切削剤の工具冷却効果

—切削剤の冷却効果に関する研究 (2)—

正 会 員 山 本 明*

The Cooling Effect of the Cutting Fluid upon Tool.

Akira YAMAMOTO.

The cooling effect of the cutting fluid upon a tool was analytically investigated for an orthogonal cutting, by using an electrolytic tank which is formed as a tool model and made of a metallic plate having a surface resistance. In this analysis, a cooling power of fluid is represented by $h=\alpha/K$, where α is a heat transfer coefficient and K a thermal conductivity of tool material, and for example h would be 1~2/cm for water solution of oil or others under ordinary good conditions, but in case of a jet method it will be more than the above mentioned. A rate of heat transferred into fluid and machine body from tool top heat source Q was given as a function of factors of cutting and tool conditions within the limit of usual ones. 55~70 % of this heat flow is absorbed in back rake surface, and 10~20% in front clearance. And, the temperature distribution in tool becomes a concentrated one around the tool top source, making a sharp gradient, when h increases more than 5. The advancement of pouring device of emulsion is probably one of the best way to elevate the cooling power.

1. 緒 言

いわゆる切削剤を切削に用いるとき、刃先温度低下は潤滑効果を切離して考えるとき、切屑、工具—機械系を通じうばわれる熱量に関する。工具についてみると、単位時間に切削剤によつてうばわれる熱量 Q は

$$Q = \alpha A (\theta_w - \theta_0) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表われ、 A は工具の表面積、 θ_w はその表面温度、 θ_0 は流体の温度、 α は熱伝達率である。もちろん α , θ_w , θ_0 は場所の函数として変化する。この式から明らかのように冷却効果を増すためには

1. 切削剤の熱伝達率 α を上昇させる。局所熱伝達率 α はさらに工具の形状、相対温度、また流動状態（もつと实际的にいえば注油方法、注油場所、流速、流量）に関係するのである。

2. 切削剤の相対温度を低下させる。

3. 切削剤をもつとも 効果的な場所に集中——工具と切屑、仕上面の間に押込むこと、が考えられよう。1. は切削剤の性質の優劣にも大いに関係するものであり、最近の Jet 注油法は 1, 3 を、また CO_2 ガスによるもの (Ce De Cut法) はすべてをねらつたものといえよう。

この冷却効果に関する研究は、前報¹⁾にものべたよう

に、切削剤の個々の性質を離れて、工具形状、切削条件のうえから考察しようとするものである。そこで切削剤の性質を注油条件も含めて熱伝達率 α で代表させ、電解槽を利用して、色んな α に対して工具における冷却効果を調べてみた。

2. 実験の方法

工具の冷却状態は定常熱伝達であつて、かような問題は前報にものべたように、電気的に電解槽或いは Analog 回路を用いて解くことが出来る。

図 1 工具の対称半分を扱い、電極、水面以外は抵抗板で作り接地する。b)において $L_B=0.8H$ $B=H$

図 1 の工具に相似に拡大して作られた木製電解槽は、刃先熱源、工具台への接触面に相当する電極および水面以外の工具形状は抵抗板でおかれる。ここでは水面を対称面とした 2 次元切削における工具を考えることにする。この抵抗板の厚さ方向の抵抗すなわち工具模型の表面

* 神戸大学工学部

固有抵抗 $r\Omega\text{cm}^2$ は $1/\alpha$, また水の固有抵抗 $\rho\Omega\text{cm}$ は工具の熱伝導率 K の逆数 $1/K$ に対応する。また相対表面熱伝達率 $h=\alpha/K$ を考えると、静電系では ρ/r となるから、いま

$$h = \alpha/K = C\rho/r \quad \dots\dots\dots(2)$$

にとつて (C は模型倍率による係数), かつ工具に相似な模型を作れば, 工具におけると全く等価な状態が現出しよう。この扱いにおいてなされる仮定は次のようになる。

1. 熱伝達率 α は工具表面の位置に関せず一定
2. 工具の熱性質は一定
3. 刃先接触面と工具台接触面はいたる処で一定温度にあるとし、後者は常温と考え機械への吸熱能力は ∞ とする。

2.1 熱伝達率 α , 相対表面熱伝達率 h の推定

切削の場に注がれる油剤はその附近の工具, 加工物, 切屑をおおい, 工具を包んで流下し, 一部は切屑と共に持去られる。この場合の流動状態は, 噴流の衝突した附近は乱流であり, これから遠ざかると層流に変わり, 遠方ほど流速は非常に減ずるのである。この解析は困難であつて, さらに刃先熱源にごく近い場所での状態は明確でない。しかし全体として膜沸騰はないものとみなせよう。

かような冷却状態の簡単な例としては, 平板に直角に水噴流をあてた場合を考えることが出来る。水噴流を高速で冷却面に衝突させる冷却方法は古くから蒸気凝結研究に用いられ, 高い局所熱伝達率がえられるのであるが, 多くは凝結側が主であるため冷却側についての実験資料は極めて少ない。永井氏²⁾が 100° の蒸気で加熱されている銅板に 24° の水を半径 r_0 の管から色々な速度 (レイノルズ数 Re_0) で噴出衝突させて, α を測定されているが, その最大値は $0.6\sim 0.9\text{ cal/cm}^2\text{s}^\circ\text{C}$ となっている。そして Re_0 が大きいほど, また同じ Re_0 では径の小さい管ほど α したがって冷却効果は大きい。かつ α は $1.25 r_0$ の位置で最大値をとり, 衝突点から拡がつて流速の小さくなるにつれて減じている。もつともこの実験の Re_0 は実際の注油状態に比して大きいし, r_0 も小さいが, Jet 注油方式³⁾ にていて, その実際効果を裏付ける点が非常に多い。

また中川氏⁴⁾による銅片を静止の水, 燈油に焼入れた場合における α の測定値も参考になる。 α は物体の形で異り, 立方体では側面より角, 稜で大きい。Leiden-frost 点で α は最大値をとるが, この値は水で約 2, 燈油で約 $1\text{ cal/cm}^2\text{s}^\circ\text{C}$ であつて, うえのものより大きく出

ている。燈油の熱伝導率は水の $1/4.7$ であるが, 核沸騰の部分での平均では α は $1/2.88$ となるのである。

さらに熱交換器における熱通過率の色々な値⁵⁾を参考にすると, 大きい値をとつてもうえの最大値の $1/10\sim 1/4$ にすぎない。切削の場における油剤の流動状態は明らかでなく, これら資料の条件とも一致しないので平均熱伝達率 α を推定することは困難であるが, あとの図 2 に見るように冷却が衝突点に近い所で行われることを考慮に入れて, 通常の注油条件で冷却状態がよい場合, 水溶性油で 0.2 の附近, 高圧 Jet 注油方式で $0.8\text{ cal/cm}^2\text{s}^\circ\text{C}$ の附近, 不水溶性油でこれらの $1/3$ 以下と考えることにする。したがって工具の熱伝導率 K を $0.1\text{ cal/cm}^\circ\text{C}$ とすれば, 実験は $h=1\sim 8/\text{cm}$ の附近で行えばよいことになる。

2.2 表面抵抗板

抵抗としての色々な条件を考え種々の方法を試みたが, 結局主に使用したものはトタン板に表裏ラツカー吹付けを行つたものである。抵抗したがってラツカー被膜の厚さを均一にするため, 各回毎に色を変えて吹付けた。1例をあげれば, 5回吹付, 被膜厚さ約 0.2 mm , 表面固有抵抗 $r=0.125\text{ M}\Omega\text{cm}^2$ である。欲する h をうるためには (2) 式により ρ を変化させる。また刃先熱源の極板の縁とこれを包囲する抵抗板の縁が近いときには, とくに ρ が低い場合異常電流状態となるので約 1.5 mm の間隔^{*}をあけてある。

2.3 測定方法

電位分布, 貫流電流の測定は前報と同じ方法で, 後者は定電圧法を用いた。切削の実際は流入熱量に関係するから, 後者の結果は前報にのべたように,

$$\theta/\theta_0 = V_I/V_{I0} = I_V/I_V \quad \dots\dots\dots(3)$$

から定電流法に直せ, 工具条件を変化したときの刃先温度変化を考察出来ることも同じである。工具を形成する各面要素への流入割合を測定するには, 測定せんとする面に電流計を入れ, 他の面へは抵抗を入れて電流計による電圧降下を補償することによつて, これらと同じ電位において測定した。

3. 工具内における温度分布

図 2 は定常状態における, 色々な h に対する工具内の温度分布を示す。 h の増加につれて温度分布は刃先に偏在するようになり, h が 5 以上ともなると, 温度勾配

* 工具模型は 10 倍に作られているから, 実際寸法では 0.15 mm である。油剤が冷却能を落すことなく, 材料の流れに逆つて, 熱源にどれだけ浸入または接近出来るかは明瞭でない。

図2 刃先温度を10, 切削剤と工具台接触面温度を0としたときの温度分布。2次元切削における対称半分を示し、手前は中心面、前にげ角 6° , $L=47$, $H=15$, $2l=4$, $m=2$ (mm)

は急であつても分布のうへでは大差はなくなる。この図から、次のことが云えよう。

1. 現存の不水溶性、水溶性油は、もしその性能とくに注油方法を改善出来るならば、冷却能を変えうる余地

は充分ある。2.

冷却能の大きいとき、図のように工具全体を冷却しなくても、Jet注油

法のように要所を冷却するだけで流量少くして効果をあげる。(実際の

のように前にげ面に入れるときは図と分布状態は異なるが) 3. しかしこの

場合には、注油中の注油条件の変動は刃先に熱的亀裂を生ずる危険性

が多い。4. h の変化につれて工具面であらわれる熱量割合は変化する。(次節)

図3 $H=15$, $L=1.5H$
 $2l=4$ $m=2$

4. 工具各面に流入する熱量割合

図3はこの変化を示す。すくい角 α が大きいほど、冷却面が近くかつその面積も大きいので、すくい面、前にげ面に入るものが増える。とくにすくい面で大きいのは工具全体が冷却され熱流が工具台方向に向うことによる。さらに h が大となると、前にげ面、側面に入るものが増すことは明白であろう。また h の大きいとき前節の

2. のように工具柄附近の冷却がおそろかになつてもよいといえる。図は附記条件の場合であるが、 l , m , H を増加するとすくい面に入るものがやゝ増し、例えば $H=10$ では55~65%となつて前にげ面流入量が増す。

5. 冷却能、工具条件と刃先冷却効果

任意の h をうるには実験では ρ を変えたが、 L_V が ρ に逆比例することを利用して、 ρ 一定のもとで h を変化したときの刃先から流れる全貫流電流 I_V を求めることが出来る。図4は $\rho=1000 \Omega \text{cm}$ としたときの変化を示したもので、 h を増してゆくと各面への流入割合は図3

図4

のように変化しても、全体としては図4のような関係で増加するのである。現存の油剤の冷却能力は工具全体に対しては、乾切削における最大値（前報、工具台の吸熱能力 ∞ ）のほぼ2倍程度であつて、油剤の性能、注油方法によつて h が変化しても向うの余地はうばえる熱量の差ではたかだか 40~50%以下にすぎないのである。むしろ3節の 2. のように量少くして効果をあげる方法を考えるべきであろう。

図は張り出し長さ $L=1.5H$ のときであるが、 $L=(1 \sim 3)H$ の実験の範囲では $I_r = C(H/L)^{0.02}$ の関係が成立する。よつて以下 $L=1.5H$ について扱い、実際に多くとられる条件の範囲で考え、かつこの範囲で影響度の少ない因子は省略することにする。

図 5 は $h=3$, $H=15$ の場合において、刃物角 γ (に

図 5 $h=3$, $H=15$, $L=1.5H$, $L_B=0.8H$

げ角 6° としたときのすくい角 α), 切屑幅 $2l$, 切屑との接触長さ m の変化にともなう I_r の変化を示したものである。この I_r は工具の対象半分の模型で定電圧 10V の下における値である。にげ角を 6° から多少変化させても I_r は殆んど変わらず、 $\alpha \leq -10^\circ$ ではそれがあるが、実用条件の範囲では $I_r = C\gamma^{0.14}$ において差支えなからう。切屑幅 $2l$ の変化には、 m の大きさもやゝ関係するが、 $2l/H=0.13 \sim 0.4$ の範囲では $I_r = C(l/H)^{0.45}$ とみなせる。たゞし $2l \geq H/2$ となると側面による冷却効果がましてきて、この関係からそれて失うことが図にみられる。

接触長さ m は実際では 1~2.5mm 附近の値であることが多いが、実験では極と抵抗板との間隔を約 1.5mm にとつたので、この影響をさけるため $m=2$ 以上の値で行つた。 I_r は $I_r = C(m/H)^n$ と表わせるが、べき n は l およびすくい面の投影長さ L_B の影響をうけ、 l/H , m/L_B が大となるにつれ n は減少する。これは熱源がす

くい面上で占める大きさに関係するともいえる。これらを整理して、普通条件の範囲で次のように約 $\pm 2\%$ の精度で近似することが出来た。

$$n = 0.48(L_B/H)^{0.92} (H/10l)^{0.17} \\ = 0.325 L_B^{0.92} l^{-0.17} H^{-0.75} \quad \dots\dots\dots(4)$$

L , L_B , l , m の H に対する相似比, γ , h , ρ が同じならば、 H の変化に対して I_r がある一定の法則にしたがつて変化することは当然である。これらの同じ組合せに対し H について整理したところ、多小のパラツキがあるが近似的に $H=10 \sim 20$ の範囲で $I_r = CH^{1.71}$ とすることが出来た。

以上をまとめ、 ρ を工具の熱伝導率 K , I_r を刃先温度を一定に保つたときの熱通過量 Q_θ におきかえて

$$Q_\theta = C_\theta h^{0.07} H^{1.71} \\ \gamma^{0.14} \left(\frac{H}{L} \right)^{0.02} \\ \left(\frac{l}{H} \right)^{0.45} \left(\frac{m}{H} \right)^n K \quad \dots\dots\dots(5)$$

さらに Q_θ を I_r とみなし (3) 式を利用して、工具への流入熱量を δQ とし、工具条件および冷却能を変化した場合の刃先温度の変化を考察出来る。(5) 式より

$$\theta_t = C_Q \delta Q \alpha^{-0.07} \\ K^{-0.93} H^{n-1.28}$$

$$\gamma^{-0.14} L^{0.02} l^{-0.45} m^{-n} \quad \dots\dots\dots(6)$$

この式は、普通にとられる条件の範囲で、切削剤を使用したときの 2 次元切削における刃先温度 θ_t を与える。たゞし $L_B=0.8H$ で、 n は (4) 式で与えられ、この精度は $\pm 5\%$ 位であろう。 δQ , L 以外の増加はすべて θ_t を低下させるように働く。実際の変化範囲を考えて影響度の高いものは δQ (切削条件), l , α , H といった順であろう。また前報の乾切削の場合と比べて、 H , l の影響がまし、 L , γ の影響が減ることは冷却の状態からみて明白なことである。さらに (6) 式における常数 C_Q を測定出来、切屑冷却の式を導きうれば、切削剤を用いた場合の切削温度の理論計算が行えるようになる。

6. 総 括

1. 切削剤の冷却性能（性質と注油条件）を h で代表させ、2 次元切削に対し、電解槽を利用して、工具内温度分布、工具各面への流入割合、工具条件の刃

先温度への影響を調べた。

2. 工具が広範囲で冷却される場合、50%以上の熱がすくい面で奪われる。つまり前にげ面である。
3. $h \geq 5$ 以上では温度上昇は刃先のごく近傍に限られて、分布のうえでは大きな変化はみられなくなる。
4. 同じ良好な注油条件では水溶性油に比し不水溶性油の熱伝達率は $1/3$ 以下とみてよからうが、それが5倍ちがつても工具から奪いうる熱量は20%程度の差にすぎない。
5. よつて冷却性能のよい切削剤を用い、注油条件、場所をえらび、あるいは熱源近くへ押込んで、量少くして切削剤の出しうる最大の効果をあげることをねらうべきである。例えば Jet 注油法の如きである。

6. 工具条件を変化したときの刃先温度は(6)式で表わせる。影響度の多い因子は δQ , α , l , H などである。(1956, 2月24日受付)

参考文献

- 1) 精密機械: 22, 6 (昭31) p. 273.
- 2) 永井, 河合, 谷口: 機械学会論文集, 21, 104 (昭30) p. 310.
- 3) R. J. S. Pigott: Am. Machinist, Jan. 21(1952). 倉田忠雄: 日立造船技報, 16, 2 (昭30-5) p. 43.
- 4) 中川, 吉田: 機械学会論文集, 18, 72 (昭27) p. 16.
- 5) J. H. Perry: Chemical Engineers' Handbook (1950). 栗野, 葛岡: 伝熱工学 (昭29) p. 114.

高速切削の研究 (第9報)

——接触面積理論に基づいた切削速度効果について——

—— その 1 ——

正 会 員 竹 山 秀 彦*

Study on High Speed Machining (9)

——Cutting Speed Effect based upon Theory of Tool-Chip Contact Area——
(Part 1)

By Hidehiko TAKEYAMA

It was reported by the previous papers that the tool-chip contact area is a controlling factor in metal machining. One of the most typical examples of this effect is revealed in high speed machining.

The main object of this experiment is to find out the reason why the machining characteristics are such improved that the shear angle and chip thickness ratio increase, and the cutting force decreases generally, when cutting speed is raised up. By such a special type of machining test that the shear angle was always kept constant, it was proved that the shear strain in the shear plane is localized into a narrow zone as the cutting speed increases. This is because that the plastic deformation in the shear zone occurs more adiabatically at higher cutting speeds as C. Zener made it sure in his punch test of rather plastic materials. Anyhow this tendency makes the tool-chip contact area smaller at higher cutting speeds, which results into a larger shear angle, that is, better machining characteristics, to balance the cutting force on the rake face, according to the theory described by the previous reports.

Here also so called the coefficient of friction in metal cutting has been proved to be a poor index of the machining characteristics, whereas the tool-chip contact area has been demonstrated to play a very important role in the mechanism of high speed machining as well as for the analysis of general metal machining.

I. 緒 論

前報¹⁾において、刃面切屑接触面積が切削性を左右す

る支配的要素なることを示したが、その間の関係が最も端的にあらわれ且つ實際上非常に重要な意味をもつ例が高速切削である。本報告においては、黄銅、鋼及び鋳鉄

* 工業技術院機械試験所