重工業分野におけるレーザー加工技術の最前線

Leading Edge of Application and Innovation with Laser Processing in Heavy Industry

大 脇 桂*

Katsura OOWAKI

Key Words: Laser Processing, Laser Welding, Underwater Welding, Laser Cladding, Hybrid Welding, Remote Laser Welding

1. 緒 言

レーザー光を熱源とした溶接・切断・表面改質等の熱加工に用いるレーザー加工は、低入熱・高精度・高速加工が可能であることから、幅広い産業分野での適用が期待されている。実際に、電機・電子産業における微細加工分野や自動車の薄板加工分野ではすでに多くの実用化例を見ることができる。ただし、対象物の板厚が厚くなり、サイズが大きくなると、レーザー発振器の出力と発振効率、対象物の精度管理とハンドリング、加工そのものの安定性等において解決すべき課題が存在する。このため、重工業分野における普及はそれほど多いとはいえない。

しかしその一方で、近年、レーザー発振器の光束品質・出力・信頼性が急速に進歩してきたこと、発振、励起方式の異なるいくつかのレーザー発振器が高出力レベルでの実用化を迎えていること、またモニタリングや光束制御技術等の周辺技術が進歩してきたことなどから、この技術分野は新たな段階を迎えつつあることも事実である。

ここでは、レーザー加工分野の技術動向や最新技術とその適用事例について紹介する。

2. レーザ加工技術の現状

レーザー加工は通常のアーク熱源を用いた加工と比較して、イニシャルコスト（設備投資額）が高いため、レーザーでなければ不可能あるいは、信頼性が確保できないという部材を対象に適用されてきた。以下にこれまでのレーザー加工事例について述べる。

2.1 狭隘部・特殊環境への適用

狭隘部や水中・人の近づけない放射線環境下における溶接では、遠隔・自動溶接が不可欠な技術であり、光ファイバー伝送が可能な YAG レーザ溶接法は、アーク溶接で問題となる電圧降下や高電圧伝送を考慮する必要がなく、非常に有効な手段である。

原子力分野では、高品質の水中溶接技術の要求が高まっており、ファイバー伝送可能な大出力固体レーザーが従来の溶接法に変わる新たな溶接法として注目されている。筆者らは、タンク内面の肉盛補修溶接や原子炉内構造物の表面改質へ水中 YAG レーザ溶接法を適用した。

Fig.1 に水中 YAG レーザ溶接法の原理を示す。溶接ヘッド内には、レーザー光束とシールドガスが同軸で供給されており、被溶接部はこのシールドガスによって部分的に気中雰囲気になっている。遮水の構造は極めてシンプルであるが、この方法で十分なシールド法を確保できる。水中におけるビードの形成はシールドガス流量、溶接速度、ノズル高さおよびノズル孔径などによって影響される。これらを適切に選択することで安定した溶接が可能となる。

Fig.2 は、水中レーザー溶接を行うための溶接ロボットの外観模式図である。本溶接ロボットを用いた母材部及びすみ肉継手への補修溶接施工法は、特殊方法溶接として、経済産業省より認可されており、実機工事に即時投入が可能である。

2.2 素材機能化

素材に新たな機能を付加する表面改質においても、レー

Fig.1 Underwater laser welding.

*株式会社 IHI 検査計測（〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1）

IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. (1 Shin-nakahara-cho, Isoko-ku, Yokohama 235-8501 JAPAN)

Fig.2 Remote tool for underwater laser welding.

Fig.4 Bead appearance of laser cladding.

Fig.3 Laser cladding system for ICM guide tube.

Fig.5 Flange surface of heat exchanger with carbon steel.

ザ加工技術は素材への熱影響が小さいという点で非常に有効な手段である。ここでは、高い信頼性と安全性を要求される原子力プラントでの実用化例について述べる¹⁾。

2.2.1 原子炉 ICM 配管へのレーザクラッディングの適用

原子力プラントでは年一回の定期検査が義務づけられており、ここで補修あるいは予防保全対策が必要とされたものについては、現地にて信頼性の高い技術を用いて効率的に作業を進めることが要求される。

過去に BWR（沸騰水型原子炉）において、予防保全の観点から、既設ステンレス小口径配管（インコアモニタハウジング）の溶接部内面における応力腐食割れ性を改善したいというニーズがあった。この狭隘部に対する工法として、YAG レーザを用いて高耐食性合金を配管内面にクラッディングする技術を開発、実用化した。Fig.3 に本工法の概要、Fig.4 にクラッディング部の外観を示す。屋外から光ファイバーにて伝送されたレーザ光により、既設配管内面に予め塗布された高耐食性合金粉末層を熔融し、高耐食性合金層を形成させる。予防保全対策としての本技術は、既設プラントの寿命延長を可能とした。

2.2.2 熱交換器フランジシール面へのレーザクラッディングの適用

炭素鋼熱交換器フランジシール面では、ガスケット面に

孔食が発生しやすく、この部分に対する恒久対策としてステンレス鋼のレーザクラッディングを実施した。対象部材は Fig.5 に示すような外径約 1800 mm のフランジで、肉盛幅 60 mm の大面積をクラッディングする必要がある。シール面であることから変形を極力抑える必要がある。そこで、レーザクラッディングを採用することとした。本工法では母材による希釈を極力抑え、かつ初層の炭素鋼成分による硬化を 2 層目のクラッディングにより再熱することで、施工後の熱処理を省略することも可能とした。

2.3 高精度・低入熱溶接

自動車、電機産業、重工業分野などで金属材料の溶接や切断加工において、高出力のファイバーレーザやディスクレーザの適用が拡大している。これまで大出力レーザの代表例である LD 励起 YAG レーザや CO₂ レーザが主に用いられてきたが、コストや性能面で劣っているのが現状と言える。現在盛んに使用されつつあるファイバーレーザは、これまで高出力が困難であると考えられてきたが、現在では 20 kW の出力を持った発振器がラインナップされている。産業界では、自動車分野や橋梁、造船などの構造部材に適用されつつある。各メーカーから販売されている発振器

17kW fiber laser

4kW disk laser

10kW diode laser

Fig.6 Several types of high power laser sources.

を Fig.6 に示す。対象としては、構造部材への適用を目標として、ファイバーレーザを用いたレーザ溶接やアーク溶接を併用したハイブリッド溶接の研究開発を進めている。

3. レーザ・アークハイブリッド溶接現象とその適用

レーザ・アークハイブリッド溶接（以下、ハイブリッド溶接）は、Fig.7 に示すように、レーザとアークの熱源で一つの熔融池を形成させ、レーザ溶接とアーク溶接の両方を組み合わせた溶接方法である。レーザとアークの特徴

を活かし、さらに、ハイブリッド化により生じるさまざまな特徴を生かした新しい溶接方法としての研究・開発が行われ、現在では実用化を含めて各方面で利用されている。

ここでは、ハイブリッド溶接の装置構成や特徴及び溶接現象を観察した一例について述べるとともに、現在実用化またはそれに向けて適用が検討されている例について紹介する。

Fig.7 Hybrid welding process principles.

(a) GMA welding

(b) Hybrid welding

Fig.8 Bead appearances of laser arc hybrid welds.

3.1 レーザ・アークハイブリッド溶接装置の構成

レーザ・アークハイブリッド溶接装置は、レーザ溶接に使用するレーザ発振器と、市販されているアーク溶接用の電源を組合せ、レーザヘッドにアーク溶接用のトーチを装着させて行うことが、一般的である。

ハイブリッド溶接に使用するレーザ発振器は、通常のレーザ溶接と同様の発振器から選択される。この中でも、光ファイバーでレーザを伝送できるファイバーレーザやディスクレーザなどが操作性の面から有利であり、採用されることが多い。特にファイバーレーザは従来のレーザと比較して発振器の大きさが小さく、また、高効率であること、高ビーム品質が得られることから、従来のレーザ以上に高速溶接や、深溶込み溶接が可能となった。この性能が期待され、各分野で研究開発が活発に展開され、一部では実用化が始まっている。ハイブリッド溶接でも、このファイバーレーザへの期待は高く、多くの研究開発が実施されている²⁾。

Fig.8 及び Fig.9 にハイブリッド溶接におけるビード外観と断面マクロ観察結果の一例を示す。

3.2 レーザ・アークハイブリッド溶接の最近の適用

薄板に対しては、寸法精度の向上とともに高速溶接が行える点と継手特性の面で溶込み深さや溶着量を増やすことが出来る点などから、これら施工性が需要である個所に適

Fig.9 Cross sections of laser and hybrid weld beads.

用が進められている。その一つとして、自動車分野では、ドア部分へのレーザ・アークハイブリッド溶接の適用が行われており³⁾、そのほかテーラードブランク材やアルミ材への検討も行われている⁴⁾。

厚板に関しては、変形が少なく後工程の仕上げ調整や組立工数の削減がメリットとなる。ヨーロッパでは、造船用部材の隅肉溶接や、突合せ溶接にハイブリッド溶接が実用化されている。また、ギャップ裕度拡大と継手特性の改善を目的に、パイプの全姿勢溶接などへの適用も検討されている⁵⁾。

3.3 自動化への動向

ハイブリッド溶接は、アーク溶接条件やレーザ溶接条件などのパラメータが多く、また、レーザ溶接を用いる特性上、自動化が不可欠である。基本的には、複雑な溶接線や比較的小型な部材には、多関節ロボットが多く用いられ、直線の溶接には、精度に優れたカンチレバータイプやガントリタイプの装置が多く用いられる。また、大型構造物を溶接する場合、大型の装置が必要となるが、コスト面からの制約も大きくなる。このような観点から、走行台車を用いたハイブリッド溶接装置の開発がヨーロッパで行われており、著者らも、溶接装置を開発し、良好な溶接継手を得ている。Fig.10 にカンチレバータイプのハイブリッド溶接装置を Fig.11 に走行台車方式の溶接装置を示す。また、このような大型部材を溶接する場合には、狙い位置精度や溶接変形などの観点から、開先做い機構を用いた溶接装置の開発が必要となる。

4. リモート溶接とその適用

高品質なレーザビームが得られる発振器を使用することにより、近年、リモートレーザ溶接が盛んに研究されている。リモート溶接とは、従来レーザマーキング装置で使用されていたガルバノスキャナーに高出力で高品質なレーザビームと長焦点のレンズを組み合わせて、レーザビームをある溶接箇所から別の溶接箇所に瞬時に移動させることができる装置である。これによって、これまで時間を費や

Fig.10 Cantilever welding machine.

Fig.11 Automated guided vehicle system.

Fig.12 Scanner head for remote laser welding.

していた溶接箇所の移動時間を飛躍的に短縮することができ、また、広範囲な領域を溶接することができるため、加工ヘッドを移動させることなく、多くの点数を短時間で溶接することが可能となる。溶接部の信頼性向上や生産ラインの設備のスペースを大幅に簡略化することにより、今後、品質向上とコスト低減のための有望なツールとして期待できる。以下では、リモート溶接技術の適用例を紹介するとともに、溶接品質を確保するために必要不可欠なインプロセスモニタリングシステムの開発状況について述べる。

4.1 リモート溶接の原理とシステム

Fig.12 にリモート溶接の原理を示す⁶⁾。レーザ発振器から出されたレーザビームは集光レンズを介して、専用のスキャニングミラーで反射されてワークに照射される。通常焦点距離は 1 m 程度の長焦点レンズを使用する。スキャニングミラーは一枚で直交 2 軸を駆動することができ、Z 軸

Fig.13 Application for automotive bodies.

Fig.14 Photographic device used for the long stand-off of the focusing head.

方向にも集光点を連続的に移動させることができる。また、従来のロボットなどの搬送装置を使用した加工と比較して、高速移動及び正確な位置決めが可能である。これにより、溶接個所の移動時間は数十 ms オーダーであるため、移動時間を最小にすることができ、単位時間あたりの溶接ポイントを増加させるなど高生産性を実現させることができる。

4.2 リモート溶接の適用例

リモート溶接は主に自動車車体や自動車パーツの製造に向けた研究開発が行われている^{7),8)}。Fig.13 に示すように自動車車体は薄板構造体の典型であり、数百種類の鋼板プレス部品を溶接にて一体化させた、スチールコック構造が一般的である。溶接法としては、従来、抵抗スポット溶接が90%を占めており、車1台当たりの打点数は4,000～5,000点に及ぶ。このため、数十台のロボットを同時に使用し、溶接時間の短縮化を図っているが、多数の溶接ロボットを設置するためにそのための設備や工場面積が必要となる。リモート溶接技術を用いることにより、広い範囲を1台のレーザー溶接機でほぼ同時に溶接することができる。

このように、リモート溶接では、溶接部から溶接部への移動時間が他の溶接法と比較して極めて短く従来のロボッ

Fig.15 Images by the long stand-off of the focusing head.

トを使用した溶接と比較して精度の良い位置決めが可能であるため、多数の溶接箇所がある部材や複雑形状を有する部位へ適用することにより、大幅なコスト削減が期待できる。このような観点から重工業分野では、管と管板などのシール溶接など複雑形状への適用が試みられている。

4.3 リモート溶接のモニタリングシステム

レーザー溶接部の品質保証を行う場合、溶接中に溶接部を観察（インプロセスモニタリング）し、溶接品質の良否判定システムが必要となる。ここでは、新たに長焦点のレーザービームで形成される溶融池をモニタリングする装置開発への足がかりとして、長焦点距離で観察することを確認するための基礎試験を行った。ワークとモニタリング装置の距離を1 m として溶融部の挙動を撮影した。Fig.14 にモニタリングシステムの構成を示す。レーザーは5 kW のファイバーレーザーを使用し、加工ヘッドの焦点距離450 mm の加工ヘッドを使用した。照明用の補助光源として、波長980 nm、最大出力30 W の半導体レーザーを用いている。また、フィルターとして、波長974 nm のバンドパスフィルターを高速度カメラに装着した。撮影速度は5000 F/s とした。

Fig.15 にレーザーパワー3 kW で照射した場合の観察結果例を示す。観察結果から、補助光源を使用することにより、撮影距離約1 m において、溶接中の溶融プールの状況及びスパッタの形成を明瞭に観察することができた。

現在、本システムをリモート溶接加工ヘッドに装着し、高速に移動するレーザービームと同期した溶融池のインプロセスモニタリングシステムを開発中である。リモート溶接では、加工ヘッド内のミラー角度を変えることにより、レーザービームの照射位置を制御している。本システムでは、Fig.16 に示すように、長焦点距離のCMOS カメラを装着し、ダイクロイックミラーを使用することにより高速に移動するレーザービームと同期する。加工点の観察状況を Fig.17 に示す。本インプロセスモニタリングシステムを使って、レーザー溶接中に溶接部を観察することにより、溶接品質の良否を判断することが可能となる。

Fig.16 Schematic set-up of in-process monitoring system.

Fig.17 Monitoring result of high-speed observation image.

5. まとめ

レーザ溶接では、材質や板厚、ユーザの必要とする生産タクトに合わせた最適な熱源を選択する必要がある。その中でも、近年開発が進んでいるファイバーレーザやディスクレーザまたは、高出力半導体レーザなど最適な熱源を使用することにより、生産プロセスとしての革新が図れるものと期待できる。

引用文献

- 1) 大脇ら：“最近のレーザ・アークハイブリッド溶接現象とその適用”、平成 19 年度溶接技術講習会（社）日本溶接協会中国支

部）、(2007) 63-74.

- 2) 大脇ら：“重工業分におけるレーザ加工技術の現状と今後”、溶接学会レーザフォーラム (2004), (2004) 16-20.
- 3) 阿部、林：“レーザ・アーク複合溶接法とその将来”、溶接技術、51-7 (2003) 62-67.
- 4) 河合、岩見、馬場、小川：“レーザ・アークハイブリッド溶接現象の観察”、第 153 回溶接アーク物理研究委員会資料、ア物-04-1218.
- 5) 村山、外館：“パイプのレーザハイブリッド全姿勢溶接”、溶接技術、54-4 (2006) 52-59.
- 6) 水谷：“レーザ加工ヘッドの最新動向及びその適用例”、LMP シンポジウム 2008、(2008) 139-146.
- 7) 空田：“自動車業界におけるリモート溶接について”、第 68 回レーザ加工学会講演論文集、(2007) 147-150.
- 8) 樽井、森ら：“車体へのレーザ溶接適用技術”、第 68 回レーザ加工学会講演論文集、(2007) 157-163.