

氏 名	Xiao 謝 Jian 建 Xin 新
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 3 年 3 月 28 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 材料加工学専攻
学 位 論 文 題 目	多素材押出し法による中空品の成形加工に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 高橋 裕男
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 高橋 裕男 東北大学教授 桑名 武 東北大学教授 池田 圭介 東北大学助教授 村上 糺

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

金属材料の塑性加工において大きな役割を果たしてきた押し加工技術については、いろいろな進歩改善がなされつつあるが、高強度材料の中空品や高精度の型材およびクラッド材の成形などにおいてさまざまな問題が残っている。たとえばポートホールダイなどを用いる、いわゆるウェルディングチャンバー方式の押し加工（WC法）では、一工程の前半で素材の分割を行ない、後半で接合成形を行う工具構造となっているためにダイ強度が不足で高力アルミニウム合金および銅や銅合金など高強度材料の中空品成形への適用が難しい。

本研究における多素材押し法（図1）は従来のWC法における素材分割過程を複数素材で置換えることによって高強度材料の中空品成形を可能にすることを狙った新しい加工法である。

本研究は中空品の新しい加工法としての多素材押し法における変形挙動、および本法の応用可能性について調べたものであるが、ウェルディングチャンバーにおける材料流れおよび接合挙動は多素材押しの場合でも、従来のWC法の場合でも同じであると考えられるので、多素材押し法についての研究は従来、遅れているWC法押し加工についての研究の進展にも寄与すると言える。

第 2 章 多素材押しパイプ成形所要力

本章では被加工材料に市販純鉛を用いて、パイプの多素材押し成形を行い、多素材押し加工の際の荷重特性について調べた。押し前期段階においては素材はウェルディングチャンバーに充

満するため、荷重－ストローク曲線は階段状に変化する。平均押し圧力（押し荷重を素材の総横断面積（コンテナ穴の総横断面積）で割った値）は押し比 R 、コンテナ穴数 N およびコンテナ穴の外接円の直径 D それぞれの増加に対してほぼ直線的に増加する。また、ウェルディングチャンバー深さ h の小さい方が押し圧力は高くなる。かような傾向は従来の WC 法押しにおいても認められるはずである。

第3章 多素材押しパイプ成形における材料流れ

本章では、半割り工具を用い、4 素材押しによりパイプを成形する場合を取り上げ、ウェルディングチャンバー内での材料流れおよび接合挙動を格子線法で調べた。ウェルディングチャンバー内で隣り合う素材どうしの接触面（接合面と呼ぶ）には、素材内部から材料が流出してきて、新生面が形成される（図2、ダイ出口直上の白色領域）。新生面が形成された領域は素材どうしの接合が実際に起こる領域（接合領域と呼ぶ）と考えられる。この新生面が形成された領域はダイ出口の近くにあり、接合面において比較的小さい面積を占めるに過ぎない。本章の実験で得られた、ウェルディングチャンバーにおける塑性領域を押し方向に投影した形は4葉クローバーとよく似ている（図3）。そして、コンテナ穴数 N が多いほど、またコンテナ穴がコンテナブロック中心から離れる（穴の外接円直径 D が大きい）ほど、図3のクローバー状塑性領域の面積が大きくなると推測された。それゆえ、第2章の結果に示したように、 N 、 D が大きいほど押し圧力は大きくなるものと考えられる。一方、チャンバー深さの小さい方が押し圧力が高くなる（第二章）原因は、チャンバー深さは小さい方が、被加工材料はチャンバーにおいて、より大きなせん断変形を受け、円周方向へ（接触面の方へ）の流れ拘束が強くなることにあることも明らかにされた。テーパ付マンドレルを用いた時の材料流れ挙動を調べた結果、マンドレルのテーパ部の形状寸法が押しされるパイプの寸法誤差に大きな影響を与えることが示された。そこで、次に示したテーパマンドレルのテーパ部を設計する基準式を導いた。

$$L < h - t \text{ の場合, } 0 \leq \theta \leq 90^\circ \quad (3-1)$$

$$L \geq h - t \text{ の場合, } \theta < 2 \tan^{-1} \left(\frac{h - L}{t} \right) \quad (3-2)$$

ここで、 h はチャンバーの深さ、 t は押しされるパイプの肉厚、 L および θ はそれぞれマンドレルのテーパ部の長さと半頂角である。

上の基準式は従来の WC 法についても適用できると考えられる。

第4章 多素材押しにより成形したパイプの接合状態および寸法状誤差

第2章のさまざまな条件のもとで押しされた鉛パイプの接合状態、寸法形状誤差およびそれらの影響要因について調べた。パイプの接合状態について、液圧バルジ試験を行った結果、押し比が7以上であれば、パイプの接合強度は素材の降伏強度以上になり、本加工法により健全なパイプが成形でき、多素材押し法が中空品の新しい加工法として実用の可能性が十分あることが確認され

た。ほかの加工因子（コンテナ穴数 N 、コンテナ穴の外接円直径 D など）はパイプの接合状態にあまり影響しなかった。ウェルディングチャンバーの深さ h が押出されたパイプの肉厚 t に等しいかあるいは t より小さい場合はパイプの外径誤差および形状誤差（パイプ断面形状の円形から多角形へのゆがみ）が大きくなることが分かり、ウェルディングチャンバーの深さを押出されたパイプの肉厚より大きく取ることが必要であるとの知見が得られた。

第5章 多素材押出しパイプ成形における圧力分布の測定

本加工における接合はいわゆる圧接である。そこで、本章ではセレーション型感圧素子を用いて、素材どうしの接合面およびダイ加圧面における圧力分布を測定した。その結果、素材どうしの接合が実際に行われる接合領域における圧力レベル比較的低いこと、本実験に用いた工具構造の場合には接合面における最大圧力領域はデッドメタルゾーンにあることが判明した。接合強度に関して、 $R = 4.3$ の場合は $R \geq 6.4$ の場合に比べて明かに劣るという結果になったのであるが、その原因の一つは図4に示したように $R = 4.3$ の場合、特に接合領域内側部（パイプ内側部）の接合圧力が低いことにあると思われる。また、ほかの押出し条件は同じで、ウェルディングチャンバー深さを $h = 10\text{mm}$ からその半分（ $h = 5\text{mm}$ ）に減らした時の接合領域における圧力分布について調べた結果は、チャンバー深さの小さい方（ $h = 5\text{mm}$ ）が接合領域のダイ出口に近い部分における圧力は比較的低くなり、接合領域全体の圧力レベルもいくぶん低下することが分かった。これは第2章「 h の小さい方が押出し圧力は高い」、第3章「チャンバー深さは小さい方が、被加工材料はチャンバーにおいてより大きなせん断変形を受け、円周方向への流れ拘束が強くなる」などの結果とよく関連する。

第6章 多素材押出しパイプ成形の数値解析

本章では第2章～第5章の実験結果を踏まえて、多素材押出しパイプ成形のコンピューターシミュレーションを行なうための理論解析法について述べている。解析方法は変形エネルギー法に基づいており、3次元変形モデルを提案し、数値解析を行なった。提案した解析モデルで予測した押出し荷重は実験結果とよく一致した。また、計算結果によれば平均押出し圧力に対し、最適ウェルディングチャンバー深さは、押出し比 $R = 4.3$ の場合、 $10 \sim 15\text{mm}$ で、 $R = 6.4$ の場合、 $8 \sim 12\text{mm}$ である。

第7章 熱間多素材押出しパイプ成形

前章までの結果から本加工法により十分な接合強度を有する健全な中空品を成形できることがわかった。そこで、本加工法の実用性を探るために、本章では実際に従来のウェルディングチャンバー方式（WC法）による中空品の成形に一番多く使われている純アルミニウムA1050、アルミニウム合金A6063、および従来のWC法では中空品成形が困難な高強度アルミニウム合金A7475、銅合金C3771などを用い、熱間多素材押出しによるパイプ成形を行なった。押出しされたパイプの接合状態はパイプ横断面における接合部付近の組織観察、扁平試験および円錐パンチによる押広げ試験などによって調べられた。多素材押出し法により従来のWC法で成形できなかったA7475、C3771などのパイプ成形もできて、成形したパイプは素材の降伏強度に劣らない接合強度を持ち、JISの特

殊級の寸法精度を有することなどが確かめられ、多素材押し法は中空品の新しい加工法として極めて有望であることが分かった。

第 8 章 総 括

第 1～7 章の結果をまとめた。

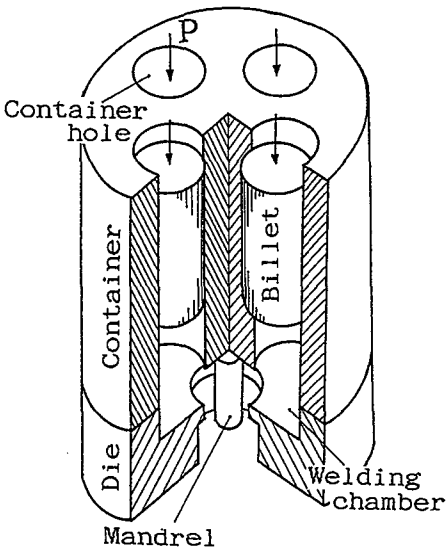


図 1 多素材押し法

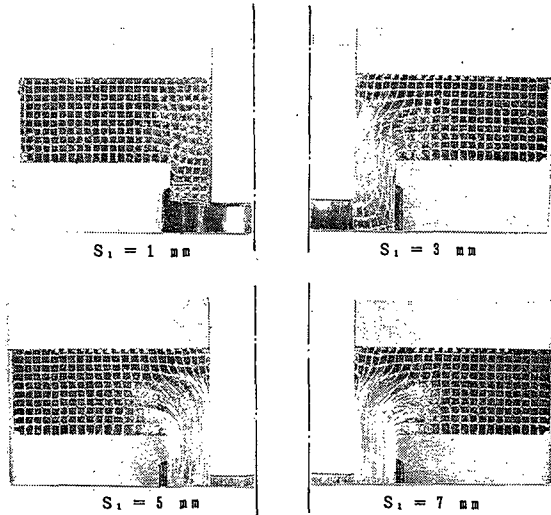


図 2 素材どうしの接合面における新生面の形成。
格子線はウェルディングチャンバーが充満された後試料を取り出して黒色に着色してからけがいたものである。S₁は格子線をけがいた後の再押し出しストローク

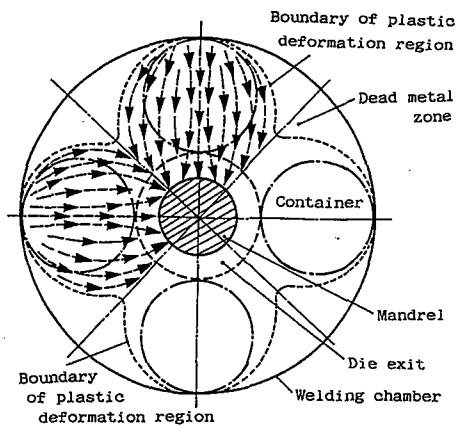


図3 押し出し方向に見たウェルディングチャンパーにおける塑性領域形状および材料流れ

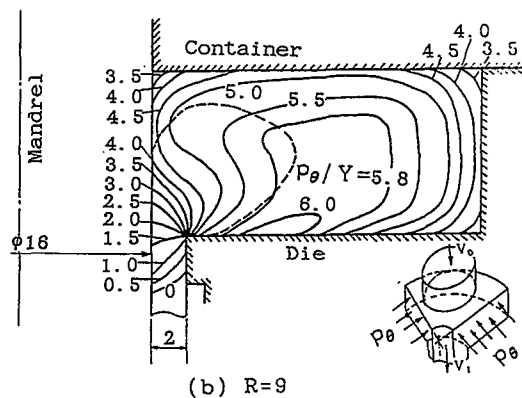
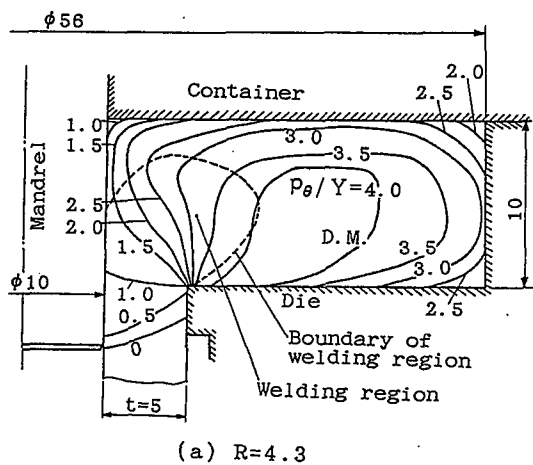


図4 接合面における圧力分布。R = 素材の総横断面積 / パイプの横断面積

審査結果の要旨

アルミニウムの管やサッシのような複雑形状品の成形にはポートホールダイまたはブリッジダイを用いた押し加工が広く行なわれている。この加工では一工程の前半で素材の分割、後半で接合成形を行なう工具構造となっているため工具強度上から高強度材料への適用が制限されている。多素材押し法は、従来における分割工程を、複数素材を用いることで省略し、接合成形を行なう新しい加工法である。本論文は多素材押し法の基本となる中空品、とりわけ円管の成形に関するもので、全編8章より成る。

第1章は緒論である。

第2章では鉛をモデル材料とした成形実験によって本加工法に関する作業因子が成形荷重に及ぼす影響について述べている

第3章は材料流れについての実験結果である。半割り工具ならびに半割り素材を用いて格子線法によって加工の進行に伴う内部変形を追跡し、接合が達成されるための新生面の発現機構を明らかにしている。これはこの加工の成否を決定づける重要な知見である。

第4章では成形品の接合状態および寸法精度について述べており、押し比を7以上を取れば接合強度も十分で、真円度も良い健全品が得られることを確かめている。

第5章は第3章の実験で用いた半割り工具に感圧素子を組込んで行なった圧力分布測定に関する。十分な接合強度が達成される場合、接合が行なわれる領域に作用する圧力は素材の流動応力の1.5~5.5倍であり、ダイアプローチ面に作用する最大圧力は流動応力の6倍に達すると述べている。

第6章はこの加工についての理論解析で、三次元変形に表わす速度場モデルを提案し、エネルギー法で解析を行なって、荷重その他について実験とよく合う結果を得ている。

第7章は応用研究で、高力アルミニウム合金や黄銅など、従来のポートホールダイ押しではダイの強度が不足で加工できなかった材料について多素材押しを行なって、十分な接合強度と寸法精度を持つ管の成形が可能であることを実証している。

第8章は総括である。

以上要するに本論文は、従来法における素材の分割工程を複数素材の使用で置換えることによって高強度の材料の中空品成形が可能となることを基礎から応用に至る一連実験によって確認し、工具設計ならびに加工条件の設定に有用な多くの知見を与えたもので、材料加工学の発展に寄与する所が少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。