

月刊 THE TRIBOLOGY

トライボロジー

2024
No.439

3

MOTION & CONTROL™
NSK



次世代高精度工作機械用ボールねじ
日本精工

特集

切削、研削、塑性加工技術

高硬度材の高能率断続切削を達成したHPC加工技術 — cBN焼結体の最適結合相の選定 —



和田任弘
Tadahiro WADA
鳥羽商船高等専門学校 客員教授

森合勇介*
Yusuke MORIGO
(株)トクビ製作所 製造部長

表1 高圧クーラント切削で実現できる生産性向上²⁾

1. 切りくず折断効果 ・切りくず巻付きによる設備停止の防止による完全自動化の実現
2. 切削領域の冷却による工具摩耗抑制効果 ・工具交換回数低減、および高速度切削による加工時間短縮の実現
3. 深穴加工時の切りくずの排出性向上 ・ノンステップ加工による加工時間短縮の実現
4. 加工時の抜けバリ抑制 ・手作業によるバリ取り作業工数低減の実現

1. はじめに

難削材とは、一般に「削り難い材料」を意味している。以下のような条件を満たす工作物が「削り難い材料」と言われている。

- ① 工作物が高强度、高硬度、低熱伝導であれば切削温度が上昇しやすくなる、あるいは工作物と工具との化学的親和性が強ければ凝着摩耗が起こりやすくなる。このような工作物を切削すると、工具寿命が短命になる。
- ② 純アルミニウムのように伸びの高い工作物を切削すると、連続した切りくずが排出されるため、切削作業に悪影響を及ぼす。
- ③ セラミックスのような脆性材料を切削すると、き裂型の切りくずが排出され切削仕上げ面が粗悪になる(セラミックスの切削では、切削条件によっては、延性モード切削が可能となる)。
- ④ 切削工具に作用する比切削抵抗(単位切削面積あたりの切削抵抗)が過大に

なる工作物を切削すると、工具刃先に過大な切削力が集中し、工具欠損が起こりやすくなる。

- ⑤ マグネシウムなどの発火・引火しやすい工作物を切削すると、切削作業に重大な悪影響を及ぼす。
- ⑥ 切削に関するデータが非常に少ない工作物では、切削条件の選定が困難になる。

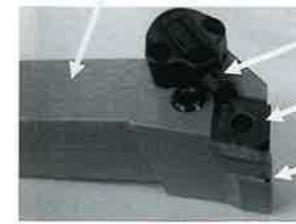
特に①、②で示される工作物材料に関しては、古くから「難削性」の解明が進められてきた。

さて、工作物を切削するには、ピッカース硬さ換算で工具材の硬度が工作物硬度の3~4倍以上あれば、この工具で工作物を切削できる。切削の可否は、単に硬度のみで決まるのではなく、高温下での硬度、耐酸化性、工作物との親和性、

熱伝導性なども考慮する必要があるのと言うまでもない。このように考えると、高硬度物質を超硬合金母材に被覆したコーテッド超硬合金工具で、高硬度材の切削は充分可能である。ただし、低速切削の場合であって、高速切削では切削温度が上昇するため、高温下での工具材硬度が必要となる。そのため、cBN焼結体は1300℃まで熱的耐性があることから、切削温度が高温となる高速切削での加工にはcBN焼結体が適した工具材である。

最近、生成される切りくずを流体の圧力で曲げることによって切りくずを折断できる高圧クーラント切削が注目されている。この方法は、バイトのすくい面、逃げ面、あるいはすくい面と逃げ面の両方向から切削部にクーラントを高圧で供給する方法で、切りくず折断に高い有効性

バイトホルダー：PCLNL2525M12-CHP



ノズルA(すくい面方向)
インサート：ISO CNGA120412
ノズルB(逃げ面方向)

図1 使用工具

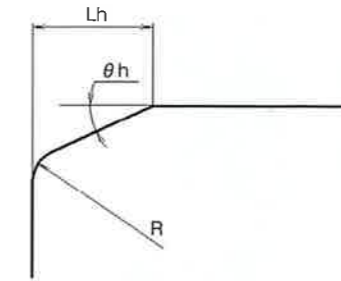


図2 刃先形状

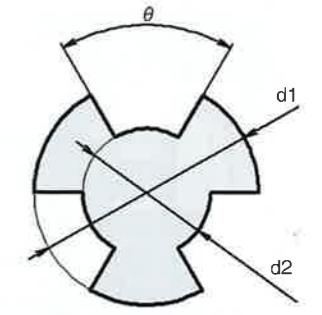


図3 工作物の形状・寸法
($\theta = 60^\circ$ 、 $d1 = 122\text{mm}$ 、 $d2 = 70\text{mm}$)

表2 cBN焼結体の特性(コーテッドcBN焼結体を除く)

工具材種	結合相*	cBN含有率**	cBN粒径(μm)
cBN IX	WC-Co-Al	85/15	3.0
cBN IV	WC-Co-Al	95/5	3.0
cBN VII	TiCN-Al	45/55	5.0
cBN VI	TiN-Al	65/35	3.0
cBN I	TiN-Al	75/25	5.0

*: 主な結合相、**: (cBN粒子/結合相)

表3 切削条件

切削速度(Vc)	180、300、430m/min
送り(f)	0.1mm/rev
切込み(ap)	0.1mm
端面切削の繰返し回数(N)	5回
切削方式	乾式切削、 高圧クーラント切削(吐出圧力: 20MPa)

があることが確かめられている¹⁾。さらに、高圧クーラントを切削加工に用いる場合、切りくず折断効果以外にも工具摩耗の抑制効果など種々の効果が期待できる。これらの効果により、表1に示す生産性向上が実現できる。特に、乾式切削の場合と比較すると、工作物の温度低下が著しいので工作物は熱の影響を受けにくいため、寸法精度の向上や加工変質層の低下も期待できる。このことから、難削材の切削にHPC(High Pressure Coolant)加工技術を用いる効果は、生産性向上の達成に大きな効果をもたらすことは、筆者らも経験済みである。

今までの高圧クーラントに関する書物や解説は、旋削などの連続切削が取り上げられているが、最近、ボルト穴のあるフランジの端面を旋削する端面断続切削の要求が増しているにもかかわらず、端面断続高圧クーラント切削を取り上げた書物や解説はほとんど見当たらない。

本稿では、難削材に分類される高硬度材の端面断続切削に高圧クーラントを用いた場合の効果について解説する。

高硬度材として冷間金型用合金工具鋼SKD11(60HRC)を使用したハードターニングでは、cBN焼結体は極めて有効な

工具材である。高能率加工を実現するためには切削速度を上昇させることが効果的であるが、切削速度の上昇とともに切削温度も上昇するため、あまり過大な切削温度の上昇(工作物の温度上昇に繋がる)は、高硬度材に施された熱処理に悪影響を及ぼす。そこで、高硬度材SKD11(60HRC)の高速切削時の切削温度の上昇を抑えるために、工具先端から切削部に高圧クーラントを供給する高圧クーラント切削を行った。その結果、高圧クーラント切削によるハードターニングでは、(TiCN-Al)結合相のcBN焼結体を用いることにより、切削速度Vc=600m/min(送りf=0.05mm/rev、切込みap=0.1mm)の高速切削を達成した³⁾。

最近、円盤状高硬度材工作物の中心軸方向に貫通穴を設けたフランジの高能率加工の要求が増している。これらのフランジの端面切削では、貫通穴部で断続切削となるため、工具刃先の欠損が生じやすい。そこで、本稿では、cBN焼結体工具による高硬度材の端面断続高圧クーラント切削において、最適な工具材の選定を行ったので、その結果について報告する。

2. 切削実験の方法

使用工具は、PCLNL2525M12-CHP型バイトホルダーにCNGA120412型インサートを取り付けたものである(図1)。なお、CNGA120412型インサートの刃先には、図2に示すように、ネガランドおよびRホーニングが施してあり、ホーニング幅Lh=0.13mm、ネガランド角 $\theta h = 25^\circ$ 、RホーニングR=0.02mmである。また、チップブレイカーが付与されていないインサートを用いた。

図3に、工作物の形状・寸法を示す。 $\theta = 60^\circ$ 、 $d1 = 122\text{mm}$ 、 $d2 = 70\text{mm}$ で、この工作物の端面切削を行った。工作物の材質は、高硬度材の一つである冷間金型用の合金工具鋼SKD11(60HRC)である。

表2に、使用したcBN焼結体の特性を示す。なお、表2に示すcBN焼結体以外にも、コーテッドcBN焼結体(cBN A、およびcBN M)も用いた。結合相(WC-Co-Al、TiCN-Al、TiN-Al)、cBN含有率、cBN粒径が異なる5種類のcBN焼結体、および表には示していないが2種類のコーテッドcBN焼結体を工具材として用いた。2種類のコーテッドcBN焼結体については、母材およびコーティングの特性

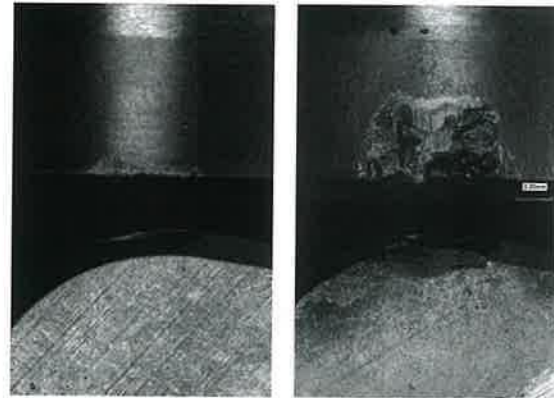
*【著者問合せ】
〒581-0854 大阪府八尾市大竹3-167
Tel.072-941-2288 Fax.072-941-5181
E-mail y.morigo@tokupi.co.jp



図4 使用したCNC旋盤

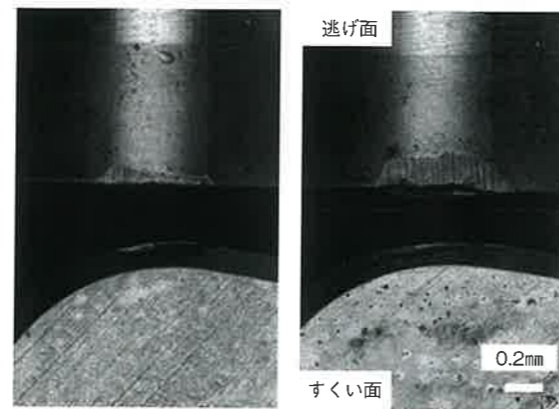


図5 高圧クーラントユニット



(a) 摩耗による損傷
高圧クーラント切削
(b) 工具刃先に生じた欠損
乾式切削

(i) cBN IV 工具



(a) 摩耗による損傷
高圧クーラント切削
(b) 摩耗による損傷
乾式切削

(ii) cBN IX 工具

図6 工具の損傷状態の一例 (cBN IV、cBN IX 工具の場合)
($V_c = 300\text{m/min}$, $f = 0.1\text{mm/rev}$, $a_p = 0.1\text{mm}$, 端面繰返し回数 $N = 5$ 回)

は非公開のため、表には記載されていない。これら7種類のcBN焼結体は、すべて市販品である。

表2に示した各種cBN焼結体工具で、図3に示した工作物の端面断続切削を行った。なお、端面断続切削では、パイロットの移動は、工作物外側 (d1) から内側 (d2) へ向けた移動による断続切削である。

切削条件は、表3に示すように、送り $f = 0.1\text{mm/rev}$ 、切込み $a_p = 0.1\text{mm}$ を一定とし、クーラント切削 (クーラント吐出圧力 $P = 20\text{MPa}$) と乾式切削とした。切削速度 V_c は、180、300および430m/minとし、端面切削の繰返し回数は、5回 (切込みの合計: 0.5mm) とした。

使用工作機械は、CNC旋盤 (図4、11/15kW、主軸最高回転数 4200min^{-1}) で

ある。

使用した高圧クーラントユニットは、高圧クーラントユニット (トクビ製作所製HIPRECO185-20型、最大吐出圧力20MPa、最大吐出流量45L/min) である (図5)。本稿では、クーラント吐出圧力20MPaの場合について解説する。切削油剤は水溶性切削油剤 (ユシローケンFGS650、濃度 $10 \pm 3\%$) を用いた。

表3に示した切削条件で高硬度材SKD11の端面断続切削を行い、工具の損傷状態を調べた。

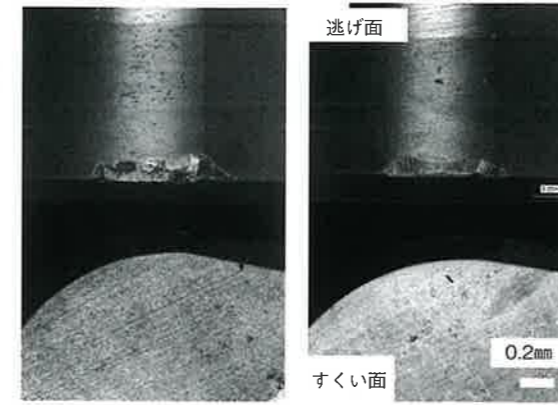
3. 切削実験の結果

図3で示した高硬度材を各種cBN焼結体工具で端面断続切削を行い、工具の損傷状態を調べた。切削速度300m/minの場合における一例を図6に示す。なお、

端面切削の繰返し回数は5回である。図中、上半分が逃げ面、下半分がすくい面である。図6に示すように、cBN焼結体工具の損傷状態は、摩耗により損傷する場合 (図6i(a)、図6ii(a)、図6ii(b)) と工具刃先に欠損が生じる (図6i(b)) 場合がある。

切削速度180m/minの場合の一例を図7に示す。図7は、高圧クーラント切削の場合で、端面切削の繰返し回数は5回である。図7(a)に示すcBN IV、および図7(b)に示すcBN IXともに、主な工具損傷は逃げ面摩耗となっている。また、cBN IVにおける逃げ面摩耗幅の最大値 VB_{max} は、図6i(a)に示した切削速度300m/minに比べ、切削速度を低下させたにもかかわらず大きくなっている。

表4は、端面断続切削における工具損



(a) cBN IV (摩耗による損傷) (b) cBN IX (摩耗による損傷)

図7 工具の損傷状態の一例 (cBN IV、cBN IX 工具の場合)
($V_c = 180\text{m/min}$, $f = 0.1\text{mm/rev}$, $a_p = 0.1\text{mm}$, 高圧クーラント切削、端面繰返し回数 $N = 5$ 回)

表4 端面断続切削における工具損傷の状態

送り $f = 0.1\text{mm/rev}$ 、切込み $a_p = 0.1\text{mm}$ 、端面繰返し回数 $N = 5$ 回			
切削速度	工具	高圧クーラント切削	乾式切削
(a) $V_c = 180\text{m/min}$	cBN I	×	×
	cBN VI	×	×
	cBN VII	×	×
	cBN IV	○	×
	cBN IX	○	×
	cBN A	×	×
	cBN M	×	×
(b) $V_c = 300\text{m/min}$	cBN I	×	×
	cBN VI	×	×
	cBN VII	×	×
	cBN IV	○	×
	cBN IX	○	○
	cBN A	×	×
(c) $V_c = 430\text{m/min}$	cBN IV	×	×
	cBN IX	×	×

傷の状態を調べたものである。高圧クーラント切削におけるクーラント吐出圧力は20MPaで、端面切削の繰返し回数は5回である。図6に示したように、cBN焼結体工具が摩耗により損傷する場合 (図6i(a)、図6ii(a)、図6ii(b)) を「○」、工具刃先に欠損が生じる場合 (図6i(b)) を「×」とした。表4より、高圧クーラント切削では、切削速度180、300m/minの場合、cBN IV、cBN IXの主な損傷状態は摩耗となっている。これに対し、乾式切削では、切削速度180m/minの場合、すべてのcBN焼結体工具の工具刃先に欠損が生

じている。切削速度300m/minの場合、cBN IXでは摩耗による工具損傷となっているが、cBN IX以外のcBN焼結体工具の工具刃先には欠損が生じている。

次に、切削速度180、300m/minの高圧クーラント切削で、摩耗が主な工具損傷となったcBN IV、cBN IXについて、切削速度430m/minで高硬度材の端面断続クーラント切削を行った。その結果、cBN IV、cBN IXの工具刃先に欠損が生じた。

また、表4よりcBN IVおよびcBN IXともに主な結合相が (WC-Co-Al) であるこ

とから、高硬度材の断続切削には主な結合相が (WC-Co-Al) のcBN焼結体が適した工具材であることが分かる。

4. おわりに

本稿では、cBN焼結体工具による高硬度材SKD11 (60HRC) の端面断続切削に高圧クーラント供給を併用した、端面断続高圧クーラント切削を行った場合の工具損傷について解説した。その結果、切削速度180、300m/minの場合、高圧クーラント切削では、乾式切削に比べて工具の欠損を防止できる。また、この場合、主な結合相が (WC-Co-Al) のcBN焼結体が適した工具材であることを解説した。

以上のことから、(WC-Co-Al) 結合相cBN焼結体工具による高硬度材 (SKD11 (60HRC)) の端面断続切削において、HPC加工技術を用いることにより、切削速度300m/minの高効率加工を達成できた。

最後に、本稿で使用したデータには、参考文献^{4)、5)}の学術論文から引用したデータが含まれている。

参考文献

- 1) 関本昌利: 超高圧クーラントによる切りくず処理・工具寿命改善の実際、機械と工具、日本工業出版、2015年2月号 (2015年2月) pp.51-56.
- 2) 和田任弘、森合勇介: 切削・研削加工における高圧クーラント供給技術、月刊トライボロジー、新樹社、第37巻3号 (2023年3月) pp.22-25.
- 3) 和田任弘、森合勇介: HPCでハードターニング加工の切削時間短縮を達成、機械と工具、日本工業出版、2022年7月号 (2022年7月) pp.56-59.
- 4) 和田任弘、藤原聡大、森合勇介、島田大嗣: 高圧クーラント供給を用いた焼入れ鋼SKD11の断続切削におけるcBNの工具摩耗、日本設計工学会関西支部令和2年度研究発表講演会講演論文集 (2021年3月13日開催).
- 5) Tadahiro Wada: Tool Wear of Cubic Boron Nitride in Intermittent Cutting of Hardened Steel ASTM D2 with High-Pressure Coolant Supply, Applied Mechanics and Materials, Vol.907, pp.19-25, DOI: 10.4028/p-5o2e36.