铁矿石同化性能试验研究与配矿优化

马 辉[1]，秦华伟[2]
(1. 安钢集团有限责任公司，河南 安阳 455000；2. 濮阳源泰高科技冶金材料有限公司，河南 濮阳 457500)

摘要： 本文以安钢常用铁矿石为研究对象，利用偏光显微镜和矿石高温基础特性测定仪研究了铁矿石的原矿矿相结构和同化性能，从矿相结构和化学成分分析了影响铁矿石同化性能的因素，并进行了烧结配矿优化。结果表明：铁矿石同化性与铁矿石矿相结构密切相关；铁矿石同化性能与其烧损值呈正相关，烧损越大，其同化性能越好；铁矿石中 SiO_2 质量分数越高，铁矿石同化温度越低，同化性能越好；当铁矿石中 MgO 的质量分数较高时会恶化铁矿石同化性能；Al_2O_3 质量分数对矿石同化性的影响因矿石类型而不同。经过配矿优化后，混合矿同化温度调整至适宜的同化区间内，烧结成品率和转鼓强度分别提高 1.33% 和 1.98%，烧结矿冶金性能指标变优。

关键词： 铁矿石；同化性能；矿相结构；烧损；配矿优化
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2022)05－0013－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.05.065

Experimental research on assimilation performance of iron ore and ore matching optimization

MA Hui[1], QIN Huawei[2]
(1. *Angang Iron & Steel Group Co., Ltd., Anyang* 455000, *Henan, China*; 2. *Puyang Yuantai High-tech Metallurgical Materials Co., Ltd., Puyang* 457500, *Henan, China*)

Abstract: Taking the iron ore commonly used in Angang as the research object, the ore phase structure and assimilation performance of iron ore are studied by polarizing microscope and basic characteristic measuring instrument of iron ore under high-temperature. The factors affecting the assimilation performance of iron ore are analyzed from the ore phase structure and chemical composition, and the sintering ore matching optimization is carried out. The results show that the assimilation of iron ore is closely related to the its ore phase structure; the assimilation performance of iron ore is positively related to its burning loss value, the greater the burning loss, the better the assimilation performance. In the iron ore, the higher the mass fraction of SiO_2, the lower the assimilation temperature and the better the assimilation performance of the iron ore. When the mass fraction of MgO in the iron ore is high, the iron ore assimilation performance will be deteriorated. The effect of Al_2O_3 mass fraction on iron ore assimilation varies by ore type. After the ore matching optimization, the assimilation temperature of the mixed ore is within the appropriate assimilation range, the sintering yield and the drum strength are increased by 1.33% and 1.98%, respectively, and the metallurgical performance indicators of the sinter are improved.

Key words: iron ore; assimilation performance; ore phase structure; burning loss; ore matching optimization

安钢烧结生产所用铁矿石以进口国外矿粉为主，搭配部分国内精矿，其过去烧结配矿主要采用的以铁矿石化学成分、粒度组成为依据的传统自主优化配矿，缺少铁矿石高温基础性能的研究和指导[1-2]，配矿科学性差、盲目性大。铁矿石同化性是铁矿石高温性能之一，表征的是铁矿石在烧结生产过程中与 CaO 的反应能力[3]，它能贴切、真实地反映铁矿石烧结过

收稿日期： 2021－08－19；**修回日期：** 2021－09－15
作者简介： 马 辉(1976—)，男，高级工程师，从事炼铁新工艺、新技术方面的研究。
通信作者： 秦华伟(1987—)，男，工程师，从事铁矿石基础性能方面的研究。

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

程中的行为和作用，有助于深化对烧结矿固结机理的认识以及对铁矿石自身性质的整体评价，从而可为烧结配矿的优化提供科学支撑[4-5]。

铁矿石同化性以其最低同化温度表示，同化性越好说明其同化温度越低，在烧结过程当中越容易产生液相，但是对于核矿石的粗粒矿石同化性能过好会导致其固结骨架作用减弱，从而使得烧结层透气性恶化，影响烧结矿的产、质量，因此铁矿石的同化温度要有适宜的温度区间[6]。安钢技术人员依据烧结理论和自身配矿结构的实际情况，经过对近几年的统计、测算与探索得出混匀矿适宜的综合同化温度区间为1 250～1 280 ℃[7]。

前人对铁矿石同化性做了大量的研究：吴胜利等[8-9]较早地在国内提出了铁矿石同化性的概念并通过大量的研究，提出了铁矿石同化性的评价标准和同化性互补理论；张建良等[10]从化学成分的角度评价了影响铁矿石同化性的因素并做了相应的机理分析；薛芳等[11]分析了铁矿石矿物赋存状态结构对同化性的影响，结果表明豆状结构的晶体形貌有利于促进铁矿石同化性；王艺慈等[12]通过研究发现铁矿石同化性与其中F、K和Na也有一定的关系。为了在生产中更好地指导安钢烧结配矿，本文在总结了前人研究的基础上，针对安钢常用典型铁矿石进行了原矿矿相分析与同化性试验研究，以期多角度探索影响铁矿石同化性能的因素。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验所用铁矿石取自钢厂原料场，主要化学成分见表1，其中I矿和J矿为精矿粉，其它为粉矿。

表1 铁矿石主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of iron ore %

铁矿石	TFe	FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	LG(烧损)
A矿(褐铁矿)	57.31	4.85	0.20	6.33	0.20	1.62	11.05
B矿(褐铁矿)	57.41	3.95	0.22	5.46	0.64	1.81	10.17
C矿(半赤半褐)	60.78	3.71	0.09	4.31	0.08	1.97	4.55
D矿(半赤半褐)	58.74	0.91	0.20	5.16	0.10	2.61	4.01
E矿(半赤半褐)	61.56	4.85	0.23	6.22	0.38	1.03	3.05
F矿(赤铁矿)	63.04	0.11	0.12	6.50	0.14	1.57	0.60
G矿(赤铁矿)	65.04	1.02	0.20	1.24	0.20	1.04	0.33
H矿(赤铁矿)	56.21	1.33	0.20	6.61	0.20	4.89	0.89
I矿(磁铁矿)	63.70	23.97	0.54	0.98	5.37	1.91	-2.50
J矿(镜铁矿)	64.29	0.36	0.21	4.93	0.80	0.75	0.77

注：半赤半褐指的是矿物主要成分为赤铁矿与褐铁矿。

由表1可知，G矿品位最高，F矿、I矿、J矿品位次之；I矿的的FeO质量分数较高；A矿、E矿、F矿和H矿的SiO_2质量分数较高，均大于6%，而G矿和I矿较低；G矿的Al_2O_3、I矿的MgO质量分数较高；A矿和B矿烧损都在10%以上，C矿、D矿和E矿都有烧损，I矿表现为烧增。10种铁矿石化学成分和烧损差别大，基本涵盖了安钢生产使用的典型矿种，这也更有利于本文多角度研究铁矿石的同化性。

1.2 矿相试验方法

矿相试验主要分为制样、矿相观察和矿物测定3个过程。首先将矿样用环氧树脂胶固结，然后将固结好的试样在磨片机的铁盘上经粗磨、中磨和细磨3道磨制，磨样介质分别用120#～150#、400#～500#、800#～1 000#金刚砂，磨制后在抛光机上进行抛光，制成光片，最后在偏光显微镜(Axioskop A1 pol)下进行矿相结构的分析，并采用Image-Proplus 6.0进行矿物面积

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

百分比测定[13-14]。

1.3　同化性试验方法

本文将不同铁矿石样品破碎并筛分至 0.154 mm 以下作为同化试验试样，并选用 CaO 分析纯为熔剂。首先将 CaO 熔剂和铁矿石试样分别压制成∅20 mm 和∅8 mm 的圆饼(制样时 CaO 为 2.5 g 大饼，铁矿粉为 0.8 g 小饼)，并在 10 MPa 压力下保持 2 min，然后将矿粉小饼置于 CaO 大饼之上，放入 TSJ-3 型矿石高温基础特性测定仪试验装置中，在表 2 的试验条件下焙烧，测定不同铁矿石小饼与 CaO 大饼接触面上生成略大于铁矿粉小饼一圈的反应物时的温度，由此评价不同铁矿石的同化性。

表 2　试验气氛和温度控制条件

Table 2　Control conditions of test atmosphere and temperature

温度/℃	室温～600	600～1 000	1 000～1 150	1 150～1 250	1 250	1 250～1 150	1 150～1 000	1 000～室温
时间/min	4.0	1.0	1.5	1.0	4.0	2.0	1.5	—
气氛/(5 L·min^{-1})	空气							

2　结果与分析

2.1　同化性试验

按照试验要求测定的 10 种铁矿石的同化温度如图 1 所示。

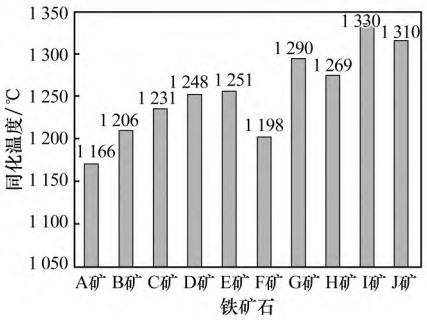


图 1　铁矿石的同化性温度

Fig. 1　Assimilative temperature of iron ore

由图 1 可知，铁矿石的同化温度由低到高的顺序为 A 矿＜F 矿＜B 矿＜C 矿＜E 矿＜D 矿＜H 矿＜G 矿＜J 矿＜I 矿。A 矿、F 矿同化温度较低，不到 1 200 ℃，同化性过好；F 矿、B 矿、C 矿、D 矿同化性适中，同化温度在 1 200～1 250 ℃之间；G 矿、H 矿同化性能较差，I 矿、J 矿同化温度在 1 310 ℃以上，同化性很差。

2.2　矿相试验

不同的矿石类型其矿物组成和矿相结果差别较大，矿相试验选取了不同的矿石类型，分别对 A 矿(褐铁矿)、E 矿(半赤半褐)、F 矿(赤铁矿)、I 矿(磁铁矿)和 J 矿(镜铁矿)进行矿相研究，矿物组成见表 3，矿相结构见图 2。

表 3　铁矿石矿物组成(面积百分数)

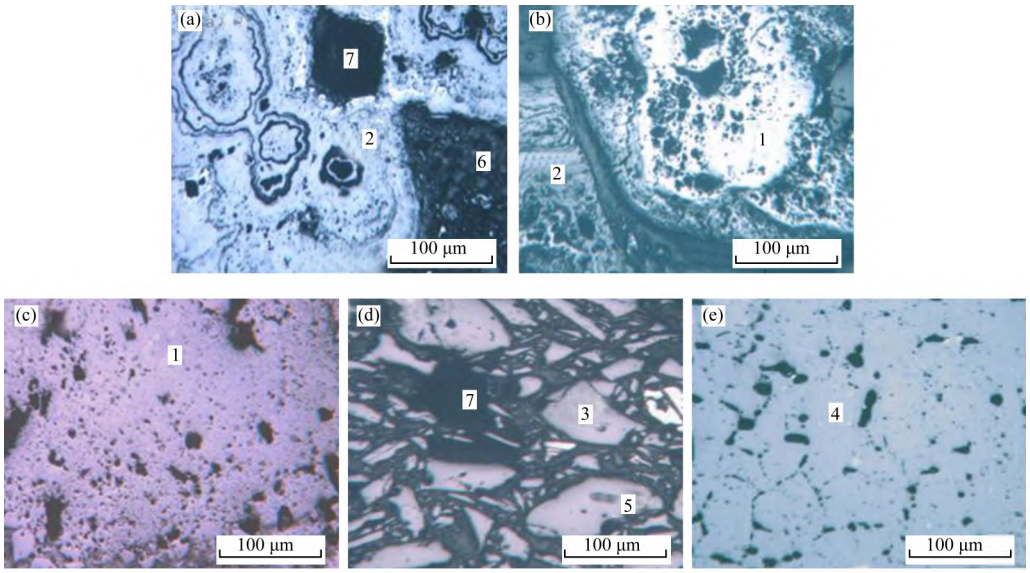
Table 3　Mineral composition of iron ore　%

铁矿石	含铁矿物				脉石	其他
	褐铁矿	赤铁矿	磁铁矿	黄铁矿		
A 矿	65～70	10～15	少量	偶见	15～20	2～5
E 矿	30	55～60	少量	偶见	10～15	1
F 矿	3～5	75～80	少量	偶见	10	5～10
I 矿	＜1	2～3	85～90	3～5	10～15	2～3
J 矿	＜1	80	5～10	2～3	10～15	2～3

由表 3 可知：A 矿主要为褐铁矿，质量分数为 65%～70%，赤铁矿质量分数在 10%～15%，偶见磁铁矿，脉石总量约为 15%～20%；E 矿主要为赤铁矿和褐铁矿，赤铁矿质量分数为 55%～60%，褐铁矿质量分数约为 30%，偶见磁铁矿，脉石质量分数为 10%～15%；F 矿主要为赤铁矿，质量分数为 75%～80%，褐铁矿较少，不到 5%，磁铁矿和黄铁矿极少，脉石质量分数约为 10%；I 矿为精矿粉，铁矿物主要为含镁磁铁矿，质量分数为 85% 左右，脉石质量分数为 10%～15%；J 矿为镜铁矿，脉石质量分数为 10%～15%。

结合表 3 和图 2 可知：A 矿为褐铁矿粉矿，其显微结构多为鲕状、豆状、皮壳状、土状或块状等，含有的赤铁矿多为豆状、皮壳状，吸附水和结晶水较多，孔洞较多，结构较为疏松；E 矿为半赤半褐粉矿，其赤铁矿主要为粗粒、

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



(a) A矿；(b) E矿；(c) F矿；(d) I矿；(e) J矿

1—赤铁矿；2—褐铁矿；3—含镁磁铁矿；4—镜铁矿；5—尖晶石；6—黏土脉石；7—孔洞。

图2 不同类型铁矿石的显微结构

Fig. 2 Microstructure of different types of iron ores

大粒集合体，结构不均匀性强，部分致密部分疏松；F矿为赤铁矿粉矿，多为大粒状，结构较为致密；I矿为精矿粉，铁矿物主要为含镁磁铁矿，主要为粒状和板片状，偶见黄铁矿，脉石种类较为复杂；J矿为镜铁矿，多为细粒集合体，组织结构比较致密几乎无孔洞，层状、片状结构较多，表面光滑。

2.3 铁矿石矿相对同化性的影响分析

不同类型的铁矿石矿物组成和显微结构差别较大，此处结合同化性试验结果和矿相试验结果，分析了铁矿石矿相对同化性的影响，矿种的选择与矿相试验一致。

A矿同化性温度很低只有1 166 ℃，同化性较好，这与该矿主要组成为矿物结构较为疏松、结晶水质量分数高的褐铁矿利于同化反应进行有关。F矿同化温度也较低，为1 198 ℃，主要因为该矿本身是赤铁矿，不需要氧化可直接与CaO发生同化作用，使得同化性较好。E矿同化温度适中，为1 251 ℃，这与其半赤铁矿半褐铁矿的矿物组成有关。I矿和J矿都为精矿，同化温度都较高，分别为1 330 ℃和1 310 ℃，I矿同化温度高，与其含有较多的含镁磁铁矿不利于与CaO反应有关；J矿组织结构比较致密，层状、片状结构较多，Fe_2O_3与CaO反应的动力学条件较差，同化性差。

综上分析可知，不同铁矿石同化性波动大，铁矿石同化性与铁矿石种类、矿物组成结构有关。结构疏松、结晶水质量分数高、烧损大的褐铁矿同化性能较好；赤铁矿的同化性优于磁铁矿；组织结构比较致密，层状、片状结构较多的镜铁矿同化性最差。

2.4 化学成分对铁矿石同化性的影响分析

由于铁矿石种类多，矿物组成结构复杂，很难建立单一因素与同化性的关系，本部分在对比铁矿石矿相对同化性影响的基础上重点分析铁矿石化学成分对同化性的影响，在不同影响因素下选择不同的矿石，以避免不同因素之间的相互影响。

2.4.1 烧损对矿石同化性的影响

烧损是影响矿石同化反应的重要因素之一，本文选取了烧损比较明显的的A矿、B矿、C矿、D矿和E矿分析烧损对同化性能的影响，结果如图3所示。

由图3可知，矿石的同化温度与其烧损呈负相关的关系，即烧损越大同化温度越低，同化性越好，这一规律与任强等[15]研究结果一

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

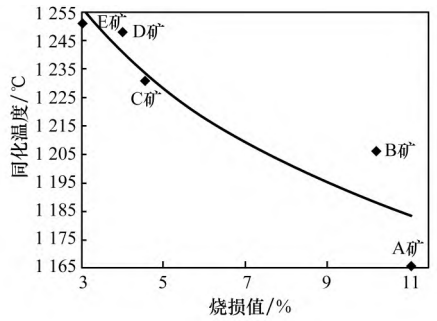


图 3　铁矿石同化温度与烧损的关系

Fig. 3　Relationship between assimilation temperature and burning loss of iron ore

致。这主要是由于烧损较大的铁矿石在高温烧结时会产生较多的气孔，促进了 CaO 与矿石中其他矿物离子的扩散，加快了彼此间的反应，从而使得同化温度变低，同化性变好。

2.4.2　SiO_2 质量分数对同化性的影响

铁矿石中 SiO_2 是液相生成的主要来源，决定了其与 CaO 的反应强弱，是铁矿石同化性的一个重要因素，因此对比分析了铁矿石中 SiO_2 质量分数与同化性的关系，试样考虑到烧损的影响，矿种选择了 C 矿、D 矿、E 矿、G 矿、I 矿和 J 矿。试验结果如图 4 所示。

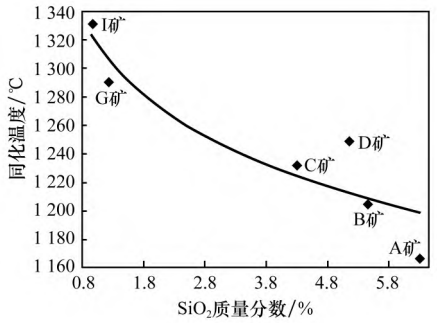


图 4　铁矿石同化温度与 SiO_2 质量分数的关系

Fig. 4　Relationship between iron ore assimilation temperature and SiO_2 mass fraction

由图 4 可知，随着 SiO_2 质量分数的增加，铁矿石同化温度变低，同化性变好，这主要是因为 SiO_2 越多越容易与 CaO 反应生成低熔点化合物，越有利于提高铁矿石的同化性。

2.4.3　MgO 质量分数对同化性的影响

MgO 是铁矿石的重要化学组成部分，也是影响铁矿石性能的一个重要因素，为了便于对试验结果进行分析，选择与 MgO 质量分数相近的 C 矿、D 矿、G 矿、E 矿和 J 矿，I 矿 MgO 质量分数较高，试验结果体现得也较为明显。MgO 质量分数对矿石同化性的影响如图 5 所示。

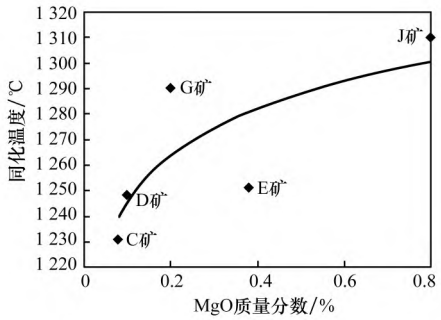


图 5　铁矿石同化温度与 MgO 质量分数的关系

Fig. 5　Relationship between iron ore assimilation temperature and MgO mass fraction

由图 5 可知，铁矿石中 MgO 质量分数与同化温度基本呈正相关关系，高 MgO 质量分数有恶化铁矿石同化性的趋势。I 矿作为高镁精矿，其同化性温度很高，同化性能最差。这主要是由于 MgO 是高熔点物质，烧结过程中有利于赤铁矿分解成磁铁矿，而且抑制铁酸钙的生产，在高温固相反应后会形成难熔物相，不利于液相的生成，从而使同化温度升高。

2.4.4　Al_2O_3 质量分数对同化性的影响

Al_2O_3 是铁矿石的重要组成部分，对铁矿石性质具有较大影响，试验对所选 10 种铁矿石中 Al_2O_3 质量分数与同化性的关系进行了分析，由于 A 矿、B 矿、C 矿和 D 矿同属褐铁矿，趋势在图 3 中体现较明显，故下图 6 中只反应 D 矿和其他矿种试验结果。

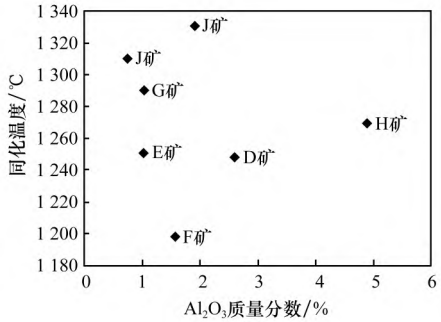


图 6　铁矿石同化温度与 Al_2O_3 质量分数的关系

Fig. 6　Relationship between iron ore assimilation temperature and Al_2O_3 mass fraction

由图 6 可知，Al_2O_3 质量分数与铁矿石同化

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

性的影响因矿石类型不同而不同，很难找到明显的趋势和规律，无法用趋势图表征。对A矿、B矿、C矿、D矿等褐铁矿，Al_2O_3 质量分数的增加会使铁矿石同化温度升高，同化性变差，主要是因为 Al_2O_3 质量分数增加使得液相的黏度增大，不利于铁矿粉与CaO反应；对其他矿种找不出 Al_2O_3 质量分数与同化性的关系。

3 生产实践

实践表明，优质高产的烧结矿需要具有适宜同化温度的混合矿作支撑[10]，因此烧结配矿中应考虑不同矿石类型的合理搭配，来确保混合矿适宜的同化性。按照安钢优化配矿的要求和原则，以安钢铁矿石的同化性性能搭配为基础，进行优化安钢烧结的生产实践试验，其中以A矿、B矿和H矿为主要结构，再配加I矿和J矿，混合矿配比结构见表4，烧结碱度按1.9控制，烧结杯试验结果见表5，烧结矿成分和冶金性能指标表分别见表6和表7。

表4 混合矿配比及同化温度

Table 4 Mixed ore proportion and assimilation temperature

项目	配比(质量分数)/%					同化温度/℃
	A矿	B矿	H矿	I矿	J矿	
优化前	35	25	13	12	15	1 243
优化后	35	25	13	17	10	1 261

表5 烧结杯试验结果

Table 5 Sintering cup test results

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})
优化前	14.13	80.33	74.37	0.88	52.61
优化后	15.09	81.47	76.35	0.90	52.82

表6 烧结矿主要化学成分

Table 6 Main chemical composition of sinter

项目	主要化学成分(质量分数)/%					R
	TFe	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	
优化前	56.83	9.67	5.03	1.77	1.79	1.92
优化后	56.17	9.38	4.91	1.83	1.80	1.91

表7 烧结矿冶金性能指标

Table 7 Metallurgical performance index of sinter

项目	T_{10}/℃	T_s/℃	T_d/℃	(T_d-T_s)/℃	RI/%	$RDI_{+3.15\ mm}$/%
优化前	1 092	1 301	1 503	202	85.23	72.17
优化后	1 063	1 293	1 482	189	85.55	72.62

由表4~7可知，经过配矿优化后混合矿的同化温度为1 261 ℃，符合安钢配矿适宜的同化温度区间(1 250~1 280 ℃)，在该温度下也更有利于铁酸钙的生成。烧结杯试验表明，在优化配矿后，除了固体燃料消耗稍有升高外，垂直烧结速度改善较大，成品率、转鼓强度分别提高1.33%、1.98%，利用系数稍有提高；烧结矿软化开始温度为1 063 ℃，偏低；滴落温度为1 482 ℃较好，熔融温度区间温度(T_d-T_s)较优化前变窄189 ℃，较为适宜；还原性和低温还原粉化指标也有改善。综合分析可以看出，经过优化配矿后烧结矿指标变好。

4 结 论

(1) 铁矿石同化性与铁矿石种类、矿相结构密切相关，不同种类的铁矿石同化性波动大，结构疏松、结晶水质量分数高、烧损大的褐铁矿同化性能较好；赤铁矿的同化性优于磁铁矿；镜铁矿矿相结构较致密，其同化性较差。

(2) 烧损与同化温度呈负相关关系，烧损越大，同化温度越低，铁矿石同化性能越好；随着 SiO_2 质量分数的增加，铁矿石同化温度降低，同化性能越好；较高的MgO质量分数会导致铁矿石熔点高，同化性能较差；Al_2O_3 质量分数对矿石同化性的影响因矿石类型不同而不同，对褐铁矿 Al_2O_3 质量分数的增加会使得铁矿石同化温度升高，同化性变差。

(3) 依据铁矿石同化性可以达到优化配矿的效果，配矿优化后混合矿的同化温度达到了适宜的1 261 ℃；烧结矿转鼓强度、利用系数、成品率和烧结矿冶金性能指标改善较多，各指标能够支撑高炉顺行。

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

参考文献：

[1] 王俊山，周明顺，翟立委，等．鞍钢铁矿石基础特性试验研究[J]．矿冶工程，2013，33(3)：94－97.
WANG Junshan，ZHOU Mingshun，ZHAI Liwei，et al. Experimental study on basic sintering characteristics of iron ore in AnSteel [J]. Mining and Metallurgical Engineering，2013，33(3)：94－97.

[2] 刘振林，葛洪霞，冯根生，等．济钢常用铁矿石烧结基础特性的研究[J]．钢铁，2004(7)：7－11.
LIU Zhenlin，GE Hongxia，FENG Gensheng，et al. Study on sintering basic characteristics of iron ore [J]. Iron and Steel，2004(7)：7－11.

[3] 吴胜利，刘宇．铁矿粉与 CaO 同化能力的试验研究[J]．北京科技大学学报，2002，24(3)：258－261.
WU Shengli，LIU Yu. Experiment study of assimilation ability between iron ores and CaO [J]. Journal of Beijing University of science and technology，2002，24(3)；258－261.

[4] 秦华伟，郭军伟，龙防．安钢常用铁精矿粉液相流动性试验研究[J]．烧结球团，2019，44(1)：14－17.
QIN Huawei，GUO Junwei，LONG Fang. ExperimentaI study on liquid phase nuidity of iron ore concentrate fines commonly used in Anyang Steel [J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(1)：14－17.

[5] 赵凯，李杰，张玉柱，等．邢钢烧结原料基础特性及优化配矿试验研究[J]．矿冶工程，2016，36(4)：88－92.
ZHAO Kai，LI Jie，ZHANG Yuzhu，et al. Experimental study on basic characteristics and optimal ore blending of sintering raw materials in Xing Steel [J]. Mining and Metallurgical Engineering，2016，36(4)：88－92.

[6] 余盈昌，吴铿，赵勇，等．基于"同化性特征数"分析影响铁矿粉同化性的因素[J]．有色金属科学与工 程，2014，5(6)：28－33.
YU Yingchang，WU Jian，ZHAO Yong，et al. Influencing factors of the assimilation of iron ore powder based on the assimilation characteristic number [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering，2014，5(6)：28－33.

[7] 杨玉兵．铁矿粉同化性能在安钢 500 m^2 烧结配矿过程中的应用实践[J]．河南冶金，2019，27(3)：29－32.
YANG Yubing. Application of iron ore powder assimilation performance in sintering and ore blending process of angang 500 m^2 [J]. Henan Metallurgy，2019，27(3)：29－32.

[8] 吴胜利，戴宇明，DAUTER Oliveim，等．基于铁矿粉高温特性互补的烧结优化配矿[J]．北京科技大学学报，2010，32(6)：720－724.
WU Shengli，DAI Yuming，DAUTER Oliveim，et al. Optimization of sintering ore blending based on complementary high temperature characteristics of iron ore powder [J]. Journal of Beijing University of science and technology，2010，32(6)；720－724.

[9] 吴胜利，刘宇，杜建新，等．铁矿石的烧结基础特性之新概念[J]．北京科技大学学报，2002，24(3)：254－257.
WU Shengli，LIU Yu，DU Jianxin，et al. A new concept of basic sintering characteristics of iron ore [J]. Journal of Beijing University of science and technology，2002，24(3)；254－257.

[10] 张建良，苏步新，车晓梅，等．若干国内外铁矿粉的同化性实验研究[J]．过程工程学报，2011，11(1)：97－102.
ZHANG Jianliang，SU Buxin，CHE Xiaomei，et al. Experimental study on assimilation of some iron ore fines at home and abroad [J]. The Chinese journal of process engineering，2011，11(1)：92－102.

[11] 薛方，王琨．褐铁矿类型铁矿粉微观特性的分析研究[J]．烧结球团，2019，44(1)：19－23.
XUE Fang，WANG Kun. Study on the microscopic characteristics of the limoIlite iron ore fines [J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(1)：19－23.

[12] 王艺慈，罗果萍，柏京波，等．F、K、Na 对烧结固相反应影响的研究[J]．钢铁，2008，43(7)：12－15.
WANG Yici，LUO Guoping，BAI Jingbo，et al. Study on influence of F，K and Na on solid phase reaction of sintering process [J]. Iron and Steel，2008，43(7)：12－15.

[13] 司天航，韩秀丽，刘 磊，等．镁铝对烧结矿矿相结构的影响规律[J]．烧结球团，2021，46(4)：24－31.
SI Tianhang，HAN Xiuling，LIU Lei，et al. Influence of Mg and Al on mineralogical structure in sinter [J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(4)：24－31.

[14] 秦华伟，黎应君，刘琪．安钢烧结矿矿相研究与分析[J]．河南冶金，2016(3)：8－10.
QIN Huawei，LI Yingjun，LIU Qi. The research and analysis of Angang sinter mineralogical [J]. Henan Metallurgy，2016(3)：8－10.

[15] 任强，王艺慈，罗果萍，等．铁矿粉的烧结基础特性及最佳配矿试验研究[J]．烧结球团，2020，45(4)：26－30.
REN Qiang，WANG Yici，LUO Guoping，et al. Experimental study on basic sintering characteristics and optimum ore blending scheme of iron ore powder [J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(4)：26－30.

[16] 贺真．基于铁矿粉烧结基础特性的优化配矿研究[D]．长沙：中南大学，2014.
HE Zhen. Research on optimizing proportion for sintering based on fundamental characteristics of iron ore fines [D]. Changsha：Central South University，2014.

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