PWB 加工における CVD ダイヤモンドドリルの摩耗挙動*

亀岡 誠司** 本西 英** 内田 仁***

Wear Performances of CVD Diamond Coated Drills in PWB Drilling

Seiji KAMEOKA, Suguru MOTONISHI and Hitoshi UCHIDA

Wear performances of CVD (Chemical Vapor Deposition) diamond films caused by PWB (Printed Wiring Board) drilling were investigated. For glass epoxy resin boards, only major cutting edge wear occurred, and chisel edge wear, margin wear, and face wear were very little. By the wear of CVD diamond films, major cutting edge showed "knife edge shape". These phenomena are very characteristic as compared to carbide drills. On the other hand, for paper phenol resin boards, almost all wear didn't occur. It is considered that the main influence factor for wear of CVD diamond films is not abrasive but thermal. Chipping of major cutting edge was triggered by appearance of substrate followed by the extension of major cutting edge wear. Wear performances were affected by a film thickness and cutting conditions. It was revealed that there were critical thickness for chipping of major cutting edge, and low feed rates accelerated wear progress.

Key words: CVD diamond film, PWB, drilling, wear, chipping

1. 結 言

これまで、CVD ダイヤモンド (Chemical Vapor Deposition Diamond) に関して多くの研究がなされ、これを応用した切削工具の開発も活発に進められてきた¹⁾²⁾。これらは、主としてアルミニウム合金やグラファイトの切削を目的としたものが多く、高硬度、高熱伝導率といったダイヤモンド本来の特性が発揮されるべき他の多くの難削材への応用は、まだ緒についたばかりの段階であるといえる。特に、これら難削材加工においては、ほとんどの場合に密着性不足による剥離によって工具寿命に至るため、摩耗挙動に関する研究もほとんどなされていない^{3)~7)}。

現在、超硬ドリルで穴あけ加工される難削材のひとつに PWB (Printed Wiring Board) がある。PWB には様々な種類があるが、一般には樹脂、銅、あるいはガラス繊維など化学的、物理的性質の異なる素材の複合体という構造を持つ。また、穴あけ加工に際しては、通常アルミニウム板などのエントリ材とベークライト板などのバックアップ材を組み合わせたスタックとして加工されるため、超硬ドリルの場合には激しい摩耗による短寿命、内壁荒れ、位置精度の悪化など多くの問題が発生する⁸⁾。超硬ドリルをもちいた PWB 加工における切削条件が加工穴品質やドリル寿命におよぼす影響については種々報告があるが^{9)~11)}、本報告では、これら従来の超硬ドリルに CVD ダイヤモンドを被覆したドリルをもちい、PWB、特にガラス繊維含有基板の穴あけ加工における摩耗挙動について検討したので報告する。

2. 実験方法

2.1 超硬ドリルへの CVD ダイヤモンド合成

超硬ドリルへの CVD ダイヤモンドの合成には、原料ガスを 2.45GHz のマイクロ波で励起し、基板上に析出させるマイクロ波プラズマ CVD 法¹²⁾¹³⁾をもちいた。原料ガスは水素-メタン混合ガスとし、膜厚は 2~8 μ m とした。コーティング条件を表 1 に、合成の概念図を図 1 にそれぞれ示す。

2.2 穴あけ加工

穴あけ加工には PWB 穴あけ加工用 CNC 2 軸穴あけ機 (日立精工製 ND-2J14) をもちいた。PWB にはガラス布基材エポキシ樹脂 4 層銅張り積層基板 (松下電工製 C-1810, 外層銅箔 18 μ m, 内層銅箔 35 μ m, 板厚 1.6mm, 以下、ガラスエポキシ基板と略す) と紙基材フェノール樹脂両面銅張り積層板

Table 1 Deposition conditions

Reaction gas	H ₂ +CH ₄ (2.5vol%)
Gas flow rate sccm	400
Gas pressure kPa	5.0
Substrate temperature K	1173

Fig.1 Illustration of microwave CVD method

* 原稿受付 平成 12 年 12 月 28 日

** 正 会 員 エムエムシーコベルコツール (株) (明石市魚住町金ヶ崎西大池 179-1)

*** 姫路工業大学工学部 (姫路市書写 2167)

Table 2 Geometries of CVD diamond coated drills

Type	A	B
Drill diameter mm	0.40	0.65
Flute length mm	5.0	10.0
Web thickness mm	0.10	0.12
Point angle °	130	130
Helix angle °	30	30

Fig.2 Illustration of PWB stuck

(松下電工製 R-8705, 銅箔 35 μm , 板厚 1.6mm, 以下, 紙フェノール基板と略す) をもちいた. なお, ガラスエポキシ基板の場合は 2 枚, 紙フェノール基板の場合は 5 枚を重ね, 厚さ 0.15mm のアルミニウム板を当て板, ベークライト板を捕材としてスタックを構成した. その構成図を図 2 に示す. CVD ダイアモンドドリルには表 2 に示す 2 種類をもちい, $\phi 0.40\text{mm}$ のドリル (A) はガラスエポキシ基板加工用, $\phi 0.65\text{mm}$ のドリル (B) は紙フェノール基板加工用とした. また, CVD ダイアモンド膜を被覆しない超硬ドリルを比較にもちいた. なお, それぞれのドリルの超硬素材は, ドリル (A) については WC 平均粒径 $0.5\mu\text{m}$ 以下, Co 含有量約 8wt%, ドリル (B) については WC 平均粒径 $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$, Co 含有量約 5wt% である.

2.3 評価方法

切れ刃部分の摩耗は, 走査型電子顕微鏡 (SEM) によって観察した. 2 番面の摩耗幅には, ドリルを垂直に立てた場合の上面視野像から観察される両刃の摩耗幅の最大値を採用した. 実験は同一条件で 2 本のドリルについておこない, 各刃計 4 か所の摩耗幅を計測した.

3. 実験結果および考察

3.1 摩耗形態

図 3 に, $\phi 0.40\text{mm}$, 膜厚 $8\mu\text{m}$ の CVD ダイアモンドドリル (A) およびダイヤモンドを被覆しない超硬ドリルの, ガラスエポキシ基板スタックを被削材とした場合の加工数と 2 番面摩耗幅の関係を示す. 加工条件は, CVD ダイアモンドドリル, 超硬ドリルともに回転数 $80\,000\text{min}^{-1}$, 送り速度 20m/min (送り量 $25\mu\text{m/rev}$) である.

超硬ドリルでは, 加工初期から摩耗がほぼ直線的に増大し, 5 000 穴で摩耗幅が約 $30\mu\text{m}$ に達するのに対し, CVD ダイアモンドドリルでは, 加工数 50 000 経過後もその摩耗幅は約 $15\mu\text{m}$ に過ぎず, 著しく耐摩耗性が向上することがわかる.

図 4 に CVD ダイアモンドドリルの, 50 000 穴加工後の切れ刃部, 図 5 には, このときのチゼルエッジとマージンのダイヤモンド膜表面の SEM 像をそれぞれ示す. さらに, 比較と

して図 6 に, $\phi 0.40\text{mm}$ 超硬ドリルの 5 000 穴加工後の切れ刃先端部の SEM 像を示す.

以上の SEM 像から明らかなように, 超硬ドリルでは, チゼルエッジ, 外周マージンともに著しい摩耗が認められるのに対し, CVD ダイアモンドドリルでは, 2 番面の切削作用部のみ帯状の摩耗が認められ, 先端のチゼルエッジや外周マージンには実質的に摩耗が見られない. なお, CVD ダイアモンドドリルの 2 番面に見られる帯状の摩耗幅は, 外周コーナから約 0.2mm までの部分においてはほぼ一定であり, 摩耗幅の測定値も, この部分における外周コーナ近傍の任意の位置とした.

Fig.3 Relationship between number of holes and width of flank wears

Fig.4 SEM photographs showing cutting edge of diamond coated drill (A) after drilling 50 000 holes

Fig.5 SEM photographs showing surface morphology of diamond film

Fig.6 SEM photographs showing cutting edge of cemented carbide drill after drilling 5 000 holes

図 7 は, 50 000 穴加工後の CVD ダイアモンドドリルの 2 番面を詳細に観察した SEM 像である. すなわち, (a)は上面

Fig.7 SEM photographs showing cutting edge of diamond coated drill (A) after drilling 50 000 holes

視野からの外観であり、この図に示す外周コーナ近傍で機械的に 2 番面を破断、その破断面を 2 番面とともに観察した図が(b)、破断面に対して垂直方向の視野から観察した図が(c)である。これらの観察結果より、すくい面側のダイヤモンド膜は全く摩耗していないが、2 番面側は摩耗によって切れ刃に近づくほど膜厚が傾斜的に薄くなり、ナイフエッジ状となっていることがわかる。

すなわち、超硬合金工具の場合は、摩耗の進行に伴って図 6 に示したような切れ刃の丸みが発生するのに対し、CVD ダイアモンドドリルの場合には、as-coated の状態で存在していたダイヤモンド膜の膜厚に相当する丸みが、摩耗が進行するに伴って 2 番面側が削ぎ落とされたような格好で除去され、幾何学的に鋭利になる。

このように初期状態よりも加工数を経るほどむしろ切れ刃が鋭利になるという摩耗形態は、超硬ドリルのようなアブレッシブな摩耗には見られない非常に特徴的な形態である。

図 8 に、 $\phi 0.65\text{mm}$ 、膜厚 $8\mu\text{m}$ の CVD ダイアモンドドリル (B) をもちい、紙フェノール基板スタックを 50 000 穴加工した後の切れ刃先端部の SEM 像を示す。加工条件は、回転数 $60\,000\text{min}^{-1}$ 、送り速度 21m/min (送り量 $35\mu\text{m/rev}$) である。ガラスエポキシ基板スタックについて同一数加工後の摩耗状態 (図 4) と比較すれば明らかなように、紙フェノール基板加工の場合の摩耗は極めて軽微であり、擦過痕が認められる程度である。基板を構成するマトリックスである樹脂の硬度に顕著な差はなく、このような摩耗の進行の差はガラス繊維の有無が大きく影響していると考えられる。

また、図 4 と図 7 に示すように、ガラスエポキシ基板加工で認められる 2 番面の摩耗は条痕状であり、ダイヤモンド粒子が脱落したと認められる形態は観察されないこと、2 番面と同様、被削材との擦過の影響を最も受けると考えられるチゼルエッジやマージンには明確な摩耗が認められない。したが

Fig.8 SEM photographs showing cutting edge of diamond coated drill (B) after drilling 50 000 holes

Fig.9 SEM photographs showing cutting edge of diamond coated drill (A) after drilling 50 000, 60 000 and 70 000 holes

って、ガラスエポキシ基板加工の場合は、超硬ドリルのように、結合相で保持された WC 粒子が順次脱落していくことによって摩耗が進行するといった純粋にメカニカルな要因によるアブレッシブ摩耗だけではなく、その擦り減り機構においては、ガラス繊維切断時に発生する熱によるダイヤモンドの燃焼も関与していると考えられる。また、ダイヤモンドの燃焼開始温度は約 950K と報告されていることから¹⁴⁾、ガラスエポキシ基板加工の場合、2 番面の切削作用部の温度は局部的、すなわち切削時にガラス繊維とコンタクトする微視的な領域においては上述の温度以上に達している可能性がある。

3.2 摩耗過程

ガラスエポキシ基板加工におけるダイヤモンドドリルの摩耗の進行についてさらに検討した。図 9 に、 $\phi 0.40\text{mm}$ 、膜厚 $8\mu\text{m}$ の CVD ダイアモンドドリル (A) の 50 000 穴、60 000 穴および 70 000 穴加工後の切れ刃部の SEM 像を示す。加工条件は、3.1 節の場合と同じく、回転数 $80\,000\text{min}^{-1}$ 、送り速度 20m/min (送り量 $25\mu\text{m/rev}$) である。ここで、50 000 穴加工の状態(a)にはダイヤモンド膜には摩耗以外の損傷は見られないが、60 000 穴加工後(b)には切れ刃に沿って筋が認められ、70 000 穴に達すると(c)、切れ刃の外周コーナ近傍にチッピングが発生することがわかる。

図 10 は、65 000 穴加工後の筋状部分の SEM 像であるが、摩耗したダイヤモンド膜の下から、超硬母材が露出していることがわかる。すなわち、膜が連続的に存在しているあいだは外周コーナ部分が維持されるが、2 番面の摩耗の進行によって超硬母材が露出し、膜が不連続な状態となると、これがト

Fig.10 SEM photographs showing cutting edge of diamond coated drill (A) after drilling 65 000 holes

Fig.11 Illustrations of wear process of diamond film in cutting glass epoxy resin board

リガとなって基材である超硬母材を伴ってダイヤモンド膜が破壊される。図 11 に、これら摩耗過程を模式的に示す。

3.3 膜厚の影響

以上のようなダイヤモンドドリルの摩耗における、膜厚の影響について検討した。図 12 に、切れ刃の外周コーナ近傍の膜厚とチッピングに至るまでの、膜厚と加工数の関係を示す。もちいたダイヤモンドドリルの形状は若干異なるものの、膜厚と加工数との間にはともに同じ傾向が認められた。すなわち、膜厚が大きくなるほどチッピングまでの加工数は増大するが、両者の間には、直線的な相関は認められず、ある膜厚以下では初期にチッピングが発生する。図 13 に、膜厚 $5.2\mu\text{m}$ の CVD ダイアモンドドリル (A) でガラスエポキシ基板を 5 000 穴加工後の切れ刃外周コーナ近傍の SEM 像を示す。コーナ部は既にチッピングしており、臨界膜厚以下では、じん性に乏しいダイヤモンド膜は、切削抵抗に打ち勝つことができず破壊され、図 11 の摩耗過程を経ることなく、加工初期にチッピングが発生すると考えられる。すなわち、膜厚が臨界値以上の場合には擦り減りによる正常摩耗が、逆に満たない場合はチッピングが発生する。また、この臨界膜厚の値は被削材によって異なる。ガラスエポキシ基板加工の臨界膜厚が約 $5\sim6\mu\text{m}$ であるのに対し、紙フェノール基板加工の場合の臨界膜厚は約 $2\sim3\mu\text{m}$ であることがわかる。さらに、図 12 における曲線の傾きは摩耗の進行速度を反映すると考えられ、本実験で得られたデータ数では必ずしも明確には表れていないものの、紙フェノール基板加工の場合、その傾きはガラスエポキシ基板加工に比較して大きくなるものと思われる。

従来、CVD ダイアモンドの切削工具への応用に関しては、基板との付着強度や残留応力に起因する剥離が実用上の課題のひとつとされてきたが⁶⁾⁷⁾、今回得られた知見によれば、これら膜の密着性だけでなく、膜厚も切削作用部の膜の損傷に対する重要な因子であり、膜強度を確保するための必要最小限の膜厚が被削材ごとに存在することが明らかとなった。

3.4 切削条件の影響

つぎに、切削条件が摩耗におよぼす影響について検討した。

Fig.12 Relationship between film thickness and number of holes until chipping in diamond coated drill (A)

Fig.13 SEM photograph showing cutting edge of diamond coated drill (A) after drilling 5 000 holes

Fig.14 Relationship between feed rate and width of flank wears in diamond coated drill (A)

図 14 に、 $\phi 0.40\text{mm}$ 、膜厚 $8\mu\text{m}$ の CVD ダイアモンドドリル (A) をもちいてガラスエポキシ基板を 10 000 穴加工した場合の送り量と 2 番面摩耗幅の関係を示す。このときの加工条件は、回転数を 60 000、75 000 および 90 000 min^{-1} とし、1 回転あたりの送り量が 12、16 および $20\mu\text{m/rev}$ となる計 9 条件について検討した。図 14 からわかるように、2 番面の摩耗量は、回転数にかかわらず、1 回転あたりの送り量にのみ依存し、送り量が小さいほど摩耗の進行は速い。このような傾向は、送り量の減少とともに切削距離が増大することでも大きな原因と考えられる。しかし一方で、送り量が減少するほど、すなわち同一箇所を工具が擦過する頻度が大きくなるほど、エポキシ樹脂という熱伝導率の悪い物質の存在によって加工熱が蓄積しやすくなる。さらには、送り量が小さいほどスミア (smear; 加工熱によって樹脂が溶融し、内層銅箔を覆うことによって、穴あけ加工のあとにおこなわれる内壁

のスルーホール銅めっきが内層銅箔と接続されず、絶縁不良を起こす現象)の発生率が大きくなるという傾向⁸⁾とも考え合わせると、ダイヤモンド膜の摩耗において加工熱が関与している可能性を示唆するものとも考えられる。

4. 結 言

CVD ダイヤモンドドリルの PWB 穴あけ加工における摩耗挙動について検討した。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) ガラスエポキシ基板加工の場合、摩耗は 2 番面の切削作用部だけに発生し、チゼルエッジ、外周マージンおよびすくい面は実質的に摩耗しない。
- (2) 2 番面のダイヤモンド膜の摩耗は条痕状であり、ダイヤモンド粒子が脱落したと認められる形態は観察されない。また、2 番面は摩耗によって切れ刃に近づくほど膜厚が傾斜的に薄くなり、ナイフエッジ状の形態を示す。
- (3) ガラス繊維の含まれない紙フェノール基板加工の場合には、2 番面を含むすべての切削作用部に摩耗は発生しない。このことから、ガラスエポキシ基板加工におけるダイヤモンド膜の摩耗は、純粋にメカニカルな要因によるアブレーション摩耗だけではなく、その擦り減り機構においては、ガラス繊維切断時に発生する熱によるダイヤモンドの燃焼も関与していると考えられる。
- (4) ガラスエポキシ基板加工の場合、摩耗の進行によって、超硬母材が露出すると、これがトリガとなって切れ刃の外周コーナ近傍のチッピングが発生する。
- (5) 切れ刃の外周コーナ近傍がチッピングするまでの加工数は、膜厚に依存する。膜厚が大きくなるほどチッピングまでの加工数は増大するが、両者の間には、直線的な相関は認められず、ある膜厚以下では初期にチッピングが発生する。
- (6) この臨界膜厚の値は被削材によって異なる。ガラスエポキシ基板加工の臨界膜厚は約 $5\sim6\mu\text{m}$ に対し、紙フェノール基板加工の場合は約 $2\sim3\mu\text{m}$ である。このように、

膜厚も切削作用部の膜の損傷に対する重要な因子であり、膜強度を確保するための必要最小限の膜厚が被削材ごとに存在することが明らかとなった。

- (7) ガラスエポキシ基板加工における摩耗挙動は、切削条件に依存する。2 番面の摩耗の進行は、1 回転あたりの送り量にのみ依存し、送り量が小さいほど摩耗の進行は速い。

参 考 文 献

- 1) B.Lux, R.Haubner and P.Renard : Diamond for Tooling and Abrasives, Diamond and Related Materials, 1, (1992) 1035.
- 2) 菊地則文：ダイヤモンドコーティングの切削性能への応用，表面技術，42, 12 (1991) 41.
- 3) K.Saijo, M.Yagi, K.Shibuki and S.Takatsu : Improvements in Adhesive Strength and Cutting Performance of Diamond-Coated Tools, Surface and Coatings Technol., 47, (1991) 646.
- 4) S.Söderberg, A.Gerendas and M.Sjöstrand : Factors Influencing the Adhesion of Diamond Coatings on Cutting Tools, Vacuum, 41, 4-6 (1990) 1317.
- 5) K.Kamada, S.Yoshida, K.Yoneshima and H.Ando : Diamond-Coated Cutting Tools and Their Applications, Diamond Films and Technol., 8, 2 (1998) 93.
- 6) 松原秀彰：硬質材料基板上でのダイヤモンド気相合成，NEW DIAMOND, 6, 1 (1990) 9.
- 7) 宇根宏治：ダイヤモンドコーティングドリル，機械と工具，43, 5 (1999) 29.
- 8) プリント回路学会編：プリント回路技術便覧，第 2 版，日刊工業新聞社，(1993) 594.
- 9) R.E.Weiss : An On-Line Printed Circuit Drill Monitor, The Printed Circuit World Conventional I, (1978) 4-4-1.
- 10) R. Bolton, C.L.Hough, Jr. : Evaluation of Force and IR Thermal Sensors for Drilling Printed Circuit Boards, Composite Material Technol., 45, (1992) 45.
- 11) M.N.Srinivasan and C.L.Hough : Evaluation of Drilled Hole Quality in Printed Circuit Boards, J. Eng. Ind., Trans. ASME, 117, (1995) 248.
- 12) M.Kamo, Y.Sato, S.Matsumoto and N.Setaka : Diamond Synthesis from Gas Phase in Microwave Plasma, J. Crystal Growth, 62, (1983) 642.
- 13) 加茂睦和，佐藤洋一郎，瀬高信雄：マイクロ波放電プラズマ法によるダイヤモンドの気相合成，日本化学会誌，10 (1984) 1642.
- 14) 瀬高信雄：ダイヤモンド薄膜の気相合成とその応用，電気・情報関連学会論文集，2, (1986) 131.

編 集 後 記

はじめと暑苦しい梅雨が続いておりますが、会員の皆様におかれましては、元気にお過ごしのことと存じます。今月号は、“ナノメートルレベルの回転精度を目指して”と題しまして、スピンドルの回転精度に焦点を当ててみました。

“回転”を題材とした特集は 1995 年 9 月号でも取り上げられておりますが、6 年を経過して当時とは違ったトレンドや要求も出てきております。磁気ディスク装置においては、年率 60 % 増が限界であろうと思われた記録密度が最近では年率 100 % 増を達成しています。回転精度に対する要求の厳しさは高まる一方で、スピンドルモータ用の軸受としては動圧流体軸受も使用されるようになってきました。また、工作機械においても真円度や表面粗さの向上が差別化の武器となっております。

そこで本特集では、ナノメートルレベルの回転精度実現を目指す必要性和将来展望を皮切りに、現在使用されている各種軸受における回転精度の理論解析と現状・将来について解説していただ

き、限界を目指して努力を続けている姿を紹介いたしました。また、高回転精度を実現する上においては、スピンドルの挙動をいかに正確に測定・評価するかが重要になってきます。1 nm を測定できるセンサ技術や測定物と回転精度を分離する手法についても詳細に解説していただきました。さらに、ナノメートルレベルの回転精度を実現する方法として、測定した振れをフィードバックして制御する能動型軸受が試みられてきました。その代表として磁気軸受の現状と将来についても解説していただきました。21 世紀を迎え、ナノメートルレベルの回転精度が必要になった状況とそれに向けた精度向上の取り組みをご理解いただければ幸いです。

最後に本特集を実現するためにご尽力いただきました関係各位に深く感謝申し上げますとともに、ご多忙にもかかわらずご執筆いただきました執筆者各位に心よりお礼申し上げます。

(野口昭治)