

余热锅炉设计与运行

北京有色冶金设计研究总院 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 20 1/4 插页 1 字数 535 千字

1982年3月第一版 1982年3月第一次印刷

印数 00,001~4,700 册

统一书号: 15062·3772 定价2.50元

前 言

随着国民经济的日益增长,我国能源的生产和需求之间的差距越来越大。开源节流是解决能源供需矛盾的可靠办法。因此,要求我们在加强管理和革新落后生产工艺的同时,在更加经济、合理地用好一次能源的基础上,考虑如何更好地开发和利用二次能源的问题。我们知道,余热锅炉是利用二次能源的重要组成部分(高温烟气)的主要手段之一。因此,如何使余热锅炉的制造和运行更加完善,更好地满足工艺革新的需要,也是当前我们热力工作者面临的课题。

编写本书的目的,就是要把当前国内外余热锅炉设计和运行方面的一些技术资料 and 实践经验,汇编成册,以供广大的余热锅炉的设计和运行人员参考使用。在编写上,力求做到立足全局,勾划概貌,反映共性,突出重点。同时,为了力争全书达到系统性、科学性、实用性的要求,在内容上特意做了如下的安排:1.探索余热锅炉发展的历史和存在的问题以及解决的途径;2.讲述余热锅炉的结构组成和组件设计的要领和方法;3.汇编有关余热锅炉整体设计的计算资料以及技术质量标准;4.讲述余热锅炉运行和维修的实践知识;5.列举一些设计、运行成功的余热锅炉实例。

另外应该指出的是,鉴于余热锅炉的整体计算比较繁琐,为了有效地减少计算工作量,目前国内外有关余热锅炉的各种计算(主要是热力和水力计算)都在力求程序化,但本书因受时间和条件的限制,未能编制出相应的组件(block)化的程序来,这也只能有待日后陆续予以补充了。

本书是由广东省冶金设计院黄铃图编写第一章,北京有色冶金设计研究总院杨文奇编写第二、四、五章,沈阳铝镁设计研究院张统道编写第二章第四节,贵阳铝镁设计研究院黄瑞煊及昆明有

色冶金设计院柳肇民编写第三章的一部分，南昌有色冶金设计研究院刘沛华、曾继炎、何兴武编写第四章，长沙有色冶金设计研究院颜亨明编写附录。由杨文奇、何兴武、黄铃图和戴学文担任汇编工作。最后由郑州铝厂的戴声道和有色冶金设计研究院的胡道德对全书进行了校阅。

本书承蒙杭州锅炉厂、哈尔滨锅炉厂、西安交通大学、上海机械学院、白银有色金属公司、葫芦岛锌厂、钢铁设计院等单位的同志，对书稿进行审查并提供很多宝贵的意见，在此谨致衷心的感谢。

由于我们水平有限，调查研究不够，书中的缺点和错误在所难免，热忱欢迎广大读者批评指正。

编 者

1980年7月

目 录

第一章 余热锅炉的特点

第一节 概述.....	1
一、余热资源的分类和计算方法.....	1
二、余热利用的一般方法.....	5
三、余热利用的特点.....	7
四、余热锅炉的发展概况.....	8
第二节 积灰.....	17
一、积灰的分类.....	17
二、积灰的成分.....	18
三、积灰形成的机理.....	18
四、积灰的防止.....	24
五、积灰的清除.....	31
第三节 腐蚀.....	32
一、低温腐蚀.....	32
二、高温腐蚀.....	50
第四节 磨损及其他问题.....	54
一、余热锅炉的磨损.....	54
二、其他问题.....	59

第二章 余热锅炉的结构

第一节 炉型及受热面的结构.....	63
一、炉型及受热面的结构.....	63
二、受热面结构设计中应注意的几个问题.....	68
三、辐射冷却室的结构设计.....	74
四、对流受热面的结构设计.....	80

五、蒸汽过热器与过热炉.....	87
六、集箱、下降管、引出管及循环水泵.....	104
七、支吊架.....	109
八、防爆门、人孔及受热面的清灰.....	116
第二节 锅筒.....	119
一、锅筒及其支承方式.....	119
二、锅筒的外部装置.....	124
三、饱和蒸汽的污染.....	129
四、一次分离元件的计算和结构.....	133
五、二次分离元件的计算和结构.....	145
六、分段蒸发系统.....	153
七、汽水分离系统的选择和计算方法.....	161
八、汽水分离装置的计算实例.....	165
九、锅筒内部辅助装置.....	170
十、锅筒内部装置示例.....	182
第三节 余热锅炉的构架.....	187
一、余热锅炉构架的分类.....	189
二、构架的布置原则.....	192
三、框架式构架的布置.....	193
四、桁架式构架的布置.....	199
五、荷载的统计.....	202
六、荷载的分配.....	207
七、构架用的材料和许用应力.....	212
八、余热锅炉构架计算中几个问题的说明.....	217
九、梁和柱.....	219
第四节 余热锅炉的炉墙.....	228
一、炉墙材料的选择.....	229
二、炉墙的砌筑.....	238
三、露天布置的锅炉炉墙的防护.....	267

II

第三章 余热锅炉的辅助设备和配置

第一节 辅助设备	270
一、清灰设备	270
二、除灰设备	276
三、减温减压装置	286
四、蓄热器	296
第二节 余热锅炉的配置	318
一、露天、半露天及室内配置	318
二、余热锅炉与工业炉窑的联接烟道	320
三、余热锅炉与工业炉的配合方式	321
四、旁通烟道	321

第四章 余热锅炉的整体计算

第一节 热力计算	324
一、烟气的容积和焓	325
二、锅炉的热平衡	329
三、辐射冷却室换热计算	333
四、对流受热面计算	340
五、关于余热锅炉热力计算方法的若干建议	353
六、余热锅炉热力计算例题一	361
七、余热锅炉热力计算例题二	373
八、热力计算线算图	384
第二节 余热锅炉烟道通风阻力的计算	409
一、余热锅炉烟道通风阻力的分类	409
二、摩擦阻力的计算	410
三、局部阻力的计算	413
四、烟气横向冲刷管束通风阻力的计算	420
五、余热锅炉烟道通风阻力计算的程序及注意事项	424
六、线算图	427

第三节 水循环计算.....	445
一、自然循环与强制循环.....	445
二、两相流运动.....	448
三、工质在管内运动的阻力损失.....	452
四、循环的可靠性检查.....	463
五、吸热的不均匀性.....	480
六、自然循环的计算方法.....	482
七、强制循环的计算方法.....	496
八、计算简例.....	509
九、附图.....	525

第五章 余热锅炉的运行和维修

第一节 烘炉、煮炉及开炉、停炉.....	548
一、烘炉.....	548
二、煮炉.....	550
三、开炉.....	551
四、停炉.....	555
第二节 运行的监视与调整.....	558
一、余热锅炉运行中的注意事项.....	558
二、余热锅炉的正常运行.....	560
三、余热锅炉辅助设备的运行.....	562
第三节 事故的处理及预防.....	565
一、缺水事故.....	566
二、满水事故.....	567
三、锅水膨胀事故.....	568
四、水位计玻璃损坏事故.....	568
五、汽压过高事故.....	569
六、锅炉爆管事故.....	569
七、过热器爆管事故.....	570
八、炉内爆炸事故.....	571

九、炉墙损坏事故.....	571
十、锅内水击事故.....	572
十一、炉内严重结渣事故.....	572
十二、锅炉爆炸事故.....	573
十三、管道内水击事故.....	574
十四、余热锅炉房用电中断事故.....	574
十五、水泵风机的常见故障及消除方法.....	574
十六、强制循环余热锅炉循环水泵的故障.....	575
十七、控制烟门的故障.....	575
第四节 维护和检修.....	576
一、检修分类.....	577
二、检修前的准备工作.....	577
三、常用的几种检查方法.....	577
四、余热锅炉应着重检验的主要缺陷.....	579
五、余热锅炉检修的重点部位.....	580
六、水压试验.....	583

附 录

附录 I 余热锅炉的水质要求.....	585
一、我国工业锅炉给水和锅水的水质标准.....	585
二、我国电站锅炉水汽质量的控制标准.....	585
三、国外的一些有关锅炉的水质标准.....	590
附录 II 锅炉的常用标准.....	591
一、锅炉锅筒的制造技术条件.....	591
二、锅炉集箱的制造技术条件.....	599
三、锅炉管子的制造技术条件.....	603
四、锅炉水压试验的技术条件.....	614
五、锅炉胀接管孔的尺寸及偏差.....	617
六、锅炉管孔中心距的尺寸偏差.....	617
七、中、低压锅炉管子的弯曲半径.....	618

八、中、低压锅炉焊接管孔的开孔尺寸.....	618
九、锅炉受压元件的焊接技术条件.....	621
附录Ⅲ 附表.....	632
表Ⅲ-1 空气和平均成分烟气的物理特性.....	632
表Ⅲ-2 1米 ³ 空气和烟气以及1公斤灰的焓.....	633
表Ⅲ-3 燃烧每公斤煤炭产生的烟气量($V_{\text{烟}}$)	633
表Ⅲ-4 燃烧每公斤液体燃料产生的烟气量($V_{\text{烟}}$) ...	634
表Ⅲ-5 燃烧每立方米气体燃料产生的 烟气量($V_{\text{烟}}$)	634
表Ⅲ-6 炉渣比热的计算.....	635

第一章 余热锅炉的特点

第一节 概 述

在工业生产中，使用着各种炉窑，如加热炉、转炉、反射炉、沸腾焙烧炉、回转窑等。这些炉窑都耗用大量的燃料。它们的热效率都很低，一般只有30%左右，而被高温烟气、高温炉渣、高温产品等带走的热量却达40~60%。其中可利用的余热在冶金方面约占燃料消耗量的三分之一，机械、玻璃、造纸等方面占15%以上。随着工业的发展，科学技术水平的不断提高，余热利用在对改善劳动条件、节约能源、增加生产、提高产品质量、降低生产成本等方面起着越来越大的作用，有的已成为工业生产中不可分割的组成部分。自从六十年代以来，世界各国余热利用技术发展很快。但我国目前的技术现状与世界先进水平的差距还很大，大部分余热尚未充分利用，因此在当前能源供应日趋紧张的总趋势下，大力开展回收余热的工作已经日益提到议事日程上来。

一、余热资源的分类和计算方法

1. 余热资源的分类：

余热属于二次能源，它是一次能源和可燃物料转换过程后的产物，是燃料燃烧过程中所发出的热量在完成某一工艺过程后剩下的热量。一般分成下列七大类：

(1) 高温烟气余热 耗用燃料的工业炉窑及内燃机、燃气轮机等都有高温烟气排出，是最常见的一种余热形式。它的特点是产量大、产出点集中、连续性强、便于回收利用。由它带走的热量约占总热量的40~50%，有的甚至更多，其烟气性质如表1-1-1所示。这种余热一般可装设余热锅炉加以回收，有的可用来发电，有的可供生产或生活用汽。

表 1-1-1 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	700~1150	含尘量较大, 烟量波动
氧气顶吹转炉	1650~1930	含尘量大、烟量波动、间断
炼铜反射炉	1090~1370	含尘量较大, 连续
炼锌烟化炉	980~1090	含尘量大, 烟量间断
锻造和钢胚加热炉	930~1210	烟量间断
退火炉	590~1090	同 上
玻璃熔窑	650~870	连 续
水泥窑 (干法)	600~800	含尘量大, 连续
水泥窑 (湿法)	420~590	连 续
燃气轮机排气	420~540	连 续
柴油机排气	530~650	连 续

(2) 高温炉渣余热 在冶金炉的冶炼过程中, 往往产出大量的高温炉渣。如高炉、转炉、电炉、反射炉等有的造渣率高达70%, 炉渣温度在1000℃以上, 每公斤渣含热达300~400千卡。高温炉渣带走的热量可达总热量的20%左右。

(3) 高温产品余热 (包括中间产品) 如炼焦炉产出的焦炭、有色冶金浇铸的阳极板、化工厂黄铁矿沸腾焙烧炉产出的高温制酸烟气等, 一般温度都很高, 并含有大量的余热。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。

(4) 冷却介质余热 如各种工业炉窑的水套、烟罩、门架、拱脚梁等冷却装置排出的大量冷却水, 各种汽化冷却装置产出的蒸汽, 轧钢机的冷却水等, 都含有大量的余热。这些余热目前只有部分得到利用, 而大部分仍被排弃掉。

(5) 可燃废气余热 如炼铁高炉、炼钢顶吹转炉产出的煤气, 炼油及化工厂的可燃废气, 炼铅密闭鼓风炉、炼锌焦结炉产出的低热值煤气等, 这些可燃废气余热的特点是数量大、分布广, 因此充分利用起来是很有价值的。

(6) 化学反应及残炭的余热 在冶金、硫酸、硝酸、化肥、

化纤、油漆等工业部门的生产过程中有大量的化学反应余热，目前得到了利用的不仅强化了工艺生产，提高了产量，而且降低了成本。

(7) 冷凝水余热 各工业部门生产过程用汽，在工艺过程使用后冷凝成水时，所具有的大量物理显热。

2. 余热资源的计算办法：

在这里，我们着重讨论余热总资源的计算办法。

余热总资源系指生产设备排放的可能回收的余热的总和。各种炉窑的烟气余热已经采用余热锅炉、换热器来回收，或已用于其他工艺（例如干燥）生产的需要，即可作为已经回收的余热计算在内。

(1) 高温烟气余热量计算：

1) 外用燃料加热

$$Q_y = B \times V_y \times t_y \times C_y \times H / 7000$$

式中 Q_y ——烟气余热量，吨标准煤/年；

B ——平均燃料消耗量，吨（千标米³）/时；

V_y ——单位燃料燃烧产生烟气量，标米³/公斤（标米³）；

t_y ——烟气从炉窑排出平均温度℃；

C_y —— t_y 下的烟气平均比热，千卡/标米³·℃（按照烟气成分计算）；

H ——年作业小时，小时/年。

2) 自热冶炼

$$Q_y = V_y \times t_y \times C_y \times H / 7000$$

式中 V_y ——排出的烟气总量，千标米³/时；

t_y 、 C_y 、 H 同前。

(2) 高温炉渣余热量计算：

$$Q_z = G_z \times t_z \times C_z / 7000$$

式中 Q_z ——高温炉渣余热量，吨标准煤/年；

G_z ——炉渣年产量，吨/年；

t_z ——炉渣温度，℃；

C_z ——炉渣平均比热, 千卡/公斤·度。

(3) 高温产品 (包括中间产品) 余热量计算:

$$Q_c = G_c (t_c \times C_c + q_c) / 7000 = G_c \times i_c / 7000$$

式中 Q_c ——高温产品的余热量, 吨标准煤/年;

G_c ——产品年产量, 吨/年;

t_c ——高温产品温度, °C;

C_c ——高温产品平均比热, 千卡/公斤·度;

q_c ——液态产品熔化潜热, 千卡/公斤;

i_c ——产品的焓, 千卡/公斤。

(4) 冷却介质余热量计算:

1) 汽化冷却:

$$Q_q = D_q \times (i_q - i_s) \times H / 7000$$

式中 Q_q ——汽化冷却余热量, 吨标准煤/年;

D_q ——汽化冷却产汽量, 吨/时;

i_q 、 i_s ——分别为蒸汽及进水的焓, 千卡/公斤。

2) 水冷却:

$$Q_s = G_s \times (t_2 - t_1) \times C_s \times H / 7000$$

式中 Q_s ——冷却水的余热, 吨标准煤/年;

G_s ——冷却水流量, 吨/时;

t_1 、 t_2 ——冷却水进出口温度, °C。

(5) 可燃气体余热量计算:

$$Q_{rq} = (3018\text{CO}\% + 2466\text{H}_2\% + 8529\text{CH}_4\%) \times V_{rq} \times H / 7000$$

式中 Q_{rq} ——可燃气体余热量, 吨标准煤/年;

V_{rq} ——每小时可燃气体量, 千标米³/时;

CO、H₂、CH₄——可燃气体所含的CO、H₂、CH₄的容积百分数。

(6) 化学反应及残炭余热计算:

1) 化学反应余热计算:

如矿石中硫 (S) 参加化学反应, 产生反应热为 2217 大卡/公斤;

矿石中铁 (Fe) 参加化学反应, 产生反应热为1589 大卡/公斤。

2) 残炭余热计算:

$$Q_t = 8.1 \times G_z \times C / 7000$$

式中 Q_t —— 残炭余热量, 吨标准煤/年;

G_z —— 炉渣年产量, 吨/年;

C —— 残炭含量, 公斤/吨。

(7) 冷凝回水余热量计算:

$$Q_n = G_n \times (t_r - t_{ch}) \times 1000 / 7000$$

式中 Q_n —— 冷凝回水余热量, 吨标准煤/年;

G_n —— 冷凝回水量, 吨/年;

t_r —— 冷凝回水温度, °C;

t_{ch} —— 给水初温, °C。

二、余热利用的一般方法

1. 余热锅炉法 采用余热锅炉来回收余热的方法, 近二十多年来, 在各个工业部门中已得到广泛采用。它既可利用高温烟气余热、化学反应余热、可燃废气余热, 也可利用高温产品余热。如炼焦炉产出赤热焦炭的余热, 要想直接利用确实是会有一定的困难, 但如采用惰性气体进行干法熄焦, 惰性气体温度升高后再进入余热锅炉回收热量, 冷却后的惰性气体再送去熄焦, 这样往复循环即可顺利地将余热回收起来。余热锅炉可生产出高压、中压或低压的蒸汽。蒸汽有广泛的用途, 不但可以用来发电和供生产、生活用热, 有的还可用来强化生产。因此有的余热锅炉已成为生产中不可缺少的重要环节之一, 如在炼铜闪速炉熔炼技术中就是这样。

工业炉窑烟气的特性如表1-1-2所示。

2. 热水法 有的余热采用锅炉回收有一定的困难, 例如冷却水、高温炉渣等。但可利用这种余热将水加温到一定的温度, 如淬渣水温度就可达80°C以上, 经沉淀过滤后送往热用户即可使用。我国某些钢铁厂和有色金属工厂即采用此法解决了大面积建

表 1-1-2 工业炉窑烟气特性表

炉窑名称	产品单位	排出烟气特性		单位产品可能热利用量 q_1 , 大卡/单位产品	从单位产品中可能获得的标定蒸汽量 d_1 , 吨/单位产品
		温度 t_1 , °C	热损失, %		
炼钢平炉	吨金属	500~700	30~40	$(0.2\sim0.3) \times 10^6$	0.3~0.15
加热炉	—	1100~1200	55~60	$(0.1\sim0.25) \times 10^6$	0.15~0.40
持续加热炉	—	750~900	35~50	$(0.15\sim0.25) \times 10^6$	0.25~0.40
高炉	—	1100~1200	55~60	$(0.35\sim0.60) \times 10^6$	0.55~0.90
均热炉	—	600~900	30~50	$(0.10\sim0.25) \times 10^6$	0.15~0.40
炼焦炉 (机械焦)	吨焦炭	~1000	5~6	$(0.2\sim0.3) \times 10^6$	0.3~0.45
炼铜炉 (反射、精炼)	吨金属	1000~1200	50~60	$(0.3\sim0.5) \times 10^6$	0.50~0.80
混合煤气发生炉	10^3 标米 ³ 气体	400~700	15~20	$(0.15\sim0.30) \times 10^6$	0.25~0.45
四冲程瓦斯发动机	1 马力·小时	500~700	30~40	750~900	—
四冲程柴油机	1 马力·小时	370~400	25~35	200~250	—
水泥回转窑	吨水泥	550~600①	35~40	$(0.35\sim0.5) \times 10^6$	0.55~0.75
—	—	900~1000②		$(0.50\sim0.75) \times 10^6$	0.75~1.15
玻璃熔窑	吨玻璃	500~600	30~40	$(1.25\sim3.5) \times 10^6$	2.0~5.5③

①适用于湿法喂料；②适用于干法喂料；③对池、槽设备选用较小值，对炉、罐设备选用较大值。

筑物的采暖问题，从而节省了大量燃料。另外这种热水也可用来加热低沸点工质，如氯乙烷（沸点 12.29°C ）、氟利昂11（沸点 23.79°C ）、氟利昂113（沸点 47.59°C ）和正丁烷（沸点 -0.51°C ）等，此类工质经加热生成一定压力的蒸汽后可直接推动汽轮机进行发电，或用以直接拖动风机，水泵等动力机械。这种方法在利用低温地热资源方面，已在多处进行试验并取得了一定的成果。

3. 预热空气法 用余热来预热空气，在钢铁方面早已采用，如炼钢平炉的蓄热室、炼铁高炉的热风炉、铅锌密闭鼓风炉脱湿器等。为了进一步提高工业炉的热效率和强化生产，越来越迫切地需要预热空气。但应当注意到，余热热源的烟气工作条件往往是很恶劣的，因此利用它来预热空气时要特别慎重。

4. 烟气-流体换热器 利用烟气余热加热各种有机流体的换热器。化工合成、石油精炼等行业采用这类设备较多。

5. 余热、干燥物料 用余热来预热、干燥原材料、矿石等。

三、余热利用的特点

在工业领域内，由于使用的生产方法、生产工艺、生产设备以及原料、燃料条件的不同和工艺上千变万化的需要，从而给余热利用带来很多困难。要想解决这些困难，必须清楚了解它的特点。一般来说其特点如下：

1. 热负荷不稳定 不稳定是由工艺生产过程所决定的。例如有的生产是周期性的，有的高温产品和炉渣的排放是间断性的。有的工艺生产虽然连续稳定，但余热锅炉热源提供的热量也会随着生产的波动而波动。

2. 烟气中含尘量大 如氧气顶吹转炉烟气中的含尘量达 $80\sim 150$ 克/标米³、沸腾焙烧炉 $150\sim 350$ 克/标米³、闪速炉 $80\sim 130$ 克/标米³、烟化炉 $80\sim 160$ 克/标米³，含尘数量大大超过一般的锅炉。同时烟尘的物理、化学性质也特别恶劣，尤其是炉烟温度高含尘量大时，更容易粘结、积灰，从而对余热回收的设备有可能产生严重磨损和堵塞的后果。

3. 烟气有腐蚀性 烟气中有的含有如二氧化硫等腐蚀性气体，在烟尘或炉渣中含有各种金属和非金属元素，这些物质都有可能对余热回收设备造成低温腐蚀或高温腐蚀。

4. 受安装场所固有条件的限制 余热利用设备常受到安装场所固有条件的限制，如有的对前后工艺设备的联接有一定的要求，有的对排烟温度要求保持在一定的范围内等。这些问题与余热回收设备常发生一定的矛盾，必须认真研究统筹解决。

四、余热锅炉的发展概况

八十年前美国首先在铜反射炉后装设余热锅炉，开始做回收余热的尝试，五十年前在炼钢平炉后面开始装设余热锅炉。在这几十年中，世界各国对余热锅炉也不同程度地进行了一些研制工作，而进展却一直不快。其原因除了是对余热利用可能重视不够之外，但更主要的是没有掌握好它的规律。五十年代以后，余热利用才得到较快的发展。尤其六十年代闪速熔炼技术的出现，对余热锅炉的研制工作更起了促进的作用，使积灰、腐蚀、磨损等方面的问题都逐步得到了较好的解决。现仅以有色冶金余热锅炉为例，进一步说明余热锅炉的发展情况。它基本上可以分为初期、中期和成熟期三个阶段。

在初期阶段中，对有色冶金余热的特点和烟气、烟尘的特性等了解的很不够，错误地把余热锅炉等地当做一般锅炉来对待，以为把一般通用的锅炉装上去即可达到回收余热的目的了。在这样的情况下，各国先后设计了一些余热锅炉。图1-1-1是美国在1900年在安纳康达铜冶炼厂反射炉后装的斯达林型余热锅炉，图1-1-2是日本在1952年设计的第一台沸腾焙烧炉余热锅炉，图1-1-3是日本于1958年使用的铜反射炉余热锅炉。这些锅炉运行不久即被积灰堵死。如图1-1-2所示的余热锅炉经过两周的实际运行，通风损失从12毫米水柱增加到73毫米水柱。被迫停炉检查发现炉内通道几乎全部被烟尘堵死，且部分钢管有被严重磨损的痕迹。分析积灰的主要原因，是由于烟气进入第一通道时，首先和锅炉管成横向冲刷，在下部灰斗处亦成横向冲刷，在炉膛中间