クリープフィード研削用通液溝付き砥石の開発とその研削性能*

和井田 徹** 須藤徹也** 野口豊生** 井上英夫**

Development of Slotted & Perforated Wheels for Creep Feed Grinding and their Grinding Performance

Tohru WAIDA, Tetsuya SUTO, Hosei NOGUCHI and Hideo INOUE

The structure and the grinding performance of newly developed grinding wheels are discussed. The new type wheels have slots/segments and cooling holes in the wheel working surface suitable for creep feed grinding of difficult to machine materials such as nickel base alloys Udimet 520 and Inconel 713 C could be creep feed ground in one pass up to the downfeed of 10 mm at specific energy of only 150-200 J/mm³. The energy was also found to remain constant with increasing downfeed. Profiled wheels of the same structure were also developed. Their grinding performance can be estimated by the mean depth of cut along the wheel width.

Key words · creep feed grinding, nickel-base alloy, slotted & perforated grinding wheel, spouted coolant volume, specific energy, profile grinding

1. ま え が き

高能率かつ高精度な加工が実現できる研削加工は、機械、光学、電子など多くの産業分野で、精密部品の仕上加工に広く利用されている。また近年各種新素材の開発により、それら新材料の特性を損なわない高品位精密加工の手段としてもニーズが高まっている。なかでも、砥石切込みを大きく、テーブル速度を小さくして、ワンパスで工作物を仕上げてしまうクリープフィード研削法は、砥粒切れ刃への負荷が小さく、砥石の型くずれが少なく、高能率でありながら工作物表面の粗さが小さく、加工変質層も少ないという利点があり、特に難削材に複雑なプロフィールを創成する総形研削加工などに適用すると大きな効果が期待できる。しかし、砥石と工作物の接触弧が長く、研削抵抗が増大しやすく、研削熱が多量に発生し、研削焼けなど熱的損傷が発生しやすい。そのため、これまでにも、高気孔率、軟結合度砥石を用いる¹⁾、砥石外周部に溝を入れる^{2)~4)}、砥石をセグメント化する⁵⁾、などの対策が提案されている。

しかし、クリープフィード研削では、なによりも、

数十 mm にも及ぶ長さの接触弧をもつ砥石と工作物の干渉領域、すなわち研削ゾーンをいかに冷却するかが重要な課題であり、これがこの加工の成否を決めるともいえる。そこで、筆者らは、研削ゾーンに研削液を確実に注入することをねらって、ニッケル基耐熱合金のような難削材をクリープフィード研削加工する場合の新研削工具として、砥石外周部に溝をもち、さらに各溝に通じる通液機構ももった通液溝付き砥石を開発した。本報では、この新研削工具の構造と機能、および試作した通液溝付き CBN 電着砥石の研削性能を調べた結果について報告する。

2. 通液溝付き砥石の試作

2.1 新構造砥石の特徴

開発した通液溝付き砥石の構造と研削液供給方法を図 1 に示す。金属製の台金の外周面に多数の溝が設けられている。砥石側面には研削液溜まりを設け、これから各溝に対して通液穴がつけられている。研削液を砥石側面に設けられた研削液溜まりに注ぐと、砥石の回転による遠心力によって、研削液は各通液穴から溝内に噴出される。こうして、砥石と工作物の接触弧が長くても、砥石内部から注液することにより、充分な冷却、潤滑効果をもたせることができる。しかも研削盤を改造する必要はない。

この新研削工具の設計上のねらいと特徴は次のよう

* 原稿受付 平成 2 年 11 月 27 日 昭和 61 年度精密工学会秋季大会学術講演会 (昭和 61 年 10 月 10 日) および 1989 年度精密工学会春季大会学術講演会 (平成元年 3 月 23 日) にて発表

** 正 会 員 機械技術研究所 (つくば市並木 1-2)

Fig. 1 Structure of newly developed wheel and coolant penetration

Fig. 2 Plastic models of grinding wheel with perforated holes

にまとめられる。

- (1) 適切に溝率を選ぶことによって、切れ刃数を調整し、工作物との不必要な摩擦による研削抵抗を減少できる。
- (2) 溝と通液穴により、冷却・潤滑効果を高めるので、研削液が高品質なほどその効果が期待できる。
- (3) 前二者の複合作用により、切れ刃の早期摩耗、砥石目づまりを防ぎ、砥石の切れ味の向上、長寿命化が期待できる。
- (4) 砥石切込み量が大きいとき（接触弧が長いとき）、難削材研削時に、従来砥石と比べ、特に優れた効果が期待できる。
- (5) 砥石側面より研削液の供給が可能のため、既存の研削盤を改造する必要がない。
- (6) 砥石台金製作費（初期コスト）が高くなる。

2.2 通液穴の大きさと噴出量

砥石設計の指針を得るために、図2の写真に示すように、硬質塩化ビニルで、通液構造をもつ模擬砥石を作り、通液穴の大きさと噴出液量、および噴出速度の関係を調べた。通液穴数は45個で、穴径がそれぞれ1, 2, 3 mmの3種類である。

Fig. 3 Set-up for measurement of coolant volume spouted from the holes

Fig. 4 Effect of diameter of a perforated hole on volume and velocity of spouted coolant

図3に実験方法を示す。研削液を回転する模擬砥石側面の研削液溜まりに注ぎ、通液穴を通じて噴出する研削液を容器に集めた。一定時間後、容器に噴出された液量を重量で測定し、通液穴1個当たりの噴出量、噴出速度を求めた。研削液供給量は11.7 l/min、給液用ノズルの先端内径は7.5 mmである。供給位置、供給角度は図に示す通りである。

図4に、通液穴の大きさと噴出液量、および噴出速度の関係を示す。砥石回転数が500~1500 rpmまでは通液穴径が大きいほど、また回転数が上がるほど通液穴1個からの単位時間噴出量は増すが、さらに回転数が増すと噴出量は必ずしも増さず、また通液穴の大きさも大きな効果をもたなくなる。

噴出速度は通液穴径が小さい方が高くなる。この結果、常用の3000 rpmにおいては噴出速度が高く、噴出量もほとんど低下しない直径1 mm程度の通液穴径が望ましいことがわかった。

Fig. 5 Newly developed wheel and structure of cutting surface

2.3 砥石の試作

図5に、試作した通液溝付き砥石の写真(a)と切れ刃部分の構造を示す。図5(b)は、溝をつけた台金に、CBNやダイヤモンド砥粒を電着した構造で、図5(c)は、ビトリファイドボンドで作られたCBNやダイヤモンド砥石のセグメントを台金に接着固定して切れ刃部とした場合である。構造的には同じであるが、後者は繰返しドレッシングが可能である。

研削盤への取付方法は、従来の砥石同様に、フランジを介して砥石軸に固定する。ビトリファイドボンドの砥石セグメントを固着する方式の砥石は研削盤上でドレッシングにより砥石の真円成形が可能である。しかし、電着砥石の場合は、研削盤上でのセンタリングが困難である。そこで、今回の一連の実験では、真円度測定機上で、まず砥石アーバのセンタリング、及びレベリングを行った後、フランジにボルトで緩く仮締めされた通液溝付き構造の電着砥石をそのアーバに取り付け、砥石台金に設けてある芯出し用の基準円筒面の振れを見ながらセンタリングを行い、その振れが $10\mu\text{m}$ 以内に収まるように調整して、フランジに固定した。

2.4 通液テスト

図6に、実際に使用した給液ノズルの配置と砥石作業面から砥石回転方向に噴出する研削液の様子を示す。この場合、噴出液が目視できるように、砥石回転数を下げている。研削時には、砥石が工作物と接触する研削ゾーンで最も液が噴出するように、ノズルの給液位置を調整することが重要である。

Fig. 6 Coolant distribution of a segmented and perforated wheel

(a) with a conventional method

(b) with the new cooling method

Fig. 7 Comparison of grinding power recorded with conventional (top) and perforated (bottom) cooling methods

図7は、試作した通液溝付き砥石について、平面研削（ダウンカット）を行い、研削液の供給方法の違いによる効果を研削動力の記録波形によってみたものである。

砥石はCBN 140 P、直径205 mm、厚さ10 mm、溝角度 0° 、溝本数120本、溝率30%である。ここで、溝角度は砥石軸に対する溝の角度を、溝率は砥石円周方向における作業面長さに対する溝の長さの割合を表す。工作物は高速度工具鋼（SKH 51）で、幅12 mm、長さ60 mmである。砥石切込み量は2 mm、テーブル速度は30 mm/min、研削液はソリュブル

Table 1 Composition of workpiece materials

Alloy %	Ni	Al	Ti	Mo	Nb+Ta	Cr	W	Fe	Co	HRC
Udimet 520	55.07	2.27	3.14	5.97		18.86	1.09	0.73	12.68	35
Inconel 713 C	72.42	8.17	0.78	4.70	2.53	13.07				37
SKH 51				4.73		3.98	5.77	81.51	0.86	65

タイプ 5% 希釈液である。

図 7 (a) は砥石の回転に沿って、工作物の前方から、砥石と工作物の接触面に向けて供給する従来方式（前方ノズル給液）の場合、図 7 (b) は砥石内部から供給する開発した通液方式の場合である。動力値には、給液方法による差が、ほとんど認められない。研削中の砥石面挙動を意味する波形の変動に着目すると、通液方式は、従来方式と比べ、より安定した波形を示し、良好な研削が行われていることがわかる。このことは通液方式による給液法のみでも十分な冷却能力をもっていることがうかがえ、この方式は研削液の供給量、供給圧力の低減にも効果があるものと考えられる。

3. ニッケル基耐熱合金のクリープフィード研削

試作した通液溝付き構造の CBN 電着砥石で、難削材として知られているニッケル基耐熱合金（インコネル、ウジメット）をクリープフィード研削加工し、新構造砥石の研削性能を調べた。比較のために高速度工具鋼も研削した。また、同じ通液構造をもった凸形と凹形の総形砥石を試作し、その研削性能を調べた。

3.1 実験手続き

砥石は CBN 140 P、直径 205 mm、厚さ 8 mm、周速 30 m/s、溝角度 45°、溝本数 120 本、溝率 53% である。通液穴の大きさは、直径 1 mm 程度のものが噴出速度が高く、可能であれば一つの溝に複数の通液穴があるのが望ましいが、本実験では、台金加工上の制約から、各溝の中央部に直径 2 mm の穴 1 個をあける方式にした。工作物は、Udimet 520、Inconel 713 C、SKH 51 の 3 種類で、幅 11~12 mm、長さ 60 mm である。工作物の化学成分および硬さを表 1 に示す。研削幅は 8 mm、研削方式はダウンカット、研削液はソリュブルタイプ 5% 希釈液である。研削液供給法は、通液と前方ノズルとの併用方式である。研削盤は横軸角テーブル往復型、主軸モータが 3.7 kW のものを使用した。

実験に使用した砥石は電着砥石であるため、加工条件の変更ごとにドレッシングをして、初期の砥石面性状を同一にするということができないため、砥粒切れ刃の摩耗等砥石面状態が変化する過程においても、材

料別の被削性、高切込みの可能性、砥粒切れ刃摩耗の影響などについてのより多くのデータを得るために、図 8 (a) に示す順番で、3 種類の工作物計 13 個を、切込み量とテーブル速度の組合せを変えて研削し、切れ刃の摩耗を考慮して、研削結果を考察した。

3.2 実験結果

図 8 (b) に研削動力の測定結果を示す。ニッケル基耐熱合金を 8~10 mm という深い切込みで、ワンパスカットできた。研削進行に伴う砥粒切れ刃の摩耗のため、同じ工作物の同一切込み条件でも、研削後期では、研削動力は増加している。Udimet 520 は Inconel 713 C に比べて研削動力は大きい。

Fig. 8 Grinding power and surface roughness of nickel-base alloys

Fig. 9 Section of nickel-base alloy (60 mm in length) ground in one-pass with wheel depth of cut of 10 mm (left: Udimet 520, right: Inconel 713 C)

図8(c)はこの研削過程における仕上面粗さの変化を示すものである。研削初期の $12\mu\text{mR}_z$ から後期は $7\mu\text{mR}_z$ 程度まで減少しているが、工作物材質、切込み量の大小の影響をほとんど受けていない。

図9に、切込み10 mmでワンパスカットした工作物の断面を示す。研削面には焼けは認められなかった。この研削面の残留応力をX線回折法により測定したところ、 $800\sim 1000\text{ MPa}$ の圧縮応力が存在していることが認められた⁶⁾。この砥石による研削は発熱が少なく、クールカットが実現されていることを示していると思われる。

次に、クリープフィード研削が適用されることの多い総形加工にこの新構造用砥石が利用できるかどうかを調べるために、図10に示すような形状の凸型および凹型の通液溝付き総形砥石を試作した。溝角度 0° 、溝本数120本、溝率は37%である。通液穴は各溝の砥石幅方向中央部に設けた。高切込みクリープフィード研削加工を行った結果、通液溝付き構造の総形砥石も、平形同様に、高い研削性能を示すことが確かめられた。図11に、試作した総形砥石と、それによりワンパスカットしたニッケル基耐熱合金のプロファイルを示す。このような総形砥石の場合、砥粒切れ刃にかかる負荷は、砥石プロファイル上の場所によって異なるが、砥石全体にかかる研削抵抗や研削動力を推定する場合などには、図12に示すように、切込み断面積を研削幅で除した平均切込み量をもって実質切込み量とすれば、平形砥石と同じ扱いができることがわかった。

図13は砥石切込み量に対する研削動力の関係を示すものである。総形砥石の結果は、上に述べたように、平均切込み量により示してある。テーブル速度が一定(12 mm/min)のため、砥石切込み量が大きくなると共に研削動力も大きくなっている。総形砥石に

Fig. 10 Slotted & perforated wheel for profile grinding

Fig. 11 Section of nickel-base alloy (60 mm in length) ground by the profiled slotted & perforated wheel

Fig. 12 Mean depth of cut in profile grinding

よる場合も、平形砥石による場合も、ほとんど同一の関係でまとめられる。また、Udimet 520はInconel 713 Cよりも所要研削動力が大きく、より難削材であることがわかる。これらニッケル基耐熱合金に比べると、高速度工具鋼は非常に低い所要研削動力で削れることがわかる。

図14は砥石切込み量と比研削エネルギーの関係を

Fig. 13 Effect of wheel depth of cut on grinding power

Fig. 14 Effect of wheel depth of cut on specific energy

求めたものである。新構造砥石を使用すれば、難削材として知られている Udimet 520 でも 150 J/mm^3 程度、Inconel 713C は 100 J/mm^3 程度の比研削エネルギーで削ることがわかる。また、両者とも砥石切込み量が増しても比研削エネルギーは増大せず、むしろ減少する傾向にあることがわかる。これは、砥石と工作物間接触弧長さが数十 mm にも及ぶ高切込み条件下で、特に、この新研削工具の利点が発揮されるとい

うことを意味している。切込み量 5 mm の SKH 51 はニッケル基耐熱合金と比べて約 25% の比研削エネルギーで削れることも示されている。

4. ま と め

- (1) 難削材のクリープフィード研削用砥石として、溝と共に通液機構をもつ新構造の研削工具を開発した。この新構造砥石は既存の研削盤に何ら手を加えずに利用できる。
- (2) 本砥石の切れ刃部分は、CBN ダイヤモンド砥粒を電着するか、ビトリファイドボンドの超砥粒セグメントを固着して構成する。
- (3) 総形形状の同構造砥石も開発した。総形砥石の実質切込み量として、砥石切込み断面の平均切込み深さをあてれば、研削動力の推定等において、平形砥石と同じように取り扱うことができる。
- (4) 新構造砥石によれば、ニッケル基耐熱合金の 10 mm ワンパスカット加工ができる。このときの比研削エネルギーは $100 \sim 150 \text{ J/mm}^3$ にすぎず、しかも切込みが増しても比研削エネルギーは増大しない。

参 考 文 献

- 1) 松井正己, 庄司克雄, 厨川常元: 極軟砥石によるクリープフィード研削——クリープフィード研削に関する研究 (第 3 報), 精密機械, 51, 9 (1985) 1738.
- 2) 中山一雄, 高木純一郎, 宮崎耕一: ねじみぞをつけた研削砥石 (第 2 報)——クリープフィード研削への応用, 昭和 53 年度精機学会秋季大会学術講演会前刷, (1978) 97.
- 3) 和井田 徹, 須藤徹也, 野口豊生, 井上英夫: 砥石面のみぞパターンが研削性能に及ぼす影響——新研削工具の開発 (第 3 報), 昭和 61 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1986) 7.
- 4) J. Stanislaw & E. G. Turker: Tooled Grinding Wheels - A Concept for Higher Productivity, Mfg. Eng. & Management, June (1975) 38.
- 5) 松井正己, 庄司克雄, 厨川常元: セグメント砥石の研削性能について——クリープフィード研削に関する研究 (第 4 報), 精密工学会誌, 52, 11 (1986) 1863.
- 6) 野口豊生, 和井田 徹, 須藤徹也: ニッケル基耐熱合金の研削表面の残留応力について, ABTEC '89, Paper No. G 109.