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

渡辺 翼*・本村 貢**
萩原 明夫***・小西 玄太***

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 62, No. 10 (2012), 363–369
© 2012 The Japan Institute of Light Metals

Investigation on defects generation mechanism and method for reducing defects in impact extrusion of battery cases for vehicles

Tsubasa WATANABE*, Mitsugu MOTOMURA**
Akio HAGIWARA*** and Genta KONISHI***

The cases of the Li-ion batteries mouthed in EV (Electric Vehicles) and FCV (Fuel Cell Vehicles) are conventionally produced by multistage deep drawing. This forming process requires a large number of stages and is expensive. In this study, cold backward (impact extrusion) was adopted since it has very high productivity comparing to conventional process. However, the defects, such as cracks, distortion and uneven thickness will arise in produced cases. The generation mechanism and how to deal with those defects were investigated in this paper. From the experimental results, it was assumed that bending and twisting elastic deformation of dies are cause of the defects. It was found that the case of the deformation is in the heterogeneity state of the lubrication. The punch bottom geometry which can minimize the influence the heterogeneity of the lubrication in the last phase of forming was investigated. In order to reduce the wear of lubricant at high reduction of area, lubricant and surface treatment were also investigated.

(Received January 16, 2012 Accepted July 20, 2012)

Keywords: impact extrusion, backward extrusion, battery case, 3003 aluminum alloy, restunglar case

1. 緒 言

近年、CO₂排出量の少ないEV（電気自動車）やFCV（燃料電池自動車）が注目されている。EVやFCVには充電電池としてLi-ionバッテリーが多く用いられており、今後生産量が増加するものと考えられる。従来そのLi-ionバッテリーのケースは多段深絞り加工にて作製されているが¹⁾、多工程、高コストであり、代替加工法として冷間後方押出加工（インパクト加工）があげられる。インパクト加工は材料であるスラグを、300mm/s程度の高速度で後方押出することにより円筒ケースや矩形ケースを一度に成形することのできる加工法である。円筒形状に関してはすでに多くの製品に適用されているが、矩形形状の場合押出後のケースに割れやゆがみおよび偏肉などの欠陥が生じやすく歩留まりが低下しやすい。そこで本報告ではインパクト加工で作製したケースの肉厚分布や、DEFORM^{TM}3Dを用いた弾性FEM解析を行うことにより、欠陥の発生メカニズムの解明と改善方法の調査を行う。

2. ケース欠陥発生メカニズムの解明

ケース欠陥の発生メカニズムについて実験結果から推定し、解析にてその確認を行った。

2.1 ケース外観と肉厚分布

2.1.1 実験方法

実製品の成形荷重は600MPa以上となるため本研究では実製品のモデルケースとして、外形寸法15.8×79mm、肉厚0.7mmの3003アルミニウム合金製ケースをパンチ速度300mm/s程度のインパクト加工により作製する実験を行った。パンチ・スラグ・ダイスの概要図と寸法をFig. 1, Table 1に示す。パンチ材質にはSKH51を用いた。ダイスは側面部を構成するダイリングと底部を構成するダイボトムに分割され、ダイリングには超硬合金を、ダイボトムにはSKD61を用いた。またダイリングは補強のためにφ115の補強リングで締め代0.02mmの焼ばめを行った。ワークであるスラグはHazzlet連続鋳造機にて鋳造した板材を圧延後、打抜きによ

* 早稲田大学大学院基幹理工学研究科機械科学専攻大学院生（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）。Graduate Student, Major in Mechanical Science, Graduate School of Fundamental Science and Engineering, Waseda University (3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555).

** 早稲田大学理工学術院基幹理工学部機械科学・航空学科、早稲田大学各務記念材料技術研究所（新宿区）。Department of Applied Mechanics and Aerospace Engineering, School of Fundamental Science and Engineering, Waseda University, Kagami Memorial Laboratory for Materials Science and Technology (Shinjuku-ku, Tokyo).

*** 日本圧延工業(株)（東京都）。Nihon Aluminum Rolling Co., Ltd. (Minato-ku, Tokyo).

Fig. 1 Outline of dies and slug.

り作製している。また熱処理としては成形荷重低減のために析出を促進させる $600^{\circ}\text{C}-16\text{h}+450^{\circ}\text{C}-16\text{h}$ の2段均質化処理を行った²⁾。スラグの潤滑処理として、エアブラストによる $12\mu\text{m Ra}$ 程度の均一な表面粗さ付与後、タンブリングにて潤滑処理を行った。潤滑剤には従来インパクト加工に頻繁に用いられるステアリン酸亜鉛 (Zn-St) に加えて、近年潤滑性能が良好であると示唆されているステアリン酸アルミニウム (Al-St) も使用し、潤滑膜厚は $15\mu\text{m}$ ほどに制御した。またスラグ高さが高いほどケース作製が困難になるため、スラグ高さを3種類用意し、どの高さまでケース作製が可能であるかも調査を行った。

2.1.2 結果と考察

ケース高さ、潤滑剤の影響は後述する。ここではケース欠陥の分類とケース肉厚分布について述べる。ケース欠陥は割れとゆがみであり、それぞれ Fig. 2 のような特徴が観察された。割れ欠陥に関しては、ケース長辺下部の片方がすべて割れる「片側全面での割れ」とケース長辺下部の対角の隅で割

Table 1 Dimensions of dies and slug in an experiment and analysis

	W	L	R, r	C	W_s	L_s	h_s
Dimension (mm)	15.8	79.0	1.0	0.7	15.6	78.8	8, 11, 14

Aspect ratio 1 : 5   Reduction in area 89.3%

Single-sided crack   Diagonal corner crack
(a) Crack defect (two categories)

Bulging distortion   Sunken distortion   Wavy distortion   Twisted distortion
(b) Distortion defect (four categories)

Fig. 2 Picture of case defect.

れる「対角隅割れ」の2種類があった。またゆがみ欠陥に関してはケース長辺中央部が膨らむ、もしくは凹む「太鼓型」、「鼓型」と、波打つようにしわが発生する「波打ち型」、上部からみるとケースがねじれてゆがんでいる「ねじれ型」の4種類が観察された。これらの発生原因を調査するために、ケースの長辺を正面側と背面側に分けて肉厚を測定した。測定箇所と測定値をFig. 3に示す。なお測定には従来配管腐食検査に用いられる高精度超音波厚さ計を使用した。測定値は

Fig. 3 Measurement value of wall thickness (mm).

Fig. 4 Distribution of wall thickness.

Fig. 5 FEM analysis conditions.

正面側を実線、背面側を点線、また対応する線を同色として肉厚分布グラフを作成し、Fig. 4に示す。肉厚分布は大きく2種類の傾向があり、1つはFig. 4(a)のような片側全面割れ発生ケースの肉厚分布であり、ケース下部に進むに従って正面側で減肉、背面側で増肉の傾向が大きくなっている。また割れの発生箇所は減肉箇所に一致している。もう1つはFig. 4(b)のような対角隅割れ発生ケースの肉厚分布であり、ケース下部に進むに従って正面右と背面右で減肉、正面左と背面左で増肉しており、中央では増減肉が比較的少なくなっている。これらの分布から、パンチのたわみやねじれ型の弾性変形が起きていると推定される。円筒缶インパクトの場合でも高成形荷重のために製品寸法が金型弾性変形により規定通りにならないことが報告されている^{3)~6)}。本報告のような矩形形状のパンチの場合は金型の圧縮や膨張型の弾性変形に加えて、このような変形が生じやすいと考えられる。

2.2 パンチ変形再現解析

インパクト加工では断面減少率が90%に達することもあるため、成形後期において潤滑切れすることが問題になりやすい。先述したパンチの変形も成形後期における不均一な潤滑切れが原因であると推定し、その状態を解析で再現し、変形が起こりうるかどうかFEM解析にて調査した。

2.2.1 解析方法

DEFORM^{TM}3Dを用いて解析を行うにあたり、変形抵抗

Table 2 Displacement of punch in analysis result (flat punch)

	Stroke x (mm)				Displacement Y (mm) Color bar
	0.0	2.33	4.66	7	
Displacement of punch					0.00
					-0.04
					-0.08
					-0.12
					-0.16
					-0.20

データを得るための冷間・温間圧縮試験および摩擦係数を調査するためのリング圧縮試験を行った。リング圧縮試験片寸法は外形15mm、内径7.5mm、高さ5.0mmである⁷⁾。摩擦係数はZn-Stでせん断摩擦係数 $m=0.12$ 程度であり、一般的な鍛造で頻繁に用いられるグラファイト (Gr) は $m=0.18$ 程度であった。解析モデル、摩擦状態をFig. 5に示す。パンチねじれも同様に解析を行ったが、本報告では発生頻度が高いと思われるパンチたわみについて示す。パンチたわみを再現するためにパンチを弾性体、ダイスを剛体、スラグを剛塑性体とし、形状はすべて1/2モデルとした。スラグは圧縮試験での変形抵抗を用いるが、パンチに関してはDEFORM内のSKD11のデータを使用する。インパクト加工の特徴としてダイス側よりもパンチ側での表面拡大率大きいことが挙げられる^{8),9)}。そこでパンチを2分割し片側をZn-Stの摩擦係数 $m=0.12$ とし、もう片側をZn-Stに比べて若干高いGrの摩擦係数 $m=0.18$ とした摩擦不均一状態を構築した。解析時間の短縮のためにスラグ高さは8.0mmとした。

2.2.2 結果と考察

解析結果としてパンチのY方向変位量をTable 2に示す。パンチ先端部に向かうほどパンチの変位量(変形量)は大きくなっており、摩擦係数の高い方向へたわみが発生している。ここでは割愛するがパンチねじれに関しても同様に摩擦係数の高い方向、すなわち材料が流動しにくい方向に変形している。これは摩擦不均一状態によりパンチランド部に流入する量が不均一になりパンチが力を受けるためと考えられ、この解析により摩擦不均一状態がパンチ弾性変形の要因になりうる事が示された。

3. ケース欠陥の改善

先述した通り、ケース欠陥の原因はパンチ弾性変形の影響であると考えられ、その弾性変形はインパクト加工特有の高成形荷重と成形後期で潤滑切れによる摩擦不均一状態が発生することが原因であると推定された。そこで欠陥の改善を目指し以下の2種類の対策を試みる。

(1) パンチ底面に溝形状を付与し摩擦不均一状態を緩和(底面溝付きパンチの使用)

(2) 表面処理により摺動性を改善し、潤滑切れと成形荷重低減(金型表面粗さ付与)

3.1 底面溝付きパンチ

Fig. 6に本研究で用いる底面溝付きパンチを示す。溝の寸法は深さ1.0mm、幅2.0mmでありR0.5の面取りを行っている。底面溝付きパンチの作製前の評価方法として先述したパンチ摩擦不均一解析を底面溝付きパンチに対しても行い、効果確認後、実験に使用した。

3.1.1 解析結果と考察

Table 3に解析結果としてパンチ変位量を示す。パンチ変位量は、従来のパンチ(フラット)と比較して少ないことが確認できる。溝形状の効果としては溝形状付近にて流動しづらいデッドメタルを形成して、材料流動の中心を矯正することが挙げられ、結果としてパンチ変形量が抑制されると推定される。この底面溝付きパンチを用いて実験を行った。なお実験方法は先ほどと同様である。

3.1.2 実験結果と考察

実験結果として良品ケース作製率をTable 4に、スラグ高

Fig. 6 Punch with groove geometry in the bottom.

Table 3 Displacement of punch in analysis result (punch with groove)

Table 4 Formability for different punch shape

		Flat punch		Punch with a groove	
		Zn-St	Al-St	Zn-St	Al-St
Slug height, h_s (mm)	8.0	○	○	◎	◎
	11.0	△	○	○	○
	14.0	×	×	○	○

◎: 80% non crack and non distortion, ○: 80% non crack, △: 50% non crack, ×: 80% crack

さ11.0mmのケース肉厚分布をFig. 7に示す。結果としてスラグ高さ8.0mmと11.0mmでは底面溝付きパンチを用いることで良品ケースが作製可能となり、肉厚分布を比較しても明らかに偏肉が減少している。またスラグ高さ14.0mmにおいても割れの発生が抑制され、溝形状がパンチたわみを抑制する効果を有することが示された。

Fig. 7 Distribution of wall thickness.

Fig. 8 Surface photographs observed by microscope.

3.2 金型表面粗さ付与（MKS処理）

ブラスト処理の1つであるMKS処理を用いて潤滑性能の向上を目指し、金型に表面粗さ付与をした実験を行った。

3.2.1 MKS処理について

従来金型表面は摺動性向上を目的として、滑らかにすることが念頭に置かれていた。ワークに関しては表面を荒らすことによる潤滑ダマリ（Lubricant pool）の形成促進などの理由から表面粗さを大きくすることは有用性が高いことが証明されている。しかし金型に粗さを付与するという考え方は研究段階にとどまり、実用化されているケースは少ない。文献などには金型表面に粗さが付与されると金型にギザギザの凹凸ができ、それにより潤滑層が破壊しやすくなってしまい潤滑切れを促進するので適さないと報告されている^{10),11)}。しかし近年金型表面に微細かつ滑らかな凹凸を付与し、接触面積の減少と潤滑剤の封入、ベアリング効果を狙ったMKS処理という表面処理技術が開発され、潤滑性能が向上したと報告されている¹²⁾。本研究においても摺動性向上と潤滑切れ抑制を狙い実験にてパンチとダイスに使用した。金型表面の粗さは処理前（ラッピング）で $0.1\mu\text{mRa}$ に対して、処理後では $0.6\mu\text{mRa}$ 程度である。それぞれの金型表面拡大写真をFig. 8に示す。なお詳細なブラスト方法などは企業秘密となっている。

Table 5 Measurement items for evaluating lubricous performance

Lubrication	Measurement item			Lubrication
Bad ←	Glossy	Appearance gloss	Lusterless	→ Good
	Small	Surface roughness	Large	
	Large	Load	Small	
	Thick	Bottom thickness	Thin	
	Low	Case height	High	
	High	Earring height	Low	

3.2.2 結果と考察

良品ケース作製率に加えて、潤滑状態の評価も行う。本研究のインパクト加工における潤滑状態が影響を及ぼすケース測定項目をTable 5に示す^{13),14)}。潤滑性能がよければ表面にLubricant poolが形成されるため光沢はなくなりやすく表面粗さは大きくなる。また成形荷重は他の鍛造と同様に潤滑が良好であれば低い。底厚に関しては弾性変形や、材料の流れ

Fig. 9 Load and bottom thickness.

Table 6 Formability for different surface conditions of punch with groove

		Lapping		MKS treatment	
		Zn-St	Al-St	Zn-St	Al-St
Slug height, h_s (mm)	8.0	◎	◎	◎	◎
	11.0	○	○	◎	◎
	14.0	○	○	○	◎

◎: 80% non crack and non distortion, ○: 80% non crack, △: 50% non crack, ×: 80% crack

Slug height h_s 8(mm)   Slug height h_s 11(mm)   Slug height h_s 14(mm)
Case height h_c 60(mm)   Case height h_c 90(mm)   Case height h_c 120(mm)

Fig. 10 Bird's-eye view of the produced case.

やすさなどから、潤滑が良好であれば薄くなり、同時に押出された体積量が増加するためにケース高さは高くなる。また長辺における耳高さ（長辺と短辺でのケース高さの差）は矩形形状では必ず生じる。これは長辺方向への材料流動と短辺方向への材料流動に差が存在するために発生する。すなわち長辺に材料は流れやすく、その傾向はケース長辺の中央部ほど顕著であり、そのために流動が多い中央部で耳のような形状を生じる。これらの測定項目の中で特に潤滑状態の傾向が表れやすいのはケース成形荷重とケース底厚であるため、こ

れらを用いてMKS処理の効果を検証する。

良品ケース作製率をTable 6に、荷重と底厚についてZn-StとAl-StそれぞれをFig. 9に示す。MKS処理によりAl-Stのスラグ高さ14.0mmで良品のケースが作製可能となり、摺動性改善の効果が観察された。作製された良品のケース外観をFig. 10に示す。Fig. 9ではラッピングのみの場合、スラグ高さ8.0mmと11.0mmの間での差は少ないが、スラグ高さ11.0mmと14.0mmの間で大きな差が生じている。これは11.0mmと14.0mmの中間領域から潤滑切れが起きているためである。MKS処理を用いた場合では特にスラグ高さ14.0mmの成形荷重と底厚の低下が大きく、潤滑切れ抑制効果が確認された。またAl-StとZn-Stを比較すると従来用いられていたZn-Stに比べてAl-Stの方が低く、潤滑性能が良好であることがわかる。この違いについての詳細はまだ解明していない。それぞれの融点はZn-Stで $120 \pm 5^\circ\text{C}$ 、Al-Stで $110 \pm 10^\circ\text{C}$ である。またインパクト加工時の加工発熱は、解析により 160°C 程度に達するということが明らかになっている。このことからインパクト加工時は、加工発熱によりどちらも液体状態になっており、液体状態の粘性の違いがこのような差をもたらすと推定される。

4. 結 言

矩形形状を有するインパクト加工の欠陥発生メカニズムと欠陥改善方法について実験と解析を実施して研究を行った結果、以下の知見を得た。

(1) 作製したケース肉厚分布と解析により明らかになった摩擦不均一状態に起因するパンチの弾性変形がケース欠陥の主要因であることがわかった。

(2) 潤滑不均一性の影響を緩和する底面溝付きパンチにより良品ケース作製率が向上し、パンチ弾性変形抑制効果が見られた。

(3) 従来の概念と異なるMKS処理により成形荷重低減と潤滑切れ抑制効果が得られ、成形性が向上した。

(4) 従来用いられていたZn-Stに比べてAl-Stの潤滑性能が良好であることが示された。

(5) パンチ改良と金型表面粗さ付与により、スラグ高さ14.0mmでケース高さ120mmの割れ・ゆがみのない良品ケースの作製が可能となった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、共同研究としてご協力頂きました

日本圧延工業株式会社の皆様に厚く御礼を申し上げます。

また様々な助言および助力を頂きました川村化成工業株式会社 澁谷 卓氏, 住鋳潤滑剤株式会社 石橋 格氏, 株式会社不二製作所 大石 隆夫氏に深甚なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土田 信, 田中宏樹: 住友軽金属技報, **31-4** (1990), 40-54.
- 2) 村田 等, 山中雅樹, 富田賢二, 坂口雅司: 軽金属学会第91回秋期大会講演概要, (1996), 217-218.
- 3) Y. S. Lee, J. H. Lee and Y. N. Kwon: Journal of Materials Processing Technology, 153-154 (2004), 1081-1088.
- 4) J. Danckert: CIRP Annals, **53-2** (2004), 227-230.
- 5) T. Ishikawa, N. Yukawa, Y. Yoshida, H. Kim and Y. Tozawa: Annals of the CIRP, **49-1** (2000), 169-172.
- 6) 石川孝司: 天田金属加工機械技術振興財団研究概要報告書・国際交流報告書, No. 23 (2011), 30-34.
- 7) C. H. Lee and T. Altan: Journal of Engineering for Industry, (1972), 775-782.
- 8) R. K. Uyyuru and H. Valberg: Journal of Materials Processing Technology, 172 (2006), 312-318.
- 9) N. Kawai, H. Saiki and T. Nakamura: Journal of Engineering Materials and Technology, 106-3 (1984), 257-263.
- 10) N. Bay and B. E. Christophersen: Advanced Technology of Plasticity, Vol.II (1987), 917-923.
- 11) K. H. Jung, H. C. Lee, S. H. Kang and Y. T. Im: Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 31, Issue2 (2008), 327-334.
- 12) 勝又章議: 型技術, **25-6** (2010), 41-44.
- 13) G. Shen, A. Vedhanayagam, E. Kropp and T. Altan: Journal of Materials Processing Technology, **33** (1992), 109-123.
- 14) S. H. Kim, S. W. Chung and S. Padmanaban: Journal of Materials Processing Technology, Vol. 180, No. 1-3 (2006), 185-192.