

工业炉窑 节能减排技术

王冠 安登飞 庄剑恒 张殿印 等编著



化学工业出版社

工业炉窑 节能减排技术

王冠 安登飞 庄剑恒 张殿印 等编著



化学工业出版社

·北京·

本书是一部环境工程技术工具书，全书分为八章。包括工业炉窑节能减排原理，熔炼炉节能减排技术，铁矿烧结机（炉）节能减排技术，熔化炉节能减排技术，加热炉、热处理炉节能减排技术，玻璃、陶瓷、耐火材料、砖瓦炉窑节能减排技术，石灰窑、干燥窑节能减排技术和其他工业炉窑节能减排技术。本书内容全面，联系实际，可操作性强，编写重点突出，层次分明，释义准确，资料翔实。

本书可供工业炉窑节能减排领域的广大工程设计人员、科学研究人员和企业管理人员阅读使用，也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工业炉窑节能减排技术/王冠等编著. —北京: 化学工业出版社, 2015. 8

ISBN 978-7-122-24490-1

I. ①工… II. ①王… III. ①工业炉窑-节能-技术
IV. ①TK175

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 146588 号

责任编辑: 左晨燕

装帧设计: 张 辉

责任校对: 宋 玮

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 20 $\frac{3}{4}$ 字数 524 千字 2015 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 85.00 元

版权所有 违者必究



前言

随着社会经济的发展,人们对生活质量越来越关注,对自身健康越来越重视。但是人类生活的环境越来越不尽人意,大量炉窑造成的工业污染和能源消耗是原因之一。因此大力推动工业炉窑污染治理、节能减排、发展循环经济、保持生态平衡成为人们的重大任务。编写本书的目的在于补充工业炉窑节能减排技术领域书籍的不足,填补工业炉窑污染治理和节约能源方面工程技术书籍的空白,为广大环境和能源工程领域的科研、设计、管理人员提供一部内容全面、操作性强、查找方便的节能减排工程技术书籍。同时希望本书能为读者提供一条捷径,以便使他们不用付出获取直接经验的高额成本,不再走前人所走过的弯路,而能迅速达到较高的理论和技术水平,满足日益发展的环境污染治理、节约能源的需求,提高节能减排工程技术水平。

本书是一部环境工程技术工具书,全书分为八章。包括工业炉窑节能减排基本原理,熔炼炉节能减排技术,铁矿烧结机(炉)节能减排技术,熔化炉节能减排技术,加热炉、热处理炉节能减排技术,玻璃、陶瓷、耐火材料、砖瓦炉窑节能减排技术,石灰窑、干燥窑节能减排技术和其他工业炉窑节能减排技术。本书编写力求内容全面,联系实际,操作性强,重点突出,层次分明,释义准确,资料翔实。主要特点如下。

1. 技术全面,重点突出。书中包括国家标准规定的 10 类 19 种炉窑节能减排技术,重点介绍其中的 6 类 12 种炉窑的节能减排技术。

2. 从实用出发,可操作性强。对叙述内容尽可能结合工程、结合需要,如重要技术和方法介绍其多样性的各种技术。

3. 新颖、求真。在编写中,把专门针对工业炉窑节能减排的新规范、新标准、新术语集中加以举例,全书列举许多工程实例。

4. 简明实用。把近年出现的实践证明可行的新方法、新技术、新设备,去伪存真,详细列于书中。并有意避开了一些理论推导计算和物理常识叙述,使本书尽可能简明实用,重点突出,层次分明,示例典型。

本书由王冠、安登飞、庄剑恒、张殿印、高华东、申桂秋、陈盈盈、姚艳春、李倩婧、李素珍、徐飞、路聪聪、谢秀艳、张紫薇等编著。杨景玲、邹元龙教授对全书进行了审阅,知名环保专家王海涛、申丽、陈满科、肖春为本书编著提供了宝贵的技术资料,在此一并深

致谢忱。

本书在编写中还参考和引用了一些科研、设计、教学和生产工作同行撰写的著作、论文、手册、教材和学术会议文集等，书后附有参考文献，在此对所有作者表示衷心感谢。

由于作者学识和水平有限，书中疏漏和不当之处在所难免，殷切希望读者朋友不吝指正。

编著者

2015年6月



目录

第一章 工业炉窑节能减排原理 1

第一节 工业炉窑的分类和应用范围	1
一、工业炉窑的分类	1
二、工业炉窑的应用范围	2
三、工业炉窑的能耗	2
四、工业炉窑的排污特点	3
第二节 工业炉窑节能原理	3
一、能源的分类和计量	3
二、节能的基本原理	6
三、工业炉窑热损失分析	9
四、工业炉窑余热资源利用	10
五、工业炉窑节能技术措施	11
第三节 工业炉窑污染物减排原理	14
一、气体中粒子分离机理	14
二、气态污染物控制技术	22
三、废水处理原理	27
四、固体废物处理原理	28

第二章 熔炼炉节能减排技术 30

第一节 高炉炼铁节能减排技术	30
一、高炉炼铁工艺	30
二、高炉煤气余压发电技术	34
三、热风炉烟道废气余热回收	36
四、高炉煤气除尘	38
五、高炉出铁场烟尘减排	41

六、高炉渣处理技术	50
第二节 转炉炼钢节能减排技术	52
一、转炉炼钢工艺	53
二、转炉烟气余热回收技术	55
三、转炉负能炼钢技术	57
四、LT法转炉煤气净化回收技术	59
五、转炉钢渣处理与利用	62
第三节 电炉炼钢节能减排技术	63
一、电炉炼钢工艺	63
二、电炉烟气余热利用技术	65
三、电炉烟气预热废钢技术	69
四、炼钢电炉炉气综合回收利用	72
五、电炉炼钢二噁英减排技术	75
第四节 有色金属冶炼炉节能减排技术	76
一、有色金属冶炼工艺	76
二、有色金属冶炼炉节能技术对策	76
三、铜冶炼节能减排技术	78
四、铅冶炼节能减排技术	85
五、铝电解槽(炉)节能减排技术	90
第五节 铁合金熔炼炉节能减排技术	97
一、铁合金熔炼炉分类	97
二、铁合金熔炼炉节能	100
三、铁合金电炉除尘净化	104
四、铁合金烟气净化与节能工程实例	108

第三章 铁矿烧结机(炉)节能减排技术 111

第一节 烧结机(炉)生产工艺流程	111
一、烧结工艺及设备	111
二、烧结工序能耗	112
三、烧结工序污染物排放	113
第二节 烧结机(炉)节能技术	114
一、烧结机废气余热回收利用	114
二、烧结烟气余热回收利用实例	116
三、烧结烟气冷却机废气余热回用技术	119
四、烧结环冷机余热利用实例	121
五、烧结机低品位余热回收	123
六、烧结烟气热能回收发电技术	124
第三节 烧结机生产污染物减排技术	125
一、烧结烟气SO ₂ 减排技术	125
二、烟气脱硝工艺	135

三、二噁英减排技术	136
第四节 球团(炉)生产节能减排技术	137
一、球团生产工艺及设备	137
二、球团过程节能技术	139
三、球团污染物减排技术	140

第四章 熔化炉节能减排技术 / 143

第一节 冲天炉节能减排技术	143
一、冲天炉结构和工作原理	143
二、冲天炉节能技术	144
三、冲天炉烟尘减排技术	148
四、冲天炉烟气净化与余热利用设计实例	152
第二节 有色金属熔化炉节能减排技术	158
一、有色金属熔化炉类型	158
二、有色金属熔化电炉节能技术	160
三、有色金属熔化炉污染物减排技术	161
四、熔化炉减排工程实例	165
第三节 铝加工熔化炉节能减排	170
一、铝加工工艺流程	170
二、熔铝炉节能技术	170
三、铝加工过程污染物减排	172

第五章 加热炉、热处理炉节能减排技术 / 174

第一节 锻造加热炉节能减排技术	174
一、锻造加热炉的分类	174
二、常用加热炉	175
三、加热炉节能技术	178
四、锻造加热炉污染物减排技术	181
五、加热炉排烟净化	181
第二节 轧钢加热炉节能减排技术	185
一、轧钢加热炉分类和热平衡	185
二、轧钢加热炉节能技术措施	187
三、热装热送节能技术	190
四、高温蓄热燃烧技术	191
五、加热炉废气余热回收利用	195
六、加热炉节能工程实例	198
七、加热炉 NO _x 减排技术	199
第三节 热处理炉节能减排技术	201
一、热处理炉节能技术	201

二、 热处理盐浴炉烟尘净化	203
---------------------	-----

第六章 玻璃、陶瓷、耐火材料、砖瓦窑节能减排技术 / 210

第一节 玻璃熔窑节能减排技术	210
一、 玻璃熔制和窑分类	210
二、 玻璃窑节能技术	214
三、 玻璃窑保温技术	217
四、 玻璃窑烟气余热利用技术	219
五、 烟气余热发电技术	222
六、 清洁燃料技术	222
七、 玻璃熔窑污染物减排	223
第二节 陶瓷窑节能减排技术	229
一、 陶瓷窑分类和工作原理	229
二、 陶瓷窑节能技术	232
三、 陶瓷窑污染减排技术	234
第三节 耐火材料隧道窑和倒焰窑节能减排技术	238
一、 隧道窑构造	239
二、 全窑热平衡及热效率	240
三、 高温隧道窑节能	241
四、 倒焰窑的节能	242
五、 隧道窑和倒焰窑的余热回收利用	244
第四节 砖瓦窑节能减排技术	245
一、 砖瓦生产工艺流程	245
二、 砖瓦窑节能的途径	246
三、 砖瓦窑废气治理	246

第七章 石灰窑、干燥窑节能减排技术 / 249

第一节 石灰窑分类和节能技术	249
一、 石灰窑分类	249
二、 石灰窑节能技术	252
三、 竖窑节能技术	254
第二节 石灰窑烟尘减排技术	255
一、 石灰回转窑除尘	255
二、 石灰竖窑除尘	257
三、 双膛竖窑除尘	258
四、 石灰悬浮窑除尘	259
五、 石灰回转窑烟尘减排实例	261
第三节 木材干燥窑节能	264
一、 窑干能耗分析	264

二、各种干燥方法能耗比较	264
三、木材干燥能耗现状	266
四、节能途径	267
五、木材干燥窑保温节能技术	269
六、利用热油作干燥热源的节能	271
第四节 其他干燥炉窑节能减排技术	272
一、燃煤干燥炉窑节能减排	272
二、干燥炉窑节能途径	273
三、浸漆干燥炉节能技术	276
四、催化剂干燥炉节能技术	278

第八章 其他工业炉窑节能减排技术 / 281

第一节 水泥窑节能减排技术	281
一、水泥窑的分类	281
二、水泥窑节能技术	283
三、水泥窑烟尘减排技术	288
四、篦式冷却机余风除尘	293
第二节 炼焦炉节能减排技术	295
一、炼焦炉组成	295
二、炼焦炉能耗及热工效率	296
三、炼焦炉节能新技术	298
四、炼焦炉煤调湿节能技术	299
五、炼焦炉干熄焦节能技术	300
六、炼焦炉装煤烟尘减排	305
七、炼焦炉推焦烟尘减排	309
八、炼焦炉煤气综合利用	312

附录 燃料和燃烧数据 / 313

一、主要燃料特性	313
二、燃烧反应	315
三、燃烧产物	316

参考文献 / 319



第一章 工业炉窑节能减排原理

本章介绍了工业炉窑的分类、能耗、污染物的产生。重点是工业炉窑节约能源的原理和减少污染物排放的原理。

第一节 工业炉窑的分类和应用范围

炉窑是利用燃烧反应把材料加热的装置。炉多用于冶炼和机械工业系统，主要用来冶炼和制备钢铁、各种有色金属材料等。窑多用于硅酸盐工业系统，如生产陶瓷、砖瓦、水泥、玻璃等。

一、工业炉窑的分类

工业炉窑是指在工业生产中用燃料或电能转化产生的热量，将物料或工件进行冶炼、焙烧、烧结、熔化、加热等工序的热工设备。根据 GB 9078，工业炉窑分 10 类 19 种。

(1) 熔炼炉 将金属或非金属熔化、调整其成分、去其杂质，获得所设定成分的金属或非金属的工业炉，如高炉、铜鼓风冶炼炉等。包括以下几种。

① 高炉及高炉出铁场。

② 炼钢炉、混铁炉（车）。

③ 铁合金熔炼炉，包括各种用于铁合金熔炼的炉窑。如矿热电炉、明弧电炉、铝热法熔炼炉、焙烧回转窑、多层机械烧焙炉等。

④ 有色金属熔炼炉，包括各种铅锌、铜有色金属冶炼用的鼓风炉、闪射炉、烧结炉、炼铜转炉、精炼炉等。

(2) 熔化炉 将固体金属或非金属熔化成液体的工业炉。包括以下几种。

① 冲天炉、化铁炉，包括铸造用各类冷风、热风冲天炉及各种化铁炉。

② 金属熔化炉，包括各种熔铜炉、化铅炉、熔铝炉等。

③ 非金属熔化、冶炼炉，包括玻璃熔炉、刚玉冶炼炉、硅冶炼炉、耐火及保温材料熔炉等。

(3) 铁矿烧结炉 把物料，如矿粉、铁粉加热到生成液相的温度，使其达到黏结成块的

工业炉。包括以下两种。

- ① 烧结机（机头、机尾）。
- ② 球团竖炉和带式球团。

(4) 加热炉 一般特指物料加热提高其温度而不改变其形态，以满足加工工艺要求的工业炉。包括以下两种。

- ① 金属压延锻造加热炉，包括各种钢坯加热炉、均热炉、锻造加热炉、感应加热炉。
- ② 非金属加热炉，包括沥青加热炉、玻璃塑型炉、沥青混凝土搅拌炉等。

(5) 热处理炉 包括以下两种。

- ① 金属热处理炉，包括各种退火炉、调质炉（淬火、回火）、钎焊炉、马弗炉等。

② 非金属热处理炉，除去物料中所含水分或挥发分的工业炉。按不同干燥对象分为砂型干燥炉、泥蕊干燥炉、油染干燥室、木材干燥室等。

(6) 干燥炉、窑 包括各种金属、非金属加工用干燥炉（窑）。

(7) 非金属焙（锻）烧炉窑、耐火材料窑 包括各种用于非金属焙烧、生产耐火材料的回转窑、竖窑等。

(8) 石灰窑 包括各种生产石灰的竖窑及土窑。

(9) 陶瓷、搪瓷、砖瓦窑。

(10) 其他炉窑 包括各种煤气发生炉、造气炉等，以及不包括在上述各类中的其他工业炉窑。

二、工业炉窑的应用范围

工业炉窑种类及应用范围见表 1-1。

表 1-1 工业炉窑种类及应用范围

行业	冶金	机械	建材	轻工
用途	炼铁、炼钢、轧钢、热处理、耐火、焦化、机修	铸铁、铸钢、锻压、热处理、干燥	水泥、砖瓦、平板玻璃、建筑陶瓷、玻璃纤维等	民用陶瓷、玻璃器皿、搪瓷器具、合成洗涤剂
炉窑种类	高炉、焦炉、焙烧炉、平炉、转炉、电炉、均热炉、轧钢加热炉、热处理炉、隧道窑、倒焰窑	熔化炉（反射炉、冲天炉、天炉、电弧炉、感应电炉）、加热炉、热处理炉、干燥装置	水泥回转窑、玻璃熔炉（池炉、坩埚炉）、陶瓷窑（倒焰窑、隧道窑）、砖瓦窑、玻璃纤维坩埚炉	玻璃、陶瓷窑（倒焰窑、隧道窑）；搪瓷炉
燃料结构	煤 70%（炼焦煤 55%，燃料煤 15%），电力 17%，重油 10%，天然气 2%，其他 1%	炼钢：电力为主。化铁：焦炭为主。加热炉：煤 55%，重油 33%，煤气 10%，电力 2%	玻璃池炉、陶瓷隧道窑、倒焰窑和坩埚炉烧煤气、重油为主；水泥窑和砖瓦烧成窑烧煤为主	玻璃、陶瓷窑（倒焰窑、隧道窑），搪瓷炉烧煤为主，部分烧油

三、工业炉窑的能耗

从工业炉窑的产量和拥有量来看，在世界上我国堪称“工业炉窑大国”。我国共有各类工业炉窑约 12 万台。其中，机械行业炉窑约 7.5 万台；冶金行业炉窑 1 万余台；玻璃、陶瓷、建材、耐材行业拥有各类炉窑约 1.5 万台。轻工、化工行业有各类工业炉窑 5000 台以上。工业炉窑是我国的能耗大户，年总耗能达 2.6 亿吨标准煤，约占全国总能耗的 1/4，占工业总能耗的 60%。工业炉窑中燃料炉能耗占工业炉窑总能耗的 92%，其中固体燃料约 70% 左右，其他为气体和液体燃料。电炉按台数占 45%，而能耗仅占工业炉窑总能耗的 8% 左右。

目前,我国大部分工业炉窑在炉型结构、燃烧系统、热能利用、绝热材料、热工检测、环境保护以及控制系统等方面技术水平比较滞后,由此而造成产品综合能耗高、环境污染较严重、产品存在质量缺陷等问题。因此在工业炉窑制造和使用行业中,大力进行工业炉窑节能减排共性技术的研究与应用具有重大意义。

四、工业炉窑的排污特点

工业炉窑排放和产生的污染物有烟尘、废水、固体废物和噪声。其中主要是烟尘。工业炉窑污染特点如下。

(1) 污染原因单一 炉窑对环境的污染,主要来源于燃料燃烧过程中产生的烟尘、二氧化硫、氮氧化物等。高炉、转炉、冲天炉等产生的污染,一方面来源于燃料的燃烧,另一方面来源于原料本身。

(2) 污染设备差别大 工业炉窑是仅次于锅炉的第二种主要工业燃煤设备,种类多,分布面广,污染装备也千差万别,所以必须根据不同的工艺过程、不同的燃烧方式,采取不同的治理措施。

(3) 烟气特点多样

① 烟气温度较高,一般在 200°C 左右,倒焰窑的烟气温度有时高达 $300\sim 500^{\circ}\text{C}$ 。

② 烟尘浓度高,烟气黑度大,烟尘浓度一般在 $2\text{g}/\text{m}^3$ (标态) 以上,烟气黑度可达林格曼四级。

③ 烟气中烟尘粒径较细, $5\mu\text{m}$ 以下的占 80% 以上。

④ 含有氟化物、二氧化硫等有害气体。

第二节 工业炉窑节能原理

工业炉窑是耗能大户,也可以是节能大户。通过改进炉型结构和燃烧方式、加强保温、减少散热、回收余热都有很好的节能效果。

一、能源的分类和计量

凡是能够提供能量(如热能、机械能、电能、光能等)的资源,都称为能源。大自然赋予人类多种多样的能源,一是来自太阳的能量,除辐射能外,还有经其转换的多种形式的能源;二是来自地球本身的能量,如热能和原子能;三是来自地球与其他天体相互作用所产生的能量,如潮汐能。能源目前没有统一的分类方法,可以从不同角度进行多种分类,一般可分为一次能源和二次能源、常规能源和新能源、再生能源和非再生能源等。能源分类见表 1-2。

表 1-2 能源分类

类 别		常规能源	新能源
一次能源	非再生能源	化石能源:煤炭、石油、天然气、油页岩	核燃料:铀、钚、钍、钷
	再生能源	水力能、生物质能	原子能、风能、海洋能、潮汐能、地热能、太阳能
二次能源	电力、汽油、柴油、重油、石油液化气、焦炭、煤气、水蒸气、氢能、醇类燃料、沼气		

(1) 一次能源和二次能源 一次能源是从自然界取得的未经加工的能量,如开采出的原

煤、原油、天然铀矿和天然气等。二次能源是由一次能源经过加工、转换得到的能源，如焦炭、煤气、煤油、汽油等燃料。大部分的一次能源都需要经过转换使其变成容易输送、分配和使用的二次能源，以适应消费者的需求。

(2) 常规能源和新能源 能源按使用状况可分为常规能源和新能源。常规能源是指当前被广泛使用且量大的能源，如煤炭、石油、天然气、核能等。新能源是指在当前技术和经济条件下，尚未被人类广泛大量利用，但已经或即将被利用的能源，如太阳能、地热能、风能、潮汐能、生物质能与核聚变能等。

(3) 再生能源与非再生能源 在一次能源中，不会随人们的使用而减少的能源称为再生能源，如太阳能、水能、生物能、风能、地热能和海洋能等。而化石燃料和核裂变燃料，如煤、原油、天然气、油页岩、核能等都会随着使用而逐渐减少，称为非再生能源。

(4) 我国能源结构 我国煤炭资源比较丰富，能源结构以煤为主，以油、气为辅。其中煤炭比重约为 70.6%，超出世界平均水平约 40%；天然气比重最低，仅 3.7%，远低于 23.8%的世界平均水平。

从世界主要国家天然气消费比重横向比较来看，我国天然气能源利用严重不足。我国与资源禀赋最为接近的美国及印度两国相比，天然气消费比重分别低 23.3%和 5.5%。随着世界经济的发展，推进绿色、环保、低碳经济的呼声日渐高涨，促使各国能源结构不断优化，煤炭比重不断下降，天然气等清洁能源比重不断上升。

2011 年，我国能源消费总量达 34.8 亿吨标准煤，成为世界第一大能源消费国。随着工业化、城镇化的深入推进，我国能源消费仍将持续增长。在今后相当长的时间里，我国以煤为主的能源结构难以改变，经济社会发展面临的能源压力将持续增大。因此，促进能源技术进步，加快开发可再生能源，推动能源转型发展，是今后能源建设和改革的重要任务。

(5) 能源的计量 能源计量可以以实物单位计量，也可以以能量单位计量。如，1t 煤也可以表示为 0.7143tce (ce 为标准煤，下同)。各种能源均需折算成标准煤量。用能单位实际消耗的燃料能源应以其低（位）发热量为计算基础折算为标准煤量，并规定低（位）发热量等于 29307kJ 的燃料，称为 1kgce。

用能单位外购的能源和耗能工质，其能源折算系数可参照国家统计局公布的数据；用能单位自产的能源和耗能工质所消耗的能源，其能源折算系数可根据实际投入产出自行计算。

耗能工质的标准煤折算系数可按式 (1-1) 进行计算：

$$b_k = g_{k-1}^C + g_{a-k}^C - g_{\zeta-k}^C \quad (1-1)$$

式中 b_k ——某种能源介质 k 的标准煤折算系数，kgce/t、kgce/m³ 及 kgce/(kW·h) 等；

g_{k-1}^C ——能源转换过程中原料带入的能量，kgce/t、kgce/m³ 及 kgce/(kW·h) 等；

g_{a-k}^C ——能源转换过程中外部供入的各种能量之和，kgce/t、kgce/m³ 及 kgce/(kW·h) 等；

$g_{\zeta-k}^C$ ——能源转换过程中回收外供的能量，kgce/t、kgce/m³ 及 kgce/(kW·h) 等。

当无法获得各种燃料的低（位）发热量实测值和单位耗能工质的耗能量时，可参照表 1-3 和表 1-4。

表 1-3 各种能源折标准煤参考系数

能源名称	平均低位发热量	折标准煤系数
原煤	20908kJ/kg(5000kcal/kg)	0.7143kg/kg
洗精煤	26344kJ/kg(6300kcal/kg)	0.9000kg/kg

续表

能源名称		平均低位发热量	折标准煤系数
其他洗煤	洗中煤	8363kJ/kg(2000kcal/kg)	0.2857kg/kg
	煤泥	20908~12545kJ/kg (2000~3000kcal/kg)	0.2857~0.4286kg/kg
焦炭		28435kJ/kg(6800kcal/kg)	0.9714kg/kg
原油		41816kJ/kg(10000kcal/kg)	1.4286kg/kg
燃料油		41816kJ/kg(10000kcal/kg)	1.4286kg/kg
汽油		43070kJ/kg(10300kcal/kg)	1.4714kg/kg
煤油		43070kJ/kg(10300kcal/kg)	1.4714kg/kg
柴油		42652kJ/kg(10200kcal/kg)	1.4571kg/kg
煤焦油		33453kJ/kg(8000kcal/kg)	1.1429kg/kg
渣油		41816kJ/kg(10000kcal/kg)	1.4286kg/kg
液化石油气		50179kJ/kg(12000kcal/kg)	1.7143kg/kg
炼厂干气		46055kJ/kg(11000kcal/kg)	1.5714kg/kg
油田天然气		38931kJ/m ³ (9310kcal/m ³)	1.3300kg/m ³
气田天然气		35544kJ/m ³ (9310kcal/m ³)	1.2143kg/m ³
煤矿瓦斯气		14636~16726kJ/m ³ (3500~4000kcal/m ³)	0.5000~0.5714kg/m ³
焦炉煤气		16726~17981kJ/m ³ (4000~4300kcal/m ³)	0.5714~0.6143kg/m ³
转炉煤气		4976~17160kJ/m ³	0.17~0.59kg/m ³
高炉煤气		3763kJ/m ³	0.1286kg/m ³
其他煤气	发生炉煤气	5227kJ/kg(1250kcal/m ³)	0.1786kg/m ³
	重油催化裂解煤气	19235kJ/kg(4600kcal/m ³)	0.6571kg/m ³
	重油热裂解煤气	35544kJ/kg(8500kcal/m ³)	1.2143kg/m ³
	焦炭制气	16308kJ/kg(3900kcal/m ³)	0.5571kg/m ³
	压力气化煤气	15054kJ/kg(36000kcal/m ³)	0.5143kg/m ³
	水煤气	10454kJ/kg(2500kcal/m ³)	0.3571kg/m ³
粗苯		41816kJ/kg(10000kcal/m ³)	1.4286kg/kg
热力(当量值)			0.03412kg/MJ
电力(当量值)		3600kJ/(kW·h)[860kcal/(kW·h)]	0.1229kg/(kW·h)
电力(等价值)		按当年火电发电标准煤耗计算	
蒸汽(低压)		3763MJ/t(900Mcal/t)	0.1286kg/kg

注：数据引自《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2008)。表中转炉煤气值为笔者补充。

表 1-4 耗能工质能源等价值

品种	单位能耗工质耗能量	折标准煤系数
新水	2.51MJ/t(600kcal/t)	0.0857kg/t
软水	14.23MJ/t(2300kcal/t)	0.4857kg/t
除氧水	28.45MJ/t(6800kcal/t)	0.9714kg/t
压缩空气	1.17MJ/m ³ (280kcal/m ³)	0.0400kg/m ³

续表

品种	单位能耗工质耗能量	折标准煤系数
鼓风	0.88MJ/m ³ (210kcal/m ³)	0.0300kg/m ³
氧气	11.72MJ/m ³ (2800kcal/m ³)	0.4000kg/m ³
氮气(作副产品时)	11.72MJ/m ³ (2800kcal/m ³)	0.4000kg/m ³
氮气(作主产品时)	19.66MJ/m ³ (4700kcal/m ³)	0.6714kg/m ³
二氧化碳	6.28MJ/t(1500kcal/t)	0.2143kg/m ³
乙炔	243.67MJ/m ³	8.3143kg/m ³
电石	60.92MJ/kg	2.0786kg/kg

注：耗能工质是指在生产过程中所消耗的不作为原料使用、也不进入产品、在生产或制取时需要直接消耗能源的工作物质。

二、节能的基本原理

1. 节能概念

所谓节能，即节约能源。它是指采取技术上可行、经济上合理、环境和社会可接受的一切措施，来提高能源资源的利用效率（世界能源委员会 1979 年提出的定义）。节能就是尽可能地减少能源消耗量，生产出与原来数量、质量相同的产品；或者是以相同数量的能源消耗量，生产出比原来数量更多或质量更好的产品。在具体节能工作中，不仅要注意节约能源，而且还要注意节约非能源。

工业节能工作应从直接节能与间接节能两个方面开展。一是应用先进的生产工艺或技术，以提高生产过程中的能源利用效率，从而降低单位产品能耗，称之为直接节能；二是通过技术和管理手段减少原料、辅料消耗，减少废弃物的产生，加强废弃物和余热余能的回收利用，调整产品结构，提高产品质量，延长设备寿命等措施降低能耗，称之为间接节能。

2. 能量及其转换基础

能量有机械能、热能、电能、磁能、化学能、核能、光/辐射能等多种形态，这些形态可以相互转换。能量根据可转换性的不同，可以分为三类。

第一类是可以不受限制的、完全转换的能量。例如电能、机械能、位能（水力等）、动能（风力等），称为高级能。从本质上说，高级能是完全有序运动的能量。它们在数量上和质量上是完全统一的。

第二类是具有部分转换能力的能量。例如，热能、物质的热力学能、焓等。它只能一部分转换为第一类有序运动的能量，即根据热力学第二定律，热能不可能连续地、全部地转变为功，它的热效率总是小于 1。这类能属于中级能。它的数量与质量是不统一的。

第三类是受自然界环境所限，完全没有转换能力的能量。例如处于环境状态下的大气、海洋、岩石等所具有的热力学能和焓。虽然它具有相当数量的能量，但在技术上无法使它转变为功。所以，它们是只有数量而无质量的能量，称为低级能。

热力学中定义：在环境条件下，能量中可转化为有用功的最高份额称为该能量的焓。或者，热力系只与环境相互作用，从任意状态可逆地变化到与环境相平衡的状态时，做出的最大有用功称为该热力系的焓。在环境条件下，不可能转化为有用功的那部分能量称为熵。

能量和焓、熵的关系如图 1-1 所示。

(1) 焓 焓是为了衡量能量的可用性而提出的指标，也称为“可用能”。它是指物质或物流由于其所处的状态与某一基准状态不平衡而具有的做功能力。焓是系统与环境相互作用的产物，是以给定环境为基准的相对量。焓一般分为物理焓和化学焓。

物理焔是指系统经可逆物理过程达到约束性死态时,能最大限度转化为有用功的那部分能量。换句话说,如果以物理死态为基准,物理焔就是处于任意状态的系统所具有的焔。

物理焔分为机械焔和热焔。其中,机械焔是由力不平衡引起的,又称压焔;而热焔则是由热不平衡引起的。

化学焔是指系统与环境之间由约束性平衡经可逆物理与化学过程达到非约束性平衡时能最大限度地转换为有用功的那部分能量。换句话说,如以非约束性死态为基准,则化学焔是系统在约束性死态下所具有的焔。

化学焔分为扩散焔和反应焔。由于某种或某些物质的浓度不平衡,系统通过可逆的扩散过程,变化到非约束性死态的浓度时,系统对外做的最大有用功称为扩散焔。由于组成物质的不平衡,系统由给定物质通过可逆化学反应,变化为环境的组成物质时,系统对外做的最大有用功称为系统的反应焔。

(2) 焔 焔是指能量中不能够转变为有用功的那部分能量,即无效能、无用功。自然环境的热能以及从环境输入、输出的热能全为焔。

(3) 能级 如前所述,任何能量 E 都由焔 (E_x) 和焔 (A_n) 两部分组成,即:

$$E = E_x + A_n \quad (1-2)$$

对于可无限转换的能量, $A_n = 0$, 如机械能、电能全部是焔, $E_x = E$; 对于不可转换的能量, $E_x = 0$, 如环境介质中的热能全为焔。不同形态的能量或物质处于不同状态时,包含的焔和焔比例各不相同。

能级 $[\Omega, \text{kJ}(\text{焔})/\text{kJ}(\text{能量})]$ 是反映能量品质的一个量,它可以定义为焔值 (E_x) 与相应总能量 (E) 之比,即:

$$\Omega = E_x / E \quad (1-3)$$

对于热能,其能级可按恒温热源与变温热源计算如下:

恒温热源:

$$\Omega = 1 - T_0 / T \quad (1-4)$$

变温热源:

$$\Omega = 1 - \frac{T_0}{T - T_0} \ln \frac{T}{T_0} \quad (1-5)$$

对于电能,其能级:

$$\Omega = 1$$

对于机械能,其能级:

$$\Omega = 1$$

化学能的能级可近似地处理为: 气体燃料 $\Omega = 0.95$; 液体燃料 $\Omega = 0.975$; 固体燃料 $\Omega = 1.0$ 。

3. 节能原理的数学表达式

工业炉窑的热效率 η 为有效利用热 (Q_{yx}) 与供给热量 (Q_{GG}) 之比,即:

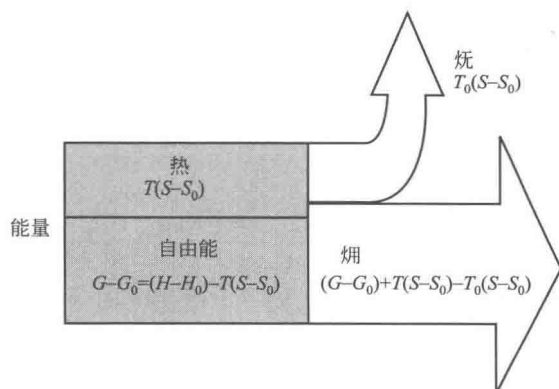


图 1-1 能量和焔、焔的关系