電気泳動現象を利用した半球状極微粒 ダイヤモンドホイールの精密成形*

仙波卓弥^{*1}, 佐藤 眞^{*2}, 竹内恵三^{*3}

Precision Truing and Dressing for Spherical Diamond Wheels Using Electrophoretic Phenomenon

Takuya SENBA, Makoto SATO and Keizo TAKEUCHI

Precision truing and dressing techniques using an electrophoretic phenomenon was newly developed for spherical diamond wheels with fine grains. Truing was carried out by rolling loose abrasives within a contact surface between the wheel and anode, that was reversely preformed against the spherical shape. Also, soft dressing was carried out by bringing the wheel into contact with a gelled film on the anode. An electrophoretic phenomenon was employed to generate a gelled film on the anode by attracting loose abrasives and high-molecular-weight electrolyte in the polishing fluid. The truing test clearly indicated that both surface roughness and sphericity of under $1\mu\text{m}$ could be achieved within 5 minutes, in the case where surface roughness of under $5\mu\text{m}$ was preliminarily created by pretruing using a metal-bonded wheel. It was also established by the dressing test that the gelled film on the anode behaved like a soft polisher, so that a sufficient chip pocket, without any residual damage on the bond surface, could be derived.

Key Words: Truing, Dressing, Diamond Wheel, Resin-Bonded Wheel, Electrophoretic Phenomenon, Abrasive Grain

1. 緒 言

形状精度が必要とされる精密金型の仕上げ加工を行う場合には、研磨時に生成される加工の誤差を修正するための修正研磨が行われている⁽¹⁾。しかし定圧研磨で形状を創成することは難しく、研磨むらや縁だれは避けられない問題として残っている。

したがって精密金型の仕上げ加工には、定圧研磨よりはむしろ変位切込み方式の研削加工が適していると考えられる。この場合、金型の自由曲面を高精度な鏡面に仕上げるためには、球状あるいは半球状に成形された極微粒の研削工具を用いる必要がある。

極微粒の研削工具を高精度に成形する方法として、メタルボンドホイールに関しては陽極酸化を利用する方法⁽²⁾や放電現象を利用する方法⁽³⁾が有効であると考えられる。レジンボンドホイールについてもGC砥石⁽⁴⁾や磁気を援用した手法⁽⁵⁾がすでに提案されてい

るが、研削工具の形状が球状あるいは半球状に限定された場合には、新たな成形の手法を開発する余地が残されているのではないかと判断された。

本研究では電気泳動現象⁽⁶⁾を極微粒のレジンボンドホイールのドレッシングに応用することを試みた。成形しようとする半球状のホイールに対して総形に成形した電極の表面に遊離砥粒を含むゲル状の皮膜を吸着させ、皮膜にホイールを接触させることによってホイールのドレッシングを行うことを試みた。

2. 加工原理

2.1 理論的背景 水溶性高分子電解質を用いて遊離砥粒を分散させた研磨液に電場をかけると、電極の表面には、電気泳動現象によって遊離砥粒を含むゲル状の皮膜が生成される⁽⁷⁾⁽⁸⁾。そこで、成形しようとする半球状のホイールに対して総形に成形した陽極の表面にゲル状の皮膜を吸着させ、皮膜にホイールを接触させることによってホイールのドレッシングを行うことを試みた。ホイールと電極との相対位置は図1に示すとおりである。

2.2 研磨液 pHが7のイオン交換水に、アニオン形の水溶性高分子電解質であるカルボキシメチルセルロース(CMC)⁽⁹⁾と、アルミナ砥粒を混入した溶液

* 原稿受付 1997年6月9日。

^{*1} 正員、福岡工業大学 (☎ 811-0295 福岡市東区和白東3-30-1)。

^{*2} (株)牧野フライス製作所 (☎ 243-0308 神奈川県愛甲郡愛川町三増359-3)。

^{*3} ノリタケダイヤ(株) (☎ 819-1215 福岡県浮羽郡田主丸町大字竹野210)。

Fig. 1 Geometrical relationship between wheel and anode electrode

を研磨液として使用した。メッシュサイズが# 2000 程度のアルミナ砥粒を研磨液に分散させ、しかも電極の表面にゲル状の皮膜を吸着させるために、重合度が2 600, エーテル化度が1.4 のCMCを使用した。なお、研磨液の粘度は45~50 cP に調節することにした。

2・3 総形電極 研磨液に電場をかけると、陽極にはCMC やCMC のコロイド皮膜で覆われたアルミナ砥粒だけでなく、酸素イオンも同時に引き寄せられるために、陽極酸化を防止する必要が考えられた。そこで陽極にはステンレス鋼 SUS 304 を使用した。また陽極に対して1 mm のすきまが空くように成形したグラファイト製の陰極を陽極と相対する位置に配置し、両者の間に電場をかけることにした。

図1 に示したホイールと陽極とを同じ向きに同じ角速度 ω で回転させると、両者が接触する経線上にある任意の点での相対速度 V は、

$$V = (R + r) \cdot \omega \quad \dots\dots\dots (1)$$

と幾何計算され、経線上で変化しないことが確かめられた。ここで、 R はホイール、 r は陽極に関する X 軸方向の半径を表している。そこでプレストンの経験則⁽¹⁰⁾ を参考にして、ホイールと陽極とは同じ向きに同じ回転数で回転させることにした。

3. 実験装置と実験方法

3・1 実験装置

実験に使用した装置の概要を図

Table 1 Truing and dressing conditions

Truing	Truer: SD325Q100MW6(125D × 32T × 16H)
	Rev. speed of truer: 1500 rev/min
Dressing	Rev. speed of grinding wheel: 200 rev/min
	Feed rate: 5 ~ 200 mm/min
	Setting depth of cut: 2 μm
	Coolant: Soluble(1/50)
	Dresser: Anode electrode(SUS304)
Dressing	Rev. speed of dresser: 1000 rev/min
	Rev. speed of grinding wheel: 1000 rev/min
	Setting depth of cut: -15 ~ 15 μm
	Coolant: CMC fluid containing WA grains
	Viscosity of coolant: 45 ~ 50 cP
	WA grain density in coolant: 5 wt %
	Mesh size of WA grain particles: #2000 ~ #8000
	Applied current: 0 ~ 3 A

Fig. 2 Schematic view of experimental setup

2 に示す。陽極は電気絶縁体を介してACインダクションモータに接続されている。ホイールと陽極との接触位置や研磨力を測定するために、モータは工作機械のテーブル上に設置した切削工具動力計に取付けることにした。図1 に付記した Z 軸の方向に生じる押しつけ力を、研磨力と表現することにした。

なお、高粘度の研磨液をホイールと陽極との接触面に供給するために、研磨液の循環ポンプにはチュービングポンプを使用することにした。また電流や電圧の制御には、最大電圧が100 V、最大電流が5 A の直流安定化電源を使用した。

3・2 半球状ホイール ホイールには直径が20 mm の半球状レジンボンドホイール SD 3000 P 100 B を使用した。砥粒には粒径が4~6 μm の合成ダイヤモンド砥粒、結合剤にはメラミン樹脂を用いている。

3・3 実験方法 ホイールを立形マニシングセンタの主軸に装着し、芯振れを除去するためのツルーイングを行った後、ホイールに対するドレッシングを行った。実験条件は表1 に示すとおりである。

ツルーイングには、駆動式の横形ロータリドレッサに装着したメタルボンドホイール SD 325 Q 100 MW 6(125 D×32 T×15.8 H)を使用した。またドレ

ッシング時には、式(2)のように定義したホイールと陽極との接触量 ΔR を変化させることにした。

$$\Delta R = \pm (\Delta X^2 + \Delta Z^2)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ΔX や ΔZ はホイールと陽極とが接触した位置からの X 軸、 Z 軸方向への移動量である。ホイールと陽極とを接触させた場合に ΔR を負、両者を離れた場合に ΔR を正と表すことにした。なお、接触位置の検出にはボアスコープと切削工具動力計を使用した。

3・4 ホイールの表面うねりと真円度 ドレッシングの後に、直径が1mmのスタイラスを装着した触針式粗さ計でホイールの円周方向に生成された表面うねりを測定した。また厚さが1.5mmのカーボン板を研削し、カーボン板に転写されたホイールの形状を測定することによって、ホイールの真球度を真円度に置き換えて評価することにした。

この場合、ホイールの底部では自転速度が零に近づくために、カーボン板に削り残しが生じることが観察された。そこでホイールの底部が接触するカーボン板には、あらかじめ直径が6mmのボールエンドミルで凹部を成形することにした。なおカーボン板に転写されたホイールの形状測定には、直径が1mmのスタイラスを装着した真円度測定器を使用した。

4. 実験結果及び考察

4・1 前加工面 表1に示したツルーイング条件、ただし工具の送り速度を変化させた場合に測定されたホイールの表面うねりと、送り速度との関係を図3に示す。同図に付記したとおり、メタルボンドホイールの角部を用いてツルーイングを行った場合の結果である。なお、図3に併記した実線は工具が1往復するのに要した時間を表している。

図3に示されているように、ホイールの表面うねりは最高で3 μm W_{EM} 程度にまで平滑化されることが明

らかになった。ただしホイール表面の状態は図4に示すとおりであり、ホイールがドレッシングされたようすは観察されなかった。そこでツルーイング時には工具の送り速度を100 mm/min に設定し、ホイールの芯振れを高能率に除去することにした。

4・2 ホイールと陽極との接触量 ホイールの表面うねりに相当する15 μm だけホイールと陽極とを接触させた場合、離れた場合、ならびに両者の接触位置でドレッシングを行った場合に得られたホイールの表面うねりと加工時間との関係を図5に示す。研磨液に混入するアルミナ砥粒のメッシュサイズを#2000、砥粒濃度を5 wt%，ならびに印加電流を3 A に設定した場合の結果である。5分ごとにホイールの表面うねりを測定した関係で、ホイールと陽極との接触位置は毎回測定し直すことにした。またホイールの表面が平滑化された後も、ホイールと陽極とは常に15 μm だけ接触させることにした。

図5の結果によれば、ホイールと陽極とを15 μm 離すとホイールの表面はまったく平滑化されていないのに対し、両者を15 μm 接触させた場合には最初の5分

Fig. 4 Topograph of wheels after truing test

Fig. 3 Surface waviness vs feed rate

Fig. 5 Surface waviness vs machining time

間で $2\mu\text{m } W_{EM}$ 程度にまで平滑化されていることがわかる。ただしホイールの表面うねりを $2\mu\text{m } W_{EM}$ 以下には平滑化できないことが明らかになった。したがってホイールの表面が $2\mu\text{m } W_{EM}$ 程度に平滑化された後は、ホイールと陽極とを $15\mu\text{m}$ 接触させる必要はないのではないかと考えられた。

そこでホイールの表面うねりを測定した後に、最大うねりに相当する量だけホイールと陽極とを接触させることにした。この場合に得られたホイールの表面うねりと加工時間との関係を図6に○印で示す。図5に□印で示した結果とは異なり、接触量を逐次減少させた場合にはホイールの表面を $1\mu\text{m } W_{EM}$ 程度にまで平滑化できることが明らかになった。そこで以下の実験では、ホイールの最大うねりに相当する量だけホイールと陽極とを接触させることにした。

4.3 印加電流 研磨液に混入するアルミナ砥粒のメッシュサイズを #2000、砥粒濃度を 5 wt% に固定した上で、電極間に印加する電流値を変化させた場合に得られたホイールの表面うねりと加工時間との関係を図7に示す。印加電流が増すに従ってホイールの表面が平滑化される速度は早くなっている。これは印加電流が増すに従ってホイールと陽極とのすきまに侵入した砥粒の数が増加したためではないかと考えられ

る。

4.4 砥粒径 研磨液に混入するアルミナ砥粒の濃度を 5 wt%，印加電流を 3 A に保った上で、砥粒のメッシュサイズを変化させた場合に得られた、研磨力と研磨時間との関係を図8に示す。この場合に測定されたホイールの表面うねりと加工時間との関係は、図9に示すとおりであった。砥粒の粒径が減少するに従って研磨力は増加しているのに対し、ホイールの表面が平滑化される速度は減少している。これはアルミナ砥粒の粒径が小さくなるに従ってホイールと陽極とのすきまに侵入したアルミナ砥粒の数は増加したが、切りくずの除去能力が低下したためではないかと考えられる。

4.5 ホイールの真円度 図7や9の結果から、ホイール表面の凹凸はドレッシングを開始してから最初の5分間に、最低でも $5\mu\text{m}$ 程度は除去されることが明らかになった。したがってツルイーグ時にホイールの表面うねりを $5\mu\text{m } W_{EM}$ 以下に成形しておけば、5分間程度のドレッシングを行うことによって、ホイールの表面を $1\mu\text{m } W_{EM}$ 程度に平滑化できるのではないかと考えられた。そこで表面うねりが $5\mu\text{m } W_{EM}$ 以下にツルイーグされたホイールに対して、5

Fig. 6 Effect of clearance ΔR on dressing speed

Fig. 8 Finishing force vs machining time

Fig. 7 Effect of applied current on dressing speed

Fig. 9 Effect of WA grain size on dressing speed

Fig. 10 Clearance ΔR vs surface waviness and roundness

Fig. 11 Profile of wheels after dressing test

分間のドレッシングを行うことにした。

メッシュサイズが#2000のアルミナ砥粒を使用した場合に得られたホイールの表面うねり、真円度と接触量との関係を図10に示す。電極間に電流を1 A印加した場合の結果である。ホイールと陽極とを10 μm 以上離すとホイールの表面はほとんど平滑化されていないのに対し、両者を5 μm 以上接触させると1 μm W_{EM} 程度に平滑化されていることがわかる。ただしツルーイング後に1 μm 程度であった真円度は、2 μm 程度に劣化している。この場合に測定されたホイールの形状は図11(a)に示したとおりであり、ホイールと陽極との接触面で転動したアルミナ砥粒によって、ホイールの表面が荒らされたのではないかと考えられた。

そこで研磨液に混入するアルミナ砥粒の粒径を減少させることを試みた。この場合に得られたホイールの表面うねり、真円度と接触量との関係を図12に示す。アルミナ砥粒の粒径が減少するに従ってホイールの表面は平滑化され難くなっている。ただし図11(b)や図12に示したように、#8000のアルミナ砥粒を用い

Fig. 12 Effect of WA grain size on surface waviness and roundness of wheels

Fig. 13 Averaged finishing force vs clearance ΔR

た場合にも、ホイールと陽極とを15 μm 接触させれば、真円度ならびに表面うねりとも1 μm 程度にドレッシングできることが明らかになった。

4・6 ゲル状皮膜を用いたドレッシング 図12の実験過程下において測定された、平均研磨力と接触量との関係を図13に示す。図8のように測定された研磨力の平均値を平均研磨力と表現した。ホイールと陽極とを離れた場合にも研磨力が生じ、しかも研磨力はすきまを狭めるに従って増加していることがわかる。そこでホイールと陽極との間に5 μm のすきまをあけ、ホイールをアルミナ砥粒を含むゲル状の皮膜と接触させることによって、砥粒の目を出すためのドレッシングを行うことにした。なお、アルミナ砥粒のメッシュサイズは#8000、印加電流は1 Aに設定した。

図11(b)のように成形されたホイールに対し、10分間のドレッシングを行った場合に観察されたホイー

Fig. 14 Topograph of wheels after dressing test

Fig. 15 Non uniformity of topograph after dressing test

ル表面の状態を図 14 に示す。ツルーイング後のホイール表面と、ホイールと陽極とを接触させてドレッシングを行った場合に観察されたホイール表面の状態を図 14 に併記している。図 13 に付記したとおり、回転中心から 15° 傾けたホイールの底部を観察した結果である。図 14 の結果によれば、ホイールと陽極とを接触させてドレッシングを行った場合に比べ、ホイールをゲル状の皮膜に接触させた場合には砥粒がほとんど脱落していないことがわかる。また結合剤には機械的な損傷がほとんど残留していない。

図 14 と同様の観察を、回転中心からホイールを 45° ならびに 65° 傾けたホイールの側面に対して行った結果を図 15 に示す。同図に付記したホイールの底部とは異なり、ホイールの側面では砥粒の後方にボンドテールが発生している。このように、結合剤に機械的な損傷が残留しないという意味からは、ホイールの底部に関しては理想的なドレッシングを行うことができたのではないかと考えている。ただし現状ではホイールの表面を均一にドレッシングすることができないという問題点を抱えている。

5. 結 言

本研究では、電気泳動現象を半球状に成形された極微粒レジンボンドホイールのドレッシングに応用することを試みた。本研究で得られた結論は以下のように整理される。

(1) メタルボンドホイールを用いたツルーイング時にホイールの表面うねりを $15 \mu\text{m } W_{EM}$ 程度に成形しておけば、研磨液に #2000 のアルミナ砥粒を混入した場合には、ホイールと陽極とを接触させた状態で 5 分間程度の電気泳動ドレッシングを行うことによって、 $2 \mu\text{m } W_{EM}$ 程度にホイールの表面を平滑化することができる。

(2) #8000 のアルミナ砥粒を用いた場合にも、メタルボンドホイールを用いたツルーイング時にホイールの表面うねりを $5 \mu\text{m } W_{EM}$ 程度に成形しておけば、5 分間程度の電気泳動ドレッシングを行うことによって、真円度ならびに表面うねりとも $1 \mu\text{m}$ 程度にホイールを成形することができる。

(3) ホイールと陽極とを接触させてドレッシングを行った場合には、ホイールから砥粒が脱落するだけでなく、結合剤に機械的な損傷が残留する。これに対してホイールを陽極の表面に生成されるゲル状の皮膜に接触させた場合には、ホイールの底部に生じる砥粒の脱落や結合剤に残留する機械的な損傷を防止することができた。ただし、現状ではホイールの表面を均一にドレッシングすることができないという問題点を抱えている。

文 献

- (1) 竹本誠, 非球面の超精密鏡面ポリシング加工, 型技術, 10-12(1995), 40-41.
- (2) 大森整, ELID 研削加工技術, 機械と工具, 40-3(1996), 65-73.
- (3) 鈴木清・ほか 4 名, マシニングセンタによる硬脆材料の研削加工, 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), 687-688.
- (4) 厨川常元・ほか 4 名, 極微粒ダイヤモンドホイールのツルーイング・ドレッシングに関する研究, 1995 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1995), 467-468.
- (5) 鈴木清・ほか 4 名, 磁気研磨援用ドレッシングの研究第 1 報(MP-dressing 法の提案), ABTEC'96 講演論文集, (1995), 309-312.
- (6) 北原文雄・渡辺昌, 界面電気現象, (1972), 102-116, 共立出版.
- (7) 池上拓史・仙波卓弥, 導電性・弾性電極の試作と金型材料の電気泳動研磨, 機論, 61-583, C(1995), 481-487.
- (8) 池野順一・谷泰弘, 電気泳動現象を利用した極微粒砥石の開発とその応用, 機論, 57-535, C(1991), 367-372.
- (9) 三澤忠則, 水溶性高分子, (1995), 43-58, 化学工業社.
- (10) Preston, W. J., Glass Technology, 11(1927), 214-256.