Al₂O₃-ZrO₂ 系セラミック工具による 炭素鋼の高速正面フライス切削*

林 桂** 山根 八洲男*** 鳴瀧 則彦***

High Speed Face Milling of Plain Carbon Steel
with Alumina-Zirconia Ceramic Tool

Katsura HAYASHI, Yasuo YAMANE and Norihiko NARUTAKI

High speed face milling for plain carbon steel S 45 C was carried out with ceramic tools. TiC added alumina, and zirconia toughened alumina ceramic tools were mainly used. Among the tested ceramic tools, the zirconia toughened alumina ceramic tool showed the largest crater wear resistance in high speed face milling. However, in turning the same steel, the crater wear resistance of the ceramic tool was almost the same degree as compared to the other ceramic tools. The superior wear resistance of the zirconia toughened alumina ceramic tool is based on its stability for the reaction with FeO at high temperature.

Key words : cutting, ceramic tool, wear characteristics, face milling

1. 緒 言

高速切削は生産性を向上させるためのもっとも有効な方法の一つである。しかし、高速切削では切削温度が上昇するために切削速度の増加につれて工具摩耗が大きくなる傾向がある。そのため一般に高速切削においては金属を含有しないアルミナ等のセラミック工具が優れた性能を示す。しかし、高速正面フライス切削においては工具は高い切削温度だけでなく機械的衝撃や熱衝撃にさらされるため、アルミナセラミック工具を使用するのは難しい。

ところでセラミックスはそのじん性を向上させるために種々の方法¹⁾が試みられており、その多くがアルミナセラミック工具に応用されている。なかでも繊維強化とジルコニア強化は効果的で、特にジルコニア強化アルミナセラミックス (Zirconia Toughened Alumina : ZTA) は比較的簡単に大きな効果が得られ、Fe と容易に反応する成分を含んでいないという特徴がある。

この研究では、平均粒径の異なる 2 種の ZTA についてそれぞれの強度、硬度、破壊じん性等を調査し、そのうちの 1 種を使用して炭素鋼の高速正面フライス

切削を行った。

2. ZTA の微構造と機械的特性

2.1 抗折強度と破壊じん性

ZTA の強化機構は次のように説明されている²⁾。単斜晶ジルコニアを含むセラミックスを焼結すると、昇温中にジルコニアは正方晶に相転移し、ジルコニアの体積は収縮する。これを冷却すると正方晶ジルコニアは再び単斜晶ジルコニアに転移するが、この際の転移温度はジルコニアの粒径に依存し、粒子径が小さくなるほど相転移温度は低下し、ある粒径以下では室温でも正方晶として残存する。

このような正方晶ジルコニアを含むセラミックスにクラックが侵入すると、クラック先端の応力場においてジルコニアが正方晶から単斜晶に応力誘起変態する。この変態は体積増加を伴うことから新たにマイクロクラックが発生し既存のクラックの進展を妨げる。

従って ZTA の機械的性質は含有されるジルコニアの粒径に大きく依存する。そこで市販されているジルコニア粒径の異なる 2 種類の ZTA について走査型電子顕微鏡を用いて組織を観察し、抗折強度、破壊じん性、硬度を測定した。抗折強度は JIS R 1601 に基づいて 3 点曲げ抗折試験によって測定した。破壊じん性値は IF 法を用い新原の式³⁾によって算出した。また同時にビッカース硬さも測定した。

これらの ZTA の SEM 写真を図 1 に示す。写真の

* 原稿受付 平成 4 年 12 月 7 日

** 正 会 員 京セラ(株) (京都市山科区東野北井ノ上町 5-22)

*** 正 会 員 広島大学工学部 (東広島市鏡山 1-4-1)

Fig. 1 SEM photographs of polished and thermally etched surfaces

Table 1 Mechanical properties of ZTA

	T. R. S. MPa	K_{Ic} MPa ^{1/2}	HV
A	1 230	5.5	1 600
B	590	4.7	1 600

白い部分がジルコニアで灰色の部分が Al_2O_3 である。試料 A は Al_2O_3 , ZrO_2 とともに試料 B よりも微細な結晶より成ることがわかる。また、この写真のジルコニアの面積率から 2 種の材料のジルコニアの含有率に大きな差がないことがわかる。抗折強度と破壊じん性値を表 1 に示す。抗折強度、破壊じん性ともにジルコニア粒径の小さい試料 A が高い値を有している。

2.2 相転移と圧縮応力

ZTA 中のジルコニアは応力誘起変態をすることから、研削加工によっても相変態を生じる。図 2 は試験した ZTA の研削前後の X 線回折パターンを示す。研削後には研削前に認められなかった単斜晶 ZrO_2 の回折ピークが認められ、研削によって正方晶から単斜晶への相転移が起きていることがわかる。X 線回折パターンから Miller らの方法⁴⁾によって正方晶と

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of the zirconia toughened alumina ceramic tool before and after grinding

Table 2 Change of tetragonal phase of ZrO_2 on ground surfaces (mol%)

	Before	After	Change of t- ZrO_2
A	98	63	-35
B	53	32	-21

単斜晶のモル比を求めると、表 2 に示す結果となり、転移する ZrO_2 の量は研削前に正方晶の ZrO_2 をより多く含有した ZTA の方が多くなる。

また、 ZrO_2 の相転移は体積増加を伴うので研削の結果表面に圧縮応力が発生する。研削の結果発生する応力の大きさは転移した ZrO_2 の量に比例するため、表 2 に示すように、研削前に正方晶の ZrO_2 をより多く含有した ZTA の方が、研削後高い残留圧縮応力を有する傾向がある。市販のセラミック工具は研削仕上げされているので、表面に圧縮応力が発生している可能性が高い。

そこで研削による残留圧縮応力の生成の程度を観察するため、試料 A と ZrO_2 を含有していない Al_2O_3 -TiC 系のセラミック工具について、 ZrO_2 の相転移が生じ難いゆるやかな条件で表面をポリシングし、ポリシング量とそれぞれの面の残留応力を求めた。残留応力の測定は特性 X 線 Fe-K α を用い Al_2O_3 の (2 1 10) 回折面で測定を行った。

図 3 は切削試験に使用した Al_2O_3 - ZrO_2 セラミック工具とアルミナ-炭化チタン系 (Al_2O_3 -TiC) セラミック工具の表面の圧縮残留応力を示す。 Al_2O_3 -TiC セラミック工具と比較すると試験した Al_2O_3 - ZrO_2 セラミック工具には非常に高い圧縮残留応力が存在している。この工具表面の圧縮の残留応力は、前述のクラッ

Fig. 3 Residual surface compressive stress of the tested ceramic tools

ク先端からのマイクロクラックの発生による応力の緩和と相まって、工具表面からのクラックの進展を抑える効果があるものと期待できる。

3. FeO に対する反応性

鋼の正面フライス切削においては、エアカット時に切りくずの酸化によって酸化物 (FeO) が生じるが、FeO はセラミックスと反応性が高い傾向がある。従って、工具材料が高温で FeO に対する安定性が高ければ、その工具材料は炭素鋼の正面フライス切削において高い耐クレータ摩耗性を示すと考えられる。そこでセラミック工具と FeO との反応試験を行った。

まず、反応試験の温度を決定するために電気伝導性のよい TiC を含有する Al₂O₃-TiC セラミック工具を用い、工具被削材熱電対法によって切削温度を測定した。その結果切削速度 400 m/min の時、切削温度は約 1100°C であった。工具被削材熱電対法によって測定した切削温度は工具と被削材の接触面の平均温度であると言われている⁵⁾。クレータ摩耗が最大になる工具-切りくず接触面の中央付近ではこれよりも高温となると考えられることから試験温度は 1300°C とした。

試験はセラミック工具間に FeO の粉末を挟み試験温度で 100 分間加圧加熱を行い、炉冷の後、試料境界面に垂直にダイヤモンドディスクで切断し、切断面をダイヤモンドペーストで研磨した。研磨後断面部の元素分布を EPMA により測定した。

図 4 に (Al₂O₃-TiC)-FeO-(Al₂O₃-ZrO₂)、および図 5 に (Al₂O₃)-FeO-(Al₂O₃-ZrO₂) の組合せで反応試験を行った試料の EPMA による測定結果を示す。それぞれ図中右が SEM 像と各元素の線分析結果を重

Fig. 4 Line analysis and elements mapping of diffusion couple : (Al₂O₃-TiC)-FeO-(Al₂O₃-ZrO₂)

Fig. 5 Line analysis and elements mapping of diffusion couple : (Al₂O₃)-FeO-(Al₂O₃-ZrO₂)

ねた図で、左は同じ部分における各元素の面分析結果である。

Table 3 Chemical composition and hardness of the tested work materials

	Chemical composition wt%						HB
	C	Si	Mn	P	S	Al	
S 45 C	0.47	0.18	0.75	0.021	0.011	0.008	181

Al_2O_3 -TiC セラミック工具の場合は工具と FeO との界面が判別し難くなるほど Ti および Al が FeO 層内部に侵入している。一方、 Al_2O_3 -ZrO₂ 工具と Al_2O_3 工具の場合には工具表面に Al_2O_3 -TiC 工具程の顕著な反応は見られない。標準生成自由エネルギーを比較すると⁶⁾、1300°C では ZrO_2 : $-205\,000\text{ cal/g}\cdot\text{mol O}_2$ に対し、 Al_2O_3 : $-185\,000\text{ cal/g}\cdot\text{mol O}_2$ 、TiC: $-38\,000\text{ cal/g}\cdot\text{mol C}$ とジルコニアは最も安定で、TiC が最も不安定である。したがって、これらの工具の FeO に対する安定性の差は工具成分である Al_2O_3 、 ZrO_2 、TiC の自由エネルギーの違いによるものと思われる。

4. Al_2O_3 -ZrO₂ セラミック工具の 摩耗特性

Al_2O_3 -ZrO₂ セラミック工具を用いて機械的及び熱的衝撃が大きい正面フライス切削試験と旋削試験を行った。試験にはそれぞれマシニングセンタと NC 旋盤を用い、乾式切削とした。被削材の化学組成と硬度を表 3 に示す。

工具は Al_2O_3 -ZrO₂ セラミック工具、 Al_2O_3 -TiC セラミック工具および純アルミナ系 (Al_2O_3) セラミック工具を使用した。一部超硬工具も使用した。工具形状は SNGN 120408、工具角は正面フライスではラジアルレーク -5° 、アキシャルレーク -5° 、コーナアングル 25° で、旋削では $(-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8)$ とした。その他の切削条件はそれぞれの図中表示した。

試験結果

図 6, 7 に炭素鋼 S 45 C を切削速度 400 及び 600 m/min で正面フライス切削を行った場合の摩耗進行曲線を示す。逃げ面摩耗については工具間で極端な差は認められない。しかし、すくい面摩耗には明確な差が認められ、超硬工具はいずれの切削速度においても特に大きなクレータ摩耗が生じている。一方、 Al_2O_3 -ZrO₂ セラミック

工具は 400 m/min 以上でもっともクレータ摩耗が小さく、特に切削速度 600 m/min では他のセラミック工具の 1/2 以下である。

図 8 は切削速度 600 m/min で切削したセラミック工具のすくい面を示している。すくい面には溝状摩耗が認められる。セラミック工具上のこれらの溝は熱クラックのために生じたと思われる⁷⁾。そこですくい面摩耗部の中央部横切れ刃に平行にスタイラス型の表面粗さ計で測定した。得られた結果を図 9 に示す。 Al_2O_3 -ZrO₂ セラミック工具の断面は他のセラミック工具に比べ溝状摩耗の凹凸が少ない。このことから、 Al_2O_3 -ZrO₂ セラミック工具は試験した他のセラミック工具に比較して熱クラック抵抗があると言える。

図 10 は同じ被削材 S 45 C を切削速度 400 m/min で旋削試験した結果を示している。超硬工具の摩耗量

Fig. 6 Wear progress curves of tested tools when milling S 45 C at 400 m/min

Fig. 7 Wear progress curves of tested tools when milling S 45 C at 600 m/min

Fig. 8 Rake face of the tested ceramic tools when milling S 45 C

Fig. 9 Cross-section profile of the tested ceramic tools when milling S 45 C
Cutting conditions are the same as Fig. 8

はこの切削条件では非常に大きいのでここでは結果を省略した。旋削の場合にはフライスに比較して試験したセラミック工具のクレータ摩耗はほとんど同じであ

Fig. 10 Wear progress curves of tested tools when turning S 45 C at 400 m/min

る。この傾向は切削速度 600 m/min でも同様であった。

5. 考 察

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ セラミック工具は炭素鋼の正面フライス切削において優れた耐摩耗性を示した。高速正面フライス切削時のクレータ摩耗の主因⁸⁾(酸化した切りくず (FeO) が工具成分と反応し工具を劣化させる) および、セラミック工具で鋼を高速正面フライス切削した場合の工具すくい面の損傷状態(すくい面には熱き裂と考えられる浅いき裂が数多く見られる)を考えると、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ セラミック工具が優れた耐クレータ摩耗性を示す理由は、FeO に対する安定性が優れているかあるいは、耐衝撃性そのものが優れているかのいずれかであると考えられる。

FeO に対する安定性については、FeO との反応実験で示したように、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ セラミック工具は TiC 添加のセラミック工具よりは FeO に対し安定であるが、 Al_2O_3 セラミック工具とは優劣つけ難く、FeO に対する安定性のみで耐クレータ摩耗性を説明することは困難である。

一方耐衝撃性については、工具表面の圧縮応力が重要な役割を果たしている。 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ セラミック工具は、成形研削時の衝撃により圧縮応力をその表面に発生させている。この応力は図 3 に示したように表面下 10 μm 以内であるが、実際には摩耗量が 10 μm を大きく越えた場合でも摩耗進行速度に変化は見られない。従って正面フライス切削時の被削材との衝撃により常に工具表面に圧縮応力が発生している可能性がある。

そこで切削後の工具すくい面底部について、圧縮応力の有無を調査した。なお、すくい面底部の面積は非常に小さいため(本切削実験条件ではほぼ $1 \times 0.2\text{mm}$) 直接応力を測定することが困難なことから、圧縮応力を発生させる主因である ZrO_2 の相変態をスポット径 100 μm の微小部 X 線回折法により測定した。その結果約 20% の ZrO_2 が正方晶から単斜晶に転移していることが認められた。以上より切りくずと接するすくい面底部には常に圧縮応力が存在しているものと推測でき、これが工具の対衝撃性(あるいは対き裂性)を向上させると思われる。

なお、耐アブレシブ性に関しては、旋削加工において同工具と他のセラミック工具

で特に顕著な差はみられなかったことから、ほぼ同程度と考えられる。

従って、鋼の正面フライス切削時における Al_2O_3 - ZrO_2 セラミック工具の優れた耐クレータ摩耗性は、同工具の FeO に対する安定性と、工具表面に存在する圧縮応力による耐衝撃性が共に寄与しているといえる。

6. 結 論

高速で切削性能のよい Al_2O_3 に ZrO_2 を添加して抗折強度が高い Al_2O_3 - ZrO_2 セラミックを作った。このセラミックは研削により表面に高い圧縮残留応力が生成した。

さらにこれを用いて炭素鋼の高速正面フライス切削を行ったところ、 Al_2O_3 - ZrO_2 セラミック工具は Al_2O_3 セラミック工具や Al_2O_3 - TiC セラミック工具に比較して優れた耐クレータ摩耗性を示した。しかし、同じ炭素鋼を旋削した場合、これらの3つのセラミック工具はほとんど同じ耐クレータ摩耗性を示した。

この理由を明らかにするため、これらの工具と FeO との反応性の試験を行ったところ、反応試験では Al_2O_3 - ZrO_2 セラミック工具は Al_2O_3 - TiC セラミック工具よりも安定であることが明らかになった。しかし、 Al_2O_3 - ZrO_2 セラミック工具と Al_2O_3 セラミック工具の FeO に対する反応性に差は認められなかった。

なお、 Al_2O_3 - ZrO_2 セラミック工具は、 ZrO_2 の相変態から、正面フライス切削時の衝撃によりすくい面底

部に圧縮の応力が発生していることが推定された。

したがって、 Al_2O_3 - ZrO_2 セラミック工具の優れた耐摩耗性については同工具の FeO に対する安定性と、工具表面に存在する圧縮応力による耐衝撃性のいずれもがこれに寄与している。

参 考 文 献

- 1) M. V. Sain : Strategies for Toughening Very Hard Materials, Proc. 1st Int. Symp. on the Science of Engineering Ceramics, Ceram. Soc. Japan, (1991) 237.
- 2) N. Claussen et al. : Design of Transformation Toughened Ceramics, in *Advances in Ceramics 3, Sci. and Tech. of Zirconia*, ed. by A. H. Heuer et al., Am. Ceram. Soc., (1981) 137.
- 3) K. Niihara et al. : Further Reply to "Coment on 'Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics : The Median/Radial Crack System,'" J. Am. Ceram. Soc., 65, (1982) c 116.
- 4) R. A. Miller et al. : Phase Stability in Plasma-Sprayed, Partially Stabilized Zirconia-Yttria, in *Advances in Ceramics 3, Sci. and Tech. of Zirconia*, ed. by A. H. Heuer et al., Am. Ceram. Soc., (1981) 241.
- 5) T. Kitagawa : Experimental Measurement of Temperature Distribution in Tool-Chip Interface, Bull. Japan Soc. Prec. Eng., 9, 3, (1975) 83.
- 6) 日本金属学会編, 金属データブック, 改定2版, 丸善, (1984) 90.
- 7) 鳴瀧則彦, 越智秋雄, 浦部哲士 : S 45 C の正面フライス切削時のセラミック工具の損傷, 精密機械, 43, 5 (1977) 591.
- 8) 山根八洲男, 鳴瀧則彦 : 正面フライス切削時の工具損傷に及ぼす雰囲気の影響 (第1報) —すくい面摩耗への影響, 精密機械, 49, 4 (1983) 521.

量子機械工学で産学交流の研究会発足

日本工業技術振興協会 (JTTAS) は量子機械工学に関する産学交流の研究会を設立することになった。

材料の変形や破壊、摩擦といった力学現象を量子力学の視点から解明し、機器の設計などに役立てる可能性を探る。

固体中の電子の振舞いなどミクロの現象を説明する量子力学はエレクトロニクスの基礎となっている。

一方、材料の変形など機械的な性質は伝統的な古典力学で説明されてきた。

量子機械工学は、変形や破壊、摩擦などが起きているミクロな場所での電子や光、フォノン (格子振動の量子) などの挙動を量子力学の手法でとらえ、これをもとにマクロな機械的性質を解明しようというものである。ところで三重大学工学部の妹尾允史教授は80年代後半

に「マリオニクス」として提唱した。JTTAS が事務局となって設立するマリオニクス研究委員会は妹尾教授を委員長に東大、阪大、名工大、愛知工大、日立製作所、日本電信電話、新日本製鉄など産学の研究者が委員として参加する。

量子機械工学はまだ体系化された学問ではないが、材料の特性解明のほか、センサや駆動機構、メカトロニクス機器などの設計に応用する道を探る。

なお、JTTAS は工業技術院認可の社団法人で、各種の技術課題に沿った産学交流や人材のあっせんなどを手掛けている。

研究会に関しては事務局 (電話 03-3584-0207) に問い合わせたい。

(服部 敏夫)