

TK172

0245

180072

换热器设计、运行及CAD 系统

刘燕春 编著

冶金工业出版社

1998

内 容 提 要

本书针对换热器设计、生产、使用中的大量具体问题,作了系统阐述,具有很强的实用性。其内容包括余热回收设备合理设计概述、工业炉烟气的余热回收利用、余热回收设备的运行及其保证条件、间壁式换热器的热工分析计算、换热器的 CAD 系统。

本书可供高等院校相关专业师生及换热器的设计、生产和使用人员作参考。

图书在版编目(CIP)数据

换热器设计、运行及 CAD 系统/刘燕春编著. —北京:冶金工业出版社,1998. 2

ISBN 7-5021-2143-2

I. 换… II. 刘… III. 冶金炉-换热器-概论 IV. TF066. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 27196 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 张维真 封面设计 李心 责任校对 朱翔

北京顺义兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1998 年 2 月第 1 版,1998 年 2 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;8.875 印张;235 千字;273 页;1-1600 册

17.00 元

前 言

换热器是冶金、动力、化工等工业部门的重要设备之一。由于节能降耗和提高产品质量日益受到人们的重视,高效换热器逐渐为人们所青睐。

换热器的设计与运行二者不是各自孤立的,而是相互联系、相互制约的。同时,换热器与其相关设备之间也是相互联系、相互制约的。因此,在设计换热器时应当考虑到这些相互影响因素。另外,应当针对不同情况,选择不同类型的换热器,采用不同的计算公式,编程上机运算,并“一条龙”完成其 CAD 系统。还应当选择合适的,既经济又长寿的材质,这种材质应能防腐,能减少污垢。

由于多年来从事教学、科研与设计等工作,作者在上述方面积累了一定的经验,因此著成此书。

在多年的合作共事中,袁工阳和张良城工程师、纪国富和张西和老师,以及付志红同志给予了很多的帮助,作者的一些学生也做了很多工作,所以本书内容可以说是集体智慧的结晶。作者在此向上述同志表示感谢。

编者

1997 年 12 月

目 录

1 余热回收设备概述及工业炉烟气余热回收	(1)
1.1 余热回收设备合理设计概述	(1)
1.1.1 合理设计余热回收设备的重要性	(1)
1.1.2 余热回收设备的合理设计目标	(2)
1.1.3 余热回收设备设计过程概述	(3)
1.2 工业炉烟气的余热回收利用	(4)
1.2.1 工业炉烟气余热与工业炉烟气的可利用余热 ...	(4)
1.2.2 工业炉烟气的余热利用方式	(4)
1.2.3 工业炉余热利用的形式	(5)
1.2.4 利用余热进行空气预热的效果	(6)
1.2.5 关于预热段、喷流预热段、空气预热和余热 锅炉.....	(11)
1.2.6 预热空气的最佳温度.....	(19)
1.2.7 烟气余热利用现状.....	(27)
1.2.8 各企业常用换热器的型式、能力及节能水平 ...	(31)
1.2.9 余热回收率低的原因.....	(33)
1.2.10 换热器的主要技术经济指标	(34)
2 余热回收设备的运行及其保证条件.....	(37)
2.1 预热方法的选用.....	(37)
2.1.1 使用低热值煤气获得高炉高风温的方法.....	(37)
2.1.2 热风炉助燃空气与煤气预热方法的比较.....	(39)
2.1.3 热风炉助燃空气、煤气预热方法的选用	(58)
2.2 换热器的选型.....	(59)
2.2.1 换热器的选型步骤.....	(60)
2.2.2 对几个问题的说明.....	(60)

2.3	使换热器有效运行的基本措施	(61)
2.3.1	正确确定换热器设计计算用原始参数	(62)
2.3.2	明确换热器内外流体的流动条件	(63)
2.3.3	明确热工条件	(66)
2.3.4	注意换热器元件的热膨胀性	(77)
2.3.5	防止结垢阻塞和腐蚀	(78)
2.3.6	正确选用材料	(88)
2.3.7	正确安装换热器	(92)
2.3.8	掌握在运行中修复换热器的方法	(95)
2.3.9	在下排烟加热炉内正确使用换热器	(96)
2.3.10	掺冷风控制烟温	(98)
2.3.11	间歇性炉换热器的运行	(99)
3	间壁式换热器的传热分析计算	(100)
3.1	间壁式换热器的传热计算及热阻与污垢层的影响	(100)
3.1.1	换热器计算的基本公式	(100)
3.1.2	热阻及污垢的影响	(101)
3.2	间壁式换热器常用的传热计算方法	(105)
3.2.1	平均温差法及其计算步骤	(106)
3.2.2	传热单元数法(ϵ -NTU 法)及其计算步骤	(113)
3.2.3	Q - P 法及其计算步骤	(124)
3.3	间壁式换热器组合及其设计与校核计算	(125)
3.3.1	三种常见组合方式及其特点	(125)
3.3.2	间壁式换热器组合整体的设计和校核计算步骤	(129)
3.3.3	对数平均温差法在换热器组合整体的设计和校核计算中的应用	(129)
3.3.4	叉流间壁式换热器的组合计算	(130)
3.4	翅片管热水器设计计算示例	(135)
3.4.1	设计计算步骤	(135)

3.4.2	设计计算实例	(138)
4	换热器 CAD 系统	(147)
4.1	换热器辅助设计计算系统的运行	
	环境与开发思想	(147)
4.1.1	系统的运行环境	(147)
4.1.2	系统的开发思想	(147)
4.1.3	系统中数据图表的处理	(148)
4.1.4	系统的程序设计环境及原则	(149)
4.2	换热器辅助设计计算系统功能简介	(149)
4.2.1	系统开发的基本框架	(149)
4.2.2	系统功能简介	(149)
4.3	换热器辅助设计计算系统的开发	(151)
4.3.1	简介	(151)
4.3.2	金属管状换热器辅助设计计算系统的开发 ..	(151)
4.4	换热器辅助绘图系统的开发	(157)
4.4.1	系统的运行环境与开发思想	(157)
4.4.2	图形转换文件——DXF 类型图形交换	
	文件的构成	(158)
4.5	换热器 CAD 系统的运行	(177)
4.5.1	换热器 CAD 绘图方法简述	(177)
4.5.2	用计算机绘制换热器分解步骤图例	(179)
4.6	换热器 CAD 系统的有关程序举例	(179)
4.6.1	图表数据处理源程序 F2.C	(179)
4.6.2	金属管状换热器设计计算源	
	程序 SHEJI.C	(184)
4.6.3	生成 DXF 文件的接口程序 F3.C	(202)
4.6.4	绘制换热器图的 Auto LISP 应用	
	程序 H.lsp	(217)
4.7	插入件换热器的计算机辅助设计计算	(221)
4.7.1	几种常见的插入件	(221)

4.7.2	插入件换热器的设计计算	(221)
4.7.3	插入件换热器设计计算的计算机 框图及程序	(227)
4.8	换热器 CAD 系统向工业炉 CAD 系统 过渡简述	(253)
附录 1	常用金属材料的密度、比热容和热导率	(259)
附录 2	干空气的热物理性质	(261)
附录 3	大气压力下烟气的热物理性质	(262)
附录 4	烟气某些物理参数的修正	(263)
附录 5	局部阻力系数	(264)
参考文献		(272)

1 余热回收设备概述及工业炉烟气余热回收

生产和生活中需要利用能源和节约能源。在工业炉内的热交换过程中,一部分热量传给物料或工件,另一部分则以不同形式被损失掉。烟气余热即是损失的热,它约占供热量的三分之一^[1]。全国约有 480 座加热炉其总排放余热(以标准煤计)为 125 万 t。采用合适的余热回收设备(如各类换热器)回收这部分热量,是合理利用能源与节约能源的重要手段。

1.1 余热回收设备合理设计概述

随着生产规模的逐渐扩大和生产技术的不断现代化,余热回收设备的设计必须满足各种不同生产条件的要求。因此,对其进行合理设计是至关重要的。

1.1.1 合理设计余热回收设备的重要性^[1~3]

余热回收设备工作性能的优劣直接影响着整个装置的综合性能。如苏州钢铁厂小型轧钢加热炉利用热值为 $3780\text{kJ}/\text{m}^3$ 的高炉煤气作燃料时,只能将空气预热到 160°C ,其理论燃烧温度仅能达到 1430°C ,采用低压涡流式直焰烧嘴生产时,炉温仅有 1100°C ,钢温为 1050°C 。但按照全自回收原理,若利用性能较好的换热器,将空气预热至 650°C ,煤气预热到 350°C ,则其理论燃烧温度可由 1430°C 提高到 1789°C ,炉温可提高到 1341°C ,钢坯热耗由 3266 降到 $1424\text{kJ}/\text{kg}$,炉子的热效率可由 25% 提高到 56%,而烟温降到 200°C 以下。这种设计合理、性能优良的余热回收设备即是插入件换热器,它们在无锡市第二钢铁厂、南京钢铁厂三轧厂都显示出了良好的应用效果。但必须申明,虽然插入件换热器性能优越,但若设计不合理,其优越性也难以发挥。如将一台(组)性能优良的换热器安装在低温烟区,则烟道拐弯处气流不均匀等因素都会严重影

响换热器性能的发挥。再如,马鞍山钢铁公司(以下简称马钢)二铁厂4号高炉热风炉的烟气余热利用也是合理设计的范例,该热风炉烟气量在标准状态下约为 $35\text{km}^3/\text{h}$,平均烟温 320°C ,采用经合理设计的热管换热器后,排烟温度降为 135°C ,空气被预热至 191°C ,煤气被预热至 147°C ,热风炉拱顶温度达 1329°C ,高炉风温达 1166°C 。其设计的合理之处在于:

(1)在总体布置上,空气预热器与煤气预热器并联,这样,第一,两台预热器烟气进出口温度都较高,既合理利用了能源,又防止了露点腐蚀的出现;第二,总压降较小,动力消耗少;第三,操作较方便。

(2)热管采用顺排形式,管间距和翅片参数选择合理,使煤气预热器的压降控制在了一定的范围内,这样就使换热器既不受煤气管网压力波动的影响,又不降低热管的传热性能。

(3)采用了由柔性密封填料与密封剂组合的密封结构。

1.1.2 余热回收设备的合理设计目标

换热器的合理设计应满足如下要求^[4]:

(1)流体(煤气、空气)压降要小且符合系统的要求,这样既可减小动力消耗,又能保证一定的传热量和流体的出口温度。

(2)采用传热强度高、密集度大的传热面(插入件、热管等),以保证有较小的外形尺寸和重量。

(3)有一定的连续工作寿命,维修简单。

(4)安全可靠,考虑了热应力、防腐性能和强度等。

(5)尽量减少初投资,制造容易。

设计工作者不能为设计而设计,设计的目的是使余热回收设备在实际中好用,所以合理设计的目标应与运行目标保持一致,设计时应考虑如何在使用过程中使余热回收设备达到和保持设计目标。如有的厂虽然在加热炉上每吨钢配置了 $11\sim 26\text{m}^2$ 的管状换热器,设计目标合理,但余热回收率却不高,原因是通过换热器的烟气量不足,换热器结垢严重,换热器装在了低烟温区等。所以合理设计的重要任务之一是必须正确分析换热器的操作条件,使设

计数据更接近于实际操作数据。

1.1.3 余热回收设备设计过程概述

余热回收设备的设计,从收集原始资料数据开始,到绘图为止,一般应包括下列几方面的内容:

(1)明确设计任务,包括明确各种参数,如流体的流量、温度、压力、换热器大小尺寸、重量、形式等。

(2)进行总体布置,即确定所用换热器的结构型式、流体流动方式、所用材质,确定安装位置等。对于高温金属换热器来说,尤其要保证加热介质——热气体(烟气)沿平行管排均匀分布,保证积垢的清除与少积垢,并考虑温度膨胀。

(3)进行热工计算,根据已知条件求出换热器的传热系数,计算传热面积,确定换热器的结构参数,如管的直径、长度、根数等。

(4)进行流体阻力计算,以选择泵与风机,或核算其压降是否在规定的范围内等。

(5)进行强度计算,计算换热器各部件应力的大小。尤其要加强热应力的计算并采取相应的措施,以防换热面变形或某些部位破裂。当换热器预热介质温度较高时,其壁温也是较高的,此时换热器元件的热膨胀量较大。换热器的温度膨胀可归结为三类^[5],即1)换热器由冷态被加热到稳定工作的热态时体积的增大及冷却时体积的减小;2)换热器冷却和加热过程中各元件及部分局部尺寸的不均匀增加或缩小;3)换热器在其工作状态下各元件及局部尺寸的不均匀增大。由于换热器的温度不均匀膨胀相当大,因此所产生的应力足以对其强度造成损害。故在设计和安装换热器时应设法使进入换热器的烟气流横截面流速尽可能均匀,也就是使换热器离烟道弯头、闸板或其他突变截面要远些。这个道理很简单,但在实际应用中却又很容易被忽略^[1]。

(6)设计者还应参加设备的制造、安装调试及使用过程中的调查研究,这样才能算作是完成了一个完整的设计。

1.2 工业炉烟气的余热回收利用

余热是指热设备(如工业炉)或系统排出的热量中可以被回收利用的那部分热量。根据有关资料,全国工业余热的总量折合标准煤约为 3300 万 t,而可回收利用的余热资源约为 2000 万 t,其中钢铁工业可利用余热资源约 500 万 t,已回收的只为 100 万 t。可见余热回收大有可为。而那些确实不可回收利用的排热便是废热了。须知废热有时并不“废”,例如必须保持一定的排烟温度,以防腐蝕和保持排烟抽力。

工业炉的余热,就其存在的形态可分为两类:一类以固体或熔体的形态存在,如钢渣、铁渣、被加热的钢坯、窑中的热砖坯等的热量;另一类以气体形态存在,主要是各种火焰炉燃烧烟气的余热。前一类热从热平衡的角度上看,算作是有效利用的热。如果在被有效利用之后,这部分热再被回收利用,则将这部分被重复利用的热称作重热。而后一类从热平衡角度来看为损失的热量,其中可被回收利用的部分为余热。所以余热利用就要从利用重热和利用余热这两个方面着手。本书中仅涉及余热的回收利用。

1.2.1 工业炉烟气余热与工业炉烟气的可利用余热

工业炉烟气余热是指其炉膛排烟的物理热。

工业炉烟气可利用的余热是指由烟气温度降低到 250℃时所放出的物理热。

1.2.2 工业炉烟气的余热利用方式

在炉子的炉顶或烟道中安装换热器或余热锅炉是常用的回收工业炉烟气的两种方法。但是,利用上述两种方法回收同样数量的热量时,由于用换热器回收的热量直接被送入工业炉内,从而提高了燃料的理论燃烧温度,加强了炉气、炉壁与工件之间的辐射传热,因而采用换热器可以更多地节约入炉燃料量。通过预热空气或煤气而得到的燃料相对节约量由下式计算

$$\Delta B/B = q_k / (Q_{dw}^0 + q_k - q_y) \quad (1-1)$$

式中 $\Delta B/B$ ——燃料的相对节约量,其中 B 为不预热时炉子的

燃料消耗量, ΔB 为预热后燃料的节约量;

Q_{dw}^y ——燃料的应用基低发热量;

q_k ——单位燃料所需助燃空气达到预热温度时的物理热;

q_y ——单位燃料燃烧后由炉子排出烟气的物理热。

设有一烧重油的炉子, $Q_{dw}^y = 41870 \text{ kJ/kg}$, 烟气出炉温度为 $t_y = 1000^\circ\text{C}$, 若将助燃空气预热到 300°C , $B = 100 \text{ kg/h}$, 则求 $\Delta B/B$ 。

在一般情况下, 有单位烟气生成量(标准状态下) $V_n = 14.5 \text{ m}^3/\text{kg}$, 单位空气需要量 $L_n = 13 \text{ m}^3/\text{kg}$, 相应温度下烟气、空气的比定压热容分别为 $c_p^y = 1.55 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, $c_p^k = 1.32 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, 则

$$q_y = V_n t_y c_p^y = 14.5 \times 1000 \times 1.55 = 22475 (\text{kJ/kg})$$

$$q_k = L_n t_k c_p^k = 13 \times 300 \times 1.32 = 5148 (\text{kJ/kg})$$

代入式 1-3, 有

$$\Delta B/B = 5148 / (41870 + 5148 - 22475) = 20.9\%$$

这样, 空气被预热后, 重油的用量减少到

$$B - \Delta B = 100 - 20.9 = 79.1 (\text{kg/h})$$

而由此可以节约的能量为 $41870 \times 20.9 = 875083 (\text{kJ/h})$ 。并且所需空气量在标准状态下为 $13 \times 79.1 = 1028.3 (\text{m}^3/\text{h})$, 将空气预热到 300°C 时需 $1028.3 \times 300 \times 1.32 = 407207 (\text{kJ/h})$ 的热量, 这也就是预热空气时从烟气中回收的热量。

如果不是将所回收的余热直接送入工业炉内, 而是用余热锅炉产生蒸汽, 则所节约的热量为蒸汽所含热量的 1.33 倍。而且预热空气所节约的是炉用优质燃料, 而用余热锅炉产生蒸汽所节约的是锅炉用劣质燃料, 这就是首先考虑预热空(煤)气回收余热的原因, 也就是说, 首先要考虑将所回收的烟气余热用于炉窑本身。

1.2.3 工业炉余热利用的形式

根据余热的种类、能级和数量, 工业炉上可以装置各式各样的余热利用系统, 使用较广泛的 4 种如图 1-1 所示。其中图 a 是指在炉后装换热器, 利用烟气余热预热助燃空气(煤气), 这种形式主要

应用于各种钢材加热炉上。图 *b* 是指在空气预热器后再装余热锅炉，这种形式主要用在炼钢平炉及大型轧钢加热炉上。图 *c* 是指将工业炉所排出的烟气喷在入炉料坯上。图 *d* 是指利用高温炉的排烟直接作为低温炉的热源。另外，必须说明的是，炉后装预热器同时预热空气和煤气的炉子在逐渐增多；在低能级(200℃左右)的烟气中安装换热器产生 0.12~0.4MPa 的蒸汽也获得了成功^[9]。余热利用正在向纵深发展。

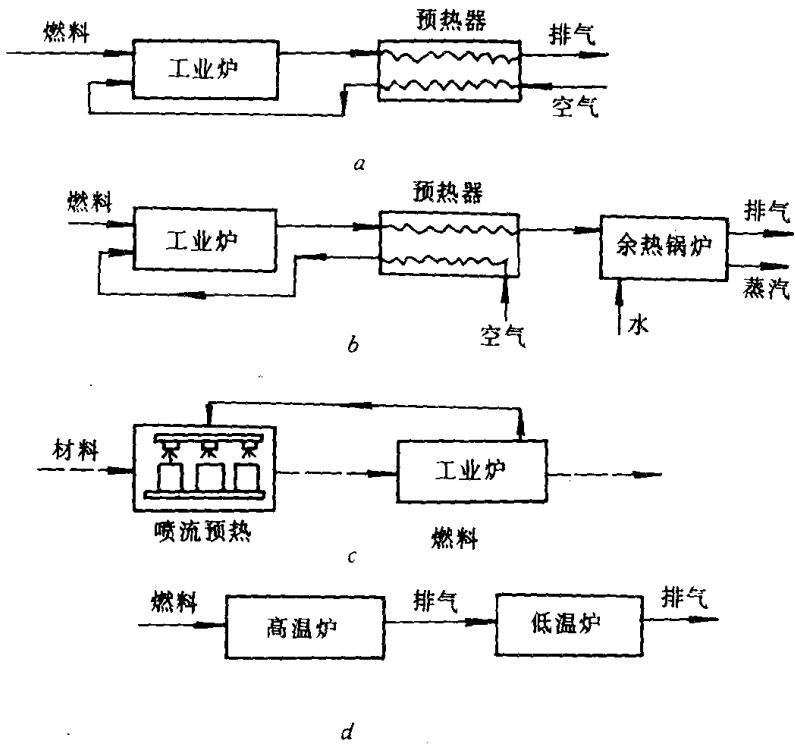


图 1-1 工业炉烟气余热的形式

1.2.4 利用余热进行空气预热的效果^[7,8,10]

在炉子所用燃料种类不变，炉子有效热和炉膛各项热损失不变的条件下，预热空气的燃料节约量可由式 1-1 计算得出。前面已介绍过，这种回收一次能源并将回收后的能源直接用于炉窑本身的做法，可以取得成倍节约燃料的效果。

1.2.4.1 节约燃料

几种燃料在不同出炉烟气温度 and 不同空气预热温度条件下的燃料节约率示于图 1-2 中。从图中可以看出燃料的节约率还与空气过剩系数有关。

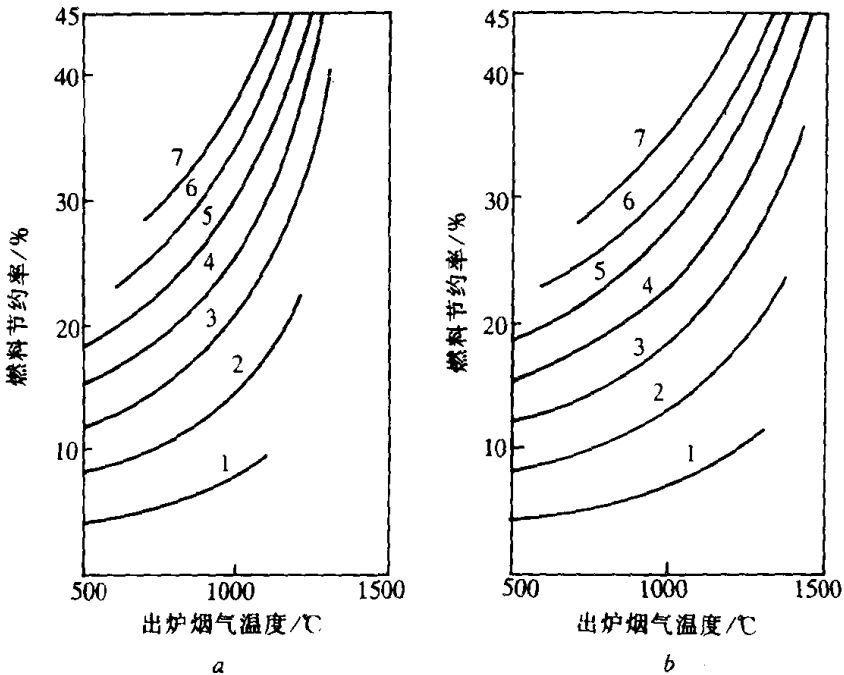
从图 1-2 中可以看出,预热空气的温度越高,燃料节约量就越大。

1.2.4.2 提高理论燃烧温度

为了使炉子在工作中实现高产低耗,必须保证有足够高的炉温。提高燃料燃烧的理论燃烧温度 t_1 (单位为 $^{\circ}\text{C}$) 对提高炉子的炉温 t_{lw} 有直接作用,

$$t_{lw} = \eta_{lw} t_1 \quad (1-2)$$

式中 η_{lw} ——炉温系数,它与炉子结构型式有关。它还随炉子单产与炉膛热损失的增加而降低,随炉内热交换的改善和燃烧的加速而提高。不同类型加热炉的炉温系数见表 1-1。



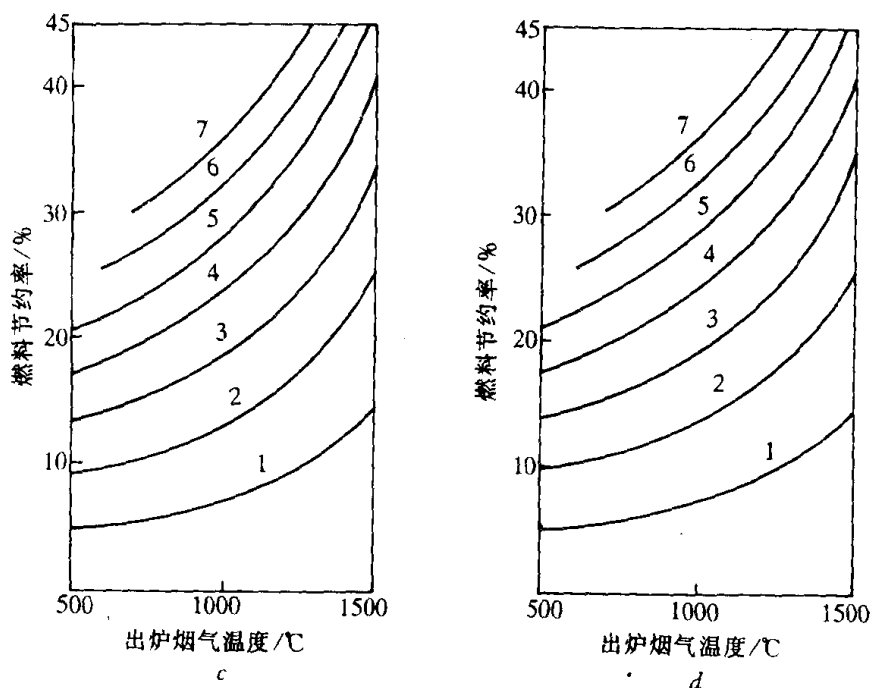


图 1-2 几种燃料在空气预热后的燃料节约率(标准状态下)

a— $Q_{hw}=5024\text{kJ/m}^3$, 高炉、焦炉混合煤气($\alpha=1.05$);

b— $Q_{hw}=8374\text{kJ/m}^3$, 高炉、焦炉混合煤气($\alpha=1.1$);

c— $Q_{hw}=35295\text{kJ/m}^3$, 天然气($\alpha=1.1$);

d— $Q_{hw}=40892\text{kJ/kg}$, 重油($\alpha=1.15$)

1—空气预热 100°C; 2—空气预热 200°C; 3—空气预热 300°C;

4—空气预热 400°C; 5—空气预热 500°C; 6—空气预热 600°C;

7—空气预热 700°C

表 1-1 炉温系数 η_w 的经验值

炉 型	η_w
连续式加热炉	0.70~0.80
室式加热炉	0.75~0.85
车底式加热炉	0.70~0.75
开隙式加热炉	0.65~0.70

根据经验和计算结果,为保证在中等单产条件下获得先进的能耗指标,要求煤气的理论燃烧温度要达到 1800°C 左右,这时加

热炉的炉温 t_{lw} 为

$$t_{lw} = \eta_{lw} t_l = 0.75 \times 1800 = 1350(^{\circ}\text{C})$$

为此,在不预热空气时, Q_{dw} 在标准状态下不低于 $10467\text{kJ}/\text{m}^3$ 才能获得该温度,而对于纯高炉煤气来说,这一温度是无法达到的。所以,只有对空气和纯高炉煤气同时进行预热且预热温度总和应达到 1000°C ,这一温度才能获得,且这样才能使低热值的纯高炉煤气有效地用于高温加热炉,指标达到或接近高热值燃料的工作指标,如图 1-3 所示。

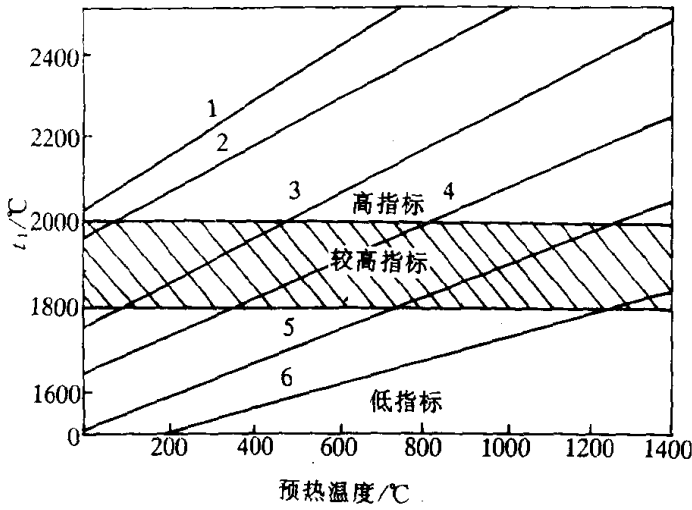


图 1-3 燃料的预热对 t_l 和炉子工作指标的影响

1—重油;2—焦炉煤气;3—混合煤气;
4—发生炉煤气;5—高炉煤气 1;6—高炉煤气 2

由此可见,当空气和煤气被预热到足够高的温度时,由于理论燃烧温度的提高,炉温达到了 $1300\sim 1350^{\circ}\text{C}$,从而满足了工艺要求。

由上面的讨论可知,空气预热温度越高,节约的燃料就越多。但是当空气预热到接近于烟温时,预热器的平均温差和传热系数下降,这样就使其传热面积和初投资增加。图 1-4 反映了燃油时空气预热温度与传热面积的关系。

由图可见,当排烟温度为 800°C 时,空气预热温度从 300°C 提

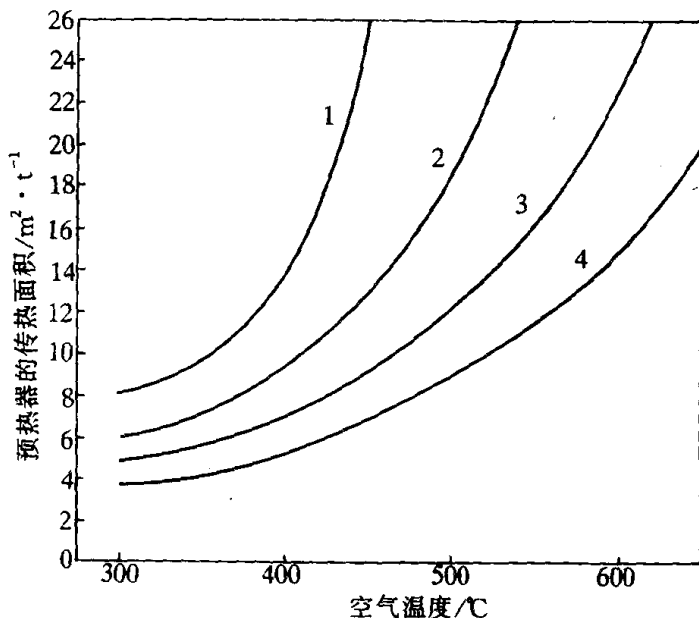


图 1-4 不同烟温和预热温度下预热器的传热面积

1—预热器入口烟温 600℃；2—预热器入口烟温 700℃；
3—预热器入口烟温 800℃；4—预热器入口烟温 900℃

高到 600℃，单位质量钢的传热面积由 4.7m²/t 增加到 22m²/t。尽管此时余热回收率和节能效果可增加一倍，但预热器的造价也增加了数倍。

1.2.4.3 改善燃烧，提高加热质量

推钢式连续加热炉烧粘度较大的重油时，若把助燃空气预热到 400℃，则燃烧室的实际温度可以从 1450℃ 提高到 1600℃，这样可以把重油燃烧的时间从 0.88s 减少到 0.76s，从而减少了化学的和机械的不完全燃烧，增加了炉内的辐射热交换量，提高了炉子的产量，减少了被加热工件的烧损。我国中小型燃油加热炉多数采用冷空气助燃，若把空气预热到 300℃（送到烧嘴前时约为 250℃），并采用热风烧嘴，则实际炉温要比用冷风时的高出 150℃，见表 1-2。