利用 Minitab 工具建立配煤预测模型的研究*

付利俊[1],李晓炅[1],庞文娟[2]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司煤焦化工分公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 利用 Minitab 软件建立配煤预测模型,解决了包钢经验配煤预测误差大、准确度不高问题,对于生产具有较强的指导作用。该模型能够快速预测焦炭质量,及时指导焦化配煤生产,保证了焦炭质量,确保高炉稳定顺行,同时扩展了包钢用煤范围,节约优质炼焦资源,降低用煤成本,其极具应用推广意义。

关键词: 配煤; 焦炭质量; 预测模型; Minitab 软件
中图分类号: TF526.1; TQ018 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2020)03-0014-05
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.03.004

Study on Establishing Prediction Model of Coal Blending with Minitab

Fu Li-jun[1], *Li Xiao-jiong*[1], *Pang Wen-juan*[2]

(1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Coke Chemical Engineering Branch Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The prediction model of coal blending is established with Minitab software so that the problems of large error and low accuracy of coal blending prediction by experiences in Baotou Steel are solved, which plays a stronger guiding role in production. The coke quality can be quickly predicted with the model so that the production of coking coal blending is guided in time as well as the coke quality, the stable and trouble-free operation of blast furnace are ensured. Meanwhile, the range of coal used in Baotou Steel is expanded, high-quality coking resources are saved and costs of coal are reduced so that it is of great significance in application and promotion.

Key words: coal blending; coke quality; prediction model; Minitab software

传统的生产焦炉配煤比确定完全依靠试验焦炉的数据,整个过程耗时长,人力、物力、财力投入大,不能够及时指导生产。特别针对包钢目前优质煤源紧缺,供煤方的恶意混煤、煤质波动大、煤种复杂的情况,试验焦炉的滞后性显得尤为突出。

焦炭质量预测模型并不陌生,通过以往资料的查阅,近年来的焦炭质量预测法多以预测方程为主,并且提出了许多新的预测指标。有些预测模型涉及的指标本身意义不太明确,计算繁琐,预测精度不高,限制了其推广应用。另外,现有模型存在的主要问题是适用范围不明确。因此确定煤焦之间主要相关参数以及回归模型的具体表达方程式是关键点,同样也是技术难点。

Minitab 软件是现代质量管理统计的领先者,全

* 收稿日期: 2020-04-22
作者简介: 付利俊(1972-),男,内蒙古呼和浩特市人,硕士,高级工程师,现从事配煤炼焦和相关煤炭应用工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

球六西格玛实施的共同语言，以无可比拟的强大功能和简易的可视化操作深受广大质量学者和统计专家的青睐。Minitab 统计软件为质量改善和概率应用提供准确和易用的工具[1]。利用 Minitab 数据处理软件以各基础分析数据为依据，找出影响煤焦之间相互关系参数，并进一步去除非主要影响因子，以确定最终建模关键参数。最终建立一套适合包钢的焦炭质量预测模型，以期能够及时、准确、高效的指导炼焦生产。

1　焦炭灰分和硫分的预测模型

一般来说，配合煤的灰分和硫分与焦炭的灰分和硫分之间存在线性关系，焦炭的灰分是配合煤灰分 1.2 ~ 1.4 倍，焦炭的硫分是配合煤硫分 80% ~95% 的关系[2]，不同地区的煤种它们的关系略有不同。针对包钢来煤质量和配煤结构，利用 Minitab 软件预测焦炭质量，建立数据模型。

1.1　焦炭灰分的预测

由于煤和焦之间关于灰分、硫分相关性基本属于线性相关，且相关性较好，因此采用线性方程建立预测模型。采集包钢配合煤和焦炭的相关数据，见表 1。

表 1　配合煤与焦炭灰分、挥发分、硫分数据

编号	配合煤指标				焦炭指标		
	A_d /%	V_{daf} /%	$S_{t,d}$/%	G	A_d /%	V_{daf} /%	$S_{t,d}$/%
1	10.40	27.40	1.10	83	13.28	1.27	0.93
2	10.25	27.00	1.08	78	13.21	1.27	0.91
3	10.44	27.05	1.24	80	13.39	1.28	1.02
4	10.25	26.30	1.21	84	13.21	1.28	1.01
5	10.06	25.96	0.99	82	12.90	1.26	0.90
6	10.17	25.44	0.94	78	12.94	1.26	0.85
7	10.22	25.92	1.00	82	12.97	1.26	0.91
8	10.15	26.51	0.94	84	12.89	1.26	0.87
9	10.05	26.55	0.98	84	12.77	1.27	0.87
10	10.15	26.15	1.07	82	12.79	1.27	0.92
11	10.04	25.67	0.96	81	12.79	1.26	0.87
12	9.93	26.11	1.01	83	12.76	1.26	0.93

利用 Minitab 软件处理表 1 所示相关数据，建立预测灰分预测模型。焦炭灰分和煤的灰分回归分析模型建立为：$A_{d焦} = 1.27\ A_{d煤}$，$A_{d焦}$ 与 $A_{d煤}$ 回归数据分析如表 2 所示。

表 2　$A_{d焦}$ 与 $A_{d煤}$ 回归数据分析

自变量	系数	系数标准误差	T	P	S
$A_{d煤}$	1.312	0.023	58.04	0	0.76
来源	**自由度**	SS	MS	F	P
回归	1	1 966.8	1 966.8	3 368.24	0
残差误差	11	6.4	0.6		
合计	12	1 973.2			

一般来说，SS 为偏差平方和，MS 为均方和，F 为 SS 与 MS 的比值，此值足够大，越能够充分表明回归效果显著。说明此模型的焦炭灰分和煤的灰分回归效果显著。P 值为判断方程显著性的表征值，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

将其边界值定为0.05，P值大于0.05，则表明此方程无意义，或无存在意义。其越接近于零，则越能够证明回归显著有效。本次回归P值为零，证明焦炭的灰分和煤的灰分回归模型有效。

1.2 焦炭硫分的预测

硫分的回归同样采用线性方程建立预测模型，根据表1所示的硫分相关数据，利用Minitab软件处理后建立的模型为：$S_{t,d焦}=0.87\ S_{t,d煤}$，$S_{t,d焦}$与$S_{t,d煤}$回归数据分析如表3所示。

表3 $S_{t,d焦}$与$S_{t,d煤}$回归数据分析

自变量	系数	系数标准误差	T	P	S
$S_{t,d煤}$	0.82	0.024	33.75	0	0.09
来源	**自由度**	SS	MS	F	P
回归	1	8.41	8.41	1 138.80	0
残差误差	11	0.081	0.007 4		
合计	12	8.50			

回归分析数据表3中，自变量系数标准误差非常小，表明其精确度较高，由此得到的T值较大，生成的P值等于零，因此判定自变量系数显著不等于零，即预测变量对响应具有显著效应。也表明此自变量$S_{t,d煤}$为显著因子，此硫分回归模型显著有效。

2 冷态强度的预测模型

2.1 M_{40}预测模型

焦炭冷态强度的预测尤其以前苏联可燃矿产研究所的阿莫索夫法[3]及美国钢铁公司的夏皮洛法[4]最具代表性，但其数据模型结构复杂，操作困难，需要大量的手工运算建立模型，不能适应当下生产需要。Minitab软件属于现代数据处理工具，快速简洁，操作方便，精确度高。

通过Minitab软件寻找同焦炭冷态强度的相关因子，发现焦炭冷态强度同煤的灰分、挥发分、G值存在一定的线性关系，且能够得到较好的预测。其M_{40}的预测模型为：$M_{40}=82.10+0.042A_d-0.16V_{daf}+0.12G$，回归分析数据如表4所示。

表4 回归分析数据

自变量	系数	系数标准误差	T	P	S
A_d	0.041	0.78	5.33	0	1.39
V_{daf}	0.16	0.253	2.70	0.013	
G	0.12	0.099	3.42	0.002	
来源	**自由度**	SS	MS	F	P
回归	3	199 630	66 543	34 421.59	0
残差误差	22	43	2		
合计	25	199 673			

S代表均方差，表示偏离估计值，其值越大，表明偏离程度越高。此回归分析中均方差S=1.39>1，则表明存在较大离散程度。

2.2 M_{10}预测模型

利用Minitab软件寻找同焦炭冷态强度的相关因子，发现焦炭M_{10}同煤的灰分、挥发分、硫分存在一定的线性关系，且能够得到较好的预测。其M_{10}的预测模型为$M_{10}=3.10-0.12A_d+0.17V_{daf}+0.0009G$，回归分析数据如表5所示。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5　M_{10} 的预测模型

自变量	系数	系数标准误差	T	P	S
A_d	0.12	0.17	1.15	0.26	0.30
V_{daf}	0.16	0.055	0.40	0.69	
G	0.000 91	0.021	1.98	0.06	
来源	**自由度**	SS	MS	F	P
回归	3	951.00	317.00	3 455.13	0
残差误差	22	2.02	0.09		
合计	25	953.02			

从分析数据认为，相较于焦炭的抗碎强度，其耐磨强度的预测方程相关性明显优于 M_{40}。$S=0.30<1$，$P=0$。

从焦炭冷态强度四合一残差图中分析得出，自变量同因变量之间相关性一般，得到的回归模型存在偏离，预测精度一般。究其根本原因，主要是由于焦炭冷态强度的考核指标恒定，实测数据结果本身波动不大，量化到每天实测自变量参数，也即实测煤的灰分、挥发分和 G 值，其差异性显著，因此，建立的回归模型其数据的独立性和差异性一般，导致准确度和真实性一般。

虽然预测精度较差，但可以作为焦炭冷态强度的趋势性研究判断，因此，给出冷态强度的回归模型以作参考：

$$M_{40}=82.10+0.042A_d-0.16V_{daf}+0.12G$$

$$M_{10}=3.10-0.12A_d+0.17V_{daf}+0.000\,9G$$

3　焦炭热态性质的预测

焦炭的热性质（反应性 *CRI* 和反应后强度 *CSR*）取决于炼焦煤的煤质、炼焦和备煤工艺条件以及焦炭或煤的灰分组成 3 个主要因素，而这 3 个因素的每一个又有很多次级因素构成[5]。所以关键影响参数的确定、筛选至关重要。表征炼焦煤性质的参数有数十个之多，每一个参数都表征炼焦煤的 1 个特性。除了灰分和硫分之外，常用煤化度指标和粘结性指标来表征炼焦煤的工艺性质。

3.1　焦炭 *CSR* 模型建立

利用 Minitab 软件寻找同焦炭热态强度的相关因子，发现焦炭热态强度同煤的灰分、挥发分、G 值存在一定的线性关系，且能够得到较好的预测。其 *CSR* 的预测模型为：$CSR=72.71+0.19A_d+0.11V_{daf}-0.16G$，回归分析数据如表 6 所示。

表 6　焦炭 CSR 回归分析数据

自变量	系数	系数标准误差	T	P	S
A_d	0.19	0.52	5.15	0	0.43
V_{daf}	0.11	0.027	4.53	0	
G	0.17	0.031	2.89	0	
来源	**自由度**	SS	MS	F	P
回归	3	1 607.88	743.92	16 448.45	0
残差误差	24	1.23	0.04		
合计	27	1 608.10			

在回归分析中，自变量 A_d、V_{daf} 和 G 值的 P 值均为 0，则表明自变量同因变量显著相关。$S=0.43<1$，表明预测精度较高，误差较小。建立的回归方程其 P 值也为 0，则进一步充分证明此回归模型的有效性和可行性。

3.2　焦炭 *CRI* 模型建立

焦炭的反应性同反应后强度之间是否存在线性关系，通过 minitab 数据处理给出 *CRI* 与 *CSR* 之间相互关系式，且二者存在线性相关，具体线性关系如图 1 所示。

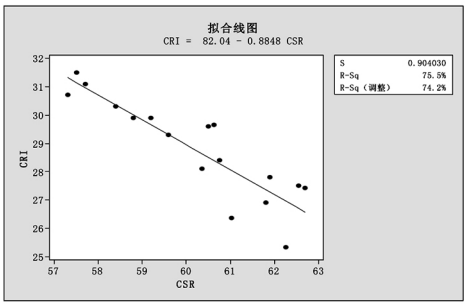


图 1　焦炭反应性同反应后强度拟合线图

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

其 *CRI* 的预测模型为: $CRI = 82.04 - 0.884\,8CSR$，回归分析数据如表7所示。

CRI 与 *CSR* 存在线性相关，但从线性拟合图中可以看出，数值分布较离散，相关性一般。S = 0.90 < 1，R - Sq = 75.5% 与调整后的 R - Sq = 74.2% 非常接近，且均大于70%，可见二者存在相关性。

表7 焦炭 *CRI* 回归分析数据

来源	自由度	SS	MS	F	P
回归	1	50.27	50.27	61.51	0
残差误差	20	16.34	0.82		
合计	21	66.61			

4 预测模型的实际验证

采用工业焦炉实测生产数据对预测模型进一步验证，随机抽取 1#—4#、7#—8#、9#—10#焦炉实测配合煤数据见表8。

表8 配合煤数据

焦炉	A_d/%	V_{daf}/%	$S_{t,d}$/%	*G*
1#—4#	10.03	26.33	1.02	80
1#—4#	10.12	26.62	1.08	80
1#—4#	10.21	26.81	1.04	78
1#—4#	9.95	26.32	0.99	81
7#—8#	10.06	27.36	0.99	83
7#—8#	10.19	27.16	0.94	82
7#—8#	10.09	27.81	1.06	85
7#—8#	10.15	27.24	0.96	84
9#—10#	10.05	27.61	0.98	82
9#—10#	10.21	27.41	1.02	83
9#—10#	10.12	27.81	0.98	82
9#—10#	10.06	27.38	1.07	81

根据实测配合煤数据，利用预测模型对焦炭进行预测，其灰分、硫分、M_{40}、*CSR* 与生产实际质量对比数据分析如表9所示，焦炭化验国家标准如表10所示。

表9 预测模型与实测数据对比(质量分数) %

焦炉	预测焦炭 A_d	实测焦炭 A_d	差值	预测焦炭 V_{daf}	实测焦炭 V_{daf}	差值	预测焦炭 M_{40}	实测焦炭 M_{40}	差值	预测焦炭 *CSR*	实测焦炭 *CSR*	差值
1#—4#	12.74	12.81	-0.07	0.89	0.85	0.04	89.27	90.12	-0.85	65.31	66.51	-1.20
	12.85	12.64	0.21	0.94	0.89	0.05	89.11	89.87	-0.76	65.36	66.38	-1.02
	12.97	12.71	0.26	0.90	0.86	0.04	89.44	90.06	-0.62	65.72	67.21	-1.49
	12.64	12.78	-0.14	0.86	0.88	-0.02	89.39	90.21	-0.82	65.14	66.87	-1.73
7#—8#	12.78	12.57	0.21	0.86	0.89	-0.03	88.98	88.26	0.72	64.95	64.12	0.83
	12.94	12.52	0.42	0.82	0.86	-0.04	89.14	88.73	0.41	65.11	64.76	0.35
	12.81	12.85	-0.04	0.92	0.88	0.04	88.91	88.16	0.75	64.69	64.39	0.30
	12.89	12.91	-0.02	0.84	0.86	-0.02	88.89	88.35	0.54	64.79	65.72	-0.93
9#—10#	12.76	12.63	0.13	0.85	0.86	-0.01	88.70	89.59	-0.89	65.14	64.91	0.23
	12.97	12.64	0.33	0.89	0.85	0.04	88.74	88.37	0.37	64.99	66.05	-1.07
	12.85	12.93	-0.08	0.85	0.89	-0.04	88.44	88.12	0.32	65.17	64.13	1.04
	12.78	12.62	0.16	0.93	0.89	0.04	88.86	88.21	0.65	65.27	64.37	0.90

(下转第57页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

经过热处理之后，组织基体上分布着细小的碳化物颗粒，加稀土后，微量稀土可以促使碳化物由连续分布变为断续分布，析出的碳化物细小弥散分布在整个基体内。对比结果均表明稀土具有一定的细化组织作用。

4　结束语

随着温度的降低，加入稀土元素后横向冲击韧性逐渐提高，冲击断口韧性区所占比例大，表明加入稀土后材料的横向低温冲击韧性明显提高；微量稀土可以促使碳化物由连续分布变为断续分布，析出的碳化物细小弥散分布在整个基体内，表明稀土具有一定的细化组织作用。

参　考　文　献

[1] 马爱清，贺景春，石晓霞. BT100H 钢级套管横向韧性偏低原因分析 [J]. 包钢科技，2012，38(03)：30－32.

[2] 胡秉仁，卢小庆，方华，等. 高强度热采井专用套管 TP100H 的开发 [A]. 中国金属学会. 2001 中国钢铁年会论文集 [C]. 北京：冶金工业出版社，2001，168－171.

(上接第 18 页)

表 10　焦炭化验国家标准

编号	分析项目名称	引用标准	允许化验误差/%
1	灰分	GB/T 2001—2013	0.30
2	全硫	GB/T 2286—2008	0.04
3	M_{40}	GB/T 2006—2008	2.0
4	*CSR*	GB/T 4000—2008	3.2

通过数学模型预测焦炭质量与实测焦炭质量对比数据分析，焦炭灰分对比差在允许化验误差范围内的数据合格率达到了 83.3%，焦炭硫分合格率为 91.7%，焦炭 M_{40} 数据合格率为 100%、焦炭 *CSR* 数据合格率为 100%。由此说明预测数据模型能够满足生产需求，快速预测焦炭质量，指导焦化配煤生产，及时应对来煤质量波动和来煤量不平衡对配煤生产的影响。

5　结论

(1) 利用 Minitab 软件首次在包钢建立了焦炭质量预测数学模型，解决了经验预测误差大，准确度不高问题，对于生产具有较强的指导作用。

(2) 预测数学模型能够快速预测焦炭质量，减少了来煤质量波动和来煤量不稳定造成对配煤生产的影响，及时指导焦化配煤生产，保证了焦炭质量，确保高炉稳定顺行。

(3) 预测数学模型的建立，为配煤研究提供了新思路，进一步在新煤种开发应用方面发挥作用，扩展了包钢用煤范围，节约了优质炼焦资源，能够有效降低用煤成本。

参　考　文　献

[1] 马逢时，周暐，刘传冰. 六西格玛管理统计指南 [M]. 北京：中国人民大学出版社，2012.

[2] 胡玉香. 配煤灰分硫分与焦炭质量的相关分析 [J]. 山西冶金，2011，134(6)：13－14.

[3] 张群，吴信慈，冯安祖，等. 宝钢焦炭质量预测模型Ⅰ. 影响焦炭热性质的因素 [J]. 燃料化学学报，2002，30(2)：113－118.

[4] 谢海深，刘永新，孟军波，等. 焦炭质量预测模型的研究 [J]. 煤炭转化，2006，29(3)：54－57.

[5] 郭治，杜铭华，曲思建. 焦炭反应性及反应后强度预测模型研究与分析 [J]. 煤炭学报，2005，30(1)：113－117.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net