S134013

工具刃先チャンファ処理条件が切削に及ぼす影響

清田 大樹^{*1}, 糸魚川 文広^{*2}, 柿原 淳史^{*3}, 遠藤 将太^{*1},
吉田 浩之^{*4}, 若林 俊嘉^{*5}, 中村 隆^{*2},

Effect of Chamfer Preparation Condition at Tool Edge on Cutting Mechanics

Hiroki KIIYOTA^{*1}, Fumihiro ITOIGAWA^{*2}, Atsushi KAKIHARA^{*3}, Shota ENDO^{*1},
Hiroyuki YOSHIDA^{*4}, Takayoshi WAKABAYASHI^{*5} and Takashi NAKAMURA^{*1}^{*1} Nagoya Institute of Technology, Graduate School of Engineering
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, Aichi, 466-8555 Japan

A chamfered cutting edge, which is commonly shaped in order to strengthen an edge of a cutting tool consisting of brittle material, easily causes an enhanced adhesion and a burr formation due to high compressive stress anterior to the edge. These problems lead to detachment of tool material and notch wear at depth-of-cut line, which would result in unexpected tool fracture. On the other hand, the edge shape promotes formation of a built-up edge (BUE) as a dead metal and can maintain it stably. Actually, the formed BUE is plastically extruded along to the chamfered edge and can prevent formation of the notch wear. In this study, basic experiments to investigate effects of chamfered tool edge preparation, such as chamfer angle and chamfered land texture on the BUE behavior were conducted. The results suggested that the plastic flow in the BUE extrusion can suppress the adhesion if the extrusion is arisen. Additionally, analytical modeling of cutting with chamfered tool was presented. The BUE shape could be predicted by considering principle of least work consisting of friction and plastic deformation work required to be extruded it.

Key Words : Chamfered Cutting Tool, Difficult-to-cut Material, Built-up Edge

1. 緒 言

難削材切削に広く適用されている超硬合金や立方晶窒化ホウ素 (cBN) などの焼結切削工具は高硬度である反面、靱性に乏しいことから、一般的にその刃先には強度確保のためにチャンファやランドといった処理が施されている。この場合、刃先の鈍化に伴い前方の材料内部における圧縮応力が増加し、境界部でのバリの生成や工具への強固な付着が生じやすくなる。特に加工硬化率の大きな難削材ではこれらの問題が顕著に発生し、脆性な焼結切削工具の突発的な欠損を引き起こす。その一方で、処理された刃先近傍では被削材が滞留し、デッドメタルとして構成刃先が生じやすい形状でもある。この場合には生じた構成刃先が工具に成り代わって切削機構を担い、工具母材の保護効果の発現が期待できる。

本研究では難削材であるNi基耐熱合金インコネル718切削においてチャンファ形状が切削現象に及ぼす影響を調査し、その結果チャンファ下に生じた構成刃先の側方流動現象がその形状に依存して生じることを確認した。当現象は上記のようなバリや付着の回避をもたらすといった利点を有することから、積極利用すべくチャンファ面性状による当現象の制御も試みた。また、その現象も加味した解析モデルについても検討し、チャンファ下に生じる構成刃先の形状を決定する手法として、側方流動を加味した際の摩擦仕事と塑性仕事における最小仕事の原理を提案する。

^{*1} 非会員, 名古屋工業大学大学院 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

^{*2} 正員, 名古屋工業大学

^{*3} 非会員, 名古屋工業大学大学院 (現 三菱電機株式会社)

^{*4} 正員, 三菱重工業株式会社

^{*5} 非会員, 住友電気工業株式会社

E-mail: cir16503@stn.nitech.ac.jp

2. 構成刃先の側方流動現象

2・1 チャンファ形状による切削現象の差異

インコネル 718 切削において工具刃先チャンファ角が切削現象に及ぼす影響を調査するため、表 1 に示す条件にて突っ切り切削（二次元切削）実験を行った。なお、工具刃先形状は図 1 のように定義する。また、ここでは図 2 (a) に示すように高速度ビデオカメラを配置し、切削プロセスのその場観察を行った。その際得られる映像は同図 (b) のようになる。図 2 は急停止実験後の切削点近傍の被削材組織写真で、硫酸を用いた電解腐食を行った結果である。高ひずみを受けたことによる組織の微細化により腐食されなかった部分（写真白色部）が構成刃先であると考えられるが、その先端は切取り深さ方向には成長しておらず、逃げ面側からバリシングによる大きな反力を受ける形状である。これにより構成刃先は切削中、準静的に力学的安定状態となり、かつ大きな静水圧が作用することとなる。図 3 はそれぞれその場観察においてみられた刃先近傍のスナップショットであるが、 $\gamma = 15^\circ, 30^\circ$ において構成刃先が押し出されている状況が確認できる。これは生じた構成刃先が高静水圧下にさらされる一方で、切削幅端部は自由面であるのでその圧力差によって発現するものと考えられる。このような構成刃先の側方流出挙動は臼井ら⁽¹⁾も指摘している。一方、 $\gamma = 45^\circ$ では構成刃先の流出は見られず、切れ刃側部に構成刃先がないため、境界部の材料は負のすくい角であるチャンファランド面に流入し、バリとなって仕上げ面に残る。この繰り返しの結果として非常に大きなバリが発生している。

Table 1 Cutting conditions

Work material		Inconel718
Tool	Material	Sintered WC-Co
	Geometry	$\alpha = 10^\circ, \gamma = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, W_c = 0.1 \text{ mm}$
Cutting speed		30 m/min
Feed rate		0.1 mm/rev
Width of cut		1 mm
Lubrication		Dry

Fig. 1 Schematic illustration of tool edge geometry

Fig. 2 Setup and snapshot of cutting point; (a) setup, (b) snapshot

Fig. 3 Cross-section of BUE with chamfered tool of: (a) $\gamma = 15^\circ$, (b) $\gamma = 30^\circ$ and (c) $\gamma = 45^\circ$ Fig. 4 BUE extrusion behavior with chamfered tool of: (a) $\gamma = 15^\circ$, (b) $\gamma = 30^\circ$ and (c) $\gamma = 45^\circ$

2・2 構成刃先の側方流動の利点

先述のように構成刃先の側方流動が生じた場合には工具母材保護効果の他、バリの生成や強固な付着の回避に効果的であると考えられる。これに関して、構成刃先の流出挙動が生じる条件と生じない条件において断続突っ切り切削（図5）を行った結果を図6に示す。構成刃先の流動が生じない場合（a）においては切削幅端部においてバリが生成し、切削中断時には切りくずを伴って被削材が工具へ強固に付着している。これに対して、流動が確認されるチャンファ条件（b）においてはバリの生成もなく、流動が生じているために被削材の付着も緩和され、中断時には工具への付着は見られない。すなわち、構成刃先の側方流動が生じる場合には境界摩耗⁽²⁾やチッピングを引き起こすようなバリや付着といった問題が回避されると考えられる。

Fig. 5 Interrupted cutting

Fig. 6 Snapshots in interrupted cutting: (a) without BUE extrusion ($\gamma = 45^\circ$),
(b) with BUE extrusion ($\gamma = 30^\circ$)

2・3 チャンファ面性状が構成刃先の流動性に及ぼす影響

前節のように構成刃先の流動現象はバリの回避や付着の緩和に対して効果的であると考えられるが、その流出挙動は定常ではない。図7に時間経過に伴う構成刃先流出距離を示す。これは高速度ビデオカメラの映像から各コマ間における工具と流出した構成刃先との相対的な位置変化を積分して求めたもので、その傾きが流出速度を表す。この結果より構成刃先は定常に流出するのではなく、静止と流動を繰り返す挙動をしており、その挙動は不安定といえる。また、構成刃先の固着は切削終端における工具母材チッピングの要因ともなりうる。そこで、チャンファ面の摩擦低減を期待し、テクスチャリングの効果を発現させることを目的として放電加工によってチャンファ面を研削加工仕上げよりも粗く仕上げた工具を用いた ($R_{\max}=5.4\mu\text{m}$)。図8に構成刃先の流動挙動が観察された頻度を全体に占める時間割合として示す。放電加工で仕上げた工具では研削仕上げに比べて流動が生じる割合が2倍程度に増加しており、微細構造の効果によりチャンファ面の摩擦が低減され、流動が顕著となって流出挙動が安定化したと考えられる。また、それぞれの工具において切取り厚さを変化させたときの平均流出速度を図9にそれぞれ示す。切取り厚さの増大に伴い、平均速度の増加が見られるが、これは構成刃先への材料供給量が増加したためであると考えられる。また、チャンファ面を粗くすることで、流動の頻度と同様に平均流出速度においても2倍程度の増加が見られる。よって、より定常な流出挙動を発現するためには、前者のように切取り厚さの増加も有効であるが、この場合には工具母材と切り屑との接触長さが増大し、すくい面摩耗が生じやすくなることから、チャンファ面のテクスチャリングによる流動性向上が有効であると考えられる。

Fig. 7 BUE extrusion length over time

Fig. 8 Time ratio of flowage ($\gamma = 30^\circ$)

Fig. 9 BUE extrusion speed ($\gamma = 30^\circ$)

3. 切削モデルの検討

チャンファ付き工具の解析に関してはこれまで多くのモデルが提案⁽³⁾⁽⁴⁾されており、生じるデッドメタルの形状に関する種々の議論⁽⁵⁾がなされている。最小仕事の原理から考えると、すくい角はより大きい方が有利であり、いかなるチャンファ条件の工具で切削した場合も構成刃先は実質すくい角が大なる形状まで成長すると予想される。しかしながら、構成刃先形状は工具刃先の幾何形状に依存して変化する。本研究ではこの点を構成刃先の側方流動を加味し、その際の摩擦仕事と塑性仕事について最小仕事の原理から構成刃先の実質すくい角が決定すると考えた。

3・1 すべり線場解析モデル

まず、切削現象に関して図 10 に示すようなすべり線場モデルを検討する。特徴としてはバニシ領域 dt_1 が設けられており、この厚さ分の材料は構成刃先に供給される、ないしはバリとなると考える。構成刃先の先端部には第 2 すべり線の有心場 ACF があり、この上に直線すべり線場 ABC が乗っている。また、その下には加工硬化を考慮した帯状せん断域を有しており、AF 面にて最大せん断力に達するものとした。

図 11 は各チャンファ角においてこのモデルより算出された加工力の理論値と実験値の比較を示す。理論値に関しては、急停止実験により凍結した刃先近傍組織写真から当すべり線場における各角度を実測し、材料のせん断応力値を 1019MPa として計算を行った。両者を比較すると最大で 10% 程度の差が見られるものの、加工分力の変化傾向としては比較的良好に一致している。

Fig. 10 BUE shape model

Fig. 11 Measured and predicted cutting force components

3・2 構成刃先の流動現象加味

先述のようにチャンファ付き切削工具では生成した構成刃先の側方流動現象が見られる。ここではその際の仕事について最小仕事の原理を適用することで、チャンファ下に生じる構成刃先形状を検討する。考慮すべき仕事は摩擦仕事と塑性変形仕事の2つである。

まず、摩擦仕事であるが、これは構成刃先の流動に伴い界面にはたらく摩擦力に起因するものである。ここでは、構成刃先に作用する摩擦力は工具チャンファ面との界面のみを考えた。これは構成刃先の側方流動速度は切りくず流出速度および切削速度と比べて圧倒的に遅く、速度比から構成刃先の流動に対してはすくい面および逃げ面には摩擦力は作用しないと見なせるためである。

また、上記のモデルにはバニシ領域が設けられており、この厚さ分の材料は構成刃先に供給される、ないしはバリとなると考えている。したがって、この領域の変形仕事を考える必要があり、これが塑性変形仕事である。ここでは構成刃先の押出しおよびバリの生成を平面ひずみ状態における平行型間の据え込みと等価なものとして考えた (図 12)。

以上の仮定よりそれぞれの仕事を求め、その和が最小となる条件から構成刃先の実質すくい角を求めた。ここで一例として、 $W_c=0.2\text{ mm}$ 、 $\gamma=30^\circ$ の条件下で、実質すくい角を $-10^\circ-10^\circ$ と変化させた際の摩擦仕事、塑性変形

仕事, およびそれらの和である全仕事の変化傾向を図 13 に示す. これより, 実質すくい角の増加に伴い塑性変形仕事は減少しているのに対し, 摩擦仕事は増加していることが確認できる. それぞれの傾向は, パニシ領域およびチャンファ面上の摩擦力の変化に起因する. このような関係から全仕事が最小値を示す実質すくい角が存在する. つまり, 構成刃先はこの形状に達するまで成長し, この時点から側方流動が生じ始めると推察される. また, チャンファ形状の変化に対する実質すくい角の変化傾向についても, この方法によって求められた結果と実験結果は定性的に一致する.

Fig. 12 Material supply to BUE

Fig. 13 Variation in friction and plastic deformation work

4. 結 言

チャンファ処理条件が切削現象に及ぼす影響について, Ni 基耐熱合金インコネル 718 切削において調査した結果以下の知見が得られた.

1. チャンファ下にデッドメタルとして生じる構成刃先は力学的に安定な形状となり, チャンファ角に依存して側方流動が生じる.
2. 構成刃先の側方流動が生じる場合には切削幅端部に生じるバリの回避や工具への付着の緩和が期待される.
3. 構成刃先の流動性の向上に対して, チャンファ面のテクスチャリングは効果的である.
4. 側方流動現象を加味し, その際の摩擦仕事と塑性仕事について最小仕事の原理を適用することで構成刃先の実質すくい角を見積もることができる.

文 献

- (1) 臼井英治, 星光一, “接触面積拘束工具の切削性の研究 (第 4 報): 通常構成刃先と拘束工具の構成刃先について”, 精密機械, Vol. 30, No. 350 (1964), pp. 273-284.
- (2) H. Kiyota, F. Itoigawa, A. Kakiyama and T. Nakamura, “Prevention of Depth-of-Cut Notch Wear in CBN Tool Edge by Controlling the Built-up Edge”, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 5, No. 3 (2011), pp. 342-348.
- (3) N. Fang, “Machining with tool-chip contact on the tool secondary rake face Part I: a new slip-line model”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44 (2002) pp.2337-2354.
- (4) H. Kudo, “Some New Slip-line Solutions for two-dimensional Steady State Machining”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 7, (1965), pp.43-55.
- (5) 広田明彦, 笠原和夫, 間中友一, “大きな負のすくい角をもつ工具の切削特性 (第 6 報): 工具形状によるデッドメタル生成の差異”, 2002 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p. 293.