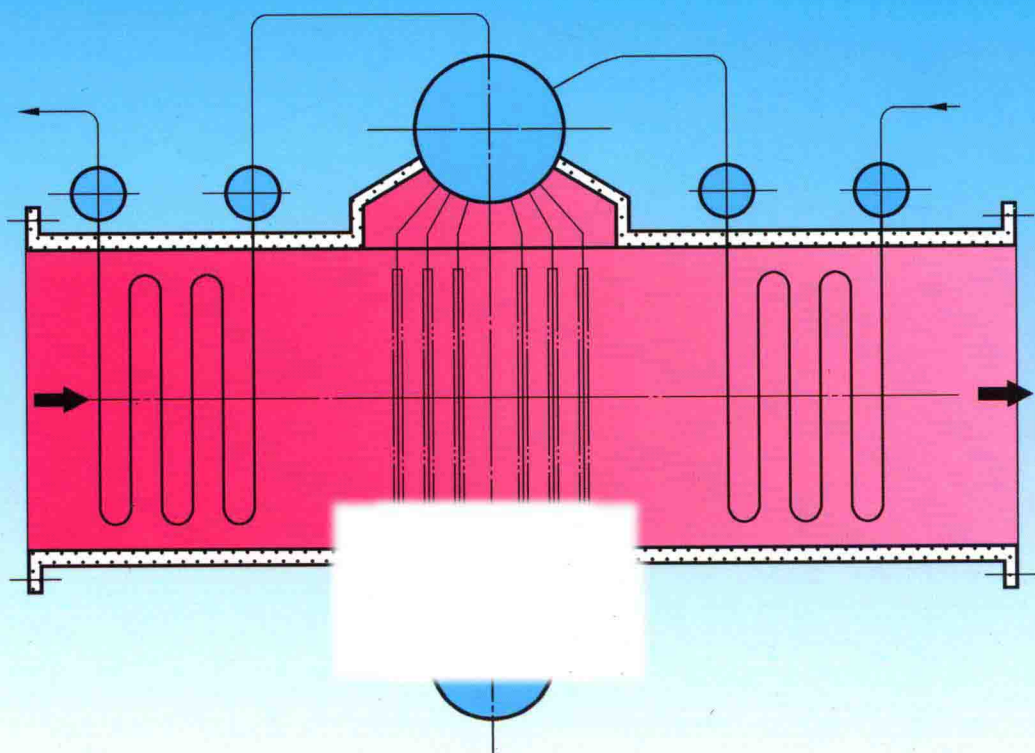


余热回收的原理与设计

Theory and Design for Waste Heat Recovery

刘纪福 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

余热回收的原理与设计

Theory and Design for Waste Heat Recovery

刘纪福 编著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书重点讲述余热回收的原理与设计,包括多种余热回收系统和相关设备的设计计算方法。涉及的余热回收系统有锅炉的余热回收系统,余热发电系统,以及钢铁、石化、机械、化工、轻工、空调等行业的余热回收系统。在介绍余热回收原理的基础上,本书通过几十个设计例题较详细地讲述了余热回收设备的设计计算方法,包括多种类型的余热锅炉、省煤器、热管换热器、翅片管换热器的设计方法,本书为推广和实施余热回收工程提供了一定的理论和设计基础。

图书在版编目(CIP)数据

余热回收的原理与设计/刘纪福编著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社, 2016. 6
ISBN 978-7-5603-5917-5

I. ①余… II. ①刘… III. ①余热回收-废热回
收-系统设计 IV. ①X706

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 062160 号

策划编辑 王桂芝 张 荣
责任编辑 范业婷 高婉秋
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 23.75 字数 549 千字
版 次 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-5917-5
定 价 98.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

余热,又称废热,是指在工艺过程完成后准备废弃或排放的能量。余热的排放温度有的很高,有的较低,在排放的余热中,有的夹杂着大量的粉尘和污染物。将余热排向大气和环境中,不但造成了能源的浪费,而且会对环境造成严重的污染。

热力学相关定律指出,在排放的余热中都含有一定的可用能。如何回收和利用这部分可利用的能量,提高能源的利用率,同时减轻对环境的污染,已成为节能和环保的重大课题。

本书的特点如下:

(1)在相关的参考文献中,对“余热回收”的叙述和讲解,绝大多数都集中在“技术方案”本身,即只给出系统图,指出由几个部件组成,基本上不讲解系统的设计计算,尤其是重要部件或设备的设计计算,这给余热回收设备的制造、推广和应用带来了困难。针对上述情况,本书重点讲述余热回收的原理和设计,而且以设计为主。作者认为,只有掌握了设计计算方法,能自行设计关键设备,才能真正地掌握技术本身,才能对余热回收系统进行改进和开发。为了使读者掌握设计计算方法,作者全面并概要地讲述了相关设计原理,推荐了几十个设计公式或试验关联式,列举了几十个设计计算例题和详细的设计步骤,并为设计计算提供了必要的参考数据和物性参数。

(2)本书作者曾长期从事能源领域的教学和工业服务,参与过众多工业部门余热回收项目的研究、开发和设计,本书中的设计方法和大多数例题都有工业应用的背景。在作者推荐的设计计算方法中,有下列创新和特点:

①对于余热回收中常用的翅片管换热器,作者推出了多种翅片管的翅片效率的计算方法,使读者不用查表和查图,可以直接进行余热回收换热器的计算和设计;

②利用“传热效率-换热单元数”概念和公式,提出了余热回收换热器的“变工况计算方法”,即在运行条件发生变化时,可以方便地推导出余热回收设备的运行参数和性能变化;

③对多种余热回收设备和换热器,提出了统一而有区别的传热热阻计算公式,其中对翅片热阻、污垢热阻、接触热阻等都提出了选择和计算方法,使设计结果更加合理和安全;

④本书扩展了余热回收的研究领域和思维空间:例如,液化天然气在汽化过程中的冷能发电,利用寒冷空气中的冷能加固冻土地带的工程基础;空调排气的余热回收;空冷器排气的余热回收等。

(3)将余热回收和环境保护紧密地结合在一起:

①余热回收本身提高了能源的利用效率,从而减少了“废热”向环境的排放和对环境的污染;本书中很多章节都涉及对工业废弃物的处理、除灰除尘和余热利用,对节能和环保提出了技术方案,将环境保护作为余热回收方案的重要考虑因素;

②为了防止大气污染和雾霾的产生,燃煤锅炉和工业生产排烟的脱硝脱硫日益受到重视。本书在相关章节简要介绍了脱硝脱硫的原理和工艺,并推荐了余热回收设备在脱硝脱硫环境保护工程中的应用方案。

考虑到余热回收的应用领域极其宽广,涉及的工业部门众多,新的技术和方案在不断涌现,本书所涉及的内容还有很多有待提高和完善之处。希望本书的出版能对余热回收事业提供一点微薄的助力。

哈尔滨工业大学能源学院 刘纪福

2016.1

目 录

第 1 章 余热回收的基本概念和理论	1
1.1 余热回收的基本概念	1
1.2 余热回收和热力学第一定律	5
1.3 余热回收和热力学第二定律	13
1.4 余热回收的传热学基础	20
1.5 余热回收用翅片管换热器	35
1.6 余热回收用热管换热器	46
1.7 余热锅炉的结构和设计	59
1.8 余热回收中的烟气除灰和净化	72
1.9 燃煤烟气的脱硫脱硝	77
1.10 余热回收效率和经济评价	84
第 2 章 锅炉的余热回收	89
2.1 概述	89
2.2 H 型翅片管省煤器	90
2.3 环形翅片管省煤器	98
2.4 热管式空气预热器	110
2.5 电站锅炉的余热回收	120
2.6 余热回收中的腐蚀及其对策	132
2.7 SCR 脱硝系统中的省煤器设计	142
2.8 SCR 脱硝系统中的空气预热器设计	147
2.9 湿法烟气脱硫系统中的气-气换热器	155
第 3 章 余热发电和热电联产	159
3.1 余热发电——高质量的余热利用	159
3.2 余热发电的参数选择和热力过程	160
3.3 余热发电系统的余热锅炉设计	166
3.4 余热发电机组的选型设计	180
3.5 通过热电联产提高热能利用率	184
第 4 章 钢铁工业的余热回收	190
4.1 概述	190

4.2 赤热焦炭的干式冷却和余热回收 193

4.3 烧结矿石的显热回收 205

4.4 高炉热风炉排气的余热回收 216

4.5 炼钢炉炉气的余热回收 225

4.6 高炉和转炉炉渣的余热回收 237

第 5 章 石化工业中的余热回收 241

5.1 概述 241

5.2 石化工业中特殊形式的余热锅炉 242

5.3 硫酸工厂的余热回收 246

5.4 化肥生产的余热回收 253

5.5 原油相变加热及其余热回收 261

5.6 液化天然气的汽化和冷能发电 270

第 6 章 工业炉窑的余热回收 277

6.1 加热炉的余热回收 277

6.2 化铁炉的余热回收 283

6.3 水泥工程的余热回收 291

6.4 热处理炉的余热回收 304

第 7 章 造纸和食品工业的余热回收 309

7.1 造纸工程的余热回收 309

7.2 食品工业的余热回收 315

第 8 章 环境温度附近的余热回收和热能利用 325

8.1 概述 325

8.2 空调排气的余热回收 326

8.3 热泵及其应用 329

8.4 空冷器排气的余热回收 336

8.5 环境冷能在冻土区的应用 349

附录 物性及相关数据 356

参考文献 373

第 1 章 余热回收的基本概念和理论

1.1 余热回收的基本概念

1.1.1 余热和余热资源

余热,有时也称废热、排热(Waste Heat),是指从能量利用系统或设备中废除或排出的热量,包括排出的热载体中所释放的高于环境温度的热量和可燃性废弃物中含有的低发热值的热能。排放余热的载热体可以是气体、液体或固体,余热分布在多种能源消耗系统和设备中,例如:

- ① 锅炉排出的烟气及炉渣中未完全燃烧的固体颗粒所包含的余热;
- ② 以潜热形式存在于汽轮机排汽中的余热;
- ③ 冶金工业中的高炉热风炉排气,炼焦炉排气,转炉和电炉等炼钢炉的排气以及各种炉渣中所包含的余热;
- ④ 石化工业中炭黑尾气等可燃性废气所含有的余热;
- ⑤ 各种高温固态、液态产品(包括中间产品)所包含的余热;
- ⑥ 汽车发动机、各种内燃机做完功后所排出的余热等。

系统的余热资源量是以环境温度下限进行计算的,原因在于:余热的载热体(气体、液体或固体)最后都要排向环境,排出余热的最后温度是环境温度,也就是说,环境和环境温度是所有载热体和余热资源的最后归宿。因而,选取环境温度作为计算余热资源的下限温度是合理的。例如,某锅炉的排烟温度为 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$,当地环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其余热资源对应的温差为 $220\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

虽然余热资源量是以环境温度为下限来定义和计算的,但在工程实践中以环境温度为下限的余热是不能被完全回收和利用的,只能回收高于环境温度的某一部分余热,称为可利用余热。可利用余热是指被考察体系排出的余热资源中,经技术经济分析(技术上可行,经济上合理)所确定的可利用的那部分余热,其数量仅仅为余热资源量的一部分。由于技术条件、经济性及现场利用条件等的限制,余热回收的下限温度是变化的,可利用的余热数量会有所不同。随着技术的进步,下限温度将逐渐下降,回收热量会逐步提高。例如,对于锅炉的排烟余热,若排烟温度为 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$,考虑到露点腐蚀的影响,将余热回收的下限温度定于 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,则其可利用余热对应的温度范围为 $220\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。若由于技术进步,采用了抗腐蚀的材料或采用合理的设计,余热回收的下限温度下降至 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$,使可利用余热大大提高,对应的温度范围为 $220\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

当废弃物为带有一定发热值的固体或气体可燃物时,其低位发热值的总量即可认为是余热资源量,因为其发热值的定义和测试都是以环境温度为基础进行的,其包含的余

热资源在应用后,最终都会回归到环境和环境温度。

1.1.2 余热资源的分类

由于工业设备和系统千差万别,余热资源的数量、质量和形态各不相同,要对余热资源进行全面分类是很困难的。下面提出三种余热资源的划分方案。

1. 按余热载体的物理特性划分余热资源

(1) 固态载热体余热资源。这是存在于固态载热体中的余热资源,包括各种固态产品和其中间产品的余热资源、排渣的余热资源和可燃性废料中的余热资源。例如,钢铁工业中炽热的焦炭、烧结矿、炉渣、连铸坯等固态物料所携带的余热,石油工业排放的油渣,各种炉窑排放的含灰量高的炉渣余热等都属于这类余热资源。这类余热资源一般含灰量大,对环境污染严重,在余热回收的同时必须考虑对环境的保护。此外,由于固态载热体流动性差、散热慢,需采用特殊的余热回收技术和设备。

(2) 液态载热体余热资源。这是一种以液态形式存在的余热资源,包括液态产品及其中间产品的余热资源,冷凝水和冷却水的余热资源,以及可燃性废液包含的余热资源。在余热回收中要考虑这种载热体的流动性、腐蚀性、可燃性等各种特性的影响。

(3) 气体载热体余热资源。这是一种最广泛、最普遍的余热资源,包括各种烟气的余热、各种设备排气的余热及各种可燃性废气的余热等。对气体的余热回收已积累了丰富经验,由于气体侧换热性能较低,需采用强化传热元件和热交换器,同时,还要重点考虑气体的积灰、磨损和腐蚀。

2. 按载热体温度水平划分余热资源

(1) 高温余热资源,一般指载热体温度高于 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的余热资源。

(2) 中温余热资源,一般指载热体温度在 $300 \sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的余热资源。

(3) 低温余热资源,一般指载热体温度低于 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的余热资源。

应当指出,上述高、中、低温余热资源的划分仅有参考意义,并不是固定不变的。例如,对于燃煤的普通锅炉,一般情况下的排烟温度在 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,当排烟温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,就认为是中等排烟温度了。对于燃烧天然气的锅炉,一般的排烟温度在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,当排烟温度达到 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,就认为是很高的排烟温度了,应属于中温余热资源。

3. 按工业部门和设备划分余热资源

考虑到工业部门众多,用热设备各具特点,产生的余热资源在形式和温度水平上各不相同,为了便于余热的回收和利用,有必要直接按工业部门和用能设备将余热资源进行划分,见表 1.1。

应当指出,虽然对余热资源的特性做了上述分类,但仍难以全面考虑余热资源的其他特点,例如,有的余热资源是间断性的,有的余热资源是连续而稳定的;有的余热资源含有大量粉尘、颗粒或其他成分,有的则比较干净;有的余热资源有腐蚀性或对人体有害,有的则无毒无腐蚀。这些特点通常与特定的设备、特定的工艺、特定的运行方式及不同的燃料品种有关。因此,为了便于研究并制订合理的余热回收方案,有时需要针对具体的设备进行分析。

表 1.1 各工业部门的余热资源

工业部门	用能设备	余热种类	余热温度 /℃	载热体形态
钢铁工业	炼焦炉	焦炭显热	1 050	固态
	烧结炉	烧结矿显热	650	固态
	热风炉	排气余热	250 ~ 300	气态
	高炉冷却水	低温水余热	50 ~ 70	液态
	炼钢炉	排烟灰余热	600 ~ 1 000	气态
	炉渣冷却水	冷却水余热	50 ~ 70	液态
有色金属工业	自熔炉	烟气余热	1 200	气态
	自熔炉	炉渣余热	1 200	固态
化工工业	加热炉	排气余热	200 ~ 700	气态
	电石反应炉	炉渣余热	1 800	固态
工业锅炉	燃煤锅炉	烟气余热	150 ~ 200	气态
	燃气锅炉	烟气余热	100 ~ 150	气态
工业窑炉	玻璃窑炉	排气余热	900 ~ 1 500	气态
	水泥窑炉	排气余热	600 ~ 700	气态
	锻造加热炉	排气余热	600 ~ 700	气态
	热处理炉	排气余热	400 ~ 600	气态
	干燥炉,烘干炉	排气余热	200 ~ 400	气态
电力工业	电站锅炉	排烟余热	100 ~ 300	气态
	燃气轮机	排气余热	300 ~ 500	气态
	冷凝器	排水余热	30 ~ 50	液态
轻工业: 食品、纺织、 造纸	加热炉	排气余热	100 ~ 200	气态
	干燥炉,烘干炉	排气余热	80 ~ 120	气态

注:表中所列举的余热温度范围仅供参考,由于具体设备和运行条件的不同,余热温度会有所变化

1.1.3 余热回收的难题和对策

综上所述,余热回收工程或项目遇到的难题很多,解决这些难题的方法和策略也在不断发展和完善中,主要有:

(1) 低温排烟的露点腐蚀。当换热器的表面温度低于烟气中硫酸蒸气的露点时,硫酸蒸气就会在换热表面上凝结下来,从而造成对换热表面的硫酸腐蚀。通常所采取的措施有:改进设计使其壁面温度高于硫酸蒸气的露点,从而避开露点腐蚀;开发或选用抗露点腐蚀的材质,从而避免露点腐蚀。

(2) 粉尘、积灰和磨损。在气态或液态载热体中往往含有大量的灰分和粉尘,有时每立方米载热体中的粉尘含量高达 50 ~ 200 g,这给余热回收装置和换热设备的正常运行造成极大的威胁,是余热回收不得不面对的难题。通常可采取的措施有:在含灰量很大的载热体进入换热器之前,设置大容积的降尘室,以降低工质的流速,同时采用弯转的流道,依靠工质的重力和离心力使灰分沉降。对含灰量一般的烟气,在其流经换热表面时,

往往选取较大的质量流速,使其具有一定的自吹灰能力;或者采用不宜积灰的换热表面和放置形式等。此外,虽然在工质的出口都设置了除尘器,但在余热回收设备中,在工质流过的路径上,增设合适的除灰设备也是必要的。

(3) 易燃、易爆介质。应采取的技术方案有:在余热回收的同时,严格防止易燃介质与助燃成分的混合和泄漏,例如,采用分离式换热设备将两种介质隔离开来;采用安全的中间介质在冷热流体之间进行换热;在换热器的合适部位设置防爆阀和排放阀等。

(4) 高温固体颗粒的余热回收。这是最难回收的余热资源之一,当固体颗粒本身是可燃物或含有可燃物时(如焦炭),余热回收的同时应保护好可燃物包含的化学能,不要让它燃烧。所采用的方法有:利用不可燃的介质(如氮气)作为吸收余热的中间工质,然后再将其吸收的余热传递给做功的介质。目前,已开发出成熟的相关技术。在该技术领域,最不理想方案是用水直接喷淋高温固体载热体,这种方案不但没有回收余热,反而损失了大量的水分,造成严重的环境污染。

(5) 降低投资和成本的技术方案。余热回收必须考虑投资和成本,因为投资和成本本身就代表着能量的消耗,余热回收是为了节约能量,但制造、运输、安装、运行、维修一台余热回收设备需要消耗资金,即消耗能源。设备的经济效益有很多评估方法,其中计算余热回收项目的投资回收期是必要的。如果投资回收期在一年之内,就说明从第二年开始就可以得到投资的净收益了。如果投资回收期过长,甚至超过设备的使用寿命,那就得不偿失了,需要重新选择和设计余热回收方案。

1.1.4 余热回收的理论和设计

为了合理地规划余热回收方案,正确地设计余热回收设备,需要了解并掌握余热回收的相关理论和设计计算方法,为此,本章包含了如下有关章节:

1. 余热回收和热力学第一定律

热力学第一定律是能源领域中的一个基本定律,它的核心是能量守恒,在能量的利用、转换、排放、回收、再利用等过程中,热力学第一定律从数值上确定了各部分能量之间的守恒关系。例如:

$$\text{余热回收的热量} = \text{余热载体减少的热量}$$

$$\text{热载体放出的热量} = \text{做功消耗的热量} + \text{排放的热量}$$

对热交换器: $\text{热流体放出的热量} = \text{冷流体吸收的热量}$

以热力学第一定律为基础,给出了在各种情况下热量的计算方法和热量的相关函数。

2. 余热回收和热力学第二定律

热力学第一定律从数量上指出了能量在传递和转换过程中的数值关系。而热力学第二定律则是从质量上评价能量的一条定律,说明在能量的转换、传递和不断使用过程中,虽然能量在数值上是守恒的,但能量的质量在下降,在贬值,而贬值后的能量不断地充斥在环境中。热力学第二定律不仅是一个学术规律,而且已成为一个重要的思想方法。在制订余热回收的整体方案时,正确地掌握和应用热力学第二定律是非常必要的。

3. 热交换器的基本理论和设计要领

余热回收离不开热交换器,热交换器从余热载体中吸收余热,同时将热量传给特定

的介质,变为有用的能源。为了掌握热交换器的设计方法,需要了解传热学的基本原理。本书重点介绍了广泛用于余热回收的翅片管换热器、热管换热器和余热锅炉的设计计算方法。并在相关章节中,通过大量例题进一步说明设计方法的应用。

4. 余热回收的经济评价

余热回收项目在收益和投资之间如何平衡,如何计算余热回收工程的收益和投资,也是余热回收中必须关注的问题。本节将从热力学第一定律和热力学第二定律的观点提出余热回收的经济评价方法。

1.2 余热回收和热力学第一定律

1.2.1 热力学第一定律的表述

热力学第一定律是能量守恒定律在热力学上的应用。能量守恒是自然界的基本规律之一。在处理和思考与能量、能源有关的问题时,热力学第一定律既是世界观,也是方法论。

热力学第一定律有各种表述,可以以宇宙、地球或某一个工程或工厂为背景进行表述,也可以从我们生活中与能源有关的方方面面来表述。余热回收与能量、能源有关,因而余热回收的任何一个环节都离不开热力学第一定律的制约。

热力学第一定律从宇宙角度的表述是:“宇宙的能量总和是个常数。我们既不能创造也不能消灭能量。宇宙中的能量总和一开始就是固定的,而且永远不会改变。”

从地球角度对热力学第一定律的表述是:“地球上的能量是固定的:一个是地球本身所储存的能量,另一个是太阳能。”

其他表达形式为:“我们每天都在消耗能量,但我们并没有消灭能量,而只是把它转换成了其他的能量形式。”

“热能可以转换为其他形式的能量,但总能量是守恒的。”

“热是能的一种,热可以变成功,功也可以变成热,一定量的热消失时,可产生一定量的功;消耗了一定的功时,必出现与之对应的一定量的热。”

以一个发电厂为背景对能量守恒定律进行的表述是:“发电厂所消耗的能源总量(即燃烧的燃料中所包含的总能量和从环境空气中吸取的热量)等于发出的电力所消耗的热能,加上通过固态、液态、气态等载热体以各种形式向环境排放的热能。”

以一部汽车发动机为例,能量守恒定律体现的是:“发动机每燃烧一升燃料所产生的能量等于发动机产生一定的动力所消耗的能量加上发动机向外排气带出的能量和各部件的散热量。”

余热回收就是从内向外排出的“废热”中,吸收一部分热能,使其从“无用”变为“有用”,提高能源的利用率。在余热回收系统中,处处离不开热力学第一定律的制约,例如:

载热体进入系统的热量 - 载热体排出系统的热量 = 余热回收的热量

又如,对一台换热器而言:热流体传入的热量 = 冷流体吸收的热量

热力学第一定律看起来简单,容易被人接受,但在执行和操作中却经常被忽略,甚至

出现错误,例如:

(1) 某资料称,发明了一个传热元件,只要使用了它的工质,向元件中传出的热量就可以大于传入的热量。

(2) 某锅炉的热效率为 80%,有宣传称,采用了某种余热回收设备,就可以将能源利用率提到 50%。

(3) 在一台换热设备的设计中,用户随意地给出了冷、热两种流体的所有已知条件,但根据此条件计算出的热流体的放热量并不等于冷流体的吸热量。

1.2.2 计算热能的重要物性和参数

为了从数值上计算和分析系统中的各项热量,需要熟悉计算热量的相关参数。最常用的参数是两个与能量有关的物性:燃料的发热值和焓。下面分别对其进行说明。

1. 燃料的发热值

发热值又称发热量,是燃料的特性指标,表达了燃料品质的高低。只有掌握了燃料的发热值,才能对燃烧设备的燃料消耗量、热效率及余热回收系统的经济性做出评价。

燃料的发热值是指每千克(气体燃料为每 Nm^3) 燃料完全燃烧时所放出的热量,单位是 kJ/kg , 或 kJ/Nm^3 。在煤炭或煤气燃料中都含有一定量的水分,所含有的水分在燃料的燃烧过程中变为水蒸气,燃烧所放出的热量有一部分转化为水蒸气的汽化潜热,这部分热量在锅炉中是不能被利用的。为此,把含有水蒸气汽化潜热的燃料燃烧放出的总热量称为高发热值,而把不包含水蒸气汽化潜热的值称为低发热值。在余热回收的热平衡计算中,都按燃料的低发热值计算,一般用 Q_{dw} 表示。

煤的发热量可用氧弹测热计直接测量,测热计的基本原理是:将一定量的煤样置于充满氧气的氧弹中,并在氧弹中完全燃烧,同时将氧弹沉没在盛满水的容器中,煤样燃烧后放出的热量被氧弹外的水吸收,测试水温的升高和水量,便可计算出煤的发热量。

发热值也可以根据燃料的元素分析及工业分析的结果进行计算,计算得出的数值与测试得出的数值应接近,并在一定的误差范围之内。

各种煤种的低发热值可以在相关文献中查找,常用的一组数据见表 1.2 和表 1.3。

表 1.2 各煤种的低发热值

煤种	级别	可燃基挥发分的质量分数 /V%	低发热值 / ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
劣质煤	I 类		6 500 ~ 11 500
	II 类		> 11 500 ~ 14 100
烟煤	I 类	≥ 20	> 14 400 ~ 17 700
	II 类	≥ 20	> 17 700 ~ 21 000
	III 类	≥ 20	> 21 000
贫煤		10 ~ 20	$\geq 17 700$
无烟煤	I 类	5 ~ 10	< 21 000
	II 类	< 5	$\geq 21 000$
	III 类	5 ~ 10	$\geq 21 000$
褐煤			$\geq 11 500$

表 1.3 煤气的低发热值

种类	煤气平均成分的体积分数 /%								低发热值 / (kJ · Nm ⁻³)
	CH ₄	C _m H _n	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ S	N ₂	O ₂	O ₂
气田煤气	97.42	1.27	0.08		0.52	0.03	0.76		35 600
油田煤气	83.18	12.18			0.83		3.84		38 270
液化天然气	100								104 670
高炉煤气			2	27	11		60		3 678
发生炉煤气	1.8	0.4	8.1	30.4	2.2		56.4	0.2	5 650

2. 焓

焓是表征流体所含能量的一个状态参数,是计算流体热能的一个重要物性。由热力学可知,存在于流体中的能量有两种形式:一是流体的内能,它是流体内部分子、原子等微观粒子的热运动所具有的能量;二是流体本身可以移动做功的能量,因为流体具有一定的压力,当流体移动时就可以对外做功。因此,焓是 1 kg 工质(气体为每 Nm³)所包含的内能和推动功的总能量,并以 0℃ 作为计算起点,常用*i* 或*h* 表示,其单位是 kJ/kg (气体为 kJ/Nm³)。

对于饱和水和饱和水蒸气,其焓值随饱和温度和饱和压力而改变,可在附表 4、附表 5 中查取,例如,100℃ 下,饱和水的焓值 *i*₁ = 419.1 kJ/kg,饱和蒸汽的焓值 *i*₂ = 2 675.7 kJ/kg,将 1 kg、100℃ 的饱和水变成 100℃ 的饱和蒸汽需要加入的热量为:*r* = *i*₂ - *i*₁ = 2 675.7 - 419.1 = 2 256.6 kJ/kg,*r* 为在该温度下水的汽化潜热。

对于过热水蒸气和过冷水的焓值可在相关附表中查取,见附表 6。

当烟气和空气等气体在近似等压状态下换热时,其吸热量或放热量可以通过该气体在进出口温度下的焓差计算,也可以通过气体的平均比定压热容计算:

$$Q = m \times \Delta i = m \times c_p \times \Delta T$$

式中 *Q*—— 换热量, kJ/s, 或 kW;

c_p—— 比定压热容, kJ/(kg · ℃);

ΔT —— 气体的进出口温差, ℃;

m—— 气体的质量流量, kg/s。

比热容 *c_p* 也是一个常用的物性,主要用在单相流体的热力学计算中,它代表 1 kg 单相流体,其温度每变化 1℃ 所吸收或放出的热量,对于空气和烟气,*c_p* 值可在附表 2、附表 3 中查取。

若空气中含有较多的水蒸气,应当作“湿空气”处理,而且需要用焓计算,湿空气焓的计算式为

$$i = i_a + d \times i_w$$

式中 *i*—— 湿空气的焓, kJ/kg;

i_a—— 干空气的焓, kJ/kg;

i_w—— 水蒸气的焓, kJ/kg;

d—— 1 kg 干空气中水蒸气的含量, kJ/kg_{干空气}。

湿空气的焓可从湿空气的焓 - 湿图查取,也可由下式计算:

$$i = 1.01t + d(2500 + 1.84t) \text{ 或 } i = (1.01 + 1.84d)t + 2500d$$

式中 t ——湿空气的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

下面通过几个例题,说明在余热回收工程中相关热量的计算。

例1 某工业锅炉,每小时产生 100 t、180 $^{\circ}\text{C}$ 的饱和蒸汽,水的入口温度为 40 $^{\circ}\text{C}$,试计算该锅炉的供热负荷。

解 蒸汽流量: $m = 100 \text{ t/h} = 27.778 \text{ kg/s}$

水入口焓值: $i_1 = 167.5 \text{ kJ/kg}$

蒸汽出口焓值: $i_2 = 2777.7 \text{ kJ/kg}$

锅炉热负荷: $Q = m \times (i_2 - i_1) = 72506 \text{ kW}$

例2 例1中,该锅炉每小时平均燃烧 15.26 t II 类烟煤,假定煤炭完全燃烧,计算该锅炉燃煤产生的热负荷。

解 煤炭燃烧量: $B = 15.26 \text{ t/h} = 4.24 \text{ kg/s}$

II 类烟煤低热值: $Q_{\text{dw}} = 19000 \text{ kJ/kg}$ (由表 1.2 选取)

燃煤产生热负荷: $Q_0 = Q_{\text{dw}} \times B = 19000 \text{ kJ/kg} \times 4.24 \text{ kg/s} = 80560 \text{ kW}$

锅炉热效率: $\eta = \frac{Q}{Q_0} = \frac{72506 \text{ kW}}{80560 \text{ kW}} = 0.9$

例3 在上述两例题中,已知烟气的排烟量为 180000 kg/h,排烟温度为 $T_1 = 180^{\circ}\text{C}$,为了回收排烟余热,安装一台余热回收设备用来加热给水,将排烟温度降至 $T_2 = 130^{\circ}\text{C}$ 。给水的入口温度为 40 $^{\circ}\text{C}$,出口温度为 70 $^{\circ}\text{C}$,试计算回收热量和给水流量。

解 烟气流量: $G_1 = 180000 \text{ kg/h} = 50 \text{ kg/s}$

烟气平均比热容: $c_p = 1.08 \text{ kJ/(kg} \cdot ^{\circ}\text{C)}$

烟气放热量: $Q_1 = G_1 c_p (T_1 - T_2) = 50 \text{ kg/s} \times 1.08 \text{ kJ/(kg} \cdot ^{\circ}\text{C}) \times (180 - 130)^{\circ}\text{C} = 2700 \text{ kW}$

由热力学第一定律,烟气放热量 = 水的吸热量

水的入口焓值: $i_1 = 167.5 \text{ kJ/kg}$

水的出口焓值: $i_2 = 293.0 \text{ kJ/kg}$

水的吸热量: $Q_1 = G_2(i_2 - i_1)$, 水的流量为

$$G_2 = \frac{Q_1}{i_2 - i_1} = \frac{2700 \text{ kW}}{293.0 \text{ kJ/kg} - 167.5 \text{ kJ/kg}} = 21.5 \text{ kg/s}$$

例4 由以上 3 例题,分析余热回收的节能效果。

解 节约煤炭量: $B = \frac{Q_1}{\eta \times Q_{\text{dw}}} = \frac{2700 \text{ kW}}{0.9 \times 19000 \text{ kJ/kg}} = 0.158 \text{ kg/s} = 568.42 \text{ kg/h}$

余热回收热效率: $\eta_1 = \frac{Q_1}{Q_0} = \frac{2700 \text{ kW}}{80560 \text{ kW}} = 0.0335$

即由于余热回收,使原有锅炉的热效率提高了 3.35%。

1.2.3 余热回收中烟气流量的计算

余热回收中的烟气流量是余热锅炉设计中的关键参数。燃料燃烧时所需的空气量及燃烧后的烟气量是通过复杂的计算确定的。在计算时,将空气和烟气中的组成气体都

看作理想气体,并以标准状态,即 0℃、0.101 3 MPa 大气压力下的立方米(Nm³) 为单位计算。

燃料中各种可燃成分完全燃烧所需空气量之和称为理论空气量,用符号 V_0 表示,对每千克固体或液体燃料,其理论空气量的单位是: Nm³/kg; 对每 Nm³ 气体燃料,其单位是 Nm³/Nm³ 气体。

燃料燃烧时实际供给的空气量与理论空气量之比称为过剩空气系数 α ,过剩空气系数是锅炉运行的重要指标, α 过大则会增加排烟热损失, α 太小则不能保证燃料的完全燃烧。对于不同的燃料和不同的燃烧设备, α 应选取不同的数值,一般在 1.1 ~ 1.8 之间。

实际烟气量的计算可参考锅炉设计的相关文献。为了方便设计,下面给出一组烟气流量的简化计算表格,可作为余热锅炉设计的参考,表格中仅有 4 个变量:燃料燃烧所产生的烟气量 V_y ,理论空气量 V_0 ,燃料的低发热值 Q_{dw} 和过剩空气系数 α ,见表 1.4 ~ 1.6。

表 1.4 煤炭燃烧每千克所产生的烟气量 (V_y) Nm³/kg

热值	kcal/kg	2 000	3 000	4 000	4 500	5 000	5 500	6 000
Q_{dw}	kJ/kg	8 374	12 560	16 747	18 841	20 934	23 027	25 121
$V_0/(Nm^3 \cdot kg^{-1})$		2.52	3.53	4.54	5.05	5.55	6.06	6.56
不同过剩空气系数 α 下的 V_y	1.20	3.93	5.08	6.12	6.66	7.21	7.77	8.31
	1.30	4.19	5.38	6.53	7.16	7.76	8.38	8.96
	1.40	4.44	5.75	7.02	7.66	8.32	8.97	9.61
	1.50	4.69	6.08	7.48	8.17	8.88	9.58	10.27
	1.60	4.94	6.44	7.93	8.67	9.43	10.18	10.93
	1.70	5.19	6.79	8.39	9.18	9.98	10.79	11.57
	1.80	5.44	7.14	8.84	9.69	10.54	11.39	12.23

注:①工业锅炉常用煤炭热值 Q_{dw} 可参阅表 1.2,也可参考推荐数值:石煤(Ⅱ类),5 500 ~ 8 400 kJ/kg; 煤矸石,6 300 ~ 11 000 kJ/kg;褐煤,8 400 ~ 15 000 kJ/kg;无烟煤(Ⅱ类),大于21 000 kJ/kg;贫煤,不小于 18 800 kJ/kg;烟煤(Ⅱ类),15 500 ~ 19 700 kJ/kg

②固体燃料燃烧的过剩空气系数 α 值约为 1.30 ~ 1.7;对于机械燃烧方式 α 值取低一些

表 1.5 燃烧每千克液体燃料所产生的烟气量 (V_y) Nm³/kg

热值	kcal/kg	7 000	8 000	9 000	9 500	10 000
Q_{dw}	kJ/kg	29 308	33 494	37 681	39 775	41 868
$V_0/(Nm^3 \cdot kg^{-1})$		7.95	8.8	9.65	10.07	10.5
不同过剩空气系数 α 下的 V_y	1.05	8.17	9.32	10.47	11.05	11.63
	1.10	8.57	9.76	10.95	11.56	12.15
	1.15	8.96	10.20	11.44	12.06	12.68
	1.20	9.36	10.64	11.91	12.56	13.20
	1.25	9.76	11.08	12.40	13.07	13.72
	1.30	10.15	11.52	12.88	13.57	14.25
	1.40	10.95	12.40	13.85	14.58	15.30

注:①液体燃料的热值:重油,39 000 ~ 41 000 kJ/kg;焦油,29 000 ~ 38 000 kJ/kg;原油,41 000 ~ 44 000 kJ/kg

②液体燃料燃烧的过剩空气系数 α 值约为 1.10 ~ 1.30

表 1.6 气体燃料燃烧所产生的烟气的量 (V_y) Nm³/Nm³ 气体

热值 Q _{dw}	kcal/ Nm ³	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	8 350	9 000	10 000
	kJ/Nm ³	4 187	8 374	12 560	16 747	20 934	34 960	37 681	41 868
V ₀ /(Nm ³ · Nm ⁻³ 气体)		0. 875	1. 75	2. 63	4. 11	5. 20	9. 25	9. 97	11. 07
不同过 剩空气 系数 α 下的 V _y	1. 02	1. 743	2. 49	3. 23	4. 89	6. 05	10. 45	11. 19	12. 32
	1. 05	1. 769	2. 54	3. 31	5. 01	6. 21	10. 72	11. 49	12. 65
	1. 10	1. 813	2. 63	3. 44	5. 22	6. 47	11. 18	11. 98	13. 21
	1. 15	1. 857	2. 71	3. 58	5. 43	6. 73	11. 65	12. 49	13. 75
	1. 20	1. 900	2. 80	3. 71	5. 63	6. 99	12. 11	12. 99	14. 32
	1. 30	1. 987	2. 98	3. 97	6. 04	7. 51	13. 03	13. 97	15. 42

注:① 气体燃料的热值:高炉煤气,约 4 100 kJ/Nm³;发生炉煤气,4 600 ~ 10 000 kJ/Nm³;混合煤气,5 400 ~ 15 000 kJ/Nm³;炼焦煤气,约 16 700 kJ/Nm³;天然气,约 35 000 kJ/Nm³;油田伴生气,约 40 000 kJ/Nm³;液化天然气,约 42 000 kJ/Nm³

② 气体燃料燃烧的过剩空气系数 α 值约为 1. 02 ~ 1. 20

例 5 某工业锅炉,每小时产生 100 t、180 ℃ 的饱和蒸汽,水的入口温度为 40 ℃,经计算,锅炉热负荷:Q = 72 506 kW。该锅炉燃烧 II 类烟煤,其低热值:Q_{dw} = 18 840 kJ/kg。锅炉热效率:η = 0. 9,设过剩空气系数为 1. 3,试计算该锅炉的排烟量(kg/s 或 kg/h)。

解 锅炉耗煤量:
$$B = \frac{Q}{\eta \times Q_{dw}} = 4. 276 \text{ kg/s} = 15\,394 \text{ kg/h}$$

由表 1. 4,煤炭燃烧每千克所产生的烟气的量 V_y = 7. 16 Nm³/kg

总排烟质量:
$$M_y = 4. 276 \text{ kg/s} \times (7. 16 \text{ Nm}^3/\text{kg} \times 1. 295 \text{ kg/Nm}^3) = 39. 65 \text{ kg/s}$$
$$= 142\,740 \text{ kg/h}$$

其中,烟气在标准状况下的密度为 1. 295 kg/Nm³。

由此可见,该锅炉每产生 1 t 蒸汽的排烟量约为 1 400 ~ 1 500 kg。对于更高的过剩空气系数和更低热值的燃料,则每产生 1 t 蒸汽的排烟量可达 1 600 ~ 1 800 kg。

例 6 在上述例题中,锅炉的热负荷及热效率不变,但锅炉的燃料由 II 类烟煤改为天然气,天然气的低发热值为 Q_{dw} = 35 000 kJ/Nm³,锅炉的天然气耗量为
$$B = \frac{Q}{\eta \times Q_{dw}} =$$

2. 3 Nm³/s,设过剩空气系数为 1. 1,试计算该锅炉的排烟量(kg/s 或 kg/h)。

解 由表 1. 6,每 Nm³ 天然气所产生的烟气的量为 V_y = 11. 18 Nm³/Nm³

总排烟量为
$$M_y = 2. 3 \text{ Nm}^3/\text{s} \times 11. 18 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 = 25. 714 \text{ Nm}^3/\text{s} = 33. 3 \text{ kg/s}$$

每小时排烟质量为 119 880 kg

由此可见,该锅炉每产生 1 t 蒸汽的排烟量约为 1 200 kg,当过剩空气系数较高时,每产生 1 t 蒸汽的排烟量可达 1 300 kg。

由以上两个例题可以看出,燃料的发热值越低,过剩空气系数越高,则排烟量就越多。总之,记住锅炉(燃烧设备)排气量的大致范围和确定方法,对余热回收的计算和设计是至关重要的。