双层预烧结新工艺传热与成矿行为研究

周明顺[1]，王义栋[2]，赵东明[3]，翟立委[1]，姜 涛[4]，钟 强[4]
(1. 鞍钢集团钢铁研究院，辽宁 鞍山 114009；2. 鞍山钢铁集团公司，辽宁 鞍山 114021；3. 鞍钢股份有限公司炼铁总厂，辽宁 鞍山 114021；4. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083)

摘 要：在没有富氧烧结的条件下，在本研究的前期工作中对预烧结时间与双层布料上、下层厚度的比例关系进行了优化实验并开展了工业试验，取得了双层烧结大幅增产的效果，烧结矿质量满足高炉冶炼要求。但双层预烧结工艺存在下层烧结矿强度差的问题，针对该问题开展了双层预烧结传热与成矿行为的研究，结果表明：双层预烧结热状态烟气性质与单层烧结完全不同，其烧结料层结构和性质更为复杂；双层预烧结料层中下部反应气体为上层废气，含氧量低，导致中下部部分区域烧结矿矿化不充分，烧结矿结构有些疏松；双层预烧结上部料层为单层烧结过程，中部料层为预烧结形成的烧结矿带，该料层烧结过程与单层一致；下部料层与上部料层同步进行烧结的双层预烧结过程，其传热与成矿行为与常规的单层烧结完全不同。本研究工作将为后续改善双层预烧结工艺烧结矿质量提供理论支撑。

关键词：双层预烧结；热量传递；成矿行为；微观结构
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2020)01－0013－07
doi：10.13403/j.sjqt.2020.01.003

Study on heat transfer and mineralization behavior of a new technology of double-layer pre-sintering

Zhou Mingshun[1], Wang Yidong[2], Zhao Dongming[3], Zhai Liwei[1], Jiang Tao[4], Zhong Qiang[4]
(1. *Iron and Steel Research Institute, AnSteel Group Corporation, Anshan* 114009, *Liaoning*; 2. *AnSteel Group Corporation, Anshan* 114000, *Liaoning*; 3. *Iron-making Plant, Angang Steel Co., Ltd., Anshan* 114000, *Liaoning*; 4. *School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan*)

Abstract Under the condition of no oxygen-enriched sintering, the proportion of pre-sintering time to the thickness of the upper and lower layers of the double-layer burden is optimized and industrial tests were carried out in the early stage of this study, which helped the double-layer sintering greatly increase its production, and the sinter quality meet the requirements of blast furnace smelting. However, there is a problem of lower layer intensity differences in the double layer pre-sintering technique, thus a study of heat transfer of double layer pre-sintering and mineralization is carried out. The results show that the flue gas in the hot state of double-layer pre-sintering is completely different from that in the single-layer sintering, for its structure and properties are more complex; the reaction gas in the middle and lower part of the double-layer pre-sintering layer is the upper exhaust gas, and the oxygen content is low, which leads to the inadequate mineralization of sinter in some areas of the lower and middle part, and the structure of sinter is a little loose; the upper layer of double-layer pre-sintering has single layer sintering process, and the middle layer is a sinter belt formed by pre-sintering. The sintering process of the middle layer is the same as that of single layer, the lower layer and the upper layer are in the double-layer sintering process simultaneously. The heat transfer and mineralization behavior of the middle layer is completely different from that of the conventional single-layer sintering. The research work in this paper will provide theoretical support for the improvement of sinter quality in the double-layer pre-sintering process.

Key words double-layer pre-sintering; heat transfer; mineralization behavior; microstructure

收稿日期：2019－10－13
作者简介：周明顺(1964—)，男，鞍山钢铁首席专家，工学博士，教授级高级工程师，从事烧结球团技术研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

鞍钢股份有限公司为压缩烧结产线，拟将鞍山地区7条烧结生产线减为6条烧结生产线，2015年12月，鞍钢集团钢铁研究院自主开发了双层预烧结新工艺，提出工艺技术方案并进行了工业试验。超厚料层双层预烧结不仅能降低烧结能耗、提高烧结矿产量，而且能大幅度地缩短烧结时间、降低烧结抽入风量、提高烧结利用系数[1-6]。双层预烧结工业试验结果表明：采用超高料层双层预烧结工艺的烧结矿产量有明显提高，但下层烧结矿饼质量不均，存在转鼓强度和成品率降低的问题[7-9]。为了查明双层预烧结成品率和转鼓强度降低的原因，开展了双层预烧结传热与成矿行为的试验研究，可为其推广应用提供理论参考。本文也是在文献[10]工作基础上的后续系列研究之一。

1 试验原料和方法

1.1 试验原料

试验含铁原料、熔剂及燃料均取自鞍钢本部炼铁总厂烧结车间，含铁原料、熔剂和燃料的主要化学成分如表1～3所示。

表1 含铁原料的主要化学成分(质量分数) %

TFe	FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	S	LOI
57.86	16.17	4.28	5.02	1.02	0.93	0.044	5.84

表2 熔剂的主要化学成分(质量分数) %

种类	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P	S	LOI
生石灰	0.38	0.036	2.69	0.43	62.36	3.20	0.29	0.023	0.011	0.068	27.75
石灰石	0.65	0.45	5.09	1.05	46.85	2.95	0.62	0.041	0.019	0.040	40.74

表3 燃料的化学成分(质量分数) %

固定碳	挥发分	灰分	灰分化学成分								
			TFe	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	P	S
83.87	0.98	15.15	7.10	49.8	3.37	27.52	0.89	0.93	0.64	0.24	0.052

1.2 试验方法

对常规单层烧结和双层预烧结的烧结效果进行对比，以表征双层预烧结新工艺的特征。烧结杯配矿方案参见本研究前期工作文献[10]的方法，同时采用∅200 mm×1 000 mm分体式烧结杯(图1)进行双层预烧结传热传质与成矿行为研究。由图1可知：分体式烧结杯沿料层高度方向将料层分为五层，每层料高200 mm。第一层和第二层为上料层烧结；第三层、第四层和第五层为下料层烧结，其中第三层料层主要进行的是单层烧结；第四层和第五层主要为与上料层烧结过程同步进行的双层预烧结。烧结完毕，可将烧结杯打开，对烧结饼不同区域的烧结矿进行取样，分析不同料层烧结矿成品率、转鼓强度、高温冶金性能、主要化学成分、矿物组成和显微结构。烧结杯体设有10个开口，可以用于测温取气，离料面距离分别为50、150、250、350、450、550、650、750、850、950 mm。研究中根据需要从开口外接热电偶或烟气分析仪对烧结过程的热状态和烟气性质进行检测或者用螺钉将其密闭。

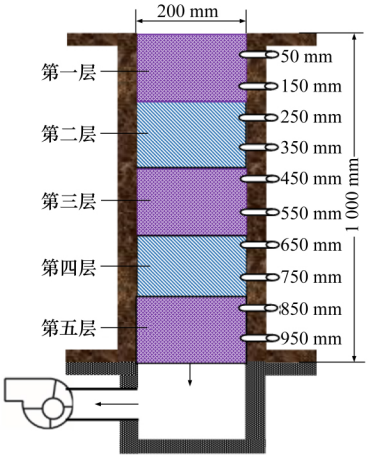


图1 分体式烧结杯示意图

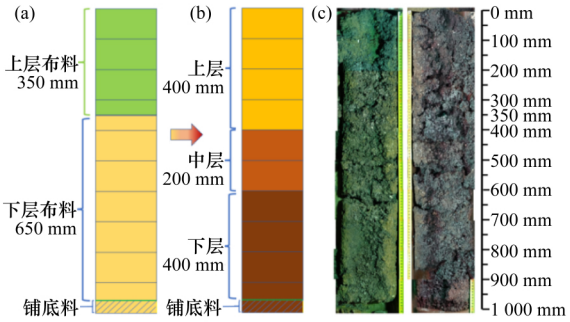
2 试验结果分析

2.1 烧结指标及成矿行为分析

在料层总高度为1 000 mm(上层料高为350 mm、下层料高为650 mm)，预烧结时间为12

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

min 的条件下，对双层预烧结的成矿行为进行研究。采用双层预烧结法的烧结饼宏观结构如图 2 所示，单层 700 mm 烧结常规基准试验与双层预烧结的烧结杯试验结果见表 3。



(a) 生料示意图；(b) 烧结饼示意图；(c) 实际烧结饼照片

图 2　双层预烧结的烧结饼宏观结构

由图 2 可知：

(1) 第一层烧结饼的表层烧结矿粘结结构较差，粘结相粘结薄弱，细颗粒较多、边缘存在一些未烧透的生料颗粒，说明最表层高温保持时间不够，烧结成矿不充分，需采取保温措施。

(2) 第二层烧结饼液相充足，粘结结构较好，烧结矿以大块形式存在，边缘颗粒较少，这是由于上层烧结的蓄热作用使得第二层烧结料经历的温度更高，高温保持时间更长，成矿效果更好；此外，第二层下部 50 mm 是第一次点火时的表层烧结矿，但其烧结效果也较好，这是由于上层底部的液相有部分进入了已烧好的料层空隙中；另外，上层烧结结束时的高温热废气也对下层烧结矿的表层有再次加热的作用，使得其矿化更充分。

(3) 第三层烧结饼液相充足，分布均匀，粘结结构良好，烧结矿粘结成一整块、烧结矿壁厚孔小，边缘有少量细颗粒和粉末。第三层实质上是正常的单层烧结的烧结矿，也是五层烧结区间中烧结矿质量最好的。

(4) 第四层烧结饼液相过多，但与第三层有明显界限，粘结结构良好，液相分布均匀，孔洞较多，大小适中，边缘细颗粒较少。这是由于第四层已经进入了上下两层同时烧结的过程，在这一过程中，由于下层烧结蓄热作用的继续，烧结料层温度较第三层更高，高温维持时间也更长；但是，由于上下两层同时烧结，整体料层透气性变差，料层燃烧不够充分，烧结矿与第三层明显不一样，导致了分层裂痕的产生。

(5) 第五层烧结饼液相过量，分布均匀，但孔洞大且多，存在大量的大孔薄壁结构，边缘细颗粒较多。这是由于厚料层蓄热作用使得下层热量过多导致的液相过多，从而形成大孔薄壁结构；且下层液相过多，局部透气性差使得边缘效应较上层严重。

表 3　烧结杯试验结果

项目	垂直烧结速度 /(mm·min^{-1})	成品率 /%	转鼓强度 /%	利用系数 /(t·m^{-2}·h^{-1})	固体燃料消耗 /(kg·t^{-1})
单层烧结	21.36	68.37	61.50	1.27	46.12
双层预烧结	30.72	64.95	58.67	1.91	45.90

由表 3 可知：单层 700 mm 烧结常规基准试验的垂直烧结速度为 21.36 mm/min，料层总高度为 1 000 mm 的双层预烧结垂直烧结速度为 30.72 mm/min，双层预烧结垂直烧结速度显著提高；但双层预烧结工艺的烧结矿质量有所降低，其转鼓强度为 58.67%，而单层 700 mm 烧结常规基准试验值为 61.50%。因此，若能找到方法使双层预烧结工艺的烧结矿质量不降低，势必带来烧结大幅提产。

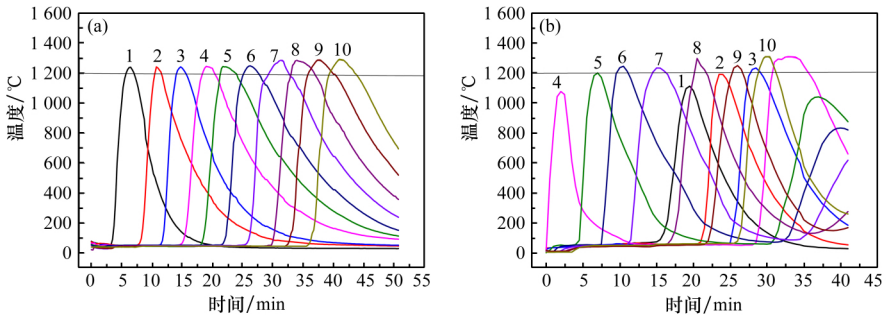
以下从双层预烧结的传热与成矿行为方面对质量有所降低进行分析，以期能找到解决问题的原因。

2.2　料层热状态分析

为了对比常规单层烧结和双层预烧结的传热与成矿行为的差异，对两种烧结的热状态进行测定。其中常规单层烧结采用单层布料单层点火烧结，料层厚度为 1 000 mm；双层预烧结首先布料 650 mm 进行点火烧结，预烧时间 12

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

min 后，快速二次布料至 1 000 mm 料高，进行二次点火烧结。单层烧结和双层预烧结不同料层的热状态结果分别如图 3(a) 、3(b) 所示。两图中各有 10 根烧结废气温度曲线(根据测温点位置距烧结杯料面的距离分别得出) 。

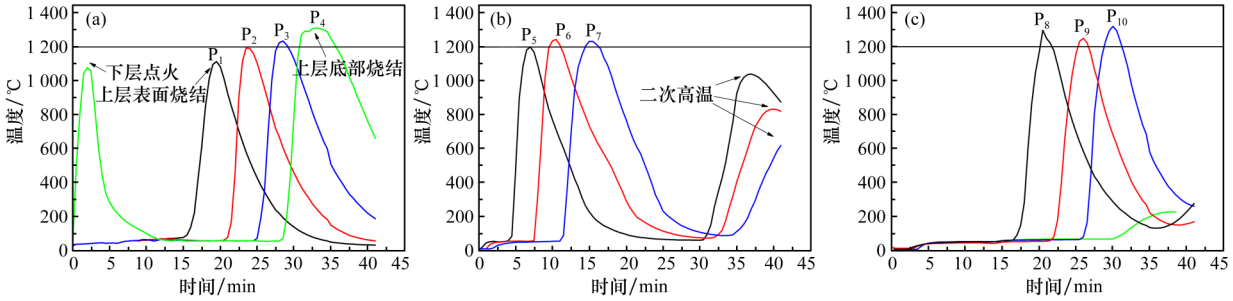


(a) 常规单层烧结; (b) 双层预烧结

距离/mm: 1—50; 2—150; 3—250; 4—350; 5—450; 6—550; 7—650; 8—750; 9—850; 10—950。

图 3 不同烧结料层热状态

由图 3 可知: 单层烧结不同料层的温度曲线呈一定的规律。随着烧结进行，料层自上而下依次升温，表明烧结燃烧带自料层表面往下移动; 料层越往下，烧结最高温度越高，高温区间越宽，表明料层越往下，热量越多，高温持续时间越长; 特别是距料面 750 mm 以下的料层，其烧结最高温度大幅度提高，1 200 ℃以上高温保持时间明显延长; 对于双层预烧结，不同料层温度曲线没有明显的规律。这是由于双层布料双层点火烧结改变了料层的热状态，上、下两层同时烧结，且同时上层烧结产生的热量传递至下层，又会影响下层的烧结热状态，导致双层预烧结热状态呈现完全不同于单层烧结的热状态。为了进一步清晰地分析双层预烧结的热状态，将其分为 3 部分，不同料层温度曲线分别如图 4(a) 、4(b) 、4(c) 所示(图中曲线根据测温点位置距烧结杯料面的距离分别得出) 。



(a) 上部料层; (b) 中部料层; (c) 下部料层

距离/mm: P_1—50; P_2—150; P_3—250; P_4—350; P_5—450; P_6—550; P_7—650; P_8—750; P_9—850; P_{10}—950。

图 4 双层预烧结不同料层温度曲线

由图 4 可知: 上部料层(0 ~ 350 mm) 热状态为二次布料点火后的单层烧结过程; 中部料层(350 ~ 650 mm) 热状态主要为一次布料点火后的单层烧结过程; 下部料层(650 ~ 950 mm) 热状态主要为与上部料层烧结同步进行的双层预烧结过程在 350 mm 处，一次点火导致其出现第一个峰值，最高温度与 1 100 ℃的点火温度接近; 点火完成后烧结过程向 350 mm 以下的料层移动，350 mm 料层温度快速降低，而 450、550、650、750、850、950 mm 处料层温度依次上升。

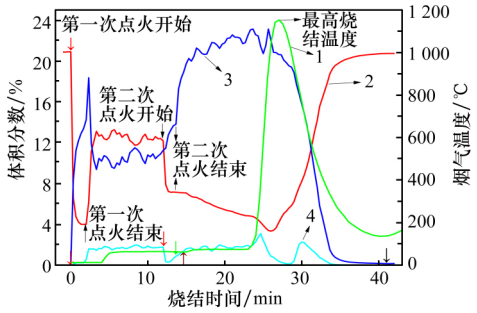
此外，预烧结 12 min 后，0 ~ 350 mm 区域料层二次布料点火烧结，使 50、150、250、350 mm 处料层温度依次上升。由于抽入的冷空气对料层表层的影响，造成 50 mm 处料层烧结最高温度偏低、高温保持时间偏短，其也是料层表

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

面烧结矿质量较差的原因。由于上部料层烧结会引起 350 mm 以下料层二次升温，350 mm 处二次最高温度达到 1 300 ℃，450 mm 处二次最高温度也达 1 000 ℃，二次高温会强化这部分料层烧结矿成矿，导致料层第二层和第三层烧结矿质量较好。在 650 ~ 950 mm 区域的下部料层，为与上层烧结同步进行的双层预烧结，这部分料层的烧结最高温度较高，但是其 1 200 ℃以上高温区域较窄(烧结成矿高温保持时间短会影响烧结矿的成矿) ，其原因可能是由于下部料层缺氧导致。

2. 3　料层烟气性质分析

对双层预烧结距料面 850 mm 处的料层烟气性质进行研究，850 mm 料层烧结过程 O_2、CO_2 和 CO 气体组成随烧结时间的关系如图 5 所示。



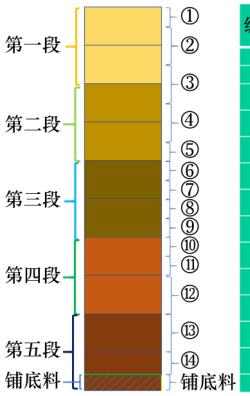
1—烟气温度；2—O_2；3—CO_2；4—CO。

图 5　双层预烧结过程气相组成

对图 5 中料层烟气性质的相关解析可参考本研究前期工作文献［10］。另外，4% O_2 体积分数最低值所对应的烧结时间正好是烧结最高温度对应的烧结时间，表明此时烧结燃烧带移动至 850 mm 处，碳的燃烧反应剧烈发生，大量消耗 O_2，O_2 体积分数急剧降低，导致下部料层缺氧，这是下部料层区域烧结矿质量较差的原因，同时印证了由于下部料层缺氧，燃料燃烧不充分导致 1 200 ℃以上高温区域较窄的事实; 随着烧结过程继续进行，O_2 体积分数快速上升，CO_2 体积分数急剧降低，此时 850 mm 料层的烧结反应完成，形成烧结矿带。

2. 4　料层成矿行为与物相组成

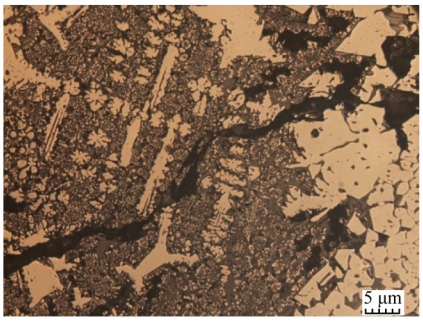
为了分析不同料层烧结矿成分的变化，研究中自上而下选取 14 处不同料层的烧结矿检测其 FeO 质量分数，结果见图 6。其中: 第 5 至第 9 取样点对应为 350 ~ 600 mm 料层，该料层主要为第一次布料点火后的单层烧结; 第 1 至第 4 取样点对应为 0 ~ 350 mm 料层，该料层为第二次布料点火后的单层烧结; 第 10 至 14 取样点对应为 600 ~ 950 mm 料层，该料层为双层预烧结过程，与上料层单层烧结同步进行。由图 6 可知: 第 1 至第 9 取样点的 FeO 质量分数在 6. 25% ~ 9. 71% 区间内，属于常规单层烧结生成烧结矿的正常 FeO 质量分数; 而第 10 至第 14 取样点的 FeO 质量分数明显偏高，第 14 点 FeO 质量分数为 13. 50% ，第 10 至第 13 取样点的 FeO 质量分数高达 20% 左右，这表明该段料层发生剧烈的 Fe_2O_3 还原反应，Fe_2O_3 大量被还原成 FeO，其主要因为 O_2 体积分数很低，烧结过程严重缺氧。



编号	料层/mm	FeO质量分数/%	残碳质量分数/%
1	0~50	8.82	0.77
2	50~150	7.37	—
3	150~250	9.41	0.11
4	250~350	9.71	—
5	350~400	7.48	0.21
6	400~450	6.25	—
7	450~500	7.05	0.12
8	500~550	6.73	—
9	550~600	8.45	0.14
10	600~650	23.12	—
11	650~700	19.45	0.57
12	700~800	19.23	—
13	800~900	23.82	0.18
14	900~960	13.50	—

图 6　不同料层烧结矿 FeO 和残碳质量分数

采用偏光显微镜对第 10 取样点(600 ~ 650 mm 料层) 的烧结矿微观结构进行观察，部分烧结矿矿相结构如图 7 所示。



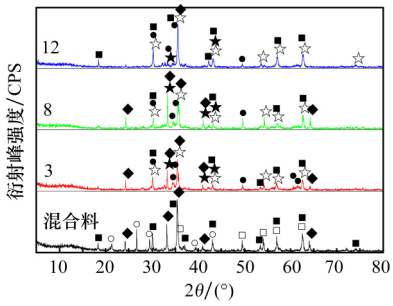
黑色—磁铁矿；白色—赤铁矿。

图 7　双层预烧结下层 600 ~ 650 mm 处烧结饼的烧结矿微观结构

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由图 7 可见：该段料层出现明显的骸晶类型的矿相结构，其只在缺氧、FeO 质量分数高的环境下存在。矿相存在大量的磁铁矿，表明赤铁矿被大量还原成磁铁矿，磁铁矿与赤铁矿互相交织，这样的烧结矿结构疏松，强度较差。

选取 150 ~ 250 mm 区域处烧结矿作为烧结矿上层代表，500 ~ 550 mm 区域处烧结矿作为烧结矿中层代表，700 ~ 800 mm 区域处烧结矿作为烧结矿下层代表，并同未烧的混合料进行了 X 射线衍射(x-ray diffraction，XRD)分析，结果见图 8。



◆—Fe_2O_3；■—Fe_3O_4；●—$7CaO \cdot Fe_2O_3$；★—$2CaO \cdot Fe_2O_3$；◇—$2FeO \cdot SiO_2$；□—SiO_2；○—$CaCO_3$；☆—$MgO \cdot Fe_2O_3$。

图 8 双层预烧结混合料与烧结矿的 XDR 分析

(图中左列的数字“3”、“8”、“12”分别代表图 6 中的③、⑧、⑫)。

由图 8 可知：烧结原始混合料中的主要物相是磁铁矿、赤铁矿、石英、石灰石等，烧结后石英和石灰石参与反应消失了，磁铁矿和赤铁矿的峰还在，部分为残留，部分为次生，新生成了铁酸钙、铁酸二钙、铁橄榄石、铁酸镁等；根据衍射峰强度与物相质量分数的定性关系可以看出，烧结后赤铁矿质量分数减少了，而磁铁矿在料层中从上往下先减少后增加，在下层烧结矿中磁铁矿的质量分数甚至高于混合料；在烧结料层中，铁酸镁的质量分数随着料层越往下越高；铁酸钙和铁酸二钙的质量分数则是先增高后降低，依次为中层 > 上层 > 下层。上述结果也印证了下层缺氧和中层液相较多的事实。

2.5 双层预烧结反应历程

结合双层预烧结过程热状态、烟气性质及烧结成矿，双层预烧结反应历程见图 9。

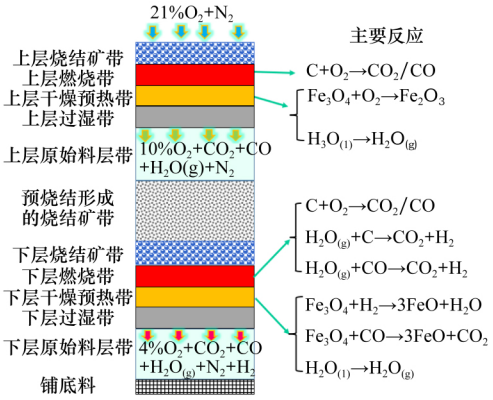


图 9 双层预烧结反应历程

由图 9 可知：双层预烧结料层结构和性质更为复杂，其上部料层为单层烧结过程，结构和性质与单层烧结相同，自上而下分为烧结矿带、燃烧带、预热带、过湿带和原始料带；含有体积分数 21% O_2 的空气由上部料层表面往下流动，与料层中 Fe、C 等组分发生一系列反应消耗 O_2、生成 NO_x、H_2O(g)等，气体流动至原始料层时主要组成为 10% O_2 + CO_2 + CO + H_2O + N_2 等；中部料层为预烧结形成的烧结矿带，该料层烧结过程与单层烧结过程一样，为一次布料点火后的单层烧结过程，其料层高度主要由预烧结时间决定，气体(10% O_2 + CO_2 + CO + H_2O + N_2)从上层原始料层流入中部料层，没有发生任何反应而继续按照原气相组成往下层料层流动。

下部料层烧结过程是与上层料层烧结过程同步进行的双层预烧结过程。下部料层结构自上而下也分为烧结矿带、燃烧带、预热带、过湿带和原始料带，但其性质与单层完全不同。该料层发生更复杂的一系列反应，如碳的燃烧反应、水蒸汽与碳组成的水煤气反应，Fe_2O_3 生成 FeO 的还原反应，水的汽化反应等。O_2 进一步消耗，其质量分数由 10% 左右降低至 4% 左右，下部料层缺氧，同时 CO_2 等进一步生成。

2.6 富氧烧结强化双层预烧结下部料层矿化过程

根据双层预烧结传热传质与成矿分析可知，由于下层料层为废气烧结过程，废气中 O_2 体积分数仅为 4%，导致下层料层烧结成矿较差，转鼓强度低。为此，采用富氧方法强化双层预

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

烧结过程，富氧操作从二次点火烧结及保温后开始，至下层料层烧结完成而停止。

在料层总高度为 1 000 mm(上层料高为 350 mm、下层料高为 650 mm)，预烧结时间为 12 min 的条件下，研究在烧结杯料面喷入富氧空气对双层预烧结产、质量指标的影响，结果见表 4。

表 4　富氧对双层预烧结指标的影响

O_2 体积分数 /%	烧结速度 /(mm·min^{-1})	成品率 /%	转鼓强度 /%	利用系数 /(t·m^{-2}·h^{-1})	固体燃耗 /(kg·t^{-1})
25	30.00	69.06	66.40	2.09	53.79
21	30.72	64.95	58.67	1.91	57.02

经对烧结富氧理论计算，当在烧结杯料面喷入 O_2 体积分数为 25% 的空气时，满足充分矿化反应对 O_2 体积分数的需求。与常规不富氧比较，在空气含 O_2 体积分数为 25%(即富氧体积分数为 4%)时，烧结矿成品率、转鼓强度和利用系数均有不同程度的提高，烧结固体燃耗降低，尤其是烧结成品率和烧结矿转鼓强度指标改善明显。烧结成品率和烧结矿转鼓强度分别由 64.95%、58.67% 提高至 69.06%、66.4%，利用系数由 1.91 t/(m^2·h) 提高至 2.09 t/(m^2·h)，固体燃耗由 57.02 kg/t 降低至 53.79 kg/t。通过富氧烧结强化下部料层矿化反应，可明显提高烧结矿冷强度，取得改善双层预烧结产、质量指标的效果。

3　结　论

(1) 双层预烧结料层的中层、下层与上层料层同步进行烧结，料层的中层、下层中间区域气体为上层烧结后的废气，O_2 体积分数低，废气烧结导致中层、下层的区域烧结矿矿化不尽充分，存在烧结矿结构疏松，烧结矿冷强度较低的问题。

(2) 双层预烧结热状态和烟气性质与单层烧结的完全不同，其结构和性质更为复杂：上部料层为单层烧结过程，其结构和性质与单层烧结相同，自上而下分为烧结矿带、燃烧带、预热带、过湿带和原始料带；中部料层为预烧结形成的烧结矿带，该料层烧结过程与单层烧结过程一样；下部料层结构自上而下也分为烧结矿带、燃烧带、预热带、过湿带和原始料带，但其传热与成矿行为与常规单层烧结的完全不同。

(3) 双层预烧结新工艺目前存在烧结矿成品率和冷强度有一定程度下降的问题，其主要原因是下料层烧结过程缺氧所致，通过富氧烧结强化下部料层矿化过程，可明显提高烧结矿的冷强度，取得改善双层预烧结工艺烧结矿产、质量指标的效果。

参考文献

[1] Wang Y Z, Zhang J L, Liu Z J, et al. Recent advances and research status in energy conservation of iron ore sintering in China [J]. JOM, 2017, 69(11): 2 404 – 2 411.

[2] Jiang T, Yu Z W, eng Z W, et al. Preparation of BF burden from titanomagnetite concentrate by composite agglomeration process(CAP) [J]. ISIJ International, 2015, 55(8): 1 599 – 1 607.

[3] Kang H J, Choi S, Yang W, et al. Influence of Oxygen Supply in an Iron Ore Sintering Process [J]. ISIJ International, 2011, 51(7): 1 065 – 1 071.

[4] E. Ф. 魏格曼. 双层烧结法的研究 [J]. 烧结球团, 1991, 16(2): 34 – 36.

[5] H. C. Минаков. 改善高料层烧结的双层混合料烧结工艺 [J]. 武钢技术, 1996(6): 10 – 12.

[6] C. 泽温. 新利佩茨克钢铁公司双层布料双碱度烧结工艺 [J]. 烧结球团, 1995, 20(3): 29 – 32.

[7] Feoktistov A V, Odintsov A A. Making more efficient use of solid fuel in two – layer sintering [J]. Metallurgist, 2014, 58(5 – 6): 469 – 477.

[8] 唐复平，周明顺，王义栋，等. 一种采用预烧结的超厚层烧结方法: 中国, 201610144762.8 [P]. 2017 – 01 – 18.

[9] 翟立委，周明顺，唐复平，等. 一种采用预烧结的超厚料层复合式配料方法: 中国, 201610815437.X [P]. 2017 – 01 – 18.

[10] 周明顺，王义栋，韩淑峰，等. 超厚料层双层预烧结新工艺研究与工业试验 [J]. 烧结球团, 2019, 44(6): 23 – 27; 38.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net