

节能资料

钢铁工业 的节能

1985

北京能源学会

目 录

钢铁企业能源最优化分配计算研究报告	沈昌焯 任晓茹 (1)
钢铁企业余能资源的焓分析和焓分析	李君慧 (12)
钢铁工业余热利用	范志增 (21)
工业余能的利用、管理和经济评价	陈志诚 (28)
利用焓分析探求冶金过程节能的途径	徐业鹏 (35)
充分利用余热资源	倪学梓 (40)
我国炼铁能耗的潜力及预测	刘云彩 (44)
电机节能途径	赵家礼 (52)
磁选厂节约能源的途径	张远举 (56)
35吨锅炉全烧高炉煤气改造小结	徐瑞云 (59)

钢铁企业能源最优化分配计算

研究报告

沈 昌 焯

任 晓 茹

1. 前言

钢铁厂节能途径可分为两大类,即采用新技术新工艺和改进操作改进管理。近年来,采用新技术的办法已受到重视,很多企业更新了设备,引进了新技术和装备,这是十分必要的,因为大凡一项新技术如果能在生产中被采用并推广,除了在产品产量、质量上有所改进外,消耗也都有不同程度的降低(有的新技术本身能耗没有降低,甚至略有增加,但可使全企业的能耗有较多的降低)。但是,有了新技术新设备,还要有与之相适应的管理方法,不然,新技术的优越性发挥不出来,或发挥的不够充分;在经济上,看不出有多大效果。这种现象在许多企业都出现过。所以这两大类节能措施是相辅相成的,是不可偏废的。

我国钢铁工业节能工作是从1978年开始的,当时首先抓了管理工作,杜绝明显的浪费和改革不合理的管理办法,建立合理的管理制度。这虽然只是“扫浮财”,但也收到良好效果。

钢铁企业各生产工序,首尾相接,是一个连续的生产过程。在联合企业中,至少有焦化、烧结、炼铁、炼钢、初轧和轧钢等六大工序,不少企业还有球团、连铸和多种产品的轧钢车间,生产情况更为复杂。有些车间的耗能设备,可以使用多种能源,如焦化抽气机和高炉鼓风机,既可用汽动,也可用电动;焦炉既可用焦炉煤气、高炉煤气、高焦混合煤气,也可用发生炉煤气加热;轧钢加热炉可用煤

气、重油,也可用煤粉、块煤加热。炼钢技术的发展,使不少钢种既可用平炉,也可用转炉或电炉冶炼,而这三种炼钢方法的能耗和耗用能源种类是不同的。钢铁企业耗用的能源种类很多,燃料方面有各种煤、各种煤气、重油和焦炭等;动力方面,有电、鼓风、蒸汽、压缩空气以及氧、氮等气体和各种水。

在这种复杂情况下,能源的分配可以有多种方案,应当在工艺和设备条件许可基础上,选用最优方案。不同企业、不同要求,其“最优”的含义也是不同的。例如,可能要求能耗最少;能源费用最少;投资最少或者对环境的污染最少等等。从钢铁生产的经济效益出发,一般要求能源费用最少,亦即在完成同样生产任务条件下,如何分配能源,可以使能源费用最少(降低成本,增加收益)。能源费用减少的措施一是节能,二是用廉价的能源(一般是劣质能源)代替昂贵的能源。这两个措施有时是一致的,有时是互相矛盾的,使用劣质燃料可能费用低,但能耗有可能增加。

在能源分配办法方面,我国钢铁企业基本是按习惯做法,除锅炉可以使用多种燃料外,其它炉窑基本上只能使用单一种类的燃料。从节能角度看,目前这种状况是极为不利的,它不能调剂能源的余缺,影响生产,浪费能源。应当有选择地安排一些设备可以使用多种能源。例如有些轧钢加热炉,既可烧油也可烧煤气,在煤气有余量时,可以烧部份煤气,减少烧油。这种做法不但节省了重油,避免了煤气放散损失,而且燃料费用也相应减少。

我国钢铁企业目前的能源分配习惯做法是否经济性良好呢？从下面几个例题（都是选用某些企业的生产实际数字）可以看出，即使工序能耗不变（没有采取节能措施），降低能源费用，提高能源使用的经济效益的潜力还是不小的。

选用最优的能源分配方案的基础是作多方案比较，做出的方案越多，选用的方案相对就越优，这是尽人皆知的。但是做几十个分配方案要花费大量人力和时间，往往在实际工作中是办不到的，即使如此，所选用的方案仍然不能说是“最优”的。现代数学提供了最优化计算方法，理论上，这是从无限多的方案中选出的，因此可以称作“最优”。在能源分配方面，采用的方法是线性规划。日本、美国及西德等国家钢铁企业的能源中心都采用此种方法，取得良好效果。

2、线性规划方法简述

线性规划是从1940年第二次世界大战中开始研究的，当时是用于军事目的，后来传到美国，1945年大战结束后，此法用于工业和民用方面。

表1

(单位:小时/每件产品)

产 品	机 器 甲	机 器 乙
A	0.05	0.02
B	0.02	0.03

产品A的利润为0.03元/个，产品乙的利润为0.04元/个。

计算的目标是：在上述条件下，A、B两种产品在甲、乙两台机器上各生产多少可以获得最大利润。

设产品A的产量为 X_1 ，产品B的为 X_2 。

工厂所获利润为：

$$Z = 0.03X_1 + 0.04X_2$$

目标函数为上式的极大化。

根据题意，人工和原料都没有限制，只有时间的限制，故其约束条件为：

讲述线性规划方法的书籍很多，故本报告中只做简述。

线性规划中有一个目标函数，它是用数学式表达的计算目的。如费用最少、收益最大等。除此以外，有一个由大量等式和不等式组成的约束方程组。它们是用数学式表达那些为达到目标所受到的各方面限制和约束，如各种能源供应量的限制，工艺上对能源使用的约束等等。约束方程组实际上就是这个工厂能源使用的数学模型，它因厂而异，没有通用的方程组。即使在一个企业内，随着时间变迁，工厂有了新建和改建项目，约束条件也将随之变更。线性规划计算过程中，如果有一个约束条件不能满足，全部计算都无解。所以说，只要得出计算结果，就一定能满足全部约束条件。

线性规划的基本原理可用下面简例说明：

某工厂生产A、B两种产品。工厂每周工作五天（40个小时），工作效率为90%，即实际每周有36个小时用于生产此两种产品。有甲、乙两台机器可用来生产，每台机器生产A、B两种产品所耗时间如下表1。

$$\text{甲机器：} 0.05X_1 + 0.02X_2 \leq 36 \dots (1)$$

$$\text{乙机器：} 0.02X_1 + 0.03X_2 \leq 36 \dots (2)$$

(1)、(2)两个约束条件是每台机器生产时间不得超过36小时。第三个约束条件是 $X_1; X_2 \geq 0$... (3)

即： X_1 及 X_2 的值都不允许有负值。

此例题只有两个变量，故可用图解法把方程(1)改为等式：

$$0.05X_1 + 0.02X_2 = 36$$

设 $X_1 = 0, X_2 = 1800$ ，如 $X_2 = 0, X_1 = 720$

在图中划出此直线：(见图1)

同样，(2)式也画出直线， $X_1=0$ ， $X_2=1200$ ； $X_2=0$ ， $X_1=1800$

按照题意，在机器甲生产中， X_1 及 X_2 的值均应在0ab的范围内。机器乙生产中， X_1 及 X_2 值均应在0ce的范围内。两个约束条件都能满足的范围是0cdb。换言之，要在0cdb区域内寻求利润最大的 X_1 ， X_2 值。

目标函数 $Z=0.03X_1+0.04X_2$ 可改为 $X_2=3/4X_1 + \frac{Z}{0.04}$ ，亦即：给定一个Z值，就

可画出一条斜率为 $-3/4$ 、与 X_2 轴交点为 $Z/0.04$ 的直线。可以看出，通过d点的目标函数直线是利润最大点，高于d点的直线，不能满足cde直线要求，低于d点的直线，Z值不是最大。所以d点($X_1=327$ ， $X_2=982$)是最优解。因为可以给定无限多个Z值，所以此解是在无限多个方案中的最优解。

上述例题中只有两个变量，所以是最简单的例子。

在钢铁企业能源分配计算中，可有十几个至上百个变量，就无法用图解方法来求解，只能用线性规划的单纯形法，在本报告中，是按单纯形迭代法，作了某些改进。采用ALGOL-60语言编成。在DJS-21机上计算。

以上例子可以用一般的数学形式来表现。线性规划也就是实际问题在众多的线性等式和不等式的约束条件：

$$\begin{aligned} a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n &\leq b_1 \\ a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n &\leq b_2 \end{aligned}$$

$$a_{i1}X_1 + a_{i2}X_2 + \dots + a_{in}X_n \leq b_i$$

$$X_i \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

下，求目标函数：

$f(X) = c_1X_1 + c_2X_2 + \dots + c_nX_n$ 的最大值或最小值。计算的粗略框图如图2。

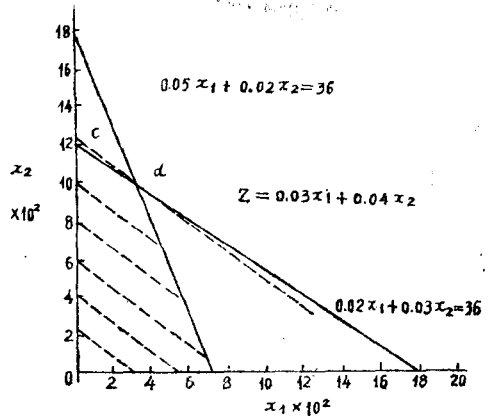


图 1

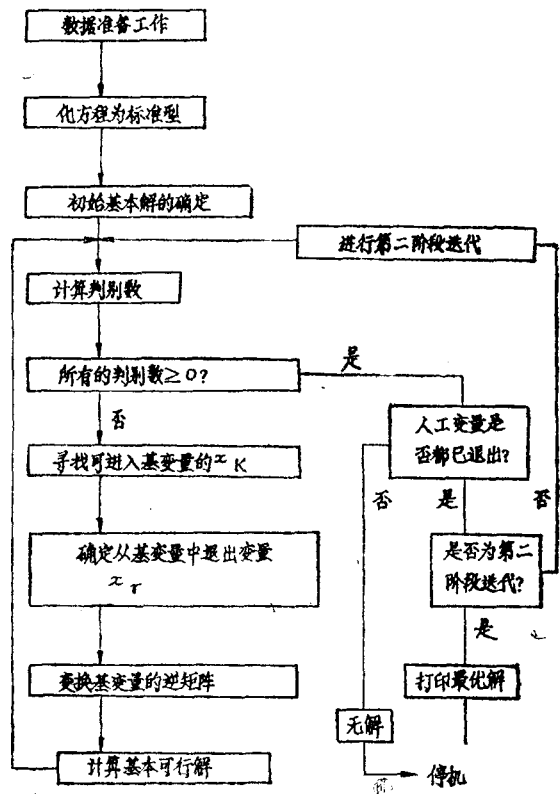


图 2

3. 钢铁企业能源最优化分配计算举例

(1) 某钢厂有平炉、转炉及电炉三个炼钢车间，其生产情况如下：

年产钢总量：58.5692万吨

年耗用废钢总量：20.0763万吨

总能耗：14.5192万吨标煤

炼铁年产量：47.6209万吨

各炼钢车间生产情况如表2。

表2 各炼钢车间生产情况

	产 量 (万 吨)	废 钢 耗 率 (吨/吨)	生 铁 耗 率 (吨/吨)	工 序 能 耗 (公斤标煤/吨)
平 炉	12.8601	0.3425	0.6957	506
转 炉	35.2425	0.11587	0.96367	117.6
电 炉	10.4666	0.9614	0	368.63

假定所炼钢种是三个车间都能生产，要求在钢产量、工序能耗不变；废钢用量不增加的前提下，通过重新安排三个车间的生产任务，使炼钢的总能耗最少。

设 X_1, X_2, X_3 分别为平炉、转炉和电炉车间的废钢用量，则

平炉钢产量为 $X_1 / 0.3425 = 2.91971X_1$

转炉钢产量为 $X_2 / 0.11587 = 8.63036X_2$

电炉钢产量为 $X_3 / 0.9614 = 1.0401X_3$

目标函数：最小化：

$$0.506 \times 2.91971X_1 + 0.1176 \times 8.63036X_2 + 0.36863 \times 1.0401X_3$$

$$\text{或 } 1.4774X_1 + 1.01666X_2 + 0.38341X_3$$

约束条件：

钢产量不变：

$$2.91971 X_1 + 8.63036X_2 + 1.0401X_3 = 585692 \dots \dots \dots (1)$$

废钢耗量不变：

$$X_1 + X_2 + X_3 = 200763 \dots \dots \dots (2)$$

非负值要求：

$$X_1, X_2, X_3 \geq 0 \dots \dots \dots (3)$$

因为只有三个变量，可以用手工计算。

首先将非标准型化为标准型，加入人工变量 X_4 及 X_5 ，整理后，如下计算表3。

表 3

0	0	0	1	1	0
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	b
1	1	1	1	0	200763
2.91971	(86.3036)	1.0401	0	1	585692
-3.91971	-9.63	-2.0401	0	0	-786455
0.662	0	(0.879)	1	-0.1158	132899
0.338	1	0.121	0	0.1158	67864
-0.662	0	-0.879	0	0.1158	-132899
0.753	0	1	1.1376	-0.1317	151193
0.2468	1	0	-0.1376	0.1317	49569
0	0	0	1	1	0

判别数均 ≥ 0 , $b=0$, 并已化为标准型式故可求最优解

	1.4774	1.01666	0.38341	0	
	x_1	x_2	x_3	b	
	0.753	0	1	151193	
	0.2488	1	0	49569	
	0.93778	0	0	-108363.73	

判别数 ≥ 0 , 最优解为:

$$\therefore x_1=0; x_2=49569; x_3=151193.$$

目标函数值为108363.73

也可用电子计算机计算, 其结果为:

$$x_1=0; x_2=49652.897; x_3=$$

151110.1.

目标函数值为108417.23.

手工计算与电子计算机计算结果的差, 是来源于手工计算四舍五入的影响。故采用电子计算机结果。

钢产量:

平炉钢: $x_1=0$, 钢产量=0;

转炉钢: $x_2=49,652.897$, 钢产量=428,522.38吨;

电炉钢: $x_3=151,110.1$, 钢产量=157,169.62吨;

总产量=585,692吨。

要求钢产量为585,692吨, 满足要求。

废钢用量:

$4,9652.897 + 151,110.1 = 200,762.997$
 $\approx 200,763$ 吨生铁耗量;

$412,954.15 < 476,209$ 吨。

总能耗:

$108,417.23 < 145,192$ 吨标煤

亦即完全满足要求, 年节能 36,774.77 吨标煤, 节约25.33%。

平炉所以被淘汰, 是因为工序能耗高。

(2) 某钢厂能源消耗如表4所示。

要求在工序能耗不变条件下(这是为了考察最优化分配的效果而提出的条件), 按

最优化分配能源, 使能源费用最少。为了考察能源价格对分配的影响, 要求计算燃油价格为71元/吨, 及140元/吨的分配方案。

目标函数: 极小化: $\sum_{i=1}^{i=24} F_i x_i$

式中: x_i —各种能源消耗量

F_i —各种能源的单价

约束条件: 有三部份, 即:

各工序能耗不变。

除无烟煤及动力煤可增加供应量外, 其余各能源供应量均不可超过现况(见表4)。

工艺及设备对能源的分配有以下九条要求:

1) 焦炉可用焦炉煤气、高炉煤气或高焦混合煤气加热。

2) 烧结的固体燃料可用无烟煤、动力煤及焦粉。

3) 烧结点火可用焦炉煤气或混合煤气。

4) 球团可用焦炉煤气、高炉煤气或高焦混合煤气焙烧。

5) 炼铁可喷吹煤粉, 置换比为0.8公斤/公斤, 焦比不得少于350公斤/吨。

6) 中板可用动力煤、燃油、焦炉煤气或高焦混合煤气加热。

7) 高炉鼓风机可用汽动也可用电动。

8) 锅炉可用动力煤、焦炉煤气或高炉煤气。

9) 制氧压缩机可用汽动或电动。

全部共24个变量, 约束条件有19个方程。必须用电子计算机进行计算。计算结果见表5。

表 4

能源	无烟煤	动力煤	燃油	焦炭	焦炉煤气	高炉煤气	电	蒸汽	费用
单位	吨	吨	吨	吨	10 ³ Nm ³	10 ³ Nm ³	10 ³ 度	吨	万元
炼焦	-	-	-	-	89,377	-	9268.65	64,753	415.64
烧结	14,784	-	-	20,402	5774	-	17,791.16	2265	358.9
球团	-	-	-	-	-	45103	7476.64	1256	69.28
炼铁	-	-	-	254,703	2888	855640	5609.25	46,157	2256.76
炼钢	-	-	-	-	24,432	1406	6122.6	37,238	158.77
轧钢	-	-	15,050	-	1459	2315	7369.97	15,988	179.91
鼓风机站	-	-	-	-	-	-	12,838.2	107,606	137.47
供水站	-	-	-	-	-	-	21,632	-	151.42
锅炉	-	3481	-	-	43,168	289478	1800.02	-	262.43
氧气站	-	-	-	-	-	-	34,485.8	20,377	261.78
小计	14,784	3481	15,050	27,105	167,098	693942	124,394.3	295,640	4312.66

表5 计算结果
原——原来情况

甲——油价为71元/T时的分配方案

乙——油价为140元/T时的分配方案

能源	无烟煤		动力煤		燃油		焦炭		焦炉煤气		
	T		T		T		T		10 ³ Nm ³		
	原	乙	原	甲	原	乙	原	甲	原	乙	
炼焦	—	—	—	—	—	—	—	—	89,377	0	30,118.7
烧结	14,784	—	0	42,188	—	—	20,402	0	5774	5774	5774
球团	—	—	—	—	—	—	—	—	0	9020	0
炼铁	—	—	—	—	—	—	254,703	181,568	2888	21,098	0
炼钢	—	102,725	—	—	—	—	—	—	24,432	24,432	24,432
轧钢	—	—	—	—	15,050	0	—	—	1459	1921	35,902
鼓风站	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
供水站	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
锅炉	—	—	3481	76,502	—	—	—	—	—	—	—
氧气站	—	—	—	—	—	—	—	—	43,198	0	0
共计	14,784	102,725	3481	128,690	15,050	0	275,105	181,568	167,098	62,245	96,286

高炉煤气	10 ³ Nm ³		电		力		蒸汽		汽		费	
	T		T		T		T		T		元	
	原	乙	原	甲	原	乙	原	甲	原	乙	原	乙
原	446,883	396,290	9268.65	9268.65	9268.65	9268.65	64,753	64,753	64,753	64,753	415.64	286.04
59	—	—	17,797.16	17,797.16	17,797.16	17,797.16	2265	2265	2265	2265	358.91	271
45,103	0	45,103	7496.64	7496.64	7496.64	7496.64	1256	1256	1256	1256	69.38	82.46
355,640	264,590	370,083	5909.25	5609.25	5609.25	5609.25	46,157	46,157	46,157	46,157	2256.76	2048.38
1406	1406	1406	6122.6	6122.6	6122.6	6122.6	37,238	37,238	37,238	37,238	158.77	158.77
2315	0	0	7369.97	7369.97	7369.97	7369.97	15,988	15,988	15,988	15,988	179.91	174.63
—	—	—	12,838.2	0	0	0	107,606	108,147	108,147	108,147	197.47	108.15
—	—	—	21,632	21,632	21,632	21,632	—	0	0	0	151.42	151.42
289,478	72,847	72,847	1800.02	1800.02	1800.02	1800.02	—	—	—	—	262.43	266.07
—	—	—	34,485.8	27,780	27,780	27,780	20,377	19,834	19,834	19,834	261.78	214.29
693,942	785,726	785,729	124,420.29	104,875.89	104,875.89	104,875.89	295,640	295,638	295,638	295,638	4312.46	3769.34

1983年有关能源消耗实况

	无烟煤 (万吨/年)	动力煤 (万吨/年)	重油 (万吨/年)	冶金焦 (万吨/年)	焦粉 (万吨/年)	焦炉煤气 (百万大卡/年)	高炉煤气 (百万大卡/年)	氧气 (亿标米 ³ /年)	能耗共计 (万吨标煤/年)
化	23.04					451.014	1,076,418		21.82
烧	23.042				5.753	172,950	86,768		25.397 固 气
炼	7.947	0.034		119.606	0.168	12,108	1,313,892		93.475
平			11.451		0.066	152,512	—	0.446	19.844
转						86.497	1253		1.254
铸						87.137	13,330		1.4435
连						343,951	155,586		7.137
初						97.660	43,635		3.018
大						186.352	81,240		3.823
中						859,600	17,825		9.155
热			5.480						1.548
冷						93,340	15,045		1.212
轧			0.058	0.471		32,090	14,367		
轧					0.011				
锅			3.088			222,632	346,644		12.456
炉									
共	30.989	0.034	20.077	120.077	6.298	2,797,843	3,166,003	0.446	205.495
单	31.3	20.33	141.64	84.4	40	0.00086	0.00064	1000	
价(万元)									
费	999.9557	0.6912	2843.7063	10,134.498	251.92	2406.1450	2026.2419	446	
用(万元)									

表 7

最优化分配计算结果

焦化	无烟煤 (万吨/年)	动力煤 (万吨/年)	重油 (万吨/年)	冶金焦 (万吨/年)	焦粉 (万吨/年)	焦炉煤气 (百万大卡/年)	高炉煤气 (百万大卡/年)	氧气 (亿标米 ³ /年)	能耗共计 (万吨标煤/年)
烧结	29.531				0	172,970	86,800		23.4906 固 25.397 气 3.711
炼铁	9.906	0.034		117.87	0.468	12,108	1,313.882		~93.475*
平炉			10.3661		0.066	152,512	—	0.558	18.7191
转炉						86,497	1253		1.254
连铸						87,137	13,330		1.435
初轧						345,590	154,000		7.137
大型			0			94,500	46,760		2.108
中板			0			178,990	88,620		3.823
热轧			5.231			110,320	17,850		9.155
冷轧						87,570	20,790		1.548
轧辊			0	0.471	0.011	0	52,080		1.212
锅炉		17.544	0			0	0		12.456
共计	39.437	17.578	15.597	118.341	0.545	1,603,933.9	3,163,945	0.558	204.8307
与1983年相比									总计
1983年实耗	30.989	0.034	20.077	120.077	6.293	2,797,843	3,166,003	0.446	205.495
耗量增(+)减(-)	+ 8.448	+ 17.544	- 4.48	- 1.736	- 5.753	- 1,193,879.1	- 2058	+ 0.112	- 0.6643
计算费用(万元)	1234.3781	357.3607	2209.1591	9987.9804	21.8	1379.4089	2024.9248	558	17,773.012
1983年费用(万元)	969.9557	0.6912	2843.7063	10,134.4988	251.92	2406.1450	2026.2419	446	19,079.1589
费用增(+)减(-)	+ 264.4224	+ 356.6695	- 634.5472	- 146.5184	- 230.12	- 1026.7361	- 1.3171	+ 112	- 1306.1469

*喷煤粉量增加后,使能耗降低的因素有:增加高炉煤气回收量,提高风温多耗煤气,使能耗增加的因素有:提高风温多耗煤气,此例因增加煤粉量较少,按能耗增减因素互相抵消计算,如有煤粉、焦炭的元素分析资料,可比较准确的计算

从表5可看到：如燃油价格为71元/吨时，轧钢还可以烧油，而燃油价格为140元/吨时，轧钢改烧焦炉煤气较经济。此时焦炉煤气总耗量仍低于现况，这是因为锅炉增加了动力煤耗量，节省出焦炉煤气的结果。高炉喷吹无烟煤粉后，燃料比有所增加，这是因为喷吹无烟煤粉的置换比为0.8公斤/公斤。

从费用变化可见，不论燃油价格为71元还是140元，绝大部分工序的能源费用都减少了，少数工序略有增加。这一现象表明，从全局着眼，少数工序费用增加，换来的却是能源费用的全面减少。

(3) 某钢铁联合企业，1983年有关能耗如表6。要求通过最优化计算，重新分配燃料，使燃料费用最省。计算的约束条件如下：

1) 各工序的工序能耗不变（即没有采用节能措施）。

2) 在五座焦炉中，只有一座焦炉可烧高炉煤气，其余四座可烧混合煤气。

3) 烧结用固体燃料可用焦粉及无烟煤，但焦粉用量不得超过焦炭产量的4%。

4) 烧结点火用煤气的发热值应不少于1700大卡/标米³。

5) 高炉燃料比与1983年同(579.6公斤/吨铁)，喷吹无烟煤粉量不可高于45公斤/吨铁。

6) 高炉热风炉可用发热值为820大卡/标米³的高炉煤气。

7) 平炉全部烧油，八座平炉中，两座吹氧，其油耗为45公斤/吨钢。不吹氧的六座其油耗为113公斤/吨钢。在计算中，要求吹氧及不吹氧的平炉钢产量各占50%。

8) 转炉仍以焦炉煤气为辅助煤气。

9) 热轧燃料可用燃油及发热值为2300大卡/标米³的混合煤气。但混合煤气耗量不得超过总耗热量的20%。

10) 燃油消耗量不得超过30万吨/年。

(1983年实耗量)，用煤量不受限制。

按照上述要求。安排线性规划计算，共有32个变量，约束条件有29个方程，计算结果如表7。

对照约束条件，对计算结果进行校核。

焦炉加热用煤气：由于计算资料中没有五座焦炉各自煤气耗量，此处按平均值计算，即五座焦炉共耗热量为21.82万吨标煤，平均每座耗煤气4.364万吨标煤。一座烧高炉煤气的焦炉，耗高炉煤气（按4.364万吨标煤折算，高炉煤气发热值为820大卡/标米³）305,480×10⁶大卡/年，计算结果是：其他四座焦炉加热共耗焦炉高炉混合煤气（发热值为980大卡/标米³）1,338,859.9×10⁶大卡/年，其中焦炉煤气（发热值为4150大卡/标米³）275,769.6×10⁶大卡，或6645.06万标米³，高炉煤气1,063,090×10⁶大卡，或129,645.12万标米³。五座焦炉加热总耗煤气量为23.4906万吨标煤，高于21.82万吨标煤，这是因为改烧低热值煤气后，加热效率有所降低，因而耗量有所增加。

烧结用固体燃料，计算结果是全部使用无烟煤，不用焦粉，这就满足了焦粉用量不超过焦炭产量的4%的要求。烧结点火煤气的发热值为1760大卡/标米³。满足约束条件要求。

炼铁喷吹煤粉量：计算结果要求达到45公斤/吨铁，比1983年略有增加，因为煤粉置换比为0.8，故燃料比也稍有增加。增加喷吹煤粉量对于炼铁工序能耗的影响存在增加和减少两方面的因素。燃料比增加，高炉煤气的发热值和产量都增加，回收高炉煤气后，抵消一部分燃料比增加的影响，但无烟煤的发热值是焦炭发热值的88.7%，这两个因素结合起来可能使工序能耗略有减少，另一方面，增加喷吹煤粉量要提高风温，这导致增加工序能耗，此外根据喷吹的煤粉成份，鼓风量也会有变化。在此例中，因为没有无烟

煤成份资料且喷吹量增加较少(6公斤/吨),故按工序能耗不变考虑。

平炉生产按约束条件要求,规定明确而且设有调整余地,故未列入计算。

转炉生产用辅助煤气的耗量和煤气种类都有明确规定,也不能列入计算。

热轧用燃料,符合约束条件要求,即在总热耗9.155万吨标煤中,燃油占80%(7.324万吨标煤),混合煤气占20%,混合煤气发热值为2650大卡/标米³。

1983年冷轧总燃耗为1.548万吨标煤,在所耗煤气中,有986.7万标米³的焦炉煤气不能用混合煤气代替,相当于0.585万吨标煤,亦即可代替部份为0.963万吨标煤。计算结果,用发热值为2300大卡/标米³的混合煤气,连同保留的焦炉煤气,总热耗仍为1.548万吨标煤。

重油耗量比1983年减少4.48万吨,也符合不超过1983年的30万吨的要求。

从以上校核可见,在全部满足约束条件要求情况下,每年可节省燃料费1306万元。

4. 结论

通过以上实例计算,对用线性规划方法作能源最优分配计算可作出以下几点结论:

(1) 用线性规划方法,可以满足能源最优分配计算的要求,即在全部满足约束条件要求的基础上,求出最佳效果的分配方案。本报告所作的工作,可为企业根据生产任务,作出合理使用和购进能源的计划,并在生产中实施,取得良好的效益。

在本报告中,是以一个工序为单元的,如果以每个耗能设备为单元,例如炼铁以每座高炉为计算单元,则效果会更好。但要有每个耗能设备的能耗要求(约束条件)的资料。

如果通过测定,能提供每个用能设备在操作条件变化时,其效率变化的规律性数

据,则利用线性规划方法,可以作在线的计算,随时根据生产的变化,计算出最佳的能源调度方案,达到效益最好的目标。这就是能源中心的主要工作手段。它的经济效益会更加良好。因此,也可以说,本报告是能源中心主要工作手段的前期工作。

(2) 从实例计算可见,改进我国钢铁工业的能源使用情况,提高经济效益,是大有可为的。中共中央“关于经济体制改革的决定”中,在谈到改革价值体系时要求:“在提高部份矿产品和原材料价格的时候,加工企业必须大力降低消耗,使由于矿产品和原材料价格上涨而造成的成本增高基本上在企业内部抵消,少部份由国家减免税收来解决,避免因此提高工业消费品的市场销售价格”。通过最优化分配能源的计算,节省能源费用,是抵消矿产品和原材料价格上涨而造成的成本增高的有力措施之一。

(3) 我国钢铁工业企业能源分配的办法,目前都是按习惯作法,多数耗能设备只能使用单一品种的能源,这对合理调整、最优分配是极为不利的,亦即对降低能源费用不利,不能根据生产变化及时调整能源分配,减少煤气放散和其他浪费或影响生产。因此,在企业进行技术改造时,建议能增加使用多种能源的设备,增加设备使用能源的灵活性,及时调剂余缺,降低能源费用。

(4) 降低能源费用应当是以企业为整体,全面考虑,最优化计算的结果可能使少数工序能耗稍有增加,但由此却可使企业的能源费用大幅度节省。这正是系统工程的优越之处,也是本计算方法的优越之处。

(5) 本报告中的计算例题没有考虑节能措施,理由是为了考察单纯依靠最优化分配能源的经济效果。如果结合节能措施,其经济效果将会显著增高。

钢铁企业余能资源的焓分析和焔分析

李 君 慧

钢铁工业在高温状态下进行生产,为取得钢材,要投入大量的能源。当今先进国家的钢铁工业能源利用率约50~60%。尽管如此,他们认为与利用效率大于80%的锅炉差距还很大,仍不断地深入研究难度较大的余能资源开发技术^[1]。我国钢铁工业能源利用率低,这方面的研究更是必要的。

钢铁企业生产过程的特点是高温、多工序,这两个特点决定了钢铁企业余能资源的特性。工序多,从而累积的余能资源量大,同时又多属高、中温的余热。也就是说,钢铁工业余能资源量大、质高。有效地利用这些余能是钢铁工业节能的主要途径之一。

由于本文的分析包括了化学能和压力能,故不称“废热”或“余热”,而称之为“余能”。

众所周知,要利用某种热能,除去要知道其总热量外,还应知道是多高温度的热能。因为温度不同一卡路里的能质是不同的,因而其做功的能力不同,利用的价值也有所差异。同理,压力不同的压力能,化学组成不同的化学能其利用价值也不同。为了有效地利用企业的余能,对现在的余能资源必须从“量”和“质”两方面进行调查分析,进而找出合理利用的途径。近些年来,随着节能工作的深入开展,国内外都很重视有效能的研究。

由于我国钢铁工业的能源水平与一些先进国家比较,差距大,可利用的余能潜力无疑地也会更大一些。我国钢铁企业的余能从“量”和“质”上到底有多大潜力,这些潜力应如何开发利用。为此,我们于1982年4月

到7月和1983年4月到8月、1984年5月到7月先后对首钢、邯钢、杭钢和梅山铁厂的余能资源进行了调查和分析,以在此基础上进行了焓和焔的分析。这是对冶金工业余能进行数量分析和质量分析的尝试。我们希望对冶金余能资源在着眼于环境问题的同时也着眼于能质和能量的分析;期望能引起人们对冶金余能早日合理利用更加重视,对节约能源、治理环境有所帮助。

一、焓和焔的概念及其意义

以热力学第一定律为依据,对设备做热量的收支平衡,做出热平衡表,求出过程的热效率,用以找出节能的途径,这就是用焓的概念分析问题的方法,也是人们已经熟悉的。这种分析的方法只能从数量上计算出热能的有效利用程度,而对于供给的不等质的能量(电能或动力,热能——又分高温、中温、低温),都等价地去看,能质在过程中贬值也无法表示。如一万千卡的高温烟气的焓和一万千卡冷却水的焓都等价看待,换热器前后烟气的焓都等价看待等,这都是不合理的。这就是焓分析的不足之处。

热力学第二定律指出,在任何不可逆过程中能质量是逐渐贬值的。要使能量有效利用,必须注意能质的变化,在保证满足生产工艺的条件下尽量减少不可逆过程,达到热力学的完善性,提高有效能的利用率。近年来人们提指出了一个“exergy”的概念,我国译为“焔”或“有效能”,做为包含能质的一个参数。与比焓和焓相对应,比焔是单位质量(或容积)载能体所含的有效能,单

是kcal/kg或kcal/m³；焓是所研究的某些载能体所含的总的有效能，单位是kcal。

所谓有效能即焓值，是指当一含能系统达到与外界（环境）平衡时所能释放出来的最大功。对于一稳定物质流，其温度为T，压力为P，当与外界温度T₀、压力P₀达到平衡时，其物理的数学表达式为：

$$E = [H(T, P) - H_0(T_0, P_0) - T_0(S(T, P) - S_0(T_0, P_0))] = [H - H_0] - T(S - S_0) = \Delta H - T_0 \Delta S \quad (1)$$

其中H、H₀——物质流在T、P和T₀、P₀下的焓值

S、S₀——物质流在T、P和T₀、P₀下的熵值。

此关系式表明，物质流中的焓值，只有一部分是可以做功的（E）。还有一部分是不能做功的熵增（T₀·ΔS）。能量中含有的焓值比例越大，其做功能力越高，一般用其比值来表示该载能体的能级，用符号“λ”表示：

$$\lambda = \frac{E}{H} \quad (2)$$

电能和机械能转换为热能时，其能级都为1，热能是一种低质能，其能级小于1，随温度而异，其计算方法可参阅有关资料〔2,3〕。

对能量转换过程做焓的平衡可计算出过程焓效率，显然焓效率越高，过程焓热力学完善性越高，这是评价一种能量转换方式（或设备）是否合理、是否先进的一个标志。

焓平衡表达式为：

$$E_{\text{支付}} = E_{\text{获益}} + E_{\text{损失}} \quad (3)$$

$$\text{效率为：} \eta_c = \frac{E_{\text{获益}}}{E_{\text{支付}}} = 1 - \frac{E_{\text{损失}}}{E_{\text{支付}}} \quad (4)$$

焓分析法便于统计和评价不同温度水平的余热资源；便于判断余热资源利用方案的合理性。

二、余能资源潜力的分析

1. 调查背景

必须指出，四个厂的调查不是同一年进行的，首钢系1981年、邯钢系1982年，杭钢及梅山铁厂系1983年的年平均值。

各厂的产品结构有差异，如邯钢、杭钢焦炭中有商品焦；首钢钢坯产量大于钢材产量，杭钢有比重不小的加工材等，都不是配套生产的联合企业，梅山铁厂有铁无钢，暂不进行分析。

调查过程中邯钢、杭钢包括了动力分厂的余能，首钢未包括动力分厂，数据来源全部来自各厂的记录，或报表的年平均值。有的数据系单项补测数据，有的数据（如杭钢高炉冷却水）由于无记录又无测试手段，只好不计入。

2. 调查结果

各厂调查结果按不同工序，分为物理余能和化学余能两部分。示于表1、2、3、4、5、6、（全略）。

表7表示各厂总余能资源占总能耗的比例。总能耗的焓值和焓值系按当年购入的一次能源计算而得。

为便于和首钢比较，从邯钢、杭钢总余能资源中减去动力分厂的数据，并在杭钢炼铁系统中加上占炼铁工序总余热资源焓值的6.5%和焓值的0.5%的冷却水余热项，结果用*表示，也示于表内。

由表可见，杭钢的余能资源相对少些，而邯钢最大，说明邯钢的节能潜力更大。随着时间的推移，各厂每年的节能工作都有新的成果，如82、83年吨钢能耗已发生很大变化，见表8。

以下的分析仅能代表当年的历史情况，并不能完全代表现在的状况。

3. 余能资源的焓分析

(1) 余能资源的焓值

1) 首钢的总余能资源（焓值）

表8

吨钢综合能耗 (吨标煤/吨)			吨钢可比能耗(吨标煤/吨)		
1981	1982	1983	1981	1982	1983
首钢 1.875	1.866	1.704	1.011	0.979	0.985
邯钢	1.941	1.871		1.499	1.377
		(1~9月)			(1~9)
杭钢	1.266	1.190		1.008	0.937

81年全年消耗的总能量是 19.346×10^{12} 千卡, 物理余能总焓值 6.067×10^{12} 千卡, 包括全部购入能源和已回收的余能资源。炼铁所需要焦炭未重复计算。物理余能的焓值占总能源的31.4%。副产煤气的化学余能总量为 6.425×10^{12} 千卡, 占总能源30.13%。两项合计余能总量占总能源的61.53%, 也就是说六个工序通过冶金反应及热加工后, 由固、气、液(包括冷却水)诸介质带出的余能总量占总能收入的近三分之一。

2) 邯钢的总余能资源(焓值)

1982年耗能为 6.68×10^{12} 千卡, 合95.43万吨标煤(包括亏损、机修、运输等)。调查结果表明。物理余热的焓值为 2.6×10^{12} 千卡, 占总能耗的39.0%, 副产煤气总焓值为 2.62×10^{12} 千卡占总能耗的39.1%(其中炼钢工序产品显热按 950°C 的钢锭算)。两项合计余能总量占总能耗的77.3%。该厂余能总焓量竟为总购入能源的五分之四。

3) 杭钢的总余能资源焓值

1983年总能耗为 3.888×10^{12} /年, 物理余热为 1.135×10^{12} 千卡/年, 占总能耗的29.12%, 副产煤气总值为 0.994×10^{12} 千卡/年, 占总能耗的25.68%(钢以热锭计显热)。两项余能总量之和占总能耗的54.86%。

上述三组数据表明, 虽然各钢铁厂的能量利用水平存在着差异, 但三个企业中有两个全国先进企业, 其中一个是全国重点企业, 一个是地方骨干企业。通过这三厂的现状, 纵观全国钢铁工业, 可以说明钢铁企业购

入总能耗的二分之一以上乃至五分之四变为余能。这个数据应该说具有一定代表性。由此可见我国钢铁工业的余能潜力很大, 充分利用这些余能。无疑地应该是我国钢铁工业节能的主要着眼点, 也是降低单位钢铁产品耗能, 实现2000年产量翻一番, 能源翻半番的潜力所在。

(2) 余能资源的焓值分布

余能资源丰富是冶金工业的特点。余能资源的利用是要逐项地采取措施的。为了有效地利用这些余能资源, 必须了解这些资源的分布状况。对上述企业的余热由大至小顺序排列, 便可看出几项主要余热资源的分布情况。

首钢的余能资源按其大小排列如下:

(1) 铁水显热	0.836×10^{12} kca1/年
(2) 炼焦废气显热	0.791×10^{12} kca1/年
(3) 烧结矿显热	0.623×10^{12} kca1/年
(4) 高炉煤气显热	0.563×10^{12} kca1/年
(5) 冷却水显热	0.519×10^{12} kca1/年
(6) 焦炭显热	0.429×10^{12} kca1/年
(7) 均热炉废气显热	0.427×10^{12} kca1/年
(8) 铁渣显热	0.401×10^{12} kca1/年

这八项余热占总余热量的85.9%, 减少这些热损失或有效地利用这些余热, 无疑地对节能将起重大作用。

邯钢的余能资源顺序排列如下: (见图1、2)

(1) 炼焦废气显热	37.570×10^{10} 千卡/年
(2) 冷却水显热	32.13×10^{10} 千卡/年
(3) 焦炭显热	23.90×10^{10} 千卡/年
(4) 铁水显热	21.91×10^{10} 千卡/年
(5) 烧结矿显热	19.84×10^{10} 千卡/年

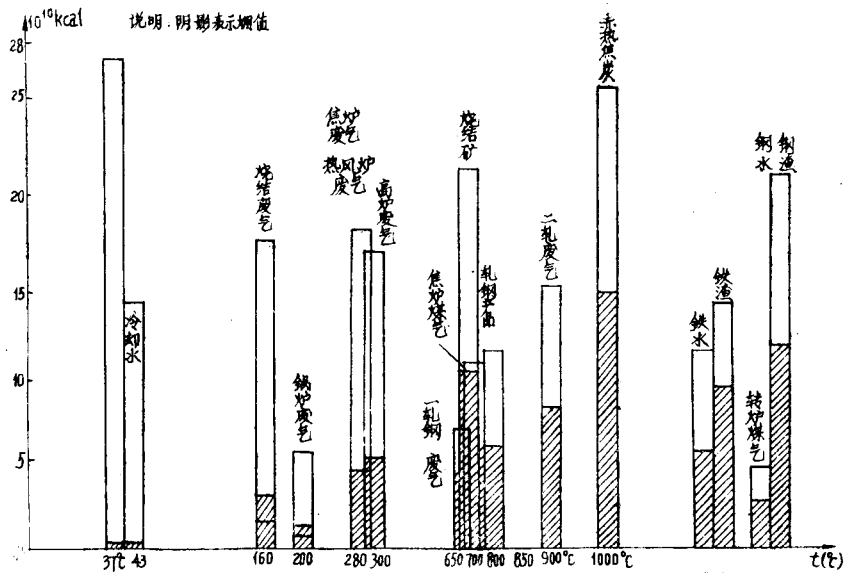


图1 邯钢特回收余能主要项的焓烟分布

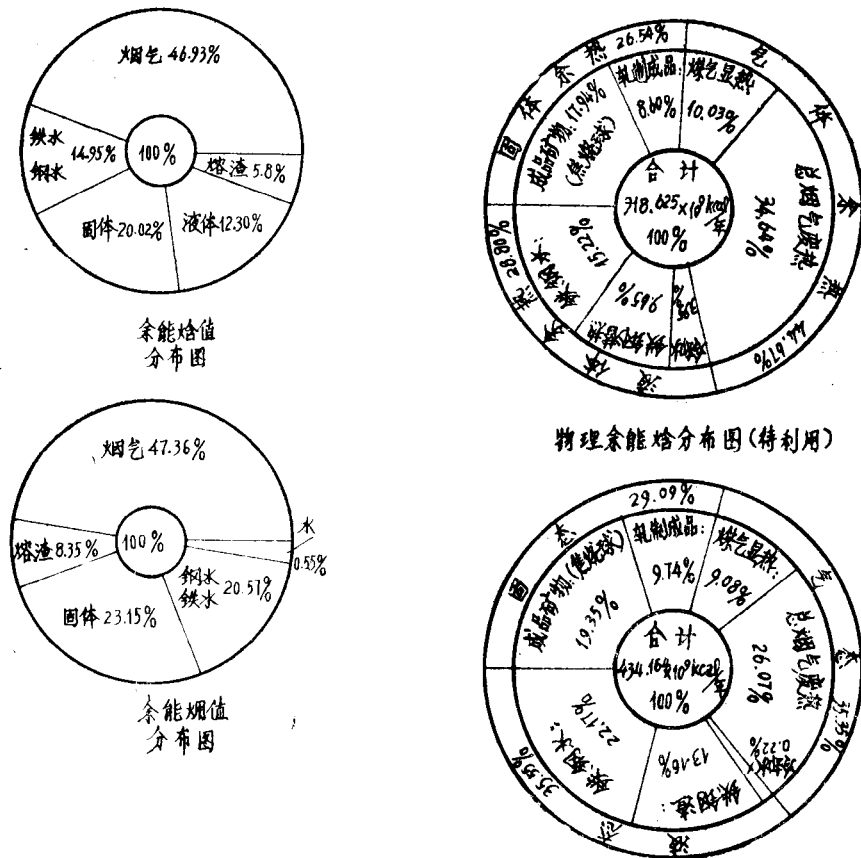


图2 邯钢余能分布

图4 杭钢物理余能(待利用)分布