低硅低碱度烧结试验与热力学计算分析

郭 亮[1]，尹 浩[1]，李光辉[2]，刘会波[2]
(1. 湖南华菱涟源钢铁有限公司，湖南 娄底 417009；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083)

摘要： 低硅低碱度烧结可以提高烧结矿铁品位，但会恶化烧结矿质量。本文以涟钢烧结原料作为研究对象，从理论和烧结杯试验两方面对低硅低碱度烧结的可行性和下限进行研究。研究结果表明，烧结液相的生成量受碱度和 SiO_2 质量分数的影响很大，且烧结混合料的液相生成量与烧结矿转鼓强度呈线性相关关系；通过优化配矿，改变混合料中黏附粉的质量分数和液相生成能力，可以实现混合料中液相生成总量不变；理论分析和烧结杯试验均表明，低 SiO_2 质量分数烧结可以实现，但低碱度烧结难以实现，这是由于低碱度烧结会降低黏附粉的液相生成能力；低硅烧结可以实现 SiO_2 质量分数从 5.0% 降低至 4.6%，提高烧结矿的铁品位 0.62%，减少熔剂消耗量 8.90 kg/t，低硅烧结产品的显微结构与基准产品一致，冶金性能也与基准产品相当。

关键词： 烧结；液相量；碱度；SiO_2；热力学计算
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)02－0017－08
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.02.018

Low-silicon and low-alkalinity sintering test and thermodynamic calculation analysis

GUO Liang[1], YIN Hao[1], LI Guanghui[2], LIU Huibo[2]
(1. Hunan Valin Lianyuan Iron & Steel Co., Ltd., Xiangtan 417009, Hunan, China;
2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Low-silicon and low-alkalinity sintering can improve the iron grade of sinter, but it will deteriorate the quality of sinter. The sintering raw materials from Lianyuan Iron & Steel Co., Ltd. are used as the research object. The feasibility and lower limit of low-silicon and low-alkalinity sintering are studied from such two aspects as theory and sinter pot test. The results show that the sintering liquid phase quantity is greatly affected by alkalinity and SiO_2 mass fraction, and the liquid phase generation of sintering compound is linearly related to the sinter tumbler strength. By optimizing the blending and changing the mass fraction of the adhesion powder and the liquid phase generation capacity in the compound, the total amount of liquid phase generation in the compound can be unchanged. Theoretical analysis and sinter pot test show that low SiO_2 mass fraction sintering can be achieved, but low-alkalinity sintering cannot be achieved, because low-alkalinity sintering will reduce the liquid phase generation capacity of adhesion powder. Low silicon sintering can reduce the SiO_2 mass fraction from 5.0% to 4.6%, increase the iron grade of the sinter by 0.62%, reduce flux consumption by 8.90 kg/t, and the microstructure of the low-silicon sintering product is consistent with the benchmark product, and the metallurgical performance is comparable to the benchmark product.

Key words: sintering; liquid phase quantity; alkalinity; SiO_2; thermodynamic calculation

烧结矿是目前我国高炉使用占比最大的含铁原料，其质量会直接影响高炉生产[1]。低硅低碱度烧结作为高炉精料措施之一，可以提高烧结矿的铁品位，减少烧结工序的熔剂消耗，平衡炉料结构，然而该方法会降低烧结矿的转鼓强度[2]。朱亚东等[3]研究表明，当烧结矿碱度为 2.5 时，

收稿日期： 2021－10－09；**修回日期：** 2021－11－19
作者简介： 郭 亮(1975—)，男，工程师，从事烧结生产技术和管理方面的工作。

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

SiO_2 质量分数为4.0%的低硅烧结工艺能实现良好的烧结矿强度指标。低硅高碱度烧结尽管保证了烧结矿质量，但却没能实现提高烧结矿铁品位的目的。韩闯闯等[4]研究表明，高碱度烧结矿在降低碱度的同时其强度会显著下降，这是由于降低碱度会减少黏结相中铁酸钙的生成量，降低烧结矿的黏结强度。此外，铁矿粉复合造块技术也可以降低造块产品的总碱度，但该技术需要足量的精粉用来造球[5]。因此，实现低硅低碱度烧结的前提是要保证足够的液相生成量。而富含熔剂的黏附粉在烧结时会熔化形成液相，其也是烧结液相的主要来源[6]。混合料中小于0.5 mm粒度的部分主要起黏附粉作用，其在制粒时包裹在核颗粒外与核颗粒共同形成准颗粒[7-8]。由于粒度不均匀，黏附粉和整个混合料的化学成分存在一定的差异。在实际生产中，一般通过配矿方案优化来调节混合料中黏附粉的质量分数，用以保证足够的液相生成量。

吕学伟等[9-12]采用FactSage热力学计算软件，在固定碱度条件下对比了铁矿的灰熔特性和不同温度下烧结过程的理论液相生成量，发现二者具有同样的变化规律。本文以烧结液相生成理论为基础，结合烧结杯试验和热力学计算方法，探究低硅低碱度烧结难以实现的原因，给出特定原料条件下实际烧结生产的 SiO_2 质量分数和碱度下限，并指出实现低硅低碱度烧结的优化途径。

1 原料性质与研究方法

1.1 原料性质

试验所用原料均来自涟钢烧结厂(该厂以粉矿搭配精矿进行烧结生产，原料以外购为主)，包括4种粉矿、3种精矿、2种含铁原料(返矿和除尘灰)、2种熔剂(白云石和生石灰)，其主要化学成分如表1所示。粒度组成中，精矿E、F、G和除尘灰小于0.5 mm粒级占比均为100%，其余原料的粒度组成如表2所示。

表1 试验原料的主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical composition and burning loss of test raw materials %

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	P	S	烧损
粉矿A	63.46	0.07	4.95	0.08	0.03	1.95	0.27	0.03	0.06	0.02	0.90
粉矿B	65.94	1.22	1.31	0.05	0.05	1.38	0.01	0.01	0.05	0.02	2.76
粉矿C	57.55	0.03	5.22	0.08	0.07	2.29	0.05	0.03	0.06	0.03	7.70
粉矿D	59.81	0.32	3.90	0.07	0.06	2.16	0.03	0.05	0.07	0.03	6.58
精矿E	62.37	25.09	10.54	0.16	0.30	0.93	0.04	0.03	0.04	0.06	0.97
精矿F	59.91	2.51	7.39	2.23	0.49	0.55	0.09	0.09	0.50	0.05	1.37
精矿G	68.24	19.12	3.37	0.31	0.35	0.37	0.02	0.04	0.01	0.04	0.41
返矿	56.84	6.81	4.92	9.36	1.95	1.58	0.08	0.04	0.07	0.02	0.61
除尘灰	48.96	3.64	5.65	11.68	2.47	2.05	0.42	0.09	0.07	0.20	6.10
白云石	0.39	0.07	2.13	31.90	19.41	0.24	0.06	0.03	0.01	0.01	44.64
生石灰	0.18	0.05	1.66	79.95	3.08	0.10	0.09	0.02	0.01	0.05	14.7

由表1可知：原料中 SiO_2 质量分数差异很大，粉矿B的 SiO_2 质量分数较低，精矿E和F的 SiO_2 质量分数较高，这为烧结生产调节 SiO_2 质量分数提供了条件。此外，由表2可知：所有粉矿小于0.5 mm粒级占比较低，不超过30%；白云石的粒度较小，小于0.5 mm粒级占比超过30%；生石灰消化后，其小于0.5 mm粒级占比高达90%以上，其在制粒过程中大部分也都成为黏附粉。

1.2 研究方法

1.2.1 烧结杯试验

本文试验所用烧结杯高度为900 mm，平均直径为170 mm，试验固定粉矿A、粉矿B、粉矿C、粉矿D、精矿F、精矿G的配比分别为13.0%、15.0%、6.0%、37.0%、8.0%、9.0%，除尘灰、返矿、焦粉配比分别为1.0%、30.0%、5.3%。为减小试验干扰，混合料中 SiO_2 质量分数通过控制精矿E的配比来实现，碱度通过控制白云石、生石灰的配比实现。设计的配矿方案共14

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

表 2　试验原料的粒度组成(质量分数)

Table 2　Particle size composition of raw materials　　%

原料名称	>8 mm	(5,8) mm	(3,5) mm	(1,3) mm	(0.5,1) mm	>0.5 mm
粉矿 A	0.91	10.84	30.99	35.08	11.93	10.25
粉矿 B	5.16	8.12	18.44	27.74	14.39	26.15
粉矿 C	2.93	12.13	29.62	35.63	11.64	8.05
粉矿 D	9.16	19.42	25.12	22.72	8.42	15.16
返矿	0	0.58	20.00	42.09	19.72	17.61
白云石	—	0.05	11.06	36.62	18.47	33.80
生石灰	—	—	4.35	17.84	17.06	60.75

注：生石灰消化后，其 <0.5 mm 粒级占比为 92.56%。

组，包括为 A_1(高碱度对照组)、B_0(基准组)、B_1～B_4(碱度为 1.9)、C_1～C_4(碱度为 1.8)、D_1～D_4(碱度为 1.7)。烧结杯试验配矿方案如表 3 所示。

表 3　烧结杯试验配矿方案

Table 3　Blend scheme of sinter pot tests

试验编号	碱度	SiO_2 质量分数/%	配比(质量分数)/%			
			精矿 E	混匀矿	白云石	生石灰
A_1	2.0	4.9	10.2	84.4	5.8	8.8
B_0	1.9	5.0	12.0	84.9	5.8	8.3
B_1	1.9	4.9	9.4	85.2	5.8	8.1
B_2	1.9	4.8	6.9	85.5	5.8	7.7
B_3	1.9	4.7	4.5	85.8	5.8	7.4
B_4	1.9	4.6	2.3	86.1	5.8	7.2
C_1	1.8	4.9	9.5	85.9	5.8	7.4
C_2	1.8	4.8	6.9	86.1	6.1	6.9
C_3	1.8	4.7	4.7	86.3	6.1	6.7
C_4	1.8	4.6	2.5	86.5	6.2	6.4
D_1	1.7	4.9	9.2	86.6	5.8	6.6
D_2	1.7	4.8	6.6	86.7	6.2	6.1
D_3	1.7	4.7	4.4	86.9	6.3	5.9
D_4	1.7	4.6	2.2	87.1	6.3	5.6

除配矿方案不同外，烧结杯试验其他参数均保持一致。控制混合料水分为(7.0±0.1)%，制粒时间为 3 min；固定烧结料层高度为 900 mm，点火温度为(1 150±50)℃，点火时间为 2 min，保温温度为 900～1 150 ℃，保温时间为 1 min，点火负压为 5 kPa，抽风负压为 10 kPa。烧结矿的物理强度和冶金性能等参数检测分别依据《鼓风炉用铁矿料和直接减少给料量：压碎强度的测定》(ISO 4700—2015)、《铁矿石 还原性的测定方法》(GB/T 13241—2017)、《铁矿石 低温粉化试验 静态还原后使用冷转鼓的方法》(GB/T 13242—2017)、《高炉用铁球团矿自由膨胀指数的测定》(GB/T 13240—2018)等进行[13-14]。

1.2.2　FactSage 热力学计算

FactSage 热力学计算软件可以计算平衡态下反应体系的吉布斯自由能变、物相组成、液相质量分数、液相性质等。本文采用 FactSage8.0 的 Equilibrium 模块计算 1 300 ℃时黏附粉体系的液相生成量，设定反应体系的氧分压为 10.132 5 kPa(实际烧结环境的氧分压)，选择 FToxid-SLAGA 计算烧结过程中黏附粉的液相生成量[15]。

假设原料中的 FeO 均以 Fe_3O_4 形式存在，依据试验原料单矿的化学成分、单矿 <0.5 mm 粒级占比以及烧结配矿方案，通过西格玛加和这三者的乘积，可以计算出黏附粉(<0.5 mm 粒度的混合料)的主要化学成分和碱度，并对主要成分结果进行归一化，得到 FactSage 热力学计算所需的主要氧化物的质量分数，如表 4 所示。

2　结果与讨论

2.1　烧结杯试验结果

根据前述方案开展低硅低碱度烧结杯试验，结果如表 5 所示。由表 5 可知：在相同的烧结操作制度下，烧结速度在 20 mm/min 附近波动，烧结机利用系数随成品率的变化而变化，烧结矿固体燃料消耗为 58 kg/t，返矿基本达到平衡(配入返矿与产出返矿比值接近 1)。结合表 4 数据可知，烧结矿成品率、转鼓强度与黏附粉碱度、SiO_2 质量分数的变化趋势相同。

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

表4 混合料中黏附粉的主要化学成分、碱度以及热力学计算所需氧化物的化学成分

Table 4 Main chemical composition, basicity and composition of oxides used in thermodynamic calculation of the adhesive powder in mixtures

试验编号	主要化学成分(质量分数)/%						碱度	热力学计算所需氧化物的化学成分(质量分数)/%					
	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3		Fe_2O_3	Fe_3O_4	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3
A_1	52.83	9.24	5.58	17.58	1.91	1.11	3.15	44.40	29.58	5.55	17.47	1.90	1.10
B_0	53.59	9.84	5.78	16.29	1.84	1.11	2.82	43.56	31.54	5.75	16.21	1.83	1.11
B_1	53.36	9.12	5.55	16.70	1.90	1.13	3.01	45.61	29.24	5.52	16.61	1.89	1.12
B_2	53.22	8.37	5.32	16.96	1.96	1.14	3.19	47.91	26.84	5.29	16.88	1.95	1.14
B_3	53.03	7.56	5.07	17.30	2.03	1.16	3.41	50.33	24.24	5.04	17.22	2.02	1.15
B_4	52.81	6.72	4.81	17.70	2.10	1.17	3.68	52.77	21.56	4.79	17.62	2.09	1.17
C_1	54.03	9.26	5.60	15.59	1.86	1.14	2.78	46.14	29.75	5.58	15.53	1.86	1.13
C_2	53.92	8.48	5.36	15.75	1.96	1.15	2.94	48.61	27.24	5.35	15.70	1.96	1.15
C_3	53.74	7.73	5.13	16.07	2.04	1.17	3.13	50.85	24.83	5.11	16.02	2.03	1.16
C_4	53.59	6.90	4.87	16.34	2.12	1.19	3.35	53.38	22.17	4.86	16.29	2.11	1.18
D_1	54.69	9.30	5.62	14.51	1.84	1.15	2.58	47.04	29.89	5.61	14.48	1.83	1.15
D_2	54.61	8.50	5.38	14.57	1.96	1.17	2.71	49.62	27.34	5.37	14.55	1.96	1.17
D_3	54.46	7.73	5.14	14.85	2.03	1.18	2.89	51.96	24.87	5.13	14.83	2.03	1.18
D_4	54.30	6.88	4.87	15.12	2.12	1.20	3.10	54.59	22.13	4.87	15.10	2.11	1.20

注:黏附粉主要化学成分为考虑烧损后的计算值;热力学计算所需氧化物成分中,Fe_3O_4 质量分数按照对应的 FeO 质量分数来计算。

表5 烧结杯试验结果

Table 5 Sinter pot test results

试验编号	烧结速度/($mm \cdot min^{-1}$)	成品率(质量分数)/%	转鼓强度(质量分数)/%	利用系数/($t \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$)	固体燃料消耗/($kg \cdot t^{-1}$)	返矿平衡值
A_1	22.08	74.96	65.51	1.59	59.77	1.05
B_0	22.07	75.36	63.89	1.68	57.88	1.00
B_1	19.03	76.79	65.35	1.49	56.63	0.96
B_2	20.10	75.08	65.50	1.53	57.95	1.01
B_3	18.93	74.35	64.71	1.44	58.40	1.04
B_4	18.19	74.05	63.78	1.35	59.03	1.05
C_1	19.56	75.85	61.57	1.52	57.20	0.98
C_2	20.41	75.91	60.05	1.62	57.57	0.98
C_3	20.59	75.46	61.03	1.61	58.18	0.99
C_4	21.24	76.07	62.00	1.61	57.70	0.96
D_1	18.27	76.37	58.33	1.46	56.91	0.96
D_2	20.41	75.96	60.19	1.63	57.23	0.98
D_3	20.66	74.05	60.03	1.59	59.32	1.04
D_4	19.59	75.41	58.53	1.55	58.00	1.00

注:返矿平衡值为烧结杯产生的返矿与混合料配入的返矿的质量比。

2.2 热力学计算分析

(1) 液相生成量。黏附粉的碱度和 SiO_2 质量分数对液相生成量有显著影响,其热力学计算结果如图1所示。由图1可知:体系液相生成量与黏附粉碱度、SiO_2 质量分数呈现正相关关系,降低碱度和SiO_2质量分数会减少体系的液相生成

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

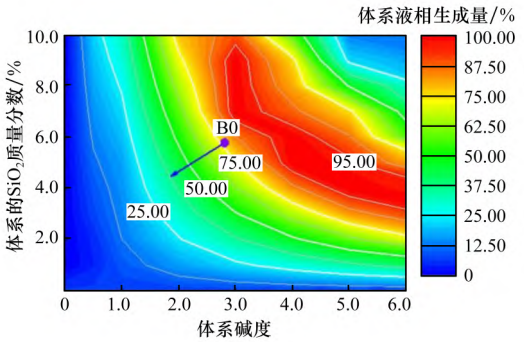


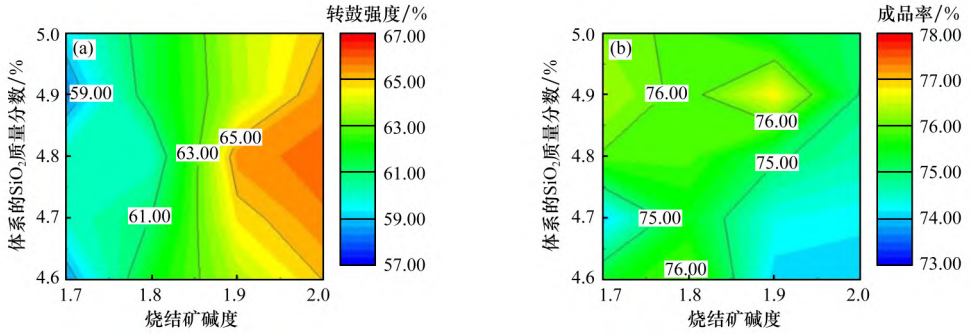
图 1　碱度和 SiO_2 质量分数对液相生成量的影响

Fig. 1　Effect of basicity and SiO_2 mass fraction on liquid phase generation

量，进而降低烧结矿质量。因此，低硅低碱度烧结会对烧结质量产生不利影响，然而烧结混合料中黏附粉的质量分数可以通过配矿进行调控。通过控制烧结混合料中黏附粉的质量分数及其碱度和 SiO_2 质量分数，可以在实现混合料的整体碱度与 SiO_2 质量分数降低的同时维持整体液相量不变。

(2) 烧结矿质量。采用克里金校正法处理表 5 所示数据，并绘制等值线图，结果如图 2 所示。由图 2 可知：碱度对烧结矿转鼓强度有显著影响，二者呈现正相关关系；而 SiO_2 质量分数对转鼓强度的影响不明显，碱度和 SiO_2 质量分数对成品率的影响不大。

在实际烧结生产中，降低 SiO_2 质量分数较易，降低碱度十分困难。此外，由表 5 可知，当碱度为 1.9，SiO_2 质量分数为 4.6% 时，烧结矿的转鼓强度为 63.78%，接近 63.89% 的基准值。因此，要确保烧结矿转鼓强度不低于基准值，混合料碱度不能低于 1.9，SiO_2 质量分数不能低于 4.6%。

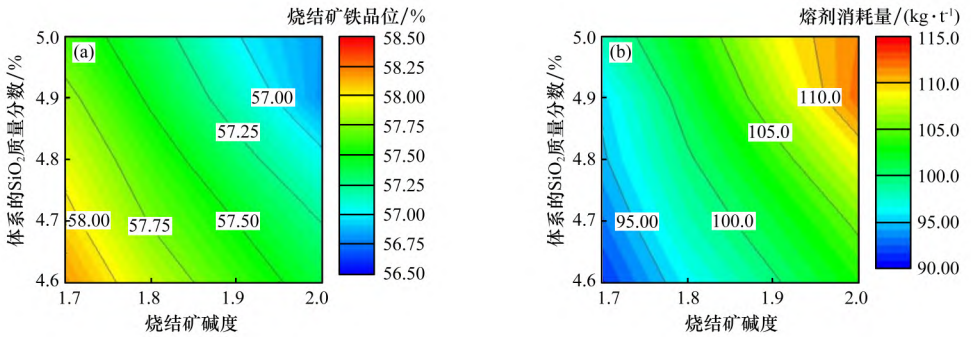


(a) 转鼓强度；(b) 成品率

图 2　碱度和 SiO_2 质量分数对烧结矿转鼓强度和成品率的影响

Fig. 2　Effect of basicity and SiO_2 mass fraction on the tumbler strength and yield of sinter

低硅低碱度烧结对烧结矿铁品位和熔剂消耗量的影响如图 3 所示。由图 3 可知，当碱度为 1.9，SiO_2 质量分数从 5.0% 降低为 4.6% 时，烧结矿的铁品位提高了 0.62 个百分点，熔剂消耗减少了 8.90 kg/t。由此可知，低硅低碱度烧结可以有效提高烧结矿的铁品位，减少造块过程中的熔剂消耗量，提高高炉生产效率，降低烧结成本。



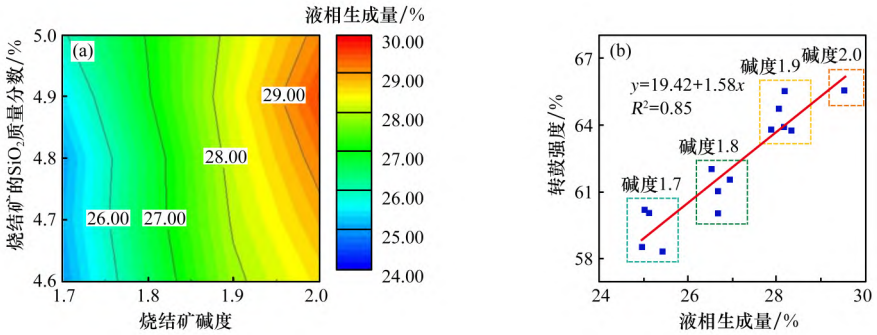
(a) 铁品位；(b) 熔剂消耗量

图 3　碱度和 SiO_2 质量分数对烧结矿铁品位和熔剂消耗量的影响

Fig. 3　Effect of basicity and SiO_2 mass fraction on iron grade and flux consumption

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

(3) 降低碱度与 SiO_2 质量分数对混合料液相生成量的影响。为解释低硅烧结可实现但低碱度烧结难以实现的原因，本文对烧结过程液相生成量进行分析，结果如图 4 所示。由图 4 可知：液相生成量受碱度的影响较大而受 SiO_2 质量分数的影响较小，烧结矿转鼓强度与混合料液相生成量呈正相关关系，即混合料液相生成量越多，烧结矿转鼓强度越好。



(a) 液相生成量；(b) 液相生成量与烧结矿转鼓强度的关系

图 4 液相生成量与烧结质量的影响因素

Fig. 4 The influencing factors of liquid phase generation and sintering quality

混合料中黏附粉质量分数对烧结矿碱度和 SiO_2 质量分数的影响如图 5(a) 所示。由图 5(a) 可知，通过配矿方案设计，在降低烧结矿碱度和 SiO_2 质量分数的同时降低混合料中黏附粉的质量分数，可以提高黏附粉的碱度。

黏附粉碱度对烧结矿碱度和 SiO_2 质量分数的影响如图 5(b) 所示。由图 5(b) 可知，随着烧结矿 SiO_2 质量分数的降低，黏附粉的碱度提高；但随着烧结矿碱度的降低，黏附粉的碱度却并没有提高。这是由于黏附粉碱度是通过调整熔剂用量来实现的，而通过配矿来调节黏附粉碱度是不现实的。

随碱度和 SiO_2 质量分数的变化，黏附粉体系的理论液相生成量和实际配矿方案下黏附粉的液相生成量如图 5(c)、(d) 所示。由图 5(c)、(d) 可知，通过增加黏附粉的液相生成量来弥补混合料中黏附粉质量分数减少带来的不利影响，可以保证烧结矿质量。

2.3 烧结矿性能分析

在碱度为 1.9、SiO_2 质量分数分别为 5.0% 和 4.6% 的低硅烧结和基准烧结条件下，烧结矿的主要化学成分和碱度、冶金性能分别如表 6、7 所示，两种烧结矿的矿相结构如图 6 所示。由表 6 可知：低硅烧结矿的铁品位较基准提高了 0.62%，SiO_2 质量分数降低了 0.43%，FeO 质量分数略有提升，其他成分和碱度维持不变。

表 6 低硅与基准烧结矿的主要化学成分与碱度

Table 6 Main chemical composition and basicity of low silicon and base sinter

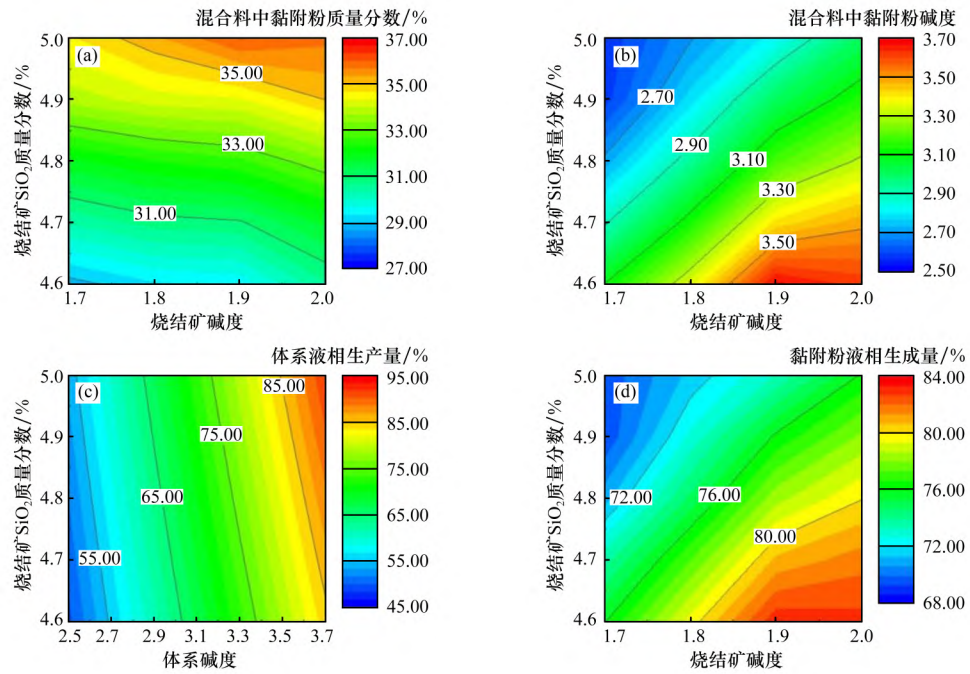
试验编号	化学成分(质量分数)/%										碱度
	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	P	S	
B_0	57.01	9.60	5.06	9.65	1.70	1.84	0.09	0.04	0.09	0.01	1.91
B_4	57.63	9.82	4.63	8.82	1.67	1.80	0.08	0.05	0.09	0.02	1.90

表 7 低硅与基准烧结矿的冶金性能

Table 7 Metallurgical properties of low silicon and base sinter

试验编号	还原度(质量分数)/%	低温还原粉化指数(质量分数)/%		软熔性能/℃			
		>3.15 mm	<0.5 mm	软化开始温度	软化终了温度	软化区间	滴落温度
B_0	79.36	60.72	10.25	1 184	1 338	154	1 445
B_4	82.32	57.74	11.02	1 191	1 357	166	1 453

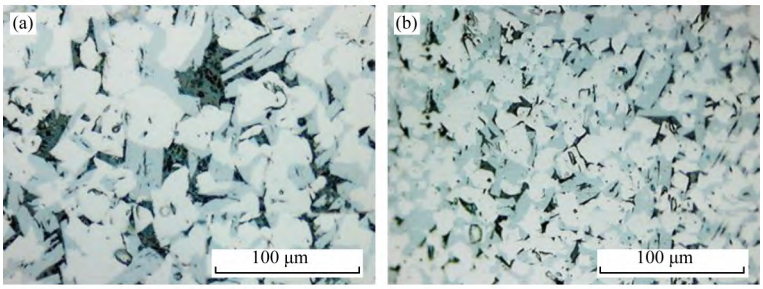
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 黏附粉质量分数；(b) 黏附粉碱度；(c) 体系液相生成量；(d) 黏附粉液相生成量

图 5　体系碱度和 SiO_2 质量分数对黏附粉性质与体系液相生成量的影响

Fig. 5　Effect of the system basicity and SiO_2 mass fraction on the properties of adhesive powder and liquid phase generation amount of the system



(a) 基准烧结(500 倍)；(b) 低硅烧结(500 倍)

图 6　烧结矿的显微结构

Fig. 6　The microstructure of the sinter ores

由图 6 可知：尽管低硅烧结矿的 SiO_2 质量分数降低了 0.43%，但两者的显微结构均为针状或柱状铁酸钙黏结相包裹着片状赤铁矿，并紧密结合。这是由于当混合料碱度相同时，降低硅质量分数导致黏附粉质量分数降低，但黏附粉部分碱度提高，生成的液相质量分数增加，总的液相量没有明显的变化，因此黏结相的性质并没有发生变化。

由表 7 可知：低硅烧结矿的还原度指数达到 82.32%，略好于基准烧结矿，但其低温还原粉化指数(>3.15 mm)仅为 57.74%，略低于基准烧结矿；低硅烧结矿的软熔温度区间为 166 ℃，滴落温度为 1 453 ℃，略高于基准值，影响不大。

3　结　论

(1) 液相生成量受烧结混合料碱度和 SiO_2 质量分数影响，与烧结矿转鼓强度呈线性相关关系。通过优化配矿，降低黏附粉质量分数，提高黏附粉液相生成量，控制混合料中的液相生成总量不变，可维持烧结矿质量稳定。

(3) 在实际烧结生产时，可以实现低 SiO_2 质量分数烧结，但低碱度烧结难以实现，这是由于碱度降低会使得混合料中液相生成总量降低。

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

(4) 低硅烧结可以提高烧结矿的铁品位0.62%，减少熔剂消耗量8.90 kg/t，烧结矿的显微结构与基准产品基本一致，还原度指数有所改善，低温还原粉化指数略微降低。

参考文献:

[1] 李素英,宋秀臣. 改善烧结矿质量降低高炉炼铁燃耗的措施分析[J]. 冶金与材料,2021,41(2):17-18.
LI Suying,SONG Xiuchen. Analysis of measures to improve the quality of sintered ore and reduce the fuel consumption of blast furnace ironmaking[J]. Metallurgy and Materials,2021,41(2):17-18.

[2] 支建明,李杰,李飞,等. 高铁低硅烧结技术发展动态[J]. 矿产综合利用,2022(1):1-9.
ZHI Jianming,LI Jie,LI Fei,et al. Development trends of high-iron low-silicon sintering technology[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2022(1):1-9.

[3] 朱亚东,罗果萍,王永斌,等. 提高包钢低硅烧结矿强度的试验研究[J]. 钢铁研究学报,2010,22(10):16-19;29.
ZHU Yadong, LUO Guoping, WANG Yongbin, et al. Study on sinter strength with low silicon content of Baotou iron and steel(group) co[J]. Journal of Iron and Steel Research,2010,22(10):16-19;29.

[4] 韩闯闯,李杰,杨爱民,等. 烧结矿强度-碱度低凹区及影响因素研究[J]. 烧结球团,2018,43(2):5-9;19.
HAN Chuangchuang,LI Jie,YANG Aimin,et al. Study on sinter strength-basicity low-concave areas and their influencing factors[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(2):5-9;19.

[5] 张荣华,刘兵兵,张元波,等. 高镁铁精矿复合造块法制备中低碱度炉料研究[J]. 烧结球团,2017,42(6):27-33.
ZHANG Ronghua,LIU Bingbing,ZHANG Yuanbo,et al. Research on preparation of low-medium basicity BF burden from high-MgO content iron ore concentrates by composite agglomeration process[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(6):27-33.

[6] 范晓慧. 铁矿烧结优化配矿原理与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2013:15-30.
FAN Xiaohui. The principle and technology of optimizing ore matching for iron ore sintering[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press,2013:15-30.

[7] 梁高铭,汤伟,汤乐云,等. 湘钢烧结低水制粒技术开发与应用[J]. 金属材料与冶金工程,2020,48(3):24-29.
LIANG Gaoming,TANG Wei,TANG Leyun,et al. Development and application of low water granulation technology of sintering in Xiangtan steel[J]. Metal Materials and Metallurgical Engineering,2020,48(3):24-29.

[8] OYAMA N,HIGUCHI T,MACHIDA S,et al. Effect of high-phosphorous iron ore distribution in quasi-particle on melt fluidity and sinter bed permeability during sintering[J]. ISIJ International,2009,49(5):650-658.

[9] 吕学伟. 炼铁流程中铁矿石评价体系构建[D]. 重庆:重庆大学,2010.
LÜ Xuewei. Construction of iron ore evaluation system in the ironmaking process[D]. Chongqing: Chongqing University,2010.

[10] 万新宇. 酸、碱料超厚料层混烧烧结技术研究[D]. 唐山:河北联合大学,2013.
WAN Xinyu. Research on the technology of mixed burning and sintering of ultra-thick layers of acid and basicity materials[D]. Tangshan: Hebei United University,2013.

[11] 田硕,王艺慈,罗果萍,等. 某钢厂常用4种铁矿粉烧结基础特性[J]. 中国冶金,2020,30(4):12-17.
TIAN Shuo,WANG Yici,LUO Guoping,et al. The basic characteristics of four iron ore fines commonly used in a steel plant[J]. China Metallurgical,2020,30(4):12-17.

[12] JIANG Xin,ZHAO Jidong,WANG Lin,et al. Effects of liquidus temperature and liquid amount on the fluidity of bonding phase and strength of sinter[J]. ISIJ International,2020,61(1):86-92.

[13] 朱德庆,黄铮静,杨聪聪,等. GF88赤铁精矿制备氧化球团的试验研究[J]. 烧结球团,2020,45(6):61-68.
ZHU Deqing, HUANG Zhengjing, YANG Congcong, et al. Research on production of oxidized pellets from GF88 hematite concentrate[J]. Sintering and Pelletizing, 2020,45(6):61-68.

[14] YU Zhengwei,LI Guanghui,JIANG Tao,et al. Effect of basicity on titanomagnetite concentrate sintering[J]. ISIJ International,2015,55(4):907-909.

[15] LÜ Xuewei, BAI Chenguang, DENG Qingyu, et al. Behavior of liquid phase formation during iron ores sintering[J]. ISIJ International,2011,51(5):722-727.

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