

多段チャンファ工具を用いた超合金の楕円振動切削

慶應義塾大学理工学部 システムデザイン工学科 ○伊藤 寛晃, ◎柿沼 康弘

要旨

ガラスレンズの金型に用いられる超合金を高精度に加工することが求められる。超合金は非常に硬度が高く、ナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)工具でさえ欠けが生じ、まともに切削することができない。そこで本研究では刃先強度を高めるため多段チャンファを施した NPD 工具を製作し、これを用いた楕円振動切削による延性モード加工を行った。加工実験の結果、多段チャンファを用いることで工具の欠けを抑制できることを確認した。

1. 結論

近年、デジタルカメラやスマホなどの光学機器の高性能化に伴い、精密形状を有するガラスレンズの需要が急増している。一般にガラスレンズは超合金を用いた成形用の金型によって大量生産される。超合金はその硬度の高さより従来では放電加工や砥石を用いた研削加工が一般的に用いられてきた。しかし部品の小型化・複雑化が進み、これらの加工方法では金型材の複雑微細形状の加工は困難である。そのため形状精度の高い切削で高精度加工を行うことが求められている。先行研究において、単結晶ダイヤモンド(SCD)工具を用いた超合金の楕円振動切削が有効であることが報告されており、加工面の脆性破壊を抑制することができる^{[1][2]}。

本研究では SCD よりも硬度が高く劈開性や強度に異方性がないナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)工具を用いて超合金の楕円振動切削加工を行った。しかし通常のチャンファを施した NPD 工具を用いても工具刃先に欠けが生じることによって高精度な加工が困難であった。そこで刃先強度を高めるため刃先角度の大きい多段チャンファを NPD 工具に施し、楕円振動切削加工を行った。通常のチャンファを施した NPD 工具と比較することによってその有効性を評価した。

2. 楕円振動切削加工の原理

楕円振動切削とは主分力方向と背分力方向の 2 方向の振動を位相差 90°で与え、楕円または円軌道を工具軌跡に付加させる手法である (Fig. 1)。工具の振動速度が切りくず排出速度を上回る領域ですくい面上での摩擦力の方向が反転するため、切りくずの排出が促進される。その結果、せん断角が増大し、せん断面積が減少することで大幅に切削抵抗が減少する。さらに工具が被削材から一時的に離れるため、加工点に切削液や空気が供給され、発生する熱が抑制される^[3]。これにより切削工具と被削材の熱化学的反応を抑制することができ、様々な工具での切削加工が可能となった。

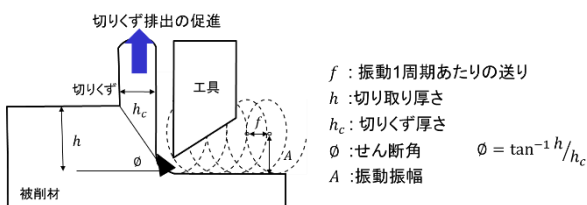


Fig. 1 Elliptical vibration cutting

3. 超合金の楕円振動切削における振動振幅の影響

楕円振動の振幅が加工面に与える影響を評価するために Table 1 に示す加工条件のもと振幅を変更して溝加工試験を行った。加工実験の様子を Fig. 2 に示す。楕円振動装置に工具を取り付け、被削材をジグを介して動力計に平行に固定した。切削力の測定は、

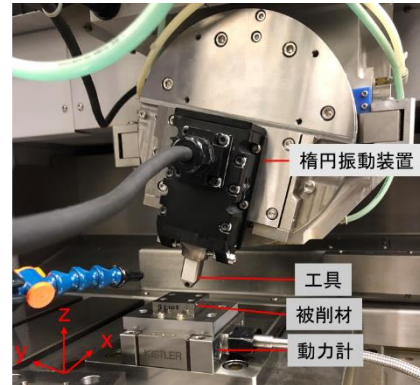


Fig. 2 Experimental setup

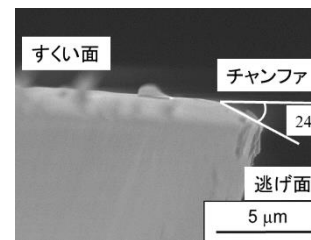


Fig. 3 Observation of normal chamfer tool edge

Table 1 Experiment condition

Feed rate	150 mm/min
Cutting distance	32 mm
Cutting depth	1 μm
Vibration frequency	41 kHz
Vibration amplitude	0, 1, 2, 4 μm

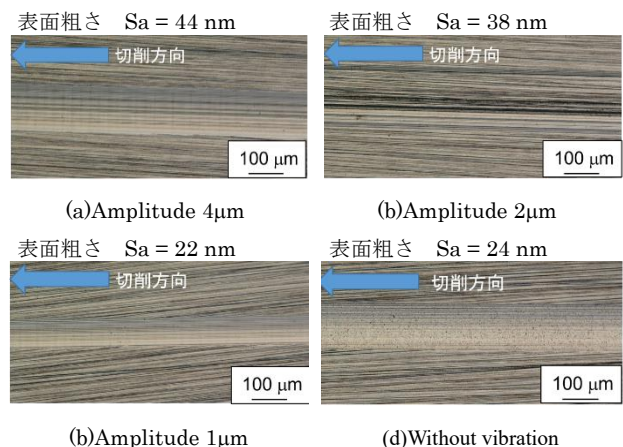


Fig. 4 Observation of cutting surface

サンプリング周波数を 40 kHz として、ローパスフィルタにより 10 kHz 以上の高周波成分を取り除き行った。コーナ半径 1 mm, すくい角 0° , 逃げ角 11° を持つ NPD 工具に対して, Fig. 3 に示す幅 $2\ \mu\text{m}$ のチャンファを施した。被削材には超微粒超硬合金 AF1 を用いた。AF1 は, 炭化タングステンの平均粒径 $0.3\ \mu\text{m}$, コバルト含有量 12 wt% から構成され, 硬度 92.5 HRA である。また切削液には不水溶性の潤滑性に優れているものを用いた。被削材と工具逃げ面の接触時の衝撃を抑えるため L/D が 100/1 で工具を進入するように加工経路を設定した。

Fig. 4 に光学顕微鏡を用いて観察した加工面とその表面粗さ Sa を併せて示す。表面粗さ Sa は, 白色干渉計を用いて溝の先頭, 中央部, 終端部で各 5 回ずつ測定した平均値とした。振幅 $4\ \mu\text{m}$, $2\ \mu\text{m}$ における加工面では工具の欠けに由来する切削方向と同一方向の筋が観察された。振幅 $0\ \mu\text{m}$ では超硬合金の炭化タングステンの脱粒による黒い点が観察された。一方で振幅 $1\ \mu\text{m}$ では工具の欠けによる筋が生じず, 良好な加工面が得られた。また炭化タングステンの脱粒による黒い点が観察されなかったことから延性モードによる加工が行われていると考えられる。振幅が大きい条件において工具の欠けが生じた。このことから, 楕円振動切削では振動速度が高すぎると工具先端に生じる衝撃力が高くなり, 工具刃先の欠損に繋がることがわかった。

4. 多段チャンファ工具の切削特性

前節において超硬合金の楕円振動切削では振動振幅 $1\ \mu\text{m}$ とすることでその有効性を示した。同様の工具, 被削材を用いて切削距離を 10 倍に伸ばし, Table 2 に示す加工条件のもと溝加工試験を行った。電子顕微鏡を用いて得られた加工面の写真を Fig. 6 (a) に示す。観察の結果, 工具に欠けが生じ加工面に $300\ \text{nm}$ 程度の筋が生じた。

そこで工具刃先の強度を確保するため刃先角度が大きい多段チャンファ工具を新たに製作した。コーナ半径 $0.05\ \text{mm}$, すくい角 0° , 逃げ角 15° とした。Fig. 5 よりチャンファが二段に施され, 刃先の角度が増加していることがわかる。通常のチャンファの工具と比較するため, 加工条件を Table 2 に示すものと同様にして切削試験を行った。

得られた加工面を電子顕微鏡を用いて観察した結果を Fig. 6 (b) に示す。工具の欠けによる筋が抑制され良好な加工面を得ることができた。加工面の表面粗さは通常のチャンファの工具では $48\ \text{nm Sa}$ であったのに対し, 多段チャンファ工具では $20\ \text{nm Sa}$ を達成した。表面粗さ低減の要因は主として刃先強度が増したことによる欠けの発生の抑制と考えられる。一方で比切削抵抗においては工具刃先の角度が増加したことによって主分力は 3.2 倍, 背分力は 10.2 倍に増加した(Fig. 7)。

5. 結論

本研究では, 工具刃先の強度を高めるため多段チャンファを NPD 工具に施し超硬合金の楕円振動切削を行った。本研究で得た結果を以下にまとめる。

1. 超硬合金の楕円振動切削では振動振幅を $1\ \mu\text{m}$ にすることで工具の欠けを抑制できる。
2. 多段チャンファを施した工具を用いて楕円振動切削を行うことで, 切削距離が長くなっても工具の欠けが発生せず, 良好な加工面を得ることができた。

謝辞

本研究に際し, 工具, 被削材の提供をして頂いた住友電工ハードメタル株式会社, 株式会社アライドマテリアルに深く感謝の意を表す。

Table 2 Experiment condition

Feedrate	150 mm/min
Cutting distance	$32 \times 10\ \text{mm}$
Cutting depth	$1\ \mu\text{m}$
Vibration frequency	41 kHz
Vibration amplitude	$1\ \mu\text{m}$

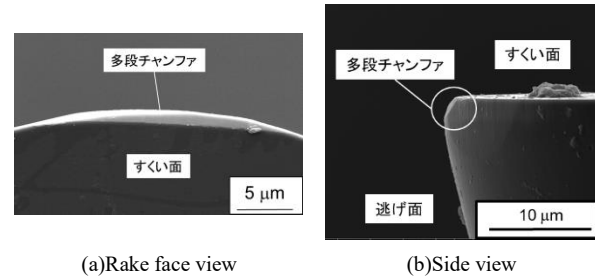


Fig. 5 Observation of multistage chamfer tool edge

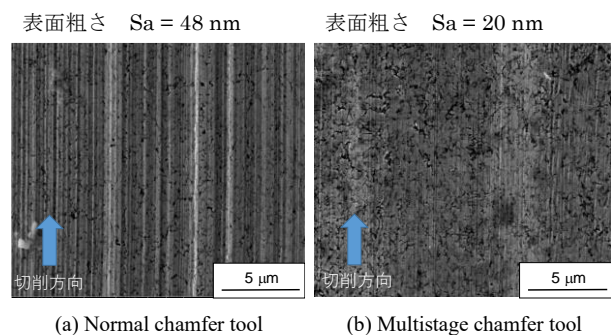


Fig. 6 Observation of cutting surface

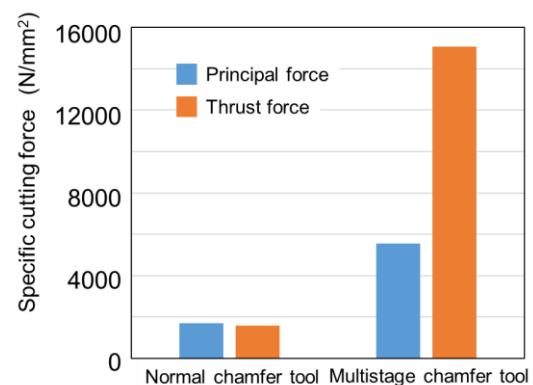


Fig. 7 Result of specific cutting force

参考文献

- [1] 社本英二, 鈴木教和, 樋野 励, 益田真輔, 超硬合金の超精密楕円振動切削加工-延性モード切削機構の検討-, 精密工学会誌, Vol.72, No.4, 2006, pp.539-545
- [2] J. Zhang, N. Suzuki, Y. Wang, and E. Shamoto, "Fundamental investigation of ultra-precision ductile machining of tungsten carbide by applying elliptical vibration cutting with single crystal diamond," J. Mater. Process. Technol., vol. 214, no. 11, 2014, pp. 2644-2659
- [3] 社本英二, 森本祥之, 森脇俊道, 楕円振動切削加工法 (第 1 報) -加工原理と基本特性-, 精密工学会誌, Vol.62, 1996, pp.1127-1131