超高強度鋼中空部材の 通電加熱ガスフォーミング

豊橋技術科学大学 前野智美

概要

超高強度鋼中空部材を成形するために、成形と焼入れを同時に行う通電加熱ガスフォーミングを 開発した。開発の通電加熱ガスフォーミングでは空気が密閉された焼入れ用鋼管を通電加熱し、 金型で圧縮することによって成形する。また金型は下死点で停止し管材は金型に保持されること によって冷却、焼入れされる。管材に封入された空気圧によって成形中の座屈の防止とダイクエ ンチにおける管材と金型の良好な接触が達成された。

1. はじめに

引張強度が1.5GPaを超える部材が得られるホット スタンピングが自動車の軽量化、安全性向上から注 目され車体補強部品などへの適用が増えている^{1).2)}。 自動車の足回りも軽量化のために高強度化が望まれ ているが、高い剛性が必要なため中空断面を有する 部材が多くなっている。

自動車の足回り部品である中空アクスルビーム は、鋼管の断面が部分的にV形に成形されており、 鋼管の座屈を防止するために冷間液封成形が行われ ているが、高強度材を冷間で成形するため成形の後 に歪取り焼鈍などの熱処理が行われている³⁾。著者 らは、このV形断面の成形にホットスタンピング とガスフォーミングを組み合わせた通電加熱ガス フォーミングを開発しており、管材に予め空気圧を 密閉することによって座屈の防止や、ダイクエンチ のための冷却性を向上している⁴⁾。

ここでは、通電加熱ガスフォーミングによる超 高強度鋼中空部材の成形方法について中空アクスル ビームを模擬したV形断面の成形を通して紹介する。

2. 密閉空気圧を用いた通電加熱ガスフォーミング

図1に自動車のトレーリングアーム+トーション ビーム式サスペンションシステムを示す。トーショ ンビームには曲げ方向の剛性とねじりバネとして作 用する柔軟性が求められるため、パイプの中央部分 をV形に扁平した高強度な中空部材が採用されてい る。この中空アクスルビームは液封成形やホットス タンピングによって製造されている^{5),6)}。

図2に管材のホットスタンピング、液封成形およ び通電加熱ガスフォーミングによる超高強度鋼中空 部材の製造プロセスを示す。管材のホットスタンピ ングでは、加熱した焼入れ用鋼管をプレスで成形す ると同時に金型への熱伝達による急冷で焼入れする ダイクエンチによって高強度化する。しかしながら、





図 2 (a) 管材のホットスタンピング、(b) 液封成形および(c) 通電加熱 ガスフォーミングによる超高強度鋼中空部材の製造プロセス







図4 通電加熱直後の管材軸方向温度分布

管材をプレス成形するため中空部 にはマンドレルが必要となり、マ ンドレルを挿入できない部分は管 が密着した形状に限定される。液 封成形は水を充填させた管材を、 プレス成形し、プレスによって管 材内部に圧力を発生させ、圧力を 調整しながら水を排出して管材の 座屈を防止しながら中空部材を成 形する。しかしながら、冷間で高 強度材を成形するため、成形の後 に歪取り焼鈍などの熱処理が行わ れている。開発した通電加熱ガス フォーミングは、空気圧を負荷し て密閉した管材を成形装置内で通 電加熱し、加熱完了すぐにプレス 成形を行う。加熱によって管材 の変形抵抗は小さくなっているた め、内部のメディアは空気圧でよ く、圧縮性もあるため排出の必要 がなくなる。液封成形と同様に内 圧によって座屈が防止され、ダイ クエンチにおける管材と金型との 密着も得られる。管材は密閉され ているため成形中の圧力制御はな いが、管材の加熱と圧縮によって 内圧は自動的に昇圧され下死点で は初期の圧力よりも大きな圧力を 得ることができる。

図3に密閉空気圧を用いる通電 加熱ガスフォーミング装置外観 とV形断面成形金型を示す。管材 には直径32mm、肉厚1.8mmの 焼入れ用鋼管(C:0.19%, Si:0.18%, Mn:1.3%, B:0.004%)を用いた。 装置は通電加熱電源と連動する サーボプレスにセットされてい

る。管材には初期内圧 p_0 の空気圧が密閉され、銅電 極によって平均接触面圧 2 MPaで固定される。電流 密度 33.2 A/mm², 7.5 sの通電加熱によって管材成形 部が 950℃に 7.5 秒で加熱されると、連動したサーボ プレスによってスライドが 80 mm/s で下降して、管 材にパンチを 27 mm 押しこんで圧縮し、ダイクエン チのために t_h 秒の金型保持を行う。管材の成形前後 の体積変化率は $V_r=20~60\%$ である。管材は電極の 間のみが加熱され、端部は加熱されないため O-リ ング付のプラグによって封をすることができる。金 型はV形状の断面となっており、管材の噛み込みを 防ぐためにV形状の両端は解放されている。

図4に加熱直後の管材の軸方向温度分布を示す。 管材両端は電極への熱伝達によって温度低下が生じ

3. V形中空断面の成形^{3),4)}

図5に通電加熱ガスフォーミングで成形した管材 を示す。比較として冷間成形と炉加熱の結果も示す。 (a)の $p_0 = 0$ MPa (密封あり)ではパンチ斜辺部の形 状が十分に転写されていないが、(b) $p_0 = 1.5$ MPa で は十分な転写が得られている。(c) $p_0 = 2.5$ MPa では 内圧が高すぎるため、加熱によって管材が軟化した だけで破断を生じた。(d)冷間では延性が低いため 割れを生じている。(e)炉加熱では酸化スケールの 発生が著しい。炉加熱では管端部も加熱されるため 密封が難しく、密封が可能となっても高い内圧を成 形前に入れると炉の中で管材が膨らみ割れが生じる ため、成形中に圧力を負荷するしかなく、制御が複 雑になってしまう。



図 5 V_r = 20% および t_h = 60 s において成形された管 材 (a) p₀ = 0 MPa、密封あり、(b) p₀ = 1.5 MPa、 (c) p₀ = 2.5 MPa、(d) 冷間成形、p₀ = 0 MPa、 (e) furnace heating、密封なし。

図6に V_r =20%および t_h =60sにおける通電加熱ガスフォーミング中の管材内部の圧力履歴を示す。管材が加熱されると内部の空気も温度上昇するため内

ているが、電極より20mm程度離れると均一な温度 分布が得られている。また、管材は電縫管であり溶接 部があるが、一般部と大きな温度差は生じていない。



図 6 通電加熱ガスフォーミング中の管材内部の圧力履歴 (Vr = 20% および th = 60 s)

圧は上昇し、成形によって管材が圧縮されると体積 の変化にともなって内圧はさらに上昇する。圧縮後 ダイクエンチによって管材が冷却されると管材内部 の空気も温度低下するため圧力は徐々に低下してい る。この成形下死点で得られる内圧は以下に示すよ うに比較的簡単に見積ることができる。

加熱後、成形直前の内圧 *p*h が理想気体の状態方程 式に従うとすると以下のように示すことができ:

$$p_h = (p_0 + 0.1) \cdot \frac{T_{a1} + 273}{T_{a0} + 273} - 0.1$$

ここで T_{a0} と T_{a1} は加熱前後の管材内の空気の温度 である。図6において加熱後の圧力はおよそ 2.5倍 になっていることから、管材内部の空気は 500 C 程 度に加熱されている。そして成形直後の内圧 p_c は断 熱圧縮に従うとすると次のようになる。

$$p_c = (p_0 + 0.1) \frac{T_{a1} + 273}{T_{a0} + 273} \cdot \frac{1}{1 - V_r} - 0.1$$

図6に、その結果を示しているが、実験と良い一 致が得られている。

図7に V_r =20%および t_h =60sにおける通電加熱ガスフォーミング中のパンチ荷重を示す。成形荷重は加熱によって著しく低減されており、割れも抑制された。

図8に V_r =20%および t_h =60sにおいて成形された 管材の中央断面および軸方向断面を示す。 p_0 =1.5MP



図 7 通電加熱ガスフォーミング中のパンチ荷重 (Vr = 20% および th = 60 s)



図 8 V_r = 20% および t_h = 60 s において成形された (a) 管材断面および(b) 軸方向断面



 図 9 p₀ = 1.5 MPa および V_r = 20% における断面形状に 及ぼす下死点保持時間の影響

では p0=0.0 MP に比べ金型充満が向上している。

図9に p_0 =1.5MPaおよび V_r =20%における断面 形状に及ぼす下死点保持時間の影響を示す。 t_h =10s 以下では、管材が十分に冷却されず軟化されている ため、パンチ上昇後に成形した管材が内圧によって 膨らんでしまっている。金型からの管材取出しは十 分な冷却か、内圧を抜いてからが望ましい。

図10にV_r=20%およびt_h=60sにおける初期内圧 が管材中央断面の硬さ分布に及ぼす影響を示す。初 期内圧の増加にともなって接触界面の熱伝達が増加 するため硬さは向上しており、金型に接触していな いダイス側角以外は400HV10以上の硬さが得られて いる。



図10 V_r = 20% および t_h = 60 s における初期内圧が
管材中央断面の硬さ分布に及ぼす影響

自動車に用いられる中空アクスルビームなどは長 手方向の多くの部分を圧縮するため、成形前後の体 積変化が大きくなる。図11にV_r=60%で成形された 管材を、図12にその時の管材内部の圧力履歴を、図 13にダイス側角部半径と初期内圧の関係を示す。体 積変化が大きくなると、下死点で得られる内圧が大 きくなるため、初期内圧が小さくても比較的良好な 形状転写を得ることができる。



(b) p₀=0.75 MPa

図11 Vr = 60% および th = 60 s で成形された管材



図12 通電加熱ガスフォーミング中の管材内部の圧力履歴 (V_r = 20%, 60%, t_h = 60 s)



管材の噛込み防止のために設けた隙間部分の硬さ を向上するために、図14に示すようにパンチが下死 点に到達すると同時に左右の隙間部分に圧縮空気を 吹きかけて急速冷却を行う強制空冷を試みた。ダイ ス底角部は成形される管材の角半径に沿う形状に変 更し、金型と密着させダイクエンチを向上させた。 図15に強制空冷ありとなしにおける通電加熱ガス フォーミング後の中央部円周方向硬さ分布を示す。 強制空冷を行うことによって全域でほぼ 450 HV10



図14 強制空冷による隙間部分の硬さ向上方法



図13 ダイス側角部半径と初期内圧の関係(t_h = 60 s)

を得ることができており、金型非接触部の焼入れが 向上した。



図15 強制空冷ありとなしにおける通電加熱ガスフォー ミング後の中央部円周方向硬さ分布(Vr = 20%, p₀=1.5 MPa, t_h = 60 s)

5. 不活性ガス雰囲気成形による酸化スケールの抑制⁷⁰

通電加熱ガスフォーミングでは周囲の工具は加熱 されないため、図16に示すように周囲を簡単なスク リーンで囲むだけで不活性ガス雰囲気での成形が可 能になる。ケース内に炭酸ガスを充満させ、加熱・ 成形を行い、成形後の外観および電着塗装を行い塗 膜の密着性を評価した。



図16 不活性ガス雰囲気中での成形による酸化防止方法



図17 炭酸ガスおよび大気中で成形した管材の成形後 および電着塗装後の表面

図17に炭酸ガスおよび大気中で成形した管材の成 形後および電着塗装後の表面を示す。炭酸ガスで成 形した管材に比べ大気中で成形した表面は若干粗く

6. おわりに

中空形状は剛性が高く、足回り部品の軽量化において適している。しかしながら、管材のホットスタ ンピングは、座屈の発生やダイクエンチにおいて保 持することが問題となるため簡単ではない。ここで 紹介した通電加熱ガスフォーミングは管材内部に空 気圧を封入することで、座屈の発生やダイクエンチ の問題を解決している。板材の通電加熱では素板形 状の限定や、電極接触部分の温度低下などにより歩 留まりが問題となっているが⁸⁾、管材においては異 形状であることが少なく、電極接触による温度低下 部分も管材の密封を簡単にしており、通電加熱と管 材の相性は非常に良い。通電加熱ガスフォーミング は加熱装置もコンパクトであり、成形中の内圧制御 も無いシンプルな加工方法であり、今後の実用化を 期待したい。



図18 テープによる塗膜引剥し試験後の試験面

なっている。電着塗装後においては大気中成形した ものにおいて一部剥離が生じている。

電着塗装後の管材の塗膜密着性を評価するため に、碁盤目試験法およびクロスカット試験による テープ引剥し試験を行った。電着塗装した表面に カッターで5×5または10×10の格子の切れ目を加 えてから、テープで塗装面を引剥がして塗膜の剥離 を評価した。テープによる引剥し試験後の管材表面 を図18に示す。大気の場合、底平面と金型非接触面 において塗膜の剥離が生じており、端角部では剥離 は生じている。一方、炭酸ガスでは端角部、底平面 において剥離は生じていない。

参考文献

- 1)秋岡幸司,今井和仁,須藤俊太郎,市川正信,尾林彰: まてりあ,51-2 (2012) 70.
- Karbasian, H. & Tekkaya, A.E.: J. of Mater. Process. Technol., 210-15 (2010) 2103.
- 3)山本出,近藤正顕,志満津了,福士考聡,中村英幸, 穴井功:素形材,50-12 (2009)44.
- 4)前野智美,足立一晃,森謙一郎:平成23年度塑性加工 春季公演会講演論文集(2011)173
- 5) 上野行一, 島田世津子: "異形断面筒状体の製造方法及 びトーションビーム用アクスルビーム"特開 2001-321846.
- 6) Linnig, W., Zuber, A., Frehn, A., Leontaris, G., Christophliemke, W., ATZ worldwide eMagazines Edition 111-2 (2009) 10.
- 7)前野智美,足立一晃,森謙一郎,矢口誠,村山貴洋: 第63回塑性加工連合講演会講演論文集(2012)67.
- 8) 森謙一郎: プレス技術, 52-8 (2014) 18.