放電研削加工の研究(第3報)

——加工速度に及ぼす加工液の影響——

筒井 忠夫*

Study on the Electric-Discharge Grinding (3rd Report)
——Effect of the Dielectric Fluid on the Stock Removal Rate——

Tadao TSUTSUI

The dielectric fluid is necessary for generating pulse discharges and the machining efficiency depends on the appropriate selection of this fluid. So the stock removal rate of tungsten carbide (work piece) is studied experimentally with various fluids, and the results are as follows.

- (1) The stock removal rate increases as the density of the fluid becomes larger, and decreases when the temperature of the fluid increases.
- (2) The removal rate is improved by mixing about 10 per cent of carbon tetrachloride (CCl_4) in transformer oil, but adding ethyl alcohol or toluene is not effective.
- (3) Intermittent firing of the fluid in a spark gap does not practically impair the efficiency of machining under various electrical conditions.
- (4) Chips produced from both tungsten carbide and cast iron wheel electrode are found in the shape of small spheres in the fluid.

1. 緒 言

放電研削においては、電極を回転させて加工を行なうので、加工くずの排出がよく、加工液の流動性はあまり問題にならない。したがって孔あけ、型ほりに効果ある液が研削にそのまま適用されるとは限らない。また液を流しかけて加工を行なう場合、点火することがあり、その影響についても検討する必要がある。孔あけ用加工液については種々研究が行なわれているが¹⁾、研削用加工液については十分な研究がなされていない現状にある。

そこで本報では加工速度を中心にして実験を行ない、加工速度に及ぼす加工液の種類、液温、添加物などの影響について調べた。さらに点火しやすい流しかけ法と点火しない浸漬法とを比較検討した。また加工液中に残る

加工くずの形状を観察し、それより加工の機構についても考察を加えた。

2. 加工液の作用

加工液は間欠的放電の発生に必要であり、加工効率を高める上からも重要な役割をなす。加工液の主な作用²⁾をあげれば次のようである。

(1) 絶縁作用

被加工物と加工電極との間を絶縁することにより、放電をパルス性のものとし放電エネルギーを増大させる。また放電間隔を小さくし、被加工面に作用するエネルギーを増加させる。この作用を効果的にするには、絶縁耐力のすぐれた液を使用すること、加工くず、分解生成物、気泡などを除いた新鮮な液を循環させることが必要である。

* 正会員 新潟大学工学部

(2) 冷却作用

被加工物および加工電極を冷却し、放電の加熱作用が不必要な部分にまで及ぶことを防ぐ。また放電回路自体を冷却し、その結果電流密度が増大し(放電回路が細くなり)、被加工面にエネルギーを集中させることができる。これには、液温の上昇を防ぎ、液の循環をよくすることが必要である。

(3) 消イオン作用

放電消滅後に残留しているイオンを減少させ、放電が連続性になることを防ぎ、放電の繰返し回数を増加させる。この作用を促進させるには、液の循環をよくする。また適当な添加物を加えることもある。

(4) 高圧力の発生

液中でパルス放電を行なわせると、局部的に高圧力が発生し、加工作用を促進し、加工くずを排除するのに役立つ。この圧力を有効に被加工面に作用させるには、密度の大きい液を使用する。また適当な添加物を加えて液の密度を大きくすることも考えられる。一般に密度の大きい油は粘度が高く、流動性が悪い欠点がある。

なお当実験では、回転電極を使用するので(2)、(3)の作用が一層促進されると考えられる。

3. 実験装置および方法

実験に用いた主要装置は前報³⁾と同じであるので詳細は省略する。図1にその実験回路を示す。回転電極は直径130mmの鋳鉄製円板、CはM. P. コンデンサ、Oは2現象オシロスコープ、Wは単相電力計、Recは3相全波セレン整流器である。今回は試験片に超硬合金S2(断面積 $8 \times 8 \text{ mm}^2$)を使用した。加工液を放電間げきに供給する方法に、流しかけ法と浸漬法とを用いた。浸漬法は図2に示すように、加工中は試験片を完全に液中に浸すようにする。放電間げきを調整するために、ホルダを左右に少し動かしても木わくはコイルばねにより

図1 実験回路(RC回路)

図2 浸漬法

回転電極に押し付けられていて動かない。したがって木わく内には常に液が充滿しており、余分の液はあふれ出るようになっている。

また実験に使用した加工液の密度は精密化学天びんによって正確に測定した。

実験方法は電源電圧、コンデンサ容量、充電抵抗などを調整し、電極を回転させ加工液を注入しつつ、徐々に試験片を電極に接近させて放電を発生させる。電力計が放電電力の最大値を示す付近で2~3分間加工し、加工量を秤量して加工速度(mg/min)を算出した。

表 1 加工速度と加工液の種類(流しかけ法)

加工液	コンデンサ油	高圧絶縁油	冷凍機油	灯油	スピンドル油	焼入油
JIS規格	電気絶縁油 1号	電気絶縁油 2号	冷凍機油 2号	灯油 1号	スピンドル油 1号	—
絶縁性能 (順位)	1	2	3	4	4	5
引火点 (°C)	130以上	130以上	155以上	35以上	130以上	160以上
密度 (g/cm ³)	0.89	0.89	0.91	0.80	0.89	0.91
加工速度 (mg/min)	24.0	24.0	28.5	18.0	23.5	29.0

$E=46\text{ V}$, $C=30\text{ }\mu\text{ F}$, $R=21\text{ }\Omega$, $W_m=22\text{ W}$, 周速度: 127 m/min, 液温: 20°C

(a) 高圧絶縁油

(b) 焼入油

$C=30\mu F$,
 $R=21\Omega$,
 周速度:
 127m/min,
 流しかけ法

図3 加工速度と液温との関係

4. 実験結果および考察

4.1 加工速度と加工液の種類

加工速度は加工液の性質によって変化するので、これについて調べた。表1は電源電圧E、コンデンサ容量C、充電抵抗R、液温を一定にして6種の油について実験した結果である。表より加工速度は密度の大きい油ほど大きくなり、その用途から推定される絶縁性能の順序にはならない。その理由は、これらの油は微小間げきの絶縁耐力に大きな相違がないからであろう。また数回使用後には、気泡、不純物などを含有しその相違がさらになくなる可能性がある。したがって油の流動性はこの場合あまり影響しないから、最も変化しにくい密度の影響を敏感に受けるものと考えられる。

図3は加工速度と液温との関係を示したものである。(a)高圧絶縁油の場合、液温の上昇とともに、最大放電電力は変化しないが加工速度は低下する。これは、当実験

表2 加工液の密度と液温

液温 (°C)	10	20	30	40	50
高圧絶縁油 密度 (g/cm ³)	0.896	0.892	0.886	0.881	0.877
焼入油 密度 (g/cm ³)	0.913	0.909	0.903	0.898	0.893

表3 加工速度と加工液添加物(流しかけ法)

添加物	エチル アルコール	イソアミル アルコール	トルエン	四塩化 炭素	なし
分子式	C_2H_5OH	$C_5H_{11}OH$	C_7H_8	CCl_4	—
誘電率	25.8	14.8	2.4	2.2	(2.1~2.4)
比電導度 ($\Omega^{-1}cm^{-1}$)	1.4×10^{-9}	1.5×10^{-8}	1.4×10^{-14}	4×10^{-18}	($10^{-16} \sim 10^{-19}$)
密度 (g/cm ³)	0.79	0.81	0.87	1.59	(0.89)
加工速度 (mg/min)	26.0	25.5	26.0	28.0	26.0

$E=47V$, $C=30\mu F$, $R=21\Omega$, $W_m=24W$,
 周速度: 155m/min, 加工液: 高圧絶縁油, 混合比: 3/100, 液温: 20°C

は流しかけ法であるから、油と空気とが接触する機会が多く、空気を比較的多く含有している。したがって液温の上昇とともに空気を放出しやすくなり、絶縁耐力が低下し、さらに表2に示すように密度の減少がこれに影響して、加工速度が減少すると考えられる。

(b)焼入油の場合は、20°C以下では油の流動性がきわめて悪く、放電が不安定となり加工速度は低下し、30°C付近で最大となる。それ以上の液温では前述の理由で加工速度は再び減少する。N. Mironoffの研究⁴⁾においてもこれと同様な傾向を示している。

4.2 加工速度と加工液添加物

加工液に誘電率の大きいアルコール類を少量混入すると加工速度が向上するといわれているので⁵⁾、添加物の影響について調べた。表3は電源電圧、コンデンサ容量、充電抵抗、液温を一定にして4種の添加物を高圧絶縁油に混入して実験した結果である。ここで混合比とは添加物と加工液との体積比である。表より加工速度は添加物の誘電率にほとんど影響されない。むしろ誘電率の小さい四塩化炭素の添加が加工速度を少し大きくすることがわかる。

図4はこの四塩化炭素の添加の影響を詳しく調べた結果である。最大放電電力は変化しないが、加工速度は増加し、混合比 10/100 で加工速度が約15%大きくなる。その理由は、

(1) CCl_4 と高圧絶縁油とは、比電導度が同程度であるから、 CCl_4 の添加によって絶縁耐力が低下するとは考

図4 四塩化炭素の添加の影響

$C=30\mu F$,
 $R=21\Omega$, 周速度:
 119m/min,
 加工液: 高压絶縁油, 流しかけ法

図6 炭素粉の添加の影響

$C=30\mu F$,
 $R=21\Omega$, 周速度:
 145m/min,
 加工液: 高压絶縁油, 流しかけ法

図5 エチルアルコールの添加の影響

$C=30\mu F$,
 $R=21\Omega$, 周速度:
 92m/min,
 加工液: 高压絶縁油, 流しかけ法

えられない。

(2) CCl_4 原子は電子親和力が大きいので、電子が CCl_4 の中性分子に付着して陰イオンとなる傾向がきわめて強い⁶⁾。したがって CCl_4 の適量を混入した場合、放電消滅直後に残留している電子が CCl_4 分子に付着して陰イオンとなり、その移動能力が小さくなる⁷⁾。その結果、極間の絶縁の回復が速やかになり、放電の繰返し回数を増加させる。

(3) CCl_4 の密度(1.59)は大きいので、これを油(0.89)に混入したとき密度が大きくなる。たとえば、混合比10/100のとき密度は0.95となる。

以上の理由から加工速度が向上すると説明することができる。

図5はエチルアルコールの添加の影響を調べた結果である。混合比を10/100まで大きくしても加工速度は減少することがあっても、増加することはない。その理由は

C_2H_5OH は比電導度が油より大きく、これを油に添加すると絶縁耐力は多少低下する。 C_2H_5OH は CCl_4 のような前述(2)の効果は期待できない。また C_2H_5OH を油に混入したとき密度は少し小さくなる。したがって加工速度が増加するとは考えられない。

次に加工液を連続使用していると、分解生成物(炭素)によって液が黒濁してくるのでこの影響について調べた。図6は炭素粉を1 g/lまで加えて実験した結果である。加工速度は炭素粉の混合量によってほとんど変化しないことがわかる。灯油の絶縁破壊電圧の測定結果によれば⁸⁾、市販の灯油は相当に黒濁しても、絶縁耐力がほとんど変わらない。したがってこの実験においても炭素粉1 g/l (0.1%)までは油の絶縁耐力、密度にほとんど変化がなく、加工速度が低下しなかったと考えられる。なお N. Mironoff によれば⁹⁾、加工くずおよび分解生成物などの不純物が加工液中に2%まで混入しても加工速度の低下はわずかであるが、2%以上になると急低下すると報告している。

4.3 流しかけ法と浸漬法との比較

放電間げきに加工液を流しかけて実験を行なう場合、放電電力が大きくなると液に点火することがある。また液が飛散して放電が不安定になることもある。液の点火は、放電間げき近くを加熱すること、液に分解生成物の混入が多くなること、火災その他の危険性があることなどのために望ましくない。液の点火をなくするためには送風機によって加工部に風を吹きつけるとある程度防げる。図2のように液中で加工を行なうと点火は完全になくなる。そこで点火しやすい流しかけ法と点火しない浸漬法とを加工速度について比較した。

図7 加工速度とコンデンサ容量との関係

図8 加工速度と電源電圧との関係

図7は加工液に高压絶縁油を使用し、電源電圧、充電抵抗を一定にしてコンデンサ容量を $10\mu\text{F}$ から $90\mu\text{F}$ まで変化させ、両方の加工速度を求めた結果である。ただし最大放電電力は両方とも同じにして比較した。流しかけ法では $50\mu\text{F}$ 以上になるとときどき点火するが著しくはない。図からわかるように加工速度には違いがほとんどない。

図8はコンデンサ容量、充電抵抗を一定にして電源電圧を 45V から 95V まで変化させ、両方の加工速度を比較した結果である。流しかけ法では 55V 以上になると点火が始まり、電圧を高くすると点火、油の飛散が激しくなる。しかし加工速度にはその影響が現われず、相違がほとんどない。点火の影響を調べるには、この実験が最も適している。

図9は電源電圧、コンデンサ容量を一定にして充電抵抗

図9 加工速度と充電抵抗との関係

表4 流しかけ法と浸漬法との比較

加工液	引火点 ($^{\circ}\text{C}$)	密度 (g/cm^3)	加工速度(mg/min)	
			流しかけ法	浸漬法
冷凍機油	155以上	0.91	37.0	38.0
焼入油	160以上	0.91	37.5	38.0
高压絶縁油	130以上	0.89	32.5	32.0
スピンドル油	130以上	0.89	32.0	32.5
灯油	35以上	0.80	25.0	25.5

$E=54.5\text{V}$, $C=30\mu\text{F}$, $R=21\Omega$, $W_m \approx 32\text{W}$,
周速度: $106\text{m}/\text{min}$, 液温: 20°C

抗を 14Ω から 42Ω まで変化させ、両方の加工速度を求めた結果である。流しかけ法では 20Ω 以下になると点火する。図から加工速度には違いがないことがわかる。

以上の実験結果から油の点火は加工速度にほとんど影響しないことが明らかになった。

その理由は、放電が発生すると熱および圧力によって油の一部が気化、分解し可燃性の気体を発生する。流しかけ法ではこの気体と空気中の酸素とが化合して燃焼する。一方、放電間げきには絶えず多量の油が補給されているため、燃焼はこの間げきの外で空気の十分にあるところで起こっている。特に間げきが 0.1mm 以下であるからなおさらである。そのため放電間げきに加熱の影響がおよびにくく、燃焼生成物が介入することがなく、浸漬法と同じ状態にあるからと考えられる。なお点火しているとき、電圧波形をオシロスコープで観察しても特別の変化がない。

流しかけ法と浸漬法とは、加工液の点火以外に、液の循環、発生気体の放出、空気との接触状態が異なるので、

それらの影響を確かめる目的で次の実験を行なった。表4は電源電圧、コンデンサ容量、充電抵抗、液温を一定にして、5種の油について両方の加工速度を比較した結果である。この場合、密度の大きい油ほど流動性が悪いが、引火点は高い。また灯油以外の油は点火しなかった。表からわかるように、加工速度には相違がほとんどない。しかし前述のように密度の大きい油ほど加工速度が大きくなる。

4.4 加工くずの形状

加工液中に生ずる加工くずは超硬合金S2および鋳鉄電極が消耗してできたものである。その形状を観察することにより、被加工物および加工電極がどんな状態で消耗したかがわかる。加工くずの形状は細長いもの、破片状のものもあるが大部分は図10に示すような球形をしている。その大きさは放電電力が増加すると大きくなる。図より電源電圧が45Vでは 10μ 以下、63Vでは 15μ 以下、83Vでは 20μ 以下となる。なお図(E=63V)の黒い雲のようなものは遊離炭素である。

E=45V
 10μ 以下

E=63V
 15μ 以下

E=83V
 20μ 以下

C=30 μ F, R=21 Ω , 周速度: 106m/min,
加工液: 高压絶縁油

図10 加工くず(混合)

(磁石を動かす)

図11 加工くずの判別

11 μ

11 μ

主成分WCの粒子

10 μ

21 μ

主成分Feの粒子

E=65V, C=30 μ F, R=21 Ω ,

周速度: 106m/min, 加工液: 高压絶縁油

図12 加工くず(分離)

つぎにこの混合粒子のうち、主成分がWCの粒子と主成分がFeの粒子とを判別した。超硬合金S2の成分はWC(78%), TiC(14%), Co(8%)であり、WCおよびTiCは常磁性体、Coは強磁性体である。いまこの混合粒子を油とともにガラス板上にとり、顕微鏡の視野内(400倍)に入れ、対物レンズの近くで磁石を左右に動かす。図11に示すように、磁石によって非常に動きやすい粒子、動きにくい粒子、動かない粒子とがある。全混合粒子中のTiC、Coの含有量は少量であるから、非常に動きやすい粒子は主成分がFe、動かない粒子は主成分がWCと考えてよい。図12にその顕微鏡写真を示す。上図の破片状粒子はS2からのものであり、下図の2個の鉄粒子は磁性をおびて互いに吸引し付着し

たものである。

以上のことから、超硬合金S2および鋳鉄電極からえられた粒子はいずれも大部分が球形をしている。したがって両者とも一度は溶融して消耗したものと考えられる。六崎¹⁰⁾は超硬合金の放電加工面についてX線試験を行ない、溶融層を確認しその組織について詳細に調べている。

5. 結 言

超硬合金S2を放電研削し、加工速度に及ぼす加工液の影響について調べた結果、次のことが明らかになった。

- (1)加工液としては密度の大きい油ほど、加工速度が増加する傾向がある。液温が高くなると加工速度は減少する。
- (2)高圧絶縁油を使用するとき、四塩化炭素の添加は加工速度を向上させ、混合比10/100が適当である。エチルアルコールの添加は加工速度を向上させなかった。
- (3)点火しやすい流しかけ法と点火しない浸漬法とを比較すると、その相違はほとんどない。
- (4)加工くずは大部分が球形をなし、超硬合金S2も鋳鉄電極も一度は溶融して消耗したものと考えられる。

最後に本研究を行なうにあたり、種々ご指導をいただいた東京大学鳳誠三郎先生、倉藤尚雄先生に厚くお礼申し上げますとともに、実験に協力された池内英一、佐藤絃一両氏に感謝の意を表わす。

(1966, 8月1日受付)

参 考 文 献

- 1) 鳳誠三郎, 倉藤尚雄: 放電加工, コロナ社(1961) 121.
- 2) 鳳誠三郎: 放電加工のメカニズム, 精密機械, 29巻10号(1963) 685.
- 3) 筒井忠夫: 放電研削加工の研究(第2報), 精密機械, 31巻3号(1965) 220.
- 4) N. Mironoff: Electro-erosive Metal Working, its Physical Fundamentals and Industrial Applications, Microtecnic, Vol.19 No.5 (1965) 257.
- 5) 木本保夫: 放電加工の加工速度について, 電気学会雑誌, 79巻845号(1959) 172.
- 6) 電気学会通信教育会編: 放電現象, 電気学会, (1960) 95.
- 7) 鳳誠三郎, 木原登喜夫: 高電圧工学, 共立出版社, (1960) 193.
- 8) 放電加工技術研究会編: 放電加工技術便覧, 日刊工業新聞社, (1963) 162.
- 9) 文献4)と同じ.
- 10) 六崎賢亮ほか2名: 超硬合金の放電加工面における異常組織, 日本金属学会誌, 27巻9号(1963) 427.

情 報

(26頁よりつづき)

▽技術水準＝現在の国際競争の中心問題は、技術開発力の競争であるという観点から技術水準の問題はきわめて重要な地位を占めている。今回の調査でも調査対象業種104業種中約50業種について技術水準向上の必要性が指摘されている。具体的には①技術革新の進展が急速で、技術水準の向上または技術開発力の強化がとくに必要とされる業種として電子計算機、電子部品、石油化学など約10業種が指摘された②このほか一般的な技術水準はいちおう国際水準にあるが、今後その産業の発展の中核となる新製品あるいは特殊な製品の開発力になお遅れのみられる業種として、原子力発電機、大形火力発電機に問題のある重電機、データ伝送、電子式電話交換機、宇宙通信、レーザ通信等方式の通信部門に問題のある有線、無線通信機、家庭電機ではルームクーラ、カラーテレビ、また大形、大容量、高性能および特殊機で遅れている工作機械その他各種産業機械など約40業種が指摘され

ている。

▽産業体制＝産業体制整備の必要が指摘された業種は約50業種にのぼった。これを問題の性格によって分けると、生産規模の拡大が問題であるものが約10業種、専門生産体制の確立が問題であるものが約30業種、設備過剰が問題であるもの約10業種となっている。①国際的にみて生産規模に格差があり、量産体制の確立がとくに必要とされる業種は自動車、石油化学など約10業種である。②生産品種の整備、分野調整などによる専門体制の確立が必要とされる業種は機械工業振興臨時措置法および電子工業振興臨時措置法の対象となっている各種の機械工業および部品工業のほか、電線ケーブル、合成染料、自動車タイヤなど約30業種である③過剰設備の処理がとくに必要とされるが、または設備過剰のため増設規制を実施中の業種は綿・スフ紡、レーヨン・ステープル各種織り物など約10業種である。

(71頁へつづく)