球团

膨润土物理性能对生球落下强度的影响

马承胜[1]，甘牧原[1]，韦振宁[1]，罗邦曹[2]，春铁军[2]
(1. 柳州钢铁股份有限公司 烧结厂，广西 柳州 545002；2. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243002)

摘要： 为研究膨润土物理性能对生球落下强度的影响，本文对国内外 9 种膨润土在膨润土外配为 2.1%，造球时间为 15 min，生球水分为 8% 的条件下进行造球实验，并利用 MATLAB 多元线性回归方程分析了膨润土的物理性能对生球落下强度的影响。结果表明：膨润土的黏度和吸水率指标对生球的落下强度影响较大，生球落下强度(Y_1)与吸水率归一化系数(x_3)和黏度归一化系数(x_5)的关系式为 $Y_1 = 1.675\ 08 + 0.850\ 566x_3 + 2.204\ 27x_5$。

关键词： 铁矿球团；膨润土；物理性能；落下强度；黏度；吸水率
中图分类号： TF046.6　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000－8764(2022)03－0043－08
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.03.038

Influence of bentonite physical performances on the drop numbers of green pellets

MA Chengsheng[1], GAN Muyuan[1], WEI Zhenning[1], LUO Bangcao[2], CHUN Tiejun[2]
(1. *Sintering Plant of Liuzhou Iron&Steel company Ltd.*, *Liuzhou* 545002, *Guangxi*, *China*;
2. *School of Metallurgical Engineering*, *Anhui University of Technology*, *Ma'anshan* 243002, *Anhui*, *China*)

Abstract: In order to investigate the influence of physical properties of bentonite on the drop numbers of green pellets during the pelletization, the experiments of using 9 different bentonites were carried out under the conditions of adding 2.1% bentonite, balling for 15min with the moisture of 8%. MATLAB multiple linear regression equation was used to analyze the experimental data. The results show that the viscosity and water absorption of bentonite paly the significant role in the drop numbers of green pellets, and the relationship between drop numbers and the normalized coefficients of viscosity and water absorption is: $Y_1 = 1.675\ 08 + 0.850\ 566x_3 + 2.204\ 27x_5$.

Key words: iron ore pellets; bentonite; physical performances; drop numbers; viscosity; water absorption

膨润土是一种以蒙脱石为主的非金属矿物，是铁矿球团生产所需要的重要黏结剂。在球团制备过程中添加一定量的膨润土能显著改善生球的落下强度和抗压强度以及爆裂温度[1－3]。目前球团厂所用的膨润土主要有钙基膨润土、钠基膨润土和有机改性复合膨润土[4－5]。当前，研究者主要将储量较大的钙基膨润土进行物理提纯或钠化改性，或者添加有机黏结剂制备成复合膨润土[6－8]。如：郑银珠等[9]用膨润土和有机黏结剂 SN 复合，生球爆裂温度、落下强度均提高，且膨润土用量降低，球团矿的铁品位提高；魏国良等[10]使用复合黏结剂替代膨润土针对包钢球团进行了研究，复合膨润土可提高铁品位 0.84%，降低 $w(SiO_2)$ 0.86%。国内学者在膨润土物理性能对球团质量方面的影响也做了相关研究。如：张玉柱等[11]研究表明生球的落下强度跟胶质价和膨胀倍数之间没有显著关联；葛方红等[12]研究表明吸水率、碱性系

收稿日期：2021－11－08；修回日期：2022－01－04
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51574002)
作者简介：马承胜(1973—)，男，高级工程师，从事烧结球团生产和管理方面研究。
通讯作者：春铁军(1984—)，男，教授，从事烧结球团理论与新技术方面研究。

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

数、阳离子交换量是影响生球落下强度的主要因子，pH 值和膨胀倍数效果不显著。韩卫涛[13]研究了 5 种不同的膨润土与同一种铁精粉进行造球实验，结果表明蒙脱石占比对生球落下强度影响不显著。以上研究证明了膨润土的物理性能影响生球的落下强度，但是膨润土各项物理性能与生球落下强度之间的关系缺乏具体量化。常用的统计方法有 SPSS 回归、主成分分析回归、Logistic 回归、MATLAB 多元回归等，其中 MATLAB 多元回归分析方法包含大量的计算算法合集，具有高效的数值计算功能，可实现矩阵运算和线性方程组的求解，广泛应用于相关行业的的数据分析[14]。因此，本文通过对9 种不同种类膨润土进行造球实验，根据实验结果，采用 MATLAB 多元回归分析方法建立膨润土物理性能与生球落下强度的关系方程，系统研究膨润土物理性能对生球落下强度的影响。

1 试验原料与方法

1.1 膨润土

试验所用的 9 种膨润土(分别用字母 A ~ I 表示)为国内外不同种类膨润土，分别取样于 6 个不同球团厂，包括钠基膨润土、钙基膨润土与复合膨润土。不同膨润土物理性能差别较大，具有一定样品代表性。9 种膨润土的物理性质、主要化学成分及 -0.075 mm 粒度占比分别如表 1、2 所示。

表 1 膨润土物理性质

Table 1 Physical properties of bentonite

种类	水分/%	膨胀倍数/($mL \cdot g^{-1}$)	胶质价/[$mL \cdot (15\ g)^{-1}$]	2 h 吸水率/%	吸蓝量/[$g \cdot (100\ g)^{-1}$]	蒙脱石(质量分数)/%	黏度/(mPa·s)
A	7.82	7.5	6.0	139	19.62	44.39	3.8
B	5.34	3.0	4.0	141	14.81	33.51	2.5
C	9.25	16.0	17.0	411	19.86	44.93	5.9
D	4.66	20.0	50.0	321	21.97	49.71	7.3
E	7.20	12.5	29.5	185	18.23	41.24	5.3
F	8.80	9.6	20.5	303	22.79	51.56	3.4
G	9.44	19.0	40.0	393	24.37	55.14	6.1
H	8.12	21.0	42.0	407	25.90	58.60	6.3
I	5.71	9.5	19.0	499	27.73	62.74	4.3

表 2 膨润土主要化学成分及 -0.075 mm 粒度组成(质量分数)

Table 2 Chemical composition and content of particles passing 0.075 mm %

膨润土	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	LOI	-0.075 mm
A	42.67	17.13	2.35	22.34	0.64	1.23	11.67	98.56
B	43.05	16.32	2.78	24.08	0.53	1.03	10.25	95.01
C	45.81	3.31	4.74	24.39	2.48	0.84	16.35	97.45
D	57.52	3.68	2.32	16.85	2.12	1.60	14.39	98.67
E	46.04	12.05	2.06	21.01	0.86	2.09	13.23	99.45
F	46.17	15.84	1.63	15.46	0.78	2.81	15.28	96.34
G	60.53	1.39	2.75	20.98	1.10	1.65	10.65	97.72
H	61.69	1.89	2.31	19.82	1.11	1.64	10.73	98.91
I	56.02	2.07	2.99	28.15	1.55	0.65	9.48	96.23

1.2 铁精矿

试验所用的 4 种铁精矿来自国内某球团厂所用的造球原料。其主要化学成分、粒度分布和比表面积分别如表3、4所示。由表3、4可

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

表 3　铁精矿主要化学成分(质量分数)

Table 3　Main chemical composition of iron concentrate　%

铁精矿	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	P	LOI
乌克兰精粉	65.30	26.95	7.78	0.15	0.36	0.14	0.010	-2.11
澳洲精粉	65.10	26.76	7.92	0.13	0.38	0.29	0.019	-2.19
智利精粉	65.20	27.69	4.83	0.46	0.39	1.44	0.015	-2.15
巴西精粉	67.05	0.93	3.06	0.05	0.02	0.54	0.019	2.05

表 4　铁精矿粒度分布和比表面积

Table 4　Particle size distribution and specific surface area of iron concentrate

铁精矿	粒度分布(质量分数)/%				比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)
	-0.037 mm	0.037~0.045 mm	0.045~0.075 mm	+0.075 mm	
乌克兰精粉	81.17	13.95	3.58	1.30	1 511.1
澳洲精粉	89.59	7.36	2.35	0.70	1 649.8
智利精粉	65.62	26.83	4.53	3.02	812.3
巴西精粉	70.37	22.67	5.79	1.17	1 048.9

知，4 种铁精粉的铁品位较高，均在 65% 以上，粒度小于 0.075 mm 占比均在 90% 以上，满足造球对铁精粉质量的要求。

1.3　研究方法

膨润土物理性能中的吸蓝量、膨胀倍数、蒙脱石质量分数、吸水率和胶质价，依据 GB/T 20973—2020标准进行检测。黏度性能根据 GB/T 5005—2010 中检测悬浮液流变性检测方法进行检测，首先称取 22.5 g 膨润土，加入 350 mL 去离子水，利用搅拌器搅拌均匀，搅拌 20 min，采用 NDJ-5S 型旋转黏度计测量膨润土黏度，数值由黏度计直接读数，单位为 mPa·s。实验所用铁精粉配比为 40% 乌克兰精粉 + 30% 澳精粉 + 20% 智利精粉 + 10% 巴西精粉，膨润土为外配 2.1%。试验采用圆盘造球机(直径为 1 000 mm，转速为 38 r/min，圆盘倾角为 45°)制备生球，造球时间为 15 min，生球水分为 8.0% 左右，造球结束用 10~12 mm 的圆筛进行筛分，得到的生球进行落下强度检测。落下强度的检测方法为，首先将 20 个生球在 0.5 m 高度进行自由落体，落到厚度为 5 mm 钢板上，反复重复操作至球团出现裂纹为止，每个生球的落下次数减去 1 即为其落下强度，单位为次/(0.5 m)。

2　结果与讨论

2.1　不同膨润土对生球落下强度的影响

9 种不同膨润土对生球落下强度的影响如表 5 所示。结合表 1、5 可知：膨润土 A 生球落下强度为 2.1 次/(0.5 m)，抗压强度达到 10.8 N/P，生球质量处于 9 组球团质量的最低水平，膨润土 A 对应的各项物理性质指标相较于其他膨润土也均处于最低水平；膨润土 B 的生球落下强度为 2.2 次/(0.5 m)，抗压强度为 13.1 N/P，膨润土 B 的各项物理性质指标相对较低，但是蒙脱石质量分数达到 44.39%。分别配加膨润土 E、F、I 后，生球的落下强度依次为 2.6、2.8、3.2 次/(0.5 m)，落下强度有显著提高，这是由于膨润土的吸水率从 184.93% 提高到 499.26%，导致膨润土纤维星散装结构形成更加充分，膨润土的黏结效果明显提升。膨润土 C 和 G 的生球落下强度均为 3.7 次/(0.5 m)；膨润土 D 的生球落下强度最高为 4.7 次/(0.5 m)，其物理性质指标中黏度指标达到最高为 7.3 mPa·s。通过对表 4 的分析发现，生球落下强度与膨润土对应关系复杂，且膨润土物理性质因素较多，不能从单一要素分析膨润土物理性质对生球质量的影响。

2.2　利用 MATLAB 的多元线性回归分析

本文采用 MATLAB 多元线性回归分析方法，研究膨润土物理性能与生球落下强度之间的关系。将膨润土各项物理性质设为不同自变量，生球质量为因变量，代入回归方程，结合

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

表5 膨润土物理性质及生球质量

Table 5 Physical properties of bentonite and quality of green pellets

膨润土	膨胀倍数/(mL·g^{-1})	胶质价/[mL·(15 g)$^{-1}$]	蒙脱石(质量分数)/%	黏度/(mPa·s)	吸水率/%	抗压强度9.8/(N·P^{-1})	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]
A	7.5	6.0	44.39	3.8	139.25	13.1	2.2
B	3.0	4.0	33.51	2.5	140.74	10.8	2.1
C	16.0	17.0	44.93	5.9	411.34	14.2	3.7
D	20.0	50.0	49.71	7.3	320.67	13.5	4.7
E	12.5	29.5	41.24	5.3	184.93	12.1	2.6
F	9.6	20.5	51.56	3.4	302.63	13.1	2.8
G	19.0	40.0	55.14	6.1	392.61	12.2	3.7
H	21.0	42.0	58.60	6.3	407.34	15.3	4.0
I	9.5	19.0	62.74	4.3	499.26	12.1	3.2

回归显著性和 P 值判断建立的回归模型是否有效，再利用得出的有效线性回归方程，总结出与生球落下强度相关的物理性质指标。

2.2.1 多元线性回归

常见的线性回归分析中存在两个或两个以上的自变量，本文中的自变量分别设置：吸蓝量(x_1)、膨胀倍数(x_2)、吸水率(x_3)、胶质价(x_4)、黏度(x_5)，因变量为落下强度(y_1)。利用膨润土的5种主要物理性质来确定最优组合对因变量进行预测。

多元线性回归的数学模型一般形式：

$$Y_i=\beta_0+\beta_1X_{1i}+\beta_2X_{2i}+\cdots+\beta_kX_{ki}+u_i,\ i=1,2,3,\cdots,n \tag{1}$$

式中：k 为解释变量的个数；$\beta_j(j=1,2\cdots,k)$ 为回归系数，称为线性回归的随机表式，真实的表达式：

$$Y_i=\beta_0+\beta_1X_{1i}+\beta_2X_{2i}+\cdots+\beta_kX_{ki},\ i=1,2,3,\cdots,n \tag{2}$$

式中：β_j 被称为偏回归系数。

多元线性回归的计算模型：

$$Y=\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\cdots+\beta_kx_k+\varepsilon,\ \varepsilon\sim N(0,\delta^2) \tag{3}$$

多元线性回归与一元线性回归方程一样，需要求误差平方和 $\sum e$ 为最小，利用最大似然估计法求解。设(x_{11}，x_{12}，…，x_{1p}，y_1)，…，(x_{n1}，x_{n2}，…，x_{np}，y_n)为样本，估计参数：

取 $\hat{b}_0$，$\hat{b}_1$，…，$\hat{b}_p$，当 $b_0=\hat{b}_0$，$b_1=\hat{b}_1$，…，$b_p=\hat{b}_p$ 时，$Q=\sum_{i=1}^{n}(y_i-b_0-b_1x_{i1}-\cdots-b_px_{ip})^2$ 达到最小值。

$$\begin{cases}\dfrac{\partial Q}{\partial b_0}=-2\sum_{i=1}^{n}(y_i-b_0-b_1x_{i1}-\cdots-b_px_{ip})=0\\ \dfrac{\partial Q}{\partial b_j}=-2\sum_{i=1}^{n}(y_i-b_0-b_1x_{i1}-\cdots-b_px_{ip})=0,\ j=1,2,\cdots,p\end{cases} \tag{4}$$

将上述式子化简得到：

$$\left.\begin{aligned}&b_0n+b_1\sum_{i=1}^{n}x_{i1}+b_2\sum_{i=1}^{n}x_{i2}+\cdots+b_p\sum_{i=1}^{n}x_{ip}=\sum_{i=1}^{n}y_i,b_0\sum_{i=1}^{n}x_{i1}+b_1\sum_{i=1}^{n}x_{i1}^2+\\ &b_2\sum_{i=1}^{n}x_{i1}x_{i2}+\cdots+b_p\sum_{i=1}^{n}x_{i1}x_{ip}=\sum_{i=1}^{n}x_{i1}y_i\\ &\vdots\\ &b_0\sum_{i=1}^{n}x_{ip}+b_1\sum_{i=1}^{n}x_{ip}x_{i1}+b_2\sum_{i=1}^{n}x_{ip}x_{i2}+\cdots+b_p\sum_{i=1}^{n}x_{ip}^2=\sum_{i=1}^{n}x_{ip}y_i\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

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

然后引入矩阵式子为:

$$X=\begin{bmatrix}1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p}\\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p}\\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots\\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np}\end{bmatrix},\ Y=\begin{bmatrix}y_1\\ y_2\\ \vdots\\ y_n\end{bmatrix},\ B=\begin{bmatrix}b_0\\ b_1\\ \vdots\\ b_p\end{bmatrix} \tag{6}$$

方程组简化得到:

$$X'XB=X'Y \tag{7}$$

最大似然估值:

$$\hat{B}=\begin{bmatrix}\hat{b}_0\\ \hat{b}_1\\ \vdots\\ \hat{b}_p\end{bmatrix}=(X'X)^{-1}X'Y \tag{8}$$

$u(x_1, x_2, \cdots, x_p)=b_0+b_1x_1+\cdots+b_px_p$ 的估值:

$$\hat{y}=\hat{b}_0+\hat{b}_1x_1+\hat{b}_2x_2+\cdots+\hat{b}_px_p \tag{9}$$

上式(9)即为 MATLAB 的回归方程。

2.2.2　落下强度 MATLAB 回归分析

首先将影响生球质量的膨润土物理性质转化成多元线性回归模型可用的自变量：吸蓝量(x_1)、膨胀倍数(x_2)、吸水率(x_3)、胶质价(x_4)、黏度(x_5)，由于吸蓝量和蒙脱石质量分数互为影响，所以取其一种因素，同时为了消除各因素之间水平数量级差别，所以将自变量因素进行 MATLAB 归一化处理，数据如表 6 所示。

表 6　自变量归一化结果

Table 6　Results of normalization of independent variables

膨润土	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
A	0.385 0	0.275 0	0.050 0	0.089 1	0.293 7
B	0.050 0	0.050 0	0.055 0	0.050 0	0.050 0
C	0.401 6	0.700 0	0.730 0	0.304 3	0.687 5
D	0.548 8	0.900 0	0.505 0	0.950 0	0.950 0
E	0.288 0	0.525 0	0.165 0	0.548 9	0.575 0
F	0.605 8	0.380 0	0.460 0	0.372 8	0.218 8
G	0.716 0	0.850 0	0.685 0	0.754 3	0.725 0
H	0.822 5	0.950 0	0.720 0	0.793 5	0.762 5
I	0.950 0	0.375 0	0.950 0	0.343 5	0.387 5

将归一化后的自变量 x 和因变量 Y_1 输入到 MATLAB 设置好的模型程序中，输出结果如表 7 所示，样本残差见图 1。

表 7　落下强度样本输出结果

Table 7　Output results of Drop numbers sample

B	Bint	R	Rint
1.822 7	0.558 8 ~ 3.086 5	0.124 7	−0.957 8 ~ 1.207 2
−0.681 4	−4.463 5 ~ 3.100 7	0.117 1	−0.232 4 ~ 0.466 5
−0.011 1	−6.558 6 ~ 6.536 4	−0.526 9	−1.304 4 ~ 0.250 6
1.249 5	−4.883 0 ~ 7.381 9	0.124 4	−1.399 8 ~ 0.648 6
1.036 7	−2.966 5 ~ 5.039 9	−0.071 4	−0.407 1 ~ 0.264 2
1.326 3	−1.923 8 ~4.576 3	0.016 1	−0.526 0 ~ 0.558 2
—	—	−0.221 7	−2.017 1 ~ 1.573 7
—	—	0.018 1	−1.510 7 ~ 1.546 9
—	—	0.419 7	0.186 0 ~ 0.653 4

注: 其中，B 为回归系数; Bint 为可信回归系数区间; R 为残差值; Rint 为可信残差区间。

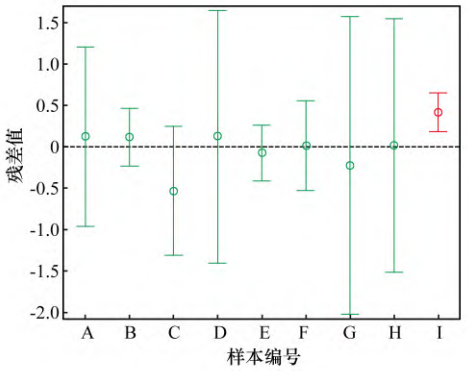


图 1　落下强度样本残差图

Fig. 1　Residual diagram of drop strength sample

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

由表 7 可知：回归系数均在回归系数区间之内，残差值也都在可信残差区间之内，另外用于检验回归模型的统计量 stats 分别为 0.909 5、6.031 6、0.085 0、0.184 4，其中相关系数 r^2 = 0.909 5，当相关系数越靠近 1，说明回归方程越显著。概率 p = 0.085 0，概率的模型成立范围是 0.01 ~ 0.05，因为概率值 P > 0.05，且从图 1 样本残差图中可知 9 组样本中 8 组数据处在正常区间内，但第 9 组出现异常值点。因此，该模型不能应用于计算生球的落下强度。此模型得到落下强度 y_1 与自变量归一化系数的关系式：

$$Y_1 = 1.822\ 7 - 0.681\ 4x_1 - 0.011\ 1x_2 + 1.249\ 5x_3 + 1.036\ 7x_4 + 1.326\ 3x_5 \quad (10)$$

根据式(10)，分析膨胀倍数和蒙脱石质量分数为负相关，吸水率、黏度和胶质价对生球的落下强度呈正相关的作用。为了保证模型成立并删除残差图中的异常点，将各因素以不同的组合方式导入回归方程，如图 2 所示。软件自动组合 5 种因素可能出现的组合，每 1 种组合会在均方差误差显示蓝色点，此时蓝色点出现最低的点被认为是这个模型标准误差最小，结果如图 3 所示。

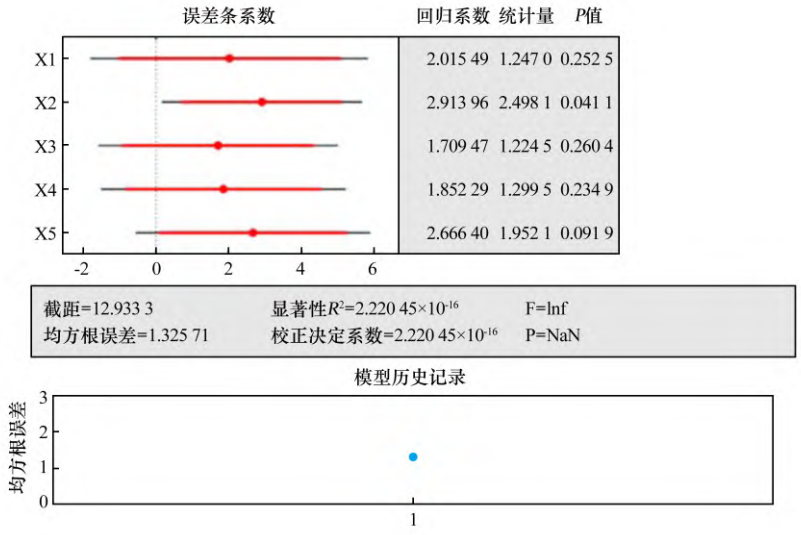


图 2 各因素处理界面

Fig. 2 Each factor processing interface

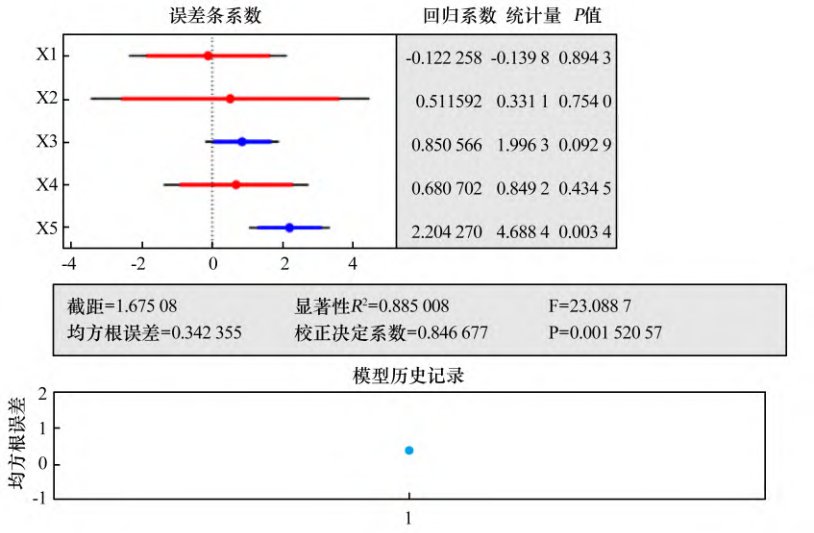


图 3 标准误差最低点

Fig. 3 Minimum standard error

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

此次模型的显著性 $R^2 = 0.885\ 008$，说明回归模型显著，概率值 $P = 0.001\ 520\ 57 < 0.05$，所以回归成立。最优回归方程最终含有 x_3 和 x_5 两个变量为蓝色(表示该因素在回归方程中)，说明黏度和吸水率这两个指标代表的膨润土对生球的落下强度有着重要的贡献。生球落下强度 Y_1 与吸水率归一化系数 x_3 和黏度归一化系数 x_5 的关系见式(11)：

$$Y_1 = 1.675\ 08 + 0.850\ 566x_3 + 2.204\ 27x_5 \quad (11)$$

根据公式(11)可知，黏度的影响最为显著。这是由于膨润土分布在铁矿颗粒之间主要起到黏结力的作用，黏性越大，黏结力越大，黏结力越大则生球的落下强度也随着提高。吸水率也有利于提高生球落下强度，其主要原因是强吸水性可以起到调控球团过程中自由水含量，多吸收的水可以进到蒙脱石层间转变成层间水，自由水增多提高生球中毛细力，毛细力在生球的制造过程中起着关键的作用。

2.3　验证实验

为了进一步验证公式(11)的准确性，将 F 膨润土(样本内)和 J 和 K 膨润土(样本外)进行对比验证试验，预测和实测的生球落下强度结果如表 8 所示。分析表 8 可知，根据式(11)预测落下强度分别为 2.55、5.43、2.99 次/(0.5 m)，而实测的落下强度分别为 2.8、5.0、2.9 次/(0.5 m)，两者之间数值相近，证实了公式(11)的准确性。这同样解释了在膨润土添加有机黏结剂后制备的复合膨润土，吸水率和黏度显著提高，虽然蒙脱石质量分数、胶质价及膨胀容等指标较差，但生球落下强度依旧较好的原因。

表 8　膨润土验证试验结果

Table 8　Results of bentonite validation test

膨润土	黏度/(mPa·s)	2 h 吸水率/%	预测落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	实测落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]
F	3.4	302.63	2.55	2.8
J	10.5	277.66	5.43	5.0
K	4.6	276.90	2.99	2.9

3　结　论

膨润土物理性能指标较多，不能从单一指标分析膨润土对生球落下强度的影响。采用 MATLAB 多元线性回归分析建立数学模型，生球的落下强度与膨润土吸水率和黏度之间的关联性最强，生球落下强度 Y_1 与吸水率归一化系数 x_3 和黏度归一化系数 x_5 的关系式为：$Y_1 = 1.675\ 08 + 0.850\ 566x_3 + 2.204\ 27x_5$，这为膨润土的评价提供了新的指导。

参考文献：

[1] KOTTA A B, PATRA A, KUMARM, et al. Effect of molasses binder on the physical and mechanical properties [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2019, 26(1): 41 – 51.

[2] 吴小缓，彭春艳，袁鹏. 国外膨润土行业发展现状及策略研究 [J]. 非金属矿，2016，39(5)：65 – 68.
WU Xiaohuan, PENG Chunyan, YUAN Peng. Research on current situation and strategies of bentonite industry in foreign countries [J]. Non-Metallic Mines, 2016, 39(5): 65 – 68.

[3] 郑长文，管俊芳，郑佳敏，等. 矿业领域膨润土应用的研究进展 [J]. 矿产综合利用，2020(3)：22 – 27.
ZHENG Changwen, GUAN Junfang, ZHENG Jiamin, et al. Progress in the application of bentonite in mining industry [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3): 22 – 27.

[4] 陆启财，陈铁军，罗艳红，等. 低品位膨润土改性及其在球团中的应用研究 [J]. 烧结球团，2021，46(3)：39 – 46.
LU Qicai, CHEN Tiejun, LUO Yanhong, et al. Research on modification of low-grade bentonite and its application in pellets [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(3): 39 – 46.

[5] 白晓光. 带式球团配加新型黏结剂替代膨润土试验研究 [J]. 包钢科技，2020，46(6)：1 – 4；11.
BAI Xiaoguang. Experimental study on adding new-type binder instead of bentonite for pellet with belt type roasting machine [J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2020, 46(6): 1 – 4; 11.

[6] 李志超，王宇，柴轶凡，等. 膨润土对白云鄂博铁精矿球团矿生球及成品球强度影响 [J]. 中国冶金，2021，31(4)：19 – 24.
LI Zhichao, WANG Yu, CHAI Yifan, et al. Effect of bentonite on strength of raw pellets and finished pellets prepared from Baiyun Obo iron concentrate [J]. China Metallurgy, 2021,

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

31(4):19 – 24.

[7] 李金莲,朱建伟,宫作岩,等. 铁矿球团复合黏结剂技术经济评价[J]. 鞍钢技术,2020(2):18 – 24.
LI Jinlian,ZHU Jianwei,GONG Zuoyan,et al. Economic evaluation on technologies for composite binders for iron ore pellets[J]. Angang Technology,2020(2):18 – 24.

[8] 谢小林,段婷,郑富强,等. 改性复合黏结剂制备磁铁矿氧化球团研究[J]. 金属矿山,2018(1):79 – 83.
XIE Xiaolin,DUAN Ting,ZHENG Fuqiang,et al. Study of magnetite oxidized pellet prepared by modified composite binder[J]. Metal Mine,2018(1):79 – 83.

[9] 郑银珠,彭志坚. 铁矿球团复合黏结剂的试验研究[J]. 烧结球团,2009,34(5):28 – 33.
ZHENG Yinzhu,PENG Zhijian. Experimental study on iron ore pelletizing composite binder[J]. Sintering and Pelletizing,2009,34(5):28 – 33.

[10] 魏国良,付国伟,吕志义,等. 包钢球团配加复合黏结剂替代膨润土研究[J]. 包钢科技,2020,46(3):19 – 22.
WEI Guoliang,FU Guowei,LÜ Zhiyi,et al. Study on substituting bentonite with cobinder for pellet of Baotou Steel[J]. Science and Technology of Baotou Steel,2020,46(3):19 – 22.

[11] 张玉柱,边妙莲,刘鹏君,等. 膨润土理化性能对球团性能影响的研究[J]. 烧结球团,2006(2):21 – 24.
ZHANG Yuzhu,BIAN Miaolian,LIU Pengjun,et al. Influence of bentonite properties on pellet performances[J]. Sintering and Pelletizing,2006(2):21 – 24.

[12] 葛方红. 国内外膨润土指标对铁矿球团性能影响的探讨[J]. 烧结球团,1996(5):17 – 23.
GE Fanghong. Influence of bentonite indexes on performance of iron ore pellets at home and abroad[J]. Sintering and Pelletizing,1996(5):17 – 23.

[13] 韩卫涛. 不同种类膨润土对生球强度的影响规律[J]. 矿业工程,2015,13(4):41 – 44.
HAN Weitao. Impact rules of different bentonites to green ball strength[J]. Mining Engineering,2015,13(4):41 – 44.

[14] 钱宇,张恒,杨俊. 基于多元线性回归的飞机燃油消耗诱因分析[J]. 计算机仿真,2021,38(9):24 – 30.
QIAN Yu,ZHANG Heng,YANG Jun. Analysis on the inducement of aircraft fuel consumption based on multivariate linear regression[J]. Computer Simulation,2021,38(9):24 – 30.

(上接第42页)

5 结 论

环冷机是烧结工艺常用冷却装置,本文利用仿真软件对环冷机中的回转框架组成部分进行轻量化优化设计研究。主要得出以下结论:

(1)仿真分析应力发现,轴承座均在与支撑钢板连接处应力值达到最大,最大值为9.788 MPa,故可以在与轴承相连接处进行轻量化处理;两处圆管梁均在与支撑钢板连接处仿真应力达到最大,最大值为11.950 MPa,因此可以对圆管中间部位结构重新设计,进行轻量化处理;在静止和运动状态下,回转框架最大位移变形量仅为4 mm左右,有轻量化空间。

(2)轻量化后的模型与原模型相比较,焊接处的应力有0 ~ 20 MPa的增幅,周边应力值变化幅度很小,约在10 MPa以内。排除掉一些应力集中区域的特殊位置,整个回转框架的应力值在100 MPa以下,远小于屈服应力值235 MPa。

参考文献:

[1] 王晓波. 我国铁矿行业“十三五”中期回顾及“十四五”展望[J]. 冶金经济与管理,2019(4):4 – 6.
WANG Xiaobo. Mid-term of the 13th and of the 14th for China[J]. Yejin Jingji yu Guanli,2019(4):4 – 6.

[2] 张峰,刘静波,申理仁,等. 新型环冷机回转框架及台车的制造工艺改进[J]. 烧结球团,2019,44(4):23 – 26;30.
ZHANG Feng,LIU Jingbo,SHEN Liren. Improvement of manufacturing process for rotary frame and pallet car of new type of circular cooler[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(4):23 – 26;30.

[3] 舒文艺. 新型环冷机设计及安装工艺研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2017.
SHU Wenyi. Research on design and installation process for the new type of ring cooler[D]. WuHan:Hubei University of Technology,2017.

[4] 范军锋,冯奇,凌天钧,等. 汽车轻量化与制造工艺[J]. 机械设计与制造,2009(7):141 – 143.
FAN J F,FENG Q,LING T J,et al. Automobile lightweight and manufacture technology[J]. Machinery Design & Manufacture,2009(7):141 – 143.

[5] 肖凯锴. 重型汽车驱动桥壳联合仿真及轻量化研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.
XIAO Kaikai. Research on joint simulation and lightweight of heavy-duty vehicle[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2017.

[6] 李育锋,何彦,黄桃,等. 考虑产品制造过程环境影响的轻量化设计方法[J]. 计算机集成制造系统,2017,24(9):2306 – 2313.
LI Yufeng,HE Yan,HUANG Tao,et al. Lightweight design method considering environmental impacts in products manufacturing stage[J]. Computer Integrated Manuf acturing Systems,2017,24(9):2306 – 2313.

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