基于热力学计算的炉料脉石相交互作用研究

潘玉柱，丁 望，罗大军
（湖南华菱湘潭钢铁有限公司，湖南 湘潭 411100）

摘要： 熔滴试验和单颗粒炉料试验表明，不同性质炉料的脉石相之间存在交互作用，最终形成成分均匀的初渣。本文通过使用 FactSage 热力学计算软件分析不同性质炉料脉石相的熔化及其交互作用机理，阐述不同工艺条件下交互作用对冶炼的影响。研究结果表明，由于矿相组成不同，球团矿相较烧结矿，其脉石相的液相率较高；球团矿和烧结矿脉石相组成的混合初渣，其液相率高于单一烧结矿脉石相的液相率和球团矿、烧结矿脉石相液相率的加权平均值，这说明交互作用可以促进难熔化的烧结矿脉石相熔化；脉石相的液相率随着 FeO 质量分数的增加而升高。在当前工艺条件下，高碱度烧结矿搭配酸性炉料比使用熔剂型炉料合理。未来氧气高炉和富氢高炉等高还原势高炉可以大量使用酸性炉料和熔剂型炉料。

关键词： 炉料；烧结矿；球团矿；脉石相；熔化；交互作用
中图分类号： TF521；TF046 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764（2023）02－0078－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.02.026

Research on interaction of charge gangue phases based on thermodynamic calculation

PAN Yuzhu，DING Wang，LUO Dajun
（Hunan Valin Xiangtan Iron & Steel Co.，Ltd.，Xiangtan 411100，Hunan，China）

Abstract: The droplet test and single-particle charge test show that there is interaction between gangue phases of different charges，and an initial slag with uniform composition is formed finally. The melting of gangue phases with different properties and their interaction mechanism are analyzed by using FactSage thermodynamic calculation software，and the influence of interaction on smelting under different technological conditions is expounded. The results show that the liquid phase ratio of gangue phase of pellets is higher than that of sinter due to its different mineral phase composition. The liquid phase ratio of mixed primary slag composed of pellets and sinter gangue phase is higher than that of single sinter gangue phase and the weighted average of liquid phase ratio of pellets and sinter gangue phase，which shows that the interaction can promote the melting of refractory sinter gangue phase；and the liquid fraction of gangue phase increases with the increase of FeO mass fraction. Under current process conditions，high alkalinity sinter with acid charge is more reasonable than flux type charge. In the future，high reducing potential blast furnaces such as oxygen blast furnace and hydrogen-rich blast furnace can use a large number of acid charge and flux charge.

Key words: charge；sinter；pellet；gangue phases；melting；interaction

在高炉冶炼过程中，含铁炉料经历还原、软化、熔化形成初渣，初渣渗入焦炭层的滴落带后，逐步吸收焦炭和煤粉的灰分，最终在炉缸形成终渣。目前我国高炉的含铁炉料通常为高碱度烧结矿＋酸性炉料，由于成分上的差异，不同含铁炉料之间会发生交互作用，最终形成成分均匀的初渣，这一过程被称为交互作用。冶金工作者通常使用滴落试验和单颗粒炉料试验对炉料之间的交

收稿日期： 2022－06－23；**修回日期：** 2022－08－07
作者简介： 潘玉柱（1989—），男，博士，工程师，从事高炉炼铁、冶金固废资源化利用工作。

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

互作用进行研究[1-2]，虽然这些研究方法能够验证交互作用的存在以及其对混合炉料熔滴性能的影响，但对交互作用过程机理缺乏深入研究[3-4]。同时，受到分析方法的限制，大多数人对炉料交互作用的研究局限于 $CaO-SiO_2-FeO$ 体系的研究，高炉初渣属于 $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-FeO$ 五元体系，因此只考虑 $CaO-SiO_2-FeO$ 体系的研究忽略了 Al_2O_3 和 MgO 对交互作用的影响。

研究表明，酸性炉料的脉石相先于碱性炉料脉石相熔化，并在熔化后传质促进后者熔化，最终形成成分均匀的初渣[5]。为了进一步研究脉石相的熔化过程机理以及探究不同工艺下更加合理的炉料结构模式，本文采用热力学计算方法，将研究范围由 $CaO-SiO_2-FeO$ 三元体系扩展到 $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-FeO$ 五元体系，系统研究不同 FeO 质量分数对不同性质的炉料脉石相的熔化行为影响，明晰不同性质炉料脉石相液相生成路径和交互作用机理，以期为高炉低碳冶炼提供理论基础。

1　原料与方法

1.1　原料性质

本文计算所用烧结矿和球团矿的主要化学成分如表 1 所示。球团矿、烧结矿以及组合后的混合脉石相的化学成分和碱度如表 2 所示。

表 1　试验所用烧结矿和球团矿的主要化学成分和碱度

Table 1　Main chemical components and alkalinity of the sinter and pellet referenced in the experiment

原料名称	质量分数/%						R_2
	TFe	FeO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	
烧结矿	57.91	8.44	8.76	4.92	1.39	1.83	1.78
球团矿	61.40	0.87	1.16	6.63	1.27	1.97	0.17

注：R_2 为二元碱度。

表 2　球团矿、烧结矿以及混合脉石相的主要化学成分和碱度

Table 2　Main chemical composition and alkalinity of in sinter，pellet and mixed gangue phase

项目	脉石相编号	质量分数/%					R_2	组合碱度
		CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	FeO		
球团矿和烧结矿的脉石相	P_1	10.51	60.11	17.86	11.52	0	0.17	1.3
	S_1	51.90	29.05	10.86	8.19	0	1.78	
	P_2	9.46	54.10	16.07	10.37	10	0.17	1.3
	S_2	46.71	26.15	9.77	7.37	10	1.78	
	P_3	8.93	51.09	15.18	9.79	15	0.17	1.3
	S_3	44.11	24.69	9.23	6.96	15	1.78	
混合脉石相	M_1	44.74	34.42	8.77	12.07	0	1.30	—
	M_2	40.27	30.98	7.89	10.86	10	1.30	—
	M_3	38.03	29.25	7.45	10.26	15	1.30	—

注：P_1、P_2、P_3 分别为球团矿脉石相；S_1、S_2、S_3 分别为烧结矿脉石相；M_1、M_2、M_3 分别为 $P_1 \sim P_3$ 与 $S_1 \sim S_3$ 组成的混合脉石相。

表 2 中，以炉料中脉石相的主要化学成分 CaO、SiO_2、Al_2O_3 和 MgO 等进行重新组合，分别设定 FeO 质量分数为 0%、10% 和 15%，得到热力学计算的 3 组成分，用于明确不同还原度对熔化过程的影响；将每组脉石相成分按二元碱度 1.3 进行组合，组合后除 FeO 质量分数不同外，其余脉石相的化学成分占比均相同。

1.2　研究方法

本文采用 FactSage 软件进行热力学计算。FactSage 热力学软件是热化学领域中集成数据库最大的计算系统之一，该软件已经广泛应用于钢铁冶金、有色冶金、化工、能源等领域，该软件由一系列信息、数据库、计算及处理模块组成，用户可根据不同计算需求选择不同数据库[6-7]。利用 FactSage 软件，用户可以进行多种约束条件下多元多相平衡条件的计算，计算结果可以采用图形或表格的形式输出。如通用的 n 元相图截面图、工业体系中的锍/金属/炉渣/气体/固体的平衡图、多元优势区图以及电位 - pH 图、平衡或者非平衡凝固过程图、复杂热平衡图等。

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

本文选用 FToxid(The FACT Oxide Database，氧化物数据库)数据库进行热力学计算。数据库中，$CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-FeO_x$ 体系优化程度高，在冶金领域应用已经非常广泛。热力学计算的基本参数设定如表 3 所示。基础相(Base-Phase)包含 FT-oxid-SLAGA(氧化物渣)、FT-oxid-MeO A(氧化物相)、FToxidα-C_2SA(斜长石相)、FToxid-OlivA(橄榄石相)。参考炉料软熔试验方案，设定计算的温度范围为 1 000 ~ 1 450 ℃，温度间隔为 50 ℃。计算结果包括固相线温度、液相线温度、多相转变点以及每个温度点的物相组成和数量。

表 3 热力学计算基本参数设定

Table 3 Basic parameter settings for thermodynamic calculation

基础相名称	全称	中文名称
FT-oxid-SLAGA	A-Alag-liq all oxids + S	氧化物渣
FT-oxid-MeO A	A-Monoxide	氧化物相
FToxidα-C_2SA	A-α-Ca_2SiO_4	斜长石相
FToxid-OlivA	A-Olivine	橄榄石相

由于计算结果包含的数据多，为了便于分析、统计和理解，本文采用物相组成来直接表示固相矿物。定义不同脉石相成分的液相率如下。

$$L=\frac{M}{M_{总}}\times 100\% \tag{1}$$

式中：L 为液相率，%；M 为液相重量，kg；$M_{总}$ 为参与计算的脉石相总重量，kg。

不同脉石相成分液相率则标注相应下标，如 L_{P1}、L_{S1} 和 L_{M1} 代表 FeO 质量分数为 0 时烧结矿、球团矿和混合脉石相成分的液相率；L_{P2}、L_{S2} 和 L_{M2} 代表 FeO 质量分数为 10% 时烧结矿、球团矿和混合脉石相成分的液相率；L_{P3}、L_{S3} 和 L_{M3} 代表 FeO 质量分数为 15% 时烧结矿、球团矿和混合脉石相成分的液相率。

从计算结果中提取不同脉石相的液相量，并计算出烧结矿脉石相和球团矿脉石相的加权平均液相率，其计算公式如下。

$$L_{PS}=\frac{L_P\cdot M_P+L_S\cdot M_S}{M_P+M_S}\times 100\% \tag{2}$$

式中：L_{PS} 为球团矿和烧结矿的加权平均液相率，%；L_P 为球团矿的液相率，%；L_S 为烧结矿的液相率，%；M_P 为计算设定的球团脉石相重量，g；M_S 为计算设定的烧结脉石相重量，g。

采用 L_{PS1}、L_{PS2} 和 L_{PS3} 代表 FeO 质量分数分别为 0、10%、15% 时混合脉石相的加权平均液相率。

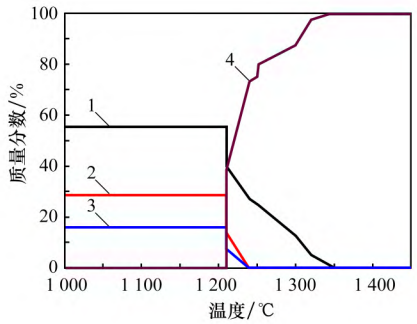
2 脉石相液相产生与交互作用机理

2.1 球团矿脉石相液相产生机理分析

P_1 物相变化如图 1 所示，其固相组成为 $CaMgSi_2O_6$、$CaAl_2Si_2O_8$ 和 SiO_2，三者在 1 200 ℃ 时发生共晶相熔化反应：

$$CaMgSi_2O_6+CaAl_2Si_2O_8+SiO_2\rightarrow L(液相)\quad T=1\ 200\ ℃ \tag{3}$$

这与计算得到的固相线温度(1 209 ℃)有所偏差，可能是物相占比或者数据库来源不同所导致。随着温度升高，液相率逐渐升高，固相消失的顺序为 SiO_2、$CaAl_2Si_2O_8$ 和 $CaMgSi_2O_6$。



1—$CaMgSi_2O_6$；2—$CaMgSi_2O_6$；3—SiO_2；4—L_{P1}。

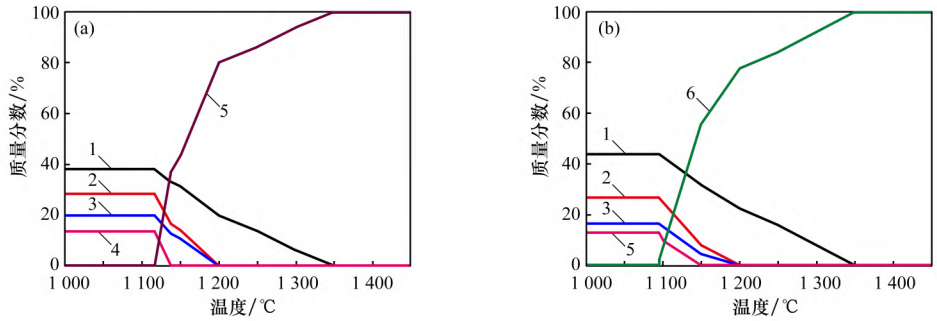
图 1 P_1 熔化过程中物相组成变化

Fig. 1 Changes of phase composition during melting of P_1

P_2 和 P_3 物相以及物相中存在的固溶体组分随温度变化的情况如图 2 所示。由图 2 可知：与 P_1 不同，P_2 和 P_3 中加入了 FeO 后，固相组分中出现了 Olivine 固溶体相(橄榄石)，该橄榄石相初始物相组成如表 4 所示。对比 P_1、P_2 和 P_3 可知，随着 FeO 质量分数的增加，组分的固相线温度更低，液相生成速率更快。这是因为在 P_2 和 P_3 中加入 FeO 后，橄榄石相中出现了熔点更低的 Fe_2SiO_4 和 $CaFeSiO_4$，这两者可以与其他物相通过 $CaO-SiO_2-FeO$ 体系产生液相，最低液相出现温度为 1 093 ℃[图]。由于计算处于平衡态，在真实的熔化反应中，可能还存在如下反应：

$$CaMgSi_2O_6+CaAl_2Si_2O_8\rightarrow L\quad T=1\ 274\ ℃ \tag{4}$$

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



(a) P_2；(b) P_3

1—橄榄石固溶体相；2—$CaMgSi_2O_6$；3—$CaAl_2Si_2O_8$；4—SiO_2；5—L_{P2}；6—L_{P3}。

图 2　P_2、P_3 熔化过程中物相组成变化

Fig. 2　Changes of phase composition during melting of P_2 and P_3

$$CaMgSi_2O_6 + CaAl_2Si_2O_8 + Mg_2SiO_4 \rightarrow L \quad (5)$$
$$T = 1\ 270\ ℃$$

表 4　P_2 和 P_3 的橄榄石相主要物相组成(质量分数)

Table 4　Main phase composition of olivine phase of P_2 and P_3　%

编号	Mg_2SiO_4	Fe_2SiO_4	$MgFeSiO_4$	$CaFeSiO_4$
P_2	43. 14	10. 51	45. 00	1. 35
P_3	30. 02	20. 58	49. 40	—

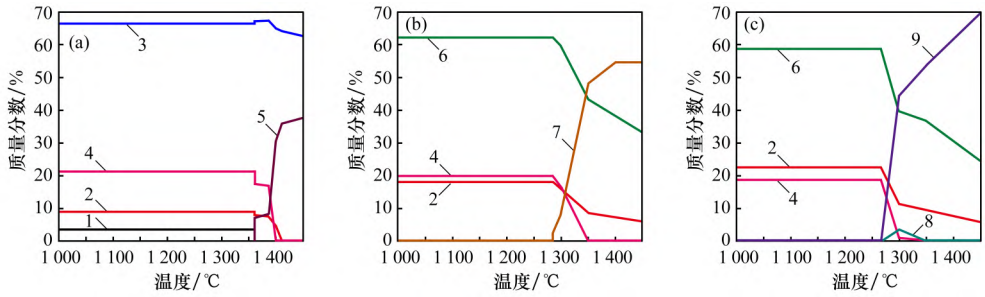
2. 2　烧结矿脉石相液相产生机理分析

不同 FeO 质量分数烧结矿脉石相熔化过程物相的变化规律如图 3 所示，其含有的固溶体相组成如表 5 所示。图 3(a) 代表富氢还原或者氧气高炉等高还原势工艺还原状态。由图 3(a) 可以看出，当 FeO 质量分数为 0 时，液相出现之前的固体组成为 Ca_3SiO_7、氧化物固溶体相、α-Ca_2SiO_4 和 $Ca_2Al_2SiO_7$ 相。其中，氧化物固溶体相主要成分为 MgO(质量分数为 99. 5%)。S_1 液相产生的原因为包晶相熔化反应:

$$Ca_3Si_2O_7 + Ca_2Al_2SiO_7 \rightarrow L + Ca_2SiO_4 \quad (6)$$
$$T = 1\ 361\ ℃$$

由于没有其他的液相生成路径，且烧结矿脉石相的碱度高，造成了 S_1 渣系在 1 450 ℃平衡时液相率较低。

图3(b)、(c) 为FeO质量分数为10% 和15%



(a) S_1；(b) S_2；(b) S_3

1—$Ca_3Si_2O_7$；2—氧化物固溶体相；3—Ca_2SiO_4；4—$Ca_2Al_2SiO_7$；5—L_{S1}；6—α-Ca_2SiO_4；7—L_{S2}；8—$Ca_3MgSi_2O_8$；9—L_{S3}。

图 3　S_1、S_2、S_3 熔化过程中物相组成变化

Fig. 3　Changes of phase composition during melting of S_1, S_2 and S_3

表 5　S_1 ~ S_3 的固溶体主要物相组成(质量分数)

Table 5　The main phase composition of the solid solution of S_1 ~ S_3　%

编号	氧化物固溶体相				α-Ca_2SiO_4		
	FeO	MgO	Al_2O_3	CaO	Mg_2SiO_4	Fe_2SiO_4	Ca_2SiO_4
S_1	—	99. 50	0. 50	—	4. 25	—	95. 75
S_2	52. 29	47. 53	0. 02	0. 16	3. 39	1. 32	95. 29
S_3	63. 60	36. 13	0. 02	0. 25	3. 72	1. 61	94. 67

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

的渣系熔化过程物相变化规律。由图 3(b) 、(c) 可知: 与不含 FeO 渣系的烧结矿脉石相相比，氧化物固溶体相中出现了 FeO 组分，并且 FeO 质量分数最高; 同时在 α-Ca_2SiO_4 相中出现了 Fe_2SiO_4，这就造成了含有 FeO 体系的液相由 CaO-SiO_2-FeO 体系产生，因此也造成了体系随着 FeO 质量分数的增加，固相线温度降低，相同温度下的液相率升高。

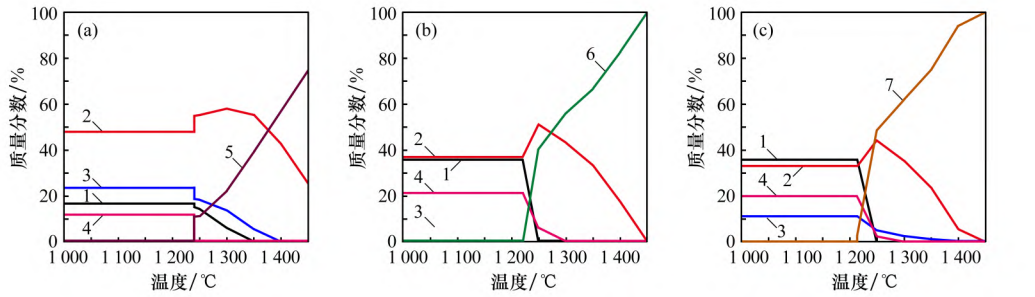
2.3 混合初渣液相生成机理与交互作用分析

不同烧结矿和球团矿脉石相的混合初渣物相变化规律如图 4 所示。由图 4 可知: M_1 ~ M_3 混合渣的固相均为橄榄石固溶体相、$Ca_2Al_2SiO_7$、$Ca_3MgSi_2O_8$ 和 $Ca_2MgSi_2O_7$。Olivine 固溶体相物相组成变化较大。不同 FeO 质量分数的 Olivine 相的物相组成如表 6 所示。由表 6 可知: 当混合渣中不含有 FeO 时，体系中不含有 $CaFeSiO_4$、Fe_2SiO_4 和 $MgFeSiO_4$，但含有 Mg_2SiO_4。通过热力学计算发现，混合初渣体系中不含有 FeO 时，液相产生的主要路径如式(7) 所示。

$$Ca_2MgSi_2O_7 + Ca_2Al_2SiO_7 \rightarrow L + Ca_3MgSi_2O_8 \quad (7)$$

$$T = 1\ 240\ ℃$$

与烧结矿和球团矿脉石相相同，当混合初渣中含有 FeO 时，液相可由 CaO-SiO_2-FeO 体系产生，混合初渣在相同温度时随着 FeO 质量分数的增加其液相率升高。



(a) M_1; (b) M_2; (c) M_3

1—橄榄石固溶体相; 2—$Ca_3MgSi_2O_8$; 3—$Ca_2Al_2Si_2O_7$; 4—$Ca_2MgSi_2O_7$; 5—L_{M1}; 6—L_{M2}; 7—L_{M3}。

图 4 混合初渣熔化过程物相变化规律

Fig. 4 Phase change rules during the melting process of mixed primary slag

表 6 不同混合脉石相中 Olivine 相的物相组成(质量分数)

Table 6 Phase composition of Olivine phase in different gangue phases %

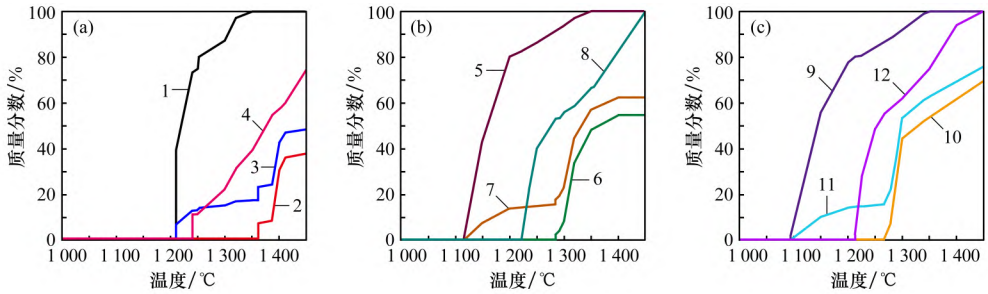
编号	Ca_2SiO_4	Mg_2SiO_4	$CaMgSiO_4$	$CaFeSiO_4$	Fe_2SiO_4	$MgFeSiO_4$
M_1	2. 08	7. 64	90. 28	—	—	—
M_2	7. 87	—	56. 63	33. 93	1. 27	1. 97
M_3	11. 55	—	48. 75	37. 01	0. 73	1. 96

烧结矿和球团矿脉石相的加权平均液相率对比结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，混合渣的液相率高于烧结矿和球团矿脉石相的加权平均液相率，这说明除了烧结矿和球团矿脉石相产生的液相之外，还有额外的液相产生，即通过交互作用产生液相。该结果与本文作者之前的研究结论一致，即球团矿脉石相可以使烧结矿脉石相在低于自身熔化温度时熔化。当 FeO 质量分数为 15% 时，烧结矿脉石相的熔化温度为 1 325 ℃，当有球团矿脉石相参与交互反应时，烧结矿脉石相的熔化温度降低至 1 289 ℃，即熔化的球团矿脉石相使高熔点的烧结矿脉石相在低于自身熔化温度时发生熔化行为[3]。同时，该结果也与之前学者研究结论一致[1-4]，即烧结矿可防止球团矿过早软熔，而球团矿可以使烧结矿难滴落。

3 不同工艺条件下合理炉料结构分析

热力学计算表明，交互作用可以使液相大量生成，使所有炉料的熔化形成更趋近于均匀的混合初渣，因此可以将不同炉料之间的交互作用理解为初渣生成的反应。由于还原得到的金属铁均为铁 - 碳合金，因此交互作用只能发生在不同性

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



FeO 质量分数/%：(a) 0；(b) 10；(c) 15

1—L_{P1}；2—L_{S1}；3—L_{PS1}；4—L_{M1}；5—L_{P2}；6—L_{S2}；7—L_{PS2}；8—L_{M2}；9—L_{P3}；10—L_{S3}；11—L_{PS3}；12—L_{M3}。

图 5　不同脉石相的液相率随温度升高的变化规律

Fig. 5　Variation of liquid phase ratios of different gangue phases with increasing temperature

质的炉料脉石相之间。综合之前的研究和热力学计算可知，由于不通过炉料之间的物理阻隔，交互作用只能发生在某一种炉料熔化发生的渣相扩散之后。熔化的渣相滴落至焦炭层的必要条件是炉料中的金属铁相熔化后熔渣与焦炭发生润湿行为，而与熔渣的液相率无关[8]。由此可见，在炉料中还原出的金属铁相熔化之前交互作用过分发展对熔滴性能和透气性是不利的。而交互作用过分抑制，一部分渣相无法熔化，可能会对矿石层的透气性有利。但这有可能使未熔融的脉石相颗粒进入滴落带，造成滴落带透气性变差，甚至造成高碱度堆积。由此可见交互作用对高炉冶炼过程具有两面性。根据渗入焦炭层的条件推测，交互作用大量发生时，即液相大量产生时的温度尽量接近金属铁相的熔化温度，这种状态既对矿石层透气性有利又不影响滴落后焦炭层的透气性。

目前，中国、日本和韩国等国家高炉炼铁使用的炉料结构大多数为高碱度烧结矿搭配酸性炉料，该炉料结构能够保证初渣良好形成，因此该炉料结构模式相对合理。欧洲和北美等国家则使用高比例熔剂型球团矿进行生产，熔渣的熔化曲线更接近于计算结果。根据研究结果可知，初渣的这种熔化方式对软熔带的透气性不利。欧洲和北美等国家的高炉入炉品位较高，虽然熔化过程液相率高，但滴落之前液相的绝对值比较低，因此高比例的高品位熔剂型球团生产同样可行。高品位熔剂型球团的低脉石相质量分数弥补了滴落之前液相率高的缺陷。近年来，中国的炼铁工作者更多致力于高比例球团冶炼模式的研发工作。基于交互作用的计算结果，配入高比例球团时必须保证高入炉品位，否则软熔带的成渣过程更趋近于 LM 曲线，滴落之前液相的绝对数量增加，从而给高炉冶炼带来困难。因此在传统高炉工艺条件下，受品位的限制，我国大比例使用球团矿或者使用自熔性烧结矿从初渣生成的角度出发是不合理的。

基于研究结果可知，高还原度可抑制酸性炉料液相的产生，交互作用受到抑制。由此可以推测，为了保证氧气高炉、富氢高炉等高还原势工艺条件下炉料更好地熔化和滴落，可以使初渣的熔化过程贴近 LM 曲线，而高还原势条件下高比例相对低品位的冶炼模式的可行性将比传统模式更高。

4　结　论

本文使用 FactSage 热力学计算软件对不同性质的炉料脉石相交互作用进行研究，并根据研究结果对不同工艺条件下的合理炉料结构进行辨析，得到如下主要结论：

(1) 由于成分不同，球团矿相比烧结矿，其脉石相液相生成路径比烧结矿多，球团矿脉石相比烧结矿的固相线温度低，相同温度下其液相率更高。

(2) FeO 组分的增加可使烧结矿和球团矿脉石相的液相由 CaO-SiO_2-FeO 体系产生，使两者都表现出随着 FeO 质量分数的增加，固相线温度降低、相同温度时液相率增加的特征。

(3) 计算结果表明，混合初渣的液相率高于

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

烧结矿和球团矿脉石相液相率的加权平均值，说明交互作用的发生会使额外的液相产生。

(4) 根据研究结果得到不同工艺条件下合理的炉料结构：当前工艺条件下，高比例高碱度烧结矿搭配酸性炉料的结构更加合理；未来氧气高炉和富氢高炉等高还原势冶炼条件下，可以考虑较低品位的自熔性炉料。

参考文献:

[1] 刘新亮,HONEYANDS T,O´DEA D,等. 软熔过程中烧结矿和块矿的交互作用[J]. 钢铁,2019,54(12):19-26.
LIU Xinliang,HONEYANDS T,O´DEA D,et al. Interaction between sinter and lump during softening and melting process[J]. Iron and Steel,2019,54(12):19-26.

[2] 刘迎立,郭文涛,薛庆国,等. 炉料软熔过程还原度对微观结构影响规律[J]. 中国科学:技术科学,2017,47(9):933-940.
LIU Yingli,GUO Wentao,XUE Qingguo,et al. Influence of reduction degree on the burden microstructure during the softening and melting process[J]. Scientia Sinica Tecnologica,2017,47(9):933-940.

[3] 陈龙,薛庆国,郭文涛,等. 氧气高炉块矿与烧结矿软熔过程交互作用[J]. 钢铁,2016,51(2):15-21.
CHEN Long,XUE Qingguo,GUO Wentao,et al. Interaction effect between lump and sinter under condition of oxygen blast furnace[J]. Iron and Steel,2016,51(2):15-21.

[4] 吴胜利,汪国俊,姜伟忠,等. 高炉内天然块矿与烧结矿高温交互反应研究[J]. 钢铁,2007,42(3):10-13.
WU Shengli,WANG Guoju,JIANG Weizhong,et al. Interaction between lump ore and sinter in BF[J]. Iron and Steel,2007,42(3):10-13.

[5] PAN Y,SHE X,WANG G,et al. Melting behavior and interaction of gangue phase of iron-containing burden[J]. ISIJ International,2019,59(7):1192-1197.

[6] BALE C W,CHARTRAND P,DEGTEROV S A,et al. FactSage thermochemical software and databases[J]. Calphad,2002,26(2):189-228.

[7] BALE C W,BéLISLE E,CHARTRAND P,et al. FactSage thermochemical software and databases:Recent developments[J]. Calphad,2009,33(2):295-311.

[8] BOWEN N L,SCHAIRER J F,POSNJAK E. The system CaO-FeO-SiO_2[J]. American Journal of Science,1933(26):193-284.

[9] UEDA S,KON T,MIKI T,et al. Softening,melting,and permeation phenomena of CaO-FeO-SiO_2 oxide on a coke bed[J]. ISIJ International,2015,55(10):2098-2104.

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