许端平,李晓波,薛　杨,等. 不同环境条件下的煤基胶体稳定性[J]. 煤炭学报,2015,40(8):1936-1941. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.0583

Xu Duanping,Li Xiaobo,Xue Yang,et al. Stability of coal colloid under different environmental parameters[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(8):1936-1941. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.0583

不同环境条件下的煤基胶体稳定性

许端平,李晓波,薛　杨,郭春华,崔芳菲

(辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院,辽宁 阜新　123000)

摘　要: 为了揭示不同环境条件下煤基胶体的稳定性,实验采集辽宁省阜新市五龙煤矿选矿厂煤山底层煤粉,并用离心法提取胶体,研究 pH 值(pH=4~9)和电解质(Na^+,Ca^{2+},Al^{3+},Mg^{2+},Cu^{2+}和Zn^{2+})对胶体稳定性的影响,并对不同条件下煤基胶体悬液体系 ζ 电位进行测定。研究结果表明,煤基胶体稳定性随 pH 值的增加而增加,随着阳离子价数的升高而降低,同价态非重金属离子对其影响相似,同价态重金属离子比非重金属离子更易导致体系趋向不稳定状态;体系 ζ 电位绝对值随 pH 值的升高而增大,随阳离子价数的升高而降低,重金属离子<非重金属离子;不同 pH 值条件下的 CFC 值和 ζ 电位具有显著负相关性,且均达到 0.01 水平,Na^+,Ca^{2+},Mg^{2+}和 Al^{3+}存在时体系 CFC 值和 ζ 电位具有显著负相关性,且均达到 0.01 水平,Cu^{2+}和 Zn^{2+}存在时体系 CFC 值和 ζ 电位不存在显著相关性。

关键词: 煤基胶体;稳定性;pH;电解质;ζ 电位

中图分类号: X592　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253-9993(2015)08-1936-06

Stability of coal colloid under different environmental parameters

XU Duan-ping,LI Xiao-bo,XUE Yang,GUO Chun-hua,CUI Fang-fei

(*College of Environmental Science and Engineering,Liaoning Technical University,Fuxin*　123000,*China*)

Abstract: In order to study the stability of coal colloid under different environmental parameters,this study is to investigate the stability of coal colloid under the conditions of different pH (pH = 4-9) values and different cations (Na^+,Ca^{2+},Al^{3+},Mg^{2+},Cu^{2+} and Zn^{2+}). The coal colloid was extracted by using centrifugation method with the coal samples collected from the bottom of coal hill at Wulong Mine in Fuxin,Liaoning,China. The zeta potential of coal colloidal suspension was measured to investigate the stability of coal colloid under different conditions. The results show that the stability of coal colloid tends to increase and decrease respectively with the increase of pH value and the cationic valence,and is similar in the presence of non-heavy metal ions of same valence. Heavy metal ions of same valence are more likely to result in an unstable system than non-heavy metal ions. Absolute value of suspension zeta potential tends to decrease with the increase of cationic valence and increase with the increase of pH value,and the absolute value of heavy metal ions is lower than that of non-heavy metal ions. The CFC and zeta potential are significantly negative correlated,both reach 0.01 level,under different solution pH values and different cations (Na^+,Ca^{2+},Mg^{2+},Al^{3+}),however,had no significant correlation in the presence of Cu^{2+} and Zn^{2+}.

Key words: coal colloidal; stability; pH; electrolyte; zeta potential

收稿日期: 2015-04-29　　**责任编辑:** 张晓宁
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41373125)
作者简介: 许端平(1961—),男,江苏溧水人,副教授,博士。E-mail:xdp1961@sina.com。通讯作者:李晓波,女,辽宁凌源人,硕士研究生。E-mail:lxb788997@126.com

我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，目前煤炭占我国能源需求总量的 67% 左右，这样的能源构成在今后相当长的时期内不会改变[1]，煤炭是一种低品位能源，在其开采、运输、转换和利用的各个环节都会对生态环境造成很大的危害，是最大的污染源之一。在化学结构上，煤分子中含有丰富的羟基、羧基、羰基和甲氧基等含氧官能团，可以与被吸附分子形成化学键，是一种天然吸附剂。许多专家学者研究表明: 煤粉在粉碎及超细化[2-3](粒径在 20 μm 以下的煤粉) 的过程中，随粒度的减小，比表面积急剧增大，大分子结构被破坏，表面官能团增多，大大提高其对污染物质的吸附[4-5]。煤基胶体主要指粒径在 1 ~10 μm 范围内的煤颗粒[6]，由于胶体粒径的排阻作用，胶体能够以远远超过水流的速度在土壤孔隙中运移[7-9]。重金属、有机污染物、病毒、农药等污染物均可吸附于煤基胶体之上[10-11]，通过胶体的优先流而加速其在地表水、地下水和土壤中的运移[12-13]，甚至以超过水的速度运移[13-17]，进而增强了污染物的移动性[18-19]。因此，研究胶体携带污染物迁移和胶体稳定性将对治理修复地下水污染和土壤污染具有重要意义。

目前，关于煤基胶体稳定性研究鲜有报道。溶胶粒子在电场中运动，由于外力作用，使液 - 固相界面内的双电层沿着移动界面分离开，而产生电位差，即电动电位(ζ 电位)，胶体 ζ 电位和 Stern 电位(φ_s 电位) 在大多数情况下数值相差不大，且 ζ 电位比较直观易测，因此用 ζ 电位代替 φ_s 电位讨论胶体的稳定性[20-21]。胶体稳定性可以用 CFC(临界聚沉浓度) 和 ζ 电位来表征。因此，本文对不同 pH 和不同离子价下煤基胶体悬液 CFC 值和 ζ 电位进行测定，揭示其对煤基胶体稳定性的影响及作用机理，为开展土壤及地下水环境保护提供科学参考。

1　材料与方法

1.1　材料与样品制备

煤基胶体提取采用高速离心法: 将 60 g 粒径小于 0.25 mm 的煤样品以土水比 1∶ 30 配成煤悬液，超声 30 min(每 5 min 搅拌一次)，然后将其用 CR21GⅢ型高速冷冻离心机 5 000 r/min，8 min 离心沉降，去除粒径大于 2 μm 的颗粒，上清液继续于 10 000 r/min，20 min 离心沉降，得到粒径小于 2 μm 煤基胶体。煤基胶体粒径分布(图 1) 由 Horiba 公司 LA - 300 激光粒度仪测定，ζ 电位由 JS94 J 型微电泳仪测得，其中粒径小于 2 μm 煤基胶体颗粒约占全部颗粒的 85.78% ，d_{Median} = 1.429 μm，2 ~5 μm 胶体颗粒约占全部颗粒的 14.22%；比表面积和孔径分析由北达燕园微构分析测试中心完成。煤基胶体的理化性质: pH = 7.52，ζ 电位为 - 46.10 mV，比表面积为 41.56 m^2/g，孔体积为 0.08 cm^3/g，电导率为 0.027 1 S/m; 平均孔径，6.26 nm。用 X 射线衍射仪(D/max - rA) 对煤基胶体进行矿物分析(图 2) ，其中石英、高岭石和蒙脱石质量分数分别为 29% ，30% 和 41% 。

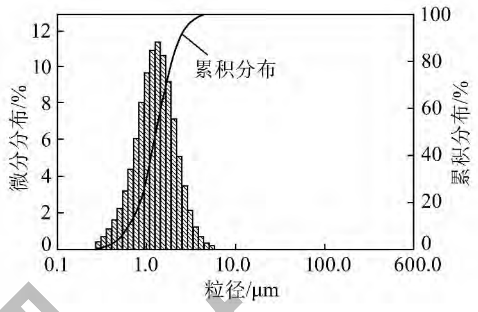

图 1　煤基胶体粒径分布

Fig. 1　Particle size distribution of coal-based colloid

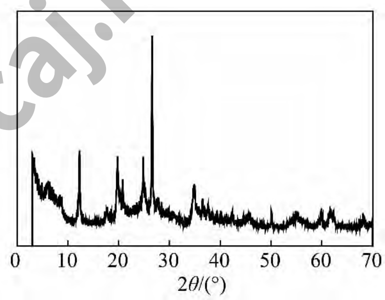

图 2　煤基胶体 X 射线衍射图像

Fig. 2　Coal-based colloid X-ray diffraction pattern

1.2　煤基胶体悬液临界胶束浓度测定

胶体的临界聚沉浓度(critical flocculation concentration，CFC) 指在一定时间内一定量的分散胶体产生聚沉所需最小的添加物浓度。CFC 值反映煤基胶体的稳定性，CFC 值大，表示胶体溶液相对稳定，反之，CFC 值小，则相对不稳定[17]。

考虑到悬浮液中胶体本身的沉降，引起吸光度的下降，定义当相对分散浓度(A_i/A_0) 为 0.2 时所对应的电解质浓度为 CFC(其中，A_i 为加入电解质后土壤胶体悬浮液的吸光度，A_0 为相同时间下未加电解质时的土壤胶体悬浮液的吸光度) 。

pH 对煤基胶体稳定性影响实验时，用 0.1 mol/L 的 NaOH 和 HCl 调节溶液的 pH 值分别为 4，5，6，7，8 和 9，取 10 mL 质量浓度为 1.0 g/L 的胶体溶液放入一系列 50 mL 比色管中，分别加入不同体积的浓度为 1.0 mol/L NaCl 溶液后，去离子水定容，充分混合，于恒温 25 ℃下静置 3 h，取上层溶液，于 600 nm 处测定

其吸光度 A_i，测定同等条件下不添加 NaCl 溶液的煤基胶体溶液吸光度 A_0，并计算(A_i/A_0) 值。

不同价态阳离子对煤基胶体稳定性影响实验: 取 10 mL 质量浓度为 1.0 g/L 的胶体溶液放入 50 mL 比色管中，加入不同体积、一定浓度的离子溶液后，实验步骤同上，分别测得不同离子影响条件下的 A_i 和 A_0，并计算相应的 A_i/A_0 值。

实验时，加入阳离子后，保证混合液中煤基胶体的最终质量浓度为 0.2 g/L。以混合液相对吸光度(A_i/A_0) 为纵坐标、添加物浓度为横坐标作图。当 A_i/A_0 大于 1.0 时胶体完全分散，小于 0.2 时基本凝聚[19]。在不同实验条件下，测定煤基胶体悬液 A_i/A_0 值后，采用 JS94 J 型微电泳仪测定其 ζ 电位。

2 结果与分析

2.1 不同 pH 下 Na－煤基胶体悬液稳定性特征

由图 3(a) 可知，$c(Na^+)$ =2～10 mmol/L 时，相同浓度的条件下，随着 pH 值的升高，Na－煤基胶体悬液的 A_i/A_0 无明显增大或减小的趋势，除在 pH =4，$c(Na^+)$ =10 mmol/L 条件下，煤基胶体悬液体系的 A_i/A_0 值为 0.132 9 外，其他条件下的 A_i/A_0 值均围绕 1 波动，变化不明显; 在相同 pH 值条件下，随 $c(Na^+)$ 的升高，A_i/A_0 值无规律性变化。$c(Na^+)$ 在 20～50 mmol/L 时，相同浓度的条件下，随着 pH 值的升高，Na－煤基胶体悬液的 A_i/A_0 值增大，$c(Na^+)$ =20 mmol/L、pH =4～9 时，A_i/A_0 值由 0.108 2 增大到 0.940 1; $c(Na^+)$ =30 mmol/L、pH =4～9 时，A_i/A_0 值由 0.101 4 增大到 0.936 2; $c(Na^+)$ =40 mmol/L、pH =4～9 时，A_i/A_0 值由 0.102 7 增大到 0.762 3，$c(Na^+)$ =50 mmol/L、pH =4～9 时，A_i/A_0 值由 0.119 2 增大到 0.297 1。在相同 pH 值条件下，随 $c(Na^+)$ 的升高，A_i/A_0 值降低。pH =4 时，A_i/A_0 =0.108 2～0.102 7; pH =5 时，A_i/A_0 =0.276 7～0.147 9; pH =6 时，A_i/A_0 = 0.633 5～0.190 3; pH = 7 时，A_i/A_0 = 0.899 9～0.179 1，体系趋向不稳定状态; $c(Na^+)$ = 60～200 mmol/L 时，不同 pH 值和 $c(Na^+)$ 条件下，体系的 A_i/A_0 值均小于 0.2，体系趋向不稳定状态，此时不同 pH 值和 $c(Na^+)$ 不会对体系的稳定性产生明显影响。

由图 3(b) 可知，不同 pH 值条件下，体系 ζ 电位均随溶液中 Na^+ 浓度的增大而增大; 不同浓度条件下，体系 ζ 电位随 pH 值的增大而减小。$c(Na^+)$ =20～50 mmol/L 时，不同 pH 值和 $c(Na^+)$ 对体系 ζ 电位影响与其对体系稳定性的影响相似。

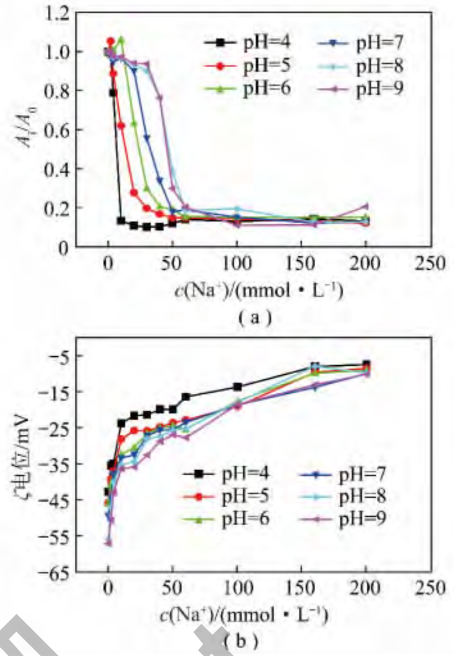

图 3 不同 pH 条件下 Na－煤基胶体悬液的稳定性和 zeta 电位

Fig. 3 Stability and zeta potential of Na-coal-based colloid suspension under different pH conditions

实验结果表明，由于随体系 pH 值升高，胶体表面负电荷量(OH^-) 逐渐增加，煤胶体净表面势能升高，颗粒间的排斥力增加，从而导致胶体颗粒聚集作用减弱[20]，文献[21]研究表明: pH =7.5 和 5 时，复合乳液体系颗粒具有较高的势垒，颗粒很难跨越势垒发生凝聚; 而 pH =4 和 2 时，势垒消失，表明体系发生了凝聚现象，符合 DLVO 理论。Adachi Y 等[22]发现由电荷中和产生的凝聚比压缩双电层产生的凝聚更快。胡俊东等[23]研究表明，若悬液中反电荷离子存在，它们在胶体颗粒间起桥梁作用，从而加速了胶体絮凝团粒的形成，本文研究结果与以上结论相一致。

颗粒表面带电荷量为 0 时的 pH 值是胶体颗粒零电点(PZC) ，PZC 是影响胶体态悬液的稳定性的重要因素。当体系 pH 值等于 PZC 值时，胶体颗粒之间没有静电排斥力，此时，胶体颗粒可以最大程度上相互结合聚集，产生絮凝。而当 pH 值处于非 PZC 值时，胶体颗粒间由于具有同性净电荷而相互排斥，从而保持了胶体悬液稳定，阻止絮凝的发生。因此，胶体悬液的稳定性与系统 pH 值密切相关。

研究发现体系随 pH 值增大，稳定性增大，ζ 电位绝对值增大。一方面，由于 pH 值的增大，体系中负电荷数量增加，与带负电的胶体粒子间的斥力势垒增大，粒子越不容易发生聚集，分散性越强，体系越稳定; 另一方面，当体系 pH 值较小时，将发生电中和，导致胶体粒子迅速聚集，破坏体系稳定性[24]。

2.2　不同电解质作用下煤基胶体悬液稳定性特征

由如图 4(a) 可知,随着 Na^+,Ca^{2+},Al^{3+} 浓度的增加,煤基胶体悬液体系越来越不稳定,其 A_i/A_0 逐渐减小,当所添加的 Na^+ 浓度在 10～60 mmol/L 时,体系 A_i/A_0 值迅速降低,当 Na^+ 浓度达到 60 mmol/L 时,体系的 A_i/A_0 值为 0.198 2,此时认为煤基胶体悬液体系处于不稳定状态,继续增加 Na^+ 浓度,A_i/A_0 值无明显增大或减小的趋势;添加 Ca^{2+} 后,体系 A_i/A_0 值变化情况与添加 Na^+ 相似,Ca^{2+} 浓度在 0.2～1.8 mmol/L 时,体系 A_i/A_0 值降低,在 Ca^{2+} 浓度为 2 mmol/L 时,A_i/A_0 值为 0.183 0,体系处于稳定状态;添加 Al^{3+} 后,浓度在 0.02～0.04 mmol/L 较小的范围内体系是相对稳定状态,当 Al^{3+} 浓度为 0.04 mmol/L 时,体系 A_i/A_0 值为 0.173 6,此时体系处于不稳定状态,继续增加 Al^{3+} 浓度,A_i/A_0 值无明显变化。

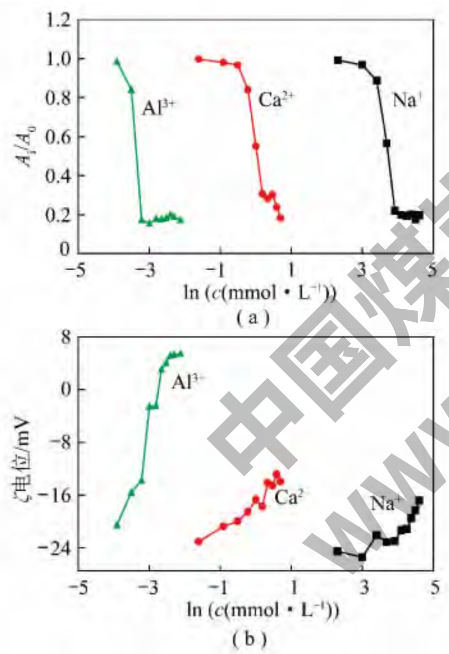

图 4　不同价态阳离子下煤基胶体悬液的稳定性和 zeta 电位

Fig. 4　Stability and zeta potential of coal-based colloid suspension under different valence cations

综上,在实验条件下,分别添加 Na^+,Ca^{2+} 和 Al^{3+} 的体系煤基胶体的 CFC 值分别为 60,2 和 0.04 mmol/L,其比例为 1∶0.03∶0.007,可见以上 3 种价态的阳离子对煤基胶体稳定性的影响差异较大,随阳离子价数的增大,胶体颗粒的聚集能力呈数量级式增大。

由图 4(b) 可知,随着 Na^+,Ca^{2+},Al^{3+} 浓度的增加,体系 ζ 电位逐渐增大,Na^+ 浓度由 0.2 mmol/L 增加到 2 mmol/L,其对应的 ζ 电位由 −37.10 mV 增大到 −16.78 mV;Ca^{2+} 浓度由 0.02 mmol/L 增大到 0.12 mmol/L 时,对应的 ζ 电位由 −24.70 mV 增大到 −13.89 mV;Al^{3+} 浓度由 0.02 mmol/L 增到 0.06 mmol/L 时,ζ 电位由 −23.66 mV 增加到 −2.369 mV,继续增加 Al^{3+} 浓度,ζ 电位由负值转变为正值,并且随着 Al^{3+} 浓度的增大而增大,Al^{3+} 浓度由 0.07 mmol/L 增到 0.12 mmol/L,ζ 电位由 3.14 mV 增大到 5.56 mV。

综上可知,阳离子的价态对煤基胶体的稳定性影响很大,出现这种现象主要是因为煤基胶体表面带有负电荷,当向体系中添加带有正电荷的离子时,会发生电中和,导致胶体粒子扩散双电层被压缩,随着所添加得 Na^+,Ca^{2+} 和 Al^{3+} 价态的增大及其浓度的增大,体系中与煤基胶体所带电荷相反的电荷越多,胶体粒子双电层被压缩越明显,粒子间相互斥力逐渐减小,粒子彼此靠近,当粒子间斥力小于范德华引力,最终在范德华引力作用下使胶体粒子发生聚集[25-26]。

由以上结果可知,体系 ζ 电位绝对值随阳离子价态及浓度的增大而减小,这是由于随着阳离子价态及浓度的增加,胶体粒子间斥力势能垒降低,当该势能垒降到一定程度,粒子间由于范德华引力而相互聚集,使体系稳定性下降。

由图 5(a) 可知,随着 Mg^{2+},Ca^{2+},Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 浓度的增加,体系的 A_i/A_0 降低,Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度小于 0.8 mmol/L 时,体系 A_i/A_0 下降较缓慢,0.8～1.2 mmol/L 时,体系 A_i/A_0 下降迅速,浓度为2 mmol/L 时体系 A_i/A_0 值分别为 0.192 5 和 0.183 0,体系均处于不稳定状态;而 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 作用时,浓度小于 0.8 mmol/L 时体系 A_i/A_0 下降较迅速,Cu^{2+} 浓度为 0.8 mmol/L 时体系 A_i/A_0 值为 0.208 7,处于不稳定状态,Zn^{2+} 浓度为 1.2 mmol/L 时体系 A_i/A_0 值为 0.204 9,处于不稳定状态,添加 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 的体系 A_i/A_0 小于 0.2 后,继续增大添加电解质浓度,体系稳定性无明显变化。由以上现象可知,体系 A_i/A_0 值小于 0.2 时,所需添加二价离子浓度由大到小为:$Mg^{2+}=Ca^{2+}>Zn^{2+}>Cu^{2+}$;添加 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 体系的 CFC 值低于添加 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 体系。

由图 5(b) 可知,随着 Mg^{2+},Ca^{2+},Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 浓度的增大,体系的 ζ 电位增大,离子浓度范围由 0.2 mmol/L 增加到 2 mmol/L,4 个体系 ζ 电位分别由 −23.934,−24.696,−26.420,−26.420 mV 增加到 −13.915,−13.892,−8.004,−10.275 mV;在同一浓度条件下,添加 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 体系的 ζ 电位高于添加 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的体系。

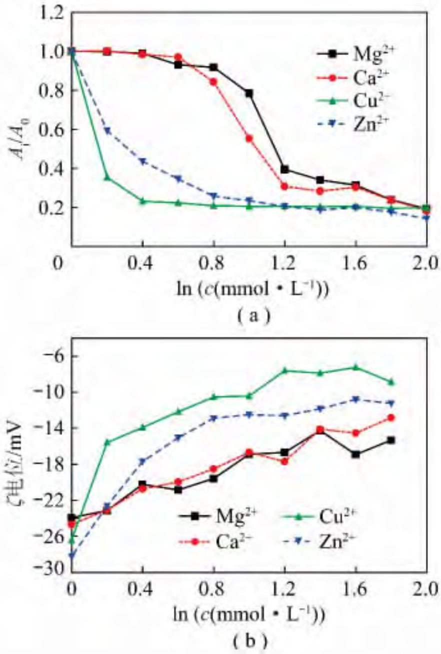

图 5 同价态阳离子下煤基胶体悬液的稳定性和 zeta 电位

Fig. 5 Stability and zeta potential of coal-based colloid suspension under cation with same valence cations

由以上实验结果可知，同种价态的阳离子对体系稳定影响也不尽相同，体系对 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 重金属离子反应更敏感，更易由稳定状态转变成不稳定状态。理论上 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 的离子半径和水合半径相近，对体系稳定性的影响应该相似，但实验结果发现两者对体系的影响存在一定差别，可能是由于 Cu^{2+} 专性吸附所引发的聚集使煤基胶体借助于 Cu^{2+} 的配位吸附而形成以配位键和氢键为主要键合力的更大分子量的超分子聚合体，从而使 Cu^{2+} 在相同浓度下较 Zn^{2+} 更敏感[26]。由实验数据分析，ζ 电位对体系的影响同上。

2.3 不同实验条件下 CFC 值和 ζ 电位的相关性

采用 SPSS Statistics 21 对不同 pH 和电解质条件下的 CFC 值和 ζ 电位值进行相关性分析，结果见表 1。由表 1 可知，不同 pH(4,5,6,7,8,9) 条件下的 CFC 值和 ζ 电位具有显著负相关性，且均达到 0.01 水平；加入 Na^+，Ca^{2+}，Mg^{2+} 和 Al^{3+} 后，体系 CFC 值和 ζ 电位同样具有显著负相关性，且均达 0.01 水平；而加入 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 后，体系 CFC 值和 ζ 电位的相关系数仅为 -0.280 和 -0.553，无显著相关性。

表 1 不同 pH 值和电解质条件下 CFC 和 ζ 电位相关性系数

Table 1 CFC and ζ-potential correlation coefficient under different pH conditions

pH=4	pH=5	pH=6	pH=7	pH=8	pH=9	Na^+	Ca^{2+}	Al^{3+}	Mg^{2+}	Cu^{2+}	Zn^{2+}
-0.796**	-0.867**	-0.866**	-0.879**	-0.822**	-0.801**	-0.899**	-0.909**	-0.857**	-0.943**	-0.280	-0.553

注：**表示在 0.01 水平上显著相关。

由以上结果可知，在不同 pH 值和 Na^+，Ca^{2+}，Mg^{2+}，Al^{3+} 不同价态离子条件下，CFC 值和 ζ 电位值均具显著相关性，因此可用 ζ 电位代替 CFC 表征胶体的稳定性，但是研究体系中 Cu，Zn 等重金属可能影响 ζ 电位表征胶体稳定性的准确性。

3 结 论

(1) pH=4,5,6,7,8,9，电解质浓度为 0～200 mmol/L 时，煤基胶体稳定性随体系 pH 值的增加而提高，随电解质浓度的增加而下降。

(2) 随所添加 Na^+，Ca^{2+}，Al^{3+} 离子价态的增加，煤基胶体稳定性降低；添加同价态阳离子 Ca^{2+}，Mg^{2+}，Zn^{2+}，Cu^{2+} 条件下，煤基胶体体系对重金属 Zn^{2+}，Cu^{2+} 的反应更敏感，更易出现不稳定状态。

(3) 在 pH=4,5,6,7,8,9 条件下，体系 CFC 值和 ζ 电位具有显著负相关性，且均达到 0.01 水平；加入电解质 Na^+，Ca^{2+}，Mg^{2+} 和 Al^{3+} 后，体系 CFC 值和 ζ 电位同样具有显著负相关性，且均达 0.01 水平；而加入电解质 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 后，体系 CFC 值和 ζ 电位无显著相关性。

参考文献：

[1] 刘加勋. 超细煤粉物化特性及其对 O_2/CO_2 分级燃烧 NO_x 排放的影响[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2011.

[2] 徐旭常，陈昌和. 燃煤污染防治与生态优化[A]. 中国工程四次院士大会学术报告论文集[C]. 北京，1995：303-313.
Xu Xuchang，Chen Changhe. Coal pollution control and ecological optimization[A]. Proceedings of the Four Acad-Emicians Conference of Chinese Engineering[C]. Beijing，1995：303-313.

[3] 姜秀民，李巨斌，邱健荣. 超细化煤粉燃烧特性的研究[J]. 中国电机工程学报，2000，20(16)：71-74.
Jiang Xiumin，Li Jubin，Qiu Jianrong. Study on the combu-stion characteristics of ultrafine pulverized coal[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering，2000，20(16)：71-74.

[4] James S C，Chrysikopoulos C V. Transport of polydisperse colloid suspensions in a single fracture[J]. Water Resources Research，1999，35(3)：707-718.

[5] Nunez G A，Briceno M I，Joseph D D，et al. Colloidal coal in water suspensions[J]. Energy & Environmental Science，2010，3：629-640.

[6] Werner S. Chemical interaction in particle separatio-n[J]. Environ-

mental Science & Technology,1977,11(2):1 - 066 - 1070.

[7] Bradford S A,Bettahar M. Straining attachment and detachment of cryptosporidium oocysts in saturated porous media [J]. Environ. Qual.,2005,34(2):469 - 478.

[8] Keller A A,Sirivithayapakorn S,Chrysikopoulos C V. Early breakthrough of colloids and bacteriophage MS_2 in a water-saturated sand column [J]. Scholarship Repository,2004,40:1 - 11.

[9] Warwick P,Allinson S,Beckett K,et al. Sampling and analyses of colloids at the drigg low level radioactive waste disposal site [J]. Journal of Environmental Monitoring,2002,4(2):229 - 234.

[10] 刘庆玲,徐绍辉. 地下环境中胶体促使下的污染物运移研究进展 [J]. 土壤,2005,37(2):129 - 135.
Liu Qingling,Xu Shaohui. Colloil-facilitated transport of contaminants in subsurface environment [J]. Soil,2005,37(2):129 - 135.

[11] 殷宪强. 胶体对铅运移的影响及铅的生物效应 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学,2010.

[12] Barton C D,Karathanasis A D. Influence of soil colloids on the migration of atrazine and zinc through large soil monoliths [J]. Water,Air,& Soil Pollution,2003,143(1):3 - 21.

[13] Citeau L,Lamy I,Oort F,et al. Colloidal facilitated transfer of metals in soils under different land use [J]. Colloids and Surfaces A,2003,217(1 - 3):11 - 19.

[14] Jonge L W,Kjaergaard C,Moldrup P. Colloids and colloid-facilitated transport of contaminants in soils: an introduction [J]. Vadose Zone Journal,2004,3(2):321 - 325.

[15] Lowry G V,Shaw S,Kim C S,et al. Colloid-facilitated Hg transport from New Idria and Sulfur Bank mercury mine Tailings [J]. American Geophysical Union,2001,38(19):5101 - 5011.

[16] Hu Shaoping,Chen Xincai,Shi Jiyan,et al. Particle-facilitated lead and arsenic transport in abandoned mine sites soil influenced by simulated acid rain [J]. Chemosphere,2008,71(11):2091 - 2097.

[17] Zhang Hua,Selim H M. Reaction and transport of Arsenic in soils: Equilibrium and kinetic modeling [J]. Advances in Agronomy,2008,98:45 - 115.

[18] Roy S B,Dzombak D A. Chemical factors influencing colloid-facilitated transport of contaminants in porous media [J]. Environmental Science & Technology,1997,31(3):656 - 664.

[19] 唐　颖,李　航,朱华玲,等. SDBS/Na 对红壤胶体悬液稳定性的影响 [J]. 环境科学,2014,35(4):1540 - 1547.
Tang Ying,Li Hang,Zhu Hualing,et al. Impact of SDBS/Na^+ on red soil colloidal stability [J]. Environmental Science,2014,35(4):1540 - 1547.

[20] 陈宗淇,王光信,徐桂英. 胶体与界面化学 [M]. 北京: 高等教育出版社,2001.

[21] 崔　升,沈晓冬,林本兰. 水基稳定分散的靶向药物用纳米 Fe_3O_4 认的制备 [J]. 精细化工,2006,23(9):855 - 862.
Cui Sheng,Shen Xiaodong,Lin Benlan. Preparation of water based water-based stabilized dispersion of nanon Fe_3O_4 used in target orientation drug [J]. Fine Chemicals,2006,23(9):855 - 862.

[22] Adachi Y,Kogaa S,Kobayashi M,et al. Study of colloidal stability of allophane dispersion by dynamic light scattering [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,2005,265:149 - 154.

[23] 胡俊栋,沈亚婷,王学军. 离子强度、pH 对土壤胶体释放、分配沉积行为的影响 [J]. 生态环境学报,2009,18(2):629 - 637.
Hu Jundong,Shen Yating,Wang Xuejun. The effect of ionic strength and pH conditions on the release,deposition and dispersibility behaviors of natural soil colloid [J]. Ecology and Environment,2009,18(2):629 - 637.

[24] 傅　强,郭　霞,邵　月,等. Cu ~ (2 +) 与 Zn ~ (2 +) 引发胡敏酸胶体凝聚比较研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2013,38(9):50 - 54.
Fu Qiang,Guo Xia,Shao Yue,et al. A comparative study on humic acid colloid aggregation induced by specific adsorption Cu ~ (2 +) and Zn ~ (2 +) [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition),2013,38(9):50 - 54.

[25] Jiang Canlan,Séquaris Jeanmarie,Vereecken Harry,et al. Effects of inorganic and organic anions on the stability of illite and quartz soil colloids in Na - ,Ca - and mixed Na-Ca systems [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,2012,415:134 - 141.

[26] 朱华玲,李　兵,熊海灵,等. 不同电解质体系中土壤胶体凝聚动力学的动态光散射研究 [J]. 物理化学学报,2009,25(6):1225 - 1231.
Zhu Hualing,Li Bin,Xiong Hailing,et al. Dynamic light scattering study on the aggregation kinetics of soil colloidal particles in different electrolyte systems [J]. Journal of Physical Chemistry,2009,25(6):1225 - 1231.