球团

复合黏结剂对铁精矿球团质量的影响

岳志玲[a]，杨大兵[b]，胡明欣[a]，王 炜[c]
（武汉科技大学 a. 资源与环境工程学院；b. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室，
c. 材料与冶金学院，湖北 武汉 430081）

摘要：为充分发掘有机黏结剂对铁精矿球团质量提升的优点，同时弥补有机复合黏结剂削弱成品球抗压强度的不足，本文将蛭石、羧甲基纤维素钠（有机黏结剂）、膨润土进行复配，探究复合黏结剂对铁精矿球团质量的影响，并借助 SEM 和热重分析探索蛭石改善成品球强度的机理。试验结果表明：在不复配有机黏结剂，仅仅添加 1% 的膨润土时，球团的落下强度只有 1.5 次/(0.5 m)，抗压强度为 8.2 N/P，爆裂温度为 550 ℃，在预热温度为 950 ℃、焙烧温度为 1 200 ℃时成品球的强度为 3 121 N/P；固定膨润土用量，随着有机黏结剂复配比例增加到 0.12%，生球落下强度可提升到 8.0 次/(0.5 m)，抗压强度提升到 11.3 N/P，但生球的爆裂温度下降到 395 ℃，成品球强度下降到 2 465 N/P；加入 0.03% 蛭石 +0.12% 有机黏结剂 +1% 膨润土的复合黏结剂后，球团的质量指标最好，球团落下强度可达到 6.5 次/(0.5 m)，抗压强度为 13.4 N/P，爆裂温度为 362 ℃，成品球强度在相同条件下可以提升至 2 764 N/P。SEM 和热重分析结果表明：蛭石膨胀能不断填充球团中的孔隙，在焙烧过程中生成液相，有利于固相扩散晶体长大，降低球团孔隙率，从而提升成品球的抗压强度。

关键词：羧甲基纤维素钠；蛭石；复合黏结剂；球团质量；抗压强度
中图分类号：TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000 - 8764(2024)02 - 0031 - 07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.02.021

Effect of composite binder on quality of iron concentrate pellets

YUE Zhiling[a], YANG Dabing[b], HU Minxin[a], WANG Wei[c]
(1. Wuhan University of Science and Technology a. School of Resources and Environmental Engineering; b. Hubei Province Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources; c. Institute of Materials and Metallurgy, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: In order to fully explore the advantages of organic binders on the quality improvement of iron concentrate pellets and make up for the shortcomings of organic composite binders in weakening the compressive strength of finished pellets, vermiculite, sodium carboxymethyl cellulose (organic binders) and bentonite are compounded to explore the effect of composite binders on the quality of iron concentrate pellets, and the mechanism of vermiculite to improve the strength of finished balls is explored with the help of SEM and thermogravimetric analysis. The results show that, when only 1% bentonite is added without organic binders, the drop strength of pellets is only 1.5 times/(0.5 m), the compressive strength is 8.2 N/P, the burst temperature is 550 ℃, and the strength of finished pellets is 3 121 N/P when the preheating temperature is 950 ℃ and the roasting temperature is 1 200 ℃. When the amount of bentonite is fixed, with the increase of the proportion of organic binder to 0.12%, the drop strength of green pellets can be increased to 8.0 times/(0.5 m), and the compressive strength can be increased to 11.3 N/P, but the bursting temperature of green pellets can be reduced to 395 ℃, and the strength of finished pellets can be reduced to 2 465 N/P; After adding 0.03% vermiculite + 0.12%

收稿日期：2023 - 01 - 06；**修回日期**：2023 - 04 - 11
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51974212)
作者简介：岳志玲(1998—)，女，硕士研究生，从事铁矿黏结剂方面的研究。
通信作者：杨大兵(1965—)，男，教授，从事矿物加工、铁矿球团黏结剂方面的研究。

organic binders + 1% bentonite, the quality index of pellets is the best, the dropping strength of pellets can reach 6.5 times/(0.5 m), the compressive strength is 13.4 N/P, and the bursting temperature is 362 ℃. The strength of finished pellets can be increased to 2 764 N/P under the same conditions. The results of SEM and thermogravimetric analysis show that the expansion of vermiculite can continuously expand and fill the pores in the pellets, and form a liquid phase during the roasting process, which is conducive to the growth of solid-phase diffusion crystals, reduce the porosity of the pellets, and improve the compressive strength of the finished pellets.

Key words: sodium carboxymethyl cellulose (CMC); vermiculite; composite binder; pellets quality; compressive strength

球团矿作为炼铁中不可或缺的主要原料之一，直接影响高炉铁水的产、质量。在球团生产中，作为改善球团质量的黏结剂必不可少，其可分有机黏结剂和无机黏结剂两大类。国外球团生产几乎全部采用有机黏结剂，而国内的球团则相反，几乎全用无机黏结剂。采用无机黏结剂对球团生产企业会带来直接经济效益，但是综合炼铁全流程来分析，该做法的总体效益未必更好。因此，研究黏结剂对球团质量的影响对炼铁工业具有现实意义。为了满足工艺条件，提高入炉原料的精度，同时节约生产成本，将羧甲基纤维素钠与膨润土进行复合加入铁精矿球团[1]，不仅可改善球团质量，使得球团表面光滑，同时可降低粉化率，减轻回转窑结圈现象，提高高炉的利用系数，具有可观的经济效益[2]。姜涛等[3]对黏结剂有机链架结构与性能的关系进行了定性分析，认为选择环形网状结构的链架较为理想；此外，还根据分子模型及选择判据，研制合成了新型黏结剂 S-1。李彩霞等[4]确定了用于工业生产的有机物/膨润土复合球团黏结剂的制备工艺。徐晨阳等[5]通过残烧试验和 XRD 研究了膨润土与有机黏结剂间的相互作用，结果表明：有机复合黏结剂比原始膨润土的晶层间距增加了 0.08 nm。多名研究者的造球和焙烧试验结果表明：添加有机黏结剂替代膨润土可以提高生球落下和抗压强度，但有机聚合物热分解产物从球团内部扩散，阻碍了磁铁矿颗粒的固结，降低了成品球的抗压强度；此外，在焙烧过程中由于有机黏结剂高温裂解在球团中形成的孔隙会降低成品球团抗压强度[6-7]。

为充分发掘有机黏结剂对铁精矿球团质量提升的优点，同时弥补有机复合黏结剂削弱成品球团抗压强度的不足，本文在添加有机黏结剂时协同加入蛭石，利用蛭石的高温膨胀性能，填充在有机黏结剂裂解形成的孔隙中，从而来改善成品球的抗压强度。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验原料来自某钢铁厂的凹山铁精矿，膨润土为该钢铁厂所用的印度膨润土，各原料的理化性质如表1~4所示。综合表1、2来看，该铁精矿的比表面积不高，成球性指数偏低。表3结果显示膨润土的吸水率很高，是一种高品质的黏结剂。由表4可知，蛭石 <0.075 mm的粒级占比为93%，

表1 试验原料的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of iron concentrate %

原料名称	TFe	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	S	P	Na_2O	K_2O	Mn_3O_4	TiO_2
铁精矿	65.27	27.00	—	4.52	1.69	0.43	0.38	0.110	0.010	0.42	—	—	—
膨润土	11.98	—	—	47.01	15.00	1.52	2.02	0.051	0.082	2.13	0.12	—	—
蛭石	—	1.95	11.23	39.56	12.70	4.24	18.29	—	—	—	3.84	0.17	0.93

表2 铁精矿成球性能及粒度

Table 2 Pellet performance and particle size of iron concentrate

最大分子水/%	最大毛细水/%	成球性指数	真密度/($g \cdot cm^{-3}$)	堆密度/($g \cdot cm^{-3}$)	比表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)	<0.075 mm粒级占比/%
4.56	16.53	0.31	5.12	2.56	792.32	82.5

表 3　膨润土理化指标

Table 3　Physicochemical index of bentonite

阳离子交换容量/［mmol·(100 g)$^{-1}$］	吸蓝量/［g·(100 g)$^{-1}$］	胶质价/(mL·g^{-1})	膨胀容/(mL·g^{-1})	膨胀值/(mL·g^{-1})	吸水率/%	蒙脱石质量分数/%
70	36.09	307.5	21.5	13.8	502.76	81.65

表 4　蛭石的粒度组成(质量分数)

Table 4　Particle-size distribution of vermiculite　　%

>0.150 mm	[0.150,0.075) mm	[0.075,0.063) mm	[0.063,0.053) mm	[0.053,0.045) mm	<0.045 mm
5.4	1.6	45.3	16.8	14.6	16.3

细度满足球团的需要。

1.2　试验方法

造球及质量检测试验流程如图 1 所示。在实验室中称取 4 kg 铁精矿，配制 1% 的膨润土和不同比例的羧甲基纤维素钠(有机黏结剂)在混料盘中先手工混料，再用碾磨机细磨，进行堆料混匀两次。设置混料时间为 5 min；将混合料放入直径为 800 mm 的圆盘造球机上造球，设置造球机转速为 20 r/s、造球时间为 14 min，并密实 2 min；在造球过程中，每间隔一段时间向造球盘中加入相同的水分，以保障充足的造球水分要求。造球结束之后筛选出10 ~ 12 mm 的合格生球进行抗压强度、落下强度和爆裂温度测定，将剩余的合格生球烘干，并测定水分；再取干燥后的合格生球经 15 min 预热、20 min 氧化焙烧后得到成品球团矿，冷却之后进行成品球抗压强度测定。

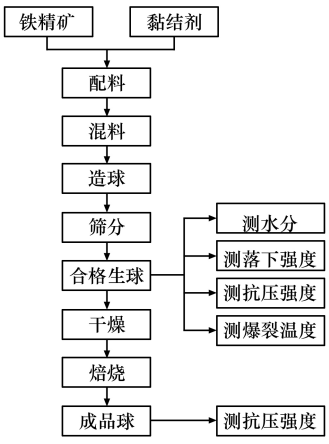


图 1　造球试验及球团质量检测流程

Fig. 1　Pelletizing experiment and inspection process of pellet quality

鉴于印度膨润土的质量较好，结合工业生产中的实际用量，试验选取 1% 膨润土和不同比例的有机黏结剂进行复合造球，确定最佳的有机黏结剂配比；同时，由于该有机黏结剂在预热焙烧阶段分解留下的孔隙会对成品球抗压强度产生不利影响，在最佳的有机黏结剂配比条件下，加入蛭石来改善成品球质量，通过加入不同比例的蛭石进行造球试验，确定最佳的蛭石配比，并通过扫描电镜观察加入蛭石前后成品球的形貌变化，分析蛭石影响成品球抗压强度的原因。

2　结果与讨论

2.1　有机黏结剂单因素试验

2.1.1　有机黏结剂对生球质量的影响

进行有机黏结剂单因素试验，研究其用量对球团性能的影响，结果如表 5 所示。由表 5 可知：随着有机黏结剂用量的增加，生球落下强度升高，当加入 0.15% 有机黏结剂时，生球落下强度达到了 14.0 次/(0.5 m)。由于该有机黏结剂含有大量的—COOH—和—OH 基团，—COO—可以与铁精矿表面发生离子链合，—OH 是亲水基团，所以加入有机黏结剂可以提高球团表面的亲水性，增加球团颗粒间的毛细力，使得球团在受到冲击时，颗粒之间可以相互滑动，产生塑性，不会轻易裂开，使得球团落下强度提高[8]。随着有机黏结剂用量的增加，生球抗压强度先增加后降低，当加入该有机黏结剂用量达到 0.12% 后，抗压强度开始下降，这是由于该有机黏结剂用量的增加导致球团塑性增加，适当的有机黏结剂用量可以增加球团的抗压强度，但有机黏结剂用量过高时，球团表面过于光滑，颗粒之间滑动增强，导致球团抗压强度下降[9]。球团的爆裂温度随着有机黏结剂用量的增加而降低，这是由于随着该有机黏结剂用

量的增加，球团形成链的聚团增多，在受热时毛细孔中的水分和蒸汽无法及时排除，产生内应力，导致球团破裂，从而使得球团的爆裂温度降低。

表 5 有机黏结剂用量对球团性能的影响

Table 5 Effect of the amount of organic binders on pellet properties

有机黏结剂用量（质量分数）/%	落下强度/［次·(0.5 m)$^{-1}$］	生球抗压强度/(N·P^{-1})	生球爆裂温度/℃
0	1.5	8.2	550
0.08	1.8	8.6	512
0.09	2.2	9.5	501
0.10	4.6	9.7	485
0.11	6.7	10.4	425
0.12	8.0	11.3	395
0.13	9.2	10.8	321
0.14	10.5	10.7	302
0.15	14.0	9.4	254

2.1.2 有机黏结剂对成品球抗压强度的影响

在预热温度为950 ℃、焙烧温度为1 200 ℃的焙烧条件下，试验得到有机黏结剂对成品球抗压强度的影响，结果如图 2 所示。由图 2 可知：随着有机黏结剂用量的增加，成品球的抗压强度不断下降，这是因为在球团焙烧过程中，由于温度升高，该有机黏结剂分解，球团内部产生很多孔隙，导致抗压强度降低。

为探究有机黏结剂对球团性能的影响机理，对该有机黏结剂进行热重和差热分析，结果如图3所示。由图3可知：随着温度的升高该有机黏结剂开始分解，其在100 ℃左右分解加快，此时是水分的蒸发过程；在300 ℃时分解速率升高，此时该有机黏结剂开始裂解，其在500 ℃左右分解完全，说明有机物在球团工艺的干燥阶段分解完全，在球团内部产生空位，导致球团在焙烧后产生孔隙，这些孔隙导致球团疏松，抗压应力降低，最终对成品球的抗压强度造成不利影响。

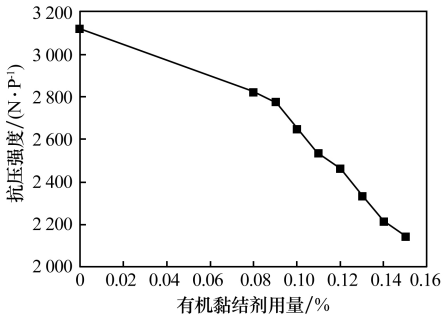


图 2 有机黏结剂用量对成品球抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of the amount of organic binder on compressive strength of finished ball

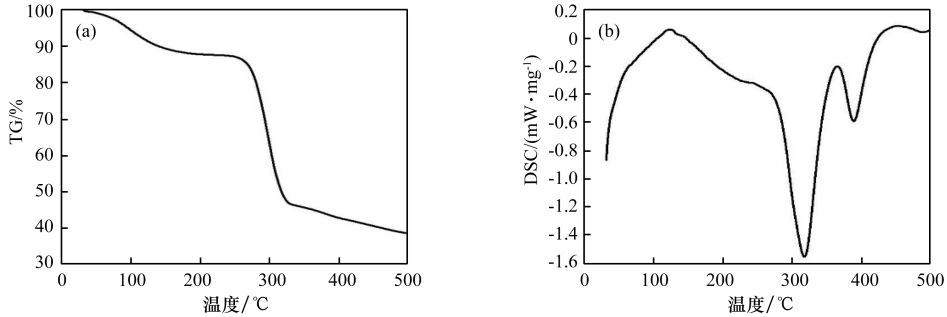
综上所述，加入有机黏结剂会明显改善生球的落下强度，并且随着加入占比的增加而升高，但球团的爆裂温度和成品球的抗压强度不断下降，爆裂温度应在350 ℃以上。因此，综合选取0.12%有机黏结剂+1%膨润土是最优条件进行后续试验研究。

2.2 蛭石、有机黏结剂、膨润土复配试验

前文研究发现有机黏结剂与膨润土配置的复合黏结剂对于单独使用无机黏结剂在生球性能上有明显优势，但随着有机黏结剂用量的增加，成品球的抗压强度不断下降。为了弥补这种不足，通过加入蛭石细粉来改善成品球的抗压强度，试验固定0.12%有机黏结剂+1%膨润土配比，再加入不同比例蛭石进行造球试验，结果如表6所示。

2.2.1 蛭石对生球性能的影响

由表6可知，随着蛭石用量的增加，生球落



（a）TG；（b）DTA

图 3 有机黏结剂的 TG 和 DTA 曲线

Fig. 3 TG and DTA curve of the organic binder

表 6　蛭石用量对球团性能的影响

Table 6　Effect of the amount of vermiculite on pellet performance

蛭石用量(质量分数)/%	落下强度/［次·(0.5 m)$^{-1}$］	生球抗压强度/(N·P^{-1})	生球爆裂温度/℃	成品球抗压强度/(N·P^{-1})	孔隙率/%
0	8.0	11.3	395	2 465	24.32
0.01	7.2	11.7	384	2 534	22.94
0.02	6.8	12.5	371	2 646	20.21
0.03	6.5	13.4	362	2 764	19.65
0.04	5.3	13.9	321	2 742	23.56
0.05	4.6	14.5	298	2 638	24.78
0.06	4.5	14.4	284	2 586	25.15

下强度不断下降，这是由于蛭石没有连结作用，随着蛭石用量的增加，球团颗粒间的毛细力降低，球团塑性变差，在下落到盲板受到冲击时球团颗粒间的相互滑动减少，所以生球落下强度降低；随着蛭石用量的增加，生球抗压强度提高，当蛭石用量增加后，球团中细小的颗粒增加，球团会变的更加密实，导致生球的抗压强度会有所增加[10]。

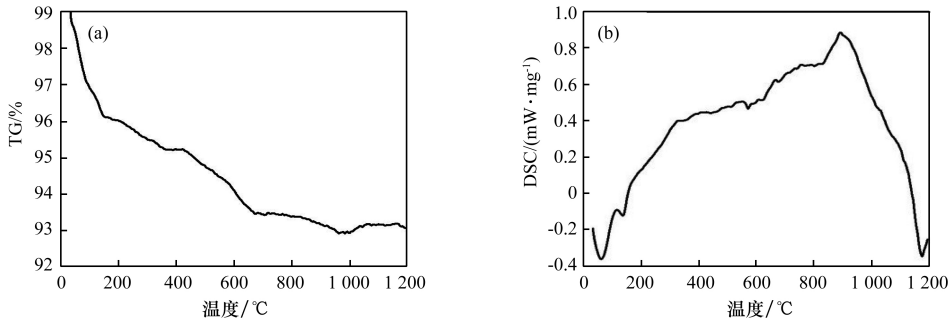
同时，随着蛭石用量的增加，球团爆裂温度也有所下降，这是由于随着蛭石用量的增加，球团中的孔隙减少，在温度上升后，球团内部水分蒸发，并无法及时的排出，导致球团的爆裂温度下降。因此在球团中蛭石的用量不宜过高，过高会导致生球落下强度和爆裂温度下降，蛭石用量应控制在0.03%左右比较合适。

2.2.2　蛭石对成品球抗压强度的影响

由表6可知，在相同焙烧条件下，当蛭石用量增加到0.03%时，成品球抗压强度达到最高，继续增加蛭石用量，成品球抗压强度下降；球团孔隙率先随着蛭石用量的增加而降低，但蛭石用量超过0.03%后，孔隙率反而升高，这是因为当用量过高时，蛭石会分散在除有机物分解留下的孔隙外的其他位置，并随着温度升高而膨胀，而蛭石在脱水膨胀时自身也会形成孔隙，这些孔隙同样会导致球团抗压强度降低，加入过多的蛭石并没有起到填满球团内部孔隙的作用，反而生成更多的孔隙，使得成品球抗压强度更低；同时，球团中 K_2O 质量分数不应超过0.07%，过量的K离子会导致球团异常膨胀，强度降低，粉化率剧增，给高炉冶炼带来不利影响。因此蛭石用量为0.03%最合适，过多的蛭石反而会影响球团冶金性能。

由于蛭石具有高温膨胀性，将蛭石加入到有机物球团中，当温度升高，有机黏结剂分解后，蛭石体积膨胀，可以填充在有机黏结剂分解留下的孔隙中，改善由于孔隙造成的成品球抗压强度下降的影响。

对蛭石进行热重和差热分析，结果如图4所示。由图4可知：在0～200 ℃时蛭石脱水速率过快，在此区间有两个吸热峰，吸热是由于物理吸附水分子的脱除引起的，该部分水的脱除不会引起蛭石的体积膨胀；在200～1 000 ℃时蛭石脱水速率减慢，在600 ℃和700 ℃左右出现两个吸热峰，此时吸热是由蛭石阳离子结合的层间水的脱除引起的，层间水的脱除使蛭石层间距增大，蛭石发生膨胀；在1 000 ℃以后蛭石重量几乎不发生变化，1 200 ℃时虽然出现吸热峰，但此时蛭石晶体结构已经破坏，不再发生膨胀[11]。说明在球团工艺的预热阶段，蛭石内部层间水蒸发后发生体积



（a）TG；（b）DTA

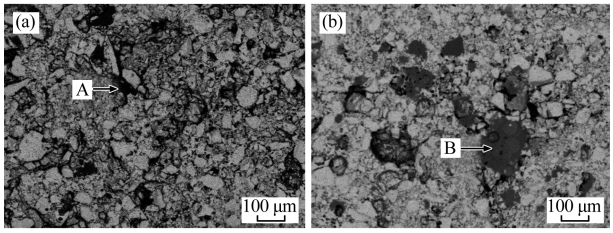
图 4　蛭石的 TG 和 DTA 曲线

Fig. 4　TG and DTA curve of vermiculite

膨胀，填满在球团内部有机黏结剂分解后形成的孔隙中，同时，Al、Si 等容易与铁精矿形成低熔点物质，分布在孔隙周围，有利于固相扩散，促进晶体长大，使得球团矿紧密连接、增加其抗压应力，从而改善球团的抗压强度[12]。

2.3 扫描电镜分析

加入蛭石前、后成品球的表面形貌如图 5 所示。由图 5(a)可知，未加入蛭石的球团焙烧后，球团内部由于有机物的分解形成许多孔隙，没有形成很致密的连结，因此成品球抗压强度较低。由图 5(b)可知，加入蛭石的球团中，蛭石高温膨胀后填充在有机物分解的孔隙中，与球团矿紧密结合在一起，灰色部分为蛭石膨胀后与球团形成的液相连结，这些液相连结分布在球团矿中使得在相同面积下球团的孔隙减少，孔径也有所减小，球团更加致密，成品球团抗压强度提高。



(a) 未加入蛭石；(b 加入蛭石

A—有机物挥发后所形成的孔隙（黑色部分）；B—蛭石膨胀后补充在球团孔隙中形成的断面（灰色部分）。

图 5 加入蛭石前、后的成品球 SEM 对照

Fig. 5 SEM comparison of pellets before and after adding vermiculite

3 结 论

(1) 当膨润土用量为 1%、有机黏结剂用量为 0.12%时，球团的性能更好，此时生球的落下强度为 8.0 次/(0.5 m)，生球抗压强度为 11.3 N/P，爆裂温度为 395 ℃，成品球抗压强度为 2 465 N/P。

(2) 采用 1%膨润土、0.12%有机黏结剂为复合有机黏结剂，加入蛭石后，生球落下强度和爆裂温度降低，生球抗压强度升高。当加入 0.03%蛭石时，生球落下强度为 6.5 次/(0.5 m)，抗压强度为 13.4 N/P，爆裂温度为 362 ℃，可以满足生产要求。加入 0.03%的蛭石可以改善成品球抗压强度，成品球抗压强度由 2 465 N/P 提升至 2 764 N/P。

(3) 加入有机黏结剂后，成品球抗压强度降低主要是由于该有机黏结剂受热挥发导致球团孔隙率增加、球团抗压应力降低，此过程主要发生在球团的干燥阶段，蛭石高温膨胀发生在 200 ~ 1 000 ℃，所以蛭石膨胀主要发生在预热阶段。蛭石通过不断膨胀来填充球团中的孔隙，并在焙烧过程中和球团连结在一起，有效降低了球团孔隙率，从而提高成品球的抗压强度。

参考文献：

[1] EISELE T C, KAWATRA S K. A review of binders in iron ore pelletization [J]. Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review, 2003, 24(1): 1 – 90.

[2] 滕飞，曾志彦，郭培民. 一种含锰铁精矿球团性能试验研究[J]. 烧结球团，2021，46(5)：47 – 53.
TENG Fei, ZEN Zhiyan, GUO Peiming. Experimental study on pellets performance of a kind of manganese-containing iron concentrate[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(5): 47 – 53.

[3] 姜涛，邱冠周，王淀佐. 铁矿球团有机黏结剂的分子构型及选择判据[J]. 中南工业大学学报(自然科学版)，2000(1)：17 – 20.
JIANG Tao, QIU Guanzhou, WANG Dianzuo, et al. Molecular structure mould and selecting criterion of organic binder for iron ore pellet[J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 2000(1): 17 – 20.

[4] 李彩霞，任瑞晨，刘健，等. 有机物/膨润土复合球团黏结剂的研究[J]. 硅酸盐通报，2011，30(4)：809 – 812.
LI Caixia, REN Ruichen, LIU Jian, et al. Study on organics/bentonite compound pellet binder[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2011, 30(4): 809 – 812.

[5] 徐晨阳，张建良，刘征建，等. 有机复合黏结剂特性表征及对球团矿性能的影响[J]. 钢铁研究学报，2021(11)：1154 – 1160.
XU Chenyang, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Characterization of organic composite binder and its influence on properties pellets[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021(11): 1154 – 1160.

[6] ZHAO H, ZHOU F, ZHAO H, et al. A review on the effect of the mechanism of organic polymers on pellet properties for iron ore beneficiation[J]. 2022, 14(22): 4874.

[7] 贾继华，韩宏亮，段东平，等. 黏结剂对高炉灰含碳球

团强度的影响[J]. 钢铁钒钛,2013,34(6):29 – 32.
JIA Jihua,HAN Hongliang,DUAN Dongping,et al. Effect of different binder addition on strength of carbon-containing pelletized blast furnace dusts[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2013,34(6):29 – 32.

[8] 刘新兵,杜烨. 含有机黏结剂人工钠化膨润土在球团生产中的应用[J]. 烧结球团,2003,28(6):47 – 50.
LIU Xinbing, DU Ye. Application of a sodium activated bentonite added organic binder in iron ore pellet production[J]. Sintering and Pelletizing,2003,28(6):47 – 50.

[9] 王永刚,杨大兵. 黏结剂对程潮铁精矿球团质量的影响[J]. 烧结球团,2011,36(4):20 – 22;27.
WANG Yonggang,YANG Dabing. Influence of binder on quality of Chengchao iron concentrate pellet[J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(4):20 – 22;27.

[10] 嵇建国,杨群,谢永生. 新型有机黏结剂在球团生产中的应用[J]. 烧结球团,2011,36(5):30 – 33.
JI Jianguo, YANG Qun, XIE Yongsheng. Application of new type of organic binder in pellet production[J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(5):30 – 33.

[11] 刘福生,彭同江,张宝述. 膨胀蛭石的利用及其新进展[J]. 非金属矿,2001,24(4):5 – 7.
LIU Fusheng, PENG Tongjiang, ZHANG Baoshu. Utilization of expanded vermiculite and its new progression[J]. Non-Metallic Mines,2001,24(4):5 – 7.

[12] 胡光锁. 蛭石膨胀机理及膨胀蛭石性质的研究[D]. 北京:北京工商大学,2006.
HU Guangsuo. Study on the expansion mechanism of vermiculite and the properties of expanded vermiculite [D]. Beijing: Beijing Technology and Business University,2006.

(上接第 24 页)

MA Jinghua. Emission characteristics of particulates from typical production process iron and steel enterprises[D]. Chongqing:Southeast University,2009.

[2] GUAN F,DUAN M,MA W,et al. An experimental study of mechanical behavior of coiled tubing in pipelines[J]. Applied Ocean Research,2014,44:13 – 19.

[3] 谢振强,曹学文,吴超,等. 弯管固体颗粒冲蚀理论与防冲蚀研究进展[J]. 表面技术,2021,50(8):170 – 179.
XIE Zhenqiang,CAO Xuewen,WU Chao,et al. Research progress of solid particle erosion theory and erosion prevention in bent pipes[J]. Surface Technology,2021,50(8):170 – 179.

[4] 偶国富,许根富,朱祖超,等. 弯管冲蚀失效流固耦合机理及数值模拟[J]. 机械工程学报,2009,45(11):119 – 124;132.
OU Guofu,XU Genfu,ZHU Zuchao,et al. Fluid-structure interaction mechanism and numerical simulation of elbow erosion failure[J]. Journal of Mechanical Engineering,2009,45(11):119 – 124;132.

[5] 周大鹏,马学东,陈燕. 基于 CFD-DEM 耦合几形管冲蚀磨损的模拟分析[J]. 石油机械,2022,50(7):136 – 142.
ZHOU Dapeng, MA Xuedong, CHEN Yan. Simulation analysis of erosion wear of several shaped tubes based on CFD-DEM coupling[J]. Petroleum machinery, 2022,50(7):136 – 142.

[6] 王岩. 液体颗粒对天然气管道冲蚀的数值模拟[D]. 抚顺:辽宁石油化工大学,2019.
WANG Yan. Numerical simulation of erosion of natural gas pipeline by liquid particles[D]. Fushun: Liaoning Shihua University,2019.

[7] KESANA N R, GRUBB S A, MCLAURY B S, et al. Ultrasonic measurement of multiphase flow erosion patterns in a standard elbow[J]. Journal of Energy Resources Technology,2013,135(3):1160 – 1167.

[8] MENG H C,LUDEMA K C. Wear models and predictive equations:their form and content[J]. Wear,1995,181:443 – 457.

[9] CHEN X, MCLAURY B S, SHIRAZI S A. Application and experimental validation of a computational fluid dynamics (CFD)-based erosion prediction model in elbows and plugged tees[J]. Computers & Fluids,2004,33(10):1251 – 1272.

[10] ZHANG Y L, MCLAURY B S, SHIRAZI S A. Improvements of particle near-wall velocity and erosion predictions using a commercial CFD code[J]. Journal of Fluids Engineering-Transactions of The Asme, 2009,131(3):303 – 312.

[11] GRANT G, TABAKOFF W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles[J]. Journal of Aircraft,1975,12(5):471 – 478.