放電加工における応力分布に関する研究 (第4報)

— 焼戻し処理効果と応力分布形態 —

向山芳世* 緒方 勲* 日原政彦**

Study on Stress Distribution in Electric Discharge Machining (4rth Report)

— Relationship between Effect of Heat Treatment
and Stress Distribution —

by Yoshitsugu MUKOYAMA, Isao OGATA and Masahiko HIHARA

In electric discharge machining (EDM), as the residual stress that generates on surface of the workpiece has direct effects upon the quality of products, more detailed investigations are required.

In previous papers, the relationships between the residual stress distribution and the electrical conditions (energy supplying duration, peak discharge current), the materials of workpiece (mild steel, cold work die steel) and machining forms (impulse and repetitional discharge machining) etc. were reported by the same authors.

The residual stress generated on EDM surface is mainly caused by thermal stress and transformation stress resulting from thermal action of electric discharge. Accordingly, the magnitude and contribution form of stress are closely related to the mechanical characteristics and metallic structure of the workpiece. Therefore, it is very important to make clear the relation between the residual stress and heat treatment processes of the material (workpiece).

* 山梨大学工学部

** 山梨県機械金属工業指導所

This paper examined the distribution form of residual stress with a main point to the tempering effects after hardening in the case of the cold work die steel, and discussed the cause for generation of residual stress being observed the cross section of the workpiece (machined by EDM) employing scanning microscope.

1. 緒 言

放電加工の際、加工表面に発生する残留応力は、放電の熱的作用による熱応力および相変態（変態応力）が主要因であるから、発生する残留応力の大きさ、分布形態は工作物の熱物理的特性、機械的特性および内部組織と密接に関係し、素材の熱処理履歴によっても大きく異なってくると考えられる。

既報¹⁾²⁾では、加工電気条件（放電電流ピーク値、エネルギー供給時間）、工作物材質（軟鋼、冷間工具鋼）およびエネルギー供給方式（単発放電、繰返し放電）などと残留応力分布の関係を報告した。

本報では、冷間工具鋼（SKD11 材）における焼入れ処理後の焼戻し温度（低温焼戻し処理、高温焼戻し処理）に主点を置き、残留応力分布の発生形態を測定するとともに、走査型電子顕微鏡を用いて加工断面の観察を行ない、残留応力の発生原因などとの関連を考察した。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験した放電加工機、X線応力測定装置およびX線測定条件は前報³⁾⁴⁾と同様である。X線応力の算出は前報で使用する装置に、演算回路によるデータ解析装置を装着し、測定値をデジタルプリンタにより出力させてデータの測定の効率化を図った。

なお、前報までの応力算出方法による結果とデータ解析装置による結果とは、同一であることを広い測定範囲にわたり確認した。

2.2 実験方法

工作物（冷間工具鋼SKD11 材）は、同一ロッドから切り出したものを、切削加工と研削加工により仕上げ（ $\phi 12 \times 45 \times 85 \text{ mm}$, $2 \mu \text{Rmax}$ ）、前加工などによって発生した応力を除去するために、応力除去焼鈍処理（真空焼鈍炉、 650°C , 2 hour）を行ない、焼入れ・低温焼戻しおよび焼入れ・高温焼戻し処理した（図1）。なお、焼入れ・焼戻し処理は、スケール発生防止のために窒素ガス雰囲気中でステンバック法により

図1 熱処理方法

行なった。

試料(工作物)への放電(加工)は、前報と同一の方法で単発放電と繰返し放電で行ない、加工した面の残留応力とともに、試料内で放電加工を行っていない面(非加工面)の応力を同時に測定(図2・a, b)し、比較検討した。

図2 応力測定点

3. 実験結果および考察

3.1 低温焼戻し処理材と高温焼戻し処理材における応力分布

3.1.1 単発放電による実験

図3(a, b, c)は各熱処理材における放電(単発)面と、非放電(加工)面(放電をとばしていない面)の残留応力分布の一例である。同一放電エネルギー条件でも、素材の熱処理の差異によって分布形態が大きく異なってくる。

放電電流ピーク値 $I_p = 68\text{A}$ 、エネルギー供給時間 $\tau = 1200\mu\text{s}$ (図3・a)では、低温(250℃)焼戻し処理材の加工表面に引張応力約 70kgf/mm^2 が作用する。これは他の熱処理材の加工面と比較して(高温焼戻し処理材で約 40kgf/mm^2 、焼鈍処理材で約 30kgf/mm^2)、極めて大きい値である。深さ方向の応力分布は、 $100\mu\text{m}$ で約 40kgf/mm^2 、 $200\mu\text{m}$ で約 23kgf/mm^2 、深さが $300\mu\text{m}$ 付近では 20kgf/mm^2 のほぼ一定値となる。この値は低温焼戻し処理材の非放電(加工)面(図3・a)における同一深さの応力値(約 20kgf/mm^2)と一致する。

また、低温焼戻し処理材の加工面の応力分布は、ある深さでいったん低下する傾向を示す。これは、図4に示すように、放電による応力分布(曲線A)と、素材に加工前から存在する焼入れ処理の際に発生した残留応力分布(曲線B)とが重畳(A+B)することに原因すると考えられる。

このように、焼入れ処理の際に発生した試料の残留応力は、放電加工による応力分布に大きく影響する。

焼入れ処理の際の残留応力は、加熱後の冷却作用によって、外表面から内部へと組織(マルテンサイ

図 3(a) 単発放電加工による応力分布(1)

図 3(b) 単発放電加工による応力分布(2)

図 3(c) 単発放電加工による応力分布(3)

図 4 残留応力の重畳

ト) 変態が進行する際の体積膨張に起因する変態応力と、深さ方向の温度差(温度勾配)による熱応力とが重畳して発生する。この場合、常温までの冷却の間に逐次分布形態を変えて最終状態での応力分布形態が形成される。

焼入れ処理によって発生した残留応力は、焼戻し処理によって当然軽減される。しかし、焼戻し温度が低い(250°C)低温焼戻し処理材は、組織変化(残留オーステナイトのマルテンサイト化)の規模が小さいこと、および焼入れの際の急冷によって発生した熱応力が焼戻し温度が低いために十分除去されず、内部に比較的大きい応力(引張応力約 20 kgf/mm²)として残留することになる。

高温(550°C)焼戻し処理材を加工したときの応力分布は、実験条件($I_p = 68A$, $\tau = 1200$, 500 , $50 \mu s$)を変えた場合も、最表面の応力値が低温焼戻し処理材の加工面に比較して小さい値となる。しかし、ある深さで比較的大きな応力のピーク値をもつ分布形態となり、応力のピーク値とその深さは、放電エネルギー(エネルギー供給時間)が小さくなるにつれて減少する。また、ピーク値は放電時間

の減少につれて(図3・a, b, c)浅い領域に移行する。

高温焼戻し処理材の深さ方向の応力分布はある深さではほぼ 0 kgf/mm^2 となり、低温焼戻し処理材の場合(引張応力約 20 kgf/mm^2)とは異なる形となる。これは、焼入れ処理(急冷)により発生した熱応力が、焼戻し温度(550°C)が高いために除去され易いことと、マルテンサイト組織がある程度分解され、トランスタイトおよびソルバイト組織に分解した結果、組織応力が除去されて内部に残留する応力が減少するためである。

ある深さに応力のピーク値をもつ形は焼鈍処理材の加工の際の応力分布にも観察され、分布状態は高温焼戻し処理材の場合と同一傾向であるが、高温焼戻し処理材より応力のピーク値は低く、ピーク値が存在する深さも小さい。

このように、加工表面近傍の応力分布形態は、おのおのの熱処理履歴によって大きく異なる。

放電(加工)によって発生する応力は、加工表面の熔融残留層(凝固・収縮)およびその深さ方向の近傍における高温度(加熱)領域が凝固・収縮する際に発生する引張応力(熱応力)と、加工表面の放電による組織変態(主にマルテンサイト変態・体積膨張)によって発生する圧縮応力(変態応力)とが重畳されたものになる。

放電終了後、放電点近傍の熔融残留層および高温度(加熱)領域では、冷却開始と同時に熱応力の発生が始まり、常温まで下降する間に変態応力と重畳しながら最終状態の分布形態になるが、結果的には組織変態による圧縮応力の影響はほとんどないことが応力の測定結果にみられる。

低温焼戻し処理材では、最表面近傍に焼入れ処理の際の圧縮応力が比較的大きく(約 12 kgf/mm^2)残留しているが、単発放電では除去量(深さ)が小さく、この残留圧縮応力の大部分が残り、放電後の収縮の際に発生する引張応力と相殺される。その結果、クラックの発生が少なくなり、クラックの発生による応力解放がなく、表面近傍での応力値の低下がほとんどみられない。

一方、高温焼戻し処理材では、表面における残留圧縮応力が比較的小さい(約 6 kgf/mm^2)ので、放電後、急冷による収縮の際の引張応力に与える影響は少なく、また、縦弾性係数(ヤング率 E)の値(約 $2.15 \times 10^4\text{ kgf/mm}^2$)が、低温焼戻し処理材(約 $2.10 \times 10^4\text{ kgf/mm}^2$)に比較して大きいので、同一条件での放電によって発生する熱応力($\sigma = E \epsilon_H$, ϵ_H ; 熱作用による材料の歪)も大きい。このことは、低温焼戻し処理材に比較してクラックの発生も多くなることを示す。クラックの発生により、表面近傍における引張応力が解放されて最表面の残留応力が低下した形となり、ある深さにピーク値をもつ応力分布形態となる。

焼鈍処理材は、焼入れ・焼戻し処理材に比較して延性が高いので、放電エネルギーが大きい条件の場合($I_p = 68\text{ A}$, $\tau = 1200, 500\mu\text{s}$)にしかクラックの発生がなく、表面近傍での応力値の低下は高温焼戻し処理材に比べて小さい。また、放電エネルギーが小さい($\tau = 50\mu\text{s}$)条件ではクラックの発生がなく、応力分布の形は低温焼戻し処理材と同一傾向になる。

また、焼鈍処理材の内部は放電加工の影響がある深さ（ $850 \sim 900 \mu\text{m}$ 程度）まで圧縮応力（ $5 \sim 10 \text{ kgf/mm}^2$ ）が存在する形となるが、これは焼入れ・焼戻し処理材に比べて弾性変形を生じ易く、表面近傍に発生する引張応力の反作用力（圧縮応力）が顕著になるためと思われる。しかし、この影響領域以上の深さでは、焼鈍処理による素材の内部残留応力（約 0 kgf/mm^2 ）の値となる。

3.1.2 繰返し放電による実験

低温焼戻し処理材および高温焼戻し処理材の繰返し放電面と非放電（加工）面の残留応力分布の一例を図5（a, b）と図6（a, b）に示す。

図5(a) 低温焼戻し処理材（繰返し放電）の応力分布(1)

図5(b) 低温焼戻し処理材（繰返し放電）の応力分布(2)

図6(a) 高温焼戻し処理材（繰返し放電）の応力分布(1)

図6(b) 高温焼戻し処理材（繰返し放電）の応力分布(2)

繰返し放電による加工面の応力分布は、前述した単発放電の分布形態と大きく異なる。

繰返し放電⁵⁾においては、多数回放電に起因する熱エネルギーの蓄積により、試料（工作物）の定常温度が単発放電の場合より高くなり、熱的作用を受ける領域も深くなる。また、放電加工面は、加工液

(灯油)の熱分解による炭化物が表面近傍に浸炭・固溶され残留オーステナイトが生成⁶⁾されるが、熱的影響が大きい繰返し放電の場合は、単発放電に比べて生成量、深さが大きく機械的強度が低下しているので、クラックが発生し易い。

したがって、同一熱処理条件、同一放電エネルギー条件でも、単発放電の場合より繰返し放電の方がクラックの発生数および発生深さが大きくなる(図7・a, b, 図8・a, b)。

図7(a) 低温焼戻し処理材(単発放電)の加工断面

図7(b) 低温焼戻し処理材(繰返し放電)の加工断面

図8(a) 高温焼戻し処理材(単発放電)の加工断面

図8(b) 高温焼戻し処理材(繰返し放電)の加工断面

また、前述のように、低温焼戻し処理材には焼入れ処理の際の残留応力が、表面近傍に圧縮応力 (12 kgf/mm^2) として存在する。したがって、除去深さが極めて小さい単発放電では、表面近傍の焼入れの際の残留圧縮応力の影響によってクラックの発生が抑制される形となってくる。しかし、繰返し放電の場合は比較的除去 (加工) 深さが大きくなるために、放電によって発生した応力が、熱処理による内部の残留引張応力 (約 20 kgf/mm^2) と重畳して応力値は極めて大きくなる。この結果、クラックの発生深さも大きくなり、生地組織にまで達する場合が多い (図9)。

図9 低温焼戻し処理材 (繰返し放電) の加工断面

前述のように高温焼戻し処理材の試料内部では、焼入れ処理の際の残留応力がほぼ除去されている (0 kgf/mm^2) ので、放電による応力と重畳されることがなく、低温焼戻し処理材の加工面の応力に比べてその値は小さくなる。また、低温焼戻し処理材の引張強さ (約 150 kgf/mm^2) および抗析力 (約 330 kgf/mm^2) は、高温焼戻し処理材の引張強さ (約 200 kgf/mm^2) および抗析力 (約 380 kgf/mm^2) と比較して小さいので、クラックの発生が一層助長されることになる。

低温焼戻し処理材の放電加工による応力分布は、クラックの発生によって高温焼戻し処理材の加工の場合に比べ表面近傍の応力の低下が著しい。この結果高温焼戻し処理材の方が見かけの応力分布は大きくなる (図5・a, b, 図6・a, b)。

図10は低温焼戻し処理材および高温焼戻し処理材の放電加工断面における硬度分布の一例である。表層部近傍の白層と内部の生地組織との間には、 $15 \sim 30 \mu\text{m}$ 程度の変色した領域 (図中太線部) が存在し、その部分の硬度が最も大きい。SEMで観察すると、この組織では炭化物の生地組織への溶解が内部に比べて進行し、微粒で密に分布しているとともに炭化物の形状も均一となっている。これ

図10 放電加工断面の硬度分布

は、放電の熱的作用によって再焼入れ層が発生したことを示すが、このことが硬度を高くする要因である。

また、繰返し放電の場合が単発放電に比べて深い領域まで高い硬度分布を示すが、硬度分布と応力分布形態とは必ずしも明確な対応はみられない。

3.2 焼戻し処理材の放電加工による応力分布の形成

放電加工の際、ある部分に最初の放電が発生し、そこに次の放電が発生すると、最初に発生した応力に次の応力が重畳される形となり、内部の残留応力が順次大きくなると解釈できるが、放電が発生するごとに母材（試料）表面はつぎつぎと除去されていくので、次第にある一定の分布形態になっていく。

図11(a)は第1発目の放電によって形成された応力分布に、第2発目の放電によって発生した応力が重畳する過程を、低温焼戻し処理材の加工における場合（ $I_p = 68\text{ A}$ ， $\tau = 1200\mu\text{s}$ ）を例に模式的に示した図である。この場合、試料内部に残留する引張応力は 20 kgf/mm^2 （実測値）とし、放電1発あたりの除去深さを $50\mu\text{m}$ （実測値）とした。

図11(a) 焼戻し処理（低温）材の応力分布の形成(1)

放電1発による応力分布を曲線A（実測値）とすると、これが残留引張応力（ 20 kgf/mm^2 ）と重畳した結果が曲線Bとなる。次に、第2発目の放電によって $50\mu\text{m}$ 除去された後の分布曲線Bと、第2発目の放電による応力分布（曲線A'）が重畳して曲線が（A' + B）となる。この結果、第2発目の放電によって、最表面では 120 kgf/mm^2 程度の引張応力が発生し、内部における分布も大きくなる。

このように多数回の放電により、つぎつぎと表面が除去され、発生した応力が重畳・形成される状態を描いたのが図11(b)である。放電回数が増加するにつれて、最表面の残留応力値は順次大きくなっていくが、放電回数が多くなるにつれて増加の度合いは小さくなり、第7～第8発目以降は一定値（引張

図 11(b) 焼戻し処理（低温）材の応力分布の形成(2)

応力約 165 kgf/mm²) に収斂する。

図 11(b)における一点鎖線は繰返し放電の際の実際の応力分布曲線を示すが、クラックが発生しない領域（太線部）における応力分布は、第 8 発目以降の応力分布曲線とよく一致する。

図 12 (a, b) は高温焼戻し処理材 ($I_p = 68 \text{ A}$, $\tau = 1200 \mu\text{s}$ の場合) の加工面の応力分布形成過

図 12(a) 焼戻し処理（高温）材の応力分布の形成(3)

図12(b) 焼戻し処理(高温)材の応力分布の形成(4)

程の模式図である。この場合も、第7～第8発目以降における最表面での応力値(約140 kgf/mm²)および応力分布形態は放電回数と関係なく一定となって、実際の応力分布(図12・bでの一点鎖線の太線部)とよく一致する。

3.3 X線応力測定値と機械的応力測定値の関係

X線回折による応力測定は、結晶内の面間隔(微視的)変化に基づくものである。一方、ストレインゲージなどを用いての機械的方法による応力測定は、結晶の変形が集積された領域における総合的(巨視的)変化を測定することになるが、両者がどの程度対応するか比較実験を行なった。

実験に用いた単純曲げ応力荷重装置を図13に示す。実験試料は軟鋼(SS41)および冷間工具鋼(SKD11)で、切削および研削仕上($t2 \times 30 \times 90$ mm, $2 \mu\text{m}$ Rmax)し、真空焼鈍(650°C, 2hour)したものである。ストレインゲージは2ヶ所に貼付し、X線応力の測定は最大曲げ(引張)応力が作用する試料の中心部で行なった。

図14は試料に単純曲げ応力を負荷し、最表面における応力値をストレインゲージにより測定した結果と、X線により測定した結果の関係である。

ストレインゲージでの応力値 σ_M と、X線による応力値 σ_X とは、SS41材で $\sigma_X = 0.94 \sigma_M - 0.70$ 、SKD11材で $\sigma_X = 0.86 \sigma_M + 1.15$ となりよく対応する結果となる。

この場合の応力負荷は弾性領域であるが、前述のようにX線応力測定法は結晶の面間隔変化に基づく

図13 単純曲げ応力負荷装置および測定方法

ものであるから、塑性領域においても弾性領域と同等に扱うことが可能である。

また、本報では深さ方向の応力分布の測定は、電解研磨により、試料の外層を逐次除去し測定する方法を採ったが、外層部の除去に伴って、内部（深さ方向）の応力状態がどのような影響を受けるかを確認しておくことが重要となる。

計算に用いた試料形状は応力測定に用いたものと同一寸法（ $t 12 \times 45 \times 45 \text{ mm}$ ）で、中央部に $30 \times 30 \text{ mm}$ の放電加工を行なったものとした。放電加工面の深さ方向の応力分布形状は実際の応力分布に近似させて放物線とし、表面からの深さ x の関数（ $\sigma(x) = k(x-a)^2$, $0 < k, a$, $0 < x < a$ ）とすると（図15）、外表部での放電によって発生した引張応力は、試料への曲げモーメントとして作用する。

いま、電解研磨により深さ x まで除去した場合、除去された深さ領域の応力に相当する曲げモーメント $M(x)$ が、試料（厚さ； $T-x$ ）にそのまま作用すると考えると、厚さ（ $T-x$ ）に作用する曲げモーメント $M(x)$ は、

$$M(x) = \int_0^x k(x-a)^2 w dx \cdot \left\{ \frac{1}{2} (T-x) \right\} \quad (1)$$

w : 放電面の幅 T : 試料の最初の厚さ

次に、曲げモーメント $M(x)$ によって、厚さ $T-x$ の最表面に作用する応力は

$$\sigma(x) = \frac{M(x)}{I} y = \frac{M(x)}{z} \quad (2)$$

図14 ストレインゲージ応力値（ σ_M ）とX線応力値（ σ_X ）との比較

図15 電解研磨による表面からの除去

I ; 断面二次モーメント y ; 断面の中立軸から外表までの距離 z ; 断面係数

ここで

$$z = \frac{1}{6} b (T - x)^2 \quad b ; \text{試料の幅}$$

であるから、(2)式に代入して

$$\sigma(x) = \frac{6 M(x)}{b (T - x)^2} \quad (3)$$

の関係が成立する。

一例として、放電によって発生した応力の作用深さ $a = 1000 \mu\text{m}$ (1mm)、最表面の引張応力値 60 kgf/mm^2 の場合に、深さ $x = 100 \mu\text{m}$ (0.1mm)まで除去されたと仮定し、除去後の最表面に影響する応力値を計算すると、約 1.4 kgf/mm^2 (圧縮応力)となる。すなわち約 1.4 kgf/mm^2 だけ実際の場合より応力値が小さくなる。この数値は応力の実測値からすると小さく、影響は少ない。

これは、放電による応力作用域深さ a が、試料の板厚 T に比較して極めて小さく、試料の幅 w が放電加工面の幅 b に比較して大きいことに原因がある。

また、本実験における低温焼戻し処理材および高温焼戻し処理材での放電加工による応力分布深さは、電気エネルギー条件が大きい場合 ($I_p = 68 \text{ A}$, $\tau = 1200 \mu\text{s}$)でも $300 \sim 400 \mu\text{m}$ であり、この仮定による応力作用深さ ($1000 \mu\text{m}$) よりも小さいのでさらに影響は少なくなる。加工面の表面近傍は塑性変形領域であるから、その部分の電解研磨による除去では応力弛緩はほとんど無視してよく、残った部分への影響は小さいと考えられる。

前述のように、低温・高温焼戻し処理材の内部には焼入れ処理の際発生した応力の一部が引張応力 (約 20 kgf/mm^2 , 但し高温焼戻し処理材および焼鈍材の場合は約 0 kgf/mm^2) として残留している。いま、電解研磨による応力の解放があるとするならば、熱処理によつての残留した応力値に当然変化が生じるはずである。しかし、ある深さで残留応力値は一定の値を示す。このことは実験結果測定のうちからも電解研磨による応力解放はほとんどないことを示していることになる。

4. 結 言

- 1) 放電加工によって発生する応力は、主に引張応力であることから、放電の熱的作用が主要因であり、相変態による変態応力の影響は少ない。
- 2) 放電加工面の応力分布形態は、工作物素材の熱処理履歴によって大きく異なり、熱処理による残留応力、機械的特性、組織変化の影響を受ける。
- 3) 残留応力の分布形態は、加工表面近傍の応力発生に伴う亀裂発生の影響を大きく受ける。
- 4) 放電加工の際の応力分布は、定性的には単発放電によって発生する応力が重畳され形成されるが、ある放電回数を越えると一定値に収斂した形となる。

- 5) X線回折による応力測定値(σ_X)とストレーンゲージによる応力測定値(σ_M)とはSS41材において $\sigma_X = 0.94 \sigma_M - 0.70$, SKD11材で $\sigma_X = 0.86 \sigma_M + 1.15$ の関係となりよく対応する。
- 6) 深さ方向の応力測定のための電解研摩手段は, 放電加工による応力値に影響を与えないことが, 理論的, 実験的に明確である。

謝 辞

試料の熱処理に関連する事項につき, 貴重なご助言を頂きました株式会社サーマルの松本伸氏, 山田恒夫氏に厚く御礼申し上げます。

(1982. 11. 20 受付)

文 献

- 1) 向山, 緒方, 日原: 放電加工における応力分布に関する研究(第2報) — エネルギー供給時間・放電電流ピーク値と応力分布の関係 —, 電気加工学会誌 Vol. 13, № 26
- 2) 向山, 緒方, 日原: 放電加工における応力分布に関する研究(第3報) — 単発放電, 繰返し放電および熱処理効果と応力分布の関係 —, 電気加工学会誌 Vol. 15, № 29
- 3) 1) に同じ
- 4) 2) に同じ
- 5) 1) に同じ
- 6) 2) に同じ