃料的燃烧过程	68
3.2.4 气体燃料的燃烧过程	72
3.3 燃烧及热平衡计算	78
3.3.1 成分计算	78
3.3.2 燃料和灰分的比热容	79
3.3.3 燃料发热量的计算	79
3.3.4 燃烧用空气量的计算	82
3.3.5 烟气生成量的计算	85
3.3.6 燃烧温度的计算	86
3.3.7 能量平衡计算	88
3.3.8 热效率计算	92
3.3.9 燃料消耗量	93
第4章 燃烧器及直接加热热风炉	94
4.1 固体燃烧装置及固体燃料直接加热热风炉	94
4.1.1 块煤燃烧装置及块煤直接加热热风炉	94
4.1.2 煤粉燃烧装置及煤粉直接加热热风炉	106
4.1.3 生物质燃料燃烧装置及直接加热热风炉	115
4.2 液体燃料燃烧装置及液体燃料直接加热热风炉	121
4.2.1 液体燃烧装置分类	121
4.2.2 液体燃烧装置的结构及性能	121
4.2.3 液体燃料直接加热热风炉	132
4.3 气体燃料燃烧装置及直接燃烧热风炉	137
4.3.1 气体燃料燃烧装置	137
4.3.2 管型煤气烧嘴的设计计算	148
4.3.3 燃气直接加热热风炉	151
4.4 排烟系统设计	153
4.4.1 自然排烟	153
4.4.2 机械排烟	153
4.4.3 烟气流速的选择及烟囱直径计算	154
4.4.4 烟道及烟囱阻力计算	154
4.4.5 烟囱自生通风力计算	155
4.4.6 烟囱高度计算	155
4.5 烟道气对干燥产品和环境的污染	156
4.5.1 烟道气对干燥产品的污染	156
4.5.2 排烟对环境的污染	159
4.5.3 防止污染的措施	159
第5章 无管式热风炉	163

5.1 无管式热风炉的结构形式、分类与特点	163
5.1.1 基本结构形式	163
5.1.2 分类及其特点	164
5.2 间接加热式热风炉的基本设计计算	164
5.2.1 加热空气流量的确定	164
5.2.2 换热器的基本设计计算公式	165
5.2.3 对流换热系数的基本计算	166
5.3 光面无管式热风炉换热计算	167
5.3.1 烟气侧辐射换热	167
5.3.2 烟气侧对流换热	167
5.3.3 空气侧对流换热	168
5.4 带肋片无管式热风炉的传热计算	168
5.4.1 传热方程建立的假设条件	168
5.4.2 传热方程	168
5.4.3 传热方程应用及计算方法	172
5.5 典型无管式热风炉的结构与设计计算	172
5.5.1 无管立式热风炉结构与计算	172
5.5.2 无管卧式热风炉结构与计算	179
5.5.3 分体式热风炉设计	184
5.5.4 燃油热风炉设计	187
5.5.5 其他无管式热风炉	190
第6章 列管式热风炉	192
6.1 列管式热风炉的结构与分类	192
6.1.1 列管式热风炉的结构	192
6.1.2 列管式热风炉的分类	192
6.2 列管式热风炉换热器的设计计算	193
6.2.1 列管式换热器的结构设计	193
6.2.2 列管式换热器的传热计算	196
6.3 典型列管式热风炉设计	201
6.3.1 列管立式热风炉设计	201
6.3.2 典型列管卧式热风炉结构与性能	207
6.3.3 典型分体式热风炉结构与性能	210
第7章 热管式热风炉	213
7.1 热管的工作原理及特性	213
7.1.1 热管的工作原理	213
7.1.2 热管的结构	213
7.1.3 热管的主要特性	214
7.2 热管的分类	215
7.2.1 按工作温度分类	215
7.2.2 按冷凝液回流方式分类	215
7.3 热管基本理论	217

7.3.1	液体的表面张力及表面张力系数	217
7.3.2	接触角和浸润现象	218
7.3.3	弯曲液面两边的压力差	218
7.3.4	毛细升高和毛细压差	219
7.3.5	热管内的毛细压力差	219
7.3.6	流体在圆管内流动的摩擦压力损失	221
7.3.7	热管吸液芯中液体流动的压力降	221
7.3.8	吸液芯内液体流道的截面积 A_w	221
7.3.9	沿程长度	222
7.3.10	热管内蒸汽流动的压力降	222
7.4	热管的传热机理	225
7.4.1	传热原理	225
7.4.2	热管的传热极限	226
7.5	热管的应用	229
7.5.1	温度展平	229
7.5.2	隔离热源和冷源	229
7.5.3	热流密度变换	229
7.5.4	温度控制	229
7.5.5	单向导热	230
7.5.6	旋转元件的传热	230
7.6	热管设计	230
7.6.1	工作液体的选择	230
7.6.2	工作温度	235
7.6.3	工质与壳体材料、管芯的相容性以及工质本身的热稳定性	236
7.6.4	吸液芯的选择	237
7.6.5	管壁材料的选择	237
7.6.6	设计计算	238
7.6.7	设计举例	241
7.7	热管式热风炉	244
7.7.1	热管式热风炉的特点	244
7.7.2	热管式换热器	245
7.7.3	热管换热器的设计	252
7.7.4	热管式热风炉设计及应用	268
第8章	热媒加热式热风炉	282
8.1	蒸汽加热式热风炉	283
8.1.1	蒸汽加热式热风炉的结构和工作原理	283
8.1.2	锅炉容量的确定	284
8.1.3	换热器的计算	284
8.2	导热油加热式热风炉的结构与分类	285
8.2.1	导热油加热式热风炉的主要构成	285
8.2.2	导热油加热式热风炉的分类及其特点	285

8.2.3 导热油炉的辅助设备	288
8.3 导热油的性质、选择及使用	290
8.3.1 对导热油的要求和导热油的特点	290
8.3.2 导热油的种类及其特性	291
8.3.3 导热油的选择和使用	293
8.3.4 延长导热油使用寿命的方法	295
8.4 热油炉系统主要部件设计	298
8.4.1 热油炉的设计	298
8.4.2 储油槽的设计	315
8.4.3 膨胀系统的改进设计	317
8.5 导热油供热系统的设计	318
8.5.1 导热油供热系统设计概要	318
8.5.2 卧式燃油(气)热载体锅炉系统设计	321
8.5.3 提高大型燃油热载体加热炉热效率的措施	323
8.6 热媒加热式热风炉的换热装置设计	327
8.6.1 计算方法	327
8.6.2 常用翅片换热器系列标准	331
第9章 电加热式热风装置	337
9.1 电热基础	337
9.1.1 电热的作用及优越性	337
9.1.2 电热的能量转换	338
9.1.3 电热转换的计算	338
9.2 电热元件	339
9.2.1 合金电热元件	339
9.2.2 PTC 电热元件	355
9.2.3 硅钼棒电热元件	362
9.2.4 碳化硅电热元件	364
9.3 电加热热风装置	368
第10章 余热利用	371
10.1 烟气余热回收	371
10.2 余热回收换热器的分类	372
10.2.1 对流型换热器	373
10.2.2 辐射型换热器	373
10.2.3 陶土换热器	374
10.2.4 热管换热器	375
10.2.5 旋转式换热器	376
10.2.6 蓄热室	377
10.2.7 热媒式换热器	377
10.2.8 热泵	378
10.2.9 余热锅炉	378
10.3 烟气余热回收的节能计算	380

10.3.1	余热回收预热空气时的节能率	380
10.3.2	出炉烟气温度变化时的节能率	381
10.3.3	余热回收率与节能的关系	382
10.3.4	余热回收率与热效率的关系	382
10.3.5	预热器预热空气和燃料的压力补偿	383
10.3.6	换热器回收余热注意事项	384
10.4	典型余热回收装置结构与性能	384
10.4.1	热媒式换热器	384
10.4.2	旋风式余热回收装置	386
10.4.3	热泵余热回收装置	389
10.4.4	蓄热余热回收装置	391
10.4.5	热管余热回收装置	400
10.4.6	余热回收锅炉	406
参考文献		415

第 1 章 绪 论

热风炉是用于气流干燥、喷雾干燥、流化干燥、塔式干燥、隧道干燥以及回转干燥等装置的主要辅助设备，也是温室及家畜饲养场加温的主要设备，广泛地应用于农业生产、农产品及食品加工、冶金、建材等行业。当热风炉产生的热风被用来干燥物料时，热风将被干燥物料加热蒸发水分，然后带走水蒸气。热风炉性能的好坏直接影响到干燥设备的技术经济指标。当热风炉产生的热风被用来加热温室及饲养场时，热风的主要目的是加热环境中的空气，使其适合动植物生长。热风炉的性能将影响环境条件的控制，最终影响到动植物的生长。除个别情况外，几乎所有利用热风炉的场合对热风都要求洁净、无污染。

1.1 热风炉的分类

长期以来，根据不同的需要以及燃料的不同，人们开发了各种各样的热风炉。目前用于热风炉的热源主要有天然气、煤、电、油以及太阳能。加热形式主要有直接烟道气式和间接换热式。换热器的类型更是复杂多变，有列管式、无管式及热管式等。在功率上有大型和小型之分。

热风炉可根据燃料、燃烧方式和加热方式来分类。

根据燃料类型可分为固体燃料热风炉、液体燃料热风炉、气体燃料热风炉。

根据燃料或热源的不同可分为燃生物质材料热风炉、燃气热风炉、燃煤热风炉、燃油热风炉、电加热器和太阳能集热器等。

按加热形式分主要有直接烟道气式热风炉和间接换热式热风炉。间接换热式热风炉根据热载体的不同可分为导热油加热炉、蒸汽热风炉、烟气热风炉等。根据换热器形式的不同可分为无管式热风炉、列管式热风炉、热管式热风炉等。

固体燃料在炉中的燃烧方式基本有三种：铺层燃烧、悬浮燃烧和沸腾燃烧，与之相应的燃烧设备分别称之为层燃式热风炉、悬燃式热风炉和沸腾燃烧式热风炉。层燃炉又分手烧式热风炉、链条式热风炉和往复式炉排热风炉。

根据司炉方式可分为机烧式热风炉和手烧式热风炉。

按炉体结构可分为卧式热风炉和立式热风炉。

按炉排的分布形式可分为水平炉排热风炉和倾斜炉排热风炉。

根据功率的大小可分为大型热风炉和小型热风炉。

功率在 100 万大卡 ($1 \times 10^6 \text{ kcal}$, $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$, 余同) 以上为大型热风炉，功率在 100 万大卡 ($1 \times 10^6 \text{ kcal}$, $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$, 余同) 以下为小型热风炉。

1.2 热风炉的技术参数及评价指标

1.2.1 温度参数

热风炉炉温度参数主要有：燃烧温度、烟气出口温度、热风温度、换热器壁温度。

燃烧温度为燃料燃烧时燃烧产物的温度，可近似认为是产生的烟气温度。燃料不同，燃烧温度也不同。

烟气出口温度是热风炉的排烟温度，排烟温度低说明换热效率高。

热风温度是指热风炉能将洁净空气加热到的温度，热风温度是选择热风炉的一个重要指标，一般情况下热风温度与燃料的燃烧状况、空气量及空气入口温度有关。

换热器壁温度涉及到采用什么材质，换热器最高器壁温度在主要换热段烟气入口处。

若 $\alpha_1 > \alpha_2$ $T_B \rightarrow T_{w1}$

$\alpha_1 < \alpha_2$ $T_B \rightarrow T_{s1}$

$$T_B = \frac{\alpha_1 T_{w1} + \alpha_2 T_{s1}}{\alpha_1 + \alpha_2} = \frac{T_{w1} + T_{s1} \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} = \frac{T_{s1} + T_{w1} \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} \quad (1-1)$$

式中 α_1 ——空气侧换热系数， $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ ；

α_2 ——烟气侧换热系数， $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ ；

T_{w1} ——空气温度，K；

T_{s1} ——烟气温度，K；

T_B ——壁面温度，K。

所以，在一定的温度条件下，两侧谁的换热系数大，器壁温度就接近那边的温度。为了降低器壁温度，可适当提高冷空气侧的对流给热系数。 T_B 与空气入口温度、烟气入口温度、烟气黑度有关，烟气入口温度高对强化传热有好处。有时为了降低器壁温度，不得不人为降低烟气入口温度，故采用较大的空气过剩系数。

1.2.2 热风炉的风量和供热量

供热量是热风炉最重要的技术参数，它必须与干燥工艺所要求的热量平衡。更确切地说干燥工艺首先确定的是风量和温度，这两者一定，供热量就确定了。

$$\text{众所周知} \quad Q_2 = V_2 (T_{w0} c_{p0} - T_{w1} c_{p1}) \quad (1-2)$$

空气比热容为物性参数，所以 V_2 和 T_{w1} 由工艺确定后，热风炉的供热量即确定。

这里还有三个问题要引起设计者注意。

(1) 空气流量 式(1-2)中 V_2 中的单位是 m^3/h ，是标准状态下体积流量，而工艺上往往给出的是热态下的体积流量，这时必须换算成标准状态下的空气流量，再求出供热量，才能为热风炉传热计算提供准确依据。

(2) 空气出口温度 T_{w0} 。并非工艺要求的温度，它往往要高于工艺要求的温度。因为热风炉与干燥机之间连接管道有散热损失，设计时切不可忽略这一点。

(3) 空气入口温度 T_{w1} 作为固定产品的热风炉设计计算时应取热平衡的基准温度 0°C 。但炉子运行时可能高于或低于这个温度，这对炉子工作有极大影响。例如东北地区夏天可能气温达 30°C ，冬天可达 -20°C 。以 $1000\text{m}^3/\text{h}$ 风量的炉子为例，同样的热风出口温度，炉子应提供的热量相差 15 万大卡/小时 ($1.5 \times 10^5 \text{kcal}$)，这必须引起设计者和用户的注意。

1.2.3 热风炉的热工指标

从热工的角度看，一台好的热风炉主要考察温度效率、热效率、单位生产率等参数。

1.2.3.1 温度效率

热风炉的温度效率为热风出口温度与燃料实际燃烧温度之比。

$$\eta_T = \frac{T_{wo}}{T_s} \quad (1-3)$$

式中 η_T ——热风炉温度效率, %;

T_{wo} ——热风出口温度, °C;

T_s ——燃料实际燃烧温度, °C; T_s 与燃料的理论燃烧温度和炉子自身特点有关, 目前尚不能准确计算出, 只能凭经验计算。

$$T_s = \eta_s T_h \quad (1-4)$$

式中 T_h ——燃料燃烧理论温度, °C;

η_s ——炉温系数。

T_h 可通过理论计算得出, 它与燃料种类、发热量、空气过剩系数、助燃空气温度有关; 热风炉的炉温系数尚无经验数据, 只能参考其他类工业炉数据估计。 η_s 估计得准确与否是十分重要的, 因为它直接影响炉内辐射传热计算、炉壁及管道的温度、传热面积等重要参数。

1.2.3.2 热效率

热效率是空气所获热量与燃料燃烧发热量之比。

$$\eta_h = V_2 \frac{T_{wo} c_{po} - T_{wi} c_{pi}}{B Q_{DW}^y} = \frac{V_2 (T_{wo} c_{po} - T_{wi} c_{pi})}{V_1 T_s c_{ps}} \quad (1-5)$$

式中 c_{po} , c_{pi} ——分别为空气出口、入口时的平均比热容, kJ/(m³ · °C);

c_{ps} ——烟气的平均比热容, kJ/(m³ · °C);

V_1 , V_2 ——分别为烟气和空气的流量, m³/h;

T_{wo} , T_{wi} ——分别为空气出口、入口时的温度, °C;

T_s ——烟气的温度, °C;

B ——燃料量, kg/h 或 m³/h;

Q_{DW}^y ——燃料低发热量, kJ/kg 或 kJ/m³。

只有当 $V_2 c_{pi} = V_1 c_{ps}$, 且 $T_{wi} = 0$ 时, 温度效率才等于热效率。

热风炉热效率是衡量热风炉运行经济性的主要指标, 是燃料发热量与热损失之差。热风炉有以下几项热支出: 加热空气需要的热量、排烟带走的热量、炉体散热、炉渣带走的热量、其他热支出。热损失有化学不完全燃烧损失、机械不完全燃烧损失、排烟损失、灰渣热损失、炉体散热损失等。值得注意的是炉体散热损失和排烟损失主要影响炉子的热效率。

(1) 炉体散热 通常外壁平均温度为 25°C 左右。冬季热量散失较大, 一台 35 万大卡 (3.5×10^5 kcal) 的炉子, 表面若加保温材料, 每小时可节约 2kg 煤, 这相当于在 300°C 烟气温度下建了一台相当规模的余热利用换热器, 而且没有增设换热器带来的占地面积大、阻力损失和投资大等问题。

(2) 排烟带走的热量 理论上讲热风炉的热效率可达到 100%。换言之, 排烟温度可降到 0°C, 但这样的热风炉换热面积无穷大, 尤其在 400°C 以下的烟气温度, 换热面积急剧增大, 相应维修费用增大, 阻力损失增加, 综合效益急剧减小。一般设计时取排烟温度为 200~250°C 较为合适。温度再低也易出现低温零点腐蚀。所以过分降低排烟温度和提高热效率是不合适的。

1.2.3.3 单位生产率

传热系数 K 是衡量热风炉单位生产率最重要的参数, 此外生产率还有两种直观表示法。

(1) 单位质量生产率 kJ/(h · t · °C) 这是指冷热气体介质平均温差为 1°C, 在 1h 内每

吨热风炉中的传热量。该数值越大,说明热风炉所用材料越少。

(2) 单位体积生产率 $\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 这是指冷热气体之间平均温差为 1°C 时,在 1h 内每立方米热风炉中的传热量。该数值越大,说明热风炉占地面积或所占空间越小。

1.2.3.4 气体阻力损失

热风炉内有烟气通道和空气通道,在温度和流量一定时,速度越大,流经路线越长,几何形状越复杂(如拐弯多,特别是 180° 以上拐弯),阻力损失越大。要保证两种气体的流动通畅,减少通风设备的动力消耗,必须对流体通道进行合理设计,一般情况下要做到以下几点。

① 尽量减少 180° 拐弯,因为它的局部阻力系数至少为 2,所以具有空气回程的设备不可太多。

② 为了增加对流传热系数,不适当地增大速度,必然使阻力急剧增加,因为阻力与速度的平方成正比。

③ 热风温度高,阻力增大。

1.2.3.5 换热系数

换热系数 K 为换热器主要的性能参数,换热系数高,换热效率高,所以热效率也高。

$$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + 1/\alpha_2 + \delta/\lambda + R_4} = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (1-6)$$

① R_3 为金属壁面热阻。它的数值很小,对 K 影响不大,可忽略。

② R_1 为烟气侧热阻。减少这个热阻的方法是器壁能承受一定温度时,尽量提高烟气温度和增加烟气黑度。高发热值燃料、合适的空气过剩系数均可提高烟气温度;烟气中的 CO_2 、 H_2 含量高,微颗粒含量多,有效射线长度都增加烟气黑度。一般讲燃料及燃烧静力学计算确定之后, R_1 主要决定于有效射线长度。从这个意义上讲热风炉主要换热段烟气侧不应有任何射线障碍物,而现在许多炉子在炉膛设换热管是不合适的。

③ R_2 为空气侧热阻。它随空气侧流动附面层厚度减少而减少。空气侧的紊流度越大,附面层越薄。增加紊流度的办法是:提高空气侧流速,频繁改变流动方向,附设干扰物等。

④ R_4 为烟尘热阻。燃煤热风炉在运行一段时间后,烟气侧表面集存烟尘,烟尘的热导率很小,形成较大热阻。有资料介绍, 1mm 厚烟尘,可减少传热系数 12% ,目前国内多数热风炉不能清理烟尘。虽然设计时指标很好,但炉子表面很快集存烟尘,达不到设计指标,炉子很快老化。所以设计清烟尘便利的热风炉是维持炉子的正常工作状态,保持合适的热效率的必要条件。

⑤ 提高综合传热系数 K 时,需注意两点。

a. 不能盲目地减小热阻,必须分析空气侧和烟气侧谁的热阻大,哪个大减小哪个最有效。

b. 设置肋片,增加传热面积,哪边的热阻大,肋片设在哪边。肋片结构合理,可增加传热量;但设计不合理则影响传热。对于矩形直肋,其效率为 0.6 左右时,肋质量轻,最省材料。随着不同传热系数和肋片材质,存在最佳肋高度和肋厚度。更重要的是存在最佳肋间距,它使器壁温度最低,传热量最大,空气温度最高。

1.3 热风炉的特性

1.3.1 直接加热热风炉的特性

直接加热热风炉的特点是燃料燃烧后的烟气直接用于加热干燥,不通过换热器。烟气温

度可达 800℃，设备成本较低，热损失小。该方法燃料的消耗量约比用蒸汽或其他间接加热器少一半左右。因此，在不影响产品质量的情况下，尽量使用直接加热。

直接加热热风炉燃料主要有固体燃料，如煤、焦炭、生物质材料；液体燃料，如轻柴油、重油；气体燃料，如城市煤气、天然气、液化气、生物质气等。燃料经燃烧反应后得到的高温燃烧气体进一步与外界空气接触，混合到某一温度后直接进入干燥室，与被干燥物料相接触，加热、蒸发水分，从而获得干燥产品。

1.3.1.1 固体燃料热风炉

固体燃料热风炉主要以煤炭为原料，虽然近年来开发了一些新型燃料，但应用很少。虽然相对来说燃料价格比较便宜，但其热效率较低，对环境污染较大，需专人看管而且劳动强度大，很难进行自动控制；而且燃烧过程不稳定，炉温不均匀，因而烟道气温度不均匀，烟气流也有波动，对于某些热敏性较高的被干燥物料来讲，将直接影响产品的质量和产量。

固体燃料的燃烧方式主要有层燃式、悬燃式和沸腾式。

(1) 层燃炉 主要燃烧固体燃料。燃料铺在炉算上，与通过炉算缝隙送入燃料层的空气接触燃烧。大部分燃料在炉算上而燃烧，少量的细煤末和挥发性成分在炉膛空间燃烧。灰渣排到灰坑里。燃料在层燃炉中的燃烧速度，取决于燃料的表面积大小和送入空气的速度。因为炉膛中储藏了大量的燃料，故有充分的蓄热能力，保证了层燃炉所特有的燃烧稳定性。

层燃炉具有结构简单、操作方便的特点，常用于中小容量的热风炉。

层燃炉的燃烧层结构有一定的规律性。手烧燃煤热风炉的新燃料加在灼热的焦炭上而后，经过预热、干燥、挥发物析出等过程，在吸收炉内进行燃烧。焦炭层是主要放热区域，其温度最高。燃料中灰分在燃烧中形成了熔融的灰渣，从焦炭层向下流，遇冷空气后被冷却，在炉算上部凝固成固态灰渣。这层灰渣可以保护炉算不受高温的影响，并使空气分配得更均匀。空气过剩系数的变化随燃料层高度增加越来越小。温度最高点是在灼热焦炭层的上部。因此层燃炉中燃料的燃烧可明显地分为新燃料层、燃烧焦炭层和灰渣层，而每层中进行着燃烧的一个阶段。

链条式和往复移动炉排式燃煤热风炉可以实现机械上煤和清渣，适用于大功率热风炉。这两种热风炉炉排上的燃烧层分 4 个区域：新燃料区、挥发物析出和燃烧区、焦炭燃烧区和灰渣燃尽区。四个区域中燃烧的强度不同，新燃料区基本不燃烧，只是对燃料加温；灰渣燃尽区由于燃料的耗尽，燃烧强度也很低；焦炭燃烧区燃烧强度最大，耗氧量也最大。因此，在设计这两种热风炉时要注意根据燃料燃烧的不同阶段，设计进风口，选择风速。

在层燃炉中，燃料层的厚度、燃料的颗粒大小对燃烧的经济性有重要影响。燃料层厚，会增加还原区的厚度和燃料层的阻力，使空气量减少，烟气中 CO 含量增加；燃料层薄，阻力小，空气量增加，烟气量也相应地变大，烟气损失大。大块燃料与空气的接触面积小，化学反应缓慢；小块燃料接触面积大，燃烧反应加快，但颗粒太小又会造成燃烧阻力大，影响通风，或被气流吹起，造成火口，使飞灰中可燃物增加。因此，根据燃料种类和燃烧方式选用合理的燃料层厚度和颗粒度，是保证燃料完全燃烧的关键。

综上所述，针对一定的煤种，燃料层厚度应该基本不变，因此热风炉的负荷调节不能依靠改变燃料层的厚度，而应通过改变通风强度来改变。

(2) 悬燃炉 其燃烧方式与层燃炉不同，燃烧时，燃料在炉膛中处于悬浮状态。悬燃炉适用于气体燃料、液体燃料和粉状固体燃料（煤粉）。燃料经过喷燃器与空气混合后一起送到炉膛内燃烧。由于燃料是经过磨制或雾化的很小的颗粒，故与空气的接触面积很大，这就改善了燃料与空气的混合条件，可以在较短的时间内燃尽。因此，悬燃炉燃烧效率高，热强度大，负荷调节方便。悬燃炉是当今大、中容量锅炉和热风炉普遍采用的