

提高铁矿石烧结效率

工艺工程师们利用多物理场仿真研究钢铁烧结工艺, 为实现高效、节能、环保的钢铁大规模生产铺平了道路。

作者 **ZACK CONRAD**

不断追求质量和效率的提升是制造业永恒的主题, 其中以钢铁行业最为典型。由于钢铁生产的工艺链较长, 这就为整个制造流程未来的改进留下了充足的空间。德国钢铁协会下属的钢铁研究中心 (简称 BFI) 是欧洲领先的钢铁冶金技术研究机构之一, 目前正在使用多物理场仿真技术优化工艺配置, 实现制造流程的全面变革。

⇒ 准备符合高炉冶炼要求的烧结料

烧结是钢铁生产线的一个重要环节, 其过程是将铁矿粉与其他材料进行混合, 然后送入高炉中将金属熔融, 最终生产出成型钢。烧结工艺是将粉末混合料进行高温焙烧, 直至其熔合形成多孔介质, 然后再放入高炉中冶炼。如图 1 所示, 由铁矿粉、燃料 (焦炭) 和熔剂 (石灰石) 组成的原始混合料被送入设备点火烧结。与此同时, 主抽风机从料层底部抽吸空气, 使焦炭加速向下燃烧, 从而加速部分矿石的熔化和凝固、煅烧和干燥。

效率的提高主要表现为缩短工作完成时间, 对于制造业而言尤其如此。“如果能够加快工艺流程、缩短完成时间, 效率自然会提高。” BFI 研究人员 Yalcin Kaymak 博士解释说, “效率的提升不仅有利于提高产能, 还能实现节能减排。” 在烧结工艺中, 要缩短各工序完成时间, 主要依靠加速混合物的燃烧。此外, 整体效率还取决于混合物的渗透性和孔隙率、气体流速、温度场和烧结矿整体强度等多种因素。Kaymak 博士和 Hauck 博士以及双良克莱德贝尔格曼有限公司的 Hillers 博士利用数值仿真方法研究了上述因素的影响。

BFI 的研究人员开发了一种可行的解决方案: 采用水平和/或竖直放置的渗透性棒料在送料过程中提高原料混合物的透气性 (图 2)。随着输送带的移动, 水平放置的松料棒会在水平方向形成一个椭圆形局部通风区域; 竖直放置的松料棒会与填充床相切, 形成一个近似矩形的曝气区。在本例中, 这个区域是沿竖直棒轴的垂直面区域。松料棒起到增加填充床孔隙率的作用, 从而改

善燃料燃烧中的空气供给, 最终实现加快燃烧速度并提高效率。仿真工作的重点是优化松料棒的布置方式, 最大程度地增加孔隙率。

⇒ 烧结工艺的多物理场建模

铁矿石烧结的燃烧过程由一系列子过程构成, 包括传热、化学反应 (如熔化和凝固) 以及流体在多孔介质中的流动。这意味着, 如果希望准确地分析

烧结过程, 需要建立一个真正的多物理场模型, 从而能够有效地将这些物理场耦合到一个建模中进行研究。“COMSOL 软件不仅运行速度快, 还具有卓越的灵活性, 用户能够根据需要编辑表达式以及控制网格划分。” Kaymak 博士评价道。基于软件的灵活性, 研究团队在模型中输入了自主开发的孔隙分布数据, 这是表征原始混合料局部透气性的一个重要参数。为了确定孔隙分布, 研究人员通过实验对特定透气棒布置下的气流速度进行了测量。他

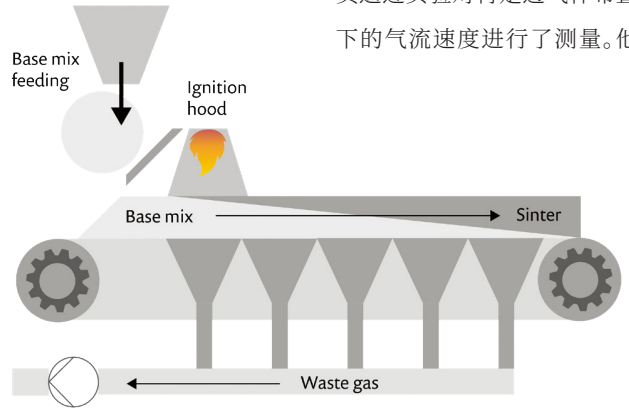


图 1. 烧结工艺示意图。图注: Base mix feeding - 原始混合料入口; Ignition hood - 点火器; Base mix - 原始混合料; Sinter - 烧结矿; Waste gas - 废气

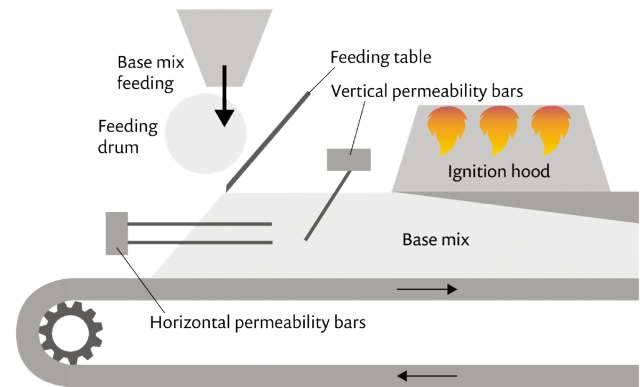


图 2. 增设了棒料的烧结工艺示意图。图注: Base mix feeding - 原始混合料入口; Feeding drum - 圆辊给料机; Feeding table - 进料台; Vertical permeability bars - 竖直松料棒; Ignition hood - 点火器; Base mix - 原始混合料; Horizontal permeability bars - 水平松料棒

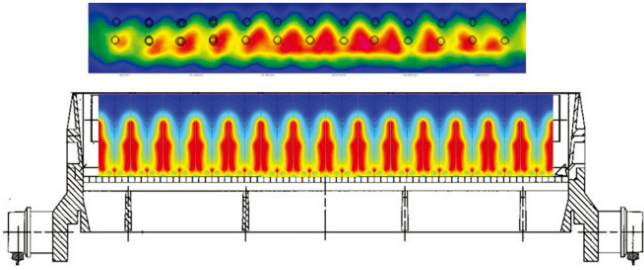


图 3. 废气排放高温区的测量结果(上)和仿真结果(下)。

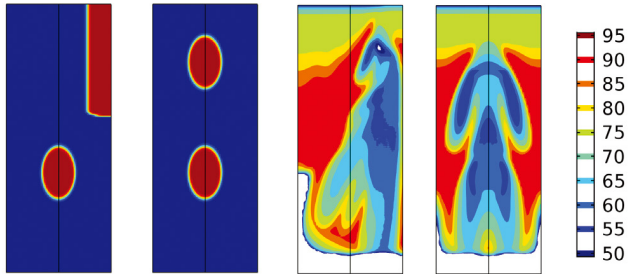


图 4. 两种松料棒布置的质量评估结果。

们让空气流经混合料,通过测量该过程中的空气流速确定孔隙分布,然后将数据直接输入到软件中。

团队在得到孔隙分布并将其输入模型后,接下来就可以对烧结过程运行瞬态仿真分析,得到明确的温度分布,并对各种不同的布置方式进行深入研究。此外,他们还利用全局常微分方程的时间积分运算特征,对许多相关物理量进行了计算,综合表征了不同布置对烧结过程的影响。这些物理量包括输入输出的总能量、含水量、输入物质总量、点火器的总输入能量、输出物质总量和气体总量。

由于燃烧是烧结过程的重要组成部分,因此特定布置下的温度分布对烧结时间和烧结矿强度有直接的影响。冷强度是评估烧结矿质量的一个关键指标,这是因为高强度意味着烧结矿能够承受高炉冶炼过程中的恶劣条件。烧结矿强度可以通过转鼓测试的方法进行测量;通常情况下,高于熔点温度的燃烧时间越长,烧结矿强度就越高。由此可见,根据局部瞬态温度分布信息,可以计算出局部冷强度,进而得到整个横截面的质量分布,如图 3 上图所示。

为了验证仿真的准确性,团队将分析得到的温度分布结果与使用红外热成像技术观测到的烧结厂废气排放数据进行了比较,充分证实了模型的可靠性。图 4 左侧为测量得到的热成像图,其中的小圆表示水平松料棒的位置;从图中可以看出,松料棒的位置与

低温区域完全一致。仿真模型的计算结果也呈现出相同的趋势。

⇒ 仿真成果及未来工作展望

仿真结果表明,松料棒的布置经过优化后,烧结速度可以提高 40%。本例中的最佳布置方式可以是分上下两排水平放置松料棒,如图 5 所示;也可以在竖直放置的松料棒中间放入水平棒。目前, BFI 正力图在模型中加入更多的因素,扩大模型的适用范围。他们接下来的目标是确保质量和强度在烧结过程中保持不变。

为了深入挖掘模型的功能并不断提高模型的准确性,团队利用模型的可扩展性,尝试在对流方程中加入扩散和弥散效应,以及更多的其他物理现象,例如氮氧化物生成等。他们还计划使用 COMSOL 软件中的“App 开发器”工具创建简单易用的仿真 App,为操作人员提供技术支持。专业仿真人员可以定制 App 界面,控制显

示的输入输出数据,使不具备仿真专业知识的用户也能够自如运行仿真 App,并专注于相关参数的设置和调整。他们还可以通过 COMSOL Server™

“COMSOL 软件不仅运行速度快,还具有卓越的灵活性。”

— YALCIN KAYMAK, BFI 研究人员

产品对仿真 App 进行部署,使整个组织都能受益于多物理场建模带来的优势。操作工人关注的重点包括:能量流、床层温度、排气温度、焦炭消耗量、煅烧、硫化作用、冷凝和烧结矿质量等。“很多操作人员都没有仿真经验,不了解软件中的细节。” Kaymak 博士表示,“但自从有了直观易用的仿真 App,他们就能将精力集中于参数的调整,快速模拟参数变化对设计的影响,即时查看效果,从而优化参数设置。” ❖



图 5. 烧结厂给料系统,安装了两排水平松料棒。