小特集Ⅰ. 切削工具における表面改質技術の現状(2)

CVD によるコーティング切削工具の現状
—スローアウェイチップ

長 田 晃*

CVD Coated Cutting Tools—Indexable Insert

Akira OSADA*

Key Words : CVD, Cutting Tools, TiCN, Al₂O₃

切削加工の高能率化やコストダウンの実現に欠かせない CVD によるコーティング切削工具の現状について、最近のコーティング技術とそれを用いた切削工具の性能を中心に解説する。

1. はじめに

近年、長期的な景気低迷下での切削加工の低コスト化や納期短縮、高精度化等への流れの中で、高能率加工・高精度加工に対する要求は一段と高まっている。このため、切削工具においてもこれらの要求に応える新しい切削工具材料の開発が益々重要となってきた。それらの中でもコーティング切削工具は、使用比率が最も高く、高能率加工・コストダウンの実現に極めて重要な役割を担っている。

図1に示すようにスローアウェイチップにおけるコーティング切削工具の生産量は一貫して増加傾向にあり、その生産比率は1981年には全体の約30%であったが、1997年には約50%を占めるまでに至っている。このようにコーティング切削工具が他の切削工具材料と比較して急速に普及したのは、実用化以来、コーティング物質、密着性、母材などさまざまな点で絶えず改良、開発が重ねられてきた結果といえる。

CVD によるコーティング切削工具(以下 CVD 切削工具という)の実用化は、1970 年代前半の TiC、TiN などの単層コーティングに始まり、その後、母材は既存の汎用超硬合金から専用超硬合金へ、コーティング層は Al₂O₃ を含む複層、多層コーティングへと変遷してきた。最近ではより一層の長寿命化、高性能化を目的とし多層厚膜コーティングが増加している。これらの改良、開発経緯について表1に示す^{1)~5)}。

本稿では、CVD 切削工具の現状について、最近のコーティング技術とそれを用いた切削工具の性能を中心に紹介する。

図1 スローアウェイチップの国内生産個数推移

*三菱マテリアル㈱ (〒300-2795 茨城県結城郡石下町古間木1511)
Mitsubishi Materials Corporation (1511, Furumagi, Ishige-machi, Yuuki-gun, Ibaraki 300-2795)

表1 CVD コーティング切削工具の変遷

年代	コーティング層構造	コーティング物質	母材	文献
1970 年代前半	単層	TiC, TiN など	既存超硬合金	2)
1970 年代後半	複層	TiC-TiN, TiC-Al ₂ O ₃ など	専用超硬合金	3)
1980 年代	多層	TiC-TiCN-TiC-Al ₂ O ₃ -TiN など	専用超硬合金	4)
1990 年代	多層厚膜	TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN など	専用超硬合金	5)

2. コーティング物質の特性

切削工具に求められる特性としては、①高速、高能率加工にも耐える高い耐摩耗性。②断続切削、黒皮切削などでも使用可能な高い耐欠損性。③さまざまな加工条件、被削材に適用できる高い汎用性、などが上げられる。

図2に各種硬質物質の生成自由エネルギーと硬さとの関係を示す。主として機械的なこすりにより発生する逃げ面摩耗に対しては、硬さが大きく影響するため、図の上側へ行くほど耐逃げ面摩耗

性が高くなる。これに対し、すくい面摩耗は、切削時に工具すくい面が高温高压状態になり工具－被削材間の化学反応や酸化が進行することにより発生するので、物質の熱的安定性を示す生成自由エネルギーにより耐すくい面摩耗性を推定できる。すなわち、図の右側へ行くほど耐すくい面摩耗性が高くなる。このため、現在実用化されている切削工具のコーティング物質としては、耐逃げ面摩耗性に優れる TiCN, TiC などと耐すくい面摩耗性に有効な Al₂O₃ とが組み合わせて使用され、さらに用途に応じて多層構造および層厚さなどの最適化が図られている。

図2 各種硬質物質の硬さと生成自由エネルギー

3. CVD 法の原理と特徴

CVD 法(化学蒸着法)は化学反応により各種物質を生成する方法で、化学反応に必要な活性化エネルギーを与える方式によって熱 CVD 法、プラズマ CVD 法、光 CVD 法などに分類されるが、切削工具用としては主に熱 CVD 法が利用されている。表2に主なコーティング物質の代表的な反応例について示した⁶⁾。

CVD 法と並び切削工具へのコーティング法と

表2 代表的な CVD 反応例

被覆物質	代表的な反応例
TiC	$\text{TiCl}_4 + \text{CH}_4 \xrightarrow[1,173\sim1,373\text{ K}]{\text{H}_2} \text{TiC} + 4\text{HCl}$
TiN	$\text{TiCl}_4 + 1/2\text{N}_2 + 2\text{H}_2 \xrightarrow[1,073\sim1,273\text{ K}]{} \text{TiN} + 4\text{HCl}$
TiC _x N _{1-x}	$\text{TiCl}_4 + x\text{CH}_4 + (1-x)/2\text{N}_2 + 2(1-x)\text{H}_2 \xrightarrow[1,173\sim1,373\text{ K}]{} \text{TiC}_x\text{N}_{1-x} + 4\text{HCl}$
Al ₂ O ₃	$2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2 + 3\text{CO}_2 \xrightarrow[1,123\sim1,373\text{ K}]{} \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl} + 3\text{CO}$

して PVD 法(物理蒸着法)が広く使用されている。中でも最も多く使用されているのはイオンプレATING法である。以下に両者を比較しながら CVD 法の特徴を述べる。

(1) コーティング物質

CVD 法では耐熱性・耐酸化性に優れた Al_2O_3 などの酸化物のコーティングができるが、これらは絶縁物質であるため導電性を必要とするイオンプレATING法では実用化が難しい。

(2) コーティング層の付着力

CVD 法は PVD 法と比較してコーティング温度が 1,073~1,373 K と高いため、母材である超硬合金との拡散反応が十分に生じるためコーティング層の付着力が高い。このため、厚膜化も容易ではなく離などの異常損傷が生じにくい。しかしながら、この拡散反応により母材表面部には η 相と呼ばれる脆い脱炭相($\text{Co}_x\text{W}_y\text{C}$)が生じる。この生成量が多いと切削工具の強度が大幅に低下するため、このような脱炭相が生じやすいシャープエッジを有する切削工具には CVD 法の適用は難しい。

(3) コーティング層の残留応力

CVD 法では母材とコーティング物質の熱膨張係数の差により引張残留応力が、PVD 法では圧縮残留応力が発生する。このため、PVD 法ではコーティング層中のクラックの発生および進展が抑制されるのに対し、CVD 法ではその逆となり切削工具の強度を低下させる。

その他、CVD 法では付きまわり性が良く均一な膜厚で被覆できるなどの利点がある。

4. 最近の CVD コーティング技術とそれを使用した切削工具

4.1 強靱 TiCN コーティング

第1章の表1に示したように、最近では多層厚膜コーティングからなる切削工具が広く使用されるようになってきた。ここでいう厚膜コーティングとは、従来コーティングの膜厚が 6~10 μm 程度であるのに対し、約 1.5 倍の 11~16 μm 程度の膜厚を有するものをいう。これら厚膜コーティングが増加した背景には、下記反応式に示される

ような有機 CN 化合物(主として CH_3CN , $\text{CH}_2=\text{CHCN}$ などのニトリル化合物)を使用し従来の CVD 法と比べ比較的低温の 973~1,173 K で被覆される TiCN コーティング⁷⁾の実用化の寄与するところが大きい。

このコーティング方法を従来の CVD 法(高温 CVD 法)と対比して中温 CVD 法または MT-CVD 法(Moderate Temperature-CVD)と呼んで区別する場合もある⁸⁾。この方法を利用することで TiCN の結晶形態を図3に示すような繊維状あるいは柱状を呈するものとすることができる。

この TiCN 層は、表2に示したような従来の CVD 法による TiCN 層に比べ比較的低温で被覆されることから引張残留応力が低く、母材表面に生じる脱炭相も生成しにくい。また、その特徴的な結晶形態により被覆層自体の強度も向上している⁵⁾。これらの特徴から、この TiCN 層を利用することで従来と比べ被覆層厚を厚膜化した場合でも被覆層自身の破壊によるチッピングや超硬合金母材の強度低下による欠損などの発生を抑制することができる。

コーティング層が厚膜化するにともない耐摩耗性は向上するが膜の耐はく離性に対しては不利な方向にある。このため、母材と TiCN 層との付着力を向上させる目的で、両者の界面に粒状の結晶形態を有し母材成分の拡散した TiN, TiCN な

図3 コーティング層断面の走査型電子顕微鏡組織

図4 Al₂O₃ 膜厚と母材表面温度の関係
被削材：S 45 C
送り：0.25 mm/rev, 切込み：=2.0 mm
乾式旋削加工

図5 CVD 切削工具の速度-寿命曲線
被削材：S 45 C, チップ：CNMG 120408
送り：0.3 mm/rev, 切込み：=1.5 mm
乾式旋削加工
寿命基準：逃げ面摩耗 (VB) = 0.25 mm

どを被覆する⁹⁾といった改善も行われている。

4. 2 厚膜 Al₂O₃ コーティング

高速高能率加工・乾式加工を考えた場合、切削中の切刃は千数百 K もの高温になるので、熱的安定性・耐酸化性に優れる Al₂O₃ は切削工具のコーティング物質として必須の成分であり、その特性および層厚は工具寿命に大きな影響を及ぼす。

さらに、Al₂O₃ は熱伝導性が低いため切削時のコーティング表面部の温度を母材に伝えにくいという特性も持つ。図4は帯川らの開発した有限差分モデル¹⁰⁾を使用し、Al₂O₃ 膜厚を変化させたときの各切削速度における母材表面温度を解析した結果である。これより Al₂O₃ を 10 μm 被覆した場合と被覆しない場合とでは、母材表面温度に約 200 K の差が生じることがわかる。両者の母材表面温度が同一となる切削速度で見ると約 100 m/min の速度差がある。このことから厚膜 Al₂O₃ が高速加工に非常に有効であることがわかる。

4. 1で述べた強靱 TiCN と厚膜 Al₂O₃ (TiCN/6 μm・Al₂O₃/6 μm) とからなる CVD 切削工具 (以下厚膜 Al₂O₃ 切削工具という) および従来 CVD 切削工具 (Ti 化合物/3 μm・TiC/3 μm・Al₂O₃/2 μm) について、炭素鋼 S 45 C を送り：0.3 mm/rev, 切込み：1.5 mm で乾式旋削加工したときの切削速度と工具寿命との関係を図5に示す。厚膜 Al₂O₃ 切削工具は従来切削工具と比べ高速側でも工具寿命の低下度が少なく、たとえ

ば工具寿命が 15 分となる切削速度はそれぞれ 300 m/min, 215 m/min であり厚膜 Al₂O₃ 切削工具を使用することで加工能率を約 1.4 倍に向上できることがわかる。

4. 3 Al₂O₃ の結晶形

Al₂O₃ には α , γ , θ , κ 等多くの結晶形が認められているが切削工具用としては、主として α , κ の 2 種が使用されている。 α 型 Al₂O₃ は高温での安定相であり硬さや熱的安定性の点では κ 型より優れると考えられるが、多層膜として用いられる場合の下地層である TiC, TiCN などの Ti の化合物との十分な付着力を得にくい、厚膜化により結晶の粗粒化や均一性の低下が生じやすいなどの問題点がある¹¹⁾。これとは逆に κ 型の Al₂O₃ では、上記問題は少ないが切削中に高温にさらされると α 型に変態するとともに体積収縮が生じ、被覆層にクラックが生じる可能性がある¹²⁾。このため最近の CVD 切削工具では、用途に応じ両者が使い分けられる場合も出てきている¹³⁾。

5. CVD 切削工具の切刃形状と切削性能の関係

5. 1 ホーニング形状

第3章で述べたように CVD 切削工具の場合シャープエッジ部は脱炭しやすく強度が低下する

ため、これを避ける目的で母材の切刃にはホーニングが施される。ホーニングの形状および量はCVD 切削工具の切削性能に大きな影響を及ぼすため、実際の工具では、用途に応じて各種の形状と量が採用されている¹⁴⁾。

図 6 は 2 種の異なるホーニング形状を有する CVD 切削工具で合金鋼 SCM 440 の正面フライス加工を行ったときの摩耗進行状態と切刃の損傷形態を示したものである。チャンファーホーニングを施した工具では切刃に熱亀裂やチッピングが多く発生し寿命に至っているのに対し、コンビ

ネーションホーニングを施したものは正常摩耗となっている。このように、鋼のフライス切削のような切刃に機械的衝撃や熱衝撃が多くかかる切削ではコンビネーションホーニングをとることで熱亀裂やチッピングの発生を抑制することができる。

5. 2 切刃の平滑性

CVD 切削工具では、被覆層の構成や被覆物質によっては被覆物質の結晶粒の粒成長や被覆層中への異物の介在などが原因で工具の表面粗さが粗くなる場合がある¹⁵⁾。このような表面粗さの差も使用条件によっては工具寿命に大きく影響する。

図 6 切刃損傷に及ぼすホーニング形状の影響
上段：切刃断面形状 下段：切刃損傷形態
被削材：SCM 440，チップ：SEEN 120 AF ○ N 1
送り：0.2mm/刃，切込み：=2.5 mm
切削速度：200 m/min，湿式正面フライス加工

図 7 溶着性に及ぼす表面粗さの影響
被削材：SUS 304，チップ：CNMG 120408
送り：0.3mm/rev，切込み：=1.5 mm
切削速度：200 m/min，乾式旋削加工

図7は切刃の表面粗さの異なるCVD切削工具にてオーステナイト系ステンレス鋼の旋削加工を行った場合の切刃損傷形態の比較写真である。これより、CVD切削工具の切刃の表面粗さを向上することでステンレス鋼や軟鋼など切刃に溶着が発生しやすい被削材の加工において溶着が抑制されることがわかる。

6. おわりに

本稿で紹介した最近のコーティング技術は、表面わずか数 μm ～十数 μm のコーティング層の特性を改良することで、工具寿命の飛躍的な向上を実現するものである。これらの技術を使用した新しいCVD切削工具が、今後も実際の加工現場で切削加工の高能率化とコストダウンに役立つことを期待したい。

(2000-2-1 受理)

文 献

- 1) 超硬工具ハンドブック, p. 58 (超硬工具協会, 1998)
- 2) H. E. Hintermann, H. Gass, J. N. Lindstrom: Proc. the 3rd Int. Conf. on CVD, p. 352 (1972)
- 3) J. N. Lindstrom, R. T. Johannesson; *J. Electro-*

- chem. Soc.*, 123, 553 (1976)
- 4) 吉村寛範, 岡田義一; マシニスト, 32, 74 (1988)
- 5) 狩野勝吉, 長田 晃, 吉村寛範; 精密工学会誌, 61, 773 (1995)
- 6) 鈴木 寿編著; 超硬合金と焼結硬質材料, p. 209 (丸善, 1986)
- 7) M. Bonetti-Lang, R. Bonetti, H. E. Hintermann, D. Lomann; *Int. J. Refract. & Hard Metals*, 1, 161 (1982)
- 8) R. Bonetti, H. Wiprachtiger, E. Mohn; Proc. Surface Modification Technologies III, p. 291 (1990)
- 9) K. Akiyama, E. Nakamura, I. Suzuki, T. Oshika, A. Nishiyama, Y. Sawada; *Surface and Coatings Technology*, 94/95, 328 (1997)
- 10) T. Obikawa, W. N. Liu, T. Shirakashi; Proc. IMCC'95, 2, 55 (1995)
- 11) S. Vuorinen, J. Skogsmo; *Thin Solid Films*, 193/194, 536 (1990)
- 12) P. Hansson, M. Halvarsson, S. Vuorinen; *Surface and Coatings Technology*, 76/77, 256 (1995)
- 13) H. G. Prengel, W. Heinrich, G. Roder, K. H. Wendt; *Surface and Coatings Technology*, 68/69, 217 (1994)
- 14) 鈴木 寿編著; 超硬合金と焼結硬質材料, p. 206 (丸善, 1986)
- 15) 斉藤 実, 寺田 修, 鈴木 寿; 粉体および粉末冶金, 42, 634 (1995)