不同黏结剂强化钢铁冶金粉尘冷固球团的作用机理

李彦天，刘晓明，张增起，魏 超，马善亮，曾庆森
（北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083）

摘要：厂内循环利用方法被认为是能实现钢铁冶金粉尘大量消纳的主要途径，如何选择黏结剂制备球团以使其性能满足循环利用要求是当前需要解决的问题。本文旨在对硅酸钠、环氧树脂等多种无机与有机黏结剂复合作用于冷固球团时的性能影响、作用效果及机理进行探索，以制备出符合转底炉直接还原工艺的钢铁冶金粉尘复合冷固球团。结果表明：当环氧树脂－硅酸钠黏结剂用量为5%时，环氧树脂中极性基团上的羟基与硅酸钠溶液中聚硅酸分子上的硅羟基发生氢键结合，抑制了聚硅酸分子之间的缩聚反应，进而抑制胶粒的长大。即通过细化硅酸钠胶粒的方式增大球团原料的堆积密度，减少大孔数量及总孔体积，所得球团的生球和成球力学性能均满足转底炉工艺的强度要求。试验成品球的抗压强度达870.2 N/P，其在高温冶炼过程中仍能保持良好的形态。

关键词：钢铁冶金粉尘；冷固球团；黏结剂
中图分类号：TF09；TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)06－0084－07
doi：10.13403/j.sjqt.2022.06.088

Mechanism of different adhesive strengthening cooled agglomerated pellets of iron and steel metallurgical dust

LI Yantian, LIU Xiaoming, ZHANG Zengqi, WEI Chao, MA Shanliang, ZENG Qingsen
(*School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In-plant recycling method is considered to be the main way to realize a large amount of iron and steel metallurgical dust consumption. How to choose adhesive to prepare pellets so that their performance can meet the requirements of recycling is a problem that needs to be solved at present. The purpose of this paper is to explore the performance influence, effect and mechanism of sodium silicate, epoxy resin and other inorganic and organic adhesive acting on cooled agglomerated pellets, so as to prepare the composite cooled agglomerated pellets of iron and steel metallurgical dust which meet the direct reduction process of rotary hearth furnace. The results show that when the dosage of epoxy resin-sodium silicate adhesive is 5%, the hydroxyl on the polar groups in epoxy resin and the silicon hydroxyl groups on polysilicic acid molecules in sodium silicate solution form hydrogen bonding, which inhibit the polycondensation reaction between polysilicic acid molecules and further growth of colloidal particles. That is, by refining sodium silicate colloidal particles, the bulk density of pellet raw materials is increased, the number of macropores and the total pore volume are reduced, and the mechanical properties of green pellets and balling of pellets obtained meet the strength requirements of rotary hearth furnace process. The compressive strength of the finished test ball reaches 870.2 N/P, and it can still keep a good shape during high temperature smelting.

Key words: iron and steel metallurgical dust; cooled agglomerated pellet; adhesive

收稿日期：2022－10－11；**修回日期**：2022－10－27
基金项目：国家重点研发计划(2020YFC1910000)；中央高校基本科研业务费资助项目(FRF－AT－20－08)
作者简介：李彦天(1997—)，男，硕士研究生，从事冶金等工业固废资源化利用方面的研究。
通信作者：刘晓明(1980—)，男，博士生导师，教授，从事冶金等工业固废资源化利用方面的研究。

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

钢铁工业是我国不可或缺的经济支柱之一，同时也是资源消耗大户[1-2]。我国每年排放的工业固废中有近 45% 来自钢铁工业[3]。钢铁固废种类多，而且大都含有有价金属资源。加大对钢铁固废的回收利用，不仅能提高资源循环利用率，还能降低堆积造成的环境污染。钢铁冶金尘泥（Iron and Steel Metallurgical Dust，ISMD）是钢铁生产过程中从烧结、炼铁、炼钢等工序的冶炼设备上部排出的烟尘，一般通过干法或湿法除尘方式收集得到，这些烟尘主要由冶炼过程中产生的易挥发物质经氧化冷凝后形成的细颗粒及少部分未反应的炉料大颗粒组成。ISMD 排放量大且成分复杂，据国家统计局统计，2021 年我国粗钢产量达 10.35 亿吨，按每生产 1 t 粗钢产生 100 kg ISMD 计算[4-6]，2021 年 ISMD 排放量约为 1 亿吨。ISMD 中普遍含有铁、碳和锌等有价元素，其中全铁（TFe）质量分数一般为 30%～70%[7-8]，是一种宝贵的二次资源。如果对产生的 ISMD 不加以回收利用而只进行堆存处理，将会造成有价元素和土地资源的严重浪费，且细微粉尘颗粒随风飘散还会影响大气质量[9]。

目前，转底炉直接还原工艺处理 ISMD 是一种发展趋势，此工艺具有原料处理范围广、适应性强、除尘设备完善、封闭性良好等优势。但利用转底炉处理 ISMD 首先要面临的问题是如何选择黏结剂制备球团以使其性能满足冶炼要求。因此，本文通过制备符合转底炉直接还原工艺的 ISMD 复合冷固球团，并通过 FTIR、XRD、SEM 等多种分析方法以及力学性能等多种性能测试，研究不同黏结剂的黏结机理及其对球团性能的影响，并以此来评判适合制备转底炉球团的最佳黏结剂种类。

1　材料与方法

1.1　材料

1.1.1　黏结剂种类

试验中用到的黏结剂种类和规格如表 1 所示。

表 1　试验所用黏结剂试剂种类

Table 1　List of binder reagents used in experiment

试剂种类	品牌	试剂纯度
硅酸钠	麦克林	$w(SiO_2)$ = 44%～47%
$Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$	国药	分析纯
水玻璃	—	工业级
腐殖酸钠	希恩思	试剂级
白糊精	阿拉丁	分析纯
黄糊精	—	工业级
玉米淀粉	麦克林	试剂级
羧甲基纤维素钠（CMC-Na）	麦克林	黏度为 5 000～15 000 MPa·s，USP 级
环氧树脂	麦克林	试剂级

1.1.2　试验原料

试验研究中使用的所有 ISMD 原料均由唐山某企业提供，作为骨料和补铁材料的铁砂购自河北某企业，试验中用到的转炉除尘灰为 LT 法除尘灰。3 种 ISMD 的化学成分如表 2 所示。由表 2 可知，转炉除尘灰中铁质量分数最高，达到了 53.4%。

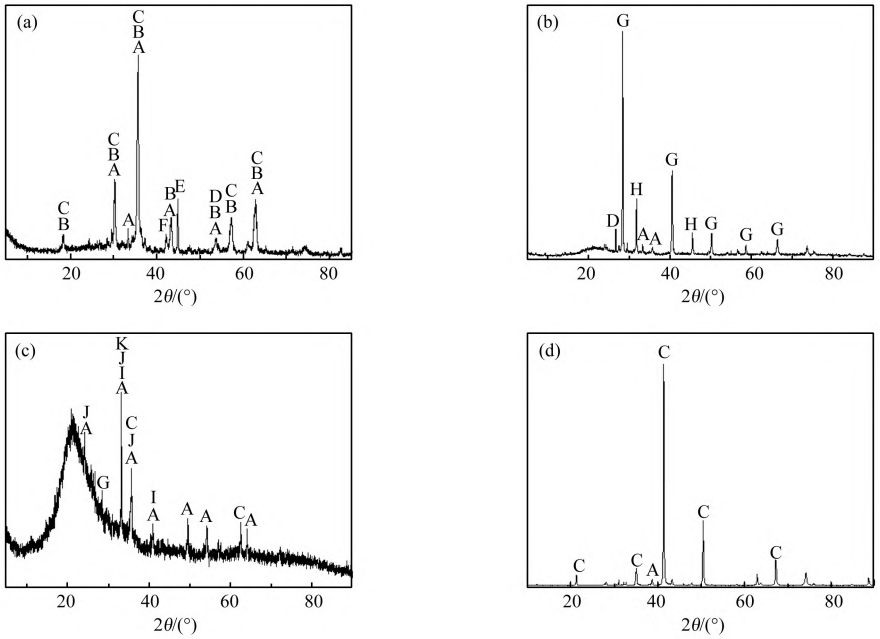
表 2　原料的主要化学成分和烧损（质量分数）

Table 2　Main chemical composition and burning loss of raw materials　　%

原料名称	TFe	ZnO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Na	K	Cl	PbO	烧损
转炉除尘灰	53.40	7.91	7.15	1.98	0.72	0.65	0.52	0.480	0.070	0.33
烧结机头灰	8.84	0.36	3.33	1.46	0.69	7.98	24.57	36.430	1.440	6.47
高炉布袋灰	34.22	3.83	7.84	13.45	9.37	1.16	2.58	4.130	0.340	26.54
铁砂	55.81	0.13	1.24	9.49	3.76	0.35	0.17	0.002	0.001	—

试验所用原料的 X 射线衍射图谱如图 1 所示。由图 1 可看出：转炉除尘灰主要矿相为铁酸盐矿相及赤铁矿、磁铁矿等铁氧化物；烧结机头灰的主要矿相为钾和钠结合的氯盐矿物（KCl、NaCl）；高炉布袋灰的主要矿相为褐铁矿和石英；铁砂的主要矿相为金属铁，TFe 质

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



（a）转炉除尘灰；（b）烧结机头灰；（c）高炉布袋灰；（d）铁砂

A—Fe_2O_3；B—$ZnFe_2O_4$；C—Fe_3O_4；D—CaO；E—Fe；F—FeO；G—KCl；H—NaCl；I—SiO_2；J—$Al_3Fe_5O_{12}$；K—$CaFe_2O_4$。

图1 4种钢铁冶金粉尘的XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of 4 types of iron and steel metallurgical dust

量分数达到55.81%，因为铁砂的杂质成分较少，因此在试验中被用作铁质校正原料。

1.2 样品制备与检测方法

为分析不同黏结剂对球团强度的影响机理，在满足转底炉冶炼最低的全铁标准下，试验所有料浆均按以下配比进行制备：铁砂为30%、转炉除尘灰为49%、烧结机头灰为7%、高炉布袋灰为14%、水灰比为0.1、黏结剂配比为5%。试验中，采过DF-101S型磁力搅拌器将黏结剂与水混合均匀(在参考样品中，铁砂作为骨料)；采用NJ-160B型水泥净浆搅拌机搅拌5 min使其混合均匀；采用球窝直径为20 mm的小型对辊压球机，将混合料压制成球；将生球养护24 h后，得到成品球。根据《高炉和直接还原用铁球团矿抗压强度的测定》(GB/T 14201—2018)，将每个样品组制备12个球团，采用YHKC-2A型颗粒强度测定仪分别测定生球、成品球的抗压强度。

1.3 检测设备

采用德国布鲁克公司的射线粉末衍射仪(D8 ADVANCE X)进行XRD分析，采用铜钯和钴钯进行检测，X射线管电压为20~60 kV，温度范围为室温至1 500 ℃。红外分析采用美国某公司生产的红外光谱仪(Nicolet IS10)，波数精度优于0.01 cm^{-1}，FTIR标准线性度小于0.1%，光谱范围为400~4 000 cm^{-1}，分辨率优于0.4 cm^{-1}。微观形貌分析采用日本某公司生产的场发射扫描电子显微镜(SU8020)，加速电压范围为0.5~30 kV。X射线能谱仪元素分析范围为B5-U92，分辨率为130 eV，倾转角T为-5°~70°，R为360°。

2 结果与讨论

冷固球团被用于转底炉工艺时需要具备一定的力学性能以承受下落冲击和炉内高温造成的应力。因此，冷固球团成品球的抗压强度不低于400 N/P，落下强度大于20次/(0.5 m)，生球抗压强度达到15 N/P，生球落下强度达到10次/(0.5 m)。

2.1 单一黏结剂对冷固球团强度的影响

基于初步配合比，探究$Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$、硅酸钠(Na_2SiO_3)、水玻璃和腐殖酸钠4种无机黏

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

结剂以及白糊精、黄糊精、玉米淀粉、羧甲基纤维素钠(CMC-Na)和环氧树脂 5 种有机黏结剂单独作为 ISMD 冷固球团黏结剂使用时，其对球团强度的影响。

设定单一黏结剂的用量为 5%，得到黏结剂与生球抗压强度的关系如图 2 所示。由图 2 可知，无机黏结剂的性能明显优于有机黏结剂。其中：硅酸钠对提高生球抗压强度的效果最显著，生球抗压强度可达 28.1 N/P；以 $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$ 为黏结剂的冷固球团强度可达到 24.3 N/P；在有机黏结剂系列中，CMC-Na 冷固球团生球的抗压强度为 21.5 N/P，相对较高；所有单一黏结剂中，以黄糊精、环氧树脂、和 SAC 为黏结剂冷固球团生球的抗压强度比较低。

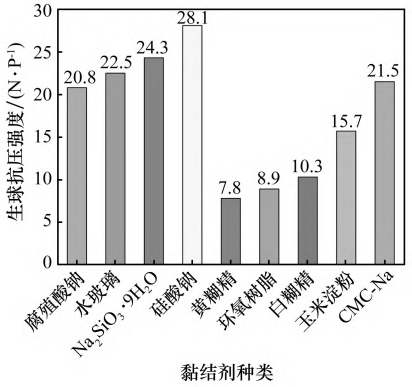
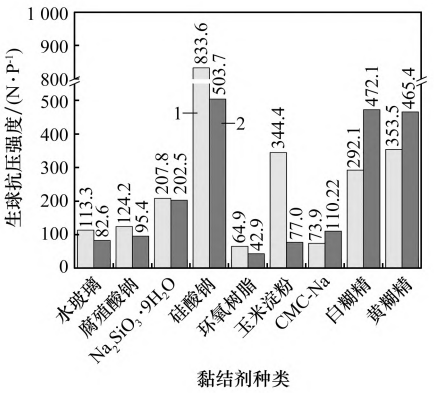


图 2　单一黏结剂种类对冷固球团生球抗压强度的影响

Fig. 2　Effect of a single binder type on the compressive strength of raw pellets of cooled agglowerated pellets

各种黏结剂的热稳定性能并不相同，考虑到热稳定性较差的黏结剂可能会受高温影响而无法发挥黏结作用，因此探究单一黏结剂对 ISMD 冷固球团成品球抗压强度的影响时，不仅应分析各组球团在 105 ℃下固结 24 h 后的强度性能，而且还应分析自然固结 7 d 时的表现，从而对用各种黏结剂制得的球团所需固化条件进行初步定性。固结环境对冷固球团成品球抗压强度影响的试验结果如图 3 所示。

由图 3 可看出：无机黏结剂一般更适合高温固结，而有机黏结剂则需要通过试验探究其相关性质；所有无机黏结剂均适合采用 105 ℃高温固结，其各自在105 ℃下的成品球抗压强



1—105 ℃下固结 24 h；2—自然晾干 7 d。

图 3　固结环境对冷固球团的成球抗压强度影响

Fig. 3　Effect of consolidation environment on the compressive strength of cooled agglowerated pellets into balls

度均大于其在自然条件下放置 7 d 后的成品球抗压强度；以硅酸钠为黏结剂的冷固球团在 105 ℃下固化 24 h 后其成品球的抗压强度最高，可达到 833.6 N/P。对于有机黏结剂，白糊精、黄糊精和 CMC-Na 的冷固球团表现为更适宜常温固结，玉米淀粉和环氧树脂的冷固球团更适合在高温下固结。白糊精和黄糊精的冷固球团自然放置 7 d 后的抗压强度分别为 472.1 N/P 和 465.4 N/P。综合分析，硅酸钠是一种可以明显提高球团力学强度的黏结剂。

2.2　复合黏结剂对冷固球团强度的影响

将腐殖酸钠和环氧树脂分别与硅酸钠以不同配比制备得到 10 种二元复合黏结剂，按照初步配合比配料混合压球，其中复合黏结剂用量为 5%，测定 10 种成品球的抗压强度，并与单一黏结剂的力学强度进行比较。试验配比如表 3 所示，试验结果如图 4 所示。

由图 4 可看出，随着硅酸钠配比的减小与腐殖酸钠配比的增大，ISMD 成品球的抗压强度呈逐渐减小的趋势。A-1 到 A-7 的 7 组冷固球团样品，由于黏结效果好的硅酸钠黏结剂的质量分数减少，导致成品球的抗压强度也逐渐减少。但是在硅酸钠与环氧树脂制备的二元复合黏结剂试验中，随着硅酸钠配比的减小，环氧树脂配比的增大，ISMD 成品球的抗压强度出现了峰值，B-3 和 B-4 组均优于 B-1 组，两组球团的抗

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

表 3 复合黏结剂的配方设计

Table 3 Formulation design of the composite binder

试验编号	m(硅酸钠):m(腐殖酸钠)	抗压强度/(N·P^{-1})	试验编号	m(硅酸钠):m(环氧树脂)	抗压强度/(N·P^{-1})
A-1	10:0	833.6	B-1	10:0	833.6
A-2	8:2	520.7	B-2	8:2	652.3
A-3	6:4	435.7	B-3	6:4	870.2
A-4	5:5	368.5	B-4	5:5	860.5
A-5	4:6	271.4	B-5	4:6	447.8
A-6	2:8	158.3	B-6	2:8	226.6
A-7	0:10	124.2	B-7	0:10	64.9

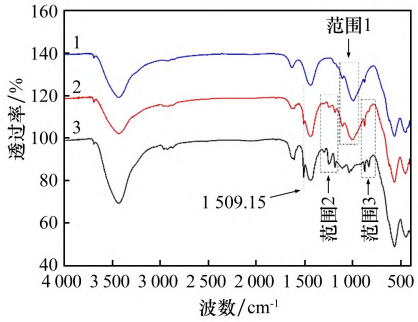
注:m 为质量,kg。

压强度分别达到 870.2、860.5 N/P。B-3 中硅酸钠与环氧树脂的配比分别为 3% 和 2%，B-3 成品球的抗压强度(870.2 N/P)大于添加 3% 单一硅酸钠黏结剂冷固球团的强度(367.9 N/P)，同时远大于 B-7 添加 5% 单一环氧树脂黏结剂冷固球团的强度(64.9 N/P)。综合看来，硅酸钠与环氧树脂之间存在增强 ISMD 冷固球团强度的协同作用。

2.3 复合黏结剂的黏结机理

2.3.1 官能团组成分析

分别对以复合黏结剂、硅酸钠、环氧树脂为黏结剂的 3 种冷固球团进行红外光谱分析，结果如图 4 所示。在范围 1(1 105.17 ~ 992.88 cm^{-1})内，谱线 1 与谱线 2 中都含有硅酸钠的 Si-O-Si 伸缩振动特征峰，谱线 2 中比谱线 1 中多出来的峰正好与谱线 3 中的特征峰重合，这些峰分别是1 509.15 cm^{-1}处的对位取代苯环



1—硅酸钠；2—硅酸钠－环氧树脂；3—环氧树脂。

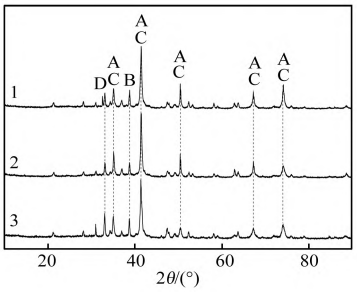
图 4 3 种冷固球团的红外光谱分析

Fig. 4 Infrared spectroscopic analysis of three cooled agglomerated

-C=C-的弯曲振动、范围 2(1 296.63 ~ 1 182.54 cm^{-1})内的脂肪芳香醚 C-O-C 的反对称伸缩振动以及范围 3(890 ~ 805 cm^{-1})内的 1,2,4 三取代苯的面外弯曲振动[10-12]。因此可见，复合黏结剂球团中硅酸钠和环氧树脂只是发生了简单的混合，复合黏结剂的黏结性能增强机理与官能基团无关，并不是两者结合产生了新的官能团或者发生了相互改变和影响。

2.3.2 矿物组成分析

3 种冷固球团的 XRD 分析结果如图 5 所示。由图 5 可知：3 个样品中含有的物相基本一致，结合原料的 XRD 分析，这些主要是合成原料中的物相，并未发现与黏结剂相关的明显谱峰。因此复合黏结剂的黏结机理并非是通过产生新物相来改变球团原料颗粒之间的固结能力。



A—Fe_3O_4；B—Fe_2O_3；C—$MgFe_2O_4$；D—KCl

1—硅酸钠；2—硅酸钠－环氧树脂；3—环氧树脂。

图 5 使用不同黏结剂的 3 种样品的 XRD 图谱

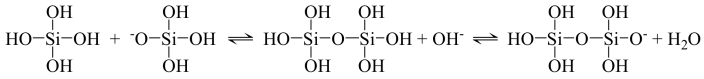
Fig. 5 XRD patterns of three samples using different binders

2.3.3 微观形貌分析

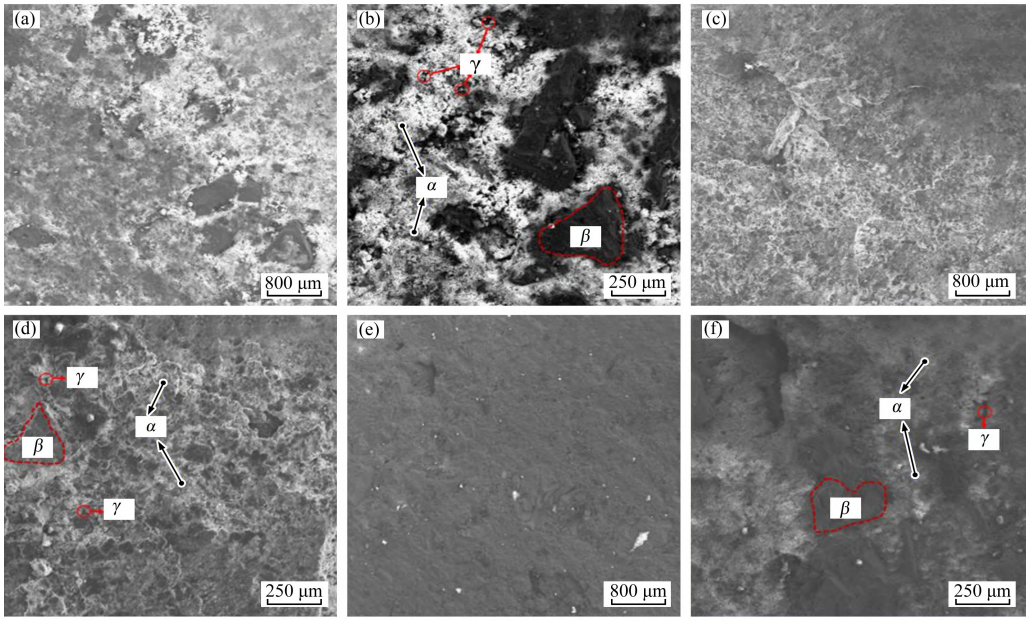
分别对添加复合黏结剂、硅酸钠、环氧树

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

脂的 3 种冷固球团样品进行 SEM 分析，结果如图 6 所示。由图 6 可看出，3 个样品在表面形貌上有明显的差异，致密程度依次增加。以环氧树脂为黏结剂的样品形貌[图 6(a)、(b)]中，亮暗区域分布无序，表示其表面凹凸不平，而且粉尘原料颗粒之间、铁砂与其周围粉尘原料之间的黏结并不紧密，孔洞数量多，结构明显更为疏松，说明环氧树脂对原料的固结能力较弱，疏松的形貌结构与其较弱的力学强度表现相吻合。在以硅酸钠溶液为黏结剂的样品形貌[图 6(c)]中，相对于第一组样品，其表面形貌凹凸程度下降，致密程度增加。但是，在其高倍形貌[图 6(d)]中，大量的粉尘颗粒团聚体，这是由于硅酸钠溶液中的聚硅酸分子之间在不受限制条件下发生了缩聚反应[13]，如式(1)所示。



（1）



(a)、(b) 环氧树脂；(c)、(d) 硅酸钠；(e)、(f) 硅酸钠－环氧树脂

α—粉尘；β—铁砂；γ—孔洞。

图 6　不同类型黏结剂冷固球团的 SEM 形貌分析

Fig. 6　SEM morphology analysis of cooled agglomerated pellets with different types of binders

由图 6 可知：使用复合黏结剂的样品表现出最为致密的微观表面形貌，表面无明显凹凸，原料之间的孔隙得到了充分地填充，这是因为环氧树脂中含有大量羟基等极性基团，极性基团会与硅酸钠聚硅酸表面硅羟基之间形成氢键发生键合[14]，从而阻止聚硅酸之间继续发生缩聚反应，进而抑制硅酸钠胶粒的长大；硅酸钠胶粒被控制在较小的粒度范围内可使得原料颗粒之间的黏结更加紧实，致密的微观形貌可以表现出优良的力学强度性能。复合黏结剂的黏结机理依靠的是官能团之间进行分子间的氢键结合，改变的是黏结剂的物理形态，造球过程中不会产生新的基团结构和新的物相。

由此可见，无机黏结剂对干球强度起决定性作用，而有机黏结剂对干球强度的影响呈多面性[15]。

3　结　论

（1）单一黏结剂试验中，5% 硅酸钠作为黏结剂制得的冷固球团具有最好的力学性能，生球和成品球抗压强度分别可达 28.1、833.6 N/P。

（2）硅酸钠与环氧树脂以一定配比制得的复合黏结剂具有协同提高球团力学强度的作用。当黏结剂用量为 5%，硅酸钠与环氧树脂的配

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

比分别为6∶4(B-3)和5∶5(B-4)时成品球的抗压强度(870.2、860.5 N/P)均大于单掺硅酸钠黏结剂时球团的强度(833.6 N/P)，也大于单掺环氧树脂时的强度(64.9 N/P)。

(3) 复合黏结剂的黏结机理在于利用环氧树脂中极性基团上的羟基与硅酸钠溶液中聚硅酸分子上的硅羟基发生氢键结合，从而抑制聚硅酸分子之间的缩聚反应，进而抑制胶粒的长大，即通过细化硅酸钠胶粒的方式增大球团原料的堆积密度，减少大孔数量及总孔体积。复合黏结剂制备的球团中并未产生新的基团结构和新的物相，不过其内部的孔结构更加致密。

参考文献：

[1] 毛瑞,张建良,刘征建,等. 钢铁流程含铁尘泥特性及其资源化[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(3):774－785.
MAO Rui, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Characteristic and resource utilization technique of dust and sludge containing iron from steel production process[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(3):774－785.

[2] 尚海霞,李海铭,魏汝飞,等. 钢铁尘泥的利用技术现状及展望[J]. 钢铁,2019,54(3):9－17.
SHANG Haixia, LI Haiming, WEI Rufei, et al. Present situation and prospect of iron and steel dust and sludge utilization technology[J]. Iron and Steel, 2019, 54(3):9－17.

[3] 李威,谭炳富,栗克建,等. 钢铁厂含锌固废资源循环利用研究现状及发展态势[J]. 有色冶金节能,2021,37(1):8－12.
LI Wei, TAN Bingfu, LI Kejian, et al. Research status and dvelopment trend of zinc-containing solid waste recycling in iron and steel plants[J]. Non-ferrous metallurgy energy saving, 2021, 37(1):8－12.

[4] 牛福生,倪文,张晋霞,等. 中国钢铁冶金尘泥资源化利用现状及发展方向[J]. 钢铁,2016,51(8):1－5.
NIU Fusheng, NI Wen, ZHANG Jinxia, et al. Current situation and development of comprehensive utilization of metallurgical dusts and slimes in China[J]. Iron and Steel, 2016, 51(8):1－5.

[5] 孔楠. 钢铁作业工人粉尘暴露、血液白细胞参数与肺功能改变的关联性研究[D]. 青岛:青岛大学,2021.
KONG Nan. Blood leukocyte counts and lung function changes induced by occupational dust exposure in iron and steel industry workers[D]. Qingdao: Qingdao University, 2021.

[6] YE Q, PENG Z, LI G, et al. Microwave-assisted reduction of electric arc furnace dust with biochar: an examination of transition of heating mechanism[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(10):9515－9524.

[7] ANDERSSON A, GULLBERG A, KULLERSTEDT A, et al. A holistic and experimentally-based view on recycling of off-gas dust within the integrated steel plant[J]. Metals, 2018, 8(10):760.

[8] 余正伟,穆固天,龙红明,等. 钢铁厂含铁尘泥的利用途径分析[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京:冶金工业出版社,2017.
YU Zhengwei, MU Gutian, LONG Hongming, et al. Utilization method analysis of iron-bearing dust and sludge from iron and steel plant[C]//Proceedings of the 11th Annual China Steel Conference. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2017.

[9] STECKO J, STACHURA R, NIESLER M, et al. Utilisation of metallurgical sludge by multi-layer sintering[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2018, 45(9):779－786.

[10] 荊煦瑛,陈式棣,么恩云. 红外光谱实用指南[M]. 天津:天津科学技术出版社,1992.
JING Xuying, CHEN Shidi, YAO Enyun. Practical guide to infrared spectroscopy[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1992.

[11] HUMMEL D O. Identification and analysis of surface-active agents by infrared and chemical methods: Text volume[M]. New York: Interscience Publishers, 1962.

[12] 卢湧泉,邓振华. 实用红外光谱解析[M]. 北京:电子工业出版社,1989.
LU Yongquan, DENG Zhenhua. Practical infrared spectral analysis[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1989.

[13] 孙敏,郭凌. 改性水玻璃黏结剂的分析与应用[J]. 包头职业技术学院学报,2008(3):4－6.
SUN Min, GUO Ling. Analysis and application of modified sodium silicate binder[J]. Journal of Baotou Vocational &Technical College, 2008(3):4－6.

[14] 许进,王文清,戴绪绮,等. CO_2 硬化水玻璃凝胶胶粒的细化[J]. 铸造,1995(5):6－10.
XU Jin, WANG Wenqing, DAI Xuqi, et al. Refinement of gel grains of CO_2-hardened sodium silicate[J]. Casting, 1995(5):6－10.

[15] 雷杰,汪名赫,周江虹,等. 新型复合黏结剂提高生球质量的作用机理及构效关系[J]. 工程科学学报,2023,45(1):1－9.
LEI Jie, WANG Minghe, ZHOU Jianghong, et al. Mechanism and structure-activity relationship of a new composite binder to improve the quality of green pellets[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(1):1－9.

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