厚板レーザー溶接技術の新展開

石出 孝, 坪田 秀峰, 名山 理介, 下楠 善昭*, 福本 清治*

三菱重工業(株) 高砂研究所 (〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜2-1-1)

*三菱重工業(株) 神戸造船所 (〒652-8585 兵庫県神戸市兵庫区和田崎町1-1-1)

Recent Evolution of High Power Laser Welding in Heavy Components

Takashi ISHIDE, Shuho TSUBOTA, Michisuke NAYAMA,

Yoshiaki SHIMOKUSU,* and Kiyoharu FUKUMOTO*

Takasago R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 2-1-1 Shinhamma, Arai-cho, Takasago, Hyogo 676-8686

* Kobe Shipyard & Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 1-1-1 Wadasaki-cho, Hyogo-ku, Kobe, Hyogo 652-8585

(Received June 15, 2000)

This paper reviews techniques to apply the laser welding to heavy components. Especially high power CO₂ laser applications in this area which include ship building and bridge building industry and high power YAG laser welding in the nuclear power plants are dealt with. In addition, future lasers for processing in heavy components are discussed.

Key Words: Heavy components, Laser welding, High power YAG laser, Multi-pass laser welding

1. はじめに

厚板分野でのレーザー溶接ではこれまで発振器出力の高いCO₂レーザーによる検討が精力的に成されてきたものの、その実用化は発振器自体のイニシャルコストの高さ、ポロシティに起因する溶接品質面での不安、ビーム品質の安定性、長距離のビーム伝送性等の難しさから特定分野に限られてきた。これに対し、最近、YAGレーザーの開発及びその高出力化は著しく、1パスで10mm以上の板厚の製品の溶接が可能となりつつある。現状の高出力YAGレーザーは、CO₂レーザー程ビーム品質が良くないことから、高速領域での溶込み能力は劣るもののファイバ伝送が可能などから複雑大型形状部材の溶接に適し、CO₂レーザーに比べ、ビーム伝送後のビーム強度分布が安定している。また、ピーク出力が定格出力の2~3倍得られることから、CO₂レーザーの同一定格出力の発振器と比べ、溶込み能力が高く、厚板溶接に有利である。プロセス面でも深溶込みが得られる低速域でCO₂レーザーのようにレーザー誘起プラズマによるビーム吸収の影響¹⁾を受けないことから施工でのプラズマ制御溶接が不要で溶接品質が安定する。

以上のように、厚板分野での溶接を考えた場合、YAGレーザーはCO₂レーザーに比べ様々な優位性を持つことから、今後その実用化は益々増加してゆくと考えられる。本報では最近の厚板分野での高出力レーザー溶接の適用状況を述べるとともに、10kW級YAGレーザーの溶接特性とその実用化について示す。さらに、今後の厚板溶接の展開

を考える。

2. 高出力レーザー溶接の適用状況

厚板製品の溶接が要求される産業分野として、鉄鋼、造船、橋梁、原子力、原動機分野等があげられる。この各分野での適用状況について述べる。鉄鋼分野での高出力レーザーの適用は最も早くから行われてきており、1980年代に熱延・冷延鋼板の連続コイル板継ぎ溶接ラインへの実用が開始されたものの²⁾、レーザー出力はその当時の出力の制限、安定性より10kWクラスに止まっていた。しかし、1995年に25kWのCO₂レーザーが溶接鋼管ラインに導入され、板厚16mmまで高速溶接が高周波加熱とアプセットによる複合プロセスとして実用化されている³⁾。さらに、最近では、熱延工程中の板継ぎ溶接に2台の45kW級CO₂レーザーが使われている例も報告されている⁴⁾。造船分野での実用は欧州での客船、フェリー等におけるサンドイッチパネルの溶接があげられる。ドイツのMeyer Werftでは同強度で重量軽減が図れ、定形鋼板のモジュール化した部材の溶接になることを利用したコスト低減効果を狙い、Fig.1に示すようなサンドイッチパネル構造を12kWと14kWのCO₂レーザーを用い溶接構造化し、客船の船倉隔壁やデッキに採用している⁵⁾。また、デンマークOdense Steel Shipyardでもコンテナ船のサブ材スティフナー部の隅肉溶接を12kWのCO₂レーザーにより行っている。

橋梁分野ではFig.2に示すように道路橋床版の45kW CO₂

Fig.1 Laser welded sandwich panels.

Fig.2 Laser lap welding of bottom plate for highway bridge.

レーザーによる溶接が検討されており、継手強度、疲労強度等の評価が実物モデルにて行われている⁶⁾。

以上の実用化、あるいは検討例はいずれも高出力が得られるCO₂レーザーの溶接速度が1m/min以上の比較的高速領域での検討が主となっている。これに対し、10kWクラスのYAGレーザーによる厚板溶接への適用検討結果を以下に示す。

3. 高出力YAGレーザーの溶込み特性

Fig.3に10kW級YAGレーザーによる連続発振(以後CW)

Fig.3 High power YAG laser penetration characteristic.

とパルス発振(モデュレーションによるパルス化、以後PW)の溶込み特性を示す。この溶接では、SI型のコア径0.8mmの光ファイバを利用するとともに、光学系はBf(バックフォーカス) = 200mm, レンズ口径60mmの集光系を用いた。Fig.4に示す10kW以上のCO₂レーザーでの溶込み特性では溶接速度が低下するにつれ、レーザー誘起プラズマのビーム吸収による溶込み深さの減少が著しく⁷⁾、プラズマ制御による溶接が必要となる。これに対し、YAGレーザーでは低速になるにつれ溶込み深さは増大し、レーザー誘起プラズマの影響は生じていない。このため溶接出力7.6kW, 溶接速度0.2m/minの低速でPWにて21mmの溶込み深さが得られるとともにCWでも15mmの溶込み深さが得られている。一方、高速域ではCWがPWに比べ深い溶込みが得られている。これはCWでは定常的にキーホールが形成されているのに対し、PWでは1パルス毎にキーホールを再形成するため高速になるにつれ、十分深いキーホールが形成されにくくなっているものと考えられる。

このようにYAGレーザーはCO₂レーザーに比べ、レーザー誘起プラズマの影響を受けないものの、波長が短い分溶接部に発生するヒュームによるビームの散乱の影響を受けやすい⁸⁾。Fig.5は各波長のレーザービームをプローブレーザーとして溶接部直上に照射した際の透過率を示したもので、CO₂レーザーでは殆どビーム損失がなく、YAG, He-Neレーザーと短波長側のビームになるにつれ、ビーム透過損失が大きくなっていくことが分かる。

Fig.6にレンズ系バックフォーカス(Bf)の溶込みへの影響を示す。ここでの比較はレンズ口径を一定としてBfを変化させた際の溶込みを比較している。従って、Bfが長くなると、焦点深度、集光スポット径ともに大きくなっている。この結果より、高速溶接では集光スポット径の小さいBf =

Fig.4 High power CO₂ laser penetration characteristic.

Fig.5 Effect of welding fume on beam transmission.

Fig.6 Effect of focal length on penetration depth.

123mmの溶込みが深くなるものの、低速域では $B_f = 200\text{mm}$ での溶込みが最も深くなる。一方、 $B_f = 300\text{mm}$ は、作業性は良いが、溶込み深さは全般的に浅くなる。以上より、高出力YAGレーザー溶接での深溶込み化には、 $B_f = 200\text{mm}$ が有効と判断される。以後、この出力域での深溶込み化に適した $B_f = 200\text{mm}$ を溶接試験に用いている。

4. パルス条件検討による深溶込み化

4.1 パルス周波数の影響

Fig.7に平均出力4.5kW、パルスデューティ50%（パルスオンタイムとオフタイムが同じ）、溶接速度0.4m/minでパルス周波数を40Hzから200Hzまで変化させた際の溶込み形状を示す。これよりパルス周波数の低下とともに溶込み深さが増大し、ビード幅が低減する結果が得られた。これはパルス周波数の低下とともにパルスオンタイムが長くなり、1パルスでの溶込み深さが増大するためと考えられる。パルス周波数40Hz以下の条件は発振器からの制約より実現することが難しいことから、以後40Hz以上での検討をおこ

Fig.7 Relationship between pulse frequency and penetration shape.

Fig.8 Relationship between pulse duty and penetration depth.

なっている。

4.2 パルスデューティの影響

Fig.8に平均出力2.5, 3.5, 4.5kWにおけるパルスデューティの溶込み深さへの影響を示す。いずれの出力においてもデューティが小さくなる（ピーク出力が増大する）につれて溶込み深さが増大する。一方、デューティが50%以下となるとそれぞれ飽和傾向を示し、さらにデューティが低下すると溶込み深さは減少している。この原因を考えるため、高速度ビデオにより溶接時のレーザープルームの発生状況を各々のデューティで観察した。その結果をFig.9に示す。同図にはレーザーの発振波形とその各々の時間でのプルーム挙動を示している。その結果、1パルス間で3種類のプルームの挙動が観察された。その各々を時間経過の順にRegion I, II, IIIとすると

Region I：パルス発振波形の先頭部であり、レーザープルーム発生が著しい時間領域

Region II：レーザープルームの発生が殆ど見られない時間領域

Region III：プルームが再度発生し、発生量の変動が激しい時間領域

が存在することが分かる。これよりRegion Iでは溶込みが急激に増大し、大きなレーザープルームが発生し、Region IIではRegion I程ではないものの溶込みは増大していると考えられる。Region IIIではキーホールが不安定になり、キーホール上方に流れ込む溶融金属にビームが照射され、再度大きなプルームが発生すると考えられる⁹⁾。以上よりパルスデューティが40%より低下すると溶込み深さが減少しているのは、パルスオンタイムが短くなり溶込み深さが飽和していないためと考えられる。一方、パルスデューティを大きくするとピーク出力も低下し、Region IIIの領域が多くなり、平均出力が同じでもレーザービームのエネルギーが溶込み深さ増大に十分寄与していないものと考えられる。以上の結果より、各溶接速度、溶接出力に対し、深溶込みが有効に得られるパルスデューティが存在することが分かる。

Fig.9 Plume conditions in each pulse condition (4.5 kW, 40 Hz, 0.4 m/min).

5. ステンレス鋼容器へのYAGレーザー溶接の適用

圧力容器を適用対象とし、板厚14mmまでのSUS304L材での適正溶接条件範囲について裏波ビード形状、ビード表面形状に着目し、焦点ぼかし量(L_f)と溶接速度に関し、貫通溶接が可能な適正施工範囲を調べた結果をFig.10に示す。この施工条件については発電用機器の溶接施工法確認試験に準じ、PT, RT, 硬さ、断面マクロ・ミクロ、引張・曲げ試験、腐食試験を実施し、いずれにおいても良好な試験結果を確認している。

Fig.11には再処理プラント向けステンレス鋼容器($\phi 1.4\text{m} \times \text{H}1.8\text{m} \times 6\text{mm}$)への実用化状況を示す。このステンレス鋼容器は平板をロール曲げた後、治工具にて固定し、長手溶接が行われ、溶接終了後、浸透探傷試験、放射線透過試験を行い、良好な結果を得ている。

6. 今後の厚板溶接の展開

溶接に用いるツールとしてのYAGレーザー発振器の開発の進展には著しいものがあり、NEDOの光子計測・加工技術プロジェクトでは平成13年を目指し、10kW級LD励起YAGレーザーの開発が進められており、現在すでに

Fig.11 Welding condition in stainless steel tank.

Fig.10 Proper full-penetration welding conditions.

3kW級のLD励起YAGレーザーが販売されている。さらにLDによる直接加工についても、溶接を対象とした試験が試みられ¹⁰⁾、ランプ励起のYAGレーザーの効率3%に対し、LD励起YAGレーザーが15%、LDは50%近い効率が期待され、現状6kWクラスのものまで開発されている。米国のPrecision Laser Machiningプロジェクトやドイツでのビーム品質の向上を狙った加工用LD開発のプロジェクトのスタートにより、さらにLD自体の価格の低下が進み、将来LDによる直接溶接機が出現するのも間近となりつつある。

また、プロセス面では厚板を対象とした超狭開先の溶接が検討されていくものと考えられる。これはFig.12にYAGレーザーによるマルチパス溶接例を示すが、今後、さらに開先幅を小さくした高効率な厚板溶接プロセスが開発さ

Fig.12 Multi-pass welding by YAG laser (48 mmt).

れていくものと考えられる。いずれにしても、発振器メーカーとユーザの両者の開発がお互いの利益を引き出す方向に進むことがこの方面での技術進展の牽引となることに

間違いないと考えられる。

参考文献

- 1) M. Nayama, T. Ishide, M. Mega, S. Aoki, and T. Koguchi: *Proc. of CISFFEL6* (1998) 137.
- 2) H. Sasaki: *Transaction of the iron and steel institute of Japan*, **2b** (1986) No.5, 491.
- 3) M. Ono, T. Shiozaki, M. Ohmura, H. Nagahama, and K. Kohno: *Proc. of ECLAT '96* (1996) 115.
- 4) K. Minamida: *Proc. of SPIE High-Power Laser in Manufacturing* **3888** (1999) 533.
- 5) F. Roland: FOCAL. SPO. WPO, March (1995).
- 6) 北側 彰一, 福田 直見, 武田 慎之助, 大澤 守彦, 芦田 英史, 石原 照久, 金吉 正勝, 福本 和弘: *日立造船技報* **60** (1999) No.3, 56.
- 7) T. Ishide, S. Shono, T. Ohmae, H. Yoshida, and A. Shimmi: *Proc. of LAMP '87* (1987) 187.
- 8) 小島 庸光, 池田 卓郎, 宮本 勇, 坪田 秀峰, 石出 孝, 長島 是: *溶接学会全国大会講演概要* No.66 (Spring, 2000) 56.
- 9) T. Kojima, E. Ohmura, I. Miyamoto, T. Nagashima, and T. Ishide: *Proc. of ICALEO '98* (1998) 187.
- 10) F. Bachmann: *SPIE-Proceedings* **3888** (1999) 67.