

工业废水中金属离子对水煤浆性能的影响及作用机理研究

李晓腾,吕剑桥,马椽栋,由晓芳,李琳

(山东科技大学 化学与生物工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:工业废水用于制备水煤浆,有利于其资源化利用,降低工业废水的处理成本,减少环境污染。为了探究工业废水中金属离子对水煤浆黏度、稳定性和燃烧特性的影响,选用 Na^+ 、 Ca^{2+} 两种金属离子进行实验研究。成浆实验研究表明, Na^+ 、 Ca^{2+} 存在时均会增加水煤浆的黏度,并且 Ca^{2+} 的增黏幅度明显高于 Na^+ ; Na^+ 、 Ca^{2+} 对水煤浆稳定性的影响较小。燃烧特性研究表明, Na^+ 、 Ca^{2+} 水煤浆的着火温度、燃尽温度降低,最大燃烧速率增大, Na^+ 对燃烧特性产生的积极影响比 Ca^{2+} 显著。

关键词:水煤浆;钠离子;钙离子;黏度;燃烧特性

中图分类号:TD926

文献标志码:A

Effect of metal ions in industrial wastewater on the performance of coal water slurry and its mechanism

LI Xiaoteng, LÜ Jianqiao, MA Chuandong, YOU Xiaofang, LI Lin

(College of Chemical and Biological Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Using industrial wastewater to prepare coal water slurry helps to utilize it as a useful resource, reduces the cost of its treatment, and decreases environmental pollution. To explore the effect of metal ions in industrial wastewater on the viscosity, stability and combustion characteristics of coal water slurry, this study selected the metal ions of Na^+ and Ca^{2+} for experimental research. The results of slurry experiments show that the presence of Na^+ and Ca^{2+} will increase the viscosity of coal water slurry, but the viscosity increase of Ca^{2+} is significantly higher than that of Na^+ , and that Na^+ and Ca^{2+} have little effect on the stability of coal water slurry. The studies on combustion characteristics show that the ignition temperature and burn-out temperature of Na^+ and Ca^{2+} coal water slurry decrease whereas the maximum combustion rate increases. The positive effect of Na^+ on the combustion characteristics is more significant than that of Ca^{2+} .

Key words: coal water slurry; sodium ion; calcium ion; viscosity; combustion characteristics

工业废水是工业生产过程中产生的废水、污水和废液,其成分复杂、排放量大,难以集中处理^[1]。工业废水处理不当会导致严重的环境污染,对人们的身体健康造成严重危害。目前,工业废水的处理方法主要分为物理、化学和生物处理三种方法。这些处理方式均价格昂贵且效率低、效果差^[2]。水煤浆(coal water slurry, CWS)是 20 世纪 80 年代开发的一种高效、低污染、强流动性的煤基液体燃料,其在煤原始性质的基础上,

收稿日期:2021-11-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51904174,52074175);山东省自然科学基金项目(ZR2020ME103);山东省高等学校青创科技支持计划项目(2020KJD001)

作者简介:李晓腾(1997—),男,山东烟台人,硕士研究生,主要从事矿物资源综合利用研究。

由晓芳(1982—),女,山东烟台人,副教授,博士,主要从事矿物(煤)分选理论及工艺、矿物加工过程模拟与优化及选矿(煤)信息化和智能化研究,本文通信作者。E-mail:youxiaofang1212@sdust.edu.cn

又具有石油的流动性和稳定性^[3-4]。水煤浆技术作为一种成熟技术,近年来已逐渐开始向原料多样化方向发展,许多学者对各种类型的废水和固体废弃物制备水煤浆的可行性进行了研究。

Xiang 等^[5]以油田废水为原料制备煤-油田废水浆,结果表明,使用油田废水提高了水煤浆的成浆能力,改善了水煤浆的流变特性。Wang 等^[6]通过对比煤气化废水为原料制备的水煤浆和石油焦水煤浆的成浆性发现,煤气化废水提高了水煤浆的成浆性。张昊等^[7]将采油含聚废水直接制备水煤浆,综合考虑水煤浆性能发现 20% 的废水掺混比例更为合适。陈聪等^[8]利用焦化废水制备水煤浆,结果表明,焦化废水的最大成浆浓度比去离子水稍低,可以实现焦化废水无害化、资源化利用。姚彬等^[9]掺配酚氨废水制备了符合气化工艺要求的水煤浆,从经济性角度考虑废水掺配量 6%~8% 为宜。王睿坤等^[10]将城市湿污泥与煤粉掺混制备污泥水煤浆,发现污泥掺混量增加、浆体成浆浓度下降、黏度增加。王健等^[11]研究发现,当两种污泥添加比例为 10% 时,水煤浆成浆浓度达到 60% 以上。赵帅等^[12]研究发现,添加含油污泥促进了水煤浆的燃烧过程。因此,工业废水制备水煤浆可以用于工业废水的资源化利用,是一种可行的废水处理方式。

工业废水成分复杂,其中一些成分会对水煤浆性能造成影响。 Na^+ 、 Ca^{2+} 等金属离子是工业废水中无法忽略的重要组成部分,目前在金属离子对水煤浆性能影响的研究上主要集中在黏度、稳定性等方面,金属离子对水煤浆燃烧特性影响的研究较少。Liu 等^[13]研究了有机废水中 6 种金属离子对水煤浆黏度、稳定性的影响,发现不同金属离子对水煤浆性能的影响不同。Wang 等^[14]研究了无机盐对水煤浆黏度的影响,结果表明,一价盐降低了水煤浆黏度,三价盐增加了水煤浆黏度,而二价盐对水煤浆黏度影响不大。Wang 等^[15]研究发现,适量的碱性添加剂利于降低水煤浆的黏度。本研究选择 Na^+ 、 Ca^{2+} 两种金属离子制备了不同浓度的钠离子水煤浆(Na-CWS)、钙离子水煤浆(Ca-CWS),并对制备的水煤浆进行检测,在分析 Na^+ 、 Ca^{2+} 对水煤浆黏度、稳定性影响的基础上,重点分析了 Na^+ 、 Ca^{2+} 对燃烧特性的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

煤样采自内蒙古某选煤厂,依据 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》和 GB/T 31391—2015《煤的元素分析方法》对煤样进行分析,煤质分析结果见表 1。分散剂采用木质素磺酸钠(分析纯,阜阳曼林生物技术有限公司),金属离子以金属无机盐代替,选用 NaCl(分析纯,烟台远东精细化工有限公司)、 CaCl_2 (分析纯,天津市北辰方正试剂厂)两种金属无机盐。

表 1 煤样的工业分析及元素分析

Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis of coal

工业分析				元素分析					%
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C	H	N	S	O	
10.04	4.73	29.76	55.47	76.22	4.05	0.87	0.67	8.15	

1.2 粒度分析

对煤样进行初步破碎,之后使用 XZM-100 振动磨样机(武汉探矿机械厂)磨至 200 目(0.074 mm)以下,使用 BT-9300Z(中国丹东百特仪器有限公司)激光粒度分析仪分析煤粉粒度,结果如图 1 所示。

由表 2 可知,煤样中 97.49% 的煤粉粒径小于 74 μm ,所占比例远大于 75%,体积平均径为 16.72 μm ,符合制备水煤浆的煤样粒度要求。

1.3 水煤浆制备方法

每组水煤浆总质量为 100 g,成浆浓度 64%,分散剂用量为干燥用量的 1%,金属无机盐用量为干燥用量的 0~2%(0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%、1.6%、2.0%)。采用干法制浆,按照预定比例计算煤粉、分散剂、去离子水和金属无机盐的质量。先将分散剂与金属无机盐溶解于去离子水,再加入煤粉,使用 JB 90-D 型实验室强力电动搅拌机(上海沪析实业有限公司)以 1 000 r/min 的转速将混合物进行搅拌,搅拌时间为 6 min,即得到水煤浆。

1.4 流变性

表观黏度(ν_{100})是在 100 s^{-1} 剪切速率下测得的黏度。为了减少实验误差,剪切速率从 0 均匀增加到 100 s^{-1} ,当剪切速率达到 100 s^{-1} 时,记录 6 次数据,取平均值为水煤浆的表观黏度。

采用 NXS-4C 型水煤浆黏度计(成都仪器厂)测定水煤浆的黏度,将水煤浆放置在内转子和外筒之间的圆形空间中测量,在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$) 剪切速率范围为 $0\sim 100\text{ s}^{-1}$,剪切速率从 0 到 100 s^{-1} 均匀变化,然后均匀降至 0。记录剪切速率为 10、20、40、60、80、 100 s^{-1} 及 100、80、60、40、20、 10 s^{-1} 时的黏度,绘出黏度与剪切速率的关系图。

为了研究水煤浆浆体的流变特性,采用 Herschle-Bulkley 模型(H-B 模型)对水煤浆的剪切速率与剪切应力进行曲线拟合:

$$\tau = \tau_0 + Ks^n \quad (1)$$

式中: τ_0 为屈服应力, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; τ 为剪切应力, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; K 为稠度系数, $\text{mPa} \cdot \text{s}^n$; s 为剪切速率, s^{-1} ; n 为流动指数;稠度系数 K 值的大小代表浆体黏稠度的高低。

1.5 稳定性测定

稳定性是评价水煤浆的一项重要指标,直接影响水煤浆的生产和使用。采用析水率法对稳定性进行评估,水煤浆制备完成后,在室温下将其密封静置于量筒中 7 天,记录相关数据。析水率(P)计算公式:

$$P = (d/D) \times 100\% \quad (2)$$

式中: d 是析水层高度, cm ; D 是水煤浆总高度, cm 。

1.6 Zeta 电位

Zeta 电位可用于预测水煤浆静电相互作用,是表征煤颗粒表面电荷的重要指标。以煤的质量作为固定值,取 0.5 g 煤粉,按水煤浆配制比例分别加入木质素磺酸钠和金属无机盐,使用去离子水定容至 50 mL ,转移至锥形瓶密封,用 WHY-2 水浴恒温振荡器(常州国宇仪器制造有限公司)在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温振荡 4 h ,之后静置 2 h ,取样品上清液,使用 JS 94 H 型微电泳仪(上海中晨数字设备有限公司)在室温下测定上清液对应的 Zeta 电位值。

1.7 热重

热重分析法(thermogravimetric analysis, TG)是水煤浆燃烧特性表征常用的热分析技术,是一种通过程序控制温度、测量物质质量随温度变化的技术^[16]。通过对热重数据分析能够得到煤的着火温度、燃尽温度、最大失重速率等重要参数,从而反映水煤浆的燃烧特性,判断金属离子对水煤浆燃烧特性的影响。热重分析采用 NETZSCH TG 209F3 TGA209F3A-0407-L,升温速率为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,升温区间为 $30\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$,通入空气。为了更清晰地分析 CWS、Na-CWS、Ca-CWS 的燃烧过程,判断 Na^+ 、 Ca^{2+} 对燃烧特性的影响,热重实验使用的水煤浆样品的成浆浓度均为 64% ,分散剂用量为干燥用量的 1.0% ^[8,15,17],金属无机盐用量为干燥用量的 1.0% 。

2 结果与讨论

2.1 流变性分析

水煤浆在外力作用下发生流动与变形的特性称为流变特性。不同 Na^+ 、 Ca^{2+} 浓度水煤浆的黏度与剪切速率关系分别如图 2(a)、图 2(b)所示。由两图中流变特性曲线可见,表观黏度均随着剪切速率的增加逐渐

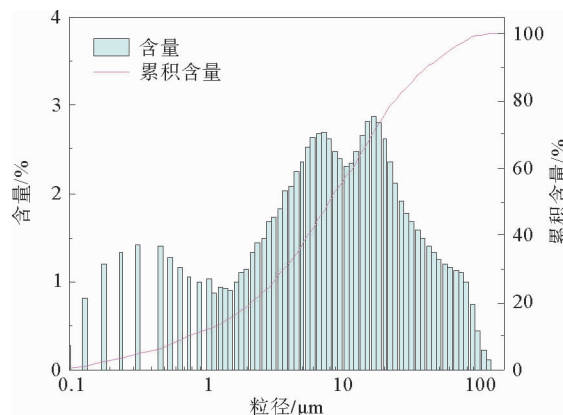


图 1 煤样粒度分布图

Fig. 1 Particle size distribution of coal sample

表 2 煤样粒级统计表

Table 2 Statistics of coal sample particle size

煤样粒径/ μm	<5	<10	<30	<50	<74
体积分数/%	34.71	55.08	84.17	91.64	97.49

降低,具有明显的“剪切变稀”特性,这说明制备的水煤浆是非牛顿流体。从图 2 中可以看出,加入金属离子制备的水煤浆与该煤种普通水煤浆流变特性均符合剪切变稀规律。对比图 2(a)、图 2(b)发现,金属离子浓度越高,水煤浆黏度越大;相同金属离子浓度下,Na-CWS 的黏度明显低于 Ca-CWS 的黏度。结果表明,Na⁺、Ca²⁺ 的加入导致表观黏度增加,流变性变差,并且 Ca²⁺ 的增黏幅度明显高于 Na⁺ 的增黏幅度。

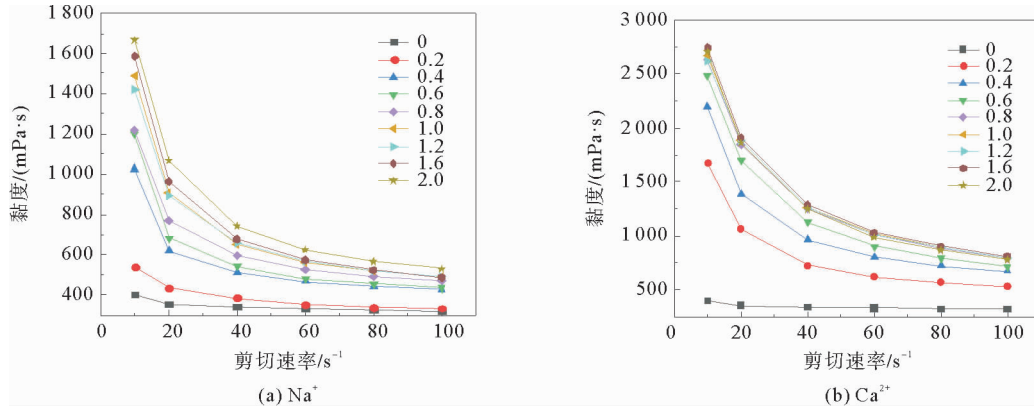


图 2 不同 Na⁺、Ca²⁺ 浓度下水煤浆的流变性

Fig. 2 Rheological properties of coal water slurry under different Na⁺ and Ca²⁺ concentrations

采用 H-B 模型对不同浓度 Na-CWS、Ca-CWS 的剪切速率和剪切应力进行曲线拟合,浆体流变学数据的 H-B 拟合曲线如图 3 所示,拟合参数结果分别如表 3、表 4 所示。从拟合结果看出,CWS、Na-CWS、Ca-CWS 浆体的流变曲线拟合后相关系数均大于 0.99,说明 H-B 模型适用于各实验水煤浆组拟合。此外,所制备的各组水煤浆流动性指数 *n* 均小于 1,符合假塑性流体特征,达到了浆体燃料工业应用的基本要求^[18]。结合图 2 可知,相同剪切速率下 Na-CWS 有更低的黏度和更小的 *K* 值,且 CWS 具有最低的黏度和最小的 *K* 值,进一步说明 Na⁺、Ca²⁺ 的加入会导致表观黏度增加,流变性变差,并且 Ca²⁺ 的增黏幅度明显高于 Na⁺ 的增黏幅度。

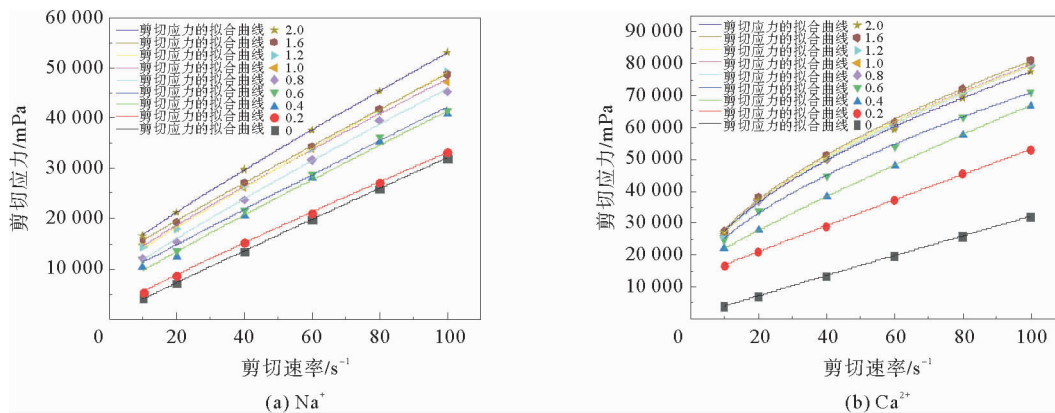


图 3 不同 Na⁺、Ca²⁺ 浓度下水煤浆剪切速率与剪切应力变化关系

Fig. 3 Relationship between shear rate and shear stress of coal water slurry under different Na⁺ and Ca²⁺ concentrations

图 4 呈现了 Na-CWS、Ca-CWS 的表观黏度与金属离子浓度的关系。从图 4 中可以看出,没有添加金属离子时,CWS 的表观黏度为 321 mPa·s,随着金属离子浓度的提高,Na-CWS、Ca-CWS 的表观黏度呈现快速增加后趋于稳定。金属离子浓度从 0 增至 1.0%,Na-CWS 和 Ca-CWS 的黏度分别由 321 mPa·s 增至 473、799 mPa·s,而 Ca-CWS 的黏度增幅约为 Na-CWS 的 3 倍。这一结果表明 Na⁺、Ca²⁺ 的加入增大了水煤浆表观黏度,Ca²⁺ 对水煤浆的增黏效果比 Na⁺ 更强,对水煤浆的成浆性造成了不利影响。这是因为一方面 Na⁺ 和 Ca²⁺ 与煤表面的负电荷结合,压缩了双电层,正负电荷发生中和,减弱了煤颗粒之间的静电斥力

(Zeta 电位机理研究见 2.2 节);另一方面 CaCl_2 的加入导致生成 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,消耗了水煤浆中的自由水,转变成结合水,相当于提高了水煤浆的固含量,进一步增加了水煤浆的黏度。

表 3 不同 Na^+ 浓度下水煤浆 H-B 模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of coal water slurry H-B model under different Na^+ concentrations

浓度/%	屈服应力	K	n	R^2
0	750.71	367.25	0.967 4	0.999 9
0.20	2 141.91	439.99	0.927 3	0.999 8
0.40	7 389.56	492.47	0.931 7	0.996 6
0.60	9 555.76	404.54	0.967 3	0.995 7
0.80	8 356.18	613.01	0.901 9	0.998 5
1.00	11 226.80	581.42	0.907 5	0.998 6
1.20	10 165.72	488.05	0.953 8	0.999 8
1.60	12 068.89	458.22	0.955 4	0.999 8
2.00	11 981.26	637.66	0.906 0	0.999 9

表 4 不同 Ca^{2+} 浓度下水煤浆 H-B 模型拟合参数

Table 4 Fitting parameters of coal water slurry H-B model under different Ca^{2+} concentrations

浓度/%	屈服应力	K	n	R^2
0	750.71	367.25	0.967 4	0.999 9
0.20	13 046.48	470.16	0.968 3	0.999 8
0.40	15 479.66	896.77	0.880 7	1.000 0
0.60	13 815.58	3 579.91	0.613 5	0.999 0
0.80	11 008.17	5 245.15	0.568 1	0.999 3
1.00	11 234.47	5 763.41	0.551 0	0.999 0
1.20	9 734.56	6 704.86	0.524 0	0.998 9
1.60	12 204.99	5 242.13	0.570 0	0.999 2
2.00	12 779.10	5 116.28	0.563 7	0.999 1

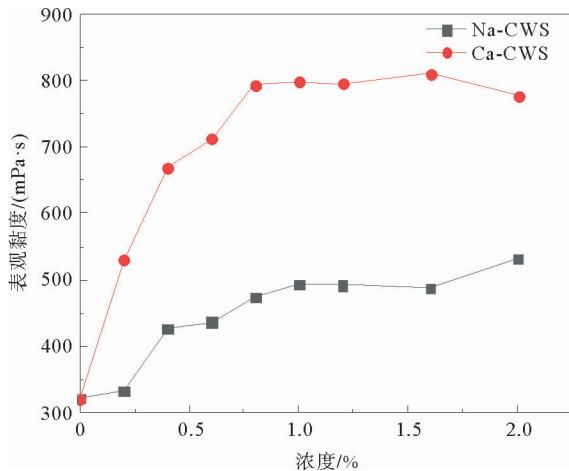


图 4 水煤浆表观黏度与金属离子用量的关系

Fig. 4 Relationship between the amount of metal ions and the apparent viscosity of coal water slurry

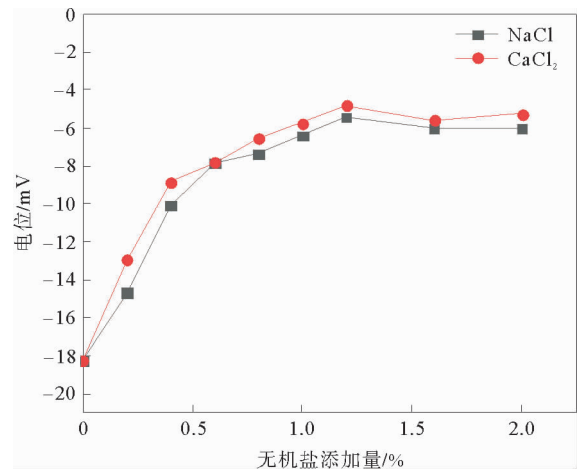


图 5 Zeta 电位与金属离子用量的关系

Fig. 5 Relationship between Zeta potential and the amount of metal ions

2.2 Zeta 电位分析

水煤浆的 Zeta 电位主要取决于煤的性质、分散剂种类和溶液中阳离子的共同作用,考虑到金属离子吸附直接影响煤表面的荷电状态,通过测定 CWS、Na-CWS、Ca-CWS 的 Zeta 电位观察了金属离子对水煤浆的影响。图 5 显示了当分散剂使用木质素磺酸钠,其他条件相同时,水煤浆 Zeta 电位与金属离子浓度变化的关系。

从图 5 中发现,在没有添加金属离子的情况下,CWS 样品的 Zeta 电位为 -18.255 mV 。这是由于在没有添加金属离子的情况下,煤中的含氧官能团呈负电性,使悬浮液带负电荷,木质素磺酸盐在煤表面的吸附又导致悬浮液的电位值降低。金属阳离子存在时,随着金属离子浓度的增加,Na-CWS 和 Ca-CWS 悬浮液的 Zeta 电位变化规律相似,都随着浓度的增加先增加后基本达到平衡,但 Na-CWS 的 Zeta 电位的绝对值高于 Ca-CWS。这是因为加入 NaCl 和 CaCl_2 后,在水中电离出大量金属阳离子, Na^+ 和 Ca^{2+} 与木质素磺酸钠

产生较强络合作用^[19],逐渐中和煤表面的负电荷,使煤颗粒间的静电斥力减小,降低了木质素磺酸钠的分散降黏效果。此外,吸附在煤表面的木质素磺酸钠中的 Na^+ 与 NaCl 中的 Na^+ 形成了竞争吸附,降低了 Na^+ 对煤表面负电荷的中和能力,从而电负性强弱顺序为 $\text{CWS} > \text{Na-CWS} > \text{Ca-CWS}$ 。金属离子的加入使煤颗粒表面负电量减少,颗粒之间的静电斥力减弱,颗粒团聚几率增大,导致水煤浆黏度增大。

2.3 稳定性

通过析水率法对 CWS、Na-CWS、Ca-CWS 的稳定性进行评价,制备了不同金属离子浓度的水煤浆进行浆体稳定性分析。图 6 显示了水煤浆静置 7 天后的析水情况,从图中可以看出,析水率随着金属离子浓度的增加略有降低,但影响不大。这是因为 NaCl 和 CaCl_2 是固体颗粒,增加了水煤浆中的固含量,导致水煤浆中游离水减少,但其加入量不大,因此对析水率影响不大。

2.4 热重分析

3 种样品的 TG 和 DTG(derivative thermogravimetry)曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看出,这 3 种样品的燃烧过程均分为 3 个阶段。从图 7 中可直观地得到 3 个过程的共同点,即第 1 个阶段约为 $40\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ 迅速失重,主要是水煤浆体系中水分挥发导致的质量损失,体系中存在的自由水和煤中的结合水随着温度升高不断挥发造成失重;第 2 个阶段约为 $70\sim 510\text{ }^\circ\text{C}$ 再次快速失重,并在这个范围内产生煤燃烧的过程最大失重速率,这是因为在这个阶段主要进行的是煤中挥发分析出燃烧和焦炭燃烧、燃尽的过程,该过程中煤表面发生氧化和热分解,达到着火温度迅速燃烧生成气体导致失重;第 3 个阶段约为 $510\sim 1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$,此时 TG 和 DTG 曲线趋于平缓,表明水煤浆燃烧过程基本结束,挥发分和固定碳燃尽。

将 3 个燃烧过程曲线对比发现,虽然燃烧过程的各个阶段规律相似,但某些燃烧特性仍存在差异。本研究主要从燃料的着火温度、最大燃烧速率和燃尽温度等方面分析水煤浆的燃烧特性,3 种水煤浆的燃烧分析数据如表 5 所示。

1) 着火温度 T_i

着火温度 T_i 用来反映样品着火的难易程度,着火温度有很多分析方法,本研究采用常用的 TG-DTG 切线法^[20]。对比表 5 中数据发现,水煤浆的着火温度不同,3 种浆体的 T_i 相对大小为 $\text{Na-CWS} < \text{Ca-CWS} < \text{CWS}$; CWS 的着火温度为 $425.4\text{ }^\circ\text{C}$,加入 Na^+ 、 Ca^{2+} 后着火温度分别下降了 9.1 和 $6.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。这主要是因为碱金属 Na^+ 、 Ca^{2+} 对浆体燃烧产生催化作用,Na、Ca 的位置成为燃烧时的活性中心,降低了浆体的着火点。

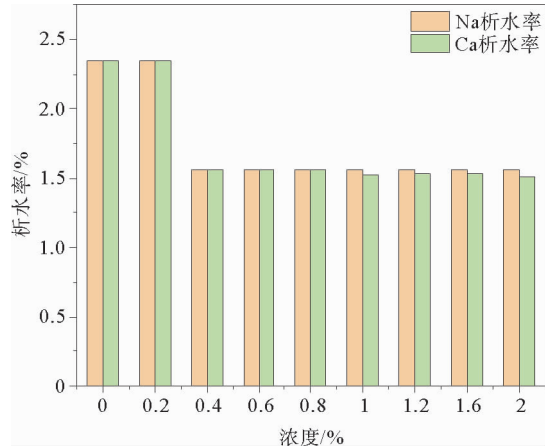


图 6 同 Na^+ 、 Ca^{2+} 浓度下水煤浆的析水率

Fig. 6 Water separation rate of coal water slurry under different Na^+ and Ca^{2+} concentrations

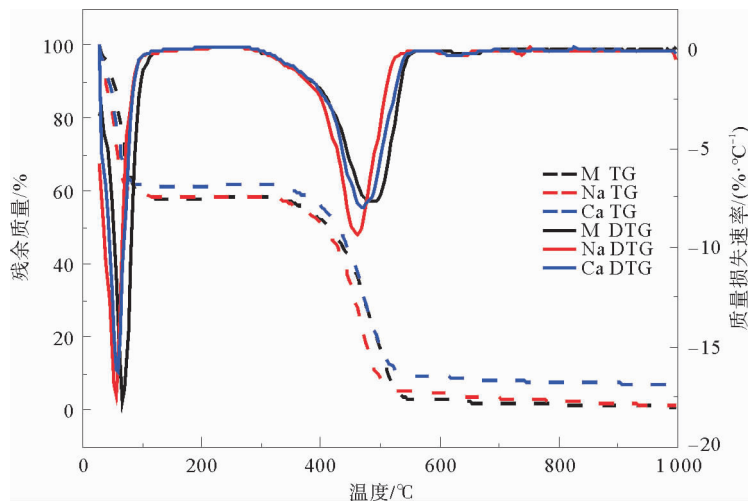


图 7 CWS、Na-CWS、Ca-CWS 的 TG、DTG 曲线

Fig. 7 TG and DTG curves of CWS, Na-CWS, Ca-CWS

这主要是因为碱金属 Na^+ 、 Ca^{2+} 对浆体燃烧产生催化作用,Na、Ca 的位置成为燃烧时的活性中心,降低了浆体的着火点。

2) 最大燃烧速率点 $(dw/dt)_{max}$

DTG 曲线能够直观地看出温度与各个温度段失重速率的对应关系, $(dw/dt)_{max}$ 值越大, 说明燃烧越剧烈, 达到最大燃烧速率需要的温度越低、用时越短。从表 5 中看出, 最大燃烧速率点的温度和燃烧速率也与金属离子的加入有关, 最大燃烧速率点 $(dw/dt)_{max}$ 大小顺序为 Na-CWS < Ca-CWS < CWS。CWS 的 $(dw/dt)_{max}$ 对应温度为

487.0 °C, 燃烧速率为 7.72%/min, 加入 Ca²⁺ 后 $(dw/dt)_{max}$ 对应温度降至 468.1 °C, 降低了 18.9 °C, 同时燃烧速率增大了 0.25%/min。而 Na⁺ 加入的效果更加明显, 使其对应温度降低了 26.8 °C, 燃烧速率增大了 1.61%/min。这表明 Na-CWS 燃烧剧烈, 达到最大燃烧速率需要的温度低、用时短。这是由于碱金属 Na、Ca 均匀分散在煤颗粒表面, 使燃烧更加充分、迅速, Na 的效果优于 Ca。

3) 燃尽温度 T_h

燃尽温度 T_h 是样品完全燃尽时的温度, 燃尽温度的分析采用切线法^[20]。一般来说, 着火温度低、燃烧速率大, 样品的燃尽温度也较低。由表 5 可以看出, 燃尽温度 Na-CWS < Ca-CWS < CWS。Na-CWS 的燃尽温度比 CWS 降低了 28.7 °C, 比 Ca-CWS 降低了 17.4 °C。这表明 Na⁺、Ca²⁺ 的加入加快了水煤浆的燃烧进程, 对降低水煤浆的燃尽温度具有积极作用, 着火温度的降低和燃烧速率的增大导致了燃尽温度的降低。

3 结论

通过制备不同金属离子浓度的 Na-CWS、Ca-CWS, 研究其对水煤浆黏度、稳定性和燃烧特性的影响。

1) 通过对浆体流变性能的分析, 发现水煤浆的表观黏度随着 Na⁺、Ca²⁺ 的加入而增加, 这主要是由于双电层的压缩导致的, 对水煤浆的成浆性造成不利影响。分析不同水煤浆的析水率发现, Na⁺、Ca²⁺ 对水煤浆的稳定性影响不大。

2) 分析不同金属离子浓度水煤浆的 Zeta 电位发现, Na-CWS 和 Ca-CWS 悬浮液的 Zeta 电位变化规律相似, 随浓度的增加先增加后基本达到平衡; 金属离子的加入使煤颗粒表面负电荷减少, 颗粒之间的静电斥力减弱, 颗粒团聚几率增大, 导致水煤浆黏度增大。

3) 分析相同条件下 CWS、Na-CWS、Ca-CWS 热重结果发现, Na-CWS、Ca-CWS 的着火温度、燃尽温度降低, 最大燃烧速率增大, Na⁺ 对燃烧特性产生的积极影响比 Ca²⁺ 更大。这是由于 Na、Ca 均匀分散在煤颗粒表面, 成为燃烧时的活性中心, 使燃烧更加充分、迅速, 加快了水煤浆的燃烧进程, 导致了燃尽温度的降低, 且 Na⁺ 作用更加显著。

参考文献:

[1] 张统, 李志颖, 董春宏, 等. 我国工业废水处理现状及污染防治对策[J]. 给水排水, 2020, 46(10): 1-3.
 ZHANG Tong, LI Zhiying, DONG Chunhong, et al. Current situation of industrial wastewater treatment and countermeasures of pollution control in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(10): 1-3.

[2] 曾柏淞. 工业废水处理方法研究进展[J]. 化学工程与装备, 2020(9): 257-258.
 ZENG Bosong. Research progress of industrial wastewater treatment methods[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2020(9): 257-258.

[3] LI L, MA C D, HU S P, et al. Effect of the benzene ring of the dispersant on the rheological characteristics of coal-water slurry: Experiments and theoretical calculations[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021, 31(3): 515-521.

[4] LI L, MA C D, LIN M Y. Study of sodium lignosulfonate prepare low-rank coal-water slurry: Experiments and simulations [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2021, 29(1): 344-353.

[5] XIANG Y, WANG R K, LIU J Z, et al. Study on the slurring and rheological properties of coal-oilfield wastewater-slurry

表 5 水煤浆燃烧特性

Table 5 Combustion characteristics of coal water slurry

样品	$T_i/°C$	$(dw/dt)_{max}/(°C, \%/min)$	$T_h/°C$
CWS	425.4	487.0, -7.72	526.3
Na-CWS	416.3	460.2, -9.33	497.6
Ca-CWS	418.6	468.1, -7.97	515.0

- [J].Energy Sources,2016,38(24):3687-3693.
- [6] WANG R K, YE X M, ZHAO Z H, et al. Simultaneous disposal and utilization of coal chemical wastewater in coal and petroleum coke slurry preparation; Slurrying performance and mechanism[J].Fuel,2018,215:312-319
- [7] 张昊,魏征,姜勇,等.掺加采油含聚废水对水煤浆制备及性能的影响[J].洁净煤技术,2020,26(4):72-77.
ZHANG Hao, WEI Zheng, JIANG Yong, et al. Effects of polymer containing wastewater from oil production on the preparation and properties of coal water slurry[J].Clean Coal Technology,2020,26(4):72-77.
- [8] 陈聪,刘建忠,徐发锐.焦化废水制备水煤浆的成浆性能[J].化工进展,2019,38(6):2986-2991.
CHEN Cong, LIU Jianzhong, XU Farui. Slurry property of coal water slurry prepared from coking wastewater[J].Chemical Industry and Engineering Progress,2019,38(6):2986-2991.
- [9] 姚彬,张玉荣,王志敏,等.掺配酚氨废水制备水煤浆的实验研究[J].煤炭技术,2021,40(3):151-153.
YAO Bin, ZHANG Yurong, WANG Zhimin, et al. Experimental study on preparation of coal water slurry by blending phenol ammonia wastewater[J].Coal Technology,2021,40(3):151-153.
- [10] 王睿坤,刘建忠,胡亚轩,等.水煤浆掺混湿污泥对浆体成浆特性的影响[J].煤炭学报,2010,35(增1):199-204.
WANG Ruikun, LIU Jianzhong, HU Yaxuan, et al. Influence of wet sludge on the slurrying properties of coal-water slurries[J].Journal of China Coal Society,2010,35(S1):199-204.
- [11] 王健,何其慧,许仁富,等.掺混污泥对水煤浆性能的影响[J].洁净煤技术,2013,19(3):83-88.
WANG Jian, HE Qihui, XU Renfu, et al. Effect of sewage sludge addition on coal water slurry properties[J].Clean Coal Technology,2013,19(3):83-88.
- [12] 赵帅,李寒旭,武成利,等.掺配合油污泥对水煤浆浆体性能及燃烧性能的影响[J].煤炭转化,2021,44(4):20-28.
ZHAO Shuai, LI Hanxu, WU Chengli, et al. Effects of blending oil-bearing sludge on slurry properties and combustion performance of coal water slurry[J].Coal Conversion,2021,44(4):20-28.
- [13] LIU J Z, WANG S N, LI N, et al. Effects of metal ions in organic wastewater on coal water slurry and dispersant properties[J].Energy & Fuels,2019,33(8):7110-7117.
- [14] WANG C Y, ZHAO H, DAI Z H, et al. The effect of inorganic salt in wastewater on the viscosity of coal water slurry[J].Environmental Science and Pollution Research,2019,26(14):14171-14177.
- [15] WANG C Y, ZHAO H, DAI Z H, et al. Influence of alkaline additive on viscosity of coal water slurry[J].Fuel,2019,235:639-646.
- [16] 徐朝芬,孙学信,郭欣.热重分析试验中影响热重曲线的主要因素分析[J].热力发电,2005,34(6):34-36.
XU Chaofen, SUN Xuexin, GUO Xin. Analysis of the main factors influencing the thermogravimetric curve in the thermogravimetric analysis test[J].Thermal Power Generation,2005,34(6):34-36.
- [17] 田毅,涂亚楠,王磊.哈拉沟煤制备水煤浆的成浆性与稳定性研究[J].洁净煤技术,2021,27(增1):14-17.
TIAN Yi, TU Yanan, WANG Lei. Slurriability and stability of coal water slurry prepared with Halagou coal[J].Clean Coal Technology,2021,27(S1):14-17.
- [18] 李得第,刘建忠,张伟明,等.兰炭废水水煤浆成浆特性及添加剂对比研究[J].煤炭转化,2020,43(6):40-47.
LI Dedi, LIU Jianzhong, ZHANG Weiming, et al. Comparative study on slurry property and additives of coal water slurry prepared from blue coke wastewater[J].Coal Conversion,2020,43(6):40-47.
- [19] 李磊,何国锋,吕向阳,等.煤气化废水制备水煤浆的成浆特性研究[J].煤炭转化,2021,44(1):65-71.
LI Lei, HE Guofeng, LYU Xiangyang, et al. Slurry property of coal water slurry prepared from coal gasification wastewater[J].Coal Conversion,2021,44(1):65-71.
- [20] 喻秋梅,庞亚军,陈宏国.煤燃烧试验中着火点确定方法的探讨[J].华北电力技术,2001(7):9-10.
YU Qiumei, PANG Yajun, CHEN Hongguo. Discussion on the methods of determining the fire point in coal combustion test[J].North China Electric Power,2001(7):9-10.

(责任编辑:吕海亮)