621.9.027.4

セラミック工具の切削性能*

大 越 諄** 佐田 登志夫***

On Ceramic Cutting Tools

by Makoto OKOSHI and Toshio SATA

Several experimental results of a research on ceramics as cutting tools are described in this paper. Mechanical properties, grinding procedures, cutting characteristics and tool life of ceramics are discussed comparing with those for carbide tools. These results showed that ceramic tools used in this study was inferior a little in hardness, sharpness of cutting edges by grinding and resistance of flank wear to those for carbides, owing to less ductility. On the other hand, it was shown that ceramics had excellent features in cutting characteristics, that is, larger shear angle and less tool-chip contact length, and showed good cratering resistance. Improvement in ductility is mostly desired for increasing usefulness of ceramic tools.

1. 緒 言

この数年来、ソ連、イギリス、アメリカなどの諸国において酸化アルミニウムを主体とする新しい切削工具材料セラミックがようやく実用化の段階に入り、切削能率向上のためにおおいにその性能が期待されている⁽¹⁾。中でも酸化アルミニウムはタングステンカーバイドに比べて常温におけるかたさが高く、また高温においても容易にその機械的性質が低下しないことから、現在のタングステンカーバイド工具よりさらに削り速度を高くすることができ、またセラミックが非金属性であるために金属材料を切削する場合に被削材と工具との間の凝着性が少く、構成刃先を生ぜず、その仕上面がよいのではないかと考えられる。さらにこのセラミックはタングステンカーバイド系の工具材料に比べて原料が安価であるため、量産に入れば工具費用は飛躍的に低下することも予測されている。このような数々の特色が考えられる反面、セラミックは粘り強さが十分ないために断続切削あるいは、切削中の振動などによって刃先にチッピングを生ずるおそれも大きいとされている。

この研究はセラミック工具の実用化のための基礎資料をうるため、タングステンカーバイド工具と比較しながらセラミック工具の機械的性質、被研削性、切削機構上の特色、構成刃先の生成、加工仕上面の状態および工具の寿命について検討したものである。

2. セラミック工具の組織とかたさ

この研究に使用したセラミックチップはすべてイギ

リス某社の製品であり、またそれと比較のために用いたカーバイド工具は国産の S2 チップである。第 1 図

セラミック

カーバイド

第 1 図 セラミックおよびカーバイドの組織

にこのセラミックおよびカーバイドチップの顕微鏡写真を示す。この写真はセラミックおよびカーバイドチップを 3000# のメタルボンドのダイヤモンドといしで湿式研削を行い、弗化水素と硝酸との腐食液で腐食後、それぞれ 1000 倍および 1500 倍の金属顕微鏡でとったものである。この写真から、いずれのチップともビットはほとんどなく、またその組織もち密であって組織上の欠陥はないことがわかる。

二つのチップの機械的性質を比較するために、ロックウェルかたさ計 A スケールでそのかたさを測定した。その結果を第 1 表に示す。セラミックのかたさ測定の際には荷重を附加中にも圧こん周辺に大小さまざまなクラックを生じ、特に大きなクラックを生じたときには、か

* 昭和 31 年 10 月 1 日 東京秋期講演大会において講演、原稿受付 昭和 31 年 11 月 28 日。

、* 正員、科学研究所。

第1表 セラミックおよびカーバイド
かたさ測定結果 (R_A)

チップ材質	測 定 値	平均値
セラミック	80.4, 84.5, 76.5, 76.1, 85.5	80.6
カーバイド	91.6, 90.8, 91.4, 91.1, 91.1	91.2

たさの測定値が非常に低くなり、したがって第1表の測定値にも大きなばらつきができ、またかたさ平均値をカーバイドチップに比べて相当低い値を示している。このかたさ測定結果は、現在のセラミックはまだ粘り強さが十分でなく、耐衝撃性に劣るのではないかという不安の念をいだかせる。

3. セラミック工具の被研削性

次にセラミックの粘り強さが前にわかったように小さいために研削によって十分鋭利な刃先を生ずるか否かを検討する。このためセラミックおよびカーバイド工具を各種の粒度のダイヤモンドといしで研削して、その面および刃先のあらさを測定した。研削に使用したといしはすべてメタルボンドダイヤモンドといしで、研削は湿式で行った。また工具はすべて横すくい角 0° 、横逃げ角 6° の片刃バイトを用い、工具の表面あらさは仕上面あらさ検査機で先端半径 5μ のサファイヤ針で10000倍の倍率で測定し、また刃先の鋭利性は先端角度 30° 、半径 10μ のナイフエッ

第2図 工具面および刃先あらさの測定例

第3図 ダイヤモンドといし研削による
工具面あらさ

第4図 ダイヤモンドといし研削による
工具刃先あらさ

ジ状の触針を用いて倍率1000倍で測定した。第2図はこの測定結果の一例、また第3図および第4図はそれぞれすくい面あらさの最大および刃先あらさの最大とダイヤモンドといしの平均粒径との関係をとったものである。この二つの図から工具面のあらさおよび刃先のあらさともカーバイドに比較してセラミックが著しく劣っていることがわかる。これはセラミックのもろさのために研削によって微細なチッピングを生ずるためと考えられる。したがってカーバイド工具を100#のダイヤモンドといしで研削したときと同

第5図 工具刃先あらさ
の模型図

程度の刃先あらさをうるためには、セラミックでは300#程度のダイヤモンドといしで研削しなければならない。

またこれらの図から工具表面あらさに比べて刃先あらさが著しく大きいことに気付く。もしすくい面および逃げ面のあらさ h_m が等しければその刃先のあらさ H_m は理論的には第5図のように

$$H_m = h_m / \sin(\theta/2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし θ は刃先角

で与えられる。たとえば $h_m = 0.2\mu$ 、 $\theta = 84^\circ$ とすれば、(1)式から計算される $H_m = 0.3\mu$ となるはずであるが、実測値はカーバイドでは約 3μ 、セラミックでは約 6μ であってはるかに大きな値を示す。これは研削の際に刃先に微細なチッピングを生ずるため、セラミックでは特にこれがはなはだしいことを示すものである。

4. セラミック工具による切削機構の特色

次にセラミック工具で切削を行う場合に、工具材質

が異なるために切削機構上変化があるかどうかを検討する。このためセラミックおよびカーバイド工具をともに横すくい角 0° 、横逃げ角 6° の片刃バイトにして、焼ならしたクロムモリブデン鋼 (SCM 4) の丸棒旋削を行った。切削条件はすべて切込み 2 mm 、送り 0.1 mm/rev で乾燥切削である。この

第 6 図 流れ型切削模型

ような近似的な二次元切削試験によって、第 6 図のような流れ型切削をする場合の切くずのせん断角 ϕ および工具と切くずとの接触長さ l とを求め、また工具動力計によって切削抵抗の水平成分 F_c および垂直成分 F_t とを測定した。

単位体積の被削材を切削するに要する全切削仕事量を u 、そのうちせん断面におけるせん断仕事を u_s 、また工具すくい面の摩擦仕事を u_f とすればこれらの値は

$$u = u_s + u_f = F_c / bt \quad (2)$$

ただし b : 切込み, t : 送り

$$u_s = \tau_s \{ \tan(\phi - \alpha) + \cot \phi \} \quad (3)$$

ただし τ_s : せん断面におけるせん断応力,

α : すくい角

$$u_f = \tau_c l / t_2 \quad (4)$$

ただし τ_c : 工具接触面におけるせん断応力,

t_2 : 切くず厚さ

で表わされる。したがって せん断面 および工具接触面における せん断応力の小さいほど、せん断角の大きいほど、また工具と 切くず との接触長さの短いほど切削仕事が少なくなるはずである。ところで せん断面における せん断応力は、もっぱら被削材の性質のみに左右され、工具材料によって異なるのは後の二者と考えられるので、セラミックおよびカーバイド工具による切削実験結果からこれらの値を求めてみる。第 7 図はこの二つの工具で切削を行った場合の せん断角 および 工具接触面長さと 削り速度との関係である。この結果から 削り速度のいかにかわらず、セラミック工具の方が常にカーバイド工具より大きなせん断角を生じ、また切くずと工具との接触長さも短く、工具材料としては好ましい性質を持つことがわかる。したがって当然セラミック工具で切削した方が切削抵抗が少なくなることが予期されるが、実測の結果は第 8 図に示すようにその水平成分 F_c 、垂直成分 F_t とともにセラミック工具の方がカーバイド工具より若干大きくでている。せん断面に働く せん断応力はセラミック工具で切削する場合でも、カーバイド工具で切削する場合でも等しいと考えられるから、セラミッ

被削材 SCM 4 (焼ならし), 工具形状 0-0-6-6-6-0-0.5, 切込み 2 mm , 送り 0.1 mm/rev

第 7 図 セラミックおよびカーバイド工具切削によるせん断角および工具接触長さと削り速度との関係

切削条件は第 7 図と同じ

第 8 図 セラミックおよびカーバイド工具切削による切削抵抗と削り速度との関係

ク工具で切削する場合の切削抵抗の増分が せん断面 AB (第 6 図) の間に働くとはとうてい考えられない。これはおそらくはセラミックの もろさ のために切削開始後まもなく刃先あるいは逃げ面に微細なチップングを生じ、このために刃先で余分の切削仕事が消費されているためと考えられる。

5. 構成刃先の生成状態

セラミック工具は非金属性の材料であるため、金属

切削の場合には切くずと工具との凝着性が少く, 構成刃先を生じないのではないかと期待が持たれるので, 次にこの点について検討する。

切削条件は第7図と同じ

第9図 セラミックおよびカーバイド工具切削による構成刃先の生成と消滅

そこで前項の切削試験のときと同じ切削条件で削り速度を低速度から徐々にあげながら構成刃先が附着しているかどうかを観察した。構成刃先が附着しているかどうかは切くずの裏側すなわち工具との摩擦面側に構成刃先が脱落したこん跡があるか, あるいは構成刃先による擦こんがあるかどうかによって判定した⁽²⁾。第9図はカーバイド工具と比較しながら構成刃先の観察を行った結果である。この結果からセラミックおよびカーバイド工具のどちらも削り速度が低い場合には構成刃先が生成し, 削り速度が十分高くなれば消滅すること, また構成刃先が消滅する臨界削り速度は今の場合どちらの工具でもほぼ 42 m/mn であって, セラミックが非金属性であるために構成刃先が生成しないというような事実はないことがわかる。削り速度が高く構成刃先を生じないような場合にでも, 顕微鏡で観察すればセラミック工具のすくい面上には微細な金属粉が附着しているのが認められ, したがってこの上の

切くずがさらに分離して蓄積してゆくかどうか構成刃先の生成のための条件であって, 工具材質というものは余り関係しないのではなからうか。

第11図 セラミックおよびカーバイド工具切削による加工面あらさと削り速度との関係

6. セラミック工具による切削仕上面

次にセラミックおよびカーバイド工具を用いて切削する場合の仕上面の良否について検討する。このため前の切削試験ときと同じ形状のセラミックおよびカーバイド工具を用い, 切込み 2 mm, 送り 0.1 mm/rev の中程度の切削と切込み 0.5 mm, 送り 0.025 mm/rev の軽切削とを行い, その仕上面のあらさを測定した。第10図にその測定結果の一例を, また第11図に切削仕上面あらさの最大高さ, 削り速度との関係を示す。第10図からわかるように切込み 2 mm, 送り 0.1 mm/rev の中程度の切削の場合にはその切削仕上面あらさにはっきりと送りに等しいピッチの山があらわれているが, 軽切削の場合には送りのマークははっきりしない。第11図から中程度の切削条件ではセラミック工具で切削した場合も, またカーバイド工具で切削した場合でも, 切削仕上面のあらさはそれほど大きな差はないが, 軽切削の場合にはセラミック工具で切削したときの方が若干仕上面が良くなっているようである。

第10図 セラミックおよびカーバイド工具切削による切削加工面あらさ測定例 (削り速度 150 m/mn)

この実験に使用した工具は先端に 0.5 mm の半径の丸みをつけてあるので, もし被削材が工具の形どおりに忠実に切削され, 他の変形がなければ, 第10図のような切削条件では円弧の部分のみが表面に残り, したがってその仕上面は半径 0.5 mm の円弧を送りの量だけずつ軸方向にずらしていったときに得られる曲線となるはずである。この曲線をあらさの測定のとときと同じ倍率で縦横に拡大して書いたものを第10図に示した。このようにして幾何学的に得られるあらさ曲線のあらさの最大値 H_0 は工具先端の丸みの半径を r と

すれば、送り t_1 が余り大きくないときには

$$H_c \approx t_1^2 / 8r \quad \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。したがって送りが 0.1 mm/rev のときには あらさ の最大値は 2.5μ 、また、送りが 0.025 mm/rev のときには 0.13μ になるはずである。しかるに第 10 図および第 11 図を見てわかるように実際の表面あらさはこれよりはるかに大きな値を示す。すなわち実際の切削仕上面は工具の幾何学的形状によってきまるあらさ以外に数多くの外的条件によってそのあらさが増大しているものと考えられる。そのおもなものは切削中の被削材および工具の振動、工具刃先に附着する構成刃先あるいは切削中の刃先の欠損による工具形状の実質的な変化および被削材に切削抵抗が働き、そのために工具前切刃面の部分の被削材が変形してより上ってくることなどによるものと考えられる。ところで第 10 図の上の図ではその あらさ はほとんど同じ形の山が送りと同じピッチで並んでおり、しかもその山の高さは工具の形状から幾何学的に考えられる あらさ の最大高さよりはるかに大きい。このように切込み、送りが大きく、切削抵抗が比較的大きく、しかも構成刃先は完全に消滅していると考えられるような場合には、工具前切刃面前面の被削材のより上りがあるさ増大の主因をなしているものと思われ、したがって工具材質はそれほど関係がないのであろう。しかし第 10 図の下図のような軽切削の場合にはこの程度の削り速度ではまだ構成刃先が附着しているおそれもあり、また表面あらさが小さくなればなるほど刃先の鋭利性、工具と被削材との凝着性⁽³⁾等の効果が大きくあらわれ、工具材質の影響が見られるのであろう。

7. セラミック工具の寿命試験

最後にセラミック工具がどの程度削り速度あるいは送りをあげて切削加工の能率を向上させうるかを検討するためにこの工具の切削寿命試験を行った。このときの切削条件および工具形状などはすべて前と同様に、すなわち横すくい角 0° の片刃バイトを用いて切込み 2 mm 、送り 0.1 mm/rev で、クロモリブデン鋼丸棒の二次元旋削を行った。そして切削時間とともに横逃げ面の摩耗幅の最大値が増大してゆく状態を測定した。第 12 図はセラミック工具で切削した場合の横逃げ面摩耗幅の最大値と削り時間との関係である。また第 13 図はセラミック工具と比較するためにカーバイド工具を用いて、同じ切削条件で寿命試験を行ったときの横逃げ面摩耗幅の最大値と削り時間との関係である。この二つの図からどちらの工具においても逃げ面の摩耗幅が $0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$ 程度の値に達すると、それ以後の摩耗が急激に増大してゆく現象が見られ⁽⁴⁾、またこの摩耗が急激な増大を示すときの臨界摩耗幅はセラミック工具の方が若干低いことがわかる。このような現象は逃げ面が摩耗して被削材と摩擦する面積が増大するとその面に働く圧縮応力が急激に増大

切削条件は第 7 図と同じ

第 12 図 セラミック工具の逃げ面摩耗幅の増大

切削条件は第 7 図と同じ

第 13 図 カーバイド工具の逃げ面摩耗幅の増大

して摩耗を促進するためと考えられている⁽⁵⁾ので、セラミック工具の臨界摩耗幅がカーバイド工具に比べて若干低いことはやはりセラミックの粘り強さかあるいは機械的強度がなお少し不足して早く大きなチップングを起すものと考えられる。たとえば第 14 図はカーバイドおよびセラミック工具によって第 7 図と同じ条件で削り速度 200 m/min で 8 分間切削したときの工具切刃の あらさ の測定記録である。この図からセラミック工具の切削後の あらさ はカーバイド工具に比べてはるかにあらく、刃先のチップングが著しいことがわかる。第 15 図は 前の結果から 逃げ面 の 最大摩

削り速度 200 m/mn, その他の切削条件は第7図と同じ

第14図 切削後の工具切刃のあらさ

第15図 セラミックおよびカーバイド工具の寿命曲線(切削条件は第7図と同じ)

耗幅が0.5 mmに達したときを工具寿命と見なして求めたセラミックおよびカーバイド工具の寿命曲線である。この図から現在のセラミック工具はなおその寿命がカーバイド工具に比べて相当短いことがわかる。そのおもな理由は、逃げ面の摩耗は微細なチップングによるものと考えられるので、セラミックの粘り強さの不足によるものと思われる。

次にすくい面のクレータについて比較してみる。第16図は削り速度 200 m/mn で切削したときの工具すくい面のクレータ深さおよび逃げ面の最大摩耗幅の削り時間による変化を求めたものである。工具すくい面のクレータは工具面温度が非常に高くなるための凝着性の摩耗によるものと考えられているが、この図からその点ではセラミックはカーバイド工具に比べてほぼ同程度の性能を持つことがわかる。これはセラミックの摩耗の耐熱性がカーバイドと同程度に大きいことを示すもので、したがってセラミックの粘り強さが現在より改善されて高くなれば、逃げ面の摩耗が減少し、

第16図 セラミックおよびカーバイド工具の逃げ面摩耗幅、クレータ深さの比較(削り速度 200 m/mn)

その工具寿命も飛躍的に増大することが期待される。

8. 結 語

以上の結果を総合すれば新しい工具材料セラミックは酸化アルミニウムを主体とするため、当然タングステンカーバイドを主体とする工具よりも高温における耐摩耗性をよくする可能性があり、したがって耐クレータ性がよく、せん断角が大きく、切くずと工具接触面長さが短いという切削機構上の特色も持ち、また軽切削においてはカーバイド工具より良好な仕上面が得られるがその反面現在われわれが入手しうるセラミック工具はまだ粘り強さが不足し、そのため被研削性が悪く、十分鋭利な刃先をうるためには微粒のダイヤモンドといいで研削する必要がある、切削中にチップングも生じやすく、また微細なチップングによるためか工具逃げ面の摩耗も大きく、その寿命はなおカーバイド工具には及ばない。ともかくまだ未完の工具といふべきであってその粘り強さの改善が最も望まれる。

この研究は昭和 31 年度通産省機械工業の基礎的研究委託事業によって行われたものであり、また本研究の遂行にあたっては科学研究所機械工学研究室の野田英男君、丸山久君、横山忠雄君の熱心な協力を得た。ここに記して厚く感謝の意を表わしたい。

文 献

- (1) W.B. Kennedy and Bennett Bovarnick, *Tool Engineer*, (1955), 71; *Am. Mach.*, No. 22 (1954), 113.
- (2) 中山一雄・井口和文, 精密機械, 22 (昭 31), 16.
- (3) 切削工具刃先に微細な刃こぼれがあつて、前切刃面が被削材とわずかに接触している場合には、その部分で送りでできた凹凸を再び切削して、かえって表面あらさが減少することがある。また構成刃先の発達は、被削材の性質のみによつてきまるが、その大ききすなわち構成刃先の附着面積は、工具材料と切くずとの凝着性によつて変るかも知れず、軽切削の場合にはこのようなことも表面あらさに関係するであろう。
- (4) 竹山秀彦, 精密機械, 21 (昭 30), 304.
- (5) 大越諄・佐田登志夫, 精密機械, 23 (昭 32), 404.