軽量部材加工用のダイヤモンドコーティッド工具

羽 生 博 之^a

^a オーエスジー(株) (〒442-8544 愛知県豊川市本野ヶ原 1-15)

Diamond Coated Tools for Machining of Lightweight Materials

Hiroyuki HANYU^a

^a OSG CORPORATION(1-15, Honnogahara, Toyokawa-shi, Aichi 442-8544)

Keywords : Diamond, Coating, Cutting Tool

1. はじめに

近年、環境・省エネルギーに配慮した軽量部材の用途が拡大している。軽量化、低燃費化のため高シリコンアルミニウム合金やCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) が多く採用され始めているが、これらは難削材であり、従来工具では切削が困難であった。これらの難削材に対し高能率、長寿命加工を実現するため、耐摩耗性や耐溶着性に優れたダイヤモンドコーティングの切削工具への応用が期待されてきた。しかしながら、最も過酷な条件にて使用される切削工具においてダイヤモンドコーティングを使用する場合には、母材表面とダイヤモンドとの密着性確保が困難であり、突然の欠けやはく離により性能が安定しないといった問題点があった。また、ダイヤモンド被膜は通常その表面に、大きく成長したダイヤモンド結晶の凹凸を持つため、その凹凸が邪魔をして精密な仕上げ加工や、ドライ、セミドライ切削加工などへの適用には問題があった。本稿ではダイヤモンドコーティングが軽量部材の加工用の切削工具として使用されるために行われてきた開発と、それらの切削工具を用いた様々な加工事例をまとめた。

2. ダイヤモンドコーティッド工具のための基材と表面処理

ダイヤモンドコーティングは、処理温度が通常 800℃～900℃程度で処理されるため、焼入れ、焼戻し処理を行う工具用鋼材を選定することは不可能である。セラミックスの窒化ケイ素は、熱膨張係数がダイヤモンドに近く、コーティング後に発生する残留応力が低いため、ある程度の密着性を確保することが可能であり、切削工具としてある程度使用されてきている。

ダイヤモンドコーティッド工具の基材として一般的に使用されているのは、WC-Co 超硬合金である。しかしながら、超硬合金の結合材として使用されているコバルトが、コーティング時にグラファイトなどの不定形炭素の形成を促進させる触媒として働き、界面に強度の低い層を形成させてしま

うことで、密着性を得ることができなかった。これを解決するために、表面からコバルトを除去するなどの密着性確保のための特殊な前処理が開発された。

現状の超硬合金母材表面の前処理内容は、大半では下記のような内容となっていると思われる。

- ・ダイヤモンド被膜と超硬合金母材表面の間に、投錨効果による密着性を与えるために母材表面に凹凸を形成する処理。
- ・ダイヤモンド形成を阻害するコバルトを超硬母材の表層から除去する処理
- ・ダイヤモンド結晶核の初期形成を促進させ、成膜初期の核発生濃度を向上させるための表面核付け処理

これらの処理内容をそれぞれ最適化することで、密着性の良いダイヤモンドコーティングを超硬母材表面にも形成することが可能となっている。

さらには、ダイヤモンドコーティングに適した専用の工具形状を設定し、耐はく離性を向上させることも行われた。このようにして、きわめて長寿命の切削工具が開発されてきた。

3. ダイヤモンド被膜の微結晶化と被膜特性

ダイヤモンドコーティングを工具として使用した場合の欠点として、ダイヤモンドの結晶が柱状に成長し、表面で大きな自形面を形成するため、被膜表面の凹凸が大きくなるという点が上げられる。このような表面では、切削工具として使用した場合は、ダイヤモンド結晶の凹凸が加工面側に転写されてしまい、仕上げ加工としての品位を下げてしまうことになる。

このため、平滑な表面を形成するために、コーティング後に刃先被膜を機械的に研磨する試みが行われたが、エンドミルなどのねじれた刃をもつ切削工具では、刃先のみ均一な研磨加工は非常に困難であった。

これを解決する手段として、結晶のサイズを小さくする試みがなされ、サブミクロンサイズの結晶からなるダイヤモンドが提案されてきたが、当初は不定形の炭素分を含み結晶性が悪くなる場合が多く、耐摩耗性に劣り、工具としての性能

を損なう場合があった。

そこで結晶性のよい条件にて成膜した微結晶を、多層構造で組み合わせることで、表面を平滑に保ったまま、結晶性が良く耐摩耗性に優れる被膜を形成することにした^{1),2)}。

図1にこのようにして形成した微結晶被膜と従来の被膜の表面写真示す。表面に現れる結晶のサイズが小さく、平滑な表面状態が保たれているのがわかる。

さらに多層構造により、粗粒組織で観察される母材から表

図1 ダイヤモンド被膜の表面状態
(a)一般的な粗粒ダイヤモンド被膜の表面
(b)開発した微結晶ダイヤモンド被膜の表面

図2 被膜靱性値の比較
実験値とシミュレーションより得られる荷重-クラック進展長さの比較

面まで形成される大きな柱状組織を細かく分断したことで、粒界に沿って進展しやすいクラックに対する抵抗性が増加し、被膜の靱性を向上させることができた。図2に被膜靱性の測定結果を示す。靱性の測定方法としては神谷らの方法を用いた³⁾。この方法では、被膜に母材から突き出た部分を形成させ、被膜の端面にノッチを形成し、ノッチの端部に荷重を与えてクラックを進展させる。このときの荷重とクラックの関係記録し、数値シミュレーションから算出した値と比較することで、クラックの進展抵抗性を評価するものである。

この結果では従来の粗粒被膜と比較し、2倍の靱性向上が確認できた⁴⁾。

4. 微結晶ダイヤモンド被膜の示す性能

4. 1 グラファイト切削加工

この微結晶被膜の実際の耐摩耗性の確認として、粗粒ダイヤモンドと微結晶ダイヤモンド被膜を比較切削した。図3にボールノーズエンドミルを使用して、グラファイトの切削試験を行ったときのボール部の刃先二番面の摩耗曲線を示す。この試験においては、微結晶ダイヤモンドは粗粒ダイヤモンドと同等の耐摩耗性を確認することができ、微結晶ダイヤモンドの耐摩耗性は確保できていることを確認できた。

4. 2 アルミニウム合金加工

また、コーティング表面が平滑となったことで、被削材の面粗さを向上させることができた。図4にアルミニウムA7075を切削したときの被削材面粗さの比較データを示す。通常の粗粒ダイヤモンドと比較して非常に粗さが小さく、ノンコート超硬製工具と同等の面粗さを呈しており、仕上げ加工へのダイヤモンドコーティングの使用が可能となった。

また、粗粒のダイヤモンドでは、結晶の間にアルミニウムが機械的にこすり付けられて発生する溶着が観察されたが、微結晶ダイヤモンドではこの溶着を大部分防止できることがわかった。

耐溶着性向上の確認のため実際に切削試験を試みた。外部からの給油でドリルの穴あけ加工を行い、給油は極少潤滑方

図3 グラファイト切削時の摩耗状態比較

<切削条件>

被削材： グラファイト(ショア硬さ100)
工具： ボールエンドミル R1.5 × 3 mm
切削方法： 微加工
切り込み量： $a_p \times a_e = 0.18 \times 0.1$ mm
 a_p = 軸方向切り込み量
 a_e = 径方向切り込み量
切削速度： 38000 min^{-1}
送り速度： 6000 mm/min
冷却： ドライ

式で、ミストにて給油した。図5に結果を示す。ここでは、従来の粗粒ダイヤモンドは2160穴加工後折損により寿命となった。ノンコートは447穴の加工数と比較すれば良好な結果を示したが、図6のドリル先端写真状態が示すように、粗粒ダイヤモンドのドリル先端溝部には大量に溶着が発生したのに対し、微結晶ダイヤモンドはコーナー部分にわずかに溶着が発生したもの、溝にはほとんど溶着を観察せず、9000穴以上の加工を実現し、良好な耐溶着性能および切削性能を示した⁵⁾。

図4 被加工面の面粗さ比較

<切削条件>

被削材: A7075
 工具: 2枚刃スクエアエンドミル, φ10 mm
 方法: 側面切削
 切り込み: $ap \times ae = 0.1 \times 10 \text{ mm}$
 ap = 軸方向の切り込み深さ
 ae = 径方向の切り込み深さ
 切削速度: 12800 min^{-1}
 送り速度: 1280 mm/min
 冷却: 水溶性切削油

図5 極少潤滑における異なるタイプのドリルでのADC12の穴あけ性能比較

<切削条件>

被削材: ADC12
 ドリル径: φ6
 加工方法: 穴あけ加工
 穴深さ: 18 mm
 切削速度: 4500 min^{-1}
 送り速度: 540 mm/min
 冷却: Minimum Quantity of Lubricant 10 mL/h

4.3 MMC加工

さらに、上述したように被膜の靱性が向上しているため、非常に難削材である金属基複合材料(Metal Matrix Composite; MMC)の切削において良好な結果を得ることもできた。

金属基複合材料は組織中に非常に硬いSiCなどの粒子が散在する材料である。図7に被削材として使用したSiC系金属基複合材料合金の組織写真を示すが、この組織には最大50 μm程度のSiC粒子が散在しているのが確認される。この材料のエンドミル切削をノンコート品および膜厚が20 μmの粗粒ダイヤモンドコーティング、微結晶コーティングにておこなった。

工具の寿命判断に関しては工具刃先の摩耗量が0.1 mmに達した場合か、もしくはコーティングの大規模な欠けおよび剥離が発生した時点で、その工具の耐久限界とした。図8に切削条件および切削試験の結果を示す。ノンコーティング

図6 ドリル先端の外観

(a) 2000穴切削後の粗粒ダイヤモンドコーティッドドリル
 (b) 9216穴切削後の微結晶ダイヤモンドコーティッドドリル

図7 SiC系金属基複合材料組織拡大写真

図8 MMC材 切削耐久比較

<切削条件>

被削材: 30%SiC MMC
 工具: 2枚刃スクエアエンドミル, φ6
 切り込み深さ: $0.15 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$
 切削速度: 2650 min^{-1}
 送り速度: 636 mm/min
 冷却: 水溶性

の超硬エンドミルは切削初期から大きく摩耗し、これらはわずか0.07 mの切削長で摩耗幅が0.1 mmに達するまでに至った。その後切削を継続したところ、わずか0.35 mの切削距離にて図9 (a)に示すようにコーナー部がなくなるほど大きく摩耗し継続使用不可となってしまった。

これに対して粗粒ダイヤモンドコーティングエンドミルはノンコート品の40倍以上の耐久を、微結晶エンドミルはさらにその4倍もの耐久性を示した。図9 (b)は3.13 m切削後の粗粒ダイヤモンドの外観写真であるが、コーナー部のコーティングがはく離し母材が露出してしまったのに対して、微結晶ダイヤモンドコーティングでは図9 (c)に示した11.7 m切削後の写真のように、粗粒ダイヤモンドコーティングのさらに約4倍もの耐久を示し、12 m程度の距離が切削可能であった。コーナー部分の刃先のごく一部が摩耗しているのみであることがわかる。

図10には切削試験後の粗粒ダイヤモンドコーティングと微結晶ダイヤモンドコーティング品の切削刃先の電子顕微鏡による拡大写真を示す。図10 (a)は粗粒ダイヤモンドコーティング品、図10 (b)は微結晶ダイヤモンドのものである。図10 (a)の粗粒ダイヤモンドコーティングがはく離して母材が露出してしまっているのに対し、図10 (b)の微結晶ダイヤモンドコーティングは定常摩耗を呈しているのがわかる。この差はコーティングの結晶が微細化され高靱化されたことで、金属基複合材料の切削における大きな硬質粒子との衝突時にコーティングの表面に微小なき裂が進展し、表面の一部が欠け落ちる現象を効果的に抑制し、コーティングの破壊が防止できた結果であると考えている。

図9 エンドミルコーナー部拡大写真(底刃側より観察)

図10 刃先損耗部拡大 電子顕微鏡

このように適した工具形状に微結晶ダイヤモンドコーティングを施すことにより、従来工具では不可能であった加工を可能とすることができた。

4.4 CFRP 切削と使用工具

航空機や自動車の軽量化、省エネ化の推進のため、機体構造材としてCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) の使用が進められてきているが、炭素繊維の持つ硬さと炭素繊維シートの積層構造が切削を非常に困難なものとしている。具体的な問題点としては、切削時に生じる炭素繊維を含んだ切粉が非常に硬いことがあげられる。このため通常の超硬工具などでは、摩耗の進行が極めて早く加工が非常に困難となる。また、炭素繊維シートの積層構造を樹脂で固めた組織となっているため、この切削を行ったときに、デラミネーションや、バリが発生する点である。これらを解決するためには、ダイヤモンドコーティングと最適化された工具形状を組み合わせたCFRP専用加工工具を使用することが必要である⁷⁾。

実際の加工を考えると、部品加工ではトリミング(輪郭削り)とファスナーを通すための穴あけが主となるが、ここで生じやすい品質上の不具合の代表的なものがデラミネーションである。図11に示されるように、積層された繊維が穴の出入り口やトリミング時の端面ではく離することで、図11 (a)のような表層はく離や盛り上がり、および図11 (b)のような毛羽立ち、炭素繊維の切断不良など様々な形態になる。

炭素繊維は高強度であり、この繊維の束を切断しようとすると大きな切削抵抗がかかり、発熱をもともなう。またこの繊維の束を取り巻くのは樹脂であるため、無理な力が加わると、上述のような不具合が生じてしまう。また加工される部材は薄肉で三次元曲面を持つものが多いので保持が難しい場合が多い。不安定な保持状態のまま、加工時に振動やスプリングバックが生じれば不具合につながることも多い。このため、穴あけにし、トリミングにし、切削抵抗が低く、繊維を切断するためにシャープな刃と高い耐磨耗性を備え、切削抵抗の分散に配慮した、専用工具が必要となる。

(a) 盛り上がりとむしれ

(b) 毛羽立ち

図11 CFRP 加工で観察される不具合例

これらは工具選定が不適切だと、加工された部材の品質が全く満足できない。またこれは切削条件の変更などで改善できるものでもないのが実情である。工具選定には最新の注意を払うことが必要とされる。

4. 4. 1 CFRP 穴加工用工具

現在のところ CFRP 加工用ドリルには、図 12 のような 2 種類が主なものとなっている。穴の入り口側をカウンタシンク加工する場合、出口側のデラミネーションの抑制には図 12 (b) に示すような強ねじれ W アングルドリルが効果的である。図 13 (a) に示すように、貫通直前の CFRP 最表層の削り残し部分の強度よりもスラスト力が上回ったとき、スラスト力を支えきれずに CFRP がはく離する。そこで、図 13 (b) のように削り残しの断面三角形の軸に平行な辺を長くし、デラミネーションを起きにくくしたのが W アングルドリルである。このような形状にすることで、切削抵抗の反力を軸方向から半径方向に分散させることができ、デラミネーションを防止できる。

さらに薄板も含め、穴出入り口両方のデラミネーションを抑制したい場合には、図 12 (a) のような先端角に多段階の変化を持たせた直溝ドリルが効果的となっている。これは穴の出入り口で、ドリル切れ刃がファイバーの層に対して垂直に近い角度で切断することで、入り口でのファイバーの盛り上がりや出口でのデラミネーションの発生を抑えることができる。これは、ねじれ溝ドリルは、加工能率などを含めると出口側で抜群の効果をもたらすが、入り口側ではファイバーを持ち上げるように作用してしまうためである。これらドリルを用途によって使い分けることが望ましい。

このようにして開発された W アングルドリルを用いて切削耐久性評価を行った結果を図 14 に示す。ここに示した加工条件においては、平均穴数で 300 穴以上、総切削長でおよそ 5 m であり、他社ダイヤモンドドリルの 10 倍以上、また

PCD ドリルに比べても 1. 6 倍～2 倍の非常に優れた穴あけ性能をダブルアングルダイヤモンドドリルが示した。

4. 4. 2 CFRP トリミング用工具

トリミング用工具にも、図 15 のような様々な形状からわかるように、CFRP 加工ならではの特殊な工夫が必要である。金属加工で一般的に用いられている右刃右ねじれのエンドミルでは、切削抵抗の反力が CFRP 上面表層をめくり上げてしまい、デラミネーションや毛羽立ちが発生する。そこで、図 16 に示すように、一本のエンドミルに、左ねじれで上面表層を母材に押し付ける刃と、右ねじれで仮面側を引き上げるように作用させる刃を持たせた。これが図 15 ①のヘリングボンカッターである。

図 17 にこの工具で加工した被断面を示すが、毛羽立ちは一切発生しておらず、また切削抵抗が低くてビブリの発生がない、滑らかできれいな被断面が得られている。

このヘリングボンカッターの発想を発展させ、多刃タイプにしたのが図 15 ②③のニック付多刃ルータータイプであ

図 13 ドリル貫通直前の削り残しと切削抵抗の反力

(a) 先端角 120° 標準ドリル

軸方向の力が強く、デラミネーションが発生する

(b) 先端角 120° × 30° ダブルアングルドリル

切削抵抗の反力を軸方向から半径方向に分散させる

図 12 CFRP 加工用ドリルの例

ダブルアングルドリルの先端形状

図 14 CFRP 穴あけ加工におけるドリル耐久比較

<切削条件>

被削材： CFRP t17.1 mm
 工具： ドリル直径 $\phi 6.375$ mm
 切削速度： 3000 min^{-1}
 送り量： 228 mm/min.
 冷却： ドライ
 寿命限界： デラミネーション半径 1 mm 以下

る。②はファイピッチクロスニッケルター、③はコースピッチクロスニッケルターで、ともに右ねじれ浅溝多刃形状にクロスして左ねじれ溝を設け、菱形刃を千鳥掛けに多数配列したものである。そのため高能率で長寿命な加工が可能で、薄板から厚板まで対応できる。ニッケル付だが粗加工用ではなく、高能率に良好な仕上げ面が得られる。

④は綾目ルーターで、浅く交差したV字溝によって構成された鋭い刃が多数配列されていて、切り屑排出能がやや劣るので切込みを大きくすることには向かないが、薄板から厚板、ハニカム材などの加工に向いている。

⑤は仕上げ用に用いられる多刃カッターで、被削材の保持剛性が高い場合に、良好な仕上げ面を得るために使用される。また面取りなどにも使用される。

いずれの場合も機械と被削材の保持剛性、切り込み量などによって使い分けられる。

以上のように、CFRP加工では、工具摩耗が急速に進行するので、工具材質にはダイヤモンドコーティングは必須と言える。同時に、上述のように独特の切れ刃形状が重要であ

(a)被削面を上面から見た様子

(b)被削面を正面から見た様子

図 17 ヘリリングボーンカッターで加工した CFRP 板の面品位

図 15 CFRP 加工用ルーター

- ①ヘリリングボーンカッター
- ②ファインピッチクロスニッケルター
- ③コースピッチクロスニッケルター
- ④綾目ルーター
- ⑤仕上げ用多刃ルーター

図 16 ヘリリングボーンカッターの切削機構

る。ダイヤモンドコーティングは、ねじれ角やねじれ方向、スクイ角、刃数など、工具形状の自由度が高く、最適化することが可能であるため、結果として優れた費用対効果を示すことができている。

5. まとめ

本稿では弊社のダイヤモンドコーティング工具の開発経緯と、その軽量部材の加工に対する性能に関して述べた。

ダイヤモンドコーティング工具は、密着性の向上や専用形状の最適化、微結晶化による耐溶着性の向上や高靱化によって、従来困難であった様々な加工に適用可能となった。今後はさらに様々な用途へと広げて行きたいと考えている。特に今後の用途拡大が期待される CFRP の加工に対して柔軟に対応できるよう、性能、コストの両面から開発を進めてゆきたいと考えている。

(Received January 17, 2012)

文 献

- 1) H. Hanyu, S. Kamiya, Y. Murakami, M. Saka ; *Surf. Coat. Technol.*, **169-170** 258 (2003).
- 2) H. Hanyu ; Japan Patent 3477162 (2003).
- 3) S. Kamiya, H. Kimura, M. Saka, H. Abe ; *Thin Solid Films*, **389**, 180 (2001).
- 4) H. Hanyu, S. Kamiya, H. Odagi, Y. Murakami, M. Saka ; *Thin Solid Films*, **413**, 139 (2002).
- 5) H. Hanyu, S. Kamiya, Y. Murakami, M. Saka ; *Surf. Coat. Technol.*, **173-174**, 992 (2003).
- 6) H. Hanyu, S. Kamiya, Y. Murakami, Y. Kondoh ; *Surf. Coat. Technol.*, **200**, 1137 (2005).
- 7) 滝川義博 ; 機械と工具, **2009**年3月号, 16, (2009).