ワイヤ放電加工面の硬さ変化

増井 清 徳** 曽 根 匠** 出 水 敬**

The Microhardness on Wire-EDM'd Surface

Kiyonori Masui, Takumi Sone and Kei Demizu

Thermal erosion process in wire-EDM influences metallurgical integrity on its machined surface, especially the change of microhardness may cause abnormal wear and/or micro-chipping of the EDM'd tools. This paper describes the behaviour of the microhardness in machining steels. The results obtained are summarized as follows: (1) Machining under de-ionized water makes surfaces hardened to an annealed steel, but re-softened to a quenched & tempered steel by a formation of the austenite. (2) Machining under the oil, both an annealed and a quenched & tempered steels are re-hardened by a increased carbon content from the dielectric fluid. (3) The discharge energy influences the hardness variations, the microhardness neighbouring to the machined surface are effected by each dielectric fluid, but not by the heat treatment conditions of the workpieces.

Key words : wire-EDM, surface integrity, microhardness, dielectric fluid, de-ionized water, heat treatment

1. 緒 言

ワイヤ放電加工における加工表面の性状は、それによって製作される製品の性能を左右する。なかでも、プレス金型では、加工面の硬さ変化は切れ刃部分の異常摩耗やチッピングなどの原因になりやすく、型寿命に大きく影響を及ぼすと考えられている¹⁾。

ワイヤ放電加工面の性状については、すでにいくつか報告されているが、それらは加工液にイオン交換水を使用したものであり^{2)~4)}、著者らの知るかぎりでは、水以外の加工液として絶縁油を用いて、前熱処理条件や放電エネルギーと硬さ変化の関係を示す系統的な研究はほとんどなされていない。

そこで本研究では、水中および油中のワイヤ放電加工を行い、おのおの加工液における硬さ変化の挙動を明確化するとともに、硬さ変化に及ぼす前熱処理や放電エネルギーの影響についての検討を行った。

2. 実 験 方 法

2.1 工作物と前熱処理

工作物は、通常、冷間プレス金型に多用される合金

Table 1 Chemical compositions of SKD11
unit : wt %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
1.51	0.32	0.42	0.025	0.008	11.3	0.84	0.22

Table 2 Heat treatment conditions

Quenching	Tempering	Hardness (HRC)
1030 °C - 80 min (Gas cooling)	530 °C - 90 min (Air cooling) 520 °C - 90 min (Air cooling)	58.8 - 59.1

工具鋼 (SKD11) で、市販のままの焼なまし材と、それに熱処理を施した焼入焼戻し材である。表1はSKD11の化学組成、表2はその熱処理条件を示す。

2.2 加工回路と実験条件

ワイヤ放電加工は、表3に示す実験条件にしたがい荒加工から中仕上げおよび仕上げ加工に至る3段階の加工領域について行った。図1は、本実験に使用した加工回路の概略を示す。放電エネルギーの影響を広範囲に検討するために、供給されるエネルギーが比較的高い荒加工には、トランジスタの充電方式によるCR回路を用い、また、加工面の改善を目的とした仕上げ

* 原稿受付 平成元年12月25日。昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会 (昭和63年3月17日) にて発表

** 正会員 大阪府立産業技術総合研究所 (大阪市西区江の子島 2-1-53)

Table 3 Experimental conditions

Wire-EDM machine	AGIE DEM15/15LD			
No load voltage	200 V (constant)			
Polarity	Workpiece (+) , Wire (-)			
Table feed rate	1 mm/min (constant)			
Wire material	Brass. (diameter : 0.2 mm)			
tension, speed	800 gf, 35 mm/sec			
Dielectric fluid	De-ionized water (conductivity : 2 μS/cm)			
	Oil (kerosene)			
Workpiece	Alloy tool steel (SKD11, thickness : 16 mm)			
Machine settings		Roughing	Semi-finish	Finishing
Generator circuit		Relaxation	Rectangular	Rectangular
Discharge capacitor C	nF	350	—	—
Circuit resistor R	Ω	20	20	100
Peak pulse current i _e	A	70	10	2
Pulse duration t _i	μs	2.5	1.5	1.5
Pulse cycle time t _p	μs	-	3.5	4.5
Pulse energy W _e	mJ	3.57	0.29	0.05
Wire offset in water	μm	0	80	110
in oil	μm	0	80	140
Surface roughness at R _{max}				
cutting in water	μm	13	6	2
cutting in oil	μm	21	10	2

Fig. 1 Circuit diagram of wire-EDM

加工には、破線内部のコンデンサを取り外し、方形波回路に切り替えた。なお、図中のコンデンサに並列接続されたダイオードDは、電流波形の振動を抑え単極化するためのもので、すべての加工は、工作物を陽極、ワイヤ電極を陰極とする正極性接続である。

おのおの加工領域における一発当たりの放電エネルギー W_e の計算は、オシロスコープで観測された加工間隙の電圧 $u(t)$ ・電流 $i(t)$ 波形をもとに、次式の時間積分値から求めた。

$$W_e = \int_0^t u(t) \cdot i(t) dt \quad (\text{J})$$

図2は、中仕上げ加工時の加工間隙における、電圧、電流および電力波形の一例で、この場合の放電エネルギーは、 $W_e = 0.29 \text{ mJ}$ である。

硬さ変化の時間的な挙動は、図3 (a) のスリット加

Fig. 2 Example of the wave forms in the gap with a discharge energy of 0.29 mJ

Fig. 3 Cutting path configuration

工で調べた。また、放電エネルギーの低い中仕上げ加工以降は、同図 (b) に示す側面加工によった。なお、加工液には、イオン交換水と白灯油をそれぞれ用いた。水中加工では、電解腐食の影響⁵⁾を極力抑えるために、イオン交換水の電導度を $2 \mu\text{S}/\text{cm}$ に設定した。

加工後の試料は、加工表面や断面組織の顕微鏡観察と硬さ測定、さらに、E PMA 分析およびX線回折による加工面の構造解析を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 硬さ変化の挙動 (焼入焼戻し材の加工)

ワイヤ放電加工では、ワイヤ電極に対し、加工の進行方向である前面部と、すでに加工が終了した側面部とでは、硬さ変化に及ぼす熱的な影響も異なると考えられる。そこで図4のように、スリット加工の途中で、故意に電源を切り離し、加工面の状況と硬さ変化の時間的な挙動を調べた。なお、加工は、より正確な表面

解析結果を得るために、加工変質層が比較的厚く形成される荒加工条件によった。

まず、SEM写真では、水中も油中も加工の前面と側面では、その表面状態に大きな違いが見られる。放電が頻繁に繰り返されている加工前面部は、双方ともに滑らかな溶融物で、一様に覆われている。しかし、側面部では、さらに、塊状の凝固物が無数に堆積し、最終的な加工表面を形成している。

また、図の断面組織で比較すると、油中加工の側面部では、水中よりも大規模で、丸みをおびた凝固物が複雑に重なっていることがわかる。

同図には、それぞれの断面組織における加工の前面部 (a) と、側面部 (b) での硬さ分布の比較も示す。これらの分布状態は、白色組織を呈する溶融再凝固層と素地との境界を基準に測定した。

加工前面部の硬さ分布は、加工液の区別なく図のように、ほぼ同様の傾向を示し、硬さは母材より低下する。しかし、側面部では、加工液の違いによる影響が顕著に現れ、さらに硬さが低下する水中加工に対し、油中加工の硬さは、最表面部では、逆に母材より高くなり、それに続く内部組織では部分的に低くなる二段階的な変化を示す。

このように同一の放電エネルギーで加工されたにもかかわらず、水中と油中で、加工面の硬さに対象的な差異が現れたのは、それぞれの加工液中における加工間隙の大きさや、放電で生じた溶融再凝固層の性状によるものと思われる。

図5は、以上の硬さ変化の違いをさらに明確化するために、焼入焼戻し材に側面加工を行った場合の加工面のSEM、および断面組織写真を示す。水中加工では、無数に微小な孔をともしない、比較的滑らかな加工面を呈するが、図4と同様に油中では、やや丸みをおびた凝固物が塊状に重なり、マイクロクラックも存在する。これは、それぞれの加工液の粘性や冷却速度の違いが、放電で生成された溶融物の凝固形態に影響したものと考えられる。

Fig. 4 Microscopic views of the cutting gap and variation process of the microhardness

一方、断面組織でも、溶融再凝固層にその差異が見られる。油中では加工時の溶融物が幾重にも堆積したために、再凝固層としては厚く観察される。また、水中、油中いずれの場合も、再凝固層直下の内部組織には大きな違いは認められず、硬さ測定時の圧痕もほぼ同程度の大きさを示す。しかし、油中の最表面に存在する凝固物は、スプー硬さで HK900 を越す場合もある。通常、油中加工における加工硬化層は、主にこうして形成された凝固物であると考えられる。

おのおの加工断面における硬さは、放電の熱作用で溶融した金属が飛散し、加工液中を経て他の場所で付着しながら凝固した部分、そのまま同じ場所で再凝固した部分、さらには、直接溶融には至らなかったものの、高い熱影響を受けた部分ではそれぞれ異なる。しかし、本実験条件のように比較的放電の持続時間が短く、急峻なパルス波形を用いたワイヤ放電加工では、すでに、形彫り放電加工で指摘されている焼入れ層や

Fig. 5 SEM photographs and microstructures of the machined surface with side-cutting

Fig. 6 EPMA analysis on the machined surface in cross section

焼戻し層としての素地の組織変化⁶⁾は、明瞭には観察されなかった。

図6は、EPMAによる加工断面の分析結果を示す。双方の組成像は、加工面の熔融再凝固層を中心に拡大したもので、写真中の白線に沿って線分析を行った。水中加工の再凝固層におけるFe、Cr、Cの強度は、母材内部の状況とほとんど変わらず、硬さ低下につながる脱炭現象は確認されなかった³⁾。しかし、油中加工では、比較的強度の強いCが認められた。これはす

Fig. 7 Cross-sectional microstructures of the machined surface for annealed steel

Fig. 8 X-ray diffraction patterns obtained from machined surface

で指摘されている放電による加工液の熱分解に基づくCの浸入^{6)~8)}と考えられ、図4の表面硬化層の厚みによく対応している。なお、油中加工の母材部で検出されるCrとCのピークは、元来工作物自体に含有される炭化物であり、再凝固部の浸炭組織とは異なる。

3.2 前熱処理の影響

以上は、焼入焼戻し処理の施された工作物についての検討であるが、加工面の硬さ変化に及ぼす前熱処理の影響を検討するために、焼なまし材を加工しその違いを調べた。

図7は、焼なまし材をそれぞれ水中と油中で加工し

た場合の加工断面の組織写真を示す。組織的には、これらも図5の焼入焼戻し材とほぼ同じ状況を呈すが、圧痕の大きさと比較する限り、最表面の再凝固部は、母材よりもかなり硬化しているのがわかる。

図8は、種々の加工表面におけるX線回折図形を示す。いずれの母材も、加工前には、強度の強い α -Feと、強度の弱い M_7C_3 の回折線のみであるが、加工を施すと、新たに γ -Feの回折線が検出され、加工表面にオーステナイトの生成が確認される。とくに水中加工では、その傾向が著しく、硬さ変化の原因としては、オーステナイトの生成が大きく影響⁹⁾していると考えられる。

また、油中加工では、炭化物(M_7C_3)の回折線が、加工前の母材よりも強く検出され、 γ -Feの回折線のピーク位置も、水中加工に比べてわずかに低角度側へ移行している。これは、前図6のEPM分析結果と同様に加工液の熱分解による浸炭現象を意味しており、加工面の硬化を示唆している。しかし、X線回折結果では、水中と油中による表面構造の違いはあるが、おのおの加工液においては、焼なまし材も焼入焼戻し材も、放電加工によって生成される加工表面層の構造は、ほとんど同じで、前熱処理の影響を受けないことがわかる。

図9は、加工断面の硬さ分布を示す。いずれの場合も加工面における硬さは、母材に比べて大きく変化する。焼入焼戻し材の水中加工では、すでに指摘したように、硬さは低下するが、焼なまし材では、逆に、母材のそれよりは高くなっている。これは、加工によって焼入れ効果が生じたものと思われる。しかし、加工の最表面から約10 μ mまでは、双方ともほぼ同程度の硬さを示す。

一方、油中加工の硬さ分布は、浸炭作用の影響を受け、水中のそれとは大きく異なる。図7の再凝固部で観察される溶融物が重なって凝固した部分の硬さは、焼入焼戻し材の母材よりも高く測定された。この傾向は、焼なまし材においても顕著に現れ、最表面部の硬さは、焼入焼戻し材とほとんど同じであった。

Fig. 9 Comparison of microhardness in cross section of the machined surface

Fig. 10 SEM photographs and microstructures of the hardened steel machined with a discharge energy of 0.05 mJ

また、再凝固層と素地の境界部における硬さ変化は、放電による熱影響を受けた部分で、焼入焼戻し材の油中加工では、焼戻し作用による部分的な硬さ低下として確認される。本図では、再凝固層から母材硬さに到達するまでの部分を熱影響部として示した。

3.3 放電エネルギーの影響

供給する放電エネルギーを低くすると、加工表面における影響層も次第に薄くなることが予想される。

図10は、焼入焼戻し材において、供給エネルギーが極端に低い最終仕上げ加工面のSEM写真、および断面組織を示す。加工面は微細な塊状の溶融物が衝撃的に打ちつけられ、順次重なり合って凝固したように観察される。本条件においても、水中加工の方が油中

Fig. 11 Effects of the discharge energy on microhardness distribution

よりも微細な表面を呈する。また、このように供給エネルギーを極力低く設定しても、断面組織では依然として数 μm 程度の再凝固層が存在するため、加工面の硬さ変化については、これまでと同じ傾向を示すものと思われる。なお、比較のために焼なまし材についても同様な観察を行ったが、ほとんど類似の状況であった。

図11は、放電エネルギーを変化させた場合の加工断面の硬さ分布を示す。加工液の種類や、前熱処理の方法により、それぞれ独自の分布曲線を呈す。加工液と前熱処理が同一であれば、硬さ変化の傾向はほとんど同じである。放電エネルギーの低下につれて、変化層の厚みは薄くなり、本実験の最終仕上げ加工面では($We = 0.05 \text{ mJ}$)、約 $10 \mu\text{m}$ 程度の硬さ変化層を示した。

4. 結 言

鋼のワイヤ放電加工における加工表面の硬さ変化について検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 脱イオン水での加工では、焼なまし材のように硬さの低い材料の加工面は、焼入作用により硬化処理されるが、焼入焼戻し材では、オーステナイトの生成により、母材より軟化する。
- (2) 油中加工では、加工液の熱分解による浸炭作用で、焼なまし材も焼入焼戻し材も、それぞれ母材より硬化する。
- (3) 加工で生じる最表面の構造や硬さ変化は、加工液の種類によって異なるが、工作物の前熱処理条件には関係しない。
- (4) 硬さ変化の規模は、設定される放電エネルギーの大きさに左右され、エネルギーを小さくすることにより、その影響層を抑制できる。プレス金型などの高精度化には、荒加工から順次放電エネルギーを低くする仕上げ加工が必要である。

参 考 文 献

- 1) R. F. Ruling: Wear Behavior of Wire-cut Blanking Tools, Ann. ISEM-6, (1980) 198.
- 2) 向山芳世, 緒方 勲: 放電加工の研究, 電気加工技術, 6, 15 (1983) 17.
- 3) 斉田義幸, 内藤 寛, 川尻鉦二: 冷間ダイス鋼の放電加工変質層の組織と残留応力, 電気加工技術, 6, 17 (1983) 13.
- 4) B. M. Schumacher: EDM Technology for Precise Workpieces with Excellent Surface Quality, Ann. ISEM-7, (1983) 126.
- 5) 増井清徳, 曾根 匠: ワイヤ放電加工面の電解腐食, 精密工学会誌, 54, 6 (1988) 160.
- 6) 六崎賢亮, 鈴木正敏, 河合栄一郎: 鉄鋼材料の放電加工面における変質層, 金属学会誌, 27, 6 (1963) 283.
- 7) 向山芳世, 緒方 勲, 日原政彦: 放電加工における応力分布に関する研究 (第3報), 電気加工学会誌, 15, 29 (1981) 20.
- 8) A. G. Mamalis: Macroscopic and Microscopic Phenomena of EDM'd Surfaces, J. Mechanical Working Tech., 15, (1987) 335.
- 9) 須藤 一, 門間改三, 浅田千秋: 新金属材料篇, 鉄鋼II, 日本金属学会, (1965) 140.