

高炉无钟布料模型的改进与发展

马富涛, 吴 建

(北京首钢自动化信息技术公司 自动化研究所, 北京 100041)

摘要:探讨了目前国内高炉无钟布料模型现状,介绍了首钢高炉布料模型中的改进和创新环节,提出了今后布料模型的发展方向,并通过首钢二高炉规范化布料调整试验分析了其可行性。

关键词:布料模型;改进;发展方向;布料调整试验;可行性

1 布料数值模拟的现状

目前许多大型高炉采用无料钟旋转溜槽布料装置,大多数布料模型都是以模拟料面形状为主,多数是以炉料运动物理分析并结合经验参数进行模拟计算,有的借助辅助设备进行料面模拟,如红外摄像仪、雷达、激光料面计等,其核心思路均是为了得到比较真实的料面形状,但效果各不相同。

1.1 炉料运动物理分析

(1) 炉料进入溜槽的运动分析。如图 1 所示,

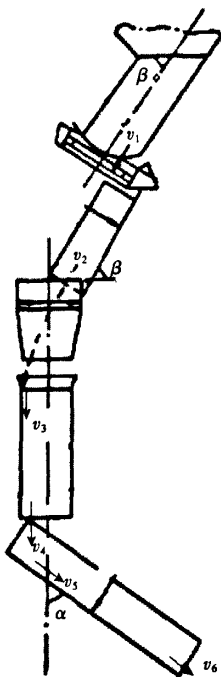


图 1 无料钟布料设备简图

炉料由料流阀口以速度 v_1 放出后,在叉形斜溜槽内变加速运动,再以 v_2 的初速度斜抛进锥形漏斗及中心喉管,当炉料离开中心喉管并与旋转溜槽碰撞时,运动方向发生改变并以 v_3 的初速度在旋转溜槽内运动,炉料在溜槽上的受力情况如图 2 所示,最终以 v_6 的速度离开溜槽末端布向炉内。

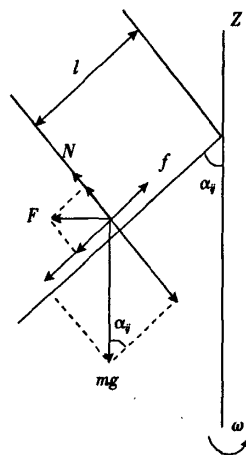


图 2 炉料在溜槽上的受力状况

(2) 炉料在空区的运动分析。炉料运动轨迹如图 3 所示,炉料离开溜槽末端时速度为 v_6 ,在动坐标系 $O'X'Y'Z$ 中有三个方向的分速度^[1],分别为

$$v_x = v_6 \sin \alpha$$

$$v_y = 2\pi\omega l_0 \sin \alpha$$

$$v_z = v_6 \cos \alpha$$

式中, v_x 为炉料在溜槽末端的 X' 方向上的分速度, m/s; v_y 为炉料在溜槽末端的 Y' 方向上的分速度, m/s; v_z 为炉料在溜槽末端的 Z' 方向上的分速度,

m/s , l_0 为溜槽长度, m 。

根据牛顿第三定律、运动方程和炉料下落时间, 累计求解炉料堆尖与中心间距 x_n 。炉料在 XY 平面的运动如图 4 所示。

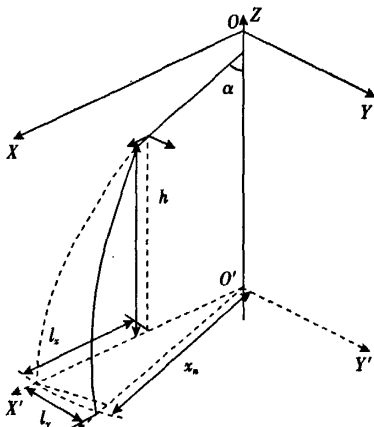


图 3 炉料在空区中的运动

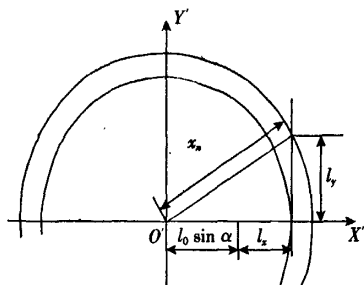


图 4 炉料在 XY 平面上的运动

1.2 料面形状理论假设

依据开炉实测料面形状特点, 可将料面轮廓分为四部分, 如图 5 所示。

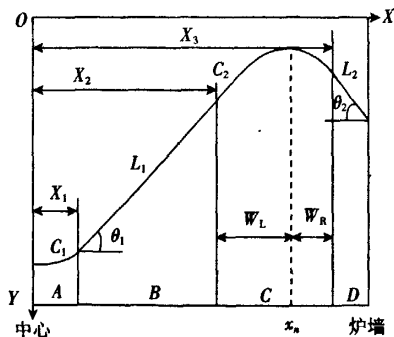


图 5 分段料面图

建立数学模型时做如下理论假设:

(1) A、C 部分为曲线段, B、D 部分为直线段,

x_1, x_2, x_3 为四部分的分界点的横坐标。

(2) 假设料流落点位置就是料面堆尖位置。

(3) 将 C 段的宽度以堆尖为中心分成 W_L 和 W_R 两部分, 其中 W_L 由料流内侧部分形成; 而 W_R 不仅与料流外侧部分的宽度有关, 还与堆尖与炉墙距离有关。

(4) A 段宽度主要取决于料面内堆角 θ_1 。

(5) 料面内堆角 θ_1 在鼓风时应依据煤气平均流速进行修正。

(6) 假定在布料过程中料面不下降。

1.3 模型计算

根据炉料运动物理分析、落点求解、料面形状等理论基础, 进行模型计算, 主要包括: 单环布料料面求解; 多环布料料面函数求解; 料面下降时的料面形状修正和径向矿焦比的计算。

2 布料模型的改进与发展

2.1 布料模型的改进与创新

首钢高炉布料模型在一般建模思想的基础上, 做了改进和创新, 模型模拟料面更加细致, 计算更准确。主要体现在炉料落点求解、多环布料料面求解、料面形状修正、径向负荷计算等方面。

(1) 炉料落点求解方法的改进。根据炉内料面的形状变化, 动态求解炉料落点的过程中, 由于旧料面离散逼近的方法会造成落点偏离或无法求解的情况, 针对这一问题, 模型中采用了离散线段方程与轨迹方程联立求解落点的方法, 不仅能更准确的计算落点位置, 而且避免了无法求解的情况。

(2) 多环布料料面求解方法的改进。在多角度布料过程中, 炉料落点位置和料面形状不断变化, 每个角度对应的料面形状互相交错, 新旧料面交点情况复杂多样, 为了满足求解要求, 模型中采用分段函数方程联立求交点的方法, 不仅能满足新旧料面相交的所有复杂情况, 而且效率高, 计算准确。

(3) 料面形状修正的创新。布料过程中, 由于上升煤气流、焦炭塌陷、料面下降等原因会造成料面形状发生变化。模型中对于焦炭塌陷后的料面形状修正, 进行了改进和创新, 将土坡塌陷与堆积原理成功应用于焦炭塌陷、滑移、堆积的动作处理中, 并在各动作环节上进行了细致的处理, 生动的模拟出焦炭塌陷的过程和料面的变化。主要技术环节包括: 塌陷圆弧的查找、滑移面的确定、滑移

面与旧料面交点的求解、堆积曲线的求解等。

(4) 径向负荷计算的创新。模型中除了径向负荷曲线计算外,根据不同高炉的实际情况采用三段法分别计算中心、中间和边缘的平均矿焦比,可以直观的反映煤气流的分布状况,为调整布料操作提供依据。

2.2 布料模型的发展方向探讨

高炉煤气分布,在很大程度上受炉料分布左右,合理布料十分重要。目前大多数布料模型都是以模拟料面形状为主,除采用辅助设备进行料面检测外,建模思想基本相同,效果不尽相同。所有模型中对于如何实现布料对煤气流分布的控制,考虑的较少,其原因在于:一方面没有确切的方法,不便于计算机的实现;另一方面也没有相应的试验作为理论基础。

首钢高炉布料模型创新的基础上,提出了布料模型今后切实可行的发展方向:建立规范化炉料分布与煤气流分布的函数关系,并与专家系统相结合,通过模型提供可靠的布料方案来合理调整煤气流分布,实现计算机自动控制,稳定炉况,控制高炉运行。

为了验证其可行性,研发小组在首钢北京地区 2 号高炉进行了规范化布料调整试验控制煤气流分布状况,具体试验情况如下所述。

2.2.1 试验背景

首钢 2 号高炉容积 $1\,780\text{ m}^3$ 、炉喉直径 6.8 m 。2002 年 5 月 23 日开炉后,炉况稳定运行。从 2005 年起,因炉衬侵蚀严重,每年需喷涂一次,到 2007 年已喷涂 3 次。

2008 年 3 月 13 日开始试验的当天,其布料角度及圈数见表 1,实际炉料分布图如图 6 所示。

表 1 2008 年 3 月 13 日布料角度

参数	炉料种类									
	矿石					焦炭				
布料角度/ $^{\circ}$	35	38	35	40	38	35	32	26		
圈数	3	4	2	5	3	1	2	1		

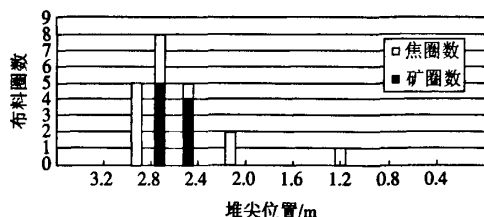


图 6 2008 年 3 月 13 日实际炉料分布

图 6 中横坐标是炉喉半径,0 点是炉喉的中心位置。从图中看到,焦炭和矿石均布在炉喉半径中部,矿石又布在焦炭中间,形成高炉边缘及中心两股强大的煤气流。在吨铁渣量 330 kg 左右、风温可达到 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的条件下,高炉煤气利用率仅 46% 左右,炉顶温度经常在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。

2.2.2 试验方法

整个装料试验过程以布料模型为工具,每进行一步调整都先通过模型进行模拟仿真,由模型计算出的径向负荷分布状况,分析煤气流的分布情况,进而由人工制定出较为科学稳妥的装料调整方案进行试验。

2.2.3 试验过程

2008 年 3 月 13 日凌晨发生悬料事故,焦炭负荷退到 3.7,平均煤气利用率 45.33% ,试验在此基础上展开。为了稳妥起见,采用先边缘加焦稳定炉况,后逐步外推矿、焦角度的调整方案。

(1) 将 2 号高炉炉喉布料环位按等面积原则分为 9 区,见表 2。

表 2 2 号高炉环位/角度对照表

布料环位	9	8	7	6	5	4	3	2	1
溜槽角度/ $^{\circ}$	47.5	45.5	43	40.5	37.5	34.5	31.5	27.5	22

(2) 每批炉料抽 1 t 焦炭,每 5 批将抽出的 5 t 焦炭布于 43° 环位 6 圈。

(3) 从 146 批炉料开始,矿、焦布料环位整体外移 1° ,开始改变炉料分布的基础进程。

(4) 14 日 9:30,第 68 批起,取消抽焦,同时将焦炭环位普遍外移 2° 。

(5) 15 日凌晨 4:00,矿焦继续外移,到 23:00 进入固定布料环位。

(6) 13~16 日经过 4 d 的调整,运行完全正常,煤气分布明显改善,炉顶温度下降,煤气利用率提高。17 日 7:00 开始加负荷,18、19 日连续加负荷,每次加矿 1 t ,矿石批重由 40 t 加到 43 t ,负荷由 3.7 增加到 4.02 。

(7) 19 日矿石环位继续外移,焦炭未动。

(8) 20 日起继续加负荷,至 4 月 24 日矿石批重加到 45 t ,焦炭负荷由 4.02 加到 5.5 。具体调整步骤见表 3。

2.2.4 试验效果分析

从技术指标来看,规范化的布料调整,取得了稳步的效果,见表 4。比较试验前后结果,高炉的

表3 布料试验具体过程

日期(2008 年)	矿石、焦炭角度改变步骤	料线深度/m	实际负荷
3 月 13 日	$\alpha_{k342} + \alpha_{j353226}$	1.3	3.7
3 月 13 日 22:30	$\alpha_{k363936} + \alpha_{j4139363327}$ (矿焦外移 1°)	1.3	3.7
3 月 14 日 9:30	$\alpha_{k363936} + \alpha_{j434139363327}$ (焦外移 2°)	1.3	3.7
3 月 15 日 4:00	$\alpha_{k374037} + \alpha_{j444240373428}$ (矿焦外移 1°)	1.3	3.7
进入固定环位			
3 月 15 日 23:00	$\alpha_{k65} + \alpha_{j876543}$	1.3	3.8
3 月 17 日	$\alpha_{k765} + \alpha_{j876543}$	1.3	3.9
3 月 19 日	$\alpha_{k7654} + \alpha_{j8765434}$ (焦角未动)	1.5	4.02
4 月 4 日	$\alpha_{k876545} + \alpha_{j8765434}$	1.5	5.06
4 月 24 日	$\alpha_{k876545} + \alpha_{j8765434}$ (矿焦同角)	1.5	5.5

炉况稳定性得到了加强,炉缸活跃程度也逐步得到了改善:

(1)炉顶温度由 200 ℃ 降到 180 ℃,下降 20 ℃。

(2)煤气利用率由试验前的 46% 提高到 49%,提高 3%。

(3)焦炭负荷从 3.7 提高到 5.5,炉温水平维持在[Si] 0.5% ~ 0.6%,风温稳定在 1 200 ℃ 左右,煤比不断上升,焦比明显下降,高炉日产量达到了一个较高的水平。

试验前后的炉料分布和煤气分布变化见表 5。通过规范化的布料调整,与试验前比较,矿石布料角度由 38° 提高到 45.5°,外移 7.5°,矿石堆尖外移约 0.7 m,焦炭外移 5.5°,焦炭堆尖外移约 0.6

表4 首钢 2 号高炉各月技术指标

月份	日产量/t	焦炭/(kg/t)	煤粉/(kg/t)	小焦块/(kg/t)	燃料比/(kg/t)	风量/(m ³ /min)	风温/℃	炉顶温度/℃	煤气利用率/%
1	4 125.06	429.9	71.4	0.8	502.1	3 565	1 044	201	44.68
2	4 208.90	414.4	79.9	14.7	509	3 660	1 097	194	46.27
3	4 353.55	426.3	72.3	3.1	501.7	3 708	1 108	192	46.66
4	4 522.6	340.8	136.7	26.5	504	3 677	1 195	187	49.24
5	4 594.77	344.9	130.6	36.2	511.7	3 613	1 201	182	49.46

表5 试验前后的炉料分布和煤气分布变化

日期 (2008 年)	批重/t	炉料分布		煤气分布(十字测温)/℃						炉顶温度/℃	煤气利用率/%	焦炭负荷
		α_k	α_j	边	2	3	4	5	中心			
3 月 13 日	40	$35^{\circ} 38' 35''$ 3 4 2	$40^{\circ} 38' 35'' 32' 26''$ 3 3 1 2 1	194	163	136	151	289	505	206	45.5	3.7
4 月 24 日	45	$87^{\circ} 65' 45''$ 322111	$87^{\circ} 65' 43''$ 332111	132	143	127	176	301	590	175	50.3	5.5

m,彻底改变了炉料堆尖落到炉喉中间地区的不良后果,从十字测温看,煤气分布趋于合理,保持中心通路的同时边缘较开。试验后的炉料分布状况如图 7 所示。

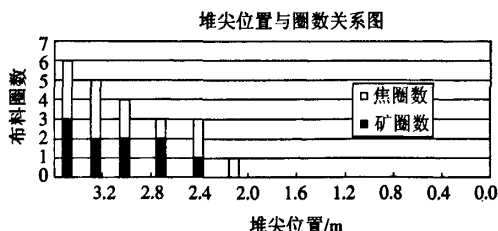


图7 实验后炉料分布

2.3 布料模型的发展方向可行性分析

首钢 2 号高炉的布料调整试验过程中,按高炉炉喉直径大小,将炉喉按等面积原则分成 9 等分^[2],固定各环位区域对应的角度,参考煤气流的变化趋势,利用固定环位规范化布料、逐步调整,

将试验前中心过开、边缘过开的煤气流分布逐步调整为中心开而窄、边缘较开的合理煤气流分布。从试验前后的技术指标可以看出,以这种规范化的布料来调整煤气流分布取得了良好的效果,且表现出稳定的态势。

整个调整过程的规范化,有利于计算机实现,也使得布料模型实现对煤气流分布的自动控制成为可能,为布料模型今后的发展方向开辟了道路。重要技术环节包括:

(1)建立规范化的炉料分布与煤气流分布类型之间的函数关系;

(2)调整炉料分布进而改变煤气流的分布类型;

(3)煤气分布类型与专家系统炉况判断结合,在特殊炉况失常情况下进行布料调整,稳定炉况。

以此建立的布料模型,不仅仅局限于模拟料面形状,更重要的是能针对煤气流的变化给出相

应的布料调整方案,将不合理的煤气流分布调整到合理的状态,同时与高炉专家系统相结合,利用布料模型提供的布料调整方案解决特殊炉况失常的问题,稳定高炉生产。

3 结束语

目前大多的布料模型都是以模拟料面形状为主,除采用辅助设备对料面进行检测外,建模思想基本相同,效果不尽相同,这与不同高炉缺乏可比性有关。所有模型中对于如何实现布料对煤气流分布的控制,考虑的较少,其原因在于:一方面没有确切的方法,不便于计算机的实现;另一方面也没有相应的试验作为理论基础。布料模型的水平止步于模拟料面形状的程度,难以实现对煤气流的

自动控制。

首钢高炉布料模型在料面数值模拟创新的基础上,提出了布料模型今后切实可行的发展方向,并通过规范化布料调整试验的过程及效果充分验证了其可行性,对于高炉布料模型的发展具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1]刘云彩.高炉布料规律[M].修订版.北京:冶金工业出版社,1993.
- [2]刘云彩.无钟布料操作的几个问题[J],炼铁,2007,26(4):42-43.

[编辑:周希章]