特集

切断加工の最新技術

ワイヤ放電加工機の最新技術紹介*

佐藤 清 侍**

The Latest Technology on Wire-Electrical Discharge Machining*

by SATO Seiji**

キーワード

放電加工, ワイヤ放電加工機, 高精度化, 生産性向上, ランニングコスト低減

1. はじめに

放電加工は、放電の火花が飛ぶことによってその部分が削られることを積極的に利用する加工方法で、工具電極と工作物にパルス電圧を印加してアーク放電を繰り返し発生させ、この放電のエネルギーにより工作物を加工するものである。放電加工機は、焼き入れ鋼や超硬合金といった高硬度で強靱な金属材料を微細、かつ、高精度に加工することが可能なため、金型加工のマザーマシンとして広く使用されている。

ワイヤ放電加工機は、高硬度材料の切断加工が可能なることから、プレス金型を製作する工作機械として発達してきたが、最近では、加工性能の向上と共に、医療関連部品や環境対応のエネルギー関連技術の部品加工にも多く用いられている。本稿では、金型製作や高精度部品加工用途に使用されるワイヤ放電加工の加工原理と最新技術について説明する。

2. ワイヤ放電加工の加工原理について

ワイヤ放電加工は、工具電極としてワイヤ電極を用い

図1 ワイヤ放電加工の原理と加工機の構成

*原稿受付 平成21年12月28日
 ** 三菱電機(株)名古屋製作所 放電システム部 加工技術課
 Mitsubishi electric corporation Nagoya Works EDM
 Systems Dept. EDM Application Technology Section

て糸のこぎりのように被加工物を切断する加工方法である。ワイヤ放電加工の加工原理と一般的なワイヤ放電加工機の構成を図1に示す。

2.1 ワイヤ放電加工機の機械構成

ワイヤ放電加工機は、工作物を固定するためのテーブル、テーブルを駆動するX、Y軸、テーブル加工を行うためのU、V軸で構成され、各軸の移動はCNC制御装置の指令で行われる。また、ワイヤ電極と工作物で形成される極間には加工電源を接続し、電圧を印加して放電を発生させ加工を行う。加工液は加工液供給装置より加工槽に供給されるが、加工液供給装置には、加工粉を除去するフィルター、イオン交換水の抵抗値を維持するイオン交換樹脂が装着されている。なお、図1には、CNCの制御指令、加工電源の電源波形、加工液の供給経路を同時に示す。

2.2 ワイヤ自動供給装置

最近のワイヤ放電加工機には工作物のスタート穴等にワイヤ電極を自動挿入するワイヤ自動供給装置が装着されることが多い。ワイヤ自動供給装置を使用することで、多数個取り等の連続無人運転が可能となり、ワイヤ放電加工の省力化を実現している。また、 $\phi 0.1\text{ mm}$ 以下の細線ワイヤ電極を機械にセットする作業はかなりの熟練を要し、生産性を妨げる要因となるが、最新のワイヤ自動供給装置では、ワイヤ電極径が $\phi 0.03\text{ mm}$ 程度までを自動供給可能としており、極細線ワイヤの取扱いを容易にしている。

2.3 加工槽の種類（吹掛け／浸漬）

従来のワイヤ放電加工機は、加工液をワイヤ電極と工作物で形成される極間にのみ供給する吹掛け式の機械が多かったが、最近は機械に加工槽を設け、工作物を加工液に浸漬させた状態で加工を行う浸漬式の加工機が一般的になっている。吹掛け式の加工機の場合は、工作物端面や段差ワークの加工などでは、加工液が飛散し放電部分に十分な加工液が供給されないため、ワイヤ断線が発生しやすいことから、加工条件選択や段取り作業に習熟を要する。一方、浸漬式加工機の場合は、高板厚のテーブル加工においても放電部分に加工液が十分に供給される

ので、安定した加工を容易に実現できる。

2.4 加工速度

ワイヤ放電加工におけるファーストカットの加工速度は、単位時間あたりの加工断面積で表すのが一般的である。したがって、加工速度（ mm^2/min ）＝加工送り速度（ mm/min ）×工作物板厚（ mm ）で表ことができ、例えば、板厚 60 mm の工作物の加工送り速度が $5\text{ mm}/\text{min}$ の場合、加工速度は $60 \times 5 = 300\text{ (mm}^2/\text{min)}$ となる。

加工速度に与える要因としては、①電気条件、電源特性、②加工液種類（水、油）、加工液圧、③ワイヤ電極径、電極材料、④工作物板厚、材料などがあり、一般に放電エネルギー、放電頻度、加工液圧が高いほど、ワイヤ電極径が大きいほど、加工速度も大きくなる。工作物板厚の影響としては、板厚が薄くなるほど小さな面積に放電が集中してワイヤ断線が発生しやすくなるため、電気条件を下げる必要がある。逆に板厚が厚くなると、加工液の供給が不十分になるため、やはりワイヤ断線が発生しやすくなる。したがって、加工板厚が厚すぎても薄すぎても加工速度は低下し、通常 60 mm 前後の板厚で最高速度（ mm^2/min ）が得られることが多い（図2参照）。また、加工液の影響としては、水を加工液とした場合は、冷却性の関係から、一般に油の3倍程度の加工速度が得られる。

2.5 加工精度

ワイヤ放電加工機における加工精度には、面粗さ、形状精度、真直精度、コーナー形状精度がある。ワイヤ放電加工で面粗さや形状精度を向上させる方法として、セカンドカット法がある。セカンドカットとは、あらかじめ仕上げ代を残して一次加工（ファーストカット）を行い、残された仕上げ代の加工は電気条件を仕上げ条件に切り替え、オフセット量と電気条件を徐々に小さくして2回以上表面部を加工除去していく加工方法である。一般に、加工速度の速い強い電気条件で加工を行うと、面粗さは粗くなり、さらに形状精度、コーナー精度などが損なわれるが、セカンドカットを施すことによりこうした問題点が解決される。何回までセカンドカットを施すかは、要求する加工精度と加工時間との兼ね合いで選択する。図3に、加工回数と面粗さ、加工回数と加工精度の関係を示す。

図2 工作物板厚と最大加工速度の関係

図3 加工回数と加工面粗さ、加工精度の関係

(1) 面粗さ

ワイヤ放電加工による加工面粗さは、放電痕の大きさにより決定される。したがって、放電エネルギーの高いファーストカットの電気条件では、面粗さは粗く $20\mu\text{mRz}$ 程度の加工面となる。一方、放電エネルギーの低いセカンドカットの電気条件では、最良仕上げ加工面として $0.5\mu\text{mRz}$ 程度の面粗さを得ることが可能である。

(2) 形状精度

形状精度は、加工中における加工溝幅の均一性、ワイヤ電極と工作物の相対移動軌跡の正確さに左右される。放電エネルギーや放電頻度が高いほど、また一定加工条件下では加工送り速度が遅いほど、加工溝幅は大きくなり、そのバラツキ幅も大きく、均一性も低下する。さらに工作物の熱変形による位置ずれ、工作物の内部応力開放による位置ずれによっても形状精度が悪化するが、前述のセカンドカットを使用することで加工精度を改善できる。

(3) 真直精度（タイコ形状）

一般に、ワイヤ放電加工による加工部断面形状はタイコ状をなしている。これはワイヤ放電加工に特有な加工部がへこむ現象で、加工品の真直精度を悪化させている。タイコ形状の発生原因は、ワイヤの振動、および加工物の中央部における加工粉の滞留による放電間隙の拡大によるもので、一般にギャップの広い加工を行うほどタイコ形状は大きくなる。

(4) コーナー形状精度

コーナー形状精度の劣化は、①放電反発力によるワイヤ電極のたわみ、②コーナー部での加工量変化による加工溝幅変化、③ワイヤ電極の振動、によって発生する。①、③については加工板厚の増大にしたがって大きくなるため、一般には高板厚の加工ほどコーナー精度は悪化する。なお、最近のワイヤ放電加工機では、荒加工や仕上げ加工におけるコーナー形状精度を改善するコーナー制御を標準搭載している加工機が多い。

2.6 ワイヤ電極

ワイヤ放電加工に使用するワイヤ電極は、黄銅線（Cu65%:Zn35%あるいはCu60%:Zn40%の組成）が現在ではもっとも一般的に使用されている。硬線と軟線があるが、特殊な広角度テーパ加工のように電極線に軟らかさが必要な加工以外では、張力を高く設定できる硬線（抗張力が 1000N/mm^2 程度）が使用されることが多い。

ワイヤ放電加工では、工作物板厚に応じて適合するワイヤ線径は異なり、板厚が厚くなるとテンションが高く設定できない細いワイヤ電極ではタイコ量が大きく加工精度が悪化する、加工速度が著しく低下するといった問題が発生する。また、最小コーナーRや最小スリット幅によってもワイヤ線径は制限されることになる。現在、市場に流通しているワイヤ電極の線径としては、 $\phi 0.03\text{mm} \sim \phi 0.3\text{mm}$ の範囲であり、以下に線径別の用途を示す。

① $\phi 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.15\text{mm}$ ：微細精密加工用、

板厚 40mm 以下

② $\phi 0.2, 0.25\text{mm}$ ：一般加工用、板厚 250mm 以下

③ $\phi 0.3\text{mm}$ ：高速加工用、ファーストカット専用、板厚 40mm 以上

2.7 ワイヤ放電加工の加工面性状

(1) ワイヤ放電加工の加工変質層

放電加工は、液中における短時間のアーク放電による高温・高圧によって形成される放電痕の累積によるものであるから、加工面からわずかな深さの表面層は、急熱・急冷の熱変化と、高温・高圧化における物理化学的作用の両方の影響を受け、母材とは異なった性質を示すようになる。加工面に形成されるこうした層は一般に加工変質層と呼んでいる。なお、変質層の厚みは電気条件によって異なるが、通常は加工面粗さに対し同程度から2倍の厚さで形成される。

(2) 無電解加工による加工変質層の低減

直流電源を使用したワイヤ放電加工機の場合、加工液にイオン交換水を使用するため、一般に電解作用と呼ばれる電気分解によって、陽極である工作物の金属イオンが解け出し、加工面の硬度低下や腐食やさびが発生するといった問題がある。最近のワイヤ放電加工機においては、無電解（交流）電源が開発され、水を加工液とした場合でも電解レス加工が実現可能となった。図4に無電解電源と直流電源を使用した加工面の加工変質層の模式図と加工面の硬さ変化を示す。図に示すように、直流電源の加工面は、加工面近傍に電解変質層と熱変質層が形成されるので、加工面より約 $30\mu\text{m}$ 程度の深さまで硬度低下が発生する。一方、無電解電源を使用した加工の場合、電解変質層が形成されず、加工面の軟化は熱変質層分（約 $5\mu\text{m}$ ）に抑制することが可能である。以上のようにワイヤ放電加工機の場合、特に直流電源を使用した機械の場合、放電エネルギーの高い加工条件では電解作用の影響で加工表面の軟化層が深くなる。このため、金型として使用する際に、初期摩耗がおおきくなる欠点がある。

図4 直流電源と無電解電源の加工変質層

図5 ワイヤ放電加工機 NA シリーズ

図7 TS マスターによる微細スジの除去

図6 オプトドライブによる真円加工

図8 高精度コーナー制御の加工例

3. 最新のワイヤ放電加工機^{*1}

高硬度材料の高精度切断加工が可能なワイヤ放電加工機は、金型製作や高精度部品加工に使用されるが、金型の精度向上や生産性改善の要望により、加工精度や生産性の向上、ランニングコストの低減といったことが望まれている。加工性能の高精度化や多様な市場の要求に応えるため、当社では構造体・駆動方式・制御システムを一新したワイヤ放電加工機 NA シリーズ（以下 NA シリーズ、図5）の開発を行った。NA シリーズは、高精度化に加え、消費電力の削減、ランニングコスト低減、ユーザビリティの向上を行った新世代のワイヤ放電加工機である。以下に NA シリーズに搭載した新機能・新技術を紹介する。

3.1 オプトドライブシステム（高応答・高精度化）

ワイヤ放電加工において高精度加工を実現するには、軌跡制御、加工サーボ、加工電源制御の各々が高次元で協調制御される必要がある。特に、軌跡制御は機械の軸駆動に関わる部分であり形状加工精度の面で非常に重要である。

NA シリーズでは、Advance 制御装置と周辺機器を高速光通信により接続することで、通信速度従来比4倍の高応答サーボシステム「オプトドライブシステム」を搭載した。アンプユニットに弊社製高応答制御アンプを搭載し、高速光通信による位置制御を行うことで、ナノレベルの高精度モーションコントロールが可能となる。これにより、従来では超高精度加工の領域であった真円度 $0.8\mu\text{m}$ の加工が可能となった（図6）。

3.2 微細スジ除去技術 TS マスター（高精度化）

金型の更なる高精度化・高寿命化のためには、加工面を研磨して初めて確認できる微細なスジの除去まで改善を行う必要がある。微細スジの発生要因には、ワイヤ電極の張力変動が挙げられる。NA シリーズで開発したワイヤテンション制御技術「TS マスター」は、ワイヤの外乱状況をモニタリングすることで、ワイヤテンションを高精度にコントロールを行うことができる。同機能により、微細スジの確認が困難な水準にまで加工面品位を向上させることに成功した。加工面を比較した結果を図7に示す。

3.3 コーナー加工技術 CM3（高精度化）

ワイヤ放電加工において、コーナー部は加工量が急激に変化するため、精度を出しにくい箇所である。NA シリーズでは、オプトドライブシステムによる高精度・高応答化された駆動系のメリットを活用し、新コーナー加工制御方式「CM3」を開発した。CM3ではコーナー部の加工体積変化から、直線部とコーナー部の加工量が等しくなるように加工速度を制御する。その結果、図8に示すように複数コーナー R のある形状でも、従来の $2\sim 3\mu\text{m}$ から $1\mu\text{m}$ へと形状誤差を約1/3に低減した。

3.4 真直精度向上とワイヤ消費量削減 Digital-V 電源（高精度化・経済性向上）

ワイヤ放電加工はワイヤ電極が工作物と放電する際に、ワイヤ電極の消耗や振動が発生する。ワイヤ電極の消耗は、荒加工時のワイヤ断線や荒・仕上げ加工時の上下寸法差となり、ワイヤ振動によりタイコ形状が発生するが、荒加工から仕上げ加工までの全領域で放電パルスのデジタル制御を行う「Digital-V 電源」を開発し、放

図9 Digital-V 電源による真直精度の向上

※上記グラフデータは、同一加工量で比較した場合の数値

図10 ワイヤ消費量と消費電力量の削減

電一発毎の投入タイミングとエネルギーのコントロールを行うことで、真直精度の加工速度の両立を実現している。（図9）また、Digital-V 電源では、放電位置制御によりワーク板厚方向の加工形状の3次元的に調整できる形状制御電源「Digital AE II」を有している。この機能により、荒・中仕上げ加工における真直精度が向上し、ワイヤ走行を低速化させても、高い真直精度を維持する事が可能であるため、加工時間短縮とワイヤ消費量削減が可能となる。

3.5 ランニングコストの低減（経済性向上）

ワイヤ放電加工のランニングコスト削減と、地球環境保護への貢献という考えのもと、NA シリーズでは消費電力を削減する機能として「ウェイクアップモード」を開発した。これは夜間、週末の機械を使用しない時間帯に省電力モードに自動的に移行し、設定時間になると熱による機械変位を抑制するために、自動的に加工槽内に水をため液慣らしを開始する機能である。ウェイクアップモード使用時は、電力供給を機械維持に必要な部分に限定し、通常待機時に比べ電力消費量を1/5にしている。図10には消費電力量の削減例を示すが、加工時間の短縮との相乗効果により当社従来機種比で最大69%の消費電力（CO₂排出量換算値）の低減が可能となる。

3.6 段取り効率の向上（操作性向上）

自動車向け金型などによるワークの大型化や、多数部品の一括加工による生産性向上を実現するため、NA シリーズではテーブルの機械ストローク（X×Y×Z）を、400×300×220 mm（NA 1200）、600×400×310 mm（NA 2400）とし、従来機より面積比約37%拡大した。

さらにNA2400では三面昇降加工槽を採用し、段取り作業の容易化と共にロボットなどの自動化システムへ対応も容易に実現可能とした。

3.7 Advance 制御装置（操作性向上）

NA シリーズでは制御装置に、3次元CADとの親和性を重視した「Advance 制御装置」を採用している。Advance 制御装置には、15インチ液晶ディスプレイ・タッチパネルを採用し、大画面で視認性のよい表示と深い階層を排除したメニュー構成で、使い勝手を大きく進歩させた。またネットワーク・USBメモリ専用ポートを標準装備し、マウス・キーボードは人間工学から使いやすい位置関係に配置している。

4. おわりに

ワイヤ放電加工機への要求は、加工精度・速度などの

性能向上はもちろんのこと，省エネやランニングコスト削減などの環境負荷低減への配慮も必須となる．これらを実現するためにも当社の総合力を生かし，様々な市場ニーズに応えられる製品を今後も開発していく所存である．

参考文献

- 1) 電気加工学会誌 Vol.43/No.102 ワイヤ放電加工機 NA シリーズの開発