セラミックカッタの熱損傷 (第 2 報)*

——熱亀裂の生成とその形態 (主として逃げ面の亀裂について)——

杉 田 忠 彰** 山 田 巖**

Thermal Cracks of Ceramic Face Milling Cutter (2nd Report)

——Formation and Configuration of Thermal Cracks——

Tadaaki SUGITA, Iwao YAMADA

This paper informs about progressive process and configuration of thermal cracks which produce in the ceramic face milling cutter.

Each crack passes through the grain boundary and the initiated crack on the tool surface is enlarged by friction between tool and workpiece. Consequently, the crack change into enlarged crack observed as a groove on the surface. Depth of the crack is shallow, range of 0.015~0.02mm, and each distance between the cracks increase with proceeding of the tool wear.

1. 緒 言

第 1 報¹⁾において、セラミック正面フライスの刃面上に発生する熱亀裂の形状、あるいは切削諸因子の影響について多少巨視的に取扱い、その熱亀裂の概略を示したが、これらの熱亀裂の生成過程あるいは微視的構造、そして形態とその変化についてはいまだ明らかでない点が多い。

かかる亀裂 (ごく刃面表層部にとどまるもの) が発生するためには、熱応力の作用に負うところが大きであると推察することは容易であるが、機械的な切削応力、あるいは被削材 (切りくずをも含めて) と刃面との摩擦によって亀裂の形態にいかなる変化を生ずるかは、それらの間の相関関係が明らかでないためにその影響を明確に論ずることができない。しかしながら、これらを個々について考えたとき、これらの熱亀裂はとくに被削材あるいは切りくずとの摩擦によって変化することが十分察せられ、その変化の仕方によっては刃面の損傷ひいては工具の寿命に重大な結果をもたらせるであろう。また、機械的応力が作用したとき、これらの熱亀裂の先端に応力集中を生じて、工具の破損が促進されるので、刃面の熱損傷の観察にもとづいた考察によってこれらの点についても、その実情を明らかにする必要がある。

そこで本報告では、主として横逃げ面上に発生する熱

亀裂の構造をより微視的に調査し、それによって亀裂の変化過程を考察して、セラミックカッタにおける熱損傷がどのようにして生ずるものであるかを検討することにした。なお、これらの熱損傷が工具摩耗といかなる関係を有するかについては第 3 報にゆずる。

2. 実 験 方 法

実験方法、実験装置などはいずれも第 1 報に報告したと同一である。被削材は F C-15 のみを用いた。

3. 亀裂周辺の微視的観察

すくい面および逃げ面側切れ刃面上の熱亀裂は、一般に幅の広い溝として観察される。そして一見単純な形跡を残しているようにみられるが、実際には、その亀裂の進行は複雑な方向性を示し、亀裂周辺のアルミナの組織にも変化を生ずるようになる。図 1 は横逃げ面における亀裂を中心としたその周辺の電子顕微鏡写真を示す。前述のように、亀裂は広い溝のごとく開口しており、その開口部の幅は広いところで $5\sim 10\mu$ にも達するので図 1 では亀裂とその周辺の関係を知るために、とくに亀裂の端部に近い開口の少ない部分を示している。亀裂から少しはなれたところでは、ほとんど通常のアルミナ焼結材の組織を呈しているが、亀裂の開口部の両側、すなわち図中の A 部では表面が微細に崩れている。この現象は被削材との摩擦によって亀裂が前述のように溝状に拡大される前駆状態ともいえるべきものである。この亀裂周辺の表面崩壊は図 1 でも明らかなように、亀裂溝幅の狭い

* 昭和 37 年 11 月 精機学会関西支部秋季講演会にて講演

** 正会員 姫路工業大学

図1 亀裂周辺の組織 (横逃げ面)

切削速度 $V=220\text{m/min}$, 一刃送り $f_t=0.085\text{mm/t}$

個所ほど著しい。そして、亀裂溝の肩部は一般に欠け落ちのように鋭い。これは、この種の材料がもろいことを示しているともいえる。またアルミナの結晶粒の粒界面は、図中のBに示すように高い切削熱によって選択的に侵されている。これに対して、粒内ではそのような痕跡は見られない。これらのことにより、粒界面は高温下では軟弱化しているのではないかと推測される。そして、このことは、いかなる温度条件下で亀裂が発生しているかを考察する重要な手がかりとなるであろう。再び亀裂の端部をみると、亀裂は粒界を縫っていることが知られるが(図の下側のC部)、亀裂の途中部分(上側のC部)でも粒界の部分で分離していることから、亀裂が発生するときあるいは、刃面の一部が欠け落ちるときは粒界が弱い状態にあることを示している。このようにして亀裂が存在するが、ときには粒によって、その直下の粒と強固につながっているものがある、図中のDに示されるように亀裂溝の中に残留することがある。

一般的には、亀裂は以上に述べたような形態を示すこ

図2 亀裂の構造 (横逃げ面)

切削速度 $V=290\text{m/min}$, 一刃送り $f_t=0.086\text{mm/t}$

とになり、同時に主亀裂の周りに2~3本の亀裂をも伴うことが多い。図2はやはり図1と同一刃面上の他の亀裂を示し、このうちの(1)の部分は上述のような個所を示す。この亀裂の相互間の距離は大体1粒子の程度であることが多く、かかる亀裂の出現によって、亀裂開口部は一そう拡大されやすくなる。主亀裂の周りの亀裂は、亀裂というよりもむしろ、主亀裂周辺の粒子間の結合が弱められた結果、ひび割れ状を呈したものと解すべきである。すなわち図1のA部に相当する部分内の結晶粒界の弱いところで、隣り合った粒の結合がはずれ、粒が孤立して強度的に弱くなり、それが被削材との摩擦で持ち去られ、結局亀裂の開口部が拡大することになる。また図中の(2)の部分の結晶粒と亀裂の状態からみて、図1のC部と同様に亀裂はやはり粒界を通ることが知られる。そして、さきに触れたように、亀裂が粒界を通ることは、結局高温下で粒界面が粒内よりも軟化しやすく、したがって、そこの強度が低下したことによるものであると推論することができる。

4. 亀裂の生成とその変化

アルミナ焼結材である刃物が、そのときにおかれていた熱的条件によって種々の熱損傷を伴うことはすでに知られたが、ここでは、これらの熱損傷の発生とその後の変化について、刃面損傷の観察から若干の検討を試みた。

急速加熱冷却の熱サイクルによって生ずる熱亀裂は、一見広い幅の亀裂であるとみられたが、これをより細かく観察すると、前出の図1あるいは図2のごとく、1粒子の程度の亀裂もあり、その亀裂は粒界を通過していることがわかった。そして主亀裂の周辺にひび割れ状の亀裂の出ることや、それが亀裂開口部の拡大に大きな役割を果たすであろうことも予想せられた。

これに反して、亀裂の生成初期の状態は、実験が困難であるだけにこれを適確にとらえることができない。したがって、正確な亀裂の時間的变化を示すことができないが、たとえば、図3(a)の矢印にみられるように一つの粒界だけを通るような初期状態の微視的亀裂の存在することから、亀裂の発生時においては図1のA部に見られるような面崩壊を伴わない、いわゆる微視的亀裂(micro cracks)であったと考えることができる。そして被削材との摩擦によって、亀裂周辺の崩壊を起こしながら(b)に示されるように2~3本もの亀裂となり、亀裂はしだいに開口して、切削時間の経過とともに、被削材との摩擦による機械的損傷へと移行して(c)の状態を経て(d)のごとく一本の拡大亀裂へと変化してゆく。(b)

a) 微視的亀裂の発生

b) ひび割れ状になった微視的亀裂

c) 微視的亀裂から拡大亀裂への過渡状態

d) 拡大亀裂

図3 熱亀裂の変化

切削速度 $V=290\text{m/min}$, 一刃送り $f_t=0.086\text{mm/t}$
 切込み $d=2\text{mm}$

から(d)への過程では、切削条件によってその亀裂の拡大するまでの時間が異なるのが普通である。横逃げ面において、切削条件の軽い場合の亀裂の拡大は、1個の粒がしだいに欠け落ちるような状態で、それは亀裂のごく周辺部のみに限られるが、切削条件が苛酷になってくると、亀裂の拡大がその周辺部にとどまらず、亀裂の出て

図4

亀裂中の粒子残留

いない部分にまで進行して、刃面脱落のごとき様相を呈してくる。

また、図4に示されるように、亀裂がかなり拡大されて刃面損傷が進行しているにもかかわらず、亀裂の中に相当数の粒子が残留していることは、この亀裂の深さがほどに深いものではなく、かつ、刃面上に並んだ粒とその直下につながっている粒との結合状態の良い場合がかなりあることを示している。この粒と粒との結合状態の良否は亀裂周辺の粒の脱落、ひいては亀裂の拡大の難易をある程度左右するものである。

5. 工具の摩耗と亀裂形態の変化

切削が進行するにつれて、刃面の摩耗は増加するが、かかる摩耗と亀裂との間にはどのような関係があるかについては不明であった。

図5 熱亀裂形態の変化(横逃げ面)

切削速度 $V=220\text{m/min}$, 一刃送り $f_t=0.085\text{mm/t}$
 切込み $d=2\text{mm}$

図6 摩耗幅と亀裂間隔の関係

V : 切削速度 f_t : 一刃送り量

図5は切削速度 220m/min, 一刃送り 0.085mm/t の横逃げ面上の一部の摩耗痕と亀裂の関係を示す。切れ刃線(写真の最上端)からある一定の距離にある亀裂の間隔に注目してみると、切削時間とともに亀裂間隔が変化していることに気づく。ところが一方、すくい面上の亀裂は、切削の初期からほとんどその亀裂間隔を変化することがない(第1報図1, 図6, 7などより推測できる)。

ここで横逃げ面の平均亀裂間隔を摩耗幅との関係でプロットしたのが図6である。この場合の亀裂間隔は、切れ刃線から 0.08mm の場所を測定し、切れ刃先端から切れ刃境界部までの間の平均間隔を求めた。この図のように亀裂間隔は摩耗幅と深い関係を有しており、摩耗幅の増加によって亀裂間隔が増大していることが知られる。ここでは、一刃送り量が大きい場合、網目状亀裂となるために、亀裂間隔をあまり正確に求めることができないので除いた。また図中の点線は寸法効果のない場合を推定したものである。

このように摩耗の進行につれて亀裂の形態が変化してゆくことは興味深い問題であるが、この理由を正しく考察するにはまだ不明の点が多い。しかしながら、一応このような事実が得られたので、これについて二三の検討を行なってみよう。まず熱サイクルの影響について考えてみると、一般にこのようなぜい性材料においても、1

回の熱サイクルによる応力負荷によって亀裂もしくは破損を生じないで、それを繰返すことによって亀裂あるいは破損を生ずる可能性のあることが知られている。²⁾ とすれば熱サイクル数の増加によって亀裂は生じやすくなり、亀裂数も増してその間隔も狭くなるはずである。熱サイクルが増加することは切削時間が長くなることに相当し、摩耗幅が増加する。そうすれば、摩耗幅の増大によって亀裂間隔も狭くなるはずであるのに、逆に広がっているの、熱サイクル数はこの場合に関係がないことになる。また亀裂の性質からみて、亀裂そのものが自由に移動することはあり得ないことであり、亀裂間隔が変わるのは何か他の原因によるのであろう。たとえば、亀裂が摩耗現象のごとき作用によって消滅することもあるであろうし、刃面の集团的脱落によって消滅する場合もあり得る。図5は摩耗によって亀裂の消滅した例である。このように亀裂の間隔は摩耗面の大きさに依存することがわかる。このことは、摩耗幅もしくは摩擦面積が切削中ほとんど変化しないようなすくい面上では、亀裂の間隔に目立った変化を認められなかったことから推察せられる。

そこで摩耗幅と亀裂間隔の関係について、つぎのような一考察がなされる。いま切削中に切削熱発生点から刃面に与えられる熱エネルギーは一定であり、亀裂の深さは温度分布によって決まりこれもほぼ一定であると仮定する。ある大きさの摩耗面のときに生ずる熱応力によって、ある状態の亀裂を発生してから、その後摩擦によって摩耗面が一そう広がったとすると、その後の亀裂はどのように変わるかという問題になる。亀裂そのものはそのときに与えられた弾性エネルギーを解放するために生ずるものである。そして一本の亀裂は一定であっても浅いので、その一本だけで十分なエネルギー解放を行ない得なければ別の亀裂を生ずることは当然であろう。したがって、摩耗幅が小さいときには短い一本の亀裂では不足で多数の亀裂によってはじめてエネルギー解放が行なわれると考えられる。一方摩耗幅が増加してくると、広い面に同様の熱エネルギーが与えられ、このときには先の場合ほど多数の亀裂の発生がなくとも一本の亀裂長さが長くなるので、一本の亀裂の解放するエネルギーは多くなり、その結果として亀裂間隔も大きくなると考えることができる。しかしながら、そのように考えてみると、摩耗幅の広いときの亀裂間隔が狭すぎる観がある(逆に摩耗幅の狭いときに亀裂間隔が広すぎるともいえる)が、これはまた別の現象たとえば、寸法効果のごとき作用によるのではないかと考えられる。

図7 刃物内部への亀裂浸入経路
(横逃げ面亀裂の断面形状)

切削速度 $V=290\text{m/min}$, 一刃送り $f_t=0.086\text{mm/t}$
切込み $d=2\text{mm}$, 被削材 FC-15

6. 亀裂の深さ

これまで発生した亀裂をすべて刃物表面上で観察し、その形態を論じてきたが、ここではその亀裂が表面より

a) すくい面

b) 逃げ面

図8 機械的亀裂と熱亀裂

M. C : 機械的応力による亀裂
T. C : 熱応力による亀裂

内部へどのような経路をたどり、どれくらいの深さまで入るものであるかを述べ、機械的応力による破壊と熱応力による亀裂との関係を報告する。

セラミックカッタ刃面に生ずる熱亀裂は、前述のごとく幅の広い溝 ($0.005\sim0.01\text{mm}$) として観察される。これは主として被削材および切りくずとの摩擦のさいに亀裂開口部の肩部の欠けなどにより拡大された結果によるものである。そのために、表面から内部へ向かって亀裂がいかなる経路をたどって、どのような形態を示すかを詳細に知ることがむずかしいが、いま、多数の亀裂断面の観察からその一例を図7に示す。図中の矢印は表面より内部への亀裂の侵入を示している。この亀裂の深さは $0.015\sim0.02\text{mm}$ くらいである。この亀裂の侵入形態の特徴は各亀裂ともに表面に対して斜めに入っていることである。たとえば、亀裂が引張応力によるものであるならば、少なくとも亀裂発生源近くの表層部では表面に直角に生ずると考えられるが、この亀裂の形態は引張応力よりはむしろせん断応力による破壊を暗示している。このような亀裂はセラミックスの高温高速下における摩擦試験中にも見出されている。³⁾

また、たまたま機械的応力によって刃欠けのごとき破損が生ずるときにおいて、熱亀裂がいかなる役割を演ずるかを知らるために、刃欠け寸前の状態をとらえた。図8はこれを示しており、(a)がすくい面で(b)が逃げ面である。機械的応力による亀裂はまずすくい面上の矢印のところから生じたものと考えられる。この亀裂は逃げ面側にも達し、破損寸前である。このような機械的応力による亀裂が発生すると、その亀裂は(b)で観察されるごとく、微視的には階段状の進路をとる。そして逃げ面に出ている亀裂状態からみると、亀裂は右上方のすくい面から侵入し、左下方で停留している。機械的応力による亀裂の進行方向の大勢は変わらないが、局部的には、すくい面からきた亀裂が切れ刃に直角な熱亀裂に遭遇してわずかにその熱亀裂に沿って下っている。次に熱亀裂と熱亀裂の間を横断して次の熱亀裂に達すると再びそれに沿ってわずかに下方に下っていることがみられる。このようくり返しがあるので微視的には、一見階段状の亀裂進路をとるように見られる。したがって、表面近くにまで機械的応力による亀裂が進行してきたとき、局部的には、このように熱亀裂が機械的亀裂の進行方向を一部変えるような役割を演じているようである。また、常識的に熱亀裂の先端部に応力集中を生ずる可能性が考えられ、そのために機械的応力による破壊が起こりやすいとも思われるが、実際にはそのような例は数少ない。これは、熱亀裂が前述のように開口され拡大された結果、亀

裂先端の鋭さがなくなり、丸味を帯びてくるために応力集中度が低下することによるのである。

7. 総 括

以上の結果を総括してつぎの諸項にまとめることができる。

- 1) 亀裂周辺の表面に崩壊を生ずることが多い。これは亀裂拡大の前駆状態ともいえる。
- 2) 亀裂の拡大は結晶粒界の軟化によって、1粒の単位で欠け落ちることにも関係がある。そしてまた、1粒界だけにとどまらず、2～3本が並行して発生し、あたかもひび割れ状を呈することがかなり見られる。このようなときには、亀裂は一般に急速に拡大しやすい。
- 3) 結晶粒界は高い切削熱によって選択的に侵され、それは切削条件の苛酷なほど著しい。
- 4) 亀裂は結晶粒界を通過する。粒界が高温下で弱められ、軟化することから、亀裂は高温下で発生する可能性が大きい。
- 5) 結晶粒が欠け落ちる（脱落）のは、表面に並んだ結晶粒とその直下の結晶粒との結合状態の良否に左右される。亀裂内に残留する粒子群の存在がこれを証明している。
- 6) 一般に、逃げ面において工具摩耗が進行するにつ

れて、亀裂間隔も増大する。

- 7) 熱亀裂の深さは $0.015 \sim 0.02\text{mm}$ 程度で、亀裂は表面から斜めに内部に向かって侵入する。
- 8) 機械的応力による亀裂が発生したときに、その亀裂が表面近くに達すると局部的に熱亀裂につながるようにみられる。また、一般に熱亀裂の先端は拡大され、丸味を帯びているので、とくに著しい応力集中を生じて刃先の破損が生じやすくなるとは考えられない。

終わりに、ご懇切なるご指導を賜った大阪大学工学部上田太郎教授、ならびに田中義信教授に心より感謝の意を表するとともに、実験試料に関してご協力をいただいた日本特殊陶業株式会社研究部の諸氏にお礼申し上げます。

(1964, 2月19日受付)

参 考 文 献

- 1) 杉田, 山田: セラミックカッタの熱損傷 (第1報), 精密機械, 30巻8号 (1964) 662.
- 2) 篠崎, 原田: 超硬質工具材料の熱応力抵抗, 精密機械, 27巻9号 (1961) 631.
- 3) L. B. Siebly, C. M. Allen: Friction and Wear Behavior of Refractory Materials at High Sliding Velocities and Temperatures, Wear, Vol.5 (1962) 312.