第Ⅱ部 産業界の最近の動向と溶接工学

Ⅱ 溶接・接合及び関連機器

4. 接合関連機器

4.3 肉盛

山 岡 弘 人*

Joining and Related Equipments Cladding

by YAMAOKA Hiroto*

キーワード：肉盛，クラッディング，レーザ，摩擦肉盛，硬化肉盛，補修溶接，直接成型，耐食性，耐摩耗性

4.3.1 概 要

ここでは、溶射を除く肉盛溶接技術に関して、2008～2009年にかけて報告された論文、講演概要、技術資料に基づき最近の動向に関して記述するものとする。肉盛溶接とは、母材上に目的に応じた所要の組成と寸法の材料を溶着させるプロセスであり、素材の耐食性・耐摩耗性・耐熱性等の機能向上を目的としたものや、同等の材料を溶着させることで補修を行うものなどがある。プロセスを実現する熱源としては、アークやプラズマ、レーザ等がある他、摩擦攪拌接合（FSW）を応用した摩擦肉盛や、放電現象を利用したマイクロスパークコーティングなど新たな手法も提案されている。発表されている論文、技術紹介の数としては、ここ数年の傾向としてレーザ肉盛に関するものが多く、対象分野としては精密金型やタービンブレード等の補修が中心となっているが、最近では、ボイラパネルの肉盛を対象分野としたプロセス開発や、その評価に関連する論文が多いことも特徴である。

以降、熱源ごとに最近の技術動向を記述する。

4.3.2 アーク肉盛

アーク熱源を利用した肉盛に関しては、前述したようにボイラパネルに対する肉盛、オーバーレイに関する論文が多い。石炭炊きボイラの火炉壁に関しては、国内ではこれまでパネルに溶射で皮膜を形成させることが一般的であったが、運転温度の高温化や低 NO_x 化に伴い、ステンレスおよび Ni 基合金を溶接肉盛する手法の検討が進められており、1.25Cr-1Mo 系のボイラパネルに対して SUS309 や Ni 基合金 Alloy622 を MIG で肉盛し、その耐食性や機械的特性を調査し、実缶試験も行い Alloy622 が耐食性に優れること、機械的特性に関しては更なる評価が必要であることが報告されている¹⁾。

海外ではすでに Alloy625 クラスの Ni 基合金による実缶での肉盛施工が行われているが、溶接プロセスとし

て、低希釈、低入熱化が求められており、パルス MIG での肉盛の優位性が示されている²⁾。さらには、パルス MIG での施工条件範囲の狭さを克服することを目的に、CMT（Cold Metal Transfer）プロセスを用いることにより、低希釈、低入熱での施工が可能であることも示されている³⁾。

肉盛材料の開発という観点では、ごみ焼却炉用廃熱ボイラの伝熱管において、従来 Ni-Cr-Mo 合金粉末をプラズマ肉盛していたものを、SUS310S 系の Fe-Cr-Ni 系合金粉末に置き換えても十分な耐食性と強度を得ることができ、環境配慮型の最適材料を選定することができたという報告がなされている⁴⁾。

一方、原子力関連の圧力容器（RPV）内面の肉盛や補修技術に関しても力学的評価に関する報告がなされており、RPV 内面肉盛に関しては、サブマージ溶接（SAW）による肉盛とエレクトロスラグ溶接（ESW）での肉盛施工を行い、その残留応力分布を PWHT も含め熱弾塑性クリープ解析により精度よく再現できることが示されている⁵⁾。また、加圧熱衝撃時に内面肉盛が RPV の構造安全性に及ぼす影響についても報告がなされており、PWHT、水密試験および運転時も含めて熱弾塑性クリープ解析を行った結果、内面肉盛により応力拡大係数は増大するが、設計応力の範囲内であることが示されている⁶⁾。補修技術に関しては、国内工事で実績の少ない WOL（Weld Overlay）工法に関して、原配管と肉盛溶接材との材料が異なる 2 層構造配管の塑性崩壊モーメントに対して、（社）日本機械学会発電用原子力設備維持規格や ASME Sec.XI の単一材料配管の極限荷重評価法と比較可能な評価式が提案されている⁷⁾。

長期供用下の石油精製用 2.25Cr-1Mo 鋼製圧力容器に関しても、ステンレス鋼オーバーレイ部の補修溶接時の割れに対して、多層盛補修溶接部の水素挙動を数値解析と実験から解明している。また、熱的脆化と水素脆化を模擬した試験により多層盛補修部の割れ感受性を評価し、割れの発生しない最大水素集積量を把握し、プラントの脱水素運転が補修溶接時の割れ防止に有効であることが示されている⁸⁾。

その他、マルテンサイト系ステンレス鋼製の蒸気タービン翼前縁部のエロージョン対策として、ステライト粉末をプラズマ肉盛する肉盛溶接ロボットシステムを開発した報告⁹⁾、耐熱性と高温強度にすぐれた金型用材料として開発した Ni 基合金「RDH338（Ni-38Cr-3.8Al）」に対して、共材溶接後、750℃×16hr の時効処理を施すこ

原稿受付 平成22年4月19日

*正 員 （株）IHI Member, IHI Corporation

とで溶接金属部、HAZ 部硬さが母材同等レベルとなることで肉盛溶接補修が可能であることを示した報告等がある¹⁰⁾。

4.3.3 レーザ肉盛

レーザ肉盛に関して、ここ数年に報告されているものとしては、大きく3つの方向性がある。1つめは素材表面の機能化に関するもので、アーク溶接と比較して、低入熱、低希釈施工が可能であることを特徴として検討するものである。2つめは直接成型、補修に関するもので、固体レーザを用いて照射スポットを絞り粉末供給により精密形状を形成したり補修したりするものと、矩形ビームの半導体レーザ等、比較的大きな照射スポットを用いて溶着量を確保するものがある。3つめは金型の精密補修に関するもので、パルス YAG を用いてワイヤを溶融肉盛する手法が装置化も含めてほぼ確立されており、用途の拡大が進められている。

素材表面機能化に関しては、ファイバーレーザを用いて低合金鋼に SUS309 粉末をレーザ肉盛する検討が行われており、希釈率が6%程度であることが示されている¹¹⁾と共に、横収縮量が MIG での肉盛と比較して抑制されていることと、その際の温度履歴が非定常熱伝導解析により2次元モデルで精度良く再現できることが報告されている¹²⁾。

直接成型に関しては、粉末肉盛での応用例としてインコネル 718, 738, チタン合金を用いたタービンブレードの補修、石油掘削用部品の硬化肉盛としてステライトやタンゲステンカーバイドの利用、射出成型機の押し出しシャフトの補修等に用いられていることが報告されている¹³⁾。半導体レーザを用いた肉盛では、SUS304 鋼管に Ni 基自溶合金粉末を肉盛するにあたり粉末送給角度の適正化に関して報告が行われている¹⁴⁾。また、半導体レーザによる粉末肉盛においても専用の加工ヘッドが開発され

タービンブレードの肉盛補修に用いられていることが報告されている¹⁵⁾。そのタービンブレードの肉盛補修に関しては、Ni 基単結晶超合金 CMSX-4 に対して 2kW 半導体レーザを用いて Rene142 ワイヤを供給し、単結晶化を実現するための検討が報告されている。単結晶化条件に関して、凝固解析と流動解析を連成させた解析モデルの有効性を示し、1パス10層肉盛に加えて図1に示すように5-4-3パスの3層多パス肉盛においても単結晶領域を得ることができるとしている¹⁶⁾。

パルス YAG を用いた金型精密補修に関しては、各種溶接材料を肉盛することにより表面硬さを色々と変えることができ、肉盛境界部のアンダーカットも 1/1000 mm 台で、ほぼ発生していないことなどが示されている¹⁷⁾。

その他のレーザ肉盛技術としては、溶接インペラの新しい製作方法としてのレーザスロット溶接法の一部としてレーザ肉盛の適用が報告されている。レーザスロット溶接法とは、図2に示すように主板にスロットを加工し、スロット側からブレードと主板を接合し、その後、スロットをレーザ肉盛により埋め戻す方法である。素材として 2.25Cr-1Mo 鋼、13Cr 鋼および析出硬化型ステンレスである 17-4PH の3種類を用いて継手を作成し強度評価をした結果、レーザスロット溶接部の強度は母材と同等、疲労強度も同等で裏波すみ肉応力集中部の全ひずみで評価できることが示されている¹⁸⁾。

4.3.4 摩擦肉盛

摩擦肉盛とは回転する肉盛材を基材に接触させ十分過熱した時点で基材を移動させることにより、界面に発生する摩擦熱を利用して肉盛金属を固相状態で基材に溶着させ肉盛層を得る方法である。固相接合であることから素材に与える熱影響が少なく、希釈も少ない等の利点がある。最近の報告としては、SUS304 に共材を肉盛する際の温度分布測定結果が報告されており、Advancing sideの方が常に Retreating side より温度が高いこと、ツール全体の温度はツールの押し込み速度が上がると高くなることなどが示されている¹⁹⁾。また、アルミ合金 A6061 あるいは A5052 の表面耐摩耗性を向上させることを目的に、アルミナ粒子分散型アルミ合金基複合材料を摩擦肉盛する検討が報告されており、肉盛金属丸棒内に穴を開けその中にアルミナ粒子を充填した状態で摩擦肉盛することで、複合化が可能となっている。また丸棒内の穴数や穴径等を変えて肉盛層の特性を比較しており、穴数や穴径が増えアルミナ充填率が高くなるほど、肉盛層は硬くなり耐磨耗特性が向上することが示されている²⁰⁻²²⁾。

図1 3層多パスレーザ肉盛部の断面組織および結晶方位¹⁶⁾
(母材：CMSX-4、溶加材：Rene142)

図2 レーザスロット溶接¹⁸⁾

文 献

- 1) Matsui ら, 溶接学会論文集, 27-2 (2009), 149s.
- 2) Rappl, Welding J., 88-1 (2009-1), 54.
- 3) Egerland, 溶接学会論文集, 27-2 (2009), 50s.
- 4) 向井ら, Hitz 技報, 69-2 (2009), 26.
- 5) 宇田川ら, 溶接構造シンポジウム講演論文集, (2009-11), 413.
- 6) Nishikawa ら, 溶接学会論文集, 27-2 (2009), 245s.
- 7) 李ら, 機械学会論文集 (A), 75-752 (2009-4), 462.
- 8) 茅野ら, 圧力技術, 46-4 (2008), 228.
- 9) 黒川ら, 溶接技術, 57-2 (2009), 93.
- 10) 伊藤ら, 型技術, 24-8 (2009), 38.
- 11) 篠崎ら, 第70回レーザ加工学会論文集, (2008-5), 201.
- 12) 篠崎ら, 第70回レーザ加工学会論文集, (2008-5), 203.
- 13) 金安ら, 第71回レーザ加工学会論文集, (2008-12), 103.
- 14) 阿部ら, 講演概要, 85 (2009-9), 122.
- 15) 池田, ツールエンジニア, (2008-7), 30.
- 16) 藤田ら, 溶接学会論文集, 26-1 (2008), 97.
- 17) 青嶋ら, 型技術, 23-8 (2008), 146.
- 18) 岩佐ら, 機械学会講演論文-6, (2008-8), 445.
- 19) Fahridin ら, 講演概要, 85 (2009-9), 198.
- 20) 仲間ら, 軽金属, 58-7 (2008), 299.
- 21) 仲間ら, 軽金属, 59-3 (2009), 114.
- 22) 仲間ら, 講演概要, 85 (2009-9), 196.