نشریه علوم و مهندسی جداسازی
دوره پنجم، شماره ۲، سال ۱۳۹۲، صفحه ۶۷تا ۷۵

Journal of Separation Science and Engineering
Vol. 5, No. 2, pp. 67-75

تاثیر خصوصیات سوسپانسیون باطله فراوری مس بر تنش تسلیم برشی و اهمیت آن در فرایند جدایش جامد از مایع

محمدرضا گرمسیری[۱]، حسن حاجی امین شیرازی[۲*]

۱. گروه مهندسی معدن، انجمن پژوهشگران جوان، دانشگاه شهید باهنر کرمان (m.r.garmsiri@gmail.com)
۲ . گروه مهندسی معدن، پژوهشکده صنایع معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان (hshirazi@uk.ac.ir)

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله
دریافت: ۲۳ تیر ۹۲
دریافت پس از اصلاح: ۶ مهر ۹۲
پذیرش نهایی: ۱۸ آبان ۹۲

کلمات کلیدی:
شیمی سطح
رئولوژی
تنش تسلیم برشی
نیروهای بین ذرات
خصوصیات سوسپانسیون

چکیده

تنش تسلیم برشی از خواص رئولوژی سوسپانسیون‌ها می‌باشد که در کارایی برخی از فرایندهای فراوری مواد از جمله جدایش جامد از مایع، آسیا کنی، طبقه بندی و انباشت باطله‌ها موثر است. در این پژوهش تاثیر غلظت جامد، میزان نرمه، pH محیط، دما، نرخ فلوکولانت و متفرق‌کننده بر تنش تسلیم برشی سوسپانسیون باطله نهایی کارخانه تغلیظ شماره ۱ مجتمع مس سرچشمه بررسی شد و نهایتا تاثیر این عوامل بر فرآیند جدایش جامد از مایع تحلیل گردید. تنش تسلیم برشی با استفاده از آزمایش اسلامپ و به کمک مدل تحلیلی پاشیاس محاسبه شد. نتایج نشان داد، افزایش سهم نرمه موجب افزایش قابل توجهی در تنش تسلیم برشی می‌شود. با افزایش نرخ مصرف فلوکولانت تا ۱۰ گرم بر تن، تنش تسلیم برشی بطور قابل توجهی افزایش یافت. در حالی که در بازه بیش از ۲۰ گرم بر تن افزایش تنش تسلیم برشی ناچیز بود. با توجه به اینکه افزایش تنش تسلیم برشی موجب افزایش مقاومت سوسپانسیون در مقابل فشرده شدن و کاهش کارایی جدایش جامد از مایع می‌گردد این نتایج می‌تواند در بهبود کارآیی تیکنرها و فیلترها مورد استفاده قرار گیرد.

* عهده دار مکاتبات

حقوق ناشر محفوظ است.

۱-مقدمه

فراوری مواد معدنی اغلب در شرایطی انجام می‌شود که ماده معدنی بصورت ذرات معلق در محیط آبی است. در این شرایط قابلیت جریان یافتن و واکنش سوسپانسیون با محیط فرایند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رئولوژی یا دانش جریان یافتن سیالات به بررسی رفتار سیال در مقابل تنش برشی اعمال شده می‌پردازد. دو خاصیت مهم رئولوژی سیالات عبارتند از: تنش تسلیم برشی[۱] و ویسکوزیته[۲].

خواص رئولوژی سوسپانسیون‌ها به برایند نیروهای بین ذرات وابسته است. زمانی که ذرات ماده معدنی در شرایط سوسپانسیون قرار می‌گیرند، شش نوع نیرو به یکدیگر وارد می‌کنند که برایند آنها رفتار رئولوژی سوسپانسیون را تعیین می‌کند. این نیروها عبارتند از: واندروالس[۳]، دولایه الکتریکی[۴]، هیدراسیون[۵]، آبرانی[۶]، استریک[۷] و پل زدن[۸][۱،۲].

نیروی واندروالس از برهم‌کنش دوقطبی‌های ذاتی درون اتم بوجود می‌آید. این پدیده به جاذبه بین ذرات در فواصل کم منجر می‌شود. برای دو ذره کروی یکسان با شعاع a و فاصله H (a>>H) نیروی واندروالس توسط رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$F = -\frac{aA}{12H^2} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، A ثابت هاماکر[۹] است که به خصوصیات ماده بستگی دارد.

در محیط آب سطح ذرات با مکانیزم‌های مختلف می‌توانند باردار شوند. لذا توزیع یون‌ها در فواصل کوتاهی از سطح ذرات درون سوسپانسیون تغییر می‌کند. زمانی که ذرات در سوسپانسیون در فاصله کمی نسبت به هم قرار می‌گیرند، همپوشانی دو لایه الکتریکی آنها منجر به نیروی دو لایه الکتریکی بین ذرات می‌شود. نیروی دو لایه الکتریکی با تغییر پتانسیل زتا که عمدتا به pH محیط وابسته است و قدرت یونی تغییر می‌کند. بیشترین تنش تسلیم برشی سوسپانسیون در نقطه بار صفر اتفاق می‌افتد[۲]. علاوه بر مقدارpH، واکنش‌های سطحی بین عامل تنظیم pH و سطح ذره می‌تواند بر تنش تسلیم برشی موثر باشد[۳].

نیروی آبرانی بین دو ذره که سطح آنها آبران است مشاهده می‌شود و اغلب از نوع جاذبه است. نیروی هیدراسیون بین دو سطح آبدوست مشاهده می‌شود و از نوع دافعه است. هنگامی که ذرات با سطوح پوشیده شده از پلیمری محلول به فاصله‌ای کمتر از دو برابر ضخامت لایه آن پلیمر برسند، بین آنها نیروی دافعه‌ای اعمال می‌شود که به آن استریک می‌گویند. نیروی پل زدن زمانی که یک نوع پلیمر مانند فلوکولانت به محیط اضافه شود، موجب افزایش نیروی جاذبه بین ذرات خواهد شد.

تنش تسلیم برشی، حداقل تنش برشی مورد نیاز برای جاری شدن سوسپانسیون است[۴،۵]. این خصوصیت درفراوری مواد در جدایش جامد از مایع [۸-۶]، آسیاکنی[۹،۱۰]، فلوتاسیون[۱۱]، هیدروسیکلون[۱۲] و انباشت پسماندهای فراوری [۱۵-۱۳] موثر است. در هر یک از این مراحل بزرگی تنش تسلیم منجر به تغییر کارایی فرایند می‌شود. برای مثال در روش‌های جدایش جامد از مایع مانند غلیظ کردن در تیکنر و فیلتر، افزایش تنش تسلیم برشی موجب افزایش مقاومت سوسپانسیون در مقابل فشرده شدن و کاهش کارایی آبگیری می‌شود. در روش‌های انباشت پسماندهای فراوری، افزایش تنش تسلیم برشی منجر به افزایش زاویه قرارگیری سوسپانسیون و کاهش قابل توجه هزینه‌های انباشت باطله می‌گردد. در آسیاکنی حد بهینه‌ای از تنش تسلیم برشی وجود دارد که موجب کارایی بیشینه می‌شود. در تنش تسلیم برشی کمتر از حد بهینه، انرژی تنها صرف برخورد گلوله‌ها می‌شود. در تنش تسلیم بالاتر از حد بهینه انرژی گلوله توسط سوسپانسیون جذب شده و کارایی خردایش کاهش می‌یابد.

پژوهش‌هایی با موضوع بررسی تاثیر خواص سوسپانسیون کانی‌های مختلف بر رفتار رئولوژی آنها انجام شده است. کلایتون و همکاران [۱۶] اظهار کردند که با افزایش غلظت جامد، تنش تسلیم برشی بصورت نمایی افزایش می‌یابد. لذا در فرایند جداسازی جامد از مایع افزایش غلظت جامد موجب می‌شود بازیابی بیشینه محدود گردد. بوگر [۱۷] نشان داد در دو سوسپانسیون با تنش تسلیم برشی برابر، غلظت جامد سوسپانسیونی که دانسیته ذرات جامد آن بالاتر باشد، بیشتر خواهد بود.

جانسون و همکاران [۱] اظهار کردند تنش تسلیم برشی به میانگین ابعاد ذرات وابسته است و با کاهش ابعاد ذرات، تنش تسلیم برشی افزایش می‌یابد. گرین و بوگر [۸] نتیجه گرفتند که افزایش پلیمرهای با وزن مولکولی بالا موجب

1-Shear yield stress
2-Viscosity
3- Van der Waals
4- Electric double layer
5- Hydration
6- Hydrophobic
7- Steric
8- Bridging
9-Hamaker

افزایش تنش تسلیم و کاهش قابلیت جریان یافتن مواد می‌شود. یانگ و همکاران [۱۸] مشاهده کردند که در سوسپانسیون دی اکسید تیتانیوم، در pH حدود ۵ (نقطه بار صفر) بیشترین تنش تسلیم برشی مشاهده می‌شود. نتایج جانسون و همکاران نیز موید آن است که همواره بیشترین تنش تسلیم برشی در نقطه بار صفر رخ می‌دهد[۱].

یانگ و همکاران [۱۸] با بررسی تنش تسلیم برشی سوسپانسیون دی اکسید تیتانیوم، یک کمینه در تنش تسلیم برشی در ۵۰ درجه سانتی گراد مشاهده کردند. هی و همکاران [۱۹] نشان دادند که با افزایش دما تنش تسلیم ماسه سنگ کاهش می‌یابد. آشر [۲۰] نیز نتیجه گرفت که با افزایش دما، تنش تسلیم سوسپانسیون خاک سرخ افزایش می‌یابد. همچنین هالستون و همکاران [۲۱] گفتند که با افزایش دما، تنش تسلیم سوسپانسیون هماتیت افزایش می‌یابد.

بطور کلی می‌توان گفت میزان تنش تسلیم برشی سوسپانسیون تابعی از خصوصیات ماده معدنی (نوع کانی‌های موجود) و شرایط عملیاتی فرایند (شامل مواد شیمیایی موجود و pH محیط) است. این امر حاکی از تنوع رفتار رئولوژی سوسپانسیون در اثر تغییر خواص آن است. فراوری کانی‌های مس‌دار منجر به تولید بیشترین حجم باطله در مقایسه با فرآوری سایر کانی‌ها می‌باشد، لیکن تا کنون تاثیر خواص سوسپانسیون باطله مس بر تنش تسلیم برشی آن مورد مطالعه قرار نگرفته است. به منظور بهبود کارایی جداسازی جامد از مایع باطله‌های فرآوری مس، در این پژوهش تاثیر خواص سوسپانسیون باطله مس بر تنش تسلیم برشی آن با نگاهی مختصر به آسیاکنی کانه مس بررسی شده است.

۲- مواد و روش کار

۲-۱- نمونه برداری

نمونه‌های لازم از باطله نهایی کارخانه تغلیظ شماره ۱ مجتمع مس سرچشمه تهیه شدند. نمونه‌های مختلف با هم مخلوط و سپس تقسیم شدند. جدول ۱ ترکیب شیمیایی نمونه مورد نظر را نشان می‌دهد. نتایج آنالیز سرندی به کمک سری سرندی و سیکلوسایزر نشان داد d_{80} نمونه مورد نظر حدود ۱۲۷ میکرون است.

جدول (۱) آنالیز شیمیایی نمونه باطله مجتمع مس سرچشمه

CuO (%)	S (%)	Al_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	Mo (%)	Fe (%)	Cu (%)
۰/۰۳۵	۲/۱۳	۱۴/۳۱	۵۷/۱۴	۰/۰۰۸	۲/۹۵	۰/۱

۲-۲- آزمایش اسلامپ

برای تعیین تنش تسلیم برشی از آزمایش اسلامپ که توسط پاشیاس و همکاران معرفی شده است، استفاده شد. این آزمایش در مقایسه با سایر روش‌ها بسیار سریع و ارزان است و امکان انجام آزمایش در محل وجود دارد[۲۲و۱۶]. در این آزمایش یک استوانه (مانند بخشی از یک لوله)، دو خط کش مدرج و یک سطح صاف برای قرارگیری استوانه روی آن مورد نیاز است. ابتدا استوانه مورد نظر روی سطح صاف قرار داده شده و سوسپانسیون درون آن ریخته می‌شود. سپس به کمک قاشقک آزمایشگاهی و با زدن چند ضربه حباب‌های هوای به تله افتاده در سوسپانسیون خارج می‌شود. آنگاه به آرامی استوانه بطور عمودی بالا کشیده می‌شود. با شروع بالا کشیدن استوانه، سوسپانسیون جاری شده و تغییر شکل می‌دهد. در نهایت ارتفاع نهایی سوسپانسیون تغییر شکل یافته به کمک دو خط کش عمود بر هم اندازه‌گیری شده و با توجه به ابعاد اولیه استوانه، مقدار کاهش ارتفاع سوسپانسیون محاسبه می‌شود.

پاشیاس و همکاران قابلیت استفاده از آزمایش اسلامپ در شرایط مختلف را بررسی کرده و ابراز نمودند که نتایج این آزمایش به نوع ماده معدنی وابسته نیست. علاوه بر آن اظهار نمودند که نسبت ابعاد استوانه، سرعت بالا کشیدن استوانه و جنس سطح زیرین آن تاثیری در نتایج ندارد[۲۲].

در صورتی که ارتفاع اولیه سوسپانسیون H، و مقدار کاهش ارتفاع سوسپانسیون معادل با S باشد، بنابراین:

$$S' = \frac{S}{H} \quad (۲)$$

$$\tau'_y = 0.5 - 0.5\sqrt{S'} \quad (۳)$$

$$\tau'_y = \frac{1 - S'}{2(1 - \ln(2\tau'_y))} \quad (۴)$$

$$\tau_y = \tau'_y \times \rho_{susp} g H \quad (۵)$$

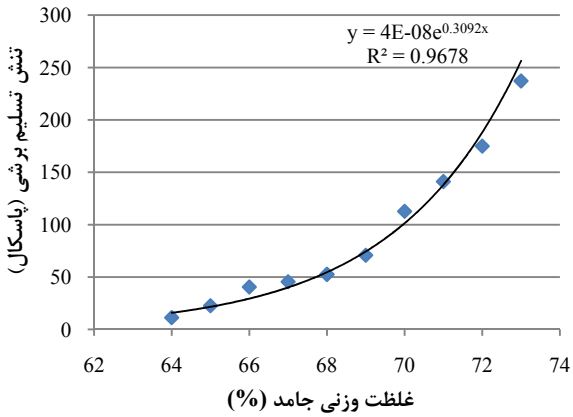
که در آن τ_y تنش تسلیم برشی(Pa)، τ'_y تنش تسلیم برشی بدون بعد، ρ_{susp} دانسیته سوسپانسیون (kg/m^3) و g شتاب گرانش زمین ($۹/۸۱ m/s^2$) است. ذکر این نکته ضروری است که در رابطه (۴)، تنش تسلیم برشی بدون بعد در بخش سمت چپ رابطه و مخرج سمت راست وجود دارد. در این شرایط می‌بایست تنش تسلیم بدون بعد بدست آمده از رابطه (۳)، در مخرج رابطه (۴) قرار گیرد و به کمک این رابطه مقدار جدید تنش تسلیم بدون بعد محاسبه شود. آنگاه مقدار بدست آمده مجددا در مخرج رابطه (۴) قرار گیرد و مقدار جدید تنش

تسلیم بدون بعد محاسبه شود. این روند تا جایی تکرار شود که مقدار تنش تسلیم بدون بعد محاسبه شده ثابت شود. آنگاه به کمک رابطه (۵) اندازه تنش تسلیم برشی محاسبه شود. در این پژوهش از یک استوانه از جنس PVC برای انجام آزمایش های اسلامپ استفاده شد و همه آزمایش‌ها در دمای محیط آزمایشگاه انجام گرفت.

۳- ارائه یافته‌ها و تحلیل نتایج

۳-۱- تاثیر غلظت جامد

یکی از عوامل موثر بر رفتار رئولوژی سوسپانسیون غلظت جامد است. با افزایش غلظت جامد، ذرات در فاصله کمتری نسبت به یکدیگر قرار می‌گیرند و برهم‌کنش و نیروهای بین ذرات افزایش می‌یابد. شکل ۱ تاثیر غلظت جامد وزنی بر تنش تسلیم برشی را نشان می‌دهد.



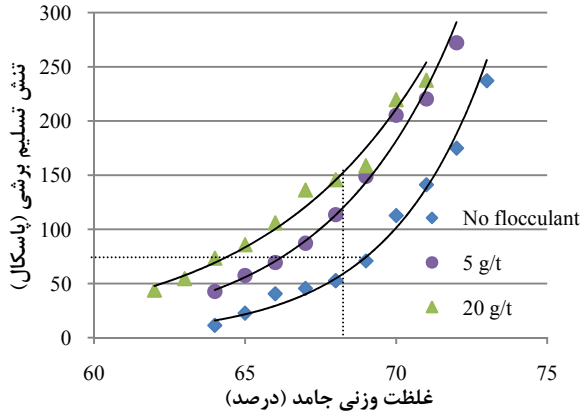
شکل (۱) تاثیر غلظت جامد وزنی سوسپانسیون باطله مس بر تنش تسلیم برشی

ملاحظه می‌شود افزایش غلظت جامد موجب افزایش قابل ملاحظه تنش تسلیم برشی بطور غیرخطی می‌گردد. این مساله می‌تواند موجب تغییرات قابل ملاحظه در کارایی آسیاکنی شود زیرا بیشترین کارایی آسیاکنی در محدوده خاصی از تنش تسلیم برشی بدست می‌آید.

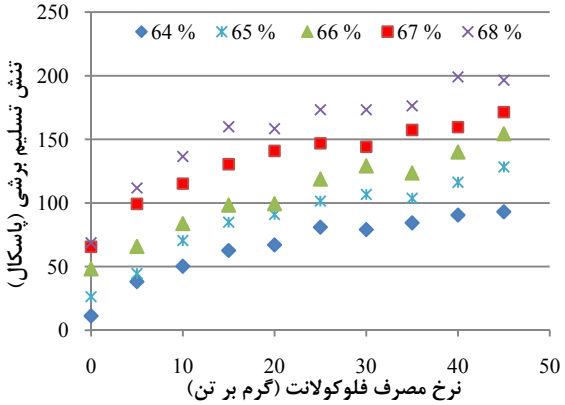
در جداسازی جامد از مایع، با توجه به شکل ۱ در صورتی که غلظت جامد در محدوده ۶۴-۷۳ درصد باشد، تنش تسلیم برشی از حدود ۱۰ به ۲۴۰ پاسکال افزایش می‌یابد. بدین ترتیب برای دستیابی به یک درصد غلظت جامد بیشتر و غلبه بر مقاومت مواد، اختلاف تنش تسلیم برشی قابل توجه بوده و باید فشار و برش بمراتب بیشتری وارد شود که در شرایط معمول تحقق نمی‌یابد. به عبارت دیگر با توجه به شکل ۱، با افزایش غلظت جامد، مقاومت مواد تحت فرایند فشردگی در تیکنرها و فیلترها افزایش یافته و کارایی جداسازی جامد از مایع به شدت کاهش می‌یابد و دستیابی به تنها یک درصد جامد بیشتر، بسیار دشوار است.

۳-۲- تاثیر نرخ مصرف فلوکولانت

فلوکولانت‌ها زنجیرهای پلیمری هستند که بطور گسترده با هدف تشکیل مجموعه ذرات[1] در جداسازی جامد از مایع در در تیکنر و فیلتر و بعضا در فلوتاسیون مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل‌های ۲ و ۳ تاثیر نرخ مصرف فلوکولانت بر تنش تسلیم برشی در غلظت جامدهای متفاوت سوسپانسیون باطله فراوری مس را نشان می‌دهد.



شکل (۲) تاثیر غلظت جامد بر تنش تسلیم برشی در نرخ فلوکولانت متفاوت



شکل (۳) تاثیر نرخ مصرف فلوکولانت بر تنش تسلیم برشی در غلظت جامدهای مختلف

1- Aggregate

ملاحظه می‌شود که در یک غلظت جامد مشخص، با افزایش نرخ مصرف فلوکولانت تنش تسلیم برشی و مقاومت سوسپانسیون در مقابل فشرده شدن افزایش یافت(خط چین عمودی شکل ۲). این مساله موجب کاهش کارایی فرایند فشردگی و جداسازی جامد از مایع در تیکنر می‌شود. از سوی دیگر با فرض اینکه در منطقه فشردگی درون تیکنر فشار مشخصی اعمال شود، با افزایش مصرف فلوکولانت بیشترین غلظت جامد قابل دستیابی و بازیابی آب کاهش می‌یابد(خط چین افقی شکل ۲).

جدول ۲ نتایج اعمال مدل نمایی بر داده‌های تنش تسلیم برشی بر حسب غلظت جامد وزنی در نرخ مصرف متفاوت فلوکولانت را نشان می‌دهد.

جدول (۲) نتایج اعمال مدل رگرسیونی بر داده‌های تنش تسلیم برشی در نرخ‌های متفاوت فلوکولانت

نرخ فلوکولانت	مدل رگرسیونی	R^2
–	$SYS = 4E-8e^{0.309x}$	0.94
۵ گرم بر تن	$SYS = 1E-5e^{0.236x}$	0.992
۲۰ گرم بر تن	$SYS = 0.000e^{0.185x}$	0.983

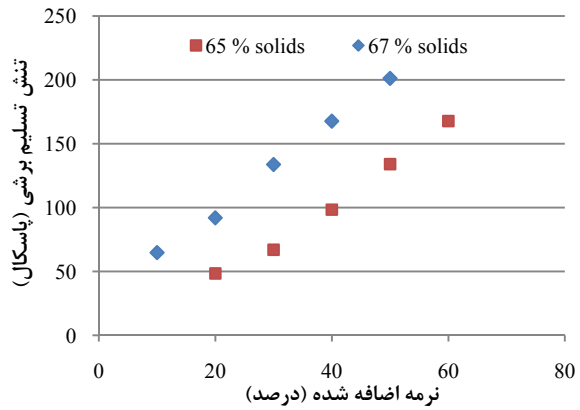
*x غلظت جامد وزنی (٪) وSYSتنش تسلیم برشی (Pa)

با توجه به مقادیر R^2 در جدول ۲ نتیجه می‌شود که مدل نمایی توصیف کننده مناسبی برای داده‌های تنش تسلیم برشی در نرخ‌های مختلف فلوکولانت است.

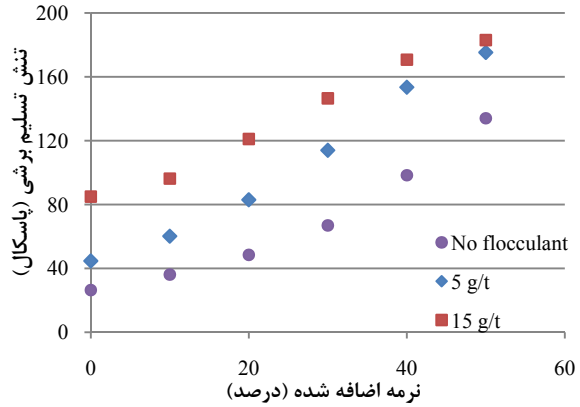
شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش نرخ مصرف فلوکولانت در بازه صفر تا ۱۰ گرم بر تن، تنش تسلیم برشی در غلظت جامد ۶۴ تا ۶۸ درصد، بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. این امر ناشی از جذب فلوکولانت روی سطح ذرات جامد و در نتیجه آن اتصال ذرات می‌باشد. بدین ترتیب مقاومت شبکه ذرات در سوسپانسیون و در نتیجه تنش تسلیم برشی افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت در نرخ مصرف فلوکولانت کم، افزایش میزان مصرف موجب افزایش قابل ملاحظه تنش تسلیم برشی و کاهش کارایی جدایش جامد از مایع در تیکنر می‌شود. در نرخ مصرف فلوکولانت بیش از ۲۰ گرم بر تن، با افزایش نرخ مصرف فلوکولانت تنش تسلیم برشی با نرخ کمی افزایش می‌یابد که می‌تواند بعلت اشباع شدن سطح ذرات توسط زنجیرهای فلوکولانت باشد. تجربیات صنعتی نیز موید آن است که در نرخ فلوکولانت بیش از ۲۰ گرم بر تن، تاثیر نرخ مصرف فلوکولانت بر تنش تسلیم برشی ناچیز است[۲۳].

۳-۳- تاثیر نرمه

یکی از عوامل بسیار مهم در کارایی اغلب فرایندهای فراوری مواد معدنی و رفتار رئولوژی سوسپانسیون‌ها میزان نرمه است. در این پژوهش برای بررسی تاثیر نرمه بر تنش تسلیم برشی، بخش کوچکتر از ۴۵ میکرون از نمونه باطله کارخانه شماره ۱ جدا شده و به عنوان نمونه نرمه در نظر گرفته شد. سپس ۱۰ تا ۴۰ درصد نرمه به نمونه اصلی اضافه شد و آزمایش‌های مورد نظر انجام شد. شکل ۴ تاثیر بخش نرمه اضافه شده و شکل ۵ تاثیر درصد نرمه اضافه شده در نرخ فلوکولانت متفاوت بر تنش تسلیم برشی سوسپانسیون را نشان می‌دهد.



شکل (۴) تاثیر درصد نرمه اضافه شده به سوسپانسیون در غلظت جامد ۶۵ و ۶۷ درصد



شکل (۵) تاثیر درصد نرمه اضافه شده بر تنش تسلیم برشی در نرخ فلوکولانت متفاوت

همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش بخش نرمه از ۱۰ تا ۴۰ درصد در غلظت‌های ۶۷ و ۶۹ درصد، تنش تسلیم برشی از حدود ۵۰ تا ۲۰۰ پاسکال افزایش یافت. این امر می‌تواند ناشی از تغییر میزان نیروی واندروالس و پیوند هیدروژنی بین مولکول‌های آب و سطح جامد باشد. رابطه (۱) نشان می‌دهد که با کاهش ابعاد ذرات، نیروی واندروالس بین دو ذره کاهش می‌یابد. این در حالیست که در غلظت جامد مشخص با کاهش ابعاد ذرات، تعداد آنها در واحد حجم افزایش می‌یابد. افزایش تعداد ذرات موجب افزایش برهم‌کنش‌های بین ذرات شده و با وجود کاهش بزرگی نیروی واندروالس مقاومت شبکه افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با کاهش ابعاد ذرات سطح کلی آنها در واحد وزن ذرات افزایش یافته و پیوند هیدروژنی بین مولکول‌های آب و سطح ذرات و در نهایت تنش تسلیم برشی افزایش می‌یابد.

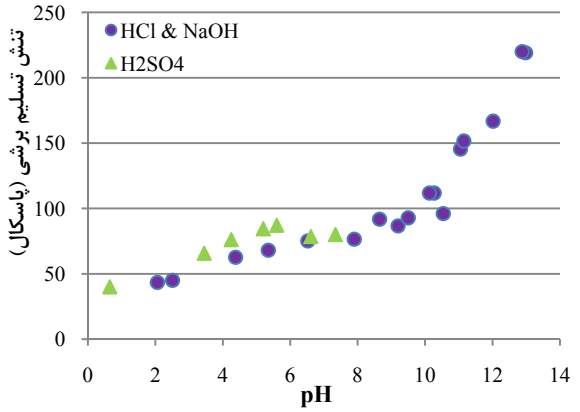
شکل ۵ نشان می‌دهد که در نرخ‌های مختلف فلوکولانت افزایش نرمه موجب افزایش تنش تسلیم برشی شد. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که مصرف فلوکولانت و افزایش سهم نرمه دو عامل اصلی افزایش تنش تسلیم برشی هستند.

در آسیاکنی با افزایش نرمه محتوای خوراک آسیا، تنش تسلیم برشی افزایش یافته و سوسپانسیون انرژی ضربه گلوله‌ها را جذب می‌کند و کارایی خردایش کاهش می‌یابد. در این شرایط غلظت جامد می‌بایست کاهش یابد تا تاثیر افزایش نرمه در افزایش تنش تسلیم برشی سوسپانسیون خنثی شود.

در جداسازی جامد از مایع، افزایش نرمه موجب افزایش مقاومت سوسپانسیون در مقابل فشرده شدن می‌گردد. با توجه به اینکه کارایی جداسازی به قابلیت فشرده شدن سوسپانسیون و نرخ عبور آب از میان آن وابسته است، ضرورت دارد تاثیر نرمه بر نرخ جداسازی بررسی شود. بطور کلی با افزایش سهم نرمه غالبا کارایی جداسازی جامد از مایع در تیکنرها و فیلترها کاهش می‌یابد.

۳-۴- تاثیر pH

یکی از عوامل موثر در رفتار رئولوژیکی سوسپانسیون‌ها pH محیط است. تغییرات pH موجب تغییر بار سطحی ذرات و وضعیت دو لایه الکتریکی می‌شود. با باردار شدن سطح ذرات، نیروی دافعه بین آنها ایجاد می‌شود و در نتیجه تنش تسلیم برشی کاهش می‌یابد. بنابراین در سوسپانسیون‌های متشکل از یک نوع ماده معدنی بیشترین تنش تسلیم برشی در نقطه بار صفر اتفاق می‌افتد که معادل با کمترین کارایی جدایش جامد از مایع می‌باشد. در شرایطی که چند نوع ماده معدنی وجود دارد (مانند باطله فراوری مس حاوی ترکیبات سیلیکاتها و کربناته)، از آنجا که نقطه بار صفر این مواد در pH های متفاوتی اتفاق می‌افتد، بنابراین در یک pH مشخص برخی ذرات دارای بار مثبت و برخی دارای بار منفی هستند. این امر مطالعه رفتار این سیستم‌ها را مشکل می‌کند. شکل ۶ تاثیر pH بر تنش تسلیم برشی سوسپانسیون باطله فراوری مس در غلظت جامد ۶۹ درصد را نشان می‌دهند. در این مرحله با هدف بررسی تاثیر عامل تنظیم کننده pH از دو نوع اسید استفاده شد.

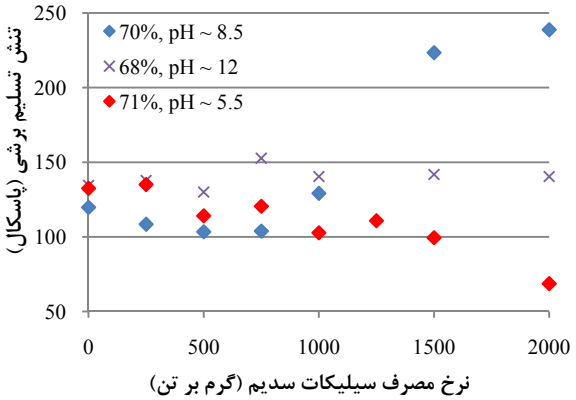


شکل (۶) تاثیر pH بر تنش تسلیم برشی سوسپانسیون باغلظت جامد ۶۹ درصد

شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش pH در بازه ۰/۷ تا ۱۳، تنش تسلیم برشی از ۴۰ تا ۲۲۰ پاسکال افزایش یافت. بدین ترتیب می‌توان گفت با افزایش pH بار سطحی ذرات مختلف به نحوی تغییر کرده که نیروی جاذبه بین ذرات و در نتیجه تنش تسلیم برشی افزایش یافته است. بدین ترتیب می‌توان گفت، با افزایش pH کارایی جداسازی جامد از مایع کاهش می‌یابد. چنین رفتاری در کالکوپریت نیز مشاهده شده است بطوریکه با افزایش اسیدهای کلریدریک، سولفوریک و نیتریک تنش تسلیم سوسپانسیون کالوپیریت کاهش یافته اما میزان کاهش در حضور مواد شیمیایی مختلف یکسان نبوده است[۳]. در این پژوهش برای اطمینان از صحت آزمایش‌ها به جای اسید کلریدریک از اسید سولفوریک استفاده شد. بررسی نتایج نشان داد با استفاده از اسید سولفوریک نیز نتایج مشابهی بدست آمد. تفاوت جزئی در نتایج بدست آمده از اسید سولفوریک و کلریدریک می‌تواند به ساختار و ترکیبات سطحی که در اثر استفاده از این دو اسید در سطح ذرات جامد بوجود می‌آید، مربوط شود[۳].

۳-۵- تاثیر سیلیکات سدیم

سیلیکات سدیم بعنوان متفرق کننده در فلوتاسیون کاربرد زیادی دارد[۲۵-۲۴]. شکل ۷ تاثیر سیلیکات سدیم در pH و غلظت جامدهای مختلف بر تنش تسلیم برشی را نشان می‌دهد.



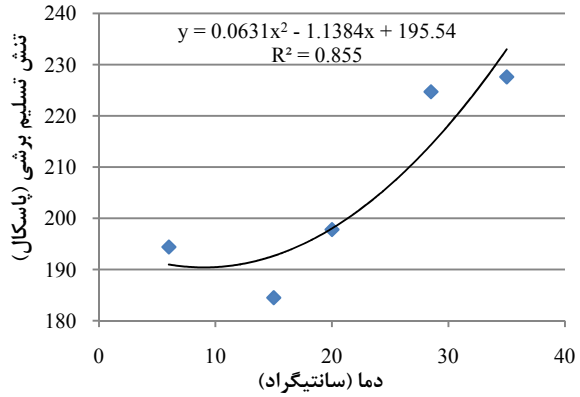
شکل (۷) تاثیر نرخ مصرف سیلیکات سدیم بر تنش تسلیم برشی در pH های مختلف

همانطور که مشاهده می‌شود در pH حدود ۱۲، افزایش نرخ مصرف سیلیکات سدیم منجر به تغییر مشخصی در تنش تسلیم برشی نمی‌گردد. در pH حدود ۸/۵، افزایش نرخ مصرف سیلیکات سدیم تا ۷۵۰ گرم بر تن موجب کاهش جزئی تنش تسلیم برشی شده، لیکن از ۷۵۰ تا ۲۰۰۰ گرم بر تن افزایش قابل ملاحظه‌ای در تنش تسلیم برشی را نتیجه داده است. در شرایط اسیدی و pH حدود ۵/۵ افزایش نرخ مصرف سیلیکات سدیم موجب کاهش تنش تسلیم برشی شد. بدین ترتیب می‌توان گفت در صورتی که فرایند در شرایط اسیدی انجام می‌شد، استفاده از سیلیکات سدیم موجب کاهش تنش تسلیم برشی و افزایش کارایی جدایش جامد از مایع می‌گردید.

۳-۶- تاثیر دما

دما از عوامل مهم در رفتار رئولوژی سوسپانسیون‌های معدنی است. هرچند رفتار سوسپانسیون کانی‌های مختلف در برابر تغییرات دما متفاوت است. شکل ۸ تاثیر دما بر تنش تسلیم برشی سوسپانسیون باطله فراوری مس را نشان می‌دهد.

شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش دما، تنش تسلیم برشی سوسپانسیون باطله مس با غلظت جامد ۷۲ درصد، از حدود ۱۹۰ پاسکال تا ۲۳۰ پاسکال افزایش یافت. بنابراین می‌توان گفت با افزایش دمای سوسپانسیون باطله فراوری مس، کارایی فرایندهای جداسازی جامد از مایع کاهش می‌یابد.



شکل (۸) تاثیر دما بر تنش تسلیم برشی سوسپانسیون باطله فراوری مس

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر غلظت جامد، نرمه، pH، دما، نرخ فلوکولانت و متفرق‌کننده بر تنش تسلیم برشی سوسپانسیون باطله فراوری مس بررسی شد و تاثیر آن بر کارایی عملیات جداسازی جامد-مایع در تیکنرها و فیلترها تحلیل گردید. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت جامد، تنش تسلیم برشی در نرخ‌های مختلف فلوکولانت بطور نمایی افزایش یافت. افزایش سهم نرمه در حضور و یا عدم حضور فلوکولانت موجب افزایش قابل توجه در تنش تسلیم برشی شد. با افزایش نرخ مصرف فلوکولانت تا ۱۰ گرم بر تن، تنش تسلیم برشی بطور قابل توجهی افزایش یافت در حالیکه در بازه بیش از ۲۰ گرم بر تن افزایش تنش تسلیم برشی ناچیز بود. علاوه بر آن نشان داده شد که با افزایش pH در بازه ۱ تا ۱۳ در غلظت جامد ۶۹ درصد، تنش تسلیم برشی از ۴۰ تا ۲۲۰ پاسکال افزایش یافت. علاوه بر آن با افزایش دما تنش تسلیم برشی افزایش یافت. نتایج نشان داد تاثیر سیلیکات سدیم به عنوان متفرق‌کننده در شرایطی که pH سوسپانسیون حدود ۵ باشد، بارز است. بدین ترتیب می‌توان گفت که افزایش بخش نرمه، pH، نرخ مصرف فلوکولانت و دما، موجب افزایش تنش تسلیم برشی و کاهش کارایی جداسازی جامد از مایع می‌گردد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت‌های مالی و معنوی شرکت ملی صنایع مس ایران تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

[1] B. J. Johnson, G.V. Franks, P.J. Scales, D.V. Boger and T.W. Healy (2000) "Surface chemistry–rheology relationships in concentrated mineral suspensions", *International Journal of Mineral Processing*, 58, 267–304.

[2] J. Addai-Mensah and C.A. Prestidge (2005) "Structure formation in dispersed systems", in *Coagulation and Flocculation*, Eds: H Stechemesser, B Dobias, Taylor and Francis.

[3] L. Huynh, P. Jenkinsand and J. Ralston (2000) "Modification of the rheological properties of concentrated slurries by control of mineral solution interface chemistry", *International Journal of Mineral Processing*, 59, 305-325.

[4] R. de Kretser and P.J. Scales (2008) "The effect of temperature on the yield stress of mineral suspensions", *Journal of Colloid and Interface Science*, 328, 187-193.

[5] P.J. Scales, S.B. Johnson and T.W. Healy (1998) "Shear yield stress of partially flocculated colloidal suspensions", *AIChE Journal*, 44, 538-544.

[6] B. Gladman, R.G. de Kretser, M. Rudman and P.J. Scales (2005) "Effect of shear on particulate suspension dewatering", *Chemical Engineering Research and Design*, 83, 933-936.

[7] B.R. Gladman (2005) "The effect of shear on dewatering of flocculated suspensions", Ph.D. Thesis, *The University of Melbourne*, Melbourne, Australia, 319.

[8] M.D. Green and D.V. Boger (1997) "Yielding of suspension in compression", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36, 4984-4992.

[9] M. He, Y. Wangand and E. Forssberg (2004) "Slurry rheology in wet ultrafine grinding of industrial minerals: a review", *Powder Technology*, 147, 94–112.

[10] F.N. Shi and T.J. Napier-Munn (2002) "Effect of slurry rheology on industrial grinding performance", *International Journal of Mineral Processing*, 65, 125-140.

[11] C.W. Bakker, C.J. Meyer and D.A. Deglon (2010) "The development of a cavern model for mechanical flotation cells", *Minerals Engineering*, 23, 968–972.

[12] F. Boylu, K. Çinku, F. Esenli and M. SabriÇelik (2010) "The separation efficiency of Na-bentonite by hydrocyclone and characterization of hydrocyclone products", *International Journal of Mineral Processing*, 94, 196–202.

[13] C.A.O. Hernandez, A.C. De Araujo, G.E.S. Valadao and S.C. Amarante (2005) "Pasting characteristics of hematite/quartz system", *Minerals Engineering*, 18, 935-939.

[14] J. Henriquez and P. Simms (2009) "Dynamic imaging and modelling of multilayer deposition of gold paste tailings", *Minerals Engineering*, 22, 128-139.

[15] S. Yin, A. Wu, K. Hu, Y. Wang and Y. Zhang (2012) "The effect of solid components on the rheological and mechanical properties of cemented paste backfill", *Minerals Engineering*, 35, 61-66.

[16] S. Clayton, T.G. Grice and D.V. Boger (2003) "Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions", *International Journal of Mineral Processing*, 70, 3-21.

[17] D.V. Boger (2009) "Rheology and resources industries", *Chemical Engineering Science*, 64, 4525-4536.

[18] H.G. Yang, C.Z. Li, H.C. Gu and T.N. Fang (2001) "Rheological behavior of titanium dioxide suspensions", *Journal of Colloid and Interface Science*, 236, 96–103.

[19] M. He, Y. Wang and E. Forssberg (2006) "Parameter studies on the rheology of limestone slurries", *International Journal of Mineral Processing*, 78, 63-77.

[20] S.P. Usher (2002) "Suspension dewatering: Characterization and optimization", Ph.D. Thesis, Department of Chemical Engineering, *The University of Melbourne*, Melbourne, Australia, 326.

[21] J. Hulston, R.G. de Kretser and P.J. Scales (2004) "Effect of temperature on dewaterability of hematite suspensions", *International Journal of Mineral Processing*, 73, 269-279.

[22] N. Pashias, D.V. Boger, J. Summers and D.J. Glenister (1996) "A Fifty cent rheometer for yield stress measurement", *Journal of Rheology*, 40, 1179-1189.

[23] M.R. Garmsiri, H. Haji Amin Shirazi, K. Jookar and A. Arabpour (2012) "Effectiveness of variable factors affecting the efficiency of deep cone thickener", *Proceedings of 26th International Mineral Processing Congress*, India, Delhi, 1517-1530.

[24] X. Ma (2011), "Effect of a low-molecular-weight polyacrylic acid on the coagulation of kaolinite particles", *International Journal of Mineral Processing*, 99, 17-20.

[25] M.O. Silvestre, C.A. Pereira, R. Galery and A.E.C. Peres (2009) "Dispersion effect on a lead-zinc sulfide ore flotation", *Minerals Engineering*, 22, 752-758.

The effect of properties of the suspension of copper processing tailings on shear yield stress and its significance to solids liquid separation

Mohammad Reza Garmsiri[1], Hassan Haji Amin Shirazi[2*]

1. Mining Engineering Group, Young Research Society, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, (Email: m.r.garmsiri@gmail.com).
2. Mining Engineering Group, Mineral Industries Research Centre, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, (Email:hshirazi@uk.ac.ir).

ABSTRACT

Shear yield stress as a rheological property of suspensions affects the efficiency of some of the mineral processing methods such as solids liquid separation, grinding, classification, and tailings disposal. In this work, effect of solids concentration, fines extent, pH and temperature on the shear yield stress of the final tailings suspension of concentration plant 1 at Sarcheshmeh Copper Complex was investigated and eventually their impact on solids liquid separation was analyzed. The shear yield stress was calculated using the slump test results and the analytical model presented by Pashias. Results indicated that, with the extent of fines the shear yield stress increased considerably. An increase in flocculant dosage up to 10 g/t resulted in a significant increase in the shear yield stress. While, with the flocculant dosages higher than 20 g/t, increasing the flocculant dosage led to a slight increase in the shear yield stress. An increase in shear yield stress leads to a decrease in compressibility of suspension and as a result the efficiency of solids liquid separation decreases. These achievements can be beneficial to the efficiency of thickening and filtering.

All right reserved.

ARTICLE INFO

Article history:
Received: July 14, 2013
Revised: Sept. 28, 2013
Accepted: Nov. 9, 2013

Key words:
Surface chemistry
Rheology
Shear yield stress
Inter particle forces
Suspension properties

* Corresponding author