

煤炭加工

基于线性规划法的配煤入选试验

孙景丹,杜新伟,李 哲

(黑龙江科技大学 矿业工程学院,黑龙江 哈尔滨 150022)

摘 要:以鸡西地区3种原煤为试验对象进行浮沉试验,结果表明:当特征灰分为11%时,主焦煤为难选煤,1/3焦煤为中等可选煤,肥煤为极难选煤。基于各煤样单独洗选后的煤质指标,以炼焦煤煤质要求和3种精煤煤质指标为约束条件,以配煤成本最低为目标函数,建立线性规划数学模型,得到成本最低时3种煤的最佳配比为:18%主焦煤,32% 1/3焦煤,50%肥煤。将煤样按上述比例混合后进行浮沉试验,并对洗选后的混煤进行煤质分析,结果表明:当特征灰分为11%时,配煤为较难选煤,明显改善了煤的可选性;配煤洗选后各煤质指标的实际值与理论值相差较小,无显著性差异,且精煤各项指标均符合炼焦煤煤质要求。因此采用线性规划法进行配煤入选可行,对炼焦煤选煤厂具有一定的借鉴意义。

关键词:配煤入选;线性规划;配比计算;浮沉试验;炼焦煤;煤质指标

中图分类号:TD94

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2014)02-0001-04

Coal blending experiment based on linear programming

SUN Jingdan, DU Xinwei, LI Zhe

(College of Mines Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

Abstract: Conduct float-and-sink analysis on three types of coal selected from Jixi. The results show that, the coking coal is difficult separation coal, the 1/3 coking coal is medium optional coal, the rich coal is extremely difficult separation coal when the ash-feature is 11 percent. Based on indicators of each coal samples after washing, the quality requirement of coking coal and indicators of three kinds of coal as constraints, the cost coal as the objective function, obtain a linear programming model and the best ratio is 18 percent coking coal, 32 percent of the 1/3 coking coal, 50 percent of rich coal. Conduct float-and-sink analysis and the quality analysis after washed with mixed coals above. The results show that, the blending coal is medium optional coal when the ash-feature is 11 percent, and coal washability is significantly improved. Between the actual value and the theoretical value of each coal index after washing, there are no significant difference, while the indicators of refined coal are in line with coal quality requirements of coking coal. Therefore, the use of linear programming for washing mixed coal is feasible, and has a certain significance for coking coal preparation plant.

Key words: coal blending washing; linear programming; ratio calculation; float-and-sink; coking coal; coal quality index

0 引 言

近年来,主要经济体国家钢铁产量大幅下滑,焦炭需求下降。澳大利亚、加拿大等国积极向中国出口炼焦煤,国外开采成本低加之国内优质炼焦煤产量下滑,严重冲击着国内焦炭市场。为有效利用煤炭资源,节约优质焦煤,扩大炼焦煤来源,降低焦

炭成本,实现炼焦行业的快速发展,实行配煤炼焦尤为重要^[1-3]。配煤炼焦就是将不同变质程度的炼焦煤按适当比例混合,实现各种煤在性质上的优势互补,使配合煤在结焦性等方面优于单种煤,这对于合理利用煤炭资源,节约优质炼焦煤,扩大炼焦煤来源具有重要意义^[4-6]。现代化炼焦厂可根据资源特点采用配煤炼焦,使炼焦煤资源得到合理利用,改善焦

收稿日期:2013-11-28;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2014.02.001

基金项目:黑龙江省科技计划资助项目(科技攻关)(GZ11A402);黑龙江省应用技术与开发计划资助项目(GC13A112)

作者简介:孙景丹(1987—),女,黑龙江肇源人,在读硕士,主要从事配煤炼焦的研究。E-mail:jing1984dan@sina.com

引用格式:孙景丹,杜新伟,李 哲.基于线性规划法的配煤入选试验[J].洁净煤技术,2014,20(2):1-4,9.

SUN Jingdan, DU Xinwei, LI Zhe. Coal blending experiment based on linear programming[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(2): 1-4, 9.

炭质量,优化生产,降低成本。炼焦型选煤厂为达到产品质量要求,往往需要多种原煤混合入选。而入选前的配比不仅影响产品质量,还涉及选煤企业以合理成本获得最大经济效益的问题^[7-8]。

笔者结合炼焦煤选煤厂生产情况,通过选定的配合煤工业分析,应用线性规划法进行优化设计配比,在实验室进行配煤的工业分析,以验证配煤入选的可行性。

1 线性规划数学方法

线性规划是运筹学的重要分支,用来确定多变量线性函数在变量满足线性约束条件下的最优解,已成为求解各种优化问题的主要方法^[9]。线性规划数学方法是先确定与生产相关的变量参数和约束条件,建立多元线性方程,最后求解线性方程得到最优结果^[10-11]。笔者采用线性规划法,在可行域上定义,通过多次迭代进行线性求解,最终得到最优结果。

2 试验条件

2.1 煤样性质

试验选取黑龙江鸡西产的 3 种炼焦用煤,分别为滴道主焦煤、杏花 1/3 焦煤、平岗肥煤。按照 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》^[12]对 3 种单煤进行煤质分析,结果见表 1。

表 1 煤样煤质分析

煤样	$A_d / \%$	$V_{daf} / \%$	$S_{t,d} / \%$	Y / mm
主焦煤	10.76	20.96	0.49	15.5
1/3 焦煤	12.83	30.09	0.46	11.5
肥煤	10.99	24.31	0.33	19

2.2 试验仪器

主要试验仪器见表 2。

表 2 主要试验仪器

名称	型号
制样粉碎机	ZMZ-100
烘干箱	101A-3
一体化智能马弗炉	ZMF-1
电子天平	FA135S
智能测硫仪	KZDL-500
胶质层测定仪	ALJK-1
真空过滤机	DL-5C

2.3 试验方法

1) 浮沉试验。按照 GB/T 478—2008《煤炭浮沉试验方法》^[13]对 3 种单煤进行浮沉试验,确定 3 种单煤的可选性。

2) 配煤入选方法。以炼焦配煤达到的质量要求和 3 种单煤的煤质特性为约束条件,以价格最低为目标函数,建立线性规划数学模型。通过求解线性规划数学模型求出满足目标函数时 3 种煤的最佳配比。按配比和各单种煤的煤质特性计算出混配后煤的各项煤质指标的理论值。

3) 验证试验。将 3 种原煤按最佳配比混配后进行浮沉试验,将浮沉得到的各密度级产物干燥后制成 -0.2 mm 煤样,对煤样进行工业分析,得到混配后煤的各项煤质指标的实际值,对混煤的实际值和理论值进行对比分析,验证配煤入选的可行性。

3 试验结果

3.1 浮沉试验

3 种单煤 3 ~ 13 mm 浮沉试验结果见表 3 ~ 表 5。

表 3 3 ~ 13 mm 主焦煤浮沉试验结果

密度级 / ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)	产率 / %	灰分 / %	浮物累计 / %		沉物累计 / %		$\delta \pm 0.1$ 含量	
			产率	灰分	产率	灰分	密度级 / ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)	产率 / %
-1.30	14.38	5.13	14.38	5.13	100.00	39.12	1.30	40.23
1.30 ~ 1.40	25.85	13.79	40.23	10.69	85.62	44.83	1.40	38.65
1.30 ~ 1.50	12.80	23.05	53.03	13.68	59.77	58.25	1.50	18.65
1.50 ~ 1.60	5.85	32.39	58.88	15.54	46.97	67.85	1.60	11.18
1.60 ~ 1.70	5.33	41.49	64.21	17.69	41.12	72.89	1.70	9.34
1.70 ~ 1.80	4.01	49.82	68.22	19.58	35.79	77.57	1.80	35.79
+1.80	31.78	81.07	100.00	39.12	31.78	81.07		
合计	100.00	39.12						
煤泥	3.98	34.83						
总计	100.00	38.96						

表 4 3 ~ 13 mm 1/3 焦煤浮沉试验结果

密度级/ (kg · L ⁻¹)	产率/ %	灰分/ %	浮物累计/%		沉物累计/%		$\delta \pm 0.1$ 含量	
			产率	灰分	产率	灰分	密度级/(kg · L ⁻¹)	产率/%
- 1. 30	15. 17	4. 35	15. 17	4. 35	100. 00	43. 68	1. 30	31. 01
1. 30 ~ 1. 40	15. 84	18. 23	31. 01	11. 44	84. 83	50. 72	1. 40	25. 13
1. 40 ~ 1. 50	9. 29	26. 97	40. 30	15. 02	68. 99	58. 17	1. 50	17. 79
1. 50 ~ 1. 60	8. 50	36. 27	48. 80	18. 72	59. 70	63. 03	1. 60	16. 33
1. 60 ~ 1. 70	7. 83	44. 75	56. 63	22. 32	51. 20	67. 47	1. 70	14. 71
1. 70 ~ 1. 80	6. 88	53. 25	63. 51	25. 67	43. 37	71. 57	1. 80	43. 37
+ 1. 80	36. 49	75. 03	100. 00	43. 68	36. 49	75. 03		
合计	100. 00	43. 68						
煤泥	0. 89	33. 65						
总计	100. 00	43. 59						

表 5 3 ~ 13 mm 肥煤浮沉试验结果

密度级/ (kg · L ⁻¹)	产率/ %	灰分/ %	浮物累计/%		沉物累计/%		$\delta \pm 0.1$ 含量	
			产率	灰分	产率	灰分	密度级/(kg · L ⁻¹)	产率/%
- 1. 30	14. 18	6. 08	14. 18	6. 08	100. 00	41. 07	1. 30	46. 90
1. 30 ~ 1. 40	32. 72	13. 12	46. 90	10. 99	85. 82	46. 85	1. 40	41. 62
1. 40 ~ 1. 50	8. 90	24. 86	55. 80	13. 20	53. 10	67. 64	1. 50	15. 05
1. 50 ~ 1. 60	6. 15	33. 76	61. 95	15. 24	44. 20	76. 25	1. 60	9. 49
1. 60 ~ 1. 70	3. 34	46. 69	65. 29	16. 85	38. 05	83. 12	1. 70	5. 48
1. 70 ~ 1. 80	2. 14	50. 49	67. 43	17. 92	34. 71	86. 63	1. 80	34. 71
+ 1. 80	32. 57	89. 00	100. 00	41. 07	32. 57	89. 00		
合计	100. 00	41. 07						
煤泥	4. 79	30. 37						
总计	100. 00	40. 58						

由表 3 可知,当特征灰分为 11% 时,主焦煤的 $\delta \pm 0.1$ 含量为 40%,因此主焦煤为难选煤。由表 4 可知,当特征灰分为 11% 时,1/3 焦煤的 $\delta \pm 0.1$ 含量为 20%,因此 1/3 焦煤为中等可选煤。由表 5 可知,当特征灰分为 11% 时,肥煤的 $\delta \pm 0.1$ 含量为 42%,因此肥煤为极难选煤^[4]。

3.2 配煤模型的建立

根据炼焦配煤的要求,在配煤工艺较稳定的情况下,焦炭质量主要取决于配煤质量。配煤各项质量指标和各单种煤质量指标线性相关,即配煤质量由各单种煤质量及配比决定。配煤选取的参考指标为灰分、挥发分、硫分、胶质层厚度和价格^[5]。炼焦煤主要煤质指标要求见表 6。3 种原料煤单独洗选后的精煤各项指标见表 7。

表 6 炼焦煤煤质指标要求

A_d /%	V_{daf} /%	$S_{t,d}$ /%	Y /mm
0. 1 ~ 12. 5	25 ~ 30	0. 4 ~ 1. 0	16 ~ 20

基于各煤样单独洗选后的各项指标,以炼焦煤煤

质要求和 3 种精煤煤质指标为约束条件^[4],以配合煤成本最低为目标函数,建立如下线性规划数学模型^[7]。

表 7 原料煤精煤各项指标

煤种	A_d /%	V_{daf} /%	$S_{t,d}$ /%	Y /mm	价格/(元 · t ⁻¹)
主焦煤	10. 76	20. 96	0. 49	15. 5	1200
1/3 焦煤	12. 83	30. 09	0. 46	11. 5	1020
肥煤	10. 99	24. 31	0. 33	19. 0	1350

目标函数:

$$\min f(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n$$

约束条件:

$$x_1 + x_2 + \cdots + x_n = 1$$

灰分约束条件:

$$0. 1 \leq a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \leq 12. 5$$

挥发分约束条件:

$$25 \leq a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \leq 30$$

硫分约束条件:

$$0. 4 \leq a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + \cdots + a_{3n}x_n \leq 1. 0$$

胶质层厚度约束条件:

$$16 \leq a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + \cdots + a_{4n}x_n \leq 20$$

式中, x_i 为各单种煤的配煤比例, $x_i \geq 0, i = 1, 2, \cdots, n$; $f(x)$ 为原煤总成本价; a_{1i} 为煤的灰分, $x_i \geq 0, i = 1, 2, \cdots, n$; a_{2i} 为煤的挥发分, $x_i \geq 0, i = 1, 2, \cdots, n$; a_{3i} 为煤的硫分, $x_i \geq 0, i = 1, 2, \cdots, n$; a_{4i} 为煤的胶质层厚度, $x_i \geq$

$0, i = 1, 2, \cdots, n$; c_i 为各种煤价格, $x_i \geq 0, i = 1, 2, \cdots, n$ 。

3.3 线性规划求解

利用规划求解功能对上述多元线性方程进行求解, 得到成本最低时 3 种煤的最佳配比, 线性优化结果见表 8。

表 8 线性优化结果

煤种	$A_d / \%$	$V_{daf} / \%$	$S_{t,d} / \%$	Y / mm	价格 / (元 $\cdot \text{t}^{-1}$)	配比 / %
主焦煤	10.76	20.96	0.49	15.5	1200.00	18
1/3 焦煤	12.83	30.09	0.46	11.5	1020.00	32
肥煤	10.99	24.31	0.33	19.0	1350.00	50
理论值	11.53	25.53	0.40	16.0	1218.72	100

3.4 验证试验

将配比分别为 18%、32%、50% 的主焦煤, 1/3 焦煤及肥煤混合后进行浮沉试验, 对洗选后的混煤

煤样进行煤质分析, 得到原煤混合洗选后精煤各项煤质指标。配煤 3 ~ 13 mm 浮沉试验结果见表 9。混合洗选后实际值与理论值的对比见表 10。

表 9 配煤 3 ~ 13 mm 浮沉试验结果

密度级 / ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)	产率 / %	灰分 / %	浮物累计 / %		沉物累计 / %		$\delta \pm 0.1$ 含量	
			产率	灰分	产率	灰分	密度级 / ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)	产率 / %
-1.30	16.73	6.67	16.73	6.67	100.00	42.57	1.30	37.76
1.30 ~ 1.40	21.03	12.98	37.76	10.18	83.27	49.78	1.40	32.94
1.40 ~ 1.50	11.91	26.01	49.67	13.98	62.24	62.21	1.50	18.58
1.50 ~ 1.60	6.67	33.64	56.34	16.31	50.33	70.78	1.60	11.02
1.60 ~ 1.70	4.35	42.71	60.69	18.20	43.66	76.45	1.70	7.09
1.70 ~ 1.80	2.73	50.82	63.42	19.60	39.31	80.19	1.80	39.31
+1.80	36.58	82.38	100.00	42.57	36.58	82.38		
合计	100.00	42.57						
煤泥	4.84	32.07						
总计	100.00	42.09						

由表 9 可知, 当特征灰分为 11% 时, 配煤的 $\delta \pm 0.1$ 含量为 25%, 因此配煤为较难选煤, 明显改善了煤的可选性。

表 10 混合洗选后实际值与理论值的对比

项目	$A_d / \%$	$V_{daf} / \%$	$S_{t,d} / \%$	Y / mm
实际值	11.31	25.87	0.39	18
理论值	11.53	25.53	0.40	16
差值	-0.22	0.34	-0.01	2

采用 SPSS 软件对表 10 数据进行方差分析, 得到实际值和理论值的显著性值 (Sig)。当 $\text{Sig} > 0.05$ 时, 认为各试验组中因变量的误差方差无显著性差异; 当 $\text{Sig} \leq 0.05$ 时, 认为各试验组中因变量的误差方差有显著性差异。经计算, 表 10 中理论值与实际值的 Sig 值为 0.054, 大于 0.05, 说明理论值与实际值

无显著性差异。因此, 将 18% 主焦煤、32% 1/3 焦煤、50% 肥煤混合洗选后各煤质指标的实际值与理论值无显著性差异, 精煤各项煤质指标均符合炼焦煤的煤质要求。

4 结 语

通过对比单种煤和配煤的浮沉试验结果, 说明配煤入选可改善煤的可选性。

以单一煤种浮沉试验获得的精煤工业指标为依据, 采用线性规划法优化混合原煤比例。将 18% 主焦煤、32% 1/3 焦煤、50% 肥煤混合洗选后各煤质指标的实际值与理论值无显著性差异, 混合洗选后的精煤可用作炼焦原料。采用线性规划法进行配煤入选可行, 对炼焦煤选煤厂具有一定的借鉴意义。

(下转第 9 页)

精煤灰分在 16% ~ 25% 频繁波动,产品也由主焦煤变为动力煤。

经技术检查和工艺试验,在浮选系统前增加 $\phi 150$ mm 小锥角水力旋流器预先抛尾工艺,即煤泥进入浮选煤浆预处理器前经 $\phi 150$ mm 小锥角水力旋流器预先抛尾,按其煤泥水量的 1.2 倍,安装 $\phi 150$ mm 型聚氨酯小锥角水力旋流器 4 组 $\times$ 12 支。初步调试后,浮选入料灰分可控,浮选精煤泥产品灰分控制在 10% ~ 12%,减少了高灰非煤矿物进入浮选系统,降低了浮选系统处理量,浮选捕收剂用量也由 1.72 kg/t 降至 1.26 kg/t,起泡剂用量由 1.15 kg/t 降至 0.94 kg/t,降低了浮选成本。

4 结 论

1) 对于临江选煤厂煤泥, $\phi 150$ mm 小锥角水力旋流器在给料质量分数 15%,给料压力 0.25 MPa 的条件下,可实现 0.038 mm 煤泥的初步分级分选。

2) 煤泥经 $\phi 150$ 、 $\phi 75$ 、 $\phi 50$ mm 小锥角水力旋流器底流串联预处理后,可实现连续降灰,但精煤泥占全级产率有所下降。与原煤泥直接浮选相比,煤泥经 $\phi 150$ mm 小锥角水力旋流器预先抛尾后,其合格精煤泥产率(占全级)、可燃体回收率和浮选完善指标分别提高 6.03%、7.28% 和 9.99%。入浮煤泥经小锥角水力旋流器预先抛尾工艺,可减少高灰非煤矿物进入浮选系统,有利于稳定浮选系统和产品指标,节约浮选药剂,降低浮选成本。

3) $\phi 150$ mm 小锥角水力旋流器在通化矿业(集团)有限责任公司临江选煤厂的生产实践表明: $\phi 150$ mm 小锥角水力旋流器应用于选煤厂预先抛尾具有

可行性。

参考文献:

- [1] 宋振东,徐洪林.小直径水力旋流器与高岭土的超细分级[J].矿产保护与利用,1994(6):35-37.
- [2] 袁 纳,陈 强,李 航.小口径水力旋流器在高岭土选矿中的应用[J].中国非金属矿工业导刊,2006(6):37-39.
- [3] 谢登峰.水力分级旋流器在我国选煤厂的应用范围及研究方向[J].煤炭加工与综合利用,2009(6):24-26.
- [4] 郭建新.煤伴生矿物的泥化对选煤厂设计的影响[J].洁净煤技术,2012,18(5):24-27.
- [5] 庞学诗.根据分级粒度计算水力旋流器直径的半经验算法[J].现代矿业,2010(7):46-47,117.
- [6] 庞学诗.水力旋流器技术与应用[M].北京:中国石化出版社,2011.
- [7] 任兰柱,周建军,崔凤禄,等.小直径水力旋流器的研制[J].洁净煤技术,2006,12(2):106-108,88.
- [8] 张乾伟,任瑞晨,李彩霞.从选钼尾矿中回收金云母试验研究[J].非金属矿,2013,36(2):72-74.
- [9] 王福元,吴正严.粉煤灰利用手册[M].2版.北京:中国电力出版社,2004.
- [10] 刘继霞,常 胜,王 伟,等.浮选尾煤中高附加值粗颗粒的回收研究[J].煤炭加工与综合利用,2008(1):4-6.
- [11] 付晓恒,单晓云,蒋和金,等.煤泥深度浮选技术的研究[J].煤炭学报,2006,31(1):90-93.
- [12] 刘均章,沙 杰,宋景玲.基于旋流微泡浮选柱的高灰细泥浮选优化试验[J].洁净煤技术,2013,19(3):22-25.
- [13] 崔广文,王京发,杨 硕,等.细粒难浮煤泥浮选试验研究[J].洁净煤技术,2013,19(6):1-4.
- [14] 桂夏辉.煤泥分选过程强化及两段式分选研究[D].徐州:中国矿业大学,2012.
- [15] 刘莉君,刘炯天,袁 闯,等.钱家营难选煤泥的分选技术研究[J].中国矿业,2010,19(8):72-75.
- [16] 张振勇,李文华,徐振刚,等.煤的配合加工与利用[M].徐州:中国矿业大学出版社,2002:99-100.
- [17] 赵 龙,贾 倩.选煤厂配煤入选的实践[J].洁净煤技术,2009,15(5):25-26,41.
- [18] 刘建知.利用 Excel 求解线性规划问题[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2005,31(5):562-564.
- [19] 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.
- [20] GB/T 212—2008,煤的工业分析方法[S].
- [21] GB/T 478—2008,煤炭浮沉试验方法[S].
- [22] 徐四海,刘建军.持续改进配煤技术有效控制配煤成本[J].广东化工,2009,36(7):314-315,323.
- [23] 薛改凤,项 茹,陈 鹏,等.炼焦煤质量指标评价体系的研究[J].武汉科技大学学报,2009,32(1):36-40.
- [24] 张千宗.线性规划[M].武汉:武汉大学出版社,2004.
- [25] 邹 进,吴 杰,朱 彤.煤中全水分的测定[J].洁净煤技术,2013,19(5):120-122.
- [26] 庄金生.我国选煤技术现状与发展趋势[J].现代营销:学苑版,2012(8):261.
- [27] 杨 丽.中国煤炭科技发展现状及展望[J].洁净煤技术,2012,18(3):1-3,32.
- [28] 刘炯天.关于我国煤炭能源低碳发展的思考[J].中国矿业大学学报:社会科学版,2011(1):5-12.
- [29] 彭陈辉.无烟煤配煤炼焦试验研究[J].煤化工,2005(6):47-50,53.
- [30] 陈文敏.洁净煤技术基础[M].北京:煤炭工业出版社,1997:12-20.
- [31] 姚昭章.炼焦学[M].3版.北京:冶金工业出版社,2005:67-69.
- [32] 卢凤莉,杨国要,王林缝,等.原煤混配洗选与炼焦的工业实践[J].河南冶金,2006,14(3):25-26.

(上接第4页)

参考文献: