コイル材切削法による金属繊維製造装置の開発

日本工業大学 兼 子 正 生 (会員)
日本工業大学 柳 沢 章
日本工業大学 鈴 木 亨

Development of Metal Fiber Production Equipments by Using Coiled Sheet Shaving Method

Masao Kaneko, Akira Yanagisawa and Tohru Suzuki

Nippon Institute of Technology,

Gakuendai Miyashiro-cho Minamisaitama-gun Saitama

Abstract

This investigation was conducted to put to practical application coiled sheet shaving method. To prevent the fiber from sticking to each other during shaving, a new method using hot water soluble resin coated coil was proposed. Production equipments for the new method which can be applied industrially were developed and their basic performances were examined. It was confirmed that fiber sticking could be prevented with coating thickness of 12~20 μ m and various kinds of metal fibers as stainless steel, nickel, titanium could be produced efficiently by the developed equipments. Further, non-woven fabric production equipments was developed suitable for these fibers eliminating problems such as breaking of fibers with the current non-woven fabric production methods.

(Received November 24, 1995)

(Accepted for Publication May 14, 1996)

摘 要

目的 優れた特徴の多いコイル材切削法による金属繊維の製造法を実用化することを目的として、製法上の問題点を解消する方法と、その対応する製造装置の検討を行った。

成果 製法上の問題点である、切削時の薄板相互の溶着防止効果に優れた分離膜材として湯溶性樹脂であるポリビニルアルコール (PVAL) を用い、コイル素材への被覆装置、繊維製造装置を開発した。これらの装置を用い各種ステンレス鋼、ニッケル、チタン等の金属繊維製造を行い、いずれの材種においても PVAL 皮膜厚さ 10~20 μ m で、良好な繊維が効率良く製造できた。また、コイル材切削法のような切削で得られる折損しやすい金属繊維に適した不織布製造装置を開発した。

(平成 7 年 11 月 24 日受理)

(平成 8 年 5 月 14 日審査終了)

1. 緒 言

金属繊維は耐熱性、焼結性、電気伝導性等の非金属繊維にはない優れた特性を持っている。金属繊維は鉛やアルミニウム合金、Fe-B-Si 系アモルファス繊維等を除いて熔融紡糸法によって製造されている。現在、金属繊維を工業的に製造する方法として

は、単線引抜き法、集束引抜き法¹⁾の引抜き法と、ワイヤ切削法²⁾、びりり振動切削法³⁾の切削法が行われている。引抜き法は一般に高品質の繊維製造法であるが、非常に高コストであり、中でも細径の繊維の得られる集束引抜き法はオーステナイト系ステンレス鋼繊維以外は製造しにくいという欠点を持っている。一方、ワイヤ切削法はコスト的には優れている

ものの、均一な径の繊維製造が困難であり、被削性の劣る材種には適用できない等の問題がある。また、びりり振動切削法は短繊維の製造法であり、長繊維の製造は困難である。

筆者らはこれまで、多材種に適応でき、繊維径の設定が容易かつ正確に行える、製造装置が簡便で低コストの繊維製造法である等の優れた特徴を持つ、コイル材切削法による金属繊維製造の研究を行ってきた。その結果、金属薄板をコイル状に巻き、その端面を切削し金属繊維を得るコイル材切削法において、実用化を妨げている最大の問題点とされていた切削時の薄板相互の溶着を防止する方法を開発した^{4,5)}、この方法はコイル素材に溶着防止のための除去の容易な分離膜を被覆して切削し、後にその分離膜を洗浄除去する湯溶性樹脂被覆コイル材切削法である。

本報告では、この新しく開発した湯溶性樹脂被覆コイル材切削法の工業的実用化を目指し、樹脂被覆装置、繊維製造装置の開発を行い、その基本的性能について検討を行った。

さらに、金属繊維は多くの用途において、これを不織布として用いることが多い。これらは、自動車用マフラーの消音材、また、焼結体としてポリマーフィルター等の各種フィルター、面燃焼バーナーの他多孔質素材として広く用いられている。しかし、金属繊維不織布の製造においては、カード式、ランダムウェブ方式等の非金属繊維における従来の方がそのまま用いられているため、繊維折損などの問題点も生じている。特に、コイル材切削法金属繊維のような折損しやすい金属繊維を上記用途に適用しようとする場合、これに適した不織布製造法の開発が必要となる。

本研究ではコイル材切削法で製造された金属繊維が実用に供されるために、これを不織布とするための製造装置の開発も行った。

2. 金属繊維製造装置

2.1 湯溶性樹脂被覆コイル材切削法

コイル材切削法を図1に示す。この方法では、コイル材の板厚と工具の送り量を変えることで任意でしかも均一な太さの繊維が得られる。また、旋削加工であることから切削可能な多材種への適応が可能であり、現在、行われている集束伸線法、ワイヤシェーピング法等の他の方法に比較して製造装置が簡

Fig. 1 Schematic illustration of the coiled sheet shaving method

便となり、繊維製造法として、多くの利点を持っている。しかしながら、この方法で繊維の製造を行うと、図2(a)に示すように、多くの材質において、切削時に薄板相互が溶着し、帯状の切りくずとなり繊維としての形態が得られない。繊維溶着は薄板相互の金属接合現象⁶⁾であり、薄板層間に樹脂等の分離膜材を形成させ切削することが溶着防止に有効であることが確認されている⁵⁾。このとき分離膜材として湯溶性樹脂を用いる方法が湯溶性樹脂被覆コイル材切削法である。ここで、分離膜材として湯溶性

Fig. 2 Comparison of appearances of fibers produced by non-coated sheet shaving (a) and coated sheet shaving (b)

Fig. 3 Hot water soluble resin coating and resin removing process

樹脂を用いる理由は次の通りである。ステンレス鋼繊維の製造には切削油剤を使用することが不可欠であるが、不水溶性切削油剤を用いると繊維に付着した油剤の除去が困難となることから、除去の容易な水溶性切削油剤が用いられる必要がある。従って、分離膜材に要求される特性として、切削油剤には溶解せず、切削中分離膜材としての性能が維持され、かつ、繊維製造後、容易に除去処理が可能であることがあげられる。これらの要求を満たす分離膜材を検討した結果、水溶性切削油剤には溶解せず 65℃以上の温水にのみ溶解する湯溶性樹脂であるケン化度 $88 \pm 1 \text{ mol\%}$ のポリビニルアルコール（以下 PVAL と呼ぶ）が選択された。湯溶性樹脂被覆コイル材切削法の繊維製造工程を図 3 に示す。また、表 1 に本法で用いた PVAL の物性値を示す。工程は、まずコイル素材に湯溶性樹脂が被覆され、乾燥後、巻き取られて被覆コイル材となる。この被覆コイル材は切削装置の主軸に所定量巻き取られ、その端面が切削され金属繊維が得られる。得られた金属繊維は温水により繊維に残存する被覆樹脂が洗浄除去された後、巻き取られる。図 2 (b) に、この方法で製造された溶着のない金属繊維の外観を示す。

Table 1 Physical properties of PVAL

Chemical formula	$-(\text{CH}_2-\text{CH})_n-$ OH
Decomposition point	200~220℃
Melting point	200~220℃
Dissolution temperature	>65℃
Viscosity	$25 \pm 2 \text{ CPS} / 4\% \text{ } 20^\circ\text{C}$
Saponification	$88 \pm 1 \text{ mol\%}$
pH	5.5~6.5

2.2 樹脂被覆装置

開発した樹脂被覆装置を図 4 に示す。この装置により、金属薄板はコーティングロールで樹脂が塗布され、輻射伝熱あるいは熱風対流により乾燥された後、専用ドラムに巻き取られる。この専用ドラムに巻き取られた被覆素材は、次工程の切削装置の素材ドラム装着部に取り付けられる。コーティングロール部の詳細を図 5 に示す。PVAL の塗布量を一定にするために供給ロールと転写ロールを用い、供給ロールにドクタブレードが取り付けられ樹脂量の調整が行われる。常温の PVAL10%水溶液を用い、ドクタブレードと供給ロールとクリアランス C、コーティングロール周速度 V_c 、薄板材の巻取速度 V_w を変えた場合の PVAL の被覆厚さの変化を図 6 に示す。PVAL 被覆厚さは SUS304, SUS430, チタン、ニッケル等の材種による差異は認められず、各巻取速度に応じ、クリアランス、コーティングロール速度を変えることにより $5 \sim 30 \mu\text{m}$ の任意の厚さに塗布できることが確認できた。

Fig. 4 Resin coating machine

Fig. 5 Coating equipment of hot water soluble resin

Fig. 7 Coiled sheet shaving machine

Fig. 6 Relation between coating roll speed, winding speed and coated film thickness

2.3 繊維製造装置

コイル材切削法は旋削であることから、繊維製造装置は基本的に施盤と同様の構造を持っている。また、得られる繊維は薄板の切削であることから長方形断面となる。このような円以外の断面を持つ繊維の場合、通常これを同じ面積の円に換算したときの直径を換算直径として表す。この換算直径 20~60 μm の金属繊維を製造するためには、板厚 0.05~0.1 mm のコイル材を用いても、切削 1 回転当たりの工具送り量を 10~20 $\mu\text{m}/\text{rev}$ の微小量としなければならない。この微小送り量で単位時間当たりの

生産量を確保するためには、切削幅を大きくすることが必要となる。微小送り、大きな切削幅の切削条件はびびり振動を非常に生じやすく、びびり振動が生じると繊維が切断され、連続的な生成は行われなくなる。このびびり振動の発生を防止するため、製造装置には高剛性、バックラッシュのない主軸回転、安定した微小送りが必要となる。これらの要求を満たすために、専用の繊維製造装置の製作を行った。図 7 に試作した製造装置の外観を示す。

初めに、回転の変動が少なく安定した主軸回転を得るために、衝撃荷重に耐え、バックラッシュの調整が可能な特殊減速機 (1:10.25) をカップリングにより主軸に直接接続し、バックラッシュの起こりにくい機構とした。また、5~30 $\mu\text{m}/\text{rev}$ 以下の安定した工具送りを得るため、ピッチ 5 mm のボールねじをベッドの中央に設置した。さらに、微小送り量を実現するために、送り減速機にハーモニックドライブ (1/50) を採用、インバーターにより 5~50 $\mu\text{m}/\text{rev}$ の安定した送り量の得られる機構とした。

この試作した製造装置を用い、びびり振動が発生せず、連続繊維の生成する切削条件の検討を行った。板厚 $t = 0.03, 0.05, 0.1$ mm の SUS304 材を用いた場合の結果を図 8 に示す。繊維生成域は SUS304, SUS430, ニッケル, チタン材で、ほぼ同様の傾向を示し、送り量が減少するとそれに伴って、連続繊維の生成可能な切削幅が小さくなる。これは送り量が減少することにより、生成繊維がより細径となるため、わずかなびびり振動の発生でも繊維切断が生じやすくなるためと、切れ刃先端の丸み半径

Fig. 8 Fiber formation region

(工具研削直後の切れ刃先端の平均丸み半径 $R = 20\ \mu\text{m}$) が切削厚さ(送り量に相当)に対して相対的に大きくなり、連続型切りくずである繊維の生成が困難になるためと考えられる。

さらに、繊維製造装置の主軸に被覆コイル材を巻き取る場合、コイル材の巻取張力が小さいと緊密な巻き付け状態が得られず、切削中にコイル材層間での変形、外周部でのめくれが発生し、連続した繊維の製造が困難となった。この問題を回避するために製造装置の素材ドラム部にブレーキ装置を取り付け、緊密な巻き付け状態が得られるようにした。板厚 $t=0.1\ \text{mm}$ 、板幅 $200\ \text{mm}$ の場合には $120\sim150\ \text{N}\cdot\text{m}$ 、板厚 $t=0.03\ \text{mm}$ の場合には $100\sim130\ \text{N}\cdot\text{m}$ のブレーキトルクで良好な巻き付け状態が得られた。

次に、溶着防止可能な PVAL 被膜厚さについて検討した。図 9 に SUS304、板厚 $t=0.1\ \text{mm}$ を用いた場合の PVAL 被膜厚さと溶着率の関係を示す。ここで、繊維溶着率とは本来生成されるべき繊維本数(コイル材の巻数に相当)を N 、実際に分離生成される繊維本数(目視により測定)を n とすると $\{(N-n)/N\} \times 100\ (\%)$ で表され、切削時の生成繊維相互の溶着の程度を示している。被膜厚さが $3\ \mu\text{m}$ では溶着防止効果が不十分で、被覆を行わない場合に比べ、溶着率の低減は 10% 程度であった。皮膜厚さ $5\ \mu\text{m}$ とすると溶着率は急激に減少し被膜厚さ $10\ \mu\text{m}$ 以上では溶着率は 10% 以下にまで低下

Fig. 9 Relation between film thickness and sticking ratio

する。皮膜厚さを $15\sim20\ \mu\text{m}$ 程度とすると、さらに薄板相互の溶着も低減し、良好な繊維の得られることが確認できた。皮膜厚さを $30\ \mu\text{m}$ と厚くすると、溶着率は 8% 以下と少ない値を示すが、軟質の PVAL 量が多くなるため切削中に薄板の変形が発生しやすくなり、良好な繊維製造が困難となった。

また、板厚 $t=0.03\ \text{mm}$ の SUS304 材でも同様の実験を行った結果、 $20\ \mu\text{m}$ 程度の皮膜厚さでも板厚に対する PVAL 量が多くなり、切削中に薄板の変形が生じ易くなった。緊密な積層状態が保持され、連続的な繊維生成が可能となる PVAL 皮膜厚さは板厚が小さくなるとより薄くする必要があると思われる。

2.4 洗浄・巻取装置

試作した洗浄・巻取装置を図 10 に示す。洗浄、巻取工程は切削された金属繊維に付着した PVAL 皮膜を洗浄除去し、巻き取るものである。洗浄装置には繊維の引取ロールが取り付けられ、繊維生成速度に一致した速度で洗浄槽内を移送、洗浄される。さらに、洗浄槽は 2 槽方式とし PVAL とともに切削油等の汚れも洗浄できるようにした。洗浄槽へは汚濁、温度低下を防ぐために、約 75°C の温水を $10\ \ell/\text{min}$ で供給した。洗浄後の繊維に残存する PVAL をソクスレー抽出器で測定したところ温水温度 75°C 、浸漬時間 $20\ \text{sec}$ で 97 Wt% の PVAL 皮膜が除去されていることが確認された。さらに、洗浄時

Fig. 10 Rinsing and winding equipment

Fig. 11 Wound stainless steel fiber by hot water soluble resin coated coiled sheet shaving method

間の延長、温水供給量の増加により残存 PVAL 量の減少は可能になるものと思われる。巻き取られた金属繊維の外観を図11に示す。

2.5 各種金属繊維の製造

次に、本法を用いて各材種の金属繊維製造実験を行った。実験の諸条件を表 2 に示す。切削速度は材種により 60～82 m/min に変化させ、送り量は 20 μm/rev、すくい角は各材種で最も良好な繊維の得られるすくい角とした。切削工具はニッケル繊維製造で SKH9 種、それ以外は超硬工具 (K10) を用い湿式切削とした。得られた繊維の外観とその拡大したものを図12に示す。PVAL を被覆しない通常の切削では (a) に示すように各材種とも薄板相互の溶着が多く、帯状のカールした切りくずとなり、繊維としての形態を示さない。PVAL を被覆して切削した場合には (b) に示すように、どの材種も薄板相互の溶着が防止され、均一な金属繊維が製造できる

Table 2 Experimental condition

Cutting tool	Sintered carbide tool (K10) High speed steel tool (SKH9)
Cutting condition	Rake angle γ : 25° ~ 42° Back clearance angle α : 10° Approach angle ϕ : 2° Cutting speed v : 74~80m/min Feed rate S : 15~20 μ m/rev Width of cut W : 10~20mm Coolant Water soluble coolant (National BIG-8)
Work materials	Stainless steel (SUS304) Permalloy (PC) Nickel (N1) Titanium (TP)
Sheet thickness	t=0.03, 0.05, 0.1mm

ことが確認された。また、(c) は PVAL 被覆により製造された繊維の外観を拡大したものである。

次に、得られた金属繊維の繊維径について検討を行った。本方法で得られる金属繊維の断面の一例を図13に示す。各繊維の送り量に対する換算直径を図14に、また、図13に示した繊維厚さ増加比 R_i (実際に得られた繊維厚さ／工具の送り量) の変化を図15に示す。繊維の換算直径は $t = 0.03$ mm の場合 30~48 μm、 $t = 0.05$ の場合、35~62 μm、 $t = 0.1$ mm の場合、50~85 μm の範囲となった。繊維厚さ増加比は材種による差はほとんど認められず、送り量が小さくなるに従って大きくなっている。これは送り量 (切削厚さ) に対して工具刃先の丸みが相対的に増加するため、繊維生成時の実せん断角が減少するためと思われる。また、材種による繊維厚さ増加比の差異が認められないことから、当然材種による繊維径の差異も認められなかった。

また、これらの材種以外に、銅、黄銅、アルミニウム、ジルコニウム等の繊維製造を行い、いずれの材種でも本方法が有効であることが確認された。しかし、銅、黄銅の場合には、温水での洗浄の際、表面酸化が生じた。これを防ぐためには皮膜を洗浄除去した直後に乾燥させる工程をとる必要があると思われる。

3. 不織布製造装置

3.1 不織布製造法

既存のカーディング法等の不織布製造法は工程が

Fig. 12 General view and magnification of fibers produced by hot water soluble resin coated coiled sheet shaving method

Fig. 13 Fiber cross section

Fig. 14 Relation between feed rate and equivalent diameter

Fig. 15 Relation between feed rate and increase ratio

複雑で、大規模な装置を必要とし、さらに、コイル材切削で得られる金属繊維は繊維製造時の加工硬化等により、繊維が折損しやすく、従来法では大きな曲げ加工を受けるため、短繊維状あるいは粉末状となりやすく不織布の製造が困難である。ここでは、コイル材切削法による金属繊維に適した不織布製造法の検討を行った。本方法で用いた不織布製造法の原理を図16に示す。この方法は速度比の異なる供給

Fig. 16 Schematic illustration of web production method

ロールと中間ロールで繊維を部分的に切断し、さらに高速回転の切断ロールで完全に切断分離し、エアによりコンベア上に飛散させ、無配向に積み重ね、連続した不織布を製造するものである。本装置ではこのように、部分的な切断の後に、高速回転ロールで完全な分離切断を行う2段階での切断方法を採用している。これは、1段階での切断工程でも、速度比の選択により、繊維切断は可能であるが、切断された繊維が充分に分離開繊せず、コンベア上に飛散するため、均一な分散が得られないため、中間ロールに対して大きな速度比で高速回転する切断ロールを用いることによって、良好な分離開繊が行われるようにしたものである。また、広幅の不織布の製造に対応するため、この2工程切断装置を幅方向に揺動させる構造とした。このとき両端部での分散繊維量の低下を防ぎ、幅方向に密度の均一な不織布を得るために、揺動速度を揺動中央部に対して両端部で変速可能にした。

3.2 不織布製造装置

製作した不織布製造装置の外観を図17に示す。回転ロール部（繊維供給ロール、中間ロール、切断ロール）を幅方向に揺動させることで幅広でしかも均一な不織布が製造可能な構造とした。ここでは、湯溶性樹脂被覆コイル材切削法で得られた換算直径30、60、90 μ mのステンレス鋼繊維を用い不織布製造実験を試みた。

まず、はじめに、良好に切断、分散させるための各ロールの速度比の検討を行った。各ロールの速度比は1:2~3:10~20の範囲が最も均一に切断、分

Fig. 17 Web production machine

散が可能であった。供給ロールと中間ロールの速度比が1:1.5以下と小さい場合には、切断ロールの速度比を3:10~3:20の間で変化させても、切断された繊維と切断されない長繊維の混合したものとなり、均一に分散させることが困難である。逆に、速度比が1:4と大きくなると供給ロールと中間ロール間で繊維が完全分離し、これはそのまま切断ロールを通過するため開繊せず均一性が極端に悪くなった。

次の切断繊維長さの測定を行った。ここでは、良好に切断、分散できる条件である1:3:15の各ロール速度比で中間ロールと切断ロールの中心距離を50~150 mmに変化させ、切断された繊維長さの測定を行った。その結果を図18に示す。繊維平均長さは繊維径の違いによってほとんど変化せず、中間

Fig. 18 Fiber length by space between middle roll and breaking roll

Fig. 19 Change of webbing weight

ロールと切断ロールの中心距離にほぼ対応することが確認された。また、切断長さが大きくなるに従って、繊維長さのばらつきの絶対値は大きくなるものの、ばらつきの切断長さに対する割合はむしろ減少することが確認された。

さらに、実際の不織布の製造実験を行った。繊維径 $60\ \mu\text{m}$ の SUS 430 繊維を用い、繊維長さを $100\ \text{mm}$ 、不織布の幅を $500\ \text{mm}$ とした。また、目付け量が 300 および $800\ \text{g/m}^2$ となるようにコンベヤ速度を $0.7\ \text{m/min}$ 、繊維供給量を $107\ \text{g/min}$ 、 $285\ \text{g/min}$ とした。揺動速度はコンベヤ移送方向への均一分散および両端部での均一分散を考慮して、中央部で $4\ \text{m/min}$ 、両端部で $2.3\ \text{m/min}$ とした。目付け量の測定は $500 \times 500\ \text{mm}$ の大きさの不織布を $50 \times 50\ \text{mm}$ に分割し、それぞれの重量測定を行い目付け量へ換算した。目付け量のばらつきの測定結果を図19に示す。本装置での目付け量のばらつきは $\pm 5\%$ 以内であり、均一な不織布が得られることが確認された。また、繊維径 $90\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ についても同様の実験を行った。繊維径 $90\ \mu\text{m}$ の場合にはほぼ同じ結果が得られたが、繊維径 $30\ \mu\text{m}$ と細くなると切断長さ $100\ \text{mm}$ では分散が悪くなり、目付け量のばらつきが大きくなった。しかし、繊維長さを $50\ \text{mm}$

Fig. 20 Appearance of web produced by developed webbing machine

と短くすると均一分散が可能になり、同様の結果が得られた。図20に本装置で得られた換算直径 $60\ \mu\text{m}$ 、目付け量 $800\ \text{g/m}^2$ 、幅 $1\ \text{m}$ の SUS430 のステンレス鋼繊維の不織布の外観を示す。

4. 結 言

コイル材切削法による金属繊維を実用化するために、湯溶性樹脂被覆装置、金属繊維製造装置および洗浄、巻取装置、さらに二次加工装置としての不織布製造装置を開発し、基本的な機能の確認実験を行った。また、各種金属繊維の製造、不織布の製造実験を行った。その結果、本製造装置は実生産に十分対応できる能力を持っていること、不織布製造装置は本方法による金属繊維に適していること、また、本方法および製造装置で多材種の金属繊維が製造できることが確認された。

文 献

- 1) 渡辺輝男；ステンレス鋼極細線の引き抜き、塑性と加工，**9**，211，692 (1978)
- 2) 中川威雄，柳沢章，鈴木清；金属繊維の製造と応用，繊維と工業，**39**，4，121 (1983)
- 3) 中川威雄，鈴木清，植松啓太郎，小山浩幸；びびり振動切削による金属短繊維の製造，精密機械，**17**，11，85 (1981)
- 4) 兼子正生，柳沢章，中川威雄；金属繊維製造のための薄板コイル材切削における繊維溶着現象の検討，精密工学会誌，**61**，5，692 (1995)
- 5) 兼子正生，柳沢章，中川威雄；湯溶性樹脂被覆コイル材切削法によるステンレス鋼繊維の製造，精密工学会誌，**62**，1，110 (1996)