

工具摩耗を利用したダイヤモンド工具の機上成形に関する基礎的検討

東京農工大学 ○小原 健一郎, 東京農工大学大学院 ◎中本 圭一

要 旨

超精密切削加工において、摩耗したダイヤモンド工具を加工機から取り外すことなく、機上で成形して再生できれば、工具の取付け・取外しに要する時間を省くことができる。また、特に多軸制御加工時の精度悪化を引き起こす、工具制御点の位置出しが容易になり、飛躍的に高精度な加工も実現できる。そこで本研究では、サファイアなどの硬脆材料を工具成形材として、切削加工時の機械的な摩耗により工具を機上成形することを目指して基礎的な検討を行った。

1. 緒 論

光学機器等の小型化に伴い、超精密加工技術がますます重要になっている¹⁾。微細な形状を作り出す加工技術は種々あるが、様々な材質や形状に適応可能な点において、超精密切削加工に優位性がある。一方、超精密切削加工では微小な工具摩耗であっても加工精度に影響するため、摩耗した工具は加工機から取り外し、再研磨する必要がある。しかし、再研磨後の工具も再度加工機に取り付けるセッティング作業が不可欠である。

工具の再セッティングにおける誤差の発生や再研磨する手間を解消するには機上成形が有効である²⁾。機上成形とは工具を加工機に取り付けたまま任意の位置で研磨、成形する手法である。本研究では、サファイアなどの硬脆材料を切削加工してダイヤモンド工具の刃先を意図的に摩耗させる機上成形において、適切な工具成形条件の検討を行った。

2. サファイアによる工具の機上成形

工具にはノーズ半径0.5 mmのダイヤモンド工具を、成形材には、ダイヤモンドの次に高い硬度を持つサファイアを使用した。本研究では、図1に示すようにノーズ半径0.5 mmのダイヤモンド工具から先端角が150°の剣先工具を成形することを想定した。このため、工具を15°傾けた状態で溝加工し、刃先を5 μm後退させることを目標とした。工具のすくい角は0°、逃げ角は10°、すくい面と逃げ面の結晶方位は{100}である。加工機には、図2に示す超精密多軸制御加工機 FANUC ROBOnano-Uiを用いた。本加工機は並進3軸、回転2軸で構成されており、B軸もしくはC軸に成形材またはダイヤモンド工具を、それぞれジグを介して取り付ける。

まず、図3に示すようにサファイア上に直線状の溝を繰り返し切削する引き切り加工による成形を試みた。その結果、切削距離25 mで、工具刃先を4.96 μm後退させることができた。しかし、引き切り加工は設定できる切削速度が低いほか、送った工具を切削開始の位置まで戻す工程が必要であり、成形に長い時間を要する。そこで、より短時間で機上成形を実現するため

に、図4に示すように成形材を回転させて円形溝を加工する端面旋削を試み、工具の刃先後退量を比較した。

サファイアは多結晶異方性材料であり、C、A、M、R面の4種類の結晶面を持ち、それぞれの結晶面では切削する方向により加工特性が異なる。端面旋削では常に切削方向が変化するため、切削方向による臨界切込み深さの差異が小さい面を使うことが望ましいと考えられる。そこで、サファイアの各結晶面の臨界切込み深さを調査した結果、C面の臨界切込み深さが切削方向によらず25 nm程度で差異が小さいことが確かめられたため、C面を端面旋削することとした。

サファイアなどの硬脆材料では2種類の破壊モードがあり、切込み深さが浅い場合は塑性変形により除去される延性破壊が、深い場合にはき裂の進展により除去される脆性破壊が支配的になる。この破壊モードの差異が与える、工具の摩耗量やチッピングの発生への影響を考慮して、1回転あたりの工具送り量 d を延性モードの5 nmおよび脆性モードの50 nmとした。端面旋削の結果、 $d = 50$ nmの場合には切削距離6 mの時点でチッピングが発生した。一方、 $d = 5$ nmでは25 m切削した後、図5に示すようにチッピングが生じたものの、刃先に激しい摩耗による1.83 μmの刃先後退が生じ、機上成形の実現可能性が確認できた。

延性モードでの端面旋削の条件と結果を引き切り加工と比較して表1に示す。端面旋削では切削速度を30 mm/minから100 mm/minにできたほか、引き切り加工と異なり送った工具を戻

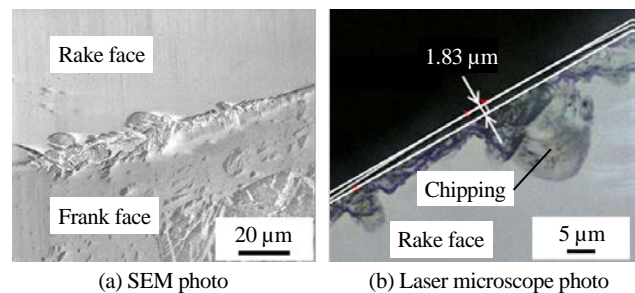
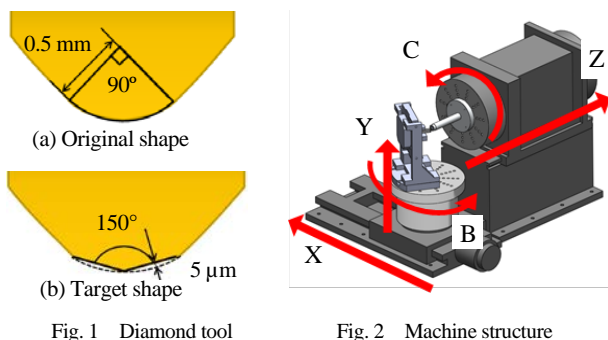
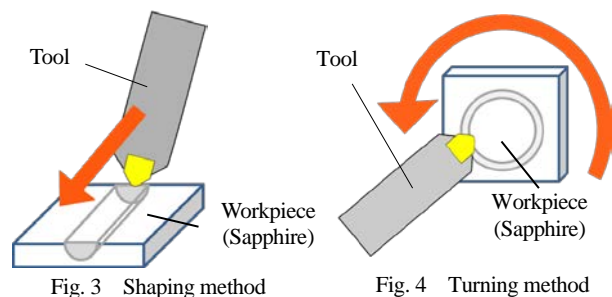


Fig. 5 Tool wear of diamond cutting tool (C plane of sapphire, $d = 5$ nm)

Table 1 Comparison of tool wear by using sapphire

	Shaping	Turning
Depth of cut [nm]	50	5
Groove depth [μm]	5	10
Cutting distance [m]	25	25
Cutting speed [mm/min]	30	100
Edge retreat [μm]	4.96	1.83
Time [h]	27.78	4.31
Edge retreat rate [$\mu\text{m}/\text{h}$]	0.18	0.42

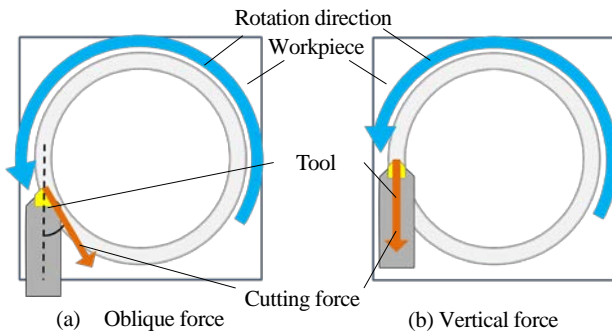


Fig. 6 Cutting force on rake face

す工程が省略されることで、所要時間を大幅に短縮することができた。この結果、所要時間当たりの刃先後退量を引き切り加工に比べ2倍以上に増加させることができた。

以上より、サファイアのような硬脆材料による旋削では、切込みを臨界切込み深さより小さく設定し、延性モードで切削することで、安定して工具摩耗を進展させ、刃先を後退させられることが分かった。

3. 工具成形条件の改善

チップングの防止および成形の高効率化を目的として、成形材や切削条件を変えて引き続き端面旋削を試みた。ここでは、サファイア以外の成形材として、超硬合金板および人工水晶(SiO_2)を成形材として検討した。

超硬合金は、炭化した金属をコバルト、ニッケルなどの鉄系金属により結合した合金であり、主に切削工具や金型に使用される。モース硬度は9.5と高い値であるため、大きな機械的摩耗の発生が期待できる。一方、人工水晶は、サファイアや超硬合金に比べると硬さが劣るため、切削時の衝撃が低下してチップングが発生しにくいと期待される。

サファイアと同条件で旋削した結果、超硬合金(V50相当)、人工水晶とも工具の摩耗と同時にチップングも発生したが、人工水晶では超硬合金に比べチップングは極めて少なかった。これは、人工水晶の硬度が超硬合金に比べて低く、さらにここで設定した切削速度では臨界切込み深さが500 nm以上となる³⁾ため、サファイアと同様に $d=5 \text{ nm}$ とすることで延性モードとなったためと考えられる。この結果から、人工水晶ではチップングを防止しつつ超硬合金よりも安定した工具摩耗が生じることが分かった。

次に、同じ成形材の人工水晶を用いて切削半径を変更した。切削半径が小さい場合には工具のセッティングで誤差があると、図6(a)に示すように切削時に工具のすくい面に対して斜め方向の分力が発生し、チップングが生じやすくなることが考えられる。そこで、切削半径を大きく設定することですくい面に対して発生する分力の低減を図った。チップングが防止できれば、切削速度をさらに高く設定することで所要時間の短縮も可能になる。

Table 2 Comparison of tool wear by using quartz crystal

Depth of cut [nm]	5	5
Groove depth [μm]	5	5
Cutting distance [m]	25	25
Cutting speed [mm/min]	100	800
Edge retreat [μm]	1.03	1.79
Time [h]	4.08	0.52
Edge retreat rate [$\mu\text{m}/\text{h}$]	0.25	3.45

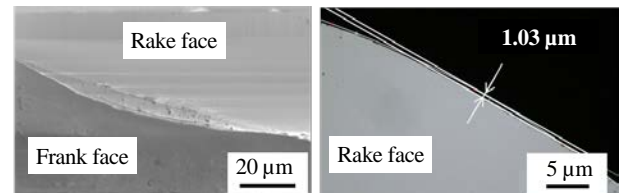


Fig. 7 Tool wear of diamond cutting tool (100 mm/min)

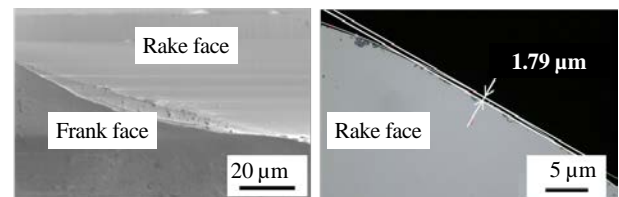


Fig. 8 Tool wear of diamond cutting tool (800 mm/min)

切削半径をこれまでの3~5 mmから8 mmに拡大し、人工水晶を端面旋削した結果を表2に示す。まず、切削速度をこれまでと同じ100 mm/minに設定した結果、図7に示すようにチップングが発生することなく刃先を摩耗させられたことから、切削半径を大きく設定することの有効性が確認できた。さらに、切削速度を800 mm/minまで増加させたところ、図8に示すようにチップングが生じることなく工具が摩耗し、1.79 μm の刃先後退が見られた。その結果、所要時間当たりの刃先後退量を10倍以上増加させることができた。これらの結果より、本研究で取り上げた成形材及び成形条件では、切削半径を大きく設定し、被削材に人工水晶を使用することが、チップング防止および所要時間短縮の点で最も適切な工具成形条件であることが分かった。

4. 結 論

本研究では、ダイヤモンド工具の機上成形に向けた基礎的な検討を行うため、複数の成形材や成形条件を調査し、以下の結果を得た。

- (1) 切込み量を臨界切込み深さ以下としてサファイアなどの硬脆材料を端面旋削することで、チップングを抑えつつ短時間でダイヤモンド工具を成形ができることが分かった。
- (2) 切削半径を大きく設定して人工水晶を端面旋削することで、チップングを防止することができ、より切削速度を高くして工具を速く成形できることを確認した。

参考文献

- 1) Fang, F. Z., Zhang, X. D., Weckenmann, A., Zhang, G. X., & Evans, C. "Manufacturing and measurement of freeform optics", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 62, pp. 823-846, (2013)
- 2) 小林庸幸, 齊藤寛史, 一ノ弘真, "単結晶ダイヤモンド工具の機上成形による工具刃先の精密位置合わせ", 精密工学会春季大会学術講演会, pp.245-246, (2013)
- 3) 高橋正行, 上田修治, 黒部利次: ダイヤモンド単粒によるガラスの超高速研削, 精密工学会誌, pp.1294-1298, (1994)