ねずみ鋳鉄材の高速旋削加工におけるバインダレス cBN 工具の損傷特性*

新谷 一博** 高井 一輝*** 角谷 均†

Wear mechanism of binder-less cBN tool on high speed turning of gray cast iron

Kazuhiro SHINTANI, Kazuteru TAKAI and Hitoshi SUMIYA

The wear mechanism of a binder-less cBN tool on the high speed turning of the gray cast iron was investigated. The tool material was characterized to have excellent both mechanical and thermal properties, owing to microstructure consisting of single phase cBN with extremely fine grain, resulting in confined flank wear in the initial stage of turning at condition of $V=33.33\text{m/s}$. The confined flank wear extended the tool life as long as 16 times compared to that of the conventional type of cBN tool. According to the precise observation of the tool surface in the course of the turning operation, an Al_2O_3 based adhered layer from workpiece was build-up on the tool flank face. The adhered layer became to exert as a protective film which prevented direct contact between tool and workpiece, resulting in a significant decrease in tool flank wear. In the turning of the workpiece material with lower Al content, the tool life was shortened because of lower possibility of formation of the adhered layer. The tool life was also shortened at the turning speed higher than $V=40.00\text{m/s}$. X-ray diffractometry and scanning electron microscopy of the adhered layer formed in the higher speed conditions, clarified that the layer consisted of a spinel type MgAl_2O_4 crystal which has inferior mechanical properties compared to Al_2O_3 .

Keywords : binder-less cBN tool, gray cast iron, high speed machining, wear mechanism, flank wear rate

1. 緒 言

ユーザーニーズが多様化し、機械部品も多様形状へのフレキシブルな対応が望まれている。この要求に答えるためには、生産方式は少品種多量生産を支えたトランスファーラインは姿を消し、FMC レベルの自動化システムが主流を成してきている。これはフレキシブルな仕事に対しての適応性が高い反面生産能率が低いため、高生産性を維持したい欠点を有していた。この欠点を改善する手段として、省スペースで高能率・高精度を実現できる高速加工の採用が試みられている。しかし、刃先温度が高温化するため工具材料に対する負荷が大きくなるとされてきたが¹⁾、我々はねずみ鋳鉄の加工においてはこれに反し、従来型 cBN 工具 (cBN 粒子をセラミックス系バインダで焼結したものを指す)を用いて高切削速度条件で加工すると、 Al_2O_3 からなるベラグが切れ刃から逃げ面摩擦部に生成する。そして、この切削速度 $V:16.67\sim25.00\text{m/s}$ の条件で著しく長寿命を示す²⁾。ことを明らかとしてきた⁴⁾。しかし、一方では $V=25.00\text{m/s}$ を超えると、被削材成分である Si が工具逃げ面に付着し、c-BN 粒子の結合剤と反応 (SiAlON 化) するため、c-BN 粒子の結合強度が弱められ、工具寿命が著しく低下することが問題となっている⁴⁾。そこで、本研究では FC300 材の高速旋削加工に、バインダを含まないバインダレス cBN 工具 (以後 RcBN 工具と表記する)を用いることにより、 25.00m/s を超える切削速度条件におけるさらなる長寿命化の可能性と、

同工具材の損傷機構や被削材中の Al 含有率が工具寿命に及ぼす影響について検討を行う。

2. 実験方法

使用被削材は、パーライト素地組織の A 型黒鉛からなるねずみ鋳鉄 (FC300) 材を使用した。表 1 は使用した被削材の主要化学成分を示すが、被削材中の Al 含有率が工具損傷に影響を及ぼすことから、後期接種の際に混入する Al 成分を最終段階で 0.002, 0.010mass% に調整した 2 種類の被削材を用いた。ここで、表 1 中の () 中の数値は $\times 10^{-3}$ の

Table 1 Chemical composition and hardness of workpiece materials

Workpiece material	Chemical composition mass%							Brinell Hardness
	C	Si	Mn	S	Al	Cr	Fe	
FC300(2)	3.12	1.63	0.70	0.08	0.002	0.042	Bal.	187
FC300(10)	3.31	1.86	0.54	0.10	0.010	0.036	Bal.	187

Table 2 Tool materials

Tool type	Content ratio of c-BN (vol%)	c-BN grain size (μm)	Material of Binding phase
RcBN	>99.9	<1	-
Conventional type cBN	20	<1	TiC+Al compound
	50	3	

* 原稿受付 平成 13 年 10 月 19 日

** 正 会 員 金沢工業大学 (石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

*** 学生会員 金沢工業大学大学院

† 住友電気工業 (株) (伊丹市昆陽北 1-1-1)

Fig. 1 The microstructure of the tool materials;
(a)Conventional type cBN tool, (b)RcBN tool

Fig. 2 Comparison of vickers hardness for RcBN material and conventional cBN material

Al 含有率を示している。被削材形状は組織の均一化を図るため黒皮部分を 5mm 除去後、外形を 160mm、内径 90mm、長さ 120mm とした中空丸棒であり、これの外周部を切削実験に供した。

使用した工具は表 2 に示す 99.9vol% の cBN からなる RcBN 工具と、比較のためにねずみ鋳鉄の高速旋削加工実験において最も長寿命を示した TiC+AlN 系セラミックスで cBN 粒子をバインディングした従来型 cBN 工具も使用した。工具刃先形状は (-5,-5,5,15,15,0.8) とし、切れ刃には 30° × 0.2mm のネガランドを設け、切れ刃稜線には丸ホーニングの刃先処理をして初期摩耗量を安定化させた。また、RcBN 工具においては丸ホーニングを施さないものも使用した。

切削方式は乾式外周旋削とし、切削条件は仕上げ条件の送り $f=0.1\text{mm/rev}$ 、切込み $a=0.5\text{mm}$ 、切削速度 $V=3.33\sim 50.00\text{m/s}$ とした。工具摩耗の評価は、被削材が切くずが断片的に生ずるねずみ鋳鉄であり、すくい面摩耗がほとんど

Fig. 3 Comparison of bending strength for RcBN material and conventional cBN material at 1273K

生じないことから逃げ面摩耗速度で行った。また、本実験範囲では逃げ面摩耗幅 VB は無摩耗時の切れ刃から摩耗最下部までの長さで表現した。

3. 実験結果及び考察

3.1 バインダレス cBN 材料の機械的特性

従来型 cBN 焼結体は、アルカリ金属やアルカリ土類金属またはそれらの窒化物の触媒を用いて 5.5GPa、1820K の条件で h-BN を c-BN に変換した後、バインダ成分と共に焼結して得られる⁵⁾ (図 1(a)参照)。本研究で使用した RcBN は触媒を使用せずに 7.7GPa、2550K の高圧高温条件下で h-BN から c-BN へ直接変換すると同時に焼結する方法により得られる⁶⁾。このため、c-BN 粒内に介在物を含む可能性が少なく、バインダを用いないで焼結されているため c-BN 粒子自身がネックグロスした形で存在している (図 1(b)の破断面観察参照)。また、c-BN 粒子の平均粒径は 1 μm 以下と小さい。このため、RcBN 焼結体は従来型 cBN 焼結体との比較において、機械的強度は室温硬度で約 1.4 倍の Hv5100、高温硬度(1273K)で約 1.7 倍の Hv3600 と極めて高い値を示し、1273K での高温曲げ強度においても約 2 倍の 1.6GPa を示した(図 2, 3 参照)。

3.2 高切削速度条件下における RcBN 工具の長寿命機構

図 4 は従来型 cBN 工具と RcBN 工具における逃げ面摩耗速度の切削速度依存性を比較したものであるが、従来型 cBN 工具が切削速度の上昇とともに逃げ面摩耗速度が減少し、26.00m/s 付近で最も高い耐摩耗性を示す。これに比し、RcBN 工具は 6.67m/s を超える切削速度よりほぼ様な逃げ面摩耗速度を示し、33.33m/s までその値はほとんど変わらない。これは従来型 cBN 工具のバインダが刃先温度に対して敏感なのに比しこれを含まない RcBN 工具は被削材から供給される逃げ面ベラークの恩恵を十分得られることが予測される。図 5 は逃げ面摩耗速度の遅い 33.33m/s の切削速度条件における工具逃げ面の SEM 観察 (同図(a)) および EDS 分析結果 (同図(b)) である。図より従来型 cBN 工具で逃げ面摩耗速度が遅い(長寿命を示した)条件で見られたのと同様⁴⁾の Al 酸化物の逃げ面ベラークが確認された。しかし、従来型 cBN 工具ではバインダを変質させる原因となる Si 元素も同時検出されたが、RcBN 工具ではバインダ相が存在しないため(長寿命化を阻害するバインダとの

Fig. 4 Average cutting temperature and cutting speed dependence of flank wear rate on RcBN tool and conventional cBN tool

Fig. 5 SEM micrograph and EDS analysis of RcBN at $V=33.33\text{ m/s}$, FC300(10); (a) Secondary electron image, (b) EDS analysis

反応は生じない), Si 付着による寿命低下は生じないものと考えられる。これを立証するため, 逃げ面摩耗部ベラークを微小部 X 線回折装置を用いて物質同定を行った(図 6 参照)。図よりこの工具材は, 前述したように c-BN 粒子のみで構成されていることから, 非摩耗部分の回折結果からは cBN のピークのみが検出されている。また, $V=33.33\text{ m/s}$ の条件で使用した工具逃げ面の回折結果からは, c-BN 以外に Al_2O_3 のピークが確認され, この被膜効果により逃げ面摩耗

Fig. 6 X-ray diffraction pattern obtained from RcBN tool; (a) Original surface, (b) Flank wear land at $V=33.33\text{ m/s}$, FC300(10)

Fig. 7 Increase of flank wear land with cutting length for various cutting tool material

速度の低下をもたらしたことが明らかである。また, 逃げ面摩耗速度が遅い条件での摩耗部からも同様な Al_2O_3 ベラークが観察されている。

RcBN 工具が長寿命化するもう一つの特長として初期摩耗が小さいことがあげられる。図 7 は代表的な $V=33.33\text{ m/s}$ の条件における切削距離の推移に伴う逃げ面摩耗幅の変化を示したものである。RcBN 工具は従来型 cBN 工具に比し初期摩耗が小さく, 従来型 cBN 工具が初期摩耗値で約 0.1 mm 程度摩耗した後定常摩耗域と移行するのに比し, RcBN 工具は, 切れ刃の丸ホーニング部 (0.02 mm 程度) が摩耗するのみで, 定常域へと移行する。これは材料が持つ曲げ強度の高さが反映された結果であり, 切削初期の工具逃げ面一仕上げ面間接触面積が極めて小さな時期においても, 切れ刃に微視的破碎を生じることなく摩耗が進む(図 8

Fig. 8 Cutting edge of RcBN tool at $V=33.33\text{m/s}$, $L=2\text{km}$, FC300(10)

Fig. 9 SEM micrograph and EDS analysis of RcBN at $V=50.00\text{m/s}$, FC300(10); (a)Secondary electron image, (b)EDS analysis

Fig. 10 X-ray diffraction pattern obtained from RcBN tool at $V=50.00\text{m/s}$, FC300(10)

Fig. 11 SEM micrograph and EDS analysis of the crystal; (a)Secondary electron image, (b)EDS analysis

切れ刃 SEM 像参照) ことを示唆したものであり、同工具材に丸ホーニングを施さずに切削に使用した結果、ほとんど初期摩耗を生じず定常摩耗が開始された。以上の結果から RcBN 工具は $V=6.67\sim 33.33\text{m/s}$ において安定した長寿命性能を示し、特に $V=33.33\text{m/s}$ の条件においては従来型 cBN 工具と比し、約 16 倍の工具寿命を示した。

3.3 $V=40.00\text{m/s}$ を超える条件での工具損傷機構

前述した図 4 より RcBN 工具は $V=6.67\sim 33.33\text{m/s}$ の範囲で最も摩耗速度が抑制されるが、 $V=40.00\text{m/s}$ を超える(平均切削温度が約 1450K となる)条件で RcBN 工具の工具寿命が著しく低下する現象が見られた。この原因について高切削速度条件下で逃げ面に生成するベラーグの物性について調査した。図 9 (a) は最も工具寿命が短くなった $V=50.00\text{m/s}$ で使用した工具逃げ面を観察したものである。図より、図 6 の $V=33.33\text{m/s}$ の条件時と同様に摩耗部分には多くのベラーグが観察されたが、このベラーグの元素分析からは $V=33.33\text{m/s}$ の条件とは異なり O, Al, Si 以外に Mg が検出された(図 9(b)参照)。Mg は被削材中の不可避不純物としての混入が確認されており、通常の c-BN 粒子を合成する際に触媒としても使用される元素であるため c-BN 粒子との反応性は優れている。そこで図 6 同様に工具逃げ面を X 線回折し、物質の同定を行った。その結果を図 10 に示す。図より長寿命時に見られた Al_2O_3 のピークは存在せず、 MgAl_2O_4 のピークと MgO のピークが確認された。この MgAl_2O_4 は 1473K で MgO と Al_2O_3 が反応して生成される⁷⁾。 $V=50.00\text{m/s}$ 時の切削温度がこの生成温度に近いことから、被削材中に

Fig. 12 Increase of flank wear land with cutting length for various workpiece materials

Fig. 13 SEM micrograph and EDS analysis of flank wear land at $V=33.33\text{m/s}$, FC300(2); (a)Secondary electron image, (b)Alk α

含まれる不可避不純物の MgO と Al_2O_3 による生成と考えられる。検証実験として、1473K の温度環境下において、 Al_2O_3 の坩堝に Mg 含有率が 10% の B 粉末を充填し、窒素ガス雰囲気中で加熱した。その結果、B と Al_2O_3 坩堝の界面において図 11(a), (b)に示す O, Mg と Al からなるスピネルと考えられる結晶が観察され、 $V=50.00\text{m/s}$ の条件において工具逃げ面に MgAl_2O_4 の生成は妥当性が高いと考えられる。また、 MgAl_2O_4 生成による寿命低下は、 MgAl_2O_4 の機械的強度が 80 から 220MPa と Al_2O_3 の強度 350 から 800MPa に比し劣ることから⁸⁾、保護膜効果が消失するためと考えられる。

3.4 被削材中の Al 含有率が工具寿命に及ぼす影響

前項において RcBN 工具が高速度条件において長寿命を示した要因としては Al_2O_3 からなるベラークの存在が不可欠であるが、保護膜として働くベラークの生成は、被削材中の Al 含有率に大きく依存しており、これが工具損傷に大きな影響を与えることが予測される⁹⁾ため、被削材中の Al 含有率を変化して逃げ面摩耗特性への影響を調査した。図 12 は長寿命化が期待できる $V=33.33\text{m/s}$ の切削速度条件で Al 含有率の異なる FC300 材を用いて切削実験した結果である。図より逃げ面摩耗幅は Al 含有率の少ない FC300(2)を被削材とした場合に急速に逃げ面摩耗は増加した。これに比し FC300(10)材を加工した場合この増加は少なく被削材中の Al 含有率が工具摩耗速度を決定付けているのが明らかである。図 13(a)は、FC300 (2) 材加工後の RcBN 工具の逃

げ面摩耗部であるが、FC300(10)を加工した場合のような Al_2O_3 ベラークは確認されなかった(図 13(b)参照)。このように、RcBN 工具の長寿命化には Al_2O_3 ベラークの生成が不可欠であり、高速条件での RcBN 工具の長寿命化は Al_2O_3 ベラークが被削材成分によりもたらされることから、あたかも傷ついた工具をベラークにより修復しながら長寿命化を達成させるごときであり、このベラークの安定生成が長寿命化を達成させる秘訣と考えられる。

4. 結 言

ねずみ鋳鉄の高速旋削加工に RcBN 工具を用いた場合この工具の損傷機構及び被削材中の Al 含有率が工具損傷に及ぼす影響について検討をした結果、以下の結論を得た。

- (1) 高温時の曲げ強度が強いバインダレス cBN 工具は初期摩耗が非常に小さい。
- (2) $V=6.00$ から 33.33m/s の条件において RcBN 工具は極めて高い耐逃げ面摩耗特性を示し、逃げ面に生成された Al_2O_3 が保護膜となって長寿命化を示す。
- (3) バインダレス cBN 工具は $V=33.33\text{m/s}$ の条件で従来型 cBN 工具と比し約 16 倍の工具寿命を示したが、 $V=33.33\text{m/s}$ を超える高速条件では工具寿命が短くなる。
- (4) $V=50.00\text{m/s}$ の高速条件では工具逃げ面に MgAl_2O_4 からなる付着物が生成する。
- (5) 高切削速度条件での工具の長寿命化には被削材中の Al が 0.010wt%程度必要である。

参 考 文 献

- 1) 新谷一博, 鈴木直彦: ADI 材加工における高温条件下での cBN 工具の摩耗機構, 精密工学会誌, 61, 6 (1995) 804.
- 2) T.J.Broskea: High Speed Machining of Gray Cast Iron with Polycrystalline Cubic Boron Nitride, Tool Mater High Speed Machining, Conference on Advances in Tool Materials for Use in High Speed Machining; (1987) 39.
- 3) Deming, B.Young, and D.Ratcliff: PCBN Turns Gray Cast Iron, Cutting Tool Engineering, 46, (1994) 84.
- 4) 新谷一博, 加藤秀治, 杉田博昭, 鈴木直彦: ねずみ鋳鉄の高速加工条件下における cBN 工具の長寿命化機構, 精密工学会誌, 64, 2 (1998) 261.
- 5) 佐藤純一: 新しい超硬材料—CBN (立方晶窒化ホウ素)—, 機能材料, 7, 5 (1987) 21.
- 6) H.Sumiya, S.Uesaka: Mechanical Properties and Cutting Performances of High Purity Polycrystalline CBN Compact, ASME 1999, Manufacturing Science and Engineering, MED, 10(1999) 759.
- 7) 大木道則, 大沢利昭, 田中元治, 千原秀昭: 化学大辞典, 東京化学同人, (1989) 124.
- 8) 佐多敏之: ファインセラミックス工学, 朝倉書店, (1990)84, 86, 88.
- 9) 新谷一博, 長瀬真, 塩谷外司, 加藤秀治: ねずみ鋳鉄の高速加工における cBN 工具の特性, 1998 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(1998)293.