フライスによる断続切削における超硬工具 の初期欠損開始位置について*

八 高 隆 雄** 長 谷 川 正** 竹 山 秀 彦***

On Initiation Site of Brittle Fracture of Cemented Carbide Tool in Milling

Takao YAKOU, Tadashi HASEGAWA and Hidehiko TAKEYAMA

In order to identify the initiation site of chipping of cutting tool, face milling tests were carried out with cemented carbide tip (P20) on which microcracks had been artificially pre-formed at varied positions by electro-discharge machining (EDM). Microcracks existing in the minor cutting edge noticeably shorten the tool life in view of chipping, while those in the major cutting edge have little influence on it. Further, it has been verified that tensile residual stresses induced by EDM cannot be the main reason of shorter tool life. Taking into account the results of scanning electron microscopy of fractured tools, it is concluded that chipping is initiated from a microcrack existing nearly a feed per tooth apart from the corner in the minor cutting edge, whereas a microcrack closer to the corner tends to be rehealed during machining. This may be ascribed to the fact that the repeated "tensile" stress accelerates the growth of the former crack, while "compressive" stress and high temperature will heal the latter. Suggestions to minimize chipping are as follows: (1) use of a tool without defect or crack along the minor cutting edge; (2) preliminary cut at a larger feed than the job feed.

Key words: cemented carbide tool, milling machining, brittle chipping, damage due to electro-discharge machining, initiation site of brittle fracture

1. 結 言

超硬工具は、フライスによる切削の際のごとく工具に断続的に衝撃力が加わる場合には、切削の比較的初期においてぜい性的かつ突発的な損傷（初期欠損, chipping）を受けやすい。このことは、工具寿命の予測を著しく困難にするとともに、切削工程の自動化を進める上で大きな障害となっている。この問題に対して、著者らは以前、化学組成がほぼ等しい超硬工具であってもボアや粗大 WC 粒などの組織欠陥密度が高いほど初期欠損が生じやすく、したがって耐欠損性を高めるためにはこのような組織欠陥に対する品質管理が重要であることを指摘した¹⁾。

ところで、この種の初期欠損は、潜在欠陥があって応力が破壊のクライテリアを越えるような大きな荷重が加わる場合、および繰返し応力を受け組織が劣化して微小クラックを生じこれが発達して破壊に至る場合

とが考えられる²⁾。本研究では、初期欠損の過程をより詳しく検討するため、あらかじめ工具面上の望みの位置に放電加工によって微小クラックを導入した工具を用いて、フライスによる実切削を行った。主な目的は、微小クラックの位置と初期欠損までの工具寿命との関係から、“工具のどこに存在する微小クラックが最終的欠損を引き起こすか”、すなわち欠損の開始位置を同定することである。

2. 実 験 方 法

用いた超硬工具は、図 1 に示す形状をもつ、鋼切削用スローアウェイチップ（P20；WC 76 wt%，TiC+TaC 14 wt%，Co 10 wt%）である。

前述したように、本実験にはあらかじめ望みの位置に微小クラックを導入した超硬工具を用いたが、それらのクラックは、RC 回路をもつ放電加工機により、極間平均電圧 100 V、コンデンサ容量 0.001 μ F の条件下で導入された。

切削実験には、立フライス盤（電動機出力 6 kW）に取り付けた 1 本刃正面フライス（カッタ有効径 100 mm，アキシャルレーキ角 +7°，ラジアルレーキ角 +1°，

* 原稿受付 昭和 60 年 9 月 30 日、日立地方講演会（昭和 60 年 9 月 27 日）にて発表

** 正 会 員 東京農工大学工学部（小金井市中町 2-24-16）

*** 正 会 員 東京農工大学工学部（現、幾徳工業大学；厚木市下荻野 1030）

Fig. 1 Schematic drawing of cemented carbide tip (P 20) used for milling test

コーナ角+15°を用いた。使用した被削材はS 55 C 炭素鋼 (HV 215) である。切削条件は、荒削りの標準切削条件³⁾に近い、切削速度 $V=1.49$ m/s、切込み量 $a=1.1$ mm および 1 刃当たりの送り量 $S=0.52$ mm/刃 (一部、0.29 および 0.75 mm/刃も用いた) である。なお、本実験では食付き時の接触法⁴⁾の代表例として、副切れ刃上の刃先からほぼ送り量に相当する位置から被削材と接触するエンゲージ角+30° (被削材幅 $W=50$ mm) および刃先から被削材と接触するエンゲージ角-20° ($W=14$ mm) の 2 種類を採用し、ディスエンゲージ角は初期欠損を生じ難いよういずれの場合も-30° 以下に抑えた*。

3. 実験結果および考察

3.1 工具における放電加工位置と初期欠損との関係

鋼、タングステンおよび超硬合金などに放電加工をした場合には、加工面に微小なクラックの発生することが以前から指摘されてきた⁵⁾⁶⁾。図 2 は、前述した条件下で、超硬合金 P 20 を回転電極によって放電加工をした時の光学顕微鏡写真である。0.001 μ F という小さなコンデンサ容量による加工であっても、加工面のところどころに微小クラックの発生が認められる (図 2 (a))。さらに、研磨により表面層を軽く除くと、ク

* この場合の被削材と工具との接触状態と離脱状態を Kronenberg の接触法⁴⁾で表せば、エンゲージ角+30° の場合には工具は VSUT の順で被削材と接触しディスエンゲージ角-30° で TSUV の順で離脱する。一方、エンゲージ角-20° の場合には工具は STVU の順に被削材と接触しディスエンゲージ角-38.5° で TSUV の順で離脱する。すなわち、いずれの場合も工具は主切れ刃の刃先から切込み量に相等する位置 T から刃先 S を経由して被削材から離脱する。

(a) P20, EDM (100V, 0.001 μ F)

(b) P20, EDM and polished

(c) P20, Section normal to EDM surface

Fig. 2 Optical micrographs of tool surface treated by electro-discharge machining (EDM)

ラックはより明りょうに現れ、それらは最大約 100 μ m の間隔で蜂の巣状に分布しているのがわかる (図 2 (b))。図 2 (c) は加工面に垂直な断面の写真であり、クラックの深さは約 10 μ m 程度であることがわかる。

刃部のすくい面、前逃げ面 (副切れ刃面)、横逃げ面 (主切れ刃面) およびそれら全面それぞれに放電加工を施した 4 種類の工具を用いて切削を行ったときの結果を図 3 に示す。図の縦軸には累積損傷確率が、横軸には初期欠損に至るまでの切削回数 (工具寿命) がとってある。ここで工具寿命は工具の突発的な欠損に伴う被削材の仕上面品位の変化から求めた。

図 3 (a), (b) はそれぞれエンゲージ角が+30°, -20° の場合であるが、いずれの場合にも、すくい面あるいは前逃げ面 (あるいはこれらの両方) を放電加工した場合には初期欠損が生じやすく、工具寿命が著しく低下することがわかる。しかし、横逃げ面のみを放電加工した場合には初期欠損は認められない。このことは、すくい面と前逃げ面との境界 (すなわち、副切れ刃側のチャンファ部) 付近に沿って存在する微小クラックが初期欠損の起源としての役割を果たしていることを

Fig. 3 Relation between tool life and cumulative probability of fracture in face milling for P20 carbide tips treated by electro-discharge machining (EDM) on varied tool faces

V ; cutting speed, a ; depth of cut, S ; feed per tooth, W ; width of cut

示唆している。

初期欠損を引き起こす微小クラックの位置をさらに正確に調べるため、欠損を起こした工具を走査電子顕微鏡によって観察した。その結果、エンゲージ角が $+30^\circ$ の場合には12回のうち10回まで、 -20° の場合には10回のうち5回まで、刃先からほぼ1刃当たりの送り量だけ離れた副切れ刃付近から破損したことがわかった。さらに、その付近を詳細に調べたところ、図4(a)に示すように、副切れ刃上のチャンファ部付近からリバー状のパターンが走っていることが確認された。また、チャンファ部近傍を拡大した図4(b)には、初期欠損の起源となったと思われる微小クラックの痕跡が認められる。以上の結果から、本実験の切削条

件下においては、ほとんどの場合（エンゲージ角が正の場合には特に）、初期欠損は副切れ刃に沿って刃先からほぼ1刃当たりの送り量だけ離れた位置に存在する微小クラックを起源として起こると結論される。

ところで、臼井ら⁷⁾は、本実験に近い切削条件下（工具：P20(0, 0, 7, 7, 15, 0.8)）で、工具すくい面と被削材とが面状態で衝突する場合について、切れ刃における衝撃応力分布を三次元有限要素法によって解析した。その結果によれば、すくい面上の被削材との接触域には大きな圧縮の応力が作用し、その結果主応力も大となり（その値は主切れ刃に近づくにつれて高くなる）、一方最大引張応力は副切れ刃側接触域のわずかに外側に発生する。ここでは、本実験の結果をこれらの計算結果と対比して考えてみる。

図3(a)と(b)に見たように、主切れ刃近傍をも含めて横逃げ面に導入された微小クラックは工具寿命の低下をもたらさないが、これはその領域が切削時に圧縮の応力下にあるためであろう。これに対して、副切れ刃側チャンファに沿って存在する微小クラックは著しい工具寿命の低下を引き起こすが、これは切りくず-工具接触域のすぐ外側に強い引張衝撃力が繰り返し作用し、その結果その部分の微小クラックが容易に成長・伝ばするためと解釈できる。初期欠損の開始位置に関するこのような議論の正当性を確かめるため、すくい面に放電加工を施した工具を用いて、エンゲージ角 $+30^\circ$ の条件で送り量を種々変化させて実切削

P20, EDM: Rake face, $V=1.49\text{ m/s}$, $a=1.1\text{ mm}$

Fig. 4 Scanning electron micrographs showing brittle fracture of P20 carbide tip with rake face treated by electro-discharge machining (EDM)

Fig. 5 Relationship between initial-contact site in engaging and chipping-initiation site at varied feeds per tooth with electro-discharge machined (EDM) rake face

を行い、その時の工具の被削材に対する初期接触位置と欠損開始位置との関係を調べた。その結果を図5に示す。両者はほぼ1対1の直線関係にあり、さらに欠損開始位置の方が初期接触位置よりもわずかに大きくなる傾向が認められる。このことは、臼井らの計算結果⁷⁾および上述の議論の妥当性を示すものであろう。

なお、前述したように、エンゲージ角が -20° の場合には、 $+30^\circ$ の場合に比べてほぼ1刃当たりの送りに相当する位置から欠損を起こす確率が低い。このことは、エンゲージ角が負の場合には、切削の度ごとに最大引張応力位置が刃先からほぼ1刃当たりの送り位置まで副切れ刃に沿って移動し、その結果必ずしも一定した位置から欠損が進行しないためと考えられる*。

ところで、超硬工具を放電加工によって仕上げた場合には、耐摩耗性が向上し、工具寿命が改善されることが知られている⁸⁾。しかし、図3の結果は、フライス盤による断続切削の場合のように、少なくともぜい性

* 本研究においては、いずれの場合にもディスエンゲージ角を -30° 以下の角の値にし、ディスエンゲージ角に起因する初期欠損が生じ難い条件⁴⁾で実験を行った。そのため上述の考察においてもディスエンゲージ角の問題は考慮されていない。しかし、ディスエンゲージ角が大きな場合(例えば正の値)には初期欠損がより生じやすくなり⁴⁾、そのような切削条件下においてはディスエンゲージ角の影響を無視することはできないであろう。また工具が被削材から離脱する際には、削りくずの塑性流動とも関連して工具刃面の応力状態が著しく複雑になり、いまだその応力状態が解明されるに至っていない。そこで本論文ではこのようなディスエンゲージ角の問題は取り扱わないことにした。一方、工具と被削材との接触法には本論文で扱った以外に何種類か考えられるが、定常切削状態に到達するまでの最大引張応力位置の移動から判断すれば、定性的には、本論文で扱った2例のいずれかに属するであろう。

Fig. 6

(a) Residual stresses in tool surface layer as received, electro-discharge machined (EDM), and vacuum annealed

(b) Comparison of tool lives between P20 carbide tips electro-discharge machined (EDM) and EDM/annealed

的損傷によって工具寿命に至る使用条件下においては、放電加工により微小クラックが導入されるような最終仕上は工具寿命を低下させる傾向にあることを示している。

3.2 放電加工による残留応力の初期欠損との関係

前項では、放電加工によって導入された微小クラックについてのみ議論した。しかし、放電加工によって加工面が複雑に変質することもよく知られた事実である⁹⁾。ここでは、初期欠損にもっとも関連が深いと思われる、放電加工によって発生する残留応力の効果について考える。

図6(a)には、受け入れたままの工具表面、放電加工面およびそれらに真空焼きなまし(1223 K×2 h; 真空度 10^{-3} Pa)を施した面についての残留応力の測定結果を示す。X線応力測定にはCu K α 線を用い、応力は $\sin^2\psi$ 法によってWCの(212)ピークより求めた。図に見るように、受け入れたままの状態では研削による圧縮の残留応力⁹⁾が、放電加工後には引張りの残留応力(この場合の応力値0.76 GPaは、ほぼ同一組成をもつWC-Co系超硬合金の引張破断応力¹⁰⁾にほぼ等しい)が認められる。また、これらに真空焼きな

(a) P20, Back-scattered electron image

(b) P20, Secondary electron image

Fig. 7 Scanning electron micrographs of microcrack introduced on chamfer of minor cutting edge by wire-cut electro-discharge machining

ましを施すことによって、いずれの場合にも残留応力は消失している。ところで、工具表面の圧縮残留応力が工具の耐欠損性を高める¹¹⁾という事実を考慮すると、前述した放電加工による工具寿命の低下が工具表面に発生した引張残留応力に起因している可能性もある。しかし、図6(b)に示すように、放電加工したままの工具とその後真空焼きなましによって残留応力を取り除いた工具のいずれにおいても初期欠損は起こりやすく、両者の間に寿命の差はほとんど認められない。このことから、放電加工による耐欠損性の低下は、引張りの残留応力によるのではなく、主として微小クラックの存在それ自体に起因するものと結論される。

3.3 副切れ刃上に導入した単一クラックの位置と初期欠損との関係

3.1項において、特にエンゲージ角が正の場合には、副切れ刃に沿って刃先からはぼ1刃当たりの送り量だけ離れたチャンファ部付近に存在する微小クラックが、初期欠損の起源となることを示した。このことから、その付近にクラックが存在しない場合には、初期欠損が起こり難いことが予想される。

この予想を確かめるために、刃先から約0.5 mmだけ離れた副切れ刃側のチャンファ部にワイヤカット放電加工によって単一のクラックを導入した工具を用い、3種類の送り量 $S=0.29$, 0.52 および 0.75 mm/刃

Fig. 8 Relation between tool life and cumulative probability of fracture for varied feed rates with regard to position of microcrack preformed in minor cutting edge by electro-discharge machining (EDM)

の下で実切削を行った。図7(a), (b)には導入したクラックの写真を、図8(a), (b)には初期欠損に至るまでの工具寿命に関する結果を示す。図8(a) (工具の被削材に対する初期接触位置がほぼ送り量に等しくなる、エンゲージ角が+30°の場合)に見るように、未放電加工工具 (白抜き記号) の場合には確かに欠損が起こり難く、数百回の切削で欠損が起こることも送り量が $S=0.75$ mm/刃と大きい場合に限られた。クラックを導入した場合には (黒く塗りつぶした記号) それに比べてはるかに欠損が起こりやすいが、ここで注目すべきは $S=0.75$ mm/刃の場合に比べて送り量が $S=0.29$ あるいは 0.52 mm/刃と小さい場合の方が欠損が起こりやすいということである。これに対し、工具が刃先から被削材に接触するエンゲージ角が-20°の場合には (図8(b)), +30°の場合とは逆に、送り量の減少とともに工具寿命が長くなる。

まず、エンゲージ角が+30°の場合について考える。

Fig. 9 Scanning electron micrographs showing rehealing tendency of microcrack by repeated compressive stress in milling

Fig. 10 Improvement of tool life when applying larger feed rate than distance of preset microcrack from corner

この場合、送り量が $S=0.29$ および 0.52 mm/刃の時
には、刃先から約 0.5 mm だけ離れて存在するクラ
ックには引張衝撃力が繰り返し作用し、このため工具寿
命は短い。しかし、送り量が $S=0.75$ mm/刃と大き
くなると、切削中クラックは圧縮応力場であり、このた
めその伝ばは抑えられ、したがって工具寿命も延びる
ものと理解される。図 9 には、送り量 $S=0.75$ mm/刃
の下で 30 回切削したときクラックがどのように変化
したかを示す(図 9 (b) では、クラックを見やすくす
るため、切削中表面に付着した凝着物を軽い研磨で取
り除いてある)。切削前の図 9 (a) に比べて、切削後の
同一視野を示す (b) では、クラックの長さも幅も減少
しクラックが閉じる傾向が認められるが、これは切削
中における圧縮応力と工具の温度上昇に起因する現象

であろう。さらに、この $S=0.75$ mm/刃の下
で 30 回切削した工具を用いて、 $S=0.29$ mm/
刃の条件下でさらに切削を続けたときの結果
(黒く塗りつぶした記号)が図 10 に示してある。
既に $S=0.75$ mm/刃の下で 30 回切削したにも
関わらず、最初から $S=0.29$ mm/刃で切削し
た場合(図中白丸)より欠損を起こし難いこと
がわかる。また、図中の黒丸はちょうどクラ
ック位置から、黒三角はそれ以外の位置から欠損
したことを示すが、黒三角が長寿命側に集中し
ているという事実は、圧縮応力下にあるクラ
ックは切削中に閉じる傾向にあるという図 9 の観
察結果を裏付けるものであろう。

他方、エンゲージ角が -20° の場合には、工具
は刃先から被削材へ接触するため、最大引張応
力位置は切削の度ごとに刃先から被削材接触域
境界まで副切れ刃に沿って移動し、したがって
クラックには毎回引張応力が作用する。さらに、
送り量 S が大きい場合ほど切削抵抗、したが
って引張応力も増すため、 S の増加につれて初期
欠損が起こりやすく、その結果工具寿命が短く
なるものと理解される。

4. 結 論

切れ刃に放電加工を施した超硬工具 P 20 を
用い、ダブルポジティブのすくい角をもつ 1 本
刃正面フライスによって、ディスエンゲージ角
が -30° 以下の負の条件で、S 55 C 炭素鋼を被
削材として切削実験を行った。得られた主な結
果は次の通りである。

- (1) 断続切削用超硬工具に放電加工によ
って最終仕上を行った場合には、たとえ放電
加工時のコンデンサ容量が $0.001 \mu F$ と小さい場
合でも、ぜい性的欠損に至るまでの工具寿命は著
しく低下する。
- (2) この工具寿命の低下は、放電加工によって生
じた工具表面層の引張残留応力によるのではなく、
副切れ刃近傍に生じた微小クラックの存在に起因
する。したがって、副切れ刃稜線付近に放電加工
を施さない限り、工具寿命の低下は起こらない。
- (3) 破面観察の結果とも考え合わせると、放電加工
を施した工具のぜい性的初期欠損の開始位置は副
切れ刃上の被削材との接触域境界付近にあると結
論される。これは、その付近に引張衝撃力が繰り
返し作用するためであろう。
- (4) たとえ副切れ刃近傍に微小クラックが存在し

でも、クラックに常時圧縮力が作用する切削条件下では欠損は起こり難く、さらに切削の続行とともにこのようなクラックは閉じる傾向にある。

- (5) 初期欠損を避けるためには、特に副切れ刃近傍に傷、クラックあるいは組織欠陥をもたない工具を使用することが大切である。また、切削に先だって、所定の送り量より大きな送り量で短時間切削を行うことも、初期欠損を防止する上で有効であろう。

最後に、実験に協力された東京農工大学学生後藤勝之君（現在、東芝タンガロイ株式会社）および工具と正面フライスを提供された東芝タンガロイ株式会社に謝意を表す。本研究は、著者の1人（八高）に対する昭和60年度科研費奨励研究（A）の補助を得ている。

参 考 文 献

- 1) 八高隆雄，竹山秀彦：超硬合金の低サイクル疲労寿命に及

- ぼす組織パラメータの影響，精密機械，50，7（1984）1136。
 2) 例えば，竹山秀彦：切削工具のぜい性損傷に関する研究の展望（1），機械の研究，315（1979）565。
 3) 例えば，精機学会編：新訂精密工作便覧，コロナ社（1970）276。
 4) 星 光一，星 鉄太郎：改訂金属切削技術，工業調査会（1971）150。
 5) 佐々木栄一：放電加工面の性質，日本金属学会会報，8，12（1969）833。
 6) 鳳 誠三郎，倉藤尚雄：改訂放電加工，コロナ社（1961）60。
 7) 臼井英治，井原 透，白樫高洋：断続切削における切れ刃欠損の解析的予測に関する研究（第3報）——切れ刃内衝撃力分布と破壊確率分布，精密機械，46，8（1980）983。
 8) 大越 諄，佐田登志夫：放電研磨による超硬切削工具の寿命改善，精密機械，25，10（1959）540。
 9) 鈴木 寿，林 宏爾：WC-Co 超硬合金の抗折力におよぼす表面研削の影響，日本金属学会誌，39，7（1975）754。
 10) C. Nishimatsu and J. Gurland: Experimental Survey of the Deformation of the Hard-ductile Two Phase Alloy System WC-Co, Trans. ASM, 52, (1960) 469.
 11) 竹山秀彦，飯島 昇，宇野和之：超硬工具におけるサーフェスインテグリティとぜい性損傷，精密機械，48，7（1982）899。

書 評

ハイテクノロジー・センサ

山香英三・編著

共立出版・刊

書名からもわかるとおり，本書は最先端のセンサ技術を紹介することに主眼を置いたものである。その意味では，まさに研究者向けの書籍としてお勧めできる。

以下にその内容を各章別にご紹介する。

第1章は可視光センサである。固体デバイスや電子管デバイスなどの波長特性が詳しいデータによって説明されている。

第2章は赤外光センサである。サーモパイルなどの熱形センサだけでなく，InSb サブミリ波センサや超電導赤外センサについても原理と特性が紹介されている。

第3章は圧力センサである。最近注目されている半導体圧力センサの応用例などが目新しい。

第4章は温度センサである。従来のもの以外に，形状

記憶合金やSAW素子を使ったタイプが詳しく書かれている。

第5章は湿度センサである。原理や構造だけでなく，実際のデータが示されており，読者にとっては非常に親切である。

第6章はガスセンサである。ガス検知の仕組みがモデルで示されているのがよい。

第7章はバイオセンサである。酵素センサ，微生物センサ，免疫センサなどがうまくまとめられている。

第8章は光ファイバセンサである。光ファイバジャイロの紹介などが興味深い。

以上，研究実務に役立つ本といえる。（塩田泰仁）

（A5判，265ページ，3300円，1986年発行）