金型表面修飾への超音波縦振動研削の応用*

仙波 卓 弥^{*1}, 比 嘉 啓 樹^{*2}, Brian J. STONE^{*3}

Surface Texturing Using Grinding with Ultrasonic Longitudinal Vibration

Takuya SEMBA^{*4}, Hiroki HIGA and Brian J. STONE^{**} Department of Intelligent Mechanical Engineering, Fukuoka Institute of Technology,
3-30-1 Wajirohigashi, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 811-0295 Japan

An attempt to develop a surface texturing technique that allows the production of a fine and uniform textured ground surface was carried out by grinding with ultrasonic longitudinal vibration. In addition, on-machine truing of a newly developed thick-electroplated tool was conducted in order to increase the tool life by diminishing the tool run-out. Profile grinding with the vibration was carried out on a work surface inclined at 45 degrees using a spherical electroplated tool. The feed was adjusted such that the feed rate per single grit was equal to that of the wavelength of the longitudinal vibration. The phase control of the longitudinal vibration was effected by adjusting the tool-path length to generate systematic microindentation patterns. It was verified by grinding tests that a fine and systematic indentation pattern similar to that of sand blasting and etching patterns could be derived by profile grinding. In addition, the tool life of the thick-electroplated tool was increased to be over 10 times longer than that of the conventional electroplated tool by diminishing the tool run-out.

Key Words: Metal Mold, Texturing, Grinding, Ultrasonic Vibration, Electroplated Tool

1. 結 論

金型の加工では、意匠上の要求だけでなく、離型性や潤滑性を増すためにシボ加工⁽¹⁾を行う場合がある。シボ加工は金型の表面を平滑に研磨した後に行うのが一般的であり、金型の製造に要するリードタイムを短縮化する上で、大きな障害になっている。

シボ加工の中でも、金型の表面を皮革や木目等の模様で加飾する皮シボ加工⁽²⁾には、フォトレジスト法が用いられている。これらの模様は自然の質感を付与することは容易でなく、近未来にフォトレジスト法に代わる皮シボ加工技術が開発されると思われる。

一方、金型の表面を砂目模様で加飾する梨地シボ加工⁽²⁾には、エッチング法やブラスト法が用いられている。微細な梨地面を創成するためには、事前に金型の表面を平滑に仕上げる必要がある。したがって、平滑化加工を含めて加工工程を集約化する必要に迫られて

いる。

この梨地面の特徴は凹凸が微細で粗さに方向性がないことであり、湿式ラッピングや放電加工時にも観察される。したがって、梨地シボ加工に限定すれば、従来のエッチング法やブラスト法に代わるシボ加工技術を開発することは、必ずしも不可能ではないように考えられた。

本論文では金型の形状創成に超音波縦振動研削を応用することにより、形状創成と同時に、粗さに方向性のない梨地面を創成することを試みた。また、厚地電着工具を新たに試作すると同時に、これを機上でツル—イングすることによって工具の偏摩耗を防止し、超音波縦振動研削時における工具寿命を増すことを試みた。

2. 研究の背景

図1のように、テーブルに対して45°傾斜した平面に対し、超音波縦振動研削を行った場合に得られた加工面の状態を図2に示す⁽³⁾。工具には直径が6 mm、メッシュサイズが#200の半球状ダイヤモンド電着工具SD 200 PA 5、工作物には合金工具鋼SKD 11を使用した。超音波縦振動の周波数は40 kHz、振幅は5 μm である。

* 原稿受付 2002年7月10日。

^{*1} 正員、福岡工業大学工学部(☎811-0295 福岡市東区和白東3-330-1)。^{*2} 福岡工業大学大学院電子機械工学専攻。^{*3} University of Western Australia (☎6009 35 Stirling Highway Nedlands Western Australia)。

E-mail: senba@fit.ac.jp

図2に示したように、金属材料に対して超音波振動研削を行うと、工作物の表面には砥粒の振動痕が残る。この事実は、既に約40年前に確認されている⁽⁴⁾。しかし、当時は平滑な加工面を得ることが優先され、振動痕を消すことに精力が費やされたように判断される。

40年前に比べて振動数が飛躍的に増加した現在もまた、平滑な加工面を高効率に得ることが指向されている。従来の研究と異なり、本研究では砥粒の振動痕を積極的に活用し、これを梨地面を創成する手段として用いることを試みた。

3. 加工面の創成機構

3.1 砥粒の運動軌跡 図1のように座標系を設定すると、工作物と接触する砥粒の運動軌跡は式(1)のように求められる。

$$\begin{aligned} x(t) &= R \cdot \cos(2\pi t/T_R - \phi) \\ y(t) &= V_f \cdot t + A_y \cdot \sin(2\pi t/T_f) \end{aligned}$$

Fig. 1 Method of grinding and tool path

Fig. 2 Indentation pattern generated by grinding with ultrasonic longitudinal vibration (Cross feed: 25 μm)

$$\begin{aligned} z(t) &= R - \Delta t + R \cdot \sin(2\pi t/T_R - \phi) \\ &\quad + A_z \cdot \cos(2\pi t/T_f) \end{aligned} \quad (1)$$

図3に示したとおり、 R は工作物と接触する位置での工具半径、 V_f は工具の送り速度、 $A_i (i=y, z)$ は超音波縦振動の振幅、 Δt は半径方向の切込み量、ならびに ϕ は砥粒間隔に相当する位相のずれである。また、 T_R は工具の回転周期、 T_f は超音波縦振動の周期であり、工具の回転数を s 、超音波縦振動の周波数を f とすれば、それぞれ

$$T_R = 1/s, \quad T_f = 1/f \quad (2)$$

と表される。

3.2 工具の送り速度 工作物と接触する位置での工具周速度 V_p は、

$$V_p = 2\pi R \cdot s \quad (3)$$

となる。また、超音波縦振動の周期 T_f は式(2)のように求められる。したがって、図3に示した超音波縦振動の波長 λ_f 、つまり図2に見られる振動痕の間隔は、

$$\lambda_f = T_f \cdot V_p = 2\pi R \cdot s / f \quad (4)$$

と表される。

次に、工具の送り速度を V_f 、工具の同一円周上にあって研削に参与する砥粒数を n_g と表すと、砥粒一個当たりの送り量 λ_g は、

$$\lambda_g = V_f / (n_g \cdot s) \quad (5)$$

となる。ボールエンドミルを用いたfp加工⁽⁵⁾と同様に、 $\lambda_f = \lambda_g$ となるように工具の送り速度を求めると、 V_f は、

$$V_f = 2\pi R \cdot n_g \cdot s^2 / f \quad (6)$$

と求められる。

3.3 助走距離とピックフィード 式(6)のように工具の送り速度を設定すると、工具中心が図4(a)に示した点aから点bに移動する間に、工作物には図

Fig. 3 Decomposition of practical longitudinal vibration along z direction into y and z directions ($n_g = 1$)

4(b)に斜線で示すような砥粒の振動痕が生成される。図4(b)に破線で示したように、点cから点dに移動する間に未加工部分を砥粒の振動痕で埋めるためには、図4(b)に示したように、点cでの振動位相を π ずらす必要がある。そこで、ピックフィード m_f を式(7)のように設定した。

$$m_f = (2n+1)\lambda_f/2, \quad n=1, 2, \dots \quad (7)$$

工具の助走距離 m_a については、点bでの振動位相が 2π になるように、これを設定することにした。つまり、式(8)を満たすように m_a を求めた。

$$m_a = (n\lambda_f - m_c)/2, \\ n > \text{int}(m_c/\lambda_f) + 1 \quad (8)$$

3・4 解析の結果 図2の条件、ただし工具の回転数を500 rpm、工具の送り速度を4 m/minに設定した場合に得られた解析の結果を図5に示す。工具の同一円周上にある砥粒の個数 n_θ を80個、砥粒の形状としては頂角が100度の四角すいを想定した。図2のように得られた実験の結果と同様に、砥粒の引っ掻き傷の上に砥粒の振動痕が重なった加工面が得られている。

Fig.4 Phase control using cross feed and approach length

Fig.5 Ground surface with scratches and indentations ($R=2.12$ mm, $s=500$ rpm, $f=40$ kHz, $V_f=4$ m/min, $n_\theta=80$, $m_a=4.4$ μ m, $m_c=100.0$ μ m, $m_f=5.8$ μ m)

図6に、工具の回転数を3 000 rpm、工具の送り速度を50 mm/minに設定した場合に得られた解析の結果を示している。工具の送り速度は式(6)を満たしている。また、式(7)を満たすように m_f 、式(8)を満たすように m_a を求めた。図2に示した実験の結果と同様に、砥粒の振動痕のみが加工面に残っている。

このように、式(6)を満たすように工具の送り速度、式(7)や式(8)を満たすようにピックフィード m_f や助走距離 m_a を設定した場合には、砥粒の振動痕で加工面を加飾できる可能性がある。

4. 超音波縦振動研削の梨地加工への応用

4・1 梨地面の粗さ 式(6)～(8)を満たすように加工条件を設定し、図2と同じ要領で超音波縦振動研削を行った。工具の同一円周上にある砥粒の内、研削に参与する砥粒数 n_θ は1個のみであると仮定し、工具の送り速度を50 mm/minに設定した。

Fig.6 Ground surface with indentations ($R=2.12$ mm, $s=3\,000$ rpm, $f=40$ kHz, $V_f=50$ mm/min, $n_\theta=1$, $m_a=25.0$ μ m, $m_c=100.0$ μ m, $m_f=25.0$ μ m)

Fig.7 Effect of ultrasonic longitudinal vibration on surface texture of ground surface ($R=2.12$ mm, $s=3\,000$ rpm, $f=40$ kHz, $V_f=50$ mm/min, $m_a=170.0$ μ m, $m_c=3$ mm, $m_f=25.0$ μ m)

半球状ダイヤモンド電着工具のメッシュサイズを変化させた場合に得られた。加工面の状態を図7に示す。超音波縦振動を付加しない、通常研削時に得られた加工面の状態を図7に併記している。加工条件は同じであるにもかかわらず、加工面の状態は両者で完全に異なっている。

図7のように創成された加工面の粗さと、ダイヤモンド砥粒の粒径との関係を図8に示している。工具送り方向の粗さを白印、ピックフィード方向の粗さを黒印で示した。梨地面の特徴は凹凸が微細で、粗さに方向性がないことであるが、超音波縦振動研削を行った場合には、ほぼ両方の特徴を満たす加工面が得られている。

4.2 従来の梨地面との比較 サンドブラスト法、エッチング法、ならびに超音波縦振動研削を行うことにより創成した梨地面を図9に示している。梨地シボ加工の目的は、金型表面のつや消しを行う点にある。したがって、加工面の粗さはよくても $4\mu\text{m Ry}$ 程度である⁽²⁾。

これに対して、メッシュサイズが#3000の電着工具を用いた場合には、粗さが $0.21\mu\text{m Ry}$ の梨地面が得られた。このように微細な凹凸は、つや消しよりはむしろ、離型剤や潤滑剤をためるためのポケットとして活用できる。

4.3 加工能率 単位時間に創成される梨地面の面積を加工能率 R と定義すると、

$$R(n_g) = V_f(n_g) \cdot m_f(n) \quad \dots\dots\dots (9)$$

と求められる。式(6)に示したように、 V_f は研削に関与する砥粒数 n_g に比例して上げることができる。ピックフィード m_f もまた、式(7)の法則に従って増すことができる。

そこで、式(7)を式(10)のように書き換え、 n_g を増

加させた場合について研削実験を行った。

$$m_f(n_g) = (2n_g + 1)\lambda_f/2, \quad n_g = 1, 2, \dots\dots\dots (10)$$

n_g を1から18個の範囲で変化させた場合に得られた、加工面の粗さと加工能率との関係を図10に示す。図11にメッシュサイズが#200と#1500のダイヤモンド電着工具を用いた場合に得られた加工面の状態を示している。

集中度が同じ場合、工具の同一円周上にある砥粒数は砥粒径が増すに従って減少する。また、工具の回転中心から砥粒先端までの距離のばらつきは、砥粒径が増すに従って増加する。このような理由から、メッシュサイズが#800以下の粗い砥粒を用いた場合には、加工能率を上げると粗さに方向性が生じる結果になった。

また、市販の電着工具を用いた場合には芯振れが原

Fig. 9 Comparison of textures derived by grinding with ultrasonic longitudinal vibration and conventional techniques

Fig. 8 Surface roughness and diamond grain size used for spherical shape electroplated tool

Fig. 10 Surface roughness and removal rate obtained by varying diamond grain size

因で工具が偏摩耗し、継続して加工できなかった。そこで、厚地電着工具を新たに試作すると同時に、これを機上でツルーイングすることによって工具の偏摩耗を防止し、工具寿命を増すことを試みた。

5. 厚地電着工具と研削性能

5・1 厚地電着工具 工具の試作に使用した装置の概要を図12に示す。砥粒を分散させためっき液は、外周を親水性フィルタで覆ったアクリル製の円筒②に入っている。アクリル製の円筒は、陰極として使用した直径が6 mmの工具台金③を中心として、回転する機構になっている。砥粒にはメッシュサイズが#600のダイヤモンド砥粒とcBN砥粒、めっき液には標準的な光沢ワット浴を使用した。

Fig. 11 Surface textures derived by varying diamond grain size and removal rate R

Fig. 12 Experimental setup used for fabricating thick electroplated diamond tool (①: plating solution, ②: cylindrical acrylic jig, ③: tool body, ④: filter, ⑤: anode (Ni), ⑥: abrasive grain, ⑦: stirring blade)

図12の装置を用いて試作した、厚地電着工具の外観を図13に示す。電着直後の状態を図13(a)、メタルボンドホイールSD325Q100MW6を使用し、工具先端を半球状にツルーイングした状態を図13(b)に示している。工具台金の表面には、厚さが約1 mmの皮膜が析出している。市販の電着工具と異なり、工具の芯振れを除去するためのツルーイングを機上で行うことができる。

図14に、厚地電着皮膜に共析した砥粒の密度と、陰極の回転数との関係を示している。陰極電流密度⁽⁶⁾を5 A/dm²、めっき液に50 wt%の砥粒を分散させてめっきを行った場合の結果である。研削に関与する砥粒数 n_g を増すために、砥粒密度が40 Vol%程度の厚地電着工具を試作し、これを研削実験に使用した。

5・2 厚地電着工具の耐摩耗性 市販のダイヤモンド電着工具SD600PA5、新たに試作した厚地ダイヤモンド電着工具SD600TPならびに厚地cBN電着工具CB600TPを用いて、超音波縦振動研削を行った。図15に工具半径方向の摩耗量 ω と研削距離との関係を示している。研削条件は図10と同じ、ただ

Fig. 13 Thick electroplated diamond tool before and after spherical shape truing

Fig. 14 Deposited grain density in thick electroplated coating and revolution speed of the anode

Fig. 15 Tool wear and grinding length obtained using conventional electroplated diamond, thick electroplated diamond and cBN tools

Fig. 16 Tool wear observed using conventional electroplated and thick electroplated tools

し加工能率を 23 mm²/min に設定した場合の結果である。

工具に関する損耗の状態を図 16 に示している。SD 600 PA 5 に関しては 20 m, SD 600 TP に関しては 250 m 研削した後に観察された損耗の状態を示している。市販の電着工具と異なり、厚地電着工具を用いた場合には、機上でツルーイングすることによって工具の偏摩耗を防止できた。その結果として、市販の電着工具を用いた場合に比べると、10 倍以上の距離を研削できた。

5・3 問題点 SD 600 TP ならびに CB 600 TP を用いた場合に得られた加工面の状態を図 17 に示す。電着工具を用いた場合に例えば図 11 のように得られた加工面と異なり、砥粒の振動痕が鮮明でない。これはツルーイングに用いたダイヤモンドホイールによって砥粒の先端が削られ、摩滅した砥粒で研削を行った

Fig. 17 Indentation pattern obtained by SD 600 TP and CB 600 TP observed after total grinding length of 200 m

ためである。したがって、鮮明な砥粒の振動痕を創成するためには、厚地電着工具に対するツルーイング技術を開発する必要があると残されている。

6. 結 論

金型の形状創成に超音波縦振動研削を用いることにより、形状創成と同時に梨地のシボ面を創成することを試みた。本論文で得られた研究の成果は、以下のようによまとめられる。

- 1) 超音波縦振動の波長と砥粒一個あたりの送り量とが等しくなるように工具の送り速度、先行刃の未加工部分が後続刃の振動痕で埋まるように助走長さやピックフィードを決めることにより、梨地のシボ面を創成できる。
- 2) メッシュサイズが # 1500 以上の微粒のダイヤモンド電着工具を用いた場合には、加工能率を 277.5 mm³/min 程度に増加させた場合にも、粗さが 1 μ m Ry 以下のシボ面を創成できる。
- 3) 厚地電着工具を用いた場合には、機上でツルーイングを行うことによって研削に関与する作用砥粒数を増すことができる。その結果として、芯振れのある市販の電着工具に比べると、10 倍以上の距離を研削できる。

文 献

- (1) 小池弘之, エッチングによる表面デザイン, 型技術, 1-4 (1986), 29-33.
- (2) 小池弘之・兵藤憲道, 成型用金型へのエッチング技術の応用, (1981), 1-25, (株) 棚沢八光社技術資料.
- (3) 仙波卓弥・比嘉啓樹, 金型表面修飾への超音波振動研削の応用, 型技術, 14-12 (1999), 82-83.
- (4) 田中義信・矢野章成, 超音波振動砥石による精密仕上げの研究(第 1 報), 精密機械, 29-3 (1963), 36-44.
- (5) 高崎昭・阿部忠之・神田敬一・松岡和彦・渡辺一樹, 高速彫り技術の開発 第 1 報—ボールエンドミルにおける切削メカニズムの解析—, トヨタ技法, 37-2 (1987), 75-87.
- (6) 川崎元雄・榎本英彦, めっき教本, (1997), 1-21, 日刊工業.