



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20160337

改性蛭石无机矿物絮凝剂的性能研究

王 昶, 刘 芳, 胡文红, 李 丽, 赵瑞华
(天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘要: 以无机矿物材料蛭石为原料,通过酸改性制备蛭石絮凝剂,用此絮凝剂处理模拟废水、校园湖水以及食品厂生化废水,并与聚合氯化铝(PAC)絮凝剂的絮凝效果进行对比.由实验结果可知:酸改性的蛭石絮凝剂与PAC絮凝剂具有几乎相同的絮凝效果,浊度去除率可达98%以上,而在絮体的沉降性能上远优于PAC;蛭石絮凝剂中的可溶性盐和颗粒物因其电中和及范德华引力的协同效应,显示出较好的沉降性能和压缩性能,絮体达到沉降平衡后,其体积只有PAC的1/3;蛭石絮凝剂与PAC絮凝剂复配,可有效地减少絮体体积,提高絮体沉降性能.

关键词: 矿物材料;絮凝剂;蛭石;PAC

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2018)02-0049-05

The Performance of Modified Vermiculite Flocculant

WANG Chang, LIU Fang, HU Wenhong, LI Li, ZHAO Ruihua

(College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Inorganic mineral vermiculite was used as raw material for preparing flocculant via acid modification and its flocculation property was investigated in treating simulated wastewater, campus lake water and food biochemical wastewater. Poly aluminium chloride (PAC) was used for comparison. The experimental results show that the modified vermiculite's flocculation performance is similar to PAC's. Modified vermiculite could reach more than 98% turbidity removal and is better than PAC in terms of flocs' sedimentation properties. Due to the synergistic effect of charge neutralization and van der Waals force of the modified vermiculite's soluble salts and insoluble particles with suspensions in wastewater, the modified vermiculite shows a better sedimentation performance and compressive properties, i. e., the volume of equilibrated flocs is only one-third of PAC's. The compound of the modified vermiculite and PAC could effectively reduce the volume of the flocs and improve the flocs' sedimentation performance.

Key words: mineral material; flocculant; vermiculite; PAC

当前世界水污染问题日趋严重,对水处理技术的应用需求也日益增大^[1],其中絮凝沉淀法^[2-3]是水处理应用中较为广泛的方法,具有经济高效、工艺简单、操作方便等优点,广泛应用于海水淡化、饮用水处理、养殖废水处理、发酵废水处理、食品加工和土木疏浚工程等领域.目前絮凝剂的种类繁多,从无机类型到有机类型,从低分子到高分子,从单一型到复合型,其趋势是向廉价实用、无毒高效的方向发展,所以开发无毒害、价廉质优的絮凝剂是目前水处理技术的发展方向.

近年来,国内对矿物材料在水处理方面的研究大多是改性后用作吸附剂,或者直接与无机高分子絮凝剂配合使用.例如,彭晓丽等^[4]将天然火山灰矿物材料经盐酸溶液改性后,可有效吸附去除水中磷污染物,磷去除率为92.02%.付军等^[5]通过在聚铝絮凝剂中添加海泡石、高岭土、滑石等对负电位较高的铜绿微囊藻进行处理,结果表明由于矿物材料正电荷明显提高了聚铝的电中和能力,添加了矿物材料后絮体在沉降过程中效果较好,有明显的助凝作用.本研究利用天然无机矿物材料经改性后直接用作絮凝剂,

收稿日期:2016-10-18;修回日期:2016-12-05

基金项目:天津市科委重大专项([2014]14ZCDGNC00097);天津市农委重大专项合作项目([2014]201404140)

作者简介:王 昶(1958—),男,江苏人,教授, wangc88@163.com

此絮凝剂具有高效价廉、无毒无害、对环境友好等优势。

目前使用较广泛的絮凝剂为聚合氯化铝(PAC),因其具有絮体松散、易上浮、沉降性能差、在水体中有一定的残留等缺点^[6],仍然需要改进。矿泉水清澈透明,与一般的河水相比,矿泉水含有矿物材料溶解的金属离子,这些金属离子对水体具有很好的净化作用^[7]。含有大量胶体的河水通过沙石层或含有矿物材料的土壤径流时,由于矿物材料金属离子的溶入而中和河水中带有负电荷的胶粒,使胶体脱稳、絮凝、沉淀和吸附。利用矿物材料这一特点^[8],可通过化学处理方法制取天然的无机矿物絮凝剂。

本研究以天然矿物材料蛭石为原料,用酸处理改性,得到粉体状的矿物材料絮凝剂。用其处理模拟胶体溶液,并与常用 PAC 絮凝剂进行对比,探讨自制絮凝剂、絮凝剂中可溶性盐以及颗粒物对水样浊度的去除率、Zeta 电位变化以及沉降速率的影响;进而对实际的食品厂生化废水以及校园内湖水进行实验,同时与 PAC 进行复配,考察自制无机矿物材料絮凝剂的絮凝效果和沉降效果,为今后的实际应用提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 仪器设备

JJ-4 型六联同步混凝搅拌器,金坛市城西瑞昌实验仪器厂;FM80 型高速万能粉碎、FM100 型高速万能粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;Turb 430 IR 型便携式浊度仪、pH3210 型精密酸度计、Cond 3210 型手提式电导率测试仪,德国 WTW 公司;Nano ZS90 型纳米粒径电位分析仪,美国马尔文仪器有限公司。

1.2 絮凝剂制备

关于用酸制备蛭石无机矿物材料絮凝剂的方法请参考文献^[9]。由于自制的絮凝剂基本是由可溶性盐和固体颗粒所构成,为了深入考察絮凝剂可溶性盐和固体颗粒的絮凝效果,通过如下方法进行分离:分别取 10 g 蛭石原料置于 5 个 250 mL 烧杯中,用质量分数分别为 15%、20%、25%、30%、35% 的硫酸对其进行改性,加入 200 mL 超纯水,搅拌,使絮凝剂中的可溶盐充分溶出。用布氏漏斗进行分离,反复用超纯水洗涤颗粒物,防止滤饼中残留可溶性盐。分离后的固体颗粒置于表面皿上,放入烘箱在 95 °C 干燥 2 h,

然后升温至 105 °C 烘干,直至质量恒定,称量待用。分离后的液体置于烧杯中,放入烘箱在 95 °C 下除去水分,然后再升温至 105 °C 烘干,直至质量恒定,称量待用。

1.3 絮凝效果评价

取若干份水样(以牛奶配制而成的具有发酵行业废水特点的模拟废水)于 500 mL 烧杯中进行实验,投加絮凝剂后 200 r/min 快速搅拌 3 min,40 r/min 慢速搅拌 15 min,静置 30 min,然后对水样上清液进行浊度等参数的测定。

2 结果与讨论

2.1 蛭石絮凝剂与 PAC 对模拟废水处理效果的比较

2.1.1 浊度

实验所使用的模拟废水是以牛奶配制而成的,具有发酵行业废水的特点^[10],其浊度为 211 NTU 左右。取 500 mL 模拟废水置于烧杯中,在六联同步混凝搅拌器上进行絮凝实验,分别考察 PAC、蛭石原料及蛭石絮凝剂的投加量对水相浊度的影响,实验结果如图 1 所示。

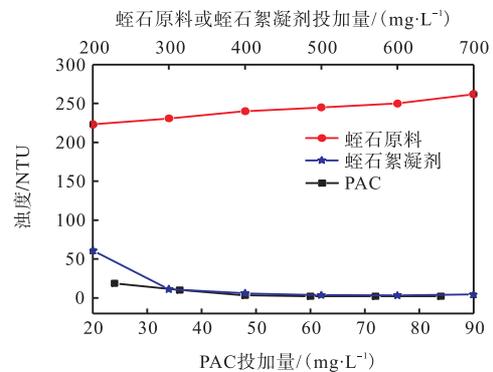


图 1 絮凝剂投加量对模拟废水浊度的影响

Fig. 1 Effect of flocculants' dosage on turbidity removal in simulated wastewater

由图 1 可知:未经酸改性的天然蛭石不但不能降低水相的浊度,反而浊度随着投加量的增加而增加,这可能是由于未经改性的蛭石即使粉碎成粉体,进入水相后释放出更多的胶体,类似于下雨后地表径流的混浊水进入水体。而经改性后的蛭石絮凝剂和 PAC 对水相的浊度却有着十分明显的去除效果,随着投加量的增加,两者都可以使模拟废水的浊度从 211 NTU 下降至 2~4 NTU,水相变得清澈透明,这就很好地说明虽然改性后的蛭石絮凝剂投加量要比 PAC 投加量多,但蛭石絮凝剂具有与 PAC 同等的去除效

果. 在该实验条件下, 蛭石絮凝剂的投加量为 600 mg/L 时, 余浊为 3.21 NTU, 浊度去除率为 98.47%, 再增加用量, 浊度略有上升; PAC 的投加量为 60 mg/L, 余浊为 2.23 NTU, 浊度去除率为 98.94%, 再增加用量, 悬浮的絮体增加. 从浊度的实验还可以知道, 无机矿物材料絮凝剂的操作范围广、絮体稳定、沉降快.

2.1.2 Zeta 电位

为了探明絮凝机理, 对上述实验水相取样, 使用 Zeta 电位分析仪对其分析, 考察在不同投加量下, 水中 Zeta 电位的变化情况, 其结果如图 2 所示.

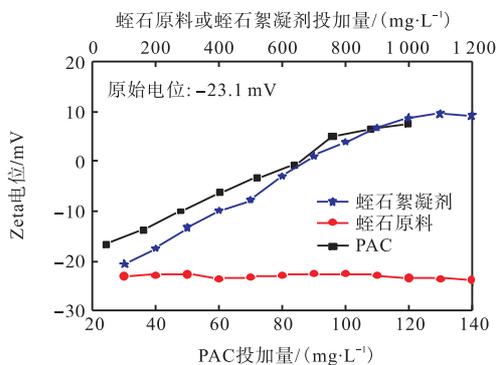


图 2 絮凝剂投加量对模拟废水 Zeta 电位的影响

Fig. 2 Effect of flocculants' dosage on Zeta potential in simulated wastewater

图 2 中实验条件与图 1 相同, 由图 2 可知, 随着未经酸改性的天然蛭石的添加, 水相中的 Zeta 电位反而略有降低. 从实验的结果也可以看到, 未被酸处理过的天然蛭石对模拟废水不产生絮凝作用, 投加的极小微粒在水相中不易沉降, 而且其中部分微粒也会形成一定量的胶体, 使水体反而更加混浊, 从表观上佐证其 Zeta 电位的降低. 而经改性后的蛭石絮凝剂和 PAC 对水相 Zeta 电位的变化与未经改性的蛭石完全不同, 随着蛭石絮凝剂和 PAC 投加量的增加, Zeta 电位逐步增加, 由负值穿过零逐步升为正值, 相比之下, 投加蛭石絮凝剂上升的速度要比投加 PAC 的快, 这说明蛭石絮凝剂的电中和效果要比 PAC 更好一些. 这可能是因为 PAC 是聚合物, 只存在部分的离子态物质, 往往主要是以吸附和网状结构形式存在^[11], 而蛭石絮凝剂主要是可溶性盐和固体颗粒物构成的, 可溶性盐在水相中以离子态存在, 由于它能与胶体有效地发生电中和作用的缘故, 脱稳后的粒子相互之间、粒子与絮凝剂的颗粒之间依靠范德华力形成矾花絮体. 该絮体与 PAC 絮体的差异还需要进行深入研究.

2.1.3 模拟废水絮体沉降性能

在蛭石絮凝剂和 PAC 的投加量分别为 600 mg/L 和 60 mg/L 的条件下, 絮体沉降 30 min 后的效果如图 3 所示. 由图 3 可知: 蛭石絮凝剂处理后的絮体结构紧实、体积小、不易上浮, 水相中几乎没有悬浮絮体; 相反 PAC 产生的絮体结构松散、易上浮, 存在很多小的悬浮絮体.

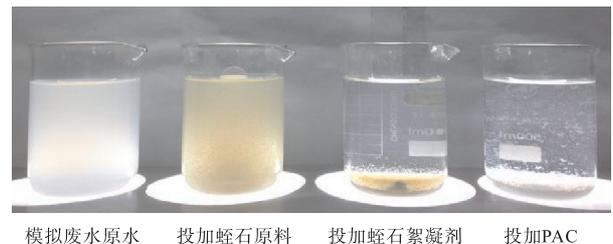


图 3 处理后水样效果对比图

Fig. 3 Comparison of samples of treated water

蛭石絮凝剂和 PAC 产生的絮体沉淀后, 分别将全部絮体转移到 25 mL 的量筒中, 再用上清液调整到量筒的最大量程, 上下颠倒混合, 静置, 记录不同时间下固液界面的读数, 作絮体体积和沉降时间的沉降曲线, 判断沉降速率的差异. 其结果如图 4 所示.

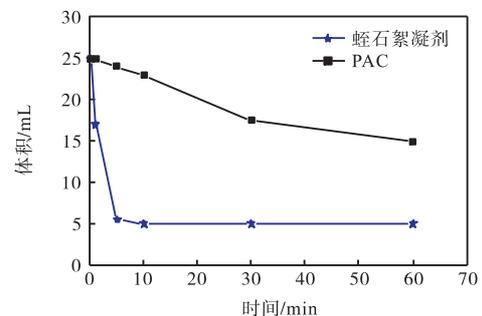
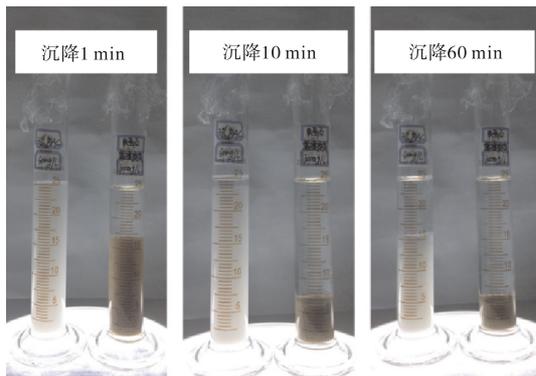


图 4 蛭石絮凝剂和 PAC 产生的絮体的沉降曲线

Fig. 4 Floccs settlement curve of vermiculite flocculant and PAC

由图 4 可知: 蛭石絮凝剂絮体沉降相对于 PAC 而言极快, 5 min 时, 蛭石絮凝剂絮体基本就已沉降完全, 絮体体积约为 5.5 mL, 而此时 PAC 絮体的体积变化很小, 絮体体积为 24 mL; 60 min 时, PAC 絮体体积仍然还有 15 mL, 是蛭石絮凝剂絮体体积的 3 倍. 由图 5 中的实验现象可知: 这样的对比十分明显, PAC 絮体很松散, 难以压缩沉降, 而蛭石絮凝剂絮体因电中和的完整性以及固体颗粒物质的范德华引力, 絮凝沉降效果特别显著. 实验结果揭示了利用无机矿物材料絮凝剂电中和性能可以改善 PAC 絮凝剂的絮凝效果.



(左: PAC; 右: 蛭石絮凝剂)

图5 蛭石絮凝剂和 PAC 产生絮体的沉降效果比较图
Fig. 5 Images of flocs settlement of vermiculite flocculant and PAC

2.2 蛭石絮凝剂可溶态盐与固体颗粒的絮凝效果

蛭石絮凝剂中的可溶性盐和固体颗粒在絮凝过程中所起作用的大小和效果,对于絮凝机理有着十分重要的意义.通过分离,可以得到不同质量分数酸处理后的可溶性盐和固体颗粒粉体,其结果见表1.随着酸质量分数的增加,可溶盐含量也相应增加.

表1 不同质量分数酸处理下蛭石絮凝剂中各组分的含量

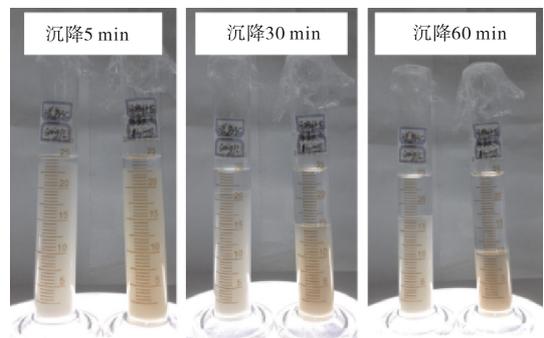
Tab.1 Compositions of acid modified vermiculite flocculant

酸质量分数/%	固体颗粒质量分数/%	可溶盐质量分数/%
15	84.29	15.71
20	80.27	19.73
25	74.62	25.38
30	69.28	30.72
35	65.47	34.53

不同质量分数酸处理得到的蛭石絮凝剂,其絮凝效果也有所不同^[12],选择效果较好的即质量分数为25%的酸处理后的蛭石絮凝剂为样品,分别对可溶性盐和固体颗粒粉体进行絮凝实验.经过实验可知,分离后的固体颗粒物质并没有絮凝作用,反而会增大模拟废水的浊度,与未改性的天然蛭石相类似.而可溶性盐可以产生较大的矾花,但是絮体沉降性能要比没有分离的蛭石絮凝剂差,且沉淀后的水样中还悬浮着部分微小絮体.可溶性盐的最佳投加量为200 mg/L,此时的Zeta电位为0.1 mV,处理后浊度为4~5 NTU,去除率约为97.8%.

PAC和可溶性盐产生絮体沉降效果的对比如图6所示.从图6可知,可溶性盐产生絮体的沉降速率稍比PAC快,但絮体也比较松散.沉降60 min时可溶性盐产生絮体体积为10 mL,是图5中蛭石絮凝剂

产生絮体体积的2倍.由此可以推断,蛭石絮凝剂的絮凝作用是固体颗粒和可溶性盐两者的协同作用.即可溶性盐和水相中胶体发生电中和,使胶体脱稳,脱稳后的颗粒相互之间以及与无机矿物材料颗粒之间依靠范德华引力,加速了这些颗粒的聚集,形成结构紧实的絮体,再加上无机矿物材料颗粒大,密度也大,形成的絮体沉降速率也快.比较图6中的两组絮体,经过60 min时PAC产生的絮体体积为18 mL,要比可溶性盐的絮体体积大8 mL,这就说明部分没有脱稳的胶体在PAC的网捕作用下被夹带吸附,使絮体内部带有未被中和的电荷,显现出难以压缩的特点,这也为今后蛭石絮凝剂与PAC复配使用提供了科学依据.



(左:PAC; 右:可溶性盐)

图6 PAC和可溶性盐产生絮体的沉降效果对比图
Fig. 6 Comparison of flocs settlement of PAC and soluble salts

2.3 蛭石絮凝剂对湖水和生化废水的絮凝效果

为了更进一步探究自制蛭石絮凝剂的絮凝效果,选取校园观景湖水和某食品厂生化废水进行实验.

校园观景湖水原水浊度为28.9 NTU,按照上述实验方法,在蛭石絮凝剂和PAC的最佳投加量下,PAC处理后的水样上清液浊度可达到2.4 NTU,浊度去除率为91.70%;蛭石絮凝剂处理后的水样上清液浊度可达到2.5 NTU,浊度去除率达91.35%,与PAC处理效果几乎相同.

生化废水原水浊度为450 NTU,经絮凝实验,PAC处理后的水样上清液浊度可达到14.7 NTU,浊度去除率为96.73%;蛭石絮凝剂处理后的水样上清液的浊度可达到13.5 NTU,浊度去除率为97.00%,效果比PAC处理效果要好一些.并且蛭石絮凝剂产生絮体的体积不到水样体积的1/10,而PAC产生絮体的体积几乎达到了水样体积的1/4.如此大的差异可以充分证明,相比于PAC,改性矿物材料蛭石絮凝

剂形成的矾花较大,絮体结构更紧实,沉降速率更快,有利于沉降分离。

2.4 蛭石絮凝剂与 PAC 复配对絮凝沉降效果的初步探讨

选用模拟废水,用上述两种絮凝剂最佳投加量的各一半,即在 500 mL 模拟废水中先投加 0.5 mL 3% 的 PAC (30 mg/L),接着投加 0.15 g 蛭石絮凝剂 (300 mg/L),复配处理后水样的上清液浊度为 2.4 NTU,具体的絮体体积随时间变化表示在图 7 中。与图 4 中 PAC 处理的效果进行对比,复配的絮凝剂不仅上清液清澈透明,而且形成的絮体效果好,沉降速率也快,30 min 后絮体沉降基本完成,而单独使用 PAC 时完全沉降所需要的时间要大于 60 min。

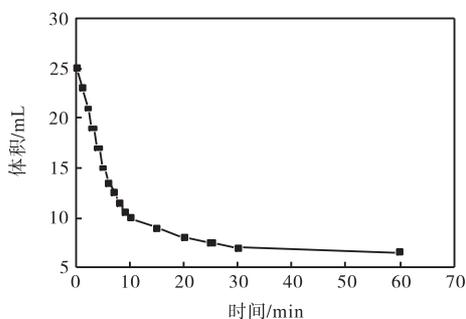
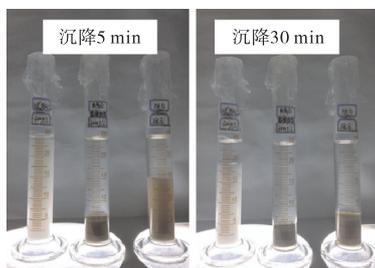


图 7 蛭石絮凝剂和 PAC 复配产生絮体的沉降曲线

Fig. 7 Flocc settling curve of the compound of vermiculite flocculant and PAC

图 8 为蛭石絮凝剂和 PAC 及两者复配产生絮体的沉降效果对比图。从图 8 中可以看出:在絮体沉降速率方面,复配后的沉降速率虽然比蛭石絮凝剂的慢一些,但比 PAC 快很多;在絮体体积方面,复配后的体积明显小于 PAC 的絮体体积,接近于蛭石絮凝剂的效果。



(左: PAC; 中: 蛭石絮凝剂; 右: PAC 与蛭石絮凝剂复配)

图 8 不同絮凝剂产生絮体的沉降效果对比图

Fig. 8 Images of flocs settlement of different flocculants

自制的蛭石絮凝剂主要成分是可溶性盐和颗粒物,这两者对絮凝过程都起到了有利的作用。可溶性

盐的离子有效地与带电荷的胶体发生中和作用,可以使 PAC 网捕吸附的胶体脱稳,消除 PAC 絮体中的胶体电荷,同时在蛭石絮凝剂颗粒物的范德华引力下,网状结构的 PAC 絮体变得紧密,表现出很好的絮凝、沉降的效果。5 min 时,复合絮凝剂的絮体体积只有 PAC 的 2/3; 30 min 时只有 1/3。复合絮凝剂比 PAC 单独形成的絮体具有更好的压缩性和沉降性,可以解决 PAC 絮凝产生的絮体难以压缩沉降的问题。

通过复配可以实现高效絮凝沉降,为实际应用提供了较为有效的复合絮凝剂。有关于复配的深度研究,包括与其他絮凝剂的复配、絮体的脱水性能等研究,将成为本絮凝剂的一个重要方向。

3 结 论

(1) 经过酸改性后的蛭石絮凝剂具有很好的絮凝效果,与 PAC 絮凝剂絮凝效果几乎相同,浊度去除率可达 98% 以上,而在絮体沉降速率上,蛭石絮凝剂远优于 PAC。

(2) 蛭石絮凝剂因自身的可溶性盐对胶体产生的电中和效应和颗粒物对脱稳后的颗粒产生的范德华引力的协同效应,絮体沉降达到平衡后,蛭石絮凝剂絮凝体积只有 PAC 絮体体积的 1/3,具有很好的沉降性能和压缩性能。

(3) 蛭石絮凝剂与 PAC 絮凝剂的复配提高了 PAC 单独的絮凝效果,可有效地减少絮体体积,提高絮体的沉降速率。用各自最佳投放量的一半复配,絮体沉降 30 min 时,絮体沉降下来的体积只有 PAC 单独条件下的 1/3,复配效果显著。

参考文献:

- [1] 万波,都颖,厉安昕,等. 浅议我国的水环境现状与存在问题[J]. 资源节约与环保, 2015(1): 131.
- [2] Lee C S, Robinson J, Chong M F. A review on application of flocculants in wastewater treatment[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2014, 92(6): 489-508.
- [3] Wu J Y, Ye H F. Characterization and flocculating properties of an extracellular biopolymer produced from a *Bacillus subtilis* DYU1 isolate[J]. Process Biochemistry, 2007, 42(7): 1114-1123.
- [4] 彭晓丽,徐芳, Eva Chmielewska. 酸改性天然火山灰吸附去除水中磷污染物[J]. 非金属矿, 2013(1): 71-73.

(下转第 71 页)

- neer's view of the NASA X-43A scramjet flight test [C]//Proceedings of the 13th AIAA/CIRA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Reston, VA: AIAA, 2005: 1181-1200.
- [2] Voland R T, Huebner L D, McClinton C R. X-43A Hypersonic vehicle technology development[J]. *Acta Astronautica*, 2006, 59: 181-191.
- [3] Chavez F R, Schmidt D K. Analytical aeropropulsive aeroelastic hypersonic vehicle model with dynamic analysis[J]. *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1994, 17(6): 1308-1319.
- [4] Bolender M A, Doman D B. Nonlinear longitudinal dynamical model of an air-breathing hypersonic vehicle [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2007, 44(2): 374-387.
- [5] Oppenheimer M W, Doman D B, Bolender M A, et al. Flexible hypersonic vehicle model developed with piston theory[C]//Proceedings of the AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. Reston, VA: AIAA, 2007: 396-420.
- [6] Oppenheimer M W, Doman D B, McNamara J J, et al. Viscous effects for a hypersonic vehicle model [C]//Proceeding of AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. Reston, VA: AIAA, 2008. <https://doi.org/10.2514/6.2008-6382>.
- [7] Clark A D, Wu C, Mirmirani M D, et al. Development of an airframe-propulsion integrated generic hypersonic vehicle model[C]//Proceedings of the 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, VA: AIAA, 2006: 2625-2654.
- [8] Frendreis S G V, Cesnik C E S. 3D simulation of flexible hypersonic vehicles[C]//Proceeding of AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference. Reston, VA: AIAA, 2010. <https://doi.org/10.2514/6.2010-8229>.
- [9] Khatri J. Modeling, Analysis, and Control of a Hypersonic Vehicle with Significant Aero-Thermo-Elastic-Propulsion Interactions: Elastic, Thermal and Mass Uncertainty[D]. USA: Arizona state university, 2011.
- [10] Praneeth R S, Cornel S, Rakesh K K, et al. Accurate computing of higher vibration modes of thin flexible structures[J]. *AIAA Journal*, 2016, 54(5): 1704-1718.
- [11] 李惠峰,肖进,张冉. 高超声速飞行器刚体/弹性体耦合动力学建模[J]. *北京航空航天大学学报*, 2012, 38(2): 160-165.
- [12] Zong Q, You Mg, Zeng F L, et al. Aeroservoelastic modeling and analysis of a six-DOF hypersonic flight vehicle [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 230(7): 1240-1251.
- [13] Zeng K C, Xiang J W, Li D C. Aeroservoelastic modeling and analysis of a canard-configured air-breathing hypersonic vehicles[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(4): 831-840.
- [14] Zhang D, Tang S, Zhu Q J, et al. Analysis of dynamic characteristics of the rigid body/elastic body coupling of air-breathing hypersonic vehicles[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 48: 328-341.
- [15] 张希彬,宗群. 考虑气动-推进-弹性耦合的高超声速飞行器面向控制建模与分析[J]. *宇航学报*, 2014, 35(5): 528-536.
- [16] Levin J, Ioannou P A, Mirmirani M D. Adaptive mode suppression scheme for an aeroelastic airbreathing hypersonic cruise vehicle[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Reston, VA: AIAA, 2008. <https://doi.org/10.2514/6.2008-7137>.
- [17] 张超凡,宗群,董琦,等. 高超声速飞行器模型及控制若干问题综述[J]. *信息与控制*, 2017, 46(1): 90-102.

责任编辑:常涛

(上接第53页)

- [5] 付军,闫海,王东升,等. 聚铝及其加载黏土矿物高效絮凝沉降铜绿微囊藻的研究[J]. *环境工程学报*, 2006, 7(1): 76-79.
- [6] 魏锦程,高宝玉,王燕,等. 聚合铁复合絮凝剂用于城镇纳污河水化学强化处理的性能及机理研究[J]. *精细化工*, 2008, 25(2): 171-176.
- [7] 肖为国,冯凤玲,王集宁,等. 泗水南部灰岩地区矿泉水锶源及形成条件分析[J]. *山东国土资源*, 2013, 29(4): 29-31.
- [8] 林亚萍. 黏土矿物对富营养化水体中磷的吸附研究[D]. 扬州:扬州大学, 2008.
- [9] 王昶,林鹏,豆宝娟,等. 黏土矿物为原料絮凝剂的制备及应用研究[J]. *天津科技大学学报*, 2015, 30(1): 62-66.
- [10] 徐浩森,夏珏良,谭轶凡,等. 基于 Zeta 电位的污水混凝降浊条件优化[J]. *上海工程技术大学学报*, 2012, 26(4): 294-297.
- [11] 汤鸿霄. 无机高分子絮凝理论与絮凝剂[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.
- [12] 林妍. 矿物材料麦饭石絮凝剂的制备及特性研究[D]. 天津:天津科技大学, 2016.

责任编辑:周建军