

## 铜渣尾矿团粒过程黏结剂筛选及黏结机理<sup>①</sup>

刘江<sup>1,2,3</sup>, 罗立群<sup>1,2,3</sup>, 刘成<sup>1,2,3</sup>, 叶远林<sup>1,2,3</sup>, J. Christophe Niyonzima<sup>1,2,3</sup>, 雷严明<sup>1,2,3</sup>

(1.武汉理工大学资源与环境工程学院,湖北武汉430070;2.关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室,湖北武汉430070;3.矿物资源加工与环境湖北省重点实验室,湖北武汉430070)

**摘要:**为减少铜渣尾矿资源化利用过程的粉尘和烟气,以铜渣尾矿为原料,以羧甲基纤维素钠(CMC)、膨润土、水玻璃单独或复配为黏结剂制备铜渣球团,通过落下强度、抗压强度和生球爆裂温度考察黏结剂的成球效果,借助扫描电镜、红外光谱和Zeta电位测试分析球团内部微观形貌、吸附特征和表面电位变化。结果表明:3种黏结剂均可实现铜渣尾矿的团粒化黏结;黏结剂单独使用时,CMC配量应大于0.20%,膨润土配量应大于2.0%,水玻璃配量应大于2.5%;CMC与膨润土或水玻璃复配,CMC配量0.1%时,膨润土配量应大于2.0%,水玻璃配量应大于2.5%;CMC配量为0.15%时,膨润土配量应大于1.5%,水玻璃配量应大于2.0%。添加黏结剂后,球团内部结构更加紧凑,空间结构更加牢固;铜渣尾矿颗粒表面Zeta电位降低,亲水性提高,促进了颗粒间的吸附作用进而提高球团质量。

**关键词:**铜渣尾矿;球团;黏结剂;黏结机理;爆裂温度;落下强度;抗压强度;Zeta电位

中图分类号:TF046;TF802

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.05.018

文章编号:0253-6099(2024)05-0089-07

## Binder Selection and Bonding Mechanism in Pelletization Process of Copper Slag Flotation Tailings

LIU Jiang<sup>1,2,3</sup>, LUO Liqun<sup>1,2,3</sup>, LIU Cheng<sup>1,2,3</sup>, YE Yuanlin<sup>1,2,3</sup>, J. Christophe Niyonzima<sup>1,2,3</sup>, LEI Yanming<sup>1,2,3</sup>

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 2.Key Laboratory of Green Utilization of Critical Non-metallic Mineral Resources, Ministry of Education, Wuhan 430070, Hubei, China; 3.Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan 430070, Hubei, China)

**Abstract:** Copper slag flotation tailings were taken as raw materials, and carboxymethylcellulose (CMC), bentonite, sodium silicate alone or the mixture were taken as binders to prepare copper slag pellet for reducing dust and flue gas generated during utilization of copper slag tailings. The effect of binder on balling was explored in terms of the drop numbers, compressive strength and cracking temperature of green ball, and microscopic morphology, adsorption characteristics and surface potential changes were also analyzed by scanning electron microscopy, infrared spectroscopy and Zeta potential detection. Results show that all three binders can be useful in agglomeration of copper slag tailings. When used alone, CMC, bentonite and sodium silicate are required to be added at an amount more than 0.20%, 2.0% and 2.5%, respectively. In case of CMC used in combination with bentonite or sodium silicate, bentonite or sodium silicate should be added at an amount of more than 2.0% and more than 2.5%, respectively, with the addition of CMC is at an amount of 0.1%; while with the addition of CMC at an amount of 0.15%, the addition of bentonite or sodium silicate should be more than 1.5% and more than 2.0%, respectively. With the addition of binder, the prepared pellet has more compacted structure and stronger spatial structure. It is found that copper slag tailings particles have a lower value of zeta potential, and an improved hydrophilicity, which can promote interparticle adsorption, and thus improves pellet quality.

**Key words:** copper slag flotation tailings; pellets; binder; bonding mechanism; cracking temperature; drop number; compressive strength; Zeta potential

① 收稿日期:2024-03-08

基金项目:国家自然科学基金(51874219)

作者简介:刘江(1997—),男,重庆梁平人,硕士,主要研究方向为矿物资源高效利用与清洁生产。E-mail:1923819195@qq.com

通信作者:罗立群(1968—),男,湖南长沙人,高级工程师,博士研究生导师,主要研究方向为矿物资源高效利用与清洁生产。E-mail:lqluollq@hotmail.com

铜与人类关系非常密切,在我国有色金属材料中的消费量仅次于铝,广泛应用于电气、轻工、机械制造、建筑工业、国防工业等领域。2022年我国精炼铜产量达1 106.3万吨,80%以上的精炼铜由火法冶炼生产,同时产生炼铜炉渣超过2 600万吨<sup>[1]</sup>。炼铜炉渣经缓冷-破碎-磨矿-浮选回收铜资源后的尾矿称为铜渣尾矿<sup>[2]</sup>,仍富含较高的铁和少量铅锌等多种有价金属。其中铁品位为30%~42%,主要为细粒嵌布的铁橄榄石和磁铁矿;铅、锌品位为1%~3%,锌主要以类质同象形式赋存在铁橄榄石、磁铁矿、铅铁硅质玻璃体中,铅则赋存于铅铁硅质玻璃体中<sup>[3]</sup>。铜渣尾矿既具有较高的综合回收价值,也存在潜在的环境污染风险。

国内外回收炼铜炉渣与铜渣尾矿中有价金属的方法主要有:磨矿-磁选法、熔分法、碳热还原-磁选法、氧化焙烧-碱浸法、碳热还原-碱浸法<sup>[4-8]</sup>。由于铜渣尾矿粒度较细,采用回转窑等还原装置进行直接还原焙烧时会产生大量粉尘和烟气,导致回转窑等还原装置尾气处理系统和物料循环负荷较大,降低还原处理能力和综合回收效益。若预先采用团粒造球,可有效解决粉尘量大、烟尘处理难、综合能耗高等问题。针对铜渣尾矿如何选用合适的黏结剂及配量,特别是尽量不降低原料铁品位的有机黏结剂与复合黏结剂,相关研究较少。为了选用适用于铜渣尾矿的有机黏结剂和复合黏结剂,本文对比考察了不同黏结剂在团粒过程的黏结效果及黏结机理,为铜渣尾矿的综合利用提供参考依据。

## 1 实 验

### 1.1 实验原料及性质

实验原料为某铜业公司铜渣尾矿,其TFe品位为36.42%。铜渣尾矿中主要含有铁橄榄石( $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ )、磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )、少量硫化物以及由脉石组成的无定形玻璃体<sup>[3]</sup>,其化学多元素分析结果如表1所示。铜渣尾矿粒度对造球具有一定影响,其粒度分布结果见图1。由图1可知,铜渣尾矿的粒度主要集中在10~74  $\mu\text{m}$ , -74  $\mu\text{m}$  粒级占76.84%,铜渣尾矿粒度适合造球<sup>[9]</sup>。

表1 铜渣尾矿化学多元素分析结果(质量分数) %

TFe	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	CuO
36.42	36.86	37.37	6.59	5.25	2.92	0.14
ZnO	PbO	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	S	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	其他
4.12	0.15	0.36	0.83	0.82	2.55	2.04

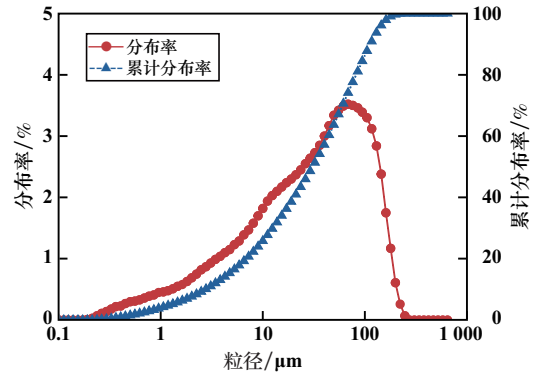


图1 铜渣尾矿粒度分布图

黏结剂在粉料团粒与造球中承担桥联与团聚作用,实验选用羧甲基纤维素钠(CMC)为黏结剂,配合膨润土和水玻璃,其中CMC和水玻璃为分析纯药剂,膨润土主要化学成分和理化性能见表2和表3。

表2 膨润土主要化学成分(质量分数) %

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$
64.36	16.64	4.93	0.88	1.69	1.57	1.02

表3 膨润土理化性能分析结果

粒度(-0.074 mm)/%	吸水率/%	膨胀容/( $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ )	胶价/%
95	300	20	400

### 1.2 实验与检测方法

球团制备:称取1 000 g铜渣尾矿,按设定比例称取黏结剂,铜渣尾矿与黏结剂充分混合后加入质量分数9%的水进行润湿混匀,然后在 $\Phi 600\text{ mm}\times 210\text{ mm}$ 圆盘造球机中造球,转数35 r/min,倾角 $45^\circ$ 。生球水分控制为11%,成球后选用直径5~12 mm的小球,对其进行落下强度、抗压强度及爆裂温度测试。

落下强度检测:参照GB/T 50491—2018《铁矿球团工程设计标准》,要求生球落下强度不小于4次<sup>[10]</sup>。干燥后的含碳球团从烘干机排出后直接排入回转窑中进行还原焙烧,因此对干球团落下强度要求不高,只需保证生球在烘干过程中不会碎裂,故干球落下强度只需不小于2次即可。

抗压强度检测:随机选取10个球团测试抗压强度,结果取平均值。对于链算机-回转窑工艺来说,生球抗压强度主要来自干燥时小球间的相互挤压,故生球抗压强度不小于8.81 N/个、干球抗压强度不小于22.1 N/个即可。

生球爆裂温度:热风流量 $10\text{ m}^3/\text{h}$ ,温度梯度 $20\text{ }^\circ\text{C}$ ,随机取30个合格生球装入风杯,生球放入爆裂

炉管内持续 5 min。若生球发生爆裂个数小于 2 个,则提高温度,重复进行测试,直到刚好出现 2 个生球爆裂,此时的温度作为此次实验的爆裂温度。对于链算机-回转窑工艺来说,生球的爆裂温度一般不低于 350 ℃。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 黏结剂对球团性能的影响

#### 2.1.1 有机黏结剂 CMC

为探究有机黏结剂 CMC 对铜渣尾矿球团性能的影响,选择黏结剂配量分别为 0.05%、0.10%、0.15%、0.20%、0.25% 进行造球,考察 CMC 配量对生球性能的影响,结果如图 2 所示;CMC 配量对干球性能的影响如图 3 所示。

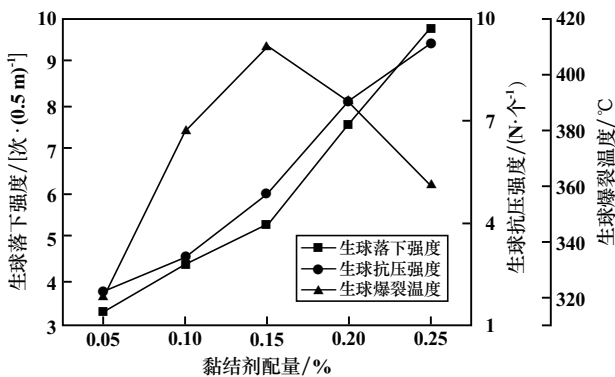


图2 CMC 配量对生球性能的影响

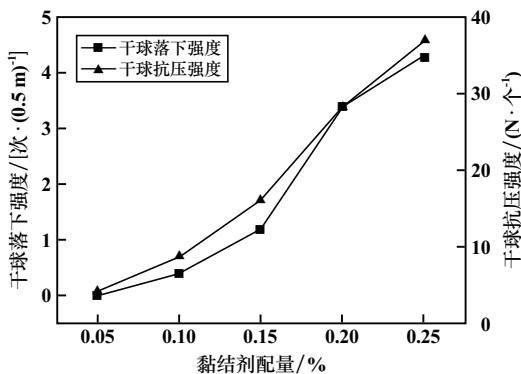


图3 CMC 配量对干球性能的影响

由图 2 可知,随着 CMC 配量增加,生球落下强度和抗压强度均逐渐增加。CMC 配量从 0.05% 增加至 0.25% 时,生球落下强度从 3.3 次/(0.5 m) 上升至 9.8 次/(0.5 m),抗压强度从 2.0 N/个上升至 9.3 N/个; CMC 配量达到 0.20% 时,生球落下强度和抗压强度分别为 7.6 次/(0.5 m) 和 7.8 N/个,均满足铜渣球团生产工艺要求。

由图 2 还可以看到,生球爆裂温度随 CMC 配量增加呈现先增加后下降趋势。CMC 配量由 0.05% 增加

至 0.15% 时,生球爆裂温度从 320 ℃ 上升至 410 ℃,说明有机黏结剂 CMC 可以有效提高铜渣尾矿生球的爆裂温度;黏结剂配量超过 0.15% 后,生球爆裂温度呈下降趋势。CMC 中有机组分可以增强铜渣尾矿表面的亲水性,使得铜渣尾矿颗粒间的黏结性增强,球团内部结构更加紧密,当温度上升至某一阈值时,CMC 中的有机组分会因高温而分解,产生的气体在球团内部形成少量孔道,利于高温下球团内部水分蒸发及时排出,进而提高爆裂温度<sup>[11]</sup>。若有机黏结剂配量过多,在高温环境下有机黏结剂的分解和球团水分的蒸发导致生成的气体过多,球团内部气体无法及时向向外扩散,球团内部压力增大,生球爆裂温度降低<sup>[12]</sup>。

由图 3 可知,干球强度与 CMC 配量呈正相关。CMC 配量由 0.05% 增加至 0.25% 时,干球落下强度从 0 上升至 4.7 次/(0.5 m),抗压强度从 4.2 N/个上升至 36.8 N/个; CMC 配量达到 0.20% 时,干球落下强度和抗压强度分别为 3.4 次/(0.5 m) 和 28.3 N/个,均满足铜渣球团生产要求。

#### 2.1.2 膨润土与水玻璃

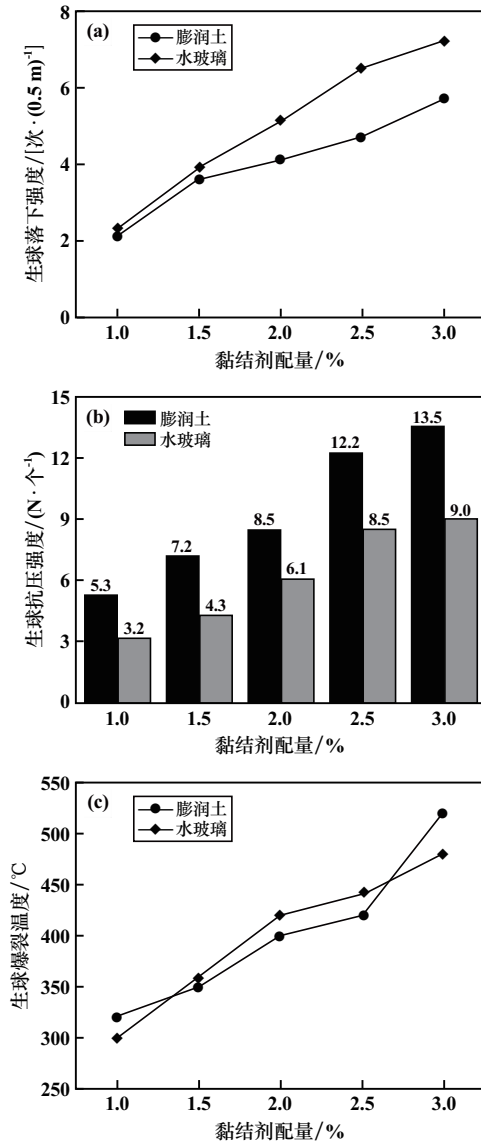
采用膨润土和水玻璃分别作为铜渣尾矿球团黏结剂,黏结剂配量对生球性能的影响如图 4 所示。

由图 4(a)、(b) 可知,随着黏结剂配量增加,生球落下强度和抗压强度都有明显提升。黏结剂配量相同时,水玻璃生球落下强度略高于膨润土生球,而抗压强度相对较低。黏结剂配量 2.5% 时,膨润土生球落下强度和抗压强度分别为 4.7 次/(0.5 m) 和 12.2 N/个,水玻璃生球落下强度和抗压强度分别为 6.5 次/(0.5 m) 和 8.5 N/个,均满足球团工艺要求。

由图 4(c) 可知,膨润土和水玻璃生球爆裂温度随黏结剂配量增加而升高。黏结剂配量 1.0% 时,膨润土和水玻璃生球爆裂温度为 319 ℃ 和 303 ℃,黏结剂配量提升至 3.0% 时,膨润土和水玻璃生球爆裂温度分别达到 522 ℃ 和 479 ℃,提升幅度较大。

水玻璃与铜渣尾矿混合后,通过附着在颗粒表面一层薄薄的水玻璃膜与相邻颗粒产生黏结作用,增强球团内部结构稳定性,提高球团强度,从而提升生球爆裂温度<sup>[13]</sup>。膨润土加入混合料后,生球产生少量孔隙,干燥时球团水分汽化易于排出,从而提升生球爆裂温度。

不同无机黏结剂对干球性能的影响如图 5 所示。由图 5 可知,随着黏结剂配量增加,干球强度均增大。黏结剂配量由 1.0% 增加至 3.0% 时,膨润土干球落下强度和抗压强度分别从 0、10.5 N/个增加至 3.4 次/(0.5 m)、29.4 N/个;水玻璃干球落下强度和抗压强度分别从



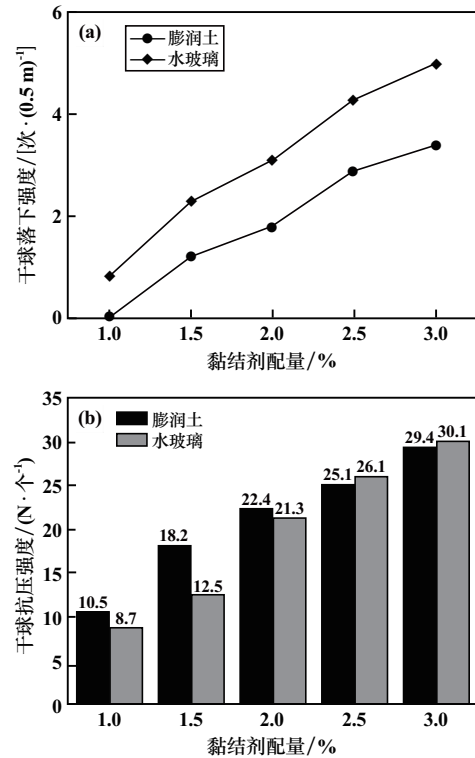
(a) 生球落下强度; (b) 生球抗压强度; (c) 生球爆裂温度

图4 膨润土与水玻璃配量对生球性能的影响

0.8次/(0.5 m)、8.7 N/个增加到5.0次/(0.5 m)、30.1 N/个。黏结剂配量相同时,水玻璃干球落下强度略高于膨润土干球,而2种黏结剂的干球抗压强度差别不大。膨润土作黏结剂时,配量大于2.0%才可满足生产工艺要求,而水玻璃配量应超过2.5%。

从上述结果分析可得,在满足铜渣球团生产工艺要求下,单独添加黏结剂时,CMC配量应大于0.2%,膨润土配量应大于2.0%,水玻璃配量应大于2.5%,相比于膨润土和水玻璃,CMC配量更低,对球团品位影响较小,且对生球落下强度和干球强度的提升幅度更大。无机黏结剂膨润土和水玻璃配量远大于有机黏结剂CMC配量,影响球团的铁品位,且无机黏结剂中主要为难以挥发的无机物,在球团焙烧后会残留在球团中。有机黏

结剂CMC配量小,且在高温下易分解挥发,只有极少的残渣遗留在球团中,对球团铁品位影响很小。



(a) 干球落下强度; (b) 干球抗压强度

图5 膨润土与水玻璃配量对干球性能的影响

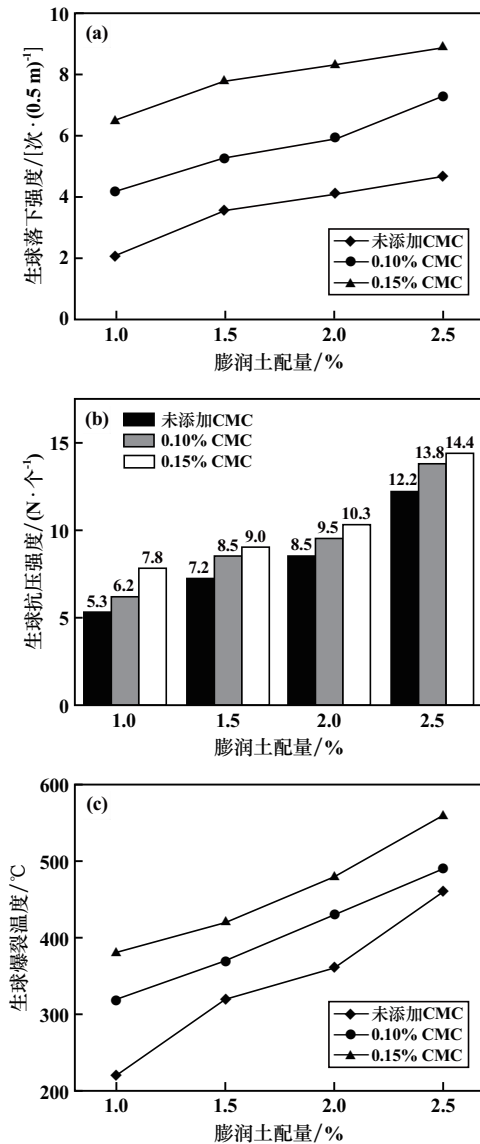
## 2.2 复合黏结剂对球团性能的影响

### 2.2.1 CMC与膨润土复合黏结剂

将铜渣尾矿、有机黏结剂CMC及膨润土按不同配量混合均匀后制备球团,测试其球团性能。每次称取1.50 kg铜渣尾矿,参照前述球团制备条件,制备后测试球团性能,结果如图6所示。

由图6(a)、(b)可知:固定膨润土配量为1.5%,不加CMC生球落下强度仅3.6次/(0.5 m),抗压强度为7.2 N/个;CMC配量为0.10%、0.15%时,生球落下强度上升至5.3次/(0.5 m)、7.8次/(0.5 m),生球抗压强度上升至8.5 N/个、9.0 N/个。由此可知,随着CMC配量增加,生球落下强度明显提升,生球抗压强度提升较小。

由图6(c)可知,生球爆裂温度随着CMC配量增加有明显提升。膨润土配量为1.0%时,未添加CMC黏结剂生球爆裂温度不足250℃,CMC配量增加至0.15%时,生球爆裂温度升高至380℃,满足生球爆裂温度不低于350℃的工艺要求。未添加CMC时,膨润土配量达到2.0%生球爆裂温度方才满足生产要求;添加0.10% CMC时,膨润土配量仅需1.5%即可达到370℃的爆裂温度。



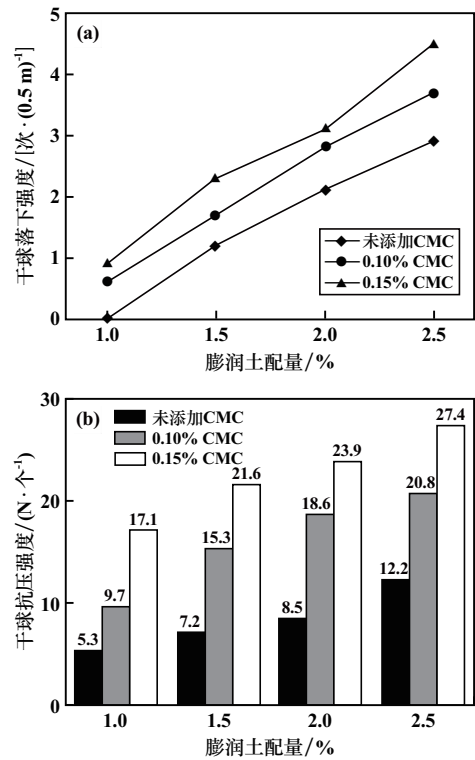
(a) 生球落下强度; (b) 生球抗压强度; (c) 生球爆裂温度  
图6 CMC配加膨润土对生球性能的影响

CMC配加膨润土对干球性能的影响如图7所示。由图7可知:随着CMC配量增大,干球强度均增大;干球抗压强度提升较显著,而干球落下强度提升幅度较小,与单一黏结剂膨润土球团强度较为接近。为满足生产工艺要求,CMC配量0.10%时,膨润土配量应大于2.0%;CMC配量0.15%时,膨润土配量应大于1.5%。

### 2.2.2 CMC与水玻璃复合黏结剂

参照CMC与膨润土复合造球条件,CMC与水玻璃复合黏结剂生球性能测试结果如图8所示。

由图8(a)、(b)可知,CMC配加水玻璃对生球强度有一定提升。随着CMC配量增加,生球落下强度和抗压强度皆有小幅度上升。相比于膨润土,CMC配加水玻璃对生球强度的影响较低。



(a) 干球落下强度; (b) 干球抗压强度  
图7 CMC配加膨润土对干球强度的影响

由图8(c)可知,CMC配加水玻璃可以提高生球爆裂温度。CMC配量0.15%、水玻璃配量2.0%时,生球爆裂温度即可满足工艺要求;而添加0.10% CMC时,水玻璃配量应大于2.5%。

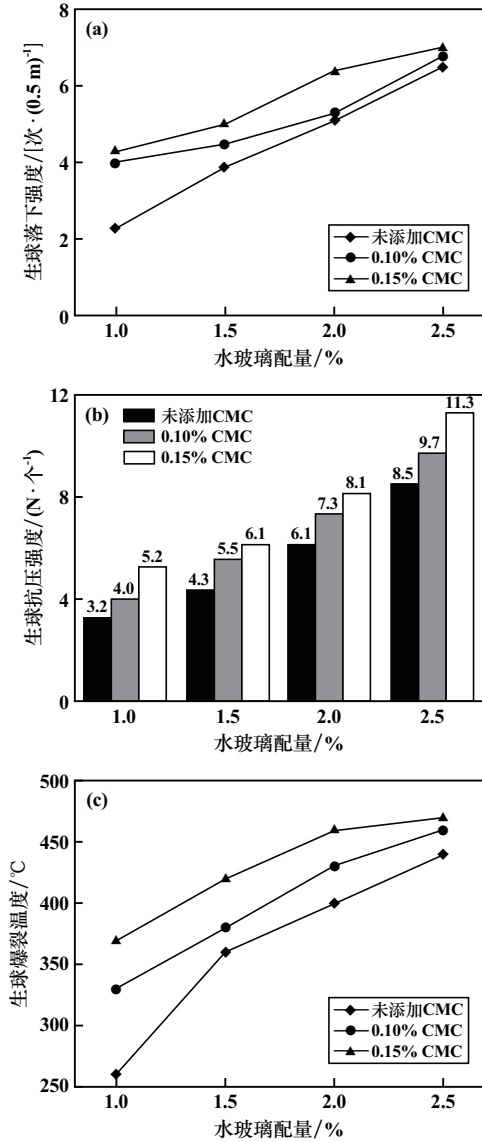
CMC配加水玻璃对干球强度影响如图9所示。由图9可知,随着CMC配量增加,干球强度均增大。

综合可得,有机黏结剂的复合对提升生球落下强度和干球抗压强度的效果较佳,而对生球抗压强度及干球落下强度影响较小。为满足球团工艺要求,CMC配量0.10%时,膨润土配量应大于2.0%,水玻璃配量应大于2.5%;CMC配量0.15%时,膨润土配量应大于1.5%,水玻璃配量应大于2.0%。

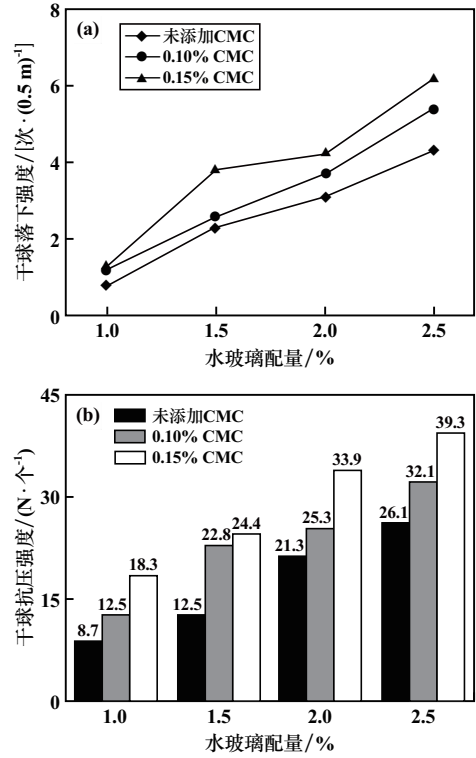
### 2.3 球团内部微观形貌分析

有机黏结剂与无机黏结剂在结构上存在差异,在造球过程中与铜渣尾矿颗粒间的作用方式不同,故对球团内部结构产生不同作用效果。为查明黏结剂在球团内部的黏结行为,采用扫描电镜观察铜渣尾矿及添加CMC、水玻璃和膨润土球团的内部形貌结构,如图10所示。

由图10可知,黏结剂为CMC和水玻璃时,球团内部结构更加紧凑,空间结构更加牢固,因此CMC和水玻璃干球强度比膨润土干球强度高。黏结剂为膨润土时,球团内部有少量孔隙,铜渣尾矿颗粒间相对作用力



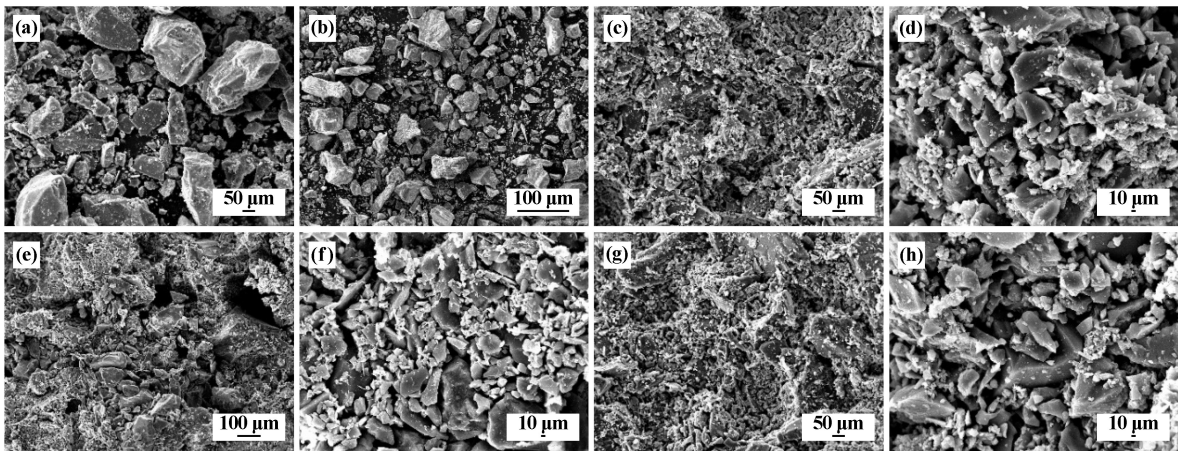
(a) 生球落下强度; (b) 生球抗压强度; (c) 生球爆裂温度  
图8 CMC配加水玻璃对生球性能的影响



(a) 对干球落下强度的影响; (b) 对干球抗压强度的影响  
图9 CMC配加水玻璃对干球强度的影响

有所降低,导致球团空间结构不如 CMC 和水玻璃球团牢固,干球强度相比于 CMC 和水玻璃干球较低。水玻璃通过附着在铜渣尾矿球团表面形成一层水玻璃薄膜,球团干燥后水玻璃薄膜因脱水固结可增强颗粒间的作用力,致使球团结构较为致密、紧凑,干球强度较高。

球团中存在的少量孔隙,有助于铜渣尾矿的焙烧还原,而 CMC 为有机物,在高温下易分解成水和二氧化碳,无尾渣残留,对球团铁品位影响很小。



(a), (b) 铜渣尾矿粉末; (c), (d) 添加 CMC 的干球断面;  
(e), (f) 添加膨润土的干球断面; (g), (h) 添加水玻璃的干球断面  
图10 铜渣尾矿及添加黏结剂后的干球断面微观形貌

### 2.4 红外光谱分析

为探究有机黏结剂 CMC 与铜渣尾矿的作用方式,对吸附 CMC 前后的铜渣尾矿进行红外光谱分析,结果如图 11 所示。

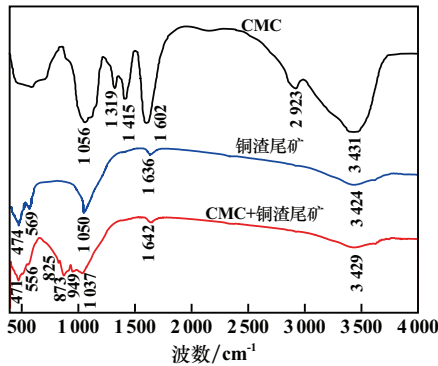


图 11 铜渣尾矿吸附 CMC 组分前后的 FTIR 光谱

对比图 11 中铜渣尾矿的光谱曲线和 CMC+铜渣尾矿的光谱曲线可知,569  $\text{cm}^{-1}$  处为 Fe—O 伸缩振动峰,474  $\text{cm}^{-1}$  处为 Si—O 伸缩振动峰。当铜渣尾矿吸附黏结剂后,红外光谱在 873  $\text{cm}^{-1}$  和 825  $\text{cm}^{-1}$  出现了新的特征峰,且在 1636  $\text{cm}^{-1}$  处的振动峰移动到 1642  $\text{cm}^{-1}$  处,1050  $\text{cm}^{-1}$  处的特征峰移动到 1037  $\text{cm}^{-1}$  处。由此可知,CMC 结构中含有亲水基团的羧基在铜渣尾矿颗粒表面产生了吸附作用。此外,3424  $\text{cm}^{-1}$  处的羟基移动到 3429  $\text{cm}^{-1}$  处也表明 CMC 分子结构中的极性基团以氢键形式与铜渣尾矿颗粒表面发生作用。

### 2.5 Zeta 电位分析

黏结剂吸附在矿物材料表面,会改变矿物材料表面的电位,显示黏结剂与矿物材料间的相互作用关系。铜渣尾矿吸附黏结剂后悬浮液 pH 值的变化对试样 Zeta 电位的影响如图 12 所示。

由图 12(a) 可知,CMC 的 Zeta 电位在零电点以下,说明 CMC 中含有大量羧基能使 CMC 在水中电离,铜渣尾矿吸附 CMC 后,含有大量羧基的 CMC 吸附在铜渣尾矿表面,使铜渣尾矿表面电负性增大。在测定的 pH 值范围内,吸附了大量 CMC 的铜渣尾矿表面呈现与黏结剂相近的电性。

铜渣尾矿球团加入 CMC 后,CMC 表面含有大量的极性基团可与铜渣尾矿颗粒之间产生化学吸附,而 CMC 表面的亲水基团可以提高铜渣尾矿表面的亲水性,以促进颗粒间的相互作用,进而提高球团质量。

由图 12(b) 可知,与膨润土作用后铜渣尾矿的 Zeta 电位值均向下移动,表明膨润土中存有的极性基团会吸附在铜渣尾矿颗粒表面带正电荷阳离子上,使

得铜渣尾矿表面的 Zeta 电位降低。

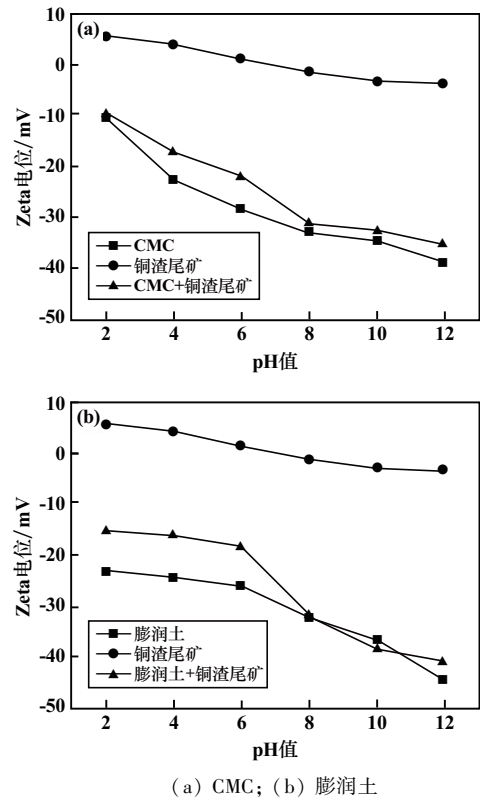


图 12 铜渣尾矿吸附 CMC 和膨润土前后的 Zeta 电位图

## 3 结 论

1) 某铜业公司铜渣尾矿 TFe 品位达 36.42%,含有少量铅锌有价成分,-0.074 mm 粒级占 76.84%,CMC、膨润土或水玻璃 3 种黏结剂均可实现铜渣尾矿的团粒化黏结制备球团。

2) 黏结剂单独加入铜渣尾矿时,CMC、膨润土和水玻璃的配量应分别大于 0.20%、2.0% 和 2.5%,方可满足球团生产工艺要求。添加 CMC 的生球爆裂温度为 320~410  $^{\circ}\text{C}$ ,较膨润土的略低。

3) CMC 与膨润土或水玻璃复配时,CMC 配量 0.10% 时,膨润土配量应大于 2.0%,水玻璃配量应大于 2.5%;CMC 配量 0.15% 时,膨润土配量应大于 1.5%,水玻璃配量应大于 2.0%。

4) 微观形貌结果表明,添加黏结剂后,球团内部结构更加紧凑,空间结构更加牢固。红外光谱显示 CMC 分子结构中的极性基团以氢键形式与铜渣尾矿表面发生作用而吸附在其表面,从而改善了表面亲水性。CMC 的加入降低了铜渣尾矿表面 Zeta 电位,提高了铜渣尾矿表面的亲水性,促进了颗粒间的吸附作用,从而提高球团质量。

(下转第 104 页)

- 究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(3):92-94.
- [7] 董馨予,王海峰,贺跃,等. 电解锰渣的浸出毒性分析及无害化处理[J]. 无机盐工业, 2023, 55(5):85-90.
- [8] 马先杰,陈森,陈兰兰,等. 贵州典型电解锰企业锰渣重金属污染特征及对植物种子萌发和生长的影响[J]. 科技通报, 2019, 35(8):190-196.
- [9] 蒋勇,文梦媛,贾陆军. 电解锰渣的预处理及对水泥水化的影响[J]. 非金属矿, 2018, 41(3):49-52.
- [10] WU J F, SONG M S, XU X H, et al. Prospects and advances of comprehensive utilization of electrolytic manganese residue[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(7):2645-2652.
- [11] 程淑君,陶宗硕,施学宝. 锰渣作水泥混合材的应用研究[J]. 中国建材科技, 2019, 28(4):48-49.
- [12] 熊玉路,徐子豪,李英杰,等. 惰性气氛下电解锰渣高温还原焙烧脱硫[J]. 化工进展, 2021, 40(增刊1):319-325.
- [13] 王勇. 电解锰渣作水泥混合材的研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(5):78-80.
- [14] LI C X, ZHONG H, WANG S, et al. Reaction process and mechanism analysis for CaS generation in the process of reductive decomposition of  $\text{CaSO}_3$  with coal[J]. Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2015, 50:173-181.
- [15] ZHENG S C, NING P, MA L P, et al. Reductive decomposition of phosphogypsum with high-sulfur-concentration coal to  $\text{SO}_2$  in an inert atmosphere [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2011, 89(12):2736-2741.
- 引用本文: 陈沪飞. 电解锰渣中高温焙烧试验研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(5):100-104.

(上接第95页)

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2022[M]. 北京:地质出版社, 2022.
- [2] 湛宏海,邓红飞,罗立群,等. 炼铜炉渣选铜尾矿制备矿微粉[J]. 化工进展, 2021, 40(8):4616-4623.
- [3] 王明细,陈荣升,罗立群,等. 炼铜尾渣提取重介质产品的特性及矿物学分析[J]. 中国矿业, 2021, 30(11):109-114.
- [4] 王苗,杨双平,庞锦琨. 火法铜渣改质还原提铁试验研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(1):98-101.
- [5] WANG H Y, SONG S X. Separation of silicon and iron in copper slag by carbothermic reduction-alkaline leaching process [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(8):2249-2258.
- [6] 李小凡,豆志河,张延安,等. 铜冶炼渣综合利用进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(4):108-118.
- [7] 万新宇,王锋,高建军,等. 铜渣还原-焙分过程中砷的行为特征[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4):96-99.
- [8] 董鑫江,左宗良,杨涵奇,等. 铜渣氧载体煅烧改性及氧化还原特性研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(6):107-111.
- [9] 张晓雪,罗立群,王洪阳. 铜渣碳热还原过程中铅锌脱离规律研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(2):379-386.
- [10] 住房和城乡建设部. 铁矿球团工程设计标准[S]. 北京:中国计划出版社, 2018.
- [11] 李彩霞,任瑞晨,刘健,等. 有机物/膨润土复合球团粘结剂的研究[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(4):809-812.
- [12] 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[J]. 烧结球团, 2018, 43(4):27-32.
- [13] 蒋武锋,李运刚,赵利国,等. 黏结剂对含碳球团还原的影响[J]. 钢铁研究学报, 2000(4):1-4.
- 引用本文: 刘江,罗立群,刘成,等. 铜渣尾矿团粒过程黏结剂筛选及黏结机理[J]. 矿冶工程, 2024, 44(5):89-95.

(上接第99页)

- [10] 伍德佑,刘志强,饶帅,等. 废旧磷酸铁锂电池正极材料回收利用技术的研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(10):70-78.
- [11] 周吉奎,刘牡丹,刘勇,等. 硫酸-双氧水浸出废弃磷酸铁锂中锂的实验研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(6):79-81.
- [12] 姚送送,吴国庆,王浩,等. 磷酸铁锂电池粉选择性提锂工艺[J]. 电池, 2021, 51(5):538-541.
- [13] 王猛,张家靓,陈永强,等. 退役磷酸铁锂电池回收技术综述[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(5):100-110.
- [14] LI H, XING S Z, LIU Y, et al. Recovery of lithium, iron, and phosphorus from spent  $\text{LiFePO}_4$  batteries using stoichiometric sulfuric acid leaching system [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(9):8017-8024.
- [15] 付中梦,巩勤学,王杜,等. 从废旧磷酸铁锂正极片中回收铁、锂[J]. 矿冶, 2020, 29(5):104-107.
- [16] 颜群轩,罗碧云,陈嘉鑫,等. 废旧磷酸铁锂电池可持续回收技术研究进展[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4):174-177.
- [17] 中华人民共和国工业和信息化部. 电池用磷酸铁:HG/T 4701—2014[S]. 北京:化工出版社, 2015.
- [18] JING Q, ZHANG J, LIU Y, et al. E-pH diagrams for the Li-Fe-P- $\text{H}_2\text{O}$  system from 298 to 473 K; thermodynamic analysis and application to the wet chemical processes of the  $\text{LiFePO}_4$  cathode material [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2019, 123(23):14207-14215.
- [19] 韩梦莹. 电池级磷酸铁的制备工艺研究[D]. 郑州:郑州大学, 2014.
- [20] ZHENG R, ZHAO L, WANG W, et al. Optimized Li and Fe recovery from spent lithium-ion batteries via a solution-precipitation method [J]. Rsc Advances, 2016, 6(49):43613-43625.
- 引用本文: 赵雨婷,周自圆,刘志启,等. 废旧磷酸铁锂电池正极材料酸浸液除杂及同步回收  $\text{FePO}_4$  研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(5):96-99.