研 究

クリープフィード研削における研削液供給法の改善*

——研削液供給状態と被削材温度の関係——

網沢洋二**

青山英彦**

青山藤詞郎***

稲崎一郎***

Improvement of Grinding Fluid Application in
Creep Feed Grinding—Relation between State of Grinding Fluid
Application and Workpiece Temperature—Yoji TSUNASAWA, Hidehiko AOYAMA,
Tojiro AOYAMA and Ichiro INASAKI

Due to its high productivity, creep feed grinding has attracted special interest recently. Efficient application of grinding fluid to the arc of contact between grinding wheel and workpiece, however, is quite difficult, so that the thermal damage of

the ground surface becomes a serious problem. In order to reduce the circumferential air flow around the grinding wheel and to improve the grinding fluid application, two methods were proposed, i. e., the use of a scraper plate and the masking of both sides of the grinding wheel. The effect of these two methods on the state of grinding fluid application as well as the cooling action on the workpiece are experimentally confirmed.

Key words: creep feed grinding, grinding temperature, application of grinding fluid, arc of contact, thermal damage.

1. 緒 言

近年、加工能率の高さからクリープフィード研削が注目されているが、通常のブランチ研削に比べて研削熱の発生が大きく、さらに砥石車と被削材間の接触弧の増加に伴い研削液の良好な供給も困難となるため、研削面の熱損傷や加工精度の低下が大きな問題となっている。本研究はこのようなクリープフィード研削における問題を解決すべく研削液供給法を改善することを目的としている。

研削液の供給法に関しては、従来いくつかの工夫が試みられている^{1)~6)}。しかしながら、これらの研究においては研削点に作用する研削液の量が定量的には把握されておらず、研削点における研削液の供給状態はその研削結果から間接的に推測されているに過ぎなかった。研削液の冷却効果等を検討する上でも、研削点に作用する研削液の量を把握する必要がある。また、これらの研究はいずれも通常の研削状態を想定したものであり、クリープフィード研削を対象とした研削液供給法の改善に関する研究はあまり行われていないのが現状である。

著者らはこれまでにクリープフィード研削を対象としたモデル実験を行い砥石車と被削材間の接触弧における研削液の供給状態を研削液の等価厚みを用いて定量的に評価することを可能とし、さらに研削液の良好な供給を

妨げる砥石車回りの空気流れ対策として遮断板の使用と砥石車両側面へのマスクの装着を試み、接触弧における研削液の供給状態に与えるこれらの効果を明らかにした⁷⁾。そこで、本報では実研削における研削液の等価厚みおよび接触弧近傍の被削材温度を測定し、遮断板、マスクの効果ならびに研削液の等価厚みと被削材温度の関係を実験的に解析した結果について述べる。

2. 実験装置および実験方法

本研究では溝加工のクリープフィード研削を想定した。接触弧内の研削液は一定の厚みで存在しているとは考えられず、砥石車内に含まれている分もあると推測されるので、これらすべてを考慮し、接触弧内の研削液が平均的な厚みで存在すると仮定した場合の研削液の厚さを研削液等価厚みと定義する。図1に実研削中の研削液等価厚みの測定に用いた実験装置の概要を示す。図のようにアルミ箔の電極を埋め込んだアクリル製の被削材を作製した。平面研削盤にパルスモータで駆動する低速送り装置を固定し、その移動テーブル上のバイスに被削材を取り付け、研削液（本実験では水道水）を供給しながら研削を行った。図中に示す回路を組み、研削中の抵抗1.2 k Ω の両端の電位差を記録し、これより砥石車と被削材間の接触弧における研削液の電気抵抗を算出した。接触弧における研削液の厚みが増すとそれに反比例して研削液の電気抵抗は減少することになる。また、接触弧内の研削液の厚さを一定にするために砥石車の代わりに同じ寸法のアクリル円板を取り付け、被削材との間に研削液を満たし、アクリル円板を上下させて研削液の厚さ

* 原稿受付 昭和58年4月28日。昭和58年度精機学会春季大会学術講演会（昭和58年3月29日）にて発表。

** 学生会員 慶応義塾大学大学院（横浜市港北区日吉3-14-1）

*** 正会員 慶応義塾大学理工学部

Fig. 1 Experimental equipment for measurement of the equivalent thickness of grinding fluid

Fig. 2 Relation between thickness of grinding fluid and electric resistance

を変化させ、この値と電気抵抗との関係を求めた。この場合、アクリル円板は回転させていない。接触弧長さ 15.7 mm における研削液の厚さと電気抵抗の関係を図 2 に示す。この関係を用いて先に測定した研削中の接触弧における研削液の電気抵抗値に相当する研削液の厚さを求め、この値を実研削中における接触弧内の研削液等価厚みとした。

図 3 に被削材温度の測定に用いた実験装置の概要を示す。被削材の形状を図 4 に示す。研削中に研削液の供給状態を一定に保つため、あらかじめ図に示した位置まで研削による溝加工を施しておいた。また、被削材側面の図中の位置に $\phi 1.7$ mm の穴をあけ、熱電対埋込み孔とした。この被削材を低速送り装置に取り付け、熱電対埋込み孔にシース型熱電対 (CRC) を埋め込み、被削材に押し付けた。この際、シース型熱電対の先端にシリコングリスを塗り、被削材との熱伝導を良くした。研削中の被削材温度は温度記録計で 5.4 s ごとに記録した。

両実験とも、使用した砥石車は WA 60 JV, $\phi 205 \times$

Fig. 3 Experimental equipment for workpiece temperature measurement

Fig. 4 Configuration of workpiece

10, ノズル出口寸法は 1.7 mm $\times$ 7.3 mm である。ドレッシング条件は砥石車周速度 26.8 m/s, 送り速度 14 mm/s, 切込み $20 \mu\text{m} \times 2 \rightarrow 10 \mu\text{m} \times 2 \rightarrow 5 \mu\text{m} \times 2 \rightarrow 2.5 \mu\text{m} \times 2$ である。

3. 結果および検討

3.1 研削液供給状態に及ぼす遮断板、マスクの効果

本研究では砥石車と被削材間の接触弧における研削液の供給状態を研削液の等価厚みを用いて定量的に評価した。研削液の等価厚みとは、砥石車と被削材間に存在する研削液および砥石車外周面に浸透している研削液が一定の厚さで接触面に存在しているとした場合の研削液の厚さを意味している。したがって、研削液の等価厚みが大きい方がより良好な状態で研削液が供給されていることになる。

研削液の良好な供給を妨げる砥石車回りの空気流れ対策として、遮断板およびマスクを用いた場合における研削液供給流量と研削液の等価厚みの関係を図 5 に示す。各々の取付位置は図中に示す。遮断板としてはアクリル板を用い、マスクとしては砥石車両側面の約 90% にシリコンゴムを塗布した。遮断板はつれ回り流を、マスクは吹出し流をそれぞれ押さえる効果がある⁷⁾。遮断板、マスクを用いると通常の場合に比べて研削液の等価厚みは

Fig. 5 Effect of the scraper and the mask on the equivalent thickness of grinding fluid

大きくなり、接触弧における研削液の供給状態が改善されていることがわかる。両者の効果を比較すると、マスクの方が効果がある。また、遮断板とマスクを併用した場合はさらに効果的である。

3.2 被削材温度に及ぼす遮断板、マスクの効果

本実験で述べる“被削材温度”は、すべて研削面下1.1 mmにおける熱電対による測定値である。この温度と被削材初期温度の差を、研削による被削材の温度上昇 ΔT とした。被削材の温度上昇 ΔT は研削点と熱電対の距離によって変化するが、この最大値を $\Delta T_{\max}$ とし、各条件における被削材温度上昇を $\Delta T_{\max}$ を用いて整理した。図6に遮断板、マスクを用いた場合における研削液供給流量と $\Delta T_{\max}$ の関係を示す。研削液供給流量の増加に伴い $\Delta T_{\max}$ は低下し、また遮断板、マスクを用いると先に述べたように接触弧における研削液の供給状態が改善されるために $\Delta T_{\max}$ は低下している。遮断板、マスクおよび両者の使用による $\Delta T_{\max}$ の低下傾向は、図5の研削液の等価厚みの増大傾向に対応している。しかしながら、 $\Delta T_{\max}$ の低下傾向は研削液供給流量の増加に伴い減少し、ついには一定値を保ち、それ以下には下がらなくなる。この理由は次節で検討する。

3.3 研削液の供給状態と被削材温度の関係

砥石車周速度はノズル出口付近の研削液の流速よりも大きく、例えば $Q_1=6$ l/minのときには約4倍にも達するので、研削液は砥粒に引き込まれて接触弧に入りチップポケット内に保持されて進行すると考えられる。本実験では、チップポケットの深さは数百 μm であるのに対し被削材への砥粒最大切込み深さは、理論計算上では0.01 μm 以下となるので、被削材が変化し、その変形特性が変わってもチップポケットの容積には影響を与えな

Fig. 6 Effect of the scraper and the mask on the workpiece temperature

Fig. 7 Relation between equivalent thickness of grinding fluid and workpiece temperature

いと思われる。したがってアクリルとS45C両被削材において、研削液供給流量が等しければ研削液等価厚みも等しいと考えられる。そこで図5、図6を研削液等価厚みと $\Delta T_{\max}$ の関係に整理し、図7に示す。研削液等価厚みと $\Delta T_{\max}$ の関係は遮断板、マスクの使用のいかんにかかわらず一つの曲線に乗ることがわかる。したがって、 $\Delta T_{\max}$ は研削液等価厚みがある値以上になるとそれ以上 $\Delta T_{\max}$ は低下しなくなる。

ここで砥石車と被削材間の接触面における研削熱の研削液への熱伝達の状態を図8に示すようにモデル化する。接触弧内では研削液の厚さ、研削点温度とも不均一と考えられるが、この状態をすべて考慮して理論的解析を行うのはほとんど不可能である。一方、接触弧内の研削液はチップポケット内に保持されて進行するので、層流と仮定できる。そこで、砥石車と被削材の接触面を平面に展開し、この平面上を無限遠での温度 $T_{\infty}=0$ なる研削液が平行に、かつすべての場所で流速 V_f が一定で進むモデルを考える。また、この流れは厚さ y 方向に無

Fig. 8 Thermal boundary layer

限であり、かつ長さ l_a なる接触面は常に温度 T_w に保たれていると仮定する。このとき、静止座標系での温度分布は図8に示したように放物線状になる。接触面から離れるにつれ研削液の温度は低下し、ついには無限遠での温度と等しくなる。この境界までを温度境界層と呼ぶ。流体自体に乗って等速で運動している座標系を (x', y') とすると、 y' 方向の温度分布の基礎式は、

$$a_f \frac{\partial^2 T}{\partial y'^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

となる。ここで、 a_f は研削液の温度伝導率である。 y' の小さい部分についての解は次のようになる。

$$\frac{T}{T_w} = 1 - \phi\left(\frac{y'}{2\sqrt{a_f t}}\right)$$

ここで $\phi(P)$ は誤差関数である。上式を静止座標 (x, y) に置きかえ、

$$\frac{T}{T_w} = 1 - \phi\left(\frac{y}{2\sqrt{\frac{V_f}{a_f x}}}\right)$$

となる。誤差関数 $\phi(P)$ を次のような2次関数で近似する。

$$\phi(P) = \frac{2}{\sqrt{3}}P - \frac{1}{3}P^2$$

$\phi(P)$ の値は $P = \sqrt{3}$ で1となり $T=0$ となるので、この近似によれば温度境界層の上縁の厚さ $y_\delta(x)$ は、

$$y_\delta(x) = 2\sqrt{3} \cdot \sqrt{\frac{a_f x}{V_f}} \quad (1)$$

となる。したがって、 $x=l_a$ での温度境界層の厚さ $y_\delta(l_a)$ (以後これを温度境界層の厚さと呼ぶ)より上の研削液は温度上昇がなく、熱伝達に寄与しないことになる。

以上より、研削液等価厚みの増加に伴い $\Delta T_{\max}$ は低下するが、研削液等価厚みが温度境界層の厚さ以上になっても $\Delta T_{\max}$ はそれ以上低下せず、一定になると考えられる。

本実験の場合、 $V_f = V_g$ (砥石車周速)として式(1)より温度境界層の厚さを求めると $y_\delta(l_a) \approx 30 \mu\text{m}$ となる。

実研削中では、接触弧内を通過する研削液以外に被削材の上部及び側面を通過する研削液等によっても $\Delta T_{\max}$ が多少低下すると考えられるので、これらのことを考慮して図7より温度境界層の厚さの実験値を約 $100 \mu\text{m}$ とみなした。両者を比較するとオーダ的に一致しており、上述の考え方は妥当であると思われる。実験値の方がやや大きくなっているが、この理由としては、実際には接触面での研削液の流れは乱れていると考えられ、熱伝達に寄与する研削液の量は計算値よりも大きくなること、および砥石車と被削材の接触弧の前後においても熱伝達が行われていることなどが考えられる。

4. 結 言

本研究ではクリープフィード研削における研削液等価厚みおよび砥石車と被削材間の接触弧近傍の被削材温度を測定し、遮断板、マスクの効果を明らかにし、研削液等価厚みと被削材温度の関係を実験的に解析した。以上で得られた結果を要約する。

- (1) 遮断板およびマスクの使用は砥石車と被削材間の接触弧における研削液の供給状態を改善し、被削材の冷却に関して有効である。
- (2) 研削液等価厚みが温度境界層に対応する厚さ以上になると冷却効果は飽和する。

おわりに本実験の遂行に際し、三井研削砥石株式会社および株式会社岡本工作機械製作所の御協力を得たことをここに記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) G. Trmal and H. Kaliszter: Delivery of Cutting Fluid in Grinding, 16th Int. MTDR. Conf. Grinding Seminar, UMIST, (1975) 25.
- 2) 貴志浩三ほか: 難削材の研削加工の改善に関する研究(第1報), 精密機械, **38**, 3 (1972) 275.
- 3) 貴志浩三ほか: 難削材の研削加工の改善に関する研究(第2報), 精密機械, **39**, 6 (1973) 613.
- 4) 佐々木外喜雄ほか: いしを通して研削液を供給する研削仕上の研究, 日本機械学会論文集, **20**, 98 (1954) 643.
- 5) 佐々木外喜雄ほか: いしを通して研削液を供給する研削仕上の研究(続報), 日本機械学会論文集, **21**, 106 (1955) 427.
- 6) W. Graham and M. G. Whisto: Some Observations of Throughwheel Coolant Application in Grinding, Int. J. MTDR, **18**, (1978) 9.
- 7) 網沢洋二ほか: クリープフィード研削における研削液供給法の改善, 精密機械, **48**, 11 (1982) 1526.