スローアウェイ型 CBN ホイールによる アモルファステープの研削に関する研究 (第1報)*

—研削特性について—

王 序進** 庄司克雄*** 厨川常元*** 田中憲司*** 茂木克己†

Studies on Grinding of Amorphous Tape with Throw-Away CBN Wheel (1st Report)
—Grinding Characteristic—

Xu-Jin WANG, Katsuo SYOJI, Tsunemoto KURIYAGAWA,
Kenji TANAKA and Katsumi MOGI

The grinding of amorphous tape is regarded as extremely difficult due to the loading of the wheel during the grinding process and due to the crystallization of the amorphous tape caused by grinding heat. By taking advantage of excellent grinding performance of endless CBN abrasive belts, a new grinding wheel system constructed of endless CBN abrasive belts (namely a throw-away CBN wheel) was developed. In order to improve the ground workpiece surface waviness and roughness, a Low-frequency Vibration Grinding Method (LFVGM) was creatively put forward. In this paper, both the theoretical analysis and experiment research of LFVGM on improving ground workpiece waviness were carried out. An experiment investigation on grinding performance with a throw-away CBN wheel in continuous-feed grinding of amorphous tape was also conducted. Experiments show that the ground amorphous tape roughness $R_{\max}$ value is below $0.8 \mu\text{m}$ by using #600 endless CBN abrasive belts.

Key words: amorphous tape, grinding wheel, abrasive belts, throw-away CBN wheel, belt grinding, low-frequency vibration grinding method, continuous-feed grinding

1. 緒 言

アモルファステープは磁性材料の新素材として、優れた特性を持ち、各種トランス、磁気ヘッド、センサなどへの応用が期待されている¹⁾²⁾。しかし、通常、アモルファステープは単一ロール急冷法で作られるため表面粗さが悪く、実用化には表面仕上げが必要である。ところがアモルファステープは、硬度が高い上に高じん性のため砥石が目つぶれと目づまりを起こしやすく、しかも研削熱による表面の再結晶化が問題となり、研削加工は困難である。これは、アモルファステープの用途の拡大に対して、大きな障害となっている。

CBN 研削ベルトは、通常の CBN ホイールに比べて、目づまりを起こし難く、しかも研削熱の発生が少ない。本研究は、CBN 研削ベルトのこのような特性に注目し、新しいベルト研削方式として、アイドラブリー方式によらないスローアウェイ型 CBN ホイールを開発し、アモルファステープの精密研削への応用を試みたものである。

2. スローアウェイ型 CBN ホイール

ベルト研削は、研磨材を塗布したベルト（研削ベルト）を用いる加工法で、通常、回転する硬質ゴム性のコンタクトホイールとアイドラブリーとの間に研削ベルトを掛け、砥石車と同様にして研削が行われる。研削ベルトは、研削砥石に比べて砥粒切れ刃間隔が極めて大きいので、切りくずポケットが大きく、能率のよい加工が可能である。しかも研削ベルトは工作物に対して弾性的に接触するため、工作物との接触面の曲率半径が極めて大きくなる。その結果、切れ刃間隔が大

* 原稿受付 平成4年1月13日

** 正 会 員 重慶大学工学部（中国四川省重慶市沙坪壩区沙坪正街174号）

*** 正 会 員 東北大学工学部（仙台市青葉区荒巻字青葉）

† 三菱マテリアル(株)商品開発センター（大宮市北袋町1-297）

きいにもかかわらず、個々の切れ刃の砥粒切込み深さは逆に小さくなり、研削熱の発生が少なく、いわゆるクールカットが可能である³⁾。

ベルト研削はこのような優れた研削特性を持ちながら、通常の砥石研削に比べて加工精度が劣るため、精密加工法としてほとんど普及していない。その原因としては、次のようなことが考えられる。

- (1) テンションブリーによって研削ベルトに張力を与える方式を取っているため、研削軸に上向きの力が作用し、回転精度を劣化させる。
- (2) テンションブリーとコンタクトホイールの間で研削ベルトが横振動を起こし、それがコンタクトホイールの振動を誘起する。
- (3) 研削ベルトの継目で剛性が変わるために、工作物とコンタクトホイールの接触形状が変化し、振動が発生する。
- (4) コンタクトホイールの弾性変形のために、形状加工精度が劣化する。

一方、アモルファステープの研削においては、砥石目づまりと研削熱による再結晶化が最も大きな問題である。この点では、ベルト研削が最適である。しかもベルト研削では、工作物の連続送りが可能である。これは、アモルファステープ研削の実用化のためには、欠くことのできない必須の条件である。したがって、アモルファステープにベルト研削を適用する際の最大の課題は、要求される加工精度をいかにして達成するかである。

このようなことから、ベルト研削法の加工精度の改善を検討することにした。まずベルト研削法の加工精度が悪い最大の原因は、上述のように、テンション方式とベルトの継目によって発生される主軸の振動にあると考えられる。そこで本研究では、継目のないCBN エンドレスベルトを採用し、テンションブリーを用いずに外径拡張式コンタクトホイールによって、ベルトを張り上げる新しいベルト研削方式を考案した。

試作した外径拡張式コンタクトホイールの構造を図1に示す。コンタクトホイールの外周はゴムリング6になっている。ナット1を調整することによって、スプリングコレット4を介してその外径を自由に調整できる。調整後は固定リング7で固定し、回転中に遠心力でスプリングコレットが弛緩するのを防止している。ゴムリングは着脱が自由で、要求に応じての適当な硬度のものに変えることができる。ゴムリングの外周は、あらかじめ研削盤上で通常のホイールのツールイングと同様に、カップツールを用いて修正した。

Fig. 1 Structure of throw-away CBN wheel

Fig. 2 Surface roughness in plunge grinding

Table 1 Grinding conditions

Amorphous tape	25 $\mu\text{m} \times 11 \text{ mm}$ (Fe 78%, Si 13%, B 9%)
Peripheral wheel speed	18 m/s
Tape feed speed	400 mm/min
Actual depth of cut	8 μm
Endless abrasive belts	CBN # 600 20 mm $\times$ 600 mm
Interval of intersection on surface of the belts	0.5 mm

このようにCBN エンドレスベルト5をCBN ホイールと同様に使用できるので、これをスローアウェイ型 CBN ホイールと呼ぶことにする。

3. プランジ研削

図2は、粒度#600のスローアウェイ型CBNホイールを用いてプランジ研削したアモルファステープの仕上面粗さ曲線の一例で、研削方向に直角に測定したものである。その研削条件を表1に示す。このように仕上面には一定周期のうねりが形成されるが、これは次の理由による。

本研究で使用了CBN エンドレスベルトは、張力

Fig. 3 SEM stereo photographs of the surface of endless CBN abrasive belts

Fig. 4 Model of grinding section curve and distributing of intersection on surface of the endless CBN abrasive belts

による伸びを少なくするために、平織りの基材を使用している。そのため、図3のSEMの立体写真に示すように、ベルトの表面には縦糸と横糸の交差点が、研削方向に整然と並んでいる。この研削ベルトはこのような表面構造を持っているため、研削液による冷却性が優れている反面、プランジ研削を行うとこの交差点が研削面に転写され、縦糸と同じピッチのうねりが形成される。

CBN 砥粒の粒径は交差点に比べて十分小さいので仕上面のうねりに対する影響は無視することができる。そこで交差点を半径 r の球と仮定し、図4(b)に

示したように、研削ベルトの表面を縦糸間隔を a 、横糸間隔 b とする交差点の行列と考えると、交差点によって作られるうねりの高さを求めることにする。

いま図4(a)のように、断面曲線を考える工作物断面が砥石軸の真下に来た時を基準にして、断面曲線上に残る任意の交差点 A_0 の円周距離を s とする。ここで s は、反時計方向を正とし、 $0 \leq s \leq b$ である。この交差点の先端が基準断面を切る高さ h_{A_0} は

$$h_{A_0} = \frac{1}{D} \left(\frac{v}{V} \right)^2 s^2 \quad (1)$$

である。ここで、 D はホイールの工作物との弾性接触面の近似直径³⁾、 V はホイールの周速度、 v はアモルファステープの送り速度である。

このとき交差点 A_0 と相隣る縦糸列で断面曲線上に残る交差点は B_0 になり、基準断面を切る高さ h_{B_0} は

$$h_{B_0} = \frac{1}{D} \left(\frac{v}{V} \right)^2 (s-b)^2 \quad (2)$$

で与えられる。したがって交差点 A_0 と交差点 B_0 の基準断面を切る高さの差は、

$$\Delta h = \frac{1}{D} \left(\frac{v}{V} \right)^2 (b^2 - 2bs) \quad (3)$$

になる。よって $s=0$ のとき、 Δh は最大値

$$\Delta h_m = \frac{1}{D} \left(\frac{v}{V} \right)^2 b^2 \quad (4)$$

をとる。このとき図5に示したように、両者の作るうねりの高さを R_p とすれば、 $r \gg R_p$ であることを考慮して、次式が得られる。

$$\sqrt{2rR_p} + \sqrt{2r(R_p - \Delta h_m)} = a \quad (5)$$

式(5)を R_p について解けば、

$$R_p = \frac{a^2}{8r} + \frac{\Delta h_m}{2} + \frac{\Delta h_m^2}{2a^2} r \quad (6)$$

になる。 R_p は、断面曲線に残るうねりの最大値である。

さらに式(6)から、交差点の半径は

Fig. 5 Surface waviness R_p in plunge grinding

Fig. 6 Surface waviness R_v in low-frequency vibration grinding

$$r = \frac{a^2}{\Delta h_m} (R_P + \sqrt{R_P^2 - R_P \Delta h_m}) - \frac{a^2}{2 \Delta h_m} \quad (7)$$

である。したがって実際の研削仕上面のうねり R_P とベルト表面の縦糸間隔 a 、横糸間隔 b の測定結果から、交差点半径 r を推算することができる。

4. 低周波振動研削

いま、砥石軸方向に平行の低周波振動

$$y = e \sin(2\pi n_e t) \quad (8)$$

を工作物に付与することによって、研削仕上面に対する交差点の影響を除去することを考える。ここで、 e は振幅、 n_e は振動数、 t は時間である。

図6に示したように、工作物に低周波振動を付与することによって、先行する交差点 A_0 の陰になっていた交差点 $A_1, A_2, \dots$ の切削痕が断面曲線上に残るようになる。このとき、A列の $i+1$ 番目の交差点 A_i と交差点 B_0 の作るうねりの高さ R_i は、 $s=0$ としたときの両者の断面曲線上の高さの差

$$\Delta h_i = \frac{1}{D} \left[\frac{v}{V} \right]^2 (2i-1)^2 b^2 \quad (9)$$

と、両者の y 方向の間隔

$$a_i = a + e \sin(2\pi n_e b / V) - e \sin(2\pi n_e \cdot 2bi / V) \quad (10)$$

を、それぞれ式(6)の Δh_m と a に代入して求められる。なお、通常の研削条件では式(10)の右辺の第2項は、 a に比べて微小であるから無視できる。したがって R_i は、次式で与えられる。

$$R_i = \frac{a_i^2}{8r} + \frac{\Delta h_i}{2} + \frac{\Delta h_i^2}{2a_i^2} r \quad (11)$$

さて図6から明らかなように、低周波振動の付与によってA列の交差点と交差点 B_0 が基準断面上に作るうねりの高さは、 R_i の最小値 R_v で与えられる。したがって、最小値 R_v をとる交差点の番号 i_v は、式(11)を i で微分しゼロと置くことによって求められ

Fig. 7 Calculation results of surface waviness R_v in low-frequency vibration grinding

る。式(11)を i で微分すると、

$$\frac{dR_i}{di} = \left[\frac{a_i}{4r} - \frac{\Delta h_i^2}{a_i^3} r \right] \frac{da_i}{di} + \left[\frac{1}{2} + \frac{\Delta h_i}{a_i^2} r \right] \frac{d\Delta h_i}{di} \quad (12)$$

である。ここで、

$$\frac{da_i}{di} = \frac{-4\pi n_e b}{V} \cos \left[\frac{4\pi n_e b}{V} i \right] \quad (13)$$

$$\frac{d\Delta h_i}{di} = \frac{4}{D} \left[\frac{v}{V} \right]^2 (2i-1) b^2 \quad (14)$$

である。通常の研削条件では、式(12)の右辺の第2項は第1項に比べて微小であり、無視できる。したがって式(12)は、次のようになる。

$$\frac{dR_i}{di} = \left[\frac{a_i}{4r} - \frac{\Delta h_i^2}{a_i^3} r \right] \frac{da_i}{di} \quad (15)$$

$dR_i/di=0$ とすれば、式(15)は

$$a_i = \sqrt{2r\Delta h_i} \quad (16)$$

になる。式(9)と(10)を式(15)に代入して解けば、 i_v は、

$$i_v = \frac{Va/b + v\sqrt{2r/D}}{2(2\pi n_e b + v\sqrt{2r/D})} \quad (17)$$

で与えられる。式(17)を式(9)、(10)の i に代入し、その結果をさらに(11)に代入することによって R_v が次式のとおりに求められる。

$$R_v = \frac{1}{D} \left[\frac{v}{V} \right]^2 b^2 \left[\frac{Va/b + v\sqrt{2r/D}}{2\pi n_e b + v\sqrt{2r/D}} - 1 \right]^2 \quad (18)$$

図7は、低周波振動研削におけるうねり R_v を上述の式に従って計算した結果である。ここで交差点の半径 $r=7.5$ mm は、図2のうねりの値 ($4.2 \mu m$) によって、さらにそのピッチ (0.5 mm) から $a=b=0.5$ mm として、式(7)を使って求めた値である。

また図8は、図2のプランジ研削と同じ研削条件(表1参照)で、 $n_e=5$ Hz、 $e=1$ mm の低周波振動を付与したときの仕上面粗さ曲線の記録である。低周波振動研削を付与することによって、ベルト基材の織

Fig. 8 Surface roughness in low-frequency vibration grinding

Fig. 9 Experimental apparatus for precision grinding of the amorphous tape

雑交点によるうねりが除去され、研削仕上面の粗さが改善されることが明らかである。

5. アモルファステープの連続研削装置

図9は、本研究で試作したアモルファステープの連続研削装置の概略を示す。実験時には、研削抵抗を測定するために、低周波振動テーブルとアモルファステープの間に弾性リング式の動力計を挿入した。

またゴム製のコンタクトホイールの弾性変形のために、アモルファステープの両側部には約 $4 \mu m$ のだれが生じた。そこでアモルファステープの下にコンタクトホイールと同じゴム製で厚さ $5 mm$ のガイドベースを敷いたところ、だれは約 $2 \mu m$ に改善された。

6. アモルファステープ低周波振動研削の特性

図10は低周波振動研削における振動数が仕上面粗さ R_{max} に及ぼす影響を調べた結果である。研削仕上面粗さは振動数 n_e の増加と共に減少し、図7に示し

Grinding conditions: $V=12m/s$, $v=400mm/min$, $\Delta=50 \mu m$
CBN#600, $a=b=0.2mm$

Fig. 10 Effect of vibration frequency n_e on surface roughness R_{max}

Grinding conditions: $V=12m/s$, $v=400mm/min$, $n_e=5Hz$
CBN#600, $a=b=0.2mm$

Fig. 11 Effect of setting depth of cut Δ on actual depth of cut Δ'

た理論計算と同じ傾向を示した。

図11は、設定切込み量 Δ と実切込み量 Δ' との関係を示す。ゴムコンタクトホイールとゴムガイドベースにはデュロメータ指数80のゴムを使用した。弾性変形のために実切込み量 Δ' は設定切込み量 Δ の約 $1/10$ になった。

図12は、仕上面粗さ R_{max} と研削抵抗 F_n , F_t に対するアモルファステープの送り速度 v の影響を調べた結果である。送り速度が増大すると、仕上面粗さ R_{max} と研削抵抗 F_n , F_t はやや大きくなった。

図13は、仕上面粗さ R_{max} と研削抵抗 F_n , F_t に対するホイール周速度 V の影響を調べた結果である。ホイールの周速度 V が増大するに従って、研削仕上面の粗さ R_{max} は減少するが、研削抵抗 F_n は増大した。研削抵抗の増加は、遠心力によるゴムコンタクトホイールの膨張のために実質切込み量が増大したからである。

7. 結 言

- (1) CBN ホイールに比べ目詰まりし難く研削熱の発生も少ない研削ベルトの特性を生かし、外形拡張式コンタクトホイールを用いたスローウェイ

Grinding conditions: $V=12m/s$, $\Delta=50\mu m$, $n_e=5Hz$
CBN#600, $a=b=0.2mm$

Fig. 12 Effect of tape feed speed v on surface roughness R_{max} and grinding forces F_n , F_t

イ型 CBN ホイールを考案した。それを用いて、アモルファステープの連続研削に成功した。

- (2) 平織りのエンドレスベルトを用いたため、研削面に縦糸間隔と同一ピッチのうねりが生じたが、アモルファステープに 5 Hz 程度の低周波振動を付与することによって完全に解消することができた。
- (3) #600 のスローアウェイ型 CBN ホイールを用い、最終的に $0.8\mu m$ R_{max} 以下の粗さを達成することができた。
- (4) テープの両側端に、ベルト研削に特有のだれが発生したが、テープの下にコンタクトホイールと同じゴム製のガイドベースを敷くことによって、だれは $2\mu m$ 程度に減少させることができた。

謝 辞

アモルファステープは宮城県工業技術センターから提供されたことを記して謝意を表す。

Grinding conditions: $v=400mm/min$, $\Delta=50\mu m$, $n_e=5Hz$
CBN#600, $a=b=0.2mm$

Fig. 13 Effect of peripheral wheel speed V on surface roughness R_{max} and grinding forces F_n , F_t

参 考 文 献

- 1) 増本 健：アモルファス合金——その物性と応用，アグネ，(1981)。
- 2) 竹浪嗣人：アモルファス金属の最近の応用動向，機械設計，33, 1 (1989) 89。
- 3) 松井正己，庄司克雄：コンタクトホイールの弾性変形の効果——ベルト研削に関する研究（第1報），精密機械，44, 2 (1978) 155。
- 4) 杉田忠彰ほか：アモルファス金属の加工表面のキャラクタリゼーション，昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1985) 751。
- 5) 小林正巳：アモルファス合金の加工，機械技術，34, 3 (1986) 38。
- 6) 馬来国弼：アモルファス薄膜，共立出版，(1988)。
- 7) 増本 健：アモルファス金属の加工特性，機械技術，35, 12 (1987) 20。
- 8) 猪 浩一郎：アモルファス合金リボンとセンサ応用，センサ技術，7, 1 (1987) 111。
- 9) 藤森啓安：非晶質軟磁性材料，金属学会会報，26, 7 (1987) 729。