

首钢型无料钟炉顶炉料运动的模型实验研究

闫树武, 苏 维, 石 岱, 梁 伟
(北京首钢国际工程技术有限公司, 北京 100043)

摘 要: 本文依托首钢国际工程公司全透明仿真无料钟炉顶设备布料模型平台, 对炉料在高炉设备料流通道中的运动情况进行全程实验研究, 打破了炉料运动研究的黑箱子。此外, 结合水力学理论, 对设备尺寸优化后炉料的运动情况进行了理论分析。为炉顶设备的合理优化以及实际高炉生产操作提供重要参考。

关键词: 无料钟炉顶; 料流通道; 炉料运动; 合理优化

An Experimental Study on The Movement of Materials in a Shougang Bell-Less Furnace Top

YAN Shu-wu, SU Wei, SHI Dai, LIANG Wei

(Ironmaking Branch, WISDRI Engineering & Research Incorporation Limited, Wuhan 430223, Hubei, China)

Abstract: The simulated experiments of distribution were made on a transparent model of bell-less top equipment, the whole movement of materials in channels in bell-less top were analysed, the black box of the materials movement study were broken. Furthermore, with the hydraulics theory, Materials movement in bell-less top were analysed with the optimization of dimensions. Provide importante reference for rational optimization of bell-less top equipment and BF production.

Keywords: bell-less top equipment; channels of materials; materials movement; rational optimization

通过炉顶装料设备将各种类型、粒度的炉料分布在高炉炉喉的合适区域, 这一过程叫做炉顶布料, 它是影响炉内煤气流分布、矿石还原、炉料——气体交换、燃料比和高炉寿命的重要因素。因此, 国内外专家对炉顶布料进行了广泛的研究和探索, 从理论分析到数学模型, 从虚拟现实技术到实验模型, 各种方法不一而足, 但是高炉设备内的炉料运动研究仍然处于黑箱之中, 针对炉顶装料设备中炉料运动全流程的实验研究^[1-2]比较少见。

首钢国际工程公司为进行此方面研究, 搭建了全透明仿真 1:15 布料装备模型的实验平台, 本文在此基础上, 结合实验研究与水力学理论分析, 对炉料在设备料流通道中的运动全程进行了探索。

1 实验平台概述

该实验平台由全仿真皮带机上料系统、全透明炉顶布料设备整体模型、全透明炉体分区研究模型、企业级高速摄像分析系统、实验平台(两层)组成。

其中, 设备模型由首钢型无料钟炉顶设备原型按 1:15 比例制作, 除气密箱内的传动齿轮为金属材料, 其余设备均采用有机玻璃制作。因此, 炉料自皮带机下料到进入高炉的整个过程都可以被直接观察到, 为研究炉料运动与布料规律创造了条件。

2 炉料在换向溜槽、受料斗中的运动分析

炉料经皮带机输送至换向溜槽, 经过溜槽导流, 在受料斗靠外侧及料罐上锥段经过两次碰撞, 折入料罐, 最终形成堆积。

2.1 炉料冲击区域分析

实验中发现, 由于炉料颗粒间的相互作用, 炉料的运动较为集中, 形成有规律的料束。由于可以准确地观察到碰撞点位置, 实验结果可以为设备结构设计提供重要参考。

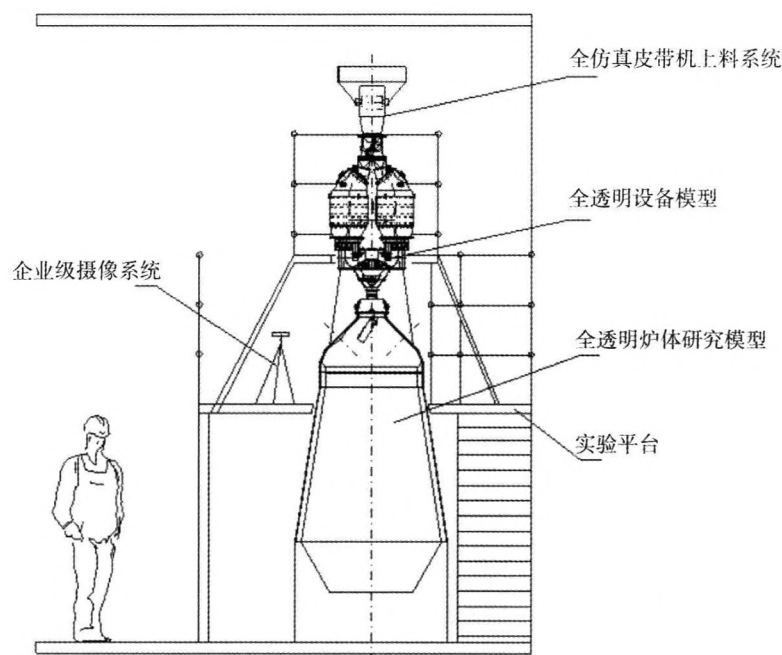


图1 试验平台概况

在高炉实际生产现场，主要料流经过受料斗落入料罐，而上密壳体内的冲击来自于部分炉料经受料斗的折射。图2为实验观察到的炉料对布料装备的冲击区。图3为高炉实际生产中，上密壳体屡受冲击、增加补强的位置图。由分析可见，由比例模型实验获得的结果与生产实际中的现象相吻合。



图2 实验显示冲击区



图3 现场补强的冲击区（上密壳体内表面）

在炉料运动全程研究中的所有冲刷现象，都可以通过全透明装置观察到，本文以部分区域冲刷为例进行说明。实验结果可与高炉生产现场实际问题相互验证，并通过设计优化，提高了设备可靠性，对高炉的稳定顺产起到了重要作用。

2.2 炉料运动分析

经由实验观察，皮带机的位置影响换向溜槽滑入料罐的速度及角度，从而影响炉料在料罐中的堆积形式，进而造成两侧料罐放料的不均匀性；两侧料罐中炉料的堆积形式不同，将会影响料罐下部出口的放料方式，最终落入高炉内部的布料轨迹也会有所差别。经由实验验证，皮带机方向与两料罐中心线连线成垂直布置时，两侧料罐的炉料堆积形式最为接近，布料稳定性也最好。

3 料罐中炉料运动分析

3.1 料罐衬板冲击

炉料自换向溜槽中下落，通过受料斗与上密封阀落入料罐，该段炉料下落高差达到 8m，对衬板冲击比较严重，该段冲击直到炉料没过冲击点结束。图 4 左侧图表示冲击结束临界时的瞬间，其中炉料高点为冲击位置。右侧图显示的是现场衬板的冲击情况。通过对比不难发现，两者位置相吻合。



图 4 炉料对料罐衬板的冲击

根据实验分析，对冲击位置采用特殊材质衬板，其他位置采用普通衬板，一方面降低了制造成本，另一方面增强了设备可靠性，降低了生产维护成本。

3.2 漏斗效应分析

料罐普遍为上下两个锥段加中间直段的形状，在料罐放料过程中，会造成炉料下降的漏斗效应现象。漏斗效应指炉料下降时，在调节阀出口处并不是均匀的活塞流，而是中间漏料的漏斗流。

此外，炉料在料罐中的料面形状为具有一定堆角的料堆，颗粒分布也不均匀，因此，漏斗效应会影响调节阀出口处的炉料粒度分布与流速，进而影响布料轨迹。

图 5 显示了随着时间推移炉料料面的变化情况。可以看出：在料罐下料过程中，随着时间推移，倾斜状的料面逐渐平缓。可以判断料流下降运动为不规则的漏斗流，中间料流速度与两侧料流速度不同，直至下降至 F 面时，形成明显漏斗下料状况。

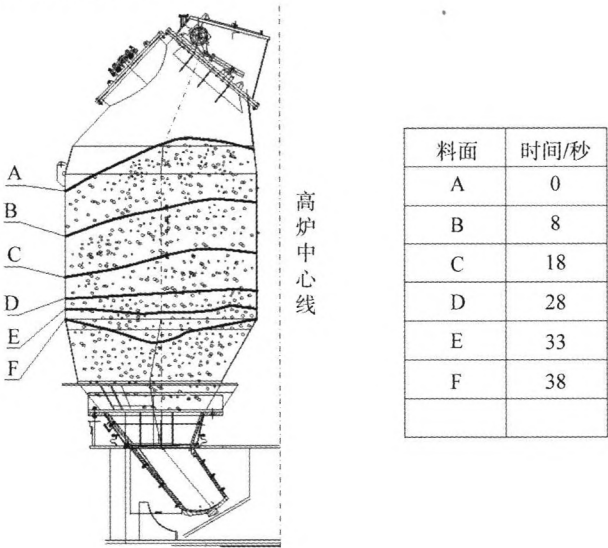


图 5 料罐中料面对应时间维度图

根据透明材质的料罐，通过企业级高速摄像分析，对料罐漏斗效应现象进行了研究，总结出了料罐中漏斗效应与时间维度的对应关系。通过此方法，还可以对炉料下降过程中的不同粒度炉料的分布情况、下降先后顺序等现象进行深入研究。

4 炉料从调节阀到喉管的运动分析

料流调节阀开启一定角度，炉料从八角溜槽的下口流出，之后沿中间斗内壁下滑，经过对中装置的碰撞、摩擦等运动进入中心喉管。在这一过程中，炉料的运动十分离散，其原理涉及流体力学、散体力学等专业力学知识，求解析解的难度较大，相关研究^[3]极少。因此布料模型实验是目前最具操作性的研究方法，实验数据极具参考价值。

4.1 炉料运动分析

图 6、7 为炉料在调节阀开度分别为 20 与 35 度时的料流情况。

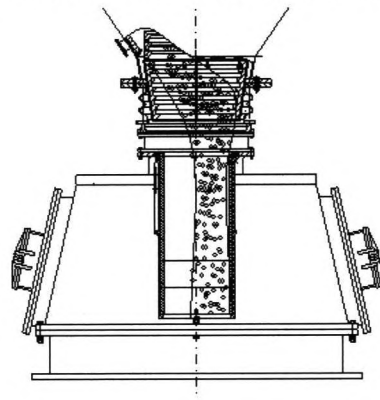


图 6 $\gamma = 20^\circ$ 时料流情况

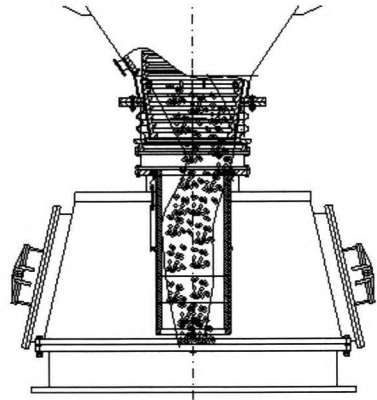


图 7 $\gamma = 35^\circ$ 时料流情况

1) 当 $\gamma = 20^\circ$ 时，由于开度较小，料流较细，状态离散，其运动形式大致如图 6 所示，料流在中间斗斜冲下来，与对中装置发生碰撞，沿中心喉管偏向料罐对侧的侧壁流下。由于料流较细，炉料自身的约束作用很小，中心喉管的充满度不够，容易出现偏析现象，对中心喉管的侧壁冲刷严重。

2) 当 $\gamma = 35^\circ$ 时，料流成束，状态集中，其运动形式大致如图 7 所示，料流在中间斗斜冲下来，与对中装置发生两次碰撞，由于炉料之间的相互作用以及设备本身的约束作用，其对中性较好。

4.2 设备尺寸变化对料流的影响

为了更好的研究料流通道的变化对中心喉管出口处料流的影响，本次实验将对中装置与中心喉管分别做了尺寸上的调整，以期得到更合理的料流通道。当调节阀开度较大时，炉料运动状态比较稳定，并且是高炉实际操作中的较常用角度，因此，在实验中，一般取 $\gamma = 35^\circ$ 。

图 8 为对中装置变径后的料流情况，对中装置的斜锥段下口直径减小 12mm，可以看到明显的料流偏析情况。此时，料流偏向料罐一侧，究其原因，应是炉料落料反弹点更靠近中心线，反弹造成炉料明显偏向料罐一侧。

图 9 为对中装置加高后的料流情况，对中装置的环形衬板加高两圈，即加高 13mm。此时，环形衬板增高，中间斗内的存料现象更明显，落料反弹点上升，但是，在中心喉管中的运动没有特别明显的变化。

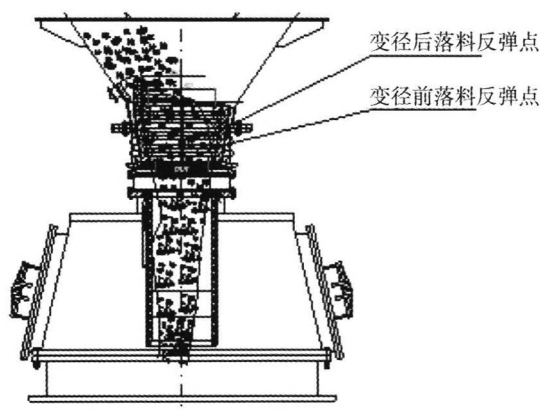


图 8 对中装置变径后料流情况

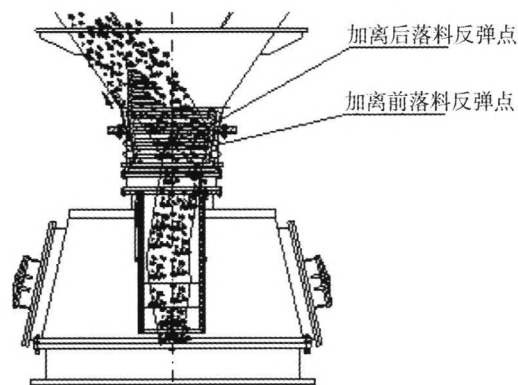


图 9 对中装置加高后料流情况

图 10 为对中装置以及中心喉管变径后的料流情况，对中装置的斜锥段下口直径减小 12mm，中心喉管的直径减小 7mm。可以看到，在喉管同时变径后，由于对中装置下口变径造成的炉料偏析现象明显好转。由此判断，中心喉管的变径对于改善炉料在中心喉管内的偏析现象起到显著作用。

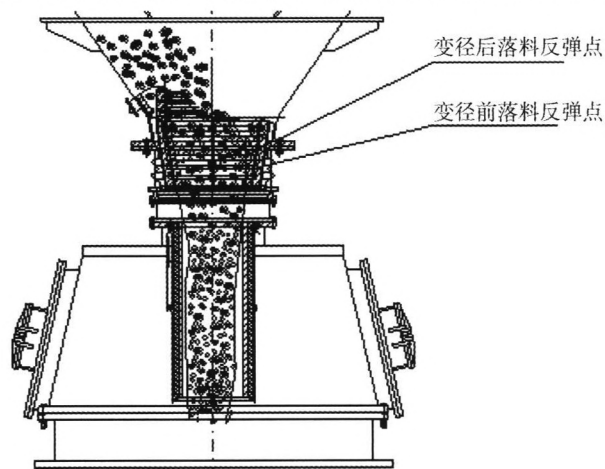


图 10 对中装置以及中心喉管均变径后料流情况

4.3 过料断面水力学理论分析

根据实验现象并结合水力学理论可知，在中心喉管内的充满度越大，布料偏析现象越小。在此，引入水力半径概念： $R = A / X$

其中， R 为水力半径， A 为过料断面， X 为湿周。湿周为水力学中的专有名词，指过水断面上水流所湿润的边界长度。对于圆管，当充满液流时， $R = D/4$ 。

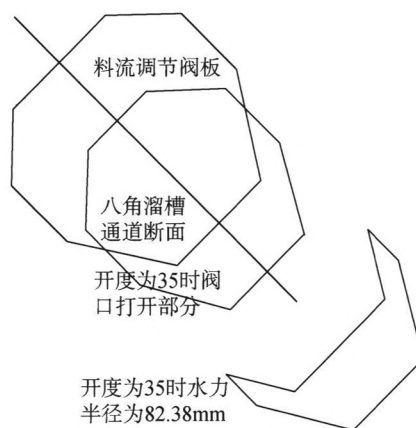


图 11 水力半径计算图解

计算分析按设备实际尺寸：

当喉管直径变为 630mm 时，其充满状态水力半径： $R(\text{喉管})=A/S=D/4=157.5\text{mm}$

如图 11 所示，当调节阀开度为 35 度时，料流充满阀口，形成不规则多边形料流断面，其面积与湿周都可以通过计算得出： $R(35)=82.38\text{mm}$ 。

同样，当调节阀开度为 50 度时，调节阀开度达到全开的 80%，此料流断面一般认为是高炉操作时的极限状态，水力半径为： $R(50)=150.8\text{mm}$ 。

由此可知：
$$R(\text{喉管}) > R(50) > R(35) \quad (1)$$

式(1)可以看出，当中心喉管的直径为 630mm 时，其水力半径大于节流阀 50 度开度时的水力半径，根据水力学中的流量计算公式可知，理论上当通过两断面的其他情况相同时，中心喉管的过料能力大于调节阀下口。

考虑到炉料在调节阀下出口处流出后，受到重力与摩擦力的作用，会产生向下的加速度，那么，

$$V(\text{中心喉管}) > V(\text{调节阀下出口}) \quad (2)$$

由式(1)与式(2)可知，当 $D=630\text{mm}$ 时，中心喉管的过料能力大于调节阀下口的过料能力，一般情况下不会存在堵料现象。

因此，中心喉管在满足过料能力的同时，尺寸越小，在该料流通道中的充满度越高，对料流的约束能力也越强，对中性也越好。

该段炉料运动的研究为设备设计优化提供了重要依据，选用合理的中心喉管直径，在满足过料需求的同时，增加布料时的充满度，明显减小了布料偏析。此项优化在生产实际现场得到应用，对喉管冲刷以及布料偏析现象，起到了良好的改善效果。

5 结语

通过全透明仿真 1:15 布料模型实验，得到了炉料在炉顶设备中全流程的实验资料，结合理论分析，为高炉实际操作与设备优化设计提供了参考。

1) 建立了全透明仿真 1:15 布料装备模型的实验平台，打破了高炉设备中炉料运动研究的黑箱子，并对炉料运动的几个关键区域进行了分项研究。

2) 炉料自皮带机进入换向溜槽的角度与速度，影响向两侧料罐的装料，而两侧料罐中料堆的堆积形式及炉料粒度分布又会最终影响炉料进入高炉内部的布料轨迹。本文通过实验，研究了合理的皮带机安装位置。

3) 通过全透明装置，研究了炉料运动全程中对设备的冲刷现象，为炉顶设备设计以及生产现场设备维护提供了重要参考。

4) 料罐中的炉料在布料过程中，下降方式呈漏斗流，而非活塞流。本文通过透明装置的料面变化，将炉料的漏斗效应现象做了分析。

5) 本文对炉料从调节阀出口至布料溜槽的运动进行了详细研究，结合设备尺寸优化前后的实验对比以及水力学理论分析，探索了减小布料偏析的方法。该方法在实际生产现场得到应用，起到了显著效果。

参考文献

- [1] 刘慰俭 叶肇宽，无料钟高炉炉顶设备中布料的研究[J]. 钢铁, N.5, 1-6, 1983
- [2] 余艾冰 杜鹤桂，高炉无料钟炉顶中炉料运动的理论解析[J]. 东北工学院学报, N.49, 1986
- [3] Masaru Ida, Kiyoshi Ogata, Development of Burden Distribution Control at New Mizushima No.4 Blast Furnace[C]//ISSTech 2003 Conference Proceedings, 2003