論文

スライドモーション制御による角筒インパクト成形の高精度化

四宮 徳章* 白川 信彦*

Improved Form Accuracy through Slide Motion Control
in Impact Extrusion of Square Cups

Naruaki SHINOMIYA* and Nobuhiko SHIRAKAWA*

(Received on January 26, 2015)

Slide motion control for a servo press was investigated with the aim of improving shape accuracy in square cups formed by impact extrusion. We studied the effects of slide speed on wall thickness accuracy in the product. We explored the factors in defective product formation by analyzing strain curves during the punching operation. The results clarified that elastic deformation of the punch in the bending direction during the initial working portion of the stroke affects the accuracy of wall thickness. When observing the process using a high-speed camera, we deduced that unstable movement of the slug when initially impacted by the punch caused the punch to deform elastically in the bending direction. By employing pulse motion during the initial stage, whereby the punch is repeatedly advanced and retracted until the slug fills the die, elastic deformation of the punch in the bending direction could be reduced, improving the wall thickness accuracy in the product.

Key words: forging, impact extrusion, servo press, aluminum, square cup, form accuracy.

1. 緒言

二次電池用筐体は、深絞り成形で製造されることが一般的である¹⁾。しかし、深絞り成形は、多工程での成形であるため金型費を要することや歩留りの悪さから、近年では、インパクト成形が注目されている。インパクト成形は、高速かつ一工程で加工ができ、生産性が高い反面、金型に高い負荷がかかる。そのため、特に角筒形状の成形では、成形中のパンチの弾性変形が大きく、成形品の割れなどの欠陥の発生や寸法精度が安定しないという問題が、渡辺らにより指摘されている²⁾。そのなかで渡辺らは、成形品の板厚測定と有限要素法 (FEM) 解析により、パンチの曲げやねじれにより成形不良が発生することを明らかにしている。また、パンチ先端部に溝加工を付与することで、成形不良の発生率低減を達成している。しかし、パンチ先端部に溝加工を行うと成形品に本来必要としない溝形状が転写されるといった問題がある。パンチの曲げやねじれの発生する原因についてはあまり検討されていない。

サーボプレスはスライドモーションの自由な設定ができるプレス機であり、その活用が楊³⁾、Osakada⁴⁾らにより広く紹介されている。なかでも、スライドモーション制御の適用により寸法精度や成形性が向上した事例が、板材プレス加工や鍛造加工において多数報告されている。著者

らは、板材プレス加工では深絞り成形を対象に、適切なパルス成形を行うことで冷間圧延鋼板の成形性を向上できることを示した⁵⁾。また、鍛造加工では純アルミニウムの円筒インパクト成形を対象に、スライドの減速制御により成形温度をコントロールし、成形品高さ方向の内径・外径のばらつきを抑えた⁶⁾。安藤は、後方押し出し成形において、成形前半は高速、成形後半を低速で加工するステップモーションにより内径のばらつきを抑えている⁷⁾。Ishikawa らは、アルミニウム合金の後方押し出し成形において、振動モーションを用いることで、成形中の素材温度を均一に保ち、成形品高さ方向の外径のばらつきを抑えている⁸⁾。Matsumoto らは、潤滑油流路を有するパンチとパルスモーションを用いて、成形品内径側の粗さを向上し、直径の標準偏差を小さくしている⁹⁾。これらの研究はすべて円筒形状を対象にしたものであり、二次電池用筐体に用いられる角筒形状のインパクト成形について、スライドモーション制御を検討した例はほとんどない。

本報では、角筒インパクト成形において、パンチひずみの計測やハイスピードカメラによる撮影を行うことで、寸法精度が安定しない原因を調査するとともに、サーボプレスのスライドモーション制御を活用して寸法精度の向上を試みた。

2. 実験条件

2.1 試験工具および供試材料

Fig. 1 に金型の構成を示す。工具には、SKH50 製のパン

* (地独) 大阪府立産業技術総合研究所
〒594-1157 和泉市あゆみ野 2-7-1
Technology Research Institute of Osaka Prefecture
2-7-1 Ayumino, Izumi 594-1157, Japan.

Fig. 1 Experimental apparatus for impact extrusion

Table 1 Chemical composition of A1050 (mass%)

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	V
Bal.	0.08	0.33	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01

チ (幅 41.4mm×奥行き 9.6mm, 肩 R=1.0mm) とダイ (幅 42.8mm×奥行き 11.0mm, 底 R=1.0mm) を用いた。また、パンチ上部のバックリングブロック (幅 46.0mm×奥行き 14.2mm×高さ 30.0mm) 長辺側壁部の前面および後面にひずみゲージを各 2 枚ずつ貼付してひずみ (以降、パンチひずみと称す) を測定した。スラグには、公称板厚 8.0mm の純アルミニウム材 (A1050P-H24) を、幅 42.3mm×奥行き 10.5mm (R=1.0) にワイヤカットした後に焼鈍したものを用いた。Table 1 にスラグの化学成分を示す。潤滑処理として、ガラスビーズによるブラスト処理の後、全面にステアリン酸亜鉛 (川村化成工業㈱製) をタンブラリングした。

2.2 試験装置および成形条件と評価方法

試験装置には 2000kN リンク式 AC サーボプレス (コマツ産機㈱, H1F200) を用いた。スライドモーションの条件として、①motion-1 (50spm) および②motion-2 (10spm) を設定し、まず成形速度の影響を調べた。また、それらの実験結果および考察から、③pulse-1、④pulse-2 の二つのスライドモーションを設定した。pulse-1 は 2mm 成形するごとにパンチを 1mm 後退する動作を 3 回繰り返すモーションとし、pulse-2 は成形初期に 0.2mm 成形するごとにパンチを 1mm 後退する動作を 3 回行った後に 10mm 後退し一気に成形を行うモーションとした。Fig. 2 にスライドモーションを示す。なお、pulse-1、pulse-2 の両条件の詳細な設定理由については、4.2 節で後述する。

成形実験は各条件で 10 回ずつ行った。成形中のパンチひずみを測定することで、パンチの弾性変形の向きや大きさを計測した。また、成形品長辺側の前面および後面について、中央・左側・右側の三箇所の高さ方向に 4mm ピッチでポイントマイクロメータにより板厚測定を行い、寸法精度を評価した。また、スラグの流動の均一性を調べるために、成形品長辺側の前面および後面について、成形高さ成形により側壁に移動して現れたスラグ底面側の稜線 (以降、エッジラインと称す) の位置を測定した。

2.3 リング圧縮試験

ステアリン酸亜鉛の潤滑特性を調べるためにリング圧縮試験を行った。試験にはサーメックマスタ Z (富士電波

(a) Motion-1 and motion-2

(b) Pulse-1 and pulse-2

Fig. 2 Various slide motion patterns used in this study

工機㈱製, FTZ-203A) を用いた。試験片は外径 18mm, 内径 9mm, 高さ 6mm の純アルミニウム材とし、スラグと同様にガラスビーズによるブラスト処理を行った後、全面にステアリン酸亜鉛をタンブラリングして潤滑処理を行った。試験速度は、ひずみ速度 $0.1s^{-1}$ および $10s^{-1}$ の 2 条件、また、インパクト成形中の加工発熱によるスラグ温度の上昇を考慮して、試験温度は室温 ($25^{\circ}C$)、 $50^{\circ}C$ 、 $75^{\circ}C$ 、 $100^{\circ}C$ 、 $125^{\circ}C$ 、 $150^{\circ}C$ 、 $175^{\circ}C$ の 7 条件とした。試料の昇温は、試料の上下に接触させて配置した SKH53 相当のプレート ($\phi 30mm$, $t=10mm$) を所定の温度にした後、30 秒保持することで行った。なお、試験は各条件において 3 回ずつ行った。

3. 実験結果

3.1 板厚の測定結果

Fig. 3 に motion-1 および motion-2 のスライド条件での成形品の板厚測定結果を示す。高さ方向の板厚の標準偏差が 0.01mm 未満のものを良品、0.01mm 以上のものを不良品と判断した。測定結果はそれぞれの条件における 10 回の実験での一例であるが、同一条件でも良品 ((a)・(c))、不良品 ((b)・(d)) が成形された。良品では成形品の軸方向や同一高さにおける板厚の差が小さく、不良品では成形品の底部ほど前面と後面の板厚の差が顕著に現れた。成形品の底部ほど、正面では板厚が減少し、背面では増加することから、パンチの曲がりにより板厚変化が生じたと考えられる。なお、motion-1 および motion-2 とともに、10 回の実験中 3 回が良品であった。また、高さ方向の板厚のばらつきを 10 回の実験での標準偏差により調べたところ、motion-1 では 0.014mm, motion-2 では 0.020mm であり、motion-1 の方が、

(a) Acceptable (motion-1)

(b) Unacceptable (motion-1)

(c) Acceptable (motion-2)

(d) Unacceptable (motion-2)

Fig. 3 Distributions of wall thickness when using link motion

高さ方向の板厚のばらつきが小さいことがわかった。

3.2 パンチひずみの測定結果

同じスライド条件において板厚分布に違いが生じた原

(a) Acceptable

(b) Unacceptable

Fig. 4 Strain curves in punch (motion-1)

因について調べるために、パンチひずみの測定を行った。

Fig. 4 に良品と不良品の成形時のパンチひずみの推移を示す。図より、ストローク 1.0~1.8mm 付近の成形初期のひずみ値は、良品では4枚のひずみゲージ間の差が小さく、不良品では差が大きいことがわかる。また、ストローク 4.0~8.0mm 付近の成形後半においても、良品では各ひずみゲージ間の差が小さく、不良品では差が大きいことがわかる。Fig. 3(b)および同図(d)に示したように、不良品では成形品の底部に近づくほど、長辺側の前面と後面の板厚差が大きくなったが、この原因は成形後半のひずみ値の差、つまりパンチの座屈方向の弾性ひずみが増大した結果と言える。なお、10回の実験とも同様の傾向を示した。

4. 考察およびスライドモーションの検討

4.1 不良品発生原因

高さ方向の板厚のばらつきは、motion-2 と比較して motion-1 の方が小さいが、その原因を、潤滑剤に使用したステアリン酸亜鉛の潤滑特性を調べることで検討した。Fig. 5 にリング圧縮試験の結果を示す。 $\dot{\epsilon}=10\text{s}^{-1}$ 、 $\dot{\epsilon}=0.1\text{s}^{-1}$ の条件とともに、試験温度が上昇するほど摩擦係数は低下することがわかる。また、摩擦係数は、 $\dot{\epsilon}=10\text{s}^{-1}$ では、高速での圧縮のため、試験片のひずみによる加工発熱が若干ではあるが影響するものの、低速に比較して高いことがわかる。インパクト成形初期のスラグ温度は室温であるため、高速での成形条件の方が摩擦係数は高いと言える。つまり、成形初期では motion-1 の方がパンチスラグ間の摩擦力は大きく、そのため、パンチ先端の座屈方向のずれを抑制で

Fig. 5 Effect of test temperature on coefficient of friction

Fig. 6 Relationship between normalized wall thicknesses and normalized strains in punch (stroke 1.0mm~1.8mm)

きたと考えられる。また, motion-1 は高速での成形であることから, 成形後期にはスラグ温度が高くなり, 摩擦係数は低くなる。それにより, 加工荷重が低くなり, パンチの弾性ひずみが抑えられ, motion-1 では高さ方向の板厚のばらつきが小さくなったと考えられる。

次に, パンチひずみの測定結果から, 不良品の発生メカニズムを検討した。成形後半の各ひずみゲージ間のひずみ値の差は, 成形初期のひずみ値の差が根本的な原因と考え, 各条件 10 回の実験結果における板厚のばらつきと成形初期のひずみ値の関係を調べた。Fig. 6 に結果を示す。なお図中の基準化 (normalized) とは, 板厚 t (あるいは, パンチひずみ) および板厚の平均値 $\bar{t}$ (あるいは, パンチひずみの平均値), 標準偏差 σ として, ばらつきを無次元化した基準値 Z を, $Z = (t - \bar{t}) / \sigma$ で表わしたものである。図より, 成形初期のパンチひずみのばらつきと成形品の板厚分布に一定の相関があることがわかり, スライドモーション制御により成形初期のパンチひずみのばらつきを抑制できれば, 成形品の板厚分布を改善できると考えられる。

成形初期の各ひずみゲージ間のひずみ値の差は, パンチとスラグの衝突時の不安定性が影響すると推定し, ハイスピードカメラによりパンチとスラグの衝突時の観察を行った。衝突直後の様子を Fig. 7 に示す。図より, パンチとスラグの衝突直後に潤滑剤がダイから噴出している様子がわかる。これは, Fig. 8 に示すように, 衝突直後にダイとスラグに囲まれた領域の空気が高圧になり, わずかな隙間から噴出したと推測される。よって, この空気の噴出時にスラグが不安定に動き, 寸法精度を悪化させたと考えられる。

Fig. 7 Behavior of lubricant when the punch first contacts the slug

Fig. 8 Illustration of a failure mechanism

4.2 スライドモーション制御による板厚の高精度化

以上のことから, Fig. 2(b)に示したサーボプレス特有のスライドモーションを設定した。pulse-1 は, ストロークを均一に三分割したタイミングでパンチを引き上げることで, パンチ初期およびストローク全域における曲げ方向ひずみを軽減することを目論んだ。pulse-2 は, 成形初期のパンチの曲げ方向のひずみを小さくするために, パンチとスラグの衝突を緩和し, ダイ内の空気が高圧になることを防ぐことを目的に設定した。具体的には, スラグがダイに充満するまで小刻みにスライドを下降させ, その後, 成形初期においてパンチとスラグの摩擦力を高めるため, パンチを大きく後退させた後に高速でスラグに衝突させるモーションとした。

各条件での成形品の高さ測定の結果を Fig. 9 に示す。図より, 前面と背面の高さのばらつきは motion-2 が最も大きく, pulse-2 において最も小さいことがわかる。特に, エッジラインの高さの前面と背面の差が, pulse-2 で顕著に低く, スラグの流動を前面と背面で均一にできることがわかった。

次に, pulse-1 および pulse-2 の成形品の板厚分布の一例を Fig. 10 に示す。両スライド条件においても, 高さ方向の板厚の差は小さく, どちらも良好な成形であるものが多く確認できた。なお, pulse-1 では 10 回の実験中 5 回が良品で, pulse-2 では 8 回が良品であった。10 回の実験結果において, 各スライドモーションでの板厚のばらつきを標準偏差によりまとめた結果を Fig. 11 に示す。pulse-1 および pulse-2 では板厚のばらつきが低減し, 特に, 成形初期のパンチひずみ抑制を試みた pulse-2 では, 極めて板厚のばらつ

Fig. 9 Heights formed using different slide motion patterns

Fig. 11 Standard deviation of wall thickness using different slide motion patterns

(a) Pulse-1

(b) Pulse-2

Fig. 10 Distributions of wall thickness when using pulse motion

きが小さく、良好な結果が得られることがわかった。

5. 結 言

角筒インパクト成形について、板厚精度に及ぼす成形速度の影響を調べ、パンチひずみの計測やハイスピードカメラによる観察を行って、板厚精度を悪化させる原因を調べた。また、サーボプレスのスライドモーション制御を活用

して、板厚分布のばらつきを抑制するモーションについて検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 低速で成形した場合と比較して、不良率は同程度であるが、高速で成形した場合の方が、板厚のばらつきは小さくなった。
- (2) 成形不良の原因となる曲げ方向のパンチひずみの発生は、パンチがスラグに衝突する際に、スラグが不安定に動くことに起因する。
- (3) 成形初期においてスラグがダイに充满するまでの間に、パンチの進行・後退を繰り返すパルス成形を行うことで、パンチの曲げ方向の弾性変形を低減でき、成形品の板厚精度を高めることができた。

本研究は、日本塑性加工学会の塑性加工技術振興事業基金「研究助成基金」若手研究者研究助成により行われたことを付記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 久野修・久野功雄・岩尾潔・福安雄一・水谷豊：素形材, **52-12**(2011), 14-19.
- 2) 渡辺翼・本村貢・萩原明夫・小西玄太：軽金属, **62-10**(2012), 363-369.
- 3) 楊明・西村尚：塑性と加工, **55-645**(2014), 897-901.
- 4) Osakada, K., Mori, K., Altan, T. & Groche, P.: CIRP Annals - Manufacturing Technology, **60**(2011), 651-672.
- 5) 四宮徳章・白川信彦：塑性と加工, **54-629**(2013), 542-546.
- 6) 四宮徳章・白川信彦：日本機械学会論文集 A 編, **79-804**(2013), 1107-1111.
- 7) 安藤弘行：プレス技術, **47-12**(2009), 27-31.
- 8) Ishikawa, T., Ishiguro, T., Yukawa, N. & Goto, T.: CIRP Ann., **63**(2014), 289-292.
- 9) Matsumoto, R., Jeon, J. & Utsunomiya, H.: J. Mater. Process. Technol., **213**(2013), 770-778.