アルミニウムの冷間衝撃押出しに関する研究*

犬山致知** 渡辺貞夫** 和泉 修**

Kazutomo Oyama, Sadao Watanabe and Osamu Izumi: Study on the Cold Impact Extrusion of Aluminium. The characteristics of cold impact extrusion of Al were investigated using the high-energy rate metal forming machine "DYNAPAK-Model 600", the maximum ram-velocity of more than 20 m/sec was attained by the use of high-pressure nitrogen-gas as a driving source. The results were compared with those of slow-rate extrusion using a 500-ton hydraulic press (about 0.6 mm/sec). Remarkable differences were observed between them, for instance, on the behaviours of lubrication, metal-flows and hardness distribution,

Especially, with the DYNAPAK extrusion, the heat-generation due to adiabatic deformation and the inertial pull-force due to deceleration of ram-velocity show marked effects on the mechanical properties or shapes of the extruded rods: the former results in partial softening and the latter sometimes causes inertial parting.

(Received June 2, 1964)

1. 緒 言

最近の金属加工において爆発成形, 放電成形, 電磁成形, 高圧ガス圧成形など一連の高速高エネルギー加工が工数を減じ, 生産コストを低下するものとして, また従来加工困難とされた材料, 形状に対する可能性への期待から多くの注目を集め, 実用にも供されつつある. その一環として例えばダイナパックでは一工程で最終形状の成形が可能で, 材料費も少く機械的強度の高い成品が期待できるといわれている⁽¹⁾⁽²⁾. しかしにこのような高エネルギー高速成形時には材料の変形過程に従来の加工法とは違った要因が加味されると考えられているが, たとえば高速高エネルギー成形時の材料の流動とか, ひずみ分布などに関しても未だ十分に解明されていない. 実際非常に短時間に大きなエネルギーが素材に付与される条件のもとでの塑性は降伏応力, 変形抵抗, 潤滑条件等の変化, 変形熱および加工中の加速(減速)の影響などによつて低ひずみ速度成形とは変つてくると考えられる. 本報では高速成形加工の変形過程に関する基礎的解明を行なう第一段階として, 当所設置のダイナパック(Dynapak)600型により純アルミニウムの室温衝撃押出しを行ない, 押出材の流れ, 硬度分布, 潤滑の作動, 押出し材のちぎれ, 変形仕事量などを低速押出しの場合と対比しながら高速衝撃押出しの特徴を考察した.

II. 実験装置および方法

衝撃押出し試験に供したダイナパック 600 型(Fig.1)は横型で, 高圧の窒素ガスの急膨張によつてラムが高速で駆動され, 衝撃的に加工が行なわれる. その作動の機構は高圧の窒素ガス(fire gas 1)とセット部の窒素ガス(set gas

2)がセットピストン(K)を圧して平衡を保っているが, トリガー部(5)に窒素ガスが導入されると平衡が破れてセット

A Shock absorber	1 Fire gas
B Ram piston	2 Set gas
C Metal bearing	3 Ram back gas or oil
D Metal ring	4 Set oil
E Punch	5 Trigger gas
F Die, container	6 Shock absorber oil
G Bolster	7 Shock absorber gas
H Tie rod	8 Gas(N ₂) pipe
K Set piston	9 Oil pipe

Fig.1 Cross-sectional view of dynapak 600 machine.

ピストンは右に移動し, 高圧のガスがトリガー部に流れ込んでラムピストン(B)の全面に接するので左へ高速で駆動される. また同時にその反動でボルスター系は右へ動くため, 高速軽量のラム系(約250 kg)と重量が大きく低速のボルスター系(約2000 kg)が衝突する形で加工が行なわれる. ラムは加工後油圧(Ram back oil)によつて元の位置に戻される. 最大エネルギーは約5 t-mである. ラムの相対速度は最大約25 m/sec位まで可能であるが, ラム重量を変えることにより多少増減できる. ラムストロークは最大約30 cmである.

応力の検出にはポンチにワイヤーストレンゲージ(120 Ω), ブリッジ結線)を接着し, その出力変化を広帯域増巾器を通してメモリスコープに記録させる. 較正は500 t水圧プレスで静的に行なつた. 速度の測定にはKodak High Speed Camera(1700~2400コマ/sec)および差動変圧器を併用した.

** 東北大学金属材料研究所 (The Research Institute for Iron, Steel and Other Metals of Tohoku University, Sendai)

* 1963年4月本会東京大会に発表

(1) 塑性と加工: 抄録, Vol.1, No.1(1960), 51.

(2) A.H.Peterson: Metal Prog., Aug. (1962), 78~83.

比較のための低速押出しはダイナパックの工具をそのまま移設して 500 t 水圧プレス (0.6 mm/sec) によつて行なつた。

試料は純アルミニウム (純度 99.77%) を $39\phi \times 40$ mm のビレットに鍛造, 旋盤加工後, 400°C で 3 時間焼鈍して炉冷した。押出は前方押出 (正押出) 法による。

III. 実験結果ならびに考察

1. 潤滑について

高速衝撃応力下における押出中の潤滑の機構は材料と工具の相対的なすべり速度, ダイ, コンテナへの面圧, 温度の変化など色々な因子が関与して一義的な解釈ができ難い。そこで以下に述べる実験結果に基づき衝撃加工時における潤滑の作動の特徴を低速加工の場合と比較考察した。

実験は Table 1 の潤滑剤を塗付した場合, および全く塗

Table 1 Lubricants used for the comparison test.

Supplied lubricants	Classification
Rape seed oil Caster oil Palm oil	Vegetable oil
Lanolin Beef tallow Grease	Animal oil
90# turbine oil 30# motor oil Machine oil	Mineral oil
Palm oil etc.	Fatty oil
Molybdenum disulfide etc.	Solid lubricants
Paraffin chloride	Extreme pressure lub.
Oleic acid	Fatty acid
Stearic aluminium	Metallic soap

布しない場合について比較した。潤滑の良否を判定する基準として, 押出比, 押出エネルギー, 工具粗度の三つの条件を同じにして押出材の表面状況, 押出長さ, ポンチ応力に対し, 潤滑剤を変えた場合いかなる影響を与えるかによつて判断した。潤滑剤は予めビレット表面に一樣に薄く塗付して実験を遂行した。

工具粗度の影響については, 工具端面に同心円の旋盤仕上面が残っている粗いものと, エメリーペーパーによつて滑らかに研磨仕上げを行なつたものによつて比較を行つた。

実験の結果は後者の研磨仕上げを行つた場合には潤滑を全く塗布しない場合を除いて, 表示したいかなる潤滑剤であつても押出長さ, 表面状況およびポンチ応力についてはほとんど顕著な差異は認められない。しかるに前者の粗い工具面の場合には動物油, 植物油などに比し油性が比較的

低い 90# タービン油の如き鉱物油が押出速度すなわちラム駆動圧を増すとともに他の潤滑剤に比し多少潤滑性が向上している。高速押出し材の表面状態はいずれの潤滑剤であつても同様に平滑で焼き付きが起つていない。潤滑が良くいっているので金属光沢は得られず, にぶい光沢の表面となる。

一方低速で 90# タービン油を用いて押出した場合には潤滑が切れ素材が工具に焼きつき易く, 非常に荒れた表面になり易い (Photo. 1)。

Photo. 1 Surface of extruded rod using the same tool and lubricant (90# turbine oil).
Upper: Dynapak extrusion,
Lower: Static extrusion by 500 t press.
Reduction, 10:1

衝撃高速押出しの場合, 潤滑剤は工具と素材の間に拘束されて内部に貯留し, いわゆる強制潤滑⁽³⁾が行なわれて, 流体潤滑に近い状態で押出しが進行すると考えられる。実際に押残り部表面には潤滑剤貯留の痕跡があり, ビレット調整時の旋盤仕上げがそのまま残っており, 素材と工具が直接すり合っていないことが判る。一般的な傾向として油性の悪い油が速度の増加によつて摩擦係数の著しい低下をきたすといわれる⁽⁴⁾。このことは 90# タービン油による高速押出しにおける潤滑性の向上と一致するが, その理由として境界潤滑層または面上の凹み中の油が工具と材料の間に引込まれたり排除されずに残留する量が速度の増大と共に増すためと考えられている⁽⁵⁾。実際に排除されずに残る潤滑剤のために押残り部の角が欠けたり, 表面に凹凸が出来たりする傾向は, 押出速度が高速である程著しく, このような傾向は鍛造のような場合には留意を要することとなるのであろう。

潤滑効果に関連して, 高速押出しで潤滑剤を塗付する場合と塗付しない場合を比較すると, 塗付する場合には約 10% の最大ポンチ応力の減少, 約 25% の押出し長さの増加が認められる。

また衝撃押出し中の応力-時間曲線 (Photo. 2) には非常に微細な振動と 1 KC 位の周期の振動の合成振動が観測さ

(3) D. G. Christopherson: Proc. Inst. Mech. Engrs., 169 (1955), 643.

(4) O. H. Clark: J. Appl. Phys., 22 (1951) 474.

(5) 鈴木弘編: 塑性加工, p. 215.

れる。機械の各部分の寸法等から計算の結果、微細振動はポンチ系、大きな振動はショック・アブソーバーを介する

Photo.2 Stress-time curves for various lubricants(1.2 t-m).

タイ・ロッド系の固有振動と考えられる。これについては、Bowden⁽⁶⁾が“付着すべり”に関連する現象として機械の系の固有振動と慣性効果による摩擦とすべり速度との関連を説明しているが、特にダイナパックのように弾性自由度を比較的多く有する系においては、かかる現象の可能性も大である。またこれが潤滑効果に影響を与えていることも考えられ、材料の塑性と併せて現在なお検討中である。

2. 押出材の流れ

衝撃押出し加工時における金属の内部の変形状態を知る目的で、ビレットを二つに分割し格子線をつけて加工を行ない、分割面上の格子線の流れによつて金属の流動および

Photo.3 Flow pattern of lattice billet (reduction 20:1)

Left: Static extrusion with lubricant
Center: Dynapak extrusion without lubricant
Right: Dynapak extrusion with lubricant.

ひずみ状態を観察するいわゆる分割ビレット法と、押出加工後の材料の断面を分割し王水処理を施して流線のマクロ組織を観察する方法とを併用した。低速押出との比較には、ダイナパックで用いたポンチ部およびコンテナ、ダイ部をそのまま 500 t プレスに移設して押出しを行ない、各々の材料の流動および硬度分布を調べた。

実験結果は **Photo.3** に示すようにダイナパックによる押出材の流動はすみずみにまで行き回り、“dead zone” が殆んど認められず、工具の摩擦による外部的な剪断変形(付加的剪断変形)をあまり受けていない。この傾向は高速程顕著になる。これについては前述の接触面での摩擦が高速ほど低下する傾向とも併せて、高速での潤滑効果が大きく関与していると解される。

また押出材の断面をマイクロピカース(荷重 50 g)によつて硬度分布を測定した(**Fig.2**)。全般的な硬度の平均値

Fig.2 Hardness distribution of longitudinal butt section.

は押出比 5~20 の範囲で低速押出材と顕著な差異は認められない。しかし、硬度分布からみると一般の押出加工における如きダイス面近傍の dead-zone は形成されず、ビレットの上下から変形するため鼓形となり、コンテナとの接触面側にやや硬度の低い部分が存在する。変形流動はダイス面に近接して行なわれるのでダイス面近傍が最も加工硬化している。低速の場合には dead-zone での非硬化部があり、この領域との境界に沿つて変形が不均一に進行する。従つて **Photo.4** の格子線の流れからも判るが、低速押出しにおいてはビレット中心部と表面部との変形流動の差異が大きい。

高速押出における変形熱の影響は、押残り部の硬度分布には明らかでない。押出し部ではそれが明瞭に現われてくるが、組織的な検討と併せて後報で詳述する。

3. 押出材のちぎれ

高速押出しにおいて一つの加工限界を与える現象として押出し棒の引きちぎれがある。すなわち押出し中の速度が急に大きく減少するような場合、押出し棒の根元の付近に慣性力が働き、大きな引張り応力を受けてちぎれる場合がある。押出し中の速度変化は必ずしも一様ではなく、い

(6) F.Bowden: Proc.Roy.Soc.NSW,78(1945),187.

いろいろな因子によって変る。材料自身の加工硬化、熱発生による軟化、外部摩擦変化があり、またラムバック圧の増加や

い(低速)側でラム重量の小さい方が大になる。Al の押出し長さについても同様の傾向がある。

Photo.4 Macro-etched flow pattern of longitudinal butt section extruded by Dynapak.

ショックアブソーバーによるエネルギー吸収などがこれに関与する。したがって厳密にちぎれ破断限界を求めることはむづかしい。また熱影響は顕著で押出末期に、いわば蓄熱されて高温高速引張りのような状態で破断が起る。実際に高速度カメラで減速度を観測してみると、押出比 20, ラム駆動圧 1400 psi で押出す場合には破断は起らないが、押出末期に約 $-700G$ (G は重力の加速度) がビレットに加わり、押出棒には $-1.4 \times 10^4 G$ 位となる。ところが 1750 psi で押出すと破断するが、この場合には押出棒に約 $-3.5 \times 10^4 G$ が加わっており、この場合に生じた引張り応力は約 45 kg/mm^2 である。このような引張りの応力を生じるために押出速度、押出比に限界を生じるが⁽⁷⁾、その機構の解明および抑制は今後さらに検討を要する問題である。

4. 所要力, 仕事量

高速衝撃押出しにおいて如何ほどのポンチ応力が加わり、また如何ほどの仕事量で加工を行ない得るかをすることは、工具および機械の保守あるいは衝撃加工の特徴を知る上で必要である。そこでまず前記高速度カメラにより、ラム重量およびラム駆動圧を変えた場合のラムおよびボルスター双方の変位を観測し、各々の速度ならびにエネルギーに換算した。結果を Fig. 3~4 に示す。ラム重量の小さいほど、またラム駆動圧の高いほど押出加工中始めの高速状態が維持され、加工末期の急な減速により加工を完了している。ラム重量の大きい場合には小さい場合に較らべ加工中の速度変化は比較的ゆるやかである。エネルギー的には Fig. 5 のようにラム駆動圧の高い(高速)側でラム重量の大きい方が軽量のものに較らべて大であり、ラム駆動圧の低い

Fig.3 Time versus stroke diagram for relative movement of ram and bolster. Ram weight: 70 kg(upper), 200 kg(lower).

Fig.4 Fire pressure (ram driving force) versus relative velocity diagram, calculated from Fig.3.

つぎにポンチの応力-時間曲線と加工中の速度変化より、応力-ひずみ曲線を求め、これと前記 500 トン水圧プレスによって低速で押出した場合の応力-ひずみ曲線とを比較した(Fig. 6)。押出速度を大きくすれば、ポンチ応力には

(7) 石井, 小林: 塑性と加工, Vol.3, No.18(1962), 504.

材料自体の変形抵抗が大きくなる因子と同時に、これとは逆に温度上昇のために変形抵抗が低下する因子が加わる。

Fig.5 Fire pressure (ram driving force) versus energy relation, calculated from the data shown in Fig.4.

Fig.6 Stroke versus punch load diagram in dynapak and 500t press (static) extrusion.
Lubricants: (1), (6) 90# turbine oil, (2) palm oil, (3) paraffin chloride, (4) beef tallow and (5) lanorin

さらに外部摩擦仕事は潤滑状態が前述のように高速ほど良好となるので減少する。また加工中の速度変化に基づく慣性引き抜き力によってポンチ応力はさらに減少する。したがって低速押出しに較らべ、高速押出しでは変形仕事量、最大ポンチ応力ともに却って低くなつたと考えられる。

高速押出しにおける熱の影響はかなり著しいと思われる。加工中いかほど温度が上昇しているかの直接計測は困難であるが、局部的にはかなり高温に達するであろう。機械的な仕事がすべて熱に変換されるとすれば、単位体積当りの温度上昇 $\Delta t (^{\circ}\text{C})$ は

$$\Delta t = P/J \cdot C \cdot \rho$$

P : 押出圧 (kg/cm^2),

J : 熱の仕事当量 ($4269 \text{ kg} \cdot \text{cm}/\text{cal}$)

C : 比熱 ($\text{cal}/\text{g}^{\circ}\text{C}$), ρ : 密度 (g/cm^3)

で与えられる。たとえば Al を押出比 20, ラム駆動圧 1400 psi で押出す場合に押出圧は $72 \text{ kg}/\text{mm}^2$ となり、この場合の温度上昇は約 300°C に達することになる。この何% が熱仕事として実際の加工に関与しているか判断しがたいが、Wallace は $0.5 \times 1 \text{ in} \phi$ の 99.7% Al を押出比 6 で衝撃的に押出した場合の温度上昇を 186°C と観測し、押出エネルギーの 96% が熱に変換されていると報告している。今回の実験で分割ビレットの格子線の溝にテンペルスティックを封入して押出した場合には 400°C 位に達する場合も認められており、冷間加工とはいっても実際にはかなり高温で加工が行なわれていることもあるであろう。したがって押出し材の機械的性能に関しては蓄熱による局部的な軟化などが考えられ充分吟味されねばならない点も多い。

IV. 総 括

ダイナパックにより Al の冷間衝撃押出しを行なつて、つぎのような結果を得た。

(1) 潤滑性能の判定に押出長さ、押出し材表面状況、ポンチ応力を基準として各種潤滑剤を比較した。無潤滑を除いて潤滑剤によつて大差はなく、焼き付きのない様な表面となる。とくに高速では油性の低い 90# タービン油のような鉱物油が比較的良好な結果を示したが、これは潤滑剤がかえつて排除され難く、高速で粘度の著しい増大があり、流体潤滑の可能性を大きくするためと考えられる。

(2) 高速押出しの場合材料と工具面の摩擦が少く、材料の流れは均一でいわゆる dead-zone はほとんどなく、非定常域が短くなる。硬度分布は材料の流れに対応し、高速押出しではダイス面に接して硬化部があり、低速ではこの付近が非硬化部となる。

(3) 押出し仕事量は、高速で押出す場合断熱変形効果、潤滑性能の向上、慣性的引き抜き力によって低速押出しの場合より減少する。

本研究を行うに当り種々御指導御援助戴いた当所、田中英八郎教授および福田武司氏に厚く感謝の意を表する。