熔剂性球团生球性能预测及优化模型研究

刘卫星[1a,1b]，陈太龙[1b,1c]，付之珍[1b,1c]，肖 洪[2]，李 杰[1b]

（1. 华北理工大学 a. 综合测试分析中心；b. 铁矿石优选与铁前工艺智能化河北省工程研究中心；
c. 理学院，河北 唐山 063009；2. 唐山钢铁集团有限公司，河北 唐山 063009）

摘要： 本文采用造球试验，研究了碱度（R）、$w(SiO_2)$、$w(MgO)$ 对熔剂性球团成球率、生球爆裂温度、抗压强度、落下强度的影响规律，并基于 BP 神经网络建立了生球性能预测优化模型。研究结果表明：制备熔剂性球团时，R 控制在 0.6～1.4 之间、$w(SiO_2)$ 控制在 3.5%～5.0% 之间、$w(MgO)$ 控制在 1.8%～2.6% 之间，造球的成球率均在 90% 以上；混合料中细粒级部分占比的增多会使生球爆裂温度升高、抗压强度与落下强度均先增大后减小；模型预测造球成球率、生球爆裂温度、抗压强度、落下强度的平均绝对百分比误差（MAPE）分别为 2.64%、5.09%、5.75%、11.19%，预测精准度能够满足冶金行业预测误差要求，可实现生球性能的精准预测；试验研究结合模型预测得出，当混合料的碱度为 1.0、$w(SiO_2)$ 为 5.5%、$w(MgO)$ 为 1.8% 时生球的各项性能最佳。

关键词： 熔剂性球团；成球率；爆裂温度；强度；BP 神经网络

中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)03－0091－08

doi： 10.13403/j.sjqt.2023.03.045

Research on prediction and optimization model of fresh pellet performance for fluxed pellets

LIU Weixing[1a,1b], CHEN Tailong[1b,1c], FU Zhizhen[1b,1c], XIAO Hong[2], LI Jie[1b]

(1. a. Comprehensive Test and Analysis Center; b. Hebei Engineering Research Center of Iron Ore Optimization and Iron Pre-Process Intelligence; c. Faculty of Science, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, Hebei, China; 2. Tangshan Iron and Steel Group Co., Ltd., Tangshan 063009, Hebei, China)

Abstract: The influence of alkalinity (R), $w(SiO_2)$ and $w(MgO)$ on the granulation ratio, fresh pellets decrepitation temperature, compressive strength and falling strength of the fluxed pellets is studied by a pelletizing experiment, and a prediction and optimization model of the fresh pellet performance is established based on the BP neural network. The results show that, when preparing fluxed pellets, R is controlled between 0.6～1.4, $w(SiO_2)$ is controlled between 3.5%～5.0%, $w(MgO)$ is controlled between 1.8%～2.6%, and the resulting granulation ratio is above 90%. The increase of the proportion of fine-grained parts in the compound will increase the decrepitation temperature of the fresh pellets, increase the compressive strength first and then decrease, and increase and then decrease the falling strength. The average absolute percentage errors (MAPE) of the model predicting the spherical granulation ratio, fresh pellets decrepitation temperature, compressive strength and falling strength are 2.64%, 5.09%, 5.75% and 11.19%, respectively, and the prediction accuracy could meet the requirements of the prediction error of the metallurgical industry and realize the accurate prediction of the performance of the fresh pellets. Combined with experimental research and model predictions, it is concluded that the performance of the fresh pellets is the best when the alkalinity of the compound is 1.0, $w(SiO_2)$ is 5.5%, and $w(MgO)$ is 1.8%.

收稿日期： 2022－06－12；**修回日期：** 2022－07－22

基金项目： 国家自然科学基金资助项目（51974131）；河北省杰出青年科学基金资助项目（E2020209082）。

作者简介： 刘卫星（1985—），男，副教授，从事烧结球团智能制造、矿物结构特征定量化表征、钢铁大数据深度挖掘及建模、冶金资源高效利用等方面的研究。

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

Key words: fluxed pellets; granulation ratio; decrepitation temperature; strength; BP neural networks

随着我国经济高速发展和科技进步，钢铁行业进入了减量去产能新阶段。当前，中国钢铁的主要发展目标是减少过剩产能、推进钢铁产业“九化”协同，提高在全球钢铁行业中的地位[1]。另外，国家提出“碳达峰碳中和”战略，钢铁企业积极响应国家政策，加快产业结构调整[2]。而优化高炉炉料结构，提高球团矿入炉比例，对实现钢铁产业节能降耗、绿色发展有重要意义[3]。由此，国内外众多学者对熔剂性球团开展了大量研究工作。

乔波等[4]研究发现，在智利精矿比例固定的前提下，分别配加澳精矿、乌精矿、秘鲁精矿3种铁精矿，混合配料后的双矿粉生球抗压强度、成球性明显比单种矿粉生球抗压强度、成球性高。李杰等[5]研究了$w(SiO_2)$对镁质熔剂性球团质量的影响，结果表明$w(SiO_2)$增加有利于成球率、爆裂温度的升高，而生球落下强度以及抗压强度略有降低。韩阳等[6]通过建立球团原料成分，包括Si、Mg、Ca与焙烧后的球团抗压强度之间的定量关系，实现了在球团配比可调控的前提下预测熟球的抗压强度。另外，还有许多学者研究发现，$w(MgO)$对氧化性球团或熔剂性球团冶金性能具有促进效果，但添加量需要控制，不宜过多[7-10]。熔剂性球团制备工艺的研究虽已十分成熟，但如何利用数学模型预测球团的相关性能还需加大研究。鉴于尹学等[11]建立GA-PSO-BP神经网络预测模型，预测烧结终点位置，均方根误差为0.003、平均绝对误差为0.001，预测效果较为良好。鉴于此，本文在采用造球试验研究造球混合料的碱度(R)、$w(SiO_2)$、$w(MgO)$、细粒级占比等因素对成球率、生球爆裂温度、抗压强度、落下强度影响的基础上，借助数学建模方法构建影响因素[R、$w(SiO_2)$、$w(MgO)$、细粒级占比]与生球性能(成球率、生球爆裂温度、抗压强度、落下强度)的优化预测模型，以小比例熔剂性球团矿的测试结果进行反复试验改进，以期为实现大数量熔剂性球团性能的精准预测提供依据。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验用造球原料来自唐山地区某钢厂，铁精粉、熔剂及黏结剂的主要化学成分及其物理化学性能见表1~5。

由表1~4中数据可知，庙沟粉、研山粉为高硅磁铁精粉，伊朗粉为低硅磁铁精粉。庙沟粉、研山粉粒度明显比伊朗粉细，其他杂质质量分数少，3种磁铁精粉中0.074 mm以下的颗粒占比分别为83.6%、77.7%、43.80%。钙镁熔剂包括石灰石粉、轻烧镁粉，二者粒度中≤0.074 mm的占比均较高，可满足制备球团的要求，这为研究熔剂性磁铁矿球团提供了良好的原料条件。

表1 原料主要化学成分及烧损(质量分数)

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

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	Zn	Mn	Cu	Cr	Ni	烧损
庙沟粉	66.56	27.98	5.46	0.25	0.56	1.38	0.06	0.05	0.005 1	0.05	0.002	0.005	0.002	-3.06
研山粉	66.45	24.56	6.31	0.15	0.26	0.84	0.07	0.01	0.001 0	0.06	0.001	0.024	0.001	-2.48
伊朗粉	66.38	24.78	3.16	0.73	0.69	0.58	0.12	0.16	0.056 0	—	—	—	—	-2.41
石灰石	—	—	3.22	49.92	0.54	1.16	—	—	—	—	—	—	—	44.04
轻烧镁粉	—	—	5.92	1.70	83.64	0.99	—	—	—	—	—	—	—	6.96
膨润土	—	—	56.23	4.59	2.56	12.12	—	—	—	—	—	—	—	11.92

表2 膨润土物理性能及烧损

Table 2 Physical properties and burning loss of bentonite

吸蓝量/(mol·g^{-1})	膨胀指数/%	胶质价/[mL·(15 g)$^{-1}$]	质量分数/%		
			蒙脱石	水分	烧损
27.85	19.67	335.00	63.00	15.00	18.11

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

表 3　原料的粒度组成(质量分数)

Table 3　Particle size composition of raw materials　　%

原料名称	[0.015,1.00) mm	[0.074,0.015) mm	[0.045,0.074) mm	[0,0.045) mm	[0,0.074) mm
庙沟粉	1.5	14.9	69.9	13.8	83.7
研山粉	0.6	21.7	58.0	19.7	77.7
伊朗粉	3.9	52.3	40.7	3.1	43.8
石灰石	1.4	81.4	13.4	3.8	17.2
轻烧镁粉	0.1	41.4	48.8	9.7	58.5
膨润土	0.0	5.6	21.8	72.6	94.4

表 4　铁矿粉物相组成(质量分数)

Table 4　Phase composition of iron ore powder　　%

铁矿粉	MFe	CFe	SFe	OFe	SiFe
庙沟粉	65.46	0.085	0.030	0.44	0.25
研山粉	63.62	0.170	0.340	1.93	0.40
伊朗粉	63.15	0.180	0.060	2.90	0.30

注: MFe 为磁铁矿，CFe 为碳酸铁，SFe 为硫化铁，OFe 为赤褐铁，SiFe 为硅酸铁。

此外，由表 5 中数据可知，所有造球原料的分子水平均分布在 9% 左右。毛细水质量分数从高到低分别是石灰石粉、白云石粉、庙沟粉、研山粉和伊朗粉。膨润土与水接触时，由于亲水性较强且内部会形成胶状物质，阻碍持续吸水，所以不能准确测量出膨润土的最大毛细水质量分数。铁矿粉的毛细水迁移速率明显高于熔剂，其中研山粉的毛细水迁移速率最高、庙沟粉次之、伊朗粉最低。两种熔剂的毛细水迁移速率差别不明显。从单种矿粉来看，其成球性指数都较高，均适合造球。

表 5　原料水分测定

Table 5　Raw material moisture measurement

原料名称	最大分子水/%	最大毛细水/%	毛细水迁移速率/(mm·min^{-1})	成球性指数/%
研山粉	9.26	18.73	7.30	98.00
庙沟粉	9.27	18.96	6.90	96.00
伊朗粉	8.68	17.67	6.50	94.00
轻烧镁粉	8.89	23.84	0.99	—
石灰石	9.71	24.62	0.87	—
膨润土	10.00	—	—	—

1.2　试验方法

试验一共分为两个部分，第一部分是使用铁矿粉造球及其生球性能检测，第二部分主要融合数据处理以及预测模型，侧重点各不相同。

1.2.1　铁矿粉造球

采用∅500 mm×150 mm 圆盘造球机进行造球实验，并进行生球落下强度、抗压强度、爆裂温度、成球性指数等相关性能检测，具体测定方法可参考文献[12]。

1.2.2　数据处理及生球预测模型

(1) 造球混合料粒度数据处理。为研究混合料中细粒级占比对生球性能的影响，对不同 $w(SiO_2)$、R、$w(MgO)$ 的造球混合料粒度数据进行处理，粒度计算公式如式(1)所示。

$$z_j=\sum_{i=1}^{6}a_i\cdot b_{ji}\quad(j=1,2,\cdots,15)\tag{1}$$

式中，设 a_i 为第 i 种原料粒度小于 0.074 mm 所占的质量分数，%；其中，$i=1$、2、…、6。b_{ji} 为第 j 个制备条件下第 i 种原料在调节生球制备过程中的百分占比；z_j 为在第 j 个制备条件下粒度小于 0.074 mm 混合料的质量分数，z_j 在 $j=1$、2、…、15(其分别表示：R 为 1.0、MgO 质量分数为 1.8% 时，SiO_2 质量分数为 3.5%、4.0%、4.5%、5.0%、5.5%；SiO_2 质量分数为 5.5%、MgO 质量分数为 1.8% 时，R 为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4；SiO_2 质量分数为 5.5%、R 为 1.0 时，MgO 质量分数为 1.8%、2.0%、2.2%、2.4%、2.6% 共 15 个制备条件)。

(2) 数据优化扩增方法。由于造球试验数据量有限，但是在数据建模及模型训练过程中需要大量数据训练、验证和测试模型，需要将已有的试验数据进行合理化扩增优化，对每组试验数据产生符合高斯分布的随机数据，扩增公式如式(2)所示，扩增后的原始数据成正态分布[13]。

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{(-x^2/2)}\tag{2}$$

公式(2)为正态分布概率密度函数，式中：$f(x)$ 为随机变量 x 的频数；x 为随机变量的取值

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

(指已有造球试验数据)。

(3) 建模方法及原理。研究中采用BP神经网络方法建模，分析R、$w(SiO_2)$、$w(MgO)$、混合料中粒度小于0.074 mm的质量分数对生球成球率、抗压强度、落下强度、爆裂温度的影响规律。因此，定义自变量碱度为x_1、$w(SiO_2)$为x_2、$w(MgO)$为x_3、混合料中粒度小于0.074 mm的质量分数为x_4，生球成球率为y_1、爆裂温度为y_2、抗压强度为y_3、落下强度为y_4，模型结构如图1所示。

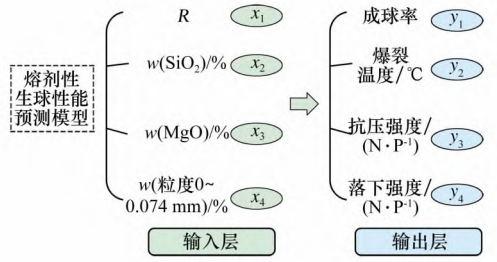


图1 熔剂性生球性能预测模型

Fig. 1 Prediction model of fluxed green pellet properties

生球性能预测及优化模型共建立了3层的BP神经网络，根据经验公式将隐含层节点数在1~20之间遍历，其中，隐含层节点的转移函数选择*logsig*，输出层节点转移函数选择*purelin*，训练函数选择*trainbr*，如式(4)所示。

$$\begin{cases} m = \sqrt{n+l} + \alpha \\ m = \log_2 n \\ n = \sqrt{nl} \end{cases} \tag{3}$$

式中：m表示隐含层节点数，无量纲；n表示输入层节点数，无量纲；l表示输出层节点数，无量纲；α表示1~10之间的常数。

1.3 试验方案

试样采用单因素变量法进行研究，R、$w(SiO_2)$、$w(MgO)$为自变量，生球成球率、抗压强度、落下强度及爆裂温度为因变量，具体配料方案见表6。

表6 试验配料方案

Table 6 Batching scheme of the experiment

编号	R	质量分数/%							
		$w(SiO_2)$	$w(MgO)$	研山粉	庙沟粉	伊朗粉	轻烧镁粉	石灰石	膨润土
1	0.6	5.0	1.8	10.0	71.4	8.3	8.0	1.6	0.7
2	0.8	5.0	1.8	10.0	69.4	8.3	7.8	3.8	0.7
3	1.0	5.0	1.8	10.0	67.4	8.3	7.6	6.0	0.7
4	1.2	5.0	1.8	10.0	65.5	8.3	7.4	8.1	0.7
5	1.4	5.0	1.8	10.0	63.6	8.3	7.2	10.2	0.7
6	1.0	3.5	1.8	10.0	27.8	53.1	4.8	3.6	0.7
7	1.0	4.0	1.8	10.0	37.9	41.7	5.5	4.2	0.7
8	1.0	4.5	1.8	10.0	47.9	30.4	6.2	4.8	0.7
9	1.0	5.5	1.8	10.0	67.4	8.3	7.6	6.0	0.7
10	1.0	5.0	2.0	10.0	67.3	8.2	6.6	6.6	0.7
11	1.0	5.0	2.2	10.0	67.1	8.0	7.6	6.0	0.7
12	1.0	5.0	2.4	10.0	67.0	7.8	8.6	5.4	0.7
13	1.0	5.0	2.6	10.0	66.9	7.5	9.6	4.8	0.7

2 结果与分析

2.1 生球性能测试结果分析

按照上述试验方案进行造球试验并测定成球率、生球抗压强度与落下强度、爆裂温度等性能，结果见表7。

由表7数据可知，随着混合料R提高，成球率提高，且均在94%左右；混合料中细粒级部分增多，生球密度增大球团表层的拉应力超过极限抗拉强度，爆裂温度降低。并且随R升高，生球抗压强度和落下强度先上升后下降，在1.0时达到最大值为14.71 N/P。因为当R为1.0时，混合料的毛细水迁移速率达到最大值，毛细水迁移速率最大，造球时混合料内部提供的分子黏结力和毛细力最高，生球的抗压强度和落下强度最大。

同时，随着$w(SiO_2)$提高，成球率提高，且

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

表 7　生球性能数据

Table 7　Green pellets performance data

编号	w(<0.074 mm)/%	成球率/%	爆裂温度/℃	抗压强度/(N·P^{-1})	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]
1	76.71	93.70	502	11.37	2.91
2	75.30	94.60	447	13.72	3.02
3	73.60	94.20	405	14.71	3.95
4	72.55	94.50	402	14.01	3.15
5	71.20	95.20	391	11.76	2.86
6	58.36	93.50	530	10.52	3.23
7	62.32	92.10	480	11.93	3.32
8	66.24	94.90	432	12.27	3.96
9	70.09	91.60	431	13.12	3.74
10	73.28	93.40	421	12.05	3.27
11	73.51	91.20	452	9.11	3.11
12	73.82	92.70	476	9.02	2.93
13	74.09	93.10	487	9.21	2.32

均在 90% 以上，爆裂温度降低。结合原料的粒度组成，w(SiO_2) 升高混合料中细粒级部分增加，生球密度增大；高温条件下，生球表面水分蒸发比中心快，收缩量大，球团表层的拉应力超过极限抗拉强度，球团破裂导致爆裂温度降低。随着 w(SiO_2) 升高，混合料中细粒级部分的增加，毛细管数量增加；造球过程中混合料内部提供的分子黏结力和毛细力增大，生球抗压强度与落下强度提高。

此外，当 w(MgO) 为 1.8% 时，成球率最高为 94.2%；当 w(MgO) 在 2.0%~2.6% 范围内变化时，w(MgO) 升高，混合料的毛细水迁移速率降低，水分在球团内部的迁移速度降低，不利用母球的形成和长大，成球率为 93% 左右。所以当 w(MgO) 为 1.8% 时，成球率最高。随着 w(MgO) 升高，混合料中粗粒度部分增加，球团结构更加松散，致密度降低，高温条件下，水分蒸发排出更加顺畅，球团内外的蒸汽压差变小，使爆裂温度提高。随着 w(MgO) 升高，混合料中细粒级部分减少，毛细管数量减少，毛细水迁移速率变小，造球时混合料内部提供的分子黏结力和毛细力降低，抗压强度降低；落下强度先小幅度升高后降低，在 w(MgO) 为 2.0% 时达到最大值。

2.1.1　数据样本集

经过数据扩增后，共有 3015 组数据用于模型分析，扩增后的数据(部分)见表 8。扩增后的数据按照碱度 R 的值升序排列，结果保留 2 位小数。由于数据扩增存在随机性，基于高斯分布扩增后的数据集精度最高达到小数点后 15 位，为保证数据模型训练的有效性，在模型训练过程中使用的是高精度数据。

表 8　部分扩增数据

Table 8　Partially amplified data

R	w(SiO_2)/%	w(MgO)/%	成球率/%	爆裂温度/℃	抗压强度/(N·P^{-1})	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]
0.55	5.35	1.84	97.99	487.08	11.00	2.88
0.55	5.40	1.90	91.60	500.02	11.26	2.86
0.55	5.51	1.71	90.68	518.37	11.49	2.68
…	…	…	…	…	…	…
1.48	5.89	1.82	93.57	369.40	11.83	2.94
1.51	5.67	1.83	97.45	408.21	11.87	2.98
1.53	5.21	1.83	97.15	394.08	12.16	2.96

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

2.1.2 预测模型隐含层节点数优化结果

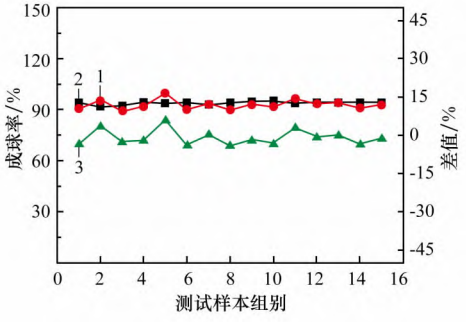
对模型的隐含层节点数从 0 ~ 200 进行遍历，通过遍历选出误差最小时模型对应的隐含层节点数，结果得出成球率预测模型最佳的隐含层节点数为 14，爆裂温度预测模型最佳的隐含层节点数为 10，抗压强度预测模型最佳的隐含层节点数为 11，落下强度预测模型最佳的隐含层节点数为 5。

2.2 模型预测结果分析

首先用训练样本集的 2 500 组数据对模型进行训练；然后用测试样本集的 500 组数据测试模型的误差，即模型的准确性；最后用验证样本集的 15 组数据验证模型的预测结果。

2.2.1 成球率预测结果分析

将 15 组验证数据代入预测模型，得到生球成球率的预测值，真实值、预测值、真实数据与预测数据的差值(真实值减去预测值)，变化趋势如图 2 所示。



1—预测数据；2—真实数据；3—差值。

图 2 成球率预测模型误差变化趋势

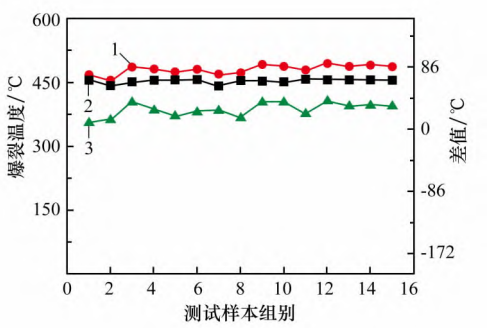
Fig. 2 Variation trend of errors in prediction model of formation rate

由图 2 可知，生球的成球率预测模型的绝对误差的值变化浮动较小。预测模型的预测数据与真实数据相差不大，变化幅度较小控制在 ±2.64%，预测结果较稳定，能够满足冶金行业对误差的要求，适用于球团矿造球成球率的预测。

2.2.2 爆裂温度预测结果分析

将 15 组验证数据代入预测模型，得到生球爆裂温度的预测值，真实值、预测值、真实数据与预测数据的差值(真实值减去预测值)，变化趋势如图 3 所示。

由图 3 可知，生球的爆裂温度预测模型的绝对误差的值均在 0 以上附近浮动，差值浮动较小。预测模型的预测数据与真实数据相差较小，变化幅度平缓控制在 ±5.09%，预测结果较稳定。



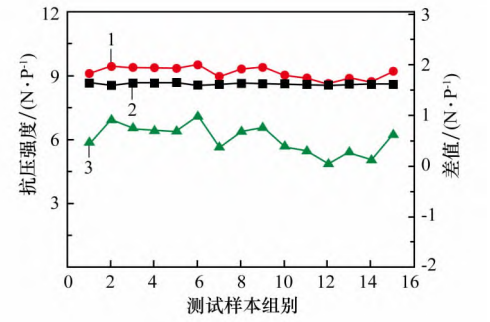
1—真实数据；2 预测数据；3—差值。

图 3 爆裂温度预测模型误差变化趋势

Fig. 3 Variation trend of errors in prediction model of bursting temperature

2.2.3 抗压强度预测结果分析

将 15 组验证数据代入预测模型，得到生球抗压强度的预测值，真实值、预测值、真实数据与预测数据的差值(真实值减去预测值)，变化趋势如图 4 所示。



1—真实数据；2—预测数据；3—差值。

图 4 抗压强度预测模型误差变化趋势

Fig. 4 Variation trend of errors in prediction model of compressive strength

由图 4 可知，生球的抗压强度预测模型的绝对误差均在 0 ~ 1 浮动，差值浮动较小。预测模型的真实数据与预测误差相差较小，浮动的幅度较小控制在 ±5.79%，预测结果可靠。

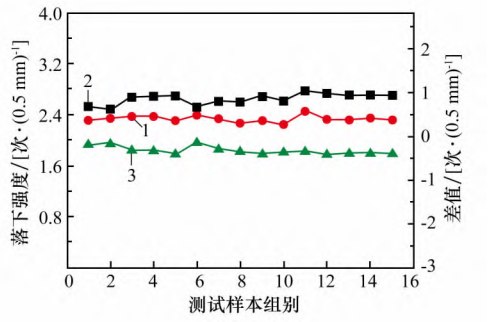
2.2.4 落下强度预测结果分析

将 15 组验证数据代入预测模型，得到生球落下强度的预测值，真实值、预测值、真实数据与预测数据的差值(真实值减去预测值)，变化趋势如图 5 所示。

由图 5 可知，生球的落下强度预测模型的绝

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

对误差值在 0 ~ 1，差值浮动一般。预测模型真实数据与测试数据存在 1 组变化趋势不同，变化趋势较一致，总体变化幅度较小控制在 11.19%，预测结果较稳定。



1—真实数据；2—预测数据；3—差值。

图 5　落下强度预测模型误差变化趋势

Fig. 5　Variation trend of errors in prediction model of falling intensity

3　结　论

(1) 当熔剂性球团中 R 保持在 0.6 ~ 1.4、$w(SiO_2)$ 保持在 3.5% ~ 5.0%、$w(MgO)$ 保持在 1.8% ~ 2.6% 时，造球所得成球率均在 90% 以上。并且随着碱度增大，生球的爆裂温度降低、抗压强度与落下强度均先增大后减小；随着 $w(SiO_2)$ 增大，生球的爆裂温度降低、抗压强度增大、落下强度先增大后减小；随着 $w(SiO_2)$ 增大，生球的爆裂温度增大、抗压强度先减小后增大、落下强度减小；生球的爆裂温度、抗压强度、落下强度等性能受成分变化影响较大。由于成分变化主要影响混合料中细粒级部分的占比，进而影响生球中毛细管数量和生球的密度，故导致生球爆裂温度和强度发生变化。

(2) 基于 BP 神经网络建立了生球性能预测优化模型，经过模型训练、验证和测试，模型预测成球率、爆裂温度、抗压强度、落下强度的 MAPE 分别为 2.64%、5.09%、5.75%、11.19%。

(3) 结合造球试验、生球性能及其预测结果，理论上当碱度为 1.0、$w(SiO_2)$ 为 5.5%、$w(MgO)$ 为 1.8% 时生球的各项性能最好。

参考文献:

[1] 李新创. 共同积极应对挑战,促进全球钢材贸易健康发展[J]. 钢铁,2017,52(5):1 - 4.
LI Xinchuang. Actively respond to challenges together and promote the healthy development of global steel trade [J]. Iron & Steel,2017,52(5):1 - 4.

[2] 王新东. 以“绿色化、智能化、品牌化”为目标规划设计河钢唐钢新区[J]. 钢铁,2021,56(2):12 - 21.
WANG Xindong. Planning and designing hegang tangshan iron and steel new district with the goal of “green,intelligent and branding” [J]. Iron & Steel,2021,56(2):12 - 21.

[3] 李新创. 新时代钢铁工业高质量发展之路[J]. 钢铁,2019,54(1):1 - 7.
LI Xinchuang. The road to high-quality development of the steel industry in the new era [J]. Iron & Steel,2019,54(1):1 - 7.

[4] 乔波,罗果萍,柴轶凡,等. 不同精矿制备球团矿预热焙烧性能对比分析[J]. 烧结球团,2021,46(2):50 - 56.
QIAO Bo,LUO Guoping,CHAI Yifan,etal. Comparative analysis of preheating roasting performance of pellets prepared from different concentrates [J]. Sintering and pelletizing,2021,46(2):50 - 56.

[5] 李杰,信自成,刘卫星,等. SiO_2 质量分数对镁质熔剂性球团性能影响[J]. 烧结球团,2017,42(4):23 - 27.
LI Jie,XIN Zicheng,LIU Weixing,et al. Effect of SiO_2 content on the properties of magnesium flux pellets [J]. Sintering and pelletizing,2017,42(4):23 - 27.

[6] 韩阳,杨爱民,张玉柱. 一种球团原料最佳配比的 BAS 智能推荐模型[J]. 仪器仪表学报,2019,40(9):246 - 254.
HAN Yang,YANG Aimin,ZHANG Yuzhu. A BAS intelligent recommendation model for the optimal ratio of pellet raw materials [J]. Journal of Instrumentation,2019,40(9):246 - 254.

[7] 李乃尧,张建良,刘兴乐,等. MgO、TiO_2 对镁质钒钛球团矿综合冶金性能的影响[J]. 钢铁,2017,52(7):14 - 21.
LI Naiyao,ZHANG Jianliang,LIU Xingle,et al. Effects of MgO and TiO_2 on the comprehensive metallurgical properties of magnesia vanadium-titanium pellets [J]. Iron & Steel,2017,52(7):14 - 21.

[8] 毕传光,龙红明,春铁军,等. MgO 质量分数对氧化球团性能的影响[J]. 钢铁,2017,52(7):22 - 26.

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

BI Chuanguang, LONG Hongming, CHUN Tiejun, et al. Effect of MgO mass fraction on the properties of oxidized pellets [J]. Iron & Steel, 2017, 52(7): 22 – 26.

[9] 潘向阳,龙跃,李神子,等. w(MgO)对熔剂性球团矿冶金性能的影响[J]. 钢铁, 2019, 54(10): 17 – 22.
PAN Xiangyang, LONG Yue, LI Shenzi, et al. Influence of w(MgO) on the metallurgical properties of flux pellets [J]. Iron & Steel, 2019, 54(10): 17 – 22.

[10] 李神子,龙跃,潘向阳,等. MgO对酸性球团矿冶金性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(1): 113 – 118.
LI Shenzi, LONG Yue, PAN Xiangyang, et al. Influence of MgO on the metallurgical properties of acid pellets [J]. Iron, Steel, Vanadium and Titanium, 2020, 41(1): 113 – 118.

[11] 尹学,李绍铭,闫成忍. 基于GA-PSO-BP神经网络的烧结终点预测模型[J]. 烧结球团, 2020, 45(6): 35 – 39; 46.
YIN Xue, LI Shaoming, YAN Chengren. Prediction model of sintering end point based on GA-PSO-BP neural network [J]. Sintering and pelletizing, 2020, 45(6): 35 – 39; 46.

[12] 韩闯闯,李杰,杨爱民,等. 镁质熔剂性球团强度影响因素分析[J]. 烧结球团, 2018, 43(1): 50 – 56.
HAN Chuangchuang, LI Jie, YANG Aimin, et al. Analysis on influencing factors of magnesia fluxed pellets strength [J]. Sintering and pelleting, 2018, 43(1): 50 – 56.

[13] 张梦雨. 基于高斯分布模型的风电机组群尾流效应计算[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
ZHANG Mengyu. Calculation of wake effect of wind turbines based on Gaussian distribution model [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.

(上接第19页)

[4] 郭玉华,张春霞,樊波,等. 钢铁企业含锌尘泥资源化利用途径分析评价[J]. 环境工程, 2010, 28(4): 83 – 87.
GUO Yuhua, ZHANG Chunxia, FAN Bo, et al. Analysis and evaluation on utilization ways of zinc-bearing sludge and dust from iron and steel enterprises [J]. Environmental Engineering, 2010, 28(4): 83 – 87.

[5] 王雪松,付元坤,李肇毅. 高炉内锌的分布及平衡[J]. 钢铁研究学报, 2005(1): 68 – 71.
WANG Xuesong, FU Yuankun, LI Qinyi, et al. Zinc distribution and balance in blast furnace [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2005(1): 68 – 71.

[6] 王飞,毛瑞,茅沈栋,等. 含锌粉尘冷固结团块高温自还原过程分析[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(7): 626 – 632.
WANG Fei, MAO Rui, MAO Shendong, et al. Analysis of self-reduction process of cold-bonded briquettes made from zinc-bearing dust at high temperature [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(7): 626 – 632.

[7] 朱德庆,侯明洲,杨聪聪,等. 复合黏结剂提高含锌尘泥团块干燥热稳定性能研究[J]. 烧结球团, 2022, 47(3): 73 – 82.
ZHU Deqing, HOU Mingzhou, YANG Congcong, et al. Research on composite binder to improve drying thermal stability performance of zinc-containing dust agglomerates [J]. Sintering and Pelletizing, , 2022, 47(3): 73 – 82.

[8] 张亚森,孟安. 转底炉处理含锌粉尘生产实践与探索[J]. 冶金设备, 2018(S1): 125 – 127; 71.
ZHANG Yasen, MENG An. The practice and exploration of zinc dust production in bottom furnace [J]. Metallurgical Equipment, 2018(S1): 125 – 127; 71.

[9] CHUN Tiejun, ZHU Deqing. New process of pellets-metallized sintering process(PMSP) to treat zinc-bearing dust from iron and steel company [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46(1): 1 – 4.

[10] 刘超,张玉柱,王峰,等. 多源冶金粉尘资源化研究现状及展望[J]. 中国冶金: 32(10): 38 – 44.
LIU Chao, ZHANG Yuzhu, WANG Feng, et al. Research status and prospect of multi-source metallurgical dust recycling [J]. China Metallurgy, 32(10): 38 – 44.

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