9 機械的嵌合技術によるハイブリッド化*

Hybridization of Cylindrical Structures by Mechanical Fitting Processes* (Thermo Elastic Plastic Processing)

松井 繁 朋**
Sigetomo MATSUI**

キーワード：熱拡管法，環熱縮管法，機械的嵌合，耐食二重管，
耐摩耗二重管

1. ま え が き

最近各種機器，構造物などの工業製品の性能も高度でしかも複数の機能が要求される場合が増えて来ている。構造材料の基本の一つである管構造体においても，その用途が広がってきたのに伴って，過酷な条件で使われるケースが増えて来ている。高強度，高耐食性，高耐摩耗性や断熱性能などが求められている。例えば高深度油井管には高強度，高耐食性が要求される。また微粉粒等の高速搬送管には高い摩耗性が要求される。高耐食管には高ニッケル合金一層単管などがあるがコスト

や強度の問題があり，低コストで高・多機能管の実用化が求められている。

管の高機能化のための手段として，例えば高強度・高耐食性管の場合高強度の外管に耐食性に富んだニッケル合金やステンレス管を内張りした二重管のアイデアがある。

重層管製造技術として一般的に次のようなものがある。

冶金結合管——熱間押し出し法
(クラッド管) 内面肉盛溶接法
HIP 法
鑄くるみ法

接着等による——内，外面エポキシ等の樹脂コーティング法

機械的嵌合管——焼きばめ法
圧入法

熱拡管法
熱縮管法 } 熱弾塑性加工法

図1 熱拡管法の概念と嵌合応力の発生機構

ステンレス鋼と炭素鋼管との複合において，冶金的重層をするため高温で熱間押し出しや肉盛溶接をした場合，製造後の熱処理においてステンレス鋼向けの固溶体化処理（急冷）と炭素鋼向けの焼き入れ焼ならし熱サイクルは原則的に相入れないもので，どちらかの材料の性質を犠牲にせざるを得ない。組合せ材料の本来の特性を損なわずに複合化出来，しかも管として一体挙動する特性をもたせると共に長尺の管が容易に製造できる技術が必要である。ここで素材の特性を維持し，しかも長尺管が安価で製造できる新しい機械的嵌合多重管の製造法とその適用例について述べる。

*原稿受付 昭和63年3月31日
**正 員 川崎重工業(株)技術研究所
KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES,
LTD.

2. 熱拡管法——内管が拡管して外管に緊着する方法

従来二重管、三重管を作る方法として焼きばめ法（冷しばめ法）があるが、この方法は、はめる前に精度の高い管の寸法仕上精度が必要なことと、長尺管を製造することが難しい。そこで新しく焼きばめ法と水圧拡管法を組合せた熱拡管法（Thermo-Hydraulic Fitting Method）と呼ぶ複合管製造方法を開発した¹⁻³⁾。本方法は図1にその原理を示すように、加熱して膨張した外管に、挿入が容易な寸法の内管を、その内管の内部を通水して内管温度を水温に保った状態で挿入し、内外管に温度差をつけた状態で水圧拡管する方法で水圧を開放し、内外管は弾性縮径するもどり差と外管が室温まで冷却する時の熱収縮とによって高い嵌合応力を有する緊着二重管を作る方法である。

写真1に熱拡管装置の外観写真、図2に熱拡管過程での内外管の温度および拡管圧力の履歴を示す。外管が所定の加熱温度に達した時点で短時間（1～2秒）に拡管圧力を増圧すると、拡管圧

写真1 長尺複合管製造用熱拡管装置

図2 熱拡管過程の拡管圧力と内外管の温度変化履歴

P_E で内管が塑性変形して内管と外管が接触し、その後内外管が一体となって拡管され、所定の拡管圧 P で短時間保持した後、圧力を開放し、内管内の冷却水（拡管用圧力媒体兼用）を流水する。内外管が接触した後、内管と外管の温度差は急速に一樣となり、室温にまで冷却されると、内外管は十分に嵌合される。

内外管の嵌合の程度を示す指標として、内管に残留する周方向の圧縮応力を採用し、これを嵌合応力 σ_F と呼ぶ。嵌合応力 σ_F は内外管の管寸法（板厚 t 、外径 D ）と降伏応力（ σ_E ）、加熱温度（ T ）ヤング率（ E ）と線膨張係数（ α ）および拡管圧力（ P_E ）によって次式に表される。

$$\sigma_F = t_P / (t_L + t_P) \cdot \{ \alpha_P T E + D_P - 2 t_L \} \cdot P_E / 2 t_P - \sigma_{EL}$$

$$P_E = 2(t_L \sigma_{EL} + t_P \sigma_{EP}) / (D_P - 2 t_P - 2 t_L)$$

ここで、添字 P は外管、 L は内管を表す。

嵌合応力は主として外管と内管との温度差（ T ）と拡管圧力（ P_E ）の組合せを適宜選定することによって所要の値に容易に制御出来る製造方法である。

適用例として、外管に高強度な高張力鋼管を内管に高ニッケル合金管を組合せることによって高強度・高耐食管が製造できる。製品は硫化水素等の腐食性ガスを含有する石油、ガス用深井戸用油井管や輸送パイプラインに適用されている（写真2参照）。

3. 熱縮管法——外管が縮径して内管に緊着する方法

高炭素鋼、高クロムマンガン鋼やセラミックスのような耐磨耗材を内管にする場合、材料そのも

写真2 石油・ガス輸送用パイプと油井管（高耐食性二重管）

のが硬度が高く、延性に乏しいことより、外管になる炭素鋼管等の金属管を縮径させ、内管材に緊着させる方法として熱縮管法 (Ring Heat Shrink Method) を開発した⁴⁾。管に対し、環状に局部加熱、冷却する処理を管長手方向に連続して施すことにより、管径が変化する。図 3 は、この処理状況を模式的に示したものであるが、この現象は、図 4 に示すような熱弾塑性挙動に起因する。すなわち、管の局部を加熱すると、加熱部は熱膨張により膨径しようとするが、周辺の冷却部により変形が拘束され、自由膨張する場合に比べ膨径量は小さくなる。このとき、加熱部は降伏点が低下していることと相伴って塑性変形し、その後冷却すると熱収縮により、この部分の径は初期径より小さくなる。このような、加熱・冷却処理のみで管径を変化させる処理を環熱縮径法 (Ring Heat Shrink method : RHS 法) と呼ぶ。

図 5 は、RHS 法により管径が変化する現象を、

図 3 環熱縮管法の模式図

図 4 局部加熱・冷却による管の変形挙動

熱弾塑性解析により評価したもので、炭素鋼管に対し、800℃まで加熱し、冷却する処理を管の長手方向に連続して施した場合の管径の過渡的变化を示したものである。この場合、与えられた熱源の温度分布に応じ、管径が変化するとともに、周辺部の拘束により塑性歪が発生し、熱源の通過後には、管は縮径していることが認められる。このように、RHS 法は、管に対しなんら外力を加えることなく管径を変化させることができ、広く工業的に適用できる熱塑性加工法の 1 つであるといえる。

RHS 法を利用した製品群に、機械的に緊着した二重管がある。これはあらかじめ内管を挿入した状態で、RHS 法により外管を縮径し、内外管を嵌合させ、二重管を製造するもので、従来、嵌合二重管の代表的製造方法である焼きばめ法と比較した場合、嵌合面での高精度な仕上げ加工が不用であり、かつ製造可能な管の長さなどの形状の制約がなく、更に、直管のみならず曲管も製造が可能であり、その適用範囲は広い。

図 6 は、RHS 法を利用した二重管製造において、処理ごとの外管の径変化と内外管の嵌合度変化の一例を示したもので、処理回数が増すにつれ、外管の縮径量は増大し、内外管が接触後、嵌合度が増大していくことがわかる。このように、RHS 法を利用した二重管製造技術は、以下の特徴を有している。

- ① 内外管の嵌合面に高精度加工が不用である。
- ② 二重管形状・材質に制約されない。
- ③ 処理回数を変えることで、嵌合度を変えることができる。

図 5 RHS 法による管の変形挙動に関する解析例 (軟鋼管：直径 165 mm，管厚 5.5 mm)

RHS法の適用例として、耐摩耗性を要求される配管部材用に、RHS法を利用して、内管に高耐摩耗材料である各種セラミックス管を用いた二重管を試作した例を写真3に示す。このように、従来、靱性に乏しく、構造用部材として使用することが難しいとされていたセラミックス材料に金属管を重ねることによって靱性・強度を付与し、セラミックス材自身の長を十分に活かした高機能管を製造することができる。製造された直管、曲り管の耐摩耗管は従来の金属管の寿命を大幅に改善した。

RHS法は、熱サイクルの回数、加熱温度の制

図6 環熱縮径処理による管の縮径とそれともなう嵌合面圧の発生

御によって嵌合度合は自由にコントロール出来ること、二重管のみならず多重管も製造可能であることなどからその適用範囲は広く、各種の高機能管の製造に活用される。

4. あとがき

以上、熱弾塑性加工として新しく開発された管の複合化技術を紹介したが、前者は熱膨張・収縮変形と水圧成形法を複合したことにより、精密成形と焼きばめを同時化した加工法と云える。後者は溶接変形問題等に係わる金属の局部加熱による熱弾塑性変形挙動を加工法として積極的に利用したもので、何ら直接外力を加えずして管を変形させる技術である。また前者は内管が拡張して外管に緊着する方法で、後者は外管が縮みし内管に緊着する方法であり、緊着すべき内管、外管の材質によって使いわけることが出来る。両方法は材料の組合せに制限はない。現在、耐食、耐摩耗二重管として製品化されているがこれ以外の管構造体の機能化、複合化等に広く適用されている。

参考文献

- 1) T. Yoshida, S. Matsui et. al : Corrosion problems of pipeline and a solution ; Offshore Conference Technology OTC 3891 (1980), pp 361-370
- 2) T. Yoshida, S. Matsui et. al : The development of corrosion resistant tubing ; Offshore Conference Technology OTC 4153 (1981), pp 365-378
- 3) T. Yoshida, S. Matsui et. al : The development of a joint for metal-lined tubing ; Offshore Conference Technology OTC 4200, pp 397-412
- 4) 荒田吉明編, 高温工学, 日刊工業新聞社発行, 昭和63年4月, pp.247~273

(a) 真 管

(b) 曲 り 管

写真3 セラミックスを内管とした耐摩耗二重管