放電加工面の性状と高品位化*

増井清徳** 曾根 匠**

Surface Integrity and its Improvement of EDM / Kiyonori MASUI and Takumi SONE

Key words: surface integrity, electro-discharge machining, die and molding, surface defect, electrolytic corrosion, finishing technology, white layer, heat affected zone, ion-nitriding, residual stress

1. はじめに

放電加工は、火花放電による材料の熱的な溶融除去現象を利用するので、加工された表面には、母材とは質的に異なった「変質層」もしくは「異常層」が形成される。

近年、加工面については、寸法・形状精度や表面粗さなどの外観的な評価以外に、製品としての耐摩耗・耐食性などの性能的な評価をも包括しようとする「Surface Integrity (表面性状)」という言葉¹⁾²⁾がしばしば用いられ、加工面の改質・改善に対する関心がますます高まっている。

ここでは、放電加工された品物の精度や品質に直接的に影響を及ぼすと考えられる「加工表面の性状」について説明するとともに、高品位加工に対する留意点、ならびに改善策について紹介する。

2. 加工面のミクロ観察

形彫り放電加工と、ワイヤ放電加工では、機械構造上の違いがあるものの、両者は火花放電による熱的な溶融作用を利用するため加工表面の性状については、顕著な差があまり現れない。むしろ、加工条件のなかでも、加工液が絶縁性液か水溶性液かでその性状が大きく異なる。

図1は、油中の形彫り放電加工と、水中でのワイヤ放電加工における加工面の写真である。油中の放

電加工面は、溶融物で覆われ、そこには発生ガスによる孔や、溶融金属の凝固過程で生じたと考えられるマイクロクラックが観察される。最表面の「溶融再凝固層」は、加工断面の組織観察では、白色を呈することから、別名「白層」とも呼ばれる。

白層に続く内部の黒ずんだ部分は、溶融には至らな

I_p : ピーク放電電流, T_{on} : パルス幅

図1 放電加工面の状態 (SKD 11 (焼入焼戻し材))

* 原稿受付 平成3年3月18日

** 正会員 大阪府立産業技術総合研究所 (大阪市西区江之子島2-1-53)

油中形彫り放電加工，加工液：白灯油，工作物：SKH 51（焼入焼戻し材），電極：銅，正極性，ピーク放電電流 I_p ：5 A，パルス幅 T_{on} ：5 μ s

図2 仕上加工面の SEM 写真と断面組織

かったものの，かなりの高温にさらされたため「熱影響層」として区別される．焼入焼戻し材の加工では，この層を「焼戻し層」と呼ぶこともある．

一方，加工液に水を使用するワイヤ放電加工では，放電による熱的作用以外に電解作用が加わり，表面の材質に影響を及ぼす．熔融金属の再凝固層や熱影響層のほかに，蟻の住処のように，白層直下のやや奥まった所で後述の「電解腐食」が発生している．

3. 加工面性状

1) 仕上放電加工面

仕上放電加工面の改善については，多くの研究報告がある．例えば，Schumacher³⁾，König ら⁴⁾の「光沢面加工」や，高鷲⁵⁾の「鏡面加工」では，放電時間の短い（数 μ s 以下），低電流パルス（数 A 以下）での正極性加工や，電極揺動法の効果が報告され，「表面仕上げ法」としての放電加工の有用性が述べられている．

また，大きな面積の電極による仕上加工では，電極と工作物の間に存在する静電容量などの影響で，低い電流パルスの維持が難しい．成宮⁶⁾は，加工液にシリコンなどの微粉末を混入し，放電点の分散による仕上面の改善を図っている．

図2は，微小エネルギーパルスの正極性加工による仕上面の観察例を示す．比較的滑らかな放電痕が重なり，クラックのない熔融再凝固層が，均一な厚みの「白層」として観察される．

2) 硬さ変化

工作物：SKD 11（焼入焼戻し材）
図3 油中と水中における断面硬さ分布の比較

図3は，形彫り放電加工とワイヤ放電加工における加工断面の硬さ分布を示す．焼入焼戻し鋼の油中加工の場合，最表面部の硬さは，加工液の熱分解による浸炭作用⁷⁾⁸⁾で，母材よりもかなり高くなる．また，白層直下の焼戻し作用を受けた熱影響層の硬さは，逆に母材より軟化している．

放電エネルギーの低い仕上加工では，影響層としての厚みは薄くなるが，放電の熱的な加工現象を利用する限り，硬さ変化を避けることは困難である．

一方，ワイヤ放電加工面の場合には，イオン交換水を使用するので，油中加工のような浸炭作用がなく，表面の硬さは母材よりも逆に低下する．「加工軟化層」と呼ばれるのはこの部分で，放電熱によるオーステナイトの生成と，高温状態の焼戻し作用が原因と考えられる⁸⁾⁹⁾．仕上加工面でも，わずかな軟化層が存在するが，こうした軟弱な表面層の一部は，微細なガラスビーズを噴射させる「ブラスト処理¹⁰⁾」によって簡単に研磨除去することができる．この場合の処理面の粗さは，ワイヤ放電加工面の約50%程度にまで改善が可能である¹¹⁾．

なお，ワイヤ放電加工面の軟化層は，同図のように表面硬化処理のひとつである「イオン窒化¹²⁾」を施すことにより，その硬さを回復させることもできる．

3) 電解腐食の影響

ワイヤ放電加工の加工液として使用する水は，イオン交換処理を施したものであるが，電気的な絶縁性は油のように高くない．このために加工中は，ワイヤと工作物の間に直流の電位が加わり，漏洩電流による

図4 ワイヤ放電加工面の残留応力とガラスブラストによる応力改善

「電解腐食¹³⁾」を生じ、鋼の加工では、さびが発生する。

電解腐食は、工作物の材質が単一元素ではなく、合金材料のように、組織的に異なった複数の元素を有する場合には、その腐食の程度に差異を生じる。例えば、超硬合金のように、結合材であるコバルトが選択的に溶出したり¹⁾、ダイス鋼では、含有される炭化物の周囲に腐食が発生しやすい。

こうした電解腐食を抑えるためには、加工液の電導度は極力低く設定することはもちろんのこと、ワイヤ電極と工作物との間に交流的な高周波パルス印加する方法¹⁴⁾¹⁵⁾や、型彫り放電加工のように絶縁油を使用するワイヤ放電加工機¹⁶⁾も市販されている。

電解腐食の電氣的な抑制法として、筆者らは、トランス結合回路¹⁷⁾を検討した。これは電源ケーブルに付加したトランス回路によって、直流パルスを交流的な波形に変換するもので、鋼や超硬合金の加工はもとより、チタン合金、亜鉛、アルミニウムなどのように、電解反応に鋭敏な金属材料の加工にも効果がある。

4) 表面残留応力

放電加工時の急熱急冷作用によって、加工表面にはかなりの引張残留応力が存在する⁷⁾⁸⁾。残留応力の大きさやその作用する深さは、工作物の種類、前熱処理条件、および放電加工条件などに左右されるが、なかでも、放電エネルギーの影響を大きく受ける¹⁸⁾。

図4は、ワイヤ放電加工の仕上面に残存する応力の分布例¹¹⁾である。本図では、仕上加工にもかかわらず、表面から数 μm の厚みで引張残留応力が存在する。通常、エネルギーの高い荒加工時には、この数倍もの引張応力が残存する。

こうした残留応力の改善には「再熱処理⁷⁾」や、同図に示す「ブラスト処理¹⁰⁾」が用いられる。ブラスト法は、比較的簡便で、短時間のうちに仕上研磨と同時に、引張応力を圧縮側に転ずるピーニング効果も得ることができる。

5) 摩擦特性

梨地状の放電加工面のなかで、微小な放電痕のくぼみは、機械的なしゅう動に対して、潤滑油の保持性に富み、優れた摩擦特性を示す¹⁹⁾。特に、表面粗さが数 μm 程度のワイヤ放電加工面では、表面の軟化層も相手材の摩擦面になじみやすい。このため低く安定した摩擦係数を維持することができる。

こうした加工面は、金型のガイドポストの穴や、カムフォロワなどしゅう動部に対しても有効であると思われる。

6) 耐食性

放電加工面をそのままプラスチック成形用金型として使用すると、成形時の熱分解ガスにより、金型表面に腐食が発生することがある。特に、腐食は放電加工面のマイクロクラックを起点に孔食として成長するが、前述の正極性接続での微小エネルギー条件では、クラックのない白層が様に形成されるため耐食性が向上する²⁰⁾。

耐食性の向上については、前述のシリコン粉末混入加工液による放電加工⁶⁾や、鈴木ら²¹⁾のシリコン電極によるステンレス鋼 SUS 304 の加工において、加工面へのシリコンの移転や、アモルファス相の形成などがその向上要因として報告されている。

また、筆者らも、図3のような微細仕上面に形成される均一な白層に注目し、耐食・耐摩耗性に富んだ表面層を得るために、Cr や W などの合金化元素を添加した加工液による放電加工²²⁾を検討している。微粉末を加工液に添加すると、加工面の平滑化とともに、使用目的に応じた新たな合金層の形成が放電加工と同時に期待できる。

一方、放電加工面に存在する残留応力も、耐食性に大きく影響を及ぼす。特に、引張残留応力は、応力腐食を助長する。この場合の対応策として、前述のガラスブラスト処理は、ピーニング作用で圧縮応力を付与できるので、さらに耐食性の向上に効果がある²⁰⁾。

4. む す び

放電加工における加工表面の性状と、その高品位化について紹介した。

放電加工面は、例えば、「やけど」の傷のようなものである。傷の程度によって治療法が異なるように、加工面もその状況に応じた処理対策が必要である。また、熱による作用もわずかであれば「傷」ではなく、「灸」としてむしろ機能の回復という逆の効果がある。

これまで加工変質層は、おもに表面の「加工欠陥」として扱われてきた。しかし、検討を重ねて行くうちに、それが単なる欠陥層としてではなく、仕上加工の方法によっては、種々の優れた特性を示すことをあらためて確認した。「禍い転じて福となる」という諺のように、これまでにない「新しい表面改質加工法」としての放電加工の可能性を感じている。

参 考 文 献

- 1) C. J. Heuvelman: The Improvement of Surface Integrity of Cemented Carbides with W-EDM, EDM-Seminar/EDM-Digest, U. S. A., (1982).
- 2) 高沢孝哉: Surface Integrity, 精密工学会誌, 55, 10 (1989) 1772.
- 3) B. M. Schumacher: EDM Technology for Precise Workpieces with Excellent Surface Quality, Ann. ISEM-7, (1983) 126.
- 4) W. König et al.: Electro-Discharge Polishing as a Surface Finishing Process, Ann. ISEM-9, (1989) 14.
- 5) 高鷲民生ほか: 微小エネルギーによる放電加工の研究, 電気加工技術, 5, 13 (1982) 9.
- 6) 成宮久喜ほか: 粉末混入加工液による放電仕上げ加工, 電気加工技術, 13, 42 (1989) 14.
- 7) 六崎賢亮ほか: 鉄鋼材料の放電加工面における変質層, 金属学会誌, 27, 6 (1963) 283.
- 8) 斉田義幸ほか: 冷間ダイス鋼の放電加工変質層の組織と残留応力, 電気加工技術, 6, 17 (1983) 17.
- 9) 増井清徳ほか: ワイヤ放電加工面の硬さ変化, 精密工学会誌, 57, 1 (1991) 138.
- 10) 菅沢好一: 噴射加工法の原理と応用について, 電気加工技術, 7, 19 (1984) 25.
- 11) 増井清徳ほか: ワイヤ放電加工の研究——ガラスブラストによる加工表面の改善, 電気加工技術, 9, 25 (1985) 13.
- 12) 曽根 匠ほか: ワイヤ放電加工の研究——表面軟化層の硬さ回復, 昭和 59 年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集, (1984) 319.
- 13) 増井清徳ほか: ワイヤ放電加工面の電解腐食, 精密工学会誌, 54, 6 (1988) 161.
- 14) 真柄卓司ほか: 交流高周波によるワイヤ放電微細仕上げ, 電気加工技術, 13, 42 (1989) 1.
- 15) Y. Suzuki et al.: Improvement of Surface Roughness in Wire EDM, Ann. ISEM-9, (1989) 80.
- 16) ソディックカタログ「ワイヤ放電加工機」(1990).
- 17) 増井清徳ほか: ワイヤ放電加工の電解作用を抑制するトランス結合回路と仕上げ加工面への適用, 電気加工学会誌, 24, 47 (1990) 1.
- 18) 緒方 勲ほか: ワイヤ放電加工における加工面残留応力に関する研究 (第 1 報), 精密工学会誌, 57, 1 (1991) 144.
- 19) 出水 敬ほか: ワイヤ放電加工面のしゅう動摩擦, 電気加工技術, 11, 35 (1987) 7.
- 20) 増井清徳ほか: 放電加工面の耐食性とその改善, 電気加工技術, 14, 44 (1990) 12.
- 21) 鈴木正彦ほか: 放電加工による金属表面の改質, 精密工学会誌, 53, 2 (1987) 243.
- 22) 増井清徳ほか: 放電加工による表面の合金化処理, 1990 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1990) 185.