

切削鍛造法の開発

Z. Wang

王 志剛*

キーワード:塑性加工,板鍛造,荷重低減

1. 研究の背景と目的

板鍛造技術は中厚板材に深絞りなどの板成形工法と据 込みや押出しなどの冷間鍛造工法を併用し、切削仕上げと 同程度の形状および肉厚精度をもつ製品の製造技術とし て、国内では広く使われており、海外のキャッチアップも 活発である¹⁾. 国際冷間鍛造グループの年次大会 ICFG2014, ICFG2016 および ICFG2017 では板鍛造が中心的なトピッ クスとして扱われ、欧州や中国からの論文の数が増えてい る²⁾⁻⁴⁾.

板鍛造に適した製品形状は、シャープエッジ、半抜き部 位をもつ平面形状、絞り品をベースとするカップ形状など を挙げられ、精密せん断品を除けば、ほとんどカップ形状 である⁵⁾.複雑な形状を成形しようとすると、大きな材料 流動を発生させる必要があり、工具圧力が過大となりやす い⁶⁾. このため、板鍛造は現状では、複雑形状、直径と板 厚比の大きい形状および高強度材の成形が困難である.

板鍛造の適用範囲を広げるためには,低い加工圧力で被 加工材を流動させる成形原理の開発が不可欠である.精密 鍛造の加工終期では,被加工材は広範な領域において金型 と接触し,複雑な変形が引き起こされ,工具圧力が極端に 大きくなる.

単純な変形モードで加工の目的を実現する加工法とし て、図1(a)に示すせん断加工がある.せん断加工では2つ の工具の刃先間の線上ABでせん断変形が生成され,塑性 ひずみの蓄積によって最終的に分離が実現される.同様の せん断変形モードは,金属の切削加工にも見られる.図 1(b)に示すように,切りくずはA点とB点の間のせん断 変形によって生成されるが,変形後の材料はせん断変形領 域ABから移動するため塑性変形の蓄積はなく,被削材の 材質と切削条件によっては連続した切りくずが生成され る.

本研究では、鍛造荷重と工具圧力を低減させるために、 金属切削の変形モードを鍛造加工に適用することを試み る.適用例として、絞り-しごきで作製したカップの一部 を動かし、断面が H 型のダブルカップやフランジ付き有 底カップの成形について調べる.



2. 切削モードによる鍛造の基本概念と力学

切削モードを用いる鍛造方法(以降,切削鍛造と呼ぶ)の概念を,図2(a)に示す軸対称モデルを用いて説明する. 上端が固定された被加工材を下側パンチが速度 V で上方 に移動して切削する.切削除去された材料は切りくずと同 様にウェブに流れ込む.せん断面 AB 上でせん断変形を生 じ,図2(a)の速度線図からせん断による相当ひずみ ε は次 式によって算出される.

$$\varepsilon = (\tan \varphi + \cot \alpha \varphi)/\sqrt{3} \tag{1}$$

被加工材のせん断変形抵抗をk,切込み深さをto,切りく ず厚さをtc,パンチの直径をdとすると,加工に必要なエネ ルギーからパンチ圧力pは次のようになる^の.

$$\frac{p}{2k} = \frac{4t_c(\tan \varphi + 0.5\cos^{-2}\varphi)}{d(1 - \mu \tan \varphi)} = 4t_c/d \ f(\varphi)$$
(2)

通常, $\tan \varphi$ は 0.1-1.0, μ は 0.1-0.3 の範囲内にあり, $p/2k = (3\sim12)t_c/d$ となる. さらに、 t_c/d の常用範囲は 0.01-0.1 であり、p/2k は 1.0 より小さい.



3. シミュレーションによる成形方法の検討

3.1 シミュレーションの条件

切削鍛造が可能な範囲を図 3 の軸対称モデルのシミュ レーションで調べた. 被加工材は SPCC 軟鋼板とし,変 形抵抗曲線をσ=Cɛnで近似し, C=501MPa, n=0.24 と した. Cを変形抵抗の代表値とする. 背圧を ps/C=0.005-0.05, 摩擦係数を 0.1-0.5 の範囲で変化させた.

3.2 工具圧力

カウンターパンチにより pd C = 0.005 の背圧を加えて 切削鍛造するときの H 字型ダブルカップの成形工程を図 4(a), (b) に示し,加工中のパンチ圧力の変動を(c)に示す. 図 4(a)における点 A, B および C は, 図 4(c)の同じ記号の 位置に対応する.上下パンチの角の間のせん断変形によっ てカップ状素材の底部は上方に動かされてウェブになる. ウェブはほぼ平坦に保たれ,シミュレーションの条件内で バルジ変形は発生しない.図 4(b)のようにウェブ厚さはカ ウンターパンチの角でわずかに薄くなり,ウェブの厚さが 薄い領域はパンチストロークの増加とともにカップ中心 に向かって広がる.





図4 切削鍛造の成形過程⁷⁾

図4(c)のようにパンチ圧力は初期に急激に上がる.パン チストロークが大きくなるとせん断領域がパンチの縁に 達する B 点からは圧力上昇は緩やかになる.図4(d)に示 すように、ウェブの厚さは直線的に増加し、カウンターパ ンチの角部のウェブの厚さが中心付近よりも小さいため、 体積一定と仮定した予測結果よりもわずかに大きくなる.

図 4 の条件では、 $\tan \varphi$ は 0.425、せん断変形による相 当ひずみ ε は 1.6、せん断変形抵抗 kは 323.8MPa で、式 (2)から p = 90.7 MPa、 $p + p_b = 94.2$ MPa と予測される. この値は、図 4(c) のシミュレーション結果である 94.5 MPa (p/C = 0.19)とほぼ同じ大きさである.

図 5 にウェブ形状に及ぼすカウンターパンチによる背 圧の効果を示す.背圧が10倍変化しても製品形状の変化 はほとんど認められない.

図 6 に示すように、切込み深さ to が増すとパンチ圧力が 高くなるが、切込み深さ to が 0.5tco であってもパンチ圧力 p/C は 0.3 以下である.



図 6 パンチ圧力に及ぼす切込み深さの影響 (シミュレーション)⁷⁾

3.3 材料の動き

鍛造中の材料流れを調べるために,被加工材の内壁面, 底面の下面,パンチの移動経路上の数点をトレースする. 図7に示すように,鍛造の進行に伴い,被加工材の内壁面 上の点はウェブの上面に移動し,パンチの移動経路上の点 はウェブの下面にシフトする.大きな塑性ひずみが,ウェ ブの材料に残されている.切削による加工硬化は,ウェブ の耐圧性などの製品強度に影響を与える可能性がある.



図7 切削鍛造中の材料の動き7)

3.4 ひけ欠陥

図4に示すように、カウンターパンチの角でウェブの厚 さが小さくなり、この挙動がひけ欠陥を生じさせる.図8 は、ひけ欠陥の成長過程を示す.カウンターパンチの角半 径が大きい場合、切削開始時にカウンターパンチの角件近 で材料不足が発生する.初期せん断開始点の図中のaは変 形の進行とともに上パンチから離れて沈み込む.最大ひけ 深さは約0.2mmで、ウェブ厚さは約1/10である.ひけ欠 陥を防ぐために、切込みtoの深さは図9のように十分に大 きくする必要がある.ひけ欠陥を防ぐための最小の切込み 深さは次式によって与えられる.

| $t_0/t_{c0} = 0.068r_{cp} + 0.22$ | for $r_{cp} < 3.2$ | (\mathbf{a}) |
|-----------------------------------|----------------------|----------------|
| $t_0/t_{c0} = 1.6r_{cp} - 4.7$ | for $r_{cp} \ge 3.2$ | (3) |



4. 実験結果

実験には低炭素鋼(SPCC)の冷延板材を用いた. この材料の変形抵抗曲線は $\sigma = 501\epsilon^{0.24}$ MPa である. 図 10 は, 絞 りーしごきカップの切削鍛造後の垂直断面の形状である. 絞りカップの内側の角半径は,しごき加工により 0.1mm に整形されている.



図10 各成形段階後の被加工材垂直断面形状⁷⁾

図 11 は,パンチストロークによるパンチ圧力の変化で ある. FEM シミュレーションの摩擦係数が 0.17 の場合, 測定されたパンチ圧力はシミュレートされたパンチ圧力 と同じ大きさである.

図 12 は、せん断変形領域におけるファイバーフローを 示す. せん断変形は、パンチの刃先とカウンターパンチの 角部間の線上で生じていることが分かる. せん断変形領域 とウェブ形状は、図5 に示すシミュレーション結果に似て いる.

図 13 は、せん断変形領域周辺のビッカース硬さの分布 である. せん断された部分の硬さはカップの壁の2倍以上 である.





図13 せん断変形領域周辺のビッカース硬さ分布 7)

図14は、鍛造品の表面性状を示す.図14のA,B,C, Dは、図10に示す位置に対応している.ウェブの上面は 溝状の構造であり、ウェブの下面は鏡面で、切削加工の切 りくず表面と似ている.内壁面 D はパンチで強く平滑化 されているが、焼付きは生じていない.



図 14 切削鍛造品の表面状態 (to/tco = 0.55)⁷⁾

5. 切削鍛造のトライボ条件

切削鍛造において, 被加工材の動きと変形量は切削加工 と類似である.しかし, プレスによる切削鍛造の加工速度 はせいぜい 10~100 mm/s 程度で,切削加工と大きく異な る⁸⁾.

図 15 は切削鍛造による被加工材と工具の温度上昇の FEM シミュレーション結果である.FEM シミュレーショ ンの条件は前章の実験条件に合わせた.工具と被加工材間 の熱伝達係数を 40 kW/(m²K)とし,実験室の環境温度を 20℃とした.パンチ速度が 10 mm/s の場合,パンチ刃先の 温度は 70 ℃程度であるが,パンチ速度が 100 mm/s と大 きくなると,パンチ刃先の温度は 170 ℃に上昇する.しか し,切削加工の刃先のような高温にならず,温度上昇に起 因する潤滑・冷却・工具摩耗などの諸課題に関しては,切 削鍛造は切削加工よりも対処しやすいと考えられる.





図 15 切削鍛造による温度上昇

図 16 はパンチ刃先付近の圧力分布である. 切れ刃のご く狭い領域においてはかなり高い値となっており,工具材 料の耐圧強度と耐摩耗性に注意を要する.

また,図 14(d)の鍛造品表面にパンチによる掘り起し傷 が見られ,量産におけるパンチの耐焼付き性能が問題とな る可能性が高く,被加工材の材質に合うパンチ表面コーテ ィングを選択することが重要である.



図 16 パンチ刃先の接触圧力

6. 切削鍛造法の活用事例

上述したように, 絞り-しごきカップの底面は切削鍛造 によって自由に移動することができる. 被加工材の一部を 自由に移動させることができる切削鍛造法の特長を利用 することによって, 複雑形状の部品を簡易な工程で成形可 能となる.

図 17 のトリプルカップは大豊精機㈱の開発事例である. 切削鍛造法を用いて,カップの片側に中空軸をもつプリフ オームから中空軸を移動させて,カップ両側に軸をもつ形 状を成形している.

このように、切削鍛造法を塑性加工技術体系の中に組み 込むことにより、塑性加工技術の競争力が大幅に向上する. しかし、切削鍛造法は提案されて間もない新技術であり、 未解明な点が多い.力学的には切削加工との類似点が多い が、トライボロジー的にはかなり異なる.今後、材料学、 加工学、トライボロジーなど多くの側面からの比較研究が 進展されることを期待したい.



図17 切削鍛造によるトリプルカップ成形品 9)

7. 結言

鍛造荷重と工具圧力を下げるために「切削鍛造」と呼ば れる新しい鍛造方法を提案し, 絞り・しごきで作製された 鋼カップから断面が H 字型のダブルカップの成形に適用 した.

(1) 切削鍛造の工具圧力は, 被加工材料の変形抵抗の 1/2 以下と非常に低い.

(2) 切削鍛造により,深絞り・しごきカップの底面をカップの高さ方向に自由に移動できることを示した.

(3) ウェブの角のひけ欠陥を防ぐために,深絞り・しごき カップの底部厚さに対する切込み深さの比率は,しごきカ ップの角半径により決まる限界値よりも大きくする必要 がある.

謝 辞

本研究の遂行にあたり、公益財団法人天田財団の平成 29 年度重点研究開発助成 B をいただいた.ここに記して 深く感謝の意を表します.また、実験の遂行に岐阜大学助 教箱山智之氏、岐阜大学大学院修士課程生遠藤喜紀氏、伊 藤健司氏、日本学術振興会外国人特別研究員の董文正氏の 協力をいただいた.さらに実験結果の討議を通して、大阪 大学の小坂田宏造名誉教授、静岡大学の中村保名誉教授に 数多くの助言をいただいた.

参考文献

- 1) 西野創一郎ほか:プレス加工による板鍛造成形技術, 塑性と加工, 51-594(2010), 642-646.
- M. Merklein, et. al.: Plastic flow and its control in sheetbulk metal forming of thin-walled functional components, Annals of the CIRP, 64(2015), 245-248.
- T. Schiemann, et. al.: Mechanisms of fold formation during flange upsetting of tubular parts, AIP conference Proceedings, 1532(2013), 284-290.
- X.Y. Wang, et. al.: Stamping-forging hybrid forming of double layer cup with different wall thicknesses, Materials research innovations, 15(2011), S435-S438.
- 5) 中野隆志:板成形と鍛造の複合技術, 塑性と加工, 42-484(2001), 388-392.
- E志剛:板鍛造の技術要点,精密工学会誌,80-12 (2014),1049-1052.
- 7) Z.G. Wang, et. al.: Annals of the CIRP, 68 (2019), 273-276.
- T.H.C. Childs, et. al.: Metal machining -Theory and applications, Elsevier Ltd, (2000), 247.
- 高橋智正ほか:中空軸付きカップ部品のシンプル工 法の開発,素形材, 63-1(2022), 15.