比 F_t/F_0 は切刃の形状により, $0.4 \sim 0.6$ の値を取り研削作業の場合と比較的よく一致する。

(2) 比切削抵抗は切込深さの指数関数として現わすことができ, 切込深さのある範囲内ではその指数は一定と見ることができる。比較的低い削り速度で行ったこの実験の結果と研削実験結果とで比切削抵抗の値がほぼ一致することから, 比切削抵抗に対する削り速度の影響は比較的少いことがわかる。

(3) 実際に微粒 といし により金属を切削する場合の切削抵抗を測定し, 理論的に といし 加工面切刃数を求め, 1 個の と粒 に働く切削抵抗の平均値を算出するとともに, 切削量の測定からその場合の切込深さを求めた結果, 単一切刃による切削実験結果は実際作業における個々の と粒 に働く切削抵抗と切込深さの関係を現わし得るものであることを確認した。

最後に, 本研究は文部省科学研究費研究助成補助金

により行ったものであることを附記する。

文 献

- (1) G. Schlesinger, *Die Werkzeugmaschinen* (1935).
- (2) M. Kurrein, *Werkstattstechnik* (1927).
- (3) M. Coenen, *Maschinenbau der Betreib* (1932).
- (4) G. I. Alden, *A.S.M.E., Trans.*, **36** (1914), 451.
- (5) J. J. Guest, *Instn. Mech. Engr., Proc.*, (1915), 543.
- (6) M. C. Shaw, *A.S.M.E., Trans.*, **78** (1956), 847.
- (7) E. Saljé, *Werk. und Masch.*, **43** (1953), 104.
- (8) 佐藤, 精密機械, **17**, 3 (昭 26), 88.
- (9) 小林, 精密機械, **23**, (昭 32).
- (10) 佐々木, 岡村, 機械学会論文集, **20**, 98 (昭 29), 648.
- (11) M. C. Shaw, *A.S.M.E., Trans.*, **74** (1952), 51.
- (12) 文献 (3).
- (13) 関口, 長谷川, 機械学会誌, **36**, 198 (昭 8), 700.
- (14) 文献 (6).
- (15) 佐々木, 岡村, 機械学会論文集, **22**, 122 (昭 31), 715.

621.9.018.5

交 流 電 源 に よ る 放 電 加 工 の 研 究*

松 山 徳 蔵**, 萱 場 孝 雄**

A Study on the Electro-Spark Machining by the Alternating Current

by Tokuzō MATSUYAMA and Takao KAYABA

In this paper, a study of the electro-spark machining process by the alternating current in the circuit used by Lazarenko is described. The results of this investigation are as follows: With the alternating current, the machining speed is maximum and in the widest extent of the working current machining is stable, using a solid brass bar electrode. The larger the condenser capacity is, the wider this extent becomes, and the larger the working current grows, at which the machining speed is maximum as same as in the case of direct current. Regardless the condenser capacity, the electrode consumptions are almost constant under a certain working current, which is largest when a solid brass bar electrode is used. Under a certain diameter of electrode, machining speed is little affected by it. The clearance between hole and electrode is also little influenced by the working current, if it is beyond a certain value.

1. 緒 言

B. R. & N. I. Lazarenko により始められた放電加工法は, 機械加工法とは異なり高かたさの材料に対しても低かたさに対すると同様に任意の形状のせん孔が可能であり, かつ切断, 研摩なども行いうるゆえにその後各国で研究されるようになった。

Lazarenko が発表した放電加工法は直流電源によるものであり, その後の研究者⁽¹⁾ももっぱらそれになら

って直流を使用している。したがってこの加工法を実施するに際しては直流電源装置のないところでは, 新たにそれを設備する必要が生じ, かつ実際の作業現場では直流よりも交流が簡単に使用されうる状態にあるゆえに, この放電加工法に対しても交流をそのまま利用しうればきわめて便利である。

もちろん交流を使用する場合には Lazarenko の回路とは異なった回路が想像されるが, その新回路はさておき本研究においては Lazarenko の直流放電回路をそのまま使用し, 200 V, 50 ㄱ の交流を用いた場合につき, 加工条件が所要加工時間, 電極消耗量などに及ぼす影響を調べた。

* 昭和 31 年 4 月 2 日 第 33 期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 33 年 2 月 10 日。

** 正員, 東北大学工学部(仙台市桜小路)。

2. 試験方法

Lazarenko の直流放電回路は第 1 図のごとくである。加工電流は電極と加工材との間隔を調節することにより、すなわち電極の送りを適当に定めることにより必要な値を得るようにし、蓄電器には定格電圧 200 V、定格電流 1.52 A の単相油入りの 20 μ F 容量の進相低圧蓄電器を用い並列に連結した。電極に送りを与えるためには継電器によって作動し正、逆回転する小形直流電動機を使用した。

3. 試験結果ならびにその考察

直流放電加工の際に良好な結果を示すといわれている黄銅、銅を電極とし、しかもそれぞれ棒状のもの、管状のものを使用し、加工液としては種々のものが考えられるが、ここでは水のみをえらび、蓄電器容量、加工電流、短絡電流などと所要加工時間、電極消耗量などとの関係を調べた。各測定値はそれぞれ 2~3 個の測定値の平均である。

(1) 短絡電流、加工電流が一定の場合の容量の影響 外径 7.8 mm の電極 (管電極の場合には肉厚 1 mm) により 3 mm 厚の軟鋼板にせん孔した場合の加工時間に対する容量の影響を示したのが第 2 図である。実験条件の短絡電流が 10 A のとき加工電流が 6 A というのは後述のごとく黄銅棒電極に対しては最も加

第 1 図

第 2 図

第 3 図

工しやすい条件の附近である。図中実線は穴が板の裏面に達するまでの所要時間、破線は電極がその穴を自由に通過し得るようになるまでの所要時間を示す。

交流による場合は直流による場合に比して加工電流は一般に不安定であるが、管電極よりも棒電極を使用した方が平均加工電流は安定で所要時間も短い。また同じ棒電極でも銅に比し黄銅の方が良好である。しかし双方ともに容量が大になれば加工時間が短くてすむようになり、容量による加工時間のこの短縮は黄銅の方が少く、また容量が大になれば加工時間はあまりちがわず黄銅でも銅でも大差なくなる。

穴が裏面に達してから貫通するまでの時間は黄銅の方が少く、各容量において銅の約 1/2 程度である。一方管電極の場合には加工電流の安定度はすべて悪くなり短絡回数が多く、かつアーク放電をも混入するようになるため加工時間は著しく長くなるが、穴が裏面に達してから貫通するまでの時間は各容量において電極材質によっては差異が少い。

次にこの場合の電極の重量消耗量、および長さの消耗量を容量に対して示したのが第 3 図であり、棒電極の場合には容量が増せばごくわずかずつではあるが両消耗量とも減少する。これに対し管電極の場合には増加の気味にあり銅電極において著しい。

(2) 加工電流と短絡電流との比が一定の場合の加工電流の影響 外径 7.2 mm の黄銅棒電極を用い加工電流と短絡電流との比を前記と同じ理由から 3/5 にした場合の加工時間に対する加工電流の影響を第 4 図に示し、図中の実線、および破線は第 2 図と同様の意味のものである。

これによれば容量が 20 μ F の時は 6~12 A で加工作業が最も良好であり、それ以下、またはそれ以上の加工電流では電流が不安定になり加工時間を多く要し、したがって加工速度はおそくなるが、容量が 60, 100 μ F と増せば上記の良好な状態で加工し得る電流範囲が広がるが、あまり違わなくなってくる。しか

第 4 図

第 5 図

し各容量で最小の加工時間を示す加工電流は、容量の増加とともにそれぞれ 8~10, 10~12, 12~14A と大電流の方に移動する。4A 程度の加工電流では容量が増せばアーク放電を混入するようになり、かえって電流が非常に不安定になり加工時間を多く要するが、20 μ F の小容量ではやや不安定になるに過ぎない。

一般に小加工電流では電流計の指針が一定になることがない程度にまで不安定で、そのために加工時間を多く要するものであると考えられ、逆にある程度以上の加工電流では放電により生じた金属粉の遊動や電極などの振動により短絡する機会が多く、したがって加工時間を多く要し実用上不便となる。しかしこれらの場合には加工液の温度も次第に上昇する。

これらから判断すれば加工電流が 6~12A であれば容量によらずほぼ安定に、かつ容易に作業を行うことができ、更に大容量ではより大きい加工電流においても良好に作業を継続することができるが、容量の増加ほどの効果はないといえる。

この場合の電極の重量、および長さ消耗量は加工電流によってはそれほど変わらない。

(3) 短絡電流が一定の場合の加工電流の影響 短絡電流を一定、すなわち短絡電流と加工電流との比を変えた場合の加工電流の影響を各電極材質、種類について調べた。

(i) 黄銅棒電極の場合 この場合の加工電流と加工時間との関係を示したのが第 5 図である。

ある加工電流のときに加工速度が最大になることは直流による場合と同じであり、かつ所要加工時間も比較的短い。しかし同じ短絡電流でも容量が増せば最小の加工時間、すなわち最大加工速度を示す加工電流は大きくなり、かつその移動量は短絡電流が大になれば大きくなる。たとえば 10A の短絡電流では、最小の加工時間を示す加工電流は 40 μ F で 7.5A 附近であったものが、80 μ F では約 8A まで移動し、短絡電流が 20A になれば 40 μ F で 10A となり、80 μ F で 12A に移動する。しかし容量が一定のときは最小の加工時間を示す加工電流と短絡電流との比は短絡電流が大になればなるほど小になる。すなわち 80 μ F の容量のときは 10A の短絡電流でその比が約 4/5 であったものが 20A では約 3/5, 30A では約 2.5/5 と次第に小さくなる。したがって短絡電流をいくら大にしても最良好な状態で作業しうる加工電流はそれほど大にならないといえる。また短絡電流が大になれば加工時間がかえって長くなるのは、アーク放電を混入し加工状態が次第に不安定になるためである。穴が裏面に達してから貫通するまでの所要時間は小短絡電流、大容量の場合に短い。これは短絡電流が小さいと穴が裏面に達してから加工は良好な状態で行われるのに対し、短絡電流が大になれば穴が裏面に達すると不安定になり短絡回数が増すためである。

この場合の加工電流と電極消耗量との関係を示したのが第 6 図で、電極消耗量は各短絡電流、各容量で加工電流によってはほとんど変わらない。

(ii) 銅棒電極の場合 第 7 図がこの場合の関係を示し、短絡電流が 10A のときには 4A 附近の加工電流では容量によらずほぼ同一の加工時間を示すが、それ以上の電流では 40 μ F の容量では 5.5A 附近で最小の加工時間を与え、更に大きくなれば短絡回数が多くなり急激に加工時間が増す。一方 80 μ F の容量

では約 6.5A 附近で最小の加工時間を示し、その前後の安定電流領域の幅も $40\mu\text{F}$ のときに比して広い。また 20A の短絡電流では、安定な加工状態を示す加工電流範囲には容量によってあまり差がなく、7~12A と非常に広くなり加工が容易になる。短絡電流が 10A と 20A のときでは最小の加工時間は各容量であまり差はない。第 5 図の黄銅棒電極の場合と比較すれば加工時間は一般に銅棒の方が長く、また最小の加工時間を示す加工電流は黄銅棒の方が大きい。ただ 10A のとき小短絡電流のときには最小の加工時間を示す加工電流をはさんで良好な加工状態を示す電流範囲は銅棒の方が狭いが 20A の短絡電流では銅棒の方がむしろ広く加工作業が容易になるのは興味ある現象である。

第 6 図

第 7 図

第 8 図

この場合の加工電流と電極消耗量との関係を示したのが第 8 図で、前述の黄銅棒の場合と比較すればその様相が著しく異なるが、この両者および後述の管電極の場合の結果から判断すれば、黄銅棒において加工電流により変わらないのは第 8 図の加工電流 7A 以下の部分に相当し、黄銅棒電極の場合でも 30A の短絡電流で更に大きな加工電流で加工すれば、第 8 図と同様に電極消耗量は加工電流とともに増加してくるのではないかと考えられる。また黄銅、銅両者の電極消耗量を比較すれば 7A 以下の加工電流では銅棒の方が少く、重量消耗量はそれほどではないが長さの消耗量は銅棒の方が著しく少い。加工電流が 7A 以上になれば銅棒の方が加工電流とともに電極消耗量は黄銅棒より大きくなり、したがって交流による場合には電流の消耗の点では、小加工電流で銅棒電極を使用の方が経済的であるといえる。

(iii) 黄銅管電極の場合 この場合の関係を示したのが第 9 図であり、直流による場合には棒電極よりも管電極の方が良いと言われているが、交流による場合にはこれと異なり、一般に管電極の場合には棒電極の場合に比較して加工電流が非常に不安定で、最小の加工時間を示す加工電流においてさえ電流は安定しないゆえに、加工電流としてはその平均加工電流を取らざるを得ない。

管電極のときは棒電極のときに比して所要加工時間は非常に長い、同じ短絡電流では容量が増せば最小の加工時間を示す加工電流が大電流の方に移動すること、また短絡電流が大になれば同容量でも大電流の方に移動することなどの諸傾向は棒電極の場合と同様である。しかし最小の加工時間を示す加工電流は棒電極の場合に比して小さく、またほぼ安定に加工しうる電流範囲は短絡電流が増しても棒電極の場合ほどは広くならない。

この場合の電極消耗量と加工電流との関係を示したのが第 10 図である。すなわち重量、長さ消耗量ともに加工電流が約 9A 程度までは短絡電流、容量によら

第 9 図

ほぼ一定で棒電極の場合と大差がないが、それ以上の加工電流では増加する。短絡電流が 10A 程度のときは棒電極の場合と同様に加工電流によらず消耗量は一定であるといえる。しかして棒電極の場合と比較すれば重量消耗量は差がないが、長さ消耗量は著しく大で約3倍にも達するものである。

(iv) 銅管電極の場合 第 11 図がこのときの結果を示し、前記同様に電流はきわめて不安定である。10A の短絡電流のときは $40\mu\text{F}$ では最小の加工時間を示す加工電流は約 4A でそれを越えると非常に不安定になるが、 $80\mu\text{F}$ では 4A では非常に長い加工時間

第 10 図

第 11 図

第 12 図

を要し、6A の加工電流でほぼ最良好の状態となることが前記三者の場合と異なる。しかし 20A の短絡電流では前記三者の模様とほぼ同様であり、最小の加工時間も黄銅電極において棒と管とで異なるほどは異ならず、ほぼ安定な状態で加工できる電流領域の幅は狭い。また棒電極のときに比して最小の加工時間を示す加工電流は小電流に位置している。

この場合の加工電流と電極消耗量との関係を示したのが第 12 図であり、その傾向はほぼ前記のものと類似しているが、加工電流によらず一定である範囲がきわめて狭く、黄銅電極の場合から推定してこの程度の容量では 4A 以下の加工電流にその領域が存在するものと考えられる。

上記の結果を総合すれば次のことがいえる。すなわちこれら 4 種の電極では棒電極の方が加工時間が少くてすみ、加工作業が容易であり、良好な状態で加工しうる加工電流範囲も広く、特に黄銅棒電極で最も良好である。最も加工しにくいのは銅管電極のときで、中でも小短絡電流では安定な領域はほとんどないと思われる程度である。電極消耗量はいずれの電極でもある加工電流までは短絡電流、容量によらず一定の値を示すが、それを示す加工電流範囲は黄銅棒、黄銅管、銅棒、銅管の順に狭くなり、銅管電極のときにはそれがほとんど存在しない程度である。しかし両消耗量とも銅電極の方が棒、管にかかわらずわずかではあるが小さい。

(4) 電極断面積の影響 上記の各試験の結果、交流による場合には黄銅棒電極が最も良好であることが判明したのでこれを電極とし、その断面積、すなわち直径を変えた場合の加工時間、その他に対する影響を調べた。第 13 図はその結果を示し、試験した加工電流は第 5 図に示すごとく $40\mu\text{F}$ の容量で最小の加工時間を与えるものであり、 $80\mu\text{F}$ でも依然として良好な加工状態を示す値である。

これによれば容量によらず約 8 mm の直径までは加工時間にはそれほど差異はなく、すなわち加工面積の増加があまり影響しないが、それ以上の直径になれば直径の増大すなわち加工表面積の増大とともに加工時間は次第に大になる。しかして容量が大きいいずれ

第 13 図

の直径でも加工時間は短く、それも 8 mm 程度以下ではあまり差はないが、それ以上の直径では容量による差が次第に大になる。穴が裏面に貫通するまでの所要時間は電極が太くなれば次第に長くなり、容量が小さいと一層長時間を要する。重量消耗量は電極断面積にほぼ比例して増加し、容量によっては小直径ではほとんど差異は認められない程度であるが、直径が大になるとその差異が大きくなる。長さ消耗量は電極直径が太く、加工面積がある程度以上に大きければ加工面積によってはあまり影響を受けないが、加工面積が小になるとわずかながら増加し容量が小さいと大きい。

(5) 電源電圧の影響 以上は加工電源として 200V、50 $\sim$ の交流電源を用いた場合の結果である。加工電源電圧を大にすれば 1 回の放電により加工材が破壊される量が多くなり、したがって加工速度が大きくなるものであるが、容量の影響をも受けるので、これらの影響を交流に対して調べた結果を第 14 図に示す。使用した電極は 7.2 mm 直径の棒である。黄銅電極のときには容量が大になれば 50V の電源電圧でやや不安定な加工状態になるが、それ以上の電圧ではきわめて良好に加工ができ、加工時間にもあまり差異が見られなくなる。一方 20 μ F 程度の小容量では、いずれの電源電圧でも加工は不安定で電圧が低くなると一層ひどくなりきわめて長時間を要する。銅電極のときはこの短絡電流、加工電流では容量によらずきわめて不安定で加工が困難となり、それでも 100 μ F のときは 150V の電圧で比較的安定になるが、この容量でも電圧が 100V 以下になると長時間を要するようになる。小容量になるとそれがはなはだしくなり、20 μ F では 150V でもきわめて長時間を要し、それ以下の電圧では加工はほとんど不可能に近い。電源電圧が 200V 以上の場合には加工時間は電圧によりあまり影響を受けないのではないと思われる。

直流による場合には電源電圧が 100V 附近で使

れることが多いが、交流による場合には 100V で使用するためには、容量を相当に大にしなければ安定加工電流で短時間に加工することはできない。

この場合の電極消耗量は、黄銅電極では電源電圧が低いと容量によらずそれぞれほぼ同じ値を示し、電源電圧とともに次第に増加し、重量消耗量は 100V を越えるとほとんど一定になる。長さ消耗量は容量が増せば電源電圧が増すに応じて大になった差が小さくなる。一方銅電極では両消耗量とも容量による差は黄銅電極のときに比し非常に大きい。

(6) 加工穴の精度 放電加工では得られる加工穴の直径は交流、直流によらず必ず使用電極の直径よりも幾分大きく、したがって実際加工するにあたっては、所要寸法より小なる直径の電極を使用しなければならない。そこで上記の試験で得られた穴の直径を測定し、使用電極の使用前の直径と比較し容量、加工電流などの影響を調べた。それらの結果によれば加工電流、短絡電流、電極直径がそれぞれ一定ならば容量が約 40 μ F までは電極材質によらずほぼ一定であり、容量が増せばその差はわずかながら大きくなる傾向にあるが、7.8 mm 直径の棒、および管電極では 20 μ F と 100 μ F の場合でそのちがいは 0.1 mm 程度である。大容量では黄銅管を用いた場合が最も小さい。また容量一定では、電極材質によらず加工電流がある値より大きければ加工電流によってはほとんど変化が見られず、その直径差はほぼ 0.2 $\sim$ 0.3 mm の範囲にある。更に電極直径の増大とともにその値は幾分かずつ減少するが、7 $\sim$ 8 mm 以上の直径になるとほぼ上記の一定値を示すようになり、黄銅棒電極では電源電圧が大になるとその差はきわめてわずかながらも増加するが、銅電極では 100V 以上の電源電圧ではほとんど変わらない。したがって交流による場合にも、加工穴と電極との直径差を最小にするには、黄銅管を電極とし小容量、小電流で加工すべきであるといえる。

4. 結 論

以上の諸結果をまとめれば次のことがいわれる。

(1) 交流電源による場合には一般に棒電極の方が管電極のときよりも加工電流が安定で所要加工時間も短い。

(2) 加工電流、短絡電流が一定ならば容量の増加により加工時間は減少し、これは銅電極、および管電極の場合に大きい。

(3) 短絡電流と加工電流の比が一定ならば、容量が増せば最小加工時間を示す加工電流は大電流の方に移動する。

(4) 電極消耗量はある一定の加工電流までは容量によらずほぼ一定の値を示すが、それを示す加工電流範囲は黄銅棒において最も広い。

(5) 電極直径はある値までは加工時間にほとんど影響せずそれ以上になると影響する。

第 14 図