第 26 卷第 8 期 中国有色金属学报 2016 年 8 月
Volume 26 Number 8 The Chinese Journal of Nonferrous Metals August 2016
文章编号：1004-0609(2016)-08-1794-08

不同质量浓度下阴离子型聚丙烯酰胺对似膏体流变参数的影响

张钦礼，王　石，王新民，张德明

(中南大学 资源与安全工程学院，长沙 410083)

摘　要：以某铅锌银矿全尾砂浆恒定剪切流变实验为例，探讨不同质量浓度下，APAM 添加前后似膏体流变参数的变化，并分析影响机理。结果表明：APAM 使砂浆更加稳定；APAM 增大砂浆的切应力和表观黏度值；质量浓度越大，砂浆的平衡切应力和平衡表观黏度增大值越大，随剪切速率的增加，平衡切应力和平衡表观黏度增加幅度减小。随剪切速率增加，APAM 高分子破坏程度加大，“桥连”对流变参数的作用情况增强；随质量浓度增大，APAM 高分子对流变参数的影响程度加强，随剪切速率的增加，流变参数的增大值减小。

关键词：APAM；似膏体；质量浓度；流变参数
中图分类号：TD85　　**文献标志码**：A

为实现充填作业的连续性，必须保证充填料浆制备的快速高效，砂浆的快速浓缩沉降是其中的关键[1−2]。在实际工程中，往往在浓缩池中添加絮凝剂来解决该难题[3]。该措施不仅保证了放砂效率和充填质量，而且提高了尾砂利用率，降低了溢流水含砂量[4−5]。絮凝剂的添加必然改变料浆的内部结构，影响输送的流变性质。探讨絮凝剂对新型料浆似膏体流变特性的影响，尤其考虑不同质量浓度，将对完善似膏体管道输送技术有重要意义。

有关絮凝剂对砂浆的影响，ESWARAIAH 等[6]发现对于超细铁矿砂浆，阴离子型絮凝剂的絮凝效果远好于阳离子型和非离子型；SELOMUYA 等[7]利用光学显微镜和 X 射线衍射，对絮团颗粒和沉淀层微观结构进行了可视化研究；TAO 等[8]研究了量筒内砂浆絮凝沉降规律，认为在沉降过程中存在扰动区、沉降区和压密区；王勇等[9]分析了絮凝剂用量对尾矿浓密的影响机理，将絮凝剂添加量划分为低、合适、高及超高 4 个区间；焦华喆等[10]研究了给料浓度和絮凝剂单耗，对尾矿最大沉速和静止沉降极限浓度的影响；吴爱祥等[11]用 Design-Expert 软件分析筛选了影响全尾砂絮凝沉降的因素，并给出了各因素最优值。这些研究并未涉及砂浆的流变性质研究。有关砂浆的流变特性，PORNILLOS 等[12]发现高浓度铅锌尾砂浆体的屈服应力和黏度随剪切时间的增加而逐渐减小，并最终趋于稳定；刘晓辉等[13]进行流变试验探究了全尾膏体触变特性规律；吴爱祥等[14−15]研究了恒定剪切作用下膏体料浆的微观结构演化特性，并将絮网结构的动态变化引入膏体管道输送阻力计算中。这些研究未考虑添加絮凝剂的情况。

本文作者以某铅锌银矿添加阴离子型聚丙烯酰胺(anionic polyacrylamide, APAM)前后 4 种料浆的流变实验为基础，获取不同质量浓度下 APAM 对切应力和黏度的影响规律信息，结合 APAM 高分子在料浆中的性质，最终探讨 APAM 对似膏体流变特性的影响机理。

1　絮凝机理与砂浆内部结构

1.1　APAM 添加前后砂浆的絮凝机理

不添加 APAM 时，砂浆中包含大量的细粒径成分，单位体积内固体颗粒的表面积较大，相互作用较强，细颗粒尾砂极易在水中吸附异性离子，形成双电子层的带电颗粒，进而在表面电场的作用下互相吸引絮凝成团[16]。此时，絮凝机理为双电层压缩和电中和的共同作用[17]。而添加 APAM 后，APAM 作为一种阴离子型高分子絮凝剂，其高分子长链就像桥梁一样，搭在两个或多个尾砂颗粒上，并以自己的活性基团与尾砂颗粒表面起作用，将尾砂颗粒连接形成絮凝团，

基金项目：国家“十二五”科技支撑计划项目(2013BAB02B05)；中南大学“创新驱动计划”项目资助(2015CX005)
收稿日期：2016-01-20；**修订日期**：2016-06-15
通信作者：张钦礼，教授，博士；电话：13170310448；E-mail: zhangqinlicn@126.com

即“桥连作用”[18−19]。因此，添加 APAM 前后，砂浆的内部结构将大相径庭。桥连作用会导致砂浆初始屈服应力更大，破坏所需外力更强，破坏与修复过程机理更复杂。

1.2　APAM 添加前后砂浆的内部结构

在静止状态下，添加 APAM 前后的似膏体砂浆内部结构对比图如图 1 所示。

由图 1 可得，未添加 APAM 的砂浆中，尾矿颗粒之间主要充斥着孔隙水，而添加 APAM 的砂浆中，不仅存在孔隙水，还有絮团之间的絮团水，其中含长链状 APAM 高分子[20]。

1.3　实验用絮凝剂量的折算

絮凝剂单耗指每吨全尾砂絮凝剂固体的添加质量。实验前，将全尾砂按实验需要配置成全尾砂浆，将絮凝剂固体颗粒配置成低浓度溶液。实验过程中，在全尾砂浆中根据需要添加适量经折算的絮凝剂溶液。絮凝剂单耗 J_x 与对应的实验絮凝剂溶液添加量 M_x 的关系式为：

$$M_x = \frac{\rho_W \cdot V \cdot J_x}{10^6 \gamma_n} \tag{1}$$

式中：ρ_W 为全尾砂浆质量浓度，%；V 为实验用全尾砂浆体积，mL；γ_n 为絮凝剂浓度，%；J_x 为絮凝剂的单耗，g/t；M_x 为絮凝剂溶液添加量，mL。

2　流变性能实验

2.1　材料性能

实验用尾砂为某铅锌银矿的全尾砂。全尾砂颗粒的粒径组成见表 1。尾砂中粒径 0.075 mm 以下颗粒占 69.1 %，中值粒径仅为 0.049 mm，不均匀系数 12.7，属于细粒级砂浆。实验中选用 P.O.32.5 水泥作为胶结剂。

2.2　实验仪器

1) 全尾砂动态浓密沉降实验装置及其配套设备。该装置采用 4 个蠕动泵，分别用于泵送稀释水、絮凝剂、尾矿矿样进入浓密实验装置的给料系统，以及从实验装置底部泵出底流矿样。

2) 室内剪切实验采用哈克 VT550 型旋转流变仪。相对于传统的旋转黏度计，十字形转子对样品的絮网结构破坏较小，有效地克服了圆柱面的滑移效应，大大提高了测量的精度。

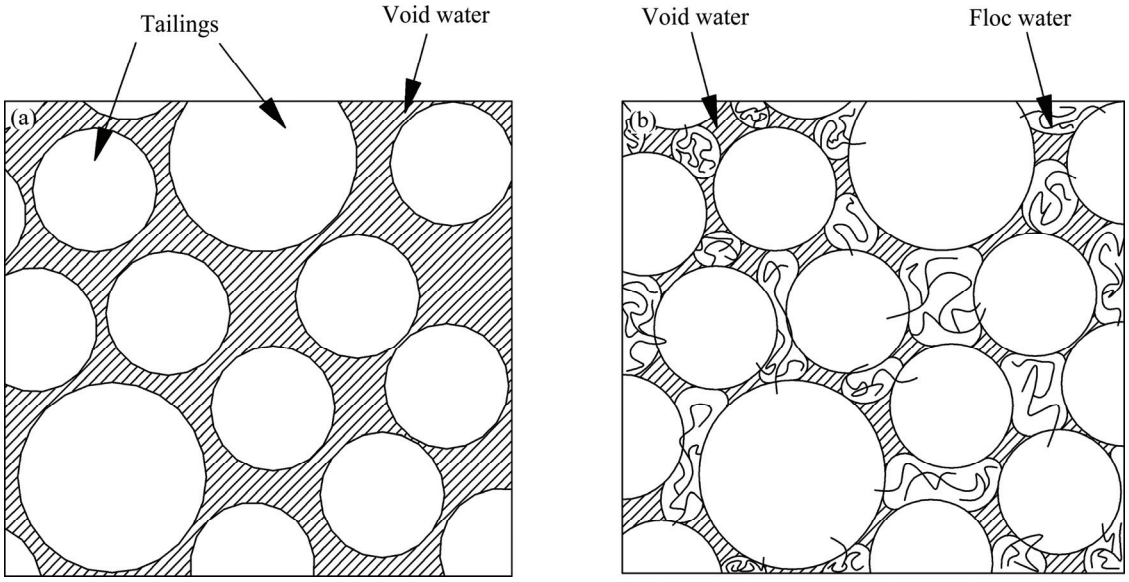

图 1　APAM 添加前后的砂浆内部结构对比图

Fig. 1　Comparison diagram of internal structure of slurries before or after APAM addition: (a) Without APAM; (b) With APAM

表 1　某矿全尾砂粒径组成

Table 1　Particle size composition of unclassified tailings in certain mine

Particle size composition/ mm	＞0.5	0.5−0.25	0.25−0.075	0.075−0.05	0.05−0.005	＜0.005
Distribution/%	0	1.3	29.6	18.1	40.7	10.3

2.3 砂浆配置

为模拟实际管道流输送情况，用全尾砂动态浓密沉降实验装置制备添加 APAM 的高浓度砂浆，并测定砂浆质量浓度，据此值反推不同充填砂浆的水泥及水的添加量，配料后搅拌均匀形成似膏体料浆。用该种砂浆对比不添加 APAM 的砂浆测定各自的流变参数值。实验中选用相对分子质量为 8×10^6 的 APAM，APAM 质量浓度为 0.1%。

配置以下 4 种砂浆进行对比实验(质量浓度分别为 70%、72%，灰砂比均为 1:6)：

1) 不添加 APAM 质量浓度为 70%的砂浆(SJ-1)。将全尾砂、水泥及水按一定比例混合搅拌均匀，配置成质量浓度为 70%、灰砂比为 1:6 的似膏体砂浆；

2) 添加 APAM 质量浓度为 70%的砂浆(SJ-2)。用动态浓密沉降装置制备砂浆，造浆过程中加入单耗为 20 $g\cdot t^{-1}$ 的 APAM。造浆后，跟据质量浓度值反推似膏体砂浆的水泥及水的添加量，配料后搅拌均匀，制成质量浓度为 70%、灰砂比为 1:6 的砂浆；

3) 不添加 APAM 质量浓度为 72%的砂浆(SJ-3)。将全尾砂、水泥及水配置成质量浓度为 72%、灰砂比为 1:6 的全尾似膏体砂浆；

4) 添加 APAM 质量浓度为 72%的砂浆(SJ-4)。依据砂浆 SJ-2 的配置方法制成浓度为 72%、灰砂比为 1:6 的砂浆。

2.4 实验过程

制备好砂浆后，用 500 mL 的烧杯盛放砂浆，质量约 900 g，放置于流变仪下，剪应力从 0 开始缓慢加载，至转子开始转动时的剪切应力即为屈服应力。根据管道输送的剪切速率，设定恒定剪切实验的 6 组剪切速率分别设为 10，20，…，60 s^{-1}，测定不同剪切速率下似膏体的黏度和剪切应力的变化，测试时长 600 s。

3 结果与讨论

3.1 实验结果及分析

由 6 组恒定剪切实验结果可得砂浆 SJ-1、SJ-2、SJ-3 和 SJ-4 的切应力变化与时间的关系，结果如图 2 所示，以及表观黏度变化与时间的关系，结果如图 3 所示。

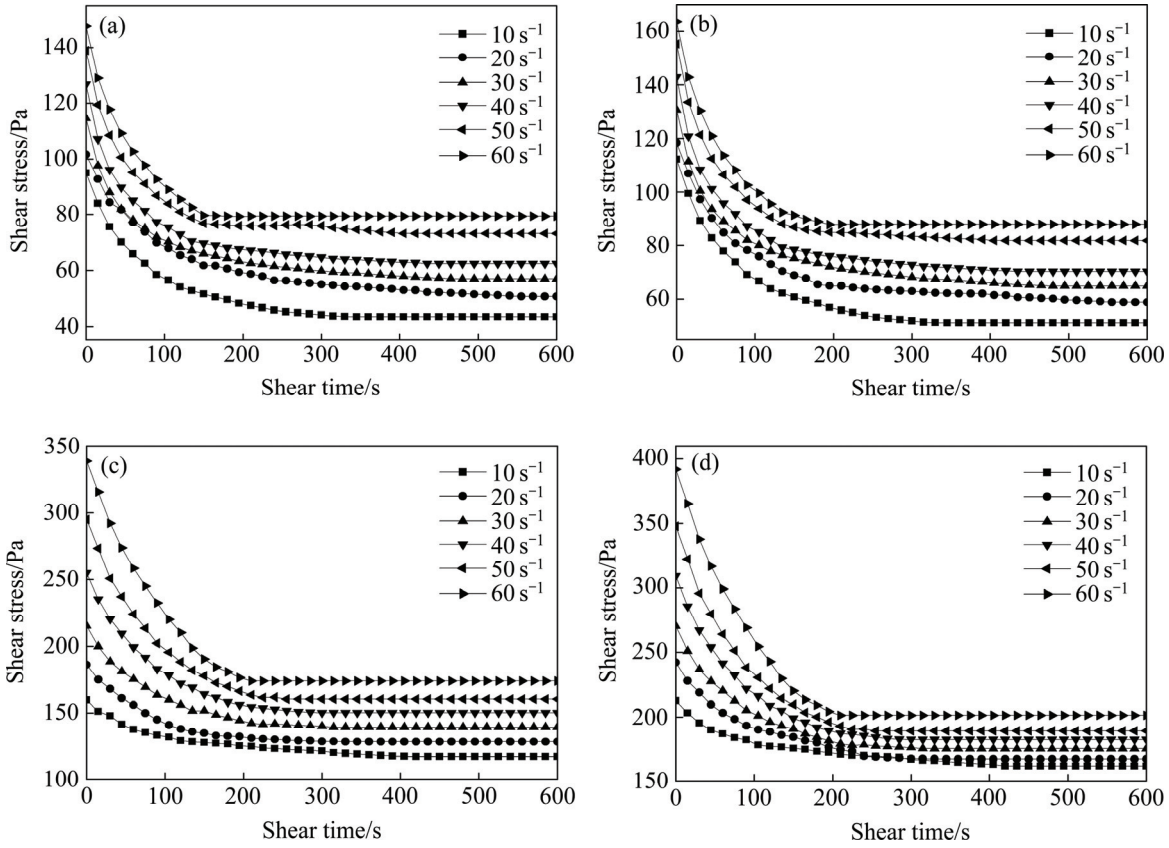

图 2 各砂浆切应力的变化

Fig. 2 Changes of shear stress of different slurries: (a) SJ-1; (b) SJ-2; (c) SJ-3; (d) SJ-4

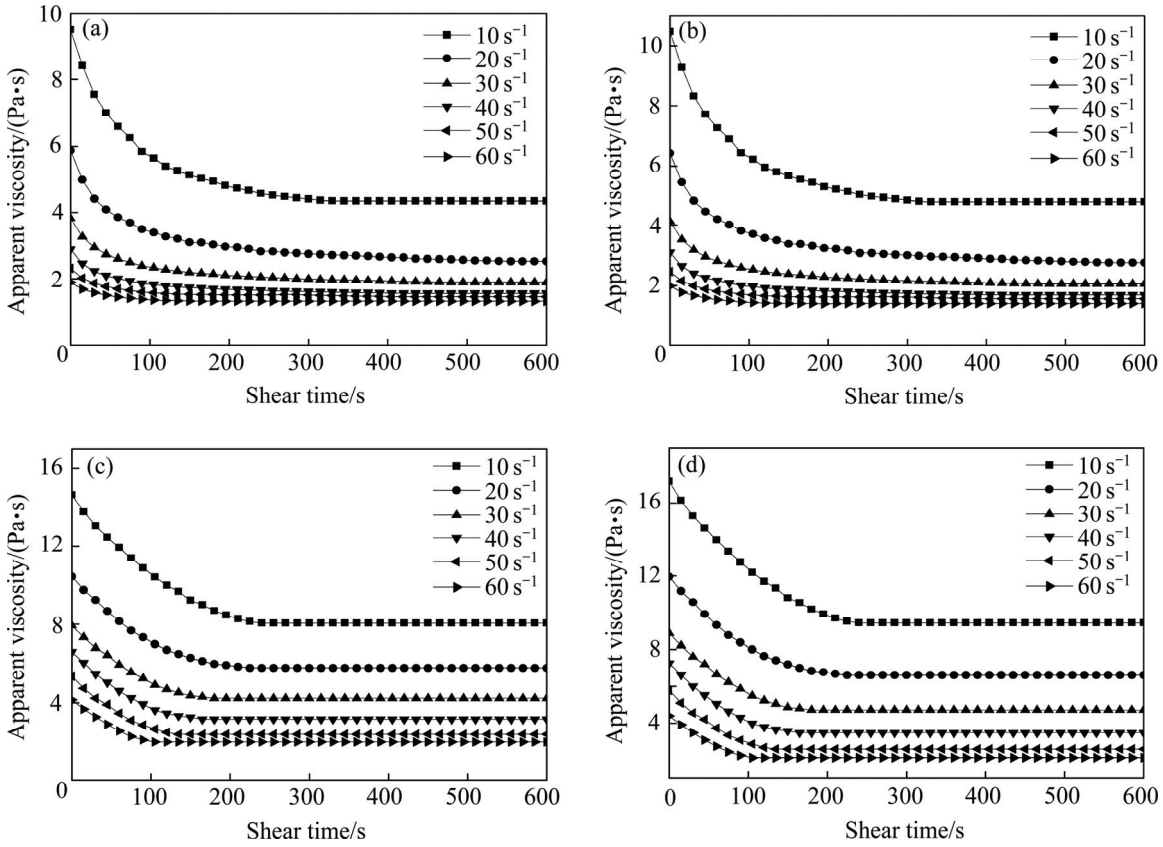

图 3　各砂浆表观黏度的变化

Fig. 3　Changes of apparent viscosity of different slurries: (a) SJ-1; (b) SJ-2; (c) SJ-3; (d) SJ-4

由图 2 和图 3 可得，在不同剪切速率条件下，4 种砂浆均表现出明显的剪切稀化的时变特性，其切应力和表观黏度均随着剪切时间的增加而逐渐减小，并逐渐趋于稳定值。

对比 SJ-1 和 SJ-2，在添加 APAM 前后，切应力及表观黏度随时间变化的关系分别如图2(a)和图2(b)，图 3(a)和图 3(b)所示。分析可知，添加 APAM 之后，流变参数曲线变得更加平滑稳定。添加 APAM 的砂浆更加稳定，在输送过程中更不容易离析。

对比图 2(a)和图 2(c)可得，质量浓度为 72%的砂浆的流变参数曲线比 70%的砂浆的流变参数曲线更加平滑。质量浓度越高，砂浆含水率越低，输送过程中更加稳定可靠。在实际输送过程中，在技术条件允许的条件下，应增大砂浆质量浓度，以保证砂浆的稳定输送。

以剪切速率 40 s^{-1} 为例，当剪切时间为 0 s 时，SJ-2 的切应力比 SJ-1 的大 16.22 Pa(见图 2(a)和(b))；SJ-2 的表观黏度比 SJ-1 的大 0.22 Pa·s(见图 3(a)和(b))；当达到平衡状态时，SJ-2 的切应力比 SJ-1 的大 7.99 Pa(见图 2(a)和(b))；SJ-2 的表观黏度比 SJ-1 的大 0.12 Pa·s(见图 3(a)和(b))。SJ-3 和 SJ-4 在不同的剪切速率下亦有同样的性质。添加 APAM 后砂浆形成的絮网结构更加稳固，需更大的力才能将其破坏。

以剪切速率为 30 s^{-1} 为例，当剪切时间为 0 s 时，SJ-3 的切应力比 SJ-1 的大 100.50 Pa(见图 2(a)和(c))；SJ-3 的表观黏度比 SJ-1 的大 4.10 Pa·s(见图 3(a)和(c))；当达到平衡状态时，SJ-3 的切应力比 SJ-1 的大 82.48 Pa(见图 2(a)和(c))；SJ-3 的表观黏度比 SJ-1 的大 2.31 Pa·s(见图 3(a)和(c))。SJ-2 和 SJ-4 在不同的剪切速率下亦有同样的性质。质量浓度越大，砂浆的切应力和表观黏度越大，砂浆越不容易破坏。

当剪切速率为 10 s^{-1} 时，经过 411 s 后，SJ-3 的切应力达到平衡状态的稳定值 127.1 Pa(见图 2(c))，当剪切速率增大到 60 s^{-1} 时，仅需 217 s SJ-3 即可达到稳定值 187.6 Pa(见图 2(c))；而当剪切速率为 10 和 60 s^{-1} 时，SJ-3 的表观黏度达到平衡状态的稳定值，却分别为 8.06 和 1.97 Pa·s(见图 3(c))。SJ-4 在不同剪切速率下的平衡时间与 SJ-3 的基本相同。剪切速率越大，砂浆达到平衡状态的时间越短，平衡切应力越大，平衡黏度越小。这是因为剪切速率越大，砂浆所受外力搅拌作用越强，砂浆内部絮网结构破坏越严重，剪切稀化的时变特性就越明显。

3.2 APAM 对流变参数的影响

由图 2 和 3 可得，SJ-1、SJ-2、SJ-3 和 SJ-4 的平衡切应力及平衡表观黏度与剪切速率的关系，如图 4 所示。

由图 4 可得，当剪切速率为 40 s^{-1}时，SJ-4 的平衡切应力比 SJ-3 的增大了 32.01 Pa；SJ-4 的平衡表观黏度比 SJ-3 的增大了 0.32 Pa·s。SJ-1 和 SJ-2 在不同剪切速率下亦有相同性质。当添加 APAM 后，砂浆的平衡切应力和平衡表观黏度均有明显增加。添加 APAM 后，不同质量浓度下砂浆平衡切应力和平衡表观黏度的相对增大值如图 5 所示。

由图 5 可得，添加 APAM 后，质量浓度为 72%砂浆的平衡切应力增大值为 15.70%~33.41%，质量浓度为 70%砂浆的平衡切应力增大值为 10.82%~18.33%。质量浓度越大，平衡切应力增大值越大，且剪切速率越小，增大值相对越大；质量浓度为 72%砂浆的平衡表观黏度增大值为 6.80%~17.22%，质量浓度为 70%砂浆的平衡表观黏度增大值为 4.91%~10.14%。质量浓度越大，平衡表观黏度增大值越大，且剪切速率越小，增大值相对越大。APAM 对平衡切应力的影响程度大于平衡表观黏度。

3.3 APAM 对流变参数的作用机理分析

在未添加 APAM 时，砂浆从静止状态受到恒定剪切力而流动，由于似膏体料浆中存在数量较多的细粒级尾矿颗粒，且形状不规则，在内聚力和摩擦力的作用下，砂浆表现出一定的屈服应力和黏度[21]。添加 APAM 后，长链状高分子的存在使得一定数量的尾矿颗粒之间相互“桥连”，在恒定切应力作用下，这些高分子动态变化特征影响了砂浆的屈服应力和黏度[22]。添加 APAM 后，砂浆在恒定切应力作用下的内部结构示意图，如图 6 所示。

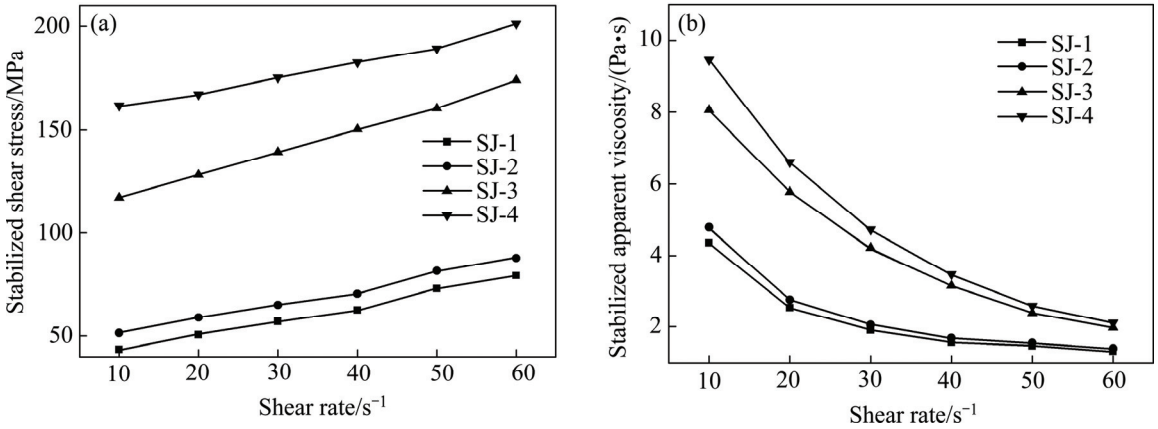

图 4 平衡切应力及平衡表观黏度随剪切速率的变化

Fig. 4 Changes of stabilized shear stress and stabilized apparent viscosity at different shear rates: (a) Stabilized shear stress; (b) Stabilized apparent viscosity

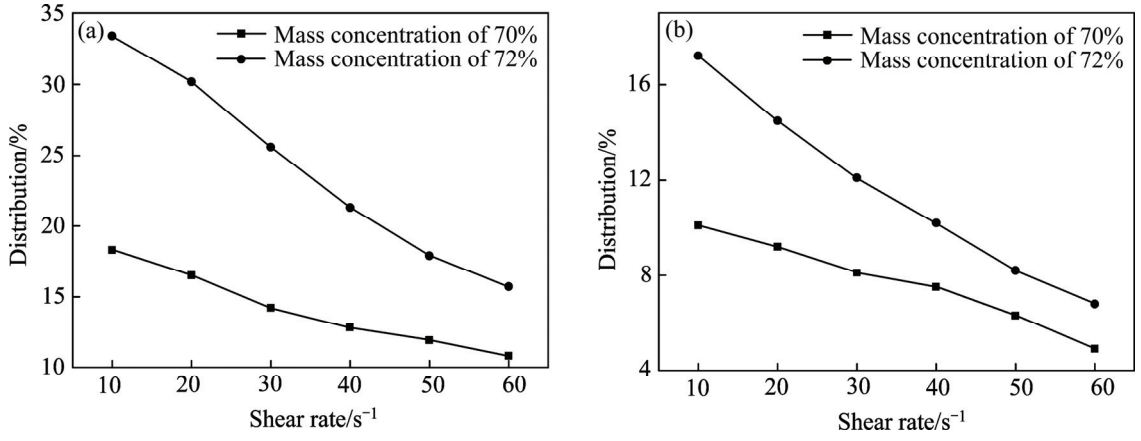

图 5 平衡切应力及平衡表观黏度的相对增大值

Fig. 5 Relative increment values of stabilized shear stress and stabilized apparent viscosity: (a) Stabilized shear stress; (b) Stabilized apparent viscosity

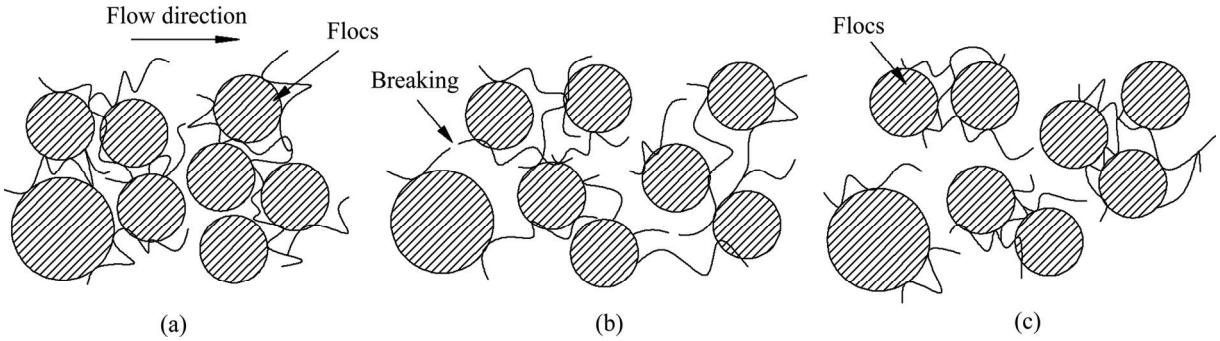

图 6　砂浆内部结构变化示意图

Fig. 6　Schematic diagrams of internal structure changes of slurry: (a) Shear before; (b) Shearing; (c) Dynamically balanced

由图 6 可得，当砂浆受到恒定切应力作用后，由于 APAM 高分子的“桥连”作用，需要更大的初始力才能克服颗粒间的摩擦力使砂浆流动，初始屈服应力和初始表观黏度比不添加 APAM 的砂浆大(见图 6(a))；在恒定切应力的作用过程中，摩擦力的存在使砂浆存在一定的流速梯度，当絮团处于流速梯度中时，尾矿颗粒的相对运动会牵拉 APAM 高分子，当速度差达到一定值时，高分子的内部力无法承担牵拉力而发生破裂，该过程中屈服应力和表观黏度在不断减小(见图 6(b))；剪切持续较长时间后，由于 APAM 本身具备一定的修复性质，当絮团的破坏速度与修复速度达到平衡值时，絮团破裂后重构，此时絮团直径小于初始絮团直径，屈服应力和表观黏度达到稳定值(见图 6(c))。

当剪切速率小时，尾矿颗粒间的摩擦力小，相对运动程度小，APAM 高分子破坏程度小。随着剪切速率的增大，尾矿颗粒间的摩擦力逐渐增大，APAM 高分子受到的破坏力增强，当达到动态平衡时，切应力的稳定值增大，而体现砂浆运动阻力性质的表观黏度的稳定值降低。APAM 形成的絮网结构会阻碍砂浆的管道输送，可在砂浆输送前加强搅拌，充分破坏絮网结构，降低砂浆动力黏度，从而降低输送的能耗损失，增强砂浆输送性能。

当砂浆的质量浓度增大时，砂浆中的水分减少，由于 APAM 添加量未变，絮团水所占比例增大，APAM 高分子的影响程度加强。此时，在相同剪切速率下，APAM 高分子的破坏程度相对减小，砂浆的运动阻力增大，表观黏度增大，且尾矿颗粒间的摩擦力相对增大，切应力也增大。剪切速率小时 APAM 高分子的影响程度小于剪切速率大时，致使剪切速率小时砂浆的平衡切应力和平衡表观黏度的增大值大于剪切速率大时。在砂浆管道输送过程中，在技术条件允许范围内，可增大系统流量，提高砂浆流动速度，降低黏度对输送的影响程度。

添加 APAM 后，由于尾矿颗粒间的絮团水比孔隙水更加稳定，受到外力时，APAM 高分子可在一定程度上降低尾矿颗粒的相对运动。此外，絮网结构可阻拦砂浆中粗颗粒的下沉，使砂浆在整体上更加均匀稳定。APAM 可增强砂浆输送的稳定性。

4　结论

1) 配置了添加及不添加 APAM 质量浓度分别为 70%、72%的 4 种似膏体砂浆，进行了恒定剪切流变实验。结果表明，添加 APAM 的砂浆更加稳定；APAM 增大了砂浆的切应力和表观黏度值；质量浓度越大，砂浆的平衡切应力和平衡表观黏度增大值越大，随剪切速率的增加，平衡切应力和平衡表观黏度增加幅度减小。

2) 分析了 APAM 对似膏体流变参数的影响机理。“桥连”作用使流变参数增大；随剪切速率的增加，尾矿颗粒间的摩擦力增大，APAM 高分子破坏程度加大，平衡切应力增大，平衡表观黏度减小；随质量浓度的增大，APAM 高分子的影响程度加强，随剪切速率的增加，平衡切应力和平衡表观黏度的增大值减小。

3) 加强搅拌可降低砂浆动力黏度，降低输送能耗。APAM 可增强砂浆输送的稳定性。

REFERENCES

[1] SONG Wei-dong, WU Shan, LI Hao-feng, CHEN Li. Study of basic characteristics of full tailings filling material[C]//Materials for Renewable Energy & Environment (ICMREE), 2011

International Conference on IEEE, 2011, 2: 1055−1059.

[2] 王新民, 古德生, 张钦礼. 深井矿山充填理论与管道输送技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010: 1−8.
WANG Xin-min, GU De-sheng, ZHANG Qin-li. Theory of backfilling activity and pipeline transportation technology of backfill in deep mines[M]. Changsha：Central South University Press, 2010: 1−8.

[3] 王新民, 赵建文, 张德明. 全尾砂絮凝沉降速度优化预测模型[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(3): 793−798.
WANG Xin-min, ZHAO Jian-wen, ZHANG De-ming. Optimal prediction model of flocculating sedimentation velocity of unclassified tailings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(3): 793−798.

[4] WANG Yuan-fang, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, WANG Yan. Effect of viscosity, basicity and organic content of composite flocculant on the decolorization performance and mechanism for reactive dyeing wastewater[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(10): 1626−1633.

[5] BOGER D V. Rheology of slurries and environmental impacts in the mining industry[J]. Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, 2013(4): 239−257.

[6] ESWARAIAH C, BISWAL S K, MISHRA B K. Settling characteristics of ultrafine iron ore slimes[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2012, 19(2): 95−99.

[7] SELOMULYA C, JIA X, WILLIAMS R A. Direct prediction of structure and permeability of flocculated structures and sediments using 3D tomographic imaging[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2005, 83(7): 844−852.

[8] TAO D, PAREKH B K, ZHAO Y M, ZHANG P. Pilot-scale demonstration of deep cone TM paste thickening process for phosphatic clay/sand disposal[J]. Separation Science and Technology, 2008, 45(10): 1418−1425.

[9] 王 勇, 吴爱祥, 王洪江, 刘斯忠, 周 勃. 絮凝剂用量对尾矿浓密的影响机理[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(11): 1419−1423.
WANG Yong, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, LIU Si-zhong, ZHOU Bo. Influence mechanism of flocculant dosage on tailings thickening[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(11): 1419−1423.

[10] 焦华喆, 王洪江, 吴爱祥, 吉学文, 严庆文, 李 祥. 全尾砂絮凝沉降规律及其机理[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(6): 702−707.
JIAO Hua-zhe, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, JI Xue-wen, YAN Qing-wen, LI Xiang. Rule and mechanism of flocculation sedimentation of unclassified tailings[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(6): 702−707.

[11] 吴爱祥, 周 靓, 尹升华, 王雷鸣. 全尾砂絮凝沉降的影响因素[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(2): 439−446.
WU Ai-xiang, ZHOU Liang, YIN Sheng-hua, WANG Lei-ming. Influence factors on flocculation sedimentation of unclassified tailings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(2): 439−446.

[12] PORNILLOS E U. A technique for measuring the reduction of yield stress of thickened tailings[C]//JEWELL R, FOURIE A. Proceedings of the 14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre of Geomechanics, 2011, 167−173.

[13] 刘晓辉, 吴爱祥, 王洪江, 焦华喆, 刘斯忠, 王少勇. 全尾膏体触变特性实验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014, 38(3): 539−543.
LIU Xiao-hui, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, JIAO Hua-zhe, LIU Si-zhong, WANG Shao-yong. Experimental studies on the thixotropic characteristics of unclassified-tailings paste slurry[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2014, 38(3): 539−543.

[14] 吴爱祥, 刘晓辉, 王洪江, 焦华喆, 王少勇, 刘斯忠, 薛振林. 恒定剪切作用下全尾膏体微观结构演化特征[J]. 工程科学学报, 2015, 37(2): 145−149.
WU Ai-xiang, LIU Xiao-hui, WANG Hong-jiang, JIAO Hua-zhe, WANG Shao-yong, LIU Si-zhong, XUE Zhen-lin. Microstructural evolution characteristics of an unclassified tailing paste in constant shearing[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(2): 145−149.

[15] 吴爱祥, 刘晓辉, 王洪江, 焦华喆, 李 辉, 刘斯忠. 考虑时变性的全尾膏体管输阻力计算[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(5): 736−740.
WU Ai-xiang, LIU Xiao-hui, WANG Hong-jiang, JIAO Hua-zhe, LI Hui, LIU Si-zhong. Calculation of resistance in total tailings paste piping transportation based on time-varying behavior[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(5): 736−740.

[16] 张 越. 污泥对模拟水力剪切条件的响应特征与调理投药的应对策略研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
ZHANG Yue. Study on response characteristics of sludge aggregates to shear conditions and coping strategy of flocculation dosing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.

[17] 俞文正. 混凝絮体破碎再絮凝机理研究及对超滤膜污染的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
YU Wen-zheng. Study on floc breakage and re-growth and its effect on ultrafiltration membrane flouling[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

[18] SADEGHI S H, HAZBAVI Z, YOUNESI H, BAHRAMIFAR N. Trade-off between runoff and sediments from treated erosion plots and polyacrylamide and acrylamide residues[J]. Catena, 2016, 142: 213−220.

[19] SWIFT T. Measuring poly (acrylamide) flocculants in fresh water using inter-polymer complex formation[J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2015, 1(3): 332−340.

[20] 牟宏伟, 吕文生, 李树磊, 车赛杰. 絮凝剂在胶结充填应用中的试验研究[J]. 矿冶, 2016, 25(1): 22−25.
MOU Hong-wei, LÜ Wen-sheng, LI Shu-lei, CHE Sai-jie. Experimental study on the flocculant applied in cemented filling[J]. Mining & Metallurgy, 2016, 25(1): 22−25.

[21] 张修香, 乔登攀. 废石−尾砂高浓度料浆的流变特性及屈服应力预测模型[J]. 安全与环境学报, 2015(4): 278−283.
ZHANG Xiu-xiang, QIAO Deng-pan. Rheological property and yield stress forecasting model of high-density slurry with waste rock- tailings[J]. Journal of Safety and Environment, 2015(4): 278−283.

[22] 金　磊, 王　可, 叶一兰, 上官勇刚, 安全福, 江志平, 郑强. 聚丙烯酰胺絮凝效果的母液浓度依赖性及其影响[J]. 高分子学报, 2013(3): 284−290.
JIN Lei, WANG Ke, YE Yi-lan, SHANGGUAN Yong-gang, AN Quan-fu, JIANG Zhi-ping, ZHENG Qiang. Dependence of flocculation performance of polyacrylamide flocculant on parent solution concentrations[J]. Acta Polymerica Sinica, 2013(3): 284−290.

Influence of anionic polyacrylamide on rheological parameters of paste-like slurry under different mass concentrations

ZHANG Qin-li, WANG Shi, WANG Xin-min, ZHANG De-ming

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Take rheological test with constant shear of full tailings slurry of a Pb-Zn-Ag mine as example, the changes of rheological parameters of paste-like slurry were discussed before or after APAM addition under different mass concentrations, and the influence mechanism was analyzed. The results show that APAM makes slurries more stable. APAM enlarges values of shear stress and apparent viscosity. With the increase of mass concentration, increment values of stabilized shear stress and stabilized apparent viscosity of slurries grow, and the increase of stabilized shear stress and stabilized apparent viscosity decreases with increasing shear rate. With the increase of shear rate, destructiveness of APAM macromolecule grows, effect degree of linking on rheological parameters grows. As the increase of mass concentration, influence degree of APAM macromolecule on rheological parameters grows, and increment values of rheological parameters decrease with the increase of shear rate.

Key words: APAM; paste-like slurry; mass concentration; rheological parameter

Foundation item: Project(2013BAB02B05) supported by National Science and Technology Pillar Program during the 12th “Five-year” Plan Period, China; Project(2015CX005) supported by Innovation Driven Plan of Central South University

Received date: 2016-01-20; **Accepted date:** 2016-06-15

Corresponding author: ZHANG Qin-li; Tel: +86-13170310448; E-mail: zhangqinlicn@126.com

(编辑　龙怀中)