

916646

• 高等学校教学用书 •

冶金炉热工与构造

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

冶金炉热工与构造

北京科技大学 陈鸿复 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书

冶金炉热工与构造

北京科技大学 陈鸿复 主编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷38号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 15 1/4 字数 358 千字

1990年5月第一版 1990年5月第一次印刷

印数00,001~3,500册

ISBN 7-5024-0711-1

TF·157 (课) 定价3.05元

前 言

本书是在北京科技大学热能工程专业课程讲义“炉子热工及构造”的基础上，结合多年教学实践的经验改写而成的。全书共有十一章，第一章至第六章属炉子热工理论的一般部份，其中第二章火焰炉内热过程分析，第三章火焰炉热平衡及燃料消耗量，第四章火焰炉生产率及热效率的内容是以火焰加热炉热工为重点研究对象进行论述的。第七章加热炉，第八章热处理炉则对轧钢加热炉、均热炉、锻造炉及热处理炉从热工到构造进行了扼要而又比较全面的讨论。第十章竖炉及流态化炉在散料的传热，流体力学及燃烧制度等基本内容分析的基础上对高炉、沸腾炉、悬浮炉等的热工特点作了阐述。

由于炉子种类繁多，其热工理论及构造有些甚至差别还相当大，要形成统一的炉子理论是比较困难的，现有的炉子理论仍停留在比较一般的定性原则方面，不够完善。这些实际情况给我们的编写工作带来一定的困难，但是事物总是在发展过程中逐步得到完善的，在这次编写过程中我们在炉子热工及构造方面所做的一点系统整理工作虽然是初步的，但相信会有助于使这门专业课程教材体系趋于比较完善和成熟。

本书的特点是企图在有限的篇幅内，系统而又较为广泛地阐述冶金炉热工及构造方面的基本内容。在本书取材方面以炉子热工为主，对构造仅作一般叙述，在这方面更为详细的内容可在炉子课程设计及毕业设计中予以补充。本书现有内容是按60讲课学时安排的。

参加本书编写的人员有：陈鸿复(1.1、1.2、1.6、2、6、7.1、7.2、9、10、11等章节)，曹冠之(1.3、1.4、1.5、1.7、3、4等章节)，汤学忠(5章)，陈洁珍(7.3、8等章节)。由陈鸿复任主编。

倪学梓审阅了本书主要章节并提出了宝贵意见。东北工学院杨宗山，重庆大学刘人达，昆明工学院周振刚和华东冶金学院王璋保参加了本书定稿前的审稿会，并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。根据这些意见编者对一些章节作了必要的调整。

本书除供冶金类院校热能工程专业选作专业教材用外，还可供其他热能类专业和冶金、压力加工及金属材料等专业作为教学参考书；也可供有关设计、研究单位以及现厂工程技术人员等自学和参考用。

由于编写人员业务水平有限，书中的错误和缺点，欢迎批评指正。

编者

1988.12

24053/11

目 录

1 绪论	1
1.1 热能的产生与热交换	1
1.2 炉子与炉子热工的重要性及其含义	2
1.3 对炉子的基本要求	3
1.4 炉子的主要组成部分	3
1.5 炉子的分类	4
1.5.1 按炉子的工艺特点分类	4
1.5.2 按炉子所用能源种类分类	4
1.5.3 按炉子工作温度的高低分类	5
1.5.4 按炉子热工操作特点分类	5
1.5.5 按炉子工作制度分类	5
1.6 炉子热工基本理论与试验研究情况	6
1.7 我国冶金炉及热工的状况和发展	6
2 火焰炉内热过程分析	8
2.1 概述	8
2.2 炉内气体运动及再循环	8
2.2.1 气体再循环的方式	9
2.2.2 再循环气流的流动情况	9
2.2.3 炉气再循环对燃烧的影响	10
2.3 火焰的基本特征	11
2.3.1 火焰的几何特征	11
2.3.2 火焰的析热规律	12
2.3.3 火焰的辐射特性	13
2.4 炉内传热	17
2.4.1 炉内辐射传热	17
2.4.2 炉内对流传热	24
2.5 火焰加热炉数学模型	26
2.5.1 概述	26
2.5.2 零维模型	26
2.5.3 一维模型	28
2.5.4 二维模型	30
2.5.5 三维模型	30
3 火焰炉热平衡及燃料消耗量	32
3.1 概述	32

3.1.1	热平衡的概念	32
3.1.2	热平衡的种类	32
3.1.3	热平衡测定与计算的目的	32
3.2	热平衡项目及其计算	32
3.2.1	炉子热平衡项目	32
3.2.2	热收入项计算	33
3.2.3	热支出项计算	35
3.3	热量有效利用系数	41
3.3.1	炉膛热量有效利用系数	41
3.3.2	炉子热量有效利用系数	41
3.4	热量利用系数	42
3.4.1	炉膛热量利用系数	42
3.4.2	炉子热量利用系数	42
3.4.3	热量利用系数与热量有效利用系数的关系	42
3.4.4	燃料种类、空气预热温度对热量利用系数的影响	43
3.4.5	燃料改变后燃料用量的变化	44
3.5	能耗(能耗)表示方法	44
3.6	降低炉子能耗的主要措施	45
4	火焰炉生产率及热效率	47
4.1	概述	47
4.2	工艺因素对炉子生产率的影响	49
4.3	热工因素对炉子生产率的影响	50
4.3.1	影响因素的确定	50
4.3.2	热工因素作用的分析	51
4.4	炉子附属设备对生产率及热效率的影响	56
4.5	炉子生产率、热效率及单位燃料消耗量之间的关系	57
5	空气预热器	59
5.1	空气预热器的作用	59
5.2	空气预热器的型式与分类	61
5.2.1	金属预热器的分类	62
5.2.2	陶土预热器的分类	63
5.3	辐射式空气预热器	64
5.3.1	典型结构特点	64
5.3.2	基本传热特性	66
5.3.3	应用实例	67
5.4	管式空气预热器	69
5.4.1	典型结构特点	69
5.4.2	基本传热特性	72
5.5	铸造式预热器	75
5.5.1	针片管式空气预热器	75
5.5.2	翅片式空气预热器	77

5.6 陶土空气预热器	78
5.6.1 四孔砖式预热器	78
5.6.2 八角管砖式预热器	79
5.7 蓄热式预热器	82
5.7.1 蓄热室的传热过程	83
5.7.2 蓄热室格子砖	85
5.8 空气预热器的选择与设计	86
5.8.1 空气预热器的选择	87
5.8.2 空气预热器的设计计算	89
5.8.3 预热器的经济性	92
5.9 空气预热器的操作与维护	94
6 金属加热工艺	96
6.1 钢的热物理性质及与加热有关的机械性质	96
6.1.1 钢的导热系数	96
6.1.2 钢的平均热容量	97
6.1.3 钢的导温系数	97
6.1.4 钢的弹性模量和泊松比	99
6.2 钢的加热温度	99
6.3 钢加热的均匀性	102
6.4 钢加热及冷却时的温度应力	102
6.4.1 一般情况	102
6.4.2 温度应力的分析	103
6.5 加热速度及加热制度	104
6.6 钢加热时间的确定	106
6.7 钢加热时的氧化和脱碳	107
6.7.1 钢的氧化	107
6.7.2 钢的脱碳	111
7 加热炉	115
7.1 连续式加热炉	115
7.1.1 推钢式连续加热炉	115
7.1.2 环型加热炉	131
7.1.3 步进炉	135
7.1.4 分室式快速加热炉	143
7.2 均热炉	147
7.2.1 均热炉炉型	147
7.2.2 钢锭的加热制度	153
7.2.3 传捆时间及装炉钢锭温度	154
7.2.4 均热炉节能技术	155
7.3 室式锻造加热炉	155
7.3.1 锻造炉的热工特点	156
7.3.2 锻造炉常用炉型	158

7.3.3 敞焰式无氧化、少氧化锻造炉	161
8 热处理炉	164
8.1 概述	164
8.1.1 热处理工艺要求	164
8.1.2 对热处理炉的要求	165
8.1.3 热处理炉分类	165
8.2 热处理炉热工和构造特点	167
8.2.1 热源选择	167
8.2.2 加热方式	167
8.2.3 对烧嘴的要求	169
8.2.4 炉衬结构	169
8.2.5 炉型及热工特点	170
8.3 热处理用可控气氛	171
8.3.1 概述	171
8.3.2 钢铁与炉气间的化学反应	172
8.3.3 常用可控气氛的制备原理	175
8.3.4 可控气氛的检测	177
8.3.5 可控气氛炉构造特点	178
8.3.6 可控气氛炉的使用	178
8.4 燃料加热热处理炉	179
8.4.1 室状炉	179
8.4.2 台车炉(车底炉)	179
8.4.3 井式炉	182
8.4.4 罩式炉	182
8.4.5 辊底炉	183
8.4.6 振底炉	185
8.4.7 钢丝退火马弗炉	186
8.4.8 流动粒子炉	188
8.5 热处理电炉	189
8.5.1 间接加热电阻炉	190
8.5.2 直接电阻加热	192
8.5.3 感应加热装置	192
9 熔炼炉	195
9.1 概述	195
9.2 炉料的加热和熔化	196
9.3 熔池中的搅拌作用	198
9.3.1 熔池的搅拌功率	200
9.3.2 经过渣层及金属的传热传质	200
9.4 转炉	202
9.4.1 氧气顶吹转炉	202
9.4.2 氧气底吹转炉及顶底复合吹转炉	202
9.5 平炉	203

9.5.1	平炉构造	203
9.5.2	平炉炉膛内气体运动及火焰组织	204
10	竖炉及流态化炉	206
10.1	竖炉	206
10.1.1	竖炉热交换基本原理	206
10.1.2	高炉内热交换一般情况	203
10.1.3	竖炉内物料运动及气体力学	209
10.1.4	竖炉用燃料及其燃烧	209
10.2	沸腾料层炉(装置)	213
10.2.1	沸腾料层的形成	213
10.2.2	临界流化速度的确定	215
10.2.3	颗粒在料层中的平均停留时间	217
10.2.4	沸腾料层中的传热	217
10.2.5	沸腾料层炉(装置)的应用	218
10.3	悬浮料层炉(装置)	220
10.3.1	悬浮料层的形成及其应用	220
10.3.2	悬浮料层的模式	221
10.3.3	悬浮料层的传热及传质	223
11	干燥炉	224
11.1	干燥过程基本原理	224
11.1.1	干燥一般过程	224
11.1.2	水份在被干燥物料内部的迁移	225
11.2	焓-湿度图	226
11.3	对流干燥装置	230
11.3.1	连续式干燥装置	230
11.3.2	间歇式干燥装置	231
11.4	辐射干燥器	231
	参考文献	233

1 绪 论

热能的产生与热交换

规模庞大的冶金工业，尤其是钢铁工业它的主要生产过程大部分是在高温下进行的，为此需要消耗大量的燃料和电力来产生热能以获得所需要的高温。这里包括二个基本问题，即热能的产生和传递或热交换，前者指的是能量的转换，因为热能仅是能的基本形式之一，其他还有机械能、电能、化学能和原子能等等形式，它们之间是可以通过一定的方式进行转换的，但是只有转变成热能以后造成一定的温度差后，才能通过热交换的方式使待处理物料获得热量达到一定的温度以保证工艺过程的顺利进行，而各种形式的热装置则是保证上述过程得以完成的场所，它们与热能的发生和热交换之间的联系以及各种能和热能之间的转换关系如图1-1所示。

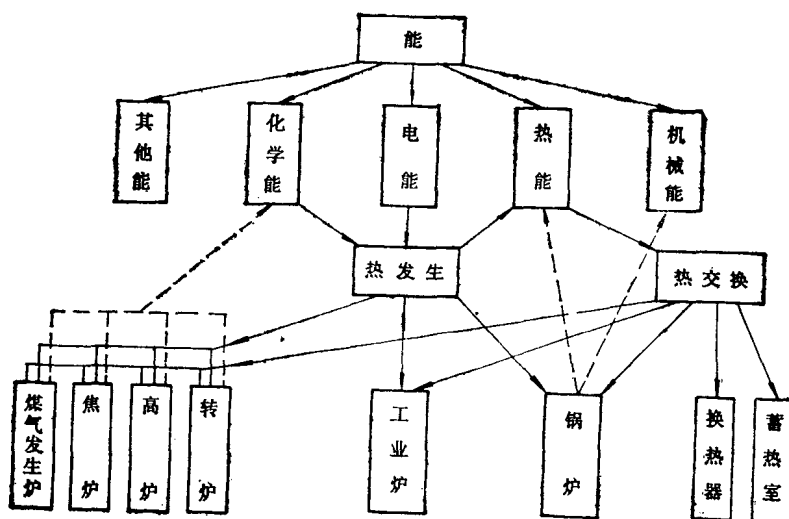


图 1-1 热发生、热交换及热装置的关系

热能的产生可以有各种途径已如图1-1所示，但在目前情况下，一般工业生产中还是以燃料燃烧的形式作为获得热能的主要方法，这种完成热能发生的装置称为燃烧器（或燃烧室）。热由一种物体通过辐射、对流和传导传递给另一种物体，中间没有热能的发生过程例如在预热器和蓄热器（室）中的情况那样，这是一种纯粹的热交换装置。热发生装置和热交换装置按不同的形式结合起来就形成了不同的工业加热装置。在火焰炉炉膛内是燃料燃烧发热和向物料进行传热直接的结合，而在隔焰炉（如马弗炉或半马弗炉）内则属于间接或局部间接的结合。焦炉、煤气发生炉或锅炉属于另一种情况，在这类装置中通过热能的发生和交换对煤或水进行加工得到另一种能的形式。前二者为具有一定发热量的煤气，而后者为具有一定压力和温度的蒸汽，它们都可以用来转换成其他形式的能量。高炉

和转炉除了完成主要冶炼工艺过程外，它们产生的高炉煤气和转炉煤气的化学能可以作为二次能源来利用，而高炉高压操作时炉顶煤气剩余压力所携带的机械能可以通过透平发电机组产生电能输出。

1.2 炉子与炉子热工的重要性及其含义

从历史上看冶金工业特别是钢铁工业的发展与炉子及炉子热工的发展是密切相关的，例如在我国汉代由于采用了较大的强制鼓风设备——畜力及水力排风就能兴建日产1吨左右生铁的高炉，十九世纪五、六十年代由于采用了蓄热室预热空气在炉膛内获得了高温使得平炉炼钢成为可能，从而推动了钢铁工业的大发展。二次大战后氧气在炼铁特别在炼钢工业中的成功应用，其中以纯氧顶吹转炉为代表，由于加快了氧化放热反应，充分利用了冶炼过程中的热量使炉子生产技术经济指标有了很大的提高。当今对我国国民经济有重要战略意义的节能工作更是和炉子热工的好坏直接有关，这是因为各种工业炉窑所消耗的能源在全国总能源消耗中占有相当大的比重的原因。

在对炉子及炉子热工作进一步阐述以前有必要先了解一下冶金生产中的热过程，因为这是获得冶金产品所必须。

矿石在高炉内被还原成生铁，钢锭（坯）经过加热和轧制变成钢材，某种显微结构和机械性能的钢经过热处理后变成另一种显微结构和性能的钢，在上述情况中从原料到产品中间经受着各种不同的处理方式，这些统称为“过程”。其中包括热物理过程，物理化学过程和机械力学过程等。由于大部分冶金过程是在高温下进行的，因此热物理过程（亦称热过程）占据十分重要的地位。它包括流体力学、传热和传质过程以及燃料燃烧中的传输过程。对于整个燃烧过程说，当然它不仅仅是物理过程，其中还包括化学反应动力学过程，但是前者往往起着决定性的作用。

在工业生产中为了使上述热加工过程得以进行，特地建造了炉子。所谓炉子是一种保证热过程顺利进行的装置，它具有围壁与周围空间隔离开来，并从某种能源获得热量以保持一定的温度，以便按某种工艺要求将热量传递给在它中间进行加热的工件或物料。由于工艺过程是各种各样的，这就决定了炉子结构的多样性。但是它们之间也存在着一些共同的特征，这也是后面要讲的炉子分类的基础。这里主要研究的是工业生产中应用的炉子，我们称之为“工业炉”。在全国有13万余台这样的工业炉，主要分布在冶金、建材、机械和化工等四个部门，占炉子总数的80%以上。但是由于传统的工业组合和分工不同，在“工业炉”这个定义下所包括的范围并不是很严格的。例如在我国工业炉中并不包括高炉、平炉和转炉而仅指轧钢加热炉、锻造炉、热处理炉、窑炉和熔化炉等。焦炉和动力锅炉由于属于能量转换装置，结构复杂，投资大，属于专门部门的工作范围，煤气发生装置虽然属于化工用炉但也由于系统庞大归专门部门管理和设计研究。

在炉内利用各种能量转换装置发生热量并将热量传递给被加热的工件，怎样在炉内有效而又经济地利用热能以满足对物料进行热加工的需要，这属于炉子热工的范畴。从“热工”这个词的含义来说，它表明利用热的工程技术，当然其中应包括热能的发生在内。炉子热工研究的范畴仅限于炉子系统，特别是炉膛内的热工过程。而在更大范围内涉及到热能的广泛利用则属于“能量转换和热能利用”的范畴。

在冶金生产过程中有一些重要的热过程例如钢锭或连铸坯的凝固，感应加热、电直接

加热、工件冷却等过程，往往并不是在炉内进行的，但它们也是属于热物理过程的工程应用，我们可称这些装置为热装置。广义的热装置应该把‘炉子’也包括在内。这里还要说明一下炉子热工和构造的关系。炉子构造的主要任务是保证炉膛内热过程的正常进行，但也有属于纯粹结构方面的问题，例如钢结构的大小和组合，炉衬的厚度，进出料机构，以及各种使炉料按某种方式在炉内运动的机构等。虽然有时从单纯构造角度看炉子的结构并不复杂，但是与之相关的炉内热过程却很复杂，例如有时喷嘴尺寸及安装位置的很小的变化会引起炉内气体流动的较大改变，因此应当从热过程的行为来研究构造，但是有时单纯的结构问题会成为主要矛盾，这就需要从材料、机械、设计等方面来研究解决。

1.3 对炉子的基本要求

炉子是完成某一工艺过程的热工设备，在满足工艺要求的前提下还应满足下列要求：

- (1) 炉子生产率要高；
- (2) 能保证热加工产品质量达到工艺要求；
- (3) 热效率高，单位产品能耗低；
- (4) 使用寿命长，砌筑和维护方便，筑炉材料消耗少；
- (5) 机械化自动化程度高；
- (6) 基建投资少，占车间面积小而且便于布置；
- (7) 对环境造成的污染少。

应该全面地达到上述这些基本要求，为此就需要从设计、施工、生产操作和维护管理等各个方面作出努力才能实现。

1.4 炉子的主要组成部分

炉子主要组成部分包括：炉体及基础、热发生装置、进出料机构、钢结构以及测量和

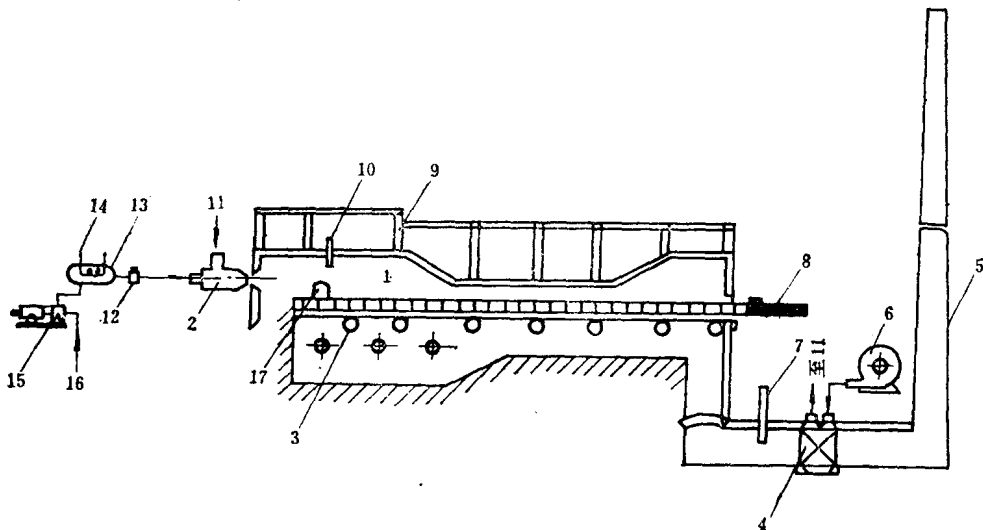


图 1-2 连续加热炉主要组成部分示意图

1—炉子主体；2—烧嘴；3—炉底水管；4—空气预热器；5—烟囱；6—鼓风机；
7—烟道闸门；8—推钢机；9—钢结构；10—热电偶；11—预热空气口；12—重油
过滤器；13—重油预热器；14—蒸汽管道；15—油泵；16—接油库；17—炉门

控制仪表等,对于燃料炉来说,还应包括:燃料和空气供给系统,排烟系统和余热回收装置以及炉子冷却系统等部分。炉门、窥孔、烟道闸板、烧嘴、预热器等属于炉子附属设备,有的已制成一定的标准件,可以直接选用。上述炉子各主要部分的功能应该围绕着对炉子的基本要求互相协调、互相配合,这样才能达到良好的生产技术经济指标,否则就会妨碍炉子正常能力的发挥,必要时就需要对炉子构造进行改造,而这往往会带来一些困难,因此一定要把好炉子设计这一关,一旦炉子建成后,再进行改造总是不太理想的。

1.5 炉子的分类

由于各种工业炉窑所完成的工艺过程不同,加热物料种类和形状的不同,在炉型结构、炉内温度的高低和炉内温度分布等方面各不相同,为了便于研究和掌握炉子,根据炉子的某些主要特征将其分类是非常必要的,虽然至今还没有一个统一而又很明确的分类方法,但一般可作下述分类:

1.5.1 按炉子的工艺特点分类

(1) 熔炼炉 在其中完成物料的加热和熔炼。在物料内部进行着一定的物理化学反应,并伴随有热量的吸收和放出,这些不仅改变了物料的物理化学性质而且物料的状态也发生变化,即由固态变为液态,冶金企业的熔炼炉一般有以下几种:

1) 物料加热和熔炼的目的是为了从矿石得到金属,如炼铁高炉就是将矿石经过冶炼得到合格的生铁;

2) 对金属(如铁水,废钢)进行精炼,去除其中的杂质如碳、硅、硫、磷等,或进行合金化,在钢中加入合金元素如镍、铬、硅、锰等以得到各种性能和用途的钢。如炼钢平炉、转炉和电弧炉等;

3) 物料加热和熔炼的主要目的是为了把固态金属变为液态,如铸造用的化铁炉等。

(2) 加热炉:在加热炉内完成物料的加热,提高物料的温度,改变物料的物理机械性能,但并不改变物料的物态。由于加热目的不同,加热炉的种类繁多,一般有以下几种。

1) 用于金属压力加工前的加热,如轧制和锻造前的加热,其目的是为了提高其可塑性,减少压力加工的变形抗力。这类加热炉在冶金和机械工业中用得较为普遍,如用于钢锭开坯前加热的均热炉,用于热轧和锻造前加热的推钢式连续加热炉、步进炉等,用于锻造前加热的室状炉,台车式加热炉等。

2) 金属加热目的是为了改变其结晶组织,获得所需要的物理机械性能,这种工艺就是金属热处理,完成热处理工艺的加热炉就是通常称做的热处理炉。由于热处理工艺不同,所处理材料的形状和尺寸大小不同,这类炉子的炉型结构种类较多,如用来处理板卷的罩式炉,用于处理钢板的辊底式炉,用于处理长形工件的井式炉以及用于处理各种钢材和工件的台车式炉等等。

3) 加热目的是为了排除被加热物料或工件中的水分,这种炉子一般叫做干燥炉。如铸造车间的砂型干燥炉等。

4) 物料加热目的是为了获得新产品,如石灰石、白云石的焙烧炉等。

1.5.2 按炉子所用能源种类分类

(1) 燃料炉：是以各种燃料燃烧放热为炉子热能来源的炉子，在各种工业炉窑中这类炉子用的最多。

(2) 电炉：电炉的热能来源是由电能转换而来，如电弧炉，电阻炉，感应炉等。

1.5.3 按炉子工作温度的高低分类

(1) 高温炉，炉子工作温度在 1000°C 以上，在高温火焰炉内，物料与周围介质的热交换以辐射传热为主，这是这类炉子的热工特点。钢铁冶金企业中的各种熔炼炉和加热炉多属于这类炉子。

(2) 中温炉，炉子工作温度在 $1000\sim 650^{\circ}\text{C}$ 之间，在中温炉内物料与周围介质的热交换，辐射和对流各占一定的比例。这类炉子多用于钢铁热处理。

(3) 低温炉，炉子工作温度低于 650°C ，在这类炉子里物料与周围介质的热交换以对流换热为主。这类炉子多用于干燥以及有色金属，铝及其合金的加热，钢铁及有色金属的回火处理等。

1.5.4 按炉子热工操作特点分类

(1) 连续操作的炉子：这类炉子炉温沿炉长方向连续变化，在正常生产情况下，炉子各点温度不随时间变化，料坯在炉内运动，从装料门进入炉内，通过炉子不同的温度区域完成加热过程，从出料门出炉。如推钢式连续加热炉、步进炉、环形炉、链式炉等。也有的炉子炉温在长度方向基本不变是为直通式炉。

(2) 周期操作（或间歇操作）的炉子，这类炉子是成批装料，装完料以后进行加热或熔炼，在炉内完成加热和熔炼工艺之后，成批出料。炉料在炉内不运动，而是炉温随时间变化。如均热炉、台车炉、罩式炉、井式炉、反射炉等。

1.5.5 按炉子工作制度分类

这种分类方法是以炉内热交换特点为基础，按炉子工作制度分为：

(1) 炉子的辐射式工作制度。把辐射传热起主要作用的炉子的工作制度叫辐射式制度，钢铁企业绝大部分高温火焰炉如平炉、均热炉、加热炉等都属于这种工作制度的炉子，这类工作制度的炉子火焰黑度和炉墙在热交换中的作用不容忽视。

(2) 炉子的对流式工作制度。把对流传热起主要作用的炉子的工作制度叫做对流式工作制度。 650°C 以下的低温炉，炉内传热方式以对流为主。这类炉子的特点是燃烧室和炉膛要分开，组织好炉内气体再循环对炉子工作有重要意义。

(3) 炉子的层式工作制度。当加热块状散料时，炉料充满整个炉膛空间，热气体在块状散料间通过，散料加热表面的大小是变化的，而且辐射层又非常薄，在温度变化较大范围内很难严格区分辐射和对流传递各占多大比例，把这种热气体通过散料的炉子工作制度叫层式工作制度，其中包括竖炉和流态化炉，而后者又可以分为沸腾料层炉和悬浮料层炉两种，炼铁高炉就是属于层式工作制度中的竖炉。

从以上炉子分类不难看出，各种炉子都是根据炉子的某方面特点进行分类，对某一个炉子来说，不只具有一个特点。所以，对同一个炉子由于分类的着眼点不同，它可以隶属于几种类型，如连续加热炉既属于加热炉，又属于火焰炉、高温炉、连续操作的炉子等。通常根据哪一种分类方法称呼一个炉子也不完全相同，一般采用习惯叫法，多数是根据炉子的结构特点称呼一个炉子的较多，如高炉、平炉、环形炉、辊底炉、车底炉、链式炉，也有根据炉子的用途来称呼的如退火炉、渗碳炉、干燥炉等。

1.6 炉子热工基本理论与试验研究情况

构成炉子热工理论的基本方面包括：1) 热过程的热力学，即热力学第一定律或能量守恒定律在炉子上的应用或是炉子热平衡的建立；热力学第二定律的应用，如炉内热过程的烟损失及烟平衡；2) 燃料燃烧析热或电—热能转换的规律；3) 热气体流动规律；4) 炉内及物料内的复杂传热、传质过程的规律；如用以研究燃烧混合过程的扩散作用，钢加热时的氧化和脱碳过程中不同相成份的扩散，水分在被干燥物料中的迁移等都属于传质过程；5) 炉子构筑理论，包括炉子建筑力学，筑炉材料及构件在高温下的损坏原因及其使用性能等。

以上这些基本规律运用到具体炉子中并和该炉子工艺相结合就成为该炉子的热工理论，苏联M.A.格林柯夫在许多不同炉子类型热工理论的基础上提出了“炉子一般理论”，它可以归纳为如下原则：

(1) 按照传热制度的不同，可将炉子分成若干种典型模式（见1.5炉子分类一节），在此基础上对它们进行炉子热工操作的研究；

(2) 在炉子热工操作中认为传热及传质过程是决定性的过程；

(3) 在研究炉子热工操作时只考虑物理过程而忽略化学反应动力学过程；

(4) 不涉及某个具体炉子的热工操作的优化及约束条件问题而只是一般性的研究。

总的来说，炉子一般理论上述原则是正确的，用它来归纳分析不同炉子的一些共性便于人们掌握它们的物理本质是有益的，但是目前它仅是定性的，没能给出定量的关系。近年来炉子热工数学模型研究取得了较大的进展，用它作为工具对于典型的炉内热过程进行研究，有助于把炉子热工理论研究向前推进一步。

虽然近年来炉子热工数学模型研究对炉子热工理论研究起到了一定的推动作用，但是由于炉内热工过程很复杂，影响因素较多，有些热工过程很难仿真，例如燃烧过程，必须较多地依靠现厂试验，另外，数学模型研究的结果需要通过试验验证。因此，炉子热工测试仍然是不可忽视的研究方法之一。

建立在相似原理基础上的近似模型法也属于热工研究方法的内容，它用于指导物理模型的建立，对于一些难于应用数学方法进行描述的热过程或对其物理本质还不太清楚的过程，比较适合于采用这种模化方法，它比较直观，便于获得整体概念，所得结果颇有实用价值，例如炉内气体流动模型，转炉熔池内流体运动模型等所提供的试验结果对炉型改造或解释炉内热过程机理有较大的帮助。

1.7 我国冶金炉及热工的状况和发展

随着冶金工业的发展和各种工业炉窑的建立、使用以及热工研究工作的开展，目前我国已经初步形成了一个具有现代科学技术水平的冶金热工这样一门相对独立的学科，它具有比较完整的学术体系，而且理论和实际紧密结合，在冶金生产技术发展中的作用愈来愈显得重要，一支庞大的专业队伍已经初步形成。在党的十一届三中全会以后，冶金炉热工技术的发展很快，尤其在节能工作方面与世界规模的节约能源的形势相适应，取得了很大的成绩。在钢铁企业中逐步建立了科学的能源管理制度，对炉子进行相应的技术改造，从过去的“高产型”改造成为“节能型”的炉子。在以煤代油、燃料改质、燃烧技术、余热

回收、绝热材料使用、计算机热工自动控制、炉子热工理论研究及热工管理等方面都有新的进展和世界先进技术之间的差距缩短了，对于节能所起的作用比较显著。以重点企业中的轧钢加热炉为例，年平均可比能耗由1979年的 $3.58\text{MJ/t}_{\text{坯}}$ 降到1985年的 $2.22\text{MJ/t}_{\text{坯}}$ ，尽管这样，从全国来看炉子热工和节能的情况，炉子技术装备水平等方面发展还很不平衡，先进和落后之间相差悬殊，与发达国家相比仍存在一定的差距，特别是单位产品能耗偏高，以1984年统计资料来看国内平均指标与国外先进水平相比要高出20~50%。怎样进一步降低单位产品能耗，全面提高炉子生产技术经济指标，改造并设计新炉型，研制新材料、新设备，提高炉子机械化、热工检测和自动化以及计算机控制的水平，以适应冶金工艺发展的需要，与之相应还需要加强炉子热工理论方面的研究，培养高质量的炉子热工专业人材。

2 火焰炉内热过程分析

2.1 概 述

火焰炉又名敞焰炉，指的是这样一些炉子，即在它们的炉膛内只有部分空间装有被加热物料，而另一部分空间为火焰或燃烧产物所占据。通过它们和炉料及炉衬之间进行的热交换，炉气将部分热量传递给受热表面然后排出炉膛。平炉、反射炉、均热炉、燃料加热炉及热处理炉等都属于火焰炉的范围。

火焰炉内热过程指的是在火焰炉内进行着的气体流动、燃料燃烧和传热、传质过程的综合，因此它属于一个复杂的以传热为中心的物理和物理化学过程，其中以物理过程为主。而对热过程的分析指的是对它物理本质的揭示以及尽可能地进行定量的数学描述，这也是炉子热工理论的主要组成部份。

炉内热过程中的流体力学过程，它和一般管道内流体等温流动规律不完全相同，它属于不等温的空间流动，它受不同炉膛空间的制约，边界条件比较复杂。从另一方面看，由于火焰炉的燃料燃烧过程大部份是在同一个炉膛空间内进行的，因此它必然会受到炉膛内气体流动情况的影响，结果形成了一个十分复杂的空间温度场和热流场。而它们又反过来对气体流动和燃烧过程产生影响。经典的流体力学、燃烧学和传热、传质学的基本内容可以构成炉内热过程的理论基础，但是还需要研究在炉膛内各种具体条件下它们的特殊规律以及彼此之间的相互作用，这正是组成炉子理论的重要内容。

人们对炉子理论的认识有一个发展过程，早在1905年，俄国学者格鲁姆—格尔日马依洛发表了“炉子水力学原理”，认为火焰炉炉膛内热气体流动象一个倒置的河床，可以应用水力学原理，进行炉内气体流动的计算。在三十年代，由于燃烧学及传热学的发展，提出了强化炉内供热的“炉子能量理论”。以后M.A.格林可夫又提出应从改进流体力学、燃料燃烧和传热等几方面来改善炉子热工作的“炉子一般理论”。它基于炉内传热方式的不同对炉子进行分类，并以此为中心提出相应的对燃料燃烧及气体力学的要求。在五、六十年代，为了扩大当时廉价的石油燃料在工业炉中的应用，荷兰埃米登国际火焰研究中心对于炉内热过程特别是在燃烧和传热等方面做了一系列比较深入的研究。从六十年代起，由于电子计算机在工业上得到较为广泛的应用，炉内热过程数学模型的研究很快取得了进展，从而使炉子热过程的定性研究逐步进入定量研究阶段。虽然至今所取得的成就仍然是初步的，但是良好的远景已经展示在我们面前。

在这一章中，我们将阐明火焰炉内热过程中的一些基本现象和规律，它可以作为分析和认识不同火焰炉热工和构造的理论依据。

2.2 炉内气体运动及再循环

炉内气体运动虽然非常复杂，但是人们可以在复杂的流动规律中按某些共同的特性加