肉盛溶接としてのレーザ複合加工 技術*

米 田 理 史**, 松 田 純**,
内 海 明 博**, 大 家 利 彦**,
勝 村 宗 英**

米田 理史

松田 純

Arc Augmented Laser Cladding Process*

by Masafumi YOMEDA**, Jun MATSUDA**,
Akihiro UTSUMI**, Toshihiko OOIE**
and Munehidi KATSUMURA**

キーワード：レーザ・アーク複合加工，高速加工，レーザ揺動，
肉盛溶接，低希釈率

内海 明博

大家 利彦

勝村 宗英

1. は じ め に

レーザは材料加工ツールとして見た場合、制御性の良い高エネルギー密度熱源であり、自由なエネルギー密度の選択が可能、非接触加工である、高速加工ができる、高融点材料も容易に溶融させることができる、などの利点を有している。また、限定された領域にのみ熱を与えることができるため加工に伴う材質劣化や歪みが少なく、生産技術上からも極めて有利な加工手段である。

通産省工業技術院においても産業科学技術研究開発制度により、平成9年度から5年計画で高品位フォトンの発生・利用技術およびフォトンを用いた計測技術など、フォトンとしてのレーザの特性に着目した大型プロジェクト「フォトン計測・加工技術」がス

タートしている。このプロジェクトでは、(1) フォトン応用加工技術（マクロ加工技術－高信頼性レーザ溶接－、ミクロ加工技術）、(2) フォトン応用計測技術（*in situ* 状態計測技術、非破壊組成計測技術）、(3) フォトン発生技術（高出力完全固体化レーザ技術、高集光完全固体化レーザ技術）の各分野が、NEDO、フォトンセンター、通産省工業技術院研究所、大学、企業の産学官連携で進められ、われわれのグループも川崎重工業（株）、大阪大学接合科学研究所、（株）レーザ応用工学研究所と共同でマクロ加工分野の技術開発に取り組んでいる。

われわれは、現在CO₂レーザ、YAGレーザなどの赤外レーザからエキシマレーザなどの紫外レーザをツールとしたレーザプロセス技術、特にレーザとレーザやイオン、アークなど熱源の複合化によるレーザハイブリッドプロセス技術の研究開発を進めている。ここでは、レーザハイブリッド化による従来熱源・加工法の高度化・高付加価値化技術として、CO₂レーザとアーク熱源を複合した高速表面処理プロセスを紹介する。

*原稿受付 平成11年4月5日

**正 員 工業技術院四国工業技術研究所 Member, Shikoku
National Industrial Research Institute, AIST,
MITI

2. レーザ複合による TIG アークの安定化

アークは金属材料の溶接・表面改質などの熱加工分野では従来から最もよく使われている熱源であり、表面改質ではクラディング（肉盛溶接）など多くの産業分野で実用化の域にある。しかし、一般にアークはエネルギー密度が低く（ $\sim 10^4 \text{ W/cm}^2$ ）、熱伝導により広い範囲が加熱されることから材料への投入熱量を大きくする必要があり、材料の変形や劣化といった熱影響が問題となっている。要求される改質層が薄い場合には、アークの電流値を低くする、あるいは加工速度を大きくすることで熱影響を抑制できるが、多くの場合アークが極めて不安定になり、材料表面でアークの極点が不連続に移動する結果、正常な加工が不可能となる。図 1 (a) はこのような条件下で不安定となった TIG アークの電圧波形、また、(c) は高速度ビデオ（毎秒 400 コマ、シャッタースピード 1/10000 秒）により観察したアークプラズマの例である。

一方、レーザは極めて高いエネルギー密度（ $\sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ ）を発生でき、溶接や切断など集光させた状態での高速加工に適しているが、比較的大きなビームスポットを用いる金属材料の表面処理ではレーザの反射率が大きく、材料の表面状態、種類にもよるが、 CO_2 レーザでは 90 数%が反射してしまう場合がある。そのため、レーザのみで十分な熱量を得ようとすると、高出力の

レーザ発振器が必要となり、非常に装置コストが高くなってしまう難点がある。

そこでわれわれは、レーザ照射による局所的な材料加熱と、その際に材料表面から放出されプラズマ状態となった高温の蒸気（レーザブルーム）を積極的に利用し、高速加工時のアークを安定化、制御する技術の開発を進めている。レーザ照射部は酸化皮膜が除去されることに加え高温で、アークの陽極点が固定されやすい。さらに、レーザ照射によって発生するプラズマは一般に多量の自由電子を含んだ導電体であることから、アークとの複合化においては導電経路として効果的に作用し、アーク単独では不安定となる高速加工域でもアークを安定した状態に保持できることが予想される。同時に、アーク熱により材料の温度上昇が生じるため、材料表面でのレーザの吸収率が改善され、レーザエネルギーを高効率で利用できる効果も期待できる。

これまでもレーザとアークの複合化による加工プロセスがいくつか試みられており、 CO_2 レーザとアークの複合化では、溶接時のアークの安定化¹⁾、厚板の開先内溶接²⁾が報告されている。また、最近では YAG レーザとアークとの複合化も検討されている^{3,4)}。われわれのグループでも CO_2 レーザと TIG/MIG アークとの複合レーザ溶接を実施し、溶け込み深さの増大や要求される開先精度の緩和に顕著な効果があることを報告してきた⁵⁾。今回は従来と少し視点を変え、より高速処理が可能な表面加工プロセスの開発を目的として、 CO_2 レーザによる TIG アークの安定化と制御、および表面処理プロセスへの適用を検討した。図 2 は高速表面加工プロセスへの適用に対するレーザ・アーク複合化の考え方を概念的に示したものである。

図 3 はこれらの考え方に基づくレーザ・アーク複合表

図 1 TIG アーク単独とレーザ・アーク複合熱源におけるアーク電圧波形とプラズマの挙動
(a) および (c) : TIG アーク単独
(b) および (d) : レーザ・アーク複合熱源
レーザ出力 : 2 kW, アーク電流 : 100 A (DCEN), 基材移動速度 : 150 mm/s

図 2 レーザ・アーク複合化に対する考え方

図3 レーザ・アーク複合表面処理法

表1 実験条件

レーザー出力	2 kW
レーザー焦点はずし量	- 3 mm
アーク電流	100 ~ 200 A (DCEN)
基材-電極間距離	5 ~ 15 mm
基材に対する電極傾き角	60°
Arガスシールド	60 l/min
基材	SUS304
基材移動速度	25 ~ 200 mm/s

面処理法を、また、表1は実験条件を示す。この方法を適用した場合の高速加工時のアークプラズマの挙動は図1(b)および(d)に示す通りであり、単独では不安定な図1(a)の場合のアーク加工条件においてもレーザーとの複合化によりアークが安定化することが確認できた。また、レーザー・アーク複合時の電圧波形(図1(b))からもアークが安定化していることがわかる。

図4は基材-電極間距離 b を変えた場合について、アーク電圧の変動が少なく連続した陽極点の痕跡が得られるアークの安定領域を、基材移動速度およびアーク電流値で図示したものである(図中の○および×印は $b=10$ mmの場合についてアークが安定な加工条件および不安定な加工条件を示す)。アークは基材移動速度が増すほど、またアーク電流が小さいほど不安定になりやすく、さらに、基材-電極間距離 b が増すにしたがって安定領域が非常に狭くなっている。このようなアークに対して、出力2 kWのレーザーを併用すると、アークの安定領域が拡大し、基材-電極間距離 b に関わらず、基材移動速度およびアーク電流値がそれぞれ200 mm/sおよび100 Aの条件でもアークが安定するようになる。このように、レーザー・アーク複合熱源は、アーク単独では安定した加工が不可能な低電流および高速加工領域においても安定性が維持される⁶⁾。

これらのレーザー複合によるアークの安定化機構を明らかにするため、鉄基材に対して、レーザー単独照射で形成

図4 アークの安定化領域とレーザー複合の効果

図5 TIGアーク(a)およびレーザー・アーク複合熱源(b)による表面溶融状況

図6 レーザ・アーク複合熱源による溶融部断面形状

されるプラズマをFe IおよびFe IIについてそれぞれ分光分析した。その結果、今まで述べたレーザー・アーク複合熱源で用いる焦点位置、Arガス流量において、レーザーパワーが約2.5 kW以上ではプラズマが生じ、その中心温度は8000~9000 Kに達するが、約2.5 kW未満ではプラズマが発生していないことがわかった⁷⁾。このことから、本実験範囲におけるアーク安定化の機構として、まず高温のレーザー照射部にアークの陽極点が固定され、その後、レーザーとアークの複合熱によりプラズマが形成され、これがアークの伝達経路として作用するようになると考えられる。

図5はTIGアーク単独およびレーザー・TIGアーク複合熱源によりSUS304ステンレス鋼板を150 mm/sで高速溶融処理した例である。アーク単独でこのような高速加工を行うと、アークが図1(a)および(c)に示した

図7 揺動レーザー・アーク複合熱源

図8 レーザ揺動によるアークプラズマの挙動

ように不安定になり、図5(a)に示すような飛び石状の溶融状態になる。これに対し、レーザー・アーク複合熱源では、図5(b)に示すように安定した溶融状態が得られている。また、レーザー・アーク複合熱源による溶融部の溶融線方向に平行な断面形状(図6)では、表面層のみの均一な溶け込みが観察される。

3. レーザによるTIGアークの揺動制御とクラディングへの応用

前節において、レーザー・アーク複合熱源ではレーザーとの複合化によりアークが高速加工域で安定化する現象について説明した。次に、この現象を利用し、ビームスキャナーにより加工方向に対して直角にレーザービームを揺動しながらアークの揺動制御を試みた結果について述べる。

図7は装置の概念図を示す。なお、レーザービームの揺動と集光には正弦波で揺動する平面鏡と固定放物面鏡からなるビームスキャナーを用いた。その際、レーザー揺動幅8mm、基材移動速度30mm/sで一定とし、揺動周波数を5~25Hzと変化させた。これ以外は表1と同じ実験条件を用いた。図8は揺動周波数が5Hzの場合について、レーザーブルームが揺動幅の両端および中央に位置する時に加工進行方向正面から撮影した高速度ビデオ画像を示す。レーザーブルームの移動に追従してアーク柱が先端部分で屈曲して振れており、レーザー揺動によりTIGアークが揺動制御されていることがわかる。なお、このような現象はレーザーの揺動周波数が25Hzの場合にも認められた⁸⁾。

図9 クラディング層の断面写真

表2 クラディング条件

レーザー出力	: 3 kW
レーザー焦点はずし量	: -3 mm
レーザー揺動周波数	: 25 Hz
レーザー揺動幅	: 10 mm
アーク電流	: 200 A (DC EN)
基材 - 電極間距離	: 15 mm
基材に対する電極傾き角	: 60°
Arガスシールド	: 60 l/min
基材	: SS400
基材移動速度	: 15 mm/s
基材に対するワイヤ供給角	: 40°
ワイヤ供給速度	: 47 mm/s

現在、われわれはこのレーザーによるアークの揺動制御技術の応用として、SS400軟鋼板上へホワイトメタル(WJ2)のクラディングを試みている⁹⁾。ここでホワイトメタルは3.2mmφのワイヤを用い、TIGトーチの反対側から供給した。

図9は表2に示す実験条件で得られたクラディング層の断面写真である。レーザービームが短時間ながら停止する両端部では若干基材が掘れ込んでいる様子が観察されるが、中央部のレーザービームの連続的な揺動域では基材による希釈はほとんど認められない(この場合の希釈率は0.5%未満であった)。この部分をEPMAでFeとSnについて線分析した結果は図10のとおりであり、界面でFeとSnのシャープな遷移が認められ、組織観察結果とあわせて基材界面での有害な金属間化合物層の形成も非常に少ないと考えられる。

このように、TIGアークにCO₂レーザーを複合化することでアークの安定化だけでなく、揺動などアークの能動的な位置制御ができることが確かめられた。この手法は材料の熱変形や変質、希釈を抑える高速クラディングプロセスに対しても有効であると考えられる。

4. おわりに

ここでは、レーザー複合による高速アーク加工の安定化

図10 基材/クラディング層界面の組成分析結果

現象およびこれをアーク制御に利用したレーザ・アーク複合プロセスを紹介した。一般に、レーザ加工では、発生するプラズマはレーザビームと相互作用し、レーザビームを吸収・屈折させるため安定な加工の阻害要因とされているが、われわれはこのプラズマを積極的に利用し、アーク現象の安定化・制御のみならず、フォトンの伝達効率（材料表面でのレーザの吸収率）の飛躍的向上、

ひいてはプロセス面からのフォトンコストの大幅な低減化に結びつける技術の開発を進めている。それには、材料表面ごく近傍での高密度プラズマ層の形成と制御が必要不可欠な要因となる。今後、レーザの実用領域拡大に向けプラズマ制御の重要性はますます高まっていくであろう。

参考文献

- 1) W. M. Steen and M. Eboo: Arc Augmented Laser Welding, Metal Construction, 11-7 (1979), 332.
- 2) 阿部, 梶田, 林, 土谷: レーザ・アーク複合高速溶接における溶接現象の観察, 第44回レーザ熱加工研究会論文集, (1998. 7), 15.
- 3) T. Ishide, Y. Nagura, O. Matsumoto, T. Nagashima, T. Kidera, A. Yokoyama: High Power YAG Laser Welded Sleeving Technology for Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plants, Proc. of LAMP'92, (1992), 957.
- 4) E. Beyer, U. Diltthey, R. Imhoff, C. Maier, J. Neuenhahn, K. Behler: New Aspects in Laser Welding with an Increased Efficiency, Proc. of ICALEO'94, 79 (1994), 183.
- 5) J. Matsuda, A. Utsumi, M. Katsumura, M. Hamasaki and S. Nagata: TIG or MIG Arc Augmented Laser Welding of Thick Mild Steel Plate, Joining and Materials, 1-1 (1988), 31.
- 6) 松田, 内海, 米田, 勝村, 矢納, 荒木: CO₂レーザによるTIGアークの安定化—レーザ・アーク併用高速表面処理法の研究(第1報)—, 本会論文集, 15-3 (1997), 445.
- 7) 大家, 内海, 松田, 米田, 勝村, 藤井: 未発表
- 8) 内海, 松田, 米田, 勝村, 荒木, 田中: CO₂レーザによるアークの揺動—レーザ・アーク併用高速表面処理法の研究—, 本会全国大会講演概要, 60 (1997), 38.
- 9) 内海, 松田, 米田, 勝村, 多曾田: レーザ・アーク複合熱源による軸受け合金の肉盛溶接—レーザ・アーク併用高速表面処理法の研究—, 本会全国大会講演概要, 63 (1998), 268.

国際会議のご案内

会議名: International Brazing & Soldering Conference

開催期間・会場: 2-5 April 2000・Hyatt Regency Hotel・Albuquerque, New Mexico

連絡先: AWS-C3 Committee

Dr. Ronald W. Smith

President

Materials Resources International

403 Elm Avenue

North Wales, PA 19454

Phone: 215.616.0400

Fax: 215.616.0496

E-Mail: solution@mri-bluebell.com