

269

# 工业炉用 热交换装置

冶金工业出版社

# 工业炉用热交换装置

卿定彬 编著

何用梅 审校

冶金工业出版社

## 内 容 提 要

本书是一本系统介绍炉用热交换装置热工原理、实际效用、结构特点、使用经验、性能数据和计算(举例)的实用参考书。其中包括各种换热器,如平滑管、翅片管、针片管、整体式对流换热器,缝式、管式辐射换热器,组合换热器,四孔砖、八方管砖、高铝(刚玉)管、“西塔尔”管、耐火混凝土管、碳化硅管换热器,改进的炉用蓄热室系统,高效蓄热器以及喷流换热器、自身换热式烧嘴、耐高压陶质换热器、热管式换热器的新结构和新技术。书末举例阐述了热交换装置的各种经济效益的计算方法。全书采用公制和国际单位制两种计算单位。

本书可供冶金、机械等工业部门中涉及热能与热工工作的科研、设计、施工和生产人员使用。亦可供有关大专院校师生参考。

### 工业炉用热交换装置

卿定彬 编著

何用梅 审校

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39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 15 3/4 字数418千字  
1986年 1 月第一版 1986年 1 月第一次印刷

印数00,001~8,350册

统一书号: 15062·4244 定价3.85元

## 序

近一二十年，国际燃料价格涨了三倍。特别是1973年石油冲击以来，能源费用在制造成本中占的比率迅速增大<sup>[1]</sup>。日本预测1985年石油供应能力将达到极限<sup>[2]</sup>，能源紧张的状况往后更会愈演愈烈。加之，环境保护标准逐步提高，公害赔款同SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>排放量成正比，要求在降低排放浓度的同时，减少烟气总排放量。因此，从燃料价格和环保要求两方面出发，世界各国竞相采取措施，使燃料消耗指标一降再降，这显示出节约能源方面有不小的潜力。

我国目前存在一种极不正常的状况：一方面，能源不足，影响了30~40%的开工率；另一方面，能源浪费严重。我国能源的利用率仅为28%，不及日本的一半（日本达57%），比西欧的40%也低得多。若能将我国的能源利用率从现在的28%提高到国外中等水平的40%，则节约的能源相当于1亿吨标准燃料<sup>[3]</sup>。可见我国节能潜力之大！

我国能源的一大用户，是工业炉。它所耗用的能源，约占全国总能耗的1/5。钢铁厂一座加热炉的耗热量达到 $(100\sim 200)\times 10^6$ 千卡/时。加热炉（均热炉）的能耗占轧钢厂总能耗的80%左右。机械工业的炉子虽小，但数量甚大。仅机械工业部系统就有工业炉5万余座，其中锻造加热炉约1万座<sup>[3]</sup>。机械工厂工业炉的能耗占全厂总能耗的1/2左右，重型机器制造厂则占70~80%。

正是我国工业炉这个能源的大用户，在能源利用上存在着惊人的浪费。锻造加热炉平均单耗达0.7公斤标准燃料/公斤锻件，热效率仅有2~5%（日、苏、英等国锻造加热炉装有换热器时的单耗为0.15公斤标准燃料/公斤锻件，热效率为20%）<sup>[3]</sup>。连续加热炉的热效率平均在30%以下（日本平均热效率为50%左右，省能炉已达56%以上），而且各厂炉子相差悬殊，最好的达49%，

最差的仅8%。

由此可见，工业炉节约热能，降低燃料消耗，是一项迫切和带有长远政策性的任务。

烧燃料的工业炉，排出烟气带走了供入炉内热量的大部分（达60~70%）。这项热损失是炉子热支出中最大（比任何其它热支出都大得多）的一项，回收利用这部分热量是降低炉子燃料消耗最为有效的手段。

利用烟气余热的途径有：预热钢料、预热助燃空气（和煤气）以及产生热水或蒸汽。

直接用烟气预热钢料（包括延长炉子预热段和抽出烟气作喷流预热两种方式），热回收效率甚高。但延长炉膛，造价增高，且平面布置上有时受限制；喷流预热钢料，不可避免地带来控制和操作上的复杂化，且此项新技术的技术经济合理性尚待实践的进一步检验。同时，预热钢料也要配上空气（煤气）预热。

装设余热锅炉回收烟气余热，热利用率虽高，但无助于加热炉本身热效率和燃烧温度的提高。国内前一时期，热交换装置越来越少，而汽化冷却和余热锅炉却得到了推广。这种情况，偏离了烟气余热应首先回收炉内，以节省炉用高质燃料，其次才用于产生蒸汽的正确方向。

比较起来，只有设热交换装置利用烟气余热来预热空气（煤气），才是工业炉最主要的行之有效的节能措施。

普通换热器将空气预热至300~400℃，可节约燃料15~25%，高温换热器可节约燃料40%以上<sup>[4]</sup>。某重型机器厂一年从加热炉烟气中回收的热量，即相当于15000吨标准煤<sup>[5]</sup>。烧低热值燃料的加热炉，将空气和煤气预热至300℃，可将升温速度提高1~2倍，将炉子产量提高20~30%。对燃油炉子来说，预热空气有助于燃油雾化质量的改善。热交换装置后面再装余热锅炉，燃料热量的利用率可达80~90%，这算是利用得很彻底了。高温预热空气（和煤气）使冶金工厂大量贫煤气（高炉煤气）资源在加热炉上的利用成为可能，也是敞焰无氧化加热所必不可少的手段。

近几年来，世界各国特别重视和大力发展各种类型的热交换装置（金属、陶质、对流、辐射换热器以及蓄热器等），作了大量的试验研究、设计、制造和推广工作，在技术、材料、结构上不断有新的突破，研制出新的高效热交换装置，实行定型设计、专厂制造和免税优惠等一系列办法，在工业炉节能上取得了越来越高的效果。

对比之下，我国中小型工业炉在热交换装置的采用上几乎是一片空白；大型加热炉（均热炉）几十年来一直使用陶质换热器，虽然积累了一定的经验，但漏风和笨大两问题长期没有得到研究和解决；金属换热器，有的厂坚持使用，取得一定效果，但普遍因缺乏维护、多年失修而停用；有关热交换装置研究发展的系统工作，多年来濒于停顿，至今未开展起来。

有些问题只要加以重视和进行相应的工作，是不难解决的。均热炉陶质换热器漏风问题，近年来有的单位通过工业试验，取得一些进展。我国精工铸造的水平较高，足可保证热交换装置元件的大量生产要求。建立热交换装置的专门制造厂，进行定型化系列化的生产，便能为热交换装置提供质高价廉的成套设备和备用元件，使热交换装置得到及时、良好的维修。另外，传播有关热交换装置效益、正确选型、计算、设计、制造、使用和维修等方面的理论和经验，推行能耗指标的考核和有关奖励制度，促进热交换装置的推广和采用是目前亟待进行的普及工作。

为了改变多年造成的上述落后状况，尚需进行一系列的提高工作。深入系统地研究世界热交换装置的发展和最新动向，结合我国情况开展自己的试验研究工作。研制长期可靠运行、无需经常维护的大型高温高压高效热交换装置，是轧机炉子能力不断增大和节能要求日益严格情况下的必然趋势。应重新评价陶质热交换装置，进行研究以求得新的突破。对特种热交换装置以及热管、热泵的应用应进行探讨和比较。应研究廉价的超耐热金属以及新的热输送、热贮存技术等。预热空气（煤气）时火焰温度升高，致使 $\text{NO}_x$ 生成量增加，这个热交换装置发展中出现的新问

题，需加以综合研究解决。

为推进上述普及和提高工作提供一册有关热交换装置<sup>①</sup>的实用参考书，乃是撰写本书的目标。

当然，作者受水平和条件的限制，不一定能完满地达到上述目标。资料搜集不全、论述不当和错误之处，欢迎指正。

本书的许多资料、数据，来源于大量的书刊文献。谨在此对这些书刊文献的作、译者表示谢忱！

---

① 鉴于高炉、平炉等的热交换装置较为定型和稳定，条件复杂、型式多样，亟待进行普及和提高工作的，主要是加热炉、热处理炉的热交换装置，故本书介绍的内容侧重于后者。本书所用“热交换装置”一词，系“工业炉用热交换装置和蓄热装置”的总称。

# 目 录

序 .....	V
第一章 空气预热的热工基础 .....	1
§ 1. 物理热的比价 .....	1
§ 2. 燃料节约 .....	4
§ 3. 空气预热对燃烧温度和炉子产量的影响 .....	10
§ 4. 空气预热对燃烧过程的影响 .....	13
§ 5. 热回收的程度 .....	15
第二章 空气预热的实际效用 .....	17
§ 1. 节约燃料、提高产量和减轻污染 .....	17
§ 2. 同它种余热回收新方法的配合和比较 .....	19
§ 3. 加热炉使用超低热值煤气的可能性 .....	21
§ 4. 敞焰无氧化加热的关键 .....	22
第三章 热交换装置总论 .....	44
§ 1. 热交换装置发展史 .....	44
§ 2. 两类换热器比较 .....	48
§ 3. 热交换装置选型 .....	49
第四章 换热器计算原理 .....	54
§ 1. 换热器传热计算 .....	54
§ 2. 换热器流动阻力计算 .....	74
第五章 金属换热器概论 .....	79
§ 1. 各种金属换热器的比较 .....	79
§ 2. 辐射换热器的特点 .....	83
§ 3. 金属换热器传热表面的结构 .....	85
§ 4. 金属换热器用的材料 .....	88
第六章 平滑钢管对流换热器 .....	92
§ 1. 基本结构 .....	92
§ 2. 实际数据 .....	103
§ 3. 计算举例 .....	108
第七章 凸翅管对流换热器 .....	118



§ 1. 基本结构 .....	118
§ 2. 针片管换热器的气密性 .....	127
§ 3. 针片管换热器的测试和计算数据 .....	129
§ 4. 针片管换热器的生产操作数据 .....	135
§ 5. 针片管换热器计算 .....	136
§ 6. 对针片管换热器安装工作的要求 .....	142
<b>第八章 整体式对流换热器 .....</b>	<b>144</b>
§ 1. 基本结构 .....	144
§ 2. 测试数据 .....	146
§ 3. 生产操作数据 .....	150
§ 4. 计算举例 .....	151
<b>第九章 缝式辐射换热器 .....</b>	<b>160</b>
§ 1. 基本结构 .....	160
§ 2. 测试数据 .....	173
§ 3. 计算数据 .....	181
§ 4. 计算举例 .....	187
<b>第十章 管式辐射换热器 .....</b>	<b>195</b>
§ 1. 基本结构 .....	195
§ 2. 测试数据 .....	201
§ 3. 计算举例 .....	204
<b>第十一章 组合换热器 .....</b>	<b>212</b>
§ 1. 辐射一对流组合换热器结构 .....	213
§ 2. 对流组合换热器结构 .....	216
§ 3. 组合换热器计算 .....	220
<b>第十二章 其它种型式的金属换热器 .....</b>	<b>221</b>
§ 1. 喷流换热器 .....	221
§ 2. 自身换热式烧嘴 .....	231
§ 3. 高效率低噪音的辐射管用换热器 .....	239
§ 4. 嵌入炉体内的换热器 .....	242
<b>第十三章 预热煤气的换热器 .....</b>	<b>246</b>
<b>第十四章 保证金属换热器有效操作的措施 .....</b>	<b>248</b>
§ 1. 缩小计算条件同实际的出入 .....	248

§ 2. 有效操作的保证措施 .....	277
§ 3. 安全操作的保护措施 .....	315
<b>第十五章 陶质热交换装置概论 .....</b>	<b>319</b>
§ 1. 简况 .....	319
§ 2. 陶质换热器的结构特点 .....	320
§ 3. 陶质换热器的气密性 .....	321
§ 4. 陶质换热器用的材料 .....	327
<b>第十六章 四孔砖换热器 .....</b>	<b>332</b>
§ 1. 各种耐火粘土质换热器结构 .....	332
§ 2. 四孔砖换热器的操作情况 .....	334
§ 3. 四孔砖换热器的应用 .....	338
§ 4. 加设喷射器的四孔砖换热器 .....	341
<b>第十七章 八方管砖换热器 .....</b>	<b>344</b>
§ 1. 换热器结构 .....	344
§ 2. 气密性 .....	346
§ 3. 换热器安装 .....	348
§ 4. 换热器在均热炉上的应用 .....	351
§ 5. 换热器在连续加热炉上的应用 .....	355
§ 6. 换热器在再循环炼钢炉上的应用 .....	357
<b>第十八章 高铝(刚玉)管换热器 .....</b>	<b>361</b>
<b>第十九章 “西塔尔”管换热器 .....</b>	<b>365</b>
<b>第二十章 耐火混凝土管换热器 .....</b>	<b>367</b>
<b>第二十一章 碳化硅管换热器 .....</b>	<b>369</b>
§ 1. 概述 .....	369
§ 2. 在连续加热炉上的应用 .....	371
§ 3. 在均热炉和炼钢炉上的应用 .....	374
§ 4. 在室式敞焰无氧化加热炉上的应用 .....	376
§ 5. BSC型陶质换热器 .....	377
<b>第二十二章 几种新型换热器 .....</b>	<b>380</b>
§ 1. CERHX型陶质换热器 .....	380
§ 2. 中介介质型换热器 .....	381
传热变换装置 .....	381

§ 4. 热管式换热器 .....	382
<b>第二十三章 蓄热室 .....</b>	<b>384</b>
§ 1. 概述 .....	384
§ 2. 喷射排烟的蓄热式均热炉 .....	385
§ 3. 炉气循环的蓄热式均热炉 .....	386
<b>第二十四章 高效蓄热器 .....</b>	<b>397</b>
§ 1. 结构要点 .....	397
§ 2. 回转式陶质蓄热器 .....	399
§ 3. 回转式珠垒蓄热器 .....	400
§ 4. 回转式金属蓄热器 .....	401
<b>第二十五章 陶质换热器计算问题 .....</b>	<b>403</b>
§ 1. 陶质换热器传热计算 .....	403
§ 2. 碳化硅粘土管砖换热器烟气侧的热交换特点 .....	422
§ 3. 陶质换热器气密性对其热工性能的影响 .....	432
§ 4. 陶质换热器流动阻力计算 .....	440
<b>第二十六章 陶质换热器计算举例 .....</b>	<b>445</b>
§ 1. 计算方法 .....	445
§ 2. 均热炉碳化硅粘土八方管砖换热器计算 .....	447
§ 3. 炼钢炉换热器计算 .....	456
§ 4. 连续加热炉耐火粘土四孔砖换热器计算 .....	464
<b>第二十七章 热交换装置经济效益计算 .....</b>	<b>470</b>
§ 1. 单位造价 .....	471
§ 2. 投资回收期 .....	471
§ 3. 极限投资金额 .....	472
§ 4. 简单资本回收法 .....	472
§ 5. 资本回收法 .....	473
§ 6. 收益法 .....	474
<b>附录 .....</b>	<b>479</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>487</b>

# 第一章 空气预热的热工基础

预热空气(或煤气)●, 可节约燃料和提高燃烧温度, 因而多半是合算的。

但不同炉型的热回收效率不同。预热空气(或煤气)所带入每一单位物理热, 其价值高于燃料所带入每一单位的化学热。这是因为, 燃料燃烧时有烟气带走的热损失, 而预热空气(或煤气)则无此项热损失, 给炉子带来净收入。而且, 出炉烟气温度越高, 炉子燃料利用率越低, 则预热空气所含每一卡路里的价值越高。

## § 1. 物理热的比价

由炉子热平衡可得〔6, 7〕

$$B(Q_{\text{低}}^{\text{理}} + H_{\text{空}} - V_{\text{烟}} \cdot c_{\text{烟}} \cdot t'_{\text{烟}}) = Q_{\text{效}} + Q_{\text{失}}$$

或

$$B = \frac{Q_{\text{效}} + Q_{\text{失}}}{Q_{\text{低}}^{\text{理}} + H_{\text{空}} - V_{\text{烟}} \cdot c_{\text{烟}} \cdot t'_{\text{烟}}} \text{米}^3/\text{时} (\text{或公斤/时}) \quad (1)$$

式中  $B$ ——燃料消耗量(有空气预热时), 米<sup>3</sup>/时(或公斤/时);

$Q_{\text{低}}^{\text{理}}$ ——燃料的低发热值, 千卡/标米<sup>3</sup>(或千卡/公斤);

$H_{\text{空}}$ ——每单位燃料所对应的预热空气热含量, 千卡/米<sup>3</sup>(或千卡/公斤);

$V_{\text{烟}}$ ——每 1 米<sup>3</sup>或 1 公斤燃料的烟气量, 标米<sup>3</sup>/标米<sup>3</sup>(或标米<sup>3</sup>/公斤);

$c_{\text{烟}}$ ——烟气的比热, 千卡/标米<sup>3</sup>·°C;

---

● 本书所写的“预热空气(或煤气)”, 系代表“预热空气或煤气”, 以及“预热空气和煤气”的意思。有时为了简化, 只写成“预热空气”, 也是指的上述意思。

$t'_{烟}$ ——烟气出炉时的温度，℃；

$Q_{效}$ ——有效热，千卡/时；

$Q_{失}$ ——炉膛热损失，千卡/时。

在空气预热和不预热的情况下解（1）式，便可看出空气预热对炉子热操作的影响。空气预热时燃料带入炉内的热量为

$$Q = B \cdot Q_{低}^{用} \text{ 千卡/时} \quad (2)$$

空气不预热时为

$$Q_0 = B_0 \cdot Q_{低}^{用} \text{ 千卡/时} \quad (3)$$

式中  $Q_0$ ——空气不预热时燃料带入炉内的热量，千卡/时；

$B_0$ ——空气不预热时的燃料消耗量，米<sup>3</sup>/时（或公斤/时）。

由（1）和（2）式，可求出空气预热时燃料带入炉内的热量为：

$$Q = Q_{低}^{用} \frac{Q_{效} + Q_{失}}{Q_{低}^{用} + H_{空} - V_{烟} \cdot c_{烟} \cdot t'_{烟}} \text{ 千卡/时} \quad (4)$$

同样，由（1）和（3）式，可求出空气不预热时燃料带入炉内的热量为：

$$Q_0 = Q_{低}^{用} \frac{Q_{效} + Q_{失}}{Q_{低}^{用} - V_{烟} \cdot c_{烟} \cdot t'_{烟}} \text{ 千卡/时} \quad (5)$$

由（5）式看出，当单位燃料燃烧所生成烟气的热含量等于燃料的发热值时，炉子的耗热量将等于无穷大。这只能出现于下述的极端情况：出炉烟气温度等于燃烧温度。此时，炉子无有效的热操作。

我们看一看，当等式  $Q_{低}^{用} = V_{烟} \cdot c_{烟} \cdot t'_{烟}$  成立时，引入空气预热会出现什么结果。在这种情况下，（4）式的耗热量将等于

$$Q = Q_{低}^{用} \frac{Q_{效} + Q_{失}}{H_{空}} \text{ 千卡/时}$$

炉子全靠预热空气的热量进行热操作。例如，轧钢或锻造加热炉烧高炉煤气（在空气不预热的情况下，空气消耗系数  $n=1$  时，其燃烧温度等于  $1400^{\circ}\text{C}$ ， $n=1.1$  时等于  $1350^{\circ}\text{C}$ ， $n=1.2$  时等于

1320℃)，就可能是这样。实践表明，轧钢或锻造加热炉烧高炉煤气而不预热空气，是无法操作的。

第二种极端情况，是烟气温度等于周围空气温度。此时，若空气不预热，则炉子消耗燃料的热量按（5）式将等于：

$$Q_0 = Q_{\text{效}} + Q_{\text{失}}$$

这样一来，燃料的热量（除 $Q_{\text{失}}$ 外）将变为有效热。空气预热时，（4）式取下述形式：

$$Q = \frac{Q_{\text{煤}}^{\text{用}}}{Q_{\text{煤}}^{\text{用}} + H_{\text{空}}} (Q_{\text{效}} + Q_{\text{失}}) \text{千卡/时}$$

也就是说，1卡物理热同1卡化学热等效。所有的实际情况都处于上述两极端情况之间。

为得出预热空气所节省热量的计算式，由（5）式减去（4）式：

$$Q_0 - Q = Q_0 \left( 1 - \frac{Q_{\text{煤}}^{\text{用}} - V_{\text{烟}} \cdot c_{\text{烟}} \cdot t'_{\text{烟}}}{Q_{\text{煤}}^{\text{用}} + H_{\text{空}} - V_{\text{烟}} \cdot c_{\text{烟}} \cdot t'_{\text{烟}}} \right) \text{千卡/时} \quad (6)$$

运用（6）式，分析若干实际情况，以确定预热空气所含热量的价值。

烧焦炉煤气、烟气温度为400℃的炉子（ $n=1.2$ ，空气预热至300℃）： $Q_{\text{煤}}^{\text{用}}=4000$ 千卡/标米<sup>3</sup>； $V_{\text{烟}}=5.6$ 标米<sup>3</sup>/标米<sup>3</sup>煤气； $c_{\text{煤}}=0.34$ 千卡/标米<sup>3</sup>·℃； $V_{\text{空}}=4.9$ 标米<sup>3</sup>/标米<sup>3</sup>煤气； $c_{\text{空}}=0.32$ 千卡/标米<sup>3</sup>·℃； $H_{\text{空}}=4.9 \times 0.3 \times 300=470$ 千卡/标米<sup>3</sup>煤气。

$$Q_0 - Q = Q_0 (1 - 0.871) = Q_0 \times 0.129 \text{千卡/时}$$

若取 $Q_0=10^6$ 千卡/时，则相应的煤气消耗量为250米<sup>3</sup>/时，预热空气的热含量为 $470 \times 250=117500$ 千卡/时。

预热空气所节省的热量将等于：

$$Q_0 - Q = 10^6 \times 0.129 = 129000 \text{千卡/时}$$

由此得出，在这种情况下1千卡物理热等效于 $\frac{129000}{117500}=1.1$

千卡的燃料化学热。

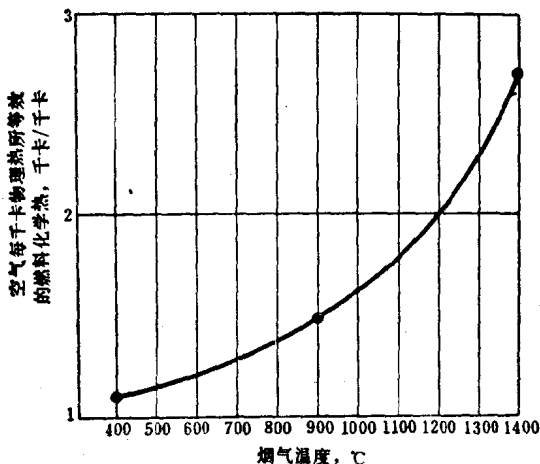


图 1 空气每千卡物理热所等效的燃料化学热  
(同出炉烟气温度的关系)

若不改变空气预热温度和其它参数，观察与预热空气热量等效的燃料化学热量如何随烟气温度而变化，便可得出图 1 所示的关系曲线。由图看出，与空气物理热等效的燃料化学热量，随烟气温度的升高而增大，当  $t_{\text{出}} = 1400^{\circ}\text{C}$  时该等效值达到 2.7 千卡/千卡。

这样一来，烟气温度变化时，空气预热至同一温度会带来不同的效果。

据此可得出结论，燃料利用率低（亦即烟气温度高）的炉子回收烟气余热最为合算。

## § 2. 燃料节约

烧气体和液体燃料的工业炉，大多以稳定不变的热负荷操作。为保持这种热负荷，往炉内供入相应的燃料量。燃料消耗量同热回收率的关系密切。预热的空气将热量带入炉内，减少了燃料消耗量。有热交换装置的炉子，其燃料消耗量取决于一系列的

因素：炉温、燃料种类、热交换装置结构与尺寸等等。对炉子耗热量影响很大的热回收率（ $P$ ），是预热空气热含量对出炉烟气热含量之比，即  $P = \frac{Q_{\text{空}}}{Q_{\text{烟}}}$ 。换句话说，热回收率表示烟气的热含量

有多大一部分在热交换装置里传给了空气。若传给空气的热量为  $Q_{\text{空}} = P \cdot Q_{\text{烟}}$ ，则排放烟气所带走的热量将是  $Q_{\text{烟}}(1-P)$ 。

在不同热回收率情况下，节省燃料量的计算式可推求如下<sup>[6, 8]</sup>。炉内产生的总热量  $Q_0$  中，只有  $(Q_{\text{放}} + Q_{\text{失}})$  这一部分留给炉膛，余下的部分  $Q_{\text{烟}}$  被出炉烟气带走。这样一来，

$$Q_0 = Q_{\text{放}} + Q_{\text{失}} + Q_{\text{烟}} \quad (7)$$

若略去热交换装置本身的热损失，则由燃料带入炉内的热量（在有热交换装置的情况下）应为：

$$Q + PQ_{\text{烟}}^{\text{回}} = Q_{\text{放}} + Q_{\text{失}} + Q_{\text{烟}}^{\text{回}} \quad (8)$$

求炉子在有、无热回收的情况下的耗热量。

若空气不预热，则燃烧区每 1 米<sup>3</sup> 烟气在燃烧温度下含有的热量如下：

$$I'_{\text{烟}} = \frac{Q_{\text{烟}}^{\text{用}}}{V_{\text{烟}}}$$

烟气出炉时的热含量等于：

$$I_{\text{烟}} = I'_{\text{烟}} \cdot c_{\text{烟}}$$

若为使炉子得到热量  $Q_0$ ，需供入  $V$  米<sup>3</sup> 烟气（其热含量为  $I'_{\text{烟}}$ ），则同量烟气在出炉时的热含将等于  $I_{\text{烟}}$ 。这样一来，由(7)式

$$V_{\text{烟}} \cdot I'_{\text{烟}} = (Q_{\text{放}} + Q_{\text{失}}) + V_{\text{烟}} \cdot I_{\text{烟}}$$

得出

$$Q_0 = \frac{Q_{\text{放}} + Q_{\text{失}}}{1 - \frac{I_{\text{烟}}}{I'_{\text{烟}}}} \quad (9)$$

① 上角标示的“回”字，表示该式是属于有热回收的情况。



在有热回收的情况下，部分热量返回炉内。此时，为保证炉膛所需热量而产生的烟气量，比 $V$ 米<sup>3</sup>要少得多。

在出炉烟气温度相同的条件下，比较炉子有、无热回收的两种操作情况，便易于理解：有热回收时 $Q_{烟}$ 值减小。

由（8）式得出：

$$V_{烟}I'_{烟} + PV_{烟}I_{烟} = Q_{放} + Q_{失} + I_{烟}V_{烟}$$

有热回收时所需的燃料化学热量将等于：

$$Q = \frac{Q_{放} + Q_{失}}{1 - \frac{I_{烟}}{I'_{烟}}(1 - P)} \quad (10)$$

得到的式子可用来求算有、无热回收时的燃料消耗量。无热回收（即 $P=0$ ）时，（10）式变得与（9）式相似。由该式看出，除热回收率 $P$ 之外，起决定作用的是比值 $\frac{I_{烟}}{I'_{烟}}$ ，即烟气出炉时热含量同其初始热含量之比。

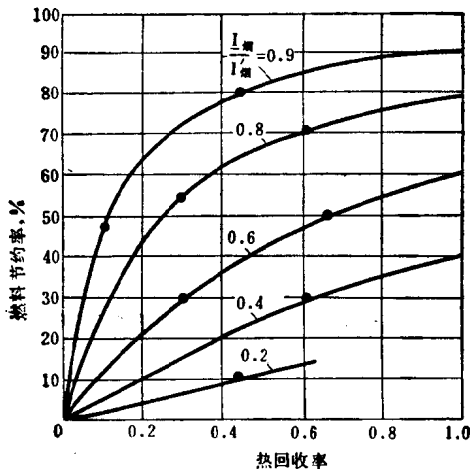


图 2 燃料节约率同出炉烟气热回收率的关系

由（9）和（10）式可导出炉子回收热量以无热回收时耗热