高炭素鋼の切削における高硬度工具の摩耗特性* (アルミナセラミック工具およびCBN工具の摩耗機構)

安 味 貞 正^{*1}, 土 井 雅 博^{*1}
佐 藤 秀 明^{*1}, 石 田 博 道^{*2}

Wear Characteristics of Hard Tools in the Cutting of High-Carbon Steels (Wear Mechanisms of Alumina Ceramic Tools and CBN Tools)

Sadamasa AMMI, Masahiro DOI,
Hideaki SATO and Hiromichi ISHIDA

This paper describes the cause of the increase in ceramic and CBN tool wear with the decrease in work hardness in the cutting of high-carbon steel. The following results were obtained. 1) Tool flank wear increases with increases in abrasive wear in the cutting of high-carbon steel. 2) The size of the true contact area between the tool flank and the cut surface increases with the decrease in work hardness. 3) Increase in flank wear with the decrease in work hardness is due to reinforcement of abrasive action of cementite in the work material.

Key Words: Cutting Tool, Ceramic Tool, CBN Tool, Tool Wear, Flank Wear, Abrasive Wear, High-Carbon Steel, Cementite in Steel, Work Hardness

1. 結 言

近年の焼結技術の進歩によってもたらされた耐衝撃性アルミナセラミック工具やCBN工具などの耐熱高硬度切削工具は、従来の超合金工具などでは切削困難な焼入鋼などの硬質材料の仕上切削に優れた性能を発揮し、研削工程の省略をも可能にするものとして注目されている。しかし、これらの切削工具は焼なまし鋼のような低硬度材料の切削では反って工具摩耗が増大するという特異な現象がみられることが報告されており⁽¹⁾、著者らも、炭素工具鋼の切削においてこの特異現象を確認している⁽²⁾。著者らはその特異現象について種々の面、すなわち、①工具逃げ面摩耗の形態、②工具逃げ面作用応力、③工具逃げ面温度、④工具逃げ面と切削面の接触機構、⑤被削材の硬さと組織の関係などの面から検討を加え、得られた新しい知見をもとにその成因について推論したが⁽³⁾⁽⁴⁾、いまだそれを十分に実証するまでには至っていない。

そこで本報では、被削材の硬さと組織の関係、工具逃げ面応力に注目してさらに検討を加えて、これまで

の知見との関係を総合することによって、前述の工具摩耗の特異現象の成因を実証することができたので、それらをまとめて報告する。

2. 工具逃げ面摩耗特性とその検討

熱処理によって硬さを変えた炭素工具鋼第3種(SK3)の被削材を、アルミナセラミック(以下単にセラミックと呼ぶ)とCBNの各工具で旋削加工した場合の、被削材硬さ(H_w)と工具逃げ面摩耗幅(V_B)の関係を図1に示す。図中のCBN-Cはセラミックバインダ、CBN-Mはメタルバインダの工具である。

なお、本切削実験は低切込み低送りの軽切削であり、この切削条件下ではすくい面摩耗の顕著な成長はみられず、工具寿命は逃げ面摩耗によって支配されることが認められた。したがって、すくい面摩耗ここでは省略する。

図1において、セラミック工具では被削材硬さ(H_w)が約500HVまでは H_w の上昇に伴い逃げ面摩耗幅(V_B)が減少し、 H_w がさらに上昇すると V_B も増大している。CBN工具では、被削材の全硬度域において H_w の上昇につれて V_B が減少している。

このように H_w の上昇に伴う V_B の減少は極めて興味深い現象であり、この成因について以下に検討を進

* 原稿受付 平成4年8月31日。

^{*1} 正員、武蔵工業大学 (〒158 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)。

^{*2} 正員、積水ハウス(株) (〒530 大阪市北区中之島 6-2-27)。

める。

2・1 工具逃げ面摩耗こんの微視的観察 一般に、金属切削における工具摩耗には機械的、熱的および化学的作用が複雑に影響しているが、セラミック工具やCBN工具はその組成上、高温硬さが高く、かつ鉄系被削材との親和性が低いなどの性質から考えて、工具逃げ面摩耗には機械的作用が支配的であることが予想される。そこで、逃げ面摩耗こんをSEMおよびEPMAによって詳細に観察した。

図2はセラミック工具逃げ面摩耗こんのSEM写真の一例であるが、工具逃げ面にはあたかもと粒で引かれたような微細な条こんが摩耗こん全面にわたって生じており、凝着物はほとんど見られない。この条こんは被削材硬さが低いほどシャープであり、その規模も大きい。これはCBN工具についても同様であり、また凝着物のないことはEPMAによっても確かめられている。

したがって、この逃げ面摩耗は“アプレシブ摩耗”であり、被削材中の微細な硬組織または硬粒子によってアプレシブ作用を受けたことを示唆している。

2・2 工具逃げ面応力に関する検討 工具逃げ面応力は、逃げ面摩耗を支配する重要な因子と考えられる。すなわち、逃げ面垂直応力は直接摩耗に關与する応力ではないが、これの増大は終局的には工具刃先の圧壊を誘起する。また摩擦応力は直接摩耗に關与する

応力である。逃げ面応力を求めるには、逃げ面に作用する力の大きさを知る必要がある。切削抵抗から逃げ面作用力を正確に抽出することはかなり難しいが、本実験条件下では工具摩耗による切刃丸味の増大はほとんどなく、すくい面摩耗深さの成長も小さく、また工具逃げ面摩耗面積と切削抵抗の間には、いずれの場合も図3のようにほぼ直線的關係が認められたので、切削抵抗の増大は逃げ面摩耗面積の増大に直接依存しているとみなせる。したがって切削抵抗の増分とそれに対応する摩耗面積増分から、逃げ面応力を求めることができる。さらに切削条件より、ノーズ半径($r=0.8$ mm)に対して切込み($t=0.2$ mm)および送り($f=0.09$ mm/rev)が極めて小さく、切削状態が準二次元的とみなせるので、逃げ面垂直力は背分力の増分として求められる。

以上の結果にもとづいて逃げ面応力を求めるための模式図を図4に示す。同図より、逃げ面垂直応力(σ_w)および逃げ面摩擦応力(τ_w)は式(1)で求められる。

$$\begin{aligned}\sigma_w &= \Delta F_t / A_a = (F_t - F_{t0}) / A_a \dots\dots\dots (1) \\ \tau_w &= \Delta F_c / A_a = (F_c - F_{c0}) / A_a\end{aligned}$$

ここで、 F_t は背分力、 F_{t0} は無摩耗時の背分力、 F_c は主分力、 F_{c0} は無摩耗時の主分力、 A_a は逃げ面摩耗面積である。

図5に、被削材硬さ(H_w)と式(1)で求めた両応力の關係を示す。図5(a)はセラミック工具、図5(b)

図1 被削材硬さと逃げ面摩耗幅の關係

図2 セラミック工具逃げ面摩耗痕のSEM写真 ($H_w=220H_v$)

図3 工具逃げ面摩耗面積と切削抵抗の關係

図4 工具逃げ面応力の求め方

は CBN 工具の場合である。 H_w の低い領域では、 H_w の上昇にかかわらず両応力ともあまり変化せず小さい値を保っている。 H_w がさらに上昇すると、それに伴い σ_w は増大するが、 τ_w はほとんど変化せず、比較的小さな値を保っている。両応力の関係、すなわち σ_w の増大にかかわらず τ_w があまり増大していないことから、逃げ面と切削面は、著しい凝着を起こしているとは考えられず、凝着物の介在しない直接摩擦状態にあり、逃げ面摩耗はアブレシブ摩耗が支配的であるとみなすことができる。

2.3 逃げ面-切削面接触機構に関する検討 被削材硬さの上昇に伴い工具逃げ面垂直応力 (σ_w) が増大するにもかかわらず逃げ面摩擦応力 (τ_w) がほとんど変わらず、かつ工具逃げ面摩耗幅 (V_B) が減少するという現象は、両面間の接触機構からも注目されることであり、これを工具逃げ面と切削面の真実接触面積の観点から検討する。

いま、切削中の工具逃げ面 (摩耗面) と切削面の接触状態を考えると、ある時刻における逃げ面摩耗面積は、各微小時間における摩耗面積増分の積分値であり、また各瞬間における両面の真実接触面積は摩耗面積とは等しくない。そして、これまでに求めた σ_w および τ_w は見かけの接触面積 (摩耗面積: A_a) から得られた見かけの応力と考えられる。

固体間の摩擦における見かけの摩擦応力 (τ_w) と真実接触部のせん断応力 (τ_r) の間には式 (2) の関係があることは、よく知られている。

$$\tau_w = \tau_r \cdot A_r / A_a \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 A_r は真実接触面積、 A_a は見かけの接触面積である。

上記の実験結果から、被削材硬さの上昇にかかわらず τ_w がほとんど変化していないことが見出されているが、式 (2) において、被削材硬さが上昇すれば τ_r も増大すると考えれば、被削材硬さの上昇が真実接触面積の減少をもたらすことになる。これを直接実証する

図 5 被削材(SK3)硬さと工具逃げ面応力の関係

には、切削中の逃げ面と切削面における各瞬間での真実接触面積を求めなければならないが、これは不可能に近い。そこで第一近似として、被削材硬さと工具・被削材真実接触面積の関係を静的接触モデル実験によって間接的に明らかにするために、被削材硬さと接触電気抵抗の関係に置きかえて検討する。固体の2面同士を接触させた場合の真実接触面積 (A_r) は、2面に作用する垂直力 (W) と、軟かいほうの平均降伏応力 (p_m) によって式 (3) で与えられる⁽⁵⁾。

$$A_r = W / p_m \quad \cdots \cdots (3)$$

また接触電気抵抗 (R) は近似的に式 (4) で与えられる⁽⁵⁾。

$$R = 1 / (2an\lambda) + 2\rho / (\pi a^2 n) \quad \cdots \cdots (4)$$

ただし

a : 真実接触部の半径

n : 接触点の数

λ : 導電率

ρ : 不導膜の単位面積当たりの抵抗

式 (4) の右辺第2項は不導膜の電気抵抗であるが、不導膜を除去すればこの項は無視できるから、接触電気抵抗によって真実接触面積の大小を推定することができる。

図6に接触電気抵抗の測定回路の概略を示す。直流電流による接触点での熱起電力の誘発やノイズ信号を抑えるために印加電流は1kHzの交流を用いた。接触面に生じる電位差は、発振周波数に対応する出力成分のみを取り出せるロックインアンプで検出した。検出した電位差と印加電流から接触電気抵抗が求まる。

この実験では、セラミックやCBNのような不導体を用いることはできないので、接触させる一方の硬い金属には鏡面仕上げ ($R_{\max} \approx 0.05 \mu\text{m}$) をした超硬工具

図 6 接触電気抵抗の測定回路

P10 ($H_v \approx 1600$, 12.7×12.7 mm) を、他方には研削加工により表面あらさ $R_{\max} = 5 \mu\text{m}$ およびピッチ $P = 250 \mu\text{m}$ の規則的な凹凸をつけた被削材料 (SK3) を用いた。なおこれらの表面には加工による酸化膜などの不導膜が生じているので、接触した状態でわずかに振動を与えて不導膜を除去し、金属接触状態を実現させるよう留意した。また接触状態を安定させるために、初めに最大荷重を負荷してから、連続的に荷重を減少させる方法を採用した。

図7に荷重 (W) と接触電気抵抗 (R) の関係を、被削材硬さ (H_w) をパラメータとして示す。図中の矢印は最大荷重から荷重を減少させていることを意味している。最大荷重の $W = 980$ N では被削材硬さによらず R はほぼ等しい値を示し、式(4)にしたがっていないが、式(4)が成り立つのは A_r が極めて小さい領域であり、 A_r がある値以上になると A_r にかかわらず R は材料の固有抵抗に収束するとされている。したがってここで注目すべき点は荷重を減少させて最小荷重 ($W = 0.1$ N) に至った状態での接触抵抗 R であり、この R は被削材硬さの相異に対して、明確な差を示している。したがって被削材硬さの上昇にともない真実接触面積 (A_r) が減少していることがわかる。

以上の静的接触実験から、実際の切削中においても、被削材硬さの上昇が工具逃げ面真実接触面積の減少をもたらす可能性について明らかにしたが、真実接触面積の大小がただちに工具逃げ面摩耗幅の大小と一義的関係にあると断定することはできない。それは真実接触面において工具を摩耗させる因子が被削材中に存在することを明らかにする必要がある、それについていまだ明らかにされていないからである。

2・4 被削材組織⁽⁶⁾に関する検討 工具逃げ面摩耗この SEM および EPMA による観察や工具逃げ面応力の検討結果から、逃げ面摩耗はアプレシブ摩耗が支配的であり、これは被削材中の微細な硬組織または硬粒子によってアプレシブ作用を受けているのではないかと推論した。この推論の妥当性を確かめるために、被削材の組織について検討する。

熱処理による被削材硬さの変化は、焼戻し温度による組織の変化に起因しているのであるから、工具摩耗を被削材組織の観点から検討することは重要である。

図8は実験に供した被削材の中で硬さが H_v 535, 300 および 220 のものについての顕微鏡による組織図である。

図8(a)は焼戻し温度 (θ_t) 573 K で得られたマルテンサイト組織、図8(b)は $\theta_t \approx 873$ K のソルバイト組織、図8(c)は $\theta_t \approx 1023$ K のパーライト組織であ

る。

組織の硬さはパーライト、ソルバイト、マルテンサイトの順に硬くなるが、これら組織の硬さは巨視的または平均的硬さである。

最もやわらかい (H_v220) パーライト組織 [図8(c)] はフェライト基地中に極めて硬く (H_v1300) 大きく成長したセメンタイト (Fe_3C) が多量に存在しており、ソルバイト組織 [図8(b)] になるとセメンタイトの粒径および量が減少し、最も硬いマルテンサイト組織 [図8(a)] にはセメンタイトはほとんど認められない⁽⁶⁾。

以上のように顕微鏡組織的にセメンタイト量を観測したが、これを定量的に把握するために、各硬さの SK3 被削材中のセメンタイトの重量分析 (被削材を 0.2 規定の塩酸水溶液で溶解し、精密ろ過膜でろ過後残さを計量) を行った。図9は重量分析で得られた、被削材 (SK3) の硬さ (H_w) とセメンタイト量 (W_c) の関係を示したものである。なお、比較のために炭素量の比較的少ない S45C についても示してある。図から SK3 においては、 H_w が H_v200 において W_c は約 9.

図7 荷重と接触電気抵抗の関係

図8 被削材 (SK3) の電子顕微鏡組織

5%であるが、 H_w が H_v500 になると W_c が約 4.5% と半減しており、この硬さ域では H_w の増加につれて W_c が明らかに減少している。なお、S 45 C については 2・5 節で述べる。

前述のように、工具逃げ面摩耗幅は、セラミック工具では被削材硬さ (H_w) が H_v500 程度までは減少し、CBN 工具では被削材硬さの全域にわたって H_w の上昇に伴い摩耗幅が減少している (図 1) が、この傾向と H_w の変化に伴う組織中のセメンタイト量の変化には極めて深い関係がある。それは被削材中のセメンタイト粒子の、工具逃げ面に対するアブレシブ作用の規模である。すなわち工具に対するアブレシブ作用の規模は、セメンタイト粒子の多い組織 (やわらかい組織) ほど大きく、セメンタイト粒子の少ない組織 (硬い組織) ほど小さくなっていることである。

なお、セラミック工具で、被削材硬さ (H_w) が H_v600 以上の領域で摩耗が増大している (図 1) のは、 H_w の上昇が逃げ面垂直応力 (σ_w) の増大をもたらす結果、図 10 のように工具刃先の塑性変形を誘起していることによるものであり、アブレシブ作用によるものとは異なる。なお、CBN 工具では、このような変形は認められない。

このように、工具摩耗に及ぼすセメンタイト粒子のアブレシブ作用が、大きな役割を果たしていることが事実であるならば、セメンタイトの生じにくいような被削材の切削では、同じ硬さでも工具摩耗に差異 (減少) があらわれるはずである。

2・5 工具摩耗に及ぼす被削材中のセメンタイトの影響の検討 前節での推論を実証するために、SK 3 に比べて焼戻し温度を高くしてもセメンタイトをそれほど生成しない構造用炭素鋼 (S 45 C) を被削材とし、SK 3 被削材と同じ条件で切削実験を行い、被削材硬さと工具摩耗の関係、被削材硬さと逃げ面応力の関係

図 9 被削材硬さとセメンタイト量の関係

図 10 セラミック工具刃先の塑性変形 ($H_w=720H_v$)

図 11 被削材 (S 45 C) の電子顕微鏡組織

図 12 被削材硬さと逃げ面摩耗幅の関係

図 13 被削材 (S45C) 硬さと逃げ面応力の関係

について, SK 3 の場合と比較検討した。

図 11 は実験に供した S45C 被削材の各硬さにおける顕微鏡による組織図を示す。図の(a)はマルテンサイト組織で SK 3 のそれと類似している。図の(c)は焼きなましで得られたものでフェライト基地にパーライト組織が点在し、層状のセメンタイトがわずかに見られるが SK 3 のそれと大きく異なり、大きく成長した多量のセメンタイトは見られない。S45C の硬さ H_w とセメンタイト量 W_c の関係は SK 3 と比較して、図 9 に併示したが、 H_w が H_v200 でも $W_c \approx 2\%$ と極めて少なく、また H_w による W_c の変化もほとんど認められない。

図 12 は被削材硬さ (H_w) と逃げ面摩耗幅 (V_B) の関係を、SK 3 と比較して示したものである。図の(a)はセラミック工具、(b)は CBN 工具の場合である。

H_w が高い領域では両工具とも V_B には被削材の相異の影響を受けず同程度の大きさであるが、低硬度域では被削材の相異が V_B に大きく影響している。すなわち SK 3 被削材の場合には前述のように、 H_w の低下にともない V_B は増大しているが、S45C 被削材の場合には、 H_w の低下に伴い V_B も減少しており、SK 3 の場合と全く反対の摩耗傾向を示している。とくに、 H_w が H_v220 においては両被削材に対する工具摩耗には極めて大きな差が生じている。

これは、もし両被削材の切削における工具逃げ面応力に顕著な差がないとすれば、明らかに被削材中のセメンタイトのアブレシブ作用規模の差に起因していると考えるのが妥当である。

図 13 は S45C の切削における H_w と逃げ面応力 (σ_w, τ_w) の関係である。これは SK3 の場合 (図 5) とほぼ同じであり、応力差はほとんど見られない。

したがって、SK 3 被削材の低硬度における工具逃げ面摩耗幅の増大には、セメンタイトのアブレシブ作用が大きく影響していることが明らかである。

3. 結 言

高炭素鋼をセラミック工具や CBN 工具で切削する際に、被削材硬さの低下に伴い工具逃げ面摩耗幅が増大する特異現象について検討した結果、次のような結論を得た。

(1) 高炭素鋼被削材の低硬度域での工具逃げ面摩耗は、アブレシブ摩耗が支配的である。

(2) 被削材硬さの低下に伴い工具逃げ面真実接触面積が増大する傾向にある。

(3) 被削材硬さの低下にともなう逃げ面摩耗の増大は、被削材中のセメンタイト粒子の増大によるアブレシブ作用規模の増大と、逃げ面真実接触面積の増大の相乗効果に起因している。

(4) 工具摩耗を被削材の平均硬さのみで推測することは危険であり、被削材の組織に留意する必要がある。

終りに、本研究を進めるにあたり、ご指導を賜った武蔵工業大学元教授 益子正巳博士に、また研究に協力された、当時大学院生の江馬城一郎氏〔現、三菱マテリアル(株)〕、神子通康氏〔現、古河電気工業(株)〕はじめ卒業生諸氏に感謝の意を表する。さらに、工具材料を提供された住友電工イゲタロイ(株)の関係各位に感謝する。

文 献

- (1) 鳴滝・ほか 2 名, 精密機械, 45-2(1979), 201.
- (2) 益子・安味・江馬城, 昭和 58 年度精機学会講演論文集, (1983), 503.
- (3) 安味・益子・神子, 昭和 60 年度精機学会講演論文集, (1985), 767.
- (4) 安味・石田・益子, 昭和 61 年度精機学会講演論文集, (1986), 839.
- (5) Bowden, Tabor (曾田訳), 固体の摩擦と潤滑, (1970), 21, 丸善.
- (6) 日本金属学会編, 金属便覧, (1971), 746, 丸善.