従動式ロータリー切削工具の難削材加工特性*

陳 平** 星 鐵太郎***

Characteristics of Self-propelled Rotary Tools
in Machining High-performance Materials

Ping CHEN and Tetsutaro HOSHI

Machining of high-performance materials hitherto remains a major challenge in production. Cutting some of those materials by the self-propelled rotary tool is evaluated in this paper with respect to tool wear and tool life. Experimental results show that the rotary tool, characterized by the tangential motion of the circular cutting edge, enhances tool life far longer than the conventional one in turning a metal-matrix composite. Crater wear hardly occurs in rotary cutting of a titanium alloy and a high manganese steel. The inclination angle of the rotary tool is found to be an important factor which controls the relative motions between the tool and the work (chip), and hence tool wear.

Key words: rotary tool, tool wear, tool life, metal-matrix composite, titanium alloy, manganese steel, inclination angle, tangential motion

1. 緒 言

近年、先端技術産業の発展とともに、強度、じん性、耐熱性などにより優れた特性を持った種々の高性能新素材が次々と開発されてきた。例えば、繊維強化金属 (FRM) 複合素材、チタン合金、高 Mn 鋼、超合金といった新素材が積極的に使用されはじめている。これらの材料は物理的、構造的性質に優れているものの、機械加工の困難なものが多い。その例の一つとして、FRM 複合材の二次加工を行う時、工具摩耗が急激に進行するため、多くの場合高価なダイヤモンド系工具の使用を余儀なくされているのが現状である¹⁾²⁾。

それらの材料の機械加工に対し、経済的でしかも高能率な加工技術を開発することが望まれている。

ロータリー工具は、図 1 に示すように、円板状チップが切削しながら回転する特徴を持つ。切れ刃の横方向運動が生じるため、切削熱が運び去られ、また工具摩耗が切れ刃に分散されることが、特に難削材の切削に適すると考えられる。この工具は耐熱合金など難削材の切削に有効であって、特に高送り加工ができると報告されている³⁾。他の難削材、例えば、アブレシブ

材料である FRM 複合材料や加工硬化効果の強い高 Mn 鋼などの切削への応用についても、検討が必要である。そこで本研究では、FRM 複合材料などの難削材の切削へのロータリー工具の適用性について、特に工具摩耗、工具寿命の面で切削実験により評価と解析を行う。

2. 実 験

2.1 被削材料

本実験に使われた難削材は SiC ホイスカ強化アルミニウム合金 (以下、SiCw/Al FRM) 複合材料、Ti-6Al-4V 及び 18 Mn 鋼である。

(1) SiCw/Al 複合材料

ホイスカ: SiC

(直径: $\phi 0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$, 長さ: $30 \sim 100 \mu\text{m}$)

(a) Rotary tool cutting

(b) Cutting model

Fig. 1 Illustration of rotary tool cutting

* 原稿受付 平成 3 年 3 月 29 日。1990 年度精密工学会秋季大会学術講演会 (平成 2 年 9 月 28 日) にて発表

** 学生会員 豊橋技術科学大学大学院 (豊橋市天伯町宇雲雀ヶ丘 1-1)

*** 正会員 豊橋技術科学大学

Table 1 Chemical composition of the materials

	Chemical composition %							
	Ti	Al	V	C	Fe	Mn	Si	Cr
Ti-6Al-4V	bal	6.0	4.0	0.08	0.25			
18 Mn steel				0.5	76	18	0.5	5

Fig. 2 The rotary tool (Rot. TL 2) used in the experiments

1: circular insert (K 10), 2: rotating shaft, 3: tool holder

母 材: AC 8 A アルミニウム鋳物合金

繊維含有率: 18% (体積率)

熱 処 理: T 6

(2) Ti-6Al-4V 及び 18 Mn 鋼

これらの材料の化学成分は表 1 に示す通りである。

2.2 切削工具

ロータリー工具は寸法の異なる 2 種類を考案試作した (以下, ロータリー TL 1 と ロータリー TL 2)。図 2 には ロータリー TL 2 工具の構造図を示す。円板状チップ 1 をねじで回転軸 2 に締め付け, 回転軸 2 は一組のニードル軸受とスラスト軸受で支持されている。回転精度と剛性を高めるため, 軸受を半径方向と軸方向ともにプリロード (予圧) している。

比較するため, ロータリー工具のほかに, 固定された丸形チップ, 四角超硬工具及び多結晶焼結ダイヤモンド工具も使用した。各工具の仕様を表 2 に示す。

2.3 切削条件

切削試験は大隈鉄工所製 LC 10 CNC 旋盤を用いて, 外周旋削で行った。切削条件は表 3 に示す通りである。

3. 実験結果

3.1 ロータリー切削の運動特性

通常切削における切れ刃が固定されて

いるのに対し, ロータリー切削では図 1 (a) に示すように, 切削運動 $\vec{V}$ と送り運動 $\vec{f}$ のほかに, 工具の回転運動による切れ刃の接線方向運動 $\vec{V}_t$ を持つ。送り速度 f が切削速度 V より十分小さいため無視すれば, 図 1 (a) から次の関係が得られる。

$$\vec{V} = \vec{V}_t + \vec{V}_r \quad (1)$$

ただし, $\vec{V}$ は切削速度, $\vec{V}_t$ は切れ刃回転速度である。 $\vec{V}_r$ は工具と工作物の相対すべり速度であり, これを有効切削速度と呼ぶことにする。

従動式ロータリー工具は工作物 (切りくず) の運動によって駆動されるが, 両者間に切れ刃接線方向には相対すべりがなく, いわば転がり運動を行うものと仮定すれば, 図 1 (b) から次の関係が導かれる。

$$V_t = V \sin \lambda \quad (2)$$

$$V_r = V \cos \lambda \quad (3)$$

ただし, λ は工具の傾き角である。

これらの関係式から, 工具傾き角 λ がロータリー切削の相対運動関係を支配することが分かる。

この関係を実験によって確かめるために, 切削中工具の回転速度を非接触式速度計で検出した。その結果は図 3 に示すように, 実験測定値は式 (2) による理論計算値より常に少し小さいことが分かる。低い切削速度では測定値と理論値が一致しているが, 切削速度の増加とともに, それらの差も大きくなる傾向があり, 工具と工作物の切れ刃接線方向に若干のすべり摩擦が生じることが分かる。これは工具回転軸系の摩擦トルクが原因であると考えられる。

3.2 工具摩耗試験

3.2.1 SiCw/Al 複合材料切削の工具摩耗

Table 2 Cutting tools used

Tool	Rotary TL 1/ Fix. cir. TL 1	Rotary TL 2/ Fix. cir. TL 2	Square carb./ Diamond
Material	K 10 & K 10+TiN-coat	K 10	K 10/ Dia. JDA 10
Size	$\phi 27$	$\phi 15$	12.8×12.8
Rake angle	0	-11°	5°
Clearance angle	8°	11°	6°
Cutting edge angle			75°
Obliquity	(inclination)	(inclination)	0

Table 3 Cutting conditions for the tests

Work material	SiCw/Al	Ti-6Al-4V	18 Mn
Tool	Rot. Fix. cir. TL/ Sq. TL & Dia.	Rot. TL/ Square TL	Rot./Sq. TL (TiN-coat)
Cutting speed V m/min	120-800	60, 120	240
Feed rate f mm/rev	0.4/0.2	0.4/0.1	0.4/0.2
Depth of cut a mm	0.5/1.0	0.25/1.0	0.5/0.5
Incl. angle λ deg	15-60/0	25/0	25/0

Cutting fluid: Trim-Sol water-soluble emulsified oil, dilution 1:20

(a) Effect of the inclination angle

(b) Effect of cutting speed

Fig. 3 Rotating speed of the tool as a function of the inclination angle and cutting speed (SiCw/Al composite, dry cutting by Rot. TL 1)

Fig. 4 Comparison of tool wear characteristics of the alternative tools in cutting SiCw/Al composite

工具寿命は、工具逃げ面の最大摩耗幅が0.3 mmに至るまでの切削時間、あるいは切削距離とした。図4には、SiCw/Al複合材の切削でロータリー工具と他の工具のフランク摩耗の比較例を示す。従来型工具である四角工具と固定された丸形工具では工具摩耗が著しく速く進行し、四角工具の摩耗は丸形工具よりさらに2倍近く速いことが分かる。それらの工具寿命は数十秒と短い、同じ超硬工具を用いたロータリー工具では、工具摩耗が切れ刃に沿って均一に分散され、ダイヤモンド工具とほぼ同等な優れた耐摩耗性を示すことが分かった。

各工具の工具寿命に対する切削速度の影響を図5に示す。固定された丸形チップの工具寿命は四角工具より約2倍延長することが確認された。両者のV-T曲線(切削速度対切削時間)は、傾きがほぼ -45° の直線になり、切削時間を切削距離に変換することによりV-T曲線から求めたV-L曲線(切削速度対切削距離)は、ほぼ水平となった。これは工具摩耗が切削速

(a) The V-T curves

(b) The V-L curves

Fig. 5 Tool life as a function of cutting speed (SiCw/Al composite cutting)

度に関係せず、切削距離に比例することを示している。切削速度の増加によって、切削温度は高くなっているはずであるが、このFRM材料の切削における工具摩耗は主にアブレシブ摩耗が支配していて、切削温度の影響をほとんど受けないものと考えられる。

同図では、ロータリー工具の工具寿命が従来型工具より大幅に延長することが分かる。

しかし、ロータリー工具のV-L曲線は、やや傾いていて、切削速度が工具寿命にわずかな影響を与えることを示している。このことは、図3(b)に示すように工具回転速度 V_t が切削速度 V の増加とともに理論値よりやや遅くなることに関係すると考えられる。

Fig. 6 Effect of the inclination angle on tool life (SiCw/Al composite cutting)

V_f が低下するため、式(1)によれば、有効切削速度 V_r は式(3)に表す理論値より高くなることが分かる。切削距離で表す工具寿命が有効切削速度 V_r と無関係とすると、切削時間で表す工具寿命は短くなる。この間切削速度 V は変化していないから計算によって求めた切削距離も短くなる。

なお、文献1)で報告された flank build-up の生成が本実験においては、四角工具及び丸形工具により切削速度 240 m/min 以上で見られた。しかし、ロータリー工具では 800 m/min まで実験しても発生しなかった。また、構成刃先も見られなかった。

各工具の工具寿命に対する工具傾き角の影響を図6に示している。固定された丸形チップには影響があまりないが、ロータリー工具には明確な効果が見られる。切削速度 240 m/min で、傾き角を 15° から 30° にすると、工具寿命が 72% 伸び、また 45° まで傾くと、さらに 145% 延長されることが分かった。その時のロータリー工具の工具寿命は 34.1 min まで達し、それは固定された丸形チップ工具寿命の 40.1 倍、四角工具の 95.3 倍である。

式(2)と(3)に表されるように、工具と被削材(切りくず)間の相対運動関係は工具傾き角 λ に支配されるため、工具摩耗も変化すると考えられる。式(3)によれば、有効切削速度 V_r は見かけの切削速度 V の $\cos \lambda$ 倍である。FRM 材料の切削における工具寿命は、前述したようにアプレシブ材料の特徴として、切削距離に決定づけられている。従って、有効切削速度の低下による工具寿命の向上率 K_{an} は以下の通り計算できる。

$$K_{an} = \frac{V}{V_r} = \frac{1}{\cos \lambda} \quad (4)$$

ただし、 K_{an} は有効切削速度の低下による工具寿命延長率である。

ロータリー工具の寿命延長のもう一つの原因は、工具摩耗が円形切れ刃全周に分散され、切れ刃のある特定部分について考えれば、実切削時間が短くなることである。このことによる工具寿命の伸び率 K_{ed} は

$$K_{ed} = \frac{l_0}{l_w} = \frac{2\pi}{\arccos(1-2a/d_t)} \quad (5)$$

ただし、 K_{ed} は切れ刃長さによる工具寿命伸び率、 l_0 は切れ刃の全周長さ、 l_w は実際の切削に関与する切れ刃長さ、 a は切込み量、 d_t は丸形チップの直径。

これら二つの因子を考慮して、式(4)と(5)に用いることにより図6に示す固定された丸形チップの工具寿命の実験データから、同切削条件におけるロータリー工具の寿命を予測することができる。その計算結果は実験データと合わせて図6に示す。理論計算値より実験値の方がさらに高いことが分かった。このことによって、ロータリー工具寿命を伸ばす未知の要素がまだ存在していると考えられる。

3.2.2 Ti 合金と Mn 鋼切削の工具摩耗

図7(a)には、Ti-6Al-4V 切削におけるロータリー

(a) Ti-6Al-4V cutting

(b) 18Mn steel cutting (with TiN-coated carbide)

Fig. 7 Tool wear curves in machining Ti-6Al-4V and 18 Mn steel (wet cutting)

工具と四角工具との工具摩耗曲線の比較例を示す。より低い切削速度 60 m/min で切削した場合、両工具の摩耗はほぼ一致している。しかし、120 m/min ではロータリー工具の平均摩耗速度が四角工具の平均摩耗速度の約 14% と低いことが分かった。これは、Flom⁹⁾ が報告した同チタン合金のロータリー切削で工具寿命が 7 倍延長することと一致している。なお、同図 (b) の 18 Mn 鋼切削の工具摩耗が、チタン合金切削の場合と類似な特徴を示している。両合金の切削とも、四角工具の摩耗はクレータ摩耗が支配しているが、ロータリー工具では、チップニングとフランク摩耗があり、クレータ摩耗があまり見られない。

4. 結 言

ロータリー工具の難削材加工への適用性について実験的検討を行い、次のような結論を得た。

- (1) 工具傾き角はロータリー切削の相對運動特性を支配し、工具摩耗に影響する。
- (2) 超硬を用いたロータリー工具は難削材加工、特に FRM 複合材料の切削に良い耐摩耗性を示し、FRM 切削における工具寿命は従来型工具よりも数十倍も伸び、ダイヤモンド系工具とほぼ同等な優れた切削特性を示す。チタン合金及び高 Mn 鋼切削におけるロータリー工具は、クレータ摩耗があまりなく、四角工具より摩耗速度が大幅

に減少されることも分かった。

- (3) ロータリー工具の摩耗は円形切れ刃に沿って、均一に分散している。工具傾き角の増加により有効切削速度は低下する。これらのため、FRM 切削におけるロータリー工具の寿命が向上する。しかし、工具寿命を伸ばす未知の要素がまだ存在している。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、実験用被削材及び切削工具を提供された鈴木自動車工業株式会社とダイヤモンド工業株式会社、ならびに大同特殊鋼株式会社に深謝する。また、本研究に関し貴重なご助言をいただきました本学堀内宰教授と徳島大学升田雅博助教授に心より感謝する。

参 考 文 献

- 1) P. Chen & Y. Miyake: Machining Characteristics of SiC Whisker Reinforced Aluminum, Proc. ASM Int. Conf. & Workshop on Factors Influ. Machinability, Cincinnati, Ohio, (1989.9) 69.
- 2) 切削加工専門委員会: FRM の切削・研削加工性、被削性小委員会研究報告, 精密工学会, (1989.5).
- 3) D. G. Flom: Advanced Machining Research Program (AMRP) Final Tech. Report, Air Force Contract No. F 33615-79-C-5199, GE Report No. 83-SRD-040, (1983.10).