PCR 加工による円管の重ね圧接*

森 敏 彦^{*1}

Lap Pressure Welding of Tubes by PCR

Toshihiko MORI

A new process for tube ironing, the planetary conical rolling (PCR) process, is proposed. A number of rollers rotate around the cone while revolving around their respective axes, preventing sliding friction which is the main cause of galling and breakage in the conventional ironing process. This process has a number of advantages. For example, a large deformation and a high pressure can be applied locally to the deformed material because this process is an incremental process and the axis support cone is highly rigid. For making use of these characteristics, a lap pressure welding of aluminum alloy A5052 tubes in the radial direction was conducted. It was clarified by visual and SEM observations and roughness measurements that the process is composed of five steps. Especially, it is important that a pressure welding step appears. Furthermore, the pressure welding mechanism was explained by strain distribution and feed force measurements. The shear bonding strength of about 45 MPa is an enough value for A5052. For the sake of pressure welding, it is necessary that the thickness reduction is larger than 0.4 and the lap length is larger than 10 mm.

Key Words: Plastic Forming, Friction, Formability, Bearing, Planetary Conical Rolling, Pressure Welding, Lap Welding, Tube, Aluminum Alloy

1. 緒 言

著者が開発したプラネタリ・コニカル・ローリング(PCR 加工と呼ぶ)は既報⁽¹⁾⁽²⁾で述べるようにいくつかの利点を有する。それらの利点の一つである「逐次に高い面圧, 大きな変形を加えることができる」を生かす加工として, 本報では円管の半径方向重ね圧接を試みた。本加工法は, 円周方向に遊星圧延を行っているとみなすことができ, 圧延で可能な圧接は本加工でも十分に可能と期待できる。異種材料の丸棒を軸方向に摩擦圧接し, 必要箇所のみ高機能をもたせる加工はすでに実用化されている。ところが, 従来の軸方向摩擦圧接を円管に適用しようとした場合には, 十分な接合強度を得るためにフランジを設けるなどの付加的箇所, 付加的加工を必要とする。本加工では, 何ら付加的箇所のない円管の接合端部に準備工程で口拡張と口狭めを行えばよい。さらに, 摩擦圧接では丸棒に回転, 軸方向の力を加えるために, 製品寸法に限られるが, 本加工法では工具に回転, 軸送りさせればよく, 大物長尺円管の接合が可能である。

したがって, 石油パイプライン, 化学プラントの配管などにおける接合, 丸棒と同様に適所に適切な機能材料が配置された高機能円管部品の製作など本研究の成果が有益となる状況は多い。

以下で, 圧接過程, 機構, 条件を走査電子顕微鏡観察, ひずみ測定, 接合強度測定などで明確にした。

2. 加工原理および実験装置

2・1 加工原理 図1にPCR(Planetary Conical Rolling)加工の加工原理を示す。本加工は, 回転するダイスに加工素材を納め, 軸方向に多数のテーパローラを送り, ローラを自転と同時に公転させて管壁をしごく加工法である。遊星圧延(Planetary Rolling)の一つのローラセットを90°回転させ, バックアップローラおよび遊星ローラにテーパをつけ, その外に素管を納めるダイスを用意した形式ともいえる。

2・2 実験装置および工具 実験装置は既報⁽¹⁾と同一のものを用いた。テーパローラ工具はNTN製(ローラ個数14, ローラ角12.5°, 最外包絡円径64.6mm)を使用した。ダイスは, 内径69.0mmで縦半割り構造となっている。加工機械には普通旋盤を用い, 主軸のチャックにダイスを固定し, 心押し台に取付けた円すいローラ軸受用ホルダを自動送りとした。なお, ホル

* 原稿受付 1997年11月10日。

*¹ 正員, 名古屋大学大学院工学研究科(☎464-8603 名古屋市千種区不老町)。

グ軸の前部は段付きとして小径部に軸受内輪をはめて両者をボルトで結合、後部はテーパ部で心押し台と結合した。

2・3 送り力、円周方向接線力の測定 円すいローラ軸受用ホルダに作用する軸方向送り力 P と円周方向接線力 T は、ホルダ中間薄肉部の変形をひずみゲージで取出すことにより測定した。測定された P 、 T 両成分力は滑り抵抗形変位計で取出したローラストロークに対して、 $X-Y$ レコーダに記録した。

3. 実験条件および方法

3・1 加工素材 試験用素材として、高強度の固溶強化形アルミニウム合金 A 5052-H 14 の押出し円管を用いた。表 1 に化学成分、表 2 に機械的性質を示すが、引張強さは 251 MPa と高く、延性尺度の n 値は 0.088 と比較的低い。

3・2 ダイスの回転数、ローラの送り速度 ダイス回転数を 400 rpm と一定、ローラ送り速度を 0.021、0.30 mm/rev の 2 種類で実験した。

3・3 素管、製品寸法および壁厚減少率 素管形状寸法を図 2 に示す。接合部において、内側となる素管を内管、外側となる素管を外管と呼んで区別する。外管外径は製品外径の 69 mm (=ダイス内径) に一致させ、加工前にダイス内に納める際のはめあわせは外管と内管が 0.05 mm 程度のすきまばめとなるよう寸法設定する。製品壁厚はダイスとローラのすき間に一致し、 $t=2.2$ mm と与えられる。接合部において外管壁厚と内管壁厚をほぼ同一とするため、今回は外管壁厚を製品壁厚の 1/2 とした。なお、後述するように、本加工法において外管の変形は小さい。接合部全体における平均的加工率としての壁厚減少率 R は、内管、外管の加工前および加工後の壁厚、 t_{i0} 、 t_{o0} および t_i 、 t_o

により

$$R = \frac{(t_{i0} + t_{o0}) - (t_i + t_o)}{t_{i0} + t_{o0}} = 1 - \frac{2.2}{t_{i0} + t_{o0}} \dots\dots (1)$$

と与えられる。外管壁厚減少が無いとした場合のおよその内管壁厚減少率 R_{inner} は次式で与えられる。

$$R_{inner} = \frac{t_{i0} - t_i}{t_{i0}} = 1 - \frac{1.1}{t_{i0}} \dots\dots\dots (2)$$

素材内管の壁厚変更により、全体平均壁厚減少率を 0.21~0.45 (外管壁厚減少=0 とすれば、内管壁厚減少率は 0.35~0.62 に相当) と変え、さらに、加工前の接合部重ね長さを 7.5~15.0 mm と変えた。後述するように素管における両寸法とも圧接の成否に大きな影響を与える。

4. 実験結果および考察

4・1 工具の動きおよび材料流動 図 3 に PCR 加工における工具の動き、変形部の材料内流動を示す。動きはダイスに相対的な状態で表し、(a) は周断面、(b) は縦断面を表す。

4・1・1 周方向流動成分 (v_c) 周方向 [図 3(a)] で見ると、本加工形式は遊星圧延に類似する。円すい状インナ・レースの周りにわずかにテーパのついたローラが材料内面を圧下し、材料外面をダイスが受ける。インナ・レースの回転でローラの回転が誘起され、ダイスが静止していると考え、両者の以下の回転

ω_b : インナ・レースの回転速度

Fig. 1 Forming principle of Planetary Conical Rolling

Fig. 2 Dimensions of raw tubes

Table 1 Chemical compositions of material used

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
wt %	0.06	0.12	0.01	0.03	2.40	0.18	0.02	Bal.

Table 2 Tensile properties of material used

Property	Value
σ_B (Tensile strength) /MPa	251
δ_u (Uniform elongation) /%	5.2
δ_T (Total elongation) /%	8.1
q_0 (Reduction of area) /%	34
n (Strain hardening exponent)	0.088
F (Plastic coefficient) /MPa	352

Fig. 3 Tool motions and material flow in PCR

$\omega_{r,l}$, $\omega_{r,s}$: ローラの公転速度および自転速度の間には、近似的に

$$\omega_{r,l} = \omega_b/2, \quad \omega_{r,s} = \omega_b \frac{r_b}{2r_r} \quad \dots\dots\dots (3)$$

の関係式がある。ここで、 r_b =インナ・レースの半径、 r_r =ローラの半径である。

4・1・2 軸方向流動成分 (v_l) ローラ・ダイス間の変形状態を軸方向で見ると、本加工はしごき加工に類似する。ただし、しごき加工と異なりローラは材料とほぼ線接触し、非接触領域にあるほぼ剛体の材料要素が接触領域にあって大きな塑性変形を受けている材料要素の変形を抑制する。

4・2 接合部の観察 十分な接合強度が得られた条件(壁厚減少率0.45, 重なり長さ15 mm)における実験結果でPCR加工による半径方向重ね圧接過程を示す。

4・2・1 目視観察 図4にはく離して目視観察した内管の接合面の状態および各領域の軸方向の概寸法を示す。非接合部から先端に向けて(図4で左から右へ)各領域の特徴は以下である。なお、各領域の名称は後述の圧接機構考察よりつけた。

- I 領域(Interpenetration region, 食い込み領域): 鈍い光沢の表面肌あれ
- P 領域(Pressure welding region, 圧接領域): 光輝な表面肌あれ
- S 領域(Smooth region, 平滑領域): 平滑な光輝面
- A 領域(Abrasion region, 擦過領域): 深い円周溝と斜めの擦過痕の大きな表面肌あれ

Fig. 4 Characteristic regions and these longitudinal length on the welding surface of an inner tube

T 領域(Through region, 通り抜け領域): 旋削面に近い光沢面

I, P, S 各領域の境界は不明りょうであるが, S と A, A と T の各領域間の境界は明りょうである。

壁厚減少率, 重なり長さを減じていった場合, 当初, I, S, A, T 領域の寸法は変わらず, P 領域の寸法のみが減少する。P 領域が消滅すると, S 領域が減じ, 次に A 領域が減ずる。

接合部の長さ, すなわち, 概寸法の和は約 30 mm であり, 当初の重なり長さ 15 mm がこれだけに伸びたこととなる。この寸法は材料寸法と変形から大略見積もることができる。

体積一定則および平均壁厚減少率 R から $l/(1-R) = 15/0.55 = 27.3$ mm と計算され, 一方, 壁厚減少が内管のみに生ずるとすると, 内管の仮想壁厚減少率 R_{inner} より, $l/(1-R_{inner}) = 15/0.38 = 39.5$ mm と得られる。実際寸法の 30 mm は両計算値の中間の値となる。

4・2・2 走査電子顕微鏡観察 図5に示す走査電子顕微鏡観察から見られる特徴は以下である。

- I 領域: 2 μ m 程度一定厚さの表面酸化膜が破断, 分離し, その間に新生面が現れている。
- P 領域: 内管, 外管が塑性変形で互いに食い込みあうことによる滑らかな筋状となっている。中央部には拡散による金属結合が分離の際に破断した箇所が存在する。小片が埋り込んでいるのも見られる。
- S 領域: ほぼ軸方向の浅い擦過痕, わずかに残る旋削痕よりなる。
- A 領域: 長く大きな凹凸よりなる。
- T 領域: ひび割れ状円周溝が見られる。外管には旋削マークが明りょうに見られ, 内管よりの移着も見られる。

4・2・3 表面粗さ 図6に示す粗さ測定結果より指摘できる特徴は以下である。

Fig. 5 Scanning electron micrography of characteristic regions (on the surface of an inner tube)

I 領域：急激な増加となだらかな減少の鋸歯状波形(1 mm 程度の周期, 8 μm 程度の粗さ変化)よりなり, ならかな減少に 2 μm 程度の粗さの旋削痕がのる。

P 領域：8 μm 程度の凹凸に, 10 μm を超える深い谷が混じる。

S 領域：ほぼ軸方向の浅い引っかき痕とわずかに残る旋削痕よりなる。

A 領域：長く大きな凹凸よりなる。

T 領域：ひび割れ状円周溝が見られる。外管には旋削マークが明りょうに見られ, 内管よりの移着も見られる。

4・3 PCR 加工による半径方向重ね圧接機構 各観察結果, 粗さ測定結果および既報⁽⁴⁾の結果より圧接機構を以下に推定する。

4・3・1 各工程段階 観察, 粗さ測定結果より, 各

Fig. 6 Roughness curves in the longitudinal direction of characteristic regions

特徴領域が図 7 に示す各変形段階の連鎖で形成されると推測される。全工程には圧接(P 段階)の前工程(I 段階)と後工程(S, A, T 段階)が含まれる。なお, P, S, A, T 段階の詳細は後述する。

I 段階(Interpenetration stage, 食い込み段階)：内管に付けた内面の段の傾き約 60° はローラ工具面の傾き 12.5° と一致していないため, ローラよりの作用力は段の角のみに作用し, 図示するように内管には軸方向引張力, 外管には軸方向圧縮力が作用する。したがって, 加工前に内管と外管はすきまばめであったが, 外管先端に軸方向圧縮力が作用するために, 両者はとまりあう。半径方向圧縮力がほとんど作用しないため, 内管と外管の間には十分な接合は始まらない。内管に対する両観察, 粗さ測定結果はそこが伸ばされ, 表面硬質被膜の割れと自由表面荒れからなっていることを表す。

P 段階(Pressure welding stage, 圧接段階)：内管内面がローラ工具面に一致し, 内管と外管の間には半径方向圧縮力が作用する。ローラ接触面下

Fig. 7 Sequence of pressure welding process by planetary conical rolling

Fig. 8 Detail schematic of planetary conical rolling

部の内管材料要素には壁厚減少率に見合う大きな塑性変形が生じ、両管の接合表面には新生面が現れ、接合界面は塑性変形で食い込み合う。したがって、内管と外管は十分に圧接しあう。

S段階(Smooth stage, 平滑段階)：内管の端になり、変形が端部に抜けるため、接合界面での面圧が減少し、互いの食い込み合いも減少し、平滑な接合界面となり、接合強度も減少する。

A段階(Abrasion stage, 擦過段階)：面圧はほとんど

Fig. 9 Plastic and loaded zones in longitudinal section

Fig. 10 Plastic and loaded zones in circumferential section

作用しないか、すきまが生じており、界面中に存在する破碎された表面被膜の硬質粒子が表面を擦過することとなる。

T段階(Through stage, 通り抜け段階)：内管の端はその前の段階における負荷で内側に反り、ローラ端に到達する前に製品壁厚となっており、そこを抜ける際には負荷が作用しない。

4・3・2 圧接段階以降における変形 図8にローラ2本を取り出し、PCR加工中の状況を示す。図9、10に各観察、測定結果および既報⁽³⁾の結果より推測される圧接段階における内管の塑性領域、負荷領域を示す。各図はローラ軸を含む縦断面、円周各断面における状態である。圧接されるためには、接合界面において新生面が現れ、両管が塑性変形で食い込み合う必要がある。そのためには、B、C断面のように接合界面まで塑性領域が貫通せねばならない。さらに、本加工の特徴はローラ直下の塑性変形域が円周方向にも軸方向にも剛性域に囲まれ拘束を受けていることである。なお、圧延では幅方向の拘束が弱まり、円筒しごきでは円周方向に塑性変形域がつながり拘束が弱まる。したがって、塑性流れは遊星圧延圧接に近いかそれ以上に拘束された状態となり、接合塑性部には大きな変形と高い面圧が作用する。

圧接段階は塑性変形域前面にあたるA断面でローラに抑えられた負荷領域が存在し、この領域の材料が塑性域材料の軸方向流動を拘束することが重要となる。工程が進み、内管端が破線 E_sE_s に至ると、前面での拘束が減じ、すなわち、軸方向流動が容易となり、

端部方向に拡がる塑性変形域となる変形パターンに変わり、接合界面間での面圧が減ずる。これにより強固な圧接から平滑な接合面、すなわち、S段階に移行する。

軸方向に流動すると、材料は内管先端部に押し出され、また、塑性変形域境界でモーメントが釣合うために内管端部は内側に反ることとなる。接触するか離れるかの時期には接合界面に堆積した表面被膜破碎小片が表面を引っかいた荒れた表面が生ずるA段階となる。

さらに工程が進むと、両管が接触しないで反った状態のままの内管端部がローラによって g_i (ここで、 g_i =ローラ後端部とダイスのすきま=外管壁厚)以下に減じられる。接合面において内管表面は旋削マークがわずかに残る表面自由荒れ、外管表面には旋削マークがそのまま残る。

4・3・3 送り力線図 図11に代表的な送り力線図を示す。壁厚減少率、重なり長さとも最大の $R=0.45$ 、 $L=15\text{ mm}$ の条件の場合を基本として実線で示し、それに対し、壁厚減少率を $R=0.30$ と減少させた場合を一点鎖線、重なり長さを $L=7.5\text{ mm}$ に減少させた場合を破線で示す。

基本条件の実線を見ると、加工開始後に行程7 mmまで増加、そこで最大値18.45 kNをとった後に減少し、行程12 mmで極小16.9 kNとなり、再び増加し、行程16 mmから行程27 mmまではほぼ一定値18.0 kNをとり、それ以降は単調減少する。負荷が作用する全行程区間は43 mmとなる。

ローラの傾きと内管の段の傾きより、I段階の行程、すなわち、ローラ後端が段の根本に達する行程は、 $(t_{i0}-1.1)/((1/\sin 12.5^\circ)-(1/\sin 60^\circ))=6.3\text{ mm}$ で与えられ、送り力最大の行程にほぼ一致する。

送り力最大時に内管に作用する軸方向引張応力の最

大値は高々、 $18\,450/(\pi Dt)=78.6\text{ MPa}$ であり、素管の引張強さ以下である。送り力が一定となる行程長さは $27-16=11\text{ mm}$ はP領域の長さにほぼ一致している。非接触領域にも工具があるとして求める仮定の平均面圧は $18\,000/(\pi D(t_{i0}-1.1))=46.9\text{ MPa}$ で与えられる実際の接触部は仮想工具面の数分の1であるので、数倍の面圧が局所的に作用することとなり、十分に圧接するに可能な面圧となっている。

実線の基本条件に対し、重なり長さが7.5 mmと半分になった条件の破線の場合には、「送り力最大、減少の途中までは同一」、ところが、再び送り力が増加することなく減少し、送り力一定となるP段階は現れていない。したがって、十分な圧接は期待できない。

基本条件に対し、壁厚減少率が $R=0.3$ と小さい場合には一定送り力は7.18 kNで、基本条件の40%程度である。なお、送り力は接触面積ないしは塑性変形体積の変化によっても変わるので、先の仮想平均面圧で求めると、35.8 MPaと基本条件の値より低い。

4・3・4 接合部のひずみ分布 図12に内外管の軸方向伸びひずみ分布を示す。内管の外面接合部、外管の内面接合部にあらかじめ1 mm間隔に線をえがいておき、この間隔変化によってひずみを測定した。位置寸法の原点は内管につけた段の根本とした。初期段階における高い引張力で内管は段手前よりひずみ、段の根本部分のみ突出した値で1を越えるまでになる。接合部に入ると急減し、I領域では0.4程度に減少する。圧接部のP領域では $e=0.7\sim 0.75$ 程度、S領域に至ると再び減少する。外管のひずみは圧接部でたかだか0.2程度である。

壁厚減少率から予測されるひずみは、内外管とも同一量変形するとした場合に $\ln(1/(1-R))=0.598$ であり、内管のみが変形するとした場合に $\ln(1/(1-R_{inner}))=0.968$ と与えられる。内管のP領域にお

Fig. 11 Influences of reduction and overlap length on feed force

Fig. 12 Longitudinal strain distribution

Fig. 13 shear bonding strength

る実測ひずみは両計算値の中間に位置する。なお、実測ひずみは壁厚減少率 $R=1-\exp(-0.725)=0.52$ に相当する。

4・4 接合性評価および圧接可能条件 接合された円管から、軸方向を長手方向とした短冊形試験片を切りだし、引張りを加えることにより、接合部に対してはせん断力が作用する接合強度試験を行った。図13に壁厚減少率、重なり長さの試験条件をプロットし、プロット点の脇にせん断強さの結果を示す。なお、3条件をカッコ表示している。この条件では接合部を切り出した段階で分離し、実質のせん断強さは零である。ただし、切り出す前に円管のままで、内管と外管を離すのに負荷が必要であり、その際の負荷を接合重なり面積で除し、その値を示した。すなわち、圧接がなされないでも、塑性変形による残留応力で両者は貫入しあっている。いずれにしても、実質的な接合がなされたのは圧接のP領域が存在し、切り出した段階で分離しない2条件であった。この試験片に対する最大荷重をP領域の面積で除し、接合強度として示した。両条件ともほぼ等しいせん断強度約45 MPaの値であり、この値は引張強さの1/5.6である。通常、セ

ン断強さが引張強さの1~1/2であることを考慮すると、十分な接合がなされたといえる。

これらおよび補間した条件下の実験結果より決まる“円管の半径方向重ね圧接可能条件”をその範囲に影を施して示す。壁厚減少率が小さい場合には圧接塑性変形を起こさなく、重なり長さが小さい場合にはI段階の後、P段階を経ることなくA段階に至り圧接を生じない。大略、壁厚減少率0.4以上、重なり長さ10 mm以上が半径方向重ね圧接可能条件である。

5. 結 論

PCR加工による円管の半径方向重ね圧接を提案し、実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 工程は5段階に分かれ、特に圧接のP段階を生じさせることが重要である。
- (2) 圧接可能条件は壁厚減少率 R が0.4以上および重ね合わせ長さ l が10 mm以上である。
- (3) セン断圧接強度の約45 MPaは対象材料であるアルミニウムA5052に対しては十分な結合強度である。

当研究は本学学生陶山傑が実施、また、1997年度文部省科学研究費補助金展開研究(B)の補助を受けていることを記す。

文 献

- (1) 森敏彦・斉藤雄二、プラネタリ・コニカル・ローリング(PCR)の加工機構、機論, **61**-589, C(1995), 3734.
- (2) 森敏彦・斉藤雄二・中島邦彦、PCR加工における拡管の影響、機論, **62**-601, C(1996), 3677.
- (3) 森敏彦・中島邦彦、PCR加工によるねじ山形成、機論, **63**-612, C(1997), 5892.
- (4) Mori, T. and Saito, Y., Forming Mechanism of Planetary Conical Rolling, *Trans ASME, J. Engi. Ind.*, Vol. 119(1997), 30-36.