

高炉内衬湿法喷注及炉缸整体浇注技术新进展

1 高炉湿法喷注技术

用喷射的方式实现无模浇注。通过精准的施工控制，将搅拌均匀的浇注料喷注到壁面上。喷注体接近于浇注水平，致密、高强、高耐磨，结合其优异的抗侵蚀性能，大大提高了高炉内衬使用寿命。喷注过程控制水平，由人工喷注，到简易的机械喷注，到可伸缩机械手，再到大型可伸缩自动平衡机械手，不断进步；且仍有很大发展前景，即采用自动侧距装置，随时调整喷注效果。简言之，喷注=喷射浇注=无模浇注→3D打印，喷注可实现复杂结构、复合材料、快速高效施工。目前，湿法喷注造衬，在高炉内衬检修中，占有比重超过80%；巨型高炉检修也逐渐采用喷注造衬保护开炉。

1.1 材料改进

选择纳米硅溶胶结合喷注料取代原有的低水泥材料，以溶胶作为结合剂，不存在结合剂界面迁移，在受热时水分可有序排除，从而具有极佳的快烘防爆性能。溶胶结合料虽然低温强度（600℃以下）相对较低，但随温度升高，纳米SiO₂与Al₂O₃反应可形成莫来石结合相，强度迅速提高；特别是在高温下，由于其不含水泥，高温热态性能优异。该材料较适合炉身中部以下内衬喷注。

1.2 设备改进

针对巨型高炉内衬喷注，设计一种大型可伸缩“洗炉+喷注”一体化机械手喷枪，如图1所示。该机械手喷枪可根据高炉内型尺寸的变化，遥控



图1 大型机械手喷注试验

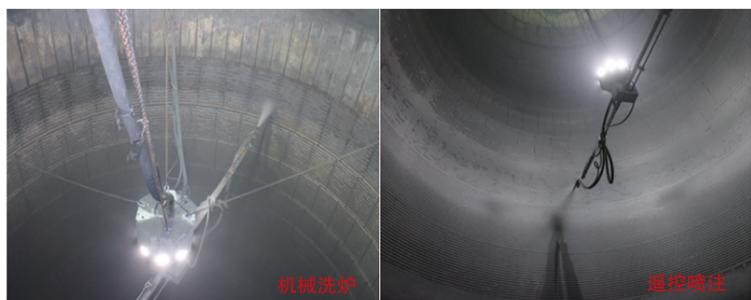


图2 国内某5860m³高炉机械喷注情况

近年来，高炉湿法喷注技术由于高效节能，得到了快速发展，逐渐取代传统半干法喷涂；尤其在巨型高炉中的应用，卓显成效。炉缸整体浇注技术，伴随着高炉冶炼节奏的加快，以其对炉缸结构原理透彻的领悟和行之有效的实践，逐渐被广大高炉炼铁所接受。高炉湿法喷注技术及炉缸整体浇注技术的快速发展，逐渐显现出不定形耐材技术的重要地位。

伸长或缩短枪身，保持枪头与壁面距离在1m(或更小)以内，减少喷注面积，进而准确控制喷注范围。

图2为国内某5860m³高炉喷注情况，采用大型可伸缩机械手喷注，由于配重的灵活变动，枪身稳定不摇摆；反弹量极小，人员可以站在高炉底部遥控机械手；该设备喷注速度可达25t/h，高效且环保。然而，该大型机械手仍有其进步空间，如可在枪头处设置“探距仪”，对凹凸不平处可随时调整转速，满足不规则炉型的喷补要求。

另外，人工抱枪喷注技术，亦在巨型高炉喷注中“一展身手”，人工抱枪喷注，速度略慢，平均速度为12t/h，然而，在巨型高炉宽阔的施工环境中，可同时两台设备施工。其优点在于：可根据炉型变化，灵活掌握给料量、枪与壁面距离、局部特殊处理等，实现圆滑炉型。

2 炉缸整体浇注

2.1 技术简介

炉缸整体浇注是基于传统砌砖修复的一种新技术。它采用不定形自流料，以支模浇注的方式，还原陶瓷杯。脱模后整体无缝，形成一个真正的“杯”结构。使得铁水“无孔可入”，而且所使用材料，与铁水不产生化学反应，真正起到了隔离与隔热的作用。其工艺简化为

图3所示。

近两年，炉缸整体浇注技术发展迅速，高炉中修时，不放残铁，仅对铁口区域特殊处理：将残铁烧掉，至炉底碳砖，其他区域无需清理，然后整体浇注，恢复生产。这种方法简单快捷，重点解决炉缸局部温度高的问题。多数高炉停炉检修，选择放残铁方式，对炉缸进行系统修复，使用周期更长。

总体来看，炉缸整体浇注技术，具备以下特点：

- 1) 能最大程度的保留残余合格碳砖，针对局部区域严重侵蚀碳砖可采用高导热浇注料进行针对性修复，因此与拆除碳砖重新砌筑相比，维修工期短，综合造价低；
- 2) 与砌筑相比，浇注衬整体性好，能与碳砖界面紧密有效贴合。因此，不存在传统陶瓷杯与碳砖间的间隙捣打料，避免了因气隙而造成“间隙热阻”的问题，提高了炉缸整体传热效率，1150℃凝铁等温线推移至浇注陶瓷杯的内部，碳砖得到有效隔离和保护。通过炉缸的浇注维修，不仅从根本上保障炉缸安全、长寿运行，而且减少了炉缸热损；
- 3) 对于风口区域，同样能最大限度利用残余砖衬，减少耐材消耗；清渣渣铁后，即可进行浇注，整体浇注的风口衬

里能有效避免砖缝的影响，降低风口窜气的风险；

4) 炉缸陶瓷杯浇注料采用溶胶结合刚玉碳化硅质泵送浇注料，其是针对传统陶瓷杯砖（塑性刚玉砖、刚玉莫来石砖等）从材质上进行了优化改进，因此具有更高的抗铁水熔蚀、抗渣蚀及抗碱侵蚀性能，同时其导热系数适中，更有利于炉缸渣铁粘滞层形成。

2.2 材料选择

1) 高导热浇注料

高导热浇注料RLG-SC：该料主要原料为导热性能好的碳质材料，采用溶胶结合；其具有与碳砖相近的导热系数，同时具有优良的抗渣铁润湿性能及良好的自流性能，能够轻易实现狭小缝隙自流填充压实作业，可用于碳砖修复、炉底找平、碳砖与冷却壁缝隙填充、陶瓷杯与碳砖缝隙填充。

2) 刚玉质浇注料

刚玉质浇注料RLG-SA是专门针对高炉炉缸陶瓷杯环境特点设计开发；以优质刚玉为主要原料，采用纳米溶胶为结合剂；材料不仅具有优良的耐高温、抗渣铁侵蚀、抗冲刷及快干防爆等应用性能，而且具有优异的自流泵送的施工性能。

2.3 施工特点

2.3.1 炉缸清理方式

炉缸整体浇注施工，前期

清理很关键，需将残砖、残碳表面粉化料、渣料、浮尘等全部清理干净，清理过程尽可能保护残砖或残碳。高炉停炉过程中，往往伴随着打水降温过程，这对环碳和炉底碳砖破坏严重，砖衬表面会存在一定厚度的粉化料，该部分碳砖依然失效，因此需清理掉，清理至砖衬露出硬面。如碳砖破损较严重，可采用高导热料修复；如仅有较薄一层损坏，则可直接浇注陶瓷杯，无需修复碳砖。

2.3.2 陶瓷杯及风口浇注

炉底采用高导热料找平后，分两步浇注陶瓷垫，陶瓷垫厚度根据炉缸尺寸确定。泵送料采用自流浇注料，全过程无需震动或简单震动。

两层陶瓷杯浇注完成后，支模浇注侧壁及铁口区域，如图4，铁口区域加厚，恢复铁口深度至原设计深度。

考虑到象脚区保护，会根据各高炉象脚区侵蚀情况，采用不同的处理方式。炉缸浇注料体密较大，液态材料静压力较大，因此一般采用分段浇注的方式浇注陶瓷杯壁，由炉底分段浇注至风口带。

待浇注完毕后，静止数小时脱模，进而完成整个炉缸浇注。然后按照制定的烘烤曲线，进行简单的烘烤，排除材料中的水分，即可满足开炉条件。

炉缸整体浇注需要根据高炉炉缸侵蚀特点，策划检修方案，拟定施工工期，然后严格按照各施工节点执行。全过程无限速环节，因此简单快捷，而且可以灵活协调，交叉作业，便于铁厂统筹安排。

3 结束语

湿法喷注技术，已拓展到不同领域，设备的精密设计、材料的研发改良，使得其应用前景广阔。目前已成功实现高炉铁沟、管道、烟道、石灰窑、耐磨仓、循环流化床锅炉、水泥窑旋风预热系统、钢包、转炉、加热炉等湿法喷注造衬。而且，喷注依然具有很大发展空间，势必成为未来不定形耐材最重要的施工手段。

实践证明，炉缸整体浇注技术是行之有效的一种炉缸耐火材料修复技术，随着技术研究工作的进一步深入与材料技术进步，复合材料整体浇注炉缸可望完全取代传统的碳砖砌筑+陶瓷杯炉缸结构。（章荣会 邓乐锐 刘贯重 孙赛阳）

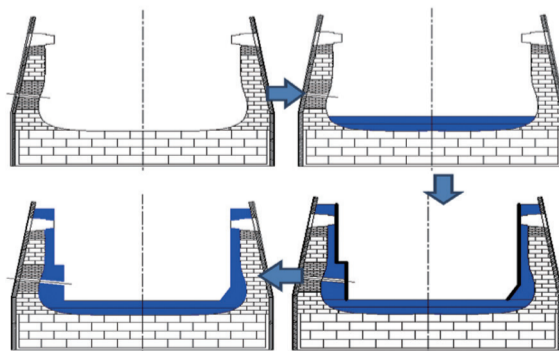


图3 陶瓷杯整体浇注技术

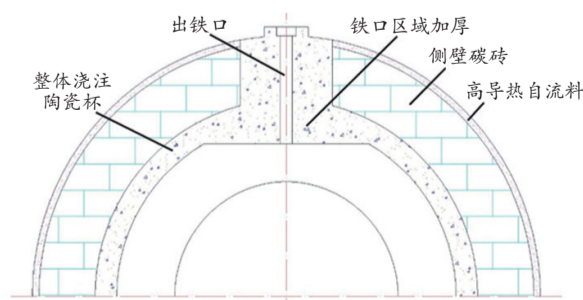


图4 铁口区域处理方式