放電加工面の機械的性質に及ぼす影響^{*}

— 超硬合金の疲れ強さについて —

筒井 忠 夫^{**}

田 村 武 夫^{**}

Effect of the Electro-Discharge Machined Surface on the Mechanical Properties

— On the fatigue strength of cemented carbide —

Tadao TSUTSUI and Takeo TAMURA

Abstract

The surface defects generated by EDM of cemented carbide give a harmful influence to prolongation of die life. The effect of surface defects on the transverse rupture strength was studied already. Evaluating the material strength, the fatigue strength is also important. In this paper, the relation is investigated between the fatigue strength of cemented carbide and the machining condition of EDM. Moreover, the fatigue life distribution is obtained from the statistical analysis. The results are as follows :

- (1) Cemented carbide machined by EDM clearly shows a fatigue behaviour and has a fatigue limit. It indicates a considerable decrease of fatigue limit comparing with that of the ground specimen.
- (2) The fatigue limit is shown by a curve with both minimum and maximum value as the pulse duration increases.
- (3) The fatigue life scatters largely and its distribution can be explained by Weibull's equation.

* 昭和61年度精密工学会春季大会学術講演会にて発表

** 新潟大学工学部

1. 緒 言

超硬合金は耐摩耗性や高温強度に優れていることなどの利点を生かした高性能金型材として、その用途は今後、ますます拡大する傾向にある。その際、金型への加工には型彫り放電加工やワイヤカット放電加工への比重が高くなっている。

しかしながら超硬合金を放電加工した場合に発生するクラックなどの変質層は金型の長寿命化に有害な影響を与える。前報¹⁾において、超硬合金を放電加工した場合に発生する表面欠陥と抗折力との関係を調べた。その結果、抗折力は大きく低下し、特に加工速度が最大となる領域でその傾向が著しいことなどが分った。ところで放電加工面の強度を評価する場合、疲労強度も重要な問題である。金型の繰返し使用による早期破損の原因は劣化した疲労強度に因るところが大きいと考える。しかし超硬合金の疲労特性を調べる際、試験方法に難点があり、疲労挙動を含め不明な点が多い。

そこで本研究では新たに疲労試験機を試作し、加工条件と疲労強度との関係を調べる。また疲労寿命のばらつきに対してワイブル分布を適用し、統計的法則を見い出す。さらにレプリカ法による連続観察により疲労破壊のメカニズムを調べ、表面欠陥の疲労破壊に果す役割を解明し、種々の検討を加えた。

2. 実験方法

2.1 疲労試験片

実験に用いた試料は耐摩耗・耐衝撃用工具として市販されている超硬合金D20(JIS V種)でその機械的性質を表1に示す。抗折力、疲労限度はそれぞれ研削試験片の強度を示す。図1に疲労試験片の形状、寸法を示す。板厚を2.5 mmとし、放電加工は斜線部に行う。

表1 試料の機械的性質

材 料	硬 さ	抗 折 力	疲労限度
	HRA	MPa	MPa
D 20	90	2200	900

2.2 試験片の放電加工

図2に疲労試験片の放電加工を示す。異常アーク痕や遊離炭素の付着による縞模様のない均一な加工

図1 疲労試験片の形状・寸法

図2 試験片の放電加工

面を得るために、穴あき電極を用いて加工する。両側の噴流孔から高い液圧(1~1.5 kgf/cm²)を掛けることにより均一な加工面が得られる。また逃げの部分の曲率半径を50mmとし、未放電加工面との境

界に働く応力集中を避ける。放電加工は片面に行う。表2に加工条件を示す。電極には銅を用い、正極性でピーク電流とパルス幅とを変化させて疲労試験を行う。なお衝撃係数は0.5とする。

表2 加工条件

被加工物	D20 (90%WC, 7%Co, 3%TiC, TaC)
電極	Cu
加工液	白灯油
極性	正極性
ピーク電流	$I_p = 3.3, 6.6 \text{ A}$
パルス幅	$\tau = 3, 10, 20, 40, 80, 500 \mu\text{s}$

2.3 疲労試験

試作した疲労試験機の機構を図3に示す。荷重台⑦にある偏心重錘⑧はプーリー⑩、タイミングベルト⑪を介して回転され、その遠心力を利用して試験片①に繰返し荷重を与える。繰返し荷重は偏心重錘のねじ部を回転させることにより負荷を変え、その大きさをリニアスケールと表示カウンタにより指示する。板ばね⑤を用いて、荷重台に発生する遠心力のうち、水平方向分力を吸収する。試験片は相対するアーム③に取付けられたつかみに固定する。アームの外端および内端はリンク②を介してテーブル④および荷重台に連結される。したがって試験片に2点支持、2点荷重の均一曲げモーメントが作用する。ところで超硬合金は縦弾性係数が鋼の約3倍と大きく、締付け時に、試験片の狂いによる大きな初期応力が発生する。そこで試験片

にひずみゲージを張り、初期応力を検出し無視できる値に調整した後、試験を行う。破断の検出は試験片に張付けたエナメル線（直径0.1mm）の破断により、リレーを作動させて行い、同時に繰返し数を測定する。なお疲労限度は基準寿命を 10^7 回とし、応力振幅20MPaきざみで決定した。

さらに表面欠陥の疲労挙動に与える影響を調べるために放電加工面の疲労破壊過程を連続的に観察する。ここでは応力繰返しの途中で時々、試験機を止め、試験片の危険断面に加工した微小なクレータ群からレプリカを採取し、その変化を金属顕微鏡で観察した。

1; Test-piece, 2; Link, 3; Load arm, 4; Table, 5; Leaf spring, 6; Vibration insulating spring, 7; Load stand, 8; Eccentric weight, 9; Linear gage, 10; Timing belt pulley, 11; Timing belt, 12; Motor, 13; Average load spring

図3 疲労試験機の機構

3. 実験結果と考察

3.1 加工条件と表面欠陥

放電加工面の疲労挙動を解明する上で加工条件の設定が問題となる。超硬合金を加工する場合、パルス幅約 $80\ \mu\text{s}$ 以上では加工速度が大きく低下し実用上適さない。したがって表2に示すように $\tau = 80\ \mu\text{s}$ 以下の条件で主に疲労強度と加工条件との関係を明らかにする。前報¹⁾において加工条件と表面欠陥との定量的な評価も含めて詳述した。ここでは疲労試験の結果を説明する際に必要な表面状態について

再度、簡単に記述する。実験を行った加工範囲では加工面を大きく三つに分類できる。図4にそのSEM写真を示す。実験を行ったすべての加工条件で微小クラックが形成される。第一に、 $\tau = 10\ \mu\text{s}$ 以下のランダムな分布形態を示す微小穴主体の面(a)、第二に $\tau = 80\ \mu\text{s}$ 以上で示されるクラックが閉曲線を形成し、クレータ内部に微小穴の少ない面(c)、第三に網目状のクラックと微小穴が混在する面(b)に分類できる。クラックはパルス幅の増大に伴って深くなる傾向を示し、ピーク電流によって異なるが、 $\tau = 10\ \mu\text{s}$ 以下ではクラック深さは $10\ \mu\text{m}$ 未満となる。一方、微小穴は $\tau = 10 \sim 20\ \mu\text{s}$ 付近で最大密度を示し、 $\tau = 80\ \mu\text{s}$ 以上では非常に少ない¹⁾。

3.2 S-N曲線

図5にピーク電流 $3.3\ \text{A}$ でパルス幅を変化させた場合のS-N曲線を示す。その結果、放電加工された超硬合金は明らかに疲労挙動を示し、疲労限度が

図4 加工面のSEM写真

図5 S-N曲線 ($I_p = 3.3\ \text{A}$)

存在する。いずれも放電加工を行うことによって、疲労限度は研削試験片の900MPaに比べて50～65%も大きく低下する。ここで大きな特徴はパルス幅の減少に伴って、逆に疲れ強さが低下する現象である。クレータ境界にクラックによる網目状の閉曲線を形成する $\tau=80\mu\text{s}$ では破壊はクラックから進行する。しかしクレータ内を覆う溶融再凝固層によって微小穴密度が大きく減少することによる修復効果とクラックの網目構造(クラックが閉曲線を形成する構造は応力集中を緩和し疲労被害を分散させると考える。)によって疲労強度が大きくなると考える。一方、クラックと微小穴から成る $\tau=3, 20\mu\text{s}$ では $\tau=80\mu\text{s}$ よりも25%疲労限度は低下し、両者の違いは小さい。これらの条件では主に微小穴から疲労クラックが進展し、材料を早期に破壊させる。特に微小クラックを伴う微小穴は疲労被害を受けやすい。

図6にピーク電流6.6Aの $S-N$ 曲線を示す。明らかに $\tau=20, 3, 80\mu\text{s}$ の順に疲れ強さが上昇する。特に時間強度において、その傾向が顕著である。 $I_p=3.3\text{A}$ の場合同様にクラック型の $\tau=80\mu\text{s}$ の疲労限度は大きい。ここで注目すべきことは、各パルス幅共に疲労限度より応力振幅 $\sigma=100\text{MPa}$ 程度の応力差で、繰返し数 10^4 に満たない早期に材料は破断する。このように小さな応力差が材

料の疲労寿命の長短を左右させる。この特性は材料のぜい性に強く依存しているものと考え。ところで先程の $I_p=3.3\text{A}$ の場合も含めて、時間強度においてはその疲労寿命は大きく変動する。しかし疲労限度はその信頼性が高い。疲労限度に近い応力で試験した場合、各条件共に疲労限度以下の応力では全く破壊せず、それ以上の応力では遅かれ早かれ破壊に至る。したがって放電加工面の強度を評価する場合、抗折力ではばらつきが大きく統計的な考え方の導入が必要であるのに対し、疲労限度はばらつきが小さく、ぜい性材料の強度を適切に評価する有効な基準である。

以上の $S-N$ 線図からパルス幅と疲労限度との関係を図7に示す。放電加工を行うことによって疲労限度はいずれも研削試験片の900MPaと比較して50～70%と大きく低下する。次に両ピーク電流共にパルス幅に対して、極小値と極大値をもつ曲線的な変化を示す。この傾向は抗折力の結果と一致する。極小値をもつ $\tau=10\sim20\mu\text{s}$ は加

図6 $S-N$ 曲線 ($I_p=6.6\text{A}$)

図7 パルス幅と疲労限度との関係

工速度が最大となる領域と一致する（図13）。この条件では図4に示すように加工面にランダムに形成される微小穴の密度が増加する。SEMによる観察の結果、微小穴から放電クラックが伸びている場合も多く、この放電クラックが疲労過程において疲労クラックとなり進展し、疲れ強さを低下させる。さらに有限要素法による解析の結果²⁾、微小穴を半円と仮定した二次元応力状態では応力集中係数は約3となり、微小穴は疲労被害を受けやすい。したがって微小穴の応力集中も疲れ強さを低下させる一因である。実験を行った加工範囲内ではパルス幅 $80\mu\text{s}$ で疲労限度が最も高い。この条件では1パルス当たりのエネルギーが大きいのにに対し、加工速度が大きく減少することにより（図13）熔融再凝固層が増大する。したがって加工時に形成された微小穴が熔融再凝固層に覆われ著しく減少する。このように微小穴の減少に伴う表面損傷度の低減は疲れ強さを向上させる主要因である。次に $\tau=80\mu\text{s}$ を越える条件では疲労限度は低下する。この加工範囲内では熔融再凝固層による修復効果よりもクラック深さの増大の影響が強くなり疲労限度が低下する。 $I_p=3.3\text{A}$ と $I_p=6.6\text{A}$ を比較すると明らかに 3.3A の方が疲労限度は大きく、その差は平均12%である。

3.3 疲労限度と抗折力との関係

放電加工面の強度を疲労限度で評価する場合、数多くの試験片と時間を必要とする。鉄鋼材料では耐久比（疲労限度を引張強さで除した値）を用いて疲労限度をほぼ推定できる。そこで放電加工面の疲労限度を抗折力で決定できないものか検討を加えた。

図8に疲労限度と抗折力との関係を示す。ここで抗折力の値は最大8点のデータの平均を示す。このように疲労限度と抗折力との間に強い相関はない。したがって抗折力の結果から疲労限度を的確に決定することはできない。この原因は抗折力がワイブル分布をし、大きなばらつきを示すことが大きな要因であると考えられる。しかしながら大略の目安として疲労限度は抗折力の40～50%の値と³⁾考えて良い。この値は鉄鋼材料の耐久比と類似する。ところで破損が大きな問題となる金型設計では疲労限度による評価が有効かつ安全であると考えられる。

3.4 疲労寿命のばらつき

放電加工された超硬合金を疲労試験した場合、一定の繰返し荷重を与えても破壊に至る繰返し数は大きく変動する。そこで疲労寿命を統計的に調べ、ばらつきについて考察する。ここで寿命の分布モデルとして次に示す二母数ワイブル分布を適用する。⁴⁾

図8 抗折力と疲労限度との関係

$$F(N) = 1 - \exp \{ -(N/N_c)^m \}$$

N : 繰返し数

m : ワイブル指数

N_c : 特性寿命 ($p=63.2\%$ に対応する寿命)

この破壊確率式に基づき図9にワイブル確率紙上に累積破壊確率と繰返し数との関係を示す。

メジアン, 5%および95%ランクを示す。はじめに $I_p = 3.3\text{ A}$ の寿命試験の結果を示す。明らかに両パルス幅共に疲労寿命は大きくばらつく。たとえば $\tau = 20\ \mu\text{s}$ の場合を例に示すと, 一定の応力を加えても寿命は $N = 3 \times 10^3 \sim 8 \times 10^4$ と大きく変動する。 $\tau = 20, 80\ \mu\text{s}$ 共に両量間にほぼ直線関係が得られた。S適合度検定の結果から疲労寿命はワイブル分布に従うという仮説は採択される。次に両パルス幅の疲労寿命を比較すると明らかにクラックが網目状の閉

曲線を形成する $\tau = 80\ \mu\text{s}$ の方が寿命が長い。特性寿命を比較した場合, 表3より $\tau = 20\ \mu\text{s}$ では $N = 2.01 \times 10^4$ であるのに対して $\tau = 80\ \mu\text{s}$ では $N = 1.45 \times 10^5$ と長い。このようにクラックと微小穴の共存する加工面では疲労限度以上の応力で早期に破壊する傾向が強い。

同じく $I_p = 6.6\text{ A}$ の結果を図10に示す。3.3 A の場合同様に両パルス幅共に疲労寿命は大きくばらつく。また破壊確率と繰返し数との間に線形関係が得られる。このように寿命試験の結果から, 放電加工された超硬合金の疲労寿命はワイブル分布を適用できる。次に疲労寿命を比較すると $\tau = 20, 3, 80\ \mu\text{s}$ の順に寿命が長い。($\tau = 20\ \mu\text{s}$ では応力 390 MPa を負荷した場合, $N < 10^3$ で早期破壊に至る。) 以上の寿命試験の結果は図5, 6のS-N曲線の信頼性を与える。

次にばらつきの指標となるワイブル指数を表

3に示す。ワイブル指数 m は一部の条件を除いて, $m = 0.9 \sim 1.0$ とほぼ同じ値が得られた。このように

図9 ワイブル分布による疲労寿命 ($I_p = 3.3\text{ A}$)

図10 ワイブル分布による疲労寿命 ($I_p = 6.6\text{ A}$)

表3 ワイブル指数

ピーク電流	パルス幅	応力	特性寿命	ワイブル指数
A	μs	MPa		
3.3	20	500	2.01×10^4	0.97
3.3	80	500	1.45×10^5	0.99
6.6	3	390	2.01×10^4	0.89
6.6	80	390	2.27×10^5	1.38
6.6	3	350	2.11×10^5	0.72
6.6	20	350	5.23×10^4	0.95

ワイブル指数は小さく、疲労寿命は広範囲にばらつくことが明らかである。またクラック型の加工面傷ばらつきは小さく、微小穴主体の加工面はばらつきの度合いが大きい。

3.5 表面欠陥と疲労破壊のメカニズム

S-N試験および寿命試験の結果から、放電加工された超硬合金の疲労強度が大きく低下することが分った。そのためクラック、微小穴などの表面欠陥が疲労破壊にどのような役割を果たすのか重要な問題である。ここではレプリカ法による連続観察によりその解明を試みる。図1に示した試験片の中央部に直径約1mmの微小放電痕を加工する。放電痕以外の領域は鏡面状態に仕上げ、微小な変化も逃さず観察する。疲労試験では疲労破壊過程の進展挙動が十分に把握できる応力振幅を選択する。以後、応力の繰返し途中、所定の繰返し数ごとにレプリカを採取し表面変化を観察する。図11に微小放電痕の全体像を示す。この写真は疲労寿命 N/N_f (N_f :試験片の破断寿命) = 0.93の結果を示す。A地点から疲労クラックが進展し、破壊に至った。

しかしこの図では微小放電痕からの微視的な破壊過程は分らない。そこでA地点の変化を詳細に調べた結果を図12に示す。加工条件ピーク電流6.6A、パルス幅20 μs の加工面はクラックと微小穴の共存型である。(a)に示す繰返し数 $N=0$ すなわち初期状態では黒く円形に見える微小穴がランダムに分布している。微小穴の直径は5 μm 未満が多い。またB地点にはクラックと微小穴から成る網目模様の一部が存在する。この初期状態の加工面が疲労被害を受け、(b)に示す $N=2.0 \times 10^4$ すなわち $N/N_f=0.13$ という早期段階において、二ヶ所から疲労クラックの発生、進展が見られる。A地点の微小穴群から疲労クラックが進展し外部へ伸びている。またB地点からもクラックが進展しA地点と合流している。A地点付近では疲労クラックは最大せん断応力方向へ微小穴を縫うように進展する。その後、この

図11 微小放電痕

一部が存在する。この初期状態の加工面が疲労被害を受け、(b)に示す $N=2.0 \times 10^4$ すなわち $N/N_f=0.13$ という早期段階において、二ヶ所から疲労クラックの発生、進展が見られる。A地点の微小穴群から疲労クラックが進展し外部へ伸びている。またB地点からもクラックが進展しA地点と合流している。A地点付近では疲労クラックは最大せん断応力方向へ微小穴を縫うように進展する。その後、この

図 12 疲労過程における表面状態の変化

疲労クラックは安定に成長し、材料を破断させる。このように微小穴は疲労破壊の起点となる。したがって微小穴密度が高い程、微小穴を結ぶ疲労クラックの進展は早くなり、材料を早期に破壊させると考える。図 7 に示すように、パルス幅 $10 \sim 20 \mu s$ で疲労限度が極小値をもつ原因は微小穴の増加に伴う表面損傷度の増大に因る。

3.6 適正加工条件

金型に放電加工を適応する場合、耐久性、加工能率および加工精度が要求される。ここで耐久性を評価する基準として疲労限度、加工能率を加工速度、さらに加工精度を加工面あらさに置き換えて適正な加工条件を検討する。その結果を図 13 に示す。加工速度は $\tau = 50 \mu s$ 以上では急激に低下する。次に疲労限度は $\tau = 20 \mu s$ 以下では $\tau = 80 \mu s$ に比較して約 30 % も劣化する。加工面あらさは $\tau = 40 \mu s$ 以上では $5 \mu m R_{max}$ を越える。このように三要素共にすべて良いという最適な条件は存在しない。使用目的に応じて耐久性、加工能率および加工精度のどれを重視するかによって

図 13 適正な加工条件の選定

加工条件を選ぶことが必要である。しかしピーク電流 3.3 A の場合、 $\tau = 40 \mu\text{s}$ に選定すると加工速度は大きく、また疲労限度も大きく上昇し、さらに加工面あらさも $6 \mu\text{m } R_{\text{max}}$ とほぼ三要素共に満足できる加工条件である。この適正なパルス幅はピーク電流の増大に伴って、低パルス幅へと移行する傾向がある。

最後に劣化した疲労強度の改善方法および表面欠陥と疲労破壊のメカニズムの詳細については次報にて報告する。

4. 結 論

超硬合金を放電加工した場合に発生するクラックおよび微小穴を含む表面欠陥と疲労強度との関係を、加工条件を変化させて調べた結果、次の結論が得られた。

- (1) 放電加工された超硬合金は明らかに疲労挙動を示し、疲労限度が存在する。疲労限度は研削試験片の 900 MPa と比較して 50～70 % と大きく強度が低下する。
- (2) 疲労限度も抗折力の場合と同様に、パルス幅に対して極小値と極大値をもつ曲線的な変化をする。極小値をもつ $\tau = 10 \sim 20 \mu\text{s}$ は加工速度が最大となる領域と一致する。
- (3) 疲労寿命は時間強度において大きくばらつき、その分布にワイブル分布を適用できる。
- (4) クラックおよび微小穴は疲労破壊の起点となり、放電加工された材料を早期に破壊させる。

参 考 文 献

- 1) 筒井忠夫, 田村武夫: 放電加工面の機械的性質に及ぼす影響 - 超硬合金の表面欠陥と抗折力について -, 電気加工学会誌, 19 巻, 38 号 (1986) 33.
- 2) Zienkiewicz, O.C., (吉識訳): マトリックス有限要素法, (昭 45 年), 44, 培風館.
- 3) 横堀武夫: 材料強度学, (昭 51 年), 152, 技報堂出版.
- 4) 日本機械学会編: 統計的疲労試験方法, (昭 56 年), 20.

(1986. 9. 10 受付)