节能环保与综合利用

复合黏结剂提高含锌尘泥团块干燥热稳定性能研究

朱德庆，侯明洲，杨聪聪，潘 建，郭正启
（中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要： 针对国内某钢铁厂含锌尘泥还原脱锌工艺过程中团块成球率低、干团块强度差、返料比高、黏结剂成本高等问题，本文开发了一种新型复合黏结剂 FHB，并考察了黏结剂类型、用量、混合料水分及成型压力对含锌尘泥生团块和干团块性能的影响，同时对生团块动态干燥性能进行了对比分析。结果表明：在成型压力为 20 MPa、黏结剂添加量为 3.3% 及混合料水分为 14% 的条件下，添加复合黏结剂 FHB 生团块性能与采用单一有机黏结剂 YJB 时相近，但生团块干燥性能、热稳定性大幅度提高，粉化率大幅度降低，从单一添加剂的 18% 降低至 2.10%，可在保证还原脱锌工艺顺行的同时，降低运行成本。

关键词： 含锌尘泥；压团；黏结剂；脱锌
中图分类号： TF046.6；TF55；X705 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2022)03－0073－10
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.03.042

Research on composite binder to improve drying thermal stability performance of zinc-containing dust agglomerates

ZHU Deqing，HOU Mingzhou，YANG Congcong，PAN Jian，GUO Zhengqi
(*School of Minerals Processing and Bioengineering，Central South University，Changsha* 410083，*Hunan*，*China*)

Abstract: In response to such problems as low pelletizing agglomerates rate，poor dry agglomerates strength，high recyclic ratio and high binder cost in the process of reductive dezincification of zinc-containing dust in a domestic steel plant，a new composite binder FHB is developed，and the effects of binder type，dosage，mixture moisture and forming pressure on the performance of raw and dry agglomerates of zinc-containing dust are investigated，while the dynamic drying performances of the raw agglomerates are compared. The results show that under the condition of 20 MPa forming pressure，3.3% binder addition and 14% mixture moisture，the performance of raw agglomerates with compound binder FHB is similar to that with single organic binder YJB，but the drying performance and thermal stability of raw agglomerates are greatly improved，and the chalking rate with single additive is greatly reduced from 18% to 2.10%，which could ensure the smooth operation of the reductive dezincification process and reduce the operating cost.

Key words: zinc-containing dust; briquetting; binder; dezincification

2020 年我国粗钢产量达到 1.065×10^9 t，占全球粗钢产量的 56.5%。钢铁生产中的粉尘产出量为粗钢产量的 8%～12%，其中高炉二次灰、电炉灰、LT 灰等含锌粉尘约占钢铁粉尘产出量的 25%～30%[1]。由此估算，我国每年约产出 2.130×10^7～3.834×10^7 t 含锌粉尘。此类

收稿日期：2021－11－01；修回日期：2021－12－02
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52004339)；湖南省重点研发计划(2022SK2075)
作者简介：朱德庆(1964—)，教授，博导，从事铁矿造块、非高炉炼铁、低品位矿综合利用、钢铁冶金节能减排与环保等方面的研究。
通讯作者：杨聪聪(1989—)，讲师，从事烧结球团理论与新工艺、低碳冶金技术与短流程、低品位矿及冶金固废资源化利用等方面的研究。

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

粉尘中含有大量的有价元素，包括 Fe、Zn、Pb、Cr 等，这些重金属一方面渗透污染水质，破坏污染环境、危害健康，另一方面也属于宝贵的二次资源，具有重要回收价值。1980 年美国环保署(USEPA)已将含锌粉尘划为 K061 类物质(有毒废弃物)[2-3]。我国 1995 年颁布了《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》，并于 2020 年 4 月 29 日第十三届全国人民代表大会常务委员会第十七次会议进行第二次修订，明确指出固体废物污染环境防治坚持减量化、资源化和无害化的原则，对含锌粉尘的综合利用提出了具体要求。因此，有效利用含锌粉尘对于提高资源利用率并解决环境污染问题具有重大现实意义。

含锌粉尘的表面活性低，其制粒性能差，直接返回烧结，将对烧结料层的透气性、烧结矿产量和质量带来不利影响。尤其是当烧结矿含锌量偏高时，使得入炉锌负荷超标，Zn、碱金属富集在高炉炉顶和炉壁而恶化高炉炉况，易造成悬料，腐蚀炉衬，缩短高炉寿命，影响高炉顺行[4]。传统的物理法脱锌工艺包括磁选、重选、水力旋流分级法，湿法浸出脱锌(包括酸浸、碱浸、氨浸)等，均存在脱锌效率较低，铁回收率低，易产生二次污染，无法实现工业生产等缺陷。

目前国内外处理含锌粉尘主要采用火法处理工艺[5]，具有脱锌效率高，对原燃料适应性强、对环境污染较小等优点，其主要包括熔融还原工艺(OXYCUP 竖炉工艺、小高炉工艺和直接还原工艺)，转底炉工艺与回转窑工艺。其中转底炉工艺[6]处理含锌粉尘生产效率高，脱锌率不小于 90%，产品金属化率不小于 70%。国内已实现工业化的转底炉共计 17 座，正在建设的转底炉项目共 10 座(沙钢二期、淮安钢铁、首钢京塘、宝钢湛江二期等)。此外，尚有鞍钢、攀钢、新余钢铁等多家钢铁企业正在规划建设转底炉项目。

转底炉还原挥发脱锌工艺包括含锌粉尘添加黏结剂压团、生团块干燥及干团块转底炉内还原、还原产品冷却等环节[7-8]。生产中含锌尘泥团块在干燥后落下强度差，粉化率高。为了提高含锌粉尘成球率和团块强度，减少粉末率，通常需要添加大量黏结剂[9]。仅添加膨润土做黏结剂难以满足生产要求，目前生产中大多使用有机黏结剂，存在添加量大、成品粉化率高，易导致转底炉底结炉及生产成本高等问题。国际上最早规模生产的铁矿球团有机黏结剂是佩利多(Peridur)和奥柯泰克(Alcotac)。1990 年代开始，我国陆续开展对有机黏结剂的研究，开发的球团有机黏结剂有 WKD、KLP、羧甲基纤维素、改性淀粉、木质素等[10-14]。单一的有机黏结剂使生球具有良好的机械性能，但在干燥、氧化、还原过程中有机黏结剂中功能组分发生软化溶解、氧化分解，导致干团块性能差。单一无机黏结剂能够改善团块的干燥性能，但对生团块的性能改善不明显，用量较高，引入杂质和有害元素(SiO_2、K、Na、P、S)，而使铁品位下降。MURR[15]开发的有机黏结剂与石灰混合黏结剂，同时提高了生球和干球的强度。此外，相关学者还开发了胶化淀粉[16]、CMC、三聚磷酸盐等复合黏结剂。中南大学自主开发的 F 复合黏结剂、MHA 复合黏结剂[17]兼具了二者的优点，主要用于铁精矿球团。迄今为止，在针对含锌粉尘压团及团块还原脱锌工艺黏结剂方面的研究，还没有相关的文献报道。因此，开发新型高效复合黏结剂，是改善含锌粉尘团块热稳定性能、减少成品粉末量、提高生产效率及降低生产成本的有效途径之一。

本文考察黏结剂类型、用量、混合料水分及成型压力对含锌尘泥生团块和干团块性能的影响，并对生团块动态干燥性能进行了对比分析，同时对干团块的微观结构进行分析，探究黏结剂的作用机理，为转底炉直接还原脱锌工艺开发新型高效复合黏结剂。

1 原料性能及研究方法

研究所用原料包括含锌尘泥、黏结剂及还原剂。其中含锌尘泥来自国内某钢厂，包括炼铁、炼钢、轧钢工序产出的各种含锌尘泥，还

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

原剂为来自焦化厂的粉尘。黏结剂包括有机黏结剂 YJB 和复合黏结剂 FHB。

1.1　原料性能

1.1.1　含锌尘泥

含锌尘泥的主要化学成分如表 1 所示。其中含锌粉尘是由烟气除尘系统回收的干粉尘，而含锌尘泥是通过湿式除尘收集的湿粉尘。由表 1 可知：不同尘泥 w(Fe) 波动范围较大，在 25.08%~62.86% 之间变化，是最主要的有价元素；w(Zn) 波动范围也较大，在 0.51%~7.89% 之间变化，是必须脱除的有害元素；含锌尘泥中 w(C) 较高，在 1.75%~26.37% 之间波动，还原过程中将起到还原剂的作用，能得到有效利用。含锌尘泥中含有一定量的 CaO、SiO_2，循环利用可节省熔剂。另外，含锌尘泥中的 Cl 和碱金属 w(Na_2O)、w(K_2O) 均较高，易在还原脱锌过程中挥发进入烟尘，最后成为次氧化锌的主要组分之一，使得还原脱锌后的金属化炉料中有害元素含量大大减少，减少其在流程内的循环富集。

表 1　含锌尘泥主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical compositions of Zn containing dusts and mud　%

尘泥种类	TFe	C	Zn	Na_2O	K_2O	Cl	CaO	SiO_2
含锌粉尘 1#	62.86	6.04	0.51	0.10	0.33	0.02	1.06	1.78
含锌粉尘 2#	34.76	26.37	2.11	0.16	1.13	2.60	3.15	6.40
含锌粉尘 3#	40.16	1.75	7.89	1.24	1.10	0.61	10.86	3.30
含锌粉尘 4#	56.38	2.34	4.42	0.55	0.61	0.31	10.20	2.01
含锌尘泥 1#	59.46	2.24	3.12	2.59	0.10	0.05	7.10	1.56
含锌尘泥 2#	25.08	5.39	6.43	0.20	0.16	2.03	14.43	5.12

含锌尘泥的粒度组成如表 2 所示。由表 2 可知，除了含锌尘泥 2# 粒度较粗之外，其他 5 种原料 −0.074 mm 质量分数均达到了 80% 以上，特别是含锌尘泥 1# 中 −0.025 mm 质量分数达到了 93% 以上，颗粒极细。这也说明含锌尘泥在还原脱锌前必须成型，而添加黏结剂压团是常用工艺。

表 2　含锌尘泥粒度组成(质量分数)

Table 2　Size distibutions of zinc-containing dusts and mud　%

尘泥种类	+0.150 mm	0.074~0.15 mm	0.045~0.074 mm	0.038~0.045 mm	0.025~0.038 mm	−0.025 mm
含锌粉尘 1#	2.23	2.05	4.83	2.48	2.83	85.58
含锌粉尘 2#	2.23	12.63	24.65	6.78	7.06	46.66
含锌粉尘 3#	4.23	6.75	8.23	2.52	10.90	67.38
含锌粉尘 4#	7.24	12.57	14.14	1.39	15.74	48.94
含锌尘泥 1#	0.24	0.93	3.30	1.74	0.58	93.23
含锌尘泥 2#	39.35	22.24	18.21	1.71	4.86	13.63

含锌尘泥物理性质测定结果见表 3。由 3 表可知，含锌尘泥比表面积普遍很高，其中，含锌粉尘 1# 最高，达到了 3 752 cm^2/g。含锌尘泥由于铁品位低，其真密度和堆密度值低于普通铁精矿。6 种含锌尘泥的休止角在 30°~50° 之间。休止角越小，摩擦力越小，流动性越好，一般认为 $\theta \leqslant 30°$ 时流动性好，$\theta \leqslant 40°$ 时可以满足生产过程中的流动性需求。若流动性较差，在生产中可能出现下料困难等问题。

1.1.2　还原剂

含锌尘泥还原脱锌所需还原剂来自焦化厂，其固定碳质量分数高达 83.89%，挥发分质量分数为 1.72%，灰分质量分数为 14.39%。粒度组成中 −0.074 mm 质量分数大于 85%，比表面积为 1 945 cm^2/g，颗粒细，有利于还原剂在混合料中分散。配入含锌尘泥中压团，有利于提

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

表3 含锌尘泥物理性质

Table 3 Physical properties of zinc-containing dusts and mud

尘泥种类	堆密度/(g·cm^{-3})	真密度/(g·cm^{-3})	流动性(休止角)/(°)	比表面积/(cm^2·g^{-1})
含锌粉尘1#	1.070	4.141	41	3 752
含锌粉尘2#	0.748	3.147	35	1 919
含锌粉尘3#	0.699	4.131	40	2 482
含锌粉尘4#	0.855	4.372	42	2 629
含锌尘泥1#	0.958	4.354	49	2 521
含锌尘泥2#	0.768	3.226	32	2 146

高还原效果。

1.1.3 黏结剂

实验研究中使用的黏结剂包括现场生产用淀粉类有机黏结剂YJB和本研究开发的复合黏结剂FHB。其中有机黏结剂YJB主要化学成分包括C、H、O，三种元素总质量分数大于90%，灰分质量分数为7.81%。复合黏结剂FHB包括有机黏结组分和无机黏结组分，其有机功能组分中C、H、O元素总质量分数大于65%，灰分质量分数为29.85%。有机黏结剂及复合黏结剂灰分化学成分见表4。由表4可知，有机黏结剂YJB灰分主要包括Al_2O_3、Na_2O、CaO、SiO_2等，复合黏结剂FHB灰分主要成分包括SiO_2、CaO、Fe_2O_3、Al_2O_3等。

表4 有机和复合黏结剂灰分化学成分(质量分数)

Table 4 Ash chemical composition of organic and composite binders %

黏结剂名称	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	P	S
YJB	6.40	12.17	11.65	2.95	29.67	0.10	28.29	0.120	0.081
FHB	4.83	6.33	49.43	1.94	12.71	2.36	1.82	0.18	0.023

1.2 实验方法与设备

6种原料按含锌尘泥1#、2#及含锌粉尘1#、2#、3#、4#的顺序，按相应质量分数为36.6、5.5、17.6、11.0、11.0和18.3的比例进行配矿，再配加4%还原剂焦粉和一定比例的黏结剂，得到混合料，每次配矿得到的混合料的总干重为2 kg。将混合料充分混匀后，在对辊压团机YQ250×50中成型，对生团块进行其性能检测，包括成球率、落下强度、抗压强度等。将其余的生团块放在鼓风干燥箱内进行静态烘干4 h(烘箱设定温度为373 K)，并对干团块检测干团块性能。最后对团块动态干燥扩大试验：将准备好的20 kg有机黏结剂用量3.3%的生团块和20 kg复合黏结剂用量为3.3%的生团块，采用中南大学链算机扩大试验装置，在抽风干燥温度为300 ℃、干燥风速为0.8 m/s条件下干燥10 min后在鼓风干燥温度为300 ℃、干燥风速为0.8 m/s条件下干燥10 min，卸料冷却后检测干团块落下强度、抗压强度及粉化率。

(1) 落下强度测定方法：随机取10个团块，从0.5 m高自由落下到钢板上，第n次团块破碎体积达到初始体积1/4及以上，则团块落下强度计为n-1次/(0.5 m)。取10次落下强度的平均值作为团块的落下强度，单位为次/(0.5 m)。

(2) 抗压强度测定方法：每次随机挑10个团块，采用抗压强度测定仪测定团块的抗压强度，取10次抗压的平均值作为团块的抗压强度，单位为N/P。

(3) 粉末率：将干燥后团块过6.3 mm筛，筛下产品质量占总质量的百分数。

2 结果与分析

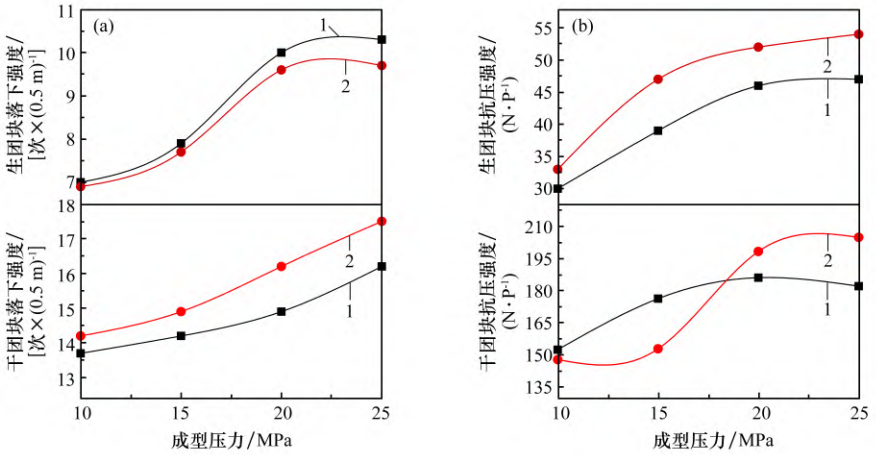
2.1 压团工艺参数优化

2.1.1 成型压力对团块性能的影响

在固定黏结剂用量为4%及混合料水分为14%条件下，成型压力对生团块和干团块强度的影响见图1。由图1可知，当成型压力从10

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

MPa 增加到 20 MPa 时，YJB 与 FHB 生团块的落下强度分别由 6.5、6.4 次/(0.5 m) 增加到了 9.5、9.1 次/(0.5 m)，干团块的落下强度分别由 13.7、14.2 次/(0.5 m) 增加到了 14.9、16.2 次/(0.5 m)，干团块的抗压强度分别从 152.4、147.8 N/P 增加到 186.0、198.2 N/P。继续增大成型压力只会增加生产成本，且团块强度增幅不明显。此外，成型压力过大，团块内颗粒组织反而爆裂，同时导致生团块脱模困难。成型压力过小，团块强度差，粉化率和返矿率偏高；成型压力过大，团块过于致密，不利于后续的还原脱锌过程中还原气体向内扩散，导致还原产品金属化率偏低。因此推荐适宜的含锌尘泥成型压力为 20 MPa。



(a) 落下强度；(b) 抗压强度

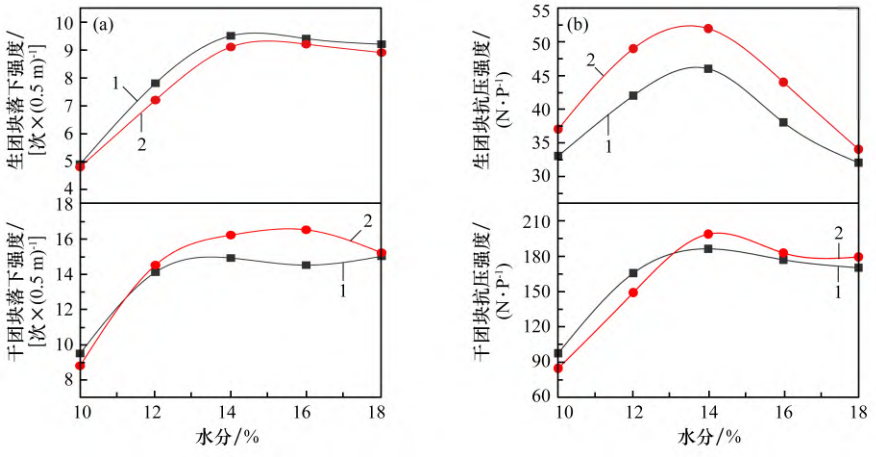
1—YJB；2—FHB。

图 1　成型压力对团块性能的影响

Fig. 1　Influence of briquetting pressure on the properties of briquettes

2.1.2　成型水分对团块性能的影响

在固定黏结剂用量为 4%，成型压力为 20 MPa 条件下，成型水分对团块性能的影响如图 2 所示。由图 2 可知，随着成型水分的增加，生团块和干团块的落下强度随之增加，当成型水分超过 14% 时，生团块和干团块的落下强度反而出现了一定程度的下降。由此推荐适宜的成型水分为 14% 时，此时 YJB 生团块的落下



(a) 落下强度；(b) 抗压强度

1—YJB；2—FHB。

图 2　水分对团块性能的影响

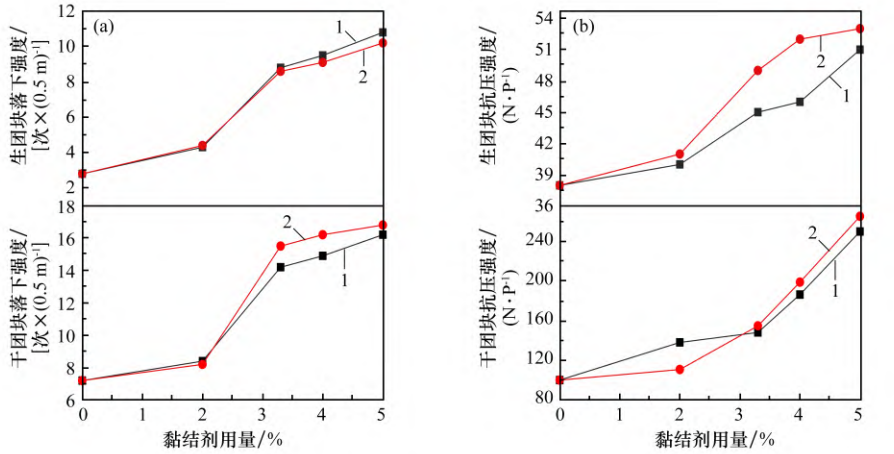
Fig. 2　Influence of moisture on the properties of briquettes

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

强度达到9.5次/(0.5 m)，干团块落下强度为14.9次/(0.5 m)。FHB生团块的落下强度达到9.1次/(0.5 m)，干团块落下强度为16.2次/(0.5 m)。表明两种黏结剂制备的生团块强度基本相近，但复合黏结剂有利于提高干团块强度。成型水分过高，自由水增加，毛细引力被破坏，而且水具有不可压缩性，过高水分不利于颗粒间靠拢。此外，水分过高时还会导致粘辊现象，脱模困难，生产难以进行。

2.1.3 黏结剂用量对团块性能的影响

在固定成型水分为14%条件下，考察了黏结剂用量对团块性能的影响，结果如图3所示。由图3可知，随着黏结剂用量的增加，团块性能得到明显改善。当黏结剂用量为3.3%时，两种黏结剂生团块和干团块强度基本相近，强度均能满足生产要求。考虑到生产成本问题，建议黏结剂用量为3.3%，此时生产1 t干团块有机黏结剂成本为194元，而生产1 t干团块复合黏结剂成本为134元，即复合黏结剂FHB较有机黏结剂YJB能减少约30%生产成本。



(a) 落下强度；(b) 抗压强度

1—YJB；2—FHB。

图3 黏结剂用量对团块性能的影响

Fig. 3 Influence of the amount of binder on the properties of agglomerates

2.2 团块干燥性能及热稳定性

针对成型压力为20 MPa、成型水分为14%及黏结剂配比为3.3%的压团条件下得到的不同种类黏结剂的生团块，对其动态干燥性能及热稳定性进行研究，主要考察动态干燥温度、鼓风风速对干团块性能的影响，并进行了扩大试验。

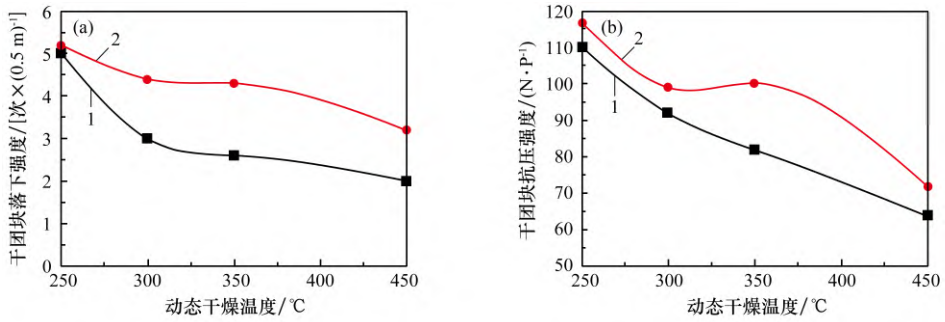
2.2.1 动态干燥温度的影响

在固定料层高度为120 mm、鼓风风速1.4 m/s条件下，考察了干燥温度对干团块强度的影响，结果见图4。由图4可知，干团块落下强度和抗压强度随着干燥温度的升高而逐渐降低，这是因为干燥初期生团块中水分蒸发溢出，留下空隙，强度下降。随着团块温度升高，有机黏结剂、复合黏结剂中部分有机功能组分发生裂解、脱羟基、脱羧基等反应，在250 ℃以上干燥温度时失效，黏结性能变差。另外，在较高的干燥温度下，有机组分燃烧后气体溢出表面，导致团块落下强度降低。复合黏结剂FHB能明显改善干团块的落下强度，当鼓风干燥为250 ℃时，干团块落下强度为5.2次/(0.5 m)；当干燥温度为300 ℃时，干团块落下强度为4.4次/(0.5 m)，较YJB团块在300 ℃干燥后落下强度为3.0次/(0.5 m)更优。这是由于FHB中的无机组分依然起到黏结作用，可减少干燥过程中生团块体积收缩，使颗粒间接触更为紧密，内摩擦力增加，干团块强度相对较强。由此可见，相比于有机黏结剂而言，复合黏结剂能显著改善干团块落下强度，提高团块稳定性。

2.2.2 干燥风速对干团块性能的影响

在料层高度为120 mm、鼓风干燥温度为300 ℃条件下，考察干燥风速对干燥后团块强

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



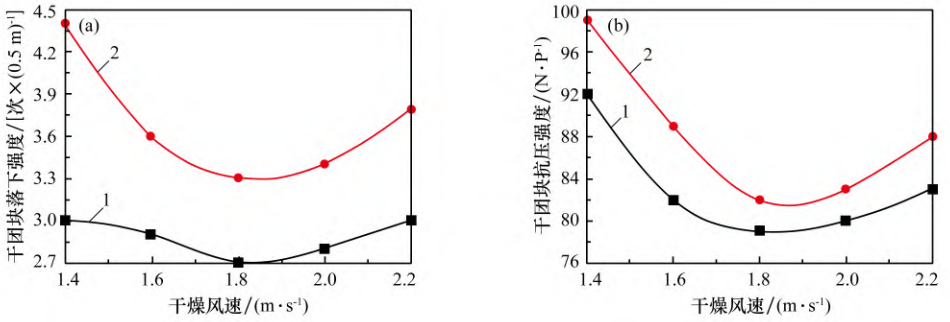
(a) 落下强度；(b) 抗压强度

1—YJB；2—FHB。

图 4　鼓风干燥温度对干团块性能的影响

Fig. 4　Influence of blast drying on the properties of dry briquettes

度的影响，结果见图 5。由图 5 可知，随着鼓风风速的提高，团块的落下强度、抗压强度均下降，团块强度较差，而当鼓风干燥风速大于 1.8 m/s 后，继续提高鼓风风速，团块的强度反而有所回升，这是因为当干燥风速增加时，干燥介质与球团之间传热增加，球团内部水分可以获得更高的能量来满足自身蒸发，气液边界层内蒸气压随之提高；由于风速的增加，边界层厚度变薄，团块内部水分蒸发阻力降低，推动力提高，偏移活化能降低，使团块内外压差降低，从而保证团块质量[19]，且复合黏结剂 FHB 干团块性能优于单一有机黏结剂 YJB 团块。



(a) 落下强度；(b) 抗压强度

1—YJB；2—FHB。

图 5　干燥风速对干团块性能的影响

Fig. 5　Influence of blast drying temperature on the properties of dry briquettes

2.2.3　动态干燥扩大试验

采用链算机扩大试验设备模拟现场团块干燥条件，对比了添加有机黏结剂 YJB 和复合黏结剂 FHB 得到的含锌尘泥生团块动态干燥性能，结果见表 5。由表 5 可知，与静态干燥的团块强度相比，动态干燥后的团块强度更差。以 YJB 为黏结剂时，生团块的热稳定性较差，由于实验室链算机装置下料高度为 1.5 m，团块下料过程中碰撞破碎，粉末量较高，干燥后粉末率高达18%。另外，干团块的落下强度只有

表 5　动态干燥扩大实验团块性能

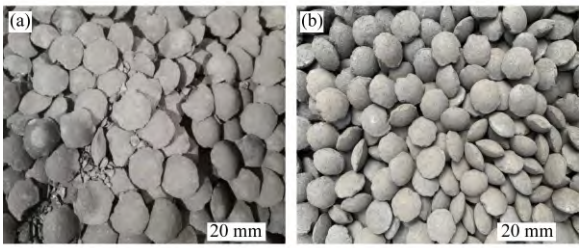
Table 5　Performance of green briquettes in the pilot-scale drying experiment

黏结剂种类	用量/%	生团块性能			干团块性能		
		成球率/%	落下强度/次·(0.5 m)$^{-1}$	抗压强度/(N·P^{-1})	干燥粉末量/%	落下强度/次·(0.5 m)$^{-1}$	抗压强度/(N·P^{-1})
YJB	3.3	87.21	8.9	44.5	18.00	3.4	44.8
FHB	3.3	87.83	8.7	45.8	2.10	4.4	46.0

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

3.4 次/(0.5 m)。而 FHB 团块热稳定性更好，相同实验条件干燥后的粉末率仅为 2.10%，落下次数为 4.4 次/(0.5 m)，干燥过程粉末率减少了 15.9%，复合黏结剂对团块的热稳定性能的改善进一步得到了验证。

动态干燥后干团块宏观形貌见图 6。由图 6 可知，YJB 团块干燥后粉化非常严重，而 FHB 团块基本保持完整团块状，粉末量较少，完整的团块对后续转底炉还原脱锌提高产品质量十分重要。由此可见，复合黏结剂能显著改善团块的干燥性能，降低其粉化率。



(a) YJB 团块；(b) FHB 团块

图 6 链算机动态干燥扩大试验后团块形貌

Fig. 6 Morphology of briquettes after the dynamic drying in the pilot scale

2.3 复合黏结剂提高团块强度的机理研究

根据团块干燥试验可知，复合黏结剂 FHB 能改善干团块强度，对黏结剂进行 TG-DSC 分析，结果如图 7。由图 7 可知，有机黏结剂 YJB 在温度小于 156.6 ℃，主要为水分的分解和少量黏结剂中脱羟基、羧基反应，失重率为 5.86%；当温度为 156.6～571.8 ℃时，主要为有机物的分解反应，裂解、脱羟基、脱羧基以及有机碳燃烧放热，失重达 71.33%；复合黏结剂在温度小于 194.3 ℃，主要为水分的分解和少量黏结剂中功能组分的脱羟基、羧基反应；当温度为 194.3～571.7 ℃时，主要为淀粉等有机物的分解反应，裂解、脱羟基、脱羧基以及有机碳燃烧放热。与 YJB 相比，FHB 热稳定性高，残余物 26.26% 为 FHB 黏结剂灰分，主要成分为 SiO_2，在高温下仍能起到黏结作用，有助于提高干团块强度。复合黏结剂 FHB 中含有大量的无机功能组分可减少干燥过程中生团块体积收缩，使颗粒间接触更为紧密，内摩擦力增加，从而提高干团块强度。

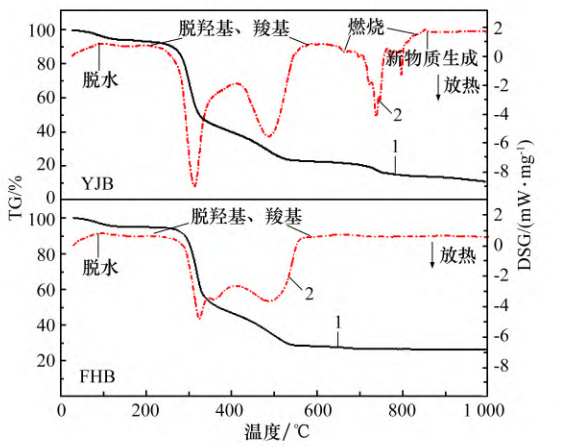


图 7 黏结剂 TG-DSC 分析

Fig. 7 Binder TG-DSC analysis

对添加有机黏结剂 YJB 和复合黏结剂 FHB 的含锌尘泥样品进行红外光谱分析，其结果如图 8 所示。由图 8 可知，有机黏结剂 YJB 含有大量的羟基 -OH、脂肪烃、芳烃、羧基 -COOH 类官能团，另外还含有少量的酰胺 $-NH_2$ 和 C^- 卤素类官能团。复合黏结剂 FHB 在 3 617 cm^{-1} 处的峰较强，为游离羟基 v_{O-H} 或 N-H 伸缩振动峰。此外，复合黏结剂还含有大量的羧基 -COOH、芳烃、脂肪烃类官能团。复合黏结剂 FHB 中游离羟基含量较高，在粉尘表面吸附后能显著改善矿物表面亲水性能，从而改善团块强度。

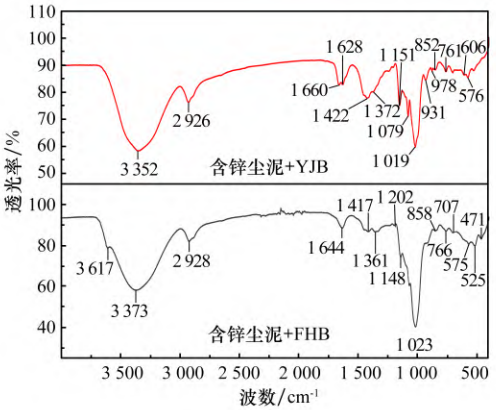


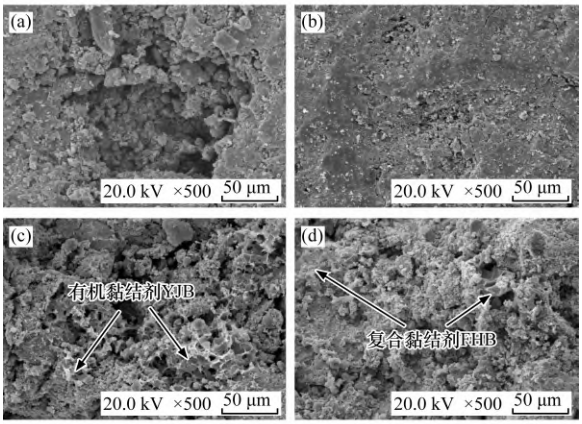
图 8 黏结剂红外光谱

Fig. 8 FTIR spectrum of binder

将在干燥温度为 300℃、鼓风干燥风速为 1.4 m/s 条件下干燥后的有机黏结剂团块和复合黏结剂团块进行扫描电镜分析，其结果见图 9。

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

由图 9 可以看出：FHB 团块表面颗粒黏结紧密，粒度小的矿石颗粒充填在大颗粒之间，仅有少量孔洞，而团块断面颗粒可以看到部分有机功能组分在高温下分解熔化，黏结作用减弱，但其中的无机黏结组分仍能起到黏结作用，并与矿粉之间紧密相连，黏结程度较高，团块内部孔隙率较低，强度较高；而 YJB 团块表面颗粒之间距离较远，有大孔洞，颗粒之间黏结疏松。通过观察团块断面可知，大部分有机功能组分在高温下燃烧熔化，留下不规则的蜂窝状有机架链，黏结性能变差，同时有机组分燃烧产生气体溢出加大团块内部空隙，最终导致团块性能差。



(a) YJB 团块表面；(b) FHB 团块表面；
(c) YJB 结剂断面；(d) FHB 团块断面

图 9　团块 SEM 分析结果

Fig. 9　SEM analysis results of briquettes

3　结　论

(1) 传统有机黏结剂和复合黏结剂均能显著改善含锌粉尘生团块性能，在相同试验及黏结剂用量条件下，复合黏结剂较传统有机黏结剂能明显降低生产成本。

(2) 复合黏结剂 FHB 能显著改善生团块热稳定性及干团块强度，生产上可以实施更高的干燥温度，以加快团块干燥，提高生产效率。

(3) 采用链箅机扩大试验设备模拟现场干燥条件，在相同黏结剂用量及干燥条件下，有机黏结剂 YJB 干团块落下强度为 3.4 次/(0.5 m)，粉化率高达 18.00%，而复合黏结剂 FHB 干团块落下强度为 4.4 次/(0.5 m)，粉化率仅 2.10%。

参考文献：

[1] 张鲁芳. 我国转底炉处理钢铁厂含锌粉尘技术研究[J]. 烧结球团，2012，37(3)：57－60.
ZHANG Lufang. Study on treatment of zn-containing dust of iron and steel plants by rotary hearth furnace process in China[J]. Sintering and Pelletizing，2012，37(3)：57－60.

[2] XIA D K，PICKLES C A. Caustic roasting and leaching of electric arc furnace dust[J]. Canadian Metallurgical Quarterly，2013，38(3)：175－186.

[3] 田玮，彭犇，王晟，等. 含锌电炉粉尘处理技术的研究进展[J]. 环境工程，2019，37(2)：144－147.
TIAN Wei，PENG Beng，WANG Shen，et al. Research progress of treatment technologies for zn-containing electric arc furnaces dust[J]. Environmental Engineering，2019，37(2)：144－147.

[4] 刘纲，干勇，李士琦，等. 高炉含锌粉尘还原性影响因素分析[J]. 中国冶金，2019，29(10)：20－25；35.
LIU Gang，GAN Yong，LI Shiqi，et al. Analysis of reducing factors of zinc-bearing blast furance dust[J]. China Metallurgy，2019，29(10)：20－25；35.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 谢泽强，郭宇峰，陈凤，等. 钢铁厂含锌粉尘综合利用现状及展望[J]. 烧结球团，2016，41(5)：53－56；61.
XIE Zeqiang，GUO Yufeng，CHENG Jiang，et al. Research status and prospect of comprehensive utilization of zinc-bearing dust in iron and steel plants[J]. Sintering and Pelletizing，2016，41(5)：53－56；61.

[8] 毛瑞，王飞，金海，茅沈栋. 转底炉工艺处理含铁尘泥关键技术[J]. 钢铁，2020，55(8)：199－205.
MAO Rui，WANG Fei，JIN Hai，et al. Key technology of treating iron-bearing dust and sludge by rotary hearth furnace process[J]. Iron and Steel，2020，55(8)：199－205.

[9] 彭程，范建峰. 宝钢转底炉工艺技术发展[J]. 钢铁，2019，54(2)：97－100.
PENG Cheng，FAN Jianfeng. Rotary hearth furnace process development in Baosteel[J]. Iron and Steel，2019，54(2)：97－100.

[10] 刘新兵，杜烨. 含有机黏结剂人工钠化膨润土在球团生产

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

中的应用[J]. 烧结球团,2003,27(6):47-50.
LIU Xinbing,DU Ye. Application of artificial sodium bentonite containing organic binder in pellet production [J]. Sintering and Pelletizing,2003,27(6):47-50.

[11] ARKOSKA D,SANKEY E,ANDERSON R. Application of organic binders in iron ore pelletizing and iron making [J]. Iron Making Conference Proceedings,1995.

[12] LA Hass,JA Aldinger. Effectiveness of organic binders for iron ore pelletization [J]. Report of Investigations United States, bureau of Mines,1998,52(5):81-84.

[13] NIKOLASK E L. New methods of application of Polyacrylate resins as binder [J]. Materials Chemistry and Physics,2002,3(12):169-172.

[14] 聂华荣,柳明珠. 羧甲基纤维素钠水凝胶的制备及其生物降解性研究[J]. 功能高分子学报,2003(4):553-556.
NIE Huarong,LIU Mingzhu. Study on preparation and biodegradability of sodium hydrogel of hydroxymethyl cellulose [J]. Journal of Functional Polymers,2003(4):553-556.

[15] MURR D L,EEGLAND D J. Development and production of organic-limestone pellets [J]. 48th Ironmaking Conf,1989:715.

[16] HASS L A. Effectiveness of organic binders for iron ore palletization [J]. U S Bur,Mines Rep,1989:21.

[17] 吴玉东. MHA黏结剂有机功能组分与铁、钛、硅天然氧化矿物表面的作用研究[D]. 中南大学,2014.
WU Yudong. Research on the interaction of the two component parts of MHA binder onto natural iron,titanium and silica oxide ores [D]:Central South University,2014.

[18] XIAO Qi. Briquett ore theory and practice [M]. Changsha:Central South University Industry Press,1989:56.

[19] 李建,付晓恒,李军,等. 基于偏移活化能对SiC球团干燥进行动态分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019,50(4):753-761.
LI Jian,FU Xiaoheng,LI Jun,et al. Dynamic analysis of SiC pellets drying based on apparent warp activation energy [J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2019,50(4):753-761.

(上接第14页)

[8] 张欣,温治,楼国锋,等. 高温烧结矿气—固换热过程数值模拟及参数分析[J]. 北京科技大学学报,2011,33(3):339-345.
ZHANG Xin,WEN Zhi,LOU Guofeng,et al. Numerical simulation and parameters analysis on the gas-solid heat transfer process of high temperature sinter [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2011,33(3):339-345.

[9] 张晟,董辉. 环冷机内气固传热过程仿真及优化[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京:中国金属学会,2017:236-241.
ZHANG Sheng,DONG Hui. Simulation and optimization of gas-solid heat transfer in sinter annular cooler [C]//The 11th CSM Steel Congress. BeiJing:The Chinese Society for Metals,2017:236-241.

[10] 张小辉,张家元,戴传德,等. 烧结矿冷却过程数值仿真与优化[J]. 化工学报,2011,62(11):3081-3087.
ZHANG Xiaohui,ZHANG Jiayuan,DAI Chuade,et al. Optimization and simulation of sinter cooling process [J]. CIESC Journal,2011,62(11):3081-3087.

[11] 张家元,李子蝶,赵玮忠,等. 环冷机台车热结构耦合分析[J]. 昆明理工大学学报:自然科学版,2017,42(3):60-65.
ZHANG Jiayuan,LI Zidie,ZHAO Weizhong,et al. Thermal-structural coupling analysis of circular cooler trolley [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science Edition),2017,42(3):60-65.

[12] 李呈顺. 硅酸铝绝热材料最新研究动态及发展方向[C]//工业用无机绝热材料标准宣贯及应用技术研讨会会议报告. 杭州:全国绝热材料标准化技术委员会,2018:71-108.
LI Chengshun. The latest research trends and development direction of aluminum silicate insulation materials [C]//Report of the workshop on the promulgation and application of industrial inorganic thermal insulation standards. Hangzhou:Thermal Insulation Materials,2018:71-108.

[13] 杨静,曹瑜,王正,等. 基于轻型木结构墙体两种保温棉传热系数的测定[J]. 林产工业,2020,45(2):30-34.
YANG Jing,CAO Yu,WANG Zheng,et al. Determination of heat transfer coefficient of two insulated cotton based on light wood frame construction wall [J]. China Forest Products Industry,2020,45(2):30-34.

[14] 陈国荣. 有限单元法原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
CHEN Guorong. Principle and application of finite element method [M]. Beijing:Science Press,2009.

[15] 吴林峰,尹晓春,吴凯,等. 复杂多接触面托圈热—机械耦合三维有限元分析[J]. 机械强度,2008,30(3):61-66.
WU Linfeng,YIN Xiaochun,WU Kai,et al. Numerical simulations of thermal-mechanical stress of converter loop with complication multi-contact surfaces by 3-D nonlinearing finite element [J]. Journal of Mechanical Strength,2008,30(3):61-66.

[16] 程宇,张巨伟. 基于ANSYS的管道外自然对流换热系数的确定[J]. 当代化工,2015,44(11):2720-2722.
CHENG Yu,ZHANG Juwei. Determination of natural convection heat transfer coefficient outside pipe based on ANSYS [J]. Contemporary Chemical Industry,2015,44(11):2720-2722.

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