烧结矿铁料单耗及其对原、燃料成本的影响

郑呈祥

(阳春新钢铁有限责任公司,广东 阳春 529600)

摘 要: 烧结矿铁料单耗是直接影响烧结矿单位制造成本的关键指标。通过理论计算与回归分析研究烧结矿铁料单耗的影响因素,采取调整褐铁矿使用配比来分析烧结矿铁料单耗与烧结原、燃料成本的关系。结果表明: 烧结矿铁料单耗的影响因素主要包括混匀铁料烧损值、烧结矿碱度、烧结矿品位、烧结矿 SiO_2 质量分数、烧结矿 FeO 质量分数、烧结矿镁铝比、石灰石粉替代钙质生石灰粉占比等7项; 烧结矿铁料单耗并非越低越好,且铁料单耗最低情形下烧结原、燃料成本也并非最低,最佳的烧结矿铁料单耗要基于烧结原、燃料成本最省。

关键词: 烧结矿; 铁料单耗; 理论计算; 回归分析; 成本

中图分类号: TF046.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8764(2020)04-0012-06

doi: 10.13403/j.sjqt.2020.04.048

Research on unit iron consumption of sinter and its influence on cost of raw material and fuel

Zheng Chengxiang

(*Yangchun New Iron and Steel Co.,Ltd.,Yangchun* 529600,*Guangdong*)

Abstract The unit iron consumption of sinter is a key index directly affecting the unit manufacturing cost of sinter. The influence factors of unit iron consumption of sinter is studied based on theoretical calculation and regression analysis,and the relationship between the unit iron consumption of sinter and the cost of raw material and fuel is studied by adjusting the proportion of limonite. The results show that the influence factors of unit iron consumption of sinter mainly include the burning loss value of mixed iron material,sinter basicity,sinter grade,SiO_2 mass fraction of sinter,FeO mass fraction of sinter,magnesia alumina ratio of sinter,and the proportion of limestone powder replacing calcareous quicklime powder. In fact,the unit iron consumption of sinter is not as low as possible,the sintered raw material and fuel cost are not the lowest when the unit iron consumption is the lowest. The best unit iron consumption of sinter is based on the lowest cost of raw materials and fuel.

Key words sinter; unit iron consumption; theoretical calculation; regression analysis; cost

随着进口铁矿石价格的快速上涨,各钢铁企业都在全力降低包括烧结矿单位制造成本在内的铁前成本指标。烧结矿铁料单耗是一个直接影响烧结矿单位制造成本的关键指标[1-2],研究烧结矿铁料单耗的影响因素、铁料单耗与烧结原、燃料成本的关系具有较强的现实意义。肖扬等[3]通过开展烧结过程物料平衡分析,建立了烧结矿铁料单耗计算模型,并在此基础上探讨了铁料单耗与含铁原料烧损、烧结矿碱度、烧结矿品位及烧结矿 SiO_2 质量分数之间的关系; 此外,也有人基于质量守恒原理,推导并研究了生产吨烧结矿所需干矿耗量的影响因素[4-7]。本文在汲取前人成果的基础上,以阳春新钢铁的原料条件、工艺现状为基础,通过开展理论计算和生产数据回归分析,得出烧结矿铁料单耗的影响因子及其影响程度,并通过理论计算研究烧结矿铁料单耗与烧结矿成本之间的关系。研究成果可以用于优化烧结配矿结

收稿日期: 2019-08-21

作者简介: 郑呈祥(1983—),男,工程师,主要从事配煤配矿与烧结技术管理工作。

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

构、降低烧结矿单位成本。

1　烧结矿铁料单耗理论计算

1.1　计算方法

烧结生产使用的原料主要包括铁料、熔剂、燃料和烧结返矿，其中烧结返矿在烧结过程中为内循环，一般要做到平衡使用。烧结矿铁料单耗指的是生产单位烧结矿消耗的含铁原料量，计算公式：

$$C = 1\,000 \times C_0 / (C_0(1 - I_g) + C_1 + C_2) \quad (1)$$

式中：C 为烧结矿铁料单耗，kg/t；C_0 为铁料消耗干量，t；I_g 为铁料烧损值，%；C_1 为熔剂烧残量，t；C_2 为燃料烧残量，t。

根据阳春新钢铁生产实践，生产 1 t 烧结矿一般需要消耗 100 ~ 130 kg 熔剂、46 ~ 60 kg 固体燃料，而铁料则一般需要消耗 910 ~ 950 kg。从数量级上分析：铁料烧损值(I_g)对烧结矿铁料单耗影响最大，C_1 影响次之，C_2 影响最小。阳春新钢铁自 2018 年开始实施 900 mm 厚料层烧结以来，不断强化“低水低碳、厚铺慢转”工艺方针的执行，不断提高年度长协矿的供给量、稳定烧结配矿结构，烧结固体燃料消耗已实现 48 ~ 52 kg/t 的窄范围稳定控制。故研究方案中不考虑因褐铁矿配比增加、烧结矿碱度降低等因素造成的燃料用量增加的情形，即将 C_2 视为常数。

分别从两个方向展开理论计算：①固定烧结矿 SiO_2 质量分数、烧结矿碱度(R_2)与烧结熔剂结构，使 C_1 成为常数，在变动铁料烧损值(I_g)的过程中，研究 C 与 I_g 的关系；②固定褐铁矿配比为 30%，使 I_g 成为常数，在分别变动烧结矿 SiO_2 质量分数、烧结矿碱度(R_2)和烧结矿镁铝比的过程中，研究 C 与 C_1 的关系。

1.2　铁料烧损值与铁料单耗关系

以阳春新钢铁 2019 年 6 月进厂的 3 种铁矿粉化学组成作为测算基准(表 1)，在固定熔剂结构及消耗的条件下，即钙质熔剂全部使用钙质生石灰粉、轻烧白云石粉的小时消耗量固定为 2 t/h，研究铁料烧损值与铁料单耗关系。

表 1　3 种主要铁矿粉的化学成分(质量分数)　%

矿粉名称	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	烧损
巴西 BRBF 粉(赤铁矿)	62.30	4.73	0.08	0.04	1.51	3.41
FMG 混合粉(褐铁矿)	57.92	5.35	0.05	0.04	2.56	8.05
伊朗粉(磁铁矿)	58.20	5.88	2.24	2.70	1.62	2.20

FMG 混合粉的配比由 5% 逐步提高至 45%，通过调整巴西 BRBF 粉与伊朗粉的使用配比，保持烧结矿 SiO_2 质量分数 = 4.70%、碱度 = 1.95，并固定烧结熔剂结构，确保烧结熔剂消耗量维持不变。理论计算结果显示：在混匀铁料烧损值从 2.418% 逐步升高至 4.496% 过程中，烧结矿铁料单耗由 929.80 kg/t 逐步升高至 944.82 kg/t(表 2)，铁料单耗呈现线性正增长。推导出二者关系(图 1)：

$$\Delta C = 4.204 \times \Delta I_g - 1.708 \quad (2)$$

式中：ΔC 为铁料单耗变化值，kg/t；ΔI_g 为混匀铁料烧损变化值，%。

1.3　铁料烧损固定情形下铁料单耗的影响因子

在固定烧结配比结构：36% 磁铁矿粉(含伊朗粉、国内磁铁精粉等) + 25% 巴西 BRBF 粉 + 30% FMG 混合粉情形下，混匀铁料烧损值为 3.70%，分别研究烧结矿 SiO_2 质量分数、烧结矿碱度(R_2)和烧结矿镁铝比($w(MgO)/w(Al_2O_3)$)与烧结矿铁料单耗的关系。

1.3.1　烧结矿 SiO_2 质量分数

保持 FMG 混合粉配比为 30%、烧结矿碱度 R_2 = 1.90 情形下，通过调整巴西 BRBF 粉与伊朗粉配比，在烧结矿 SiO_2 质量分数从 4.70% 逐步升高至 5.20% 过程中，烧结矿铁料单耗由 940.96 kg/t 逐步降低至 935.13 kg/t，烧结矿铁料单耗与烧结矿 SiO_2 质量分数呈线性负相关关系(图 2)：

$$\Delta C = -1.587 \times \Delta Si + 0.820 \quad (3)$$

式中：ΔC 为铁料单耗变化值，kg/t；ΔSi 为烧结矿 SiO_2 质量分数变化值，%。

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

表 2 混匀铁料烧损值与烧结矿铁料单耗的对应关系

方案	5% 褐铁矿	15% 褐铁矿	25% 褐铁矿	35% 褐铁矿	45% 褐铁矿
I_g/%	2.418	2.846	3.310	3.870	4.496
磁铁矿占比/%	46	43	41	36	26
赤铁矿占比/%	40	33	25	20	20
C/(kg·t^{-1})	929.80	932.32	936.36	940.89	944.82
烧结矿 TFe/%	57.57	57.55	57.54	57.52	57.71
烧结矿 SiO_2/%	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70
烧结矿碱度 R_2	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95
烧结矿 MgO/%	1.74	1.65	1.60	1.52	1.23
烧结矿 CaO/%	9.16	9.18	9.18	9.18	9.17
烧结矿 Al_2O_3/%	1.60	1.70	1.78	1.86	1.96
ΔI_g/%	—	0.428	0.892	1.453	2.078
ΔC/(kg·t^{-1})	—	2.52	6.57	11.10	15.03

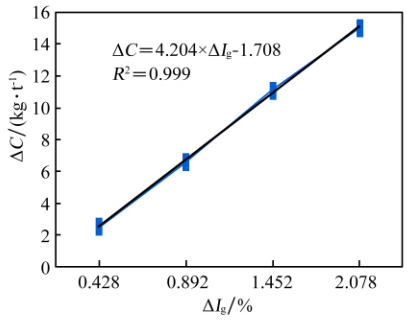


图 1 I_g 与 ΔC 的关系

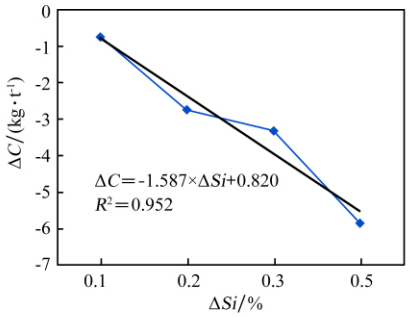


图 2 烧结矿 SiO_2 质量分数与烧结矿铁料单耗的关系

1.3.2 烧结矿碱度

通过伊朗粉和国内磁铁精粉配比搭配，在固定烧结矿 $w(SiO_2)=4.90\%$、镁铝比 $(w(MgO)/w(Al_2O_3))=0.8$，烧结矿碱度 R_2 从 1.8 递增至 2 的过程中，烧结矿铁料单耗从 942.99 kg/t 逐步降低至 933.44 kg/t，烧结矿铁料单耗与烧结矿碱度呈线性负相关关系(图 3)：

$$\Delta C = -2.412 \times \Delta R_2 - 0.052 \quad (4)$$

式中：ΔC 为铁料单耗变化值，kg/t；ΔR_2 为烧结矿碱度变化值。

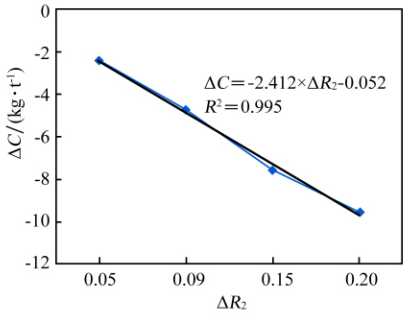


图 3 烧结矿碱度与烧结矿铁料单耗的关系

1.3.3 烧结矿镁铝比

通过伊朗粉和国内磁铁精粉配比搭配，固定烧结矿 $w(SiO_2)=4.80\%$、$w(Al_2O_3)=1.85\%$，保持烧结矿碱度 $R_2=1.95$ 情形下，烧结矿镁铝比($w(MgO)/w(Al_2O_3)$)由 0.81 逐步提高至 1.21 过程中，烧结矿铁料单耗从 938.17 kg/t 逐步降低至 930.22 kg/t，烧结矿铁料单耗与烧结矿镁铝比呈线性负相关关系(图 4)：

$$\Delta C = -2.004 \times \Delta M/A + 0.180 \quad (5)$$

式中：ΔC 为铁料单耗变化值，kg/t；$\Delta M/A$ 为烧结矿镁铝比($w(MgO)/w(Al_2O_3)$)变化值。

1.4 铁料单耗影响因子比较

通过比较式(2)～(5)可以得出烧结矿铁料单耗的影响因子及其影响程度顺序：混匀铁料烧损值(正相关)＞烧结矿碱度(负相关)＞烧结

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

矿镁铝比(负相关) > 烧结矿 SiO_2 质量分数(负相关)。

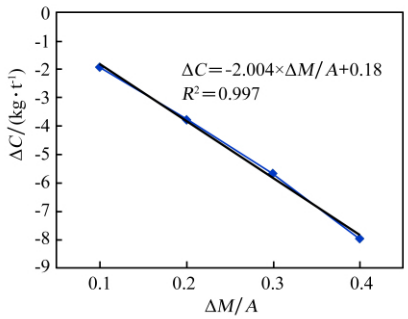


图 4　烧结矿镁铝比与烧结矿铁料单耗的关系

2　烧结矿铁料单耗回归分析

2.1　回归分析

以阳春新钢铁 2017 ~ 2019 年共 33 组烧结月生产数据作为回归分析样本，烧结矿铁料单耗作为因变量，混匀铁料烧损、烧结矿品位、烧结矿 FeO 质量分数、烧结矿 SiO_2 质量分数、烧结矿镁铝比($w(MgO)/w_2O_3$))、烧结矿碱度、石灰石粉替代钙质生石灰粉占比 7 个因子作为自变量，开展多元回归分析，得出回归方程:

$$\begin{aligned} Y = {} & 20\ 323 - 637X_1 + 5.61X_1^2 + 184X_2 \\ & - 17.2X_2^2 - 1\ 976X_3 + 526X_3^2 - 70.2X_4 \\ & + 26X_4^2 - 63.3X_5 + 8.64X_5^2 + 11.72X_6 \\ & - 0.662X_6^2 + 1.149X_7 - 0.030\ 97X_7^2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: Y 为烧结矿铁料单耗，kg/t; X_1 为烧结矿品位,%; X_2 为烧结矿 SiO_2 质量分数,%; X_3 为烧结矿碱度; X_4 为烧结矿铝镁比($w(MgO)/w(Al_2O_3)$); X_5 为混匀铁料烧损值,%; X_6 为烧结矿 FeO 质量分数,%; X_7 为石灰石粉替代钙质生石灰粉占比,%。

该回归方程的决定系数 $R_2 = 0.896\ 4$，回归方程有意义。通过回归分析，得到烧结矿铁料单耗影响因子的影响程度顺序: 石灰石粉替代钙质生石灰粉占比 > 混匀铁料烧损值 > 烧结矿碱度 > 烧结矿镁铝比 > 烧结矿品位 > 烧结矿 FeO 质量分数 > 烧结矿 SiO_2 质量分数，具体取值如表 3 所示。

2.2　回归分析与理论研究比较

从理论计算角度分析烧结矿铁料单耗影响因素，存在局限性: ①计算样本量相对较少; ②需要通过固定若干影响因子后，开展一对一相关性分析; ③烧结矿品位和 FeO 质量分数等对烧结矿铁料单耗的影响难以通过理论计算得出。而通过开展多元回归分析，拟合回归方程，可充分揭示烧结矿铁料单耗的影响因素及其影响程度。通过理论计算与回归分析两种方式，都可得出烧结矿铁料单耗影响因子的影响程度顺序: 混匀铁料烧损值 > 烧结矿碱度 > 烧结矿镁铝比 > 烧结矿 SiO_2 质量分数。

表 3　铁料单耗变量因子影响程度排序

项目	影响效应值
石灰石粉替代钙质生石灰粉占比	3.395
混匀铁料烧损值	3.386
烧结矿碱度	2.530
烧结矿镁铝比	2.125
烧结矿品位	2.120
烧结矿 FeO 质量分数	1.866
烧结矿 SiO_2 质量分数	1.475

注: 影响效应值是由于自变量因素引起的差别对观测变量影响显著性的大小。

3　烧结矿铁料单耗与烧结成本的关系

通过上述研究，混匀铁料的烧损值是烧结矿铁料单耗的显著影响因子，而一般混匀铁料的烧损值的高低与褐铁矿的使用配比直接相关，故从烧结配矿中褐铁矿配比变化时烧结矿原、燃料成本对应的变化趋势着手，研究烧结矿铁料单耗与烧结矿成本的关系。

3.1　同一时点铁矿石价格

为科学比较配矿成本，需要采用同一时点铁矿石价格作为测算基准，本文选取 2019 年 6 月 1 ~ 25 日铁矿石普氏 62 指数累计值(107.84 美元)作为测算基准，几种矿石价格如表 4 所示。

3.2　铁料单耗与配矿成本关系

实践生产中，并非矿石价格越低越合算，有害元素超标的含铁原料，再便宜也不能使用[8]。在满足烧结矿碱金属 $K_2O + Na_2O$ 质量分

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

表4 铁矿石价格取值

矿种	TFe(质量分数)/%	到岸价/(美元·t^{-1})	到厂价/(元·t^{-1})
伊朗精粉	66.3	118.81	871.48
巴西混合粉 BRBF	62.3	111.79	868.00
伊朗粉	58.2	105.67	780.69
FMG 混合粉	57.9	96.62	761.88

数不超0.12%、Zn质量分数不超0.02%前提下，按表4所述的铁矿石价格，分别固定巴西BRBF粉配比为20%、25%、30%，合理搭配使用伊朗精粉、伊朗粉等非主流矿粉，从理论上计算FMG混合粉配比由5%逐步提高至40%过程中烧结原、燃料成本变化。理论计算结果显示：同一时点的铁矿石价格，FMG混合粉配比为15%、烧结矿铁料单耗为935 kg/t对应的烧结矿原、燃料成本最低，如表5~7所示。理论计算过程中，考虑褐铁矿配比提高将导致烧结固体燃料消耗增加，参考宝钢的生产实践数据[9]：高褐铁矿烧结，褐铁矿配比上升1%，固体燃料消耗将上升0.12 kg/t，通过采取技术措施和强化生产管理，上升幅度可以控制在0.04 kg/t以内。

通过表5~7中数据可以看出：①褐铁矿FMG混合粉配比由5%提高至40%过程中，烧结矿铁料单耗理论上将由931 kg/t升高至945 kg/t，铁矿石整体成本呈现下降趋势，但包括矿石成本、熔剂成本和固体燃料成本却呈现升高趋势，主要原因是烧结矿SiO_2质量分数升高导致熔剂成本升高，褐铁矿配比增加导致固体燃料成本增加，且二者增加的成本要高于铁矿石成本的下降；②分别固定巴西BRBF粉配比为20%、25%、30% 3种情形下，测算结果都显示当褐铁矿FMG混合粉配比为15%、铁料单耗为935 kg/t时，烧结原、燃料成本最省。

表5 巴西BRBF粉配比为20%情形下配矿成本与铁料单耗

FMG混合粉配比/%	巴西BRBF粉配比/%	磁铁矿配比/%	铁料单耗/(kg·t^{-1})	原、燃料成本/(元·t^{-1})	矿石成本/(元·t^{-1})	熔剂成本/(元·t^{-1})	固体燃料成本/(元·t^{-1})	铁料综合烧损值/%	烧结矿w(TFe)/%	烧结矿$w(SiO_2)$/%	烧结矿R_2
5	40	46	931.33	879.54	770.85	43.84	64.85	2.44	57.56	4.71	1.95
15	30	46	934.87	874.67	765.56	44.01	65.10	2.85	57.51	4.71	1.95
15	20	56	934.53	868.27	760.09	43.11	65.07	2.62	57.40	4.71	1.95
20	20	51	936.43	869.24	760.16	43.64	65.44	2.94	57.45	4.71	1.95
25	20	46	938.37	870.04	760.17	44.17	65.70	3.25	57.44	4.71	1.95
30	20	41	940.28	871.19	760.41	44.71	66.07	3.56	57.52	4.71	1.95
35	20	36	943.08	869.09	757.08	45.51	66.50	4.02	57.26	4.90	1.90
40	20	31	944.65	869.88	756.76	46.26	66.85	4.33	57.28	4.91	1.90

表6 巴西BRBF粉配比为25%情形下配矿成本与铁料单耗

FMG混合粉配比/%	巴西BRBF粉配比/%	磁铁矿配比/%	铁料单耗/(kg·t^{-1})	原、燃料成本/(元·t^{-1})	矿石成本/(元·t^{-1})	熔剂成本/(元·t^{-1})	固体燃料成本/(元·t^{-1})	铁料综合烧损值/%	烧结矿w(TFe)/%	烧结矿$w(SiO_2)$/%	烧结矿R_2
5	40	46	931.48	880.31	771.82	43.63	64.86	2.41	57.64	4.68	1.95
15	30	46	935.03	875.44	766.54	43.80	65.11	2.82	57.59	4.68	1.95
15	25	51	934.88	872.05	763.61	43.35	65.10	2.71	57.50	4.68	1.95
20	25	46	936.77	873.07	763.85	43.88	65.35	3.02	57.57	4.68	1.95
25	25	41	938.71	874.04	764.03	44.41	65.60	3.33	57.60	4.68	1.95
30	25	36	940.76	875.21	764.48	44.87	65.86	3.64	57.69	4.68	1.95
35	25	31	943.21	872.25	760.01	45.97	66.27	4.12	57.33	4.89	1.90
40	25	26	945.55	873.56	760.58	46.31	66.68	4.43	57.40	4.90	1.90

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

表 7　巴西 BRBF 粉配比为 30% 情形下配矿成本与铁料单耗

FMG 混合粉配比/%	巴西 BRBF 粉配比/%	磁铁矿配比/%	铁料单耗/(kg·t^{-1})	原、燃料成本/(元·t^{-1})	矿石成本/(元·t^{-1})	熔剂成本/(元·t^{-1})	固体燃料成本/(元·t^{-1})	铁料综合烧损值/%	烧结矿 w(TFe)/%	烧结矿 w(SiO_2)/%	烧结矿 R_2
5	40	46	931.75	880.77	772.47	43.42	64.88	2.40	57.69	4.66	1.95
15	30	46	935.30	875.90	767.18	43.59	65.12	2.80	57.64	4.66	1.95
20	30	41	937.19	876.92	767.43	44.12	65.38	3.11	57.71	4.66	1.95
25	30	36	939.48	878.22	768.00	44.45	65.77	3.42	57.75	4.66	1.95
30	30	31	941.38	879.37	768.24	44.99	66.14	3.73	57.83	4.66	1.95
35	30	26	944.22	877.16	764.78	45.79	66.58	4.19	57.60	4.85	1.90
40	30	21	946.15	878.44	765.02	46.34	67.08	4.50	57.61	4.86	1.90

故即便在 2019 年上半年铁矿石价格大幅上涨的背景下，烧结矿铁料单耗也并不是越低越好，且铁料单耗最低情形下烧结原、燃料成本也并非最低，最佳的烧结矿铁料单耗要基于烧结原、燃料成本最省。

4　结　论

(1) 烧结矿铁料单耗的影响因子及其影响程度顺序：石灰石粉替代钙质生石灰粉占比 > 混匀铁料烧损 > 烧结矿碱度 > 烧结矿镁铝比 > 烧结矿品位 > 烧结矿 FeO 质量分数 > 烧结矿 SiO_2 质量分数。

(2) 从理论计算角度分析烧结矿铁料单耗影响因素，存在局限性；开展多元回归分析，拟合回归方程，可以充分揭示烧结矿铁料单耗的影响因素及其影响程度。

(3) 即便在 2019 年上半年铁矿石价格大幅上涨的背景下，烧结矿铁料单耗也并不是越低越好，且铁料单耗最低情形下烧结原、燃料成本也并非最低，最佳的烧结矿铁料单耗要基于烧结原、燃料成本最省。

参考文献

[1] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社,2008.

[2] 那树人. 炼铁计算辨析[M]. 北京: 冶金工业出版社,2007.

[3] 肖扬,范维国,李军. 烧结生产含铁原料消耗简析[J]. 烧结球团,2012,37(4):18-20.

[4] 杨东进. 用 Excel 建立烧结矿配料计算表[J]. 山东冶金,2000,22(3):30-32.

[5] 吕学伟,白晨光,邱贵宝. 三种优化烧结配料方法的比较[J]. 烧结球团,2006,31(2):11-15.

[6] 杨润泉. 对返矿参加配料计算及其影响的探讨[J]. 烧结球团,1989,14(2):40-43.

[7] 石红燕,陈伟,梁栋,等. 烧结用料矿耗量理论计算机影响因素辨析[J]. 山东冶金,2012,34(6):33-35.

[8] 安波,岳强,柯显峰,等. 新冶钢 265 m^2 烧结机低成本生产实践[J]. 烧结球团,2013,38(1):22-23.

[9] 朱仁良. 宝钢高褐铁矿配比烧结的生产实践与分析[C]//第十届全国炼铁原料学术会议. 贵阳: 中国金属学会,2007.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费，对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明。

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