烧结

基于化学成分的铁矿粉烧结基础特性预测研究

李占国[1a]，张建良[1a]，刘征建[1a]，王耀祖[1b]，牛乐乐[1a]
（1. 北京科技大学 a. 冶金与生态工程学院；b. 人工智能研究院，北京 100083）

摘要：为改进对铁矿粉基础特性预测的加权平均估算方法，本文选取15种常用的烧结铁矿粉进行同化性和液相流动性试验，并进行热力学计算；进而采用Levenberg-Marquardt和通用全局优化算法对铁矿粉的基础特性值与化学成分分别进行一维和二维数学模型拟合；最后采用随机的混矿方案对模型预测结果进行验证。结果表明：最低同化温度－开始熔化温度以及液相流动性指数－有效液相量之间有着较好的吻合程度；二维数学模型的预测在Pearson相关系数上有着更优的相关性，且预测值的平均误差也显著低于一维数学模型。在一定数量的矿种范围内，基于化学成分的二维数学模型对混匀矿基础特性的预测可以认为是有效的。

关键词：烧结基础特性；二维数学模型；化学成分；预测
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)02－0038－08
doi：10.13403/j.sjqt.2022.02.022

Prediction research on basic properties of sintering based on chemical composition of iron ore powder

LI Zhanguo[1a], ZHANG Jianliang[1a], LIU Zhengjian[1a], WANG Yaozu[1b], NIU Lele[1a]
(1. *a. School of Metallurgical and Ecological Engineering; b. Institute of Artificial Intelligence, University of Science & Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to improve the weighted average estimation method for the basis properties of iron ore powder, 15 kinds of commonly used sintered iron ore powder are selected for assimilative and liquid phase mobility tests and thermodynamic calculations are conducted; then, Levenberg-Marquardt and generalized global optimization algorithms are used to fit one-and two-dimensional mathematical models for the basis properties values and chemical composition of iron ore powder, respectively; finally, the model prediction results are validated by using a randomized blending scheme. The results show that, the minimum assimilation temperature-onset melting temperature and the liquid fluidity index-effective liquid phase have a good agreement; the prediction of the two-dimensional mathematical model has a better Pearson correlation coefficient, and the average error of the predicted value is also significantly lower than that of the one-dimensional mathematical model. Within a certain range of minerals, the two-dimensional mathematical model based on chemical composition can be considered effective for predicting the basic properties of mixed ore.

Key words: basic properties of sintering; two-dimensional mathematical model; chemical composition; prediction

尽管高配比球团是合理炉料结构的发展趋势，但烧结矿仍将长期是中国高炉最主要的含铁炉料[1]。铁矿作为烧结生产最主要的原料，直接影响烧结矿的产、质量指标。烧结生产通常使用混合铁矿互相弥补单种铁矿在烧结特性上的不足[2]。烧结基础特性是当下评价铁矿热

收稿日期：2021－03－22；**修回日期**：2021－06－08
基金项目：广东省区域联合基金－青年基金项目(2020A1515111008)；中央高校基本科研业务费(06500170)
作者简介：李占国(1962—)，男，博士研究生，从事冶金环保、炼铁技术等方面的研究工作。
通讯作者：刘征建(1982—)，男，教授，从事烧结球团、高炉及非高炉炼铁等方面的研究。

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

态性能的最重要指标，因为它们可以表征烧结过程中铁矿的反应行为[3]。国内外诸多基于烧结基础特性的配矿研究都已证明[4-6]：将性能较差与较好的铁矿混合可以有效改善烧结矿的质量，降低生产成本。

近年来，国内外学者对烧结矿基础特性做了大量的研究，如：吴胜利教授[7]自提出基础特性概念之后，又进一步地研究了主要化学成分(SiO_2、Al_2O_3、MgO、烧损等)对不同类型铁矿同化性能的影响；YAO[8]基于铁矿的液相流动性，研究了烧结温度对液相形成速率和液相量的影响。但是，很少有人研究过如何通过铁矿本身来预测其烧结基础特性。此外，钢铁企业当下仍然大多使用加权平均法来计算用于烧结生产的混合铁矿的基本特性值。因此，有必要建立一个数学模型来预测铁矿粉的烧结基础特性值。

伊凤永等[9]基于化学成分建立了一维数学拟合模型来预测铁矿的基础特性，明确了主要化学成分对同化性和液相流动性的影响，并得到了通过铁矿 TFe、CaO、MgO、Al_2O_3 等成分值来预测同化性和液相流动性的数学公式，但该数学模型并未考虑不同化学成分之间的交互影响。本文则在其研究基础之上，通过测试烧结过程中常用的 15 种典型铁矿的同化性和液相流动性；并根据它们的化学组成和试验结果，使用 Levenberg-Marquardt 和通用全局最优化方法，拟合其烧结基础特性(同化性和液相流动性)与化学成分之间的数学关系，进而比较一维数学模型和考虑实际反应的二维数学模型的预测效果，以期实现对混匀矿烧结基础特性更为准确地预测，给烧结实际生产及智能配矿软件的优化提供参考。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验原料为 CaO 纯试剂和烧结常用的 15 种典型进口铁矿，铁矿的化学成分如表 1 所示。1#铁矿是来自东皮尔巴拉的澳大利亚赤铁矿；2#、4#铁矿是来自澳大利亚的含褐铁矿的半赤铁矿；3#、5#～9#铁矿是典型的澳大利亚褐铁矿，其 TFe、SiO_2、Al_2O_3 质量分数有所差异；10#～12#铁矿是淡水河谷开采的高品位巴西赤铁矿；13#铁矿则是来自塞拉利昂 Don Kerry 铁矿；14#铁矿是具有高 SiO_2 和低 Al_2O_3 质量分数的毛里塔尼亚赤铁矿；15#铁矿是南非赤铁矿。

表 1　铁矿粉的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table1　Main chemical composition and burning loss of iron ore powder　　%

矿粉编号	TFe	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	烧损
1#	61.73	0.07	4.69	0.10	2.64	3.87
2#	60.16	0.03	4.93	0.06	2.42	6.13
3#	60.87	0.04	4.26	0.07	3.06	4.91
4#	61.06	0.06	3.99	0.08	2.42	5.41
5#	60.23	0.08	5.28	0.07	2.27	4.80
6#	55.35	0.07	7.40	0.09	1.47	11.29
7#	57.47	0.08	5.74	0.08	2.96	8.69
8#	56.67	0.04	5.97	0.06	1.92	10.69
9#	56.22	0.18	6.44	0.06	3.37	8.82
10#	65.32	0.06	4.28	0.04	0.65	1.25
11#	65.57	0.03	1.56	0.05	1.40	2.96
12#	62.52	0.06	5.46	0.05	1.54	2.92
13#	55.65	0.05	3.14	0.03	6.58	9.28
14#	64.07	0.28	7.51	0.27	0.59	−0.75
15#	63.60	0.24	5.57	0.07	1.63	0.85

1.2　试验设备及方法

在几种烧结基础特性中，选择烧结生产最为关心的同化性和液体流动性进行研究。使用图 1 所示的微烧设备进行测试，试验前将所有原料在 105 ℃的烘箱中干燥 3 h，然后使用密封的破碎机将其研磨至小于 150 μm 的粒度水平。

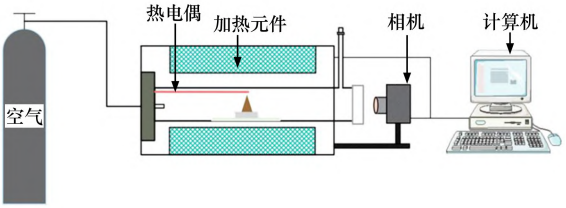


图 1　同化性试验所用的设备示意

Fig. 1　Schematic diagram of the equipment used in the assimilation experiment

(1) 同化性测试。采用定制模具将少量糊精润湿后的铁矿粉压制成三棱锥形，并用油压

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

制样机在15 MPa的压力下将2 g CaO试剂压制成直径为20 mm、高度为5 mm的圆柱薄片；随后，将制备好的三棱锥放置于CaO薄片之上，一起放在刚玉垫片上，将垫片和上述样品放入微烧结设备中。同化性试验的气氛为空气，气体流量设定为3 L/min，以保证炉膛内能够充分形成空气氧化性气氛，使液相生成反应得以良好进行。使用摄像机记录每个温度下的样品变化，并将图像传输到计算机保存。

采用三棱锥状铁矿开始同化形变的温度来表征同化性，即最低同化温度(Lowest Assimilation Temperature，LAT)。

(2) 液相流动性测试。在烧结过程中实际偏析的碱度为3.5～5.0，因此将铁矿粉和CaO纯试剂混合物的二元碱度选择为4.0。使用相同的油压制样机以15 MPa压力将1 g铁矿粉和CaO纯试剂的混合物压制成直径为8 mm，高度为5 mm的微型圆柱体，然后将该圆柱体样品放入快速升温微烧设备中，并按图2所示的加热曲线进行升温烧结，鉴于煤粉的燃烧温度大约为600 ℃，前4 min以最快升温速率升高到600 ℃，进而稍微放缓速率升高到1 280 ℃并恒温4 min以模拟矿粉停留在烧结燃烧带，随后快速冷却，用以模拟成品烧结矿在抽风作用下的冷却。实验气氛为空气，气体流量为3 L/min。在液体流动性的测试中，最高恒温段的实验温度设定为1 280 ℃。

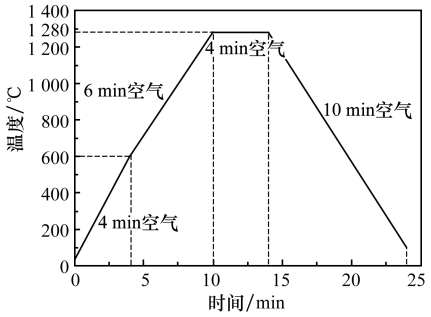


图2 液相流动性试验升温曲线

Fig. 2 Heating curve for liquid phase fluidity test

采用液相流动性指数(Liquid Fluidity Index，IFL)来表征铁矿的液体流动性，计算方法如式(1)所示。

$$Y_{IFL} = (S_{AT} - S_{OA})/S_{OA} \quad (1)$$

式中：Y_{IFL}为液相流动性指数；S_{OA}为圆柱样品的原始面积，mm^2；S_{AT}为测试后的面积，mm^2。

2 结果与讨论

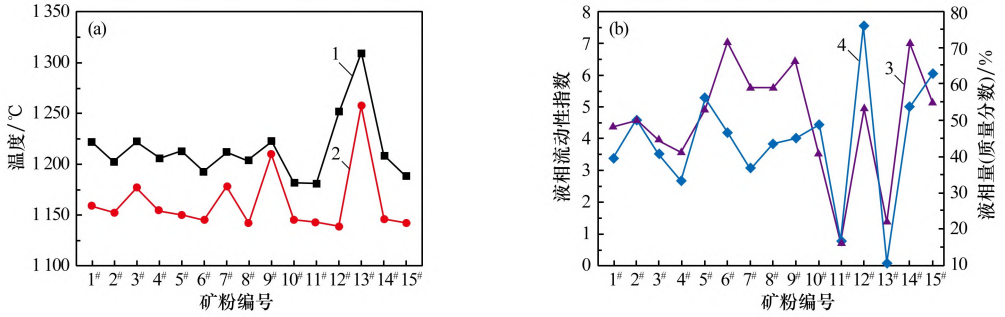
2.1 基础特性

最低同化温度(LAT)只是当三棱锥状铁矿样品由于液相的生成而略微形变时的温度，而形变时的液相反应程度并不同于化学意义上的液相形成温度。因此，本文使用热力学软件FactSage 6.4的Equilib模块计算15种铁矿和CaO反应的起始熔化温度[10]。计算结果与同化性试验结果如图3(a)所示。由图3(a)可见，15种铁矿的起始熔化温度与LAT趋势相同，但低于LAT，这意味着LAT是产生一定量液体的温度。LAT和起始熔化温度的相同趋势也表明，同化试验的结果是可信的，并且LAT可以有效地表征铁矿在烧结过程中形成液相的能力。

在这些铁矿中，13#铁矿由于Al_2O_3质量分数高而具有特别高的同化温度(1 310 ℃)，同化性较弱。相比之下，由于Al_2O_3质量分数低，两种巴西铁矿(10#、11#铁矿)具有良好的同化性(LAT分别为1 182、1 181 ℃)。这是因为根据如图4所示的热力学计算结果，增加Al_2O_3质量分数会增加$CaO-SiO_2-Al_2O_3$-10% FeO渣系的液相线温度[11-12]，因此在烧结过程中更难以生成低熔点液相。除13#铁矿外，其他铁矿的LAT均为1 150～1 250 ℃，由于它们不同成分的质量分数不同，因此难以分析单一组分对其同化性的影响。

铁矿的液相流动性(IFL)表征了CaO与铁矿反应形成液相的流动能力，除了黏性和张力，应该与有效液相量相关。因此，使用FactSage 6.4计算出15种铁矿和CaO纯试剂在1 280 ℃时混合物所产生的液相量。IF试验结果和热力学液相计算量如图3(b)所示。同样地，铁矿的液相流动性指数和计算出的液相量具有总体相似的变化趋势。由于所生成液相的黏度和表面张力的影响，这种趋势并不完全一致。

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



（a）同化性；（b）液相流动性

1—最低同化温度；2—FactSage 计算开始熔化温度；3—FactSage 计算液相量；4—液相流动性指数。

图 3　试验测定与 Factsage 热力学计算结果

Fig. 3　Test determination and Factsage thermodynamic calculation results

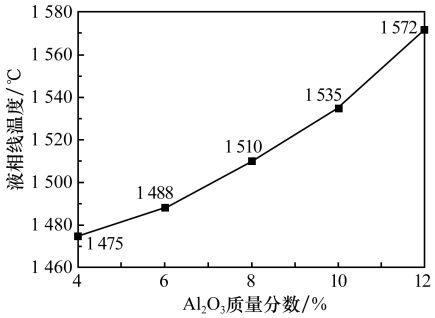


图 4　Al_2O_3 质量分数对 $CaO-SiO_2-Al_2O_3-10\%FeO$ 渣系液相线温度的影响

Fig. 4　Influence of Al_2O_3 content on the liquidus temperature of $CaO-SiO_2-Al_2O_3-10\%FeO$ slag system

这 15 种铁矿的液相流动性指数分布为0 ~ 8，相差较大。11#、13#铁矿由于具有较低的 SiO_2 质量分数而具有两个最低的液相流动性指数(分别为 0.78 和 0.08)。在一定的二元碱度条件下，向 SiO_2 质量分数低的铁矿中添加的 CaO 较少，因此液相量较少，液相的流动性也较差。12#铁矿具有最高的液相流动性指数，这是因为它具有较高的 SiO_2 质量分数和较低的 Al_2O_3 质量分数，从而在确保液相量的同时还降低了液相的形成温度。

2.2　数学模型拟合

前人研究已经表明，铁矿的化学成分与烧结基础特性之间存在确切的关系[13]。因而，可以通过化学成分形成对烧结基础特性的预测，即在化学成分和烧结基础特性之间建立数学模型。在数学模型中，选择与烧结过程液相生成最为直接相关的 5 种成分(Fe，SiO_2，CaO，MgO，Al_2O_3)作为输入参数；同化性模型和液相流动性模型的输出分别为最低同化温度(LAT)和液相流动性指数(IFL)。用于拟合数学模型的优化算法是 Levenberg-Marquardt 和通用全局优化算法[14-15]。收敛性判断的索引设置为 1.00×10^{-10}，最大迭代数设置为 1 000。

2.2.1　一维数学模型

伊凤永等[9]研究表明，通过多元线性回归，可以将这 15 种铁矿的化学成分和烧结基础特性数据用于拟合一维数学模型。式(2)、(3)分别列出了同化性和液相流动性一维数学模型的基本组成。

$$Y_{LAT}=a_1w_1+a_2w_2+a_3w_3+a_4w_4+a_5w_5+a_6 \tag{2}$$

$$Y_{IFL}=b_1w_1+b_2w_2+b_3w_3+b_4w_4+b_5w_5+b_6 \tag{3}$$

式中：Y_{LAT}、Y_{IFL} 分别为铁矿的最低同化温度(℃)和液相流动性指数；w_1 表示 TFe 质量分数,%；w_2 ~ w_5 分别表示 SiO_2、CaO、MgO 和 Al_2O_3 的质量分数,%。公式拟合相关参数如表 2 所示。

2.2.2　二维数学模型

实际上，铁矿和 CaO 之间并非简单地产生几个独立反应，其反应会对其他组分之间的反应产生影响，也就是反应之间存在着交互作用。Fe_2O_3 和 SiO_2 在烧结过程中会与 5 种与液、渣相生成有关的组分发生反应，而CaO、MgO 和

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

表2 式(2)、(3)拟合的相关参数

Table 2 Relevant parameters of Eq. 2 and Eq. 3 fitting

项目	a_i	b_i
1	7.969 864 370 264 850	0.748 339 320 273 425
2	17.276 877 877 692 800	2.192 223 942 131 740
3	-176.566 666 830 387 000	-8.080 793 259 316 330
4	38.907 894 098 635 700	-22.294 473 731 497 500
5	34.170 827 956 753 500	0.658 570 218 519 130
6	578.619 581 428 820 000	-51.507 501 704 413 100
R^2	0.795 5	0.906 8
迭代次数	28	16

注：项目列第1~6行序号代表变量 a_i、b_i 的下标值。

Al_2O_3 之间难以发生反应[16-17]。因此，考虑在数学模型中加入交互作用项，以尽可能消除交互作用对预测值的影响。考虑这些相互干扰作用，本文建立15种铁矿粉的同化性和液相流动性的二维数学模型。模型公式如式(4)、(5)所示。

$$Y_{LAT} = c_1w_1 + c_2w_2 + c_3w_3 + c_4w_4 + c_5w_5 + c_6w_1w_2 + c_7w_1w_3 + c_8w_1w_4 + c_9w_1w_5 + c_{10}w_2w_3 + c_{11}w_2w_4 + c_{12}w_2w_5 + c_{13} \quad (4)$$

$$Y_{IFL} = d_1w_1 + d_2w_2 + d_3w_3 + d_4w_4 + d_5w_5 + d_6w_1w_2 + d_7w_1w_3 + d_8w_1w_4 + d_9w_1w_5 + d_{10}w_2w_3 + d_{11}w_2w_4 + d_{12}w_2w_5 + c_{13} \quad (5)$$

式中：w_1w_2 表示 Fe_2O_3 与 SiO_2 反应产生的交互干扰作用；w_1w_3 代表 Fe_2O_3 与 CaO 反应产生的交互干扰作用；w_1w_4 代表 Fe_2O_3 与 MgO 反应产生的交互干扰作用；w_1w_5 代表 Fe_2O_3 与 Al_2O_3 反应产生的交互干扰作用；w_2w_3 代表 SiO_2 和 CaO 反应产生的交互干扰作用；w_2w_4 代表 SiO_2 和 MgO 反应产生的交互干扰作用；w_2w_5 表示 SiO_2 和 Al_2O_3 反应产生的交互干扰作用；模型拟合的相关参数如表3所示。

表3 式(4)、(5)拟合的相关参数值

Table 3 Relevant parameters of Eq. 4 and Eq. 5 fitting

项目	c_i	d_i
1	7.216 286 664 102 410	-0.739 602 913 094 369
2	174.653 405 178 287 000	-2.246 355 221 581 300
3	6 266.872 563 213 790 000	430.596 128 357 702 000
4	-16 659.589 855 124 500 000	-852.570 037 263 822 000
5	-54.606 834 179 423 600	-25.121 651 216 241 800
6	-2.243 221 240 790 310	0.044 145 475 357 522
7	-75.782 986 247 403 700	-4.677 839 345 808 900
8	245.285 781 078 118 000	9.402 862 609 475 140
9	1.921 723 605 027 570	0.428 283 149 680 297
10	-315.733 674 706 943 000	-24.900 373 380 018 100
11	229.499 784 935 861 000	39.304 713 016 282 000
12	-6.707 237 105 361 380	0.023 675 472 334 272
13	561.700 031 169 799 000	50.112 202 598 367 500
R^2	0.921 1	0.984 4
迭代次数	36	22

注：项目列第1~13行序号代表变量 c_i、d_i 的下标值。

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

从数学层面上来说，变量参数的绝对值可以代表其对输出结果的影响权重。由于铁矿中 CaO 和 MgO 质量分数一般很小，但对基础特性值的影响权重较大，而铁品位虽然质量分数很高，但影响权重较低。因此，铁品位较小的波动不会对铁矿烧结基础特性产生较大影响，而由交互反应带来的干扰作用，如在高温下铁矿内部发生的化学反应[式(6)～(9)]都会对烧结基础特性产生显著影响。

$$Fe_2O_3 + MgO \rightarrow MgFe_2O_4 \quad (6)$$

$$Fe_2O_3 + xCaO \rightarrow xCaO \cdot Fe_2O_3 \quad (7)$$

$$SiO_2 + MgO \rightarrow MgSiO_3 \quad (8)$$

$$SiO_2 + xCaO \rightarrow xCaO \cdot SiO_2 \quad (9)$$

2.3　模型验证及分析

为了验证数学模型正确性，根据实际烧结工艺设计试验，设定混合矿条件：铁品位为 58.0%～65.0%，SiO_2 质量分数为 4.2%～5.7%，Al_2O_3 质量分数为 1.0%～3.5%；使用计算机程序随机生成分别含有 2、3、4、5、6、7 种铁矿的混匀方案(分别对应编号为 S-1～S-6 的 6 种混矿方案)，并根据方案，将粒径小于 150 μm 的铁矿混合在搅拌机中，随后检测这 6 种混匀矿的同化性和液体流动性。验证试验的铁矿混合方案如表 4 所示。

图 5 是上述 6 种混匀矿分别使用一维、二维数学模型的计算与试验结果比较。对拟合数学模型的计算、试验值分别采用 Pearson 相关性和实际－预测的平均误差绝对值进行比较，同时结合统计 p 值观察相关性。Pearson 相关性系数越接近于 1，则表示计算值与试验值越相关；而 p 值越接近 0，则表示相关性结果的偶然性越低，越可信；平均误差绝对值越小，则预测准确性越高。

由图 5 可以看出：一维拟合数学模型对同化性预测的 Pearson 相关系数为 0.723 07，对液相流动性指数预测的 Pearson 相关系数仅为 0.177 74；而二维拟合数学模型对同化性预测的 Pearson 相关系数为 0.702 49，对液相流动性预测的 Pearson 相关系数达到了 0.933 34，p 值也仅为 0.006 52，预测的相关性和可信度都很高；再预测平均误差绝对值方面，二维数学拟合模型有着显著更优的准确性，在最低同化温度和液相流动性指数预测的误差绝对值分别为 9.33 ℃和 0.23，低于一维数学模型的 16 ℃和 0.59。

表 4　模型验证试验混矿方案(质量分数)

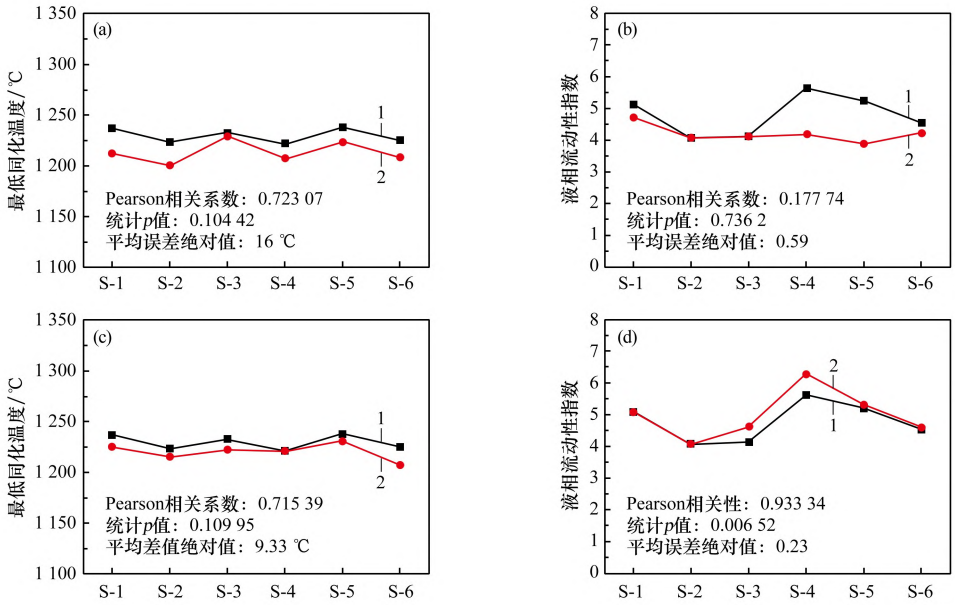
Table 4　Blending schemes for model validation　%

矿粉编号	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6
1#	—	42.1	—	—	12.5	—
2#	56.1	—	—	—	15.0	—
3#	43.9	11.8	—	—	—	—
4#	—	—	—	—	20.0	—
5#	—	—	40.5	42.8	—	30.0
6#	—	—	—	—	20.0	—
7#	—	—	—	—	—	10.0
8#	—	—	10.0	—	15.0	—
9#	—	—	40.0	—	—	21.4
10#	—	46.1	—	8.0	—	10.0
11#	—	—	—	20.2	—	13.1
12#	—	—	—	—	17.5	—
13#	—	—	9.5	—	—	—
14#	—	—	—	18.9	—	5.5
15#	—	—	—	10.1	—	10.0

综合来看，在预测表现上，一维模型对同化性的预测值与试验值的相关性与二维模型相近，但预测误差较大；液相流动性指数预测则无论是相关性还是平均预测误差都不如二维模型。因而二维拟合数学模型比一维模型具有更好的拟合效果，并且对混匀矿同化性和液相流动性的预测结果更接近于试验值。

一维拟合数学模型的一些预测数据结果可能非常接近，但是当组成数据的多样性增加时，其很难准确地进行预测。此外，应注意的是，这种拟合的数学模型主要针对铁矿烧结常用的赤铁矿和褐铁矿。但是，当下由于国际铁矿贸易市场的波动以及本地资源的高效利用，磁铁矿精粉在烧结中的使用也较为广泛。因此，下一步研究可以扩展铁矿数据库，进行相应的数学拟合，以用于更具有针对性的铁矿基础特性

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



(a)、(b)一维模型；(c)、(d)二维模型

1—试验结果；2—拟合模型计算结果。

图 5 试验结果与数学模型计算结果的比较分析

Fig. 5 Comparative analysis of experimental results and calculated results of models

预测。尤其对于使用矿种相对固定，波动较小的钢铁企业来说，基于常用的铁矿粉化学成分进行二维数学模型的拟合能够较为有效地预测混匀矿的基础特性值。

3 结 论

本文旨在于基于铁矿粉化学成分建立预测其烧结基础特性值的拟合数学模型，在此过程中进一步分析化学成分对基础特性值的影响，并比较分析一维数学模型和考虑反应交互作用的二维数学模型预测的准确性，得到以下结论：

(1) 铁矿的化学成分组成会影响其开始熔化温度和烧结过程中产生的有效液相量，进而影响着同化性和液相流动性。

(2) 铁矿中两种成分之间的反应会对其他反应产生交互干扰作用，从而对烧结基础特性也产生影响。因而，化学成分对烧结基础特性的影响是多因素交互作用的，考虑到这种相互作用，基于 Levenberg-Marquardt 和通用全局优化算法拟合的二维数学模型可以比一维数学模型更有效地预测混合矿的烧结基础特性值，其预测值与试验值的相关性更强，预测平均误差更低，对液相流动性指数的预测也比最低同化温度的预测更为精确。

(3) 二维数学模型可以更为有效地预测烧结常用的典型赤铁矿和褐铁矿的同化性和液相流动性，对于指导烧结生产具有一定的意义。对于更多类型的铁矿，可以基于此方法建立更大的数据库以扩大预测范围。二维数学模型对一定数量矿种范围内混匀矿的基础特性预测是一种比加权平均和一维模型更为精准且简单易实现的方法。

参考文献：

[1] 陈伟,武鹏飞,王宝祥,等. 烧结－高炉炼铁全过程炉料结构智能优化系统[J]. 烧结球团,2020,45(5):8－13.
CHEN Wei, WU Pengfei, WANG Baoxiang, et al. Intelligent optimization system of burden structure in the whole process of sintering-blast furnace iron-making[J]. Sintering and Pelletizing,2020,55(8):56－61.

[2] 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(2):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(2):26－30.

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

[3] 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. New concept of sintering basic characteristics of iron ore[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2002,24(3):254 - 257.

[4] WU S,OLIVEIRA D,DAI Y,et al. Ore-blending optimization model for sintering process based on characteristics of iron ores [J]. International Journal of Minerals,Metallurgy,and Materials,2012,19(3):217 - 224.

[5] OLIVEIRA D,WU S,DAI Y,et al. Sintering properties and optimal blending schemes of iron ores[J]. Journal of iron and steel research,international,2012,19(6):1 - 5.

[6] LIU D,ZHANG J,LIU Z,et al. Effects of iron sand ratios on the basic characteristics of vanadium titanium mixed ores[J]. JOM,2016,68(9):2418 - 2424.

[7] WU S,ZHANG G,CHEN S,et al. Influencing factors and effects of assimilation characteristic of iron ores in sintering process[J]. ISIJ international,2014,54(3):582 - 588.

[8] YAO L,REN S,WANG X,et al. Study on liquid phase formation and fluidity of iron ores[J]. Metallurgical Research & Technology,2017,114(2):204.

[9] 伊凤永,李福民,孙恺,等. 混合矿烧结基础性能与化学成分间的关系[J]. 烧结球团,2013,38(2):1 - 5.
YI Fengyong,LI Fumin,SUN Kai,et al. Relationship between basic sintering properties and chemical compositions of mixed iron ores fines[J]. Sintering and Pelletizing,2013,38(2):1 - 5.

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

[11] 王喆,张建良,左海滨,等. Al_2O_3 质量分数对高碱度烧结矿软熔滴落性能影响[J]. 钢铁,2015,50(7):20 - 25.
WANG Zhe,ZHANG Jianliang,ZUO Haibin,et al. Influence of Al_2O_3 content on softening-melting property of high basicity sinter[J]. Iron and Steel,2015,50(7):20 - 25.

[12] 牛乐乐,刘征建,张建良,等. 铁矿粉矿物组成对烧结矿冶金性能的影响[J]. 钢铁,2019,54(9):27 - 32.
NIU Lele,LIU Zhengjian,ZHANG Jianliang,et al. Effect of mineral composition of iron ore on metallurgical properties of sinter[J]. Iron and Steel,2019,54(9):27 - 32.

[13] 李和平,吴胜利,苏博. SiO_2 质量分数对铁矿粉液相特性及固结强度的影响[J]. 烧结球团,2019,44(5):23 - 28.
LI Heping,WU Shengli,SU Bo. Effect of SiO_2 mass fraction on the liquid phase characteristic and concretion strength of iron ore powder[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(5):23 - 28.

[14] MORÉ J J. The Levenberg-Marquardt algorithm:implementation and theory[M]//Numerical analysis. Berlin:Springer,1978:105 - 116.

[15] BIRBIL S,FANG S C,SHEU R L. On the convergence of a population-based global optimization algorithm[J]. Journal of global optimization,2004,30(2 - 3):301 - 318.

[16] SCARLETT N V Y,POWNCEBY M I,MADSEN I C,et al. Reaction sequences in the formation of silico-ferrites of calcium and aluminum in iron ore sinter[J]. Metallurgical and materials transactions B,2004,35(5):929 - 936.

[17] YANG W,RYU C,CHOI S,et al. Modeling of combustion and heat transfer in an iron ore sintering bed with considerations of multiple solid phases[J]. ISIJ international,2004,44(3):492 - 499.

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