振動・液圧絞り加工における振動条件 および潤滑油粘度の影響

片岡 征二*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 48, No. 2 (1998), pp. 73-77

Effect of vibration characteristic and lubricant viscosity on deep drawing process with hydraulic counter pressure and vibration to tool system

Seiji KATAOKA*

A new experimental apparatus is constructed in order to improve the lubrication condition in the deep drawing of A5052P-O aluminum alloy sheets with thickness of 0.6 mm. A punch is oscillated in a longitudinal mode by mechanical vibration with frequency of 5 to 80 Hz. A die surface is also oscillated in a longitudinal mode by ultrasonic vibration with frequency of 21 kHz. The hydraulic counter pressure of 1.5 MPa is applied throughout the drawing process. The suitable application of the vibration can make remarkable increase of the limiting drawing ratio (L.D.R.) up to 2.05 and reduction of the maximum punch load in spite of the use of a poor lubricity paraffin oil with viscosity 2 cSt at 40°C.

(Received May 12, 1997)

Keywords: aluminum alloy, tribology, deep drawing, deep drawing with vibration, ultrasonic vibration

1. 緒 言

無洗淨油（揮発性潤滑油）は、一般的な絞り加工用潤滑油に比べて粘度が著しく低く、ダイスと被加工材との摩擦界面では境界潤滑が支配的な厳しい潤滑状態となりやすい。したがって、何らかの方策を講じない限り、無洗淨油の絞り加工への適用は難しい。

前報¹⁾では、無洗淨油を用いたアルミニウム合金板（A5052P-O）の絞り加工において、加工速度を10 m/sまで増加させ、この速度効果を利用することによって、L.D.R.を2.1にまで向上させることに成功した。

低粘度油でも潤滑状態を良好にし得る方策には、速度効果のほかにも種々考えられる。例えば、温度を低くして潤滑油の粘度を向上させることも考えられるし、被加工材表面の粗さを制御し、ミクロプールメカニズム^{2),3)}を効果的に作動させることも考えられる。また、その構造等を適当に制御した被加工材酸化膜との併用も考えられる⁴⁾。さらに、工具あるいは被加工材に振動を加え、加工中の両者の間に隙間を形成し、ここにほかから低粘度の液体を強制的に送り込んで潤滑状態を向上させるということも考えられる⁵⁾。最後に示した方法は、振動・液圧絞り加工法と称するが、無洗淨油のような低粘度油を使用した場合にも、常に良好な潤滑状態を実現できると期待できる。

本報では、振動・液圧絞り加工装置を試作し、潤滑油粘度との関連の下で、パンチの振動数と振幅の最適条件について検討を加え、絞り加工における潤滑油の低粘度化の可能性について調査する。

Fig. 1 Schematic illustration of deep drawing process with hydraulic counter pressure and vibration to tool system.

2. 実験方法および条件

2.1 実験装置の概略

本実験で開発する装置の概略を Fig. 1 に示す。パンチに対向してダイスを設置し、その内側のキャビティを液圧室として利用する。液圧室の潤滑油は、外部の油圧ポンプによって所定の圧力に加圧され、ここから、振動によって形成されたダイスと材料との隙間に強制的に送り込まれる。加工中にパンチが液圧室内に浸入することによって生じる液圧の増加を防ぐために、油圧回路には大型のアクムレータを組込んだ。

* 東京都立産業技術研究所（〒115-0056 東京都北区西が丘 3-13-10）。Tokyo Metropolitan Industrial Technology Institute (3-13-10. Nishigao-ka, Kita-ku, Tokyo 115-0056).

本実験では、工具振動の中で最も効果的と考えられる③と⑥の振動を採用する。③は、超音波振動によって付加し、⑥は、絞り試験機として用いるサーボバルサ（島津製作所製）の機械的振動によって加えることにした。

2.2 金型条件、被加工材材質および潤滑油

ダイスの内径は30 mmで肩半径は4 mmとした。パンチは外径28.4 mmで肩半径4 mmとした。材質はSKD11で表面粗さは $0.2 \mu\text{mR}_y$ とした。潤滑油はパラフィン系鉱油で、P2 ($2.2 \text{ mm}^2/\text{s}$, 40°C)、P5 ($3.8 \text{ mm}^2/\text{s}$, 40°C)、P15 ($13.3 \text{ mm}^2/\text{s}$, 40°C)、P100 ($97.6 \text{ mm}^2/\text{s}$, 40°C) という4種類のものを用いた。極圧剤あるいは油性剤は一切添加していない。

被加工材はA5052P-Oで板厚は0.6 mmである。引張強さ、伸びはそれぞれ214 MPa、27%である。

2.3 実験方法

ダイスの超音波振動、パンチの機械的振動および液圧付加等の組合せによって、Table 1に示すような4通りの方法で実験を行った。

パンチの機械的振動は、振動数および振幅を種々変化させてその影響について検討した。ダイス側には21 kHz一定の超音波振動を付加した。液圧の大きさは、本法のような低圧の場合、1 MPaを超えると、L.D.R.への影響は小さくなること、また、液圧による加工力増加分をキャンセルすると加工力への影響も小さくなること⁵⁾、また、実際にはコンプレッサ程度の圧力でも液圧をかけられることが望ましいということとを考慮して、1.5 MPaとした。しわ抑え力は、L.D.R.付近のブランクを絞り加工した際にも、しわが発生しない最低のしわ抑え力として4.3 kNを選定した。加工速度は1 mm/sと10 mm/sの2種類とした。

3. 実験結果

3.1 最大加工力に及ぼすパンチ振動特性の影響

ブランク径を50 mm一定とし、最大加工力に及ぼすパンチ振動特性の影響について検討した結果をFig. 2に示す。この場合の最大加工力は、ダイス内の液圧による加工力の増加分をキャンセルした⁵⁾ものを用いた。パンチ振幅は0.6 mm一定とし、すべての条件で1.5 MPaの液圧を付加した

Table 1 Various drawing methods

Marks	Additional conditions for conventional drawing
A	Hydraulic counter pressure
B	Hydraulic counter pressure Ultrasonic vibration of die
C	Hydraulic counter pressure Mechanical vibration of punch
D	Hydraulic counter pressure Ultrasonic vibration of die Mechanical vibration of punch

が、ダイスへの超音波は付加していない。すなわち、絞り加工法(C)を用いた。また、図中黒く塗りつぶした記号および振動を付加していない場合に記号が記されていないものは破断したことを意味している。なお、40 Hz以上の振動数では、その慣性力の影響で加工力に2~4%程度の誤差が生じる。

パンチ振動数の影響であるが、いずれの潤滑油においても振動数が40~60 Hz付近において加工力は最小となるのが確認できる。粘度の低いP2、P5では、振動を付加しない場合には破断するものもあるが、振動を付加することによって加工力は著しく低下する。これに比べ、粘度の高いP100では振動付加の効果は小さい。また、潤滑油の粘度が低いほど加工力が高くなる傾向にあるが、振動を付加することによってその差が小さくなるのが認められる。特に、振動数60 Hz付近では高粘度油P100と比較的低粘度のP15の差はなくなり、加工速度1 mm/sではむしろP15の加工力の方が小さくなるのが注目される。

一方、パンチの振幅および振動数と最大加工力との関連について検討した結果の一例をFig. 3に示す。潤滑油としてはP5を用いた一例を示してある。振動数および振幅が大きくなるに従って、最大加工力が小さくなるのが確認できる。

3.2 限界絞り比の測定結果

限界絞り比に及ぼす振動特性と潤滑油粘度の影響を検討した結果をFig. 4~Fig. 6に示す。この場合は絞り加工法

Fig. 2 Effect of punch vibration on maximum punch load for various viscosity lubricants (Filled mark: fracture, Drawing: C).

Fig. 3 Effect of punch vibration on maximum punch load (Drawing: C).

(C) と (D) の結果を併記した。図中黒く塗りつぶした記号は、ダイスに超音波を付加したときに効果が認められた場合の値を示している。したがって、白抜き記号は超音波を付加してもしなくても同じ結果であったこと、すなわち、絞り加工法 (C) と (D) の結果が同じであったことを意味している。また、↓の記号は、用意した最低のプランク径 (48 mm) でも破断を生じたことを表す。

まず、振幅が0.3 mm と小さいときには、加工速度 1 mm/s の場合、粘度の低い P2 から P15 までの潤滑油においては、振動数を増加させるとむしろ限界絞り比は低下する傾向にある。しかし、振幅が0.6 mm 以上になると、加工速度が 1 mm/s あるいは 10 mm/s の場合でも、振動数が大きくなるに従って限界絞り比は大きくなり、60~70 Hz 付近で最大値をとるように挙動する。限界絞り比が最大値を示す付近では超音波付加の効果もみられるようになる。また P2 から P15 までの潤滑油においては、潤滑油の粘度が高いほど限界絞り比は大きくなる。また、加工速度が 1 mm/s の方が、限界絞り比は大きくなる傾向にある。

一方、高粘度油 P100 の場合には、低粘度油に比べてパン

チ振動数、振幅の影響は非常に小さいが、振動数の小さいところでも限界絞り比は2.0を超えており、低粘度油に比べて大きな値と言える。しかし、60~70 Hz 付近ではむしろ低粘度油の P5, P15 のほうが限界絞り比は大きくなる。超音波付加の効果は、P100においては広範囲の振動数において認められる。

4. 考 察

振動・液圧絞り加工法におけるパンチ振動数、振幅、加工速度、潤滑油粘度の影響は、これまでに筆者らの提案してきたマイクロプールメカニズム^{2),3)}の考えに従えば、以下のよう整理できる。

- ① パンチ振幅は大きいほど材料と工具との隙間が大きくなり、また、隙間が開いている時間が長くなることにつながる。したがって、振幅の増加は潤滑油が隙間により多く入り込むように作用し、ダイス側潤滑状態を改善させる。
- ② パンチ振動数が小さくなるということは、1 工程中に潤滑油が摩擦界面に流入し、再潤滑する回数が減るとい

Fig. 4 Effect of vibration of punch and die on limiting drawing ratio (P2). Blanked mark: Drawing C, Filled mark: Drawing D

Fig. 5 Effect of vibration of punch and die on limiting drawing ratio (P15). Blanked mark: Drawing C, Filled mark: Drawing D

Fig. 6 Effect of vibration of punch and die on limiting drawing ratio (P100). Blanked mark: Drawing C, Filled mark: Drawing D

うことにつながり、したがって小さ過ぎると、ダイス側潤滑状態の改善は期待できなくなる。

- ③ パンチ振動数の増加は、流入回数、再潤滑の回数増加の面ではプラスに作用するが、その一方で隙間の開いている時間が短くなるということにつながり、したがって振動数が大きくなり過ぎると、潤滑油が入り込みにくくなることも生じる。
- ④ 項目②、③から、本絞り加工法においては、潤滑状態を最適にする振動数が存在するはずである。
- ⑤ 加工速度が大きくなるということは、プレス1工程中の再潤滑の回数が減るとともに、隙間の開き方も小さくなるということにつながり、潤滑状態を悪くする方向に作用する。
- ⑥ 潤滑油の粘度が低いほど流動性が良好で、振動によって工具と材料との間に隙間が形成された場合に、そこへ流入しやすいと考えられる。しかしその一方で、振動によってその隙間が閉じる瞬間には流出しやすく、潤滑油粘度の影響の仕方は単純ではないと思われる。

振動・液圧絞り加工における各影響因子に関する、以上のような考えに基づいて、実験の結果について以下検討を加えることにする。

4.1 最大加工力に及ぼすパンチ振動特性および潤滑油粘度の影響

液圧とパンチ振動を加えることによって、最大加工力は著しく低下する。これは前述のようにパンチ振動と液圧との相乗効果によって、ダイス側の潤滑状態が著しく改善されるからである。

まず、パンチの振動数の影響についてみると、Fig. 2の結果から、約60 Hz付近で加工力の最小値が存在するのがわかる。このことは、項目②～④の考えに従うものである。また、Fig. 3の結果から、振幅は大きいほど加工力が低下するが、これは項目①の考えによって説明できるものである。また、振動・液圧絞り加工法においては、加工速度の小さいほうが加工力は小さくなるが、これは項目⑤の理由による。

ここで問題となるのは、潤滑油の粘度の低いほど加工力が大きくなるということである。この原因としては、項目⑥で指摘したようなことと、しわ抑え板と材料との間の摩擦の影

Fig. 7 Effect of friction between blank and blank holder on maximum punch load. Filled mark: use of polyethylene thin film on die face side of blank, Blanked mark: use of polyethylene thin film on both side of blank

響が考えられる。

しわ抑え板と材料間の摩擦であるが、パンチ振動と液圧を付加しても、本装置ではそこまで潤滑油が流れ込むという保証はない。すなわち本装置では、しわ抑え板と材料間へ潤滑油を強制的に送り込む構造にはなっていない。そこでの潤滑状態は慣用絞り加工におけるほぼ同じ状態であり、したがって潤滑油粘度の影響が加工力に反映されると推察される。このことを確認するために以下のような実験を行った。

潤滑性が優れているポリエチレンフィルム (P.F.) をダイス側としわ抑え板側の両方に装着したものと、ダイス側のみ装着したものとを比較した。ここでは液圧付加のみで振動は一切付加していない。また、P.F. および工具には、それぞれの条件において用いられる、粘度の異なる潤滑油を十分に塗布した。その結果を Fig. 7 に示す。

両面 P.F. の条件においては、塗布した潤滑油の粘度の影響は小さい。しかし、片面 P.F. の条件においては、低粘度

Fig. 8 Effect of punch vibration on breaking force for various viscosity lubricants.

油 P2 の加工力は明らかに高くなっている。この結果から、粘度の低い P5, P2 の場合、しわ抑え板側で生じている摩擦が加工力を高くするように作用していることが確認できる。

以上のように、潤滑油粘度が低いほど加工力が高くなる原因は、しわ抑え板側の摩擦力が低粘度油では高くなるということが第 1 に考えられる。さらには、現段階でははっきりと断定はできないが、項目⑥のような複雑な潤滑機構が、低粘度油において摩擦力を高くするように作用していることも考えられる。

4.2 限界絞り比に及ぼす振動付加と潤滑油粘度の影響

限界絞り比は、最大加工力とともに破断力によっても大きな影響を受ける。加工力の大小は主としてダイス側の潤滑によって左右されるが、破断力はパンチ側潤滑状態によって左右される。したがって、限界絞り比について検討するためには、パンチの振動がこの破断力に与える影響を明らかにしておく必要がある。そこで、パンチの振動数を 0~80 Hz に変化させ、絞りカップの破断するときの荷重を求めた結果を Fig. 8 に示す。この場合の振幅は 0.6 mm 一定とし、液圧は付加していない。

破断力測定用の試験片は以下の手順で作成した。まず、ダイス側にポリエチレンフィルム (P.F.) を用い、さらに潤滑油として P15 を用いて、直径 56 mm のブランクを最大加工力に達するまで絞り加工した。この場合振動および液圧は付加していない。ここで得られた絞り途中のカップをベンジンで脱脂した後、所定の潤滑油を工具およびカップに十分塗布し、種々の振動数の付加条件で破断させた。この場合のしわ抑え力は 15 kN とした。

潤滑油 P2, P5, P15 を比較すると、破断力は粘度の高い潤滑油ほど大きくなる傾向にあることが確認できる。これは、パンチ側は潤滑油を強制的に送り込んでいないため、隙間が開いたときに低粘度油ほどそこへ回り込みやすいためと考えられる。しかし、高粘度油 P100 になると再び破断力は低下するようになる。これは、粘度が高い故に、隙間が閉じたときにも絞り出されることがなく、パンチと材料との接触界面に残留しているためと考えられる。いずれにせよ、項目⑥でも指摘したように、潤滑油の粘度に関しては複雑なメカニズムがパンチ側でも生じていると推察される。

さて、限界絞り比であるが、破断力が小さくなり、その一方で加工力が高くなってしまふ P2 のような非常に粘度の低い潤滑油では、限界絞り比が大きくなるのは当然と言えよう。しかしそれでも、液圧とパンチ振動を付加した場合に限界絞り比は 2.04 に達し、さらに 1 mm/s の条件で超音波を付加すると 2.18 までに達するのは特筆できよう。この結果は、P2 よりさらに低粘度ではあるが、無洗浄油においても振動・液圧絞り加工法が十分期待できることを示唆するものである。

P2 に比べれば比較的粘度が高い P15 においては、液圧とパンチ振動を付加しただけで限界絞り比は 2.25 を超え、さらに超音波を印可すると 1 mm/s の条件では 2.32 となる。加工速度 10 mm/s の条件では 2.43 にまで達するのが確認できた。P15 でも、実際にはスピンドル油程度の低粘度の潤滑油であり、さらに添加剤を一切加えていないことを考慮すれば、これらの結果は十分満足できるものであると言えよう。

5. 結 言

(1) 振動・液圧絞り加工において、振幅の増大は潤滑状態を改善させるように作用することが確認できた。

(2) 振動数は、約 60 Hz 付近に最適条件が存在するのが確認できた。

(3) 振動・液圧絞り加工法によれば、非常に低粘度の潤滑油 (2 mm²/s) を用いた場合にも、従来の絞り加工法に比べて加工力は低減し、限界絞り比は大幅に向上するのが確認できた。この結果から、無洗浄油を用いた場合にも、振動・液圧絞り加工法が有効であることが示唆された。

最後に、潤滑油の提供を受けた三菱石油㈱村木正芳博士にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 片岡征二：軽金属, 48 (1998), 25.
- 2) 片岡征二, 菅野恵介, 木原諒二：塑性と加工, 29 (1988), 1132.
- 3) 片岡征二, 木原諒二：塑性と加工, 30 (1989), 1058.
- 4) 片岡征二, 木原諒二, 相澤龍彦：塑性と加工, 34 (1993), 210.
- 5) 片岡征二, 木原諒二, 相澤龍彦, 中田高志, 加藤光吉：塑性と加工, 35 (1994), 977.