

超硬・脆性材加工に求められる 微小切込を実現する最新技術

The Modern Technology which Achieves
the Minute Cut for Carbide and Brittleness Material



佐藤 欣且*¹
Yoshikatsu Sato

近年、切削加工においては、超硬・脆性材といった難削材から銅・グラファイトといった快削材まで、幅広い材質のワークを高精度にかつ高能率に加工することが求められている。三菱重工業(株)は、小型精密加工機 μ V1、独自開発した撮像式工具測定システム、加工技術の高度化によってこれらのニーズに応え、従来は、ワーク材質や工程によって加工機を使い分けていたものを1台に集約することを可能とした。

1. はじめに

成長を続ける東南アジアを中心とした新興国で生産される製品との差別化を図るため、国内の製造業は、より高精度で付加価値の高い製品を、より短納期・低コストで生産することが求められている。これら国内製造業の置かれた状況を背景として、高精度かつ高品質な製品を長期間安定して生産するために高精度で耐久性のある金型へのニーズが高くなっており、金型の材質として耐熱性・耐摩耗性に優れる超硬合金を採用することが現在注目されている。

超硬合金は非常に硬く、また脆い特性があるため、これまで切削加工ではなく、放電加工や研削加工が用いられてきたが、昨今、切削工具の開発が進み、超硬合金金型の切削による直彫加工が品質、納期、コストともに実用レベルに至るようになってきている。一方で放電加工においても、使用する電極材料や加工方法の開発が進み、安価で高能率な加工ができるようになってきている。

切削加工においては、超硬合金のような難削材から放電加工用の電極などの快削材まで、言わば両極端の材質を高精度・高能率に加工することが求められている。当社はこれらのニーズに応えるべく、小型精密加工機“ μ V1”(主仕様を表1に示す)を用いて、様々な材質の高精度・高能率加工に取り組んできており、本稿ではその実例とそれらを実現するための技術について紹介する。

*1 機械・設備システムドメイン 工作機械事業部技術部 グループ長

表1 小型精密加工機 $\mu V1$ の主仕様

移動量	X軸Y軸Z軸	450×350×300mm
	主軸端面～テーブル上面	150～450mm
テーブル	作業面広さ	500×400mm
	最大ワークサイズ	500×500×200mm
	最大積載質量(等分布)	125kg
	上面形状	T溝幅 14×3本, 100mm ピッチ
	床面からテーブル上面	850mm
主軸	回転速度	400～40 000min ⁻¹
	主軸テーパ穴	HSK-E32
送り速度	早送り速度	15 000mm/min
	切削送り速度	1～15 000mm/min
自動工具 交換装置	収納本数	18本, 30本(オプション)
	最大工具径	φ40mm
	最大工具長さ	130mm
機械サイズ	高さ	2 260mm
	幅×奥行	1 920×2 065mm
	質量	5 500kg

2. 超硬・脆性材加工

2.1 超硬・脆性材加工における課題

超硬合金の切削加工用の工具として、主にダイヤモンドコートやダイヤモンド焼結体を使用したものがあるが、いずれも特に仕上げ加工においては、切込みが数 μm からサブミクロンのレベルになる。このような極微小切込みの加工においては、機械の位置決め精度や熱変位精度、振動といった誤差要因が大きいと切り込めない、あるいは切込みが大きくなって工具が破損するなどの問題が発生する。

一方、加工の高能率化を図る上で、荒加工では切削条件を上げるため切削負荷が増大し、機械や主軸の剛性が弱いと、びびりや工具破損が発生する。このため荒加工と仕上げ加工で加工機を変えるなど、工程や設備の負担が増加する要因となる。

また工具先端の加工点の位置把握、熱変位や振動などの挙動把握も正確にできないと加工が困難となり、機上での測定技術も重要となる。機上の工具測定装置としては、工具をセンサーに直接接触させて検知する接触式とレーザー光を工具で遮ることで検知するレーザー式が一般的である。工具を停止させて測定する接触式ではもちろんのこと、工具を回転させながら測定できるレーザー式においても測定は瞬間的なものであるため、主軸や工具の熱変位が収束したか否かを把握することができず、測定のタイミングが適切でないと、測定後に熱変位が発生し、加工誤差となる場合がある。

2.2 $\mu V1$ 及び撮像式工具測定システムによる解決策

$\mu V1$ は、主軸に転がり軸受を用い、独自の特殊油潤滑と主軸内部冷却により、高剛性と高速低振動性を両立させ、低熱変位と長時間の安定性、繰返し再現性を実現している。また機械本体には滑り摺動面を採用し、高剛性と高減衰性を持たせており、高精度加工機でありながら荒加工もできる高剛性機となっている。

機上の測定技術としては、独自に CCD カメラを用いた“撮像式工具測定システム”を開発し、工具を加工する回転速度で回転させながら主軸や工具の熱変位をリアルタイムで測定可能にしている。⁽¹⁾

2.3 加工事例

(1) 超硬穴あけ及び形状加工

超微粒子超硬合金に穴あけ加工と形状加工を実施した。切削条件を表2に、ワークの写真を図1に示す。穴あけ加工では1穴の加工時間が4分、形状加工では1形状の加工時間が24分と非常に高能率に加工できている。

表2 超硬穴あけ及び形状加工切削条件

工程	工具	主軸回転速度 (min ⁻¹)	送り速度 (mm/min)	ピック量(mm)	
				XY	Z
穴あけ加工	Φ1.0ドリル	20000	8	—	0.0004
形状加工	Φ1R0.5 ボールエンドミル	30000	300	0.25	0.05



図1 超硬穴あけ及び形状加工ワーク

(2) 超硬パンチ及びダイ加工

超微粒子超硬合金にパンチ及びダイ形状を加工した。切削条件を表3に、ワークの写真を図2に示す。トータルの加工時間はパンチに4時間40分、ダイに6時間30分を費やしたが工具損耗も無く、良好な勘合精度を得ることができた。

表3 超硬パンチ及びダイ加工切削条件

工程	工具	主軸回転速度 (min ⁻¹)	送り速度 (mm/min)	ピック量(mm)	
				XY	Z
大荒加工	Φ6R3 ボールエンドミル	10000	200	0.4	0.1
荒加工	Φ1R0.5 ボールエンドミル	30000	200	0.2	0.05
荒加工	Φ0.6R0.3 ボールエンドミル	30000	150	0.1	0.02
中仕上げ加工	Φ0.3R0.15 ボールエンドミル	30000	100	0.03	0.01
中仕上げ加工	Φ0.2R0.1 ボールエンドミル	30000	100	0.01	0.01
仕上げ加工	Φ3R1.5 ボールエンドミル	27500	200	0.08	0.005
仕上げ加工	Φ1R0.05 ラジアスエンドミル	30000	200	0.1	0.01
仕上げ加工	Φ0.2R0.2 ボールエンドミル	30000	200	0.01	0.01
仕上げ加工	Φ0.8R0.4 ボールエンドミル	30000	200	0.01	0.01



図2 超硬パンチ及びダイ加工ワーク

(3) SiC セラミック溝加工

ダイヤモンド、炭化ホウ素に次ぐ硬さを持つ SiC セラミックを切削加工した。切削条件を表4に、ワークの写真を図3に示す。Z軸方向の切込みが 0.001mm や 0.002mm と極微小であったが形状破損も発生せず良好に加工することができた。

表4 SiC セラミック溝加工切削条件

工程	工具	主軸回転速度 (min^{-1})	送り速度 (mm/min)	ピック量(mm)	
				XY	Z
外輪荒加工	Φ1フラットエンドミル	40000	100	0.5	0.002
外輪仕上げ加工	Φ1フラットエンドミル	40000	100	—	0.002
中心穴荒加工	Φ4フラットエンドミル	40000	100	—	0.001
中心穴仕上げ加工	Φ1フラットエンドミル	40000	100	0.03	0.002
翼形状荒加工	Φ1フラットエンドミル	40000	100	0.03	0.002
翼形状仕上げ加工	Φ1フラットエンドミル	40000	100	0.03	0.002



図3 SiC セラミック溝加工ワーク

3. 銅・グラファイト加工

3.1 銅・グラファイト加工における課題

放電加工の電極には主に銅やグラファイトが用いられる。一般的に銅やグラファイトは、鋼材などに比べて切削性が良く切削条件を上げることができる。

また昨今、製品の小型化・高機能化が求められる中、金型及び電極においても形状の微細化、複雑化などが進んできている。このような微細・複雑な形状を高速で加工する際には、機械本体や送り系の剛性が弱い場合や機械の動作の制御が適切でない場合、加工形状が崩れることが多い。これを防止するため、切削条件を緩和して低速で加工することが考えられるが、複雑な形状を3次元的に加工する場合には、細かい切込み量で位置をずらしつつ加工を進めていくため、加工時間が増大するなど、製作工程への影響が大きい。

3.2 $\mu V1$ による解決策

$\mu V1$ は前述した通り、主軸及び機械本体を高剛性構造としている。また送り軸には大径で狭ピッチのボールネジや強固な支持方式を採用することで、高剛性で応答性の高い送り軸系を構成している。更にNCの高速・高精度制御機能をベースとして、独自の制御チューニングを施した“HGP2 制御”を用いることで、微細・複雑形状の高速加工においても加工形状が崩れない機械動作を実現している。

昨今、送り軸の駆動にボールネジではなくリニアモータを採用した機械も多くなってきているが、リニアモータは長い距離を高速で駆け抜けるのは得意だが、“ピタッと停止する”あるいは“停止し続ける”のは不得手で、微細・複雑形状加工時の動作はイメージに反して逆に時間を要する。これは重い荷物を人力で持ち上げる場合と、ジャッキを使って持ち上げる場合を例にとりて比較すると分かりやすい。一気に持ち上げるには人力の方が早いですが、細かく上下に正確な動きをしようするとジャッキの方がはるかに楽である。

3.3 加工事例

(1) コネクタ銅電極加工

コネクタの金型に用いられる電極(小さなフィン形状)を加工した。切削条件を表5に、ワークの写真を図4に示す。本来4角形状なのだが、HGP2 制御を OFF した状態では図4(a)のように角が丸くなり形状崩れが発生している。対して HGP2 制御 ON では形状崩れもなく高速・高精度に加工できている(図4(b))。

表5 コネクタ銅電極加工切削条件

工程	工具	主軸回転速度 (min^{-1})	送り速度 (mm/min)	ピック量(mm)	
				XY	Z
荒加工	Φ6 フラットエンドミル	8000	1000	3.0	0.5
フィン荒加工	Φ0.8 フラットエンドミル	30000	1000	—	0.1
中仕上げ加工	Φ0.4R0.2 ボールエンドミル	40000	1200	0.05	0.05
仕上げ加工	Φ0.4R0.2 ボールエンドミル	40000	1500	0.01	0.05

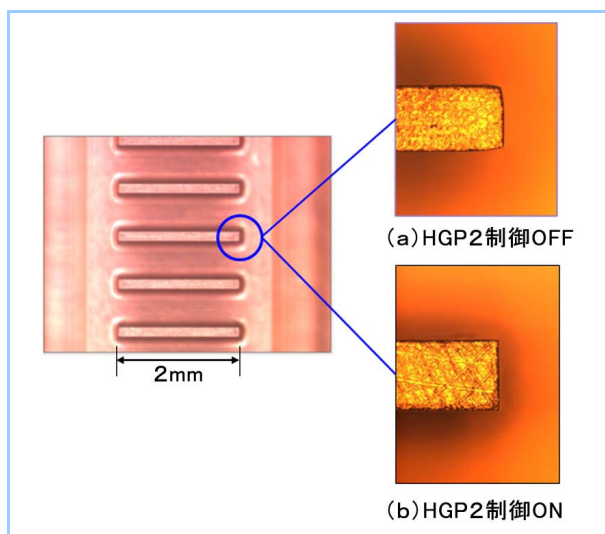


図4 コネクタ銅電極加工ワーク

(2) ベベルギヤ金型用グラファイト電極加工

一般的に銅電極に比べてグラファイト電極は、切削性が良い、バリが出ない、放電加工時に大電流が流せる、などのメリットがあるが、一方で異常摩耗が発生する、面粗度が悪いなどのリスクもある。昨今、グラファイトのメリットを生かしながらリスクを軽減し、かつコストを抑えた、グラファイトに銅を含浸させた“銅グラファイト”が注目されている。

銅グラファイトを用いてベベルギヤの金型用の電極を加工した。切削条件を表6に示す。また実際に作成した電極を用いて超硬合金金型に放電加工を実施し、その後 μ V1にて仕上げ加工を実施した。

表6 ベベルギヤ金型用グラファイト電極加工切削条件

工程	工具	主軸回転速度 (min^{-1})	送り速度 (mm/min)	ピック量(mm)	
				XY	Z
荒加工	Φ6R1 ラジラスエンドミル	8000	2500	2.0	0.5
中仕上げ加工	Φ3R0.5 ラジラスエンドミル	30000	2000	1.0	0.1
仕上げ加工	Φ1.5R0.5 ラジラスエンドミル	31000	1000	0.5	0.03

図5において上が加工した銅グラファイト電極、右下が銅グラファイト電極により超硬合金に放電加工を実施したもの、左下が更に μ V1で仕上げ切削加工したものである。従来の放電加工後に磨き仕上げを実施していた場合と比較して工数を約13%低減することができている。



図5 銅グラファイト電極ワーク(上) 及び
ベベルギヤ金型(左下:仕上げ後、右下:仕上げ前)

4. まとめ

小型精密加工機 $\mu V1$ による超硬合金、脆性材、銅、グラファイトの高精度・高能率加工の実例を紹介した。特に最近注目されている超硬合金の切削加工については、 $\mu V1$ の長時間安定して高精度を維持するというコンセプト、そして撮像式工具測定システムの工具の先端を正確に測定する技術が良くマッチングしている。またいわゆる難削材と言われる材料から快削材まで幅広い材質のワークを荒加工から仕上げ加工まで、 $\mu V1$ は1台の機械で加工することができる。これまでワーク材質や工程によって機械を使い分けていたお客様に対しては設備やコストを圧縮できるメリットがあると考えている。

今後も市場のニーズに応えるべく、更に機械本体、オプション、加工技術を高度化し、製造業の発展に少しでも貢献していけるよう努める所存である。

参考文献

- (1) 佐藤欣且, 撮像式工具測定システムを利用した高精度加工, 三菱重工技報, Vol.49 No.3 (2012) p.11~p.15