小特集Ⅰ. 切削工具における表面改質技術の現状(1)

ダイヤモンドコーティングによる切削工具の現状

神 田 一 隆*

The Present State of The Diamond Coated Cutting Tools

Kazutaka KANDA*

Key Words : Diamond, Diamond Coating, Cutting Tools, Twist Drills, End Mills

ダイヤモンドは現存物質中で最高の硬度を持つことから、理想的な非鉄材料加工用の薄膜材料と考えられ、切削工具への適用を目指して活発な研究が重ねられた。その結果、ダイヤモンド膜の付着強度の改善や生産技術の改善が進み、現在では切削工具として重要な位置を占めるまでに育った。

1. はじめに

ダイヤモンドは宝石のイメージから何かと人々の関心を引くが、工業的には古くから研磨、研削、切断、切削などの加工に用いられ、現在では近代産業を支える高能率加工や超精密加工に欠かせない材料となっている。従来より切削工具用に粉末ダイヤモンドを焼結した焼結ダイヤモンドが多く用いられているが、その硬さゆえ複雑な形状を持つ工具への適用に制限があった。ダイヤモンドコーティングは気相法によりダイヤモンドを膜として工具表面に被覆する技術であり、高圧合成ダイヤモンドに較べ歴史は浅いが、切削工具として幅広い用途が予見されたため、世界中で活発な研究が行われた。その結果、現在では図1に示されるようなダイヤモンドコーティング工具が実用化¹⁾され、自動車部品、家電部品、金型、航空機部品などの幅広い加工の分野で使用されている。

用途から見れば、ダイヤモンドコーティング工具はアルミニウム合金や銅合金などの非鉄材料の切削に多く用いられており、特に高シリコンアル

ミニウム合金やガラス繊維強化プラスチック(GFRP)のようにマトリクス中に硬質材料を含む難削新素材の加工、あるいはC/Cコンポジット、セラミックスの成形体および仮焼体、黒鉛などのように工具摩耗の速い材料の加工に威力を発揮している。

本稿では、それらのダイヤモンドコーティング工具の現状をさまざまな適用例を通して紹介する。

2. ダイヤモンドの合成方法と膜質

最近、ダイヤモンドコーティングとダイヤモンド

図1 ダイヤモンドコーティング工具

* ㈱不二越 (〒930-8511 富山県富山市不二越本町1-1-1)
NACHI-FUJIKOSHI Corp. (1-1-1, Fujikoshihonmachi,
Toyama-shi, Toyama 930-8511)

図2 超硬合金上に合成されたダイヤモンド膜

ド状カーボン(DLC)コーティングの両方を耳にする機会が多くなり、その違いを問われることがしばしばある。ダイヤモンドの方はメタン、一酸化炭素、アルコールなどの炭素含有ガスを原料とし、これを熱やプラズマで活性化し、そのガス中に置かれた 1000 K 以上の基板上に合成される。得られる膜はダイヤモンド構造を持つ結晶質の膜となる。他方、DLCの方は黒鉛を原料とする物理蒸着法あるいはメタンやベンゼンなどの炭素含有ガスを原料とするプラズマ化学蒸着法など幅広い方法で成膜され、室温付近の基板上に合成されるので非晶質構造の膜となる。合成条件により膜質は変化し、CとHから成るポリマー状の膜からダイヤモンドに近い硬さの膜までさまざまな物性の膜が得られる。

本稿で述べるダイヤモンドコーティング工具は前者の方法で成膜されている。現在まで、多くのダイヤモンドの気相合成方法が開発されているが、切削工具へのコーティングは主に熱フィラメントCVD法²⁾とマイクロ波CVD法³⁾で行われている。ダイヤモンドコーティング用の基材についてもさまざまな調査がなされ、ダイヤモンドとの付着性、耐熱性(処理温度 1000～1300 Kでの健全性)および切削工具として必要な靱性の点から、切削工具材料として汎用性の高い超硬合金が使われている。

図2に超硬合金上にコーティングされたダイヤ

図3 超硬合金上に合成されたダイヤモンド膜のラマン分光スペクトル

モンド膜の電子顕微鏡写真を示すが、これよりダイヤモンド膜は非晶質ではなく、微結晶ダイヤモンドの集まった多結晶膜であることがわかる。機械分野へ適用する場合のダイヤモンド膜の評価は一般にラマン分光とX線回折で行われる。図3に前記ダイヤモンド膜のラマン分光スペクトルを示す。ラマン分光ではダイヤモンドからの信号は 1332 cm^{-1} にシャープなピークとなって現れ、グラファイトなどを含む非ダイヤモンド成分は 1550 cm^{-1} 付近を中心に幅広い分布となって現れる。ラマン分光における非ダイヤモンド成分の感度はダイヤモンド成分に比べ2桁程度高いので、図3の膜はダイヤモンドが大部分を占める膜であると言える。また、X線回折からもダイヤモンド主体の膜であることが確認されている。

3. ダイヤモンドコーティング工具の切削性能

3.1 ドリル

ダイヤモンドコーティングドリルはアルミニウム合金、GFRP、CFRP、黒鉛、セラミックス仮焼結体などの加工に使われている。表1に実用の加工工程で得られたデータおよび我々がテストで得たデータを示した。被削材のADC 12はシリコン12%含有する汎用のアルミニウム鋳物材であり自動車部品用に多く用いられている。また

表 1 ダイヤモンドコーティングドリルと超硬ドリルの寿命比較

ドリル径	被 削 材	寿 命 比 較		切 削 条 件
		超硬ドリル	ダイヤモンドコーティングドリル	
φ 2.5	アルミ合金 ADC 12 (Al-12%Si)	20,000穴	258,000穴	回 転 数 : 2000 min ⁻¹ 送 り 量 : 0.08 mm/rev 切削油剤 : 水溶性エマルジョン
φ 6.0	アルミ合金 A 3 9 0 (Al-18%Si)	100穴	2,300穴	回 転 数 : 8000 min ⁻¹ 送 り 量 : 0.1 mm/rev 切削油剤 : 水溶性エマルジョン
φ 3.0	G F R P	3,000穴	30,000穴	回 転 数 : 40000 min ⁻¹ 送 り 量 : 0.013 mm/rev 切削油剤 : ドライ
φ 1.5	WC系セラミックス 仮焼結体	100穴	14,000穴	回 転 数 : 1000 min ⁻¹ 送 り 量 : 0.01 mm/rev 切削油剤 : ドライ
φ 2.0	Al ₂ O ₃ 系セラミックス 仮焼結体	半日～3日	3ヶ月以上	回 転 数 : 3300 min ⁻¹ 送 り 量 : 0.003 mm/rev 切削油剤 : ドライ

A 390 はシリコンを 17～18%含有する耐摩耗性が高く高強度なアルミニウム鋳物材で、マトリクス中にシリコン粒が分散しているため難削性である。ADC 12 および A 390 の加工には水溶性切削油剤を用い、その他は乾式で行っている。

一般にダイヤモンドコーティングにより従来から使われている超硬合金製ドリルの寿命を 10 倍以上伸ばすことができ、その改善効果はマトリクス中に硬い物質を多く含む材料ほど大きくなる傾向がある。また、ダイヤモンドコーティングドリルは寿命が長いだけでなく、加工した穴の寸法安定性が良好で加工面粗さも優れているという特長がある。これはダイヤモンドの高い耐摩耗性と他の物質との濡れ性が低いことに由来する低溶着特性によるものである。

近年、環境対応や加工コスト低減のため、切削油剤を全く用いないかあるいはミストとしてわずかに用いるドライ切削の流れが進行しつつある。ダイヤモンドコーティング工具はもともと黒鉛、C/C コンポジット、セラミックス仮焼結体などの切削油剤を使えないワークの加工や、アルミニウム合金切削のような刃先の温度上昇が少ない切削条件を中心に用いられてきたので、切削油剤を使わずに加工するケースが多くあった。しかし、ドリルを用いて軟質アルミニウム合金の穴あけを完全ドライで行うと、切り屑詰まりを起こし、細いドリルでは折損するケースもあった。

アルミニウムとダイヤモンドは反応性が低いので、刃先に被削材が溶着しにくいのであるが、図 2 に見られたように、電子顕微鏡で拡大して見ると膜表面が結晶の凹凸により $R_y = 2 \sim 3 \mu m$ と

図 4 平滑ダイヤモンド膜の表面写真

なっているため、切り屑の流れが悪くなり、切り屑詰まりを起こしているものと考えられた。そこで、ドリルの溝部ダイヤモンド膜を平滑化するため、結晶質の膜からやや結晶性を下げたボール状膜に変更した。図 4 は切削試験後のドリル溝部のボール状膜を示す。切削により表面がやや摩耗しているものの、図 2 の通常膜に比べ平滑になっている様子がわかる。さらに、膜の平滑化と合わせて切り屑排出性の良い溝形状を選択することにより、ドライ切削でも従来の水溶性切削油剤を用いた穴あけと較べて遜色のない性能のドリルが得られている。

3. 2 スクエアエンドミル

ドリルの場合には先端部にダイヤモンド膜が被覆されていれば十分に性能を発揮するが、スクエアエンドミルについては機能上刃部全体に均一にダイヤモンドが被覆されている必要がある。エン

ドリルのような形状の工具表面に均一にダイヤモンドを被覆することは成膜方法の性質上難しく、その分だけドリルより遅れて商品化されている。スクエアエンドミルについてもダイヤモンドコーティングの効果は抜群であり、図5に示したようにアルミニウム合金 A 390 の切削で超硬エンドミルの 10 倍以上の寿命が得られている。

前述のように、良質な多結晶ダイヤモンド膜の表面には数μmの凹凸があり、成膜したままの工具を用いるとその表面粗さがワークに転写され、表面粗さを小さく仕上げたい場合にはこれが問題

になることがある。また、刃先部分のダイヤモンド膜の膜質を低下させると、摩耗速度が速くなる⁴⁾傾向がある。そこで、スクエアエンドミルに結晶質のダイヤモンド膜を被覆した後、被削面に対する表面粗さの影響が大きい底刃のダイヤモンド膜表面の研磨を試みた。図6は底刃のダイヤモンド膜の研磨状態と研磨の有無によるアルミニウム鋳物 ADC 12 の被削面の粗さの違いを比較したものである。これより、底刃の一部のダイヤモンド膜をわずかに研磨し平滑にするだけで、加工面粗さが大幅に改善されることが判る。

ダイヤモンドコーティング後の刃先の研磨は、エンドミルの他に、リーマやバニッシュドリルのように高い加工面粗度が要求される工具や、ドリル加工で加工穴の周囲のバリ高さを抑さえる必要のあるケースに効果的である。

3. 3 ボールエンドミル

ボールエンドミルは主に金型の加工に使用されるが、放電加工用黒鉛電極の加工においては、超硬合金製ボールエンドミルの摩耗が速く、刃先形状が変わるため加工精度が問題になっていた。そこで、超硬合金製ボールエンドミルにダイヤモンドを被覆し電極用黒鉛の加工を行ったところ、工

図5 ダイヤモンドコーティングエンドミルと超硬エンドミルの切削性能の比較

図6 ダイヤモンドコーティング後に底刃の膜表面を研磨したスクエアエンドミルによる加工面粗さの改善例

被削材：ADC 12(Al-12%Si 合金)
エンドミル寸法：φ10×24×70，8 枚刃
回転数：11000 min⁻¹ (345 m/min)
送り速度：2500 mm/min (0.028 mm/刃)
切込深さ：aa=0.05 mm，ar=7 mm
切削油剤：水溶性エマルジョン

図7 ダイヤモンドコーティングボールエンドミルの切削性能

具寿命が伸び精度良い加工ができるようになった。

図7にダイヤモンドコーティングと超硬合金製ボールエンドミルを用いた黒鉛の切削試験結果を示す。超硬ボールエンドミルは切削距離200mで逃げ面摩耗が300 μ mに達しているのに対し、ダイヤモンドコーティングの方は1500m切削後も150 μ m以下であった。このように黒鉛加工においても、ダイヤモンドコーティングにより超硬ボールエンドミルの10倍以上の寿命が得られることが判る。

炭素は鉄に固溶するのでダイヤモンドコーティング工具は鉄鋼材料の切削に適さないと考えられていた。しかし、铸铁FC250を被削材としてダイヤモンドコーティングボールエンドミルの切削試験を行った結果では、超硬ボールエンドミルの逃げ面摩耗が延べ225m切削で200 μ mを越えているのに対し、ダイヤモンドコーティング品は900m切削時点でも30 μ mであり、条件を適切

に選べば、この分野でもダイヤモンドコーティング工具が使えるのではないかと期待している。

4. おわりに

超硬合金製切削工具基材にダイヤモンドを被覆することにより、その寿命が飛躍的に伸びるようになった。また、工具寿命が伸びたことにより寸法精度の高い加工も可能となった。このようなことから、ダイヤモンドコーティング工具の需要は年々伸びてきており、現在ではアルミニウム合金、銅合金、FRP、セラミックス仮焼結体、黒鉛などの切削工具として欠かせないものになっている。ここでは、標準的なドリル、エンドミルおよびボールエンドミルについての適用例を紹介したが、穴あけと座ぐり加工を同時に行う段つき形のドリルなどへも応用範囲を広げており、今後ますます適用範囲が広がっていくものと期待している。

(1999-12-28 受理)

文 献

- 1) K. Kanda, S. Takehana, S. Yoshida, F. Shimakura and K. Ishigane; *Proc. of 2nd Conf. ADC 93*, Ohmiya, MYU, Tokyo, 565 (1993)
- 2) S. Matsumoto, Y. Sato, M. Kamo and N. Setaka; *Jpn. J. Appl. Phys.*, 21, L 183 (1982)
- 3) M. Kamo, Y. Sato, S. Matsumoto and N. Setake; *J. Cryst. Growth*, 62, 642 (1983)
- 4) 神田一隆, 高野茂人, 渡辺良一, 米島弘栄; 不二越技報, 52, (1), 22 (1996)