耐熱合金のクリープフィード研削に関する研究*

——砥石周速の砥石摩耗への影響——

前田幸男** 榊田正美** 小泉幸久** 渡辺 眞**

A Study on Creep-Feed Grinding of Heat-Resisting Alloy
—Influence of Grinding Wheel Wear on Grinding Speed—

Yukio MAEDA, Masami MASUDA, Yukihisa KOIZUMI and Makoto WATANABE

Creep-feed grinding is a form-copying grinding process capable higher rates of material stock removal than most other conventional grinding processes. In industry, creep-feed grinding is used for form-copying grinding of material which is very hard or very tough. The most widespread application of the process is the form-copying grinding of Inconel turbine blades of gas turbines. This paper deals with the grinding wheel speed and grinding ratio aspects of creep-feed grinding of Inconel 738. These aspects were studied under conventional grinding and creep-feed grinding conditions. The following results were obtained. (1) In grinding conditions, the grinding ratio has an especially strong correlation with the grinding speed. The grinding ratio at a low wheel speed of 3 m/s is approximately 10 times larger than that of the conventional wheel speed of 33 m/s. (2) It is made clear that dulling and breaking appear on a grinding wheel at a conventional wheel speed, and self-sharpening appears at a low wheel speed, according to the estimation with the measured mean grain profiles. (3) The wheel wear of the edge part during creep-feed grinding is 4 times less than that of the conventional grinding, with low wheel speed operation.

Key words : creep-feed grinding, grinding wheel speed, form-copying grinding, grinding ratio, mean grain profile

1. 緒 言

耐熱合金、工具鋼、超硬合金などの難削材の高エネルギー成形研削にクリープフィード研削が用いられている。クリープフィード研削は、通常研削に比べてテーブル速度を1/100と遅く、砥石切込み量を100～1000倍と大きくするため、研削時の切りくず形状が薄く、長くなる特徴がある。このため、研削時に砥石が硬く作用し、クロストラバースを与えられない成形研削において、研削面粗さと研削比の向上が可能である。

しかし、耐熱合金は高温強度が高く、熱伝導率が低いためクリープフィード研削時に砥粒切れ刃の機械的損耗、熱的摩耗を生じやすく、Thermal Surge¹⁾と呼ばれる工作物の熱損傷が発生し、加工能率や研削比の低下の原因となる。この対策として、研削液の高圧ジェット注液法²⁾の採用、ダイヤモンドやCBN砥石を用いた高砥石周速の加工法³⁾⁴⁾、Bridgeport Harig

社⁵⁾や島宗ら⁶⁾のアルミナ系砥石を用いた低砥石周速の加工法が報告されている。耐熱合金が使用される部品のうちタービンブレードなどは、成形砥石を用いたクリープフィード研削で加工されている。この成形研削において、ダイヤモンドやCBN砥粒の成形砥石を高精度にツルーイング、ドレッシングする技術が確立されていないため、砥石成形の容易性と工具費の低減の観点から、アルミナ系砥石を用いることが多い。

そこで本研究では、アルミナ系砥石を用いてNi基耐熱合金(Inconel 738, Ni ; 70 wt%)をクリープフィード研削し、砥石周速と砥粒切れ刃の摩耗形態の相関について実験的に解析し、低砥石周速研削の適用範囲や加工条件を明らかにし、加工精度の向上を図ることを目的としている。

2. 実験装置および方法

研削実験に使用したクリープフィード研削盤を図1に示す。図1は、横軸角テーブル形平面研削盤である。砥石軸の回転駆動方式はビルトインタイプのDCサーボモータ(28 kW/2 800 min⁻¹)であり、往復動

* 原稿受付 平成4年12月11日

** 正 会 員 (株)日立製作所(横浜市戸塚区吉田町292)

*** 正 会 員 石巻専修大学(石巻市南境新水戸1番地)

Fig. 1 Photograph of creep feed grinding used for experiments

テーブルはV-平タイプのしゅう動案内とウォーム・ラックの駆動方式により、テーブル速度を0.3~330 mm/sで移動可能である。

研削条件は、特に断らない限り表1に示す平面プランジ研削方式である。この表において、クリープフィード研削における熱的損傷を低減させるため、塩崎ら⁷⁾の報告をもとに下向き研削とし、ポーラスな組織の砥石と高圧ジェットの研削液供給方式を採用した。比研削エネルギーは、砥石駆動用DCサーボモータの実消費動力の測定から求めた。表1のドレッシング切込み量を一定とし、砥石目つまりなどの前加工時の影響が無くなるまで繰り返しドレッシングしたあと研削実験した。また、砥石周速を変化させる研削実験において、砥石のアンバランスが砥石摩耗量に及ぼす影響を低減させるため、ドレッシング時と研削時の砥石回転数を同一にし、砥石回転数に対応する振動振幅を0.2 μ m P-P以下に調整した。砥石摩耗量は、快削黄銅(厚さ5 mm $\times$ 長さ50 mm)を厚さ方向に研削し、砥石形状を転写させて砥石半径減を測定した。

図2に、砥粒切れ刃分布の測定回路の構成を示す。コンデンサモータの出力軸に取り付けられたウレタン

Fig. 2 Measuring method of grain profile

ゴム製のローラを砥石に押し付け、砥石を0.5 mm/sで回転させた状態で触針式面粗さ計センサにより砥石円周方向の砥粒形状を測定した。このアナログ信号を処理回路に入力し、砥石半径方向に相当するしきい値の電圧を設定し、オペアンプからの出力信号OUT 1を積算し砥粒個数とする。このOUT 1の信号と2 kHzのクロックをANDゲートに入力し、出力信号OUT 2を積算しベアリング長さとした。この処理回路により得られた砥石半径方向の砥粒切れ刃の個数分布、ベアリング長さの分布を基に、(ベアリング長さ)/(砥粒個数)から砥粒1個当たりの平均ベアリング長さを算出し、平均砥粒切れ刃形状を求める検討をした。この測定分解能は砥粒高さ方向には0.1 μ m、砥粒の幅方向には0.25 μ mである。

3. 実験結果と考察

3.1 砥粒材質、ドレッシング条件の選定

アルミナ系砥粒である23 A 砥粒(単結晶アルミナ: 32 A とセミフライアブル: 57 A の混合砥粒)を用い、表1に示す研削条件で、Ni基耐熱合金(Inconel 738)と炭素鋼(S 20 C)をクリープフィード研削したときの研削面粗さ、砥石摩耗量の推移を図3に示す。この図から、研削面粗さはS 20 C と Inconel 738 に顕著な差が認められないが、砥石摩耗量はInconel 738の方が10~40倍と増加することが分かる。また、図3のドレッシング直後と工作物削除量45 mm³/mmにおける砥石表面の観察結果を図4に示す。この図から、砥粒切れ刃の先端に顕著な摩耗部が認められる。

このことから、Ni基耐熱合金のクリープフィード研削において、形状精度と密接に関連する砥石摩耗量を低減すること、すなわち研削比の向上が重要な技術

Table 1 Grinding condition

Grinding wheel	RA 46 F 12 V, Diameter 350 mm, Width 50 mm
Workpiece	Ni alloy (Inconel 738, Ni : 70 wt%) Carbon steel (S 20 C) 60 mm(L) $\times$ 5 mm(W)
Grinding wheel speed	$V = 18$ m/s
Work speed	$v = 1.7$ mm/s
Wheel depth of cut	$t = 0.4$ mm
Dressing condition	Dressing feed rate 0.5 mm/rev Dressing depth 20 μ m Spark-out : non
Grinding fluid	Emulsion type (Cimperial 20) Coolant fluid : 0.3 MPa, 200 l/min Cleaning fluid : 0.8 MPa, 100 l/min

Fig. 3 Grindability of thermal resistant alloy and carbon steel

Fig. 5 Comparison of grain materials (B : burn mark)

Fig. 4 Photographs of cutting edge

Table 2 Characteristic of grains

	Knoop hardness	Friability
AZ grain ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$)	1 400	9
23 A grain (57 A + 32 A)	2 050-2 250	40-50
RA grain ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$)	2 250	65

課題と言える。

そこでここでは、砥粒材質とドレッシング条件が砥石摩耗量に及ぼす影響を実験的に検討した。初めに、砥粒材質として、松尾ら⁸⁾の斜板式単粒チップング試験の報告から、砥粒の硬度、破碎性に着目し、表2に示すAZ, 23A, RA砥粒を選定した。これらの砥粒材質、粒度46、結合度F、組織12の砥石を用いてクリープフィード研削した結果を図5に示す。この図からAZ, 23A砥粒に比べRA砥粒の方が砥石摩耗量、比研削エネルギーともに小さいと言える。このことから、Inconel 738のクリープフィード研削用の砥石として、耐摩耗性が高く、自生発刃しやすい砥粒が望ましいと考えられるため、硬度と破碎性に優れたRA砥粒を選定した。

次に、RA 46 F 12 V 砥石を用い、単石ダイヤモンドドレッサの送り量 $0.025 \sim 2.5 \text{ mm}/\text{rev}$ と変え、クリープフィード研削したときの研削面粗さ、工作物真

Fig. 6 Effect of dressing condition on machined accuracy (B : burn mark)

直度、砥石摩耗量を図6に示す。この図から次のことが言える。

- (1) ドレッサ送り量 f を小さくすると、研削面粗さは良好となり、 $f \leq 0.5 \text{ mm}/\text{rev}$ では $5 \mu\text{m} R_z$ とほぼ一定となる。
- (2) 工作物真直度は、 $f = 0.05 \sim 0.5 \text{ mm}/\text{rev}$ の範囲で約 $5 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$ である。
- (3) 砥石摩耗量は、 $f \leq 0.5 \text{ mm}/\text{rev}$ で $10 \sim 15 \mu\text{m}$ とほぼ一定となる。

以上のことから、ドレッシング条件は工作物の加工精度に大きく影響すると言える。クリープフィード研削では、ドレッシングを密にしすぎると工作物表面に研削焼けが発生するため、ここでは熱的損傷を小さくする目的で、ドレッサ送り量 $0.5 \text{ mm}/\text{rev}$ を採用し

Fig. 7 Effect of grinding condition on machined accuracy (B: burn mark)

た。

3.2 研削条件の研削比への影響

前述の検討結果に基づき、RA 46 F 12 V 砥石を用いて、ドレッサ送り量を 0.5 mm/rev 一定とし、砥石周速、工作物速度、砥石切込み量を変えたときの研削比に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果を図 7 に示す。なお研削実験に際し、下向き研削方式を採用し、砥石単位幅あたりの研削能率を $0.7 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$ 、総砥石切込み量を 1 mm 一定とした。図 7 より次のことが言える。

- (1) クリープフィード研削領域の工作物速度 $0.7 \sim 3.3 \text{ mm/s}$ と、通常研削領域の 67 mm/s における研削比はほぼ同じである。

- (2) 砥石周速を 33 m/s から 3 m/s と減少させると、研削比は約 2 から 27 に向上する。また砥石周速 33 m/s におけるクリープフィード研削領域では、工作物表面に研削焼けが認められた。

以上のことから、Ni 基耐熱合金の研削において、研削条件のうち特に砥石周速は研削比と強い相関があると言える。

そこで、クリープフィード研削領域における砥石周速と研削面粗さ、研削比、比研削エネルギーの相関を図 8 に示す。この図から、砥石周速の減少に伴って研削面粗さ、研削比は向上し、比研削エネルギーは減少すること、砥石周速 3 m/s 以下で研削比と比研削エネルギーはほぼ一定となることが分かる。

図 7, 8 から、クリープフィード研削領域において、砥石周速 3 m/s 以下で通常の砥石周速に対し、研削比は約 10 倍に向上し、比研削エネルギーは約 $1/4$ に低減すると言える。

3.3 砥石周速と砥粒切れ刃の摩耗形態

図 8 の低砥石周速における研削比の向上の原因を、砥石作業面の砥粒切れ刃の摩耗形態から検討した。図 2 の砥粒切れ刃分布の測定回路を用いて、ドレッシング直後と砥石周速 3 m/s と 18 m/s で研削した後の砥粒個数、ベアリング長さを砥石円周方向に測定した。これらの測定結果を図 9~12 に示す。

次に、これらの図から砥石半径方向の平均ベアリング長さ（ベアリング長さ/砥粒個数）を求め、これを砥粒 1 個当たりの幅としたときの平均砥粒切れ刃形状を図 13 に示す。この図において、砥粒切れ刃形状は砥

Fig. 8 Effect of grinding wheel speed on machined accuracy

Fig. 9 Distribution of cutting edge (1)

Fig. 11 Abbott's bearing curve (1)

Fig. 10 Distribution of cutting edge (2)

Fig. 12 Abbott's bearing curve (2)

石円周方向に対称と仮定した。また、松井ら⁹⁾の報告を基に、砥粒切れ刃形状は砥石円周方向と軸方向に相似と仮定した。これらの図から、次のことが言える。

- (1) 砥石周速 18m/s で研削したとき、砥粒個数分布は砥石最外周から約 $10\mu\text{m}$ 以下の内部で砥粒個数が減少する。このときの平均砥粒切れ刃形状は、ドレッシング直後で頂角約 145° の円すい形であるが、研削後は砥粒切れ刃の先端部に約 $80\mu\text{m}$ の平坦部をもつ頂角約 140° の円すい台形状となる。
- (2) 砥石周速 3m/s における研削後の砥粒個数分布は、砥石最外周から約 $15\mu\text{m}$ までの外周部で変化するが、これより内部での砥粒個数はほぼ同じである。このときの平均砥粒切れ刃形状は、ドレッシング直後で頂角約 145° の円すい形であり、研削後は頂角が約 155° の円すい形となる。

以上のことから、通常の砥石周速で

Ni 基耐熱合金を研削したとき、砥石摩耗量が大きくなる原因は、研削初期に砥粒切れ刃の先端部が摩耗し、ラビング、ブラウニング領域が増加し、砥粒切れ刃に大きな負荷がかかり、その後に砥粒切れ刃が脱落すると言える。いわゆる目つぶれ形と目こぼれ形の砥

Fig. 13 Mean cutting edge profile

Fig. 14 Machining profile by form grinding wheel

石摩耗形態が進行する。これに対し、低砥石周速の研削では、平均砥粒切れ刃形状の先端に顕著な摩耗部が認められず、自生発刃を伴う良好な研削状態となるため、研削比が向上すると言える。

3.4 成形砥石による形状精度

成形砥石を用いる研削において、結合剤の砥粒保持力が弱くなる砥石エッジ部の摩耗量を低減させることも重要である。

そこでここでは、フォーミングドレッサ（先端ノーズ半径 0.125 mm、頂角 40°）により、RA 46 F 12 V 砥石に 0.45 mm の段差を形成し、この成形砥石を用いて通常研削とクリープフィード研削したときの砥石エッジ部の摩耗量を比較した。その結果を図 14 に示す。研削条件は、研削能率を $0.7 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$ 、総切込み量を 1 mm と一定にした。ドレッシング直後及び研削後の砥石エッジ部の形状は、砥石形状を快削黄銅に転写させ、触針式形状測定器にて測定した。図 14 から、以下のことが分かる。

- (1) 砥粒保持力が比較的強い砥石コーナ部（半径 0.125 mm）の摩耗は、通常研削とクリープフィード研削ともほとんど認められない。
- (2) 砥粒保持力が弱い砥石エッジ部は、ドレッシング直後の半径 0.02 mm からクリープフィード研削後で半径 0.25 mm、通常研削後で半径が約 0.9 mm と大きくなる。

以上のことから、図 7 に示した研削結果と同様に、砥粒保持力が比較的強く保たれる形状の成形砥石では、通常研削とクリープフィード研削の砥石摩耗に顕著な差は認められないが、砥粒保持力が弱い砥石エ

ッジ部を有する成形砥石では、クリープフィード研削の方が通常研削に対し約 1/4 に砥石摩耗を低減できると言える。

4. 結 論

通常の砥石周速で Ni 基耐熱合金（Inconel 738）をクリープフィード研削すると、著しい研削焼けが発生し、過大の研削動力を要し研削継続が不可能となる。このときの砥石摩耗量は炭素鋼（S 20 C）の数十倍にも達し、研削比が 2 程度と極めて悪い。

そこで本報告では、アルミナ系砥石を用いて Inconel 738 をクリープフィード研削し、加工条件の研削比への影響を実験的に検討した。その結果、本実験範囲では、以下のことを明らかにした。

- (1) 研削条件のうち、特に砥石周速と研削比に強い相関が認められ、砥石周速を 33 m/s から 3 m/s に低くすると、研削比は約 10 倍に向上する。
- (2) 砥石周速を低くすると研削比が向上する原因は、砥粒切れ刃形状の測定から、通常の砥石周速の研削では目つぶれ、目こぼれ形の砥石摩耗形態となるのに対し、低砥石周速の研削では自生発刃を伴う良好な砥石摩耗形態となるためである。
- (3) 低砥石周速の成形研削におけるエッジ部の砥石摩耗は、通常研削に対しクリープフィード研削の方が約 1/4 に低減できる。

参 考 文 献

- 1) G. R. Shafro et al.: Thermal Aspects of Creep Feed Grinding, 16th MTDR Conf., (1975) 31.
- 2) 井上英夫：研削液供給法，機械と工具，7 (1977) 83.
- 3) 石川忠幸，K. V. Kumar：超砥粒ホイールによる Ni 基耐熱合金の高効率研削，精密工学会誌，58，4 (1992) 597.
- 4) 田中秀雄，熊谷信男：難削材の研削——チタン合金，ステンレス鋼について，精密工学会誌，58，4 (1992) 601.
- 5) C. H. Wick：Low Speed Grinding of Carbidcs, Manufacturing Eng. and Management, (March 1974) 40.
- 6) 島宗 勉，餅田正秋，小野浩二：低砥石速度による研削法に関する研究（第 1 報）——クリープフィード研削における研削焼け発生条件，精密機械，49，12 (1983) 1626.
- 7) 塩崎 進，古川勇二，大石 進：クリープフィード研削における上向きおよび下向き研削機構の相違，精密機械，45，5 (1979) 599.
- 8) 松尾哲夫ほか：重研削用高じん性砥粒のチャッピング破壊特性について，精密機械，37，6 (1971) 403.
- 9) 松井正巳，庄司克雄：統計的手法による研削機構の考察（第 1 報）——砥粒切れ刃の切削長さについて，精密機械，36，2 (1970) 115.