磁気研磨法を利用したスピンドルフィニッシュ 方式研磨装置の開発とその研磨性能*

進 村 武 男** 波 田 野 栄 十*** 高 沢 孝 哉†

Development of Spindle-finish Type Finishing Apparatus and Its Finishing
Performance using a Magnetic Abrasive Machining Process

Takeo SHINMURA, Eiju HATANO and Koya TAKAZAWA

This paper describes a new spindle-finish type finishing apparatus and the finishing performance it provides when using magnetic abrasives of 0.15 mm in diameter in a magnetic field. The features of this machining process are: the finishing process is carried out with the application of magnetic force instead of the centrifugal force of finishing media in the conventional barrel-finishing process; the finishing force of the magnetic abrasives is controlled by exciting current of a magnetic coil; and surface finishing, deburring, and precision rounding-off of the workpiece are done simultaneously.

Key words: magnetic-abrasive machining, magnetic abrasives, deburring, rounding off, stock removal, surface roughness, edge finishing, magnetic field, spindle-finish type

1. 結 言

従来、小形複雑形状部品の表面研磨やエッジのバリ取りおよび丸味付けは、バレル加工ができない部品に対しては、ほとんど手作業にたよっている。この手加工工程を機械化、自動化するニーズが最近とくに著しい。

さて、バレル研磨法についてみると、この加工法では約3 mm 径より大きなメディアを用いているため、小形部品の細部まで研磨できないという難点があり、また、メディア径を0.1 mm 程度の細粒にしても、このために、逆に十分な研磨力が得られなく、さらに、図1(a)に示すようにメディア群に研磨軌跡が生じて、このままの状態では研磨不能になってしまうという問題点がある。

本報では、磁場の作用を利用して研磨力を助長させる新しい表面研磨法を創案し、小形複雑形状部品の細部の研磨とエッジのバリ取りおよび丸味付けを可能とする新しい研磨装置を提供することを目的として研究を開始した。筆者らは、磁性研磨材を用いた磁場利用の表面研磨法(磁気研磨法)の研究開発を進めており、

円筒や平面仕上、エッジ仕上などへ応用してきた^{1)~4)}。ここでは、この磁気研磨法の加工原理を展開して、粒径が0.1 mm 程度の磁性研磨材を用いた磁場利用の新しいスピンドルフィニッシュ方式磁気研磨装置を開発試作することに成功し、二・三の研磨性能を明らかにできたので報告する。

2. 磁気研磨装置の構成と磁性研磨材に作用する磁力

2.1 磁界の与え方

ここでとりあげた研磨装置の原理図を図1(b)に示す。これは図1(a)に示す従来のバレル研磨装置を基礎にして創案したものである。すなわち、バレルに対して与える磁界の方向には図示の H_1 , H_2 , H_3 の3方向が考えられる。このうち、 H_1 は上下に磁極を必要とするため、工作物のローディング、アンローディングが困難となり、また、将来、機械の自動化のために不都合を生じる。また、 H_2 の磁界方向は、研磨材に作用する遠心力の方向と磁界の方向とが等しくなり、磁性研磨材は遠心力によって外壁側に偏る傾向を生ずる。この磁界方向では工作物底面の研磨は困難となる。

以上の理由から、ここでは H_3 方向の磁界を与える磁極配置として装置を試作することにした。

2.2 磁性研磨材に作用する磁力

図1(b)の加工域における1個の磁性研磨材粒子に

* 原稿受付 昭和61年1月27日、昭和59年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和59年10月1日)にて発表

** 正 会 員 宇都宮大学工学部(宇都宮市石井町 2753)

*** 正 会 員 東洋研磨材工業(株)(東京都港区三田 1-2-22)

† 正 会 員 幾徳工業大学(厚木市下萩野 1030)

Fig. 1 Schematic diagram of finishing apparatuses of spindle-finish type

Fig. 2 Magnetic field distribution in working zone, and forces acting on magnetic abrasive particles

は、遠心力 f_c 、重力 f_g 、磁気力 F の3者が作用する。いま、研磨材粒子を球形と仮定すれば、 f_c と f_g はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} f_c &= \frac{V\rho v^2}{R} \\ f_g &= V\rho g \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

で表される。ここに、 V ：粒子の体積、 ρ ：密度、 v ：周速度、 R ：回転半径、 g ：重力加速度。一方、加工域の磁界分布は、実際に試作した後述の研磨装置（図3～図6参照）について、その加工域の電界分布によるシミュレーション実験²⁾の結果から、図2のように求められる。図2の加工域中④点における磁性研磨材粒子に作用する磁力 F_x , F_y (x ：磁力線の方向、 y ：等磁位線の方向)は、

$$\left. \begin{aligned} F_x &= V\chi_r\mu_0 H \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \\ F_y &= V\chi_r\mu_0 H \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

で表される。ここに、 χ_r ：粒子の磁化率、 μ_0 ：真空の透磁率、 H ：④点の磁界の強さ、 $\partial H/\partial x$, $\partial H/\partial y$ ： x および y 方向の磁界の変化率。また、粒子相互の磁気吸引力 F_m は加工域の磁力線の方向に作用し、次式で表される。

$$F_m = \frac{3\pi r^2 \mu_0 \chi_r^2 H^2}{2(3 + \chi_r)^2} \quad (3)$$

ここに、 r ：粒子の半径。

磁性研磨材がすべて鉄 (Fe) より構成されていると仮定して、0.1 mm 径の鉄球について f_c , f_g , F_x , F_y , F_m の値を比較してみると次のようになる。例えば、図2の例から、 $R=125$ mm また $\chi_r=2000$, $\rho=7.8$ g/cm³, $v=180$ m/min, $H=1.6 \times 10^5$ A/m, $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A·m, $(\partial H/\partial x) \approx (\partial H/\partial y) = 2.0 \times 10^5$ A/m² とおくと、 $f_g/f_c=0.14$, $F_x/f_c \approx F_y/f_c \approx 140$, $F_m/f_c \approx 1290$, $F_m/F_x \approx 9$ が得られる。

従って、本報が述べる磁気研磨装置においては、粒子に働く遠心力 f_c 、重力 f_g に比べて、磁力 F_x , F_y , F_m が極めて大きく作用することがわかる。この F_x , F_y は磁性研磨材粒子の加工域への集中力を、 F_m は粒子群が互いに磁気吸引して磁気研磨ブラシを形成する力を与える。これらの磁力は前述の式が示すように、磁性研磨材の磁化率および磁界分布とその強度に左右される。このことは、磁性研磨材の研磨力をコイルへの励磁電流を変化することにより制御可能なことを意味する。

3. 装置の試作と実験方法

図3に装置組立断面図を示す。また、図4に磁極とコイルの主要部を示す。図4(a)が示すように、直径20 mm、長さ100 mmのSS 41材の棒状磁極①をアルミニウムリング②にセグメント状に18個配置し、これを回転させる構造とした。鉄心③は $\phi 100 \times 150$ mmよりなり、これに線径1 mmのネオマル線を5000巻きした。コイル④による起磁力は磁極⑤、鉄心③、ヨーク⑥、磁極①、加工域⑦を经る閉磁気回路を形成する。コイルへの励磁電流を変えて加工域の磁束密度を変化させた。⑧は工作物(外径30 mm、厚さ10 mm)であり、モータにより一定の回転速度で回転させた。磁気回路の計算には、図2に示すように加工域の磁極間距離が大きく、図2の各微小部分のパーミアンスを集積して求める磁束分布法(Field Mapping Method)を用いて行った。図5に加工装置とし

Fig. 3 Section through experimental apparatus

(a) Cylindrical magnetic poles ① and rotating aluminum pole holder ②

(b) Electric exciting coil ④

Fig. 4 External views of parts of experimental apparatus

Fig. 5 External view of experimental apparatus

て組立てた装置外観を示す。加工域部分の詳細を図6に示す。図6の右図の写真から、磁場によって形成された磁気研磨ブラシの状況が理解できる。工作物は回転移動するこの磁気研磨ブラシによって研磨される。なお、実験条件を図7に示す。

4. 実験結果および考察

図7に、焼入れ鋼工作物(SK 3, HRC 63)を図示の条件で研磨し、コイルへの励磁電流をパラメータとして研磨量、表面粗さと研磨時間の関係を求めた結果を示す。本研磨装置によって、WA 46 K 7 V 砥石で仕上げた研磨前の表面粗さ $0.55 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ が励磁電流2.2 A、研磨時間8 minで図示の写真が示すようにほぼ鏡面に仕上げられ、 $0.15 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ の表面粗さになしうることがわかった。研磨量は研磨時間に対してほぼ直線的に増大し、励磁電流が大きい程多い傾向を示す。表面粗さはこれに対応して向上する傾向を示す。なお、工作物の底面と側面のみが研磨されており、表面粗さ

に関しては底面の測定値を示した。なお、図示していないが、工作物側面の表面粗さと研磨時間の関係は、図7とほぼ同じ値を示した。

励磁電流2.2 Aのときの工作物の断面形状を表面形状測定機(小坂研究所製, SE-3型)で拡大測定すると図8が得られた。図示のように研磨時間とともに工作物エッジ部の形状変化が大きくなる。本装置では、工作物外周部近傍に作用する磁気研磨ブラシの研磨力が大きいとい

Fig. 6 Details of experimental apparatus

Fig. 7 Relationships between stock removal, surface roughness and finishing time

Experimental conditions

Workpiece; hardened steel (SK 3) $\phi 30 \times 10$ mm, Workpiece height; $H=3$ mm, Workpiece revolution; 28 mm, Circumferential speed of rotating pole; 180 m/min, Magnetic abrasives; (Al_2O_3 , 40 μm diameter) + Fe, 500 g supplied, Machining fluid; straight oil type grinding fluid (5 wt%)

える。この事象は次のように説明される。

一般に、磁界中におかれた磁性工作物材料のエッジ部付近には磁束が集中し、磁束密度が他の箇所比べて高くなる³⁾⁵⁾。磁気研磨ブラシが工作物表面を押し付ける力(研磨圧力)は磁束密度に関係して決まり、磁束密度の増大とともに大きくなる²⁾。さらに、磁気研磨ブラシが力を受けて変形するときの変形のしにくさ(剛性)は、磁束密度の増大とともに大きくなり、強いブ

Fig. 8 Edge profiles of workpiece after finishing

ラシとして工作物の加工に関与する⁶⁾。このように、エッジ部付近の磁気研磨ブラシの研磨力は他所に比べて大きくなる。そして、磁性工作物材料の表面近傍(特に、エッジ部付近)の磁束密度は、加工域の磁界を形成する N-S 磁極の配置と、工作物の形状寸法およびその配置に大きな影響を受ける⁵⁾。従って、所定の研磨特性と研磨精度を得るには、工作物の形状寸法に対応した適切な磁極の形状寸法およびその配置を選定することが必要になるといえる。この選定は、実機を用いて種々の磁極に対して磁界分布を測定することによって可能である。また、例えば、板状の永久磁石を用いて二次元磁界分布²⁾を形成させ、種々の磁石配置に対する磁界分布を検討するモデルテストによってもある程度選定できる。

このようにして、すでに筆者らの 1 人は実機を開発している。なお、その研磨結果によれば、磁極配置の

Fig. 9 Relationship between stock removal and workpiece height H

Conditions

For hardened steel; finishing time 6 min, Brass; finishing time 8 min, with no fluid. For other conditions; see Fig. 5

選定に際しては磁界分布のみを考慮するだけでは不十分な点があり、最終的には、使用する磁性研磨材の種類や回転する磁極の周速度、および励磁電流や加工時間などの研磨条件も含めた実際の研磨結果と関連づけて決めてゆかなければならない。

ところで、工作物の底面を平面研削すると、エッジ部に高さ $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 、厚さ約 $10 \mu\text{m}$ 程度の微小な研削バリが発生する³⁾。図8からわかるように、本研磨装置によって、数十 s で全周の研削バリのバリ取りとエッジの丸味付けが可能であることがわかる。前述したように、磁気研磨ブラシの形成状態は磁界分布とその強度（磁束密度）に関係して決まり、加工に関与する。従って、適切な磁界分布が得られる磁極および工作物の配置を選定し、さらに、加工時間や励磁電流などの研磨条件を適値に選べば、所定の精密丸味付けができるものと考えられる。図示していないが、外径 30 mm 程度の複雑形状のモータ用ステータについて、平面研削後のエッジのバリ取りと丸味付けに成功している。なお、非磁性材の黄銅工作物の場合には、研磨量、丸味付け量は異なるが、ほぼ同様な傾向を示した。

図9に、磁極と工作物底面との距離（高さ H ）が研磨量に及ぼす影響を示す。黄銅の非磁性工作物の場合（○印、●印：実線）には、高さ H に適値（約 5 mm）のあることがわかる。この加工機構は、次のように考えられる。すなわち、加工域の磁界分布と磁界強度が非磁性工作物の挿入によって乱されることはない。とくに H が小さくなるとセグメント状に配置された磁極近傍の磁性研磨材のみが研磨作用する傾向をもつため、底面だけの加工が進行し、研磨量が減少したものと考えられる。

一方、焼入れ鋼の磁性工作物（●印：破線）では、工作物位置によって磁界分布とその強度が大きく変化

Fig. 10 Relationships between stock removal, surface roughness and finishing time

Condition

Workpiece; brass, Height; $H = 5 \text{ mm}$, Exciting current; $I = 2.2 \text{ A}$. For other conditions; see Fig. 5

し、高さ H が小さいほど加工部位の磁界の強さは強く、研磨量も増大するためと考えられる。例えば、磁性研磨材を充てんしないで、工作物底面付近の磁束密度 B_w と工作物高さ H の関係を実測すると、 $H = 2 \text{ mm}$ のとき $B_w = 0.65 \text{ T}$ 、 $H = 5 \text{ mm}$ のとき $B_w = 0.4 \text{ T}$ 、 $H = 7 \text{ mm}$ のとき $B_w = 0.3 \text{ T}$ が得られた（但し、励磁電流は 2.2 A ）。この結果から、工作物高さ H が小さくなるほど磁束密度 B_w が増大することがわかる。この磁束密度の増大は工作物表面に作用する磁気研磨ブラシの研磨圧力を増大させる²⁾。多少ばらついてはいるが実験値はほぼこの傾向を示している。

図10に、不水溶性研削液の添加重量%をパラメータとして、黄銅工作物の場合の研磨時間と研磨量、表面粗さの関係を示す。加工液の添加%が研磨量に大きく影響する。表面粗さは研磨量が増加する大きさに対応して向上するが、その差は小さく、最終粗さはある値に近づく。しかし、実用上、加工液の添加量が多くなる（例えば、6 wt% 程度以上になる）と、磁性研磨材が泥状化するとともに研磨圧の反作用を受けて固形化し、工作物表面に切削痕を生ずる。さらに、工作物や加工域のクリーニング作業が極めて困難になる。従って、実用に際しては、磁性研磨材粒子群が泥状化したり、あるいは研磨のための力を受けて固形化したりしない状態で、しかも研磨量の増大効果が得られる最適の加工液添加量を選定することが必要であるといえる。

Fig. 11 Relationship between stock removal and finishing time

図 11 に、各種工作物材質の研磨時間と研磨量の関係を示す。セラミックス (Al₂O₃) はその硬さのためにほとんど研磨されず、表面粗さも向上しないが、他の工作物材質では容易に前加工表面粗さが除去できることがわかった。セラミックスに対しては特別なダイヤモンド磁性研磨材を用いるべきであろう。

5. 結 言

本報の結果を要約すると次のようになる。

- (1) 図 1 (b) に示す新しいスピンドルフィニッシュ方式の磁気研磨装置を試作し、本装置によって表面研磨とバリ取り、エッジの丸味付けができ

ることを明らかにした。

- (2) 研磨特性はコイルの励磁電流、工作物の位置、加工液の添加量に大きな影響を受ける。

- (3) 本報で用いた磁性研磨材と装置によってセラミックスの表面研磨はできないが、焼入れ鋼、ステンレス鋼、黄銅の加工は極めて容易であることを究明できた。

今後は、最適な磁極形状とその配置、実用上の問題点などについて究明していく予定である。

最後に、本研究に対し、ご討論いただいたブルガリア国中央機械工学研究所、砥粒加工研究部門の B. G. Makedonski 博士に深甚なる謝意を表する。

文 献

- 1) T. Shinmura, K. Takazawa, E. Hatano and T. Aizawa: Study on Magnetic-abrasive Process - Finishing Characteristics, Bull. JSPE, 18, 4, (1984) 347.
- 2) 進村武男, 高沢孝哉, 波田野栄十: 磁気研磨法の研究 (第 1 報)——加工原理と二、三の研磨特性, 精密工学会誌, 52, 5 (1986) 851.
- 3) T. Shinmura, K. Takazawa and E. Hatano: Study on Magnetic-abrasive Process - Application to Edge Finishing, Bull. JSPE, 19, 3, (1985) 218.
- 4) 進村武男, 波田野栄十, 高沢孝哉: 平面磁気研磨装置の開発とその研磨性能, 精密工学会誌, 52, 6 (1986) 1080.
- 5) 進村武男, 波田野栄十, 高沢孝哉: 磁気研磨法の研究 (第 5 報)——磁極形状の影響と研磨機構の考察, 昭和 58 年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1983) 89.
- 6) 進村武男, 高沢孝哉, 波田野栄十, 会沢利夫: 磁気研磨法の研究——磁性研磨材の挙動に関する二、三の実験, 昭和 61 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1986) 291.

●——精密工学会刊行図書のご案内

会誌「精密機械」および欧文誌“Bull. JSPE”総目次

1. 構 成 「精密機械総目次」第 31 巻第 1 号～第 49 巻第 12 号 (昭和 40 年 1 月～昭和 58 年 12 月)
B 5 判, 本文 382 ページ
“Index to Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering” Vol. 1. No. 1-Vol. 17, No. 4 (Oct. 1963-Dec. 1983)
B 5 判, 本文 158 ページ
共に内容別・著者別分類からなっています。
2. 定 価 「精密機械総目次」 会員 2 000 円, 非会員 4 000 円
“Index to Bull. JSPE” 会員 1 000 円, 非会員 2 000 円
セット価格 会員 2 500 円, 非会員 5 000 円
(両方をセットとする場合)