

臨界衝撃速度打抜き加工法

宮崎大学 工学部 機械システム工学科

助教授 海津 浩一

(平成7年度研究開発助成 AF-95015)

キーワード：臨界衝撃速度，高速打抜き加工，断熱せん断帯

1. 研究の目的と背景

近年，新しい材料が次々と生み出されているが，実用段階では，それらの製造技術に加え，製品として世に送り出すための加工技術も必要不可欠なものとなる．しかしながら，一般的に新材料は加工しにくい難加工材料であり，加工が問題となることが多い．そのような難加工材料に対しては大きなエネルギーを用いて強制的かつ瞬間的に加工してしまう手段が有効ではないかと考えられる．本研究は，高エネルギー加工法である高速打抜き加工を難加工材料に適用できるかどうかの検討を行うために，まず第一段階として，高速打抜き加工法の基礎理論の確立を目的として，基礎理論を高速変形特有の臨界衝撃速度¹⁾の現象と関連づけることにより検討し，実験を通してその基礎理論の検証を行おうとするものである．

細い棒の一端をある速度以上で急激に引っ張ると，棒の着力端近傍で瞬時に破断が生じてしまう．この現象は棒の変形が着力端近傍に局所的に集中し，それ以外の部分には変形が伝わらないために起こるものである．このような現象の生じる速度を臨界衝撃速度¹⁾といい，材料固有の速度である．この臨界衝撃速度の現象を高速打抜き加工にうまく活用することができれば，打ち抜いたことによる加工の影響を穴周辺に限定でき，それ以外の部分には加工の影響を及ぼさないことが可能になる．そのような現象が現れるかを検証するために，谷村らは，正方形の薄いアクリル板を周辺固定し，円柱状のプロジェクトイル（発射体）を垂直衝突させる実験を行った．その結果として，衝突速度がある速度に到達すると，ひびも入らず穴の形状が急激にプロジェクトイルの断面形状に近づくこと，またその速度以上の衝突速度では，穴の直径はプロジェクトイルの直径とほぼ一致するようになることを示している²⁾．

本研究では，実際の加工法を意識し，ダイスに固定したアルミニウム試験片にポンチの代わりに円柱状プロジェクトイルを垂直衝突させることにより高速打抜き加工を行い，そのような加工条件で臨界衝撃速度の現象が現れるかどうかを検討した³⁾．

2. 臨界衝撃速度の考え方

Karman らは細い棒を高速で引っ張るとき，材料が定構成式で仮定され，単純波が棒を伝ばす場合には，ある特定の速度以上で引っ張ると棒の着力端近傍で瞬時に破断するという臨界衝撃速度が存在することを示した¹⁾．上に凸の応力-ひずみ曲線をもつ材料を引張強さに対応するひずみまで高速で一気に引っ張る場合には，引張強さで応力-ひずみ曲線の傾きが0であることからひずみの伝ば速度も0になり，引張強さに対応する大きなひずみがもはや棒を伝ばできなくなることから，着力端近傍に引張強さに対応する大きなひずみが集中して瞬時に破断が起きてしまうわけである．

一方，高速変形下の現象として断熱せん断帯の発生はよく知られている．そのような断熱せん断帯の生ずる不安定ひずみは熱軟化を考慮した応力-ひずみ曲線の傾斜が0になる条件^{4) 5)}から導かれており，ひずみ速度一定の断熱せん断変形過程において，せん断変形の局所化が始まる条件は次式のように表される．

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = \left(\frac{\partial \tau}{\partial \gamma} \right)_T + \left(\frac{\partial \tau}{\partial T} \right)_\gamma \frac{dT}{d\gamma} = 0 \quad (1)$$

ここで， τ はせん断応力， γ はせん断ひずみ， T は温度， $(\partial \tau / \partial \gamma)_T$ は等温接線係数， $(\partial \tau / \partial T)_\gamma$ は応力の温度依存性を表す係数を表している．

このように臨界衝撃速度の概念と断熱せん断帯の発生の考え方は同じものであり，断熱せん断帯の発生はせん断変形過程での臨界衝撃速度の現象であると考えられることができる．したがって，本研究では，高速打抜き加工の実験を行い，ある速度以上で臨界衝撃速度の現象が発生したときに，断熱せん断帯も発生しているかを調べ，この考え方を検証する．実際に工具を用いた高速加工では臨界衝撃速度の現象が発生したかどうかの判断がむずかしく，断熱せん断帯の発生により臨界衝撃速度の現象の発生が確認できれば，どれぐらいの速度で材料を加工すれば良いかの目安を得ることができる．

表1 材料組成 (wt%)

Al	Si+Fe	Cu	Mn	Zn
Bal.	0.71	0.15	0.01	0.01

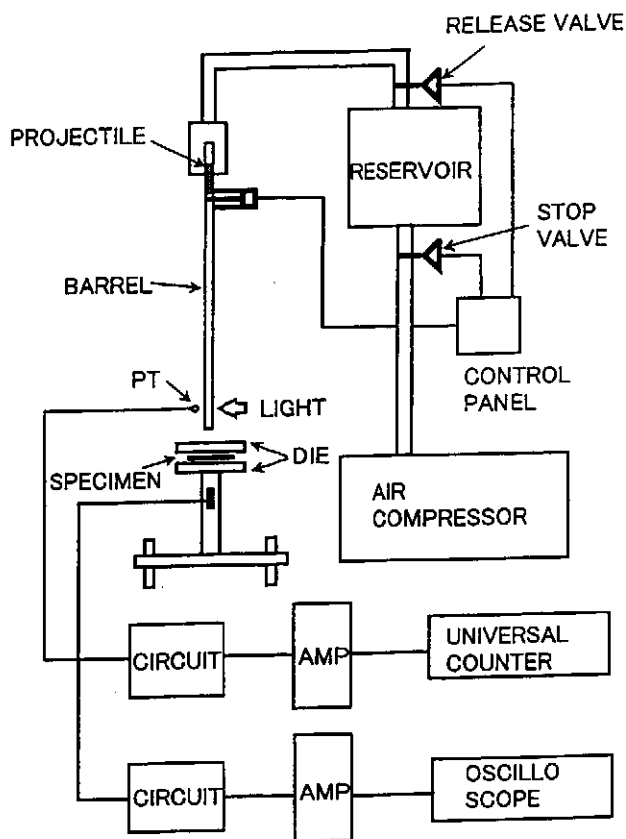


図1 試験装置の概略図

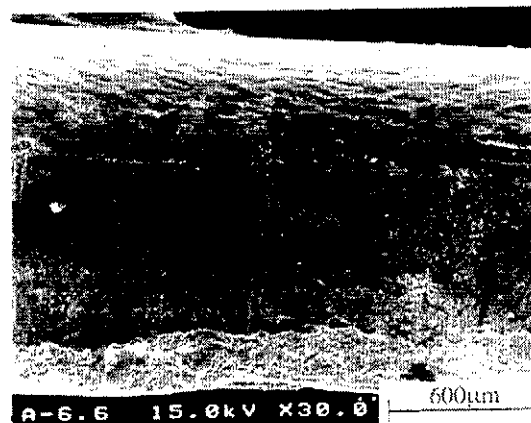
3. 実験方法および実験装置³⁾

図1に試作した高速打抜き試験機の概略を示す。試験機は縦型であり、コンプレッサーによりタンクに圧縮空気を蓄え、空気弁を開放することにより、ポンチの役割をする円柱状のプロジェクトイルを発射する。発射されたプロジェクトイルはダイスに押え板で固定された試験片に向かって垂直衝突し、さらに試験片を貫通して穴あけ加工が完了するようになっている。実験に使用したプロジェクトイルはφ10.3mm×40mmのSK11製であり、先端が試験片に垂直に衝突するように平らに加工してある。プロジェクトイルとダイスのクリアランスは0.1mmに設定し、プロジェクトイルの速度は試作した速度測定装置により試験片に垂直衝突する直前に測定する。また、軟鋼製のダイスにひずみゲージを貼り付け、ひずみゲージの出力電圧を測定してプロジェクトイルが試験片に衝突して打抜き過程を終了するまでに発生するせん断力を求めた。なお、高速打抜きとの比較のために、同じダイスとアムスラー型万能試験機(島津製作所製)を用いて静的せん断試験も合わせて行った。

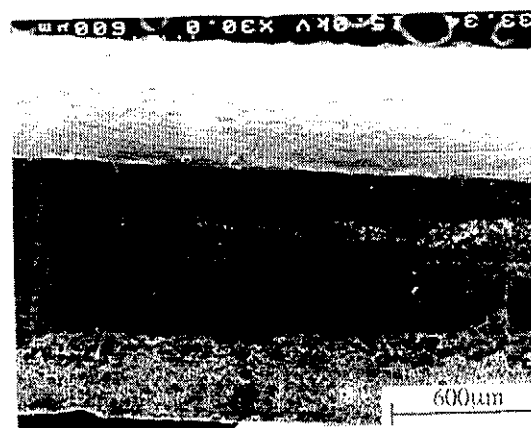
供試材は市販のアルミニウム板 (AP1100P-H14) であり、直径70mm、板厚1mmの試験片を機械加工で切り出し、350℃で2時間保持した後、除冷した。表1に材料組成を示す。

4. 実験結果および考察

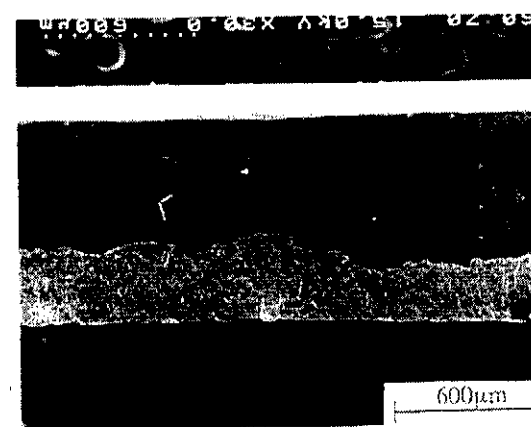
図2にせん断面の写真を示す。衝突速度が上がるとせん断面にはプロジェクトイルとの凝着と思われるすじ模様がなくなり平滑できれいになることがわかる。



(a) Static



(b) 33.3m/s



(c) 60.7m/s

図2 せん断面の顕微鏡写真

また試験片を切断し穴の周囲の断面に対し、SEM 観察を行ったが、断熱せん断帯は確認できなかった。これはアルミニウムの熱伝導率が高いため断熱せん断帯が発生しにくいことが考えられる。今後、さらに詳細な検討と観察が必要である。

図3にせん断面からの距離に対する試験片下面のビッカース硬さの変化を調べた結果を示す。せん断面から距離が離れてほぼ水平になった部分が試験片本来の硬さになると考えられる。図3より、衝突速度が速くなるにつれてせん断面近傍の硬さが低下すること、さらに、静的せん断では硬い領域がせん断面から広く存在するのに対して、高速打抜きの場合はせん断面から急激に硬さが低下していることがわかる。

図2と図3の結果は *Gotoh* らの実験結果^{5) 6)}と同じ傾向を示しており、図2と図3の結果からせん断面で断熱的な発熱による熱軟化が起こったことが推定できる。なお *Gotoh* らの実験^{5) 6)}は、打抜き速度が10m/sと低速ではあるが、大きな質量を持つポンチを用いたものであるため、質量の小さなプロジェクタイトルを用いても高速で打抜けば同様の結果が得られることが明らかになった。さらに図3の結果では、高速打抜きの場合は瞬時にせん断過程が終了するのに対して、静的な場合はせん断過程に時間がかかることから、試験片が長い時間工具に押し付けられることが広い範囲で硬さが増加する原因の一つであると考えられる。

図4に高速打抜き過程で発生した最大せん断力の結果を示す。図4では、データのばらつきが多いが、80m/sを超えたあたりで最大せん断力の低下が見られ、熱軟化の影響が顕著に出はじめてるように思われる。ただし、このデータにはばらつきが多く、臨界衝撃速度の現象が発生し、最大せん断力が低下していると判断することができないため、さらにデータの蓄積が必要である。

以上の結果から、せん断面で断熱的な発熱による熱軟

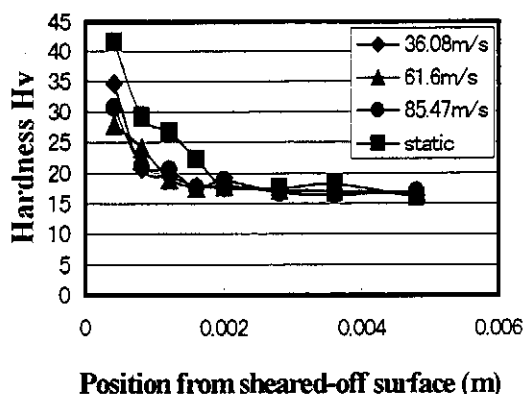


図3 試験片表面のビッカース硬さの分布

化が起こったことが推定できるが、本研究で臨界衝撃速度に達する基準と考えている断熱せん断帯は SEM 観察では認めることができず、現段階では臨界衝撃速度との関連についての明白な証拠は得られていない。今後、実験装置の改良を進め、クリアランスをできるだけ小さくし、さらに、ひずみの局所化をはかり、明瞭な断熱せん断帯の観察を行うことが必要であると考えている。

5. 結言

新たに縦型高速打抜き試験機を試作し、プロジェクタイトルの衝突速度を変えて高速打抜き試験を行った。得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) せん断面の写真から、衝突速度が上がるとせん断面にはプロジェクタイトルとの凝着と思われるすじ模様はなくなり平滑できれいになることを確認した。
- (2) せん断面からの距離に対するビッカース硬さの変化を調べた結果、衝突速度が速くなるにつれてせん断面近傍の硬さが低下すること、さらに、静的せん断では加工の影響による硬い領域がせん断面から広く存在するのに対して、高速打抜きの場合はせん断面から急激に硬さが低下することがわかった。
- (3) 高速打抜きの加工過程で発生した最大せん断力の結果から、データにばらつきがあるが 80m/s を超えたあたりで最大せん断力の低下がみられた。
- (4) 以上の結果から、せん断面で断熱的な発熱による熱軟化が起こったことが推定できる。

謝辞

本研究は、財団法人 天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成により行なわれたことを付記し、同財団に深謝いたします。

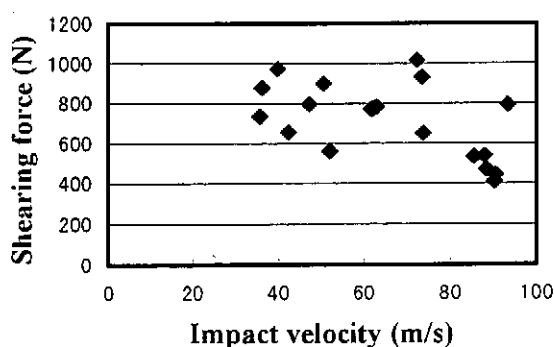


図4 せん断力と衝撃速度との関係

参考文献

- 1) von Karman T. and Duwez P., J. Appl. Phys., 21, (1950), 987.
- 2) 谷村貞治, ほか5名, 機論, 61-586, A (1995), 200-204.
- 3) 海津浩一, 池田清彦, 日本機械学会平成10年度材料力学部門講演会講演論文集 (No.98-5), Vol.B, (1998), 311-312.
- 4) 小林秀敏, Dodd, B., 塑性と加工, 29-334, (1988), 1152-1158.
- 5) Gotoh, M. and Ohno, M., Proc. Mech. Behav. Of Mat. - VI, Vol.1, 487-492.
- 6) 後藤学, ほか2名, 塑性と加工, 33-383, (1992), 1374-1379.