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*

兼子正生** 柳沢章** 中川威雄***

On Fiber Sticking Phenomenon in Coiled Sheet Shaving for Metal Fiber Production

Masao KANEKO, Akira YANAGISAWA and Takeo NAKAGAWA

Compared to existing metal fiber production methods, coiled sheet shaving is simple and efficient. Various kind of metals can be used and fiber diameter can be easily adjusted. But one major disadvantage of the method is that fiber sticking occurs, which makes it difficult to produce fine and uniform fibers, and put the method to practical application. This investigation was conducted to clarify the causes of fiber sticking in coiled sheet shaving. Experiments were performed with metals currently used. The results showed that fiber sticking is mainly caused by metallic adhesion resulting from the heat and pressure produced during shaving. Experiments on method for reducing sticking were also performed.

Key words: metallic fiber, fiber production, sheet shaving, sticking

1. 緒言

金属材料は高分子材料あるいは無機材料と同様に、その幾何学的形状を細径、長尺化することで、繊維としての特性が得られ、金属繊維としてフィルタ、吸音材および種々の用途の繊維多孔質体の素材として、また機能性複合材料の混入繊維として広く用いられている。金属を繊維化する方法としては多くのものが提案されているが、現在、工業的に行われている主な方法は引抜き法¹⁾、熔融紡糸法²⁾、切削法³⁾⁴⁾である。引抜き法は細径で均一な繊維径のものが得られ、多くの金属材料に適用できるが、高コストである。一方、熔融紡糸法は、適応材料が鉛やアルミニウムに限られる。また、切削法の一つであるびりり振動切削法は、短繊維の製造に限定される。切削による長繊維の製造法としては、コイル材切削法とワイヤ切削法があり、コイル材切削法は古くから提案された方法であるが⁵⁾、実際の生産にはワイヤ切削法が用いられている。

コイル材切削法は、ワイヤ切削法に比べ、適応材種、繊維径の微細化、均一化および材料歩どまりの点で優れていると考えられる。しかし、この方法がほとんど活用されないのは、繊維製造時に切削された繊維相互に溶着が生じ、繊維の分離が完全に行われず、本来製造可能な繊維径が得られないことが主な原因である。この現象が防止できれば、コイル材切削法で、細径、均一でかつ多材種の金属繊維が低コストで得られ、広範囲な用途の拡大が期待される。本研究は、多くの利点を持つコイル材切削法を工業的な金属繊維の製造法として確立することを目的として行われた。本報告は、金属繊維の対象材料として考えられる銅、黄銅、アルミニウム、ステンレス鋼を用い、まず溶着現象の把握とその解明を行い、また、いくつかの溶着防止策の検討と、その効果の確認を行った。

2. コイル材切削法と実験条件

図1にコイル材切削法による金属繊維製造法を示す。この方法は、金属薄板をコイル状に巻き、このコイル材の端面を旋削

加工し、金属繊維を得るものである。この方法では、基本的に所定のコイル材巻厚を1回の切込みで切削することが行われ、したがって、コイル材の板厚と巻厚で決まる本数の繊維束が得られる。図2にこの方法で得られた金属繊維の外観とその断面形状の例を示す。断面形状は長方形をしており、その一辺はコイル材の板厚にほぼ一致し、他の一辺は主として工具の送り量で決まる値となる。この繊維断面の底面は工具すくい面に直接触れている面であり、比較的平滑であるが、上面は自由生成面であり、微細な凹凸が見られる。繊維厚さは送り量より大きな

Fig. 1 Schematic illustration of the coiled sheet shaving method

SUS304, $t=0.1\text{mm}$, $V=82\text{m/min}$, $S=25\mu\text{m/rev}$, $\gamma=25^\circ$

Fig. 2 Enlarged surface and cross section of fiber produced by coiled sheet shaving

* 原稿受付 平成6年7月15日

** 正会員 日本工業大学工学部(埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4-1)

*** 正会員 東京大学生産技術研究所(東京都港区六本木7-22-1)

Table 1 Experimental conditions

Cutting tool	High speed steel tool Sintered carbide tool (P 20)
Cutting condition	Rake angle γ : 20-45° Back clearance angle α : 10° Approach angle ϕ : 2° Cutting speed V : 30-92 m/min Feed rate S : 5-40 $\mu\text{m}/\text{rev}$ Width of cut W : 20 mm Coolant for SUS : Water soluble coolant (National, BIG-8)
Work material (JIS)	Stainless steel (SUS 430, SUS 304) Copper (C 1020 R-H) Brass (C 2680 R-1/2 H) Aluminum, and alloy (AlN 30-O, A 5052)
Sheet thickness	$t=0.1, 0.05, (0.01)$ mm

値となるが、これはせん断角によって決まり、切削条件によって変化する。両側面はコイル材の圧延面であり、溶着現象は隣接する繊維の圧延面の上下角部で生じている。

供試材としてはステンレス鋼 (SUS 304, SUS 430)、銅 (無酸素銅)、黄銅 (Cu65-Zn35)、アルミニウム (純アルミニウム、Al-Mg 合金) の板厚 0.05, 0.1 mm のものを用い、ステンレス鋼は超硬工具を用いた湿式切削、その他の供試材は高速度工具鋼を用いて乾式切削を行った。これらの切削条件等をまとめたものを表 1 に示す。

実験装置は普通旋盤の主軸チャック部を取り外し、新たに巻付け軸を取り付けたものを用いた。巻付け軸は直径 150 mm、またコイル材の巻厚は 20 mm とした。したがって、切削速度はコイル材の内周と外周とで $\pm 13\%$ 程度の差異を生ずるが、これらの平均値すなわち巻厚中央部での値を用いた。薄板の巻付けは旋盤の回転によって行いが、適正な巻付張力を得るためのブレーキ装置をコイル素材支持軸に取り付けた。巻付張力が不十分であると切削時に金属薄板の層間での変形、外周でのめくれが生じるので、それを防止する条件を調べ、材質、板厚に応じて約 100~200 N・m の範囲でブレーキトルクを変えコイル材の巻付けを行った。

3. 切削実験と溶着現象

3.1 各材種の切削実験

まず、板厚 0.1 mm の各材種を用い、溶着の少ない繊維がどのような条件で得られるかを調べた。切削速度とすくい角を変化させ、目視にて溶着が最も少ないと思われる条件を求めた。

各材種の生成繊維は、いずれも単一繊維と溶着繊維の混在したものとなり、黄銅では比較的溶着現象の少ない条件が得られたが、銅、アルミニウム合金は、黄銅よりやや大きな溶着を示し、純アルミニウムはさらに溶着の少ない条件を求めることが困難であった。とくにステンレス鋼では、湿式切削にもかかわらず、溶着を低減させることが困難で、繊維としての形態が得にくいことが確認できた。図 3 は溶着の最も少なかった切削条件で得られた繊維の外観とその断面を示したものである。

この繊維溶着の程度を定量的に確認するため繊維溶着率 R_s を、本来生成されるべき繊維本数 (コイル材巻数に相当) を N 、実際に生成された繊維本数を n とした時、 $R_s = \{(N-n)/N\} \times 100(\%)$ と定義し、測定した。図 4 に前述の実験で得られた各繊維の溶着率の測定結果を示す。溶着率は比較的大きなばらつきを示すが、その平均値は目視の結果とほぼ一致し、黄

Fig. 3 General view and cross section of metal fibers produced in the optimal conditions

Fig. 4 Fiber sticking ratio of different kinds of metal fibers

Fig. 5 Appearance of fiber sticking

銅、銅の場合には平均約 18%, 26% と少なく、ステンレス鋼は 43% 程度と大きな値となった。純アルミニウムはステンレス鋼に次ぐ大きな値を、アルミニウム合金はこの中間の値を示した。ステンレス鋼の場合、工具寿命の点から SUS 304 ではすくい角を 25° 、SUS 430 では 32° と他の材種に比べ、小さくする必要があり、このことも溶着率が大きくなった一因と考えられる。さらに、このほかニッケル、チタン、ハステロイ等の材種についても同様の実験を行ったが、繊維溶着率はステンレス鋼と同様に 40% 以上と大きく、溶着の少ない繊維の製造が困難であった。

図 5 に溶着繊維の自由生成面と断面の例を示す。溶着断面の観察から、溶着は繊維の長方形断面の上下角部で生じている。このことから、溶着は切削による板厚方向の変形と、その時の温度条件が基本的な要因と考えられ、溶着率の差異は、材種の

Fig. 6 Effects of rake angle, cutting speed, and sheet thickness on fiber sticking ratio

Fig. 7 Relation between sticking ratio and cutting time

展延性の違いによる変形の大小，材種による凝着力の大小，熱伝導率の差異による温度上昇の違いなどが相互に影響していると考えられる．また，溶着は工具接触面側に比べ自由生成面側により多く発生することが確認された．

3.2 切削条件と溶着現象

ここでは，各材種を用い，工具すくい角，切削速度および板厚の変化が溶着率に与える影響を検討した．すくい角，切削速度，板厚と溶着率の関係を図6に示す．切削条件のうち，すくい角，送り量は板厚方向の変形に関与すると考えられるが，すくい角の影響は顕著で，すくい角が大きい程，溶着率は減少する．しかし，すくい角を過大にすると，刃物角が小さくなるため，刃先の急速摩耗やびびりが発生する．最も溶着率の低い条件として黄銅，銅の場合，すくい角 38° ，アルミニウムで 45° ，SUS 304 ステンレス鋼では 30° となった．また，同一すくい角で溶着率を比較すると，例えば 30° では，純アルミニウムが最も高い値を示し，ステンレス鋼，アルミニウム合金，銅はほぼ同じ値，黄銅は最も低い値となった．これは材種による溶着傾向の差異を示していると思われる．

図7に SUS 304 ステンレス鋼のすくい角を変化させた場合の，切削時間の経過と溶着率の変化の関係を示す．すくい角を 42° と大きくすると，切削の経過と共に切れ刃摩耗が短時間で進行し，溶着現象の急激な増加が見られる．また，ステンレス鋼以外の材種では，アルミニウムでは 55° ，銅，黄銅では 42° でびびりが発生し，繊維の切断が生じた．切削速度の溶着率に与える影響は必ずしも顕著ではないが，ステンレス鋼においては切削速度が 91 m/min の場合，溶着率が大きく増加している．これは切削速度の上昇による，発熱量の増加が主な原因と考えられる．また，板厚が減少すると溶着率が増加することが確認され，特にアルミニウムでその傾向は顕著に認められた．これは板厚が小さい場合，生成する繊維は細径となり，繊維の剛性が低下するため，わずかな溶着力でも分離し難くなるため

Fig. 8 Sticking at boundary of sheets

と考えられる．このほか，送り量の影響についても調べたが，工具送り量の増加と共に溶着率はわずかに増加するものの，実験の範囲内ではその影響は大きくはなかった．

4. 繊維溶着要因の検討

4.1 積層板切削による加圧力の発生

コイル材切削法の特徴的な条件は薄板の緊密な積層状態による切削であることから，積層板切削によって生じる板材の境界面がどのような状態になるかを観察した．図8は厚さ2 mm の銅板を2枚重ね，すくい角 25° ，切込み 50 μ m，切削速度 62 m/min で，長手方向に5回の繰返し切削により生じた板厚方向への幅広がり，切りくずの自由生成面の境界部を示したものである．拘束されない両外側では当然自由な幅広がりを生じるが，板厚境界部分では材料相互の拘束により幅広がりが生じない．このため，拘束される境界部分では板材に圧縮応力が作用している．この幅広がりはすくい角が小さい程大きくなり，より大きな応力が発生し，溶着の主因をなすと考えられる．この溶着は切削による新生面が生じる上下角部すなわち工具逃げ面側（次工程での切りくず自由生成面側）と工具すくい面側の2か所に発生し，材料相互の拘束力の大きな逃げ面側がより大

Fig. 9 Specimen for adhesion test

Fig. 10 Effects of compressive force and temperature on adhesive strength

きい。さらに、切りくず自由生成面側では境界部に幅方向の塑性変形による凹凸が認められ、この変形部分にはわずかな相互すべりが生じているはずであり、これも溶着を助長すると考えられる。これらの現象が溶着の要因となり、また、工具接触面より、自由生成面の溶着が生じやすい原因となっていると考えられる。

4.2 被削材温度上昇の影響

繊維溶着現象と被削材温度上昇の関係を調べるために、薄板材の加熱加圧による接合実験を行い、その接合部の強度測定を行った。接合実験は図9に示すように10×100×0.1 mmの2枚の薄板を10 mm重ね、ホットプレスで30秒間加圧し、接合した部分を図中矢印方向に引き剥がすに要する力 F_1 を測定した。

各材種の接合強度の測定結果を図10に示す。各材種とも加圧力により接合強度はわずかに増加するが、加圧力よりも加熱温度の影響を大きく受け、温度の上昇と共に接合力は大きくなる。加圧力5 MPaにおいて銅の場合、温度200°C、黄銅では400°C、ステンレス鋼では600°Cから接合力が発現し、銅では300°C以上、黄銅は500°C以上、ステンレス鋼(SUS 304)では700°C以上で接合強度の著しい増加が見られた。また、アルミニウムの場合、他の材種に比較して接合強度は低い値であったが、200~300°Cで同様の接合現象が見られた。この加熱加圧による接合現象は、加熱加圧による延性の向上と金属接触の増加、温度上昇による材料相互の凝着力の増加によるものの⁹⁾と思われるが、加圧下で比較的低温の加熱条件でも接合力が発生することが確認された。

次に実際のコイル材切削を行って被削材温度上昇による繊維溶着率の変化について調べた。コイル材板厚0.1 mmを用い、切削による刃先部温度の上昇を極力抑えるために切削速度を2 m/minと低速とし、送り量は20 μ m/rev一定とした。この実験では、あらかじめ巻付け軸に巻いたコイル材を電気炉を用いて加熱し、所定温度で30分間保持したものを旋盤チャックに取り付け、接触式表面温度計で被削材温度を測定した後切削を

Fig. 11 Relation between sticking ratio and material temperature

行った。

各材種の切削温度による溶着率の変化を図11に、また図12に銅の溶着状態の変化を示す。銅の場合150°C、黄銅で200°C、アルミニウムでは70°C、SUS 304 ステンレス鋼では700°C以上になると溶着現象が急激に顕著になり、数本から数十本の繊維が溶着した幅広い切りくずとなり、繊維としての形態が得られないことが確認できた。これらの温度値はステンレス鋼を除いて、前述の圧接実験結果に比較して低い値となっているが、圧接実験では接合に新生面が関与していないのに対して、実際の切削実験では新生面が溶着に関与しているためと考えられる。これらのことから、コイル材切削法における繊維の溶着は、繊維生成の際、切削により新生面を露出した金属接触が生じ、さらに幅広がり拘束による加圧力と切削による温度上昇により金属接合現象が生じることが主要要因で、このほか、自由生成面の繊維境界部での板厚方向の凹凸状塑性変形による機械的絡み合いが寄与しているものと思われる。

5. 溶着回避の条件

5.1 低温切削の効果

溶着現象を回避するためには、切削時に発生する繊維間の加

 Material: Copper, $t=0.1$ mm, $V=2$ m/min, $S=20$ μ m/rev

Fig. 12 Variation of fiber sticking under different material temperatures

Fig. 13 Sticking ratio of low temperature shaving

Fig. 14 Coil winding of polymer film laminated sheets

Fig. 15 Sticking ratio of metal fibers produced by polymer film laminated coil

圧力と発熱を減らし、かつ繊維間を油膜等で隔離する対策をとることが有効と考えられる。このうち加圧力は切削条件で決まり、ある程度避け得ないと考えられるので、ここではその他の対策を検討することとした。

切削時の被削材温度が板相互の溶着現象に顕著に影響することから、ここでは切削中の刃先近傍の温度上昇を極力抑えるために被削材を冷却し、低温切削を行って、繊維相互の溶着現象が低減する度合いの確認を行った。被削材は前述の高温実験と同様、あらかじめコイル材を巻付け軸に巻き、液体窒素で30分ほど冷却したものを旋盤チャックに取り付けた。このとき、CA熱電対を巻厚中央部に巻き込み被削材温度を測定し、所定の温度になった後切削した。図13に被削材の温度と溶着率の関係を示す。低温切削による溶着現象の低減が著しく、被削材温度が -40°C において、SUS304では約21%、銅で約8%、黄銅で約2%、アルミニウムでは約16%まで溶着率が低下した。

5.2 油膜介在の効果

切削油剤の介在は、薄板間を油膜で隔離すると共に、冷却作用と潤滑作用により溶着防止の働きを持っていると考えられる。溶着回避を目的として、薄板に不水溶性切削油剤である不活性形切削油（塩素系極圧添加剤配合、Mobil, VACMUL B2）を塗布したコイル材を用い、繊維製造実験を行った。その結果、溶着率はアルミニウムで約38%、銅で約20%、黄銅で約12%、ステンレス鋼で41%とわずか2~3%減少するのみであった。この理由は巻付け張力により油剤が排除され、残存油膜が薄くなり、溶着が生じる切削時の金属接触面に切削油剤が流れ込み難いことによっていると考えられる。また、この方法では粘度の高い切削油剤を用いる必要が生じるが、このことは逆に微細な繊維に付着した切削油剤の除去が困難であるという実用上の欠点も認められた。

5.3 プラスチックフィルム介在の効果

次に、金属薄板の層間にプラスチックフィルムを積層し、金属繊維相互の溶着現象の低減の効果について検討を行った。図14にプラスチック積層方法を示す。板厚0.1mmの黄銅、ステンレス鋼を用い、積層の組合せとしては黄銅、ステンレス鋼とポリエチレン（PE）フィルム（厚さ0.03mm）、ステンレス鋼と水溶性ポリビニルアルコール（PVAL）フィルム（厚さ0.03mm）とした。切削条件として、プラスチックと金属が共に繊維形状の得られるすくい角を採用した。図15にプラスチックフィルム介在の効果を示す。どの組合せでも溶着現象は大幅に低下し、プラスチックと金属の繊維が均一に混合した繊維束が得られた。プラスチックを膜材とした場合、プラスチッ

クの厚みが0.03mmと薄い場合でも溶着率を3~8%まで低減できた。

前述の切削油剤のような流動性のある介在物では、溶着防止効果はほとんど得られなかったが、プラスチックのような固体膜材の介在により繊維の溶着を著しく防止できる効果のあることが確認された。これはフィルムの厚さに相当するすきまが切削時にも維持されるため、切削による材料の幅広がりで見ずる薄板相互の接触、あるいは自由生成面形成時の金属接触が生じないためであると思われる。特にPVALフィルムは水溶性を利用して除去することが可能であることが確認され、実用的にも有効な方法であると思われる。

6. 結 言

金属薄板をコイル状に巻き、その端面を旋削加工することにより金属繊維を得るコイル材切削法において、各材種による繊維製造実験を行い繊維相互の溶着現象を調べた。また、溶着の要因を実験的に確認し、その防止法を検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 材種によって繊維相互の溶着率は大きく異なり、銅、黄銅では20~25%であるが、純アルミニウム、ステンレス鋼では45%と大きくなる。
- (2) 溶着率は工具すくい角の影響を大きく受け、すくい角を大きくすると溶着率が減少する。
- (3) 板厚は小である程溶着が多いが、切削速度、送り量の溶着への影響は少ない。
- (4) 溶着現象は幅広がり拘束による圧縮応力下の、温度の上昇による新生面の金属接合現象である。
- (5) プラスチック分離膜の介在により溶着は回避可能である。

参 考 文 献

- 1) 渡辺輝夫：ステンレス鋼極細線の引き抜き、塑性と加工，19，211（1978）692。
- 2) 幸田成康：融液から直接フィラメントを作る話，金属，50，5（1980）2。
- 3) 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（1983）121。
- 4) 中川威雄，鈴木 清，植松哲太郎，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（1981）85。
- 5) R. Bachmann and E. Thur：Patentschrift，Schweiz，No. 251460，（1946）。
- 6) 竹山秀彦：切削加工，丸善，（1989）113。