研 究

境界摩耗に関する基礎研究*

大 野 幸 彦** 竹 山 秀 彦**

Basic Investigation on Grooving Wear

Tomohiko Ōno, Hidehiko Takeyama

It is well known that grooving wear which is formed on the end cutting edge is extremely harmful to surface finish in turning. Although much effort has been devoted hitherto to clarify the mechanism of grooving wear and to prevent it, no appreciable solution or remedy has been found. In this report, the influence of gaseous environment and the physico-chemical properties of tool and work materials on the grooving wear have been analyzed experimentally, and the findings are as follows:

- (1) The gaseous media have a remarkable effect on the wear process.
- (2) The groove formation is accelerated with an easily oxidizable tool material.
- (3) The grooving wear is little formed with a tool material on which a stable oxide film is formed during cutting.

In other words, the major cause of grooving wear is the chemical reactions on the tool face, and from this a practically acceptable remedy against grooving wear has been deduced.

1. 緒 論

旋削により形成される仕上面は種々の要因の影響を受けて変化するが、最大の擾乱要因は低切削速度領域における構成刃先と切削を連続した場合に工具の前逃げ面に形成される境界摩耗である。

Šolaja¹⁾は境界摩耗幅が増加すると仕上面あらさは単調に増加するとしており、一方、竹山・宮坂²⁾はある摩耗幅までは増加するが、それ以上の値になると逆に仕上面あらさは減少するとしている。しかし、いずれにしても仕上面あらさと密接な関連性があることは事実であり、切削中に形成される境界摩耗を抑制しなければ仕上面あらさを改善することはのぞみえないのであるが、このためにはまず、境界摩耗の生成原因を明確にすることが必要であると考えられる。

境界摩耗の生成に関して従来からいくつかの研究^{3)~5)}が行われており成果が発表されているが、いまだ不可解な現象に遭遇する場合がある。これまでの研究においては被削材、工具材を含めた物性面からの考察がほとんど行われていないので、本報においては前逃げ面境界摩耗生成に影響する物性的な面を追究する。

2. 境界摩耗の生成に影響する物性的要因

2.1 ふん囲気の影響

通常の切削時（空气中で切削した場合）に形成される前逃げ面摩耗を観察すると、フランク摩耗と境界摩耗と

では形状はもとより大きさにも明確な差がみられ、一般的には境界摩耗幅が大きくなる。例えば炭素鋼には SiO_2 、 $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ あるいは MnO など被削材の平均硬度より硬い複合化合物が含まれており、切削中にこれらによるアブレシブ摩耗も工具摩耗の生成に影響していることが考えられる。しかし複合化合物は鋼中にランダムに分布しているために、特に境界の部分に強く影響して摩耗生成を促進していると考えるのは不自然である。一方、境界の部分はフランク摩耗が発生する位置に比較するとふん囲気の気体と接触する機会が多いはずであり、境界摩耗の生成に対してふん囲気の影響が強いと考えることができる。

まず第1段階として、活性あるいは不活性な気体が切削ふん囲気中に存在すると前逃げ面境界摩耗は通常の切削状態からどの程度変化するかを調べる必要がある。

図1(a),(b)に炭素鋼 S 25 C (焼準) を超硬 P 30 で、外部からノズルで酸素、アルゴンガスおよび炭酸ガスを噴射しながら切削した場合に形成された前逃げ面境界摩耗幅およびフランク摩耗幅と切削時間の関係を示す。同図は切削速度 250 m/min の場合であるが、(a) のフランク摩耗幅は活性な酸素あるいは不活性なアルゴンガスに関係なく、切削時間が同じであればほぼ等しくなる。一方、境界摩耗幅は(b)に示すように酸素を噴射した場合には通常の切削時より大きくなるのに対し、アルゴンガスを噴射した場合には小さくなるのみならずフランク摩耗幅との差もほとんどなくなる。この傾向は切削速度 100 m/min から 300 m/min の範囲内ではほぼ同様である。

* 原稿受付 昭和49年1月18日。昭和48年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和48年10月9日)にて発表。

** 正 会 員 機械技術研究所(東京都杉並区井草4-12-1)

被削材: S25C (焼準), 工具: 超硬 P30, 切削速度: 250 m/min, 送り: 0.2 mm/rev, 切込み: 0.5 mm

図1 工具摩耗とふん囲気の関係

図2 工具・被削材境界領域における拡散現象

2.1.1 酸素の作用

まず, 切削時に工具と被削材が高温度で接触している部分でどのような現象が起こっているか実験的に解析するために行った静的拡散実験の結果からすると (図2参照), 最も特徴的なことは, 両者の境界において工具材炭化物の結合剤であるコバルト濃度が集中的に高くなっていることである。

この現象から考えると, 境界摩耗の形成される位置も含めて被削材と接触している切削工具の表面には, コバルト濃度の高い層が形成される可能性があると考えられる。

被削材: S25C (焼準), 工具: 超硬 P10

図3 炭素濃度分布

図4 工具表面酸化物の定性分析

次に工具材に含まれている炭化物が実際の切削中にどのような変化をするか実験的に求めた。図3はその結果であるが, 炭素鋼 S25C (焼準) を超硬 P10 で工具・被削材熱電対方式で測定した工具すくい面の平均切削温度が 1050°C になる切削速度で 60 秒間切削したときの図3 (I) の位置を特性 X 線 (CK α) で線分析したものである。同図 (a) に示すようにフランク摩耗面に近い部分で炭素濃度が減少している。ここで同図 (b) は同じ超硬工具の切削に全く関与しなかった部分 (図3 (II) の位置) の炭素濃度変化を示しており, 前者の場合とは明確な差異が認められる。この現象から, 超硬中で炭化物を形成している炭素は切削熱によって結合元素と分離して超硬中か

ら外部へ拡散し、工具の表面には例えばタングステン、チタンなどが遊離状態で存在するようになると思われる。

このような状態に外部から酸素を供給するかあるいはそれを空气中にさらすと、表層部で濃度の高いコバルトおよび遊離状態のタングステンなどの物質は酸素と反応して酸化物を形成する可能性がある。しかし実際の切削では表面状態が常に変動しており、また特に酸素がふん囲空气中に存在すると工具面に付着する物質の量が少なく、通常の方法では化合物を検出することは非常に困難である。事実、X線束を 30×30 (μm^2)に絞って摩耗面に照射して求めた回折リングにも工具マトリクス以外のものがあらわれているが、結晶の量が少ないために同定はできなかった。このために、静的な実験によってどのような酸化物が生成される可能性があるかを類推することにした。

そこで、切削実験に使用した超硬 P 30 を空气中で 800°C に加熱し、表面に形成された物質を X 線回折装置 (X-ray diffract meter) で分析した結果、図 4 に示すように WO_2 と CoWO_4 で構成されていることを確認した。

以上の実験の結果から考えて、実際の切削時にも工具表面上に上記の酸化物が生成される可能性はあるし、特に酸素を供給すると酸化物生成の反応は強められるはずである。これら酸化物が被削材との摩擦によって脱落し、このサイクルがたえず繰返される。さらに介在する酸化物は被削材そのものよりはげしいアブレシブ摩耗を起こ

被削材: S 25 C (焼準), 工具: 超硬 P 30, 切削速度: 250 m/min, 送り: 0.2 mm/rev

図 5 境界摩耗面の EPMA 特性 X 線分析 (酸素供給)

切削条件は図 5 に同じ

図 6 境界摩耗面の EPMA 特性 X 線写真

すことも考えられる。以上のことから工具材の酸化現象により境界部の摩耗が促進されることが説明できよう。

摩耗生成がこの形態をとる場合には、摩耗面は常に変動しているために、被削材に含有されている成分が付着するという現象は起こりにくいはずである。事実、図 1 (b) の最終摩耗面の EPMA 分析結果 (図 5 および図 6) からみても、鉄を含めて付着物の量は少ない。空气中での

切削条件は図5に同じ

図7 境界摩耗面のEPMA特性X線分析(アルゴンガス)

切削により形成された摩耗面もこれと類似した表面状態を呈している。

2.1.2 アルゴンガスの作用

次に、アルゴンガスを噴射して、できる限り酸素を除いて切削した場合に境界摩耗幅が減少する現象について考察する。

まず第1に考えられることは、酸素が残存しているにしても非常に少ないために、前項で記述した酸化摩耗がかなり抑制されることである。このことは、工具の表面が安定しているであろうことを示唆している。

次に、図1(b)の最終摩耗面をEPMA特性X線で分析すると、酸素が存在する場合に比較して付着物が非常に多くなっている(図6参照)。特に図7に示すように境界摩耗のほぼ同じ位置にシリコンとマンガンが共存しており、これらと酸素の特性X線(OK_{α})の強度分布が完全に一致していることから、前記2元素は酸化物の形態をとって存在していると考えることができる。これらの酸化物は酸素を噴射して切削した場合には全く検出されなかったことから考えると、境界領域での化学的な反応によって生成されたものではなく、鋼中の微量介在物が工具表面が安定しているために堆積したものであろう。 Ca 脱酸鋼を切削すると工具すくい面に“Belag”と呼ばれる $SiO_2-Al_2O_3-CaO$ の三元共晶体が生成されて摩耗の生成を抑制すると報告⁶⁾されているが、これと同じように境界摩耗面に存在する酸化物が工具と被削材の直接接触を妨げ、境界摩耗の成長を抑制していると考えられる。なお、炭酸ガスも不活性気体として作用し、境界摩耗面にアルゴンガスにおけると同様な酸化物が存在する。

被削材: S 25 C(焼準), 切削速度: 200 m/min, 送り: 0.2 mm/rev, 切込み: 0.5 mm

図8 工具硬度と境界摩耗幅の関係

2.2 工具材種の影響

工具材自体の特性によっても境界摩耗の生成に及ぼすふん囲気の影響の程度は異なってくる。これまでの実験から考えると、ふん囲気をアルゴンガスにすると境界領域での化学的反応が抑制されるので、別の摩耗機構すなわちアプレシブ摩耗を左右する工具硬度の影響をみることができる。図8は一定時間切削した時に形成された境界摩耗幅と工具硬度の関係を、ふん囲気をパラメータにして示したものであり、工具硬度が高くなるに従って摩耗幅は減少している。アルゴンガスの場合にはWC系超硬(P10, P30, P40)およびTiC系超硬を含めて同一線上で表すことができる。しかし、酸素が存在するとTiC系超硬が示す値はWC系超硬の硬度と摩耗幅の関係を示す曲線からはずれて小さな値をとるようになる。

前述したようにWC系超硬を酸素が存在する状態で加熱すると表面に $CoWO_4$ および WO_2 が形成され、更に同一温度での酸化物の量を比較すると工具硬度が低くなるに従って多くなることを確認した。そしてこれらの酸化物が境界摩耗の生成と関連性があるので、図8からも理解できるように超硬P40はP10およびP30に比較して酸素の影響を強く受けて、アルゴンガスの場合に形成される摩耗幅との差は大きくなる。しかし、TiC系超硬に対しては酸素の影響は少ない。この超硬を高温に加熱すると表面には TiO_2 が形成されることを確認したが、この酸化物はタングステンの酸化物と比較すると、超硬マトリクスの炭化物と格子間隔が近い値を示していることから、安定な酸化物であると考えられる。したがって、この被膜によって工具と被削材の直接接触が妨げられるために摩耗幅の増加が少ないものと考えられる。

2.3 被削材の影響

図9に各種の被削材を同一切削条件で切削した場合に形成された前逃げ面境界摩耗幅と切削時間の関係を示

工具：超硬 P 10，切削速度：200 m/min，
送り：0.2 mm/rev，切込み：0.5 mm
SUS 304 は境界部分のフランク摩耗幅の値

図9 被削材と境界摩耗の関係

す。機械構造用炭素鋼では被削材の硬度が高くなるに従って一定切削時間における境界摩耗幅は増加している。しかし SUS 304 ($H_V=246$)あるいは SNCM 8 ($H_V=253$)などは硬度は炭素鋼よりかなり高いが摩耗幅は逆に小さくなっており、種々の面で境界摩耗生成に関する様相を異にする。

例えば SUS 304 についてみると図9の切削条件の場合には境界領域にみぞ状の“いわゆる境界摩耗”は形成されない。また炭素鋼の切削では顕著な影響のみられた酸素を噴射しても摩耗幅が増加するという現象は観察されない。一方、SNCM 8 の場合には境界摩耗は認められるのであるが非常に小さく、前逃げ面のフランク摩耗と明確に区別できない程度のものである。

このように被削材の硬度が高いにもかかわらず形成される境界摩耗は非常に小さいという不可解な現象を解明するためにステンレス鋼切削時の境界摩耗の変化について実験的に考察する。

切削速度 200 m/min で SUS 304 を超硬 P 30 でふん囲気を空気、酸素およびアルゴンガスの3種類に変化させて切削した結果、空気および酸素ふん囲気の場合には、前逃げ面およびすくい面からみてみぞ状の境界摩耗を認めることはできなかった。しかし、アルゴンガスの場合にはすくい面からみて境界領域に明確なみぞ状摩耗が形成されていることを認めた。また通常の切削時に、切削速度 150, 200, 250 m/min の境界部分を比較すると、200 m/min および 250 m/min では“いわゆる境界摩耗”は形成されないのであるが、150 m/min になるとはっきりした形態の境界摩耗が形成されるようになる。

ステンレス鋼の防錆性は材料の表面にクロムの酸化被膜が形成されるためであるとされているが、境界摩耗の生成に対しても被削材中のクロムあるいはニッケルなどが影響しているのではないかと推論した。前述したよう

にふん囲気に酸素が存在する状態では境界摩耗がほとんど形成されないが、アルゴンガスを供給すると境界摩耗が形成されるようになるということは、酸素が存在すると被削材の含有元素 (Cr, Ni) が工具表面に酸化被膜を形成し、それが工具マトリクスと被削材の直接接触を妨げるためではないかと推論できる。更に切削速度が高くなるに従って境界摩耗が小さくなることも、切削温度が高くなって、摩耗の生成を抑制する酸化被膜が形成されやすくなるためであろう。

これまでの研究で、酸素が存在する場合の境界摩耗の生成に対しては、主に酸素による工具材自体の酸化が最大の要因であることがわかったが、ステンレス鋼切削の場合には被削材に含有されている成分の酸化被膜が工具表面をおおって工具材の酸化反応がおさえられるために、境界摩耗は非常に小さいかあるいは全く形成されないことになる。

ステンレス鋼には、クロム、ニッケルおよび鉄が多量に含有されており、これらが酸化被膜の生成に関連があると考えられるが、各元素の酸化物の同一温度 (800°C) における標準生成自由エネルギー⁷⁾はおおの -135, -64, -90 (kcal/g·mol O₂) であって、クロムの酸化物が最も安定している。更に酸化クロムの被膜は一たび破損されても復元が早いために固体表面を保護する作用は非常に強いはずである。

図10(a),(b)に切削速度 250 m/min および 150 m/min のときの境界領域の EPMA 特性 X 線写真と線分析結果を示す。同図において特徴的な点は、すでに推論したごとくクロムおよびニッケルの付着量が多いことである。そして(a)においてはクロムおよびニッケルと酸素の特性 X 線の強度が良い対応を示しており、これら元素が酸化物として存在していることが類推できる。一方(b)の場合にも前述した2元素は付着しているが酸素の特性 X 線の強度変化とは対応せず、摩耗生成を抑制する作用のある酸化被膜は形成されていないと考えることができる。このことはステンレス鋼切削での境界摩耗生成の特異現象を定性的に説明していることになる。

3. 境界摩耗生成のモデル

以上の実験で得られた諸現象をもとにして、図11を境界摩耗生成過程のモデル図として提示する。

被削材と工具が高温状態で接触する(a)と、工具の表面においては工具中の結合剤の濃度の高い層が形成される。また炭化物を形成している炭素は被削材側へ拡散するためにタングステンあるいはチタンが遊離状態におかれる(b)。このような表面状態を呈している部分に外部

被削材: SUS 304, 工具: 超硬 P 30, 切削速度: 250 m/min,
送り: 0.2 mm/rev, 切込み: 0.5 mm
(a)

図 10 摩耗面の EPMA 特性 X 線分析

から酸素を供給すると自由状態にあるチタン, タングステンおよびコバルトは酸素と化合し, WC 系超硬の場合には WO_2 および CoWO_4 が形成される. そして, これら酸化物によるアプレシブ作用で境界摩耗が形成される (c).

一方, アルゴンガスを供給した場合 (d) には, 工具表面が安定しているために被削材に含まれている微量介在物 (SiO_2 および MnO) で構成される付着層が形成される. このために被削材と工具の直接接触が妨げられ, 境界摩耗の生成は抑制される.

しかし, これらのモデルをあてはめて考えることができるのは, あくまで境界領域の摩耗に対してだけであって, フランク摩耗面は EPMA 特性 X 線で分析しても, ふん囲気的气体による差異はほとんど見いだすことができない.

4. 境界摩耗の抑制による仕上面あらさの改善

これまでの実験的解析により明らかになったように, 境界摩耗の生成に対して最も影響の大きい要因は境界領域における化学反応である. この反応を抑制することで

図 11 境界摩耗生成過程のモデル図

被削材: S 25 C(焼準), 工具: 超硬 P 30, 送り: 0.2 mm/rev, 切込み: 0.5 mm

図 12 アルゴンガスによる仕上面の改善

境界摩耗を減少させることができたが、このことが仕上面あらさにどのようにあらわれるかを実験的に求めた。

図 12 (a), (b) は切削速度 250 m/min (a) および 200 m/min (b) で、通常の切削およびアルゴンふん囲気中で切削した時の仕上面あらさと切削距離の関係である。両切削速度におけるアルゴンふん囲気中の仕上面あらさの推移の状態は異なっているが、空気中で切削する場合より仕上面あらさの値が小さくなることが理解できる。3 km

以上の距離を切削しても、初期のあらさ値がほぼ保たれていることが特徴的である。これらのことから、アルゴンガスを前逃げ面に噴射しながら切削することは、仕上面あらさを改善するための一つの方法であると考えることができる。

5. 結 論

前逃げ面境界摩耗の生成に影響する物性的要因について実験的に解析した結果、次の結論を得た。

- (1) 前逃げ面境界摩耗の生成に対して、ふん囲気の影響が顕著である。
- (2) 工具材種および被削材により境界摩耗生成の状態は変化する。これは工具材自体の酸化反応の難易および被削材含有成分が形成する酸化物の安定度などに関連する。
- (3) これらのことから、境界領域における化学反応と境界摩耗の生成とは密接な関連があると考えられる。
- (4) 実験的解析で得た諸現象をもとにして、前逃げ面境界摩耗形成過程のモデル図を提示した。
- (5) 前逃げ面境界摩耗を抑制することで、旋削仕上面を改善する方法を見いだした。

参 考 文 献

- 1) V. Šolaja: Wear of Carbide Tools and Surface Finish Generated in Finish Turning of Steel, Wear, 2 (1958/59) 40.
- 2) 竹山秀彦, 宮坂金佳: 工具摩耗と切削仕上面あらさ, 精密機械, 35, 10 (1969) 629.
- 3) W.K. Luk and R. F. Scrutton: The Origin of Groove Wear in the Turning Operation, Inst. J. Prod. Res., 6, 3 (1968) 197.
- 4) M. C. Shaw et al.: A Plasticity Problem Involving Plane Strain and Plane Stress Simultaneously, Trans. ASME, 5 (1966) 142.
- 5) C. A. Gieszen: The Effect of Gases on Finish Turning, Ann. C.I.R.P., 18 (1970) 563.
- 6) W. König and N. Diedrich: Cutting Fluids Improve Tool-life of Carbide Tools by Chemical Reactions, Ann. C.I.R.P., 17 (1969) 17.
- 7) 沢村 宏: 理論鉄冶金学, 丸善 (1955) 179.