

## 煤泥浮选中矿物颗粒间相互作用力的研究进展

程万里<sup>1</sup>, 邓政斌<sup>1,2</sup>, 刘志红<sup>1</sup>, 童雄<sup>2</sup>

(1. 贵州大学矿业学院, 喀斯特地区优势矿产资源高效利用国家地方联合工程实验室, 非  
金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 2. 省部共建复杂有色金属资源  
清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 煤泥浮选是选煤流程中的一个重要环节, 改善煤泥浮选效果是提高煤炭高效洁净利用和企业经济效益的关键, 煤泥浮选过程的强化越来越受到选煤行业的重视。论文总结了当前煤泥浮选体系中矿物颗粒间相互作用力的最新研究方法和研究进展, 综述了浮选药剂、电解质、矿浆 pH 值、钙镁离子、机械搅拌、磁化处理、电化学处理、超声波处理以及微生物对矿物颗粒间相互作用力的影响规律及机理, 对实现煤泥的高效分选有重要的参考价值。

**关键词:** 浮选; 煤泥; 矿物颗粒; 相互作用力

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.03.008

中图分类号: TD94

文献标志码: A

文章编号: 1000-6532 (2020) 03-0048-07

我国煤炭资源丰富, 在能源消费结构中占主导地位, 其中煤泥含量约占原煤的 10% ~ 30%<sup>[1]</sup>。煤泥中微细粒矿物较多, 主要有高岭石、蒙脱石、绿泥石、石英和方解石等粘土类矿物。由于煤泥存在“细、杂、难”等特点, 其分选问题进一步凸显。浮选是目前应用最广泛、经济、有效的煤泥分选方法, 煤泥中细矿粒的存在加大了浮选的难度<sup>[2]</sup>。

煤泥中矿物颗粒间的相互作用是导致其难选的主要因素之一。当两个细粒矿物相互靠近时, 会受到彼此相互作用力的影响, 导致矿物颗粒间产生凝聚、絮凝、团聚和分散等行为, 最终影响其分选效果。在煤炭加工过程中, 强化煤泥浮选已成为研究的热点。研究者将矿物加工学与胶体

化学、界面化学、流体力学、电化学和微生物学等学科交叉, 从不同的研究视角, 通过各种先进手段对煤泥中细粒矿物颗粒间的相互作用力展开了研究, 使得相关理论得到丰富和完善, 对优化煤泥浮选技术、提高煤泥浮选效果具有重要的理论和实际意义。

## 1 矿物颗粒间相互作用力的研究方法

矿物颗粒间相互作用力的研究一般是基于经典的 DLVO 理论或扩展的 DLVO 理论。在计算时, 一般把矿物颗粒近似地看成球形, 但是实际上矿物颗粒的形状往往是不规则的。因此, 通过计算得到的结果只能代表一种理论值, 并不能认为是实际矿物颗粒间的作用力, 具有一定的缺陷性。

收稿日期: 2019-03-13

基金项目: 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室开放课题基金 (CNMRCUKF1703) 及贵州大学博士基金 (201652) 资助

作者简介: 程万里 (1995-), 男, 研究生, 主要研究方向为矿产综合利用。

通讯作者: 邓政斌 (1986-), 男, 博士, 主要研究方向为浮选理论与矿产综合利用, Tel:18786106156, E-mail:164859319@qq.com。

原子力显微镜 (AFM) 可以直接测量颗粒间的范德华力、静电力和疏水力等, 对研究矿物颗粒的凝聚与分散、浮选界面相互作用以及矿物颗粒间的作用机理提供了新的思路和方法。吴伦<sup>[3]</sup>利用原子力显微镜对在不同 pH 值的溶液和不同浓度的 CaCl<sub>2</sub> 溶液中煤粒之间, 高岭石之间以及煤粒与高岭石之间的静电相互作用力进行了测定, 发现 pH 值和电解质浓度是影响颗粒间相互作用力的重要因素。于跃先<sup>[4]</sup>利用原子力显微镜对蒙脱石与煤粒之间的相互作用力进行了直接测定, 证明煤与蒙脱石之间的相互作用遵从经典的 DLVO 理论。

另外, 随着计算机技术的发展, 分子模拟逐渐成为研究矿物浮选的重要手段。分子动力学模拟从微观角度研究浮选过程, 深入分析矿物表面及界面相互作用。目前, 分子模拟在煤泥浮选中主要是研究水分子和药剂分子 (或离子) 与煤泥中矿物表面的相互作用。杨宗义<sup>[5]</sup>基于量子化学法发现季铵盐阳离子主要是通过静电作用和氢键作用吸附在蒙脱石表面上。韩永华<sup>[6]</sup>通过量子化学方法研究发现, 高岭石的亲水性是由氢键作用引起的, 蒙脱石的亲水性是因为其表面的 Na 原子具有很强的水化能力。彭陈亮<sup>[7]</sup>采用量子力学/分子动力学相结合的方法研究发现, 水分子和疏水改性药剂主要是通过氢键作用和静电作用吸附在蒙脱石表面上, 阳离子主要通过静电作用吸附在蒙脱石表面上。当前的研究对煤泥浮选体系中矿物颗粒之间的相互作用研究鲜有报道, 目前, 计算机分子模拟研究方法较成熟, 利用分子模拟技术研究矿物颗粒间的相互作用力, 可以从分子或原子层面揭示矿物界面的相互作用, 进一步完善矿物浮选理论。

## 2 煤泥浮选中矿粒间相互作用力的研究内容

### 2.1 浮选药剂

浮选药剂能与矿物表面发生反应, 改变矿物表面的润湿性和 Zeta 电位等性质, 使矿物颗粒之间具有不同的聚集和分散行为, 最终导致不同的分选效果。

邹文杰<sup>[8]</sup>研究表明, 煤粒吸附 A 401 后, 颗粒间的静电斥力增大, 疏水引力减小; 煤粒吸附 PAM 后, 煤粒和高岭石颗粒间的静电斥力也会增大, 亲水排斥势能降低, 颗粒间以排斥力为主。陈军<sup>[9]</sup>研究发现阳离子胺/铵盐类疏水改性剂主要通过静电引力作用吸附在煤粒表面上, 弱化煤泥颗粒间的水化斥力, 增强疏水引力; 同时会降低煤粒表面的负电性, 压缩表面双电层结构, 弱化煤粒颗粒间的静电斥力, 使煤粒聚团沉降。徐东方<sup>[10-11]</sup>研究发现, 硅酸钠可以改变煤、高岭石和蒙脱石的表面电位及润湿性, 增强颗粒间静电斥力和水化斥力, 减少高岭石及蒙脱石颗粒在煤粒表面上的吸附。

### 2.2 电解质

电解质离子会与矿粒双电层结构中原有的离子相互作用, 压缩颗粒表面的双电层, 引起颗粒表面 Zeta 电位发生变化, 改变颗粒间的静电作用力; 电解质离子也能薄化煤粒表面的水化膜, 改变其润湿性, 进而会影响到颗粒间的相互作用力。

李国胜<sup>[12]</sup>发现氯化钠会压缩煤粒表面的双电层, 弱化煤粒间的静电斥力, 使煤泥颗粒之间可以在更小的范围内发生碰撞, 有利于煤泥凝聚沉降。余萍<sup>[13]</sup>研究表明, 在不同的无机电解质溶液中, 煤粒对阳离子的吸附会改变其表面的润湿性及 Zeta 电位, 影响煤粒之间的疏水作用力和静电作用力。Harvey PA 等<sup>[14]</sup>研究发现。氯化钠不仅可改变煤粒间的静电作用力, 还会增加煤粒表面电荷的亚微观尺度气泡数量, 影响煤泥的可浮性。Chin<sup>[15]</sup>发现, 氯化钠浓度较低时, 主要改变煤粒表面的润湿性; 在浓度较高时, 会改变煤粒表面 Zeta 电位, 影响颗粒间的静电作用力。

### 2.3 矿浆 pH 值

煤泥中微细颗粒主要为硅酸盐类粘土矿物,而这些矿物表面均含有大量的可以在溶液中产生质子化和去质子化作用的羟基。矿浆溶液 pH 值改变会影响矿物颗粒表面的荷电状态,引起细颗粒表面 Zeta 电位的变化,进而改变二者之间的静电作用力,影响颗粒之间的分散与凝聚。

邹文杰等<sup>[16]</sup>研究表明,随着 pH 值的增大,煤的表面 Zeta 电位的绝对值和静电斥力不断增大,且静电斥力在 pH 值等于 11 时达到最大,此时高岭石与煤颗粒以较稳定的分散状态存在。张志军等<sup>[17]</sup>发现当溶液 pH 值不断减小时,煤与高岭石之间总体上的作用力会由斥力变为引力,且随着 pH 值减小引力逐渐增大。

### 2.4 钙和镁离子

钙和镁离子主要以络合物形态吸附在矿物的 Stern 层内,压缩矿物颗粒表面的双电层结构,降低表面 Zeta 电位值,减弱其负电性,减小矿物颗粒间的静电斥力,使颗粒间更容易发生凝聚。另外,钙和镁离子自身也会水解形成羟基化合物和氢氧化物,吸附或沉淀在矿物表面上,改变颗粒表面的疏水性,弱化矿物颗粒间的疏水力,影响颗粒间的团聚行为。

桂夏辉等<sup>[18]</sup>发现,钙离子浓度较高时,颗粒间的静电斥力会被弱化,使得煤和高岭石颗粒之间有明显的粘附现象。郭德等<sup>[19]</sup>研究表明,钙离子的浓度较小时,对煤泥的浮选效果影响不大;钙离子浓度较大时,会增强煤粒间的静电吸引力,凝聚效果变好,提高了煤泥的可浮性;当钙离子浓度过大时,凝聚效果很差,不利于浮选。刘炯天团队<sup>[20-24]</sup>发现,钙离子主要是通过静电作用力吸附在粘土矿物表面上,影响其可浮性。Liu J 等<sup>[25]</sup>发现,钙离子浓度越高时,颗粒间的斥力越小,颗粒间粘附力不断增强。Xu Z. 等<sup>[26]</sup>研究发现,钙离子浓度会改变煤和粘土颗粒的 Zeta 电位分布,影响二

者之间的静电作用力,改变矿粒分散体系的稳定性。

循环水的水质硬度也是影响煤泥浮选效果的因素之一。张志军<sup>[27]</sup>研究发现,煤颗粒和粘土表面电位受矿浆水质硬度的影响较大,会改变颗粒间的静电作用力,影响其分散及凝聚等行为;随着浓度的增加,颗粒间的静电斥力会不断降低,颗粒间越来越容易发生凝聚;当浓度过大时,颗粒间的静电斥力不再减小,颗粒间作用力变化不大。代小云<sup>[28]</sup>发现,水质硬度的增大会压缩煤粒表面的双电层,降低矿粒表面 Zeta 电位,减小颗粒间的静电斥力;同时煤泥表面的接触角也会不断减小,促使微细颗粒吸附在粗颗粒的表面上。国外许多研究者<sup>[29-32]</sup>也进行类似研究,发现当煤粒表面带负电时,随着水质硬度的增加,煤粒表面的 Zeta 电位不断降低;当煤粒表面带正电时,随着水质硬度的增加,煤粒表面的 Zeta 电位变化较小。

### 2.5 机械搅拌

对于疏水性较弱悬浮颗粒,只有当颗粒间的距离很短时才会产生疏水引力。因此,需要提供外加动能来克服势能垒,使细颗粒发生疏水絮团。机械搅拌可以给颗粒提供足够的动能来克服颗粒间的疏水作用势能,增大颗粒之间的碰撞几率,使颗粒相互接近并发生聚团。

李延锋<sup>[33]</sup>发现,机械搅拌能清除粗煤粒表面上的部分细泥罩盖层,增强煤粒间的疏水引力,提高煤泥可浮性。桂夏辉<sup>[34-35]</sup>等发现,机械搅拌提高了煤粒的表面疏水性,并使得蒙脱石和煤颗粒间的脱附力大于粘附力,提高了煤表面的疏水力,增大了煤和脉石矿物表面性质的差异,有利于煤和蒙脱石的分离。

### 2.6 磁化处理

磁化处理是对处于磁场中的非铁磁性物质作用,使其物理化学性质等发生变化的一种物理调节技术<sup>[36]</sup>。磁场中矿物颗粒双电层中离子受到洛伦兹力的作用而发生了改变,从而影响了矿物颗

粒的 Zeta 电位等,最终影响到了矿物颗粒间的静电作用力<sup>[37]</sup>。

边炳鑫等<sup>[38]</sup>研究表明,磁化后轻柴油与煤粒间的相互作用增强,提高了煤的可浮性,增强了煤与煤矸石、黄铁矿之间润湿性的差异。李建军等<sup>[39]</sup>研究发现,磁化处理会降低煤泥颗粒间的静电斥力,有利于煤泥水自然沉降及絮凝沉降。熊彦权<sup>[40]</sup>等发现,煤泥磁化处理后,煤的表面电位降低,煤矸石和黄铁矿的表面电位变高,增大了二者之间的静电作用力;同时,磁化处理改变了颗粒间的疏水力,加大了煤与煤矸石、黄铁矿之间润湿性的差异。薛玺罡<sup>[41]</sup>发现,外加磁场可以增加微细粒矿物的动能,降低微细颗粒表面的电荷量,从而减小颗粒间的静电斥力,增大颗粒间的碰撞几率,实现煤泥的有效分选。

## 2.7 电化学处理

煤泥中大多数矿物颗粒表面带有一定的负电荷,表面 Zeta 电位绝对值较高,颗粒间的静电斥力越大,稳定性较好。电化学处理使得大分子颗粒荷正电,并吸附在煤泥颗粒表面上,降低颗粒间的静电斥力,实现煤泥颗粒絮凝沉降,有利于煤泥的浮选分离。

董宪姝等<sup>[42-44]</sup>发现,通过电化学预处理,压缩煤泥颗粒表面双电层结构,降低颗粒表面的负电性,弱化甚至消除煤泥颗粒间的静电斥力,有利于煤泥聚集沉降。杨玉芬等<sup>[45]</sup>研究发现,电化学处理改变了煤和黄铁矿表面的性能,在黄铁矿表面生成亲水性的物质;而煤表面上的含氧官能团减少,双电层被压缩,负电性降低,疏水性增强。陈洪砚<sup>[46]</sup>等发现,带负电荷的煤泥颗粒在电场力作用下会向阳极发生定向移动,在阳极板上失去电子,降低了煤泥粒间的静电斥力,有利于煤泥形成絮团。Tao DP<sup>[47]</sup>发现,电化学可改变煤泥颗粒表面氧化还原电位及双电层结构,增强煤粒表

面疏水性,降低表面负电性,弱化颗粒间的静电作用力,提高煤的可浮性。

## 2.8 超声波处理

超声波对煤粒具有侵蚀作用,其产生的冲击波和微射流会使煤表面产生缺陷;超声波也能使煤粒表面脉石矿物脱落,增强煤泥的疏水性,降低药剂耗用量,提高浮选效果。

荀海鑫<sup>[48]</sup>研究表明,超声处理后煤与水的润湿热减小,疏水性增强,可减少药剂消耗耗,有利于煤泥浮选。康文泽等<sup>[49-52]</sup>研究发现,超声波处理后煤的表面负电性增大,疏水性增强,降低浮选药剂的消耗。李政勇<sup>[53]</sup>发现,超声波可以使煤粒表面的细小颗粒脱落,有利于煤粒与粘土矿物的有效分离,降低煤表面的亲水性。

## 2.9 微生物处理

微生物选矿投资少、成本低,且对环境的影响小,现在越来越受到重视。微生物主要通过微生物大分子中的活性基团与颗粒表面相应基团发生化学反应,改变其物理化学性质;同时也会中和颗粒表面一部分负电荷,减小颗粒间静电斥力,使得颗粒间更容易发生碰撞,从而实现颗粒的聚集沉降。

陈瑜<sup>[54]</sup>考察了煤源细菌 FML 对矸石矿物和尾煤间的静电作用力影响,FML 可以提高煤粒表面的疏水性,其中静电引力在微生物对矿物的吸附和表面改性中起主导作用。吴学风等<sup>[55]</sup>研究指出,酱油曲霉在生长过程中会代谢出一种酸性物质,导致培养液 pH 值继续降低,减少煤粒表面的电荷,改变煤泥颗粒间的静电力。张东晨等<sup>[56]</sup>发现,球红假单胞菌主要通过生物大分子之间的“吸附架桥”与煤泥颗粒表面作用,改变煤泥颗粒表面双电层结构,影响颗粒间的静电斥力。王立艳<sup>[57]</sup>研究发现,胶红酵母菌 KDY 21 主要是通过静电作用力和疏水作用力吸附在煤粒表面上,而改变细粒煤的表面电位和润湿性,促使煤泥颗粒凝聚沉降。

### 3 结论及展望

(1) 综合所述可知, 目前对煤泥中矿物颗粒间相互作用力的研究中, 主要是从其中微细颗粒荷电这一特性出发, 从宏观角度探究了各因素对颗粒表面双电层的改变及对静电相互作用力的影响, 而对矿物颗粒表面的水化力和疏水力等作用力研究较少, 因此急需对此进行更全面和更深入的研究。

(2) 磁化处理、电化学处理、超声波处理和微生物处理可以明显改善煤泥浮选效果, 近年来在煤泥浮选领域得到广泛的探索与应用, 为优化煤泥浮选技术、改善煤泥浮选效果提供了新思路。

(3) 矿物颗粒间相互作用力的研究方法较单一, 主要是基于经典或扩展的 DLVO 理论计算和利用原子力显微镜 (AFM) 检测。目前, 计算机分子模拟研究方法较成熟, 可作为新的手段用于微细粒煤泥高效浮选体系中矿物颗粒间相互作用研究。

(4) 矿物颗粒间的相互作用力受许多因素的影响, 目前人们对矿浆中颗粒间的相互作用力进行了许多研究, 但目前的研究仍未达到指导生产的水平, 因此还需进行更加深入的研究, 并将理论研究与实际生产进行紧密的衔接。

### 参考文献:

- [1] 黄波. 煤泥浮选技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.  
Huang B. Coal Slurry Flotation Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [2] 谢广元. 选矿学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2016.  
Xie G Y. Mineral Processing [M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2016.
- [3] 吴伦. 基于原子力显微镜的煤粒表面水化膜和颗粒间相互作用力研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.  
Wu L. Study on hydration film on coal surface and interaction force between particles based on AFM [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2015.
- [4] 于跃先. 煤泥浮选颗粒间相互作用及对浮选影响研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.  
Yu Y X. The study on interparticle interaction and the effect on coal flotation [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2018.
- [5] 杨宗义. 煤泥水体系中抑制蒙脱石膨胀分散的量子化学研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.  
Yang Z Y. Quantum chemistry study on inhibiting the expansion and dissolution of montmorillonite in slime water system [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2018.
- [6] 韩永华. 高岭石、蒙脱石表面性质及其分散机理的量子化学研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2017.  
Han Y H. Quantum chemistry study on the surface properties and dispersion mechanism of kaolinite and montmorillonite [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2017.
- [7] 彭陈亮. 蒙脱石界面水化及疏水调控机理的量子力学 / 分子动力学研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.  
Peng C L. Quantum mechanics / molecular dynamics study on the mechanism of montmorillonite interface hydration and hydrophobic regulation [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016.
- [8] 邹文杰. 炼焦中煤选择性絮凝—浮选分离研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.  
Zou W J. Study on selective flocculation flotation separation of coal in coking [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2014.
- [9] 陈军. 高泥化煤泥水中微细颗粒疏水聚团特性及机理研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.  
Chen J. Study on hydrophobic agglomeration characteristics and mechanism of fine particles in high slime water [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [10] 徐东方, 朱书全, 朱志波, 等. 硅酸钠对煤和高岭石浮选行为的影响 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 201-205.  
Xu D F, Zhu S Q, Zhu Z B, et al. Effects of sodium silicate on flotation behavior of coal and kaolinite [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44 (7): 201-205.
- [11] 徐东方, 武昊, 朱志波, 等. 蒙脱石与煤的异相凝聚机理 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(5): 1284-1289.  
Xu D F, Wu H, Zhu Z B, et al. Mechanism of hetero-aggregation of montmorillonite and coal [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42 (5): 1284-1289.
- [12] 李国胜, 邓丽君, 曹亦俊, 等. 氯化钠对煤泥浮选的影响及作用机理 [J]. 中国矿业大学学报 2016, 45(5): 1038-1042.  
Li G S, Deng L J, Cao Y J, et al. Effect and mechanism of sodium

chloride on slime flotation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45 (5): 1038-1042.

[13] 余萍. 不同无机电解质对煤浮选的影响及溶液化学研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2010.

Yu P. Effect of different inorganic electrolytes on coal flotation and solution chemistry [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2010.

[14] Harvey PA, Nguyen AV, Evans GM. Influence of electrical double-layer interaction on coal flotation[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2002, 250(2): 337-43.

[15] Chin Li, P. Somasundaran. Role of electrical double layer forces and hydrophobicity in coal flotation in NaCl solution[J]. Energy and Fuels, 1993, 7(2): 244-248.

[16] 邹文杰, 曹亦俊, 孙春宝, 等. 煤泥选择性絮凝浮选中颗粒间相互作用研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(6): 1061-1067.

Zou W J, Cao Y J, Sun Chunbao, et al. Study on the interaction between particles in slime selective flocculation and flotation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44 (6): 1061-1067.

[17] 张志军. 水质调控的煤泥水澄清和煤泥浮选研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2012.

Zhang Z J. Study on slime water clarification and slime flotation for water quality control [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.

[18] 桂夏辉, 邢耀文, 李臣威, 等. 煤泥浮选过程中黏土矿物罩盖及其行为调控 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 175-181.

Gui X H, Xing Y W, Li Chenwei, et al. Clay mineral cover and its behavior regulation in slime flotation[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44 (6): 175-181.

[19] 郭德, 张秀梅, 吴大为. 对  $\text{Ca}^{2+}$  影响煤泥浮选和凝聚作用机理的认识 [J]. 煤炭学报, 2003(4): 433-436.

Guo D, Zhang X M, Wu D W. Understanding of the mechanism of  $\text{Ca}^{2+}$  affecting slime flotation and agglomeration[J]. Journal of China Coal Society, 2003 (4): 433-436.

[20] 张明青, 刘炯天, 王永田. 水质硬度对煤泥水中煤和高岭石颗粒分散行为的影响 [J]. 煤炭学报, 2008(9): 1058-1062.

Zhang M Q, Liu J T, Wang Y T. Effect of water hardness on dispersion behavior of coal and kaolinite particles in slime water[J]. Journal of China Coal Society, 2008 (9): 1058-1062.

[21] 刘炯天, 张明青, 曾艳. 不同类型黏土对煤泥水中颗粒分散行为的影响 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 59-63.

Liu J T, Zhang M Q, Zeng Y. Effect of different types of clay on

particle dispersion behavior in slime water[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39 (1): 59-63.

[22] 冯莉, 刘炯天, 张明青, 等. 煤泥水沉降特性的影响因素分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(5): 671-675.

Feng L, Liu J T, Zhang M Q, et al. Analysis of factors influencing the subsidence characteristics of slime water[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39 (5): 671-675.

[23] 张明青, 刘炯天, 李小兵. 煤泥水中黏土颗粒对钙离子的吸附试验研究及机理探讨 [J]. 中国矿业大学学报, 2004(5): 57-61.

Zhang M Q, Liu J T, Li X B. Experimental study and mechanism discussion on adsorption of clay particles on calcium ion in slime water[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004 (5): 57-61.

[24] 张明青, 刘炯天, 单爱琴, 等. 煤泥水中  $\text{Ca}^{2+}$  在黏土矿物表面的作用 [J]. 煤炭学报, 2005(5): 95-99.

Zhang M Q, Liu J T, Shan A Q, et al. The role of  $\text{Ca}^{2+}$  in slime water on the surface of clay minerals[J]. Journal of China Coal Society, 2005 (5): 95-99.

[25] Liu J, Xu Z, Masliyah J. Colloidal forces between bitumen surfaces in aqueous solutions measured with atomic force microscope[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005, 260(1): 217-228.

[26] Xu Z, Liu J, Choung JW, et al. Electrokinetic study of clay interactions with coal in flotation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 68(1): 183-196.

[27] 张志军, 刘炯天, 邹文杰, 等. 水质硬度对煤泥浮选的影响 [J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(4): 612-615.

Zhang Z J, Liu J T, Zou W J, et al. Effect of water hardness on slime flotation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40 (4): 612-615.

[28] 代小云, 张文军, 罗顺发, 等. 浮选水质硬度对煤泥润湿性及电动电位的影响 [J]. 煤炭工程, 2016, 48(9): 137-141.

Dai X Y, Zhang W J, Luo S F, et al. Effect of hardness of flotation water on wettability and electromotive potential of slime[J]. Coal Engineering, 2016, 48 (9): 137-141.

[29] Xu Z, Liu J, Choung JW, et al. Electrokinetic study of clay interactions with coal in flotation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 68 (1/4): 183-196.

[30] Ding X, Repka C, Xu Z, et al. Effect of illite clay and divalent cations on bitumen recovery[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2006(84): 643-650.

[31] Liu J, Zhou Z, Xu Z, et al. Bitumen--clay interactions

in aqueous media studied by Zeta potential distribution measurement[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2002, 252(2): 409-418.

[32] Basu S, Nandakumar K, Lawrence S, et al. Effect of calcium ion and montmorillonite clay on bitumen displacement by water on a glass surface[J]. Fuel, 2004, 83(1): 17-22.

[33] 李延锋, 张晓博, 桂夏辉, 等. 煤泥浮选过程能量输入优化 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1378-1384.

Li Y F, Zhang X B, Gui X H, et al. Optimization of energy input in slime flotation process[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37 (8): 1378-1384.

[34] 桂夏辉, 黄根, 袁闯, 等. 两段强制搅拌调浆的混合特性及对煤泥浮选的影响 [J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(4): 423-431.

Gui X H, Huang G, Yuan C, et al. Mixing characteristics of two-stage forced mixing and its influence on slime flotation[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35 (4): 423-431.

[35] 桂夏辉, 刘炯天, 程敢, 等. 能量输入对煤泥浮选过程的影响 [J]. 中南大学学报, 自然科学版, 2012, 43(6): 2075-2083.

Gui X H, Liu J T, Cheng G, et al. Effect of energy input on slime flotation process[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43 (6): 2075-2083.

[36] Amiri MC, Dadkhah AA. On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment[J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2006, 14(1): 252-255.

[37] Lipus L C, Kroppe J, Crepinsek L. Dispersion destabilization in magnetic water treatment[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2001, 236(1).

[38] 边炳鑫, 陈清如, 韦鲁滨. 浮选矿浆的磁化处理效应和机理研究 [J]. 煤炭学报, 2004(1): 97-100.

Bian B X, Chen Q R, Wei L B. Study on magnetization effect and mechanism of flotation pulp[J]. Journal of China Coal Society, 2004 (1): 97-100.

[39] 李建军, 乔尚元, 朱金波, 等. 煤泥水磁化改性及磁化-絮凝沉降研究 [J]. 洁净煤技术, 2015, 21(4): 1-4+11.

Li J J, Qiao S Y, Zhu J B, et al. Study on magnetization modification and magnetization flocculation settlement of slime water[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21 (4): 1-4+11.

[40] 熊彦权, 张希梅, 胡炳双. 煤泥磁化浮选机理的研究 [J]. 应用能源技术, 2004 (4): 12-14.

Xiong Y Q, Zhang X M, Hu B S. Study on mechanism of

magnetization flotation of slime[J]. Applied Energy Technology, 2004 (4): 12-14.

[41] 薛玺罡, 刘戥, 赵寒雪, 等. 磁处理技术在煤泥水处理中的应用 [J]. 煤炭技术, 2000 (3): 30-32.

Xue X, Liu Y, Zhao H X, et al. Application of magnetic treatment technology in slime water treatment[J]. Coal Technology, 2000 (3): 30-32.

[42] 董宪姝, 姚素玲, 刘爱荣, 等. 电化学处理煤泥水沉降特性的研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(5): 753-757.

Dong X S, Yao S L, Liu A R, et al. Study on the settling characteristics of coal slurry treated by electrochemistry[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39 (5): 753-757.

[43] 董宪姝, 孙玲, 孙冬, 等. 电解处理难沉降煤泥水较佳工艺条件的研究 [J]. 选煤技术, 2010(5): 5-8+5.

Dong X S, Sun L, Sun D, et al. Study on the best technological conditions of electrolytic treatment of difficult to settle slime water[J]. Coal Preparation Technology, 2010 (5): 5-8+5.

[44] 董宪姝, 姚素玲, 张凌云. 电化学絮凝的应用与发展 [J]. 选煤技术, 2008(4): 132-135.

Dong X S, Yao S L, Zhang L Y. Application and development of electrochemical flocculation[J]. Coal preparation technology, 2008 (4): 132-135.

[45] 杨玉芬, 朱红, 陈清如. 电化学法强化高硫煤浮选脱硫试验研究 [J]. 煤炭转化, 2003(2): 60-63.

Yang Y F, Zhu H, Chen Q R. Experimental study on electrochemical desulfurization of high sulfur coal flotation[J]. Coal Conversion, 2003 (2): 60-63.

[46] 陈洪祺, 李铁庆, 李敬峰. 电絮凝法处理煤泥水的研究 [J]. 环境保护科学, 1992(1): 43-46, 27.

Chen H Y, Li T Q, Li J F. Study on the treatment of slime water by electrocoagulation[J]. Environmental Protection Science, 1992 (1): 43-46, 27.

[47] Tao D P, Richardson PE, Luttrell GH. Electrochemical investigation of surface reaction of coal- and mineral-pyrite in aqueous solutions[C]. In: Proceedings of the 5th International Conference on Processing and Utilization of High-sulfur Coals, Oct, 1993. 219.

[48] 荀海鑫. 超声强化稀缺难浮煤泥浮选研究 [D]. 哈尔滨: 黑龙江科技学院, 2009.

Xun H X. Study on ultrasonic enhanced flotation of rare and difficult to float slime [D]. Harbin: Heilongjiang University of Science and Technology, 2009.

[49] 康文泽, 荀海鑫, 李明明. 超声波预处理对稀缺难浮煤

浮选的作用[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 625-630.

Kang W Z, Xun H X, Li M M. Effect of ultrasonic pretreatment on flotation of rare and difficult floating coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42 (4): 625-630.

[50] 康文泽, 胡军. 物理调节法对矿物浮选的影响[J]. 洁净煤技术, 2004(4): 21-23.

Kang W Z, Hu J. Effect of physical regulation on mineral flotation[J]. Clean Coal Technology, 2004 (4): 21-23.

[51] 康文泽, 王慧, 胡军. 超声处理煤泥与浮选药剂的作用研究[J]. 煤炭学报, 2006(6): 804-807.

Kang W Z, Wang H, Hu J. Study on the effect of ultrasonic treatment of slime and flotation agent[J]. Journal of China Coal Society, 2006 (6): 804-807.

[52] 康文泽, 吕玉庭. 超声波处理对煤泥特性的影响研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006(6): 783-786, 798.

Kang W Z, LV Y T. Study on the influence of ultrasonic treatment on the characteristics of slime[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006 (6): 783-786+798.

[53] 李政勇, 余悦发. 超声波处理对高灰氧化炼焦煤泥浮选的影响[J]. 煤炭技术, 2017, 36(12): 288-291.

Li Z Y, Yu Y F. Effect of ultrasonic treatment on flotation of high

ash oxidation coking slime[J]. Coal Technology, 2017, 36 (12): 288-291.

[54] 陈瑜. 微生物对煤的表面改性作用及浮选应用[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.

Chen Y. Surface modification of coal by microorganisms and its flotation application [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2014.

[55] 吴学凤, 张东晨, 姜绍通. 酱油曲霉絮凝煤泥水的试验研究[J]. 煤炭学报, 2007(4): 433-436.

Wu X F, Zhang D C, Jiang S T. Experimental study on flocculation of slime water by aspergillus sauce[J]. Journal of China Coal Society, 2007 (4): 433-436.

[56] 张东晨, 闫佳. 球红假单胞菌作为煤炭微生物絮凝剂的试验研究[J]. 选煤技术, 2014(04): 14-18.

Zhang D C, Yan J. Experimental study on pseudomonas globosa as a microbial flocculant for coal[J]. Coal Preparation Technology, 2014 (4): 14-18.

[57] 王立艳. 褐煤中微生物筛选及胶红酵母对细粒煤的表面改性作用[D]. 北京: 中国矿业大学, 2012.

Wang L Y. Microbial screening in lignite and the surface modification effect of rhodotorula gelatinis on fine coal [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2012.

## Research Progress in Interaction Force between Mineral Particles in Coal Slurry Flotation

Cheng Wanli<sup>1</sup>, Deng Zhengbin<sup>1,2</sup>, Liu Zhihong<sup>1</sup>, Tong Xiong<sup>2</sup>

(1. Mining College, Guizhou University, National & Local Joint Laboratory of Engineering for Effective Utilization of Regional Mineral Resources from Karst Areas, Guizhou Key Lab of Comprehensive Utilization of Non-metallic Mineral Resource, Guiyang Guizhou, China; 2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming, Yunnan, China)

**Abstract:** Coal slurry flotation is an important link in coal preparation process. Improving the effect of slurry flotation is the key to improve the efficient and clean utilization of coal and the economic benefits of enterprises. Strengthening the process of slurry flotation has attracted more and more attention of coal preparation industry. This paper summarizes the latest research methods and progress in the interaction between mineral particles in slime flotation system and summarizes the influencing rules and mechanisms of flotation reagents, electrolytes, slurry pH value, calcium and magnesium ions, mechanical stirring, magnetization, electrochemical treatment, ultrasonication and, microorganisms on the interaction force between mineral particles, which has important reference value for realizing the efficient separation of slime.

**Keywords:** Flotation; Coal slime; Mineral particles; Interaction force