段差部を有する棒状工具を用いた アルミニウム薄板の回転バーリング成形

北澤 君義*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 49, No. 6 (1999), pp. 233-237

Rotary burring of aluminum sheets by using a cylindrical tool with shoulder

Kimiyooshi KITAZAWA*

In order to adapt to small-lot production of hole-flanged components, a process of rotary burring in which a blank is formed to fit on a tool-envelope surface made by relative motion of a tool around the blank, was proposed. Aluminum blanks were rotary-formed to hole-flanged components with various hole-diameters by means of the proposed burring operation, and the deformation behavior was examined experimentally. It is found that, by using a cylindrical tool with shoulder, the excess bending in the large clearance zone between the blank holder and the tool-envelope surface decreases with increasing of hole expanding ratio, so that the blank fits well with the tool-envelope surface. This result suggests that the proposed rotary burring method is suitable to adapt to small-lot production of the hole-flanged components. Furthermore, experimental results show that the values of the flange height agree well with those obtained by the uniform thickness model; the flange height is little affected by several conditions such as tool feed, work-hardening exponent and lubrication.

(Received August 13, 1998)

Keywords: sheet metal forming, rotary forming, burring, hole flanging, cylindrical tool

1. 緒 言

薄板のプレス加工では、金型形状を薄板に転写させることにより成形が行われる。この製品形状と同じ形状の金型を用いる方法は、大量生産化に対しては威力を発揮する。しかし一方では金型の省略化が難しいため、多品種少量生産化には対応しにくい。薄板のバーリング成形においても、バーリング円筒部の穴径と等しい直径を有するパンチ、これに対応した形状のダイおよびブランクホルダを用いて成形が行われる。もし Fig. 1 に示すようにバーリング円筒部径よりもかなり大きな内径を有するダイを用いてバーリング成形をしようとするれば、ダイとパンチ間で薄板に曲げの余剰変形が生じてしまう。このようにダイとパンチおよびブランクホルダからなる金型システムの省略化が困難であるため、バーリング成形の多品種少量生産化への対応は難しい。これまでにバーリングの高さ^{1)~3)}、ひずみ分布³⁾、成形限界向上法^{4)~6)}などについては多くの報告がなされているものの、金型システムの省略化についての報告は見当たらない。

ところで、円管端末二次成形において、工具包絡面へ円管端末を転写させることにより、金型の省略化を可能にする回転成形法が提案されている⁷⁾。金型の代わりに工具包絡面を用いるこの方式が薄板のバーリング成形に対しても適用できるのであれば、上述の金型システムの省略化が可能となり、バーリング成形の多品種少量生産化への対応が可能になるは

Fig. 1 Schematic illustration showing excess bending occurred in burring operation, owing to the large clearance between die and punch.

ずである。この可能性を探る上で、上述の曲げ余剰変形の抑制挙動の把握が重要な検討項目となる。

そこで本研究では、薄板のバーリング成形へこの回転成形法を適用し、上述の曲げ余剰変形の抑制挙動を実験的に調べ、バーリング成形における金型省略化の可能性を明らかにする。またバーリング高さと下穴径を推定するモデルを提案し、その有効性についても実験的に明らかにする。

2. 実験方法

2.1 棒状工具を用いた回転バーリング成形法の提案

Fig. 2 に示すように薄板をブランクホルダで保持し、回転

* 信州大学工学部 (〒380-8553 長野県長野市若里500番地)。Faculty of Engineering, Shinshu University (500. Wakasato, Nagano-shi, Nagano 380-8553).

Fig. 2 Schematic illustrations showing rotary burring of sheet metals by using a cylindrical tool with shoulder.

させる。一方、棒状工具（半径 R の円弧状段差部を有する棒状工具：空回り）を薄板の下穴に入れ、半径方向へ移動させる。このとき棒状工具は、薄板に対して相対的な意味で円筒状の工具包絡面を描き、その半径方向への移動に伴って工具包絡面の直径 d は大きくなる。もしこの工具包絡面とblankホルダ間における薄板のたわみ変形（曲げ余剰変形）を抑止できれば、一つの棒状工具を用いただけで任意径のバーリング成形が可能となり、金型の省略化が期待できる。

2.2 試料薄板

アルミニウム半硬質板（A1100-H14、板厚 1 mm）を一辺 100 mm の正方形形状に切断後（角部を C10 で耳取り）、中心に直径 20 mm または 30 mm の下穴をドリルであけ、穴縁をエメリー紙（#500）で仕上げて、試料薄板として実験に用いた。また機械加工後の半硬質板を 350°C で 1 時間焼なまし、軟質の試料薄板も作成した。これらの機械的性質を Table 1 に示す。

2.3 実験条件

本研究では、旋盤を用いて実験を行った。Fig. 2 に示すように薄板を内径 72 mm のblankホルダで保持したのち旋盤のチャックでくわえ、一定回転数 $N=350$ rpm で回転させた。一方、半径 R の円弧状段差部を有する棒状工具（空回りするようにベアリングケースで保持）を刃物台に取付け、この工具を一定送り速度 f で半径方向へ移動させ、薄板をバーリング成形した。ここでは曲げ余剰変形抑止挙動とバーリング高さ h に対する棒状工具の段差部円弧半径 R と送り速度 f 、薄板の加工硬化指数 n 値と下穴径 d_0 、潤滑条件の影響を Table 2 に示す範囲で調べた。潤滑剤は工具と薄板の両方に塗布した。

2.4 変形状の測定方法

ほとんどの場合、バーリング高さは圧延方向よりもこれに直角な方向において幾分高くなっていた（およそ 0.1~0.2 mm）。このため、定盤上で形状測定精度が確保できる圧延直角方向のバーリング高さとなわみ変形量を求めた。まず

Table 1 Mechanical properties of aluminum sheets used

Materials (JIS)	σ_Y (MPa)	n	C (MPa)	σ_B (MPa)	ε_f (%)
Soft aluminum (A1100-O)	38	0.23	176	100	32
Half-hard aluminum (A1100-H14)	133	0.06	180	144	12

σ_Y : Yield stress, σ_B : Ultimate tensile stress, n : Work-hardening exponent, ε_f : Elongation, $\sigma = C\varepsilon^n$.

Table 2 Experimental conditions

Tool fillet radius, R (mm)	0.5, 3.0
Tool feed, f (mm/rev)	0.0125, 0.1
Work-hardening exponent, n	0.06, 0.23
Initial hole diameter, d_0 (mm)	20, 30
Lubricant	Pasty MoS_2 Machining oil (68 cSt)

Fig. 3 Flange height, h , and deflection, δ , in hole expanded components.

Fig. 3 に示すように棒状工具と薄板の接触開始点（同図中の黒丸印）の高さ h_1 と h_2 を求め、これらの平均値をバーリング高さ h とした。次にたわみの測定基準としてblankホルダ内縁（同図中の白丸印）の高さ h_3 と h_4 の平均値を採用し、この平均値からバーリング高さ h を引いた値をたわみ変形量 δ とした。このため δ の値は同図(b)の場合には正、同図(c)の場合には零、同図(d)の場合には負となる。本研究では変形尺度として、次式で定義される穴広がり率 λ を用いた。

$$\lambda = (d - d_0) / d_0 \quad (1)$$

ここで d と d_0 は、それぞれバーリング円筒部内径および素板の下穴径である。またバーリング成形品を素板の圧延直角

(a-1) Hole-flanged component with buckling: $R=0.5\text{mm}$. (b-1) Hole-flanged component: $R=0.5\text{mm}$.

(a-2) Influence of hole diameter on flange height and deflection.

(a) Soft aluminum.

(b-2) Influence of hole diameter on flange height and deflection.

(b) Half-hard aluminum.

Fig. 4 Relationships between flange height, deflection and hole diameter in the rotary burring operation ($f=0.1\text{ mm/rev}$, Lubricant: Pasty MoS_2).

方向にマイクロカッターで切断してフランジ部の板厚を測定し、板厚ひずみ ε_t (対数ひずみ) を求めた。

3. 回転バーリング成形の可能性

3.1 曲げ余剰変形の抑止挙動

Fig. 4 に成形の進展 (d の値が下穴径 $d_0=20\text{ mm}$ から増大) に伴うバーリング高さ h とたわみ δ の変化を示す。同図(a)の軟質材の場合、同図(a-2)に示すように $R=3\text{ mm}$ の工具を用いると約 $d=30\text{ mm}$ ($\lambda=0.5$) まで穴を広げた段階で δ を約 1.5 mm の値に抑えることができ、 $R=0.5\text{ mm}$ の工具を用いると約 $d=40\text{ mm}$ ($\lambda=1.0$) の段階で δ をほぼ零に抑えることができた。なお $R=0.5\text{ mm}$ の工具を用いると、 $d=48\text{ mm}$ ($\lambda=1.4$) の段階で同図(a-1)に示す座屈が発生した(この座屈は $R=3\text{ mm}$ の棒状工具を用いた場合には発生しない)。一方、同図(b)の半硬質材の場合、同図(b-2)に示すようにいずれの R の工具を用いた場合にも δ をほぼ零に抑えることが可能となり、特に $R=0.5\text{ mm}$ の工具を用いると約 $d=30\text{ mm}$ ($\lambda=0.5$) の段階で δ をほぼ零に抑えることが可能になった。この場合には軟質材の場合とは異なり、同図(b-1)に示すように座屈の発生しない良好な製品が得られた。このように δ の抑制挙動は半硬質材と軟質材の場合で若干異なり、また R の値により異なる。しかしいずれの場

合も、成形の進展に従い、 δ が減少し、曲げ余剰変形の抑制が可能になった。このように曲げ余剰変形が抑制された状況下では、工具の半径方向移動量を変えるだけで薄板を任意径の大きさにバーリング成形することができるため、金型の省略化が図れ、薄板バーリング成形の多品種少量生産化への対応が可能になるものと考えられる。

3.2 棒状工具段差部の存在とメタルフロー挙動

予備実験段階で段差部を設けないストレートの棒状工具を用いて成形を行った結果、**Fig. 5(a)**に示すように両側へ分流するメタルフローが生じ、マッシュルーム現象⁸⁾が発生した。このため本研究では、片側へのみメタルフローさせる目的で曲率半径 R の隅部を有する段差部付の棒状工具を採用した結果、片側へのみメタルフローが生じ、円筒形状にバーリング成形できた。この際の変形過程を観察した結果、**Fig. 5(b)**に示すように、初期段階では薄板穴縁が段差部に案内されて片側へ曲がり、次第に工具に沿って変形する過程をたどった。なお初期段階で穴縁の角(同図中の白丸印)がつぶれ、フランジ先端が著しく減肉化した。さて上述のように回転成形に特有なマッシュルーム現象が発生したことから、この回転バーリング成形の場合も、工具に沿って変形する過程で管材の揺動回転口広げ成形⁸⁾に類似なメタルフロー挙動が現われる可能性がある。すなわち同図中に示すよう

Fig. 5 Influence of tool shape on deformation modes of blank in rotary burring operation.

に、バーリング変形モード（平均的な材料流動：膜変形）に工具接触面側の圧延的なメタルフローが加わった状態で変形が進展し、フランジ上に圧延的なメタルフローの中立点⁸⁾が存在するために、フランジ根元側へのメタルフローにより根元側では増肉化するはずである。そこで成形後の板厚ひずみ ε_t を測定した結果、Fig. 6(a)に示すように先端側で ε_t が負となり減肉化し、中央から根元にかけて ε_t が正となり増肉化していた。予想結果と一致した。ところでプレス成形ではほとんど増肉化しないため⁵⁾、根元部の増肉化挙動は回転成形の特徴と考えられる。増肉化はフランジ根元部強化とねじ加工の観点からは利点となるが、先端部の減肉化はこの成形における課題になるものと思われる。

4. バーリング高さの推定方法

4.1 等板厚モデルの提案

上述の Fig. 6(a)の板厚ひずみ分布をもとにバーリング高さを推定するモデルについて検討する。Fig. 6(a)に示したように先端側では初期板厚よりも薄くなっているものの、中央部から根元部にかけては逆に厚くなっている。ところで増肉を正、減肉を負として板厚ひずみ ε_t をフランジ直線部においてZ方向に積分したところ、ほぼ零になった。すなわちフランジ直線部の ε_t の平均値はほぼ零となる。この結果は、実際の板厚分布は等板厚ではないものの、バーリング高さが第1近似として等板厚モデルから推定できる可能性を示唆している。そこでいま Fig. 6(b)に示すように、成形前後で等板厚の関係が成立するとともに根元部の曲率半径Rを省略した最も簡便なモデルを考えると、体積一定の関係から無次元化バーリング高さ $H(=h/t_0)$ は次式で与えられる。

$$H = \xi^2 \lambda (2 + \lambda) / 4 \{ \xi (1 + \lambda) + 1 \} + 1 \quad (2)$$

ここで ξ は無次元化初期穴径 $(=d_0/t_0)$ 、 λ は穴広がり率である。実際の作業では下穴径 d_0 の決定が重要になるが、この等板厚モデルを用いると、 d_0 は体積一定の関係から次式で与えられる。

$$d_0 = \{ d^2 - 4hd - 4ht_0 + 4t_0d + 4t_0^2 \}^{0.5} \quad (3)$$

(a) Thickness distribution of the hole-flanged specimen (Half-hard aluminum, $\lambda=1.26$, $d_0=20\text{mm}$, $R=3\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/rev}$).

(b) Uniform thickness mode.

Fig. 6 Thickness distribution of the hole-flanged specimen, and uniform thickness mode.

このように等板厚モデルによる近似が可能であれば、下穴径の決定は極めて容易になる。

4.2 モデルの妥当性

等板厚モデルから求められるバーリング高さ h （式(2)の H に t_0 をかけた値）と実験結果 $(t_0=1.0\text{mm})$ の h を比較した結果を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。Fig. 7 に示すように、半硬質材（同図(a)）と軟質材（同図(b)）のいずれの実験結果に対しても式(2)は比較的よい近似になっており、バーリング高さの第1近似の見積手法としては有効と思われる。なお軟質材（同図(b)）で $R=0.5\text{mm}$ の工具を用いた場合、式(2)の値よりも低い値となっている $\lambda=1.4$ の条件では、座屈が発生していた。この式(2)は、Fig. 8 に示すように送り速度（同図(a)）、下穴径（同図(b)）、潤滑（同図(c)）を変えた場合に対しても、比較的よい近似になっている。これらの結果から、バーリング高さの簡便な見積手法としてこのモデルは有効と思われる。またこのモデルは幾何的な関係のみを用いてバーリング成形形状を推定するため、個々の成形条件に対応するデータベースを蓄積することなしに下穴径の決定が行える。この意味で等板厚モデルによるバーリング形状の見積手法は、多品種少量生産下において極めて有力な手法になるとと思われる。

ところでプレス成形ではよく知られた $h=K(d-d_0)/2$ なる関係があり、係数 K は $20 \leq d/t_0$ の場合に $1 \leq K \leq 1.08$ となるため^{1)~3)}、 $K \approx 1$ とすれば $H \approx \lambda \xi / 2$ となる。この H の値は $\lambda=1$ 、 $\xi=20$ の場合に約10となり、回転成形の H の値（式(2)）の8.3よりも高い。このように回転成形のバーリング高さは

(a) Half-hard aluminum.

(b) Soft aluminum.

Fig. 7 Relationship between flange height and hole expanding ratio in rotary burring of aluminum sheets ($\xi=20$, $t_0=1.0$ mm, $f=0.1$ mm/rev, Lubricant: Pasty MoS_2).

プレス成形の場合よりも低い。これは前述 (3.2) の回転成形特有のメタルフロー挙動に起因した増肉化現象のためと考えられる。

5. 結 言

アルミニウム薄板のバーリング加工の多品種少量生産化への対応を目的に、棒状工具を用いた回転バーリング成形法を提案し、以下の結果を得た。

(1) 段差部を有する棒状工具を用い、その半径方向移動量を変えるだけで、曲げ余剰変形を抑えることができ、任意の大きさにバーリング形成することができた。このためこの回転成形法によりパンチ、ダイおよびプランクホルダにわたる金型の大幅な省略化が可能となり、この意味でバーリング成形の多品種少量生産化への対応が可能になる。

(2) 回転成形に特有な材料流れに起因してフランジ根元側が増肉化する。この増肉化は、フランジ根元部強化とねじ加工の観点からは利点となる。しかしこの増肉化のために、回転成形のバーリング高さはプレス成形の場合よりも低くなる。

(3) 回転成形のバーリング高さが等板厚モデルによりほぼ推定できることを明らかにするとともに、このモデルを用いて下穴径を求める簡便な設計式を与えた。

実験にご協力頂きました当時信州大学工学部学生の藤田一史氏、実験装置製作にご尽力頂きました信州大学工学部堤信

(a) Tool feed f ($\xi=20$, Lubricant: Pasty MoS_2). (b) Nondimensional initial hole diameter ξ ($f=0.1$ mm/rev, Lubricant: Pasty MoS_2). (c) Lubricant ($f=0.1$ mm/rev, $\xi=20$).

Fig. 8 Relationship between flange height and hole expanding ratio in rotary burring of half-hard aluminum sheets ($t_0=1.0$ mm, $R=3$ mm).

一技官に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) W. Richards: Machinery (E), 86(1955), 1303.
- 2) 益田森治監修: 薄板の曲げ加工, 誠文堂新光社, (1958), 209.
- 3) 吉田清太: 科学研究所報告, 33 (1957), 260.
- 4) 中川威雄, 吉田清太: 理化学研究所報告, 44 (1968), 150.
- 5) 町田輝史, 中川威雄: 塑性と加工, 16 (1975), 365.
- 6) 中川威雄, V. Cupka, 高野豊晴, 町田輝史: 塑性と加工, 16 (1975), 1081.
- 7) 北澤君義, 小林 勝, 丸野浩昌: 塑性と加工, 29 (1988), 767.
- 8) 北澤君義, 杉山範明: 軽金属, 45 (1995), 156.