焼入鋼の仕上切削における CBN 工具 刃先形状の検討*

新 谷 一 博** 藤 村 善 雄**

Influence of CBN Tool Geometry on Finishing of Hardened Steel by Turning

Kazuhiro SHINTANI and Yoshio FUJIMURA

On the fine turning as a substitute for grinding, the optimum geometry of CBN tool is suggested from the view-points of tool wear and surface finish. In this test, Cr-Mo steel bar carburized and hardened was cut at cutting speed of 1.67 m/s, cutting depth of 0.1 mm and feed rate of 0.1 mm/rev. And, tool geometry was varied at negative land angle NL, nose radius r_n and honing radius r_h . The results are as follows: (1) Cutting performance is best at NL from 30° to 35°. The land width is desirable to be taken larger than tool-chip contact length. (2) r_n of 0.8 mm brings longer life from the stand point of surface roughness. (3) r_h of 0.05 mm is recommended in order to remove fully the grinding scratch. (4) Flank wear rate is accelerated by occurrence of cutting edge chipping often resulting from welding.

Key words: CBN tool, negative land angle, nose radius, honing radius, tool geometry, turning, wear mechanism, hardened steel

1. 結 言

近年、新工具材種の開発はめざましく、特に高温硬度が高く、高温での鉄鋼材との反応が少ない CBN 工具で、高硬度材を切削した場合、優れた性能を示す^{1)~3)}ことが知られている。一方、焼入鋼の加工は従来研削作業で行われてきたが、これより生産性の点で優れた切削加工への転換が試みられており、この切削加工には CBN 工具を用いることは有効だと思われる。しかし、現在市販されている刃先角度の CBN 工具(ネガランド角 NL 15°, ランド幅 W_L 0.06 mm)は、使用工具機械や切削条件の相違などにより寿命に大きなばらつき⁴⁾を生ずることや、工具が高価なことなどから切削性能についての研究報告がはなはだ少ない。また、焼入鋼の加工では平均ひずみの小さいのこ歯状切りくずを生じ、大きな負のすくい角の工具を用いても良好な切削性能を得る⁵⁾ことは、刃先角を大きくできるのでじん性に劣る CBN 工具にとって有利となる。

そこで本研究では、焼入鋼の仕上切削に適当な刃先形状を求めるために、すくい角(ネガランド角)、ノーゼ半径、ホーニング半径が工具摩耗と仕上面粗さに及

ぼす影響を明らかにし、さらに工具寿命に影響力の大きいネガランド角の変化を例にとって工具摩耗機構についても検討を加える。

2. 実 験 方 法

被削材は $\phi 98 \times 450$ mm の形状を有する SCM 420 材を浸炭焼入れ[†](C 0.97%, Si 0.29%, Mn 0.86%, Cr 1.09%, Mo 0.16%) したものをを用いた。工具刃先形状および切削条件は図 1、表 1 のようである。工具材は CBN 粒子を TiN で焼結した (60 BN + 40 TiN) もので、その組成像も表 1 に付記する。ランド幅 W_L は 0.2 mm と市販の 0.05~0.06 mm のものより大きくとることによって、切りくず接触長さより大きくしてある。ランド部がすくい面となるが、そのすくい角はネガランド角にホルダの取付角-5°を加えたものである。

ホーニング半径は市販品では一般に小さく取られているが、本実験では # 800 のハンドラップで各値が ± 0.01 mm の精度に入るように、オリンパス光学製工具顕微鏡とニコン製投影機を併用して管理した。なお、工具材は同一ロットのものを使用した。

* 原稿受付 昭和 59 年 6 月 2 日、昭和 57 年度精機学会春季大会学術講演会(昭和 57 年 3 月 24 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)

† 1253 K で 6 h 浸炭, 1203 K で 4 h 拡散加熱, 1103 K より油冷し 473 K で 1.5 h 焼戻しを行った。そして、実験には有効硬化深さ 1 mm (HV 680~720) の部分を使用した。

Section A-A'

Fig. 1 Tool geometry

Table 1 Cutting condition

Tool geometry	(1)	(2)	(3)
Negative land angle : NL	15° - 45°	35°	35°
Nose radius : r_n	0.8 mm	0.8-1.6 mm	0.8 mm
Honing radius : r_H	0.05 mm	0.05 mm	0.02, 0.05, 0.10 mm
Land width : W_L	0.2 mm (0.06 mm)	0.2 mm	0.2 mm
Tool holder	N22R-44		
Tool material	CBN Tool (60BN+40TiN)		
Composition image of CBN tool			
Cutting speed	1.67 (2.33) m/s		
Feed rate	0.1 mm/rev		
Depth of cut	0.1 mm		

切削条件は研削の代替を目的としているので、送り 0.1 mm/rev、切込み 0.1 mm と精密仕上の条件とした。切削速度は NL 25° と 35° を使用した予備実験の結果より、切削距離に対して摩耗進行の少ない 1.67 m/s の条件で主に行い、一部比較のため 2.33 m/s の条件も使用する。

逃げ面摩耗幅は、オリンパス光学製工具顕微鏡で、境界摩耗部を除外した部分の平均摩耗幅を新品時の切れ刃稜より測り、これを V_B とした(図 2 参照)。十点平均粗さ R_z および工具クレータ摩耗断面プロフィールを東京精密製表面粗さ計サーフコム 304 B で測定し

Fig. 2 Worn tool edge profile in section at right angles to cutting edge

Fig. 3 Development of flank wear with cutting length at cutting speed of 1.67 m/s

た。これらの測定間隔は切削開始より切削距離 $L=50, 100, 500, 1000, 1500, 2000$ m 以後 1000 m ごとである。工具摩耗部の観察には走査型電子顕微鏡(日立 HXM 2 B 型)を、切削抵抗はキスラー社製の圧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。

工具寿命は摩耗寿命と粗さ寿命を考え、それぞれ $V_B=0.25$ mm, $R_z=4.0$ μ m を越えた点をもって判定した。

3. 実験結果

3.1 ネガランド角(すくい角)の影響

本実験では、ネガランド角 NL を変化しても、常に連続したのこ歯状切りくずを発生し、摩耗はすくい面と逃げ面の両方で起こる。図 3 は、表 1 に示した(1)の工具を用い、ネガランド角 NL を 15° から 45° まで 10° 間隔で変化したときの V_B 摩耗曲線の一例を示す。これから、いずれの NL においても初期摩耗の大きが大きく工具寿命に影響を及ぼし、定常域の摩耗速度だけでは寿命の予測がつきにくいこと、また、NL 15° の場

Fig. 4 Relation between tool life ($V_B=0.25\text{ mm}$) and negative land angle

合のように曲線 A, B と大きくばらつくことがあると指摘できる。そこで、各実験条件で数度の実験を行い、 $V_B=0.25\text{ mm}$ に達するまでの切削距離 L_1 によって耐摩耗性を定義することにして、これと NL の関係を求めてみると図 4 のようになる。図からわかるように NL 25° から 35° で最長寿命値を示し、それより大きくても小さくても性能は劣る。また、NL が小さくなるとばらつきが大きい。そこで、ばらつきを考慮すると 35° 付近が最適値と考えられる。

本実験条件では、切りくず接触長さは約 0.12 mm となり、市販工具のランド幅は 0.05~0.06 mm とこれより小さい。すなわち、市販工具を使用すると本実験の条件では、切りくず接触長さが拘束される。NL=15° と 35° の場合についてその寿命を調べてみると、図 4 に白丸で付記するように本実験の場合よりも L_1 は短く、ランド幅を大きくとるほうが有利と思われる。

一方、仕上面粗さ R_z は、図 5 に示すように、図 3 で摩耗進行の速かった NL 15°_A の工具が切削初期より

Fig. 5 Variation of surface roughness with cutting length

急激な増加をきたし、切削距離 $L=4500\text{ m}$ ですでに $R_z=0.4\text{ μm}$ を越える。これに対して、そのほかの工具ではすべて摩耗によるノーズ半径増大のため R_z が減少、のち前逃げ境界摩耗が進むことによりふたたび増加することが、図 6 の切削進行に伴う粗さプロフィールより推測される。そこで、 R_z が 3.0 μm になるまでの切削距離 L_2 を定義し、これと NL の関係を調べてみると図 7 のようになる。ここでも図 4 で見た L_1 の場合と同様に、NL が小さいほどばらつきが大きいこと、最適値が NL 35° 付近にあることを指摘できる。

以上のように、工具摩耗と表面粗さの両面から NL 30~35° が最適値となるが、この考察は 4 節において行うこととする。

3.2 ノーズ半径の影響

ホーニング半径 $r_H=0.05\text{ mm}$ 、ネガランド角は前項で得た最適値 NL 35° 一定として、ノーズ半径 r_n を 0.8, 1.2, 1.6 mm の 3 種に変化し (表 1 の (2))、 V_B が 0.25 mm に達するまでの切削距離 L_1 と R_z が 3.0 μm に達するまでの切削距離 L_2 を調べた。この結果

Fig. 6 Surface roughness profile at various cutting lengths

Fig. 7 Relation between tool life ($R_z=3.0\ \mu\text{m}$) and negative land angle

Fig. 8 Relation between tool life and nose radius

を図8に示す。図において耐逃げ面摩耗性ではノーズ半径の大きさによってあまり差は見られない。しかし、仕上面粗さ寿命では r_n が小さいほど優れる。これは図

Fig. 10 Relation between tool life and honing radius

9の工具刃先の観察よりわかるように、 r_n の大きな工具の方が前逃げ境界摩耗の発達が早いことが原因しており、この早い理由としてはノーズ半径の大きな工具では、切取厚さが薄くなり、寸法効果の影響が強く現れたためと考えられる。

3.3 ホーニング半径の影響

ネガランド角とノーズ半径のそれぞれの最適値 NL 35°, r_n 0.8 mm の条件の下で、ホーニング半径 r_H を 0.02, 0.05, 0.10 mm と変化させて (表1の(3)) 各々の切削性能を比較した。この結果を図7と同様に L_1 , L_2 とホーニング半径との関係で表したものが図10である。図より r_H 0.05 mm がばらつきの少なさと寿命より最も性能が良いことがわかる。これは、 r_H 0.10 mm の工具では切込み量の大半がホーニング部での切削となるため、NL を大きくした NL 45° の工具と似た特性を示すものと思われる。また、ホーニング半径を小さく 0.02 mm としたものは、ばらつきが大きく短寿命となるものも現れた。そこで、このばらつきで短寿命となる原因を調べるために、使用前の r_H 0.02

Fig. 9 SEM figures of cutting edges after cutting

Fig. 11 Typical chipping observed at new cutting edge

mm 工具の刃先を観察したところ刃先稜部にマイクロな欠けが数か所観察された（図 11 参照）。これは、切れ刃研磨時に切れ刃稜に生じたチップング等の大きさが、0.01～0.03 mm 程度あるため、0.02 mm のホーニング半径量でこれを完全に除去できず、残留したチップング跡が起点となって摩耗が促進され、工具寿命の短いものが現れたものと推測される。

このようにホーニング半径の工具寿命に及ぼす影響は大きく、最適値の範囲は研磨条件や切削条件によって変化するであろうが、工具研磨によるチップング部の除去という目的からいって、0.05 mm 程度のホーニング半径が必要であろう。

4. CBN 工具の摩耗機構

まず、図 3 でみた NL 15° の場合 V_B 進展の様子にばらつきが生ずる理由を考えてみよう。短寿命であった NL 15°_A と長寿命であった NL 35° の摩耗状態を比較してみると、さきの図 9 において、NL 35° の工具では

$L=15000$ m 切削後も切れ刃稜がシャープな形態をしているのに比し、NL 15°_A では刃先の鈍化が進んでいる。この様子は、すくい面摩耗部の中心部の断面プロフィールを、切削距離の進行に伴って記した図 12 においても明らかである。この摩耗進行の様子は、NL 15°_A のような切れ刃後退タイプ X と長寿命工具に見られた切れ刃残存タイプ Y に大別することができる（図 2 参照）。この X タイプでは切削初期より切れ刃下方への後退が顕著で、刃先は終始鈍化したままである。これに対し Y タイプでは切れ刃下方への後退はなく、しだいにすくい角は増しシャープな刃先となる。そして、摩耗した段階では図に見るように、いずれの NL でもすくい面プロフィールとそのみかけのすくい角は、ほぼ同じような値になる。

ここで、摩耗の増加に伴う切削力の推移は図 13 (a) のようである。NL 25～45° の工具では V_B 、NL の増加につれて背分力もほぼ一定の割合で増加するのに対して、NL 15°_A の工具では切削開始直後より V_B の増加に伴い急増する傾向を示し、 $V_B=0.05$ mm の時点で NL 45° の工具より大きくなる。これより切削初期に問題があると思われるので、NL 15° の切削開始より数 s 間における切削力曲線を示したものが図 14 で、切削開始より数 m 後に切削抵抗は数度急増している。この時の刃先の様子は図 15 のようであり、この図より切れ刃稜や逃げ面摩耗部に付く多くの付着物と矢印で示すようなチップングに伴うすくい面への引っかかり傷が観察された。これらのことから、切削開始直後切れ刃稜部に付着物が形成され、これが脱落するときにチップングを誘発し、刃先稜部の形態を変えるために切削力の

Fig. 12 Getting worse of cutting edge profile in tool cross section

Fig. 13

Fig. 14 Change of cutting force as time passes at NL 15° tool

Fig. 15 Typical chipping observed at cutting edge

Fig. 16 Increase of average tool face temperature with width of flank wear land

い面摩擦力 F_f , NL とすくい面垂直力 F_n 曲線より NL 15° 工具の F_f が他工具より大きく(摩擦係数が大きく)なるため上述のようなチッピングを生じ, その後付着・脱落へと発展することによって摩擦が加速度的に急増するものと思われる。この発生の様子は確率要因に支配され, 寿命が大きくばらつくのであろう。このような現象は NL が小さな工具に強く現れ, NL 30° を越えると工具寿命は安定する。さきに図 6 で示した表面粗さプロフィールの時間的変化でも NL 15° の異常摩擦が裏付けられる。

一方, 刃先角度の大きい NL 45° 工具や r_H 0.10 mm 工具が短寿命となる理由として, 切削温度の上昇も考えられるため, 工具-被削材熱電対法により刃先温度を測定し, 逃げ面摩擦幅との関係を求めたものが図 16 である。刃先温度は V_B の増加に伴って上昇し, NL が大

変動を生むものと思われる。ここで NL 15° 工具では刃先強度に劣ることと, 図 13 (b) で示した NL とすく

Fig. 17 Relation between tool life ($V_B=0.25$ mm) and negative land angle

きいほど、また高速ほど高い。この図でも NL 15° の異常な変化が見られる。

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、参考のために 2.33 m/s について摩耗寿命を調べてみた。この結果が図 17 で、本実験と同様な結果が得られたが、NL 15°~35° の間で L_t の差がそれほど顕著でなくなった。これは刃先温度上昇によって NL 15° の特殊な摩耗形態が改善され、NL 35° との間に耐チッピング性において大きな差がなくなったためとも解釈できる。

5. 結 言

CBN 工具を用いて焼入鋼を現在の研削加工より旋削加工への転換をはかるために、工具ネガランド角、ホーニング半径、ノーズ半径を変化し、逃げ面摩耗と表面粗さの立場から最適刃先形状を検討し、さらにこれらの摩耗機構を調べた結果次の結論を得た。

- (1) ネガランド角は V_B 、表面粗さの点より判断して 35° 付近が安定かつ最適値である。CBN 工具で

は、従来工具のように小さなランド部を設けたものは V_B の進行が速く、切りくず接触長さより大きなランド幅が必要である。

- (2) ノーズ半径は 0.8 から 1.6 mm の範囲でほとんど耐摩耗性に差はなく、表面粗さの点で 0.8 mm のものが長寿命となる。
- (3) ホーニング半径は送り $f=0.1$ mm/rev、切込み $t=0.1$ mm の仕上削りの条件下では、0.05 mm 付近が最も長寿命となる。
- (4) 刃先角の小さな (NL=15° のような) 工具では、切れ刃における付着物の付着で起こるチッピングによって摩耗が促進される。

最後に、本研究の遂行にあたり、御指導賜った大阪大学基礎工学部山本明教授、試料を提供下されたヤマハ発動機(株)、住友電気工業(株)および実験に協力下された田中豊二、坪田好史、鈴木信幸、思田春雄、白石晴盛の諸君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 鳴龍則彦, 山根八洲男, 武内睦郎: CBN 工具の摩耗, 精密機械, **45**, 2 (1979) 201.
- 2) L. E. Hibbs, Jr. and M. Lee: The Effects of Heat Treatment on the Performance of Borazon Compact Cutting Tool Machining Alloy Steels, Influence of Metallurgy on Machinability, 7, ASM, (1975) 353.
- 3) T. Hodgson and P. H. H. Trendler: Turning Hardened Tool Steels with Cubic Boron Nitride Inserts, Ann. CIRP, **30**, 1, (1981) 63.
- 4) 大谷敏昭, 藤瀬健領, 三井武良男, 横川 洪: CBN およびサーメット工具による焼入鋼の旋削, 精密機械, **48**, 5 (1982) 661.
- 5) 中山一雄, 高木純一郎, 中野 隆: 焼入鋼の研削特性, 精密機械, **41**, 8 (1975) 838.