研 究

ダイヤモンド工具による超音波加工*

久保田 護** 田村 祐二** 島村 則安***

Ultrasonic Machining with a Diamond Impregnated Tool

Mamoru KUBOTA, Yūji TAMURA, Noriyasu SHIMAMURA

The new ultrasonic machining is studied experimentally and its characteristics are found out. Experiments are performed in three ways: 1. Glass plate drilling by an ultrasonic machine tool with a turn table. 2. Glass rod turning by a lathe with an ultrasonic vibrating tool on the carriage. 3. Glass plate drilling by an ultrasonic vibrating rotor tool. Influences of working conditions such as grain size, tool amplitude, relative motion speed, and working pressure on the removal rates are obtained. The result of the experiment enables to make a new ultrasonic machining rotor tool for an NC milling machine. In conclusion: 1. Relative motion of the tool and the work with a suitable speed is necessary for this process. 2. Stock removal rate depends on the working conditions and in case of glass plate drilling it reaches to 50 mm/min. 3. Tool wear is only 0.01% in length.

1. ま え が き

超音波加工とは「超音波周波数で振動している工具と工作物の間に砥粒と加工液を注入し、工作物に工具を押し付け、工具の衝撃により砥粒が工作物を微細に破碎する加工法¹⁾」とされている。遊離砥粒を用いるこのような超音波加工では穴が深くなると砥粒の供給が困難になり、加工速度が著しく低下する。この欠点を除くためダイヤモンド砥粒を埋め込んだ工具による超音波加工が、Harwellの原子力研究所で開発された²⁾³⁾。ただし、その加工特性はほとんど発表されていない。やや遅れてソ連でも同様な加工法が研究された^{4)~6)}。しかし、これも詳細は不明である。

遊離砥粒を用いない超音波加工の考えはわが国でも以前からあったが⁶⁾、実際の研究は行われなかった。超音波振振の技術やダイヤモンド工具の製造技術が当時より進歩しており、また特殊な硬ぜい材料の工業的応用が増えている現在では、本法を十分に検討する必要があると思われる。よってこの加工法について実験研究を行い、その加工特性を明らかにした。

2. 加工の基本的な考え

ダイヤモンド砥粒を埋め込んだ工具を超音波振動さ

せ、ガラスのような硬ぜい材料に押し付けると、砥粒の先端でたたかれた部分は破壊し、工作物には砥粒の形に対応したくぼみができる。すると工具の正面全体が工作物を同時にたたくことになり(図1(a))、微細な破碎は起こらず、加工はまったく進まなくなる。このことは普通の超音波加工と著しく異なる点であって、このため異形工具の断面形状を転写する加工はできない。

工具または工作物を回転させ工具の振動方向に直角に相対運動させると、砥粒の先端は前回の衝撃点より l だけ離れた点をたたく(図1(b))。 l は相対運動速度 v を工具の振動数 f で割った値で、 $v=1\text{ m/s}$ 、 $f=20\text{ kHz}$ ならば $l=50\text{ }\mu\text{m}$ になる。

ダイヤモンド砥粒の先端が工作物の平らな表面をたたき、その衝撃によって長さ l の微小部分(深さと幅は一定とする)が飛び散ると仮定すると、除去速度は l に比例することになる。振動数 f は工具系が定まれば一定であるから、除去速度は相対運動速度 v に比例する。また工具が振動しない場合でも、除去される部分の深さと幅が一定であるならば、除去速度は v に比例することになる。1回の衝撃で除去される微小部分の深さと幅は、工作物の表面の状態、砥粒の先端の形、加工圧力、工具振幅に依存する。実際の加工では先端の形が異なる多数の砥粒が同時に加工にあずかり、また被加工面の状態は各

図1 工具と工作物の相対運動

* 原稿受付 昭和49年12月26日。昭和44年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和44年10月13日)、昭和45年度精機学会春季大会学術講演会(昭和45年4月5日)、昭和47年度精機学会春季大会学術講演会(昭和47年4月6日)ならびに日立地方講演会(昭和49年10月4日)にて発表。

** 正会員 英城大学工学部(日立市中成沢町4-12-1)

*** 学生会員 英城大学工学部

図2 回転台を用いた超音波穴あけ装置

先端に対して同じではないので、除去される微小部分の体積はそれぞれ異なり、その総和が加工量となる。

3. 加工実験

この加工法の特徴を調べ、加工機設計の基礎知識を得るため、手持ちの超音波加工機を改造して実験を行い、逐次改良を加えて結局4種類の加工装置を使用した。

3.1 回転台上のガラス板の穴あけ

1 kW の超音波加工機の加工槽を除去して回転台を設け、変速電動機を用いて水平面内で回転させた(図2)。工作物は厚さ10 mmの板ガラスで、回転台上の加工槽の中に固定される。加工速度は工具を5 mm送り込む時間から求めた。また差動変圧器式の変位計と自動平衡記録計で送り量と時間との関係を記録し、この曲線の傾きで加工速度を確かめた。

工具は外径6 mm、内径3 mmのメタルボンドダイヤモンド砥石で、粒度#100、コンセントレーション100である。中空ホーンの節点につないだ管を経て工具の穴から水を吸い込み、または吹き出して加工くずを除去した。回転台の回転数は0~900 rpm、加工圧力は10~140 g/mm²の範囲で変えた。発振器出力350 W、周波数17.5 kHz、工具振幅約40 μmである。

穴あけ加工中の工具振幅は無負荷状態の振幅より小さくなると考えられるが、その直接測定は困難である。よってこれを推定するため特殊な台で工具を支え、発振器出力を特定の値にし共振状態を保ちながら工具に荷重をかけ、そのときの振幅と無負荷のときの振幅を測定した。このさい荷重8 kg(工具圧力380 g/mm²)までの実験で振幅の減少は10%を越えなかった。したがってこの1 kW振動子と直径6 mmの工具を用いた場合、工具圧力が200 g/mm²以下の実験における加工中の工具振幅と無負荷状態の工具振幅との差は測定誤差の範囲にあるとみなせる。よって以下の実験では無負荷振幅を測定して工具振幅とした。

図3に一例を示すように加工速度は加工圧力にほぼ比

図3 加工圧力と加工速度の関係

図4 回転数と加工速度の関係

例して増大し、80~100 g/mm²で最大値に達し、さらに高い圧力ではかえって低下する。圧力が高すぎると工作物固定系のこわさが不十分なため工作物の強制振動の振幅が増し、工具と工作物の相対振幅が減少するのが原因であると思われる。また加工速度は回転数につれて増大する(図4)。ただし回転数が増すと水の遠心力による飛散がはげしく、吸込み法では加工間隙に十分な量の水を通すことができず、加工くずの排除が困難になって加工速度は低下する。吹出し法のときは遠心力の方向に水が流れるので、加工くずの滞留による加工速度低下は起こらない。しかし1000 rpm以上では工具の異常振動のため安定した加工ができなかった。この理由は砥粒と衝撃痕側壁とが干渉し、こわさの小さい工具系を振動させたためと考えられる。加工くずの処理しやすさの点では吸込み法が有利である。

この装置でガラス板に470の穴をあけ、総計3 m加工したとき、ブロンズボンドの工具の端面消耗量は約3 mmであった。加工した穴の底面には砥粒の条痕が残る、あらさは砥粒のそり方によって左右される。側面のあらさは R_{max} 6 μmで、従来の超音波加工と同程度である。工具径と穴径との差は最低0.05 mmで、0.1~0.2 mm大きい場合が大多数であった。誤差の最大の原因は回転中心と工具中心の不一致である。

3.2 ガラス棒の超音波加工

前述の回転台は1000 rpmを越えると振動がはげしく、安定な加工ができない。本加工法では相対運動速度

図5 ガラス棒の超音波旋削装置

図6 工具の粒度と回転数と加工速度の関係

図7 工具の粒度とあらさの関係

が重要であるので、高速回転に耐え工作物に大きな速度を与えられる回転装置として旋盤を利用することを考え、旋盤の往復台に超音波振動子を取付けて、ガラス棒の外周加工を行った。

実験装置は図5のようで、往復台上に設けた支持板に工具動力計を固定し、これに1kWの超音波振動子を取付けた。工具の支持系は十分なこわさを持たず、また工具の突出し長さが大なので、工具の上下振動が起りやすい。これを抑制するためホーンの節にオイルダンパのピストンを結合した。工具は外径6mmの丸棒で、粒度#60, #100, #220, #400, #800の5種類を使用した。発振器出力200W, 290W, 460W, 周波数17.4kHzのさい工具の振幅はそれぞれ約30μm, 40μm, 50μmである。

加工のさい工具にかかる抵抗の背分力 P_N (工作物の

図8 加工圧力と振幅と加工速度の関係

図9 周速と振幅と加工速度の関係

表面に垂直な静的送り力)と主分力 P_T (工作物の表面に接線方向の力)をひずみ計と記録計によって求め、送り力が一定になるように手送りした。加工液は油でも水でも加工速度に差が認められない。液をかけない場合には加工くずが工作物と工具に付着し、加工速度は小さくなる。また工具が加熱され加工を継続できない。

直径20mmのガラス棒の表面に垂直に工具を送り込むときのダイヤモンド粒度と加工速度、あらさの関係を図6、図7に示す。加工速度は外周から5mm工具を送り込む速度の平均値をとった。加工を長時間続けると大粒の砥粒が脱落せずに残り、工具表面のあらさが大になり、それにつれて加工面あらさも大になる。工作物の縦方向に工具を送れば、あらさは減少しそのばらつきも小さくなる。

送り力(加工圧力) P_N は工具と工作物の系のこわさが許せる範囲で大きい方が加工速度が大になる(図8)。ただし微粒の工具では送り力2~3kg(圧力70~100g/mm²)で加工速度が飽和する。工作物回転数は1000rpm(周速1m/s, 単粒衝撃間隔60μm)までは加工速度を比

図10 加工圧力と抵抗比の関係

図11 回転工具による超音波穴あけ装置

例的に高め、以後は飽和する傾向になった(図9)。

加工抵抗の主成分 P_T は送り力 P_N の増大につれて大になる。この比 P_T/P_N はみかけの摩擦係数であり、超音波振動を与えない場合は $0.09 \sim 0.13$ である。超音波振動させると P_N の小さい範囲では P_T/P_N が著しく小さくなる(図10)。

3.3 回転工具による穴あけ

本加工法は穴あけに用いるのが实际的と考えられる。工業的応用のためには工作物を回すのではなく、ボール盤や立てフライス盤のように工具を回転させる必要がある。よって市販の超音波振動子を立てフライス盤に取付けて実験を行った。超音波発振器からの電流はフライス盤の主軸上部に設けたスリッピングを経て 500 W の振動子に供給され、振動子の冷却水は主軸の頂上からオリングを用い主軸内の工具取付棒の中心の穴を通して供給される。振動子冷却水は工具先端の冷却と加工くずの除去を兼ねるよう、工具中心を貫通した穴を通して排出される(図11)。

工具は外径 12 mm 、内径 4 mm で、周波数 22 kHz 、発振器出力 300 W のとき振幅 $30\text{ }\mu\text{m}$ である。この装置で板ガラスに穴をあけたときは加工圧力 $200 \sim 300\text{ g/}$

図12 数値制御フライス盤につけた超音波加工装置

mm^2 で加工速度が最大値 15 mm/min になった。各回転数に対して加工速度が最大になる最適圧力が存在し、回転数が高いほど最適圧力は小さくなる。

この装置で 380 の穴をあけ、加工深さ合計 1700 mm のとき工具の消耗長さは 0.18 mm であった。すなわち 0.011% である。

3.4 小形回転工具による穴あけ

上記の実験に用いた回転振動子は市販の 22 kHz 振動子を利用したため、フライス盤の主軸の下端から工具先端までの長さが 400 mm 、重量 5 kg であって、高速で振れの少ない回転を与えるための調整が困難であった。このため寸法を短縮し軽量化した振動子を設計製作した。この振動子は 100 W 、 39.3 kHz 、工具振幅約 $10\text{ }\mu\text{m}$ で、主軸下端から工具先端までの長さは 165 mm である。数値制御立てフライス盤に付けた加工装置の写真を図12に示す。工具は外径 10 mm 、内径 4 mm 、粒度 $\#100$ 、コンセントレーション 100 である。

この装置における加工圧力と加工速度の関係を図13に示す。図3に比べて一けた高い圧力で同程度の加工速度になる。加工速度は圧力の増大、運動速度(周速)の増大につれて増大し、振幅の減少、加工面積の増大につれて減少するので、これらの因子の効果が相殺されて同程度の加工速度が得られたものと判断される。

加工圧力とトルクの関係は図14のようであって、圧力が高すぎて加工速度が低下する領域になるとトルクの増大が急になる。すなわちみかけの摩擦係数が大になる。これは加工の機構が変化し砥粒による引っかきが多くなるためと解釈される。加工した穴の底には砥粒による条痕が生じ、入口の縁には破碎割れが生じる。本装置では工具を超音波振動させなくても引っかきで加工できるが、加工速度は小さく、条痕と縁割れは大きくなる。

図 13 回転工具の加工圧力と加工速度の関係

図 14 回転工具の加工圧力とトルクの関係

加工精度は工具外径と加工穴径の差で判断される。工具外径 10.03 mm のとき加工穴径は 10.05~10.10 mm に分布した。深さ 6 mm の穴を 350 あけて合計 2 100 mm 加工したときの工具消耗長さは 0.17 mm, すなわち 0.008% であった。

4. 加工機構

各方式の実験における諸現象の観察をもととして加工機構を考察する。まず超音波振動工具に埋め込まれた砥粒の先端は工作物に衝撃を与えて表面を微細に破碎する。したがって加工面は不規則な微細破碎部で覆われる(図 15)。さらに加工面にできるあらいすじは工具表面の砥粒の本体が加工面をかきさらって動いた跡である。本法による除去機構は砥粒の先端による衝撃破碎と砥粒の本体によるかきさらいと考えられる。

平滑なガラス板に超音波振動工具を押付けて得た破壊痕には、砥粒の接触による圧痕と砥粒の接触部から離れた貝がら状割れが存在する(図 16)。この場合は同一砥粒で繰返し衝撃を与えてあるので砥粒は衝撃破碎部に入り込み、圧痕は単一衝撃の場合より大きくなっている。単一砥粒による単一衝撃破碎の状態を調べるため、図 5

図 15 加工面の破碎痕とすじ

図 16 圧痕と貝がら状割れ

の装置を用いて衝撃痕を分離して観察した。

ダイヤモンドドレッサの先端を四角すいに研磨し(頂角 120°, 先端半径 0.02 mm), ホーンの先端にろう付けして工具とし, 超音波振動させながら回転しているガラス円筒(直径 75 mm)に押付けた。円筒の回転数を 1 360 rpm とすると振動数 17.8 kHz の場合の単粒衝撃間隔は 300 μ m になるので各衝撃痕を分離できる。この衝撃痕の形と大きさはダイヤモンド先端の侵入深さによって著しく変わる。衝撃痕は砥粒の先端がガラス面に食込んで移動した軌跡を示す圧痕と、圧痕の周囲に広がる貝がら状の割れからなる。圧痕の深さが 2 μ m 以下の場合には圧痕だけが観察され、深さが 10 μ m 以上のときには圧痕の両側に貝がら状の割れが広がる。この形はローラ形チーゼルによる衝撃割れ⁷⁾と同様である。深さが 2~10 μ m のときはクラックが入る場合、入らない場合、貝がら状に割れる場合があり、その発生は偶然的である。ダイヤモンドの先端が摩耗して先端半径が大になると(約 0.05 mm)貝がら状の割れは四方に広がる。圧痕の深さが 30 μ m のとき貝がら状に割れて除去される体積は圧痕の体積の 10 倍を越える。なお単粒衝撃間隔が小さければクラックがつながって破碎が進む。

圧痕の下部で除去されずに残った部分には深さ数 μm のクラックがあると推測される。このクラックは観察困難であるが、ガラスの衝撃破砕の際の通例と、本法で段付き外周加工をした丸棒に曲げ荷重をかけたとき応力集中部からクラックが発達する様子によって微細なクラックの存在が推定される。

超音波振動しながら動くダイヤモンド工具による加工では砥粒の加工作用に二つの場合が考えられる。第1は砥粒が工作物に対して分離と衝突を繰返す場合であって、石材をたがねではつるような除去機構になる。これは超音波振動の振幅が大きく加工圧力の小さいときに起こる。第2は砥粒が工作物から離れずに表面を引っかいてゆく場合である。これは振幅が小さく加工圧力の高い場合に起こり、砥粒はクラックの入っている表面層をさらいながら、その超音波振動によって加工面にさらにクラックを残し、次の砥粒による除去を容易にする。

工具の表面に分布している砥粒は突出し高さが異なり、これに接触する工作物の表面は平滑でなく破砕痕の集合であるので、実際の工具による除去は二つの場合が同時に起こり、工具振幅が小さく加工圧力が高いほど引っかき除去の割合が大になる。いずれの除去機構であっても、超音波振動の振幅、加工圧力、相対移動速度が大になるほど加工速度は大になる。加工速度の限界は、圧力の増大による振幅の減少と加工くずの滞留によって起こると考えられる。加工くずは加工域から離脱するまでに数百回の再衝撃を受けるので微粒化しながら加工機構に関与するものと思われる。

5. む す び

ダイヤモンド砥粒を埋め込んだ工具によるガラスの超音波加工の実験的研究を行い、次の結果を得た。

- (1) この加工法では工具の超音波振動と直角の方向に相対運動を与えなければならない。
- (2) 加工速度は工具の形状、粒度、振動数、振幅、相対運動速度、圧力などによって異なるが、ガラスの穴あけで 50 mm/min の速度が得られる。
- (3) 工具の消耗は長さで約 0.01% にすぎない。
- (4) 立てフライス盤に取付けられる小形軽量の振動子でも十分な加工性能を持つことが明らかになった。

終わりに特殊な装置の製作に協力していただいた超音波工業(株)と東京ダイヤモンド工具製作所、実験に協力された岩倉邦夫、小河内信彦、阿部利美、丸山良男、飯淵謙二、斉藤道夫、金子克、小椋行男、志賀健治の諸氏に厚く感謝いたします。

文 献

- 1) 砥粒加工用語集: 砥粒加工, 2, 9 (1965) 498.
- 2) Ultrasonic Drilling with a Diamond Impregnated Probe, Ultrasonics, Jan.-March (1964) 1.
- 3) P. Logge: Machining without Abrasive Slurry, Ultrasonics, July (1966) 157.
- 4) П.Г. Петруха, А.И. Марков, И.Д. Устинов, А.И. Романов и С.Г. Грапонов: Ультразвуковое сверление глубоких отверстий в хрупких материалах алмазным инструментом, Вестник машиностроения, 50, 10, (1970) 54.
- 5) П. Г. Петруха: Резание труднообрабатываемых материалов, Машиностроение, (1972) 148.
- 6) A. I. Markov & I. D. Ustimov: A Study of the Ultrasonic Diamond Drilling of Non-metallic Materials, Ind. Diamond Rev., March (1972) 97.
- 7) 谷口紀男: 硬脆材料の衝撃破砕加工, 誠文堂新光社 (1959) 253.
- 8) 同上, p. 139.