サーボプレスによる A1070 の衝撃押出し成形とその成形解析*

四宮 徳章^{*1}, 白川 信彦^{*2}

Experimental and Analytical Studies on Impact Extrusion of A1070 by Servo Press

Naruaki SHINOMIYA^{*1} and Nobuhiko SHIRAKAWA^{*1} Technology Research Institute of Osaka Prefecture
Ayumino 2-7-1, Izumi-shi, Osaka, 594-1157 Japan

Experimental and analytical studies were carried out to clarify servo press slide motion preferable for obtaining uniform cups by one operation of impact extrusion. Cylindrical billets of aluminium (A1070) were extruded into cups by a servo press. The inner and outer diameters were measured along the longitudinal axes. The effects of servo press slide motion on billet temperature were investigated by finite element method. The following results were obtained: 1) Heat generation by processing had a great influence on the accuracy of cup diameters. 2) A constant sliding speed made diameter small at the bottom of cup. 3) By slowing down the slide speed in the middle of the extrusion process, the dimensional accuracy was improved.

Key Words : Plastic Working, Servo Press, Impact Extrusion, Accuracy, Finite Element Method, Heat Generation

1. 緒 言

衝撃押出し成形は、バルク状の素材から深い薄肉容器形状を一工程で成形できる加工法であり、近年、リチウムイオン電池などの電池筐体の加工において注目を集めている。深い薄肉容器形状を加工する場合に多工程を要する深絞り成形に比べて、衝撃押出し成形は高効率の製造ができる、残留応力が小さいなどの長所を有するが、寸法精度が低い、適用できる材料に制限があるなどの課題がある。特に、寸法精度は、加工発熱による素材の熱膨張・熱収縮や、金型の弾性変形⁽¹⁾などが影響を及ぼすと考えられている。

一方、サーボプレスは、従来のプレス機では実現できなかったスライドモーションの自由な設定を可能にするプレス機である。塑性加工の現場ではサーボプレスの導入が急速に進んでおり、スライドモーションの検討により、成形性の向上⁽²⁾や寸法精度の向上⁽³⁾を達成した事例が報告されている。しかし、衝撃押出し成形を対象にしたものはほとんど報告されていない。また、スライドモーションの設定を考慮した成形解析を行い、解析からそのメカニズムを明らかにした例も見当たらない。本報では、サーボプレスのスライドモーションを駆使して、加工発熱による素材の温度上昇をコントロールし、衝撃押出し成形において寸法精度を向上した。さらに、成形解析を用いて成形中の素材の温度分布を明らかにすることで、寸法精度向上のメカニズムについても検討を加えた。

2. 実験および解析条件

成形には 2000kN リンク式 AC サーボプレス (コマツ産機, H1F200) を用い、工具には、SKD11 製のパンチおよびコンテナを用いた。また、パンチ上部に設置した SKD11 製の円柱ブロックにひずみゲージを貼付して、成形荷重を測定した。図 1 および図 2 に概略図を示す。素材には、リン酸塩皮膜処理を行った直径 19.5mm、高さ 6mm の A1070 材 (耐力:86MPa, 引張強さ:95MPa, 伸び:28%) を用いた。成形品の内径・外径の測定には、三次元形

* 原稿受付 2013 年 1 月 17 日

^{*1} 正員, (地独)大阪府立産業技術総合研究所 (〒594-1157 大阪府和泉市あゆみ野 2-7-1)^{*2} (地独)大阪府立産業技術総合研究所

E-mail: shinomiya@tri-osaka.jp

Fig.1 Cross section of experimental apparatus

Fig.2 Front edge of punch

状測定機（ミットヨ，Quick Vision PRO）を用いて，スタイラスにより内径で8点，外径で6点の座標を測定し，円近似することで直径を求めた．

サーボプレスのスライドモーションとしては，リンクモーションの50spmを100%として，①100%一定モーション，②20%一定モーション，③下死点上5mmで100%から20%に減速するモーション，④下死点上4mmで100%から20%に減速するモーション，⑤100%の速度で下死点上4mmにおいて0.1s停止するモーション，⑥100%の速度で下死点上4mmにおいて1s停止するモーションの6種類を検討した．以降，①②を一定モーション，③④を減速モーション，⑤⑥を停止モーションと称す．

解析には，鍛造シミュレータ（NTTデータエンジニアリングシステムズ，simufact.forming10.0）を用いた．二次元での軸対称問題とし，素材は弾塑性体，工具は弾性体と定義した．工具形状は三次元形状測定機を用いてパンチ外径について2断面およびコンテナ内径について9断面の測定を行い，解析に用いた．また，素材および工具の機械的特性には，ソフトウェアに収録されているライブラリデータをそれぞれ活用し，素材には速度依存性（ひずみ速度 $0.001\sim 10\text{s}^{-1}$ ）および温度依存性（ $20\sim 120^\circ\text{C}$ ）を考慮した1000番系のアルミニウム，工具には弾性体のSKD11を設定した．実際の成形では，スライド条件によりひずみ速度 10s^{-1} や素材温度 120°C を超える変形箇所が存在すると思われるが，素材の変形抵抗はひずみ速度の低い範囲で支配的に変化し，また，温度依存性については変形時の素材温度を概ね包含していると考えられるため，ライブラリデータを活用することにした．摩擦係数としては，素材－パンチ，素材－コンテナともせん断摩擦係数を0.1に設定し，素材および工具の初期温度は 20°C ，素材－工具間の熱伝達率は $20\text{kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ に設定した．サーボプレスのスライドモーションの設定には，実際にプレスから出力される時間－ストロークデータを用いた．また，直径は，加工発熱により昇温した成形品の冷却解析を行い，熱収縮後の最終形状を三次元のSTL形式で出力して求めた．

3. 実験および解析結果とその考察

3・1 実験および解析結果

設定したスライドモーションと実際のスライド動作にかい離がないかを確認するために，まず，各モーションのスライド速度について調べた．図3は，スライド速度を下死点からの距離で整理したものである．100%一定モーションでは，下死点上5mmの位置まで急激に速度が低下し，その後1mm付近まで 40mm/s 程度のほぼ一定速になった．これは実験に使用したサーボプレスのリンク機構に起因するものである．また，20%一定モーションでは，100%の20%程度の速度（ 8mm/s 程度）になっており，設定どおりに動作したと言える．減速モーションでは，下死点上5mmおよび4mmから20%の速度に向けて減速を開始するため，2mmおよび1mm付近まで20%の速度に減速できていなかった．また，停止モーションでは，常に100%の速度設定であるにも関わらず，成形開始の6mm付近から1mm付近まで，0.1s，1sの両停止モーションとも，100%一定モーションより速度が低かった．

Fig.3 Slide velocity of various slide motion patterns used in this study

Fig.4 Load curves for various slide motion patterns

これは、4mmでの停止に向けた減速区間とその後の再起動による加速区間が必要なためである。素材と金型の熱移動に及ぼすスライド速度の影響は大きく、それによる素材の熱収縮は大きいと思われる。寸法精度の向上を達成するためには、このような実際のスライド動作を把握することが非常に重要と考えられる。

次に、各モーションで成形した時のパンチ荷重ストローク線図の一例を図4に示す。また、解析結果も併せて示す。最大パンチ荷重はどのモーションでも大きな違いはなかったが、実験結果の方が解析結果より高い荷重を示した。これは解析に用いた材料データおよび摩擦係数に起因するものと考えられる。また、成形後半で各モーションのパンチ荷重に差が生じた。成形後半にスライド速度の低い20%一定モーションや減速モーションで荷重が高くなるという傾向は、実験と解析で一致した。素材強度の温度依存性を考慮しない予備解析においては、成形後半のパンチ荷重の低下が現れなかったことより、成形後半のパンチ荷重の低下は、加工発熱による素材の昇温と素材強度の温度依存性に起因するものと考えられる。

次に、成形品の内径および外径を測定した結果を図5に示す。なお図中、縦軸は成形品の底部を0mmとしてその高さを示し、本報では、高さ方向の直径の差が小さい場合に寸法精度が良いものとして評価した。図より、減速モーションを除く他のモーションでは、内径および外径は、底部（高さ5mm）から端部（高さ21mm）に向かって徐々に大きくなるのがわかる。また、20%一定モーションと比較して、100%一定モーションでは、底部から端部のいずれにおいても内径、外径ともに小さかった。これらは成形時の加工発熱に応じた加工後の熱収縮が原因と考えられる。一方、減速モーションでは、高さ方向に対する直径の差が他のモーションに比べて小さく、下死点上5mmの減速モーションでは内径で、4mmの減速モーションでは外径で、高さ方向5mmから17mmにおいて直径の差が特に小さかった。また、停止モーションでは、0.1s、1sともに高さ方向に対する直径の差が大きかった。これらは成形中の素材温度に起因するものと考えられるが、詳しくは次節で考察する。以上より、スライドモーションが直径に及ぼす影響は大きく、スライドを適切に制御することで高さ方向の直径の差を小さくすることができた。また図6に示した解析結果においても、内径・外径に及ぼすスライドモーションの影響は実験結果に近い傾向を示し、減速モーションでは、高さ方向の直径の差が小さいことを確認できた。

Fig.5 Variation of inner and outer diameters of impact extruded cup (experimental)

Fig.6 Variation of inner and outer diameters of impact extruded cup (calculated)

3・2 成形中の素材温度と寸法精度の考察

内径寸法および外径寸法は成形中の素材温度によって大きく影響を受けると考え、成形中に最も素材温度が高くなると考えられるパンチ肩近傍の素材温度の推移を、解析により調べた。結果を図7に示す。図より、スライド速度が100%と高い場合は素材温度の上昇が大きく、最高で約140℃に達することがわかる。一方、スライド速度が20%と低い場合は、最高温度が85℃程度であった。これは、スライド速度が低速の場合、加工により発生した熱が金型へ多く移動するためと考えられる。また、減速モーションでは、成形初期に素材温度が上昇した後、成形中期以降で素材の昇温が抑制された。特に、下死点上5mmの減速モーションでは、下死点上3mm以降の素材温度が80～85℃程度でほぼ一定であった。一方、停止モーションでは、スライド停止の下死点上4mmまでに素材温度の上昇がほとんどないため、素材温度の低下に対する効果は小さかった。また、再起動後は素材の温度が急激に上昇し、100%一定モーションとほぼ同程度の約140℃にまで達した。この点については、スライド停止位置を見直し、素材温度の上昇を抑制するモーションを検討する必要がある。

次に、成形品側壁部の各部位が成形中パンチ肩近傍を通過する際の温度を図8に示す。図より、100%一定モーションや停止モーションでは、成形品底部に近いほど成形時の温度がきわめて高く、熱収縮により寸法が小さくなると考えられる。一方で、下死点上5mmの減速モーションは、各高さの成形温度が約80℃で一定であり、成形高さごとの熱膨張、熱収縮の差が小さいと考えられる。これらは、図5および図6に示した直径と同様の傾向を示し、成形途中のスライドの減速は、素材温度の適切な制御を可能にするため、成形品高さ方向の直径の差を

Fig.7 Effect of slide motion patterns on maximum work piece temperature (calculated)

Fig.8 Distribution of work piece temperature as pass through the punch shoulder (calculated)

小さくできることがわかった。

4. 結 言

衝撃押し出し成形の寸法精度向上のため、サーボプレスのスライドモーションの検討を行った。また、解析を用いて現象の解明を試みた。その結果、成形品の内径および外径に及ぼすスライドモーションや加工発熱の影響は大きいことがわかった。また、スライド速度を一定に設定した場合、素材温度は成形初期から完了まで上昇し続けるため、熱収縮の影響で成形品底部ほど直径が小さくなることがわかった。さらに、成形途中でのスライドの減速は、素材温度の上昇を抑制し、成形品高さ方向の直径の差を小さくできることがわかった。

謝 辞

本研究の一部は、財団法人天田金属加工機械技術振興財団の平成 22 年度一般研究開発助成 (AF-2010020) により行われたものであり、ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 渡辺翼, 本村貢, 萩原明夫, 小西玄太, “車載用バッテリーケースのインパクト加工における欠陥発生メカニズムとその改善”, 軽金属, Vol.62, No.10 (2012), pp. 363-369.
- (2) 四宮徳章, 白川信彦, “サーボプレスのスライドモーションと深絞り成形性に関する検討—第二報ステップ成形における引き上げ位置の影響”, 第 62 回塑性加工連合講演会, (2011.10), pp. 109-110.
- (3) 寺野元規, 郭放, 湯川伸樹, 石川孝司, “Al 合金冷間後方押し出し鍛造品寸法精度に及ぼすスライドモーションの影響”, 平成 24 年度塑性加工春季講演会, (2012-6), pp. 119-120.