工具内部冷却法による切削 (第2報)*

—切削機構に及ぼす冷却効果—

岡 本 定 次** 土 井 雅 博**

On Cutting with Internally Cooled Cutting Tool (2nd Report)

—Cooling Effect on Cutting Mechanism—

Sadaji OKAMOTO, Masahiro DOI

Tool life can be increased by cutting with internally cooled cutting tool. The tool wear is caused mainly by abrasion wear and diffusion wear. This paper describes a cause of decrease in the tool wear on cooled cutting by means of analysis on the mechanism of force system at cutting tool and the experimental findings. The main results as compared with the ordinary cutting are as follows:

- (1) The cutting resistance and the tool-chip contact length decrease on cooled cutting.
- (2) The friction force and the friction stress on the tool rake face decrease by this cutting technique.

1. はじめに

筆者らは、先に冷却液の閉回路循環方式による工具内部冷却切削法について報告したり、すなわちこの方式では、比較的簡単な冷却装置によって得られる冷媒を切削中の工具シャンク内部へ送り、工具を冷却してもとの冷却槽へもどす回路であるために、冷却能力は長時間の切削においても低下せず、冷媒の消費もなく、作業も安全に行うことができる。また本方式による切削法の効果として、工具摩耗の進行を抑制し、常温切削と比較して約3倍まで工具寿命を延長させることができた。また工具摩耗を支配する切削温度が冷却切削の場合に常温切削に比べ低くなることを示し、本切削法における切削温度と工具寿命との関係を実験式として求めた。そこで次に本切削法における工具摩耗軽減の原因について種々の観点から定性的および定量的に明らかにする必要がある。ここで工具摩耗には多くの原因が考えられるが、そのうち定常的に進行する摩耗の主な原因には、かたい粒子によるひっかき作用、冷間圧着部の微小破壊、熱化学的な原因による溶着拡散、電気化学的な熱電流および酸化などがある。これらの諸因子が複雑に作用を及ぼしあって工具摩耗を進行させるものであるが、その摩耗を時間依存性の機械的摩耗と温度依存性の溶着摩耗とに大別することができる^{2), 3)}。このように複雑な現象を分離して考

えることは難しいことであるが、本研究では工具内部冷却切削における工具摩耗軽減の原因解明の手法として、比較的切削速度の低い条件においては温度依存性の摩耗因子の影響が少ないことから、そのような条件のもとで機械的摩耗因子について、また切削速度の高い条件では機械的因子と熱的因子の複合として検討を加える。

まず本報では第1段階として、実際に常温切削と冷却切削を行った結果、切削現象に相違点のあることが観察されたことから、どの切削条件においても工具摩耗に重要な影響を与える作用力、特に摩擦力および摩擦応力について巨視的な切削機構の観点から検討を行った結果について報告する。

2. 切 削 機 構

切削仕事の大部分は切りくず生成と切りくずの排出に費やされるから、切削機構を考える場合の主な項目として、切りくず生成領域におけるせん断作用と、工具-切りくず接触領域における摩擦作用とを挙げることができる。そこで常温切削と工具内部冷却切削 (冷却切削とする) におけるこれら二つの項目を比較することによって、冷却切削の切削機構に及ぼす影響を知ることができる。すなわち、本切削法では工具のみを冷却するのであるから、常温切削に比べ、工具と切りくずの摩擦作用、たとえば切りくず接触長さ、摩擦力、摩擦応力などに何らかの変化が生じているはずである。一方、せん断領域は直接の冷却対象ではないが、冷却切削による工具すくい面における摩擦作用の変化が間接的にせん断作用、たとえばせん断角、せん断応力などに影響を及ぼしていること

* 原稿受付 昭和48年12月24日。昭和45年度精機学会秋季大会学術講演会 (昭和45年10月8日) および昭和47年度精機学会東海支部浜松地方講演会 (昭和47年6月23日) にて発表。

** 正 会 員 武蔵工業大学 (東京都世田谷区玉堤1-28-1)

も考えられる。

いま2次元切削において単一せん断面を形成する切削模型を考えると、せん断面上の平均せん断応力 τ_s および工具すくい面上の平均摩擦応力 τ_f はそれぞれ次式のように求められる。

$$\tau_s = \frac{R \cos \theta \cdot \sin \phi}{b \cdot t_1} \quad (1)$$

$$\tau_f = \frac{R \sin(\theta - \phi + \alpha)}{b \cdot l_f} \quad (2)$$

ここで、 R : 切削抵抗合力、 b : 切削幅、 t_1 : 切込み深さ、 l_f : 工具-切りくず接触長さ、 ϕ : せん断角、 α : 工具すくい角、 θ : 切削抵抗合力方向とせん断面とのなす角。

式(1)および式(2)からわかるように、せん断面上平均せん断応力およびすくい面上平均摩擦応力は、切削抵抗、せん断角および工具-切りくず接触長さを測定することにより求めることができる。式(1)および式(2)からせん断角は次式のように表すことができる。

$$\cot \phi = \cot(\theta + \alpha) + \frac{\cos \theta}{\sin(\theta + \alpha)} \cdot \frac{\tau_f \cdot l_f}{\tau_s \cdot t_1} \quad (3)$$

ここで θ の値については種々の議論があるが⁴⁾、被削材によっておおよそ一定の値をとることは多くの研究者により確かめられている⁵⁾。そこですくい角が一定の場合には摩擦応力とせん断応力の比 τ_f/τ_s と、工具-切りくず接触長さ l_f とがせん断角を決定する因子となる。また工具-切りくず接触長さを一定となるように拘束すれば、せん断角は τ_f/τ_s のみの関係で決定される。

3. 実験方法

使用した工具内部冷却切削装置は前報のものと同一である。切削方式は管状被削材の端面2次元切削である。切削条件を表1に示す。実験は次の二つの方法で行った。

〔実験1: 通常の切削工具による切削実験〕

通常の切削工具によって常温切削および冷却切削を行い、切削抵抗主分力および背分力を工具動力計で、また切りくず厚さおよび工具-切りくず接触長さを顕微鏡でそれぞれ測定し、常温切削と冷却切削について比較した。

〔実験2: すくい面拘束工具による切削実験〕

実験1の結果から、常温切削と冷却切削との間に切削機構上の相違が認められた。これらは主として工具-切りくず間の摩擦現象の変化が原因であると考えられる。そこで一定の工具-切りくず接触長さの条件のもとで、式(3)に示したように τ_f/τ_s が切削機構に及ぼす影響の

表1 切削条件

	実験 1	実験 2
切削速度 (m/min)	16, 29, 39, 54, 72, 97, 132, 179, 239, 330	20, 40, 60, 80, 100
切込み (mm/rev)	0.04	0.04
切削幅 (mm)	2.0	2.0
工具材種	超硬合金工具 P 10	
工具形状	$\alpha = -7^\circ, \beta_r = 7^\circ$	$\alpha = 0^\circ, \beta_r = 7^\circ$
すくい面拘束長さ (mm)	—	0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35
被削材	圧力配管用炭素鋼鋼管 STPG 42, 158φ	
工具冷却温度	-25~-30°C	
室温	18~22°C	

検討および各応力の比較を行うために、表1(実験2)に示すようなすくい面拘束工具を用いて常温切削と冷却切削を行い各諸元を測定算出した。切削条件は前報の工具寿命試験の結果および実験1の結果から冷却効果の大きい100 m/min以下の切削速度を採用した。

4. 実験結果と考察

4.1 通常工具による切削

図1(a),(b)は切削抵抗主分力 F_c および背分力 F_t を示したものである。 F_c および F_t ともに切削速度の増加に伴いいずれも減少している。またいずれの切削速度においても冷却切削の場合に切削抵抗は常温切削のそれに比べて小さく、その傾向は特に100 m/min以下の切削速度において顕著である。切りくず厚さについては図2に示すように冷却切削の場合にわずかであるが減少している。図3は工具-切りくず接触長さ l_f を示したものである。常温切削に比べ冷却切削の場合にいずれの切削速度においても l_f は小さくなっている。このようにこの切削条件のもとでは常温切削に比べ切削抵抗、工具-切りくず接触長さおよび切りくず厚さが減少することがわかった。これらはせん断角と密接な関係をもち、いずれもせん断角が増大した場合に生ずる現象である。つまり冷却切削の場合の冷却効果による工具すくい面上の摩擦状態の変化が二次的にせん断角を増大させたものと考えられる。また工具-切りくず接触長さについては切りくずカールの問題と関係が深い。カール半径には工具の熱伝導率、接触面の温度分布および応力分布が重要な因子となる^{6)~9)}。本研究ではすくい面の平均温度¹⁾および実験2で述べるように平均応力が冷却切削の場合に常温切削に比べ減少していることから、上記諸因子の変化が予想され、切りくずカール半径が小さくなり接触長さが減少し

(a) 切削抵抗主成分

(b) 切削抵抗背成分

図1

図2 切りくず厚さ

たものとする。なおこのような変化の生ずる原因については、工具-切りくず間の機械的および熱的挙動を説明する必要があるが、この問題については次報以下で報告する。

4.2 すくい面拘束工具による切削

実験1で求めた工具-切りくず接触長さは、工具すくい面上の切りくず擦過痕の長さを測定した値であるが、すくい面上の摩擦応力 τ_f を考える場合には、この値は厳密には不適当である。というのはすくい面上で τ_f は均一に分布しているのではなく、切りくずがすくい面か

図3 工具-切りくず接触長さ

図4 切削抵抗

ら離れる側では τ_f は減少しているからである。そこで切削機構に及ぼす接触長さの影響を調べるために、切削速度 $V=20 \text{ m/min}$ のもとで、すくい面上の接触長さを拘束する工具を用い、この拘束長さ L を変化させ諸現象との関係を求めた。ここで切削抵抗主成分がすくい面法線方向に、また背成分が摩擦面にそれぞれ等しくなるように工具すくい角を 0° にした。このような条件においては通常構成刃先の発生が問題になるが、本実験の場合にはすくい面拘束の影響もあって構成刃先の発生が認められないことを確認して実験を行った。図4に切削抵抗 (F_c, F_t) を示す。ここで L を増加させると常温切削、冷却切削ともに切削抵抗は増大している。その増大の割合は F_c については $L=0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ の間で緩慢になっていることがわかる。またいずれの L においても冷却切削の場合の切削抵抗は常温切削に比べて小さくなっている。図5に切りくず厚さ t_2 を示す。 L の増加に伴って t_2 は増大しているが $L=0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ でその傾向が変化していることがわかる。またどの L についても冷却切削の方が t_2 は小さい。以上の測定値から算出したせん断角 ϕ および摩擦角 β と L の関係を図6に示す。明らかに β および ϕ に冷却の影響が認められる。図7に τ_f および τ_s と L の関係を示す。 τ_f はどの場合にも冷却切削の場合に常温切削に比べ減少している。また τ_s について

図5 切りくず厚さ

図6 せん断角および摩擦角

図7 せん断応力および摩擦応力

は、 $L=0.2$ mm 近傍までは完全に接触面積拘束の領域であるが、 L がそれ以上になると冷却切削による接触面積減少の効果が生じてすくい面上の応力が常温切削の場合に比べ大きく減少しはじめ応力分布に差が生じるものと考えられる。このために τ_s にも冷却切削の影響が現れて常温切削のそれよりも大きくなっているものと考えられる。この領域で図5に示した t_2 の冷却切削と常温切削との差が大きくなっている。

以上の結果から常温切削では $L=0.3$ mm, 冷却切削では $L=0.2 \sim 0.3$ mm 以下で接触長さを拘束する影響が現れることがわかった。そこで次に $L=0.25$ mm の一定条件のもとで切削速度を変化させた場合の切削機構について検討する。図8に各切削速度における切削抵抗および

図8 切削抵抗

図9 せん断角および摩擦角

図10 せん断応力および摩擦応力

切りくず厚さの関係を示す。冷却切削の影響は $V=60$ m/min 以下の低速域で顕著に認められる。これらの値から ϕ , β , τ_s および τ_f を算出し、図9および図10に示す。ここで ϕ と β の間には一般に、 $\theta=\phi+\beta-\alpha$ なる関係があり、前述のように θ の値は被削材によってほぼ一定であることが知られている。本実験の場合にも、 $\alpha=0^\circ$ の条件のもとで $\theta=\phi+\beta \approx 50^\circ$ とほぼ一定の値であることがわかる。そこで冷却切削によってわずかではあるが β が減少するために ϕ は増大することになる。 τ_s についてはどの切削速度においても冷却切削の場合に常温切削よりも大きい値となる。 τ_f については切削速度の増加に伴い減少している。またいずれの切削速度においても冷却切削の場合に τ_f は減少している。ここで切削における工具と切りくずの摩擦は他の摩擦現象と異なり、工具と切りくず間の親和性が大きく影響を及ぼす。つまり、きわ

図 11 摩擦応力とせん断応力の比

めて大きな応力と温度のもとで化学的に活性の高い両者が物理的または熱化学的に凝着し、これをせん断破壊するための力が摩擦力に加わるのである。そこで切削速度の増加に伴って上昇した温度によってこの親和性は増大し、 τ_f は大きくなるものと考えられるが、実際には切りくずの降伏せん断応力が高温になるにつれて減少するために切削速度の増加に伴い τ_f は減少している。また冷却切削においては工具内部の温度勾配が常温切削に比べて大きくなり¹⁰⁾、工具すくい面上の温度が低くなる¹¹⁾ために工具-切りくず間の親和性が減少するものと考えられる。そのために常温切削に比べて τ_f は減少するものである。この現象が冷却切削における切削機構上注目すべき点である。図 11 に τ_f/τ_s と切削速度との関係を示す。常温切削、冷却切削ともにせん断領域および工具-切りくず摩擦領域において被削材も切りくずもせん断降伏状態になっているものと考えられ、 τ_f/τ_s の値はほぼ 1 になる。また冷却切削の場合に τ_f/τ_s は常温切削に比べ小さくなっている。本冷却切削法は工具すくい面の摩擦領域への効果が期待できるものであり、冷却切削において τ_f が減少することが特徴であるが、その結果せん断領域における力関係も二次的に変化する。その影響を τ_f/τ_s の値の変化として表すことができ、式 (3) に示すように一定の接触長さのもとでは冷却切削の場合に ϕ が大きくなる。

5. む す び

工具内部冷却切削法による切削機構を常温切削と比較

した結果、次のことが明らかになった。

- (1) 切削抵抗および工具-切りくず接触長さが減少する。
- (2) 工具すくい面に作用する摩擦力および摩擦応力が減少する。
- (3) 工具すくい面の摩擦領域に対する冷却効果は二次的にせん断領域の力関係にも影響を及ぼす。

以上のように冷却切削において工具への作用力が減少することがわかった。そこで目下、作用力と工具摩耗との関係および工具と切りくず間の熱化学的な拡散摩耗について定量的に考察を行うべく研究を進めている。

本研究を進めるにあたり助言いただきました武蔵工業大学・安味貞正助教授に心からお礼を申し上げます。また実験に協力された工具内部冷却切削班の卒業生諸君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岡本定次, 土井雅博: 工具内部冷却法による切削 (第1報), 精密機械, **38**, 5 (1972) 443.
- 2) H. Opitz: About Wear on Cutting Tools, Proc. Conf. on Lubrication and Wear, Oct. (1957) 664.
- 3) 藤井義也: 切削工具の寿命に関する研究, 日本機械学会誌, **71**, 592 (1968) 637.
- 4) 精密工作便覧, 精機学会 (1970) 48.
- 5) 例えば, E. H. Lee & B. W. Shaffer: The Theory of Plasticity Applied to a Problem of Machining, J. Appl. Mech., **18**, 4 (1951).
- 6) 竹山秀彦: 高速切削の研究 (第7,8報), 精密機械, **22**, 3 (1956) 108; 同, **22**, 8 (1956) 354.
- 7) 佐藤健児: 切削機構に関する研究 (第1報), 精密機械, **25**, 3 (1959) 50.
- 8) 中山一雄: 切削機構に関する研究, 精密機械, **23**, 9 (1957) 441.
- 9) 一宮亮一: 高温切削における二次元切削機構, 日本機械学会論文集, **30**, 217 (1964) 1019.
- 10) 岡本定次, 土井雅博: 工具内部冷却法による切削 (第8報), 昭和47年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1972).