CBN 工具による焼入鋼の断続仕上切削に おける刃先形状の効果*

新谷 一博** 藤村 善雄** 河端 裕**
五十嵐 正*** 鴻野 雄一郎† 柴田 宗一††

Effect of CBN Cutting Tool Geometry on
Intermittent Cutting of Hardened Steel

Kazuhiro SHINTANI, Yoshio FUJIMURA,
Hiroshi KAWABATA, Tadashi IGARASHI,
Yuuichiro KOUNO and Souichi SHIBATA

The CBN tool can be used for a fine cutting of hardened steel in turn for grinding. However, for an intermittent cutting, this tool comes often to over the life in an extremely short time owing to occurrence of cutting edge break. In this paper, so as to get long tool life and good surface finish, influences of tool geometry, collision means of tool with workpiece and frequency of collision are investigated. As a result of these consideration, a new tool of very long life was contrived. Main results are as follows: (1) In cutting of the shaft with two key ways the tool reached life because of flank wear. A recommendable negative land angle is around from 25° to 35° . (2) In cutting of

the spline shaft having many collisions in number, the tool life is over in a very short time due to an edge failure. A break happens on flank face when the tool collides at tool face (Type I), and a flaking on tool face when at cutting edge (Type II). The latter gains an advantage over tool life and surface finish, and yet its life is short. (3) The new tool has a land on flank face, and is used for cutting of a spline shaft. Its failure manner is Type II. A flaking happens on the face successively at some time interval, and the cutting edge is self-sharpened at each time. Due to this action the tool life was much prolonged by 17 times of the case (2). (4) In the above case, when lifted the real cutting edge after flaking up to the initial edge height at a suitable time interval, the tool life increased further by 26 times.

Key words: CBN tool, finish cutting, hardened steel cutting, intermittent cutting, tool geometry, long life tool, new tool

1. 緒 論

近年、高精度でしかも高能率が要求され、高硬度鋼の切削においては反応性が少なく高硬度を持つ CBN 工具が注目されている。また一方で、焼入鋼の研削を旋削に代える試みもなされている。しかし、これに関する研究は連続切削を対象としたものが多く^{1)~3)}、じん性に劣る CBN 工具での断続切削は、切れ刃欠損を生じやすいため不向きとされていた。連続切削の場合、既報⁴⁾の研究で、刃先形状を工夫することにより、工具寿命に影響を及ぼす切削初期のチップング防止に十分役立つことが分かったので、断続切削においても刃先形状を工夫することにより、切れ刃欠損の防止を試みるのが本研究の

目的である。

加工材として焼入鋼を選び、キー溝付軸とスプライン軸を切削して衝撃密度の影響も考察する。そして、この研究の結果から高寿命の刃先形状をもつ新工具を考案しこれの効果についても述べる。

2. 実験方法

被削材は図 1 に示すような 3 種の形状を有する SCM 420 材を浸炭焼入 {C 0.97%, Cr 1.09%, Mo 0.16%, HV 680~720, 有効深さ 1 mm} したものをを用いた。工具刃先形状および切削条件は図 2、表 1 のようである。N 工具は通常用いられるもの、W_r 工具は寿命延長のため新しく考えた工具で、逃げ面に切削により摩耗ランドを設けた。後者については 3.3 項で述べる。N 工具のネガランド角 NL は 15° から 45° まで 10° 間隔とし、ランド幅 W_L は 0.2 mm と大きくとった。実際のすくい角はランド角にホルダの取付角 -5° を加えたものとなる。また、切れ刃稜のホーニング半径 r_H 、ノーズ半径 r_n 、ランド幅 W_L は各々連続切削試験の切削性能より得た最適値 0.05, 0.8, 0.2 mm とし、工具材は同一ロットのもの

* 原稿受付 昭和 59 年 2 月 15 日、昭和 58 年度精機学会
秋季大会学術講演会 (昭和 58 年 10 月 16 日) にて発表

** 正 会 員 金沢工業大学 (石川県石川郡野々市町扇が丘
7-1)

*** ヤマハ発動機(株) (浜北市中条 1280)

† 正 会 員 住友電気工業(株) (伊丹市昆陽字宮東 1)

†† 正 会 員 中村留精密工業(株) (石川県石川郡鶴来町熱
野町ロ-15)

Fig. 1 Workpiece geometry

Fig. 2 Tool geometry

Table 1 Cutting condition

Tool material	CBN (BN+TiN)
Tool geometry	
Negative land angle NL	15-45°
Nose radius r_n	0.8 mm
Honing radius r_H	0.05 mm
Land width W_L	0.2 mm
Tool holder	N 22 R-44
Cutting condition	
Cutting speed V	1.67 m/s (1.00 m/s, 2.50 m/s)
Feed rate f	0.1 mm/rev
Depth of cut t	0.1 mm

のを用いた。切削条件は研削の代替を目的として、精密仕上とした微小切削で、実験を通じて一定とした。

測定は逃げ面摩耗幅 V_B をオリンパス光学製工具顕微鏡で、十点平均粗さ R_z および工具クレータ摩耗断面プロファイルを東京精密製表面粗さ計サーフコム 304 B で、それぞれ切削距離 $L=50, 100, 500, 1000, 1500, 2000$ m、以後 1000 m ごとに（一部の試験では 10 m ごとに）測定した。そして、工具損傷の観察には走査型電子顕微鏡（日立 HXM 2 B 型）を、切削力はキスラー社製の圧

Fig. 3 Relation between tool life and negative land angle

電型工具動力計と エヌエフ回路設計ブロック社製 WH-841 型ウェーブメモリーを用いて測定した。

工具寿命は、 R_z が $4.0 \mu\text{m}$ を越えたときをもって判定し、その間に生じた $V_B=0.25 \text{ mm}$ の点を摩耗から見た寿命値と定めた。

3. 実験結果

3.1 2本溝材切削におけるランド角の効果

図 3 は 2 本溝材を切削したときの工具ネガランド角と、実切削距離との関係を示す。これによれば、 $NL 25^\circ$ から 35° の角度で V_B 、 R_z 寿命値はともに最長値を示し、それより大きくても小さくても性能は劣る。この様子は比較のため連続切削における L ($V_B=0.25 \text{ mm}$ と $R_z=3.0 \mu\text{m}$) をそれぞれ一点鎖線と二点鎖線で並記した結果と同じ傾向を示す。しかし、連続切削に比し断続切削では、図でばらつき範囲を示すように、特に R_z 寿命値は不安定で、 V_B 寿命値よりも短くなることが多い。このばらつきには、被削材溝部に生じたかえり（最大時で 0.2 mm 程度）を巻き込むことによって起こる切れ刃稜の脱落、したがって切れ刃プロファイルのくずれが原因となっていることが多い。

工具刃先観察によれば、この切削では刃元より接触が始まるので、図 4 (a) に見るようにすくい面上にクラックを生じている。そして、ここで用いた精密仕上条件では、クラックはチップングや欠損に発展せず、すべて漸進摩耗により工具寿命となった。工具寿命は連続切削よりやや劣るものの、これに近い性能をもつので、適切な工具刃先角度を使用すれば、研削の代替切削として十分実用可能であると考えられる。

3.2 スプライン軸切削における接触形式が切れ刃欠損形態と切削性能に及ぼす影響

衝撃密度が高く、過酷と思われる図 1 に示した A と B

Fig. 4 Failure manner of cutting edge (type I)
(a) Crack initiation on tool face, (b) Break of tool flank

の2種のスプライン軸を切削する。いずれも溝数は6個で、B軸ではスプラインコーナ部に45°の面取りがあるため工具は刃先より被削材に接触し、A軸ではこの面取りがないので刃元から接触が始まる。使用した工具のネガランド角を25°および35°とし、ランドが被削材表面となす接触角を2種に変えて実験したが、スプラインAでは刃元から、Bでは刃先から接触が始まることに変わりは無い。

この結果は図5に示すようであり、図3に示した連続切削の場合に比べて、工具寿命は約1/30に落ちる。スプラインBでは、刃先角が大きくなっているNL35°の方が、 V_B の摩耗速度が小さく、寿命がわずかに長い。しかし、いずれもその後すくい面に剥離が生ずる。スプラインAでは、 V_B 寿命値に達しないうちに後で述べるI形欠損を発生して逃げ面が剥げ落ち、刃先プロファイルがくずれてRz寿命となる。このように、接触様式に応じて刃先の欠損様式も画然と異なった。これをそれぞれ、刃元接触で起こるものをI形、刃先接触で起こるものをII形欠損と呼ぶことにする。I形では図4のように、すくい面にクラックを生じ、これが発展して逃げ面が欠損する。II形では図6のようにネガランドと逃げ面の境界、すなわち切れ刃稜付近にクラックを生じ、これが進展してすくい面に剥離(図10(a)参照)を生ずる。I形では切れ刃プロファイルがくずれて、仕上面粗さが急増して精密仕上ではRz寿命となる。II形では、その後も切削を続行できるが、剥離によって刃先角が小さくなり、刃先強度が低下しているため、その後逃げ面にI形欠損を生ずる。

図7は欠損形態IとIIを生ずる場合の仕上面粗さ

Fig. 5 Development of flank wear with impact times

Fig. 6 Failure manner of cutting edge (type II)
(Crack initiation on cutting edge)

の変化を比較している。逃げ面が欠損するI形欠損が生ずる場合には、切削距離35mで仕上面が悪化している。これは、欠損に至らなくとも切削続行によって表面にむしれを生じたものであり、2本溝材切削の所で述べたように、大きなかえりを生じ、その巻込みによって起こる。その発生割合は約8%程度である。図のL=35mにおける大きな粗さ変化の部分は、このかえりに原因している。これに対し、II形が生ずる刃先接触の場合では、かえりは生じず仕上面粗さの変化は少ない。

以上から、精密仕上では刃先から接触する方が有利といえる。しかし、いずれの場合においても寿命が短く、しかも寿命が欠損によって決まることから、この対策を考えた工具の考案が必要となる。

3.3 新工具による寿命延長効果とその機構

Fig. 7 Surface roughness profile at cutting length

Fig. 8 Increase of flank wear width with impact times

Fig. 9 Variation of surface roughness with impact times

前項で述べたように、II 形欠損ではすくい面剥離が起こって切れ刃の自生作用が起こる可能性をもつ。このとき、その後 I 形欠損で寿命となるが、これを回避し、かつ積極的にすくい面剥離が次々起こって自生作用が生ずるようにしてやると、長寿命と仕上面粗さの維持が期待できる。このために、逃げ面にランドを設けたのが新たに考案した工具である。この工具をそのままの状態を使う場合を W_{f1} 、自生作用で低下して行く切れ刃をバイトの心高を上げることによって修正する場合を W_{f2} と名付ける。

次にこの効果を従来の工具 N との比較において述べよう。図 8 と図 9 は、 V_B と R_z の衝撃回数 T (実切削距離 L) に対する変化を示している。 V_B は、摩耗部の実際長さ (斜線で示す) と切れ刃の低下量との和で与え、図中のプロットはこの V_B を示している。 N 工具は極めて短寿命で $T=6.5$ 万回で II 形欠損を起こし、その後わずか数十回で I 形欠損を起こして寿命となっている。ところが、 W_{f1} 工具は 65 万回で最初の II 形欠損が起こるが、その後も切削可能で数回の剥離の後、ついに 112 万回で I 形欠損を起こして寿命となった。この寿命は N 工具の約 17 倍に当たる。図 9 はこの間の R_z の変化を示している。

一方、時々心高修正を行った W_{f2} 工具は 170 万回でやはり I 形欠損を生じて寿命となった。これは N 工具の寿命の約 26 倍に当たる。この間の心高修正時期は図 8 に黒丸付縦線で示してある。図 9 では切れ刃の自生作用によって仕上面粗さが向上している様子が示される。前述

Fig. 10 Failure manner of type II in new tool repeating rectification of real cutting edge height (W_{f2} tool)

(a) First flaking on tool face, (b) Step-like tool face at end of tool life

Fig. 11 Weibull plot of impact times until tool edge fracture

の寿命点すなわち I 形欠損を発生するのは、剥離によって生じた切れ刃が逃げ面ランドの下端に達したときと考えるとよい。また、このときのすくい面は図 10 (b) のように次々と起こる剥離によって階段状となっている。

図 11 はすくい面に剥離を生じたときの衝撃回数を、ワイブル確率紙にプロットしたものである。 N 工具に比べ、 W_f 工具の方が第 1 回の剥離を生じる衝撃回数が非常に大きくなるのは、逃げ面ランドを設けるなどして刃先形状を変えたために、工具刃先内の応力分布が変わったためである。これは次節で考察する。そして、 W_f 工具では、第 2 の剥離が第 1 のものより割合に時間を要せずして起こることもこの図よりわかる。ここで W_f 工具は $NL 35^\circ$ の工具より作製し使用したが、 $NL 25^\circ$ 工具においても同傾向を示し、切込みを 0.15 mm の条件での使用でも同等の効果が得られた。また、本実験では、切削速度として摩耗進行速度の小さい 1.67 m/s を採用したが、参考のためこれより低速の 1.00 m/s と高速の 2.50 m/s について同図に付記した。 N 工具では切削速度を増減しても短寿命で、その差は少ない。一方、 W_f

Fig. 12 A representative of finite element analysis model

Fig. 13 Major principal stress distribution in new tool

工具を用いた場合切削速度を増減しても性能は改善され、N 工具より寿命は延びる。特に、この図より $V=1.0\sim1.67$ m/s の切削速度領域で、その効果が大きいことがわかる。

工具心高調節を行う W_{f2} 工具の優秀性は上述したようであるが、実際作業において応用するためには、付与する逃げ面ランド幅、切れ刃高さの低下を見出し修正時期を定める技術、心高修正を行う手段が問題となる。これが応用上の宿題といえる。

3.4 N 工具と W_f 工具が刃先から接触する場合の工具内応力分布の比較考察

逃げ面ランドをもつ W_f 工具では、図 11 でみられたように、すくい面剝離 (II 形欠損) が N 工具よりも 20 倍近くも遅れる。逃げ面ランドの存在が工具内応力分布に影響を与えていると考え、有限要素法によって応力分布を求めてみた。 W_f 工具と N 工具はそれぞれ図 12 に示すようなモデルで四角形要素により分割した (N 工具は 176 要素, 575 節点, W_f 工具は 140 要素, 463 節点である)。ここで使用した材料特性値はヤング率 $E=610$ GPa, ボアソン比 $\nu=0.22$ とした。図 13 は W_f 工具、図 14 は

Fig. 14 Major principal stress distribution in usual tool

N 工具の応力分布である。 σ_t と τ_t はすくい面上に働く垂直および接線応力で、切削開始より接触が完了した時点の値を、この面で三角形分布⁵⁾⁶⁾と考え、その積分値が実験で求めた切削抵抗に対応するように定めた。接線応力 τ_t は逃げ面側で負となる⁷⁾⁸⁾が、図では表現の都合で正側に描いてある。最大主応力は図で一点鎖線で示しているが、その高い値は逃げ面の表面付近に限られる。この部分における主応力の働く方向は図示のようで、これに直角な方向に実際の欠損が起っており、II 形欠損の発生が理解できる。

逃げ面ランドのない N 工具の場合には、図 14 に見るように、切れ刃から逃げ面にかけて高い主応力の働く部分が多くなる。これが W_f 工具より早期に II 形欠損が起る理由となろう。

4. 結 論

焼入鋼の研削代替としての CBN 工具による精密切削は、断続切削の場合欠損により短寿命となることが多い。刃先の接触開始方式と衝撃回数が欠損様式、寿命、仕上面粗さに及ぼす影響を調べ、その結果から格段に高寿命となる、刃先形状を工夫した新形工具を考案した。

また主な結果は次のとおりである。

- (1) 衝撃回数の少ないキー溝削の切削では、工具寿命は漸進摩耗により決定され、最適ネガランド角は連続切削同様 $25\sim35^\circ$ 前後となる。
- (2) スプライン軸のような衝撃回数の多い材料の切削では、欠損によって工具寿命となる。また、欠損の様子は工具の接触開始方式で異なり、刃先から接触するとすくい面剝離が起こるが、この場合の方が工具寿命と仕上面粗さで優れる。
- (3) 逃げ面にランドをもつ新工具は、刃先から接触が

始まる断続切削の場合、すくい面剥離によって自生発刃を繰り返す、実験例では(2)の場合に比べ工具寿命は約17倍となった。

- (4) この工具で、剥離による刃先高さ低下を心上げによって修正を繰り返すと、工具寿命はさらに増し、実験例では約26倍となった。

最後に、本研究の遂行にあたり御助言下された大阪大学基礎工学部山本明教授、実験に協力下された金沢工大山下博史、奥野恭雄、堀内信夫の諸君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) G. Chrysosolouris: Turning of Hardened Steel Using CBN Tools, J. Appl. Metal Working, 2, 2, (1982)100.
- 2) 財満鎮雄, 鈴木正志, 南 立作, 山田 茂: CBN 工具における工具摩耗についての考察, 日本金属学会誌, 47, 1 (1983) 80.
- 3) 鳴瀧則彦, 山根八洲男, 武良睦郎: CBN 工具の摩耗, 精密機械, 45, 2 (1979) 201.
- 4) 藤村善雄, 新谷一博, 田中豊二, 坪田好史: CBN 工具による焼入鋼の仕上削り, 昭和57年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1982) 1014.
- 5) 山本 明, 中村 示, 外山和己, 河村一郎: 二次元切削時におけるすくい面上応力分布モデルの提案, 精密機械, 45, 11 (1979) 1370.
- 6) 井原 透, 白樫高洋, 白井英治: 断続切削における切れ刃欠損の解析的予測に関する研究, 精密機械, 46, 5 (1980) 591.
- 7) 山本 明, 中村 示: 微小切削における切削開始の条件について (第3報), 精密機械, 36, 3 (1970) 176.
- 8) 小野浩二, 河村未久, 北野昌則, 島宗 勉: 理論切削工学, 現代工学社 (1979).

編 集 後 記

本号小特集の企画原案を作成したことで筆をとらせて頂きます。

最近、産業界では、光技術、コンピュータ技術、精密加工技術、エレクトロニクス技術などが特に注目されている。本号では、産業界で注目している先端技術のうち、光技術、精密加工技術、エレクトロニクス技術の三つが密接にかかわっているテーマに的を絞って“光メモリー・光通信と超精密技術”と題して、小特集を企画立案致しました。

現在研究開発が進められている光メモリーでは、ビデオディスク、コンパクトディスク、コンピュータディスクその他多数ありますが、これらの先端商品を開発するのに必要な技術、また光通信では現在話題になっている日本電信電話公社の提案している高度情報通信システム (INS) 計画推進の中核になる光通信関連部品、光通信方式、光通信の応用などの技術である。これらの先端技術商品の開発での技術動向は精機学会の会員が興味をもっているテーマであると考え、このテーマについて展望、解説することにしました。

本号の小特集企画に関しては、私自身企画を立案致し

ましたが、企画案に直接かかわる研究をしていないのですが、従来から光メモリーや光通信の技術の動向には非常に関心をもっていたこと、またこのテーマなら精機学会の専門分野領域に大いにかかわりがあることなどを考えました。このため、企画原案作成にあたっては、日本電信電話公社の茨城電気通信研究所、武蔵野電気通信研究所の方々を始めとして、電子技術総合研究所の三橋室長などその方面の専門家に貴重な御助言を頂きましたし、また執筆をお願い致しました先生方には、忙しい時期に、短い期間で執筆をお願い致したにもかかわらず心よく協力して頂きました。この誌面を借り厚くお礼を申し上げます。

最後に、会誌編集委員の一員としてのお願いを一言つけ加えさせて頂きます。会誌の新しい企画として、昭和59年度9月よりテーマを絞った小特集が毎号掲載されていますが、一部では好評であります。会員各位はこのようなやり方についてどう思われるか、忌憚のない意見を編集委員会にお寄せ下さるようお願い致します。

(福井 雅彦)