分层供热均热低碳烧结方法及基础试验研究

叶恒棣[1]，周浩宇[1]，朱蓉甲[1]，魏进超[1]，王兆才[1]，甘 敏[2]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要： 文章通过研究烧结料层热量产生、消耗、传递、蓄积的规律及影响因素，揭示了能源相态、温度区间及变化梯度、微观气氛与烧结成矿（产、质量）的关系，建立了烧结料层均热数学模型及求解分层补热的数学算法，开发了基于基准配碳加分层补热实现均热低碳富氢烧结的方法，并以中天钢铁原料条件为对象开展了小试试验。试验结果表明：应用分层供热烧结方法后，烧结速度、烧结成品率、转鼓强度、利用系数等指标较基准工况均略微上升，总配碳量从4.00%降至3.25%。

关键词： 烧结；厚料层；分层供热；均热低碳烧结；富氢烧结
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764（2023）05－0043－08
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.05.069

Method of low-carbon sintering with uniform heat and basic experimental research based on layered heating

YE Hengdi[1], ZHOU Haoyu[1], ZHU Rongjia[1], Wei Jinchao[1], WANG Zhaocai[1], GAN Min[2]
(1. Zhongye Changtian International Engineering Co.,Ltd.,Changsha 410205,Hunan,China;
2. School of Minerals Processing Bioengineering,Central South University,Changsha 410083,Hunan,China)

Abstract: By studying the laws and influencing factors of heat generation,consumption,transfer and accumulation in the sinter bed,the relations among energy phase,temperature range,change gradient,microscopic atmosphere and sintering mineralization(production and quality) are revealed,a mathematical model of sinter bed with uniform heat and a mathematical algorithm for solving layered heat supplementation are established,a method to achieve low-carbon hydrogen-rich sintering with uniform heat based on benchmark carbon distribution plus layered heat supplementation is developed,and a small-scale test experiment based on the raw material conditions of Zhongtian Iron and Steel is carried out. The results show that after applying the layered heating sintering method,such indicators as sintering speed,sintering yield,tumbler strength,and utilization coefficient increase slightly compared with the benchmark working conditions,and the total carbon formulation decreases from 4.00% to 3.25%.

Key words: singering; deep bed sintering; stratified heating; low carbon sintering with uniform heat; hydrogen-rich sintering

自2020年中国提出双碳战略后，钢铁行业减碳压力日益增大。据统计，近3年钢铁行业年均排放CO_2约18亿吨，工业领域占比为18.75%，仅次于火电[1-3]。2021年我国粗钢产量为11.36亿吨，其中“烧结—高炉”长流程工艺占比达95%，故从长流程工艺入手开发低碳冶炼技术潜

收稿日期：2023－05－26；修回日期：2023－09－26
基金项目：湖南省自然科学基金资助项目（2022JJ40884）
作者简介：叶恒棣（1963—），男，正高级工程师，从事钢铁冶炼方面的研究。
通信作者：周浩宇（1981—），男，正高级工程师，从事钢铁冶炼方面的研究。

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

力巨大[4-6]。

烧结工序是长流程工艺中的关键环节，其工序能耗约占钢铁生产总能耗的8.3%，仅次于高炉炼铁工序，是高能耗、高污染集中环节[7-8]。据统计，2020—2022年我国烧结工序每年向大气排出CO_2约2.77亿吨，是造成温室效应的重要原因之一[9-10]。

厚料层技术可有效降低工序能耗与吨矿加工成本，已成为市场追逐的热点，但随着我国厚料层烧结技术的普及与推广，料层内的自蓄热效应愈发明显，900 mm以上料层内蓄热率已达55%以上[11-12]，这部分蓄热由于料层内燃料均匀态分布未能得到充分利用，不但造成能源浪费，而且造成料层下部温度过热导致成品率降低。因此，如何从改善料层供热、强化蓄热利用效率着手，开发一种均热、低碳的绿色烧结工艺，已成为钢铁行业实现双碳目标的迫切需求[13-14]。

基于以上背景，文章以烧结机厚料层烧结过程为研究对象，开展了分层供热烧结的机理、准则与工艺制度研究，形成了一种分层供热均热低碳烧结方法，并对其开展了基础试验研究，以期为其大范围推广应用提供理论依据。

1 分层供热均热低碳烧结机理研究

1.1 烧结过程蓄热模型的建立

对料层高度为H(m)，宽度和长度分别为1 m的烧结料层进行热平衡分析，料层沿高度方向被等分成N个单元，单元料层高度$\Delta H = H/N$，如图1所示。烧结混合料密度为ρ(kg/m^3)，烧结机长度为L(m)。

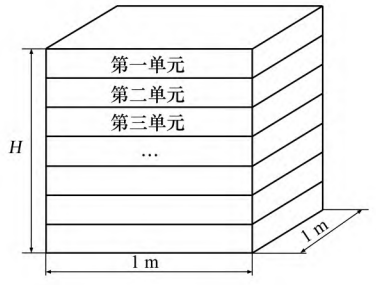


图1 料层单元分层

Fig. 1 Unit layering of sintering layer

为简化烧结传热过程，假设：① 忽略料层沿台车宽度方向以及移动方向的热量传递。由于抽风速率远大于烧结台车移动速率，而台车边缘效应宽度远小于台车宽度，因此热量传递主要发生在料层高度方向上。② 料层传热速率与燃烧速率一致。当二者速率一致时，料层内部热量可以得到最大化的利用，是一种最理想的工况。③ 单元内部采用集总参数法。单元内部各点的参数值相等。④ 物料物性参数(包括比热、导热系数等)均采用线性插值法。⑤ 根据相关资料，第一单元向周围空气热耗散为热量总收入的15%，其他单元热耗散为其热收入的8%。⑥ 点火保温热只对第一单元有影响，其他反应热各单元平均分配。⑦ 铺底料物理热只对最后一个单元有影响。⑧ 为了更好地研究蓄热作用的影响，本研究中残碳在料面往下15%高度范围内线性递减。⑨ 烧结饼温度沿高度方向呈指数变化，表层温度最低为常温(30 ℃)，底部温度随料层厚度增加而升高，料层厚度为700 mm时，底部料层烧结饼温度为1 300 ℃[15]。

对任意单元i的热收入与热支出进行热平衡分析，各单元热量收入与支出如图2所示，第i单元总热收入$Q_{in}(i)$(J)等于该单元蓄热量$Q_x(i)$与其余各项热收入之和，见式(1)。

$$Q_{in}(i) = Q_x(i) + Q_{in_other}(i) \quad (1)$$

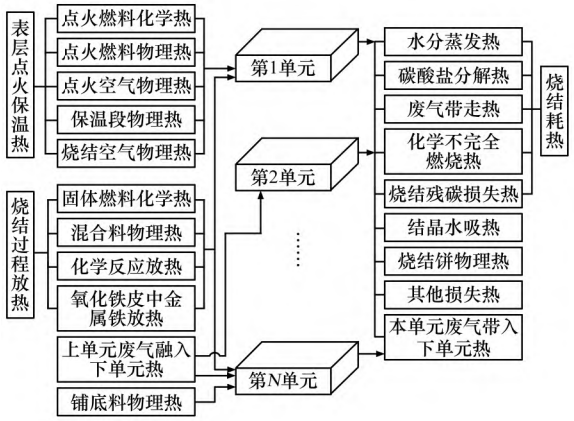


图2 料层单元热量平衡示意

Fig. 2 Heat balance of sintering layer unit

由于蓄热量是由上层各单元可传递热量按照某种方式向下层单元进行分配累积而成，因此单元蓄热量的求解无法直接给出，须沿高度方向从上至下依次展开，以下详细阐述了蓄热量的求解过程。

第i单元蓄热量$Q_x(i)$来自该单元上部料层单元。假设单元热量最大传输距离为H(m)，则

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

$Q_x(i)$ 等于上部料层中与其相距 H 范围内所有单元传递给该单元的热量总和，见式（2）。

$$Q_x(i)=\sum_{m=j}^{m=i-1}Q_x^m(i),(i-j)\times\Delta h\leqslant H \tag{2}$$

式中：$Q_x^m(i)$ 为上部某个单元 m 传递给单元 i 的热量，J；Δh 为单元高度，m；j 为与单元 i 相距 H 的上部单元。

$Q_x^m(i)$ 由单元可传递热量 $Q_t(m)$ 以及热量传递函数 $Q_s(h^*)$ 所确定，见式(3)。单元可传递热量 Q_t 等于单元总热收入减去总热支出，考虑到料层会向周围环境散热，设热损失系数为 $a(i)$，可传递热量的计算见式(4)。

$$Q_x^m(i)=Q_t(m)*[Q_s(h_{top}^*)-Q_s(h_{bot}^*)] \tag{3}$$

$$Q_t(i)=[Q_{in}(i)-Q_{out}(i)][1-a(i)] \tag{4}$$

式中：$Q_s(h^*)$ 为热量传递函数，即热量在无量纲高度 h^* 位置时的剩余比例。根据参考文献数据[15]，可以将热量传递函数表示成指数函数，具体计算公式见式(5)～(7)。

$$Q_s(h^*)=C^{h^*/(h^*-1)} \tag{5}$$

$$h_{top}^*=(h_{i-1}-h_m)/H \tag{6}$$

$$h_{bot}^*=\min[(h_i-h_m)/H,1] \tag{7}$$

式中：h_{top}^* 为上部某个单元 m 往下的第一个单元的无量纲高度位置；h_{bot}^* 为上部某个单元 m 的可传递热量所能到达的终点单元的无量纲高度位置。

烧结料层内热量传递与衰减特性如图 3 所示。

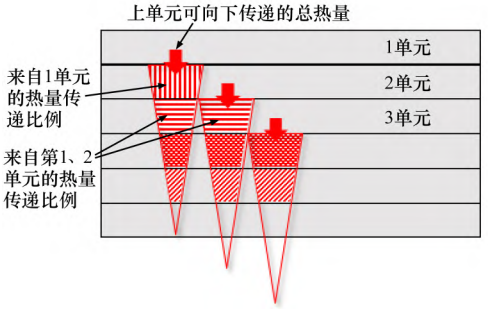


图 3　烧结料层内热量传递与衰减特性

Fig. 3　Heat transfer and attenuation through the sintering layer

第 i 单元的热支出 $Q_{out}(i)$ 主要包括各类化学反应热 $Q_{out_ra}(i)$、残碳热 $Q_{out_rc}(i)$ 以及烧结饼余热 $Q_{out_so}(i)$[15,17]，见式(8)。

$$Q_{out}(i)=Q_{out_ra}(i)+Q_{out_rc}(i)+Q_{out_so}(i) \tag{8}$$

对烧结矿进行分析可以确定各类化学反应热与残碳热，根据试验与模拟验证，残碳 M_{rc}(kg) 主要集中在表层料层，是导致表面料层热收入低的主要因素[15-18]。烧结饼余热为烧结饼所具有的显热，由烧结饼温度 T_{so}(℃) 分布决定随料层高度呈指数变化，且随着料层厚度增加而增加。残碳 M_{rc}、烧结饼温度 T_{so} 均可以表示为高度的指数函数，见式(9)、(10)。

$$M_{rc}(h)=C_{m1}\exp(C_{m2}h) \tag{9}$$

$$T_{so}(h)=C_{t1}\exp(C_{t2}h)+C_{t3}\exp(C_{t4}h) \tag{10}$$

式中：C_{m1}、C_{m2}、C_{t1}、C_{t2}、C_{t3} 均为常数，具体由原料条件(比如燃料颗粒粒度等) 和边界条件(比如料面风速等) 所确定。

基于烧结各单元料层需要的热量相等，即物料熔融显热与潜热、混合料中熔剂分解吸热以及水分蒸发吸热量之和 Q_{sum}，由于单元料层蓄热作用，各单元的理论补热量 Q_{ad} 有所差别，见式 11：

$$Q_{ad}(i)=Q_{sum}-Q_x(i) \tag{11}$$

1.2　均热烧结补热量分布计算研究

根据式(1)～式(11)，基于通用的原料条件，采用 matlab 软件编制计算程序，单元蓄热量与补热量的计算流程如图 4 所示。

由 1.1 节分析可知，针对不同原料与工艺条件，料层残碳、烧结饼余热、蓄热量都可以简化为料层高度 h 的函数，因此补热量亦可以简化为单元高度 h(m) 的函数，式(12) 给出了补热量的简写形式：

$$Q_{ad}(i)=Q_{sum}-f(h) \tag{12}$$

以典型原料条件与相应的工艺参数的时序平均值为计算基础，文章进一步对不同高度料层内部理论补热量进行了计算，计算的目的是保证沿高度各料层单元所获得的热量一致，其流程如图 4 所示。

图 5 给出了由数值计算获得的蓄热量与理论补热量沿料层高度方向的分布规律，为了便于对比与技术共性化，将热量与高度均进行了无量纲化处理，无量纲蓄热量/补热量等于蓄热量/补热量与该单元完成烧结所需热量的比值，而无量纲高度等于该单元高度与总料层高度的比值。

由图 5 可知，计算得到的烧结各单元理论补热量，在沿料层高度方向上逐步递减，且在料层顶部 5% 左右(无量纲高度 0～0.05) 与底部 25% 左右(无量纲高度 0.75～1.00) 趋于平缓。

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

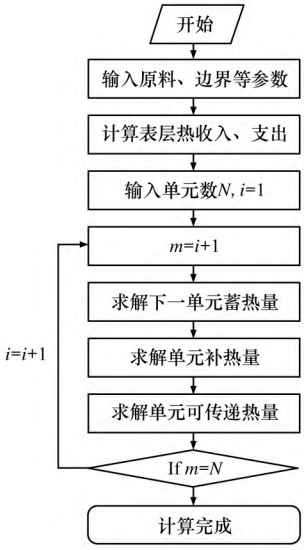
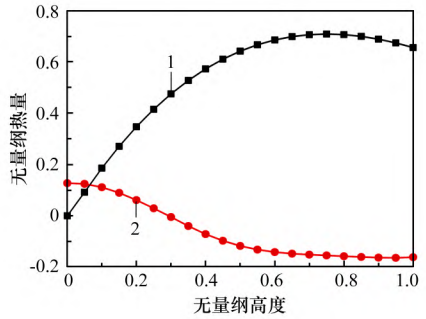


图 4 蓄热与补热量计算流程

Fig. 4 Calculation flow of accumulation heat and addition heat



1—无量纲蓄热量；2—无量纲补热量。

图 5 理论无量纲蓄/补热量随料层无量纲高度的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of theoretical dimensionless storage/heating capacity with the dimensionless height of the sintering layer

1.3 分层供热均热低碳烧结思路

在建立蓄热模型和探明理论补热量分布特性的基础上，文章提出一种新的“分层供热低碳烧结工艺”思路，即：先设定料层底部 25% 左右高度（不包括铺底料）单元为底层，将底层所需配碳量设定为配碳基准值，以此对全料层实施统一的低碳供给，然后再根据图 5 所述补热量曲线对料层另外 75% 高度单元实施不同技术手段的分层精准补热，以此，最终达到各高度单元热量分布均匀合理，实现低碳、高质、清洁、绿色的烧结矿生产。

1.4 分层供热均热低碳烧结制度准则

在提出思路的基础上，文章结合烧结中的点火、保温、燃气喷加等现有技术手段，进一步构建了“表层依靠点火补热、上层靠热风保温补热、中层靠燃气梯级浓度喷加补热、底层无需补热”的四层次气固两相复合供热制度准则，如图 6 所示。

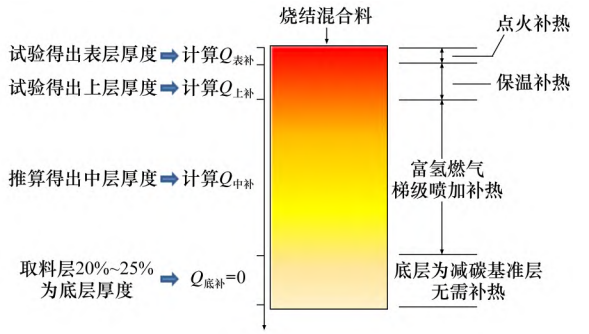


图 6 分层供热均热低碳烧结模式示意

Fig. 6 Model of low – carbon sintering with uniform heat based on layered heating

在开展实际工程设计时，需先根据对应烧结机原料条件、料层厚度等特殊条件开展烧结杯试验，根据试样结果确定各层厚度后，确定各层需要的补热量和相关补热工艺参数，从而形成适合该料种工况的分层供热均热烧结工艺制度。

2 试验效果

为验证文章提出的“分层供热均热低碳烧结”工艺方法的减碳效果，以中天钢铁 550 m^2 烧结机原料条件为研究对象，选择天然气为富氢燃气介质，基于烧结杯试验开展了极限减碳效果探索。

2.1 试验原料与方法

烧结试验原料采取中天钢铁 550 m^2 烧结机用混合料，其中铁矿石主要化学成分及烧损如表 1 所示。

项目实施过程所用烧结杯试验装置示意图如图 7 所示，主要包括：① CH_4、H_2、N_2、CO 等多组分气体的配气系统和水蒸气发生器，以模拟实际喷吹气体介质组成，并同时在莲蓬喷头上方配备煤气报警仪保证试验安全；② 规格为 Φ100 mm × 1 000 mm 的烧结杯，以模拟实际烧结生产过程，且沿杯体高度方向配置了料层测温系统，以检测烧结料层的温度变化；③ 烟气分析系统，分析烧结过程烟气 O_2、NO_x、CO_x、SO_x 等组分体积分数。

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

表 1　铁矿石主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 1　Main chemical composition and burning loss rate of iron ore　%

矿种	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	P	S	烧损
澳洲筛下粉	63.20	0.59	2.82	0.14	0.06	1.71	0.087	0.024	5.05
国王粉	57.76	0.21	5.55	0.09	0.07	1.12	0.058	0.015	9.53
巴西精矿	66.98	0.25	3.62	0.09	0.03	0.63	0.030	0.005	0.76
安徽精矿	64.38	23.37	4.46	0.70	1.26	1.18	0.048	0.560	2.17
澳洲精矿 A	64.33	26.50	8.50	0.15	0.49	0.30	0.021	0.010	0.67
巴西粉矿	57.08	0.44	12.84	0.20	0.09	0.82	0.100	0.007	3.61

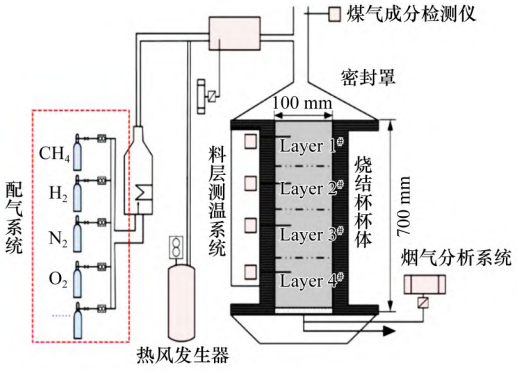


图 7　烧结杯试验装置

Fig. 7　Sintering cup test equipment

将烧结原料与固体燃料、石灰、适量水配比混匀后加入烧结杯内，料层高度为 920 mm。采用点火系统(图中未展示)从烧结杯上方点火，点火时长为 1 ~ 2 min。点火完成后将点火系统移开，将喷吹系统配置至适当高度并开始喷吹热风保温。当到达燃气喷吹时刻后，配气系统将一定比例燃气从烧结杯上方以设定速度喷出，至喷吹结束时刻停止喷吹。在此期间烟气分析系统实时采集和分析烟气成分数据。待烧结结束后，将杯中已完成的烧结矿倒出，进行相应的成品性能测试。

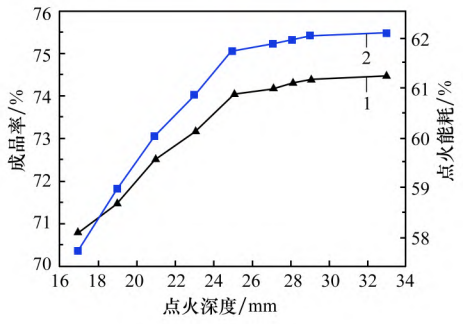
2.2　烧结杯试验分层补热工艺制度

中天钢铁总料层厚度为 920 mm，取底部 25% 即 230 mm 高度区域为底层，并将该区域所需补热量作为基准配碳量，对全料层实施配碳。

底层的配碳量即为该层所需理论补热量，故补热量 $Q_{底补}=0$。

2.2.1　表层工艺制度

烧结试验就“点火深度”(即点火阶段形成的燃烧带初始厚度)开展了系统化的烧结杯试验研究，得出了点火深度与成品率、点火能源消耗的关联关系，具体如图 8 所示。从图 8 可知：曲线在点火深度为 25 mm 时达到最优拐点，即点火深度低于 25 mm 会导致烧结成品率低下，而高于 25 mm 时，成品率提高不明显，无谓提高了点火能耗。故此，将 25 mm 定义为最优点火深度值，并将料柱从顶部 0 ~ 25 mm 的区域定义为表层，采用梯级富氧点火对该层进行减碳后的高效补热。



1—成品率；2—点火能耗。

图 8　点火深度与成品率、点火能耗的关联曲线

Fig. 8　Correlation curve between ignition depth and sinter yield, heat consumption

根据热量平衡计算，可得到 0 ~ 25 mm 的表层区域供热强度为 1.82 MJ/m³，总补热量 $Q_{表补}$ 为 28.1 MJ/m²。此外，已知补热量后，点火温度可根据牛顿传热公式计算，如式(13)。

$$Q_{表补}=(T_g-T_s)\cdot h_{con}\cdot t \tag{13}$$

式中：T_g、T_s 分别为点火温度与料层温度，℃；h_{con} 是烟气与料层之间的换热系数，W/(m²·℃)；t 是换热时间，s。经计算，点火温度为 1 172 ℃。

2.2.2　上层工艺制度

(1) 上层区域确定。通过烧结杯试验，探明了保温时间与成品率、转鼓强度、烧结速度、利用系数等参数的关联关系，具体如表 2 所示。由表 2 可知：当保温时间为 2 min 时，烧结工序的各项指标达到最优。根据垂直烧结速率，将料柱从

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

顶部25 ~ 75 mm的区域定义为上层，采用保温对该层进行减碳后的优质补热。

表2 烧结保温时间与产、质量指标关联表

Table 2 Correlation between heat preservation time and production and quality index

保温时间/min	成品率/%	转鼓强度/%	烧结速度/(mm·min^{-1})	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})
0	73.25	59.71	23.19	1.41
1.0	75.81	61.20	23.90	1.45
1.5	76.38	62.50	24.50	1.47
2.0	77.12	63.60	25.26	1.49
2.5	76.81	63.00	24.37	1.47

(2) 上层补热量与保温温度参数确定。根据热量平衡计算出25 ~ 75 mm的上层区域供热强度为1.33 MJ/m^3，总补热量$Q_{上补}$为66.3 MJ/m^2。此外，根据热平衡分析，通过保温工艺向上部料层的补热量与从料面抽吸进料层的空气携带的焓值相等，因此可以推算保温温度(空气预热温度)T_p(℃)，与补热量$Q_{上补}$之间的关系式如式(14)所示:

$$T_p = \frac{Q_{上补}}{L} \cdot \frac{U_s}{U_{air}} \cdot \frac{1}{C_{p_{air}}} \tag{14}$$

式中: L为保温区域总长，m; U_s是烧结机机速，m/s; U_{air}为被抽吸进料层的空气的自由流速，m/s; $C_{p_{air}}$是空气比热J/(kg·℃)。

推算可得保温温度为396 ℃。

2.2.3 中层工艺制度

(1) 中层区域确定。将底层230 mm(料层底部25%区域)、表层0 ~ 25 mm、上层的25 ~ 75 mm区域除去后，剩余的75 ~ 690 mm区域(该区域值仅适用于中天钢铁920 mm料层，厚度发生变化时中层区域也应相应改变)，将其定义为中层，采用燃气梯级浓度喷加后在料层内部燃烧放热的方式，对该层进行减碳后的精准补热。

根据热量平衡计算出75 ~ 690 mm的上层区域供热强度为0.52 MJ/m^3，总补热量$Q_{中补}$为257.20 MJ/m^2。此外，由于在75 ~ 690 mm区域范围内，补热量是逐渐递减的。为了使各子层内补热量差值尽可能相等，保证子区域补热量相匹配，将中层补热曲线沿y轴方向等分成9份，通过求解等分线与补热曲线交点的x轴坐标，获得分层位置。具体的，在喷吹区域起点、终点的补热量可以由式(15)、式(16)计算获得。

$$Q_{起点} = a_1 \cdot e^{-[(0.075-b_1)/c_1]^2} + a_2 \cdot e^{-[(0.075-b_2)/c_2]^2} \tag{15}$$

$$Q_{终点} = a_1 \cdot e^{-[(0.75-b_1)/c_1]^2} + a_2 \cdot e^{-[(0.75-b_2)/c_2]^2} \tag{16}$$

式中: a_1、a_2、b_1、b_2、c_1、c_2均为公式常数，由原料条件和烧结边界条件所决定，计算得到$Q_{起点}$ = 1 090 MJ/m^3，$Q_{终点}$ = 15 MJ/m^3。喷吹区域终点和起点位置的补热量差值ΔQ_t可由式(17)获得。

$$\Delta Q_t = Q_{起点} - Q_{终点} \tag{17}$$

计算得到补热量差值ΔQ_t = 1 075 MJ/m^3。将喷吹区域按等补热量差值的原则划分为9个子区域，则每个子区域终点和起点位置的补热量差值ΔQ_i可由式(18)获得。

$$\Delta Q_i = \frac{\Delta Q_t}{N=9} \tag{18}$$

计算得到子区域的补热量差值$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 = \Delta Q_3 = \Delta Q_4 = \Delta Q_5 = \Delta Q_6 = \Delta Q_7 = \Delta Q_8 = \Delta Q_9$ = 119 MJ/m^3。由此，可以计算得到子区域i终点位置对应的补热量($Q_{x1} \sim Q_{x8}$分别为971、851、732、613、493、374、254和135 MJ/m^3)。

燃气介质采用天然气，通过热平衡分析，喷吹向中层区域料层补热量等于燃料燃烧发热量，则可得天然气体积浓度计算公式:

$$C_{CH_4,i} = \frac{U_s \cdot Q_i}{L_i \cdot U_{air} \cdot \Delta H_{CH_4}} = \frac{U_s}{U_{air}} \cdot \frac{\overline{Q_i}}{\Delta H_{CH_4}} \tag{19}$$

式中: $C_{CH_4,i}$是第i个子区域内天然气体积浓度，m^3/m^3; $\overline{Q_i}$是第i个子区域内的单位长度料层所需的平均补热量，J; ΔH_{CH_4}是天然气热值，J/kg。

根据中天钢铁550 m^{2}烧结机运行参数和燃料物性参数，推算可获得9个子区域内天然气的体积浓度分别为$C_{CH_4,1}$ = 8.3‰、$C_{CH_4,2}$ = 7.5‰、$C_{CH_4,3}$ = 6.2‰、$C_{CH_4,4}$ = 5.3‰、$C_{CH_4,5}$ = 4.2‰、$C_{CH_4,6}$ = 3.4‰、$C_{CH_4,7}$ = 2.5‰、$C_{CH_4,8}$ = 1.6‰、$C_{CH_4,9}$ = 0.8‰。

2.3 分层供热工艺制度的减碳效果验证

根据以上分析，中天钢铁550 m^{2}烧结机分层供热工艺制度如图9所示。

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

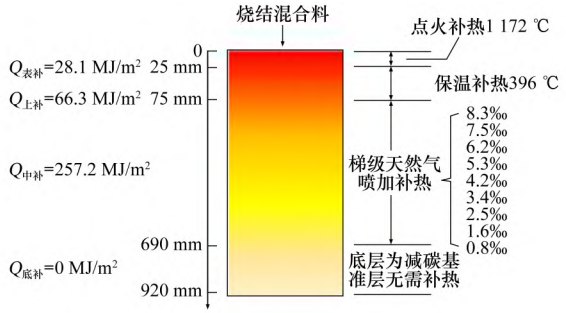


图 9　中天钢铁 550 m² 烧结机分层供热工艺制度

Fig. 9　Layered heating process system of 550 m² sintering machine of ZhongTian Steel

根据图 9 的分层供热制度，进一步通过烧结杯小试试验探明了在该制度下的烧结过程极限减碳能力，具体见表 3。

试验首先开展了水分为8. 75%、焦粉配比为4. 00%的烧结杯基准研究，随后采用分层供热均热烧结制度。由表 3 可以看出：应用新制度后，如果不降低配碳量，烧结矿质量指标反而会降低，这是因为料层局部供热过剩的原因。局部供碳量过剩，会导致固碳燃烧时间延长，从而降低烧结速率；局部供热过剩，会导致烧结矿过烧过熔，进一步降低料层透气性，从而降低产品率，同时破坏烧结矿晶体结构，降低烧结矿转鼓强度；随着配碳量降低，烧结矿指标得到提高，当配碳量为 3. 30% 时出现最高点，此时烧结矿各项指标达到最佳；继续降低配碳量至 3. 25% 时，得到的质量指标较 3. 30% 工况略微下降，但仍在基准工况质量指标之上；再进一步降低配碳量至 3. 20% 时，质量指标降低明显。

表 3　分层供热低碳富氢烧结极限减碳小试试验数据表

Table 3　Laboratory data of the minimum coke consumption by low carbon hydrogen rich sintering on layered heating

工况条件	混合料水分/%	焦粉配比/%	烧结速度/(mm·min⁻¹)	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/(t·m⁻²·h⁻¹)
基准工况	8. 75	4. 00	25. 97	71. 05	60. 79	1. 56
分层供热烧结工况	8. 75	4. 00	22. 37	65. 12	56. 92	1. 41
	8. 75	3. 80	23. 79	67. 35	57. 73	1. 48
	8. 75	3. 60	24. 68	69. 41	58. 46	1. 52
	8. 75	3. 40	25. 75	71. 29	59. 77	1. 56
	8. 75	3. 30	26. 73	72. 38	61. 35	1. 63
	8. 75	3. 25	26. 15	71. 53	60. 87	1. 58
	8. 75	3. 20	25. 45	70. 66	58. 98	1. 51

由此，针对中天钢铁 550 m² 烧结机工况，将 3. 25% 配碳量确定为新制度下的适宜配碳量，该配碳量相较基准工况的 4. 00 % 降低了 18. 75%。再结合富氢燃气喷入带来的“以氢换碳”效果，烟气 CO_2 排放总量可减少 20% 以上，减碳效果非常显著。

3　结论与展望

(1) 研究探明了烧结料层自蓄热量化特性，理清了沿料层高度方向的理论最优补热量变化规律，提出了一种四层次分层供热均热烧结方法：① 以底层 20%~25% 高度单元(不包括铺底料) 配碳量为基准实施全料层减碳；② 通过开展特殊矿种烧结杯试验确定表层与上层厚度，并推算出中层厚度；③ 根据无量纲补热量 - 料高曲线图与各层厚度推算出各层补热量；④ 结合各层补热量与各自技术手段确定各层补热工艺参数，集成整体工艺制度。

(2) 以中天钢铁 550 m² 烧结料种为研究对象，构建了其全套分层供热工艺制度：① 对表层 0 ~ 25 mm 实施点火补热，点火温度为 1 172 ℃，补热量为 28. 1 MJ/m²；② 对上层 25 ~ 75 mm 实施保温补热，保温温度为 396 ℃，补热量为 66. 3 MJ/m²；③ 对中层 75 ~ 690 mm 实施燃气梯级喷加补热，喷加浓度由 0. 83%~0. 08% 分 9 段梯级分布，总补热量为 257. 2 MJ/m²。

(3) 中天钢铁 550 m² 烧结试验条件表明：采用该供热制度后，在产、质量不变或略微提升的前提下，可实现较基准工况降碳 18. 75% 的可观减碳效果。结合富氢燃气的氢碳替代效果，工序总

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

CO_2 排放量较基准工况可降低20%以上。

(4) 未来在该技术的实际工业化应用中，根据钢厂实际情况不同，会出现如点火温度达不到制度要求、料层内水分过高导致烧结速度延慢、机旁侧部风导致罩内富氢燃气流场紊乱等问题，可视情况与富氧点火、强混—扰动低水造粒、稳流导流系列装备等技术组合使用。

参考文献:

[1] 杜学强，周继程，上官方钦，等. 基于碳素流分析铁前系统 CO_2 排放及减排措施 [J]. 烧结球团，2022，47(1)：24－28；57.
DU Xueqiang，ZHOU Jicheng，SHANGGUAN Fangqin，et al. CO_2 emission and reduction measures of pre-iron system based on carbon flow analysis [J]. Sintering and Pelletizing，2022，47(1)：24－28；57.

[2] 上官方钦，张春霞，胡长庆，等. 中国钢铁工业的 CO_2 排放估算 [J]. 中国冶金，2010，20(5)：37－42.
SHANGGUAN Fangqin，ZHANG Chunxia，HU Changqing，et al. Estimation of CO_2 emission in Chinese steel industy [J]. China Metallurgy，2010，20(5)：37－42.

[3] 上官方钦，刘正东，殷瑞钰. 钢铁行业“碳达峰”“碳中和”实施路径研究 [J]. 中国冶金，2021，31(9)：15－20.
SHANGGUAN Fangqin，LIU Zhengdong，YIN Ruiyu. Study on implementation path of “carbon peak” and “carbon neutrality” in steel industy in China [J]. China Metallurgy，2021，31(9)：15－20.

[4] 程茉莉. 钢铁企业二氧化碳减排路径分析及展望 [J]. 冶金经济与管理，2022，217(4)：18－22.
CHENG Moli. The analysis and expectation of carbon reduction path in iron and steel enterprise [J]. Metallurgical Economy and Management，2022，217(4)：18－22.

[5] 那洪明，何剑飞，袁喻兴，等. 钢铁企业不同生产流程碳排放解析 [C]//中国金属学会能源与热工分会，东北大学. 第十届全国能源与热工学术年会论文集，2019：7.
NA Hongming，HE Jianfei，YUAN Yuxing，et al. Analysis of carbon emissions from different production processes in iron and steel enterprise [C]//China Academic Journal Electronic Publishing House，Northeast University. 2019：7.

[6] 朱荣，任鑫，薛波涛. 转炉炼钢工艺极限碳排放研究进展 [J]. 钢铁，2023，58(3)：1－10.
ZHU Rong，REN Xin，XUE Botao. Research progress of ultimate carbon emission in BOF steelmaking [J]. Iron & Steel，2023，58(3)：1－10.

[7] 王志荃. 烧结工序的节能减碳技术分析 [J]. 化工管理，2021(33)：89－91.
WANG Zhiquan. Analysis of energy saving and carbon reduction technology in sintering process [J]. Chemical Enterprise Management，2021(33)：89－91.

[8] 刘臣，叶恒棣，魏进超 等. 钢铁工业炼铁工序绿色低碳技术浅析 [J]. 烧结球团，2021，46(6)：1－7；26.
LIU Chen，YE Hengdi，WEI Jinchao，et al. An analysis on green low carbon technology of ironmaking process in the steel industry [J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(6)：1－7；26.

[9] 李建军，邵雁，熊劲，等. 烧结工序节能减排技术研究综述 [J]. 烧结球团，2022，47(5)：95－101.
LI Jianjun，SHAO Yan，XIONG Jin，et al. Research review on energy saving and emission reduction technology in sintering process [J]. Sintering and Pelletizing，2022，47(5)：95－101.

[10] 李富鹏. 烧结工序能效分析与能耗预测 [D]. 唐山：华北理工大学，2021.
LI Fupeng. Energy efficiency analysis and energy consumption prediction of sintering process [D]. Tangshan：North China University of Science and Technology，2021.

[11] 李乾坤，裴元东，周晓冬，等. 超厚料层烧结料面喷吹天然气生产实践 [J]. 烧结球团，2022，47(3)：32－37.
LI Qiankun，PEI Yuandong，ZHOU Xiaodong，et al. Production practice of natural gas injection on sintering material surface of ultra-thick layer [J]. Sintering and Pelletizing，2022，47(3)：32－37.

[12] 陈绍国，张晓臣，梁洁，等. 首钢京唐公司超厚料层烧结的试验分析 [J]. 中国冶金，2023，33(3)：94－102.
CHEN Shaoguo，ZHANG Xiaochen，LIANG Jie，et al. Experimental analysis on ultra-deep bed sintering in Shougang Jingtang [J]. China Metallurgy，2023，33(3)：94－102.

[13] 叶恒棣，周浩宇，王业峰，等. 分层供热富氢烧结关键技术探索与研究 [J]. 钢铁，2021，56(12)：134－141.
YE Hengdi，ZHOU Haoyu，WANG Yefeng，et al. Exploration and research on key technologies of multi-layer heat supplying and H_2-rich sintering [J]. Iron & Steel，2021，56(12)：134－141.

(下转第58页)

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

fur dioxide during iron ore sintering [J]. Sintering and Pelletizing,2007,32(4):13 – 17.

[15] ZONG Y B,E L L,ZHANG L,et al. Emission of SO_2 from iron ore and fuel used in sintering process [C]// Proceedings of the 5th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking. Shanghai: Chinese Society of Metals,2009:533 – 536.

[16] YAN Z Q,WANG Z A,WANG X F,et al. Kinetic model for calcium sulfate decomposition at high temperature [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015(25),3490 – 3497.

[17] 唐贤容,王笃阳,张清岑. 烧结理论与工艺 [M]. 长沙:中南工业大学出版社,1992.
TANG Xianrong, WANG Duyang, ZHANG Qingcen. Sintering theory and technology [M]. Changsha: Central South University of Technology Press,1992.

[18] 臧疆文,张群,刘新娣,等. 用褐铁矿作烧结铺底料的研究 [J]. 钢铁,2002,37(5):1 – 4.
ZANG Jiangwen, ZHANG Qun, LIU Xindi, et al. Research on using limonite as sintering bedding [J]. Iron and Steel,2002,37(5):1 – 4.

[19] 朱德庆,潘建,何奥平,等. 铁矿烧结工艺中温室气体 CO_2 的排放规律 [J]. 中南大学学报:自然科学版,2005,36(6):944 – 948.
ZHU Deqing,PAN Jian,HE Aoping,et al. Emission law of greenhouse gas CO_2 in iron ore sintering process [J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition,2005,36(6):944 – 948.

[20] 潘建,朱德庆,崔瑜,等. 铁矿烧结烟气中 SO_2 的排放规律 [J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(6):1495 – 1500.
PAN Jian,ZHU Deqing,CUI Yu,et al. Emission law of SO_2 in iron ore sintering flue gas [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2011, 42(6):1495 – 1500.

(上接第50页)

[14] 叶恒棣,周浩宇,王兆才,等. 高配比富氢燃料烧结技术研究及展望 [J]. 烧结球团,2020,45(5):1 – 7.
YE Hengdi,ZHOU Haoyu,WANG Zhaocai,et al. Research and prospect of high proportion hydrogen-rich fuel sintering technology. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(5):1 – 7.

[15] 许斌. 铁矿石均热烧结基础与技术研究 [D]. 长沙:中南大学,2012.
XU Bin. Research on fundamental and technology of heat-homogenizing sintering of iron ores [D]. Changsha: Central South University,2012.

[16] PAHLEVANINEZHAD M, EMAMI MD, PANJEPOUR M. The effects of kinetic parameters on combustion characteristics in a sintering bed [J]. Energy, 2014, 73: 160 – 176.

[17] 周乐,张卫军,刘馨,等. 烧结过程能量衡算软件的编制及应用 [J]. 冶金能源,2020,39(3):33 – 37;42.
ZHOU Le,ZHANG Weijun,LIU Xin,et al. Design and application of energy efficiency evaluation software for sintering process [J]. Energy For Metallurgical Industy, 2020,39(3):33 – 37;42.

[18] HUANG X X,FAN X H,CHEN X L,et al. Optimisation model of fuel distribution in materials bed of iron ore sintering process [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2018, 46(2):1 – 7.

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