

电厂燃用混煤的技术经济分析

柳瑞禹¹, 周翔²

(武汉大学 经济与管理学院, 武汉 430072)

摘要:为解决燃煤面临的问题,电厂采用煤质好、成本低、污染小的燃煤已势在必行。基于线性规划理论,建立配煤的经济模型,并对电厂燃用混煤进行技术经济分析。研究表明:电厂燃用混煤具有良好的综合效益。

关键词:混煤;线性规划;技术经济分析

中图分类号:F062.4 文献标识码:A 文章编号:1002-980X(2010)08-0072-04

随着国民经济加速回暖、固定资产投资快速增长,我国的电力需求急剧增加。由于我国电力生产大约占煤炭消费的 70%,导致对煤炭的需求也与日俱增,煤炭成为制约我国经济社会长期发展的重要因素。如何合理利用有限的煤炭资源,使电厂来煤与锅炉设计相匹配,降低电厂成本,减少电厂给环境带来的污染,成为“十一五”节能减排背景下电厂不得不面对的重大问题。为了解决上述问题,越来越多的电厂开始燃用混煤,以期能够发挥各单煤的优势、避免其劣势,从而达到“取长补短”的效果。

1 我国电厂燃煤面临的问题

1.1 煤炭分布不均

我国煤炭供求矛盾的根本在于煤炭资源分布极不平衡,煤炭资源分布和消费区分布极不协调。我国煤炭资源北多南少,具体分布如表 1 所示^[1],从表中可以看出,华北地区煤炭储量几乎占尽全国煤炭储量的一半,“两北”地区煤炭储量占全国煤炭储量的近 80%。在各大区内部,煤炭资源分布和消费区分布也极不协调。如华东地区煤炭资源的 87%集中在安徽和山东,而工业则主要集中在以上海为中心的长江三角洲地区;中南地区煤炭资源的 72%集中在河南,而工业则主要集中在武汉和珠江三角洲地区;西南地区煤炭资源的 67%集中在贵州,而工业则主要集中在四川;东北地区相对好一些,但也有 52%的煤炭资源集中在黑龙江,而工业则主要集中在辽宁^[2]。煤炭资源分布不均导致缺煤地区往往要花费更多的成本获取煤炭供应,在煤炭供应紧张的时候甚至得不到所需的煤炭供应,使一些电厂在“厂网分开、竞价上网”的政策形势下难以获取竞争优势。

表 1 中国各大区煤炭储量分布

各大区名称	华北	西北	西南	华东	中南	东北
占全国煤炭储量/%	49.25	30.39	8.64	5.7	3.06	2.97

1.2 煤炭运力不足

我国煤炭资源分布不均导致北煤南运现象的出现,北煤南运主要通过铁路进行运输,然而煤炭资源丰富地区的铁路干线比较少,导致我国铁路煤炭运输能力一直不足,铁路部门常需组织煤炭运输应急行动。《中国煤炭行业分析报告》指出目前我国煤炭市场供需呈现平衡宽松局面。但由于运力不足,许多电厂仍然处于煤炭供应不足的境况。业界普遍认为电煤库存均值警戒线是 15 天,最低警戒线是 7 天,如果库存低于 3 天,电厂就将面临随时停机的危险。国家电网公司统计显示,截至 2010 年 1 月 6 日,我国华北、东北、华东、华中、西北五大电网各省市的全国直供电厂煤炭库存量可用天数为 8 天,其中河南、河北、内蒙古东部库存为 7 天,辽宁库存为 6 天,京津唐、浙江库存为 5 天,部分电厂库存甚至低至 1 天^[3]。我国南方地区大部分电厂不仅煤炭库存不足,且日耗煤量超过日来煤量,导致电煤库存还将可能继续下降。电煤库存不足会增加电厂的风险,降低电厂出力,降低电厂的经济效益。

1.3 煤炭价格上涨

在南方来水偏少、西南遭受干旱等情况下,水力发电比例下降,火电用煤需求旺盛,导致煤炭供应偏紧,电煤价格创下了 2009 年以来的新高,电煤价格上涨无疑会增加电厂的发电成本。据统计,2010 年 1 月秦皇岛港发热量 6000 大卡/千克的大同优混和 5500 大卡/千克的山西优混本周平仓价分别报 810~840 元/吨和 780~790 元/吨,三个月来涨幅达到 30%;另据中国煤炭运销协会统计,截

收稿日期:2010-05-14

作者简介:柳瑞禹(1955—),男,辽宁大连人,武汉大学经济与管理学院教授,博士生导师,研究方向:项目管理、技术经济;周翔(1987—),男,湖北随州人,武汉大学经济与管理学院硕士研究生,研究方向:项目管理、技术经济。

至1月7日,2010年五大电力集团旗下电厂正陆续敲定电煤合同,重点电煤价格每吨涨幅约50元^[3]。

1.4 实际燃煤偏离设计煤种

由于受到煤炭分布不均、煤炭运力不足、煤炭价格上涨的影响,许多电厂来什么煤就烧什么煤,煤种多变且煤质偏差,因此使得电厂实际燃煤常常偏离设计煤种。众所周知,电厂锅炉是依据设计煤种设计制造的,只有燃用设计煤种,锅炉运行才能达到最佳效果,而当实际燃煤偏离设计煤种时,就无法保证锅炉的安全经济运行,同时还会增加对环境的污染。电厂燃用非设计煤种主要会带来以下危害:

①降低锅炉运行安全性。例如,当燃煤灰分含量超过设计值时,炉膛易结渣,使过热器处烟温及气温升高,严重时会引起管壁超温,同时除渣时间如果很长,炉膛就会漏入大量冷风,造成燃烧不稳定甚至灭火,不利于锅炉安全运行^[4]。

②降低锅炉运行经济性。例如,燃煤水分增加会产生大量水蒸气使排烟热损失增大,降低锅炉热效率,且使引风机电耗增加;燃煤灰分增加会引起煤在锅炉中的不完全燃烧,降低燃煤发热量,使锅炉出力下降,机组不能满发等。当锅炉热效率降低时,产生相同的热量就需要燃用更多的煤,使得开采运输等费用的相对增加,从而增加发电成本。

③增加对环境的污染。非设计煤种的硫含量一般较高,许多电厂对燃煤产生的SO₂未经有效处理就直接排入大气,造成了严重的环境污染,使我国环保形势十分严峻。有资料显示,1991年我国电力工业排入大气的SO₂多达460万吨,占当年全国SO₂总排放量的29.5%。SO₂的大量排放增加了酸雨覆盖面积,酸雨污染给森林和农作物造成的损失每年达数百亿元。

2 电厂燃用混煤研究概况

目前,随着电力工业的迅速发展,混煤在电厂的使用已相当广泛,关于混煤的研究也越来越多,有关混煤的研究内容主要有以下两个方面:

1) 混煤特性研究。

①混煤煤质指标的线性可加性研究。关于混煤煤质指标的线性可加性,学术界尚存争论。文献^[5]通过实验考察了混煤挥发分、发热量和灰分的线性可加性,结果认为混煤的挥发分、发热量不具有线性可加性,而混煤灰分具有较好的线性可加性。文献^[6]对混煤的水分、硫分、挥发份、发热量指标的线性可加性进行实验验证和数学分析,结果认为这些煤质指标具有线性可加性。文献^[7]归纳认为混煤的水分、挥发分、硫分具有线性可加性,而灰分、发热量

不具有线性可加性。由于煤质可加性的评价标准不统一、煤质可加性评价时采用的基不统一、配煤情况千差万别等原因,我们不能说某一煤质指标绝对具有线性可加性或不可加性,而应该以一定的实验数据为基础,具体情况具体分析。

②混煤燃烧特性研究。混煤的燃烧特性包括着火特性、燃尽特性等,其对电厂锅炉的稳定运行影响巨大,学者主要采用热重分析方法研究混煤的燃烧特性。文献^[8]采用着火特性专项测试装置对8种单煤及其混煤的着火指数进行了测量,结果表明两种着火特性不同的煤掺混,混煤的着火特性趋近于易着火的单煤。文献^[9]利用热天平实验装置对两种单煤及其九种不同比例的混煤进行研究,结果表明当着火性能不同的两种煤掺混时,在着火性能差的煤中掺入着火性能好的煤,着火性能会有较大的改善,对着火有利。文献^[10]利用热重分析法研究3种褐煤及其混煤的着火和燃尽等燃烧特性,结果表明混煤燃烧时各单煤基本保持各自的着火特性和燃尽特性。

2) 混煤优化配比研究

根据约束条件中煤质指标是否具有线性可加性,燃煤混配模型有线性规划与非线性规划之分;根据目标函数的个数,燃煤混配模型有单目标规划和多目标规划之分。文献^[11]通过对混煤主要指标的理论分析和煤质实验结果的验证,得出混煤的分析基灰分、水分、挥发分、硫分、固定碳、发热量、灰熔融温度都具有线性可加性,以配煤成本为目标函数,建立配煤的线性规划模型进行求解。文献^[12]根据电厂不同煤种的指标数据、锅炉燃烧的实际情况以及外部环境的要求,以主要煤质指标为约束条件,以配煤成本为目标函数,应用线性规划理论,对电厂混煤燃烧的配比问题进行研究,得出了电厂混煤燃烧时各种煤质的最优掺配比例。文献^[13]以混煤的煤质指标和单煤最大配比限制作为约束条件,以配煤成本、优质煤配比和低值煤配比作为目标函数,建立多目标线性规划数学模型,并用实例说明动力配煤方案的过程,得出优化解。文献^[14]综合混煤煤质的线性预测方法和人工神经网络方法,建立混煤煤质的支持向量机组合预测模型,对混煤煤质进行回归估计,并以配煤成本、混煤硫含量和本地煤配比作为目标函数,建立原煤混配的多目标规划模型。

3 配煤经济模型

在电厂实际的配煤过程中,往往需要综合考虑电厂的经济性、煤的煤质指标等多种因素。因此本文以电厂的经济性作为目标函数,以煤的灰分、挥发

分、水分、发热量、硫含量这五个主要煤质指标值作为约束条件建立原煤混配经济模型。由于线性规划有比较成熟和有效的解法,用该方法建立的数学模型运算方便快捷,而且当配煤的各单煤差别不大时,可以认为配煤的主要煤质指标具有线性可加性,因此本文采用线性规划理论确定混煤最佳配比。

3.1 目标函数

在“竞价上网”政策环境下,电厂获取竞争优势最有效的办法就是降低配煤成本,配煤成本最小化理所当然成为电厂追求的目标。由于购煤价格在购煤成本中占的比例非常大,本文以购煤价格表示购煤成本。通过燃煤混配,调整各单煤配比,在符合锅炉要求的前提下,使电厂的经济效益最佳。假设共有 n 种单煤参与混配,第 i 种单煤的到厂价为 P_i ,其混配比例为 X_i ,则配煤成本最低的目标函数为:

$$\min Z = \sum_{i=1}^n P_i X_i \quad (1)$$

表 2 煤质指标数据

煤种	收到基灰分 (%)	干燥无灰基挥发分 (%)	收到基水分 (%)	收到基低位发热量 (KJ · Kg ⁻¹)	收到基硫分 (%)	煤的价格 (元 · t ⁻¹)
A	8.57	46.19	31.70	16710	0.25	550
B	7.00	44.21	38.80	14610	0.27	500
C	6.31	45.31	30.20	16960	0.11	630
D	8.10	43.46	30.80	16610	0.16	600

该电厂锅炉对燃煤煤质的约束如下:收到基灰分 $A_{ar} \leq 7.56\%$, $44.05\% \leq$ 干燥无灰基挥发分 $V_{daf} \leq 46.04\%$, 收到基水分 $M_{ar} \leq 32.83\%$, $14570\text{kJ/kg} \leq$ 收到基低位发热量 $Q_{net, ar} \leq 17320\text{kJ/kg}$, 收到基硫分 $S_{ar} \leq 0.17\%$ 。设 X_1, X_2, X_3, X_4 分别代表 4 种煤的混配比例, Z 代表目标购煤成本。根据公式(1)~公式(3),则线性规划可表示为:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= 550X_1 + 500X_2 + 630X_3 + 600X_4 \\ \text{s.t. } &\begin{cases} 0.0857X_1 + 0.07X_2 + 0.0631X_3 + 0.081X_4 \leq 0.0756 \\ 0.4619X_1 + 0.4421X_2 + 0.4531X_3 + 0.4346X_4 \geq 0.4405 \\ 0.4619X_1 + 0.4421X_2 + 0.4531X_3 + 0.4346X_4 \leq 0.4604 \\ 0.317X_1 + 0.388X_2 + 0.302X_3 + 0.308X_4 \leq 0.3283 \\ 16710X_1 + 14610X_2 + 16960X_3 + 16610X_4 \geq 14570 \\ 16710X_1 + 14610X_2 + 16960X_3 + 16610X_4 \leq 17320 \\ 0.25X_1 + 0.27X_2 + 0.11X_3 + 0.16X_4 \leq 0.17 \\ X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = 1 \\ X_i \geq 0 (i = 1, 2, 3, 4) \end{cases} \end{aligned}$$

利用 LINGO9 软件求解上述线性规划,运行结果如表 3 所示。

3.2 约束条件

①混煤煤质指标约束。

燃煤煤质只有符合锅炉设计煤质要求,才能保证锅炉安全运行。设第 i 种煤对应锅炉的第 j 个煤质指标 T_{ij} 的下限为 B_j , 上限为 A_j , 则用 n 种单煤配制的混煤的第 j 个煤质指标就必须在 $B_j \sim A_j$ 之间, 即:

$$\sum_{i=1}^n T_{ij} X_i \geq B_j, \sum_{i=1}^n T_{ij} X_i \leq A_j \quad (2)$$

②配比约束

n 种单煤的配比之和等于 1, 并且各种单煤的配比不能为负值, 即:

$$\sum_{i=1}^n X_i = 1, X_i \geq 0 \quad (3)$$

3.3 燃煤混配最佳配比计算实例

某电厂混合燃烧四种不同的煤, 各种煤的主要煤质指标如表 2 所示。

表 3 计算机运行结果

目标函数最优值 568.1208		
迭代次数 5		
变量	最优解	检验数
X_1	0.2117836E-01	0.000000
X_2	0.3696995	0.000000
X_3	0.5898776	0.000000
X_4	0.000000	33.22663
约束条件	松弛/剩余变量	对偶价格
1	568.1208	-1.000000
2	0.1068477E-01	0.000000
3	0.1990000E-01	0.000000
4	0.000000	-1599.117
5	0.000000	71.14127
6	560.4749	0.000000
7	2189.525	0.000000
8	0.000000	664.3222

由表 3 可知, 该电厂燃煤混配的最佳比例(为配煤方便, 掺配比保留一位小数): $X_1 = 0, X_2 = 0.4, X_3 = 0.6, X_4 = 0$, 按照这一比例进行混配时, 电厂的配煤成本最低, 且 $Z = 568 \text{元} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

3.4 电厂燃用混煤的综合效益

电厂采用“改炉适煤”的方法应对实际燃煤偏离

设计煤种的弊病,从短期看可能会产生一定的经济效益,但从长期看,电厂无法保证来煤煤质的稳定,随着燃煤变动,锅炉仍然达不到初始设计性能,因此燃用混煤才是电厂保证入炉煤质稳定的长久之计。燃用混煤综合效益主要表现在以下几个方面:

①电厂购煤更为灵活,降低对设计煤种的依赖。通过将优质煤与低质煤混配,电厂用煤就不会局限于设计煤种,而可以根据煤炭市场行情,灵活选择价格合理的煤种,降低对设计煤种的依赖,从而有利于电厂在煤炭供应偏紧的市场环境下能够获得充足的煤炭供应,提高电厂煤炭库存量可用天数,降低电厂的发电风险。

②有效控制入炉煤质,保证锅炉安全运行。通过燃煤混配,电厂可以配制出符合锅炉煤质指标的“新煤种”,以煤适炉,从而有效控制入炉煤质,保证锅炉安全运行,减少事故发生。在上述算例中,虽然煤种B的价格最低,但其煤质不符合锅炉设计要求,故不能单独燃烧。而通过与煤种C的混配,煤种B中原本不符合要求的收到基水分、收到基硫分符合锅炉要求。

③提高煤炭利用效率,节约煤炭资源。电厂直接燃用低质煤,热值不高会造成锅炉产汽不足,热效率降低,导致发电煤耗增加。而燃用混煤则可以改善入炉煤质,提高锅炉效率,进而提高煤炭利用效率,节约煤炭资源,有资料显示燃用混煤的节煤率一般在10%左右。

④降低发电成本。通过将高价煤与低价煤的混配,可以降低电厂发电成本。在上述算例中,虽然煤种C的煤质符合锅炉要求,但其价格最高,为 $630 \text{元} \cdot \text{t}^{-1}$,根据购煤成本最低原则不能单独燃烧。而将煤种B和煤种C按4:6的比例进行混配,混煤的价格变为 $568 \text{元} \cdot \text{t}^{-1}$,比单独燃用煤种C每吨便宜62元,假若某一电厂日耗煤量10000吨,燃用此混煤每天可为电厂节约62万元。

⑤控制空气污染。在我国电煤消耗中,直接燃用原煤现象普遍,导致高污染的不利后果。众多研究表明,通过将高硫煤与低硫煤混配,可以大大降低混煤的硫含量。在上述算例中,煤种B的硫含量为0.27%,煤种C的硫含量为0.11%,将煤种B和煤种C按4:6进行混配,混煤的硫含量变为0.17%。目前,燃煤混配已成为一种比较成熟的改善入炉煤质的洁净煤技术,电厂可以通过燃用混煤来控制污染物的生成,达到改善人类生存环境的目的。

4 结论与建议

今年是实现“十一五”节能减排目标的决战之

年,电厂燃用混煤既有利于保证该目标的实现,又有利于电厂在激烈的市场竞争中获得竞争优势,具有良好的综合效益。

针对电厂在燃用混煤时遇到的一些问题,本文提出以下建议:

1)燃煤混配必须遵循一定的原则。为了实现混煤中各单煤的优劣互补,电厂在进行燃煤混配时应遵循以下原则:①配制生成的“新煤种”要适应锅炉对煤质要求,保证锅炉的安全运行;②优质煤资源紧缺,尽量少使用价格高的优质煤,扩大低价煤的混配比例。

2)控制混煤硫含量,并控制其他污染物的形成。电厂是主要的排污企业,排污权交易对电厂具有内在的调节激励作用,其较传统的行政管制能更有效地促进环境容量资源的有效配置。文献^[15]指出在我国尤其是我国的电力行业,推行排污权交易已是必然的趋势。电厂应该及早做好应对新政策出台的准备,主动采取措施减少污染物的排放,提高电厂的环境效益。

3)电厂应对混煤煤质特性、燃烧特性等进行深入研究。混煤煤质指标是否具有线性可加性要视具体情况而定,如果一味地采用线性规划理论求解最佳配比,可能使计算结果具有误差,严重时会影响锅炉稳定运行。电厂技术人员在实际工作中,掌握更多的第一手资料,通过研究总结混煤煤质与各单煤煤质之间的关系,有助于更精确地计算本电厂燃煤混配的最佳配比。

4)提高配煤中心在电厂燃煤混配中的作用。配煤中心的基本原理是用低成本的煤生产市场上最需要的环保型、高质量的均质煤炭,配煤中心可以发挥配煤的规模经济效益。电厂自身进行燃煤混配,不仅要不同的地区购进不同的煤种,还要有配煤工艺和设备等等,这样配煤的成本会比较高,而如果将混配的工作交由配煤中心进行,电厂则只需从配煤中心购进配置好的“新煤种”,这样就会节省很多费用。

参考文献

- [1] 佚名. 对我国煤炭资源分布状况进行分析研究[EB/OL]. [2010-05-14]. http://www.jiaotanqihuo.com/html/201001/22/20100122100502_1.htm.
- [2] 王永伟. 中国煤炭资源分布现状和远景预测[J]. 煤, 2007(5):44-45.
- [3] 刘丽靓. 煤价涨幅达30%,电煤库存逼近警戒线[N]. 证券日报, 2010-01-09(A2).

(下转第130页)

- [29] 王伍祺,王喜成.基于多重价值流的企业核心竞争力[J].科研管理,2004(9):29-34.
- [30] 王念新,葛世伦,周园.价值链-价值流分析在企业建模中的应用[J].价值工程 2005(2):48-51.
- [31] 李文杰,徐克林.基于价值流图析的精益生产研究[J].2000:41-44.
- [32] 张东汉,孙小明.价值流技术在企业业务流程重组中的应用[J].工业工程与管理,2005(5):39-79.
- [33] 由菁菁,王亚超,张惠.基于价值流的 BPR 实例研究[J].商业时代,2007,22:56-57.
- [34] ZEITHAML V. Consumer perceptions of price, quality, and value: a means-end model and synthesis of evidence[J]. Journal of Marketing 1988,52(6):2-22.
- [35] 菲利普·科特勒著,梅汝和等译.营销管理:分析、计划、执行和控制[M].第9版,上海:上海人民出版社,1999.
- [36] WOODRUF R B. Customer value: the next source of competitive advantage[J]. Journal of the Academy of Marketing Science,1997,25(2):139-153.
- [37] CORSBY L A, EVANS K R COWLES D. Relationship quality in services selling:an interpersonal influence perspective[J]. Journal of Marketing, 1990,4(6):68-81.
- [38] RAVALD A,GRONROOS C. The value concept and relationship marketing[J]. European Journal of Marketing, 1996,30(2):19-30.
- [39] GRDNROOS, C. Value-driven relational marketing: from products to resources and competencies[J]. Journal of Marketing Management, 1997,13(5):407-419.
- [40] PARASURAMAN. Reflections on gaining competitive advantage through customer value[J]. Journal of the Academy of Marketing Science, 1997, 25(2).

Study on Quality Value Stream and Its application

Pi Shenglei

(Guangzhou Academy of Social Science,Guangzhou 510410)

Abstract: For answering the two basic questions as "How is the quality produced? What are the specific quality responsibilities of each activities in the production", the theory of customer value has been involved into the discussion of the relationship between customer value and quality objectives of company, basing on which the identity and basic model of quality value stream (QVS) have been proposed. Then all the activities and works inside the company have been separated into three quality roles, the direct production, the assistant production, and the checking and confirming, basing on which a fundamental principal of quality management has been highlighted. Finally, a set of managerial tools according to the QVS has developed and exemplified with a quality management case in a clothing making factory.

Key words: value stream; quality management; quality value stream; quality Roles

(上接第 75 页)

- [4] 冯明驰等. 锅炉分册[M]. 北京:中国电力出版社,2008:109.
- [5] 陈文敏,姜宁. 动力配煤主要煤质指标的加性[J]. 煤质技术与科学管理,1997(4):30-32.
- [6] 王雅君,赵寒雪,何京东. 动力配煤主要煤质指标可加性的研究[J]. 应用能源技术,2004(5):15-18.
- [7] 郭鹏,何屏,徐远纲,等. 混煤燃烧技术研究进展[J]. 云南化工,2007,34(6):57-59.
- [8] 侯栋歧. 混煤煤粉着火和燃尽特性的实验研究[J]. 电站系统工程,1995,11(2):24-28.
- [9] 刘亮,等. 混煤热解特性及燃烧过程的实验研究[J]. 动力工程,2006,26(1):130-134.
- [10] 聂其红. 褐煤混煤燃烧特性的热重分析法研究[J]. 燃烧科学与技术,2001,7(1):72-76.
- [11] 陈晓玲. 配煤线性规划模型的研究[J]. 煤炭加工与综合利用,2003(2):34-38.
- [12] 王运民. 电厂混煤燃烧最优掺配比例的确定[J]. 长沙理工大学学报,2004,1(2):52-55.
- [13] 侯静,赵益坤. 动力配煤的数学模型及优化解[J]. 太原理工大学学报,2006,37(4):486-488.
- [14] 张省. 火电厂原煤混配经济模型的研究与应用[D]. 保定:华北电力大学,2007.
- [15] 任玉珑,夏德建. 中国电力行业排污权交易机制设计研究——基于欧美国家的相关经验[J]. 技术经济,2010,29(1):35-43.

Technical and Economic Analysis of Burning Blended Coal at Power Plant

Liu Ruiyu, Zhou Xiang

(Economics and Management School, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To solve the problems caused by burning coal, power plant has to use high-quality, low-cost and low-pollution coal. Based on the linear programming theory, this paper establishes an economic model of coal blending, and analyzes its technical and economic effect. The research results show that burning blended coal has good comprehensive benefits.

Key words: blended coal; linear programming; technical and economic analysis