線電極を用いたガラスの放電加工

渡 辺 忠 彦^{*} 小 林 和 夫^{*} 徳 広 祐 之 輔^{*} 竹 内 正 俊^{**}

Electrical Discharge Machining for Glass with Wire Electrode

Tadahiko WATANABE, Kazuo KOBAYASHI,

Yunosuke TOKUHIRO and Masatoshi TAKEUCHI

This paper describes fundamental experiment on the electrical discharge machining with wire electrode. A thick glass plate could be ground and cut by the electric arcs generated along the contact line between the glass plate and the wire electrode in an electrolyte. In the first place under the application of alternating current, a relation between temperature of the electrolyte and the cutting rate was examined. The result showed that there was a transition temperature at about 60 °C. Secondly for the purpose of clarifying the transition phenomenon, the relation between temperature of the electrolyte and the cutting rate was investigated in the each case of the application of half-wave rectified voltage and that of full-wave rectified one to the wire electrode. Furthermore the mechanism of machining was made clear by using microscope to consider the machining surface. The main results of the second experiment are as follows:

1. When full-wave rectified negative voltage, half-wave rectified positive or negative Voltage was applied to the wire electrode, each cutting rate was almost constant over 60 °C. The cutting rate under full-wave rectified negative voltage was the largest.
2. When full-wave rectified negative voltage of 64 V was applied to the wire electrode, the cutting rate showed rapid increase over the range from 52 °C to 73 °C. This rapid increase is due to the reason that the electric current and the discharging period change little by little in the range

* 工業技術院九州工業技術試験所

** 福岡県工業試験所久留米分場

from 52°C to 73°C with increase of the temperature of the electrolyte.

3. The cutting rate by use of alternating current increased in the range from 60°C to 73°C, because the electric current and the discharging period under the positive voltage might be changed with the electrolyte temperature. In order to get the rapid increase of cutting rate, short pausing period of discharge must be chosen as pausing period under alternating voltage or positive full-wave rectified voltage.

1. 緒 言

非金属材料の電解放電加工にはダイヤモンド、ルビー、石英およびガラス等に対する孔あけ加工がよく知られており、薄いガラスに対する切断加工の一例として針状電極を用いた方法が研究されている^{1) 2)}。しかしながら、線電極にそった電解放電現象を非金属材料の平面加工に利用した加工法はまだ知られていない上に、この加工法を利用した厚いガラスの切断加工法はまだ知られていない。気体中の線状導体に現われる放電現象には次に述べる形式のものがよく知られている。すなわち線状導体が陽極のときは線上に一樣な薄膜状の放電が現われ、線状導体が陰極のときは放電箇所が1点づつまとまって、あたかも針状放電が多数並んでいるような放電が現われる。そこで筆者らはこの現象を利用したガラス板の電解放電平面加工法および切断加工法を考案した。本報では電解放電平面加工法および切断加工法に関する実験的帰結について報告する。まず交流電源を用いて液温と加工速度との関係を求めた結果、ある温度領域において、加工速度が急激に変化することがわかった。そこで交流電源を用いた場合の加工速度が液温により急激に変化する原因を究明する目的で半波整流および全波整流電源を用いて、各種電圧波形に対する加工特性を明らかにした。次に各種の電圧波形を用いて加工した場合の加工面の観察も行ない加工のメカニズムを考察した。

2. 実 験 装 置

図1(a)は実験装置を示す。図1(a)において、タンクから約1 l/min で流出した電解液が加工槽に入り、加工槽よりオーバーフローすることにより、液位および液温は一定に保つように工夫されている。加工槽は縦横200×60 mm高さ70 mm のアクリル樹脂を用いて作った。電極は直径0.3 mm φ のニッケル線と大きさ58×20×6 mm の銅板電極とを電極間距離約100 mm で電解液中に配置した。電源から各々の電極までの接続は、銅板電極にはビニールコードにより直接接続し、またワイヤ電極には、加工槽に取付けた2個のロールを介して接続した。低速モーターに巻かれた加工電極の片端に100 gのおもりをかけ、一定速度で移動するようにした。一方、4章、5.1節および5.2節の実験においては、加工物のガラスを

図 1 実験装置

図 1 (a)のごとく取付け、駆動装置を用いて紙面に直角方向にテーブルと一体でガラスと線電極を近づける方向に送り切断した。図 1 (b)は図 1 (a)の試料取付装置部分の側面図を示す。また実験開始点における加工物と線電極との間の接触圧をひずみゲージ、ひずみ計および電磁オシログラフを用いて測定した。6章の実験において、図 1 (c)に示すように加工物と線電極の相対的配置はテーブルの移動にともなって加工物表面が線電極によって平面加工されるように取付けた。この際実験開始点（放電開始点）で加工物と線電極とが接触してから 0.4 mm 線電極

を加工物表面方向に押つけ、この状態で放電を開始した。放電開始後 3 分間は加工物を静止させた状態に保ち、その後テーブルとともに加工物を 0.17 mm/min の速度で移動させ平面加工を行なった。

電源および電圧電流測定回路を図 2 に示す。4 章の実験で使用した電源出力は図 2 に示した整流回路を用いなくてスライドオートトランスから直接出力を得た。

図 2 電源および測定回路

3. 実験条件および実験方法

加工物は寸法 50 × 50 × 5 mm の強化ガラス（ソーダ石灰ガラス）を用いた。電解液は 30% 酸性ソーダ溶液を使用した。4 章の実験において、加工電源には 60 Hz の商用交流を用いた。また 5 章の実験においては、単相半波整流および単相全波整流波形を電源波形として用いた。加工電圧はシンクロスコープを用いて測定し、ピーク電圧を 64 V とした。また実験開始点では線電極とガラスとを初期荷重として 30 g で接触させた。実験開始と同時にテーブルを送り速度 0.17 mm/min で移動させて切込みを与えた。加工時間は 3 分とした。また電解液液温の測定にはサーミスタ温度計を用い、液面下約 3 mm の点の液

温を30秒間隔で測定し、最高温度を液温とした。

4. 交流電源の場合における液温と加工速度との関係

従来、針状電極を用いた電解放電加工には交流電源が用いられることが多い^{1) 2)}。そこで、線電極を用いた加工でも交流電源を利用することを検討した。交流電源を用いた場合の液温と加工速度との関係を図3に示す。図3の曲線から、液温が約25℃から40℃まで上昇すると加工速度は放物線状に上昇するが、約40℃から60℃までの範囲ではほぼ一定値となり、約60℃から約73℃までの範囲では液温の上昇にともなって加工速度は急激に上昇する。そして約73℃から76℃までは液温が上昇しても、加工速度はほぼ一定値になることがわかる。

従来、電解放電加工においては孔あけ加工が主体で加工電極には針状電極を用いているが、針状電極を用いた場合は液温の影響はないものとされている²⁾。しかしながら相当長い線電極を電解液中に浸した本加工法は、針状電極を用いた孔あけ加工とはちがった加工現象が生ずることも理解できる。そこでなぜ図3のように加工速度が液温によって変化するのかを明らかにする必要がある。緒言において述べたように交流電源を用いた場合、加工電極に正電位が印加された場合と負電位が印加された場合では放電現象は違う。そこで正電位のみが印加された場合と負電位のみが印加された場合にわけて実験を行ない、図3の加工速度の急変する現象を明らかにするとともに、各電圧波形における加工特性を明らかにする実験を行なった。

5. 各種波形電源を用いた加工

5.1 加工特性

使用電源電圧波形は4種類とし、表1に線電極に印加する電圧波形および記号を示す。表1に示した4種類の電圧波形をパラメーターとして、液温と加工速度との関係を図4に示す。波形IおよびIIの液温加工速度曲線から、加工速度は波形Iを加えた場合、約40℃から60℃の範囲では液温の上昇にともなってわずかながら上昇するが60℃以上ではほぼ一定となることがわかる。波形IIを加えた場合、加工速度は液温が

実験条件

電解液：NaOH液（30％），線電極：Ni
線 0.3 φ，電圧：ピーク値 64 V，
初期荷重：30 g，極間距離：100 mm，
加工時間：3 min

図3 液温と加工速度との関係

表1

記号	I	II	III	IV
	●	▲	○	△
線電極にかかる電圧波形				

約40℃から60℃まで上昇するにつれてわずかながら上昇するが、液温が60℃以上になるとほぼ一定となることがわかる。また加工速度は波形Ⅰを印加した方が波形Ⅱを印加する場合より4倍ほど速いことがわかる。波形Ⅱの場合より、波形Ⅰの方が、加工速度が大きい理由は線電極に負の電圧が印加されるので電子源となる線電極表面へ電界が集中して γ 作用による放電が密になる性質がある点および後述するように放電持続時間が長い二点が考えられる。波形Ⅲの液温加工速度曲線から、液温が60℃付近までは温度の上昇にともなって加工速度も上昇し、60℃以上になると加工速度はあまり変化しないことがわかる。60℃以上の液温において、波形Ⅲの加工速度は波形Ⅰの場合の加工速度の約2.7倍となっている。図4の波形Ⅳの液温加工速度曲線は線電極が正の場合、液温が約40℃から52℃の範囲で加工速度はほぼ一定となり、約52

実験条件

電解液：NaOH液（30%）
 線電極：Ni線 0.3φ，
 電圧：ピーク値 64V，初期荷重：30g
 極間距離：100mm，加工時間：3min

図4 液温と加工速度との関係

℃から73℃まで上昇させると、加工速度は液温とほぼ直線的な関係で急上昇することがわかる。また液温が約73℃以上になると液温が上昇しても加工速度はほぼ一定値となることが解った。波形Ⅳにおいて、液温52℃から73℃までの液温と加工速度との関係は図3の交流電圧波形を用いた場合の約60℃から73℃までの特性と類似していることがわかる。液温が60℃以上の範囲において、波形Ⅱを使用した場合、液温によって加工速度があまり影響を受けないこと、波形Ⅳは波形Ⅱを半波ずらせて2度印加した波形であること等を考慮すれば、波形Ⅱを2度印加すると相乗効果が生じることがわかる。また交流電圧波形を用いることは波形ⅠとⅡとを半波ずらせて重ねて用いることと同じであり、液温が60℃より大きくなるにともなって図3のように交流電源を用いた場合の加工速度は図4の波形ⅠとⅡとの加工速度の和より大きくなり、波形ⅠとⅡとを重ねることによる相乗効果が存在することがわかる。

5.2 シンクロスコープによる波形観察

前節において各電圧波形に対する加工特性が明らかになったが、印加した波形の違いによる加工速度の違いを考察するため、加工中の放電電圧電流波形をシンクロスコープを用いて観察した。図5は線電極に单相半波整流電圧（波形ⅠまたはⅡ）を印加した場合における加工中の電圧電流波形を示す。図5から線電極付近の状態は電解焼入現象⁵⁾と同様で、線電極に印加される電圧の絶対値が小さいときは電解状態となり、小さな気泡が水の電気分解によって線電極の周囲に発生していると推測される。さらに電圧が上昇すると電流密度も上昇し、線電極の周囲に発生した気泡の間の細い通路を通して電流が流れる。そして細

い通路となる電解液は抵抗熱によって蒸発し、通路が切断される。通路が切断されると電圧の絶対値は急激に大きくなり、また電流は急激に小さくなり線電極付近の状態は放電に移行する。

放電は放電開始電圧より低い電圧まで続き、放電が終了すると再び電解状態にもどることが波形の観察から推測される。また線電極が正の場合放電は不安定となり、放電持続時間は約 4.2 m sec となる。また線電極が負の場合放電は安定でかつ持続的に放電し、放電持続時間は約 5.2 m sec となる。このように線電極に印加される電圧が正の場合と負の場合とでは放電状態がちが

うことがわかる。この違いはおもに放電を生じさせる原因となる電子およびイオン源の違いによるものと考えられる。線電極に正電位を印加した場合には、電子またはイオン源は電解によって生じたガス層に接触した電解液界面であり、電子またはイオン源は不安定であると考えられる。また線電極に負電位を印加した場合には、電子源はニッケル線表面であり電子源は安定していると考えられる。

図 6 は線電極に单相全波負電圧（波形Ⅲ）を印加した場合の電圧電流放電波形を示す。図 6 に示す波形Ⅲの電圧電流放電波形と図 5(b)に示す波形Ⅰの電圧電流放電波形とを比較すると、放電持続時間はほぼ同じであるが、電流の値は図 6 に示す全波整流の方が大きくなっていることがわかる。放電電流が大きくなっていることが加工速度を 2 倍ではなく 2.7 倍にも上昇させた原因の一つであると考えられる。

図 7 は線電極に全波整流正電圧（波形Ⅳ）を印加した場合、電圧電流放電波形が電解液液温によって影響を受ける様子を示す。図 7 から、液温が 40℃における 1 回の放電持続時間は約 2.7 から 3.4 m sec であり、液温が 76℃に上昇すると約 5.3 m sec まで増加する。また放電電流の値は 40℃の場合、約 5 A であるが、76℃の場合約 15 から 30 A である。

実験条件

液温：65℃，その他実験条件は図 4 と同じ

図 5 電圧電流波形

実験条件

液温：67℃，その他実験条件は図 4 と同じ

図 6 線電極に单相全波整流負電圧を印加した場合の電圧電流波形

実験条件は液温を除き図4と同じ

図7 線電極に单相全波整流正電圧を印加した場合の電圧電流波形

すなわち液温が40°Cの放電形態は76°Cにおける放電形態と明らかに異なることがわかる。また液温が60°Cの場合には、40°Cと76°Cの放電形態が混在した状態となり、放電開始部と終了部は76°Cにおける放電形態をとり、放電の間では40°Cの放電形態をとることがわかる。液温により放電形態が変化することから、図4の波形Ⅳを用いた場合加工速度は液温により急激に変化することが理解できる。また波形Ⅳの場合の類推から図3の交流電圧を用いた場合の液温による加工速度の急変も理解できる。

6. 各電圧波形を用いた場合の加工面の観察

前節において、電源電圧波形および液温によって放電形態および加工速度が異なることが明らかになった。放電形態および加工速度の相異は加工面形状にも影響を及ぼすと考えられるので、特に波形Ⅲ、Ⅳおよび交流波形を用いて平面加工を行ない、面形状の比較を行なった。

図8(a)、(b)および(c)は投影機による加工面形状の写真を示す。加工条件は液温70°C、ピーク電圧64V、電解液は30%カ性ソーダ溶液を使用し、テーブル送り速度は0.17mm/minに選んだ。図8(a)から、

(a) 線電極負 (全波整流)

(b) 線電極正 (全波整流)

(c) 交流

0.5mm

実験条件

電解液: NaOH (30%)

線電極: Ni 線 0.3 φ

電圧: ピーク値 64 V

液温: 70 °C

図8 加工面形状

(a) 線電極負 (全波整流)

(b) 線電極正 (全波整流)

(c) 交流

0.2mm

実験条件は図8に同じ

図9 加工表面形状

線電極に波形Ⅲの電圧を印加した場合、面はほぼ線電極方向に長軸をもつ楕円状の放電痕から形成されており、このことから一回の放電は一点に集中して起きていることがわかる。図8(b)から線電極に波形Ⅳの電圧を印加した場合、面は線電極にそった溝状の放電痕から形成されている。もし一回の放電が一点に集中して起きたならば楕円状の放電痕が残っていると考えられるので線電極に波形Ⅳを印加した場合、一回の放電はほぼ線電極方向に伸びていると推測される。また図8(c)から、線電極に交流電圧を印加した場合、面は図8の(a)および(b)の混じり合った形状となっていることがわかる。

図9(a), (b)および(c)は投影機を用い放電痕の底に焦点を合せて写した面形状写真である。加工条件は図8と同一である。線電極に波形Ⅲの電圧を印加した場合、図9(a)は放電痕の底にクラックが生じていることを示しており、加工は針状電極による加工機構²⁾と同じく放電による化学反応と熱的クラックの両者によって進行するものと考えられる。図9(b)から、線電極に波形Ⅳの電圧を印加した場合、放電痕の底はなめらかな面からできており、加工は放電による化学反応によって進行するものと考えられる。図9(c)から線電極に交流電圧を印加した場合、放電痕の底はなめらかな面とクラックから構成されていることがわかる。また加工変質層に大きく影響を与えるのは交流成分のうち負電圧であることも推測される。また、こ

これらの面を表面あらさ計により測定するとほぼ $20\text{ }\mu\text{Hmax}$ の値を得た。

7. 結 言

線電極を用いたガラス板の電解放電平面加工および切断加工の基礎的実験を行なった結果、次の事柄が明らかになった。

1. 交流電源電圧を線電極に印加して加工すると、加工速度は液温により大きく影響を受け、液温約 60°C から 73°C において加工速度は急激に変化する。
2. 線電極に全波整流負電圧、半波整流正および負電圧をピーク電圧で 64 V 印加した場合液温 60°C 以上において、それぞれの加工速度はほぼ一定となり、加工速度は全波整流負電圧、半波整流負電圧、半波整流正電圧の場合の順に大きい。
3. 線電極に全波整流正電圧 64 V を印加した場合、加工速度は液温約 52°C から 73°C の間において急激に変化する。液温 73°C における加工速度は 52°C における加工速度の2倍以上である。これは液温が 52°C から 73°C まで上昇するにつれて、放電電流と放電時間が増大したためである。
4. 交流電源電圧を用いた場合、液温 60°C 付近において加工速度が急激に変化するのはおもに交流電圧成分のうち正電圧下の放電電流と放電時間が変化するためと推測される。また加工速度を温度に対して急激に変化させるには、単相半波正電圧のように放電休止期間を長く選ばないで交流電圧または単相全波正電圧の場合のように放電休止期間をある程度短く選ばなくてはならない。
5. 線電極に全波整流負電圧 64 V を印加して加工した場合、加工面はほぼ線電極方向に長軸をもつ多数の楕円状の放電痕から形成され、放電痕の底にはクラックが観察された。線電極に全波整流正電圧 64 V を印加して加工した場合、加工面は線電極にそった溝状の放電痕から形成され、放電痕の底はクラックの無いなめらかな面からできている。線電極に交流電圧 64 V を印加した場合、加工面は線電極にそった楕円状および溝状の放電痕から形成され、放電痕の底には多くのクラックが観察された。従って、加工の機構は高温に於ける化学反応以外に熱的クラックによるものが有る事が解った。

(1974. 2. 20 受付)

文 献

- 1) 井川 多美雄：ダイヤモンドの加工に関する研究（放電加工法について），精密機械，24，10（1957）553
- 2) 筒井 忠夫：ガラスの放電加工（ガラス板の切断について）精密機械，26，10（1959）596
- 3) 倉藤 尚雄，増沢 隆久，古明地 繁樹：ルビーの放電小孔加工，電気加工学会誌，3，6（1970）33
- 4) 大和久 重雄，黒柳 一雄：電解焼入法（第1報）浸漬式，日本金属学会誌，20，2（1956）63
- 5) 黒田 寿紀：電解焼入法に関する研究，大阪工業技術試験所報告，№312，March（1959）