

新型复合粘结剂提高生球质量的作用机理及构效关系

雷 杰¹⁾, 汪名赫¹⁾, 周江虹²⁾, 孙社生²⁾, 龙红明¹⁾✉

1) 安徽工业大学冶金工程学院, 马鞍山 243032 2) 马鞍山钢铁股份有限公司制造部, 马鞍山 243000

✉通信作者, E-mail: yafllhm@126.com

摘 要 降低膨润土用量是提高球团品位、实现节能减排的有效途径之一。基于新型高效复合粘结剂, 通过生球制备、线性拟合分析、生球力学特征分析等手段研究了复合粘结剂对生球质量的影响规律及与重要指标的构效关系, 阐明了复合粘结剂提高生球质量的作用机理。结果表明: 配比(质量分数)为 1.2% 膨润土+0.028% 有机粘结剂的复合粘结剂球团, 落下强度(0.5 m 高度落下次数)达到 6.2、平均抗压强度达到 14.5 N、爆裂温度达到 542 ℃, 与 2.0% 膨润土球团相比, 生球质量相近, 但膨润土消耗减少 40%; 基于构效关系分析, 有机粘结剂对生球落下强度、爆裂温度作用显著, 膨润土对干球强度影响更大; 有机粘结剂通过增强颗粒的亲水性、毛细力和黏性力强化了生球落下强度, 干燥时在表层形成少量孔隙, 有利于球团内水分的排出, 提高了生球爆裂温度, 干燥后以固态连接桥的形式强化干球强度, 但是孔隙的位点和尺寸可能会降低干球强度, 因此, 对干球强度起决定性作用的是膨润土, 有机粘结剂对干球强度的影响呈现多面性。

关键词 球团; 复合粘结剂; 生球质量; 作用机理; 构效关系

分类号 TF521.6

Mechanism and structure-activity relationship of a new composite binder to improve the quality of green pellets

LEI Jie¹⁾, WANG Ming-he¹⁾, ZHOU Jiang-hong²⁾, SUN She-sheng²⁾, LONG Hong-ming¹⁾✉

1) School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China

2) Manufacturing Department, Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'anshan 243000, China

✉ Corresponding author, E-mail: yafllhm@126.com

ABSTRACT Reducing bentonite consumption is one of the effective ways to improve the grade of pellets and realize energy saving and emission reduction. Based on the new high-efficiency composite binder, the effect of the composite binder on the quality of green pellets and structure-activity relationship with important indexes were studied by means of green pellet preparation, linear fitting analysis, and green pellet mechanical characteristics analysis. Moreover, the mechanism of the composite binder to improve the quality of the green pellets was expounded. Results show that the composite binder pellet, with a ratio of 1.2% bentonite and 0.028% organic binder, has a drop number (dropped from 0.5 m height) of 6.2, a average crushing strength of 14.5 N, and a shock temperature of 542 ℃. Compared with the pellet with 2.0% bentonite, the mass of the green pellets is similar; however, the bentonite consumption is reduced by 40%. Based on the analysis of the structure-activity relationship, the organic binder has a considerable effect on the drop number and the shock temperature of the green pellets, and the bentonite has a greater effect on the dry-crushing strength. The organic binder strengthens the drop number of the pellets by enhancing the hydrophilicity, capillary force, and viscosity, and it forms small amounts of pores on the surface layer during drying, which is beneficial for discharging water in the pellets and improving the shock temperature of the pellets. After drying, the organic binder strengthens the pellets in the form of a solid connection bridge; however, the site and the size of the

收稿日期: 2021-06-30

基金项目: 安徽省杰出青年资助项目(2208085J19)

pores may reduce the dry-crushing strength. Therefore, bentonite plays a decisive role in the strength of the dry pellets, and the influence of the organic binder on the strength of the dry pellets is multifaceted.

KEY WORDS pellet; compound binder; the quality of green pellet; the mechanism of action; structure-activity relationship

“碳中和, 零排放”概念的提出, 对高炉炉料结构优化提出了更多要求^[1]. 球团矿作为优质的高炉炉料, 其工序能耗、NO_x、SO₂ 及二噁英排放量都远低于烧结矿, 同时具有粒度均匀、冷态强度高、铁品位高、冶金性能好等优点^[2-5]. 膨润土作为主要的球团粘结剂, 能大幅改善原料成球性、提高球团质量^[6]. 但膨润土中的 SiO₂、Al₂O₃ 等脉石成分, 几乎全部残留在球团内, 进而降低球团矿品位, 增加燃料比和渣量^[7-8]. 目前, 我国膨润土用量大多在 15 kg·t⁻¹ 以上, 而国外膨润土消耗量为 5~10 kg·t⁻¹. 据统计, 每减少 1.0% 的膨润土用量, 将提高球团品位 0.6%, 降低燃料比 1.2%^[9-11]. 因此, 降低膨润土用量是提高球团铁品位、实现节能减排的有效途径之一.

以有机粘结剂替代部分膨润土是降低膨润土用量的有效方法之一. 国内外学者关于复合粘结剂的开发应用开展了大量研究: 中南大学李宏煦^[12-13] 首次提出有机粘结剂 X-P-K 理想模型, 为开发有机粘结剂提供了理论依据, 李宏煦等^[13]、杨永斌等^[14] 以有机粘结剂替代膨润土制备球团, 但生产实践表明, 采用有机粘结剂完全替代膨润土, 不仅会大幅增加球团生产成本, 还会导致成品球团强度下降, 无法满足高炉生产要求. 因此, 兼具膨润土和有机粘结剂优点的膨润土基复合球团粘结剂的开发, 成为球团工艺及低碳炼铁技术发展的重要方向^[15-18].

本文研究了新型复合粘结剂对生球质量的影响规律, 基于“构效关系”思想, 确定了膨润土及有机粘结剂用量与生球各性能指标的相关程度和数学模型; 通过对生球碰撞破碎的力学特征分析, 结合“构效关系”模型, 研究了复合粘结剂强化生球质量的作用机理, 为复合粘结剂降低膨润土消耗、

优化生球性能的工业化应用提供理论指导和技术支撑.

1 原料及研究方法

1.1 原料性能

本实验基于某企业球团生产原料结构 55% A 精+25% B 精+20% Z 精, 所涉及的 3 种铁精矿的化学成分、粒度组成、比表面积、成球性等指标如表 1 所示. 3 种铁精矿皆为铁品位大于 65% 的磁铁精矿, 其中 A 精和 Z 精的 SiO₂ 含量较高, 烧损较低, B 精的 SiO₂ 含量相对较低, 但 CaO、MgO 和 S 含量相对较高, 烧损偏高. 3 种铁精矿的-74 μm 粒级颗粒的占比(质量分数)均大于 90%, 比表面积在 1400~1600 cm²·g⁻¹ 之间, 其中 B 精最细, -74 μm 和-45 μm 粒级颗粒比例分别为 99.50% 和 94.80%, 综合而言, 原料粒度较优但比表面积不高; 3 种铁精矿的静态成球指数都在中等以上, 其中用量最大的 A 精为中等成球性, 对混合料成球性造成不利影响.

实验采用的膨润土的物化性能如表 2 所示, 膨润土吸蓝量偏低, 2 h 吸水率和膨胀指数较好. 有机粘结剂 P 高温焙烧后的灰分成分如表 3 所示, 有机粘结剂 P 经高温焙烧后残留灰分的主要成分为 Na、S、Ca、K 等, 其中 Na₂O 质量分数为 88.4%, K₂O 质量分数仅为 0.024%, 考虑到粘结剂的灰分质量分数为 2.1%, 而有机粘结剂 P 的添加量仅为膨润土的 1/50~1/30, 有利于高炉碱负荷的降低.

1.2 实验方法

实验过程主要包括混合料润磨预处理、生球制备及性能检测 3 个部分. 将 3 种铁精矿、膨润土、粘结剂按照比例混匀, 在 φ300 mm×400 mm 的润磨机中润磨 30 min, 润磨水分 7.5%, 润磨机填

表 1 铁精矿的主要化学成分及静态成球指数

Table 1 Main chemical compositions and static pelletization index of iron-containing raw materials

Iron ore	Chemical composition(mass fraction)/%								LOI	Mass fraction of iron ore with -74 μm/%	Mass fraction of iron ore with -45 μm/%	Specific surface area/(cm ² ·g ⁻¹)	Static pelletization
	TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P					
A	65.15	24.89	4.95	1.66	0.40	0.54	0.077	0.012	-0.74	94.0	78.8	1408	Medium
B	65.46	25.83	3.76	0.63	1.02	1.62	0.200	0.100	-1.91	99.5	94.8	1466	Excellent
Z	65.75	26.50	6.57	0.84	0.30	0.48	0.054	0.014	-0.47	93.6	80.3	1568	Good

Note: LOI is burning loss.

表2 膨润土的物化性能

Table 2 Physical and chemical properties of bentonite			
Methylene blue adsorbed/ (per 100 g)/g	Water absorption (2 h)/ %	Swelling coefficient/ (mL·g ⁻¹)	Colloid index (per 15 g)/mL
21.69	496	25	580

Table 3 Chemical composition of the organic binder P ash %							
Na ₂ O	SO _x	CaO	SiO ₂	Cl	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O
88.4	10.06	0.382	0.366	0.277	0.214	0.168	0.024

充率 20%，润磨后取出混合料造球。生球制备在 φ1000 mm、边高 200 mm 圆盘造球机中进行，倾角 45°~47°可调，转速 23 r·min⁻¹，造球时间 15 min，生球水分控制在 8.0%~9.0%，造球过程采用人工加料、加水，2 min 制备母球、10 min 母球长大到目标尺寸，经 3 min 随盘转动紧密后，取直径 12.5~16 mm 的合格球团，按照标准方法检测生球水分、抗压强度、落下强度、爆裂温度及干球强度等指标。

2 实验结果与分析

2.1 膨润土比对生球质量的影响

膨润土比对生球质量的影响规律如图 1 所示。随着膨润土用量的增加，生球落下强度和干球强度显著升高，生球爆裂温度有小幅提升。膨润土

用量对生球抗压强度没有表现出规律性，但各工况的抗压强度都可以满足生产要求。仅当膨润土质量分数为 2.0% 时，生球质量才能满足生产要求，此时生球落下强度（0.5 m 高度落下次数）为 6.3，爆裂温度 530 ℃。由此可见，膨润土主要对生球的落下强度、爆裂温度和干球强度产生影响，对生球抗压强度几乎没有影响。

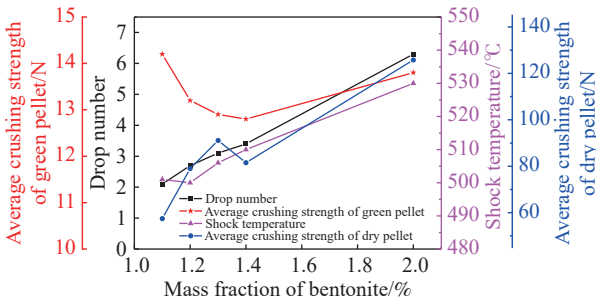


图1 膨润土用量对生球质量的影响
Fig.1 Influence of bentonite dosage on the quality of green pellets

2.2 复合粘结剂配比对生球质量的影响

将膨润土和粘结剂 P 按照不同比例混合均匀，制备复合粘结剂，不同配比复合粘结剂对生球质量的影响如表 4 所示，膨润土和粘结剂 P 的用量对于生球的落下强度、爆裂温度和干球强度都有不同程度的影响，而对于生球抗压强度没有体现出规律性：随着粘结剂 P 用量的增加，落下强度和干球强度有较大幅度提升，爆裂温度小幅增加。

Table 4 Influence of compound binder dosage on the quality of green pellets						
Mass fraction of bentonite/%	Mass fraction of P / %	Drop number	Average crushing strength of green pellet / N	Shock temperature/ ℃	Average crushing strength of dry pellet / N	Moisture content of green pellet/ %
1.1	0.020	3.9	11.0	535	82.3	8.4
	0.030	4.7	11.3	550	81.8	8.4
	0.040	5.1	11.9	560	90.7	8.8
	0.050	5.8	11.6	540	89.5	8.6
1.2	0.020	4.8	14.6	535	59.0	8.1
	0.024	5.8	13.8	530	57.1	8.5
	0.028	6.2	14.5	542	66.0	8.3
	0.032	6.6	13.9	554	73.9	8.6
1.3	0.016	4.1	13.3	540	65.2	8.7
	0.020	5.9	12.2	546	72.3	8.6
	0.024	6.4	11.7	549	63.3	8.7
	0.028	7.0	13.6	555	73.1	8.5
1.4	0.008	4.1	12.1	520	88.4	8.6
	0.012	5.2	11.2	535	107.3	8.8
	0.016	6.9	12.8	528	98.3	8.7
	0.020	7.8	13.8	530	108.1	9.0

膨润土添加量(质量分数)在 1.1% ~ 1.4% 时, 生球落下强度是限制性环节, 在 3.5 以下. 随着粘结剂 P 不同比例的配入, 生球质量逐渐达到或超过膨润土添加量 2.0% 时水平, 例如膨润土+P 配比(质量分数)分别为 1.2%+0.028%、1.3%+0.024%、1.4%+0.016% 等工况, 降低膨润土消耗 30% ~ 40%.

2.3 复合粘结剂球团构效关系

表 4 展示了膨润土和粘结剂对生球质量的双重作用关系, 单种粘结剂与生球各指标间的影响规律难以直观分析. 通过探索单种粘结剂对生球各个关键性能指标间的交互作用关系, 对于分析复合粘结剂强化生球质量机理, 建立粘结剂添加量和生球质量预测模型有重要意义. 本文研究了膨润土和有机粘结剂添加量与生球关键指标间的构效关系.

统计次数为 21 次, 自变量为有机粘结剂 P 配比、膨润土配比; 因变量为落下强度、抗压强度、爆裂温度、干球强度. 得到多元线性回归方程.

落下强度回归方程: $y_1=100.121x_1+5.715x_2-4.06$;

抗压强度回归方程: $y_2=-19.321x_1-0.345x_2+13.65$;

爆裂温度回归方程: $y_3=1094.929x_1+10.778x_2+499.049$;

干球强度回归方程: $y_4=292.412x_1+91.502x_2-40.301$.

式中: y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 分别为落下强度、抗压强度、爆裂温度、干球强度; x_1 为 P 配比, x_2 为膨润土配比, $0 \leq x_1 \leq 0.05$, $0.7 < x_2 \leq 2.0$.

回归方程的显著性和拟合度如表 5 所示. 根据显著性水平划分^[19-20], 有机粘结剂 P 配比、膨润土配比与落下次数存在极显著相关性, 与爆裂温度、干球强度存在显著相关性, 与抗压强度无相关性. 落下强度和爆裂温度所建立的回归模型拟合度较高, 具有良好的参考性; 干球强度所建立的回归模型拟合度较低, 没有高程度的参考性. 有机粘结剂 P、膨润土的标准回归系数如表 6 所示. 通过比较标准化回归系数的绝对值大小, 可以判断

表 5 回归方程显著性和拟合度

Table 5 Significance and fitness of regression equation			
Factor	Significance of variance P	Significant correlation	R^2
Drop number	0.0004	Very significant	0.882
Green crushing strength	0.551	Not relevant	0.433
Shock temperature	0.006	Significant	0.713
Dry crushing strength	0.008	Significant	0.588

出有机粘结剂 P 对生球落下强度、爆裂温度作用显著, 膨润土对干球强度影响更大.

表 6 有机粘结剂 P 和膨润土标准化回归系数

Table 6 Standardized regression coefficient of organic binder P and bentonite

Factor	P	Bentonite
Drop number	0.905	0.734
Shock temperature	0.851	0.206
Dry crushing strength	0.190	0.843

3 复合粘结剂提高生球质量机理分析

3.1 改善落下强度机理分析

生球落下过程可以分为加载和卸载两个阶段^[21]: 如图 2 所示, 生球从 $h=0.5$ m 高度自由落下与不发生形变的钢板碰撞, 初始时刻速度 $V_0=0$, 与钢板接触瞬间速度达到最大值 $V_{\max}$, 称为加载阶段, 以接触点为圆心由外向内形成“损伤圆”, 球团内部颗粒发生相对滑移, 产生微裂纹; 随后生球在时间 t 内由 $V_{\max}$ 逐渐减速为 0, 将全部动量转化为冲量, 球团内部微裂纹继续发展成裂纹, 称为卸载阶段, 如公式(1)所示.

$$(F - G)t = mV_{\max} - mV_t \tag{1}$$

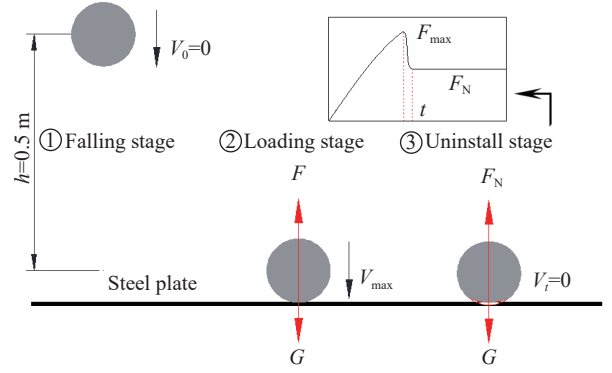


图 2 落下过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of falling process

其中: F 为钢板对生球施加的反向作用力, $F_{\max}$ 为最大反向作用力, F_N 为平衡时的作用力; G 为重力; t 为生球从 $V_{\max}$ 减速至 0 所用的时间; m 为生球质量; V_t 为时间 t 时的速度, $V_t=0$.

由式(1)可知, $V_{\max}$ 、 m 、 G 皆为固定值, 要缓解钢板对生球的反向作用力 F , 只能延长卸载时间 t .

造球原料的表面性质、亲水性对其成球性和生球质量起主导作用, 即造球原料在毛细力和机械力的共同作用下成核、长大, 并最终在毛细力和黏性力的作用下具备一定强度^[22-24]. 当物料润湿良好时, 水分填充在颗粒空隙中形成毛细水, 表面

张力的作用使毛细水在颗粒空隙中产生毛细力，如图 3 所示，毛细力 F_c 如公式(2)所示^[25]。

$$F_c = 2\pi \gamma \rho_2 (1 + H\rho_2) \tag{2}$$

$$H = \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{2\rho_1\rho_2} \tag{3}$$

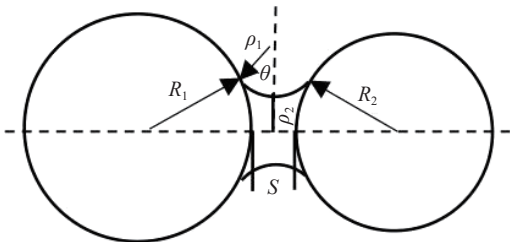


图 3 颗粒间毛细水液桥示意图

Fig.3 Schematic diagram of liquid bridge

式中， H 为液桥平均曲率， γ 为表面张力系数， ρ_1 、 ρ_2 为液桥弧半径。

Davis 等^[26]、Lian 等^[27]、Adams 和 Perchard^[28]、Goldman 等^[29]通过建模推导计算出了含液相颗粒间的黏性力，并把黏性力分解为法向分量和切向分量，黏性力由法向分量 F_{vn} 和切向分量 F_{vt} 共同组成：

$$F_{vn} = 6\pi \eta R^* v_n \frac{R^*}{S} \tag{4}$$

$$F_{vt} = \left(\frac{8}{15} \ln \frac{R^*}{S} + 0.9588 \right) 6\pi \eta R^* v_t \tag{5}$$

式中， η 为液体黏度， v_n 为相对法向速度， v_t 为相对切向速度， R^* 为折合半径， $R^* = 1/R_1 + 1/R_2$ ， R_1 、 R_2 分别为颗粒半径， S 为分离距离。当分离距离达到极限分离距离 S_c 时，液桥就会断开失去作用力。极限分离距离由式(6)所得，它与液桥体积 M 相关。

$$S_c = (1 + 0.5\theta)M^{1/3} \tag{6}$$

式中， θ 为颗粒液体间的接触角。由公式(2)~(6)分析可知，生球内部颗粒间连接强度主要与球团原料的毛细力和黏性力大小有关。毛细力与物料的亲水性、形成毛细水的数量以及液相的表面张力系数有关，黏性力与切/法速度、液相黏度、液桥体积等密切相关，但在外界机械力一定的情况下，颗粒的切/法速度不变，黏性力主要受到生球内部液相黏度影响^[30]。因此，提高落下强度可以从两个角度着手：

- (1)提高生球自身的毛细力和黏性力；
- (2)延长生球落下时的卸载时间 t ，减轻钢板对生球的反向作用力。

物料亲水性的提高利于生球塑性的提升，生球塑性的升高有利于卸载时间 t 的延长，进而减小

钢板反作用力 F 。膨润土因其良好的亲水性、分散性成为主要球团粘结剂。以有机粘结剂 P 取代部分膨润土制备的复合粘结剂黏度如表 7、图 4 所示。

表 7 膨润土和有机粘结剂 P 的黏度

Table 7 Viscosity of bentonite and organic binder P

Binder	Viscosity / (mPa·s)
Bentonite	3
P	90~120

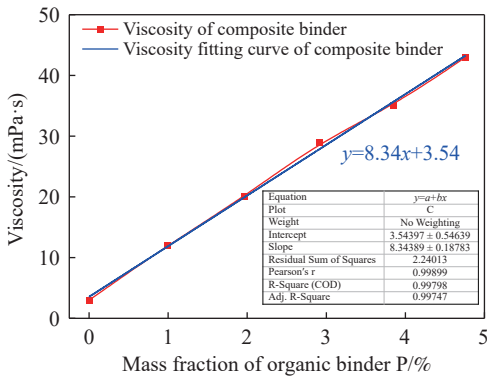


图 4 有机粘结剂 P 比例对复合粘结剂黏度的影响

Fig.4 Influence of organic binder P ratio on the viscosity of composite additive

如表 7、图 4 所示，粘结剂 P 的黏度是膨润土的 30~40 倍，复合粘结剂的黏度值与粘结剂 P 添加百分比呈正比。即使仅添加 1.0%(质量分数)的粘结剂 P，复合粘结剂的黏度值也是膨润土黏度值的 4 倍，对应的黏性力提高 4 倍。

图 5 为粘结剂 P 的傅里叶—红外光谱图，3430 cm^{-1} 为游离—OH 伸缩振动，1780 cm^{-1} 为羧酸二聚体，1441 cm^{-1} 为—CH₂ 变形振动，873 cm^{-1} 为羧基伸缩振动，697 cm^{-1} 为 C—Cl 伸缩振动。由图 6 可知，粘结剂 P 对膨润土层状硅酸盐骨架没有大的改变。1433 cm^{-1} 附近为—CH₂ 的伸缩振动峰，这是有机粘结剂 P 的特征峰，且随着粘结剂 P 添加比例的

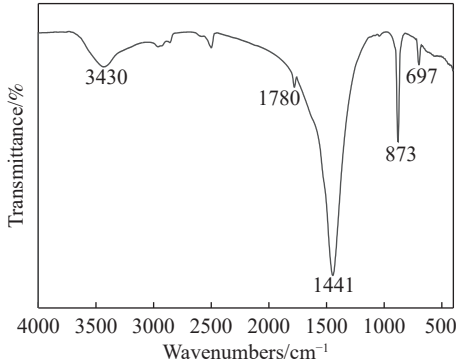


图 5 有机粘结剂 P 红外光谱

Fig.5 FTIR of organic binder P

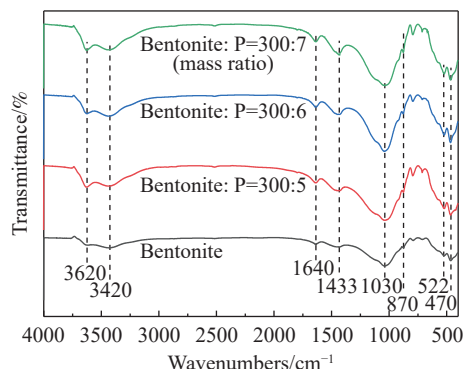


图 6 复合粘结剂红外光谱

Fig.6 FTIR of composite additive

增加, 此吸收峰有较为明显的增大, 说明粘结剂 P 已经成功结合到膨润土层间或表面。

粘结剂 P 为有机长碳链、多种活性官能团的结构, 在成球过程中, 极性基团吸附在铁精矿颗粒表面, 亲水性基团伸向铁精矿颗粒表面, 矿粒的亲水性增强。亲水性的增强有利于颗粒间“液桥”(毛细水)的增加。由式(6)可知, 颗粒间液体体积、液桥颈半径 ρ_2 增大, 颗粒极限分离距离 S_c 增大、毛细力增强。当生球受外力破坏时, 颗粒间的液桥不易断裂。同时, 官能团的增多也使矿粒间的化学作用能增强。在多种因素作用下, 生球强度提高。

3.2 改善爆裂温度和干球强度机理分析

粘结剂 P 的热重-差热曲线如图 7 所示。在空气气氛下, 粘结剂 P 的开始分解温度为 107 °C, 此阶段主要发生脱水反应; 在 324 ~ 550 °C 之间第一次剧烈失重, 此时出现两个放热峰, 粘结剂与氧气发生了氧化燃烧反应。此阶段同时发生生球的脱水反应, 如果生球表层水分蒸发不及时, 极有可能导致生球内部蒸气压过大而使生球爆裂。粘结剂 P 在 300 ~ 600 °C 区间发生剧烈的燃烧反应, 提高了生球的孔隙度, 特别是生球表层的孔隙度, 有利于生球内部水分的蒸发, 提高生球爆裂温度。

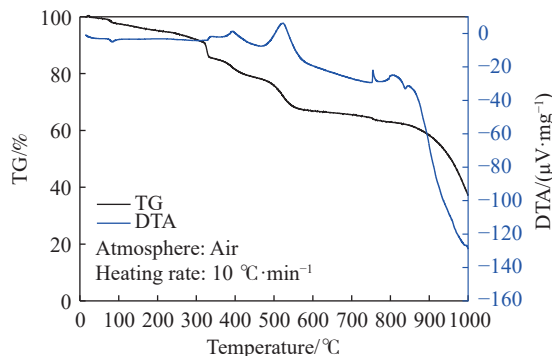


图 7 有机粘结剂 P 的热重分析和差热分析

Fig.7 Thermogravimetric analysis and differential thermal analysis of organic binder P

有机粘结剂 P 对干球强度的影响较为复杂。当球团内水分蒸发后, 膨润土和粘结剂 P 颗粒都以固态连接桥的形式填充在铁矿颗粒间, 粘结剂 P 由于其高粘性, 其黏结能力甚至比膨润土大得多, 从这个角度讲, 粘结剂 P 有利于干球强度的提高。另一方面, 粘结剂 P 部分分解在球团内形成少量孔隙, 孔隙的位点和尺寸可能会降低干球强度。由于膨润土颗粒的数量远大于粘结剂 P 颗粒, 因此, 对干球强度起决定性作用的是膨润土, 有机粘结剂 P 对干球强度的影响呈多面性。

4 结论

(1) 随着复合粘结剂用量的增加, 生球质量改善明显。复合粘结剂最佳用量(质量分数)为 1.2% 膨润土+0.028%P, 此用量下生球质量与 2.0% 膨润土球团相当, 膨润土消耗降低 40%;

(2) 复合粘结剂对生球质量有双重作用关系, 有机粘结剂 P 对生球落下强度、爆裂温度作用显著, 膨润土对干球强度影响更大;

(3) 生球落下强度与颗粒间的毛细力和黏性力有关, 有机粘结剂 P 因其高黏度和良好的亲水性, 增强了毛细力和黏性力, 进而提高生球落下强度; 有机粘结剂 P 在干燥时部分分解, 产生的孔隙有利于生球内水分的排出, 提高生球爆裂温度; 对干球强度起决定性作用的是膨润土, 有机粘结剂 P 对干球强度的影响呈多面性。

参 考 文 献

- [1] Xing Y, Zhang W B, Su W, et al. Research of ultra-low emission technologies of the iron and steel industry in China. *Chin J Eng*, 2021, 43(1): 1
(邢奕, 张文伯, 苏伟, 等. 中国钢铁行业超低排放之路. 工程科学学报, 2021, 43(1): 1)
- [2] Wang X D, Jin Y L. Strategy analysis and study of high ratio of pellet utilized in blast furnace. *Iron Steel*, 2021, 56(5): 7
(王新东, 金永龙. 高炉使用高比例球团的战略思考与球团生产的试验研究. 钢铁, 2021, 56(5): 7)
- [3] Xing Y, Cui Y K, Su W, et al. Study of the mechanism of removing ultrafine particles using SBA-15. *Chin J Eng*, 2020, 42(3): 313
(邢奕, 崔永康, 苏伟, 等. SBA-15 脱除超细颗粒的机制研究. 工程科学学报, 2020, 42(3): 313)
- [4] Wu S L, Zhang Y Z, Su B, et al. Analysis of main factors affecting NO_x emissions in sintering process. *Chin J Eng*, 2017, 39(5): 693
(吴胜利, 张永忠, 苏博, 等. 影响烧结工艺过程 NO_x 排放质量浓度的主要因素解析. 工程科学学报, 2017, 39(5): 693)
- [5] Yan B J, Xing Y, Lu P, et al. A critical review on the research

- progress of multi-pollutant collaborative control technologies of sintering flue gas in the iron and steel industry. *Chin J Eng*, 2018, 40(7): 767
- (闫伯俊, 邢奕, 路培, 等. 钢铁行业烧结烟气多污染物协同净化技术研究进展. 工程科学学报, 2018, 40(7): 767)
- [6] Zhang X B, Zhu M W. Effect of bentonite additive on pelletizing operation of our country. *Sinter Pelletizing*, 2003, 28(6): 3
- (张新兵, 朱梦伟. 膨润土对我国球团生产的影响. 烧结球团, 2003, 28(6): 3)
- [7] Kawatra S K, Ripke S J. Developing and understanding the bentonite fiber bonding mechanism. *Miner Eng*, 2001, 14(6): 647
- [8] Kawatra S K, Ripke S J. Laboratory studies for improving green ball strength in bentonite-bonded magnetite concentrate pellets. *Int J Miner Process*, 2003, 72(1-4): 429
- [9] Pei Y H, Gan X F, Chen Y Y. Experimental research on new type of organic binder as pellet additive. *Sinter Pelletizing*, 2012, 37(1): 39
- (裴业虎, 甘学锋, 陈义勇. 新型有机粘接剂作球团添加剂试验研究. 烧结球团, 2012, 37(1): 39)
- [10] Fan X H, Wang Y, Gan M, et al. Strength enhancement of oxide pellet with organic binder. *J Iron Steel Res*, 2008, 20(5): 5
- (范晓慧, 王伟, 甘敏, 等. 提高有机粘结剂氧化球团矿强度的措施. 钢铁研究学报, 2008, 20(5): 5)
- [11] Huang G X. *Study on Preparation of Oxidized Pellet by New-Style Organic Binder* [Dissertation]. Changsha: Central South University, 2007
- (黄桂香. 应用新型有机粘结剂制备氧化球团的研究[学位论文]. 长沙: 中南大学, 2007)
- [12] Li H X, Jiang T, Qiu G Z, et al. Molecular structure mould and selecting criterion of organic binder for iron ore pellet. *J Central South Univ Technol Nat Sci*, 2000, 31(1): 17
- (李宏煦, 姜涛, 邱冠周, 等. 铁矿球团有机粘结剂的分子构型及选择判据. 中南工业大学学报(自然科学版), 2000, 31(1): 17)
- [13] Li H X, Wang D Z, Hu Y H, et al. The mechanism of improving pellet strength by carboxyl methlated amylum. *J Central South Univ Technol Nat Sci*, 2001, 32(4): 351
- (李宏煦, 王淀佐, 胡岳华, 等. 羧甲基淀粉钠提高球团强度的机理. 中南工业大学学报(自然科学版), 2001, 32(4): 351)
- [14] Yang Y B, Huang G X, Jiang T, et al. Application of organic binder as substitutes for bentonite in pellet preparation. *J Central South Univ Sci Technol*, 2007, 38(5): 850
- (杨永斌, 黄桂香, 姜涛, 等. 有机粘结剂替代膨润土制备氧化球团. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(5): 850)
- [15] Huang Z C, Wang Y M, Chai B, et al. Preparation of oxide pellets with fibrosis bentonite and its mechanism. *J Central South Univ Sci Technol*, 2014, 45(7): 2145
- (黄柱成, 王雨蒙, 柴斌, 等. 纤维化膨润土强化氧化球团制备及其机理. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(7): 2145)
- [16] Huang Z C, Li T H, Yi L Y, et al. Preparation of fibrosis bentonite and its application in iron ore concentrate pellet. *J Central South Univ Sci Technol*, 2014, 45(2): 341
- (黄柱成, 李铁辉, 易凌云, 等. 纤维化膨润土制备及其在铁精矿球团中的应用. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(2): 341)
- [17] Zhang Y B, Ouyang X Z, Lu M M, et al. Application effect of humic acid modified bentonite binder in iron ore pellets. *Sinter Pelletizing*, 2018, 43(4): 27
- (张元波, 欧阳学臻, 路漫漫, 等. 腐植酸改性膨润土在铁矿球团中的应用效果. 烧结球团, 2018, 43(4): 27)
- [18] Xie X L, Duan T, Zheng F Q, et al. Study of magnetite oxidized pellet prepared by modified composite binder. *Met Mine*, 2018(1): 79
- (谢小林, 段婷, 郑富强, 等. 改性复合粘结剂制备磁铁矿氧化球团研究. 金属矿山, 2018(1): 79)
- [19] Pan S X, Sun W J, Zhang R D, et al. Data analysis and SPSS software application. *J Jilin Mil Med Coll Fourth Mil Med Univ*, 2005, 26(3): 145
- (潘淑霞, 孙王杰, 张若东, 等. 数据分析与SPSS软件应用. 吉林医药学院学报, 2005, 26(3): 145)
- [20] Xu K C, Bi L P, Chen M C. Prediction model of compressive strength of lithium slag concrete based on SPSS regression analysis. *J Archit Civ Eng*, 2017, 34(1): 15
- (许开成, 毕丽苹, 陈梦成. 基于SPSS回归分析的锂渣混凝土抗压强度预测模型. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(1): 15)
- [21] Liu L F. Micromechanics study on agglomerate impact breakage. *Adv Mech*, 2006, 36(4): 599
- (刘连峰. 颗粒聚集体碰撞破损的细观力学仿真研究. 力学进展, 2006, 36(4): 599)
- [22] Orr F M, Scriven L E, Rivas A P. Pendular rings between solids: Meniscus properties and capillary force. *J Fluid Mech*, 1975, 67(4): 723
- [23] Wei R F, Li J X, Tang G W, et al. Strength and consolidation mechanism of iron ore and coal pellets. *Ironmak Steelmak*, 2014, 41(7): 514
- [24] Pan J, Tian H Y, Zhu D Q, et al. Particle size and wettability effect of ultrafine magnetite concentrate on ballability. *Chin J Eng*, 2017, 39(6): 830
- (潘建, 田宏宇, 朱德庆, 等. 超微细铁精矿的粒度特性和润湿性对其成球性能交互影响. 工程科学学报, 2017, 39(6): 830)
- [25] Hotta K, Takeda K, Iinoya K. The capillary binding force of a liquid bridge. *Powder Technol*, 1974, 10(4-5): 231
- [26] Davis R H, Serayssol J M, Hinch E J. The elastohydrodynamic collision of two spheres. *J Fluid Mech*, 1986, 163: 479
- [27] Lian G, Adams M J, Thornton C. Elastohydrodynamic collisions of solid spheres. *J Fluid Mech*, 1996, 311: 141
- [28] Adams M J, Perchard V. The cohesive forces between particles with interstitial liquid. *Inst Chem Eng Symp*, 1985, 91: 147
- [29] Goldman A J, Cox R G, Brenner H. Slow viscous motion of a sphere parallel to a plane wall—II Couette flow. *Chem Eng Sci*, 1967, 22(4): 653
- [30] Liu L F, Wang Z Y, Wang C. Simulations of impact attrition of cuboidal and spherical wet agglomerate of fine particles. *Chin J Appl Mech*, 2020, 37(5): 1929
- (刘连峰, 王振阳, 王超. 球形和方形湿颗粒团的碰撞模拟研究. 应用力学学报, 2020, 37(5): 1929)