超音波振動切削における工具欠損防止に関する研究

神 雅 彦** 渡 邊 健 志*** 村 川 正 夫**

Study on Prevention of Chipping of Tool Edge in Ultrasonic Vibration Cutting

Masahiko JIN, Takeshi WATANABE and Masao MURAKAWA

In this study, a combination of countermeasures to prevent the chipping of the edge of cutting tool is investigated which usually occurs when difficult-to-cut materials such as hardened steels are cut by means of a conventional ultrasonic vibration cutting method (UC). The authors consider that the chipping is caused by the collision between the flank of a cutting tool and the machined surface of a workpiece when the tool moves backward thereby contacting with the workpiece. As a first countermeasure the authors propose a new UC device which has more rigidity and stability than the previous one used by the authors, even when subjected to high cutting resistance. As a further countermeasure, in addition to use of the new UC device the authors try to perform a cutting operation in which the vibrational direction of the cutting tool is inclined from a principal cutting direction at an amount of 10 to 30 degrees toward the workpiece. It is found from the result that the chipping of cutting edge can be substantially prevented and a good surface finish is obtained by both continuous and intermittent cutting modes when cutting hardened steels.

Key words: cutting, ultrasonic vibration, chipping, tool life, hardened steel

1. ま え が き

超音波振動切削法は工具刃先を超音波域の周波数で切削方向と同方向に規則的に振動させ、切削速度 v を $v < 2\pi af$ (f : 周波数, a : 振幅) として切削する方法で、切削と休止を交互に繰り返しながら小刻みに断続切削することを特徴とする¹⁾。同切削法による利点は、隈部によるいわゆる不感性振動切削機構²⁾で説明されるように、低剛性工作物あるいは工具の弾性変形を減少させ精密切削できることや、振動による断続切削であるために切削温度の上昇やそれに伴う被削材溶着現象が軽減できるなどの切削性改善効果が得られることなどである。

しかし一方では、同切削法により、焼入鋼、ステンレス鋼あるいは Ni 基合金などの難削材を生産加工レベルで切削しようとする工具欠損や逃げ面異常摩耗の不具合が発生するという報告があり^{3) 4)}、現状では、同切削法は難削材切削用途としてはあまり実用されていないようである。

前記不具合の原因としては、原理的に切削方向でなければならない刃先振動方向が前記被削材切削時の比較的大きな切削抵抗を受けて変化し、振動による刃先後退時に工具逃げ面と工作物との間に衝突やこすれが発生し、それが原因で刃先欠損や逃げ面異常摩耗が発生することが考えられる。

本報では、この問題点の解決法について検討した。その方法として、まず、実刃先振動方向を安定して原理的な切削方向に設定できる超音波振動切削装置について検討した。すなわち、従来は超音波振動工具の製作時や、切削時に試行錯誤的に行われていた振動方向の調整をなくすべく振動方向が一定で、かつ切削抵抗を受けても振動方向が変化しにくい高剛性の超音波振

動切削装置を試作した。次に、工具逃げ面の衝突やこすれをさらに減少させることを目的として、同装置を用いて、振動方向を原理的な切削方向から工作物側に対し $10 \sim 30^\circ$ 程度傾斜させて切削する方法について検討した。その結果、前記難削材料切削時の工具欠損を顕著に低減できることがわかった。

2. 超音波振動切削における工具欠損発生原因の考察

超音波振動切削法においては工具を切削方向に $20 \sim 40\text{kHz}$ 程度の超音波域の振動数 f 、振幅 a で振動させ、切削速度 v との間に $v < 2\pi af$ の関係を成立させることによって、振動数 f で微小断続切削が繰り返される切削機構となる。同切削法により工具欠損が誘発される原因としては、1) 工具が断続切削時の約 $20000g$ に及ぶ加速度の衝撃力を受けること、2) 工具の弾性振動により発生する工具内の繰返し応力により工具が疲労破壊すること、および 3) 図 1 に示すように、断続切削における工作物からの工具離脱時に工具逃げ面が工作物と衝突することにより通常の切削抵抗力 R_F とは逆方向の切削抵抗力 R_R が発生し、それにより刃先付近に引張応力が誘発され、刃先が図中に示したような形状に欠損することなどが考えられる。これらの原因の中で前者の 1), 2) に関しては超音波振動切削を行う上で原理的に避けられない現象であり、その対策としては工具のじん性向上および耐疲労性向上などが考えられる。一方、3) に関しては、振動切削において異常工具欠損が発生する主要因であることが従来より経験的に指摘されている現象である⁵⁾。この現象が発生する原因としては、1 つには工具の振動方向設定の不具合が考えられるが、これは振動方向を正確に調整することで解決される。もう 1 つは、振動切削特有の断続切削現象において、切削時には背分力が作用することにより工具あるいは工作物が弾性変形してたわむのに対して、工具離脱時にはそれが除荷されるため、弾性回復により逃げ面が工作物に衝突す

* 原稿受付 平成 11 年 6 月 14 日

** 正 会 員 日本工業大学工学部 (埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1)

*** 学生会員 日本工業大学工学研究科

Fig. 1 Consideration of a cause of chipping in the case of ultrasonic vibration cutting

Fig. 2 Distribution of stress σ_x of tool obtained with FEM analysis in UC (tool: elastic (carbide), workpiece: plastic (S45C), analytical condition: plane strain, v_v : 5.5m/min, d : 0.1mm, FEM code: DEFORM-2D)

る原因が考えられる。特に難削材切削時に問題となるのはこの原因であり、本研究においては、この問題の解決法に関して検討することとした。

まず、振動切削における切削時および工具離脱時に逃げ面が工作物に接触した場合のそれぞれの工具にかかる応力分布をFEM(DEFORM-2D)により解析した。その結果は、図2に切削方向(X方向)応力 σ_x を示すように、切削時、工具が切削方向に切削速度 v_v で前進移動した場合には、通常の切削状態と同様、刃先全体に圧縮の σ_x が加わっている。それに対して、振動による刃先後退時、すなわち刃先が切削方向と反対方向に切削速度 v_v で移動し、そのときに前述の弾性変形により刃先が工作物に 3° 食い込んだとした場合(片振幅 $10\mu\text{m}$ とすると

$1.04\mu\text{m}$ 工作物に食い込む)について解析してみると、工具逃げ面の刃先から逃げ面のやや後方に引張りの σ_x 分布が発生している。その引張応力は、その程度によって一般的にじん性の低い超硬などの工具材料を十分に引張破壊させうるものと推察できる。一方、実験により焼入鋼を従来の曲げ振動系超音波振動切削工具および従来の縦振動系超音波振動切削工具により切削してみた結果では、図示はしないが、そのときの工具欠損破面を観察してみると、欠損はすべて逃げ面側を起点としてすくい面側に向かっての貝殻状欠損となっており、この現象は前記解析結果と一致している。このことから、超音波振動切削における工具離脱時に工具逃げ面を工作物と衝突させないという対策を完全に施すことにより超音波振動切削における工具欠損の問題点が解決されるものと推察される。

3. 高剛性超音波振動切削工具の試作および切削実験

問題点解決のための第1段階として、切削負荷を受けた場合でも振動方向が変化しないような、剛性の高い超音波振動切削工具を試作することとした。従来の超音波振動切削工具¹⁾は、図示は省略するが、弾性体の縦波を利用した縦振動系工具および横波を利用した曲げ振動系工具が多く利用されている。それぞれの工具の特徴としては、まず工具剛性という観点では、両者共に、工具が共振振動しているため工具を刃物台に固定できる箇所は振動節の部分1~2か所のみである。さらに、工具先端側の固定箇所から振動の腹である工具刃先までの距離は原理的に $(\lambda/4)n$ 、ただし λ は波長、 n は奇数、とせねばならないため工具突出し長さは一般的な慣用切削工具に比べ長くなる。例えば、慣用工具の場合、一般的に20mm程度の突出し長さでよいが、20kHzの鉄鋼製の超音波振動工具では、縦振動系工具の場合、最低63mm($\lambda/4$)程度となり、曲げ振動系工具の場合には工具シャンクの断面形状により異なるが、およそ40mm以上程度必要となる。結果的に、超音波振動切削工具は慣用切削工具の固定方法に比べると剛性が著しく低く、切削抵抗による弾性変形や弾性振動が発生しやすい。次に、振動方向の安定性という観点では、一般的に、超音波振動切削工具における振動方向は刃先形状の影響を受けて変化しやすいが、縦振動系工具の場合は比較的その影響を受けにくく、刃先形状変化による振動方向の再調整が不要である場合が多い。それに対して、曲げ振動系工具の場合は、前記の振動方向の変化が大きく、現状では振動方向が正規切削方向となるように調整された専用の工具を各刃先形状ごとに準備するか⁵⁾、あるいは1本の工具で刃先形状が変わる度に工具取付姿勢を変化させるなどの調整が必要である⁶⁾。前者の場合は工具の生産性が著しく劣り、後者の場合は工具取付け角度を数十 $^\circ$ 調整する必要がある、この場合、工具において最も重要な刃先角度が変化してしまうという大きな問題が発生し実用的とは言い難い。

以上の従来の振動切削工具の問題点に対し、振動方向が一定で、かつ切削抵抗による振動状態の変動をなくする装置構造について検討した結果、図3に示すような装置を試作した。すなわち、振動系には、振動方向が安定な縦振動系を用い、切削抵抗を受けたときの振動状態の変動を防止するために、以下詳述するように、刃先の上下の振動節4か所で工具を挟み込んで固定する構造とした。

各部の詳細構造に関して説明すると、超音波振動発生装置には公称周波数21kHzおよび公称最大電気入力1kWのボルトラ

Fig. 3 Illustration of a newly fabricated ultrasonic vibration cutting tool system having high rigidity

ンジュバンタイプ電歪形振動子①を用い、工具シャック③は縦波の1/4で共振する長さとし、中央部の振動腹の箇所に切削チップ部材④を取付け、その上下4か所の振動節を工具ホルダ⑤内で固定用金具⑥をねじ⑦で締め付ける方法により固定した。切削チップ部材④は、図中に示したように、テーパをねじで引き込んで固定する方式のスローアウェイ方式とした。超音波振動子を駆動するための超音波発振器②は超音波工業(株)製の公称出力 1.2kW のものを用いた。この超音波振動切削工具の工具振動数は $f=21.0\text{kHz}$ 、振幅は $a=15\mu\text{m}$ となっており、従って臨界振動切削速度 $v_c(=2\pi af)$ は 118.7m/min である。

切削実験は、同装置の工具ホルダ⑤を4尺普通旋盤(ヤマザキマザックジュニア)刃物台⑧に固定して行った。主な切削条件、工具条件、工作物条件およびその他の加工条件をまとめて表1に示す。なお、比較のために用いた従来方式の縦振動系および曲げ振動系超音波振動切削装置に関して、縦振動系装置は振動節部のフランジ1か所で固定される方式のもので、切削チップはシャック先端にねじで固定する方式である。工具振動条件は振動数 $f=21.5\text{kHz}$ 、振幅 $a=17\mu\text{m}$ となっている。曲げ振動系装置は振動節2か所で締め付け金具により固定される方式のもので、切削チップはシャック先端にねじで固定する方式である。工具振動条件は振動数 $f=14.5\text{kHz}$ 、振幅 $a=18\mu\text{m}$ となっている。

4. 実験結果および考察

4.1 工具欠損発生の程度に関する調査

被削材 SUS304 に対し、超硬 K10 を用い、外周長手旋削を行い、切込みと送り量を順次増加させる方法で、前述の従来方式の工具と試作工具による工具欠損発生限界を調査した。その結果は、従来方式の工具では縦振動系および曲げ振動系工具の両者ともに切込み d および送り F が同時に 0.2mm を越えた時点で切削初期(切削距離 73.8mm 以内)に刃先に微小欠損が発生した。それに対して、試作工具によれば、切込み d が 0.6mm まで、送り F が 0.4mm までの範囲では欠損が発生せず、チップ発生限界が向上していることがわかった。この原因は、

Table 1 Experimental conditions

Tool	K10 (0, 0, 10, 10, 10, 30, 0.2)
Workpiece	S45C, SUS304, SUS440B (55HRC) SCM435 (40HRC)
Frequency f	21.0kHz
Amplitude a	$20\mu\text{m}$
Cutting speed V	7.9–28.0m/min
Depth of cut d	0.05–1.00mm
Feed F	0.13–0.50mm/rev
Cutting fluid	Dry or mineral oil

同試作工具は従来工具に比べ振動姿態が切削抵抗の影響を受けにくく安定しているためと考えられる。工具寿命に関しては、SUS304 に対して切込みが 0.2mm 程度までの比較的軽切削条件では工具寿命は慣用切削に比べ逃げ面摩耗の比較で約3倍程度、従来の縦振動系工具による超音波振動切削に比べ約1.5倍程度向上することがわかり、試作工具により工具寿命が向上することがわかった。

しかしながら、より過酷な切削として、同試作工具により超硬 K10 を用いて SUS440B の焼入材(55HRC)を切削速度 $v=8\text{m/min}$ 、切込み $d=0.2\text{mm}$ 、送り $F=0.13\text{mm/rev}$ の条件で切削した場合は、切削距離 20m 程度切削した時点で微小欠損が発生してしまい、まだ実用的に使用できるレベルとはいえない結果となった。

この原因について考察してみると、より過酷な切削条件においても逃げ面をこすらないようにするためには工具剛性を高めたのみでは不十分であり、さらに、それを回避できるような振動方向を検討する必要であると考えた。その対策法について検討した結果、1つには、先に社本⁴⁾が開発している振動方向を直線ではなく円振動させる方法が有効と考えられる。すなわち、工具を円振動させることによって工具離脱時には工具逃げ面を完全に工作物から離脱した軌跡とすることができる。しかしながら、同方法では、振動系が複雑になるために大出力化をしにくく、よって、極微小切削用途には良好に適用できるが、本研究で取り上げたような汎用生産加工における仕上加工用途には幾分不向きであると考えられる。そこで著者らはこれに替わる逃げ面の衝突防止方法として、2次元切削の場合を例に図4に示すように、振動方向を原理的な切削方向から工作物に食い込む方向に数十°(図4では 45°) 傾斜させる方法を試みることにした。この方法によれば工具の工作物に対する相対的振動軌跡は切削速度 v と振動速度 $v_v(t)$ の関係から図のようなループを描く軌跡となり、長円形軌道を描くようになると考えられる。よって、この振動方向を傾斜させる方法(傾斜振動切削法)により、硬い被削材切削時の工具欠損が防止できるものと期待できる。

Fig. 4 Principle illustrating an inclined vibration cutting method

(a) Two dimensional cutting operation (b) Peripheral turning operation

Fig. 5 Illustration of inclined directions of vibration for an ultrasonically vibrated cutting tool

4.2 振動方向の傾斜が工具欠損防止におよぼす影響

前述と同様、被削材 SUS304 に対し試作工具を用いて、振動方向傾斜なし、および傾斜ありの場合について、それぞれ工具欠損発生限界を調査した。この場合の振動方向は、図 5 (b) に示すように、切削方向となる X 軸方向を基準として、工具送り方向となる Z 軸方向に $\phi=30^\circ$ 、工具切込み方向となる Y 軸方向に $\psi=7^\circ$ 傾斜させた。この傾斜角度は S45C を用いた切削実験をはじめに行い、最も工具逃げ面のこすれが少なく鏡面に切削できた角度を用いた。その結果、図 6 に示すように、振動方向を傾斜させることによって、切込み d が 1.0mm まで、送り F が 0.6mm までの範囲で欠損が発生せず、前述の傾斜させない場合 ($\phi:0^\circ, \psi:0^\circ$) に比べてさらに欠損発生限界が向上することがわかった。この原因は、振動方向を傾斜させることにより原理的に工具後退時の工具逃げ面の工作物への衝突をなくしたためと考えられる。なお、これ以上の重切削条件では切削抵抗が大きすぎ、振動が停止してしまう現象が見られた。

次に、超硬 K10 を用いて SUS440B 焼入材 (55HRC) を切削速度 $v=8\text{m/min}$ 、切込み $d=0.2\text{mm}$ 、送り $F=0.13\text{mm/rev}$ の条件で切削した場合の切削距離と逃げ面摩耗幅の関係について調べた。はじめに仕上切削という観点で、慣用切削および超音波振動切削における最適切削速度について検討した。その結果、慣用切削の場合は切削速度 $v=80\text{m/min}$ 以上において構成刃先のなほ幾何学的粗さ ($12\mu\text{mRy}$) の良好な仕上面が得られたので、 $v=80\text{m/min}$ を最適速度とした。超音波振動切削の場合は一般的に切削速度が低いほど仕上面は良好となるが¹⁾、ここでは慣用切削の場合と同等以上の仕上面を維持できる範囲内でできるだけ切削速度を高め、 $v=8\text{m/min}$ を最適速度とした。なお、その際の仕上面粗さもほぼ幾何学的粗さ ($12\mu\text{mRy}$) となっている。切削距離と逃げ面摩耗幅 V_B の関係について調べた結果を図 7 に示す。慣用切削(CC)の場合、切削距離 $lg=500\text{m}$ 時点において $V_B=330\mu\text{m}$ 程度となった。このときの仕上面の推移は $V_B=200\mu\text{m}$ を越えたあたりからびりびり振動が発生し始め切削面が悪化してきた。一方、従来法の超音波振動切削 (UC ($\phi:0^\circ, \psi:0^\circ$)) においては突発的な工具欠損が発生し、その時点で、仕上面が急激に悪化した。それに対して、傾斜超音波振動

Fig. 6 Success range for chipping prevention when cutting stainless steel SUS304 (tool: K10, $v=28\text{m/min}$, cutting distance: 73.8m, $f:21\text{kHz}$, $F:20\mu\text{m}$, wet)

Fig. 7 Relationship between cut length lg and width of flank wear land V_B when cutting hardened stainless steel SUS440B (55HRC) (tool: K10, $v=8\text{m/min}$, $d:0.2\text{mm}$, $F:0.13\text{mm/rev}$, $f:21\text{kHz}$, $a:20\mu\text{m}$, wet)

Fig. 8 Variation of wear form for inclined ultrasonic vibration cutting (workpiece: SUS440B (55HRC), tool: K10, $v:8\text{m/min}$, $d:0.2\text{mm}$, $F:0.13\text{mm/rev}$, $f:21\text{kHz}$, $a:20\mu\text{m}$, wet)

切削、(UC ($\phi:30^\circ, \psi:7^\circ$)) の場合は、切削距離 $lg=500\text{m}$ 時点において $V_B=100\mu\text{m}$ 程度となり、仕上面粗さもほぼ初期と同等の $15\mu\text{mRy}$ 程度となっており、両者に比べ工具寿命が向上することがわかった。そのときの摩耗形態は、図 8 に示すように、これまで超音波振動切削における工具摩耗に関してはほとんど報告されていないが、同摩耗形態はアブレッシブ摩耗およびマイクロチップングの累積によるものであることが観察された。このことから、試作工具による傾斜超音波振動切削により、

工具の突発的な欠損が防止できること、および超音波振動切削により焼入鋼を切削したときの工具損傷の過程はアブレッシブ摩耗およびマイクロチップングの累積による定常摩耗進行モードであることが明らかになった。

4.3 SCM435調質材(40HRC)の断続形状工作物の仕上切削

超音波振動切削法の適用が期待される断続形状の工作物 SCM435 (40HRC) 材に対しても本方法の有効性を検討した。工作物形状、および工作物切削個数と逃げ面摩耗幅 V_B の関係を図9に示す。その結果、慣用切削(CC)においては、実験した切削速度条件 $V=12.6, 58.4, 102\text{m/min}$ のいずれにおいても、工具が工作物の溝を通過するごとに衝撃音および旋盤の振動が発生し、工具欠損が激しく、工作物を1個切削完了した時点でそれぞれ $V_B=200\mu\text{m}$ 程度となり、仕上面粗さは切削初期の $4\mu\text{mRy}$ から $8\sim 19\mu\text{mRy}$ 程度に達してしまい、仕上切削が不可能となった。それに対し傾斜超音波振動切削(UC($\phi:30^\circ, \psi:7^\circ$))の場合は、工具が溝を通過する際の衝撃音は一切聞こえず、工具欠損もなく、工作物を36個切削した時点で $V_B=60\mu\text{m}$ 程度に、仕上面粗さは $3\mu\text{mRy}$ となり初期と同等であった。

Fig. 9 Relationship between number of workpieces cut and width of flank wear land V_B for intermittent turning operations (workpiece: SCM435(40HRC), tool: K10, v : 12.6m/min, d : 0.1mm, F : 0.13mm/rev, f : 21kHz, α : 20 μm , wet)

Fig. 10 Comparison of roundness profile between conventional cutting and inclined ultrasonic vibration cutting (workpiece: SCM435(40HRC), tool: K10, v : 12.6m/min, d : 0.1mm, F : 0.13mm/rev, f : 21kHz, α : 20 μm , wet)

すなわち、工具寿命が慣用切削の36倍以上となった。そのときの真円度に関しては、図10に示すように、慣用切削の場合は、工作物1個切削時点で真円度 $26.8\mu\text{m}$ が計測されたのに対し、傾斜超音波振動切削の場合は、工作物36個切削時点で真円度 $2.5\mu\text{m}$ が計測され、真円度も向上していることがわかった。この原因は、傾斜振動切削により切削時の振動が抑制されたこと、および溝部分の切削ばりが減少したことによるものと考えられる。以上の実験結果から、傾斜超音波振動切削により慣用切削では仕上切削が困難な断続工作物の仕上加工が可能となることがわかった。

5. む す び

以上の研究成果をまとめると、超音波振動切削において問題点とされていた工具欠損をなくすべく、切削装置および振動方向について検討を行った結果、

- (1) 大きな切削負荷を受けた際にも振動姿態を乱すことなく刃先振動方向を正確に原理的な切削方向とすることができ、剛性の高い超音波振動切削工具を試作した。
- (2) 上記切削工具を用い、かつ振動方向を切削方向から工作物に食い込む方向に 30° 程度傾斜させることにより焼入鋼を切削した場合でも工具欠損せず、確実かつ安定的に仕上切削が可能となることを明らかにした。
- (3) さらに慣用切削では精密仕上切削することが困難な高硬度断続切削形状工作物を、工具欠損させることなく工具寿命を慣用切削の約36倍程度に維持して精密仕上切削できることを明らかにした。

従来、超音波振動切削により焼入鋼が切削可能であるという報告はいくつかなされているが^{7), 8)}、いずれもチャンピオンデータとしてであり、工具寿命についてはほとんど検討されておらず、実際には生産現場で最も嫌われる突発的な工具欠損が発生するという大きな問題点があるため、あまり実用化がなされていなかった。本研究においては、超音波振動切削法における工具欠損の問題点を解決し、安定的な実施が可能であることを明らかにした。

最後に、本研究の遂行にあたり貴重なご意見をいただいた東京農工大学 笹原弘之助教授、神戸大学 社本英二助教授、また、卒業研究として本研究の実験に参加いただいた遠藤孝政君(現日進工具(株))に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 隈部淳一郎：振動切削—基礎と応用—，実教出版，(1979) 70, 60, 125.
- 2) 竹山秀彦，飯島 昇，石渡昭一，竹治裕幸：ステンレス鋼の超音波切削における工具寿命，昭和61年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，397.
- 3) 日本電子機械工業会：超音波工学，コロナ社，(1993) 216.
- 4) 社本英二，森本祥之，森脇俊道：楕円振動切削法(第1報)，精密工学会誌，62, 8 (1996) 1127.
- 5) 文献1)，p. 179.
- 6) 文献3)，p. 211.
- 7) 隈部淳一郎，大門 守，谷口 修：焼入鋼の切削加工に関する研究—炭素鋼S55C，HRC29-57について—，精密機械，36, 9 (1970) 595.
- 8) 浜田晴司：難削材を削る—超音波たわみ振動切削—，超音波TECHNO，10, 4 (1998) 31.