



工业炉节能技术

山东科学技术出版社

工业炉节能技术

何英介 主编

*

山东科学技术出版社出版

山东省新华书店发行

山东人民印刷厂印刷

*

787×1092毫米32开本 17.25印张 338千字
1984年3月第1版 1984年3月第1次印刷

印数：1—6,000

书号 15195·141 定价 1.90元

9
:

内 容 提 要

本书综合了国内外有关工业炉节能文献和资料，较系统地介绍了工业炉节能技术。主要内容包括：工业炉节能常用的计算资料、工业炉热平衡编制、工业炉节能型燃烧装置、工业炉炉体绝热及其所用绝热材料、工业炉的余热利用、工业炉冷却件的绝热装置、油掺水乳化燃烧技术、工业炉用远红外线加热技术、节能型工业炉、工业炉采用代油燃料、工业炉其他节能途径和工业炉节能的经济效果及分析等。

本书可供冶金、机械、国防等工业部门从事能源与节能工作的科技人员、管理人员及大专院校有关专业的师生学习参考，亦可供从事能源与节能的技术工人阅读，还可作为工业炉节能函授班的主要参考教材。

前 言

大力节约能源是本世纪末实现工农业总产值翻两番的重要保证，是国家的基本国策之一，也是国家实现四个现代化的战略重点之一。

国家能源的一大户，就是工业炉。工业炉耗用的能源约占全国总能耗的五分之一。目前，我国的工业炉在能源利用方面还存在很大的浪费。如锻造加热炉单耗高达0.7公斤标准煤/公斤锻件，热效率只有3~5%；连续式加热炉的热效率为30%左右。各厂矿企业之间，工业炉的热效率相差也很悬殊，最好的为50%以上，最差的仅有3%。而有些工业先进的国家，锻造加热炉单耗只有0.15公斤标准煤/公斤锻件，热效率为20%；连续式加热炉的热效率为50%左右，节能型加热炉为56%以上。因此，做好工业炉的节能工作是一项非常迫切而艰巨的任务。

可是，我国迄今还没有较系统地介绍工业炉节能的书籍。为了促进我国工业炉的节能工作，满足从事这方面工作同志的需要，我们搜集了国内外有关书刊文献和技术资料，编写了《工业炉节能技术》一书，可供冶金、机械、国防等从事能源与节能工作的科技人员、管理人员及大专院校有关专业的师生学习参考，亦可供从事能源与节能的技术工人阅读，还可作为工业炉节能函授班的主要参考教材。

本书由上海钢铁研究所工程师、上海未来研究会能源专

业学术委员会副主任委员何英介同志主编。第十章由胡建平工程师和甘为平同志编写，其余各章由何英介工程师和何步良工程师编写。

本书在编写过程中，裴先白、何华生、明志澄、廉书楨、谷淑珍、张世德、秦宗广等同志以及上海未来研究会能源专业学术委员会的有关同志给予了热情支持和帮助，特别是得到上海交通大学顾问、美国麻省理工学院名誉院士、上海未来研究会顾问兼能源专业学术委员会主任委员杨通谊教授，上海冶金专科学校分校副校长、上海未来研究会能源专业学术委员会顾问杨子宁高级工程师的支持与帮助，在此一并致谢。蒋福娣、陈顺华、胡繁珠、周跃琪、张克芳、叶春兰以及林珍珍等同志参加了本书的抄写、整理和描图工作，特致谢意。

由于我们的水平所限，书中难免存在某些缺点错误，敬请广大读者批评指正。

何 英 介

1983年9月1日于上海

目 录

第一章	工业炉节能常用的计算资料	1
第一节	工业炉节能的热工特性参数	1
第二节	燃料的燃烧计算	12
第三节	工业炉的传热计算	18
第四节	工业炉燃烧装置计算	24
第五节	工业电阻炉的主要计算	26
第六节	电极盐浴炉的主要计算	30
第七节	工业炉冷却件冷却水消耗量的计算	31
第二章	工业炉热平衡编制	37
第一节	工业炉热平衡编制的重要性	37
第二节	工业炉的热平衡编制	38
第三节	工业炉热工测定的几个主要方面	47
第四节	加热炉热工测定的主要内容	50
第五节	热工测定的准备工作	52
第六节	几个热工特性参数的测定	53
第七节	加热炉热工测定的实例	59
第三章	工业炉用节能型燃烧装置	69
第一节	高速烧嘴	70
第二节	转杯式燃油烧嘴	75
第三节	F型油压自动比例调节烧嘴	82
第四节	自身预热烧嘴	85
第五节	平焰烧嘴	87
第六节	MB型高压内混烧嘴	92

第七节	FH型低氮氧化物烧嘴	95
第八节	富氧烧嘴	107
第九节	煤油混合燃料烧嘴(英文缩写COM烧嘴)	108
第十节	煤的机械化燃烧装置	110
第十一节	改善目前燃油的烧嘴	129
第四章	工业炉炉体的绝热及绝热材料	132
第一节	炉体绝热保温与节能的效果	132
第二节	炉体蓄热量的计算	134
第三节	炉体散热量的计算	136
第四节	工业炉炉体的厚度及其组成的选择	143
第五节	介绍几种绝热材料	150
第五章	新型节能材料耐火纤维	160
第一节	国内外耐火纤维发展概况	160
第二节	耐火纤维的种类、理化性能及特点	163
第三节	耐火纤维的基础理论研究	173
第四节	耐火纤维的合理选用	175
第五节	工业炉应用耐火纤维的热工分析	177
第六节	耐火纤维炉衬的结构型式及施工方法	180
第七节	耐火纤维工业电阻炉电热元件的固定方法	188
第六章	工业炉的余热利用	194
第一节	工业炉烟气余热回收系统的设计原则	195
第二节	工业炉常用的烟气余热回收系统	205
第三节	工业炉余热回收装置	207
第七章	工业炉水冷部件的绝热装置	276
第一节	工业炉水冷部件的热损失	277
第二节	炉底水冷管用耐火可塑料的包扎	282
第三节	炉底水冷管用耐火纤维毡的包扎	296
第四节	减少炉底管的面积	300

第五节	汽化冷却·····	304
第八章	减少工业炉孔洞吸冷风和冒火·····	318
第一节	工业炉孔洞的辐射热损失·····	318
第二节	工业炉孔洞的吸冷风和冒火·····	319
第三节	减少工业炉孔洞吸冷风和冒火的措施·····	322
第九章	工业炉用油掺水乳化燃烧技术·····	325
第一节	油掺水乳化燃烧的特点·····	325
第二节	油掺水乳化燃烧的机理·····	326
第三节	油掺水乳化燃烧的媒合作用·····	331
第四节	油掺水乳化装置·····	337
第五节	乳化油的制造工艺·····	341
第六节	对油掺水乳化燃烧需要说明的几个问题·····	348
第十章	工业炉用远红外线加热技术·····	354
第一节	远红外线加热技术的理论基础·····	354
第二节	远红外线辐射加热器·····	370
第三节	远红外线加热技术在工业炉上的应用·····	393
第十一章	节能型工业炉·····	401
第一节	热滑道连续式加热炉·····	401
第二节	无水冷滑道连续式加热炉·····	402
第三节	平顶辐射连续式加热炉·····	405
第四节	步进式加热炉·····	406
第五节	喷流换热装置节能型加热炉·····	411
第六节	感应加热炉·····	421
第七节	往复炉排连续式加热炉·····	423
第八节	粉煤连续式加热炉·····	429
第九节	节能型锻造加热炉·····	433
第十节	多孔循环燃煤锻造加热炉·····	437
第十一节	节能型环形加热炉·····	441

第十二节	用于轧钢加热炉上的电子计算机·····	445
第十三节	节能型罩式炉·····	447
第十四节	直热式连续光亮热处理炉·····	449
第十五节	气垫式连续热处理炉·····	451
第十六节	换向——脉动供二次空气复循环热处理炉·····	455
第十七节	面辐射热处理电阻炉·····	457
第十八节	催化燃烧型涂漆烘干炉·····	460
第十二章	工业炉采用代油燃料·····	464
第一节	煤油混合燃烧技术·····	464
第二节	煤水浆燃料燃烧技术·····	469
第三节	液态二氧化碳 / 煤浆的燃烧技术·····	477
第四节	用煤气作为工业炉的燃料·····	478
第十三章	工业炉其他节能途径·····	482
第一节	热滑道·····	482
第二节	加热炉炉体的延长·····	493
第三节	改进加热曲线·····	495
第四节	钢料低温出炉·····	496
第五节	采用低空气过剩系数燃烧·····	496
第六节	推钢式连续加热炉炉底管采用空气冷却·····	497
第七节	取消端出料推钢式连续加热炉的“死闲区”·····	498
第八节	工业炉采用空心炉墙和炉底烟道·····	501
第九节	均热炉采用逆L字型加热法·····	503
第十节	采用节能涂料·····	504
第十一节	加强操作管理, 健全计测装置·····	509
第十四章	工业炉节能的经济效果及分析·····	510
第一节	工业炉的节能技术与节能技术经济分析·····	511
第二节	评价工业炉节能技术经济效果的指标·····	518

附 录

一、工业炉节能常用的计量单位换算·····	522
二、我国商品重油的分类标准·····	527
三、烧嘴前要求的重油粘度·····	528
四、重油温度粘度值·····	528
五、日本各种工业炉的热效率·····	529
六、日本轧钢加热炉的热耗·····	530
七、以煤代油合理性比较表·····	530
八、重油燃烧操作中的故障、发生原因及防止措施·····	531
九、气体燃料烧嘴的不良项目、发生原因及防止措施·····	535
十、工业炉用各种换热器的检查和清扫·····	536
十一、工业炉用各种换热器损坏原因·····	536
十二、各种材料在各种工艺过程中所需达到的大致温度·····	537

第一章 工业炉节能常用的计算资料

为了研究和探讨工业炉节能，必须掌握工业炉节能的计算和常用的热工特性参数。现简要介绍如下。

第一节 工业炉节能的热工特性参数

一、热量利用系数 $\eta_{\text{热}}$

热量利用系数 $\eta_{\text{热}}$ 可用下式计算：

$$\begin{aligned}\eta_{\text{热}} &= \frac{Q_{\text{低}} + Q_{\text{物}} - Q_{\text{烟}}}{Q_{\text{低}} + Q_{\text{物}}} \\ &= \frac{V_{\text{理}} C_{\text{烟}}^{t_{\text{理}}} t_{\text{理}} - V_{\text{烟}} C_{\text{烟}}^{t_{\text{烟}}} t_{\text{烟}}}{V_{\text{理}} C_{\text{烟}}^{t_{\text{理}}} t_{\text{理}}} \\ &= \frac{t_{\text{理}} - t_{\text{烟}}}{t_{\text{理}}} = 1 - \frac{t_{\text{烟}}}{t_{\text{理}}} \\ &\quad (V_{\text{理}} = V_{\text{烟}}, \quad C_{\text{烟}}^{t_{\text{理}}} \approx C_{\text{烟}}^{t_{\text{烟}}})\end{aligned}$$

式中：

$V_{\text{理}}$ —理论烟气量（气体燃料为标米³/标米³；固体燃料、液体燃料为标米³/公斤）；

$V_{\text{烟}}$ —实际烟气量（单位与 $V_{\text{理}}$ 相同）；

$C^{t_{\text{烟}}}_{\text{烟}}$ —烟气在出炉烟气温度下的平均比热（千卡/标米³·℃）；

$C^{t_{\text{理}}}_{\text{烟}}$ —烟气在理论燃烧温度下的平均比热（千卡/标米³·℃）；

$t_{\text{理}}$ —理论燃烧温度（℃）；

$t_{\text{烟}}$ —出炉烟气温度（℃）。

上式中，分子表示留在炉内的热量，分母表示投入炉内的热量。

热量利用系数是留在炉内的热量与投入炉内的热量之比，称为炉内热量遗留率。此值越高，说明留在炉内的热量越多；反之，留在炉内的热量就越少。

由上式还可以看出：

1. 同样的烟气温度，其热值越高，理论燃烧温度越高，热量利用系数也越高。因此，高热值燃料利用系数比低热值燃料利用系数高。此外，提高燃料和空气的预热温度，也就是提高理论燃烧温度，热量利用系数也随着提高。由此可见，热量利用系数反映燃料的质量、燃烧温度和空气预热等情况。

2. 在同样的燃料和燃烧条件（即燃料和空气的预热情况）下，烟气温度越低，热量利用系数就越高。

假设燃料理论燃烧温度为1900℃，加热炉出炉烟气温度为700℃左右，而锅炉出炉烟气温度只有200℃左右，那么，

$$\begin{aligned}\eta_{\text{热加}} &= \frac{1900 - 700}{1900} \\ &= \frac{1200}{1900} \approx 0.63\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_{\text{热锅}} &= \frac{1900 - 200}{1900} \\ &= \frac{1700}{1900} \approx 0.89\end{aligned}$$

由以上计算可以看出,锅炉的热量利用系数比加热炉高。如果燃料的发热值低,又没有预热,那么 $t_{\text{理}}$ 只有 1600°C ,加热钢料就很困难。因为 $t_{\text{炉}} = 0.77$, $t_{\text{理}} = 1230^{\circ}\text{C}$,与加热钢料所要求的温度相差不多,这时,

$$\begin{aligned}\eta_{\text{热加}} &= \frac{1600 - 700}{1600} \\ &= \frac{900}{1600} \approx 0.56 \\ \eta_{\text{热锅}} &= \frac{1600 - 200}{1600} \\ &= \frac{1400}{1600} \approx 0.87\end{aligned}$$

3. 在燃料完全燃烧的条件下,当烟气温度相同时,过剩空气系数越小, $Q_{\text{烟}}$ 就小,或者 $t_{\text{理}}$ 越高,热量利用系数也就越高。

二、燃料利用系数 $\eta_{\text{燃}}$

燃料利用系数 $\eta_{\text{燃}}$ 可用下式计算:

$$\begin{aligned}\eta_{\text{燃}} &= \frac{Q_{\text{低}} + Q_{\text{物}} - Q_{\text{烟}}}{Q_{\text{低}}} \\ &= \frac{t_{\text{理}} - t_{\text{烟}}}{t^{\circ}_{\text{理}}}\end{aligned}$$

式中：

$t_{理}$ 、 $t^{\circ}_{理}$ —单位燃料在空气预热和不预热时的热量计温度（℃）；

$Q_{物}$ —单位燃料和空气预热时带入的物理热（液体、固体燃料为千卡/公斤，气体燃料为千卡/标米³）；

$Q_{烟}$ —单位燃料出炉烟气带走的热量（千卡/标米³）。

此值为加入炉膛的燃料热量在炉内所留下的部分，比较实用，可用来表示预热空气能够节约的燃料消耗量。工业炉的燃料消耗量B可用下式表示：

$$B = \frac{Q_{钢} + Q_{失}}{Q_{低} \eta_{燃}}$$

式中：

$Q_{钢}$ —钢料的有效吸收热。

燃料消耗量B与燃料利用系数成反比，故预热空气后的燃料节约率n为：

$$\begin{aligned} n &= \frac{B - B'}{B} = \frac{\eta'_{燃} - \eta_{燃}}{\eta'_{燃}} \\ &= \frac{Q_{物}}{Q_{低} + Q_{物} - Q_{烟}} (\%) \end{aligned}$$

式中：

B' —节约后的燃料消耗量。

三、热量有效利用系数 $\eta_{有}$

工业炉的热量有效利用系数 $\eta_{有}$ 可按下式计算：

$$\eta_{有} = \frac{Q_{低} + Q_{物} - Q_{烟} - Q_{失}/B}{Q_{低} + Q_{物}}$$

此值表示工业炉投入的总热量被加热工件有效吸热的部分，是工业炉总的热工指标。在设计工业炉时，要尽可能采用有效的措施，减少各项热损失，这样才能使 $\eta_{有}$ 接近 $\eta_{热}$ 。

四、工业炉的热效率 $\eta_{炉}$

工业炉的热效率 $\eta_{炉}$ 可用下式计算：

$$\eta_{炉} = \frac{Q_{低} + Q_{物} - Q_{烟} - Q_{失}}{B} \\ = \eta_{热} - \frac{Q_{失}}{BQ_{低}} \quad (\%)$$

式中， $\eta_{热}$ 值越高，工业炉的燃料消耗量就越低，炉子工作越好。现在千方百计地研究工业炉节能，就是要提高工业炉的热效率。为此，必须做到以下几点：

1. 提高燃料和助燃空气预热的温度，增加物理热；
2. 减少烟气的热损失；
3. 减少炉子其他各项热损失。

五、燃料换算系数 $K_{燃}$

当工业炉改用其他燃料时，要保持炉子的产量不变，不能单纯地按燃料的发热值进行换算，必须考虑两种燃料的热价值，进行正确的换算。

工业炉的产量不仅取决于炉子的热负荷 $BQ_{低}$ ，而且取决于热负荷留在炉内的热量 $BQ_{低}\eta_{热}$ 。炉子的产量不变，即留在炉内的热量不变，则：

$$B_1 (Q_{低1} + Q_{物1}) \eta_{热1} = B_2 (Q_{低2} + Q_{物2}) \eta_{热2}$$

燃料消耗量换算系数为：

$$K_{燃} = B_2 / B_1$$

工件的产量来计算，这个指标称为总热耗 $R_{总}$ 。由于车间的作业率和产品的收得率不同，这项指标能够反映包括炉子在内的整个车间的生产水平，但不能单独衡量炉子本身的热效率和生产情况。因此，在设计工业炉，计算热耗 R 时， B 和 G 是指炉子在正常连续操作的情况下，单位时间内的燃料消耗量和产量， G 是装入炉内的工件重量。在比较不同的炉子的热耗指标时，要注意计算方式是否相同，以便在相同的基础上进行比较。

某些加热炉的燃料消耗指标见表 1—2。

表 1—2 某些加热炉的燃料消耗指标

炉 型	热 耗 R (千卡/公斤)	其 他 指 标
均 热 炉	冷装料	总热耗 $R_{总}=210\sim580$ 千卡/公斤
	热装料	
推 钢 式 连续加热炉	燃 煤	总热耗 $R_{总}=600\sim1000$ 千卡/公斤
	燃 油	总热耗 $R_{总}=800\sim1000$ 千卡/公斤
	燃煤气	总热耗 $R_{总}=600\sim830$ 千卡/公斤
步进底式加热炉 (单面加热)	叠轧板坯	炉底热强度 $D=23\times10^4$ 千卡/米 ² ·时
	小型板坯	
	管坯再加热	
	连轧板坯	
步进梁式加热炉 (双面加热)	管坯再加热	炉底热强度 $D=13\times10^4$ 千卡/米 ² ·时
	连轧板坯	
		炉底热强度 $D=8.5\times10^4$ 千卡/米 ² ·时

(二) 工业炉的可比燃料单耗

工业炉的可比燃料单耗 F 可按下式计算（以轧钢加热炉为例）：

$$F = \frac{\text{炉子的单耗}}{\text{燃料换算系数} \times [1 + \text{合金比} \times (\text{特殊钢燃耗系数} - 1)]}$$