

节 能 与 环 境 保 护 丛 书

# 烟气热能 梯级利用

车得福 刘艳华 编著



化学工业出版社  
环境·能源出版中心

节能与环境保护丛书

# 烟气热能梯级利用

车得福 刘艳华 编著



化学工业出版社  
环境·能源出版中心

·北京·

**图书在版编目 (CIP) 数据**

烟气热能梯级利用/车得福, 刘艳华编著. —北京:  
化学工业出版社, 2006. 1  
(节能与环境保护丛书)  
ISBN 7-5025-8154-5

I. 烟… II. ①车…②刘… III. 火电厂-烟气-  
热能-资源利用 IV. X773. 01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 157956 号

---

节能与环境保护丛书

**烟气热能梯级利用**

车得福 刘艳华 编著

责任编辑: 戴燕红

文字编辑: 余纪军

责任校对: 陈 静

封面设计: 关 飞

\*

化学工业出版社 出版发行  
环境·能源出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

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

\*

新华书店北京发行所经销  
北京市昌平振南印刷厂印刷  
三河市宇新装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 13 字数 315 千字

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8154-5

定 价: 36.00 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

## 节能与环境保护丛书

主 编 林宗虎 院士

副主编 俞炳丰 教授

张 旭 教授

车得福 教授

## 内 容 提 要

本书在介绍烟气发生、组成、特点的基础上，阐述了烟气热能的品位、利用原则和方法。重点介绍了烟气热能的梯级利用原理、相应的热能转换装置和余热回收设备、烟气热能利用中可能出现的问题及相应对策等。内容丰富，实践性强，是一本难得的好书。

本书可供能源动力工程、化学工程、冶金工程、环境工程等领域内从事热能转换装置设计、制造、运行、维护的工程技术人员以及相关专业的本、专科院校的师生参考。

## 序

为了全面建设小康社会、不断开创中国特色社会主义事业的新局面，必须大力推进科技进步和创新，进一步发挥科学技术对经济社会全面发展的关键性作用。要大力发展高新技术和先进适用技术。要大力加强能源领域的科技进步和创新，提高我国资源特别是能源和水资源的使用率，减少资源浪费。要大力加强生态、环境领域的科技进步和创新，降低污染物的排放，加强对废弃物的再次利用，发展循环经济。这些都是中央当前对我国广大科技人员提出的殷切希望和要求。

我国虽然资源不少，但人口众多，人均能源资源十分有限。人均化石燃料仅为世界均值的56%，石油天然气人均可采储量仅为世界均值的8%。水力资源可开发量虽达3.79亿千瓦，但人均不到0.3千瓦。且一次能源消耗中主要为煤炭，约占总能源消耗的70%，即使到2050年，煤炭耗量预计也将占一次能源总耗量的50%，因此环境污染严重。我国三分之一以上国土受到酸雨危害，如不采取措施，二氧化碳排放量预计将从2000年占全球总量的12.7%增加到2020年的16.7%。此外，空气中的粉尘、二氧化硫和氮氧化物的污染也很严重。因此，加强节能、提高能源利用率和改善能量利用中的环境保护已成为我国经济持续发展中的一个重要课题。

随着我国国民经济发展和人民生活水平的提高，家用电器的大量使用和建筑业的迅速发展不仅使能耗进一步增大，并且引起新的环境保护问题。

为了促进和推动节能工作，改善能量利用中的环境保护，特编辑出版了这一套丛书。这套丛书共9本，书名分别为：《强化传热技术》，《烟气热能的梯级利用》，《蒸汽凝结水的回收及利用》，《建筑环境与建筑节能》，《热泵技术》，《城市垃圾的处理与利用技术》，《冷热电联产技术》，《热管技术》和《洁净燃烧技术》。每本著作均由知名专家根据国内外近期科研成果和工程实践执笔编著，可供大专院校师生、科研院所和工矿企业相关科技人员应用和参考。希望这套丛书能对我国的节能和环保事业的发展有所裨益。

中国工程院院士

林宗虎

# 前 言

煤炭、石油、天然气是世界上使用量最大的、最主要的常规能源，约占总能耗的 90%。它们是不可再生能源，按照目前探明的经济可开采储量以及年开采速度，估计的可开采年限多则数百年，少则只有几十年。

我国是一个能源资源大国，更是一个人口大国。按人口平均的能源资源占有量来计算，我国又是一个能源资源贫国。尽管许多人都认为，21 世纪的能源开发应实施多元化战略，大力开发替代能源，但从我国目前的实际情况来看，开发新能源的前景固然广阔，但是节约能源在现阶段更加可行并且潜力巨大。应该将节能视为煤、油、气和水能之后的“第五能源”，讲究能源利用效率和经济效益，坚持能源和经济的可持续发展。

煤炭、石油、天然气等燃料在许多工业过程中都是通过直接燃烧而加以利用的，也就是首先将燃料的化学能转化成为燃烧产物烟气携带的热能，然后再通过各种转换装置将烟气热能转换成为动力或通过各种换热设备将烟气热能传递给各种热媒供生产、生活之用。由于热能是有品位高低之分的，而用户对热能品位要求差别很大。如果将高品位的热能直接用于只需低品位热能的场合，就会造成所谓的“大材小用”，导致可用能的损失。实际工作中，如何在烟气热能的利用过程中尽可能做到能级匹配，并最大限度地利用低品位热能，提高系统热效率、节约能源，是热能工程技术人员的责任所在。

由于各种各样的原因，我国的能源利用效率与发达国家相比还有相当大的差距。造成这种现象的原因不仅由于技术的落后，更在于节能意识的淡薄以及国家节能政策落实的不完善或不落实。

本书结合作者的教学、科研经验和体会，重点阐述烟气热能的梯级利用原理、相应的热能转换装置和余热回收设备、烟气热能利用中可能出现的问题及相应对策等。

本书由车得福、刘艳华合写。具体分工如下：车得福撰写第 1 章、第 5 章和第 6 章，刘艳华撰写第 2 章、第 3 章和第 4 章。撰写过程中得到本丛书编辑委员会各位成员的热情鼓励和帮助，也得到西安交通大学能源与动力工程学院及人居环境与建筑工程学院有关老师的关心和帮助，在此作者表示衷心的感谢。本书各章后列出了相关的文献，对这些文献的作者表示诚挚的感谢。

由于作者学识有限，书中难免有错误和不足之处，敬请读者批评指正。

车得福 刘艳华

2005. 6

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1	<b>2.4 内燃机</b> .....	58
1.1 热能的发生与转换 .....	1	2.4.1 内燃机的分类 .....	58
1.1.1 能量及其形式 .....	1	2.4.2 内燃机的总体结构和主要部件 .....	59
1.1.2 热能的发生、转换与储存 .....	2	2.4.3 内燃机的工作过程 .....	62
1.2 烟气及其特点 .....	3	2.4.4 内燃机的热力循环及性能指标 .....	64
1.2.1 烟气组成及其性质 .....	3	2.4.5 内燃机的燃烧与燃料供给系统 .....	71
1.2.2 燃烧温度及其含义 .....	5	2.4.6 内燃机的增压系统 .....	73
1.2.3 烟气焓值的确定 .....	6	参考文献 .....	74
1.3 烟气热能的品位 .....	7	<b>3 中温烟气热能的利用</b> .....	75
1.4 烟气热能利用的原则 .....	12	3.1 余热锅炉 .....	75
1.5 烟气的显热和潜热及其利用方法 .....	14	3.1.1 余热锅炉的特点 .....	75
参考文献 .....	18	3.1.2 余热锅炉的分类 .....	76
<b>2 高温烟气热能的利用</b> .....	19	3.1.3 余热锅炉设计参数的选择 .....	77
2.1 锅炉 .....	19	3.1.4 余热锅炉的实际应用 .....	80
2.1.1 锅炉的构成及工作过程 .....	19	3.2 膨胀机 .....	85
2.1.2 锅炉的参数、型号与分类 .....	20	3.2.1 透平膨胀机的分类 .....	85
2.1.3 锅炉的燃料及热平衡 .....	22	3.2.2 透平膨胀机的结构 .....	86
2.1.4 室燃炉 .....	23	3.2.3 气体膨胀机及其应用 .....	87
2.1.5 火床炉 .....	28	3.2.4 两相膨胀机及其应用 .....	89
2.1.6 流化床炉 .....	31	3.3 制冷机 .....	90
2.1.7 锅炉受热面 .....	32	3.3.1 基本原理与制冷工质对 .....	90
2.2 燃气轮机 .....	35	3.3.2 氨-水吸收式制冷机 .....	92
2.2.1 燃气轮机简单循环及热力过程 .....	36	3.3.3 溴化锂吸收式制冷机 .....	93
2.2.2 燃气轮机的复杂循环 .....	42	3.3.4 直燃型溴化锂吸收式冷热水 机组 .....	97
2.2.3 航空燃气轮机 .....	46	3.3.5 吸收式制冷技术在废排气余热回 收中的应用实例 .....	100
2.2.4 地面燃气轮机 .....	47	3.4 气-气热交换器 .....	102
2.2.5 提高燃气轮机效率和比功的主要 措施 .....	49	3.5 气-液热交换器 .....	105
2.3 燃气-蒸汽联合循环 .....	49	3.6 再生式热交换器 .....	108
2.3.1 余热锅炉型联合循环 .....	50	参考文献 .....	110
2.3.2 余热锅炉加补燃型联合循环 .....	50	<b>4 低温烟气热能的利用</b> .....	111
2.3.3 正(增)压锅炉型联合循环 .....	51	4.1 热管技术 .....	111
2.3.4 排气助燃锅炉型燃气-蒸汽联合 循环 .....	52	4.1.1 热管的工作原理 .....	111
2.3.5 IGCC与PFBC-CC的研究与 开发 .....	52	4.1.2 热管的分类 .....	113
2.3.6 燃气-蒸汽联合循环的实际应用 情况 .....	58	4.1.3 热管的材质及工作极限 .....	113
		4.1.4 热管技术的重要特点 .....	115
		4.1.5 热管换热器 .....	115



4.1.6 热管技术在烟气利用方面的应用 .....	118	系统经济性 .....	157
4.2 热泵 .....	122	5.4.2 采暖系统运行特性对排烟余热深度回收的影响 .....	162
4.2.1 压缩式热泵 .....	122	参考文献 .....	166
4.2.2 吸收式热泵 .....	123	<b>6 烟气热能利用中的主要问题及对策</b> ...	169
4.2.3 压缩-吸收式热泵 .....	126	6.1 受热面的腐蚀 .....	169
4.2.4 热泵的应用 .....	127	6.1.1 高温及低温腐蚀 .....	169
参考文献 .....	129	6.1.2 冷凝换热器受热面的腐蚀 .....	179
<b>5 烟气热能的深度利用</b> .....	130	6.2 受热面的玷污 .....	181
5.1 冷凝式锅炉及冷凝式换热器 .....	130	6.2.1 结渣 .....	181
5.1.1 冷凝式锅炉及冷凝式换热器的工作原理 .....	130	6.2.2 干松灰 .....	184
5.1.2 冷凝式锅炉的类型 .....	132	6.2.3 高温黏结灰 .....	185
5.2 排烟余热深度利用系统 .....	133	6.2.4 低温黏结灰 .....	186
5.2.1 排烟余热深度利用基本方法 .....	133	6.3 受热面的磨损 .....	188
5.2.2 典型排烟余热深度利用系统 .....	136	6.3.1 磨损机理分析 .....	188
5.3 冷凝换热器 .....	142	6.3.2 减轻或预防磨损的方法 .....	189
5.3.1 间壁式冷凝换热器 .....	142	6.4 冷凝液处理 .....	190
5.3.2 接触式冷凝换热器 .....	149	6.4.1 冷凝液的性质 .....	191
5.4 经济性分析 .....	157	6.4.2 冷凝液的处理方法 .....	193
5.4.1 带有间壁式冷凝换热器的排烟余热		6.5 烟囱抽力减弱问题 .....	194
		参考文献 .....	196

# 1 绪 论

热能是人类最早使用的能量形式。通过燃烧燃料将化学能转变成为烟气的热能在当今社会中仍占有最重要地位。本章介绍了热能的发生与转换方法,烟气的产生、组成和特点,烟气热能的品位,烟气热能利用的原则及其利用方法。

## 1.1 热能的发生与转换

### 1.1.1 能量及其形式

所谓能量,就是产生某种效果或变化的一种能力。产生某种效果或变化的过程一定会伴随着能量的消耗和转化。

能量的类型有多种,一般把它分为六种形式。

(1) 机械能 包括物质的动能、势能、弹性能及表面张力能等。机械能常以功的形式来实现,并且能方便而有效地转换为其他形式的能。

(2) 热能 与构成物质的原子和分子的运动(振动)有关的一种能量。它的宏观表现是温度的高低。热能是一种基本的能量形式,所有其他能量形式都能完全转换为热能。

(3) 电能 与电子的流动和积累有关的一种能。电能可以静电场能或感应电场能的形式来储存。电能的传递形式就是电流。电能也能方便而有效地转换为其他形式的能。

(4) 辐射能 以电磁波形式发射的能量,所以也称为电磁能。这种能量以光速传递。根据电磁波的波长可将辐射能分为几种,通常可分为 $\gamma$ 射线、X射线、热辐射、微波和毫米波射线及无线电波。其中,热辐射是一种由原子振动而产生的电磁能,包含紫外线、可见(光)射线和红外线,因它们的辐射强度与物质的温度有关,而且常常会产生热效应,故称为热辐射。

(5) 化学能 这是一种仅以储存能的形式存在的能量,当不同物质的原子和(或)分子相结合时就会释放出来。例如,燃料燃烧就是物质间发生放热的化学反应,使化学能转换成热能。所以,按照化学热力学的定义,化学能就是物质或物系在化学反应过程中以热能形式释放出来的内能。

(6) 核能 核能(原子能)也是一种仅以储存能形式存在的能量形式。它是蕴藏在原子核内部的能量,又称核内能,在粒子相互作用或原子核中的粒子相互作用即发生原子核反应时释放出来。原子核反应通常有放射性衰变、核裂变和核聚变三种类型,其中核裂变和核聚变反应可释放巨大能量。核裂变反应已被人类所掌握并能加以和平利用,核聚变目前仅能用作军事目的,有些学者预测,受控核聚变还很难在近期实现。

上述各种能量都可以直接或通过转换而获得。其中,热能是人类使用最为广泛的一种能量形式,约有85%~90%的能源是转换成热能后再加以利用的。在一次能源中,热能资源也占了绝大部分。最主要的常规能源为化石燃料和水能,其他的所谓新能源有太阳能、核能、地热能和海洋热能等。

事实上,人类告别茹毛饮血的原始生活,是从学会利用热能——火为标志的。当然,远

古时代的人类主要靠消耗（燃烧）木材来取得热能。随着人类文明的演化，到今天为止，我们通过许多途径获得热能。

柴草、煤炭和石油是人类最早使用的主要能源。从远古时期到 19 世纪，木柴和杂草作为燃料，为人类生活和生产活动提供大部分的热能。从 19 世纪 80 年代开始，煤炭提供的能源超过木柴，成为人类使用的主要能源。20 世纪 60 年代，石油在世界能源消费中占据了首要地位。目前，天然气也已成为广泛使用的能源。

作为化石燃料的煤炭、石油、天然气是世界上使用量最大的、最主要的常规能源，约占总能耗的 90%。化石燃料是不可再生能源，按照目前探明的经济可采储量以及年开采速度，估计可开采年限多则数百年，少则只有几十年。对人类来说，如何节约使用这些宝贵的财富是重大的共同课题，能源新技术是新技术革命的三大支柱之一。

相对来说，煤炭的储量最大。但是，它的开采、运输、储存不如油、气方便，并且在燃烧时易造成对环境的污染。因此，对燃料进行改质和改进燃烧过程，以保证完全燃烧，减少对环境的污染，是燃料利用过程中的重要研究课题。

我国是一个能源资源大国，更是一个人口大国。我国能源资源总量位于世界前列，水能资源居世界第一，煤炭资源可采储量居世界第三。但按人口平均的能源资源占有量来计算，我国 2000 年人均煤炭可采储量 90t，人均石油剩余可采储量 3t，人均天然气剩余可采储量 1080m<sup>3</sup>，分别是世界平均水平（165t、23t 和 24988m<sup>3</sup>）的 54.9%、11.0% 和 4.3%；是美国（903t、13t 和 17025m<sup>3</sup>）的 9.7%、23.1% 和 6.3%；是 OECD（经济合作与发展组织）国家（404t、10t 和 12048m<sup>3</sup>）的 22.3%、30.0% 和 9.0%。从这个角度来说，我国又是一个能源资源贫国，要提倡节约能源，把节能视为煤、油、气和水能之后的“第五能源”，同时，要讲究能源利用效率和经济效益，坚持能源和经济社会可持续发展。

### 1.1.2 热能的发生、转换与储存

热能的发生可通过两种途径：一种是直接产生，如地热能和海洋热能；另一种是通过转换产生。

通过能量形式的转换而产生热能的方法有以下几种。

(1) 化学能的转换 通过燃料中可燃物质的放热化学反应即燃烧反应，使储存在燃料中的化学能转换成为热能而释放出来。通过燃烧反应，燃料中的可燃元素碳、氢和硫分别转化为二氧化碳、水蒸气和二氧化硫，同时释放出一定数量的热量。

(2) 电能的转换 根据焦耳效应，由于电路中存在电阻，电流流过时一定会产生热。当然，在绝大多数电路里，这种热效应的产生意味着部分电能转换成不可利用的热能，即热损失。但实际应用中，为了满足工业过程或生活的需要，有时要将电能转换成为热能，如电炉炼钢过程就是如此。

(3) 辐射能的转换 主要是指能使被照射的物体产生热效应的热辐射。

(4) 核能的转换 这主要是指在核裂变和核聚变反应中，大量的核能释放转换成热能。目前已可利用的是核裂变反应。

(5) 机械能的转换 这一典型过程就是摩擦，通常由此产生的热能都不能被利用，故一般都希望尽可能减少摩擦所消耗的机械能。

人类利用的各种形式的能量基本上都是由一次能源经过一次或多次转换而来的。例如，太阳照射使植物内叶绿素发生光合作用，将太阳辐射能转换储存于生物质中，而成为植物所具有的生物质能。又如，燃料在锅炉中燃烧，并把燃料的化学能转换成烟气的热能，进而转

换成蒸汽的热能，再通过汽轮发电机组，完成热能转换为汽轮机的机械能，并继而通过发电机转换为电能输出。

概括起来，通过一次转换，热能可成为两种能量形式：①机械能，如推动内燃机、汽轮机等。②电能，如热力发电。

热能除了能与其他形式的能量进行转换外，还可以进行传递。换热器就是基本的热传递装置。在热传递装置中，不同温度水平的流体可以通过固体壁面或直接混合或借助于物体的蓄热能力进行换热，使热能从较高温度物体传给较低温度的物体。

热能还具有储存的特点。热能的储存有三种基本方式：①显热储存。这是利用升高固体或液体的温度来蓄热。②潜热储存。当物体发生相变时会吸收或释放大量的热，实际应用中通常是利用材料从固体到液体的相变蓄热。③半潜热储存。原理与潜热储存基本上相类似，其特点是储存时发生可逆的吸热反应，在此过程中将热能转换为化学能。

## 1.2 烟气及其特点

### 1.2.1 烟气组成及其性质

通过燃烧燃料，将其中的化学能转换为燃烧产物所携带的热能，然后通过换热装置将热能加以利用的过程在工程中最为常见。

燃料燃烧后的产物就是烟气。燃料中的可燃物质被全部燃烧干净，即燃烧所生成的烟气中不再含有可燃物质时的燃烧称为完全燃烧。当只按化学计量比供给空气量时，燃料完全燃烧后产生的烟气量称为理论烟气量。理论烟气的组成为  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ 。前三种组成合在一起称为干烟气。包括  $\text{H}_2\text{O}$  在内的烟气称为湿烟气。由于烟气中的  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  同属三原子气体，产生的化学反应式也有许多相似之处，并且在烟气分析时常常被同时测出，因此，将它们合并表示，称为三原子气体，用  $\text{RO}_2$  表示。当有过量空气时，烟气中除上述组分外，还含过量的空气，这时的烟气量称为实际烟气量。若燃烧不完全，则除上述组分外，烟气中还将出现  $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2$  等可燃成分。因此，烟气的成分是比较复杂的。

锅炉中工质的总吸热量有一半左右是通过布置在炉膛四周的受热面完成的。炉膛的传热过程主要是指炉膛内火焰（高温烟气）与水冷壁管间的热交换过程，这种热交换过程是相当复杂的。它常常伴随着燃料的燃烧、火焰和烟气的流动以及水冷壁管外表面辐射特性的变化等。但是，它传热的主要形式却是辐射换热。送入炉膛内的燃料和空气混合后迅速燃烧，形成高温火焰。火焰一边燃尽，一边向周围的受热面传递热量，到达炉膛出口前燃烧过程停止。从炉膛出口流出的烟气继续向锅炉的其他种类换热面传递热量，直到达到锅炉的排烟温度。因此，烟气在锅炉中经历很大的温度变化。

一般可以将烟气的成分分成四大类。

(1) 三原子气体 从工程热辐射的角度来看，单原子气体及对称结构的双原子气体在小于 2000K 的温度范围内实际上没有辐射和吸收能力。因此，火焰中具有一定辐射能力的主要是  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  等三原子气体。这些三原子气体在红外光谱区的某些光带内辐射和吸收能量，而在光带以外既不辐射也不吸收，对热辐射呈现透明体的性质。因而，如果火焰完全是由三原子气体组成时，这种火焰肉眼看不到，称谓不发光火焰。

(2) 炭黑粒子 燃料中的烃类化合物在高温下裂解而形成炭黑粒子。炭黑粒子在未完全燃尽时悬浮于火焰中，其直径约为  $0.03\mu\text{m}$ 。炭黑粒子具有固体表面辐射的特点，有很强的

辐射能力，并使火焰发光。在燃烧器附近的火焰根部，炭黑粒子的生成量很大，这部分火焰称作发光火焰。离开燃烧器一段距离后，火焰中的炭黑粒子逐渐燃尽，这时火焰不再发光。包括发光部分和不发光部分的火焰的辐射能力取决于发光部分所占的比例。

(3) 焦炭粒子 固体燃料，例如煤粉颗粒，在水分和挥发分逸出后所剩部分即为焦炭粒子。焦炭粒子在未燃尽前悬浮于火焰气流之中，其直径约为  $30\sim 50\mu\text{m}$  之间，像固体颗粒那样具有很强的辐射能力，并使火焰发光。它是煤粉火焰中的一种主要辐射成分。

(4) 灰粒 焦炭粒子的可燃成分燃尽后形成了灰粒，其直径约为  $10\sim 20\mu\text{m}$ 。灰粒也有一定的辐射能力，在高温火焰中也能使火焰发光。含有焦炭粒子和灰粒的火焰常称为半发光火焰。在半发光火焰中，虽然存在水蒸气和二氧化碳等辐射性气体，但对热辐射起主要作用的成分却是焦炭粒子和灰粒。

烟气辐射是一个十分复杂的现象，影响其辐射特性的因素主要有以下几个方面。

(1) 烟气辐射成分的组成 不同的烟气的有效辐射成分极不相同。例如，气体燃料火焰的主要辐射成分是三原子气体及少量的炭黑粒子；重油的油雾火焰除三原子气体和炭黑粒子外，其辐射成分还有雾状的油滴。而煤粉火焰则更不同于上述两种火焰，它是更加复杂的多相系统。它的挥发分挥发出来的烃类化合物虽然也能产生炭黑粒子，但试验表明，产生的炭黑粒子数量很小。粒子尺寸也很小，对整个火焰辐射能力的影响不大。相反，煤粉火焰中包含大量的灰粒和焦炭粒子，它们不但比炭黑粒子的尺寸大得多，而且在火焰中的质量浓度比气体燃料火焰及重油火焰中炭黑粒子的质量浓度高许多倍，它们是煤粉火焰中最重要的辐射成分。

(2) 炉膛中有效辐射成分的浓度场 在炉膛中火焰呈稳定的流动状态，火焰的不同部位，其有效辐射成分也不相同。气体燃料火焰中炭黑粒子仅仅存在于火焰的根部，经过很短的距离就能燃尽，因此炉膛中 90% 以上的区域的有效辐射成分是三原子气体，大部分区域内火焰不发光。重油的油雾火焰，油雾的燃尽速度较慢，炭黑粒子生成量比较多，浓度比较高，在整个炉膛中有一半以上都包含有这些粒子，所以火焰的发光部分约占 50% 左右。煤粉火焰中灰粒子沿整个炉膛高度都存在，灰粒的辐射在炉膛中所有区域对煤粉火焰的辐射都产生强烈的影响。焦炭粒子仅存在于火焰的初始阶段，焦炭粒子的辐射在燃烧器区域有重要的作用。在炉膛上部，即火焰的尾部，焦炭粒子的浓度显著降低，因而对火焰辐射的性质已无明显的影响。煤粉火焰中还包含有煤粉粒子，但仅仅出现在着火区，在着火区以外的炉膛中可不考虑它对火焰辐射能力的影响。

(3) 燃烧方式和燃烧工况 燃烧器不同，所形成火焰的结构形式亦不相同，其辐射特性也不同。例如，气体燃料的扩散火焰，由于其温度不太高，烃在受热时容易裂解而产生炭黑粒子，火焰较长，发光部分比例较大，火焰的辐射能力较强。而预混火焰，由于气体燃料和空气经过了均匀的混合，混合物的燃烧十分强烈，甚至在燃烧器内部即可将燃烧过程全部完成，这样火焰进入炉膛后几乎不存在发光部分，炉膛中火焰的辐射特性主要取决于三原子气体的浓度和温度。

燃烧工况主要指锅炉的配风方式、一次风的风率和风速、煤粉细度及各燃烧器间煤粉分配的均匀性等，燃烧工况不同将引起着火点和火焰中心位置的变化以及火焰长度和火焰在炉膛中的充满度的变化，火焰的辐射特性亦将受到影响。

(4) 各种辐射成分的相互作用 火焰中往往同时存在多种辐射成分，它们具有不同的吸收辐射能的光带。当部分吸收光带重合时，总的吸收率要比各种辐射成分单独存在时的吸收

率之和。故火焰的辐射特性不仅与各种成分的辐射特性有关，还受到各种成分相互作用的影响。

因此，燃料燃烧得到的烟气以固体燃料最为复杂，并具有强烈的腐蚀性和磨损性，高温下的灰分还会黏结在受热面上造成结渣或玷污。

锅炉内结渣、玷污、腐蚀及磨损所引起的主要问题如下。

(1) 污染、结渣会降低炉内受热面的传热能力。灰污在受热面沉积后，由于其热导率很低，热阻很大，污染数小时后水冷壁的传热能力的降低可达 30%~60%，使得炉内火焰中心后移，炉膛出口烟温相应提高。由于炉膛出口烟温提高，使得飞灰易黏结在对流和屏式过热器上，引起过热器的玷污和腐蚀。积灰会使省煤器和空气预热器堵塞、传热恶化，从而提高排烟温度，降低锅炉运行经济性。

(2) 由于总的传热阻力增大，会使锅炉可能无法维持在满负荷下运行，只好增加投煤量，引起炉膛出口烟温进一步提高，使灰渣更容易粘在受热面上，形成恶性循环，导致发生一系列锅炉恶性事故，如过热器、省煤器管束堵灰、爆裂，空气预热器大量漏风，出渣系统堵死。烟温升高还会导致蒸汽过热、气温偏高，使金属管子处于超温运行状态。

(3) 在高温烟气作用下，黏结在水冷壁或高温过热器上的灰渣会与管壁发生复杂的化学反应，形成高温腐蚀。

(4) 只能低负荷运行、增加检修工作量或者被迫停炉检修而造成巨大的直接及间接的经济损失。

我国由于燃用煤种较国外更为劣，问题更为严重。我国电站锅炉受热面“四管”因积灰、腐蚀和磨损泄漏爆管而引起的事故也是十分惊人的。所谓“四管”是指水冷壁管、过热器管、再热器管及省煤器管。我国火电厂中锅炉事故占一半以上，其中“四管”的泄漏爆管事故占锅炉事故的一半以上，成为影响锅炉安全运行的主要原因。

炉管爆破使锅炉的可用率降低、事故率增加、效率降低、钢材耗损增加，而更重要的是由于停炉、停电所造成的间接经济损失更为巨大。随着锅炉容量的增大，由于炉膛容积增大，清灰困难，烟道尺寸增大，烟速和烟温容易分布不均匀。大容量锅炉蒸汽参数高，壁温升高，易引起积灰和结渣。

### 1.2.2 燃烧温度及其含义

燃料和空气送入炉内进行燃烧，它们带人的热量包括两部分：其一是由燃料和空气带人的物理显热（燃料和空气的热焓）；其二是燃料的化学热量（称为发热值或发热量或热值）。

如果燃烧过程在绝热条件下进行并且燃烧完全，则上述两种热量全部用于加热烟气本身，此时烟气所能达到的温度称为热量计温度。

稳恒条件下，燃料燃烧前后的热平衡方程式为

$$Q_{\text{net,v,ar}} + Q_{\text{rl}} + Q_{\text{k}} = I_{\text{y}} \quad (1-1)$$

式中  $Q_{\text{net,v,ar}}$ ——收到基低位热值，kJ/kg 或 kJ/m<sup>3</sup>；

$Q_{\text{rl}}$ ——燃料的物理显热，kJ/kg 或 kJ/m<sup>3</sup>；

$Q_{\text{k}}$ ——由空气带人的物理显热，kJ/kg 或 kJ/m<sup>3</sup>；

$I_{\text{y}}$ ——燃烧后所产生的烟气的焓，kJ/kg 或 kJ/m<sup>3</sup>。

如果不计参加燃烧反应的燃料和空气的物理热，并假设  $\alpha=1$ ，则所得的烟气温度称为燃烧热量温度  $t_{\text{ther}}$ （℃或 K）。此温度可显示燃料的高温能力。

如果在热平衡方程式中扣除气体不完全燃烧（包括 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 的分解吸热）而损失的

热量和固体不完全燃烧而损失的热量后（即燃烧为实际状态），全部热量用来加热烟气后所获得的烟气温度称为理论燃烧温度或绝热火焰温度。

理论燃烧温度的高低与燃料的热值、燃烧产物的热容量、燃烧产物的数量、燃料与空气的温度和过量空气系数等因素有关。

一般说来，理论燃烧温度随燃料的热值的增大而增大。当燃料中含有较多的重烃时，由于热值增高，理论燃烧温度也增高。但是，有时热值较低的燃料的理论燃烧温度可能高于热值较高的燃料的理论燃烧温度，这主要是燃烧产物的数量和比热容等因素起了主要作用。

若过量空气系数太小，由于燃烧不完全，不完全燃烧热损失增大，使得理论燃烧温度降低。若过量空气系数太大，则增加了燃烧产物的数量，使燃烧温度也降低。因此，为了提高燃烧温度，应在保证完全燃烧的前提下尽量降低过量空气系数的数值。

预热空气和燃料均可提高理论燃烧温度。由于燃烧时空气量比燃料量大，预热空气对提高理论燃烧温度的影响更为明显。

由于吸热和散热，炉膛内的实际燃烧温度  $t_{act}$  比理论燃烧温度要低得多。

### 1.2.3 烟气焓值的确定

烟气所携带的热能在数量上常用烟气的焓值的大小来度量。在锅炉的热力计算或热工试验时，常常需要根据烟气的温度求得烟气的焓或者由烟气的焓求得烟气的温度。

烟气焓的计算是以 1kg 固体及液体燃料或标准状态下  $1\text{m}^3$  气体燃料为基础进行计算的，并且以  $0^\circ\text{C}$  作为起算点。

烟气是多种气体的混合物，其焓值等于理论烟气焓、过量空气焓和飞灰焓之和，即

$$I_y = I_y^0 + (\alpha - 1)I_k^0 + I_{fh} \quad (1-2)$$

式中  $I_y^0$ ——理论烟气体积的焓，kJ/kg 或 kJ/ $\text{m}^3$ 。当温度为  $\theta^\circ\text{C}$  时，其值为

$$I_y^0 = (V_{\text{RO}_2} C_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2} C_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{H}_2\text{O}}) \theta \quad (1-3)$$

$C_{\text{RO}_2}$ 、 $C_{\text{N}_2}$ 、 $C_{\text{H}_2\text{O}}$  分别为  $\theta^\circ\text{C}$  时  $\text{RO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  气体的平均体积定压热容，kJ/ $(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

由于烟气中  $\text{SO}_2$  的含量较  $\text{CO}_2$  的含量少得多，计算中可取  $C_{\text{RO}_2} = C_{\text{CO}_2}$ 。

$I_k^0$  为理论空气焓，其值为

$$I_k^0 = V^0 C_k t_k \quad (1-4)$$

式中  $C_k$ ——空气的平均体积定压热容，kJ/ $(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ；

$t_k$ ——空气温度， $^\circ\text{C}$ 。

烟气中飞灰的焓为

$$I_{fh} = \frac{A_{ar}}{100} a_{fh} C_h \theta \quad (1-5)$$

式中  $C_h$ ——飞灰的平均体积定压比热容，kJ/ $(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ；

$\frac{A_{ar}}{100} a_{fh}$ ——1kg 燃料中的飞灰质量，kg/kg。

一般来说，只有当

$1000 \frac{A_{ar} a_{fh}}{Q_{net,v,ar}} > 1.43$  时，飞灰焓才需计入烟气焓中，否则可略去不计。

各种成分的平均定压比热容见表 1-1。

表 1-1 空气、烟气和灰的平均定压比热容

kJ/(m<sup>3</sup>·°C)

$\theta/^\circ\text{C}$	$c_{\text{CO}_2}$	$c_{\text{N}_2}$	$c_{\text{O}_2}$	$c_{\text{H}_2\text{O}}$	$c_{\text{gk}}$	$c_{\text{k}}$	$c_{\text{CO}}$	$c_{\text{H}_2}$	$c_{\text{CH}_4}$	$c_{\text{h}}$
0	1.5998	1.2946	1.3059	1.4943	1.2971	1.3188	1.2992	1.2766	1.5500	0.7955
100	1.7003	1.2958	1.3176	1.5052	1.3004	1.3243	1.3017	1.2908	1.6411	0.8374
200	1.7873	1.2996	1.3352	1.5223	1.3071	1.3318	1.3071	1.2971	1.7589	0.8667
300	1.8627	1.3067	1.3561	1.5424	1.3172	1.3423	1.3167	1.2992	1.8861	0.8918
400	1.9297	1.3163	1.3775	1.5654	1.3289	1.3544	1.3289	1.3021	2.0155	0.9211
500	1.9887	1.3276	1.3980	1.5897	1.3427	1.3683	1.3427	1.3050	2.1403	0.9240
600	2.0411	1.3402	1.4168	1.6148	1.3565	1.3829	1.3574	1.3080	2.2609	0.9504
700	2.0884	1.3536	1.4344	1.6412	1.3708	1.3976	1.3720	1.3121	2.3768	0.9630
800	2.1311	1.3670	1.4499	1.6680	1.3824	1.4114	1.3862	1.3167	2.4981	0.9797
900	2.1692	1.3795	1.4645	1.6956	1.3976	1.4248	1.3996	1.3226	2.6025	1.0048
1000	2.2035	1.3917	1.4775	1.7226	1.4097	1.4373	1.4126	1.3289	2.6992	1.0258
1100	2.2349	1.4034	1.4893	1.7501	1.4214	1.4499				1.0509
1200	2.2638	1.4143	1.5005	1.7769	1.4327	1.4612	1.4361	1.3431	2.8629	1.0969
1300	2.2898	1.4252	1.5106	1.8028	1.4432	1.4725				1.1304
1400	2.3136	1.4348	1.5202	1.8280	1.4528	1.4830	1.4566	1.3500		1.1849
1500	2.3354	1.4440	1.5294	1.8527	1.4620	1.4926				1.2228
1600	2.3555	1.4528	1.5378	1.8761	1.4708	1.5018	1.4746	1.3754		1.2979

为了方便计算，一般用式 (1-2) 编制成焓-温表。

### 1.3 烟气热能的品位

热能本身是有品位 (或质量或能级) 的。温度不同，品位不同。

能量转换必须遵守能量守恒定律，热能的转换也不例外。但是，对涉及热能的转换过程，仅仅从能量在数量上的守恒关系分析，往往会掩盖热能在质量上的差异。因为不同温度水平的热能，即使在数量上相等，其利用价值也并不相同。因此，为了有效地利用热能，正确地合理地开发节能技术，找出能量损失的关键所在，需要结合热力学第一定律和第二定律，从量和质两个方面全面地、综合地进行分析。

人们从长期无数的实践经验中总结得出了存在于各种自然现象中的一条最普遍、最基本的规律：能量守恒与转换定律。它表明各种能量可以相互转换，但它们的总量保持不变。热力学第一定律就是能量转换与守恒定律在伴有热效应的物理及化学等过程中的应用。它广泛地适用于热能和其他能量形式之间的转换，如热能和机械能、热能和化学能、热能和电磁能等的转换，在转换过程中其总量是守恒的。

对任何的能量转换系统来说，能量守恒定律可表述为

$$[\text{输入能量}] - [\text{输出能量}] = [\text{储存能量的变化}] \quad (1-6)$$

对于封闭系统，热力学第一定律的表达式为

$$Q = \Delta E + W \quad (1-7)$$

式中， $Q$  为输入的热量； $W$  为输出的功量，当实际为输出热量或输入功量时，则取负值； $\Delta E$  为储存能量的变化，包括宏观运动的动能、位能以及热力学能的变化，存储能量增加时取正值。

热力学第一定律阐明了不同形式的能量在转换时数量上的守恒关系，但是它没有区分不同形式的能量在质上的差别。

事实上，不同能量的可转换性不同，反映了其可利用性不相等，也就是它们的质量不



同。当能量已无法转换成其他形式的能量时，它就失去了利用价值。能量根据可转换性的不同，可以分为三类。

第一类是可以不受限制地、完全转换的能量。例如电能、机械能、位能（水力等）、动能（风力等），称为“高级能”。从本质上来说，高级能是完全有序运动的能量，它们在数量上与质量上是统一的。

第二类是具有部分转换能力的能量。例如热能、物质的热力学能、焓等。它仅可以部分转变为第一类有序运动的能量。即根据热力学第二定律，热能不可能连续地、全部转变为功，它的热效率总是小于1。这类能属于“中级能”，它的数量与质量是不统一的。

第三类是受自然界环境所限，完全没有转换能力的能量。例如，处于环境状态下的大气、海洋、岩石等所具有的热力学能和焓，虽然它们具有相当数量的能量，但在技术上无法使它转变为功。所以，它们是只有数量而无质量的能量，称为“低级能”。

从物理意义上说，能量的品位高低取决于其有序性。第二、三类能量是组成物系的分子、原子的能量总和。这些粒子的运动是无规则的，因而不能全部转变为有序的能量。

热力学第二定律阐明了能量转换的条件及涉及热现象的过程的方向性。它指出：自然界的一切自发的变化过程都是从不平衡状态趋于平衡状态，而不可能相反。实质上它说明了在提供动力即转变为功的能力方面，热能和其他形式的能相比较，它们的转换能力是不相等的。机械能、电能等其他形式的能可以连续地把全部能量转变为功，但热能却不能连续地全部转变为功。

按照转变为功的可能性，可以把能分为可用能和不可用能。所谓可用能，就是可以连续地全部转变为功的能。反之，不可转变为功的能就是不可用能。显然电能、机械能等都是可用能。大气、海洋等环境物体的内能，按热力学第二定律，是完全不可能用来转变为功的不可用能。

如果引用可用能及不可用能的概念来分析能量转换过程，可以看出，诸如机械能转变为热能或由高温物体向低温物体传递热量等，仍是使一部分可用能转变为不可用能的过程，它们都是自发实现的过程，即不可逆过程。反之，这类过程的逆过程，也就是使不可用能转变为可用能的过程，则是不可能自发实现的。

如果以各种形式的能中含有可用能的比例定义为能在质量方面的品位，那么各种形式的能所具有的品位则是不同的。机械能、电能等具有最高的品位，而热能则具有较低的品位。在高温状态下热能的品位较高，当温度较低时热能的品位较低，而在环境温度下热能的品位最低。如果按能的品位来看能量转换的方向，则一切不可逆过程都是沿着使能的品位降低的方向发展。

一般用“焵”（Exergy）来衡量可用能的大小。焵的定义为：在一定环境条件下，通过一系列的变化（可逆过程），最终达到与环境处于平衡时，所能做出的最大功。或者说，某种能量在理论上能够可逆地转换为功的最大数量，称为该能量中具有可用能，用  $E_x$  表示。由此可见，焵是指能量中的可用能部分。即能量可分成“可用能”和“不可用能”两部分，将可用能称为焵，不可用能称为焠（Anergy），用  $A_n$  表示。即

$$E = E_x + A_n \quad (1-8)$$

对环境状态而言，能量中没有可用能部分，即对于低级能， $E_x = 0$ ， $E = A_n$ ；

对高级能，能量中全部为可用能，即  $E = E_x$ ， $A_n = 0$ ；

对热能这样的中级能， $E > E_x$ ， $E = E_x + A_n$ 。