材料の臨界衝撃速度の評価とその薄板加工への応用[†]

王 虎* 森 田 浩 章* 山 崎 勝 広**
三 村 耕 司*** 谷 村 眞 治***

Evaluation of Critical Impact Velocity of Materials and Its Application to Processing Thin Plates

by

Hu WANG*, Hiroaki MORITA*, Masahiro YAMASAKI**,

Koji MIMURA*** and Shinji TANIMURA***

In this paper, through theoretical discussion and by obtaining numerical results, the values of critical impact velocity of various materials, such as metals of various crystal structures and non-metals, have been estimated at different temperatures and strain rates, when the specimens or bars of these materials are subjected to a tension or a torsion impact with sufficiently high velocities. The theoretical approach is made by the method of characteristic curve, provided that the conditions are the same as those in the case of Karman-Duwez solution where simple waves are propagated. Then, the values of the critical impact velocities for various materials at different temperatures and strain rates are evaluated. In addition, some experimental investigations for processing thin plates are made by high speed perforation. Some of the most significant experimental results are presented.

Key words : Critical impact velocity, Crystal structure, Perforation, Perforated hole, Sheet, Strain rate, Thin plate, Processing, Projectile

1 緒 言

棒の一端を高速で引張るとき、Karman-Duwez 理論¹⁾が適用される場合ならば、ある衝撃速度以上では、着力端近傍で瞬時に破断がおり、それ以外の部分には変形が伝わらなくなる。このような臨界速度は材料固有の値であり、臨界衝撃速度と呼ばれ、衝撃特有の破壊を説明する一つの概念として用いられる。臨界衝撃速度の定量的な検証は容易ではないが、Kawata らは有限長試験片の高速引張り時の破断伸びと引張速度の間の理論的關係を示し、さらに各種結晶構造の金属材料について臨界衝撃速度の理論値と実験値の比較を行なった。作井³⁾らは焼なました純鉄や極軟鋼を衝撃的に引張り、結晶粒の小さなものがほとんど伸びずに破断する現象を臨界衝撃速度と結晶粒度により説明している。また、臨界衝撃速度は、従来、引張りに特有の概念としてとらえられていたが、谷村⁴⁾らは、引張り以外の場合に対する臨界衝撃速度の存在を理論的に証明した。たとえば、薄肉円管の一端に引張り-ねじり組合せ衝撃が作用するときにも臨界衝撃速度が存在することを報告している。さらに、準静的組合せ応力状態に組合せ増分衝撃が作用する場合に対しても、臨界衝撃速度が存在し、その値は準静的な前負荷状態により変わることを理論的に示した。

本研究では、これまでに報告されている多数の引張り

あるいはねじり衝撃試験から得られた材料特性のデータに基づき、種々の温度とひずみ速度における材料（異なる結晶構造の金属と非金属を含む）の臨界衝撃速度の値を評価し、検討した。さらに、臨界衝撃速度の概念を工学的および工業的に応用することを目的として、薄板の高速打抜き試験を実施し、臨界衝撃速度以上では薄板の打ち抜き後の穴の直径が急激に減少し、プロジェクトイルの直径とほぼ等しくなることを確かめた。

2 基 礎 式

まず、Fig. 1 に示すように、静止している半無限長の細い棒の一端を一定速度 v_1 で急激に引張る場合を考える。

Fig. 1. Tension impact of a semi-infinite bar.

定構成式 $\sigma_t = \sigma_t(\epsilon_t)$ を仮定すると、運動方程式は次式となる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \frac{d\sigma_t}{d\epsilon_t} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここで x はラグランジュ座標、 u は変位、 σ_t は応力、 ϵ_t はひずみ、 ρ は密度、 t は時間である。Karman-Duwez

[†] 原稿受理 平成7年6月5日 Received June 5, 1995

* 大阪府立大学工学部機械工学科 〒593 堺市学園町, Dept. of Mech. Eng., Univ. of Osaka Pref., Gakuen-cho, Sakai, 593

** (株)小松製作所 〒254 平塚市四の宮, Komatsu LTD., Shinomiya, Hiratsuka, 254

*** 正 会 員 大阪府立大学工学部 〒593 堺市学園町, Dept. of Mech. Eng., Univ. of Osaka Pref., Gakuen-cho, Sakai, 593

Fig. 2. The stress-strain curve.

Fig. 3. The velocity of plastic wave.

Fig. 4. Torsional impact of a thin-wall tube.

理論と特性曲線法⁵⁾により取り扱われた理論結果から臨界衝撃速度 v_{1cr} は次式で与えられる。

$$v_{1cr} = - \int_0^{\epsilon_{tm}} c_1 d\epsilon_t, \quad c_1 = \left(\frac{d\sigma_t}{d\epsilon_t} / \rho \right)^{1/2} \quad (2)$$

ここで, c_1 は縦波の伝ば速度, ϵ_{tm} は引張応力-ひずみ線図 (Fig. 2) において, その傾きが零になる点でのひずみ (延性材料) または破断時のひずみ (ぜい性材料) である。式(2)の積分値は Fig. 3 の斜線部分の面積を表し, 棒の一端を, ステップ状でこれ以上の衝撃速度で引張れば, その着力端において材料が破断することを意味している。

つぎに, Fig. 4 に示すように等質, 等方性の薄肉円管の一端に軸対称のねじり衝撃が急激に作用するときを考える。

v_t は衝撃端に加えられた周速度である。このとき引張りの場合と同様定構成式 $\tau = \tau(\gamma)$ を仮定すると, 運動方程式は次式となる。

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \frac{d\tau}{d\gamma} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (3)$$

ここで, τ はせん断応力, γ はせん断ひずみ, θ は衝撃端における棒のねじれ角である。

このときの初期条件は

$$t=0, \quad x>0:$$

$$\gamma(x, 0) = \tau(x, 0) = v(x, 0) = 0 \quad (4)$$

であり, 境界条件は

$$x=0, \quad t \geq 0: \quad \theta = (v_t/a)t \quad (5)$$

である。ここで a は薄肉円管の半径, v は周速度を表す。

式(1)と式(3)は同形であるので, 式(2)と同様の結果を導出することができ, ねじり衝撃の場合の臨界衝撃速度 v_{2cr} は次式で示される。

$$v_{2cr} = - \int_0^{\gamma_m} c_2 d\gamma, \quad c_2 = \left(\frac{d\tau}{d\gamma} / \rho \right)^{1/2} \quad (6)$$

ここで c_2 は横波の伝ば速度, τ はせん断応力, γ はせん断ひずみ, ρ は密度, γ_m はせん断応力-ひずみ線図における曲線の傾きが零となる応力に対応するひずみまたは破断時のひずみ (ぜい性材料) である。

臨界衝撃速度は, もととは, ひずみ速度非依存性体の定構成式の仮定のもとで導出されたものである。ところが, 高速衝撃が急激に作用して, その着力端近傍で破断または破壊が生じる現象を対象とするときは, ひずみ速度依存性体に対しても, その着力端近傍での高速変化に対応した高ひずみ速度での応力-ひずみ関係が与えられれば, その関係をもとにして, 上式より臨界衝撃速度の値を算出することができる。

3 種々の材料に対する臨界衝撃速度

Table I に種々の材料に対するデータをもとにして, 式(2)および式(6)を用いて算出した臨界衝撃速度の値を示す。これらの算出値間での傾向について以下に説明する。便宜上 Table I に示した材料を F.C.C., B.C.C., C.P.H. と Orthorhombic 結晶構造および非金属に分けて議論する。なお, 本論文において準静的ひずみ速度は $0.001s^{-1}$ 以下, 低ひずみ速度は $1.0s^{-1} \sim 1000s^{-1}$, 高ひずみ速度は $1000s^{-1} \sim 5000s^{-1}$ の範囲を指すものとする。

3.1 F.C.C. 結晶構造

純アルミニウムの臨界衝撃速度の値は, 表中に示した F.C.C. 金属の他の金属の値よりも大きいことがわかる。これは, 純アルミニウムの応力-ひずみ曲線の勾配が一般的に高く, 破断ひずみも大きいことに起因している。一方, 温度の影響については 7075-T6 Al alloy に示されるように低温における臨界衝撃速度の算出値は室温下のものよりも小さくなる傾向がある。これは, 例えば Fig. 5(a) に示すように, 低温 ($-196^\circ C$) では各ひずみに対応する応力が高いにもかかわらず, ϵ_{tm} は室温におけるそれよりも小さいことに起因している。同様な傾向は, B.C.C. 金属においても認められる。しかし, 高ひずみ速度下での AISI 304 と AISI 316-H ステンレス鋼の臨界衝撃速度の算出値は高温における値よりも室温における値の方が大きくなる現象がある。これは, 高温で各ひずみに対応する応力と応力-ひずみ曲線の傾きが室温におけるそれらよりも小さいことに起因している。

また, ひずみ速度の影響については, 高ひずみ速度における臨界衝撃速度の算出値は低ひずみ速度下のものよりも低くなる傾向がある。

3.2 B.C.C 結晶構造

高ひずみ速度における臨界衝撃速度の算出値は, 低温における値の方が高温における値よりも小さくなっている。Molybdenum alloy と Steel 35 alloy の室温での結果においては, 高ひずみ速度での値の方が, 低ひずみ速度での値よりも若干高くなっている。ただし, この傾向

Table I. The critical impact velocities of various materials.

Crystal structure	Material	Average strain rate (1/S)	Failure strain	Temperature (°C)	Critical impact velocity V_{1cr} , V_{2cr} (m/s)
F. C. C.	Pure aluminium ⁶⁾ (0.9999)	$\dot{\gamma}=0.001$ $\dot{\gamma}=390$ $\dot{\gamma}=1000$	$\gamma=2.908$ $\gamma=2.61$ $\gamma=2.33$	Room Room Room	V_2 416.6 411.8 396.27
	7075-T6 Al ⁷⁾ Alloy	$\dot{\epsilon}=300$ $\dot{\epsilon}=300$	$\epsilon=0.0685$ $\epsilon=0.1166$	-196 22	76.8 90.12
	Pure OFHC ⁶⁾ Copper	$\dot{\gamma}=0.001$ $\dot{\gamma}=1400$	$\gamma=3.976$ $\gamma=2.8$	20 20	V_2 364.49 313.74
	Cartridge brass ⁸⁾	$\dot{\gamma}=0.008$ $\dot{\gamma}=293$	$\gamma=4.0$ $\gamma=3.04$	Room Room	V_2 323.4 239.8
	Nickel 200 ⁸⁾	$\dot{\gamma}=35$ $\dot{\gamma}=314$	$\gamma=5.5$ $\gamma=4.0$	Room Room	V_2 368.53 284.39
	AISI 304 ^{9),13)} Stainless steel	$\dot{\epsilon}=750$ $\dot{\gamma}=1050$	$\epsilon=0.4254$ $\gamma=1.94$	Room 1050	V_1 115.68 V_2 102.45
	AISI 316-H ^{10),11)} Stainless steel	$\dot{\epsilon}=480$ $\dot{\epsilon}=650$	$\epsilon=0.661$ $\epsilon=0.469$	20 550	V_1 151.47 151.0
B. C. C.	Pure iron ^{12),13)} (0.9999)	$\dot{\gamma}=0.00005$ $\dot{\epsilon}=1290$	$\gamma=0.40$ $\epsilon=0.45$	-190 Room	V_2 64.6 V_1 65.8
	S25C steel ¹⁴⁾	$\dot{\epsilon}=3000$ $\dot{\epsilon}=3000$	$\epsilon=0.131$ $\epsilon=0.14$	-73 27	V_1 104.16 105.46
	Mild steel ¹⁵⁾	$\dot{\gamma}=800$ $\dot{\gamma}=1200$ $\dot{\gamma}=1600$	$\gamma=0.495$ $\gamma=0.92$ $\gamma=1.18$	-150 Room 400	V_2 118.88 155.2 203.2
	A533B steel ¹⁶⁾	$\dot{\gamma}=5000$ $\dot{\gamma}=4900$ $\dot{\gamma}=4840$	$\gamma=0.6$ $\gamma=0.614$ $\gamma=0.582$	-150 25 300	V_2 87.9 112.5 127.1
	Titanium ¹⁴⁾	$\dot{\gamma}=1000\sim1300$	$\gamma=0.7$	Room	V_2 162.2
	Molybdenum ¹⁷⁾ alloy	$\dot{\epsilon}=0.0002$ $\dot{\epsilon}=50$ $\dot{\epsilon}=1250$	$\epsilon=0.1542$ $\epsilon=0.1366$ $\dot{\epsilon}=0.1244$	Room Room Room	V_1 70.3 76.48 76.86
	Steel 35 Ni Cr ¹⁸⁾ Mo V 125 Alloy	$\dot{\epsilon}=0.0003$ $\dot{\epsilon}=600$ $\dot{\epsilon}=4200$	$\epsilon=0.1375$ $\epsilon=0.175$ $\epsilon=0.20$	Room Room Room	V_1 94.7 100.78 112.1
C. P. H.	Annealed α - ¹⁷⁾ titanium	$\dot{\epsilon}=1000$ $\dot{\epsilon}=1000$ $\dot{\epsilon}=1000$	$\epsilon=0.25$ $\epsilon=0.2752$ $\epsilon=0.25$	-196 -98 15	V_1 130.8 130.68 122.2
	Pure zinc ¹⁹⁾	$\dot{\gamma}=800$ $\dot{\gamma}=800$	$\gamma=0.05$ $\gamma=0.075$	-125 -75	V_2 27.3 32.25
Orthorhombic	Annealed α - ¹⁷⁾ uranium	$\dot{\epsilon}=600$ $\dot{\epsilon}=1400$	$\epsilon=0.1693$ $\epsilon=0.0974$	Room Room	V_1 53.1 68.5
Non-metal	Acrylic resin	$\dot{\gamma}=0.001$	$\gamma=0.23$	Room	V_2 60.0
	Unreinforced ¹⁷⁾ epoxy resin	$\dot{\epsilon}=0.0003$ $\dot{\epsilon}=1000$	$\epsilon=0.039$ $\epsilon=0.035$	Room Room	V_1 52.1 55.8
	Polycarbonate ²⁰⁾	$\dot{\gamma}=2000$ $\dot{\gamma}=2000$ $\dot{\gamma}=2000$	$\gamma=0.3928$ $\gamma=1.428$ $\gamma=1.642$	-100 20 100	V_2 117.1 155.45 159.8
	Plain concrete ²¹⁾ (Tension)	$\dot{\epsilon}=6.0\times10^{-7}$ $\dot{\epsilon}=2.5$	$\epsilon=9.26\times10^{-5}$ $\epsilon=8.21\times10^{-4}$	Room Room	V_1 0.386 1.075

は、他の B.C.C. 金属に対して一般的に言えるかどうかは、これらのデータのみからでは明らかではない。

3・3 C.P.H. 結晶構造

C.P.H. 結晶構造をとる α -Titanium¹⁷⁾ 焼なまし材の臨界衝撃速度の算出値は低温になるにつれて大きくなっている。これは、温度が低くなると、各ひずみに対応する

応力とひずみ (ϵ_{rm}) がともに大きくなるのが原因である。一方、純 Zinc¹⁹⁾ の低温における臨界衝撃速度の算出値は非常に小さい。これは、Fig. 5(b)に示すように、純 Zinc¹⁹⁾ の低温における破断ひずみと応力が非常に小さいことに起因している。

3・4 Orthorhombic 結晶構造

Fig. 5. The shear or tensile stress-strain curves of various materials.

Orthorhombic 結晶構造 (斜方晶) をとる α -uranium¹⁷⁾ 焼なまし材の室温における臨界衝撃速度の算出値は高ひずみ速度での値の方が低ひずみ速度での値よりも若干大きくなっている。

3.5 非金属

Unreinforced epoxy resin¹⁷⁾ の室温における臨界衝撃速度の算出値はひずみ速度が高くなるにつれて大きくなることがわかる。これは、Fig. 5(c)に示すように、高ひずみ速度における応力-ひずみ曲線の傾きが高くなることが原因である。

また、高ひずみ速度における Polycarbonate²⁰⁾ の臨界衝撃速度の算出値は温度が高くなるにつれて大きくなる。さらに、Fig. 5(d)に示すように、純コンクリートの室温における引張応力と破断ひずみは非常に小さく、対応する臨界衝撃速度の算出値も小さくなる。このため、純コンクリートは、地震のような衝撃荷重については、かなり弱いと考えられる。

以上、各材料別に検討したが、全体的な傾向として高ひずみ速度での応力-ひずみ関係の実験データをもとにして算出した臨界衝撃速度の値は、低温における値の方が高温における値よりも小さくなる。

4 薄板の打ち抜きに対する応用

Fig. 6に示すように、薄板 (アクリル板) を剛体円柱 (プロジェタイル) により速度 v_0 で打ち抜く場合を考える。ここでは、臨界速度での薄板の高速打ち抜き現象を対象としている。したがって、より低速度で厚板を打ち抜くときにしばしば問題となるような板厚方向のせん断変形の様子などは考えない。

Fig. 6. Impact of sheets.

板厚が円柱の直径に対して十分に小さければ、近似的に応力とひずみは板厚方向に一樣と仮定することができる。従って、打ち抜かれる部分の運動方程式は円柱座標表示により次式で表すことができる。

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\tau}{r} \quad (7)$$

ここで、 ρ は密度、 w は Z 方向変位、 τ は応力、 t は時間を表す。定構成式 $\tau = \tau(\gamma)$ を仮定し、特性曲線法を用いると臨界衝撃速度 v_{cri} は次式²²⁾のように求めることができる。

$$v_{cri} = v_0 = - \int_0^{\gamma_m} c d\gamma, \quad c = \left(\frac{d\tau}{d\gamma} / \rho \right)^{1/2} \quad (8)$$

ここで、 c は波の伝ば速度、 γ_m は式(6)と同様せん断応力-ひずみ線図における曲線の傾きが零となる応力に対応するひずみまたは破断時のひずみである。

次に、薄板の打ち抜きの試験方法について述べる。Fig. 7に試験装置の概略を示す。破裂板形式の発射装置を用いて円柱状のプロジェタイル (Fig. 8参照) を 50 ~ 200 m/s の速度で周辺を固定した試験片に衝突させる。

Fig. 7. The schematic of experiment apparatus.

Fig. 8. Projectile (S45C steel).

打ち抜き時の速度はプロジェタイルが試験片の前後におかれた2つの光センサー間を通過する時間を計測して求めた。試験片は幅および高さが共に100mm、厚さ1mmの市販の亚克力板を用い、プロジェタイルにはS45C炭素鋼棒を用いた。また、プロジェタイルの先端には加工精度を上げるために約30度の刃角をつけている。Fig. 9に打ち抜き後の穴の径と衝突速度との関係を示す。図より衝突速度が約70m/sを越えたところで穴の径は急激に減少し、それ以上の速度ではほぼ一定となることがわかる。また、この時の穴の径はプロジェタイルの径とほぼ等しい。このことから、亚克力板に対する臨界衝撃速度の値は約70m/sであることがわかる。次に、式(8)を用いて臨界衝撃速度の理論値(参考値)を求めるためにインストロン型試験機で亚克力板の準静的せん断試験を行った。Fig. 10に準静的せん断試験の結果を示す。このせん断応力-ひずみ線図をもとに式(8)より得られた臨界衝撃速度の値は60m/sとなり、理論値(参考値)と実験値はかなり近い値となっている。

ここでの計算値は、準静的な応力-ひずみ関係を用いて求めたが、打ち抜かれる部分でのひずみ速度は非常に高く、このような高ひずみ速度域での応力-ひずみ関係と準静的な応力-ひずみ関係とは異なることが考えられる。したがって、厳密な理論値を求めるためには、高ひずみ応力での応力-ひずみ線図を用いる必要がある。ただし、Unreinforced epoxy resinに示すように、この高分子材の臨界速度については一般にひずみ速度依存性が

Fig. 9. Relation between diameter of perforated hole and velocity.

Fig. 10. The shear stress-strain curve.

小さいため、結果として、このような近似でもかなり有効な値を与えていると考えられる。

5 結 言

本研究では、これまでに報告されている多数の引張りあるいはねじり衝撃試験から得られた材料特性のデータに基づき、異なる温度とひずみ速度における種々の材料の特性に対応する臨界衝撃速度の値を算出し、検討した。その結果、臨界衝撃速度の算出値は異なる温度とひずみ速度下で大きく変化し、さらに、材料の結晶構造にも影響される。全体的な傾向として、高ひずみ速度での応力-ひずみ関係をもとにした臨界衝撃速度の算出値は、低温における値の方が高温における値よりも小さくなる。

臨界衝撃速度の概念を工学的および工業的に応用することを目的として、薄板の高速打ち抜き試験を実施した。これにより、臨界衝撃速度以上での高速打ち抜きでは、薄板の打ち抜き後の穴の直径が急激に減少し、プロジェタイルの直径とほぼ等しくなることを確かめた。このような臨界衝撃速度の高速加工への応用は多くの利点があり、難加工材の加工をはじめ、熱を嫌う材料や新材料の加工にも適用できるものと期待される。

参 考 文 献

- 1) T. Von Karman and P. Duwez, J. Appl. Phys., **21**, 987 (1950).
- 2) K. Kawata, Inst. Phys. Conf. Ser., **21**, 215 (1974).

- 3) 作井誠太, 森 勉, 日本金属学会誌, **28**, 537 (1964).
- 4) 谷村眞治, 海津浩一, 材料, **36**, 1324 (1987).
- 5) 谷村眞治, “衝撃工学”, 林 卓夫, 田中吉之助編, p. 73 (1988) 日刊工業新聞社.
- 6) J. L. Sturge, B. Parsons and B. N. Cole, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **47**, 35 (1979).
- 7) T. Nojima, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **70**, 135 (1984).
- 8) U. S. Lindholm and G. R. Johson, “Material behavior under high stress and ultrahigh loading rates”, p. 61 (1982) Plenum Press.
- 9) D. R. Barraclough and C. M. Sellars, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **21**, 111 (1974).
- 10) C. Albertini, A. M. Eleiche and M. Montagnani, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **70**, 177 (1984).
- 11) C. Albertini, A. M. Eleiche and M. Montagnani, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **102**, 503 (1989).
- 12) K. A. Hartley and J. Duffy, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **70**, 21 (1984).
- 13) K. Kawata, S. Hashimoto, S. Sekino and N. Takeda, IUTAM Symp. TOKYO, p. 1 (1985).
- 14) K. Kishida, T. Kataoka, T. Yokoyama and M. Nakano, IUTAM Symp. TOKYO, p. 75 (1985).
- 15) J. Duffy, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **47**, 1 (1979).
- 16) Y. H. Pao and A. Gilat, *Acta metall. mater.* **40**, **6**, 1271 (1992).
- 17) J. Harding, “Materials at High Strain Rates”, p. 133 (1987) Elsevier Applied Science.
- 18) L. W. Meyer, H. D. Kunze and K. Seifert, “Shock Waves and High Strain-Rate Phenomena in Metals/Concepts and Application”, p. 51 (1980) Plenum Press.
- 19) P. E. Sensery, J. Duffy and R. H. Hawley, *J. Applied Mechanics*, **45**, Mar., p. 60 (1978).
- 20) N. A. Fleck and S. C. Wright, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **102**, 73 (1989).
- 21) C. Albertini and M. Montagnani, *ISIE Symp. Sendai*, p. 514 (1992).
- 22) 海津浩一, 谷村眞治, 森田浩章, 山崎勝広, 日本機械学会講演論文集, **930-63**, 571 (1993).