研 究

高温切削の研究(第3報)*

切削抵抗に及ぼす温度の影響

正会員 大越 諄** 飯田 喜介** 尾関 和夫***

Researches on Hot Machining (Part 3)

The Influence of Temperature on Cutting Force

Makoto OKOSHI, Kisuke IIDA and Kazuo OZEKI

Cutting forces at elevated temperature of work material (paraffin) were calculated in various cutting conditions experimented.

In general, the higher the temperature, the lower the cutting force.

Cutting force is affected by two factors; one is the shear strength of work material and the other is the factor related to the cutting mechanism. The former was decreased exceedingly at high temperature as reported previously (Part 2), and influences of the latter is not so much. Therefore, the decrease of cutting forces is mainly due to low shear strength of work material at high temperature.

1. 緒言

第1報及第3報に於て夫々切削機構及 work の機械的性質に及ぼす温度の影響について述べたが本報では之に引続き理論的切削抵抗に対する温度の影響を考察する。

2. 切削抵抗

二次元切削に於ける切削抵抗 R は図 1 示す如く種々の分力に分けられる。

図 1 に於ける幾何学的関係から、主分力 F_c 、背分力 F_t 、剪断角 ϕ 及び剪断面に作用する分力 F_s と之に垂直な分力 F_n との間には次式で示される関係がある。

$$\left. \begin{aligned} F_s &= F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \\ F_n &= F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

剪断面上の平均剪断応力及び平均圧縮力を夫々 τ_s 及び σ_s とし、剪面面積及び切削面積を夫々 A_s 及び A_o とすると、

$$\left. \begin{aligned} \tau_s &= F_s / A_s = (F_c \cos \phi - F_t \sin \phi) \sin \phi / A_o \\ \sigma_s &= F_n / A_s = (F_c \sin \phi + F_t \cos \phi) \sin \phi / A_o \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

掬い面の摩擦係数及び摩擦角を夫々 μ 及び β とすると

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \tan \beta \\ &= F / N \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

切削工具の掬い角を α とすれば

$$\left. \begin{aligned} F &= F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \\ N &= F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

これらの関係から

* 昭和29年4月24日精機学会春季講演会にて発表

** 東京大学工学部

*** 日本精工株式会社

図 1

$$\left. \begin{aligned} F_c &= \tau_s A_0 \cos(\beta - \alpha) / \sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha) \\ F_t &= \tau_s A_0 \sin(\beta - \alpha) / \sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha) \\ R &= \tau_s A_0 / \sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha) \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

となる。

此の関係から、剪断角、工具と chip の間の摩擦係数、工具の切り角及び剪断面の平均剪断応力がわかれば切削抵抗を求める事が出来る。

前報¹⁾で述べた paraffin の各温度及び切り角に於ける切削実験の結果からの剪断角、剪断試験から求めた剪断強さ及び摩擦係数の実験から求めた摩擦角の値を夫々を用いて、種々の切削条件に於ける切削抵抗²⁾を求め、温度及び切り角に対して三次元的に示したものが図 2 である。

図 2

前報³⁾に於ける切削実験の場合の切込は 1~3 mm で比較的大きいので切削作用に於ける寸法効果は無視し得るものとし、剪断角は夫々の切込の場合の平均値を用いたものである。

温度が低く且切削工具の切り角が減少すると切削抵抗は大きくなるが、高温で切り角が大きい場合は之と対照的に切削抵抗は減少する。

1) 大越，飯田，尾関：高温切削の研究（第 1 報）第 23 卷 6 号（1957）

及び 同上（第 2 報）第 23 卷 8 号（1957）

2) 単位切断面積当りの切削抵抗の値である。

3) 第 1 報

此の実験の範囲内では、切削抵抗に及ぼす温度の影響は切り角による影響より大きい事を示している。換言すれば被削性の改善として高温切削を行う事は、切削抵抗に及ぼす影響が顕著なものであると云う事が出来る。

Krystof⁴⁾は剪断面に最大剪断応力説を適用し、work を完全塑性体として切削抵抗 R の方向を主応力の方向とし、従つて剪断面は之と $\pi/4$ の方向に生ずるものとして剪断角 ϕ を定めた。即ち 図 1 に於て

$$\begin{aligned} \angle BAC &= \frac{\pi}{4} \\ &= \phi + \beta - \alpha \end{aligned}$$

従つて剪断面の降伏剪断応力を τ_0 とすれば切削抵抗 R 及び主分力 F_c 、背分力 F_t は次式であらわされる。

$$\left. \begin{aligned} F_c &= \tau_0 A_0 (1 + \cot \phi) \\ F_t &= \tau_0 A_0 (\cot \phi - 1) \\ R &= \tau_0 A_0 \sqrt{2} / \sin \phi \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

又 Merchant⁵⁾は剪断面の剪断応力 τ_s を一様な降伏応力 τ_0 とし

$$\tau_s = \tau_0$$

従つて $F_c = \tau_0 A_0 \cos(\beta - \alpha) / \sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)$

より、剪断面は $\frac{\partial F_c}{\partial \phi} = 0$ なる方向に生ずるものとした。之より

$$\cos(2\phi + \beta - \alpha) = 0$$

即ち

$$2\phi + \beta - \alpha = \pi/2$$

従つて

$$\left. \begin{aligned} F_c &= \tau_0 A_0 2 \cot \phi \\ F_t &= \tau_0 A_0 (\cot^2 \phi - 1) \\ R &= \tau_0 A_0 / \sin^2 \phi \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

となる。

(6)及び(7)式の表わす切削抵抗は、剪断角 ϕ と降伏剪断応力 τ_0 からきまるものであり(5)式の如く β 及び α の影響はあらわれない。

(6)及び(7)式を用いて切削抵抗に及ぼす温度の影響を求めると、(5)式の結果と同様に温度が上昇すると切削抵抗は速やかに減少し、切り角が大きい程切削抵抗は低くなる結果を示している。

3. 切削機構と切削抵抗

高温切削に於て切削抵抗が減少する factor には二つが考えられる。その一つは work の機械的性質の温度上昇に伴う変化、即ち(5)式の τ_s 又は(6)及び(7)式の τ_0 の

4) Krystof : Technologische Mechanik der Zerspaltung, Ber. betr. wiss. Arb., 12, (1939)

5) M.E. Merchant : Mechanics of the Metal Cutting process. II. Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting, Jour. App. Phys., 16, 6 (1945)

減少であり他の一つは切削機構に関係する(5)式或は(6)及び(7)式の τ_s 或は τ_o 以外の項である。

剪断強さが温度上昇に伴つて如何に変化するかは、すでに前報⁶⁾で述べた事であり、之は(5)式或は(7)及び(8)式より直ちに切削抵抗の変化となつてあらわれる事は明らかである。

切削機構から影響される factor を K_1 とすれば(5)式より

$$K_1 = 1/\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha) \quad \cdots(8)$$

となる。此の値を温度及び摺い角に対して示したものが図3である。図より明らかな如く切削機構が切削抵抗に

図 3

与える影響はそれ程大きいものではない。図3は温度よりも摺い角の影響の方が大きい事を示している。

温度25°Cで摩擦係数が極小値をとる事から此の温度に於ては図の三次元曲面に多少の変化があるが、温度の増大と共に K_1 は増加する傾向があり、摺い角に対してはすべて単調に、角の増大と共に減少してゆく。

Krystof 及び Merchant の理論式に対する同様な切削機構に依る係数 K_2 及び K_3 は(6)及び(7)式より夫々

$$K_2 = \sqrt{2}/\sin \phi \quad \cdots(9)$$

$$K_3 = 1/\sin^2 \phi \quad \cdots(10)$$

となる。

(9)及び(10)式は剪断角の $\sin$ の逆数及び其の2乗で関係する。

(9)式の結果を温度及び摺い角に対して示したのが図4である。摺い角が小さい時、温度上昇に伴つて係数 K_2 は増大するが、摺い角が大きくなると共に減少してゆく。(10)式は(9)式の影響を増大した結果を示す事は式から

6) 第2報

明らかである。

以上の事から、温度上昇に伴つて切削抵抗が減少する

図 4(a)

図 4(b)

のは切削機構の温度変化による影響は少なく、剪断強さの低下に主として支配されていると云う事が出来る。

4. 背分力 F_t

図1 或は(5)式より $F_t = R \sin(\beta - \alpha)$

$\alpha = \beta$ なる時、 $F_t = 0$ となる。即ち摺い角が摩擦角に

図 5

等しい時, work の面に対する垂直分力が0となり, 従つて被削面に対する影響が最も少い状態であると考えられる。

切込 1mm の場合の温度及び削り角に対する F_t の影響を(5式)により求めた結果が図 5 である。

臨界削り角は温度 $18^\circ\sim 40^\circ\text{C}$ に於て $14^\circ\sim 22^\circ$ の間に存在する事を示している。

F_t に対する温度の影響は大きく, 温度の上昇に伴つて削り角による影響がなくなる傾向にあり, 且つ其の大きさは速やかに減少してゆく。従つて高温切削は切削抵抗の観点からは被削面が向上し, 表面あらさ及び寸法精度, 或は表面加工層等に対する影響が少なくなつてゆくものと考えられる。

高温に於て, F_t に対する削り角の影響が少なくなる事は, 高温切削に於て工具寿命の点から削り角の小さいバイトを用いても被削面に対する影響が必ずしも悪い結果とはならない事を意味する。

5. 剪断仕事量と比切削抵抗

著者の一人⁷⁾は, 1931年諸種の work に対する比切削抵抗が work の剪断仕事量に比例する事を発見した。本

実験では前述の如く切込が比較的大きいので寸法効果は無視し得るものとして求めた比切削抵抗と, 前報⁸⁾の結果から求めた剪断仕事量とは, 略々比例する関係を示している。

6. machining constant

Merchant⁵⁾ の提唱した machining constant 即ち

$$2\phi + \beta - \alpha = C$$

に対して本実験の結果を示したのが図 6 である。

低温では各点は直線から可成り分散しているが, 高温での分散は低温の場合より少ない。

Merchant の NE 9445 鋼の実験結果は $C=77^\circ$ となり $\pi/2$ より小さいが, 本実験の結果は図の如くすべて $\pi/2$ より大きい値を示している。

7. 結 論

理論的に算定した切削抵抗は, 温度上昇に伴つて著しく減少する。之は温度変化に伴う切削機構の変化に依る影響より, work の剪断強さの減少による影響が大きい。

比切削抵抗は剪断仕事量に略々比例し, machining const. は $\pi/2$ より大きい値をとる。

本研究の結果では, 高温切削の切削条件として, 切削工具の削り角が大きく且温度が高い程切削抵抗は減少しているが, 実際の各種金属の高温切削の場合には, 工具の削り角が大きい事は刃先の chipping の点から必ずしも好ましいものではなく, 且又過度の高温で切削する事は切削工具と work との相対硬度の減少或は工具の磨耗を早める結果となる。従つて最適加工条件は之等の点を考慮すると共に, work の温度上昇に伴う変態等, 夫々の work に対する高温に於ける機械的性質を考慮して決定すべき問題である。

(1957, 6月11日受付)

図 6

7) 大越諄: 切削抵抗に関する研究 (第二報) 理化学研究所 1 報第10輯, 第12号 (1931)

8) 第2報