高速フライス削りに関する基礎的研究*

——カーバイド系セラミック工具の損傷——

坂 本 正 史** 中 村 平** 本 吉 智***

Fundamental Studies on High Speed Milling

——Wear of Oxide Tools——

Masafumi SAKAMOTO, Taira NAKAMURA, Satoshi MOTOYOSHI

The plain type milling test with oxide tools added carbide has been performed on 0.53% carbon steel at high cutting speed range. The wear patterns and the wear rates are measured together and the application of oxide tools in the plain type milling at high speed range are investigated. The important results obtained are as follows.

- (1) The tool life of oxide tools are superior to carbide tools at high cutting speed range.
- (2) The wear rates of plain type milling cutters at high cutting speed range are ruled by the flank wear of tools.
- (3) The flank wear rate curves with cutting speed consist of two parts.
- (4) In first part, the small honeycomb pattern cracks appear in the flank face a little away from the cutting edge of the tools. The small honeycomb pattern cracks grow up gradually and then the end of cracks reach the cutting edge of tools, they begin to transform the small groove wear. This part is called the second part of tool wear.
- (5) In spite of the wear rates in the second part of wear are influenced by the number of impact cycle and the temperature of cutting edge, the distractive tool failure does not occur at all.

1. 緒 言

焼入れ硬化した歯車の超硬仕上ホブ切りの基礎研究として焼入鋼を切削してみると、切れ刃さえ鋭ければ非常に硬い鋼でも切削できる。この場合、切れ刃部が高温になるので切れ刃の鋭利さを長く保つためにはできるだけ高温硬度の高い工具材種を用いることが望ましい。超硬より高温硬度の高いセラミックを仕上ホブ切りに使用できれば、仕上歯切能率をさらに向上し得よう。本研究はセラミック工具が仕上歯切工具として使用し得るか否かを検討しようとするものであるが、本報ではまず焼準材で得られた結果について報告する。

2. 実 験 方 法

できるだけ剛性の高い状態で切削実験を行うために、正面フライスの剛性が高いことに着目して、正面フライス形カッタによって平フライス形切削を行った。側面切れ刃で歯面を仕上げることを想定して、できるだけ側面切れ刃を幅広く働かすように切削幅は3 mm、仕上切削

であるから切込み量は0.5 mmとし、送りは0.2~0.5 mm/rev、切れ刃数は1、切削速度は主として291, 407, 581 m/minで行った。チップはスローアウェイトタイプのセラミックチップ (Al_2O_3 70%, TiC 30%, SNP 432)で、バイトシャンク (N 11 R-33) に取付けて図1のようにして使用した。工具材種はカーバイド系セラミックのほか比較のために純アルミナ系のもの、超硬 (P 10) も一部使用した。使用機械は1.5 番、3.7 kW の立フライス盤で、被削材はS 53 C 焼準材である。

セラミックによる炭素鋼の正面フライス削りでは、すくい面摩耗が非常に大きく、これに対する観察結果も報告されている¹⁾。しかし、平フライス形切削においてはすくい面摩耗よりやはり逃げ面摩耗が工具寿命に対して支配的であるので、主として逃げ面摩耗について検討した。

工具損傷の観察、測定は切削中適当な間隔で工具顕微鏡、電子顕微鏡 (SEM) などで行った。工具摩耗幅としては平均フランク摩耗幅をとり、この値が0.2 mm を寿命判定の摩耗幅とした。

3. 実 験 結 果

3.1 一期摩耗域と二期摩耗域

* 原稿受付 昭和53年9月22日。精機学会九州支部久留米地方講演会 (昭和52年11月21日) にて発表。

** 正 会 員 九州工業大学 (北九州市戸畑区仙水町1-1)

*** 日産自動車(株) (東京都中央区銀座東6-7)

表1 実験に用いた工具

工具材種	記号	比重 (gf/cm ³)	抗折強度 (kgf/mm ²)	θ°	c (mm)
カーバイド系 セラミック	B	4.20~4.24	75	0~30	0.10
純アルミナ系 セラミック	W	3.98	70~80	20	0.18
超硬 (P 10)	—	10.8	151	0	—

図2はカーバイド系セラミック (B) で鋼をフライス削りしたときの平均フランク摩耗幅と切削時間（みかけ上の）との関係を調べた一例である。摩耗の少ない上向き削りの曲線をよくみると摩耗が二つの領域に分かれているのがわかる。ここで摩耗の緩やかな領域を一期摩耗域、急増する領域を二期摩耗域と名づけ、その境界を変曲点と呼ぶことにする。この二つの領域を2本の直線に近似しその傾きを求めると、一期摩耗域ではほぼ0.3、二期摩耗域では1.0となる。したがって、一期と二期の摩耗域で摩耗機構に何らかの違いがあることが考えられる。

() 内の数は概略、アキシヤルレーキ： -5° 、ラジアルレーキ： -5°

図1 使用したカッタ形状と切削形状

$V=407 \text{ m/min}$, S53C, 切込み: 0.5 mm, 切削幅: 3 mm

図2 セラミック工具 (B) のフランク摩耗幅

図3は横軸を衝撃回数（切削回数）にとり、切れ刃ランダム角 θ の違うデータも一緒にして送りの影響を検討したものである。送り0.2と0.5 mm/revの点は全く一致している。同様に切削速度の影響を調べたのが図4である。一期摩耗域では581 m/minの摩耗量が少々大きいようであるが、摩耗幅が0.2 mmに近づくとも切削速度の影響は無くなっているといっても良い。

図3 送り量がフランク摩耗幅に及ぼす影響

図4 切削速度がフランク摩耗幅に及ぼす影響

図5 二期摩耗域におけるフランク摩耗

であろう。これらの結果から考えるとセラミック工具のフランク摩耗幅はほとんど切削回数によって決まっていると考えられる。

3.2 初期破損

セラミック工具はもろいので、工具摩耗が衝撃回数に支配されるとなると原因としてまず考えられるのは、工具が被削材に衝撃的に切込むときの欠けである。図2中に印を変えた点をプロットしているが、これはチップング防止に効果があると言われる切れ刃ランド²⁾あるいはプリホーニング³⁾の効果を調べたものである。一期摩耗域ではランド角 θ の小さいものの摩耗がわずかに大きいようでもあるが、下向き削りでは θ の大きいものほどチップングが生じやすく逆効果でさえあった。

切削速度 291 m/min で被削材長さ 270 mm 削った後の初期チップングを観察すると、上向き削りの場合 $\theta=0^\circ$ のものに小さな刃こぼれがわずかに生じていたが、この欠けもその後それほど進行しない。また他のランド角では全く欠けは生じなかった。下向き削りも同様にランドによる差はないが、この場合被削材に最初に接触する刃先側(図1)ではなく、刃先から離れた横切れ刃部に欠けが生じていた。 $\theta=45^\circ$ になると損傷は非常に大きい。欠けは衝撃的に食いつく刃先側ではなく、刃先から離れた横切れ刃であることが興味あることである。切削速度を種々変えた実験結果を総合して考えると、欠けは上向き削りでしかも切削速度を約 300 m/min 以上に選べばほとんど生じない。すなわち、本実験のような軽・高速

フライス削りでは食付きはじめの衝撃力によるチップングはそれほど問題にしくても良いことがわかった。下向き削りで欠けが生じているのは食付き始めの衝撃力ではなく、切れ刃の抜けがけに問題があるのである⁴⁾。

3.3 二期摩耗域の損傷

図5は二期摩耗域におけるフランク摩耗面の写真である。高速になると欠けは生じないが、次第に小さなみぞ状の摩耗が顕著になってくる。図5の(b)をよくみると、刃先側にはみぞ状摩耗が生じているが、横切れ刃の刃先より離れた部分はあたかも正常な摩耗のようにみえる。この二つの部分のSEM写真が図6である。刃先側ではかなり発達したき裂がみられ、これが完全に切れ刃陵に達している。正常摩耗と思われる図(b)の場合も無数のき裂が生じているが、ただこのき裂は切れ刃陵には達しておらず、亀甲状をしている。

図7は前図より更に高速の場合である。前述の傾向がよりはっきり現れており、き裂の端の部分に付着物があるいはこすられたと思われるあとがはっきりついている。また深いき裂の内部をみると、セラミック粒子がかなり小さな単位で浮いているように思われる。

みぞ状摩耗は温度が高いと思われる刃先部とか高速域ほど顕著である。また図3~4をみると変曲点は送りにはほとんど影響されないが、わずかではあるが高速のものは少々はやく現れる傾向がある。この傾向は被削材-工具熱電対法で切れ刃温度を調べた⁴⁾傾向、すなわち切削温度は送りを少々変えた程度ではほとんど変わらず、切

図6 摩耗局部拡大写真(1)

削速度によって多少変わる傾向と似ている。すなわちみぞ状摩耗は温度に關係していることがわかる。

二期摩耗域の損傷は切削回数と温度に影響されていることから、切れ刃の繰返し加熱冷却による熱疲労が関係

しているものと思われる。

3.4 摩耗機構の考察

図8は変曲点近くの一期摩耗域における逃げ面の写真である。摩耗と思われる部分の中央付近に小さなき裂が発生しているが、このときはまだき裂の端は切れ刃陵に達していない。一期摩耗域の摩耗はその幅の大きい割には摩耗痕跡のはっきりしておらず、初期にはわずかに擦られた跡があると思われる程度のものが多い。また図4をみると高速ほど一期摩耗域の摩耗幅が大きく現れている。

李らの研究⁵⁾によると逃げ面最高温度を示す位置は切れ刃陵より少々内側へ寄った点であり、またその値もすくい面温度とあまり変わらない。本切削においても切れ刃陵より少々離れた逃げ面上のある位置が最高温度になり、ある回数切削した後亀甲状の微細なき裂がその位置付近に生じるものと思われる。この微細な亀甲なき裂は切削が進むにつれて徐々に成長し、またき裂が発達すると田の干割れのように端の部分がそりかえり、条件によってはこの部分が切削中に被削材と接触する(図7)ようになっているのが一期摩耗域であろうと思われる。したがって一期摩耗域の摩耗幅として測定したのは摩擦によってすり減った部分だけではなくこのき裂の発生した部分までの幅を含めて測定していたものと考えられる。このため一期摩耗あるいは初期摩耗がみかけ上大きく測定されたのである。

図9はすくい面の亀甲なき裂である。逃げ面のき裂と本質的には同じ性質のき裂であると考えられる。

上向き削り, $V=581 \text{ m/min}$, $S=0.5 \text{ mm/rev}$, $\theta=20^\circ$

図7 摩耗局部拡大写真(2)

上向き削り, $V=407$ m/min, $S=0.5$ mm/rev, $\theta=30^\circ$

図8 一期摩耗域における逃げ面

上向き削り, $V=407$ m/min, $S=0.5$ mm/rev, $\theta=0^\circ$

図9 すくい面の拡大写真

き裂が発達して一方の端が切れ刃稜に達するようになると、二期摩耗域に入る。図10はき裂が切れ刃稜に達した部分の写真である。(a)の状態のものを塩酸で洗うと(b)のようになる。逃げ面に付着物がかなり付いていることがわかる。き裂が切れ刃稜に達すると、この部分から被削材の一部などが逃げ面に流出し、セラミック工具の逃げ面に付着したり、流出の際セラミック粒子の一部を剝離させてき裂の縦みぞを発達させるため、みぞ状摩耗が顕著になるものと思われる。

亀甲状き裂や微細なみぞ状摩耗が生じて、本実験範囲ではこのために破損するようなことはなかった。鳴瀧ら¹⁾がすくい面摩耗機構で述べているように、発生したき裂は工具内部へ入り込む深いき裂ではなくごく表面だけに生じる微細なき裂で、摩耗の促進にのみ影響していると考えられる。

3.5 他工具材種との比較

塩酸処理前

塩酸処理後

上向き削り, $V=407$ m/min, $S=0.5$ mm/rev, $\theta=15^\circ$

図10 逃げ面の付着物

図11は超硬(P10)の写真である。切れ刃直角のみぞが生じており、セラミックに比べてその数は少ないがかなり深く、セラミックのようにみぞの最終端に付着物らしいものは見られない。また亀甲状き裂も見当たらないし、粒子が浮いたり剝離した形跡もない。このためにき裂が生じてもそのために摩耗速度が急変しないものと思われる。

図12は超硬P10、純アルミナ系セラミックのフランク摩耗進行状況を示したものである。純アルミナ系も変曲点が現れているが、超硬では変曲点が現れない。摩耗域が二つに分かれる現象はセラミック工具の特徴であると思われる。

図13は $V_B=0.2$ mmを基準にして $V-T$ 線図を描いたものである。仕上平フライス形切削では切れ刃を鋭利に保つ必要があるが、高速域ではセラミック工具が優れていることがわかる。セラミック工具は二期摩耗域で摩

上向き削り, $V=291$ m/min, $S=0.5$ mm/rev, $\theta=0^\circ$

図 11 超硬 (P 10) 工具の逃げ面摩耗

図 12 工具材種とフランク摩耗

図 13 工具材種と寿命時間

耗速度が増大するので, 図 2~4 をみたかぎりにおいては高速フライス削りに用いる工具材種としては少々問題があるようにも思われるが, 一期摩耗域はみかけ上の摩耗であって二期摩耗域でのそれを真の摩耗と考えるべきではなからうか. そしてこの摩耗量は図 13 のように超硬より少ないのである.

4. む す び

カーバイド系セラミック工具による高速平フライス形切削によって S 53 C 焼準材を切削し, 工具損傷を調べたことがわかった.

- (1) 高速平フライス形切削に用いる工具材種としては, カーバイド系セラミック工具は超硬工具に比べて寿命が長く優れている.
- (2) セラミック工具を用いた高速平フライス形切削ではすくい面より逃げ面の摩耗が工具寿命を支配する.
- (3) 逃げ面摩耗は一期と二期摩耗域に分かれている.
- (4) 一期摩耗域とは主として逃げ面に亀甲状き裂が発生したために摩耗幅が生じた領域で, そのき裂の端は切削陵に達していない. このき裂の端が切れ刃陵に達すると, これが微細なみぞ状摩耗に発達する. このみぞ状摩耗が主として現れる摩耗域を二期摩耗域と呼んだ.
- (5) 二期の摩耗量は衝撃回数と切削温度に影響されているが, き裂のために欠けが生ずるようなことはなかった.

文 献

- 1) 鳴瀧則彦, 越智秋雄, 浦辺哲士: S 45 C の正面 フライス切削時のセラミック工具の損傷, 精密機械, **43**, 5 (1977) 591.
- 2) 日本機械学会: 機械工学便覧, 日本機械学会 (1977) 17-124.
- 3) 精機学会: 新訂精密工作便覧, コロナ社 (1970) 183.
- 4) 坂本正史, 中村 平, 高松哲生: 高速フライス削りに関する基礎的研究——上向き削りと下向き削り, 精密機械, **45**, 7 (1979) 801.
- 5) 李 用成, 平元一之, 佐田登志夫: 定常切削における切削温度の解析と測定, 精密機械, **44**, 12 (1978) 1428.