砥石の切削に関する研究*

塚 本 公 秀** 松 尾 哲 夫*** 上 田 昇***

Machining of Grinding Wheels with Single Point Cutting Tools

Kimihide Tsukamoto, Tetsuo Matsuo and Noboru Ueda

The machining of grinding wheel is an important research problem related to wheel finishing process. This subject is also a typical example of ceramic composite material machining. However, there is insufficient information about this type of cutting. In this study, a turning experiment was performed on white alumina grinding wheels by the use of cemented carbide, sintered CBN and sintered diamond single point cutting tools. The cutting speed ranged from 0.003 to 150 m/min, the maximum depth of cut was 1.0 mm, and the feed was 0.6 mm/rev. Thus, the tool wear and cutting force were measured for various cutting conditions, and the optimum operating condition and mechanism of chip formation were obtained. The effects of cutting speed, rake angle, and nose radius were specially investigated. The cutting mechanism was also studied from a specially low speed orthogonal cutting experiment and FFT analysis. It is evident from this study that grinding wheel can be cut easily by using a proper cutting tool, such as K01 and sintered diamond tool, and by selecting relatively low cutting speeds, great negative rake angle and large nose radius. The chip is mainly formed by compressive fracture.

Key words: machining, grinding wheel, sintered carbide tool, sintered diamond tool, sintered CBN tool

1. 緒 言

砥石により材料を削る研究は多いが、砥石を削る研究は少ない。Peklenikら^①は単刃工具で、一方Colwellら^②はコニカルメタルホイールによって砥石を削る研究を行っている。しかしこれらの研究は共に切削抵抗を測定して砥石結合度を評価する目的で行われており、工具摩耗については触れていない。

周知のように研削砥石のうち特にビトリファイド砥石は、製造工程で高温(1200~1300℃)で焼結されるために成形後にひずみが生じ、その後常温でひずみ取り

(形状修正)のため量的に削り取られる。この作業には従来より砥石、コニカルメタルホイール、ダイヤモンド単石、クラッシュロール、遊離砥粒などが用いられてきた。

本研究はこのような砥石製造時のひずみ除去作業並びに研削中の形くずれ矯正作業の簡便な一つの方法として、超硬質単刃切削工具による切削加工法の可能性について追求したものである。ここでは超硬、焼結ダイヤモンド、焼結CBNの切削工具を用い、種々の切削条件で旋削を試み、工具摩耗や切削抵抗を測定し、最適切削条件を見つけ、同時に摩耗機構の変化を追究した。

2. 実 験 方 法

砥石の切削実験は、図1(a)に示すようにジグに取り付けられた砥石を乾式で外周旋削により行った。砥石(被削材)の幅(軸方向の長さ)は通常30mmの一定とした。切削条件を表1に示す。切削工具は超硬(K10

* 原稿受付 昭和63年7月11日。昭和60年度精機学会春季大会学術講演会(昭和60年3月28日)および昭和61年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和61年10月11日)にて発表

** 正会員 鹿児島工業高等専門学校(鹿児島県始良郡隼人町真孝1460-1)

*** 正会員 熊本大学工学部(熊本市黒髪2-39-1)

Table 1 Cutting condition

Wheel	WA46P8V (Size: 100x40x31.75)
Tool	K10, K01, CBN, Dia. A, Dia. B (from -5 to -45, from -6 to 46, 5, 6, 15, 15, from 0.8 to 5.0)
Cutting speed	$V = 0.003 - 150$ m/min
Depth of cut	$d = 0.2 - 1.0$ mm
Feed	$f = 0.6$ mm/rev
Cutting fluid	Dry, Wet (emulsion 2% 1.0 l/min)

Fig. 1 Setup of the cutting test (a) and method for measuring tip wear (b)

K01, 焼結CBN, および焼結ダイヤモンド工具の4種類を用いた。切削速度は主として0.003~150m/minとし、切込みは0.2~1.0mmとした。また送りを0.6mm/revとし主に乾式で切削し、切削中の切削抵抗と切削後の工具摩耗量を測定した。

工具摩耗の形態は金属切削の場合と全く異なり、図1(b)のように工具逃げ面がほぼ均一に摩耗し、刃先が後退するように進行する。そこで摩耗量として V_c で示される先端部摩耗量を測定した。なお刃物台の弾性による工具の逃げを防ぐため、剛性の高い刃物台を使用した。また、切削抵抗の測定は切削距離のほぼ中央地点で測定した。また砥石切削の機構を追究するために直交切削を試みた。板状の砥石を旋盤に固定し、主軸を回転させず刃物台の送り機構を利用して0.003m/minの極低速で直交切削を実現した。この時、顕微鏡を用いて砥粒の脱落の様子や切りくずを観察した。

さらに砥石の機械的な性質を知るために、せん断試験および圧壊試験を万能試験機を用いて行った。せん断試験片は、砥石より直方体に切り出した試験片に圧縮軸に対し45°の切欠きを入れたもので、せん断部の面積は5mm×20mmである。一方、圧壊試験片は5mm×5mmで厚さが2mmと4mmの2種類を使用した。

Fig. 2 Relationship between cutting distance and tool wear

Fig. 3 Effect of depth of cut on tool wear

3. 実験結果及び考察

3.1 工具摩耗

図2にK01工具にて比較的硬いWA46P8V砥石を切削速度 $V=12.5$ m/minの比較的低速と60m/minの中速で切削した際の、切削距離の増加に伴う工具摩耗量の変化を示す。工具摩耗は切削開始から $l=5$ mまでは初期摩耗として $V_c=0.3$ mm程度まで急激に進行するが、その後切削距離に比例して漸増して行く。摩耗曲線の形状は金属切削の場合と特に変わらない。ただし切削速度 $V=60$ m/minで、切込みが1mmの場合は摩耗が急速に進行しているが、このことについては後述する。

図3は工具摩耗に及ぼす切込みの影響を、超硬工具材種K10, K01に対し示したものである。同一切込みに対する摩耗量はK01工具がK10工具より小さいこと、また切込みの増加に伴い摩耗量は増大し、両工具の差が

Fig. 4 Critical cutting speed in tool wear (a), and effects of tool material on tool wear (b)

なくなることを示している。すなわち、切込みの増加に伴い工具の発熱が激しくなり、工具が研削を受けるため摩耗が増大するものと考えられる。

工具摩耗の切削速度依存性を図4(a)に示す。K01工具で切込みを0.2, 0.5, 1.0mmと変えて調べた結果、各切込みに対してある切削速度で工具摩耗が急速に増加し始める。すなわち、臨界切削速度が存在することがわかる。これによると、臨界切削速度以下では切込みにかかわらず工具摩耗はほぼ一定となっている。同図はさらに、工具摩耗における切削液供給の効果を示している。切削液を使用した場合も上述のような臨界切削速度の存在が認められ、臨界速度以下では切削液の供給によって工具摩耗量に大きな変化はないが、高速切削域では、湿式切削によって工具摩耗はかなり抑制されることが明らかである。

このような臨界切削速度の存在するメカニズムとして、臨界切削速度以下では工具の温度上昇が緩やかで工具の機械的強度の低下はほとんど起こらず、その結果アブレイシブ摩耗は切削速度や切込みに影響されず切削距離のみによって決まる。これに対し臨界切削速度以上での切削では、工具先端が赤熱する現象がみられることなどからも、工具の温度上昇が大きく、K01工具（特に結合剤であるCo）の機械的強度が低下するという機構が考えられる。その結果、工具は被削材である砥石によって研削を受けるようになる。金属材料の切削においても高速化に伴い、工具刃先温度が上昇し、

工具摩耗が増大することはよく知られている³⁾。その他の理由として、セラミックスの切削でも見られるように切削速度が上昇すると砥石の破壊規模が小さくなり、工具逃げ面へ切りくずが巻き込まれ摩耗の進行を助長する現象も生じているものと考えられる⁴⁾。なお、前出の図2において、切込み1.0mm、切削速度60.0m/minは臨界切削速度以上の条件に対応し、他の曲線は臨界切削速度以下に対応する。

図は省略したが、一定切削量に対する工具摩耗量が、送りによりどのように変わるかを検討した。正味切削作業時間は送りに反比例的に短いため送りの上昇につれ工具摩耗は低下し、ノーズ半径0.8mmでは、約0.7mm/

revで最小となった⁵⁾。

次に焼結CBN工具と焼結ダイヤモンド工具(製造メカによって異なる2社のものを用いた)による摩耗への影響を図4(b)に示す。ここで焼結CBN工具の場合切削速度30m/minで超硬工具と同程度の摩耗が生じるのは焼結CBNが衝撃に弱いためで、また切削速度が100m/minに上昇しても摩耗量が変化しないのは焼結CBNの耐熱性による。焼結ダイヤモンドは工具材種中最も硬度が高く、摩耗量が最も小さくなると考えられる。焼結ダイヤモンドA工具は切削速度30m/minで焼結CBN工具より衝撃に強く摩耗が小さい。しかし切削速度が100m/minで摩耗が増加するのは耐熱性が低いためである。焼結ダイヤモンドB工具については摩耗量が非常に小さくなった。

硬ぜい材質の工具刃先には微細破壊的摩耗が生じる傾向が強く、一般にすくい角を負に大きく取ることが望ましい。本実験でも焼結CBN工具の場合工具先端に欠けが発生しやすかった。そこで工具先端部に負のすくい角を設けて切削を行ったところ、欠けの規模は小さくなり発生頻度も低下した。図5に示すように焼結CBN, K01工具の摩耗体積(すくい角を変化させたために工具摩耗量はVcでなく摩耗体積Vvで示した)は共に $-25^{\circ} \sim -35^{\circ}$ 近傍で最小となる。ここでは、切削抵抗のうち主分力の変化もあわせて示している。

図6にノーズ半径を変えてK01工具と焼結ダイヤモンド工具を用いて切削したときの工具摩耗量の変化を

Fig. 5 Effect of rake angle on tool wear and cutting force

Fig. 6 Effect of nose radius on tool wear

示す。いずれの工具においてもノーズ半径の増加にともなって摩耗の減少が見られる。これはノーズ半径を大きくすることによって、同一切込みの場合には実切込みが小さくなるためと解釈される。また、 $R=4.5$ mmの丸こまバイト (Dia.B) ではほとんど摩耗が見られなかった。ここに図示していないが、切削距離を約4倍にしても低速では摩耗は見られず、 $V=300$ m/minの高速切削でもわずかに増加する程度となった。丸こまの焼結ダイヤモンド工具の使用が摩耗に対しては非常に有効であることが明らかである。

工具摩耗が、主にアブレーションによることから、砥石の結合度を変化させて切削を行うと結合度が高いほど摩耗が大きくなる⁵⁾。本来砥石の結合度とは砥石への圧子の押込み量を測定して等級が決められ、結合度自体が砥粒の保持力と圧縮破壊に対する抵抗という意味を含んでいることから、摩耗量が砥石結合度に依存していることは、切りくずの生成が主に圧縮破壊によっていることを示している。

図7は焼結ダイヤモンドAおよびK01工具によってWA砥石を削った後の工具切れ刃および工具摩耗面を走査型電子顕微鏡で観察した結果である。左側は低倍率、右側は高倍率で見たものであるが、低倍率の写真では、いずれもアブレーションによりエッジ部が摩耗しているのが分かる。焼結ダイヤモンド工具では、先端エ

Fig. 7 SEM observation of worn surface of tool

ジ部に大きな欠けが生じている(図7(a))。高倍率の写真では、焼結ダイヤモンド工具とK01工具は低速切削で共に凹凸の激しい摩耗面を呈しており(図7(c), (d)), 工具の母材粒子以上のアブレーションが生じているのが認められる。しかしK01工具の場合臨界切削速度を越える切削では、摩耗面が明らかに縦方向に研削条痕の認められる研削面になっている(図7(e))。

このほか粒度の影響についても実験を行ったが、粒

Fig. 8 Photograph obtained by quick-stop apparatus

Fig. 9 FFT analysis of cutting forces

度の変化にもかかわらず摩耗量において有意差はみられなかった。

3.2 切削機構の解析

ここで使用した砥石はWA46P8Vであることから、本砥石の平均砥粒径は 0.35mm であり、単位体積中の砥粒の個数は理論計算から 20個/mm^3 である。また切込み 0.5mm では、工具の作用切れ刃面積は $0.5 \times 3 = 1.5\text{mm}^2$ でこの面積中に含まれる砥粒数は計算上約11個になる。これらのことから、砥石は本実験で使用した大きさの切込みに対し、かなり離散的に砥粒が分布した材料とみなされ、金属のような均質で一様な連続体とは異なる。そのため、砥石切削時の切りくずは安定した一様な大きさの切りくずとはならず、不安定な塊状の切りくずと個々の砥粒に近い粉状の切りくずとが混在して生成されると理解される。

図8は切削速度が 0.003m/min という極めて低速な直交切削における切りくず生成域の急停止写真である。

WA46P8V
KO1
 $f=0.6\text{mm/rev}$

1.0mm

(a) $V=81\text{m/min}$, $d=1.0\text{mm}$

(b) $V=10\text{m/min}$, $d=1.0\text{mm}$

(c) $V=10\text{m/min}$, $d=0.2\text{mm}$

Fig.10 Effects of depth of cut and cutting speed on chip shape

この場合は、砥石内部に工具刃先の下向きにき裂が入り、その後上向きに約 30° の大きいき裂が発生し、切りくずは塊状に生成されている。この切りくずは、鋳鉄などの切削において認められるせん断型切りくずと極めてよく類似している。ただ、このような低速においても、大きさのそろった安定したせん断型の切りくずが生じるのではなく、粉状に近い切りくずと比較的大きな塊状の切りくずの混在した切りくずが生じている。

極低速切削域における切削抵抗の周波数解析によって切りくず生成状態を調べた結果が図9である。切削速度が 0.12m/min では低周波成分が多く含まれているのに対し、 0.64m/min では低周波成分がかなり減少しており、生成される切りくずの大きさが比較的均一に分布していることがわかる。さらに図10は切削時に得

Fig. 11 Relationship between depth of cut and specific cutting force

られた切りくずの写真である。いずれも塊状のやや大きな切りくずと粉状の切りくずが混在していることが分かる。同一切込み(図10(a), (b))では、切削速度が大きいほど、また同一切削速度(図10(b), (c))でみると切込みが小さいほど切りくずはより細かくなっていることが分かる。

図11に、砥石片の圧壊応力と切削時の比切削抵抗とを比較した結果を示す。まず圧壊試験において、砥石試験片の寸法効果が顕著に認められることがわかる。一方、比切削抵抗は切込みの影響を受け、特に切込み0.2mmで大きくなっている。図中切込み1.0mmの場合、切削速度が50m/minで比切削抵抗が逆にやや大きくなっているのは、この速度が臨界切削速度を少し上まわる速度になっており、工具摩耗がやや大きくなることによると解釈される。切削では、切りくず生成が砥石自由表面近傍の破壊によって行われていること、一方、圧壊試験では圧縮応力と垂直方向への砥石の運動が拘束されていることを考慮すると、砥石試験片の厚さ4mmでの圧壊試験と比切削抵抗が非常によく一致している。またここに示していないが、せん断試験の結果結合度の高いPがJよりせん断強さが小さく、切りくず生成においてせん断変形はさほど生じていないものと考えられる。これらのことから切削速度が12~50m/minで生成される切りくずの大部分が砥石の圧壊によるものと思われる。同図にせん断破断直前の最大せん断応力を示したが(約24MPa)、極低速切削時のせん断角を30°としたときのせん断応力(約50MPa)の約半分となる。せん断試験で得られたせん断応力は、試験片の切欠き先端形状やせん断部の面積の影響を受け、切削時のせん断応力とはかなり異なったものと考えられる。

4. 結 言

- (1) 超硬工具による砥石切削の場合全般的に摩耗が大きいが、K01工具は比較的摩耗が少なく、一般に切削速度を低くすることによって砥石の切削成形が可能である。
- (2) 超硬工具の摩耗は切込みに依存した臨界切削速度を越えると急激に増大する。また、このとき工具摩耗を低く抑えるためには工具すくい角を負に取ることが望ましい。
- (3) 焼結CBN工具は工具硬度が高く摩耗が少ないが、微細なチッピングが生じやすい。大きな負のすくい角を設けるとチッピングによる摩耗が抑制される。またダイヤモンド工具では、ノーズ半径の大きい丸こまバイトの使用が非常に有効である。
- (4) 切りくずは塊状と粉状の混在した形態であり、切込みの減少や切削速度の増加につれ、粉状切りくずの占める割合が増加する。
- (5) 砥石切削時の比切削抵抗は砥石の圧壊試験による結果と比較的よく一致する。

終わりに本研究は昭和60, 61, 62年度文部省科学研究費補助金(一般B, 代表 松尾)の一部を利用して実施したことを記すとともに、加工材(砥石)を御準備いただきましたクレノートン(株)五反田健二氏、焼結ダイヤモンド工具およびCBN工具を御提供いただきましたノリタケダイヤ(株)河端則次氏に深く感謝します。また、有益な助言をいただいた熊本大学大島栄一、大淵慶史両氏、ならびに実験遂行に協力いただいた鹿児島工業高等専門学校実習工場の皆様に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) J. Peklenik and H. Opitz: Testing of Grinding Wheel, Proc. MTDR, 2, (1962) 163.
- 2) L. V. Colwell, R. D. Lane and K. N. Soderlund: On Determining the Hardness of Grinding Wheels, Trans. ASME, B, 84, (1962) 113.
- 3) 白井英治: 切削・研削加工学, 上巻, 共立出版(1971) 150.
- 4) 鳴瀧則彦, 李 載佑, 野口和男, 水谷豊信: セラミック仮焼材の被削性(第1報) - 低純度アルミナセラミックの切削, 精密機械, 52, 11(1986) 1876.
- 5) T. Matsuo and K. Tsukamoto: Machining of Grinding Wheels by Carbide Cutting Tools, Ann. CIRP 33, 1, (1984) 39.