

余热锅炉研究与设计

赵钦新 周屈兰 编著
谭厚章 惠世恩



 中国标准出版社

余热锅炉研究与设计

■ 赵钦新 周屈兰 谭厚章 惠世恩 编著

中国标准出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

余热锅炉研究与设计/赵钦新等编著. —北京:
中国标准出版社, 2010
ISBN 978-7-5066-5724-2

I. ①余… II. ①赵… III. ①余热锅炉-研究 IV.
①TK229.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 114201 号

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街 16 号
邮政编码:100045

网址 www.spc.net.cn
电话:68523946 68517548
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 33 字数 813 千字
2010 年 9 月第一版 2010 年 9 月第一次印刷

*

定价 68.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68533533

编委会名单



赵钦新	周屈兰	谭厚章	惠世恩
徐通模	王学斌	王宇峰	刘入维
董 陈	王云刚	周津炜	张建福
胡春云	王 尧	王 朝	张知翔

前言



目前,节能减排已经成为中国政府宏观调控的重点内容,“十一五”期间,为了实现单位 GDP 能耗比“十五”末期降低 20%,污染物排放降低 10%的约束性目标,全面贯彻落实《国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》,根据《节能中长期专项规划》,国家制定的《“十一五”十大重点节能工程实施意见》将“余热余压利用工程”列为重点节能工程之一。国家《促进产业结构调整暂行规定》、《产业结构调整指导目录》把余热发电列入产业结构调整政策鼓励类项目,明确此类项目按照国家有关投资管理规定进行备案,各金融机构应按照信贷原则提供信贷支持。因此,节能减排是我国经济和社会发展的一项长远战略方针,也是一项极为紧迫的任务。回收余热发电、提供动力和供应热能、降低能耗对我国实现节能减排、环保发展战略具有重要的现实意义。

余热锅炉是余热利用的重要组成部分和主要手段之一。如何解决余热锅炉设计中的关键技术,更好地满足工业过程生产工艺革新的需要,是当前我们热能工程和动力工作者面临的现实课题。虽然在国家节能减排政策的鼓励和推动下,余热锅炉在余热发电、提供动力、供应热能方面取得了前所未有的进步,但是因工业过程中的生产方法、生产工艺、生产设备以及原料、燃料条件千变万化,如热负荷不稳定,生产的周期性,热源波动剧烈,烟气中含尘量大、腐蚀性强,灰尘粘结、磨损和堵塞,受安装空间的限制等难题,这些难题过去很少被系统地研究过,给余热利用带来很多困难。以上就是本书写作的背景。编写本书的主要目的在于全面贯彻国家节能减排战略思想,为落实我国工业过程中的重大装备,特别是为能源、电力、钢铁、石化、冶金、建材等高耗能工业过程的节能减排任务提供重要的技术支撑;同时,在新的形势下总结国、内外余热锅炉技术的最新研究成果,满足从事余热锅炉技术设计人员的实际需要。本书在内容上以技术研究支撑工程设计,按照余热资

源特性核查与标定、余热发电系统优化、余热锅炉参数优化、余热锅炉本体结构设计、本体设计计算、计算机辅助设计及计算、余热锅炉外部工作特性研究与设计等环节进行全面系统地论述,力求做到按照系统的观点表现余热利用全过程的核心技术和关键技术,同时在余热锅炉结构设计和计算时注重关键参数的物理意义,即考虑数学计算的理论依据,又和具体工程应用的生产实际相结合,更为可取的是余热锅炉的相关设计计算均以工程实例给出,方便技术人员使用,从而使本书满足系统性、科学性、实用性的目标。本书具有较强的实用性和针对性,主要面向从事余热锅炉设计、生产和运行的工程技术人员,工业过程运行管理人员,还可供从事余热锅炉安全监察、环境保护、运行管理、热工测试、节能管理及相关专业的工程技术人员参考。

本书由西安交通大学能源与动力工程学院热能工程系赵钦新、周屈兰、谭厚章、惠世恩教授编著,博士研究生王学斌、王宇峰、刘入维、董陈、王云刚,硕士研究生周津炜、张建福、胡春云、王尧、王朝、韦耿、许伟刚、张知翔等编写了相关章节内容,全书由赵钦新统稿。

作者衷心感谢科技部“十一五”国家高技术研究发展计划(863计划)高效节能与分布式供能技术专题(2007AA05Z200)大型干法水泥线纯低温余热发电双压技术(2007AA05Z251)的项目经费资助;感谢中信重型机械公司、洛阳矿山机械工程设计研究院在863计划项目合作执行过程中提供的帮助;感谢青岛达能环保设备有限公司、长沙锅炉厂有限责任公司、无锡国联华光电站工程有限公司、黑龙江双锅锅炉股份有限公司、中核动力设备有限公司提供的研究、设计经费资助。

本书由西安交通大学能源与动力工程学院徐通模教授主审,编者对徐通模教授在审稿中所提出的宝贵意见表示衷心感谢。

限于作者水平,书中缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 著 者

2009年10月于西安

目 录



第一章 余热利用技术	1
第一节 概述	1
一、余热资源分类	1
二、余热利用方法	2
三、余热利用特点	5
四、余热利用技术发展战略	6
第二节 余热利用政策与法规	7
一、余热利用潜力	7
二、余热利用背景	9
三、国家政策与法规	11
第三节 余热利用现状和技术研究进展	13
一、余热利用现状	13
二、余热利用技术研究进展	15
三、余热利用技术应用进展	18
四、电站锅炉排烟余热利用技术	24
五、我国余热利用研究和技术存在的问题和建议	32
第四节 余热资源特性	34
一、余热资源特性核查	34
二、余热资源特性的标定	37
第二章 余热锅炉关键技术研究	55
第一节 余热发电技术	55
一、余热发电系统	55
二、余热发电系统及参数优化	58
三、纯低温余热锅炉参数确定及优化	63
第二节 余热锅炉研究路线	68
一、余热锅炉技术创新	68
二、余热锅炉关键技术研究	71
第三节 气固两相流的数值模拟	78
一、气固两相流简介	78



二、气固两相流动原理	79
三、气固两相流的数值模拟	82
四、数值模拟的工程应用及示例	87
第四节 余热锅炉试验研究平台	92
一、烟尘物理和化学特性研究平台	92
二、传热和阻力特性实验研究平台	107
三、积灰和清灰技术模化实验研究平台	120
四、磨损和积灰特性实体实验研究平台	123
五、低温腐蚀实验研究平台	129
第五节 新型余热发电技术	143
一、低沸点有机工质循环余热发电技术	143
二、其他余热发电技术	145
第三章 余热锅炉结构设计	148
第一节 余热锅炉整体结构	149
一、余热锅炉分类	149
二、余热锅炉结构设计原则	157
三、辐射冷却室结构设计	157
四、对流受热面结构设计	158
第二节 锅筒及其内部结构	160
一、锅筒及其支承方式	160
二、锅筒的外部装置	166
三、一次分离元件的结构和计算	169
四、二次分离元件的结构和计算	175
五、蒸汽的污染与净化	179
六、分段蒸发系统	181
七、锅筒内部辅助装置	184
第三节 余热锅炉补燃设计及结构	186
一、补燃条件及作用	186
二、余热锅炉补燃结构及装置	189
三、补燃对循环系统的影响	190
第四节 通流结构设计及优化	192
一、通流结构数值模拟优化	192
二、通流结构数值模拟实例	203
第五节 余热锅炉炉墙	207
一、炉墙作用	207
二、炉墙结构	208



三、炉墙材料	212
四、余热锅炉炉墙设计	225
第六节 余热锅炉构架	231
一、锅炉构架作用	231
二、锅炉构架结构	232
三、锅炉构架材料	239
四、余热锅炉构架设计	240
第四章 余热锅炉本体设计计算	242
第一节 热力计算	242
一、烟气的容积和焓	242
二、锅炉的热平衡	244
三、辐射冷却室换热计算	247
四、对流受热面计算	255
五、辐射放热系数的计算	271
六、受热面污染系数和热有效系数的计算	274
七、平均温压的计算	277
八、关于余热锅炉热力计算方法的若干建议	281
九、余热锅炉计算实例	283
第二节 余热锅炉烟道通风阻力的计算	304
一、余热锅炉烟道通风阻力的分类	304
二、摩擦阻力的计算	305
三、局部阻力的计算	308
四、烟气冲刷管束通风阻力的计算	317
五、烟道的自通风	320
六、设计修正	321
七、余热锅炉烟风阻力计算实例	321
第三节 水循环计算	328
一、水循环概述	328
二、流动阻力	332
三、自然循环	342
四、强制循环	354
五、循环可靠性检验	366
六、算例	380
第四节 受压元件强度计算	386
一、防脆断安全设计准则	386
二、强度计算理论基础	388
三、强度计算基本参数的选取	393



四、承受内压力的圆筒形元件的强度计算	401
五、带有拉撑件的平板强度计算	407
六、其他受压元件的强度计算	411
七、计算实例	412
第五节 具有相变换热的余热利用	414
一、烟气相变换热余热利用技术的产生与发展	415
二、烟气相变换热的原理	417
三、相变换热余热利用技术的应用	422
四、冷凝式锅炉的设计	425
五、冷凝式锅炉存在的问题及其发展前景	441
第五章 余热锅炉计算机辅助设计及计算软件	446
第一节 计算机辅助设计	446
一、辅助设计概念	446
二、计算机绘图	449
三、设计计算一体化	451
四、辅助设备实例	455
第二节 计算机辅助计算	456
一、计算机辅助计算概念	456
二、计算机辅助热力计算	457
三、计算机辅助阻力计算	462
四、计算机辅助水循环计算	465
五、计算机辅助强度计算	467
第六章 余热锅炉外部工作特性研究与设计	473
第一节 余热锅炉外部工作特性	473
一、积灰特性	473
二、磨损特性	476
三、腐蚀特性	477
四、外部工作特性设计	482
第二节 烟尘分离技术及设备	485
一、烟尘分离技术	485
二、烟尘分离设备	490
第三节 清灰除灰技术及设备	498
一、清灰技术及设备	498
二、除灰设备	502
参考文献	508

第一章 余热利用技术

第一节 概 述

“余热资源”又称“废热资源”，是指某种特定的设备或系统排出的可以热能形式回收的能量，属于“二次能源”。它广泛存在于工农业生产中，遍及冶金、石化、机械、玻璃、造纸等方面。据统计，工业生产中使用的各种炉窑，如加热炉、转炉、沸腾焙烧炉、回转窑等都耗用大量燃料，热效率却很低，一般只有 30% 左右，而高温烟气、高温炉渣等带走的热量却高达 40%~60%。其中冶金方面，可利用余热约占燃料消耗量的 1/3，机械、玻璃、造纸等方面占 15% 以上。目前，全国能源利用效率（截至 2008 年底）不到 32%，比先进国家约低 10 个百分点；若考虑开采、运输，我国能源系统总利用效率不到 12%，也就是说，能源可采储量变成终端用能的只有约 1/10，约 90% 的能源在转换过程和终端利用过程中损失（或浪费）掉。如果能有效利用这些余热，则可节约大量能源，减少大气污染，提高产量，降低成本，改善劳动条件，节省占地面积等等。可见，随着工业的发展，科学技术水平的不断提高，余热利用技术必将发挥越来越重要的作用，成为工业生产不可分割的重要组成部分。但是，我国目前的余热利用技术与世界先进水平的还有一定差距，所以在十一五“节能减排”的总体趋势下，大力开展余热回收工作对我国国民经济的发展具有重要意义。

一、余热资源分类

余热资源属于二次能源，它是一次能源与可燃物料转换过程后的产物。按温度的高低分为：高温余热（温度高于 650℃），中温余热（温度为 230℃~650℃）和低温余热（温度低于 230℃）三类。按照余热利用的方式，一般分成下列六大类：

（一）高温烟气余热

主要是指耗用燃料的工业炉窑，如各种加热炉窑、冶炼炉窑、砖瓦窑、水泥窑、玻璃窑等，以及燃气轮机、内燃机等排出的烟气余热，其温度高达 650℃~1 650℃，其烟气性质如表 1-1 所示。这类余热数量大，分布广，约占余热资源总量的 40%~50%，分布在电力、冶金、化工、机械、玻璃、造纸等多个行业。由于其产量大、产出点集中、连续性强，一般可以通过余热锅炉发电或提供生产生活用汽加以回收利用。例如，某窑炉每小时排出温度为 1 000℃ 的烟气 5 000 m³，当采用余热锅炉后，使排烟温度降为 273℃，则可回收余热约为 5.61×10^8 kJ/h，全年可节省标煤约 1 350 t。

（二）高温产品（包括中间产品）及炉渣余热

工业生产往往伴随高温加热过程，如金属冶炼、熔化、加工，煤的气化和炼焦，石油炼制，烧水泥、砖瓦、玻璃等等。其产品和炉渣具有相当高的温度，含有大量余热。例如：钢厂炼钢炉冶炼出的钢水和钢锭，通常钢锭温度可达 1 200℃~1 500℃；炼焦厂生产的焦炭，温度一般高于 1 000℃，约占结焦过程消耗热量 $(1.256 \sim 1.675) \times 10^8$ kJ/t 的 50%，相当于 (21.4~28.5) kgce；高炉、转炉、电炉等产生的炉渣，一般温度在 1 000℃ 以上，热值达

(1 260~1 680) kJ/kg。这些余热有的在生产中已部分回收,但大多数尚未利用起来,若可以将这些余热回收利用,其效益相当可观。

表 1-1 高温烟气性质

设备名称	烟温/℃	烟气情况
空气吹炼平炉	540~700	含尘、烟量波动
氧气吹炼平炉	700~1 150	含尘量较大,烟量波动
氧气顶吹平炉	1 650~1 930	含尘量大、烟量波动、间断
炼钢反射炉	1 090~1 370	含尘量较大、连续
炼锌烟化炉	980~1 090	含尘量大、烟量间断
锻造和钢坯加热炉	930~1 210	烟量间断
退火炉	590~1090	同上
玻璃烟窖	650~870	连续
水泥窑(干法)	600~800	含尘量大、连续
水泥窑(湿法)	42~590	连续
燃气轮机排气	420~540	连续
柴油机排气	530~650	连续

(三) 冷却介质余热

许多工业炉窖的壳体需要冷却装置,如水套、烟罩等,这些冷却装置排出的大量冷却水或产出的蒸汽都含有大量的余热,约占余热总量的 20% 左右。目前,这些余热仅部分得以利用,而大部分仍被排弃掉。

(四) 可燃废气、废液及废料余热

炼铁高炉、转炉产出的煤气,炼油及化工厂的可燃废气,造纸厂的废液,化肥厂的造气炉渣等都含有大量余热。这些余热数量大、分布广,若能被充分回收利用,则效益可观。

(五) 化学反应余热

化学反应余热主要存在于化工行业,如冶金、硫酸、硝酸、化肥、化纤、油漆等,是一种不用燃料而产生的热能,不超过余热总量的 10%。若能加以利用,不仅可以强化工艺生产,提高产量,而且可以降低生产成本。

(六) 废水、废汽余热

这是一种低品位余热资源,主要来自使用蒸汽和热水的工业部门,约占余热总量 10% 以上。例如,各种蒸汽动力机械设备的排汽,蒸汽冷凝水和锅炉排污水,化工厂、纺织厂中蒸发或浓缩过程中排放的废汽和废水等等。

二、余热利用方法

余热资源种类繁多,来源广泛,其利用方式必然多样化。余热利用原则——从用户角度考虑,以余热资源的数量和品位为依据,选用最佳的系统和设备,充分利用余热资源,满足技术经济性要求。根据这一原则,余热利用可分为:直接利用、间接利用和综合利用。



（一）直接利用

直接利用通常是指直接利用高温烟气余热或高温产品及炉渣余热预热进入工业炉窑的燃料、工件,或者用于预热空气、干燥、生产热水和蒸汽等方面,从而节省燃料。例如:可将高温烟气经高温换热部件对进入燃烧炉或反应炉的空气、燃料等进行预热,可提高燃烧效率,节省燃料;可直接将经过净化处理的烟气用于干燥待热的物料和坯件,如陶瓷厂泥坯、铸造厂的胡砂模型、木付厂的木料等;还可将中低温的乏汽直接用于加热冷水,产生 $70\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或更高温度的热水和水蒸汽,以满足不同用户的需求,如洗澡用水、取暖用汽等等。总之,余热直接利用方式可以避免因能量形式的转换引起不必要的损失。

图 1-1 是一种用于平炉炼钢的室式加热炉结构示意图,装料机将待熔炼炉料经炉门装入炉内,出钢时钢水温度达 $1\ 550\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1\ 650\text{ }^{\circ}\text{C}$,主炉拱温度达 $1\ 650\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1\ 680\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。要达到这么高的温度,必须对燃料和助燃空气进行预热,让其进入炉膛之前就达到 $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。所以,该加热炉将高温烟气通入两个间歇式预热器的格子砖中分别对燃料和空气进行加热。据估算,若用 $1\ 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烟气把空气加热到 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$,则可以节省 52% 的燃料。

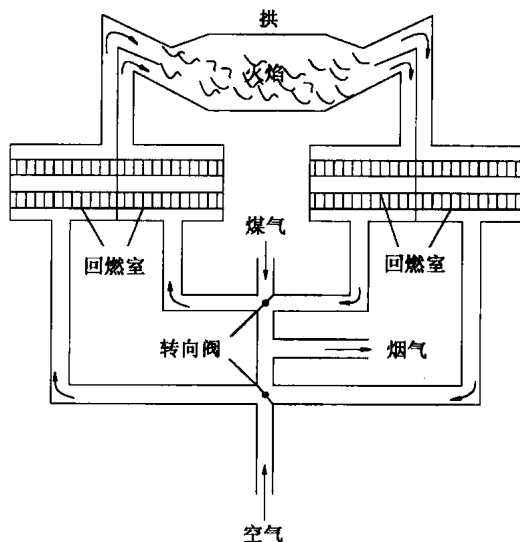


图 1-1 室式加热炉示意图

（二）间接利用

所谓间接利用是指把可回收的余热经余热锅炉产生高温蒸汽,再用蒸汽推动汽轮机发电或供热。也可用高温烟气推动燃气轮机组发电或用低温余热加热低沸点工质进行能量转换进行发电。其中,余热锅炉最为常见,且广泛应用于各个工业部门。其原因在于余热锅炉可以利用多种余热资源,包括高温烟气余热、高温产品余热、化学反应余热、可燃废气余热等,而且余热锅炉产生蒸汽便于运输,操作经验比较成熟。此外,对于许多不使用燃料、依靠炉料自身燃烧或纯氧助燃的工业炉窑,采用余热锅炉产生的蒸汽更能满足工艺流程的要求,例如,硫磺焙烧炉和硫铁矿沸腾焙烧炉焙烧后生成 SO_2 ,放出大量的热量,烟气温度高达 $850\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$,为了使 SO_2 气体转化成 SO_3 ,转化工序需要温度维持在 $350\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。如果采用余热锅炉,则可以很方便地达到转化工序所需要的温度。反之,若采用向烟气中喷水进行冷却的方法,则很难满足工艺流程的要求。

（三）综合利用

所谓综合利用即一种余热先后作两种以上用途的余热利用方式,这是最有效的余热利用的途径。根据余热品位高低,采取不同的利用方式,达到“热尽其用”。例如“燃气轮机与蒸汽轮机的联合循环发电”——先将具有较高压力的高温烟气通过燃气轮机发电,再将经燃气轮机做功后排出的仍有一定压力和温度的废气,送入余热锅炉产生蒸汽,然后将这些蒸汽通过汽轮机发电。汽轮机排出的乏汽,还可用于供热。这样,这些余热资源就得到了充分利用。

总之,余热利用的方法很多,表 1-2 综合了余热利用的多种途径。通常综合利用方式最好,其次是直接利用,第三是间接利用方式。

表 1-2 余热资源的利用途径

序号	余热种类	内容举例	约占总余热的比例/%	利用途径
1	高温烟气	1. 玻璃炉窖(650~1 450)℃ 2. 冶炼炉(700~1 200)℃ 3. 加热炉(700~1 000)℃ 4. 水泥窑~900℃ 5. 干法炼焦~700℃ 6. 其他工业炉~450℃	30~50	综合利用 { 直接利用 { 1. 预热燃烧空气 2. 预热燃料 3. 预热物料 4. 干燥 5. 退火 6. 海水淡化 间接利用 { 1. 产生蒸汽发电 2. 产生热水 3. 产生热空气

续表 1-2

序号	余热种类	内容举例	约占总余热的比例/%	利用途径
6	化学反应热	1. 化工厂 2. 化肥厂	5~9	综合利用 直接利用—工艺流程自用 间接利用 1. 产生蒸汽 2. 产生热水 3. 产生热空气

三、余热利用特点

由于余热资源种类繁多,来源广泛,生产方法、生产工艺、生产设备以及原料、燃料条件等变化不一,这就给余热利用带来很多困难,需要相适应的余热利用方法。为此,必须清楚了解余热资源的特点,我们才能够有效的利用各种余热资源。一般说来,余热利用有如下特点:

(一) 热负荷具有不稳定性

在工业领域内,由于生产方法、生产工艺等不同必然出现余热热负荷的不稳定性。例如:利用余热产生热水供应生活用水或供暖,虽然生产工艺产生的余热时连续稳定的,但是热用户的用热量却是变化的(一般白天少,夜间多),造成余热热负荷不稳定。另外,生产工艺和生产过程也存在不稳定性,有的要求周期性生产,有的则是间歇性生产,必然导致余热热负荷不稳定,如:炉渣的排放等。

(二) 烟气具有腐蚀性

许多工业炉窖排出的烟气中,常含有一些腐蚀性气体和物质,如:烟气中含有的二氧化硫、三氧化硫、硫化氢、氯气等腐蚀性气体,烟尘和炉渣中含有的碱金属硫化物、硫酸盐及其他金属或非金属元素(V、Cr 等),这些物质在一定温度条件下会对余热回收装置造成严重腐蚀,如:含有较多二氧化硫的烟气进入余热锅炉,一部分转化成三氧化硫,然后与水蒸气结合生成硫酸蒸汽。一旦锅炉受热面温度低于硫酸蒸汽的露点温度,就会在管壁凝结形成硫酸,造成严重的低温腐蚀现象;如果锅炉受热面壁温高于硫酸蒸汽的露点温度且烟气温度较高(一般高于 500℃)时,又会在过热器、再热器等部位发生高温腐蚀。

(三) 烟气含尘量大

余热锅炉及其他低温换热设备烟气中含灰量大(水泥窑 AQC 余热锅炉约为 30 g/m³,窑尾 SP 余热锅炉可达(80~100)g/m³),远大于一般规定的含尘量,导致烟尘的沉积,受热面严重灰污,致使其传热性能降低,风阻增大,直接影响余热锅炉工作的稳定性。同时,烟尘成分复杂,由多种化合物构成,物理、化学性质特异。尤其是炉烟温度高且含尘量较大,容易产生粘结、积灰等现象,对余热回收设备产生严重磨损、腐蚀、堵塞后果。

(四) 受安装场所固有条件限制

受安装场所固有条件限制,主要是就余热回收利用设备而言,如有的对前后工艺设备的联接有要求,有的却要求排烟温度保持在一定范围内等等。若要解决这些矛盾,有效利用余热资源,必须认真研究统筹解决。



四、余热利用技术发展战略

近年来,我国经济快速增长,各项建设取得巨大成就,但也付出了巨大的资源和环境代价,经济发展与资源环境的矛盾日趋尖锐,群众对环境污染问题反应强烈。为了解决这些矛盾,实现经济又好又快发展,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》提出了“十一五”期间单位国内生产总值能耗降低 20% 左右,主要污染物排放总量减少 10% 的约束性指标。坚持开发节约并重、节约优先,按照减量化、再利用、资源化的原则,在资源开采、生产消耗、废物产生、消费等环节,逐步建立全社会的资源循环利用体系。这是贯彻落实科学发展观、构建社会主义和谐社会战略思想的重大举措,也是加快建设资源节约型、环境友好型社会的迫切需要。而余热资源作为继煤、石油、天然气、水力之后的第五大常规能源,储量丰富且存在于各行业的生产过程中,特别是在钢铁、化工、建材、机械、轻工和食品等行业存在着量大面广的余热资源。因此,充分利用余热资源是实现节能减排的主要内容和手段之一。

自 20 世纪 40 年代开始,国外就开始了余热利用技术研究。经过多年的发展,高温余热利用技术已日趋成熟,其中以下几种应用广泛,具有代表性。

(一) 低热值煤气燃气轮机技术

低热值煤气燃气轮机技术实际是一种燃气-蒸汽联合循环发电技术。首先,将高炉煤气等低热值煤气和空气压缩到 $(1.5\sim 2.2)\text{MPa}$,经燃烧室燃烧,高温高压烟气直接通过燃气轮机膨胀做功并带动发电机发电。然后,燃气透平排出烟气(一般约 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$)经余热锅炉产出中压蒸汽带动蒸汽轮机发电,从而完成联合循环发电。该技术充分利用了钢铁企业高炉等副产煤气,最大可能地提高能源利用效率,使得热电转换效率从朗肯循环的 $30\%\sim 38\%$ 提高到 45% ,不仅提高了钢铁厂供电的可靠性,降低用电成本,对节能、环保、提高全厂经济效益等都起到良好的作用。

(二) 转炉负能炼钢技术

转炉负能炼钢是指冶炼过程中产生的炉气经净化处理后回收利用,回收的能量大于消耗的能量,实现转炉工序能耗负值化,集成了转炉烟气节能、环保综合利用的特点。通常,炼钢厂通过改造风机来降低电耗,通过改进炼钢技术来增加煤气和蒸汽回收量,从而降低氧气、电及其他能源介质的消耗量已实现负能炼钢。

(三) 热管余热回收技术

热管是在钢、铜、铝管内加入导热介质,并抽成一定的真空后密封而成,是一种依靠自身内部工质相变实现传热,具有很强导热性能的传热元件。热管具有极强热活性和热敏感性,遇热而吸,遇冷而放。热管工质在一定温度下被激活,并以分子震荡相变形式来传递热量,其导热系数是一般金属的 1 万倍左右,传导温度没有衰减并能以极快的速度传递(音速传递)。基于此,热管余热回收装置具有安全可靠、传热效率高、防腐蚀能力佳、安装及结构布置灵活、使用寿命长、投资回收期短等优点,并且广泛应用于工业企业。

(四) 余热锅炉技术

余热锅炉主要是将各种形式的余热转化为高、中、低压蒸汽供热或供电,从总体上提高能源利用率。余热锅炉主要分为火管式和水管式两大类:

1. 火管余热锅炉是烟气在管内流动,水在管外流动。水吸热蒸发产生饱和蒸气,经过



热器过热后送往用户。火管锅炉操作简便,对水质要求不高,炉外也不需砌砖,但工作压力不能太高,热效率低,钢材消耗量较大,在实际应用中受到很大限制。

2. 水管余热锅炉是水在管内流动,烟气在管外流动。根据水循环动力的不同,可分为自然循环和强制循环两种。自然循环水管式余热锅炉必须保证水循环的畅通,否则将危及锅炉安全运行。相对而言,强制循环水管式余热锅炉水循环较为稳定,锅炉效率较高,结构紧凑,但对水质要求高且投资费用大,运行复杂,常用于大烟气流量时。为保持效率,余热锅炉需定期清灰,保持烟道严密,防止吸入冷风。

总之,以上四种余热技术皆是高温余热利用技术范畴,但潜力巨大的中低温余热利用技术尚需进一步发展。为推进余热利用技术的进一步发展,必须清楚的认识余热利用技术推广过程中的问题和障碍,这主要体现在信息传播渠道及企业缺乏资金等方面。首先,高耗能企业缺少正确认识这些节能技术和利用清洁发展机制、合同能源管理等先进机制推进实现技术进步的机会;其次,国内外先进技术服务商也无法了解这些企业的情况。针对上述问题和障碍,提出如下建议:

(1) 大力开展余热资源调研、收集整体国内外先进的余热利用技术、先进的管理机制及案例等,促进交流与合作,加强中低温余热利用技术的研究,大量推广余热技术。

(2) 由于中低温余热利用技术具有难度较大、投资回收期较长、经济性不明显等特点,企业积极性不高,但中低温余热利用节能潜力巨大,建议政府在财政、税收等方面给予支持和优惠。

(3) 虽然中低温余热利用技术节能潜力巨大,但投资也大。目前,我国大多数节能服务公司为中小型企业,没有充裕的资金开展中低温余热利用项目。建议国家组建大型国有节能服务公司。

(4) 建议有余热利用潜力的企业和节能服务公司进行合同能源管理项目时,尽量做到将多种用能系统综合考虑,整体改进,并注重自动控制系统的精细化使用。

第二节 余热利用政策与法规

一、余热利用潜力

我国的可利用余热资源非常丰富,存在于各行业的生产过程中,特别是在冶金、建材、化工、机械、轻工和食品等行业存在着量大面广的余热资源,被认为是继煤、石油、天然气、水力之后的第五大常规能源,可利用的潜力巨大。据不完全统计,主要行业工业余热约占工业总能耗的 15%,从全国范围看,高耗能行业在余热方面的节能潜力超过 1 000 万 t 标准煤。从目前情况看,其中 80% 的余热潜力集中于钢铁、化工和建材三个行业,落实这些行业的余热利用项目意义重大。因此,充分利用余热资源是企业节能减排的主要内容和手段之一。

(一) 冶金工业

我国是钢铁生产大国,据统计,2008 年我国钢铁产量为 5 亿 t。自 1980 年以来国内钢铁企业吨钢可比能耗总下降率为 48%,其中直接节能 56%,间接节能 44%,但仍比国外先进产钢国高 112 kgce。

钢铁企业的余热种类及其温度状况见表 1-3。

总体看来,一座现代化钢铁企业所排放出来的能量,有 40% 存在于各种介质的高温气体中,15% 是低温蒸气和热水,还有 10% 为辐射损失。