論文

密封圧力と通電加熱を用いた アルミニウム合金管の熱間ガスフォーミング成形

前野 智美* 森 謙一郎* 宇納 千裕**

Hot Metal Gas Forming Process for Aluminium Alloy Tube Using Sealing Pressure and Resistance Heating

Tomoyoshi MAENO*, Ken-ichiro MORI* and Chihiro UNOU**

(Received on December 29, 2010)

A hot metal gas forming process for an aluminium alloy tube using sealing pressure and resistance heating was developed. In this process, the sealed tube is bulged by resistance heating without controlling internal pressure. A hot metal gas forming process for an aluminium alloy tube without and with axial feeding was carried out. The deformation behaviour of the tube inside the die was observed through a heatproof glass plate attached to the side wall of the die. The sealing pressure, current density, timing of axial feeding, feeding velocity and amount of axial feeding were optimized. For excessive sealing pressure, fracture occurred, and the tube partially melted at a small sealing pressure and a large current density. Since the temperature of the tube rapidly drops after coming into contact with the die, the axial feeding before the contact is effective in preventing fracture. A ceramic die with a small thermal conductivity is useful for improving the temperature decrease and die filling.

Key words: tube forming, gas forming, resistance heating, aluminium alloy, formability, temperature distribution, expanding.

1. 緒 言

自動車を軽量化するために、アルミニウム合金中空部品の採用が増加しているが、延性が低いアルミニウム合金管の成形は容易ではない¹⁾。管材を加熱して空気圧によって膨らませる熱間ガスフォーミングがアルミニウム合金管に応用されて、自動車部品にも適用されている^{2)~4)}。

熱間ガスフォーミングでは、管材は一般的に成形機の外側で加熱されるが、肉厚が小さいため温度低下が大きく、延性の低下や変形抵抗の増加を招いて成形が困難になる。温度低下を防止するため、金型に加熱装置を組込んでいるが^{5)~6)}、金型構造が複雑になる。また、高周波誘導加熱によって管材が加熱されているが、誘導電流が流れないようにするために型をセラミックにする必要がある。

森ら⁷⁾は、鋼板のホットスタンピングにおいて通電加熱を用いた熱間プレス成形法を開発しており、金型内で急速加熱を行うことによって成形開始までの温度低下および酸化スケールを抑制している。Vadillo ら⁸⁾および Zarazua ら⁹⁾は金型内通電加熱を鋼管の熱間ガスフォーミング成形に応用し、成形中にも加熱を継続して温度低下を防止し、金型に組み込む加熱装置を省略した。

熱間ガスフォーミングでは、内圧は一般に成形中制御されているが、圧縮性ガスによる内圧と加熱温度の両方を制御するのは容易ではない。そこで、筆者ら¹⁰⁾は管材に予め密封した空気による圧力だけで拡張を行う通電加熱熱間ガスフォーミングを開発した。空気を密封した管材を金型内で加熱すれば、管材は軟化して密封圧力だけで拡張成形をすることができ、成形中は温度だけを制御して内圧制御を省略した。これまでに通電加熱における加熱条件や金型を用いないフリーバルジ成形において、成形限界などを検討した。

本研究では、密封空気圧と通電加熱を用いたアルミニウム合金管の熱間ガスフォーミングにおいて金型を用いた場合の変形特性を調べ、成形条件の最適化を行った。また、金型内の管材温度を測定するとともに、成形中の管材の温度低下を防止して金型充填率を向上した。

2. 熱間ガスフォーミング方法

金型内通電加熱を用いたアルミニウム合金管の熱間ガスフォーミング装置を Fig. 1 に示す。管材は外径 22 mm、肉厚 1 mm、長さ 150 mm の A6063 アルミニウム合金管である。金型の材質は SS400、長さは 50 mm、内径は 33 mm であり、管材の初期直径に対する増加割合である拡張率が 50% になるように金型の内径を設定した。電極は管材の外周の 90% と接触し、管材を上下方向から平均面圧 1.5 MPa で挟んでおり、パンチとともに軸方向に移動する。電極間

* 豊橋技術科学大学 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1
Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi 441-8580, Japan.

** 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1
Graduate student, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi 441-8580, Japan.

距離は、軸押しなしでは 100 mm、軸押しありでは 80 mm に軸押し量を加えた長さとした。管材は銅電極によって金型内に固定されて、空気が充填されて密封圧力 p_0 が作用している。管材は加熱されて軟化すると張出して金型形状に成形される。

Fig. 1 Hot metal gas forming process of aluminium alloy tube using resistance heating during forming

熱間ガスフォーミング条件を Table 1 に示す。ここで、 s は両端の軸押し量の合計である。通電加熱には直流電源を用いており、初期の管材の単位断面積あたりに流れる電流量である電流密度 J と通電時間 t_e を変化させて通電加熱を行った。また、通電加熱は成形中も行い、開始からの時間を t とする。

Table 1 Conditions of hot metal gas forming process

Sealing pressure p_0 [MPa]	1.0 – 2.0
Current density J [A/mm ²]	61 – 121
Electrifying time t_e [s]	3.5 – 8.0
Velocity of axial feeding v [mm/s]	0 – 30
Amount of axial feeding s [mm]	0 – 20

最高温度 500 °C における軸方向温度分布に及ぼす電流密度の影響を Fig. 2 に示す。管材が変形しないように $p_0 = 0$ MPa とし、金型なしで放射温度計によって温度測定を行った。電流密度が増加すると発熱量が増加して、電極への熱伝導による端部の温度低下を抑制できた。 $J = 106$ A/mm² で金型内の範囲となる中央 50 mm 間で温度分布をほぼ均一にできた。

Fig. 2 Effect of current density on distribution of temperature on surface of tube in axial direction for 500 °C at center of tube

金型を用いないフリーバルジ成形における破断拡張率 r と管材の初期変肉率の関係を Fig. 3 に示す。初期偏肉率 α

は円周方向における最大の肉厚差を平均肉厚で除した値であり、研磨によって α を調整した。受入れ材の初期偏肉率は $\alpha = 4\%$ である。 α の増加とともに破断拡張率は低下している。管材は主に内圧によって円周方向に引張りを受けて変形するが、偏肉があると応力が大きくなる薄肉部が変形して、さらに熱間成形であるために加工硬化が小さく変形が薄肉部に集中したことによって破断拡張率が低下した。

Fig. 3 Relationship between maximum expansion ratio and initial thickness deviation ratio

3. ガスフォーミング結果

3.1 軸押しなしの成形結果

成形結果に及ぼす密封圧力と電流密度の影響を Fig. 4 に示す。電流密度が高く密封圧力が低い場合には金型に接触する前に溶融する温度に達したことによって溶融が発生している。また、密封圧力が高い $p_0 = 2.0$ MPa の場合には延性が十分向上する温度になる前に拡張したことによってわれが発生している。そこで、良好な成形が得られる条件のなかで変形後の管材が金型端から 5.5 mm の範囲で占める容積充満率を金型角部充満率 γ と定義して、 γ の値が最も大きかった条件 $J = 106$ A/mm², $p_0 = 1.5$ MPa を最適な成形条件であるとした。

Fig. 4 Forming range and corner filling ratio in hot metal gas forming without axial feeding for different current densities and sealing pressures

金型内の管材の変形を観察するために Fig. 5 に示すように金型壁面の一部に耐熱ガラスを適用した. 円筒の金型を切断して平面のガラスをはめ込み, 13 mm の幅で管材を観察できるようにした.

Fig. 5 Dies having heatproof glass for observation of deformation behavior of tube inside dies

金型内で管材が膨らんでいく様子を Fig. 6 に示す. $t=2.5$ s で中央部から膨らみ始め $t=2.9$ s では多くの部分が金型と接触する. 金型と接触する範囲は $t=3.4$ s まで徐々に外側に広がっていく. 熱間ガスフォーミングは圧力媒体が圧縮性であるため変形はハイドロフォーミングに比べて速い.

Fig. 6 Deforming tube inside dies in hot metal gas forming without axial feeding for $J = 106 \text{ A/mm}^2$ and $p_0 = 1.5 \text{ MPa}$

通電時間が成形後の管材形状に及ぼす影響を Fig. 7 に示す. 通電時間の短い $t_e = 3.0$ s の場合は軸対称形状になっていない. Fig. 3 に示したように管材は偏肉があるために不均一に変形していき, 膨らんだ部分から金型に接触していくが, 通電を停止してしまうと, すぐに温度が低下して変形が停止してしまう. $t_e = 4.0$ s まで通電を継続すると温度低下が緩和されて軸対称形状になるまで変形が継続されている. しかしながら, $t_e = 8.0$ s まで継続しても $t_e = 4.0$ s と形状に差が見られないことから $t_e = 4.0$ s の時点で通電加熱を継続しても変形を継続できる温度には保てられていない.

Fig. 7 Effect of electrifying time on deforming shape of tube for $J = 106 \text{ A/mm}^2$ and $p_0 = 1.5 \text{ MPa}$

3.2 軸押しありの成形結果

熱間ガスフォーミングにおける管材の変形は Fig. 6 に示したように変形の開始直後に金型と接触している. 管材が金型に接触すると軸押しによる材料供給の抵抗となり金型内の管材の肉厚減少の低減が難しくなる. そこで, 軸押しを始める時期として 3 つの時期を選び, 変形開始前, 開始時, および開始後の条件で成形した管材の肉厚分布を求めたところ Fig. 8 を得た. 変形開始後となる $t = 3.0$ s では, 軸押しなしに比べて肉厚減少があまり低減されていないことから, 管材が金型と接触した後に軸押しを行っても金型内の管材を増肉することは難しい. 変形開始前の $t = 2.0$ s では中央部の肉厚減少は改善されている. 管材が金型に接触する前に軸押しを行うことが金型内の肉厚減少を低減するうえで効果がある. したがって, 以降の実験においては軸押しを変形開始前の $t = 2.0$ s で開始した.

Fig. 8 Effect of timing of axial feeding on distribution of wall thickness in axial direction for $J = 106 \text{ A/mm}^2$, $p_0 = 1.5 \text{ MPa}$, $s = 10 \text{ mm}$ and $v = 20 \text{ mm/s}$

成形形状に及ぼす軸押し速度と軸押し量の影響を Fig. 9 に示す. 軸押し速度が速い場合には, しわが発生し, 遅い場合には折れ込みが発生している. そこで, 良好な形状が得られた条件のうち最も大きな軸押し量の条件である $v = 20 \text{ mm/s}$, $s = 15 \text{ mm}$ を最適条件とした.

Fig. 9 Effects of axial feeding and feeding velocity on forming shape of tube for $J = 106 \text{ A/mm}^2$ and $p_0 = 1.5 \text{ MPa}$

軸押しありにおける密封圧力と電流密度が成形結果に及ぼす影響を Fig. 10 に示す. 軸押しの条件は最適化された $v = 20 \text{ mm/s}$, $s = 15 \text{ mm}$ を用いた. 線で囲まれた部分の Fig. 4 で示した軸押しなしの結果において破断や溶融が発生していた条件においても, Fig. 10 に示す軸押し量を負荷することによって割れを生じずに成形されている. 同図において, 電流密度が小さい場合にはしわが発生している. Fig. 2 で示したように, 金型内で温度分布が不均一であることによって, 一様な変形が進行しないうえ, 過大な軸押し量が負荷されてしわが発生する. したがって電流密度と軸押しを制御することは, 管の座屈, 肉厚減少および溶融を抑制しながら, 成形可能な条件を拡大するうえで重要である.

Fig. 10 Forming range in hot metal gas forming with axial feeding for different current densities and sealing pressures for $v = 20 \text{ mm/s}$ and $s = 15 \text{ mm}$

4. 温度低下防止による金型充満率向上

4.1 低熱伝導金型による金型充満率向上

Fig. 7 のように成形条件を最適化して通電加熱を継続しても金型角部の充満率は十分ではない. 充満率が向上しない原因は, 管材の一部が金型に接触すると金型への熱伝導によって, 管材の温度が低下したことによると考えられる. したがって金型と接触しているときの管材の温度低下を防止することが重要となる. そこで, 森らによる鋼板のダイクエンチにおける金型冷却速度の制御方法¹¹⁾を熱間ガスバルジに適用するために, 低熱伝導率のセラミックを金型材料として用いることで管材の温度低下を防止する. Table 2 に金型材料として用いたこれらの熱伝導率を示す.

Table 2 Thermal conductivities of materials used for dies

	Thermal conductivity [W/(m·K)]
SS400	51.6
SUS304	16.3
Ceramic (Photoveel)	1.7

熱電対による温度測定は通電の影響や変形する管材への設置が難しく適用できないが, Fig. 11 に示すように金型に小さい穴を設ければ管材温度を放射温度計で測定できる. 穴部分の管材は金型に接触していないが, 穴周囲は金型に接触しており管材温度を近似的に測定できる. Fig. 12 に金型を示す.

Fig. 11 Measuring temperature of tube inside dies using small holes

Fig. 12 Dies used for measuring temperature of tube of inside die

軸押し無しで SUS304 とセラミック型で成形した管材を Fig. 13 に示す. セラミック型では温度低下抑制効果が強く Fig. 4 で最適化した条件では溶融が発生したため加熱条件はそれぞれの金型で最も金型充満が大きくなった条件と比較する. セラミック型では SUS304 金型に比べ金型角部の充満が向上している. また, 温度低下が防止され十分軟化しているため, 金型の加工跡が管材表面に転写されている.

Fig. 13 Bulged tubes using SUS304 and ceramic dies without axial feeding for $p_0 = 1.5 \text{ MPa}$

SUS304 とセラミック型における金型内の管材温度分布履歴を Fig. 14 に示す. SUS304 金型では中央部が金型に接触すると, 管の温度が急激に低下している. これに対して, セラミック型では管材が型に接触した後も 500°C を下回らない.

Fig. 14 History of temperature distribution during hot metal gas forming using SUS304 and ceramic dies

4.2 途中電流密度増加による金型充滿率向上

加工の初期から高い電流密度で管材を加熱すると、Fig. 4 に示したように管材が金型に接触する前に溶融が生じる。そこで、加工の途中で電流密度を増加することで、発熱量を増加させて温度低下を防止する途中電流密度増加を行った。管材が金型に接触する直前では $J = 106 \text{ A/mm}^2$ で、接触後には $J = 121 \text{ A/mm}^2$ および 136 A/mm^2 で加熱することによって成形を行った。Fig. 15 に SUS304 金型における途中電流密度増加が軸方向断面形状に及ぼす影響を示す。電流密度増加では金型接触後の管材の温度低下が抑制されて、金型角部への管材の充滿が向上している。

Fig. 15 Effect of change in current density during forming on deforming shape of tube for $p_0=1.5\text{MPa}$

途中電流密度増加を行うと Fig. 16 に示すように金型接触後の温度低下をわずかに緩和させることができる。熱間ガスバルジでは変形速度が速いために、金型角部への管材の充滿を向上させるためにわずかの時間でも温度低下を防止することが重要になる。

各温度低下防止方法による金型角部充滿率と投入電力量を Fig. 17 に示す。セラミック型および SUS304 金型による電流密度増加法のいずれにおいても金型角部充滿率は同程度に向上している。両者の特徴を比較してみると、セラミック型は投入電力量を小さくできる一方、型に割れを生じやすく適用が限られるが、SUS304 金型では電流密度増加法を援用することによって、電力量が増加するもののセラミックに比べ適用が容易になる。

5. 結 言

アルミニウム合金管の熱間ガスフォーミングにおいて、成形中も加熱を行って空気圧を制御することなしに管材を成形し、以下の知見を得た。

- 1) 密封圧力が過大であると成形途中で割れが発生し、密封圧力が低く電流密度が大きいと成形途中で溶融が発生した。
- 2) 管材が金型に接触する前に軸押を行うことによって、肉厚減少を低減でき割れ発生を防止できた。
- 3) セラミック型を用いることによって、温度低下を防止でき金型角部充滿率が向上した。
- 4) 途中電流密度増加を用いて温度低下をわずかに遅らせることによって、金型角部充滿率が向上した。
- 5) 管材の初期偏肉が大きいと成形限界が低下した。

本研究の一部は平成 21 年度スズキ財団科学技術助成金、平成 21 年度日本アルミニウム協会アルミニウム研究助成によって行われた。

Fig. 16 Variation of temperature of die corner for change in current density during forming

Fig. 17 Filling ratio of die corner and electrical energy

参 考 文 献

- 1) 近藤清人：プレス技術, **41-7** (2003), 34-38.
- 2) 木山啓：塑性と加工, **47-551** (2006), 1178-1181.
- 3) Neugebauer, R., Altan, T., Geiger, M., Kleiner, M. & Sterzing, A.: CIRP Ann., **55-2** (2006), 793-816.
- 4) Dykstra, B., Pfaffmann, G. D. & Wu, X.: SAE Technical Paper Series, (1999), 1999-01-3229.
- 5) Liewald, M. & Pop, R.: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, **39-4-5** (2008), 343-348.
- 6) Liu, Y. & Wu, X.: J. Mater. Eng. Perfor., **16-3** (2007), 354-359.
- 7) Mori, K., Maki, S. & Tanaka, Y.: CIRP Ann., **54-1** (2005), 209-212.
- 8) Vadillo, L., Santos, M. T., Gutierrez, M. A., Pérez, I., González, B. & Uthaisangsuk, V.: Proc. NUMIFORM'07, (2007), 1199-1204.
- 9) Zarazua, J. I., Vadillo, L., Mangas, A., Santos, M., Gutierrez, M., Gonzalez, B., Testani, C. & Argentero, S.: Proc. IDDRG2007, (2007), C/31/07.
- 10) 前野智美・森謙一郎・藤本浩次：塑性と加工, **50-580** (2009), 424-428.
- 11) 森謙一郎・奥田裕也・内田光隆・上藺俊：塑性と加工, **50-586** (2009), 1049-1053.