808 湾曲異形断面形状の同期ダイレススピニング加工

A Synchronous Die-less Spinning of Curved Non-axisymmetric Products

○学 関口 明生 (筑波大) 正 荒井 裕彦 (産総研)

Akio SEKIGUCHI, University of Tsukuba, 1-1-1, Tenohdai, Tsukuba, Ibaraki

Hirohiko ARAI, AIST, 1-2-1, Namiki, Tsukuba, Ibaraki

Metal spinning is a plastic forming process that forms sheet or tube metal fixed to a rotating mandrel by forcing roller tools. Products formed by metal spinning have been inherently limited to straight-axis and circular-sectional shapes. In this study, we succeeded in making curved-axis and non-axisymmetric shells by synchronizing the roller motion in the axial and radial direction with the rotation of the spindle axis, and without using forming dies. A numerically-controlled spinning machine moves the spherical head tool along the trajectory which is calculated from the desired shape considering contact with the tool. Products are experimentally formed from aluminum sheet.

Key Words : Metal Spinning, Plastic Forming, Numerical Control, Tool Trajectory, Rapid Prototyping

1. 緒言

スピニング加工とは、板材や管状のブランク（素材）をマンドレル（成形型）ごと回転させ、ローラ状工具を押し付けて成形を行う塑性加工法である。プレス加工に比べると、製品形状が軸対称円形断面形状に限られ、1個当たりの加工に時間がかかることが欠点あるけれども、基本的に成形型は雄型1つのみでよいので、特注品や試作品の低コスト生産に優れて、現代社会の多品種少量生産の流れに適している。

近年のスピニング加工は特に、知能化技術や装置の改良によって、成形型を用いずに板材を成形する方法⁽¹⁾、異形断面形状の製品を成形する方法⁽²⁾、傾斜部を持つ管形状を成形する方法⁽³⁾などが考案され、実用化が期待されている。

筆者らは、これらの長所を併せ持つような同期ダイレススピニング加工法を開発し、円錐が湾曲した形状の成形結果から加工法の特性を考察した^{(4),(5)}。本稿では、この方法における、異形断面かつ湾曲した形状の成形結果を示す。また、フランジ部のねじれによって発生する形状不良を、抑制する方法を報告する。

Fig. 1 Notation of curved synchronous spinning

Fig. 2 Procedure of curved synchronous spinning

2. 湾曲異形断面形状の成形

2.1 加工方法

ここでは、円でない断面をもつ錐の軸が仮想的な円弧状の湾曲軸に沿って変形した形状を湾曲異形断面形状と呼び、図1に示す工具運動様式によってこれを成形する。すなわち、図2のように、主軸に取り付けられたブランクに対して加工ローラを押し付け、主軸の回転に同期して軸方向と半径方向に加工ローラを動かすことで、主軸とは別の仮想的な湾曲軸にそった形状をワークに与える。

また、加工時に素板の材料が絞られるように流動するなどして、成形中のワークのフランジ部分にしわなどが発生すると、加工力が不均一になるなど成形上好ましくない。設定形状に通りの製品を得るためには、フランジ部分の平面が成形終了時まで保たれる必要があるため、素板の縁を曲げることによってワークのフランジ部剛性を高めた。

先の研究の円錐が湾曲した形状の場合には、工具接触点の軌道が製品面上かつ湾曲軸に沿って円形の螺旋を描くように工具軌道を定めるNCコード生成プログラムを作成した。今回は、断面形状が湾曲軸の送り方向に変化する形状に対して工具軌道が定められるようにプログラムを変更した。NCコードの生成と同時に、推定加工所要時間も算出される。

2.2 加工装置

成形には、ワークを回転させる主軸とローラ移動のためのXYテーブル2組からなる、5軸NCスピニング加工機の片側の1ローラを用いた。各軸は1300Wのサーボモータで駆動される。工具の位置指令はNC制御盤により直線補間されるために、主軸1回転あたりのデータ点数が多いほど緻密な加工ができる。今回は120 [pts/rev]とした。ブランクは公称板厚が $t_0 = 1.5$ [mm]で直径が150 [mm]の純アルミニウム板(A1050P-H24)の端5 [mm]をあらかじめスピニング加工により縁曲げたものを用いた。マンドレルは、先端部が直径50 [mm]の直線円筒形状で、材質は炭素鋼(S45C、焼入れ)である。ブランクはマンドレルに金具を介してねじで固定される。工具は、先端丸み半径が $\rho_R = 8$ [mm]の球頭状ローラを取付角 $\delta = 45^\circ$ で用いた。材質は工具鋼(SKD11、焼入れ硬さHRC60)で、球面部はバフ研磨した。加工前には汎用潤滑剤CRC5-56を工具とブランクに噴霧した。送りピッチは異形断面形状の最急勾配方向に0.2 [mm]とし、加工中の製品に対する工具の相対送り速度は10000 [mm/min]一定とした。

Fig. 3 Sectional shapes and contact point mappings

Fig. 4 Curved non-axisymmetric products

2.3 成形実験

成形実験として、図3のように、断面形状が円形から正 n 角形 ($n = 4, 5, 6$) と楕円形 (扁平率 $f = 0.27$) に変化する形状を成形した。すべての形状で、初期円の直径は 50 [mm]、最終形状の外接円直径は 110 [mm]、最急勾配方向の半角は $\alpha = 20^\circ$ 、湾曲軸は曲げ角 $\phi = 20^\circ$ の円弧とした。

製品の外観を図4に示す。所要成形時間は $n = 4$ の場合で約 8 分、最も長い $n = 6$ の場合で約 12 分であった。表面には光沢が出て擦り傷などは見られなかったが、楕円形状の曲げ部内側など工具が十分に転がらず成形された部分は、曇ったような表面となった。多角形の角部は半径 4 [mm] 程度の丸みを持って成形された。 $n = 4$ の製品の曲げ部内側の肉厚を両球面マイクロメータで測定したところ、半角が $\alpha = 20^\circ$ の湾曲円錐形状と同様の肉厚分布をしている傾向が観察できた。

しかし、 $n = 4$ の製品の曲げ部外側の壁面には、図5(a)のように比較的大きなゆがみが発生した。今回の形状に限らず、加工開始時と終了時のフランジ部に基準線を野書いた結果、加工終了時のフランジ部は素板に対して、最大で 10° 程度ねじれ、形状によっては曲げ面と垂直な方向にも最大で 8 [mm] 程度偏心していた。フランジ部に発生するねじれや偏心には再現性がみられるが、製品の成形長さや送りピッチだけではなく、設定断面形状や軸形状によっても変化するために、定量的な予測が難しい。

2.4 ねじれの抑制

フランジ部のねじれや偏心が形状不良の原因になっているものと考え、このようなねじれを抑制する工具軌道について検討した。ねじれの発生は、スピニング加工が製品に対して1方向の螺旋を描くように成形を行うことに起因しているだろう。このため、図6のように、中継する断面を介して、工具の回転方向を一定回数ごとに切り替えることにした。図中の点線は、減速・加速をする区間である。工具は螺旋状に5回転半と中継面上を1回転するごとに、製品に対する工具の相

対速度を定常の 30 [%] まで直線的に低下させるものとした。

このような工具軌道をプログラムに設定して加工した製品を図5(b)に示す。この結果、製品表面には回転方向の変化によるフィードマークが避けられなかったが、フランジのねじれや偏心を抑制できるとともに、ねじれによる製品形状不良を解消できた。

3. 結言

同期ダイレススピニング加工を用いて、湾曲異形断面形状の成形実験に取り組んだ。また特に以下の知見が得られた。

(1) 汎用的なマンドレルと工具を用いて、断面形状が多角形や楕円に変化する湾曲異形断面形状などが、同期スピニング加工で成形できることが明らかになった。従来のスピニング加工では難しかったさまざまな形状が、成形型を用いず低コストに加工できる。

(2) 本加工法では、ワークを1方向だけに回転させて成形すると、ワークのフランジ部分にねじれや偏心が発生して、形状不良が発生する場合があった。数回転ごとに、回転方向を切り替えて成形すると、これらを抑制できる。

Fig. 5 Top views of a same product made different types of feeding (Polygon, $n = 4$)

Fig. 6 Sectionally relayed switching pass

文 献

- (1) Shima S., Inoue A., Kotera H., Flexible Spin-Forming (in Japanese), *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol. 42, No. 489, (2001), pp.32–37.
- (2) Arai H., Robotic Metal Spinning —Forming Non-axisymmetric Products Using Force Control—, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 24, No. 1, (2006), pp.140–145.
- (3) Shindo K., Ishigaki K., Kato K., Irie T., Development of New Tube Spinning Technology (Spinning Technology for Decentered or Inclined Shape, Report 1) (in Japanese), *The 51st Proceedings of the Japanese Joint Conference for the Technology of Plasticity*, (1999), pp.173–174.
- (4) Sekiguchi A., Arai H., Development of Synchronized Die-less Spinning for Curved Products, No. 09-4 *Proceedings of JSME Annual Conference on Robotics and Mechatronics*, (2009), 2A1-A19.
- (5) Sekiguchi A., Arai H., A Synchronous Die-less Spinning of Curved Cones (in Japanese), *The 40th Proceedings of the Japanese Conference for the Technology of Plasticity*, (2009), pp.303–304.