

中国金属学会

热工与热能

第二届年会论文集

《节能》杂志社

前 言

中国金属学会热能与热工学术委员会于1981年10月,在东北工学院召开了第二届学术年会。参加会议的代表共135人,会上宣读了68篇论文,书面交流了27篇论文资料。

宣读和交流的论文基本上反映了自1979年第一届年会(无锡会议)以来我国冶金及其有关行业中热能与热工利用方面的科学研究成果和技术开发成就,具有一定的实际价值和理论水平。

为了更有效地交流和推广年会的学术成果,编委会决定出版《论文集》。《论文集》按分组编排:(1)热能与热工,(2)炉子热工理论与数学模型,(3)炉子结构与操作,(4)燃烧技术,(5)余热利用,(6)有色冶金炉热工。考虑到会议召开至论文集出版期间情况的变化,有些论文作者对文稿作了相应的补充和修改;有的作者则没有投稿。因此,本论文集只收集了61篇论文。

《论文集》还收入了日本大阪电讯大学教授松永省吾专程来华参加本届年会时所作的学术报告。

本《论文集》是由《节能》杂志社编辑出版的。辽宁省能源学会、东北工学院和辽宁省科学技术情报研究所在此工作中给予了大力的支持,谨致谢意。

编委会 1983年8月

目 录

热 能 与 热 工

钢铁工业的节能方向和途径	周大刚、陆钟武 (1)
论燃料利用的质与量	潘华珊 (4)
从烟的观点探讨冶金工业节能的潜力和途径	徐亚鹏 (11)
能的贬值性	孙立刚 (18)
企业热能利用技术指标的探讨	杨泽荣、吴德荣 (22)
鞍钢能源现状及今后节能途径	侯君实 (31)
关于冶金工业燃料油科学管理方式的探讨	刘恒谦 (35)
重视节能工作中能源经济的研究	孙洪锋 (39)
能源利用现状与节能方向	包长庚 (43)
论钢铁节能	丁 超 (48)
降低钢铁生产的能耗	傅维贤 (51)
顶吹气体射流冲击下熔池内液体运动的数学模型	李有章 (135)

炉子热工理论与数学模型

顶、底、复合吹炼转炉熔池内流谱的试验研究	王尚槐、冯 旭 (56)
射流冲击与气泡群上浮对熔液环流运动的影响	张玉明 (61)
水力模型试验中的流动显示方法	王尚槐等 (65)
竖炉散料固定床内气体流动的数值计算与分析	阎斌生、王学志 (69)
内燃室热风炉拱顶研究	蔡正等 (77)
传热设备中电子计算机的应用方法	松永省吾 (83)
加热炉热滑轨示计算数学模型	宁宝林等 (91)
火焰炉段法预示计算数学模型	宁宝林、尚德义 (95)
考虑炉围遮蔽作用的二维炉膛的辐射热交换因子	陈海耿、宁宝林 (101)
任意波长区间辐射能力计算方法探讨	陶鑫良 (107)
均热炉炉芯钢锭加热研究	秦国光 (117)
电子计算在工业炉热平衡测定计算机中的应用	齐美龙 (123)
轧钢加热炉烟气余热利用	齐家典 (129)

炉 子 结 构 与 操 作

火焰炉热工操作的试验研究	陆钟武、杨宗山 (143)
流动粒子炉冷却能力的研究	倪学梓、焦晓渝 (148)
营口中板厂加热炉改造节能经验的分析	范福厚、杨宗山 (152)
冷发生炉煤气敞焰无氧化连续热处理炉试验研究总结	陈世海、张洪芝 (156)
多点供热连续式火焰炉热工特性的研究	王景文、陆钟武 (163)
燃煤粉轧钢加热炉几项改造措施的分析与实践	井礼梧 (171)

表面温度感受器·····	宁宝林、杨泽宽 (176)
均热炉除渣方式的比较·····	魏保严 (178)
工业炉(窑)节能的途径·····	包思惠 (182)
从改进炉温制度入手,降低燃料消耗·····	成宗义 (188)
步进式加热炉在鞍钢二小型的生产实践·····	高城、丁超 (192)
推钢式连续加热炉合理热工制度的探讨·····	杨自行 (198)

燃 烧 技 术

关于扩散火焰浓度场的研究·····	郭伯伟、蔡久菊 (202)
燃料热值对炉子热耗的影响·····	邱国仕 (208)
低空气过剩系数燃烧·····	李君惠 (214)
不完全燃烧产物的特性·····	杨泽宽、薛嘉庆 (220)
双旋流数计算与平焰烧咀设计·····	孙昌楷 (227)
平、直焰两用旋流自身予热烧咀·····	孙昌楷、孙富熙 (233)
旋流燃烧噪声的分析与防治·····	孙昌楷、孙富熙 (237)
我厂半煤气炉·····	梁学成 (241)
往复炉排锻造加热炉的燃烧分析及其应用·····	王 德 (244)
平展射流气动特性及其形成机理的初步探讨·····	李旭坚、韩昭金 (248)

余 热 利 用

空气喷流换热器在加热炉上的应用·····	张洪芝、陈世海 (254)
喷流换热的最佳结构参数·····	池桂兴 (258)
新结构换热器的试验研究·····	董致和 (262)
GH-1型喷射式抽气热电偶·····	杨泽宽 (267)
环形加热炉予热空气的节能效果分析及有关问题讨论·····	贾鸿涛 (271)
第二代顶燃式热风炉·····	刘德华、邵景文 (276)
新型高温热风炉·····	高成勳 (280)
直热再生式烘砖炉·····	郭茂先、刘海臣 (285)

有 色 冶 金 炉 热 工

论铜冶金工业的节能问题·····	凌昌贵 (291)
锡反射炉大型化的探讨·····	周振刚、郭森魁 (295)
流态化技术在铅镁工业中的应用·····	卢全义 (301)
延迟焦燃烧设备探讨·····	李彦林 (306)
我国炭素焙烧炉选型探讨·····	王名声 (310)
有色金属加工用炉热管理中节能技术的探讨·····	杨士明 (313)
论控制燃烧空气量及环境保护·····	王泰福 (319)
热风强化密闭鼓风炉·····	袁希兴 (326)

钢铁工业的节能方向和途径

东北工学院 陆钟武 鞍山热能研究所 周大刚

为了更好地完成钢铁工业的节能任务,必须明确其节能的方向和途径。然而,钢铁工业工序多,过程复杂,范围广,不易掌握其全貌。而且,现在从事节能工作的人员来自各个不同的专业,不易统一认识。所以,从总体上讨论一下节能问题是非常重要的。

围绕这个问题,有些文章已经提出了很好的意见。本文拟从载能体的概念谈起,就节能的方向和途径以及节能工作中的最优化问题提一些看法。

一、概念

1. 凡是在制取过程中消耗了能量的物体,以及本身能产生能量的物体,都叫载能体。钢铁工业的一次能源如煤、油、天然气、电等是载能体,因为它们能产生能量。二次能源如各种煤气、水、压缩空气、蒸汽、氧、氮等也是载能体。钢铁工业的各种原材料,如矿石、烧结矿、球团矿、石灰石、铁合金、耐火材料、轧辊、钢锭模等,同样是载能体,因为它们在制取过程中都消耗了能量。

地下未开采的天然矿石的载能量等于零。散在废钢的载能量一般也取为零。

单位重量(体积)物体的载能量,称为该物体的能值,也有称为当量能的^[1]。

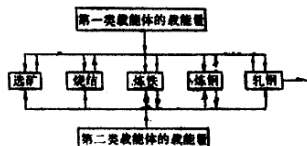
钢铁工业中的载能体可划分为两类:

第一类载能体,包括各种原材料以及水、压缩空气、蒸汽、氧、氮、电等。这类物体的载能量等于它们在制备过程中所消耗的各种原材料、动力和燃料的载能量的总和。

第二类载能体,是各种燃料。燃料的能值等于其发热值加上它在开采和人工精制(改制)过程中所花费的能量。

不同国家、不同作者提供的钢铁厂常用的各种原材料和燃料的能值数据^{[2][3]}是不同的,因为物体的能值是随生产条件和技术水平而变化的。

2. 在钢铁联合企业内部,有许多生产单位,它们在能量方面形成错综复杂的关系。为研究和计算能耗问题。这些关系可简化如下图:



图中只标明了选矿、烧结、炼铁、炼钢、轧钢这五个环节组成的主流程。至于其它各生产单位,则一律看作是主流程所需各种原材料、燃料和动力的来源。主流程中的上一道工序当然也给下一道工序提供原料。这些原材料、燃料和动力都载有一定的能量,图中的实践箭头表明了这些载能量的流向。

生产过程中从某一环节回收的燃料或其它物体不一定用于该环节本身,许多情况下这些物体将进入全厂的物流通中去。图中用虚线箭头表示了这些物体载能量的流向。

由图可知,对于某一生产环节而言,

$$[\text{产品的载能量}] = [\text{投入的总载能量}] - [\text{回收的载能量}]$$

产品的载能量,除以产品的重量,就是单位重量产品的能耗, kcal/t。

二、节能方向

由上述概念可知,钢铁工业节能的方向有三:降低各生产环节中第一类载能体的单耗;降低各生产环节中第二类载能体的单耗;回收各生产环节散失的载能体和各种能量。

1. 降低第一类载能体的单耗,在一定意义上,是节能的前提。

在各种原材料之中,尤其要注意那些能值高的原材料。在这方面,铁水占有特别突出的地位。我国每吨钢的铁水耗量过大,整个钢铁工业的钢铁比过大(1979年为1.065,远大于西方各国)。只此一项,我国每年多耗能源即达一千万吨标煤。

耐火材料、铁合金、石灰、钢锭模、轧辊等的单耗都偏高,而许多工序的成品率、合格率又偏低。这些都是影响吨钢能耗的重要因素。

钢铁工业的动力消耗在吨钢能耗中占的比重也很大。为了降低吨钢能耗,对此必须给予足够的重视。

原材料和动力消耗的高低,与钢铁工业生产结构、工艺操作和管理水平等密切相关。本文第3节中的“节能途径分析表”将提供进一步的说明。

2. 降低各生产环节的燃料(第二类载能体)单耗,是钢铁工业节能的重要方向。

当前的问题是许多生产环节的能耗过高。主要原因是:炉窑热效率低、钢铁工业布局不合理、转炉钢比低、连铸比低、原燃料条件较差。

炉窑热效率低是因为:作业率低、大马拉小车、炉体绝热差、冷却件太多、燃烧不好、热负荷调节不当以及空气不预热或预热温度低等问题还普遍存在。

钢铁工业布局不合理,主要指有些工厂或有铁无钢,或有钢无铁,或有钢无材,以致铁水铸成块经长途运输再化铁炼钢,钢锭、钢坯长途运输再加热轧制,浪费许多燃料。

我国的转炉钢比(1979年为37.5%)、连铸比(4%),都远低于西方各国。这对吨钢能耗的影响很大。

精料问题,不仅对炼铁工序很重要,而且对其他许多工序都很重要。可惜至今尚未普遍地引起重视。

3. 回收生产过程中散失的载能体和各种能量,是节能工作中不可缺少的组成部分。

当前更有必要强调这个节能方向,因为我国钢铁企业的煤气放散问题还很严重,各种余热的利用程度还很低,废旧物资的回收工作还未引起重视,炉渣、废水、废气、泛汽等的综合利用工作还未普遍开展起来。

三、节能的途径与措施

沿上述节能方向,分析生产的现状,即分析与能耗有关的各生产因素,就可进一步找到节能的途径和措施,分析节能的潜力。

1. 节能途径分析表

节能途径分析表的纵向分为三行(I、II、III),各代表一个节能方向;横向分为十一列(1、2、3……11),各代表一组生产因素;表中共 $3 \times 11 = 33$ 个方格,是一个方阵。每一个方格均按其所在的行和列进行编号,如(I, 3), (II, 5)等。方格中填写节能途径。作为例子,我们在上述表格中已填写了一些节能的途径。每一个节能途径既属于某一节能方向,同时又属于某一组生产因素。这种分析方法适用范围较广,可大到整个钢铁工业,小到一生产车间。

钢铁工业节能途径分析表

1. 生产布局	2. 外部条件	3. 原燃材料	4. 工艺过程	5. 工艺设备	6. 辅助设备	7. 工艺操作	8. 热工操作	9. 产品结构	10. 副产品	11. 废弃物及废能
降低第一类能源单耗 (I)	①降低空载系数 ②降低发电、供水耗电 ③降低耗电 ④降低耗电	①提高热效率 ②提高炉热效率 ③采用合成燃料 ④采用活性石灰 ⑤提高铁合金质量	①提高电炉比例 (在电力、废钢充足条件下) ②提高转炉连铸比例 ③提高连铸比例	①连续铸造、挖潜改造 ②更新换代、引进新设备、设备大型化	①用高效风机、电动机、泵等 ②力配变 ③液力耦合器等节电部件及装置	①提高成材率、合格率低 ②降低原料消耗、辅助材料、工具和动力单耗	①延长炉窑寿命, 降低耐火材料消耗 ②提高部件消耗 ③提高产品与工艺匹配、设备对路	①降低铁钢比, 以换代铁 ②提高低耗产品比例 ③产品与工艺匹配、设备对路		
	(I, 1)	(I, 2)	(I, 3)	(I, 4)	(I, 5)	(I, 6)	(I, 7)	(I, 8)	(I, 9)	(I, 10)
降低第二类能源单耗 (II)	①解决铁、钢、材不匹配的问题 ②联合企业内部合理布局	①提高运输效率 ②提高入炉块矿、焦炭等的高温强度 ③多用散状燃料 ④提高耐火材料	①提高转炉比例 ②提高连铸比例 ③以球团代替烧结 ④直接还原 ⑤提高铁合金质量	①延长寿命, 合理挖潜, 提高作业率 ②生产配套, 解决“大马拉小车”等问题 ③采用蓄热、换热等方法, 提高风温 ④加强炉体密封和保温, 减少水冷件	①延长寿命, 合理挖潜, 提高作业率 ②生产配套, 解决“大马拉小车”等问题 ③采用蓄热、换热等方法, 提高风温 ④加强炉体密封和保温, 减少水冷件	①延长寿命, 合理挖潜, 提高作业率 ②生产配套, 解决“大马拉小车”等问题 ③采用蓄热、换热等方法, 提高风温 ④加强炉体密封和保温, 减少水冷件	①提高成材率、合格率低 ②降低原料消耗、辅助材料、工具和动力单耗	①企业内部的均衡生产 (热负荷、冷负荷、空燃比等) ②提高热效率		
	(II, 1)	(II, 2)	(II, 3)	(II, 4)	(II, 5)	(II, 6)	(II, 7)	(II, 8)	(II, 9)	(II, 10)
回收散失的能源及废能 (I)									④回收黑炉、高炉、转炉废气, 并综合利用 ⑤废气、氮、稀有气体的回收、综合利用 ⑥废能 (如高炉余压) 的利用, 蒸汽多联使用 ⑦减少煤气、动力损耗、放散	

2. 节能潜力及其分析

在使用上述方法时,不应逐个地研究全部方案,相应地填入节能途径或措施,而且应估算各项节能措施的效果。估算工作的难易随情况而异,有时只能依靠生产经验作出粗略的估计。

针对具体情况,可以人为地给各项因素规定一个基准值(零值)。若实际数值高于(或低于)该基准值,即说明有潜力。这样,节能途径分析表就可以看成一幅立体图象,有如沙盘,峰起谷落,明显地看到节能潜力的大小和“位置”。

必须指出,在估算各种节能途径的效果时,一定要全面,切不可顾此失彼。实际上,许多节能措施在某一方面带来节能效果的同时,在另一方面却增加了能量消耗。二者的差值,才是真正的节能效果。

四、节能工作中的最优化方法

最优化方法已逐步在各技术领域得到应用,如炉子热工方面最优化方法已引起学者们的注意^{[1][6]}。在钢铁工业的节能工作中也应充分重视这个方法。在许多情况下,只有利用这种方法才能得到最大的节能效果。

用最优化方法研究能耗问题时,应以待定参数为变量建立能耗的数学表达式,把它作为目标函数,然后求函数的极小值,从而确定待定参数的数值。必须指出,在建立目标函数时,应把两类载体所载的能量都考虑在内。此外,还须注意,从省能的角度得到的合理参数,不一定在经济上是最合算的,因为在分析经济上的合理性时,不仅考虑能源问题,还要考虑其它许多因素。在分析节能措施时应讲究经济效益,进行可行性研究,估计其回收年限等。解决实际问题,最好将二者结合起来考虑。

本文经冶金部规划设计院朱志学和徐德锐、北京钢铁设计总院温作汀和沈昌炽、首钢郭廷杰和鞍山热能研究所孙鸿铮等同志提供了宝贵意见后修改写成,谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] 增子 升,制铁所における省能中省能の理论。
- [2] 藤井 隆ら,炼钢过程的节能,钢铁工业节能译文集,1980年4月,23。
- [3] Frost, P.D. et al., Energy Consumption in the Primary Production of Metals, Iron and Steel Engineer, 1979, №.4, 50。
- [4] Глиников, М.А. и др., С аль, 1975, №2, 176。
- [5] Бутковский, А.Г. и др., ИЗВ.ВУЗ.ЧЕР.Мет.1974, №5, 163, №11, 170, 1975, №1, 163。

论燃料利用的质与量

武汉钢铁设计研究院 潘华珊

内 容 提 要

本文从物理化学和工程热力学统一的角度,分析燃料有效能的含义,提出对有争议的命名方式的初步意见。用有效能分析燃料的质量和能质利用的效率,并进一步用实例运算,说明燃料混合过程的不可逆损失比率是较小的。指出在节能工作中,应根据客观条件,同时并重燃料的质与量。为达到最大的节能效果,探索新的节能途径。

一、科学分析和评价燃料质量的新标准—有效能的物理化学含义和命名浅见

在生产中,燃料的品质对节能效果有很大的影响,根据物理化学的观点,同样多热量的不同质燃料,其热力学效率是不同的。凡单位燃料有效能大的,其能质利用效率就高。因此,有效能是衡量燃料质量的指标,它比传统的热量概念,能更科学地反映出燃料品质的因素。

目前,关于有效能的定义与命名,国内外均有争论。个人认为,应该从工程热力学和物理化学的范畴,将它们统一起来。

1. 从有效能的通俗含义而言,是不同质的能源间的一种等价的度量标准,是能源在环境状态下能转化为最大技术功部份的本领。

2. 用物理化学严谨的术语讲,有效能为物系以环境温度为准态时的自由焓变。因为:

(1) 根据热力学第一定律,在一稳流物系中,当无动能和位能变化时(见图1、图2)

$$Q - W_s = \Delta I + \Delta(\text{动能}) + \Delta(\text{位能}) = \Delta I$$

在环境温度 T_0 和可逆情况下,系统对环境所作的轴功(即扣除膨胀功外的实际功)是理想的最大技术功,亦即为 T_0 基准态下的自由焓变,此即为有效能的含义。

$$\begin{aligned} \therefore W_{s, \text{可逆}} &= Q_{\text{可逆}} - \Delta I = W_s + L \quad (\text{损耗功}) = -Q_0 - \Delta I = -T_0 \Delta S_0 - \Delta I = T_0 \Delta S \\ &- \Delta I = -\Delta(I - T S)_{T_0} = -\Delta G = G_1 - G_0 > 0 \end{aligned}$$

$$\therefore W_{s, \text{可逆}} = -\Delta(I - T S)_{T_0} = -\Delta G = E \quad (\text{有效能})$$

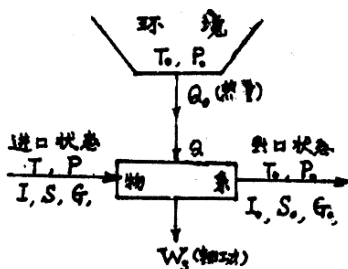


图1 物系与环境间的流图

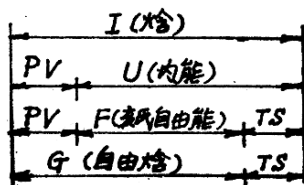


图2 物理化学参数之间关系图

(2) 根据热力学第二定律不可逆过程熵增原理,实际过程 $L \neq 0$, $(\Delta I)_{T_0} = 0$,

$$\begin{aligned} \therefore L &= E - W_s = (T_0 \Delta S - \Delta I) - (Q - \Delta I) = T_0 \Delta S + Q_0 = T_0 \Delta S + T_0 \Delta S_0 \\ &= T_0 (\Delta S + \Delta S_0) = T_0 \Delta S_1 > 0 \end{aligned}$$

ΔS_1 为物系和环境的总熵差,当过程的不可逆程度愈大, ΔS_1 愈大,作功本领损失 L 愈大,表明实际用能过程中能质有贬值趋势,即状态变化前后的物系有效能值是不等的,这正是状态函数的特性,说明有效能不随过程而变,并可用积分求值。

(3) 关于译名的浅见

自1956年以来,Z·Rant将能量分为两部分,即Exergy和Anergy,根据物理化学的概念,Exergy实际上就是 $\int_1^0 dG$,Anergy就是 $T_0 \int_1^0 dS$, $\therefore I = G + T S$

$$\therefore \text{Exergy} + \text{Anergy} = I_1 - I_0 = \int_1^0 dG + T_0 \int_1^0 dS = -\Delta G - T_0 \Delta S = -\int_1^0 dI$$

因此并未越出 $G = I - TS$ 的范畴。由于物理化学参量的含义是严谨的，而工程热力学仅为物理化学中热力学部分的一个分支，它不能替代整个物理化学过程。犹如在特定的以 T_0 为基准态下的物系自由焓变，不能替代通式 $G = I - TS$ 一样，所以，个人主张除了在能源工作中，应积极用此有效能的物理化学含义外，在命名问题上，应该严谨，应与现有的物理化学参量统一起来。对已有的物理化学定义不宜再标新立异，以至玄惑视听。个人认为它实际仅为 T_0 基准态下的自由焓变，或者从“自由”和“有效”的概念去理解，至多称之为“有效能”。

二、关于燃料有效能的计算

1. 能质利用效率的计算

(1) 根据热力学第一定律，能量利用的热力学理论最大效率为卡诺理想循环热机效率

$$\eta_1 = \frac{T - T_0}{T} < 100\%$$

∴ 有效能（热量能转化为最大技术功部分）

$$E = Q_{\text{可逆}} \times \frac{T - T_0}{T} = Q_{\text{可逆}} \eta_1$$

(2) 根据热力学第二定律换算的能质利用效率 $\eta_2 = \frac{\text{出来有效能}}{\text{进入有效率}} = \frac{E - L}{E} \leq 100\%$

当 $L = L_{\text{可逆}} = T_0 \Delta S_{\text{可逆}} = T_0 \times 0 = 0$ 时， $\eta_2 = 100\%$

(3) 有效能与偏摩尔物理量

由于有效能为状态函数，实际不可逆过程因熵差增值，有效能值降低，可用物理化学中偏摩尔物理量 (Partial Molar Property) 概念求值。不可逆过程变化后的偏摩尔物理量以 $\bar{M}$ 表示， $\bar{M}$ 可为 $\bar{S}$ 、 $\bar{G}$ 、 $\bar{I}$ 等状态函数。不等于变化前的摩尔物理量 M ，但等于各偏摩尔分量与摩尔分数乘积之和⁽¹⁾⁽²⁾，即：

$$\because \bar{M} = \bar{M}(X_1, X_2, \dots, X_i)_{T, P}$$

$$\therefore dM = \sum_i \left(\frac{\partial \bar{M}}{\partial X_i} \right)_{T, P, j} dX_i = \sum_i \bar{M}_i dX_i \quad \text{或} \quad \bar{M} = \sum_i \bar{M}_i X_i$$

(j 为除 i 组分以外的其他组分)

$$\therefore \sum_i \Delta S_i < \sum_i \Delta \bar{S}_i, \quad \left| \sum_i \Delta G_i \right| > \left| \sum_i \Delta \bar{G}_i \right| \quad \text{即} \quad E > \bar{E},$$

$$\therefore \eta_2 = \frac{E - L}{E} \times 100\% = \frac{\bar{E}}{E} \times 100\%$$

2. 气体混合的有效能损失的计算

气体的掺混属于不可逆的自动过程，混合前后有效能有损失。如恒温恒压下有 i 种气体燃料，

其总摩尔数 $n = \sum_i n_i$ ，掺混后 i 组分的摩尔分数为：

$$X_i = \frac{n_i}{n} = \frac{P_i}{P} = \frac{V_i}{V}, \quad \sum_i X_i = 100\% \quad (P, V \text{ 为压力与体积})$$

$$\because \text{恒温下内能不变 } (\Delta U)_T = 0, \quad \therefore dS = \frac{PdV}{T}$$

由于S为状态函数，故可用积分求之：

$$\therefore \Delta S_i = \int_{V_i}^V n_i R \frac{dV}{V} = n_i R \ln \frac{V}{V_i} = n_i R \ln \frac{1}{X_i} = -n_i R \ln X_i$$

$$R = 0.0887 \text{ kcal/NM}^3 \cdot \text{K} = 1.987 \text{ kcal/kg, mol} \cdot \text{K}$$

$$\because X_i < 1, \therefore \ln X_i < 0, \therefore \Delta S_i > 0, \therefore E - \bar{E} = L = T_0 \Delta S_i > 0$$

$\therefore \eta_2$ 降。混合后总有效能损失为：

$$L = T_0 \Delta S_i = T_0 \sum_i \Delta S_i = -T_0 \sum_i (n_i R \ln X_i) = -T_0 n R \sum_i X_i \ln X_i$$

而单位摩尔的混合有效能损失为：

$$l = -T_0 R \sum_i X_i \ln X_i > 0$$

$\therefore$ 理论上讲，用单一的煤气比用混合煤气的能质利用效率 η_2 为高

3. 燃料的化学有效能经验计算

根据Z·Rant提出的经验式，计算燃料的化学有效能 E_c 如下：

$$\text{气体燃料 } E_c = 0.95 H_h = 0.95 (H_i + 600 (9H + \omega))$$

$$\text{液体燃料 } E_c = 0.975 H_h = 0.975 (H_i + 600 (9H + \omega))$$

$$\text{固体燃料 } E_c = H_i + 600 \omega$$

H_h 、 H_i 各为燃料的高及低发热量 kcal/kg， H 及 ω 各为氢及水分的重量百分数含量。

4. 气体燃料有效能理论公式计算

$\because$ 气体燃料总的有效能不易直接由熵，焓等求得，因此分成温度、压力和化学能三部分。求单位燃料时以小写字母表示各物理化学参量， $e = e(T, P, C)$ (C 为化学能)

$$\therefore de = \left(\frac{\partial e}{\partial T} \right)_{P,C} dT + \left(\frac{\partial e}{\partial P} \right)_{T,C} dP + \left(\frac{\partial e}{\partial C} \right)_{T,P} dC = de_T + de_P + de_C$$

由于有效能为物系以 T_0 为基准态时的自由焓变，即 $e = -\Delta g = g_i - g_0 = T_0 \Delta S - \Delta i$ ，所以，

(1) 气体燃料高温位 T 时的有效能

$$e_T = \int_T^{T_0} \left(\frac{\partial e}{\partial T} \right)_{P,C} dT = \int_T^{T_0} de_T = T_0 \Delta S - \Delta i = C_P T_0 \int_T^{T_0} \frac{dT}{T} - C_P \int_T^{T_0} dT$$

$$= C_P \left[T_0 \ln \frac{T_0}{T} - (T_0 - T) \right]$$

$$\text{或 } e_T = C_P \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] = (i - i_0) \left[1 - \frac{T_0}{T - T_0} \ln \frac{T}{T_0} \right]$$

$$= (i - i_0) \lambda$$

$$\lambda = 1 - \frac{T_0}{T - T_0} \ln \frac{T}{T_0} < 100\% \text{ 称为转化率，由上述推演可知，} e_T \text{ 有效能为焓变 } \Delta i = i - i_0$$

的有效转化部分，即以 T_0 为基准态时的自由焓变部分。

(2) 气体燃料的化学有效能

$$e_c = \int_C^{C_0} \left(\frac{\partial e}{\partial C} \right)_{T,P} dC = T_0 \Delta S_c - \Delta i = T_0 \Delta S_c + \Delta H_i$$

ΔS_c = 生成物与反应物的熵差, $\Delta H_i = -\Delta i$ = 反应物与生成物的焓差即低发热量。

(3) 气体燃料压力有效能

$$e_p = \int_p^{p_0} \left(\frac{\partial e}{\partial p} \right)_{T,c} dp = \int_p^{p_0} de_p = T_0 \Delta S - \Delta i \quad (1)$$

$$\because di = d(u + pv) = du + p dv + v dp = T ds + v dp$$

$$\therefore \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_T = T \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T + v \quad (2)$$

• 根据Maxwell关系式, $\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = - \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T$, 代入 (2) 式

$$\therefore \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_T = v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p, \quad \because i = i(T, p)_c$$

$$\therefore di = \left(\frac{\partial i}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_T dp = C_p dT + \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp \quad (3)$$

$$\text{又} \because dq_{\text{可逆}} = T_0 ds = C_p dT \quad (4)$$

将 (3), (4) 式代入 (1) 式微分式得:

$$\begin{aligned} de_p &= T_0 ds - di = T_0 ds - C_p dT - \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp \\ &= - \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp = - \left[\frac{RT_0}{p} - T_0 \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp, \end{aligned}$$

$$(T = T_0 = \text{常数时}), \text{又} \because \frac{V}{T} = \frac{R}{p}$$

$$\begin{aligned} \therefore e_p &= -RT_0 \int_p^{p_0} \frac{dp}{p} + \frac{RT_0}{p} \int_p^{p_0} dp = RT_0 \left[-\ln \frac{p_0}{p} + \frac{p_0}{p} - \frac{p}{p_0} \right] \\ &= RT_0 \left[\left(\frac{p_0}{p} - 1 \right) + \ln \frac{p_0}{p} \right] \end{aligned}$$

$$\text{注: } \because dg = d(i - T S) = di - T ds - S dT = v dp - S dT \quad (5)$$

$$\text{又} \because g = g(p, T), \therefore dg = \left(\frac{\partial g}{\partial p} \right)_T dp + \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_p dT \quad (6)$$

$$\text{对比 (5), (6) 式知} \left(\frac{\partial g}{\partial p} \right)_T = v, \quad \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_p = -s$$

$$\therefore \frac{\partial^2 g}{\partial p \partial T} = \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p, \quad \therefore \frac{\partial^2 g}{\partial T \partial p} = - \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T,$$

$$\therefore \frac{\partial^2 g}{\partial p \partial T} = \frac{\partial^2 g}{\partial T \partial p}, \quad \therefore \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = - \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T. \quad \text{是为Maxwell关系式。}$$

三、实例

1. 用有效能概念解释重油掺水, 乳化燃料节油的机理。

重油掺水乳化燃料节油机理在国内曾有争论, 有人认为因此增加了 $CO + H_2$ 成分而节约了

燃料,从有效能原理分析,由于掺入了水,有效能是负值,只能使进料总有效能降低。

例如大庆无水基重油 $H_h = 10747 \text{ kcal/kg}$, 来油含水 0.35% , 在 90°C 时掺水 15% 乳化, $t_0 = 25^\circ\text{C}$, 重油比热 $C_p = 0.5 \text{ kcal/kg}\cdot\text{K}$, 重油的有效能:

$$e = e_T + e_C = C_p \left[T_0 \ln \frac{T_0}{T} - (T_0 - T) \right] + 0.975 H_h$$

$$= 0.5 \left[298.15 \ln \frac{298.15}{363.15} - (298.15 - 363.15) \right] + 0.975 \times 10747 \times (1 - 0.35\%)$$

$$= 3.1 + 10442 \text{ kcal/kg}$$

掺水 15% (∵乳化为非自动混合过程, 计算可按如下) 水的有效能

$$e_w = (T_0 \Delta S - \Delta i) \times 0.15 = (298.15 (2.0436 - 1.7858) - (608.2 - 89.98)) \times 0.15$$

$$= -66.2 \text{ kcal/kg 重油}$$

∴ 乳化重油燃料的有效能

$$e_L = e_T + e_C + e_w = 3.1 + 10442 - 66.2 = 10379 \text{ kcal/kg 重油}$$

$$\text{掺水损失有效能为 } \frac{66.2}{10442 + 3.1} = 0.63\%$$

查 蒸 汽 参 数 表	i kcal/kg	S kcal/kg
水 90°C	89.98	1.7858
汽 25°C	608.2	2.0436

∴ 不但不能增加燃料的有效能, 反而有所降低, 但节油主要是普通类型燃油烧咀, 不可避免的会产生多量雾化不好的液滴。由于燃烧气化不全就会热裂, 而生成活性差难燃之炭黑, 造成燃料利用的损失。油掺水形成油包水乳液燃烧时, 中心水滴汽化使油滴二次雾化, 油雾更易分散气化, 达到充分燃烧。它只是改善了燃烧条件, 提高了燃料品质利用效率而已。因为油掺水后, 还有 0.63% 左右的有效能损失, 因此, 若采用再循环自热气化式或予热式燃油烧咀³, 使油雾在燃烧前达到充分气化, 这样, 比油掺水的节油效果还要好。

2. 城市煤气是否掺混供气

某城市55万人, 采用就近天然气供民用, 按定额 $0.55 \times 10^6 \text{ kcal/人年}$, 但天然气源只能满足 $275 \times 10^6 \text{ kcal/年}$, 试评述其余不足人口用煤或掺水煤气的燃料利用效果。

已知民用煤气 CO 安全限额 $\leq 10\%$, 天然气的 $H_h = 9000 \text{ kcal/NM}^3$, $H_L = 8110 \text{ kcal/NM}^3$, $\text{CO}\% = 0$, 水煤气 $H_h = 2740 \text{ kcal/NM}^3$, $H_L = 2490 \text{ kcal/NM}^3$, $\text{CO}\% = 38$

经计算该地区天然气源, 只能满足 $275 \times 10^6 / 0.55 \times 10^6 = 500,000$ 人, 尚缺 5 万人的民用燃料, 若用水煤气混入, 需 $5 \times 0.55 \times 10^6 \times 10^4 = 27.5 \times 10^6 \text{ kcal/年}$, 混合摩尔分数比 $X_{NG} : X_{WG} = 0.7543 : 0.2457$, $X_{NG} + X_{WG} = 100\%$

∴ 混合有效能损失

$$L = -0.0887 \times 298.15 (75.43\% \ln 0.7543 + 24.57\% \ln 0.2457) = 14.75 \text{ kcal/NM}^3$$

混合后 CO 含量 $= 0.2457 \times 0.38 = 9.3\% < 10\%$, 合格。

$$\text{混合后的 } H_L = 0.2457 \times 2490 + 0.7543 \times 8110 = 6730 \text{ kcal/NM}^3$$

混合损失占混前煤气总有效能的比例

$$= \frac{14.75}{0.95(9000 \times 0.7543 + 2740 \times 0.2457)} = 0.21\% \text{ 甚小}$$

∴ 混合燃料利用率为混前的99.79%，能质利用效率降低甚小。由于一般民用燃料热效率烧煤仅为15~20%，烧煤气为55~60%，约为烧煤的三倍，∴ 直接烧煤时5万人口需

$$\frac{3 \times 27.5 \times 10^9}{7 \times 10^{10}} = 1.179 \text{ 万吨/年标准煤，而烧掺混水煤气的天然气时，当水煤气气化效率为}$$

$$65\% \text{ 时，需 } \frac{27.5 \times 10^9}{65\% \times 99.79\% \times 7 \times 10^{10}} = 6057 \text{ 吨/年标准煤，可节约5700余吨/年标准煤。}$$

上述计算说明，在天然气源短缺地区，由于民用煤气的安全要求，当上大规模价廉，无污染或少污染的煤的气化工艺还有困难的条件下，不能单独供应工艺流程较简单的普通水煤气，或发生炉煤气含CO%高的煤气品种时，不混单烧天然气的煤气，虽然用户的能质利用效率会略高，但由于地区部分民用用户只好直接烧煤，该地区民用燃料的综合节能效果反而较差。实际上，在上海等城市煤气供应中，常用焦炉煤气掺混水煤气或炭化炉煤气掺混部分水煤气作民用气源，其混合供气发热量可为3350kcal/NM³左右，就是这个缘故。

3. 燃料掺合使用影响有效能值的概念

当掺合可以互溶的液体和液体或气体和气体时，属自动的不可逆熵增过程，有效能会有损失，因此各种燃料最好不混单烧使用，这样能质利用效率最高。实际上，对某些工序单烧低的有效能燃料技术上还有困难的，这样掺合烧时，才能达到综合利用和节约能源的目的，既减少了外购有效能高的燃料，又减少了低有效能燃料的放散损失³。因为在掺合过程中，虽然有效能有损失，但就煤气混合而言，其损失量仅占总有效能的0.5~1.5%，比起因不混单烧而造成的放散损失要少的多。

如根据煤气平衡供应某轧钢工序H_L=1835，H_B=2020kcal/NM³混合煤气，其摩尔分数比为：

$$X_{BFG} : X_{COG} : X_{LDG} = 0.6362 : 0.2493 : 0.1145, \sum X_i = 100\%$$

$$\text{混合损失 } L = -RT_0 \sum X_i \ln X_i = -0.0887 \times 298.15 (0.6362 \ln 0.6362 + 0.2493 \ln 0.2493 + 0.1145 \ln 0.1145) = 23.47 \text{ kcal/NM}^3$$

$$\text{仅占总量的 } \frac{23.47}{2020 \times 0.95} = 1.22\%$$

假如不混单烧，由于BFG发热量太低H_B=850kcal/NM³当一些工序不能使用被迫放散，需另外购重油、天然气等弥补时，则放散损失为：

$$\frac{0.95 \times 0.6362 \times 850}{0.95 \times 2020} = 26.8\%，是混合损失有效能的21.9倍。所以，因地制宜地混烧反而$$

会节能。

4. 高炉煤气有效能的质量分析

已知炉容1513M³，顶压1表压，煤气温度205℃，流量19万NM³/h环境温度25℃，高炉煤气组成：CO₂15.2%，O₂0.2%，CO24%，H₂%，CH₄0.1%，N₂58.5%。试分析其物理有效能和化学有效能的数量比例。

$$\text{经计算25℃时煤气平均比热 } C_p = 0.331 \text{ kcal/M}^3 \cdot ^\circ\text{C}，\text{低发热量为 } 784.4 \text{ kcal/NM}^3$$

$$1. e_r = C_p \left[T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] = 0.331 \left[478.15 - 298.15 \times \ln \frac{478.15}{298.15} \right] \\ = 12.97 \text{ kcal/NM}^3$$

$$2. e_p = R T_0 \left[\left(\frac{P_0}{P} - 1 \right) + \ln \frac{P}{P_0} \right] = 0.0887 \times 298.15 \times \left(\left(\frac{1}{2} - 1 \right) + \ln \frac{2}{1} \right) \\ = 5.11 \text{ kcal/NM}^3$$

$$3. e_c = \Delta H_1 + T_0 \Delta S_c$$

$$\therefore 2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2, \Delta S_{c1} = (2 \times 51.05 - 2 \times 47.22 - 1 \times 49) \\ = -41.34 \text{ kcal/kmol} \cdot \text{K}$$

$$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}, \Delta S_{c2} = (2 \times 45.11 - 2 \times 31.21 - 1 \times 49) \\ = -21.20 \text{ kcal/kmol} \cdot \text{K}$$

$$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}, \Delta S_{c3} = (51.05 + 2 \times 45.11 - 44.91 - 2 \times 49) \\ = -1.64 \text{ kcal/kmol} \cdot \text{K}$$

$$\therefore \Delta S_c = \Delta S_{c1} \cdot \text{CO} + \Delta S_{c2} \cdot \text{H}_2 + \Delta S_{c3} \cdot \text{CH}_4 = -41.3 \times 0.24 - 21.2 \times 0.02 - 1.64 \\ \times 0.001 = -10.35 \text{ kcal/kmol} \cdot \text{K} = -0.462 \text{ kcal/NM}^3 \cdot \text{K}$$

$$\therefore e_c = 784.4 - 298.15 \times (-0.462) = 646.6 \text{ kcal/NM}^3$$

$$\therefore e = (e_r + e_p) + e_c = (12.97 + 5.11) + 646.6 = 664.68 \text{ kcal/NM}^3$$

其中物理有效能占总量的 $\frac{12.97 + 5.11}{664.68} = 2.7\%$, 而化学有效能占 97.3%, 数量最大,

故任何放散损失, 都会浪费较多的燃料有效能。

陕西鼓风机厂拟为炉顶余压透平发电机组配套, 容量为 2800 kW, 相当于 $2800 \times 860 = 2.4 \times 10^6 \text{ kcal/h}$, 有效能利用效率为 $\frac{2.4 \times 10^6}{(12.97 + 5.11) \times 190000} = 70\%$, 可见煤气因湿法清洗和机

械转化大约损失了 30% 左右的物理有效能。为了探索高炉煤气较高的燃料利用率, 应进一步开发干法炉顶余压透平—燃气透平联合发电的工艺模式。

参 考 文 献

- [1] 物理化学 天津大学 1978 年。
- [2] Chemical Engineers Handbook Fifth Edition
p4—43~4—75 Robert H. Perry, Cecil H. Chilton 1973
- [3] 对综合利用高炉煤气的探讨。
湖北省金属学会第一届学术年会论文集 (1979 年) 潘华瑞。
- [4] 城市煤气规划参考资料 p1—139 中国建筑工业出版社 1979 年。
- [5] Handbook of Chemistry and Physics 44th ed.

从烟的观点探讨冶金工业 节能的潜力和途径

北京钢铁学院 徐业鸣

内 容 提 要

本文首先论述了对各种热过程做烟分析的意义, 说明利用“烟”这个概念可以表示出能的量和质这两重含意, 较全面地反映了能的价值, 比热力学中传统的焓分析法更为

实用。然后从实用计算的角度计算了①各种冶金燃料的燃烧产物的焓值, ②各种冶金余能的焓值, ③加热炉的焓平衡, ④高炉的焓平衡。从这些焓的计算和分析可以看出, 许多能量转换过程的不可逆损失消耗了大量的能量, 按一般的热平衡计算是发现不了的。从焓的计算中不但能发现这些节能的潜力, 也找到了节能的途径, 为合理分配冶金能源, 正确利用冶金余能, 改善炉内热过程都有指导意义。

一、前言

人们对热过程的评价, 一般是根据热力学第一定律, 即能量守恒定律去考虑热能的收支做热平衡计算。但根据热力学第二定律, 热能具有质量(品位)的高低, 因而在使用热能时, 不能单从数量上进行分析比较, 还应当考虑能质的差异(1), 为此作者曾在上届年会上介绍了“可用能”的概念和部分计算方法(2)。“可用能”国内统称为“焓”, 即热源与环境达平衡时, 向外界所能转换的最大的有效能。

近年来国内外有不少介绍对热工过程进行焓的分析好的文章(3)(4)(5)(6)(7), 日本80年制定了“有效能评价方法通则”, 和“热平衡通则”一样做为国家标准(JIS), 用来评价各种热工设备的热能利用水平。

无论在国内或国外, 至今仍有人以焓分析法与熵分析法的结果相同为由, 认为已有焓的理论, 没有必要再提出焓这个概念。

只从能量分析的方法而言, 焓法与熵法是无本质区别的。焓分析法从作功损失的角度, 而熵分析法则从作功能力的角度对系统进行分析, 所得结果是相同的, 但是若从评价能量价值的角度而言, 焓作为一种评价能量价值的参数, 是任何其它参数无法替代的。

我们知道, 能量转换时, 具有量的守恒与质的贬值这两重性质, 只有将量与质结合起来才能正确评价能的价值。但长期以来人们习惯于以能的数值来度量能的价值, 其原因是在经典的热力学参数中还没有一个参数既包括伴能量又包括能的质这双层的含意, 如焓和熵这两个热力学参数, 虽具有量的含意和量纲, 但它们并不能反映出能的质, 焓虽然由热力学第二定律导出, 并与能质密切相关, 但它却又不能反映出能的“质”, 而且也没有直接规定能的“质”。唯独“焓”这个概念可以反映出能的量和质这两重含意, 较全面地反映了能的价值。它对帮助人们认识能的价值和能量转换的规律有重要作用。例如从动力利用价值来看, 能源确切地应称为“焓源”, 能耗也应当用“焓耗”表示, 以便用统一尺度科学地表达各种能量消耗的程度; 能量转换过程的损失, 主要不在于热损失, 而是由于不可逆焓损失所引起; 同样, 焓效率由于是同质能量的比较, 比传统的热效率更加科学。总之, 利用焓的概念和分析方法为热过程的分析提供了科学的依据。给出了评价能量价值的可能性。并提供了判别系统能量平衡的又一判据, 在热力学, 能源科学和工业节能等领域内有重要的意义。

本文在[1]的实用计算方法基础上^{[3][4]}做了对冶金燃料的评价, 对冶金厂余热的评价和对加热炉高炉等设备的计算和评价, 以期能促进我国在冶金能源管理中推行焓的分析, 做到合理利用、充分利用冶金能源。

二、对各种冶金燃料的评价

对一种燃料, 其化学焓 e_{ch} 是表示它本身能值的大小, 其实际被用来做功的能值是燃料燃烧后的产物所具有的焓值 e_{pr} 。

$$\text{即: } e_{pr} = Q_{Dw} \left[1 - \frac{T_0}{T_{\text{地}} - T_0} \ln \frac{T_{\text{地}}}{T_0} \right]$$

$$\text{或: } e_p = Q_{DW} \times \lambda$$

这说明燃料释放出来的能量大小是发热值 Q_{DW} 与能级“ λ ”的乘积，即不单取决于发热值的大小，也与燃烧过程中 λ 的损失率 L_{λ} 有关。而“ λ ”值在绝热条件下取决于 $t_{绝}$ 的大小。所以各种燃料使用价值的大小除其发热值以外，还应当考虑它的绝热燃烧温度的高低，亦即“ λ ”的大小。

表1中列出了几种冶金燃料的计算数据

表1

燃料种类	发热值 Q_{DW} 千卡/(公斤·米 ³)	理论燃烧 温度 $t_{绝}$ (°C)	能级 “ λ ”	燃烧产物的焓值 千卡/(公斤·米 ³)
重油	10000	2104	0.706	7060
焦炉煤气	4000	2038	0.701	2804
转炉气	2000	1656	0.664	1328
冷发生炉煤气	1500	1610	0.656	988
高炉煤气	900	1427	0.636	573

从表中数据可见，能级“ λ ”值的大小与 $t_{绝}$ 成正比，高热值的燃料，“ λ ”值大，低热值的燃料“ λ ”值变小，即低热值的燃料，不只是 Q_{DW} 小，其 λ 值更低。如单从发热值考虑，11.1米³的高炉气可相当1公斤重油，但从“ λ ”值考虑，相当1公斤重油需要12.3米³的高炉煤气。即不同燃料，其总热值相同时 λ 值是不同的，在使用中其有效能与热值是不等值的。因此在对使用不同燃料的同一种设备进行评价时，只用热耗量进行比较是不全面的，应当同时考虑到燃料质量的差异，即能级“ λ ”的大小，给出 λ 耗量的比较，以便更合理地评价能源使用的水平，找出节能的潜力。同理对各级能源管理部门，在做全系统的热平衡分析时，同时应进行 λ 的平衡，或者对不同燃料应当参照能级“ λ ”值乘以品位系数，这样才能提供包括能源品位的较合理的评价标准。

三、对冶金工厂余热的评价和利用

表2是我们对某钢铁公司所产生的余热资源的调查结果，表中给出了各主要工序余热的形态，温度，焓值和 λ 值。从表中数据可以看出，随各种余热温度的不同，焓值和 λ 值的比例，即各种余热的能级相距甚远，按各种物态的总计数字，分别算出它们的能级为：

$$\text{出炉固体炉料, } \lambda = 78.068/150.192 = 0.520$$

$$\text{熔渣, } \lambda = 31.382/48.832 = 0.642$$

$$\text{冷却水, } \lambda = 1.103/27.573 = 0.040$$

$$\text{炉气, } \lambda = 125.448/269.916 = 0.465$$

计算中认为铁水的显热已全部供给下一工序用于炼钢未予统计。从算出的能级数据看，各种余热的利用价值有很大差异，如各种固体物料的热含量为冷却水热含量的5.446倍，而 λ 的比值可达到7.0倍，因此如何充分利用各种高温物料的余热比利用冷却水的余热有大得多的经济价值。如用于焙焦技术回收焦炭的余热，用余热锅炉回收烧结矿或钢坯的余热等，尽管目前技术上利用物料的余热还存在某些具体困难，还没有被普遍利用，但从方向上应明确其重要性。在冶金工业中固体物料和炉渣两项所含的 λ 值几乎等于烟气所含 λ 值，是冷却水所含 λ 值的100倍，目前烟气