烧结点火工艺数值模拟优化和工业试验

田祥正[1]，王延江[2]，佘雪峰[1]，李晓海[2a]，王俊杰[1]，王静松[1]
（1. 北京科技大学 钢铁冶金新技术国家重点实验室，北京 100083；2. 德龙钢铁有限公司 a. 烧结厂；
b. 河北省热轧板带钢技术创新中心，河北 邢台 054009）

摘要：为提高表层烧结矿质量，改善烧结过程，降低点火能耗，本文通过数值模拟和工业试验相结合的方法，优化烧结点火工艺。采用 Fluent 软件模拟烧结点火过程，探究不同预热温度的高炉煤气和助燃空气以及不同含氧量助燃空气对点火温度的影响规律；并基于数值模拟结果，分别开展针对双预热温度、富氧浓度、低负压点火的烧结工业试验。结果表明：实施双预热点火后，当预热温度为 240 ℃时，点火温度提高到 1 192 ℃，烧结矿转鼓强度提升到 76.60%，成品率提高到 84.44%；实施富氧点火后，当助燃空气中含氧量提升到 25% 时，点火温度提高 140 ℃，煤气单耗降低 1.25 m^3/t，烟气量降低 2 882 m^3/h，转鼓强度提高到 78.44%，返矿率降低到 14.21%；实施低负压点火后，当点火负压为 8.25 kPa 时，点火煤气单耗下降 1.07 m^3/t，转鼓强度提高 1.16%，返矿率降低 3.72%。

关键词：烧结；点火；双预热；富氧；低负压
中图分类号：TF046.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－8764(2024)01－0048－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.01.007

Numerical simulation optimization and industrial test of sintering ignition process

TIAN Xiangzheng[1], WANG Yanjiang[2], SHE Xuefeng[1], LI Xiaohai[2a],
WANG Junjie[1], WANG Jingsong[1]
(1. State Key Laboratory of New Technology of Iron and Steel Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Delong Steel Co., Ltd. a. Sintering Plant; b. Hebei Hot-rolled Strip Steel Technology Innovation Center, Xingtai 054009, Hebei, China)

Abstract: In order to improve the sinter quality at surface layer, improve the sintering process and reduce the ignition energy consumption, the sintering ignition process is optimized by combining numerical simulation and industrial test. Fluent software is used to simulate the sintering ignition process, and the influence rule of blast furnace gas and combustion air with different preheating temperatures and combustion air with different oxygen content on the ignition temperature is explored. Based on the numerical simulation results, the industrial tests of sintering are carried out for double preheating temperature, oxygen-rich concentration and low negative pressure ignition. The results show that when the preheating temperature is 240 ℃ after the implementation of the double preheating ignition, the ignition temperature is increased to 1 192 ℃, the strength of the sinter drum is increased to 76.60%, and the yield is increased to 84.44%. When the oxygen content in the combustion air is increased to 25% after the implementation of oxygen-rich ignition, the ignition temperature is increased by 140 ℃, the unit gas consumption is reduced by 1.25 m^3/t, the flue gas volume is reduced by 2 882 m^3/h, the drum strength is increased to 78.44%, and the ore return radio is reduced to 14.21%. When the ignition

收稿日期：2022－12－16；**修回日期：**2023－01－04
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U1960205)
作者简介：田祥正(1999—)，男，硕士研究生，从事铁矿烧结节能降耗方面的研究。
通信作者：佘雪峰(1978—)，男，博士，教授，从事能源高效转化与链接方面的研究。

negative pressure is 8.25 kPa after the implementation of low negative pressure ignition, the unit consumption of ignition gas is decreased by 1.07 m^3/t, the drum strength is increased by 1.16%, and the ore return rate is decreased by 3.72%.

Key words: sintering; ignition; double preheating; oxygen-rich; low negative pressure

烧结点火的目的是供给混合料表层足够的热量，点燃表层中的固体燃料，使烧结过程得以进行[1]。点火工序是烧结工艺的关键环节[2]，如果点火效果不佳，表层烧结矿质量将严重降低，从而使烧结矿整体质量下降，造成返矿量增加，降低烧结机利用系数。通过优化点火效果，不仅能提高烧结矿产、质量，为后续高炉提供优质原料，还能降低烧结过程能源消耗。目前，日本最低的烧结点火能耗只有 20 MJ/t[3]，国内领先水平能低至 35 MJ/t[4]，国内很多烧结厂点火能源消耗的优化空间较大。

在优化点火过程方面，各个钢铁企业积极开展探索研究。相对于高热值的转炉煤气和混合煤气，采用高炉煤气的点火温度有限，不能满足点火要求，针对这一问题提高燃烧介质的预热温度是众多方法中较为经济可行的方法[5]。例如青钢将原来的空气单预热点火改造为空气、煤气双预热点火，点火温度提高了 150 ℃[6]。富氧点火通过提高点火助燃空气的含氧量，改善燃料燃烧条件，提高点火温度[7]。中天钢铁实施富氧点火，在氧气流量为 300 m^3/h 的富氧条件下，使炉膛温度升高 15～36 ℃，煤气流量降低 250～600 m^3/h，表层烧结矿强度提升 2.27%，内返矿配比降低 1%[8]。低负压点火技术可减少点火过程无效风量的浪费[9]，改善料层透气性，优化烧结过程。建龙钢铁采用低负压点火技术，点火高炉煤气单耗降低 7.38 m^3/t，取得可观效益[10]。因此，优化烧结点火工艺对钢铁企业节能降耗，提升烧结矿质量具有积极意义[11]。

本文利用 Fluent 数值模拟软件对点火器的点火过程进行仿真分析，通过分析不同工况下的点火温度场分布，探究双预热点火和富氧点火工艺对点火温度的影响；再根据模拟结果针对德龙钢铁厂的实际生产情况，在 230 m^2 烧结机上分别开展高炉煤气、助燃空气双预热点火，富氧点火以及低负压点火技术的工业试验，优化烧结点火工艺。

1　数学模型与工业试验

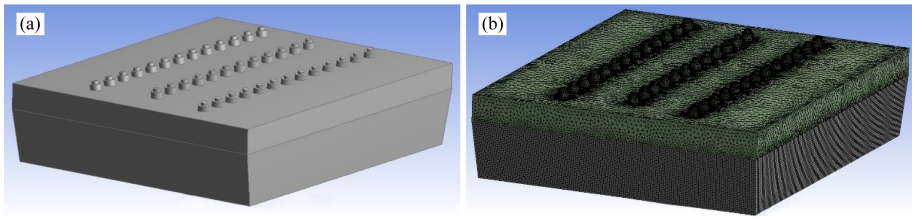
1.1　模型建立与计算

1.1.1　物理模型

根据烧结点火器设计参数，通过 Ansys DM 建模软件完成几何模型建立，得到点火器模型，如图 1(a)所示。该点火器喷嘴分为三排，数量分别为 13、12、13 个，两边分别为 80°的倾角。点火器模型网格采用 Ansys Meshing 生成，网格数 385 万，网格质量 0.85，网格质量符合要求。烧结点火器网格模型如图 1(b)所示。

1.1.2　模型假设与建立

实际烧结点火过程十分复杂，因此有必要做如下假设：① 料层为均匀多孔介质，上部为速度入口，底部为压力出口，两侧壁面为对称面(不考虑料层的收缩)；② 烧结煤气和空气在内外两个层状管道一起喷入，因此考虑其为预混燃烧模型；③ 烧结机台车水平运动速度与料层空气的速度相差两个数量级，因此将运动的料层简化为静止的料层；④ 铁矿石烧结过程包含复杂的物理化学反应，忽略次要的化学反应，只考虑决定料层内温度场的主要反应[12]；⑤ 烧结机为绝热体系，与环



(a) 物理模型；(b) 模型网格划分

图 1　烧结点火器模型

Fig. 1　Model diagram of sintered igniter

境无热交换。

基于以上模型假设，可列出描述烧结过程中包括物质之间的传热、烟气流动、化学反应等变化的控制方程，这些方程如式(1)~(4)所示。

(1) 质量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\cdot\partial\rho_g)+\frac{\partial}{\partial y}(\varepsilon\cdot\partial\rho_g\partial\cdot\mu_g)=S_i \quad (1)$$

式中：t 为时间，s；y 为纵向坐标，m；ε 为床层的孔隙率；ρ_g 为真实气体密度，kg/m^3；μ_g 为气体真实速度，m/s；S_i 为质量源相，kg/(m^3·s)。

(2) 物质输送方程：组分输运模型用于模拟混合物扩散及传输，以及组分内的化学反应过程等，其控制方程如下：

$$\frac{\partial(\rho_g Y_i)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho_g\vec{V}Y_i)=-\nabla\cdot\vec{J}_i+R_i+S_i \quad (2)$$

式中：R_i 为化学反应中组分 i 的净反应速率，mol/(m^3·s)；Y_i 为组分 i 的质量分数；V 为速度矢量，m/s；J_i 为组分 i 的扩散系数，m^2/s；S_i 为自定义源相。

(3) 动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\cdot\rho_g\cdot\mu_g)+\frac{\partial}{\partial y}(\varepsilon\cdot\rho_g\cdot\mu_g\cdot\mu_g)=\varepsilon\cdot\frac{\partial P}{\partial y}\cdot F_v \quad (3)$$

式中：P 为压力，Pa；F_v 为料层阻力造成的动量损失项，kg/(m^2·s^2)；ρ_g 为真实气体密度，kg/m^3；μ_g 为气体真实速度，m/s。

(4) 能量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\cdot\rho_g\cdot h_g)+\frac{\partial}{\partial y}(\varepsilon\cdot\rho_g\cdot h_g\cdot\mu_g)=h_{conv}\cdot A_s\cdot(T_s-T_g)+Q \quad (4)$$

式中：h_g 为气体焓，J/kg；h_{conv} 为固体对流换热系数，W/(m^2·K)；A_s 为对流换热比表面积，m^2/m^3；T_s 为固体温度，K；T_g 为气体温度，K；Q 为化学反应热，J/(m^3·s)。

在高炉煤气燃烧的过程中主要考虑到的化学反应如式(5)~(7)所示：

$$CO+1/2O_2=CO_2 \quad (5)$$

$$CH_4+2O_2=CO_2+2H_2O \quad (6)$$

$$H_2+1/2O_2=H_2O \quad (7)$$

模拟所设高炉煤气、助燃空气化学成分如表1所示。

模拟计算采用基于压力的分离式求解器，并采用二维非稳态求解算法来解决烧结过程中料层内各个变量随时间变化较大的问题；常见的湍流模型有雷诺平均NS模型、大涡模拟和直接数值模拟等，其中Fluent提供的湍流模型中 k-ε 模型及雷诺应力模型均为雷诺平均NS模型，k-ε 模型为标准、重整化和可实现三种，适用于管流、通道流和喷管内流动的计算。本文选择标准 k-ε 模型，烧结过程中发生的化学反应，使气相组分发生变化，Fluent中组分输运模型可以通过求解每个组分的对流、扩散及反应源项的控制方程，来定义化学组分的混合及传输。

表1 高炉煤气和助燃空气的化学成分(体积分数)

Table 1 Composition of blast furnace gas and combustion air %

气体名称	CO_2	CO	N_2	O_2	CH_4	H_2	H_2O
高炉煤气	21.46	29.35	47.71	0.46	0.12	0.90	—
助燃空气	—	—	77.60	21.00	—	—	1.40

1.1.3 模型计算

(1) 双预热点火。运用Fluent软件模拟烧结点火过程，通过调节入口处煤气与助燃空气的初始温度条件，分别得到常规点火以及预热200 ℃和240 ℃三种不同温度条件下的料面火焰温度分布云图，分析预热温度对点火温度的影响。

(2) 富氧点火。在Fluent数值模拟中，将助燃空气中含氧量分别提高到23%和25%，得到两种不同含氧量状态下的料面火焰温度分布云图，通过与常规点火状态下料面火焰温度分布云图进行对比，分析助燃空气中氧浓度对点火温度的影响。

1.2 工业试验

1.2.1 试验原料

在德龙钢铁厂230 m^{2}烧结机进行工业试验期，试验含铁原料的主要化学成分、物料配比如表2、3所示。表2列出了不同原料的化学成分，包括铁(TFe)、氧化钙(CaO)、二氧化硅(SiO_2)、氧化镁(MgO)、氧化铝(Al_2O_3)和水分(H_2O)的质量分数，其中返矿在混匀矿粉中的占比为18%。表3列出了混合矿、石灰石、生镁粉、白灰和焦粉的质量分数，其中自产焦粉为2.0%、外购焦粉为1.9%，用于烧结原料的配制。

表 2　烧结原料的主要化学成分(质量分数)

Table 2　Main components of sintering raw materials %

原料名称	TFe	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	H_2O
PB 粉	61.57	0.05	3.47	0.03	2.20	9.30
巴西粗粉	60.79	0.04	7.69	0.02	1.86	7.40
红泥	62.24	7.58	1.71	0.51	0.31	30.00
氧化铁皮	70.00	0.24	3.30	0.26	0.50	5.10
外购氧化铁皮	72.10	0.30	1.23	0.07	0.55	4.80
超特粉	56.77	0.04	5.74	0.05	3.29	9.80
巴西卡粉	65.60	0.12	1.88	0.05	1.20	7.40
FMG 混合粉	58.52	0.08	5.82	0.01	2.40	9.30
巴西 MUSA 粉	60.74	0.01	7.53	0.03	1.20	9.00
返矿	54.20	12.69	5.40	2.50	2.40	3.00

表 3　烧结物料配比(质量分数)

Table 3　Ratio of sintered materials　%

混合矿	石灰石	生镁粉	白灰	焦粉
78.60	6.30	4.20	7.00	3.90

1.2.2　试验方法

(1) 双预热点火。根据模拟结果，在德龙钢铁厂 230 m^2 烧结机开展工业试验。工业试验期间，保持其他生产参数条件不变，将高炉煤气和助燃空气进行预热，分别预热到 160、200、240 ℃，测量分析烧结过程参数。

(2) 富氧点火。试验期间其他生产参数条件不变。通过给助燃空气通入纯氧，改变助燃空气中含氧量进行富氧烧结，并对测量的烧结过程参数进行分析。不同条件下理论富氧率与实际富氧率如表 4 所示。由表 4 可知：不同含氧量条件下，理论富氧率与实际富氧率较为接近[8]，偏差为 0.2%~0.5%。

(3) 低负压点火。在低负压点火工业试验期间，保持其他生产条件不变，给 1~3 号风箱安装挡板，使 1~3 号风箱形成密闭空间，避免调整负压时风箱之间的窜风。通过调整点火器下 1~3 号风箱阀门开度来控制点火负压，分别将风箱开度调整为 80%、65%、60% 使点火负压控制在低于 10 kPa，点火器炉膛负压低于 10 Pa，实现负压点火，并测量烧结过程参数进行分析。

表 4　不同条件下的理论富氧率与实际富氧率的对比

Table 4　Comparison of theoretical and actual oxygen enrichment rates under different conditions

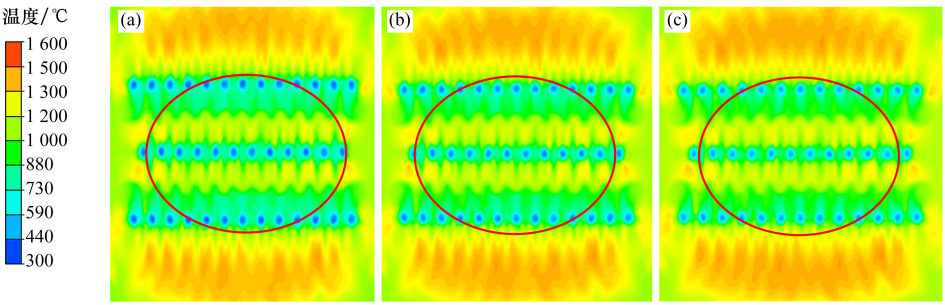
实际投入氧流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	理论富氧率/%	实际富氧率/%
0	21	21.0
148	22	21.8
300	23	22.7
454	24	23.5
614	25	25.0

2　结果与讨论

2.1　预热温度对烧结点火效果及烧结指标的影响

不同预热温度下料面火焰温度分布如图 2 所示。由从图 2 可以看出，在未预热工况下点火，料层表面低温区的温度偏低且区域偏大。当双预热温度为 200 ℃时，低温区略微变小，料层表面超过 1 100 ℃区域扩大约 3%。当双预热温度提高到 240 ℃时，对应的点火温度变化较为明显，低温区明显收窄，料层表面超过 1 100 ℃区域扩大约 5%。

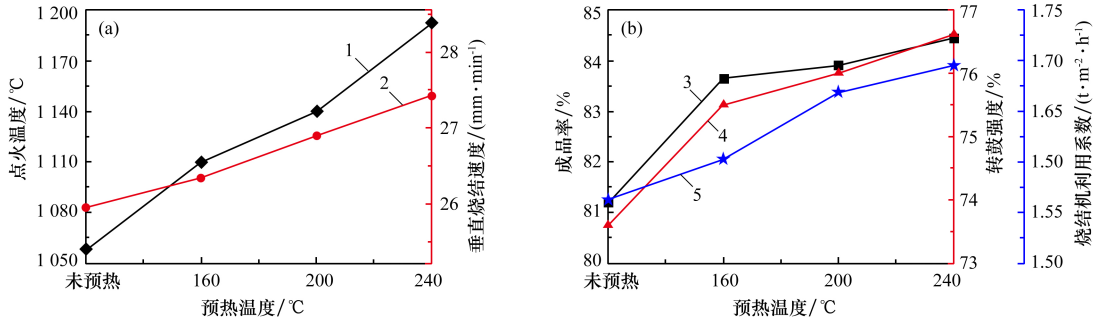
不同预热温度对点火温度和垂直烧结速度的影响如图 3(a)所示，不同预热温度对成品率、转鼓强度及烧结利用系数的影响如图 3(b)所示。



(a) 未预热；(b) 预热 200 ℃；(c) 预热 240 ℃

图 2　不同预热温度下料层表面火焰温度分布

Fig. 2　Flame temperature distribution on the surface of the feeding layer at different preheating temperatures



（a）点火温度和垂直烧结速度；（b）成品率、转鼓强度和烧结机利用系数

1—点火温度；2—垂直烧结速度；3—成品率；4—转鼓强度；5—烧结机利用系数。

图 3 不同预热温度对点火效果和烧结矿产、质量指标的影响

Fig. 3 The Influence of different preheating temperatures on the ignition effect and yield and quality indicators of sinter

由图 3(a)可以看出，随着预热温度升高，点火温度和垂直烧结速度呈上升趋势。当双预热温度为 240 ℃时，点火温度提高到 1 192 ℃，垂直烧结速度增大至 27.43 mm/min。这是因为预热温度的提高，减少了高炉煤气达到燃点需要吸收的热量，增加了点火过程中初始的物理热量，使得点火温度提高，还使得点火过程中空煤混合气体的体积分数范围变宽，改善了燃烧的初始条件，强化和稳定了点火过程[13]。同时，由于助燃空气的温度提高，烧嘴喷出的火焰速度加快，增加了火焰的出口动能，使得火焰穿透力增强，能到达料层的更深处，使高温区更深入烧结料层，料层通过点火得到的热量增加，增大了垂直烧结速度[14]。

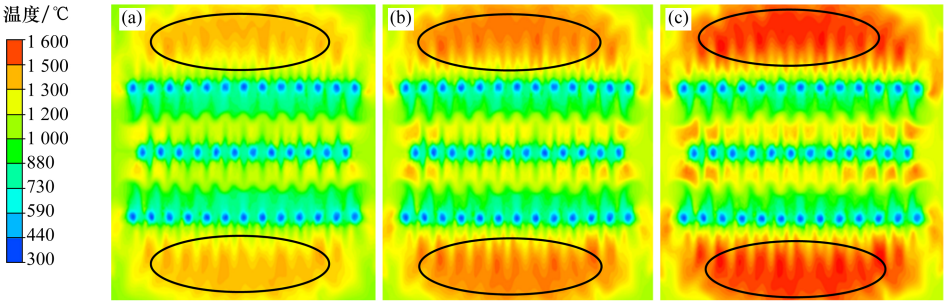
由图 3(b)可以看出，随着预热温度的增加，烧结矿转鼓强度、成品率和烧结利用系数都有提高，当双预热温度为 240 ℃时，烧结矿转鼓强度提升到 76.60%，成品率提高到 84.44%，烧结机利用系数达到 1.69 t/(m²·h)，烧结矿质量明显提升。这是因为提高预热温度，能够提高点火温度，料层表面 1 100 ℃以上的高温区域增加，表面烧结矿基本消除了黄料现象，提高了表层烧结矿质量。但是预热空气和煤气需要消耗煤气，经计算，预热温度在 200～240 ℃时，经济效益较高。

2.2 不同富氧条件对烧结点火效果及烧结指标的影响

不同含氧量条件下料层表面火焰温度分布如图 4 所示。由图 4 可以看出，随着助燃空气中含氧量的提高，料层表面温度明显提高。当助燃空气中氧体积分数提高到 23% 时，料层表面超过 1 100 ℃区域明显扩大，扩大了约 12%，当氧气体积分数提高到 25%，料层表面超过 1 100 ℃的区域进一步扩大，与常规烧结相比扩大了约 23%。这是因为助燃风中含氧量升高，煤气燃烧更充分，烧结料层表面火焰温度明显提高。

不同含氧量对点火温度、烟气量及点火煤气单耗的影响如图 5(a)所示，不同含氧量对烧结矿转鼓强度及返矿率的影响如图 5(b)所示。

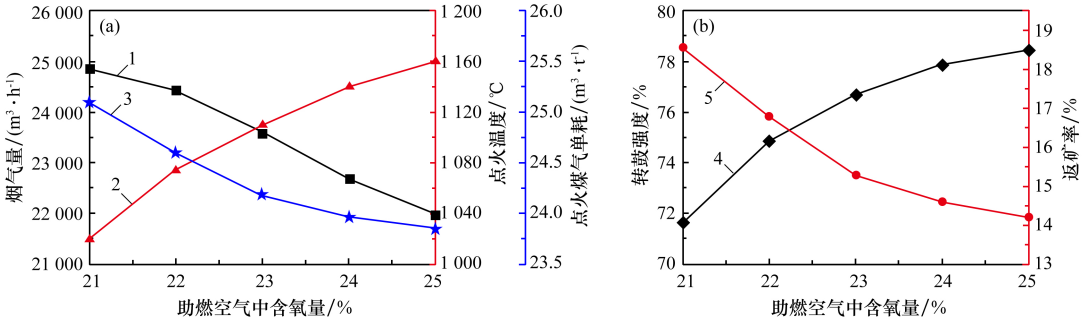
由图5(a)可以看出，随着助燃空气中含氧量



含氧量/%：（a）21；（b）23；（c）25

图 4 不同含氧量条件下料层表面火焰温度分布

Fig. 4 Flame temperature distribution on the surface of the feeding layer with different oxygen concentrations



（a）点火温度、烟气量及点火煤气单耗；（b）烧结矿转鼓强度及返矿率

1—烟气量；2—点火温度；3—点火煤气单耗；4—转鼓强度；5—返矿率。

图 5　不同含氧量对点火温度、烟气量、点火煤气单耗和烧结矿产、质量指标的影响

Fig. 5　The effect of different oxygen content on ignition temperature, smoke content, ignition gas consumption and yield and quality indicators of sinter

的提高，点火温度明显提高，提高幅度随含氧量的增加而降低；烟气量和点火煤气单耗明显下降，下降幅度随含氧量的增加而降低。当助燃空气中氧气体积分数提升到 25% 时，点火温度提高140 ℃，煤气单耗降低 1.25 m^3/t，烟气量降低 2 882 m^3/h，经计算烟气量降低使得每吨烧结矿减少热量损失 1.31 MJ，热量损失降低 11.59%。这是因为助燃风中含氧量提高，促进了点火煤气的燃烧，使煤气的燃烧效率提高，提高了点火温度，降低了点火煤气单耗。点火温度提升后，带入烧结料层的热量增加，表层混合料燃烧条件明显改善，有利于烧结过程的进行。同时，点火烟气中含氧量增加，促进了料层表面固体燃料的燃烧，优化了后续烧结过程中燃烧带的燃烧反应，减少了烧结过程中产生的烟气量。但是，含氧量过高会使点火温度太高，使表面烧结矿过熔，降低透气性，不利于烧结进行，综合考虑氧气成本，助燃空气氧气体积分数控制在 23%~25% 较佳。

由图 5(b)可以看出，实施富氧点火后，烧结矿转鼓强度明显提高，提升幅度随含氧量的提高而降低。返矿率明显下降，当氧气体积分数为 25% 时，转鼓强度提高到 78.44%，返矿率降低到 14.21%，与氧气体积分数为 21% 时相比较返矿率降低了 4.34%。返矿量的降低，能够在保证烧结矿产量的前提下降低燃料消耗量。针对德龙钢铁厂 230 m^2 烧结机实际生产数据进行计算，得到返矿率每降低 1%，每天减少烧结固体燃料用量 5.7 t。

2.3　低负压对烧结点火效果及烧结指标的影响

不同点火负压对烧结点火单耗及烧结矿质量的影响如表 5 所示。由表 5 可知，当点火负压降低到 8.25 kPa 时，点火煤气单耗下降 1.07 m^3/t，转鼓强度提高 1.16%，返矿率降低 3.72%。这是因为实施低负压点火技术后，烧结机头点火段抽风压力变小，点火煤气易聚集在料层表面，不会被抽入料层过深而导致浪费，消耗更少的煤气即可以达到同样的点火温度[15]。同时，低负压点火，能够降低烧结机头漏入的冷风量，减少了边缘效应带来的影响，提高了边缘点火效果，使得表层烧结矿质量提高。但是点火负压过低会导致点火深度过浅，点火火焰外喷造成大量热量损失，不利于煤气单耗的降低，根据生产实践，维持负压控制在 8~10 kPa 是比较适宜的范围。

表 5　点火负压对烧结点火单耗、烧结矿转鼓强度以及返矿率的影响

Table 5　Effect of ignition negative pressure on sintering ignition unit consumption, sinter bowl strength and returns out

点火负压/kPa	点火煤气单耗/(m^3·t^{-1})	转鼓强度/%	返矿率/%
13.00	24.98	75.70	17.81
10.25	24.63	76.11	16.58
8.50	24.27	76.45	15.35
8.25	23.91	76.86	14.09

3　结　论

实施双预热点火后，在双预热温度为 240 ℃ 时，点火温度提高到 1 192 ℃，垂直烧结速度增大到 27.43 mm/min，烧结矿转鼓强度提升到

76.60%，成品率提高到84.44%，烧结利用系数达到1.69 t/(m²·h)，降低固体燃料消耗0.5%以上。但是预热空气和煤气需要消耗煤气，结合德龙钢铁厂实际生产试验情况，预热温度在200～240 ℃时，经济效益较高。

实施富氧点火后，当助燃空气中氧气体积分数提升到25%时，点火温度提高140 ℃，煤气单耗降低1.25 m³/t，烟气流量下降2 882 m³/h，转鼓强度提高到78.44%，返矿率降低到14.21%，综合德龙钢铁厂实际生产情况，助燃空气氧气治理分数控制在23%～25%时取得的经济效益较佳。

实施低负压点火后，当点火负压为8.25 kPa时，点火煤气单耗下降1.07 m³/t，转鼓强度提高1.16%，返矿率降低3.72%。根据德龙钢铁厂生产实践，维持负压控制在8～10 kPa是比较适宜的范围。

参考文献：

[1] 任志国,王凤芝. 烧结点火工艺制度研究[J]. 烧结球团,1990,15(2):24－31.
REN Zhiguo, WANG Fengzhi. Research on sintering ignition process system[J]. Sintering and Pelleting, 1990,15(2):24－31.

[2] 李福东. 基于点火强度优化设定的烧结点火燃烧智能控制方法研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
LI Fudong. Research on intelligent control method of sintering ignition combustion based on ignition intensity optimization setting[D]. Changsha: Central South University,2009.

[3] 蒋大军,何木光. 降低烧结点火能耗技术进步与实践[J]. 冶金能源,2014,33(1):10－13.
JIANG Dajun, HE Muguang. Technological progress and practice of reducing energy consumption of sintering ignition[J]. Metallurgical Energy,2014,33(1):10－13.

[4] 李谦,周浩宇,刘前. 烧结点火炉工艺参数的寻优与应用[J]. 工业炉,2019,41(3):17－22.
LI Qian, ZHOU Haoyu, LIU Qian. Optimization and application of process parameters of sintered ignition furnace[J]. Industrial Furnace,2019,41(3):17－22.

[5] 陈日坤,李雪,刘晓红,等. 高炉煤气应用于烧结点火的生产实践[J]. 中国高新技术企业,2011(18):76－77.
CHEN Rikun, LI Xue, LIU Xiaohong, et al. Production practice of blast furnace gas in sintering ignition[J]. China High-tech Enterprises,2011(18):76－77.

[6] 王蒙,袁承道,葛红英. 青钢煤气、空气双预热点火系统改造[J]. 山东冶金,2012,34(5):54－55.
WANG Meng, YUAN Chengdao, GE Hongying. Renovation of Qinggang gas and air dual pre-hot spot fire system[J]. Shandong Metallurgy,2012,34(5):54－55.

[7] 沈小峰. 梅钢富氧烧结技术的研究与应用[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊),2009(10):238.
SHEN Xiaofeng. Research and application of oxygen-enriched sintering technology of Meigang[J]. Management and Technology of Small and Medium-sized Enterprises (Second Edition),2009(10):238.

[8] 张俊杰,裴元东,龙红明,等. 中天钢铁烧结富氧点火研究与应用[J]. 中国冶金,2021,31(8):54－59.
ZHANG Junjie, PEI Yuandong, LONG Hongming, et al. Research and application of sintered oxygen-enriched ignition of Zhongtian Iron and Steel[J]. China Metallurgy, 2021,31(8):54－59.

[9] 向小平,刘武杨,朱梦飞,等. 基于提质降耗的烧结工艺优化研究[J]. 烧结球团,2021,46(5):35－40.
XIANG Xiaoping, LIU Wuyang, ZHU Mengfei, et al. Research on sintering process optimization based on quality improvement and consumption reduction[J]. Sintering and Pelleting,2021,46(5):35－40.

[10] 胡锐,侯向东,王晓鸽,等. 低负压点火技术对烧结生产的影响[J]. 山西冶金,2022,45(3):11－13;87.
HU Rui, HOU Xiangdong, WANG Xiaoge, et al. Effect of low negative pressure ignition technology on sintering production[J]. Shanxi Metallurgy, 2022, 45(3): 11－13;87.

[11] 程峥明,潘文,宁文欣,等. 烧结点火制度研究与应用[J]. 烧结球团,2018,43(6):54－58.
CHENG Zhengming, PAN Wen, NING Wenxin, et al. Research and application of sintering ignition system[J]. Sintering and Pelleting,2018,43(6):54－58.

[12] 杨季鑫. 铁矿石厚料层烧结工艺的数值模拟及分析[D]. 沈阳:东北大学,2017.
YANG Jixin. Numerical simulation and analysis of sintering process of iron ore thick layer[D]. Shenyang: Northeastern University,2017.

[13] 凌子愚,孙韬琪,窦宝芬,等. 大型烧结设备余热整体利用方案[J]. 冶金能源,2007(4):49－51.

LING Ziyu, SUN Taoqi, DOU Baofen, et al. Overall utilization scheme of waste heat of large-scale sintering equipment[J]. Metallurgical Energy,2007(4):49 – 51.

[14] 夏世元,申爱民,潘玉斌,等. 热风点火技术在济钢 400 m^2 烧结机的应用[J]. 山东冶金,2013,35(1):46 – 47.
XIA Shiyuan, SHEN Aimin, PAN Yubin, et al. Application of hot air ignition technology in 400 m^2 sintering machine of Jigang[J]. Shandong Metallurgy, 2013,35(1):46 – 47.

[15] 刘京. 采用低负压点火技术提高烧结矿产质量[J]. 江西冶金,2018,38(1):18 – 20.
LIU Jing. Improving the quality of sintered minerals by using low negative pressure ignition technology[J]. Jiangxi Metallurgy,2018,38(1):18 – 20.

[16] 王炜,王珂,周长安,等. 莱钢 265 m^2 烧结机降低煤气消耗的实践[C]//2010 年全国能源环保生产技术会议文集. 九江:中国金属学会,2010:243 – 245.
WANG Wei, WANG Ke, ZHOU Changan, et al. Practice of reducing gas consumption in Laigang 265 m^2 sintering machine[C]// Proceedings of the 2010 National Conference on Energy and Environmental Protection Production Technology. Jiujiang: Chinese Society of Metals,2010:243 – 245.

(上接第 10 页)

[41] 李玉萍,李莉芬,王献科. 液膜分离富集、测定铟[J]. 上海有色金属,2001(1):29 – 33.
LI Yuping, LI Lifen, WANG Xianke. Separation and enrichment of liquid membrane and determination of indium[J]. Shanghai Nonferrous Metals,2001(1):29 – 33.

[42] 毛磊,万静,许利军,等. 用乳状液膜萃取瓦斯灰酸浸液中的铟[J]. 有色金属(冶炼部分),2009(4):23 – 25.
MAO Lei, WAN Jing, XU Lijun, et al. Extraction of indium from gas ash acid leaching solution by emulsion film[J]. Nonferrous Metals(Smelting Part),2009(4):23 – 25.

(上接第 17 页)

[9] 叶恒棣. 钢铁烧结烟气全流程减排技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2019.
YE Hengdi. Flue gas full-process emission reduction technology for sintering of iron and steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2019.

[10] 佘雪峰,薛庆国,王静松,等. 钢铁厂含锌粉尘综合利用及相关处理工艺比较[J]. 炼铁,2010(4):56 – 62.
SHE Xuefeng, XUE Qingguo, WANG Jingsong, et al. Comparasion of zinc-containing dust utilization technology in iron and steel plant[J]. Ironmaking, 2010 (4): 56 – 62.

[11] 邱伟坚. 铁合金矿粉冷压球团成球机理及固结[J]. 铁合金,2003,34(3):7 – 9.
QIU Weijian. Balling-up machanism and consolidation of cold briquetting from fine ore[J]. Ferro-alloys, 2003, 34(3):7 – 9.

[12] 甘胤,王吉坤,包崇军,等. 冷压球团技术在冶金中的研究进展[J]. 矿产综合利用,2014(1):10 – 15.
GAN Yin, WANG Jikun, BAO Chongjun, et al. Research progress of cold-pressing pelletizing technology in metallurgy[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2014(1):10 – 15.

2023 年度《烧结球团》优秀编委

《烧结球团》编委会是期刊编辑出版的学术指导机构，是期刊核心竞争力的重要组成部分，对期刊发展起着重要的支撑作用。根据 2023 年度编委对期刊的学术指导作用与支持力度，在选题策划、撰稿、组稿、审稿、学术会议等方面作出的贡献，以及编委履行" 编委会章程" 中相关的权利和义务等情况，评选出 22 位优秀编委。

2023 年度《烧结球团》优秀编委名单(按姓氏拼音排序)

陈铁军　储满生　储太山　范晓慧　甘　敏　姜　涛　蒋朝辉　李光辉　李　杰　龙红明　罗果萍
吕学伟　倪桂虎　潘　建　王跃飞　许满兴　魏进超　杨春节　张福明　张海峰　张建良　朱德庆