

論文の内容の要旨

論文題目 工具性能向上のための表面改質放電加工

氏 名 毛呂 俊夫

本論文は、工具性能向上のための表面改質放電加工(EDC: Electric Discharge Coating)に関するものであり、実用的な表面改質放電加工法を確立することを目的としている。

複合構造体電極法による表面改質放電加工

材料の高機能化、低コスト化のため、最近では蒸着法による CVD, PVD によって、TiC, TiN, TiCN, TiCNAl などが施され、加工現場に定着している。

一方、放電加工に関しても、付着や電極材の移行現象が確認されており、これを応用した表面改質加工が毛利らによって複合構造体電極法として 1990 年頃開発された。本方式は、多量の電極消耗を実現するため電極を圧粉体構造とし、電極材の移行付着現象をアシストする。工業的にも圧粉体は成型が容易で、電極の任意形状の加工が比較的簡単である。

電極材には、WC-Co 粉末、Ti 粉末が用いられ、鋼材に WC 系の厚膜、鋼材および超硬材表面に TiC の硬質被膜が形成された。Ti 粉末の代わりに Ti 金属を用いても、Ti 粉末同様 TiC 被膜を形成できる。TiC は、油中の分解カーボンと電極材料の Ti 成分との合成によって生成されるため、活性化しやすい Ti 材料が望ましい。

上記の複合構造体電極法による TiC の生成をより実用的なものにするため、TiH₂ を主成分とする圧粉体電極法（以下、TiH₂ 電極）が毛利、斎藤らによって研究、開発された。その後、工業的な用途への普及を図るため WC-Co 粉末を用いる方式と同様、電極材をそのまま移行させる方式も検討し、TiC 焼結体電極法（以下、TiC 電極）を開発した。

TiH₂ 電極は、プレス成形だけで製作できるため、実験室での基本的な成膜特性評価に用い、順次、電極サイズを大型化して実用化評価を行った。しかしながら、プレス成形のみでは、大型電極の製作が困難なため、最終的な実用化には TiC 電極によって、工具および金型への応用研究を行った。なお、TiH₂ 電極の抗折力は 7.3N/mm²、TiC 電極は 14.1N/mm² で、約 2 倍の機械的強度の違いがある。この結果、TiH₂ 電極の消耗速度は 0.050mm³/s 程度、TiC 電極では 0.025mm³/s 程度になる。

水素化チタン圧粉体電極による成膜特性

TiH₂ 電極による成膜に関しては、鋼材表面に硬質の TiC 膜を高速に形成でき、加工時間に対し、10 μm までは指数関数的に増大し、その後はほぼ一定の成長速度で増大する。これに対応して、硬さは約 10 μm で最大値になり 2500–3000Hv に到達した後は、徐々に低下する現象が現れる。一

方、約 $10\mu\text{m}$ を超える膜厚では、脆く簡単に削れるため、これ以上の膜厚は工業的な意味を持たない。薄膜の耐磨耗性は比較的高く、超硬チップの切削試験においても無処理品に対して 2 倍程度の寿命延長効果が確認された。硬さが低下する要因は、内部の気孔を多く含む被膜構造にあり、多量の電極消耗と水素ガス発生が原因している。

一方、電極消耗は電極面積の影響を大きく受ける。電極面積が大きくなるほど消耗速度が増大する強い面積効果が表れ、一般の放電加工とは大きく異なる。この面積効果は、主に面積が大きい放電間隔が長くなった場合、放電の気化爆発力が最大になるため生じるもので、電極材の複合体構造にも大きく依存する。極間のエネルギー密度を基準として、成膜特性を表すと電極消耗を除き、膜厚、硬さは面積、加工条件の違いを吸収して、統一的に議論できることがわかった。

炭化チタン焼結体電極による成膜特性

実用化を目的に開発された TiC 電極による被膜は、きわめて薄く平均 $2-3\mu\text{m}$ 程度の厚さで、 2000Hv 程度の表面硬さが得られる。また、母材内部にも数 μm 程度拡散浸透し、TiC 成分の傾斜性を持つとともに、耐スクラッチ試験においても剥離しない極めて強靱な被膜であることがわかった。電極消耗に関しては、 TiH_2 電極に比べて弱い面積効果が現れる。膜厚、硬さは面積、加工条件を含み極間のエネルギー密度で統一的に議論できることは TiH_2 電極と同様である。

硬さ測定に関連して、被膜を順次高さを変えて研削して測定すると、母材と同一の高さにおいても $1500-2000\text{Hv}$ 程度の硬さが残り、硬さの傾斜性がより明確に見出される。他の被膜には無い大きな特徴の一つである。これは、切削工具や金型への適用を考えると耐磨耗性、耐はくり性において極めて強いことが期待される。ピンオンディスク磨耗試験の結果、無処理の超硬ピンに対し、その磨耗量は数分の一にまで低減できた。

表面改質放電加工における成膜プロセスと堆積機構

放電加工による堆積現象をより正確に検討するため、 TiH_2 電極を用いて被膜生成プロセスを検討した。その結果、成膜に関しては堆積初期の過渡現象とその後の安定成長過程を伴う 2 つの異なる成長プロセスを持つ。過渡現象過程では、被膜成長率、硬さ、被膜成分濃度、電極消耗速度が加工時間（被膜厚さ）に対応して大きく変化し、その変化はおおむね膜厚 $10\mu\text{m}$ までに終了する。いわゆる表面改質加工における過渡現象が終了する。この被膜成長は、被膜内部の空隙の増加をもたらし、厚みの増大に対し、被膜密度が低下することを意味する。電極消耗速度の過渡現象は TiC 電極においても同様に現れる。

母材材質の影響に関しては、鋼材、超硬、Al、Cu、TiC 焼結板で堆積性を調べたが、膜厚は鋼材、超硬、Al、Cu の順に薄くなり、Al、Cu では被膜が粒状化して十分な堆積は難しい。TiC 焼結板では、除去加工になる。TiC を除けば、母材の熱加工指数 μ （温度伝導率×材料の融点）が大きいほど堆積が少ない傾向になる。

TiC 板による除去加工は極めて興味ある現象であり、 TiH_2 電極による多量の電極消耗にも関わらず生じることは、TiC 電極でも同様な現象が期待される。このため、今まで飽和傾向をもつとされていた TiC 電極の成膜特性に関し、長時間の加工を行った結果、一定の膜厚に到達後除去加工に変化した。また、同時に電極消耗速度の過渡現象が生じることは被膜の熱物性値の変化を伴うはずで

ある。調べた結果、被膜表面が後退しても被膜層の厚みは一定の厚みを維持したまま推移することが確認された。この結果、TiC 電極で得られる被膜は熱物性値的に、焼結 TiC とほぼ同じ性質と考えられ、明らかに TiH₂ 電極によってえられる被膜とは異なる。

放電加工による表面改質工具

以上の検討結果より、TiC 電極による硬質被膜は、その表面硬さが十分高く、かつ母材内部に数 μm 程度拡散浸透した極めて強靱な被膜であり、焼結 TiC に極めて似た性質であることがわかった。

この被膜を金型や切削工具に適用することにより、従来の PVD、CVD の代用技術として工業化が期待できる。本研究の目的は、実用化システムの実現にある。すでに普及している PVD、CVD に対して代用可能かどうか、最初に切削工具を用いて検討した。切削試験の結果、TiN ドリルに対しチゼル部、外周磨耗が大きく改善される。ステンレス材底付き穴加工において TiN ドリルは途中で欠損、折れが発生するが EDC-TiC では欠損は生じない。

ハイスボールエンドミルの場合、逃げ面の磨耗域は無処理に比較して約 30%改善される。超硬エンドミルの場合、PVD-TiN 処理品に対しやや劣り、改善が必要である。一方、超硬ドリルによるインコネル材加工の場合は、EDC-TiC 処理品はきわめて高い耐久性を示す。特に低速切削条件において大きな効果が期待できる。上記の寿命問題を解明するため、荷重をパラメーターとした磨耗比較試験を行った。その結果、PVD-TiN、CVD-TiC に比較して EDC-TiC は荷重に対して大きく影響を受けることが判明した。このため、被膜内部の構造に違いがあると予想され EDC 被膜の結晶構造に注目し、結晶学的に分析した。

その結果、EDC 膜は、CVD 膜、TiC 焼結体に比較して X 線回折ピークが低く広がり、結晶格子が小さい。結晶構造としてはアモルファスとなっている。TiC 被膜の TiC 分子比は TiC_{0.45} になり、炭素が不足している。これは、Ti 分子間への侵入型結晶構造を取る炭素 C が、放電熔融の過程で結晶構造を崩しながら母材表面に熔融固溶体を形成するためと考えられる。従って、結晶子径が CVD の TiC に比較して約 1/5 と小さく緻密な多結晶構造になっていない。これが、被膜強度を低下させる最大の要因と考えられる。従って、現時点では、高荷重の切削抵抗が作用する切削より、受圧面積が大きく、単位面積当たりの負荷が少ない、かつ材料の流動速度が低い金型に大きな効果が期待できる。

表面改質放電加工の金型への応用

金型への適用の結果、薄板板金プレスへの適用に関しては、大きな寿命延長効果が確認され、他の TiN コーティングに比較しても十分使用可能である。高精度が求められるシェービング金型への適用に関しても、TiC 被膜面を研削することにより適用可能で、寿命改善効果は大きい。プレス曲げ金型への適用に関しては、材料のすべりが発生する個所への適用が効果的である。冷間鍛造金型への適用に関しては、最も激しい磨耗部位への部分的な適用が望ましく、EDC 処理面に対し手磨きにより面粗さを改善することで、無処理の金型寿命に対し数倍以上の寿命延長効果が期待できる。これらは、いずれも TiN などの適用効果が無いもので、EDC 被膜の耐スクラッチ性が大きく発揮される適用分野であることがわかった。

以上をまとめると、工具への適用に関しては、送り量 0.5mm/rev、切削速度 200m/min 以内が

EDC 工具の使用限界で, 金型に関しては, 転造金型を除けば, 磨いて使用することを前提に鍛造型, 磨き無しでプレス型へ適用可能であり, 寿命延長効果が大きく期待できる.

EDC の課題として, 面粗さの改善がある. この解決のため, 機上研削法を導入し, EDC 処理したものをそのまま, 工作機械にロボットで搬送し, 高速スピンドルによる研削加工を試みた. その結果, $1\text{-}2\ \mu\text{m}$ 程度の誤差で, 硬質被膜を高精度に研削できることが証明できた.

結論

以上, EDC で得られる被膜は CVD, PVD 並みの機械的性質を持つが, 機械加工工具への適用に関してはドリルを除き十分とは言えない. 一方, 鍛造金型, 板金プレスなどの金型全般に対しては, 極めて高い耐久性を実現することができた.

表面改質放電加工法 (EDC) は, PVD, CVD に比較すれば, 前処理の必要が無く, 部分処理に向いていること, 金型製作現場に既に放電加工機が普及していることなどのため, 広く利用される. さらに, 硬質被膜に潤滑などの機能性を付与することも可能であり, 新機能被膜として将来性も大きく今後の利用技術開発への期待は極めて高い.