●特集 最近の膜による水処理技術-2

振動型膜分離装置の特長とその適用例

高田 一貴・山本 和良*

神鋼パントック株式会社 技術開発本部 ☎ 651-2241 神戸市西区室谷 1-1-4

*神鋼パントック株式会社 環境装置事業部 製品開発室 ☎ 651-2241 神戸市西区室谷 1-1-4

Technical Characteristics and Application Summaries of Vibratory Shear Enhanced Processing Membrane Filtration Machine

Kazutaka Takata and Kazuyoshi Yamamoto*

Technical Development Group, Shinko Pantec Co., Ltd

1-1-4 Murotani Nishiku Kobe, 651-2241

*Product Development Department, Environmental System Division

Shinko Pantec Co., Ltd.

1-1-4 Murotani Nishiku Kobe, 651-2241

Vibratory shear enhanced processing membrane filtration has developed to solve problems of fouling and/or plugging which are occurring in the conventional crossflow system. The high shear rate which is generated by the vigorous vibration acts on the surface of the membrane and this high shear rate prevents fouling on the surface of the membrane and plugging in its flow path. This unique system expands to wide range of applications not only where cross flow system are conventionally used but also as an alternative technologies such as evaporator, centrifuge, and filter press where high concentrations are required. In this paper, summaries of various technology issues and applications of vibratory shear enhanced processing membrane filtration are described.

Key Words : membrane separation/vibration/shear rate/latex/UF membrane/NF membrane

はじめに

膜分離装置におけるファウリングや閉塞の問題は解決されるべき課題として常に膜分離装置に付随しており、これら諸問題を解決することは安定

操作やコストダウンを実現する上で重要である。従来からこれらファウリングや閉塞を防止する方法として物理的には回転平膜型、逆洗型等が、化学的には洗浄薬品や洗浄方法等がそれぞれ開発されてきた。これら方法では一定の効果はあるもの

Fig. 1 Schematic diagram of vibratory shear enhanced processing membrane filtration machine.

の前者の物理的方法に関しては時として膜に付着したゲル層をスクレーパで掻き取る際膜にダメージを与えたり、逆先の繰り返しによる高分子材料への疲労等により膜が破損する問題を生じる。化学薬品を用いる後者の場合には膜を化学的に劣化させることになり、寿命低下を招く問題があった。

振動型膜分離装置はこれら従来からの諸問題を従来型とは全く異なる原理で解決することができる装置である^{1~3)}。Fig. 1に示す振動型膜分離装置は膜に振動を与えてファウリングを防止する画期的機能を有しており、クロスフロー方式に代表される従来型膜分離装置に較べて大きな透過流束で処理でき、分離が困難な高粘度物質（高SS物質）をも膜で分離できるようになった。また振動型膜分離装置では膜の薬品洗浄インターバルを長くとることができるため化学薬品による膜の機能低下を大幅に防ぐことが可能であり、膜寿命も従来型に較べて長くなることが考えられる。ここで

は振動型膜分離装置の概要ならびに適用例を、膜の諸機能におよぼす振動の影響からみた技術的特長と併せて述べる。

1. 振動型膜分離装置の特長と機構概要

1.1 特長

振動型膜分離装置は膜表面に発生する強力なせん断速度や機構構造上、①従来装置よりも大きな透過流束、②目詰まり防止機能、③高濃縮操作が可能、④小さなポンプ送液エネルギーによる高いエネルギー効率、⑤容易なメンテナンス（駆動部はベアリングとトーションスプリングのみ）、⑥MF～RO膜に至る各種平膜が装着可能、⑦省スペース、等の特長がある。

1.2 振動機構

Fig. 1に示したように、振動型膜分離装置は

Fig. 2 Schematic diagram of vibration system.

振動を発生させる駆動部と、フィルターパック、コントロール部とに大別される。ここでは振動機構とフィルターパックについて説明する。

Fig. 2 に駆動機構を示す。駆動部はおもに鋼製のトーションスプリング、サイズミックマス、モーター、偏心ベアリングから構成されている。モーターにより偏心ベアリングを約 3,000 RPM で回転させ、サイズミックマスに約 50 Hz の水平方向振動を与えたとき、サイズミックマスの荷重による慣性モーメントとフィルターパックの荷重による慣性モーメントがトーションスプリングにねじりを発生させる。このねじりによってサイズミックマスの振動とは同一周波数ではあるが 180 度逆位相の振動がフィルターパックへ伝達されるため、フィルターパック内の膜表面に強力な流体せん断力が発生し膜面の目詰りを低減する。

第(1)式は振動システムの共振時の固有振動数を表す式である。

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{k \left(\frac{1}{I_s} + \frac{1}{I_f} \right)} \quad (1)$$

ここで ω =振動周波数 [Hz], k =トーションスプリングのバネ定数, I_s =サイズミックマスの慣性モーメント [kg/m^2], I_f =フィルターパックの慣性モーメント [kg/m^2]

振動型膜分離装置では膜面積の増加に伴いフィルターパックの重量が増加する。従って振動周波数を膜面積によらずに同一とするため、第(1)式に従いサイズミックマスの重量およびトーションスプリングを変更した 3 機種が設計されている。

Fig. 3 Schematic diagram of an inside view of filter pack.

1.3 フィルターパック

Fig. 3 にフィルターパック内の模式図を示す。SUS304（標準）プレートに両面に装着された平膜トレイを膜面積に応じて FRP 外筒へ挿入し、振動によって動かないよう FRP 内でモールド固定する。フィルタートレイにはフィルターパック上段域で仕切間隔を大きく、下段域で仕切間隔を小さくするように所々に仕切板が装着されているが、こうすることで供給液がフィルターパック上段部から下段部にかけて濃縮され液流量が減少してもトレイ間を流れる流速をほぼ一定に保つようにされている。

2. 分離機構におよぼす振動の影響

2.1 膜表面せん断速度評価

振動型膜分離装置は膜面に発生するせん断速度が他の膜分離装置に比べて大きい。ここではその大きさを具体的に他のシステムと比較して示す。

せん断速度は次元解析により次式で表される。

$$\text{せん断速度 [1/s]} = \frac{\text{代表速度 [m/s]}}{\text{代表長さ [m]}} \quad (2)$$

ここで、代表速度は振動速度と一致するので次式により表される。

$$\text{代表速度} = 2\omega P = 4\pi f P \quad (3)$$

ここで ω =角速度 [rad/s], P =振幅 [m], f =周波数 [Hz]

代表長さに関しては境界層厚さとして次式により求められる⁴⁾。

$$\delta = [\mu / (\rho \cdot f)]^{1/2} \quad (4)$$

Table 1 Shear rates in various operating conditions.

Amplitude at the rim of the membrane module [m]	Frequency [Hz]	Average shear rate [s ⁻¹]	Shear rate at the inside of the membrane [s ⁻¹]	Shear rate at the outside of the membrane [s ⁻¹]
2.54×10 ⁻²	59.06	9.24×10 ⁴	4.90×10 ⁴	1.25×10 ⁵
1.91×10 ⁻²	58.88	6.90×10 ⁴	3.65×10 ⁴	9.33×10 ⁵
1.27×10 ⁻²	58.57	4.56×10 ⁴	2.42×10 ⁴	6.17×10 ⁵
6.35×10 ⁻²	57.73	2.23×10 ⁴	1.18×10 ⁴	3.02×10 ⁵

Fig. 4 Effects of vibration and TMP on the permeate flux.

ここで δ =速度境界層厚さ [m], μ =粘性係数 [Pa·s], ρ =流体密度 [kg/m³]

第(2)式に第(3), (4)式を代入してせん断速度を求めると第(5)式となる.

$$\gamma = 4\pi f^{1.5} \rho^{0.5} P / \mu^{0.5} \quad (5)$$

振動型膜分離装置の膜形状はドーナツ状なので, 第(5)式を面積積分後膜面積で除して平均せん断速度として評価するために次式が導出される.

$$\gamma_{ave} = \frac{8\pi^2 f^{1.5} \rho^{1.5}}{\mu^{0.5}} \cdot \frac{P_2}{r_2} \cdot \frac{r_2^3 - r_1^3}{3A} \quad (6)$$

ここで, γ_{ave} =膜平均せん断速度 [s⁻¹], A=膜面積 [m²], r =膜半径 [m], $P=r$ における振幅 [m], $P_2=r_2$ における振幅 [m] 添字 $1r_1$ =内半径, $2r_2$ =外半径

Table 1 に, 膜最外周部の振幅が 2.2 cm の場合の平均せん断速度の計算結果をクロスフロー型膜面せん断速度⁵⁾と比較して示す. Table 1 より振動型膜分離装置はクロスフロー型に較べてせん

断速度が 1 桁大きくになっていることがわかる.

2.2 膜面ゲル層低減効果

Fig. 4 にラテックスを例にとって, 膜間差圧に対して透過流束をプロットした結果を示す. せん断速度の増加に伴い透過流束は純水透過流束特性カーブに沿って増加するが, ある一定の膜間差圧以上になると透過流束は徐々に漸近傾向を示す. 透過流束が圧力に対して漸近しはじめる付近が最適な操作圧力になるが, 図からもわかるようにクロスフロー型に較べて同一圧力条件で比較した場合, 大きな値になっている. この効果は, 振動型膜分離装置では膜面上のせん断速度が他方式(クロスフロー型: 4000 s⁻¹)よりも大きいため, 膜面に付着しようとするファウリング物質の排除速度を速めることができたため, 膜面濃度と原液濃度の差が小さくなって濃度分極層における濾過抵抗が小さくなったことに起因する. 実際膜面上におけるゲル化濃度を計算すると (Table 2), 振動型膜分離装置ではせん断速度の増加と共にゲル形成濃度すなわち濃縮限界濃度が上昇することがわかる. 同様に物質移動係数も実験により求められたが, 物質移動係数はせん断速度にほぼ比例して増加することがわかった. 一般に高分子物質のような液体は拡散係数が小さいため絶対的に濃度境界層厚さが厚くなる. 従って振動の効果で双方の厚さを減少させて膜表面の透過抵抗を小さくすることにより高濃縮が可能になる.

2.3 阻止率向上効果

振動型膜分離装置では膜面の濃度境界層厚さを小さくする効果があることは上述のとおりである

Table 2 Gel layer concentration in various vibrating conditions.

Average Shear rate $\times 10^4$ [s^{-1}]	Mass transfer coefficient 0.93 MPa [m/s]	Mass transfer coefficient 1.65 MPa [m/s]	gel layer concentration 0.93 MPa [kg/m^3]	gel layer concentration 1.65 MPa [kg/m^3]
9.24	1.09×10^{-5}	1.73×10^{-5}	601	391
6.90	1.03×10^{-5}	1.42×10^{-5}	520	371
4.56	9.79×10^{-5}	1.13×10^{-5}	437	370
2.23	7.40×10^{-5}	7.14×10^{-5}	398	397
0.30	1.96×10^{-5}	1.94×10^{-5}	389	405

Fig. 5 Effects of shear rate on NaCl rejection and thickness of concentration boundary layer.

が、この作用によって阻止率を増加させることができる。Fig. 5 は NF 膜（ルーズ RO 膜）を用いた場合の塩阻止率および濃度境界層厚さに及ぼす振動の影響を示した図である。振動を加えることによって阻止率が著しく増加していることが示されているが、これは振動の影響によって濃度境界層厚さが薄くなり、濃度分極を抑制した結果生じるものである。実際の応用では低阻止特性を有する膜に振動をかけることで阻止特性と透過流束を高く維持し、経済性をもたせるプロセスが可能と考えられる。

3. 適用例

振動型膜分離装置は膜分離技術が適用されてきた従来分野のみならず、高濃縮操作へも適用範囲を広げることができている。振動型膜分離装置は、化学、製紙、半導体、土木、水道、下水、食品、

医薬等あらゆる産業分野において分離操作が必要なプロセスに適用可能と考えられている。ここでは、それらの例として河川水ろ過とラテックス濃縮について概説する。

3.1 河川水濾過

北海道の河川水中にはフミン酸やフルボ酸に代表されるような有機色度成分を含有し、この分子量は数百～数十万の範囲に入るブロードなものとなっている。適用されたプロセスでは振動型膜分離装置のろ過水（UF 膜）が純水装置の原水として使用される他、直接電子部品の洗浄水としても使用されるため微粒子と有機色度成分が極力少ない高いレベルの水質が要求される。これら有機色度成分を UF 膜で除去するためには、有機色度成分を含む河川原水をポリ塩化アルミニウムで凝集させ、その凝集原水を直接 UF 膜ろ過する方法がある。凝集剤を含む凝集原水を従来型膜分離装置でろ過する際には沈澱や砂ろ過器等の前処理が必要となるため、凝集原水の直接ろ過が可能な振動型膜分離装置が選定された。この装置を適用することで、雪解け時の原水水質悪化にも十分対応できる。Fig. 6 は振動型膜分離装置（膜面積 84 m^2 ）の透過流束の経時変化を示した図である。運転初期には膜面へのゲル層形成効果のために透過流束は低下するが、ある一定の透過流束になると、ゲル層形成効果と振動による剝離効果が平衡状態に達するため透過流束が一定値に漸近する。

近年河川水の濾過に対して NF 膜を適用する試みがなされてきており、河川水に含まれる環境ホルモン類やヒ素等の有毒成分除去のため振動型

Fig. 6 Effect of time on permeate flux.

Fig. 8 Effect of time on permeate flux (same latex as shown in Fig. 7)

膜分離装置が極めて有用であるとの報告がなされている⁶⁾。振動によって阻止率を増加させかつ高い透過流束を長期間一定値に保持できることが期待されている。

3.2 ラテックス濃縮

ラテックスの膜濃縮は反応機から生産される製品濃縮や排水からの有価ラテックス回収が蒸発機の代替技術としてエネルギー効率の観点から有望視されてきた。しかし従来型膜分離装置では膜表面のせん断力が小さいため目詰まりが著しく、安定操作のみならず経済的な透過流束の実現が困難である。Fig. 7はUF膜を用いた場合のラテックスろ過に及ぼす振動(せん断速度)の影響を詳細に示した図である。透過流束は濃度の上昇と共に低下するが、せん断速度の増加に伴い透過流束は大きくなっており、透過流束に及ぼす振動の影響が端的に示されている。さらにFig. 8に示すとおり振動型膜分離装置によって高い濃度のラテッ

Fig. 7 Effect of vibration on permeate flux (latex concentration)

クス溶液が長時間安定した透過流束を示すことも確認されている。振動をかけた場合の濃縮限界もクロスフロー(振動なし)の場合よりも大きくなることは既に説明したとおりである。このように振動型膜分離装置はラテックスのような高濃度エマルジョンに代表される化成品の濃縮に極めて有効な方法として今後の普及が期待されている。

おわりに

振動型膜分離装置の機構、技術的特長ならびに適用例を概説した。振動によって膜性能を最大限に引き出すことができる装置として、従来の膜分離装置の適用範囲を越えた取り扱いができるため、今後様々な分野に適用が期待される。

文 献

- 1) Culkin, B. A. Plotkin, and M. Monroe : Chemical Engineering Progress, Jan. 1998
- 2) Culkin, B. : U.S. Patent No. 5, 014, 564 (1991)
- 3) Filtration in the Biopharmaceutical Industry, Marcel Dekker, Inc (1998)
- 4) 小西嘉雄, 竹尾由重, 谷田克義, 高田一貴 : 神鋼パンテック技報, Vol. 42, No. 2 (1999)
- 5) Schlichting : Boundary Layer Theory
- 6) 卞 如林, 山本和良, 渡辺義公, 小澤源三 : 第50回全国水道研究発表大会講演要旨集 (4-77) (受付 1999年9月7日 掲載決定 10月9日)