低電極消耗放電加工の研究

—— 電極表面の黒化層について ——

防衛大学校電気工学教室 西 村 重 志
 土 屋 政 光

Study on the Low Electrode-Wear Electrical Discharge Machining

----- Black Layer of Electrode Surface -----

Shigeshi NISHIMURA, Masamitsu TSUCHIYA

It is generally considered that the composition of black layer on the tool electrode surface is the principal factor of low electrode-wear electrical discharge machining.

This paper reports the relation between the ratio of electrode-wear and the black layer, and also the results of quantitative analysis about iron and carbon contained in this layer.

The experimental results and discussions are as follows:

- 1) Under such machining condition that forms the black layer, the electrode-wear becomes very low.
- 2) The thickness of this layer is proportional to the discharge energy.
- 3) The black layer mainly consists of iron and carbon, and the volume of them are nearly equal.
- 4) The wear of this layer is very small compared to the wear of electrode metal.
- 5) In the case of single pulse discharge, a blacking are formed around the discharge crater of tool electrode. The black layer is thought as the accumulation of them.

1. ま え が き

銅、アルミニウムおよび鋼などを電極として鋼（被加工体）に放電加工を行う場合、電極を陽極とし放電パルス電流のパルス巾を大きく（数 $100\mu\text{S}$ ）して、電極消耗率を改善させることは数多く報告されている^{1)~5)}。これらの報告によれば、電極表面は黒色の層（以下黒化層と記す）によって覆われる現象を伴い、銅電極表面に生ずる黒化層についての定性的分析結果は、炭素および被加工体金属が存在することを報じている⁶⁾。低電極消耗率の得られる主な原因は、このような黒化層によって電極表面が保護され、放電加工が電極金属と被加工体金属との間の放電ではなく、黒化層と被加工体金属との間の放電によって進展し、その結果電極金属の消耗が著しく軽減されることにあると述べられている^{2)~5)7)}。

本研究は、この黒化層について行ったもので、黒化層物質についての化学的定量分析の結果ならびに単発放電によって生ずる黒化物の状態の電気的条件による変化および黒化物の集積である黒化層の単発放電による消耗の状態などについて検討した結果を述べる。

2. 放電波形と電極消耗および加工後の加工面の状態

放電波形を変えて放電加工を行った場合の、電極および鋼（被加工体）の消耗量、電極消耗率ならびに電極表面の変化についての実験および観察結果を述べる。

2. 1 実験装置および実験方法

実験は、放電パルスの放電電流波形のパルス巾、電流値およびデューティファクタを任意に変えることのできるトランジスタ方形波パルス電源を試作して行った。試作回路の回路図を図1に示す。パルス巾およびデューティファクタの変化は、パルス信号発振回路を調整して行い、電流値の変化は、並列に接続したスイッチング回路の列数を変えることによって行った。直流電源は、3相交流を両波整流して用いたが、

図1 実験回路

直流出力電圧は 75V で、 $2 \times 10^4\mu\text{F}$ のコンデンサを用いて平滑した。また、放電パルス電流波形の観測には、図2に示す円板折り返し型分流器⁸⁾を試作して用いた。

実験は、放電パルス電流の波形を種々に変えて放電加工を行い、電極および被加工体の消耗重量 M_e および M_w を測定

した。これらの測定値をもとに、電極消耗率 γ ($M_e/M_w \times 100\%$) を求め、さらに加工後の電極表面の状態について観察を行った。また、同時にパルスカウンタを用いて放電回数 N を測定し、単一放電あたりの電極および被加工体の消耗重量 m_e (M_e/N) および m_w (M_w/N) を求めた。電極材料には直径 10mm の銅、アルミニウムおよび鋼(S45C)を用い、被加工体には鋼(S45C)を用いた。

2. 2 実験結果および検討

分流器を用いて測定した放電パルス電流波形および電圧波形を図3に示す。図4、図5および図6は、

図2 分流器

図4 パルス幅 (τ) と単一放電あたりの電極 (銅) および被加工体 (銅) の消耗量 (m_e , m_w) および電極消耗率 (γ) との関係

を越えるようになる。図6は、銅対銅の電極組合せについての測定結果である。陽極側の消耗が陰極側の消耗にくらべて小さい。また、パルス巾 τ を大きくすると、陰極の消耗が増加するのに対し、陽極の消耗はそれほど増加しない。この結果電極消耗率 γ (陽極を電極とした) は、銅およびアルミニウム電極の場合と同様に、パルス巾 τ を大きくすると低下する。

以上述べた実験結果は、銅、アルミニウムおよび銅を陽極と

図3 放電パルス電流 (I) および電圧 (V) の波形

パルス巾 τ を $0.05\text{ms} \sim 1\text{ms}$ の範囲で変えて実験したときの、パルス巾 τ と単一放電あたりの消耗重量 m_e , m_w および電極消耗率 γ との関係を示す。この場合、放電パルス電流の電流値 I を 30A 、デューティファクタ τ/T を 0.2 とした。

図4は、銅を電極として電極の電気極性を陽極および陰極とした場合の測定結果である。電極を陰極とした場合にくらべ、陽極とした場合の方が、単一放電あたりの被加工体消耗重量 m_w は大きく、電極消耗率 γ は低くなり良い結果を示している。また、パルス巾 τ を大きくすると電極消耗率 γ は、低くなる傾向を示しているが、電極を陽極とした場合の方が低下の割合が大きい。

図5は、アルミニウムを電極とした場合の測定結果である。この場合も、アルミニウムを陽極とし、パルス巾 τ を大きくすることにより、電極消耗率 γ を低くすることができ、アルミニウムを陰極とすると、銅 (被加工体) の単一放電あたりの消耗重量 m_w が著しく小さくなり、電極消耗率 γ は数 100%

図5 パルス幅 (τ) と単一放電あたりの電極 (アルミニウム) および被加工体 (銅) の消耗量 (m_e , m_w) ならびに電極消耗率 (γ) との関係

図6 パルス幅(τ)と単一放電あたりの電極(鋼陽極)および被加工体(鋼陰極)の消耗量(m_e , m_w)ならびに電極消耗率(γ)との関係

し、パルス巾 τ を大きくして鋼(陰極)に放電加工を行うと、電極の消耗が少なく鋼の消耗が多くなり、電極消耗率 γ を著しく改善できることを示している。この場合の、電極および被加工体(鋼)の加工面の写真を図7に示す。電極の表面が黒化しているのに対し、被加工体(鋼)の表面は黒化していない。また、パルス巾 τ を小さくすると電極の黒化現象は少なくなり、電極消耗率は大きくなる。電極を陰極にすると、陽極にした場合にくらべ、電極の消耗が大きく被加工体(鋼)

の消耗が小さくなり、電極消耗率は悪化する。このようなときには、電極の黒化がわずかであるのに対し、被加工体(鋼)の加工面が黒化するようになる。

以上の実験および観察結果は、パルス巾 τ の大きい場合の電極消耗率 γ は、電極表面の黒化程度と密接な関係にあり、黒化層の形成が低電極消耗放電加工の大きな原因であることを示している。

3. 電極表面の黒化層

3. 1 黒化層の断面

加工後の電極を加工面と直角な方向に切断し、電極表面層の断面を金属顕微鏡を用いて観察した。観察

τ : 1 ms, I: 30A
 τ/T : 0.2, 電極直径: 20mm

図7 低電極消耗率を示す条件で放電加工を行った場合の電極および被加工体の表面

結果によると、放電パルスのパルス巾を小さくして加工した場合には、黒化物の附着は部分的であるが、パルス巾を大きくして加工した場合には、電極表面が黒化層によって完全に覆われるようになる。図8は、銅電極を陽極としパルス巾を1msとした場合について、放電パルス電流Iを10、30および145Aに変えて加工を行ったときの、銅電極加工面の直角断面の顕微鏡写真である。電極表面は黒化層によって完全に覆われている。黒化層の厚みは、放電パルス電流Iを10、30および145Aに変えた場合に、それぞれ10～20、10～40および50～100μ程度の値を示し、放電パルス電流Iを大きくすると厚くなっている。

図8 黒化層(銅電極)断面の放電パルス電流による変化

10本の表面から採取した黒化物試料に、稀塩酸(6N)を加えて加熱し、つぎに稀硝酸(6N)を加えて再び加熱したのち、遠心沈降法によって溶液と不溶物とに分離した。不溶物をガラス蒸発皿に取り、乾燥炉中(80℃)で恒量となるまで乾燥して秤量し、これを炭素の重量とした。溶液中には、鉄のほかにも黒化物と共に採取された、電極金属(銅)を含んでいるので、溶液に硫化水素ガスを通し、銅を硫化銅として沈澱させ、沈澱物を濾過して取り除き、濾液に塩化アンモニウムおよびアンモニアを加え、鉄を水酸化鉄 Fe

アルミニウム電極加工面の黒化層も銅電極の場合と同様の結果を示している。また、銅およびアルミニウム電極を陰極とした場合の電極表面には、明瞭な黒化層は見受けられないが、被加工体金属(銅)と思われるものが部分的に附着しているのが認められる。

3. 2 黒化層に含まれる鉄および炭素についての定量分析結果

銅を加工した銅およびアルミニウム電極表面の黒化層についての発光分析法による定性的な分析結果は、多量の鉄および炭素が存在することを示している。これらの量を知るために、化学的な方法によって定量分析を行った。

銅電極表面の黒化層に対する化学的定量分析の手順を図9に示す。すなわち、まず加工後の銅電極(直径2.0mm)

図9 銅電極黒化層中のFeおよびCの化学的定量分析の方法

(OH)₃ として沈澱させた。つぎに、再び濾過して Fe(OH)₃ を採取し、これを磁製ルツボに入れて灼熱し、酸化第2鉄 Fe₂O₃ としたのち、秤量し、次式によって鉄の重量を求めた。

鉄の重量 = (Fe₂O₃ 重量)

$$\times \frac{2 \times (\text{鉄原子量})}{2 \times (\text{鉄原子量}) + 3 \times (\text{酸素原子量})}$$

ただし、鉄および酸素の原子量は、それぞれ 55.85 および 16 とした。

また、パルス巾の小さい場合および銅を陰極とした場合についても、同様の分析を行った。

図10 および図11に、パルス巾 τ を変えた場合についての分析結果を示す。図10は、電極表面の

図10 パルス幅 (τ) と銅電極加工面の単位面積 (cm^2) あたりに付着する Fe および C の重量との関係

図11 パルス幅 (τ) と銅電極表面の単位面積 (cm^2) あたりに付着する Fe および C の体積との関係

単位面積 (cm^2) あたりに附着する鉄および炭素の重量を示し、図11は図10の結果をもとにして求めた、鉄および炭素の体積を示している。この場合、鉄および炭素の密度は 7.86 および 2.25 とした。これらの分析結果による

と、放電加工を行った銅電極の表面には、電極の極性および放電パルス電流のパルス巾 τ にかかわらず、鉄および炭

素が附着しているが、その量にはかなりの差がある。すなわち、銅電極表面に附着する鉄および炭素の量は、銅電極を陽極にした場合およびパルス巾 τ を大きくした場合に増加している。また、銅電極を陽極とした場合、重量で比較すると鉄の重量の方が大きい。体積で比較した場合には鉄および炭素の体積にはほとんど差がなく、むしろ炭素の体積の方が大きい。これに対し、銅電極を陰極とした場合には、炭素の量が著しく少ない。

図12は、放電パルス電流のパルス巾 τ を 1 ms とし、電流値 I を変えて放電加工を行った場合について、銅電極 (陽極) 表面に生じた黒化層を分析した結果で、電流値 I と鉄、炭素の重量および体積との関係を示す。黒化層中の鉄および炭素の量は、電流値 I と共に増加している。また、体積で比較した場合には、鉄にくらべ炭素の体積の方が大きい。

アルミニウム電極を陽極として銅 (被加工体) を放電加工した場合に、アルミニウム電極の加工面に生じた黒化層についても、化学的な方法で定量分析を行った。放電電流パルスのパルス巾 τ を 1 ms、電流

図12 放電パルス電流 I と銅電極面の単位面積 (cm^2) あたりに付着する Fe, C の重量および体積との関係

3. 3 黒化層の消耗

放電電流パルスのパルス巾 τ を 1 ms, 電流 I を 10 A として放電加工を行った場合に, 銅電極 (陽極) 表面に生じた黒化層に対し単放電を行わせ, 黒化層電極面に生ずる放電痕の大きさについて検討した。

図13の(a)および(b)は, 加工後の黒化銅電極および新しい銅電極を, それぞれ新しい銅電極と組合せ, 同一電気条件 (パルス巾 $\tau = 0.2 \text{ ms}$, 電流 $I = 145 \text{ A}$) で単放電を行わせたときにそれぞれの銅電極表面に生じた放電痕の顕微鏡写真およびプロフィールカーブである。黒化した銅電極面の放電痕は, 新しい銅電極面の放電痕にくらべて著しく小さい。これらの実験結果は黒化層自体が電極金属にくらべて消耗しにくいことを示している。

3. 4 単放電による黒化層

各種電極の組合せで, 単放電を行わせたときに生ずる放電痕は, 電極の極性および放電パルスのパル

値 I を 30 A として加工を行った場合についての分析結果は, 電極の単位面積 (cm^2) あたり, 3.3 mg の鉄と 0.65 mg の炭素が存在することを示している。これらの量は, 同一加工条件で生じた銅電極黒化層についての分析結果よりも大きな値を示している。またこれらの測定値をもとに体積を計算すると, 鉄の体積は 0.42 mm^3 , 炭素の体積は 0.29 mm^3 となり, 鉄鉄の体積の方が大きい。

黒化電極面

新しい電極面

(a) 放電痕の顕微鏡写真

黒化電極面

新しい電極面

(b) 放電痕のプロフィールカーブ

放電パルス電流: 150 A
パルス幅: 0.2 ms

図13 黒化電極面および新しい電極面に生じた単一放電痕の顕微鏡写真およびプロフィールカーブ

ス巾 τ および電流 I によって異なった様相を示す。図14に銅対銅電極の組合せについての、放電痕の顕微鏡写真を示す。銅を陽極とした場合には、パルス巾 τ を0.1ms程度以上にすると図の(a)に示すように銅電極放電痕の周辺に、リング状の黒化を生ずるようになり、パルス巾 τ を大きくするに従って、同図(b)に示すように黒化部分が大きくなる。これに対し、銅(陰極)側放電痕の周辺には、黒化は生ぜず銅(陽極)側の黒化部と同形のエロージョン部を生じている。また、銅を陰極とした場合には、同図(c)に示すように、陰極にも陽極にも明瞭な黒化は認められない。

アルミニウムおよび銅を陽極電極とし、銅(陰極)電極と組合せて単放電を行わせた場合にも、パルス巾 τ を大きくすると陽極側放電痕の周辺に黒化を生ずるようになる。

このように、パルス巾 τ を大きくすると陽極側放電痕の周辺に黒化を生ずるようになるが、放電加工(くり返し放電)の場合には、これらの黒化物が累積して電極表面を覆うようになると考えられる。

4. む す び

黒化層について、実験および検討を行ったが、これらの結果を要約すると

- (1) 低電極消耗率の得られる条件のときの電極表面は黒化層によって完全に覆われており、電極金属と被加工体との間の放電ではなく、黒化層と被加工体との間の放電加工となる。
- (2) 黒化層の厚みは、放電パルス電流のパルス巾および電流値を大きくすると厚くなる。パルス巾を1msとし、電流を10.30および14.5Aと変えた場合、銅(陽極)電極面の黒化層の厚みは、それぞれ10~20, 10~40 および50~100 μ 程度の値を示す。
- (3) 銅電極面に生じた黒化層について行った化学的な定量分析の結果は、黒化層がほぼ同体積の鉄および炭素によって形成されていることを示している。電流を増すと、電極の単位面積(cm^2)に附着する鉄および炭素の量は増加する。
- (4) 黒化層を生じている電極面の単放電による放電痕は著しく小さく、黒化層が消耗しにくいことを

図14 銅対銅の電極組合せにおける単放電痕

示している。

- (5) 放電加工において黒化層を生ずるような電気条件で単発放電を行わせると、電極側の放電痕の周辺にリング状の黒化を生ずる。放電加工の際の黒化層はこれらの黒化物が集積して生じたものと考えられる。

本研究は、丹羽義栄博士の御指導と藤本良三博士の御協力のもとに行われた。また、実験装置の試作および実験は、神谷、大泉両技官の協力のもとに進められた。ここに、謝辞を呈します。

また、化学的定量分析にあたって、御指導および御援助をいただいた、本校化学教室教授畑音博士ならびに丸山技官に対し、深く感謝します。

文 献

- 1) 奥野、三谷、藤村：放電加工における放電回路の影響，精密機械，29巻 10号(1963)737.
- 2) 西村，土屋：電極消耗について，放電加工研究会資料，№46-3(昭和42).
- 3) 元木，宇，谷村：液中過渡アーク放電の電極消耗，電学誌，第87巻，第943号(1967)793.
- 4) 木本，田宮，平田：銅電極による電極低消耗の放電加工，精密機械33巻6号(1967)379.
- 5) 斉藤，荒井，小林：パルスによる放電加工，精機学会講演論文(京都)，(昭41).
- 6) 三谷：放電加工における放電回路の影響(第8報)，放電加工研究会資料，№44-9(昭41).
- 7) 藤本：放電による電極消耗の極性差，応用物理29巻6号(1960)405.
- 8) 藤村，三谷：パルス測定技術，精密機械，29巻10号(1963)705.
- 9) 鹿島，安田：金属の発光分光分析法，共立出版(昭42)
- 10) 木村：無機定量分析，共立出版(昭38).
- 11) 日本化学会編：化学便覧，丸善，(昭31)755.