超硬合金の放電加工特性

— C I R P 共同研究 —

増井清徳* 谷村 毅*

Machinability of Cemented Carbides by EDM

— C I R P Cooperative Research Project —

by Kiyonori MASUI, Tsuyoshi TANIMURA

This paper deals with the machinability of cemented carbides by EDM carried out as a frame work of the CIRP Cooperative Research Project of the Scientific Technical Committee E (Physical and Chemical Machining). The aim of above is to investigate the correlation between the machining parameters and the surface integrity of the machined pieces.

The experiments were carried out by well defined test conditions so as to obtain the comparable test results. And also the workpiece material used were delivered by the Technical Secretariat and the University of Aachen as the standard material from one and same production batch.

In respect to our results following features will be pointed out. Both the minimum depth of micro-cracks and maximum workpiece metal removal rate were obtained at the almost same range of the pulse duration (t_i : 3~10 μ s). This similar tendency was observed also among the results of other participants.

To obtain the sound analysis of the results and to provide the optimum machining conditions further works are still going on

* 大阪府立工業技術研究所

with broadened test conditions (different grades or manufacturers of the material, shorter t_i , single discharge method, etc.). All these works will be summarized by Heuvelman, Technical Secretary of the Committee, at 28th CIRP of this year.

1. ま え が き

CIRP-STC-Eの共同研究プログラムについては本誌前号に詳しい紹介があるのでこゝでは重複を避けるが、この報告は筆者らが実際に上記活動に参加の機会を得、第26回CIRP(1976年パリ)に提出したものである。各国の研究機関で実験を開始するに先立ち、用語の定義や実験条件、測定方法の検討など共同研究の主旨を徹底するために周到な準備がなされた。そして結果的には各機関から提出されたデータ相互間に完全な一致はなかったものの一応の傾向は確認された。このことは共同研究が次のステップへすすむうえで大いに意義があり、それは新しいパラメータの発見という形で現れた。

実験条件を標準化するうえで困難な部分は保有する設備の相違であり、とくに市販機の電源を使用した場合には電氣的条件の選択に自由度が少ない。また旧型の機械本体では電極サーボ機構が異なりこの場合にも加工特性に差がみられたようである。

いづれにしてもこの報告は共同研究の初期の段階における一つの結果であり、現在も各機関で多角的に続けられている実験群の結果が集積されてより精微な超硬合金の放電加工特性像が形成されるものと信じる次第である。

2 実験条件、測定項目及び測定方法

実験条件などについては必ずしもこれらがすべてCIRPから指定された通りではない。とくにこの共同研究の重要課題である表層クラックの観察について、試料研磨法、エッチング試液など非常に詳しい方法がアーヘン工科大学からだされたが、費用、設備などの点でほとんどの参加者がこれを採用できなかった。その他筆者らが設備や時間の都合で止むをえず実験や測定の省略、変更をしたものについて以下参考のためあげておきたい。

電極材： Cu (省略)

加工液： Shell Sol TD 又は H (従来使用している国産白灯油)

V_{we} , V_{Ee} : (省略, パルス当りの電極及び被加工物除去量)

f_e : (省略, 有効放電周波数)

λ : (省略, 相対放電周波数 = f_e/f_p)

なお用語はすべてCIRPの定義にしたがったので正確を期するため英文と図-2などを参照していただければ幸いである。

2.1 実験条件

被加工物：GT 20 (85% WC, 12% Co, 3% TiC TaC, 西独 KRUPP) 17mm ϕ × 5mm t

電極材：W-Cu (75% W, 25% Cu, 仏 Sparkal X) 外径：15mm, 内径3mm

電源：方形波パルス電源

パルス電流： $\overline{i_e} = 8\text{ A}$ (仕上げ), $\overline{i_e} = 25\text{ A}$ (中仕上げ)

供給パルス幅： $t_i = 3, 10, 30, 100, 500\ \mu\text{s}$

デューティファクタ： $\tau = 0.5$ (一定)

開放電圧： $u_i = 80\text{ V}$

加工時間：15分 (2回)

電極サーボ：最適状態に調節

極性：電極(-), 電極(+)

加工液：白灯油 (液温 20~40℃)

噴出流量： $q = 0.3\text{ cm}^3/\text{s}$ ($\pm 10\%$)

2.2 測定項目

加工速度： V_w (mm³/s), Workpiece removal rate

電極消耗速度： V_E (mm³/s) Electrode wear rate

電極消耗率： θ (%) Relative electrode wear

加工面粗度： R_a (μm) (測定長4mm, カットオフ波長0.8mm) Roughness of the workpiece

マイクロクラック深さ： l_l (μm) Maximal depth of micro-cracks

加工液噴出圧： P_e (N/mm²) Dielectric inlet pressure

平均アーク電圧： $\overline{u_e}$ (V) Average discharge voltage

平均パルス電流： $\overline{i_e}$ (A) Average discharge current

放電エネルギー： $W_e = \int_{t_e} u_e(t) \cdot i_e(t) dt$ (W) Discharge, energy

平均加工電圧： u_e (V) Average working voltage

平均加工電流： I_e (A) Average working current

供給パルス周期： t_p (μs) Pulse cycle time

供給パルス幅： t_i (μs) Pulse duration

パルス周波数： f_p (KHZ) Pulse frequency

実効放電時間率： $\Phi = \Sigma t_e / \Sigma t_i$ (t_i = 実質放電パルス幅) Average relative discharge duration

2.3 測定方法

2.2であげた測定項目のうち実効放電時間率 Φ の測定は図-1の方法でおこなった。すなわち422 Aでとりだし放電電流とギャップ電圧の論理積をパルス発振器のゲート入力とし、その出力(パルス幅： $0.1 \mu s$, 周期： $0.2 \mu s$)を計数して(15分)倍数を実効放電時間と考え計算で求めた(図-2)。422

図1 放電状態検出回路

t_i : Pulse duration	$\bar{u}_e$: Average discharge voltage
t_p : Pulse cycle time	$\bar{i}_e$: Average discharge current
t_d : Ignition delay time	Discharge : (a) (b) (d) (e) (g)
t_e : Discharge duration	Open circuit : (c)
$t_e = t_i - t_d$	Short circuit : (f)
u_i : Open circuit voltage	

図2 放電状態検出回路(図1)の各部における信号波形

Aの出力は同時に積分器を経て別にとり出し、加工中にこの値が最大になるよう電極送り速度を調節した。この方法では放電ギャップの短絡及び開放時にはいずれも422 Aの出力が0となり、回路構成も簡単で Φ のみの測定には便利である。参加者のうちPhilipsとLeuvenも原理的に同じ方法をとっている。ただし欠点は持続性アークに対して無防備なことである。筆者らの場合もオシロスコープによると持続アークの特徴である平坦なアーク電圧が常時観測された。しかしこのアーク電圧には繰返しの連続性はなく、加工状態も安定であるので発生頻度の少ない短時間の放電集中と推察される。これ以後の実験において新たに Φ 測定装置を試作したが、これによると持続アークの発生頻度は供給したパルスのうち数%であると考えられる。

表層クラックの観測に必要な試料研磨はワイヤー放電加工機で切断後機械研削を経て表-1の順序でおこなった。なお研削及び研磨時に必要な試料のモールドには熱及び圧力硬化型のベークライト粉末を用いた。研磨方法でのアーヘン工科大学案との最大の相違はモールド樹脂ではなく研磨治具と試料との間に白金ストリップ(厚さ0.3 mm)を使用していることで、筆者らのものと比較するとエッジ部の平坦度がすぐれているようである。

実験は図-3、4に示す通り電極の中空穴から終始加工液を噴出させておこなったが、指定の微量流量を得るには加工機の付帯ポンプでは容易でない。そのため電磁ポンプを別にもうけ使用したが、結果

表-1 超硬加工断面の研磨法

順序	定 盤	回 転 数	ラ ッ プ 材	荷 重	時 間
1	鋳 鉄 盤	120 rpm	GC #400 (GC 30 g, 水性油 60 cc, 水 6 cc)	8 kg	15 分
2	"	"	GC #800 (")	"	5 "
3	D P ク ロ ス	"	ダイヤモンドペースト (6 μ)	4 kg	5 "
4	"	"	" (1 μ)	"	5 "

図3 実験装置の概略

は極めて良好で後述のように実験結果の再現性及び信頼性を支配する要因の一つと考えられる。

使用した加工機本体は JAPAX DH-200 B 型，電源は自家製のトランジスタ電源である。放電電流及びギャップ電圧の観測にはそれぞれ同軸型円板分流器と P6053 B 型 (10:1, TEKTRONIX) を使用し，オシロスコープは 7633 型 (TEKTRONIX) ストレージタイプを用いた。また超硬加工面の観察には JSM-U3 型走査型電子顕微鏡 (日本電子) を使用した。

3. 実験結果

実験結果を表 2～3，図 5～10 に示した。加工速度はすべての条件において電極 (－) の方がすぐれており $\overline{i_e} = 25 \text{ A}$ では $t_i = 10 \sim 30 \mu\text{s}$ で最大値を示す。この $V_W - t_i$ 曲線は他の参加者の結果と

図 4 電極の形状

表 - 2 実験結果 (逆極性)

Workpiece : GT 20 Electrode : Tungsten- Copper
Polarity : Electrode (+) Open circuit voltage $u_i = 80\text{V}$
Dutyfactor $\tau = 0.5$ Dielectrical fluid : Kerosene
Flow rate $q = 0.3 \text{ cm}^3/\text{s}$

	Test No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\overline{u_e}$	V	18	17	15	15	16	20	20	18	16	16
$\overline{i_e}$	A	8	8	8	8	8	25	25	25	25	25
W_e	W	144	136	120	120	128	500	500	450	400	400
U_e	V	30	26	35	30	26	24	20	20	20	28
I_e	A	3.5	3.5	3	3	3	7	10	10	10	7
t_p	μs	6	20	60	200	1000	6	20	60	200	1000
t_i	μs	3	10	30	100	500	3	10	30	100	500
f_p	KHz	166.7	50	16.7	5	1	166.7	50	16.7	5	1
Φ		0.652	0.774	0.569	0.288	0.153	0.777	0.886	0.813	0.761	0.302
V_W	mm^3/s	0.0263	0.0199	0.0106	0.0054	0.0012	0.1486	0.1744	0.1253	0.0710	0.0104
V_E	mm^3/s	0.0180	0.0102	0.0056	0.0018	0.0001	0.0750	0.0711	0.0488	0.0360	0.0028
θ	%	68.4	51.3	52.8	33.3	8.3	50.5	40.8	38.5	50.7	26.9
R_a	μm	0.8	1.4	1.8	2.3	—	1.3	1.9	2.4	3.0	4.2
l_l	μm	10	15	27	30	76	11	25	50	45	80
p_e	N/mm^2	0.34	0.30	0.20	0.10	0.03	0.23	0.12	0.07	0.04	0.02

表 - 3 実験結果 (正極性)

Workpiece : GT 20 Electrode : Tungsten-Copper

Polarity : Electrode (-) Open circuit voltage $u_i = 80 \text{ V}$ Dutyfactor $\tau = 0.5$ Dielectrical fluid : KeroseneFlow rate $q = 0.3 \text{ cm}^3/\text{s}$

Test No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\bar{u}_e$ V	19	15	15	15	16	20	19	18	16	16
$\bar{i}_e$ A	8	8	8	8	8	25	25	25	25	25
W_e W	152	120	120	120	128	500	475	450	400	400
U_e V	34	36	28	30	30	24	20	17	18	28
I_e A	3	3	3	3	2.5	7	10.5	11	11	7
t_p μs	6	20	60	200	1000	6	20	60	200	1000
t_i μs	3	10	30	100	500	3	10	30	100	500
f_p KHz	166.7	50	16.7	5	1	166.7	50	16.7	5	1
Φ	0.753	0.772	0.666	0.316	0.173	0.872	0.868	0.889	0.832	0.584
V_w mm^3/s	0.0432	0.0384	0.0231	0.0122	0.0019	0.1745	0.2843	0.2793	0.1657	0.0263
V_E mm^3/s	0.0075	0.0059	0.0035	0.0022	0.0006	0.0310	0.0453	0.0435	0.0290	0.0046
θ %	17.4	15.4	15.2	18.0	31.6	17.8	15.9	15.6	17.5	17.5
R_a μm	1.1	1.5	2.0	2.4	2.7	1.5	2.1	2.8	3.3	4.8
l_l μm	10	20	31	40	65	11	13	25	50	95
p_e N/mm^2	0.33	0.24	0.17	0.08	0.03	0.26	0.10	0.04	0.03	0.01

電 極 : W - Cu,

加 工 物 : GT 20

開放電圧 : $u_i = 80 \text{ V}$ デューティファクタ : $\tau = 0.5$

加 工 液 : 白灯油

噴出流量 : $q = 0.3 \text{ cm}^3/\text{s}$

図 5 供給パルス幅に対する加工速度および電極消耗率の関係

あらさ計: Talysurf Model-3 (Cut off 0.8mm)
 電極: W-Cu, 加工物: GT 20
 開放電圧: $u_i = 80$ V, デュティファクタ: $\tau = 0.5$
 加工液: 白灯油, 噴出流量: $q = 0.3$ cm³/s

図6 供給パルス幅と加工面あらさの関係

電極: W-Cu, 加工物: GT 20
 開放電圧: $u_i = 80$ V
 デュティファクタ: $\tau = 0.5$
 加工液: 白灯油, 噴出流量: $q = 0.3$ cm³/s

図7 供給パルス幅とマイクロクラック深さの関係

$$\text{実効放電時間率: } \Phi = \frac{\sum t_e}{\sum t_i}$$

電極: W-Cu, 加工物: GT 20
 開放電圧: $u_i = 80$ V
 デュティファクタ: $\tau = 0.5$
 加工液: 白灯油, 噴出流量: $q = 0.3$ cm³/s

図8 供給パルス幅と実効放電時間率の関係

$\bar{i}_e = 8 \text{ A}$ 分路器: (0.75 mΩ)
 オシロスコープ: Tektronix (Model - 7633)

図9 各種の放電々流波形

図10 加工断面の顕微鏡写真

図 11 加工断面の顕微鏡写真

は必ずしも一致せず、 $t_i = 3 \mu s$ に向って V_w が一様に増加もしくは飽和するもの (Eindhoven) と急激に減少するもの (Leuven) とに分けられる。これらの相違は主にパルス派形の違い (特に立上り及び立下り時間) に由来するものと推察され、筆者らの結果においても $\bar{i}_e$ の減少に対して ϕ の変化は緩やかでありその割に I_e が急激に減少していることからもうかがえる (表-2 及び図-8)。 t_i の調節はスイッチングトランジスタの数でおこなっているので $\bar{i}_e = 25 A$ より $\bar{i}_e = 8 A$ の方が波形としてはくずれが小さく方形波に近い (図-9)。したがって $\bar{i}_e = 8 A$ では t_i の減少につれて V_w は一様に増加の傾向を示している。

図 12 超硬の表面写真 (放電加工前)

図 13 放電加工面（正極性）

加工の安定性は $\bar{i}_e = 25\text{A}$ の方がよくとくに $\bar{i}_e = 25\text{A}$ では $t_i = 100\mu\text{s}$, $\bar{i}_e = 8\text{A}$ では $t_i = 30\mu\text{s}$ をこえると急激に悪化する。このことから安定な加工を維持する $\bar{i}_e/t_i$ の下限が存在するものと考えられる。また微少流量を得る目的で使用した電磁ポンプ（VS-1.5G, 日本コントロール）は、加工の安定化にも有効に寄与し、加工機に付帯したポンプとの差は歴然であった。特徴としては、噴出流量が放電ギャップ長の影響をあまりうけず、ほぼ一定の特性をもつので超硬材料に限らず放電加工作業一般に有用であることが予想される。

電極消耗率は銅一銅の場合のようにパルス幅に対する一様な傾向を示さないが、加工速度と同様に電極（－）の方が好ましい結果を与えている。なお、図－5 では $\bar{i}_e = 25\text{A}$ で θ が t_i の広い領域にわたり、ほぼ一定の値を示しているが全般的に云えることは、電極送り速度の調節によっては微妙にばらつく傾向をもっている。したがって直接的には実効放電時間率や持続性アークの発生率などと相関性をも

図 14 放電加工面（正極性）

つことも考えられる。

この実験の主要課題である表層クラックの測定結果は図 - 7 に示すとおりである。いづれの条件においても t_i の減少につれてクラック深さは小さくなっており図 - 5 の結果と合わせて考えると GT 20 の場合にもパルス幅の小さい領域が適しているということになる。測定は研磨した試料の金属顕微鏡写真でおこなったので必ずしも個々の加工条件における最確値とは云えず、結果のばらつきがこの種測定の困難さを示している。図 - 10, 11 に加工面断面の金属顕微鏡写真を、図 - 13 からは加工表面の電子顕微鏡写真をそれぞれ示したので参考にされたい。

各参加者の実験結果が集結後、表層クラックの発生原因やその抑制策について主に放電現象と材料組成の角度からいくつかの推論がだされたが、今回の実験の範囲内では確答が得られず後述のように内容を拡大して研究を継続することになっている。

図15 放電加工面（逆極性）

4. む す び

CIRP-STC-Eで指定された条件にもとづき、GT20の放電加工特性について実験をした結果、少くとも次の事が明らかになった。すなわち加工速度及び表層クラックの両見地から正極性接続と放電時間の短い領域が条件的に好ましい。とくに後者についてはトランジスタ電源の超硬材料への適性を論じる場合にキーとなる可能性があるので、立上り及び立下り時間を含めたパルスパラメータによる再実験が必要かと推察される。

前述のとおり本共同研究は新たにワイヤー放電加工法による実験が追加されるなどその内容と範囲の拡大により現在も続行されている。これらの結果については最終的にはHeuvelmanの手でまとめられ、今夏オランダで開催される第28回CIRPで報告の予定である。以下各研究機関において実施が

図 16 放電加工面（逆極性）

きまっている実験内容について参考のためあげると、

1. 汎用 EDM

Aachen : GT 10, GT 40, GT 60 のグラファイト, 銅, 銅タングステン電極による実験

Philips : GT 20 の単発放電による実験

Leuven : 製造会社の異なる各種超硬材の実験

Eindhoven : 新設計の電源（最小パルス幅 $0.2\mu\text{s}$ ）による実験（GT 20 - 銅タングステン）

Ljubljana : GT 20 - 銅タングステン

Iscar : 単発放電と各種超硬材に対する TRS 値の実験

山梨大学 : G 5（住友電工製）- 銅タングステンの実験

筆者ら： G5—銅 タングステン，銅の実験

2. ワイヤーEDM

Aachen, Philips, Eindhoven, Agie, Charmiles, 東京大学及び筆者ら： ワイヤーEDM用に設定された実験条件によるU6H（超微粒子超硬材—6% Co, 西独KPUPP）の加工

筆者ら： H1（住友電工製超微粒子超硬材）及びG5の加工実験

なお筆者らの担当した実験はすでにほとんど終了し，一部を昨年のCIRP（インド）に報告，残りを1月末に開催のバリでの例会に提出できる見込みである。

（1978. 1. 14 受付）