ドライアイス飛翔体による薄板の衝撃絞り*

(第1報, 飛翔体の運動エネルギーと衝撃絞り特性の関係)

田中 皓一^{*1}, 前川 慎司^{*2}, 大河内 禎一^{*1}

Shock Drawing of Thin Plates by Use of Dry-ice Projectiles (1st Report, Relationship between Kinetic Energy of Projectiles and Shock Drawing)

Koichi TANAKA, Shinji MAEKAWA and Teiichi OOKOUCHI

Considering that dry-ice is a pure solid material of carbon dioxide and easily sublimed, we intended to utilize it as a high-speed projectile for material processing such as deep drawing and forging of engineering materials. In this article, an experimental investigation is reported on the deep drawing of thin circular plates of stainless steel (SUS304) which are subjected to the direct impact of dry-ice projectiles. The relationship between the kinetic energy of the projectiles and the plastic deformation of the plates is discussed as the central topics.

Key Words: Impact, Dry-ice Projectiles, Shock Drawing, Stainless Steel, Plastic Deformation

1. 緒 言

塑性加工法の一つである深絞りでは高硬度のダイとポンチによる方法が一般的であり、極薄板材の深い絞りも行われているが、基本的には成形品形状が単純である。一方、高エネルギー加工法の一つとしての爆薬を用いた衝撃成形法は、比較的大形でかつ曲率半径の大きな部材に適用される。また、電磁力を用いた衝撃成形法は、かなり複雑な形状にも適用できるが、薄板でかつ小形の部材に限られるようである⁽¹⁾⁽²⁾。

本研究は、高速ドライアイス飛翔体の利用技術開発に関する基礎研究の一環として、高圧ガスガンによってドライアイスを加速して要求される形状の形枠の上にセットされた薄板に衝突させることにより、ドライアイスのもつ高い運動エネルギーを衝撃成形に利用しようとするものである。ドライアイスは十分の強度を有する固体であるが⁽³⁾、高速衝突後は容易に粉体状に破碎して流動し、最終的に昇華するという特質を利用することにより、複雑な形状の成形が可能であると予

測される。また、ドライアイスは CO₂ の純粋物質で摩擦も小さいので加工面品質の向上も期待できる。

ここでは、単純なカップ形のダイを用いたステンレス板(SUS304)の絞り加工について、3種の板厚および3種の直径をもつ円盤状試料に対して加工特性を検討した。

2. 実験装置および実験方法

本実験で用いた試料は、市販のステンレス板(SUS304)を円形に成形したものである(表1)。本報では、図1に示す単純なカップ状のダイを用いた深絞り加工について述べる。ダイ②の前部には滑らかな曲面をもつ軸対称ノズル①が置かれ、円盤状の被加工材料は、ダイとノズルの間に設けられた直径110 mm、間隔2.0 mmのスペースにセットされる。ダイを保持する可動シリンダ③と固定台⑤との間には、衝撃吸収用のウレタンバンパ④が設けられている。なお、潤滑材としてダイの内面および試料とノズルの接触面に薄くグリスを塗布した。

口径100 mm、加速管長4 mの単段式窒素ガスガンから発射されたドライアイス飛翔体は、発射管直後に設置されたノズル内縁に衝突した後、変形・破碎・流動しながらノズル内を高速で通過し被加工材料に直接衝

* 原稿受付 平成5年3月19日。

^{*1} 正員, 名古屋工業大学工学部 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)。

^{*2} 学生員, 名古屋工業大学大学院。

撃負荷を与える。

ドライアイス飛翔体は、液体炭酸ガスを多孔質材料製の容器の中で急速膨張させて雪状結晶としたものを、さらに内径 100 mm のシリンダ内で油圧ピストンによって円柱状に圧縮固化する方法で作成した。その平均密度は $1\,600\text{ kg/m}^3$ 、平均質量は 1.2 kg である。ノズルとの衝突を考慮して、飛翔体形状は若干工夫している(図2)。

ここでは、各種円盤試料について加速圧力を変えながらドライアイス飛翔体を衝突させて、絞り加工後の試料形状を測定し比較することにより、飛翔体の初期運動エネルギーと加工特性の関係を調べた。なお、ドライアイス内部に細い鉄線のリングを埋め込み、加速管出口に設けた二つの電磁コイルの誘導電流の時間差を観測して、ドライアイス飛翔体の速度を測定した。

3. 実験結果および考察

本実験を通じてダイは変更していないので、試料の絞り比(プランク径/ダイ内径)はそれぞれ 1.83, 1.75, 1.67 である。図3には、同一の質量で異なる速度の飛翔体によって深絞りの行われた試料例を示す。飛翔体の速度が小さすぎる場合には浅い皿形となり、速度の増加とともに絞りが進展する。しかし、飛翔体速度が過大になると、底部で円形の破断と放射状のき裂が発生する。なお、破断面は板厚方向に約 45° の角度をなす鋭利な断面であることから、引張りによる破断と推定できる。

深絞り加工における加工特性に与える因子は種々考えられるが、ここではドライアイス高速飛翔体を利用

表 1 実験試料の諸元

Thickness [mm]	Blank Diameter [mm]
2.0	100
	105
	110
1.4	110
1.0	110

図 1 深絞りジグの形状

図 2 ダイおよび飛翔体の形状

図 3 深絞りの行われた試料

するという観点から、その衝突時の初期運動エネルギーとの関係に着目して考察する。

図4、5には運動エネルギーと、変形後の試料の底部中心点の変位量(深さ)との関係をプロットした。図4では、板厚が同じでプランク径(直径)の異なる試料について示し、図5では、直径が同じで板厚の異なる試料を示した。

エネルギーが低い場合には浅い皿形の変形を示し、エネルギーが増加するとともにカップの深さが増加す

るが、あるエネルギーを超えるとカップの底部がダイ底部に接触し、さらにエネルギーが増加するとダイと試料の接触面積が広がるという経過をたどる。試料の厚さが2.0 mmの場合、エネルギーが増加するとカップの深さは折線状に増加し、1.4 mmの場合では、あるエネルギー(約7 kJ)を超えると急激にカップの深さが増加する。一方、エネルギーがある程度大きいとカップ中心部での深さは若干減少する。1.4 mm厚の試料のほうが2.0 mmの試料に比べて減少量は大きい。これは底部における微小なスプリング・バックが起こったためと考えられるが、通常のダイとポンチの深絞りに見られるような側面におけるスプリング・バックはまったく見られなかった。一方、板厚が同じでも試料の直径が異なると(すなわち絞り比が異なると)変形過程は若干異なる。絞り比が小さいほど、小さなエネルギーで引込まれてダイの底に到達しやすく、かつ大きなエネルギーでも破断は生じにくい。また、広いエネルギー領域で完全な絞りが可能である。

絞りが強くなるにつれてフランジ外径は径方向に引込まれて小さくなるので、各試料についてフランジ外径とエネルギーとの関係を図6、7に示す。試料がダイ底部に到達するエネルギーを超えても、カップの底

図4 飛翔体運動エネルギーとカップの深さの関係(プランク径の異なる場合)

図5 飛翔体運動エネルギーとカップの深さの関係(板厚の異なる場合)

図7 飛翔体運動エネルギーとフランジ引込み量の関係(板厚の異なる場合)

図6 飛翔体運動エネルギーとフランジ引込み量の関係(プランク径の異なる場合)

図8 最大および最小引込み量

部周辺は型に沿ってさらに変形を続け、フランジの引込みは大きくなる。しかし、ある一定のエネルギーを超えると、試料は急激な引張応力による破断を起こして変形が中断されるために、結果的に引込み量は逆に小さくなる。このことから、フランジの引込み量の最

大値を与えるエネルギー量が存在することがわかる。また、直径が小さく板厚が薄い試料ほど最大引込み量付近の変化は緩やかであることがわかる。引込み量は、試料の中心を通る圧延方向とその垂直方向で大きく、逆にその45°方向で引込みは小さい。また、圧延方向に対して垂直方向でフランジ外径は最小値をとる(図8に一例を示す)。

図9には、絞り精度を評価する尺度として、試料の曲率分布を測定した結果の一例を示す。blank径が110 mm、板厚が1.0 mmの場合、エネルギーが7.0 kJでは試料の深さは浅いが、ダイ肩部においての曲率はダイ自体の理論曲率(図9の細い実線)とほぼ一致する。曲率は、カップ側面の付近で急激に変化して中心から約25 mmで負の最大値をとる。その後中心に向かうにつれ変化は緩やかになり、中心部でほぼ零となる。エネルギーが9.3 kJでは、中心部がダイに接触を始め、エネルギーが13.5 kJに達するとダイ肩部と中心からの距離が30 mmの位置でともに曲率は100[1/m]となり、中心部では半径20 mmの円領域内で曲率はほぼ0[1/m]となり底面は平坦となる。このことから、この試料がほぼ完全にダイになっていることがわかる。また、絞り変形が、まずダイの肩部から開始し、次にダイ底部で進行し、最後にダイ底部周辺へ及んでゆく過程が理解できる。

なお、通常の深絞り加工では、予圧を加えた「しわ押え」が重要な役割を担い不可欠とされているが、本方

(a)

(b)

(c)

図9 衝撃絞りを受けた試料の曲率分布

(a)

(b)

図10 紙製スペーサによるしわ押えの効果

法によると厚さ 2.0 mm の場合には, 先述したダイとノズルの間の 2.0 mm のスペースがドライアイス衝撃のためにわずかに狭まることから, 有効なしわ押えとして作用してしわはまったく見られない。一方, 2.0 mm より薄い試料の場合には, 試料とノズルの間にすきまができるために, 図 10(a)に示すような規則的なしわが発生するが, 適当な厚さのリング状紙製スペーサをセットするだけで図 10(b)のように完全にしわを除去できる。また, 通常の絞り加工ではダイやポンチの潤滑に注意しなければならないが, ここでは特に考慮しなくても前掲のいくつかの写真のように, 試料面は極めて良好であることも本加工法の特徴である。

4. 結 言

本研究では, おそらく国内外で初めての試みである, ドライアイス高速飛翔体を利用したステンレス円形板の軸対称深絞りをを行い, 主として飛翔体の運動エネル

ギーと絞り加工特性に着目して考察したが, 絞りの深さや引込み量との興味ある関係が明らかとなった。ドライアイスの材料力学的な特性や形状, 成形ジグ形状, 飛翔体の初速度の最適な設定など検討すべき課題もあるが, ここで提案した衝撃成形加工法が極めて特徴的でかつ有効な手法であることがわかった。

最後に, 本研究の一部に対して平成 3 年度および 4 年度の文部省科学研究費「重点領域研究(衝撃波)」の補助を受けたことに謝意を表す。

文 献

- (1) 日本機械学会編, 機械工学便覧 B 編, (1991), B 2-80, 丸善。
- (2) Blazynski, T. Z., *Plasticity and Modern Metal-Forming Technology*, (1989), 207, Elsevier.
- (3) Tanaka, K. and Ookouchi, T., *Shock Compression of Condensed Matter-1991*, (1992), 1003, North-Holland.